



การแตกตัวเชิงตัวเร่งของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมของ  
ถ่านกัมมันต์และเหล็ก-โดโลไมต์  
CATALYTIC CRACKING OF PACKAGING WASTE PLASTIC USING  
ACTIVATED CARBON AND IRON-DOLOMITE

อรเทพิน อัจหาญวงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2566

การแตกตัวเชิงตัวเร่งของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิริยาผสมของ  
ถ่านกัมมันต์และเหล็ก-ไดโลไมต์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร  
คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ  
ปีการศึกษา 2566  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

CATALYTIC CRACKING OF PACKAGING WASTE PLASTIC USING  
ACTIVATED CARBON AND IRON-DOLOMITE



ORATEPIN ARJHARNWONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of MASTER OF SCIENCE  
(Environmental Technology & Resources Management)  
Faculty of Environmental Culture and Ecotourism, Srinakharinwirot University

2023

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การแตกตัวเชิงตัวแรงของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมของ  
ถ่านกัมมันต์และเหล็ก-ไดโลไมต์

ของ

อรเทพิน ออาจหาญวงศ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากร  
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิชากร จารุศิริ)

..... ประธาน  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรินทน์ งามนิยม)

ชื่อเรื่อง	การแตกตัวเชิงตัวเร่งของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมของ ถ่านกัมมันต์และเหล็ก-โดโลไมต์
ผู้วิจัย	อรเทพิน อัจฉาญวงศ์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2566
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ

การใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั่วโลกทำให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับการจัดการขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์เหล่านั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์มาเป็นสารตั้งต้นในการแตกสลายเชิงความร้อนด้วยกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะขนาด 3 ลิตร ศึกษาภาวะดำเนินการที่ให้ของเหลวและองค์ประกอบตามคาบจุดเดือนในช่วงของเคโรซีนมากที่สุด ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบส่วนประสมกลาง และพื้นที่ผิวตอบสนอง เพื่อหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสม และศึกษาอิทธิพลการเสริมกันและหักล้างกันของชนิดพอลิเอทิลีน และพอลิพรอพิลีน รวมถึงอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ และ 5% Fe-dolomite วิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ตาม ASTM-D2887 วิเคราะห์องค์ประกอบและหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี และเครื่องฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรด ผลการทดลองพบว่าภาวะดำเนินการที่ให้ร้อยละผลได้น้ำมันและเคโรซีนมากที่สุดจากวิธีพื้นที่ผิวตอบสนอง ได้แก่ อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละของของเหลวและเคโรซีน 81.86 และ 22.74 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรพบว่า ภาวะดำเนินการมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากวิธีการพื้นที่ผิวตอบสนอง ได้แก่ อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนของพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2 ต่อ 0.8 กับ อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์กับโดโลไมต์ที่ฝังเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ 0.2 ต่อ 0.8 โดยน้ำหนัก เมื่อศึกษาอิทธิพลของการเสริมหรือหักล้างกันพบว่า พอลิเอทิลีนมีอิทธิพลเสริมกับพอลิพรอพิลีนในการไพโรไลซิสขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ไปเป็นเคโรซีน ในขณะที่เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่แสดงการส่งเสริมหรือหักล้างกัน แสดงให้เห็นว่าการไพโรไลซิสเชิงตัวเร่งของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์เกิดการแตกสลายเชิงความร้อนสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งเสริมให้เกิดการจัดโครงสร้างของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นไฮโดรคาร์บอนจำพวกแอลลิฟาติกที่มีความอึดตัวในช่วงคาร์บอนอะตอมระหว่าง C<sub>5</sub> – C<sub>15</sub>

คำสำคัญ : ขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์, ไพโรไลซิส, การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบส่วนประสมกลาง, อิทธิพลการเสริมหรือหักล้างกัน, เคโรซีน

Title	CATALYTIC CRACKING OF PACKAGING WASTE PLASTIC USING ACTIVATED CARBON AND IRON-DOLOMITE
Author	ORATEPIN ARJHARNWONG
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2023
Thesis Advisor	Associate Professor Dr. Witchakorn Charusiri

The rapid increase in the use of plastic packaging around the world caused concern about the management of plastic packaging waste. This research aims to study the catalytic pyrolysis of plastic packaging waste in a 3-L semi-batch reactor by using activated carbon and an Fe-dolomite catalyst to achieve the highest fraction of kerosene by using the central composite design (CCD) and response surface method (RSM) to optimize the process operating conditions. Furthermore, the synergistic effects of polyethylene/polypropylene and activated carbon/Fe-dolomite were also investigated. The product distribution and chemical analyses of the liquid product were carried out using a simulation distillation gas chromatograph (Sim-DGC), according to the ASTM-D2887 standard, a gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) and Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy were performed. The response surface method showed that the optimal process conditions of 440 °C and N<sub>2</sub> flow rates of 50 mL/min and 5% loading of activated carbon as a catalyst resulted in the highest liquid yield and kerosene fraction of 81.86 wt.% and 22.74 wt.%, respectively. The influence of each variable was investigated, and it was found that the optimal conditions were consistent with the response surface method. The synergistic study illustrated the positive effect of blending polyethylene with polypropylene at a ratio of 0.2:0.8, while the use of an activated carbon catalyst and Fe-dolomite had neither positive nor negative synergistic effects. The catalytic pyrolysis of plastic packaging waste involves the thermal degradation of long-chain polymers into middle-hydrocarbon chains and further bond arrangement and further secondary cracking at high temperature into smaller hydrocarbons. Consequently, both the pore structure and the number of acid active sites in the catalyst improved the arrangement of medium-hydrocarbon chains into aliphatic hydrocarbons in the C<sub>5</sub> – C<sub>15</sub> carbon range.

Keyword : Waste plastic packaging, Pyrolysis, Factorial design, Central composite design, Kerosene

## กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยวิทยานิพนธ์เรื่องการแตกตัวเชิงตัวเร่งของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมของถ่านกัมมันต์และเหล็ก-โดโลไมต์ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องด้วยได้รับการเอื้อเฟื้อและการสนับสนุนสิ่งต่างๆในการวิจัยได้แก่ การให้คำแนะนำ คำปรึกษา และแนวทางการทำวิจัย ตลอดจนความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์จากบุคคลและหน่วยงาน ตลอดจนวิจัยเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณบุคคลที่ได้มีส่วนร่วมในการสนับสนุนดังนี้

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงรองศาสตราจารย์ ดร. วิชชากร จารุศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ สละเวลามาเพื่อให้คำปรึกษาในการวางแผนการดำเนินงาน พร้อมทั้งความรู้ และแนวทางในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนวิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมถึงคณาจารย์ทุกท่านในสาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมและการจัดการทรัพยากรที่ได้ให้คำแนะนำและความรู้ในการนำมาใช้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คุณศิริชัย รัตนวราหะ ผู้จัดการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คุณพสธร ขุนโอบขันธ์ นักวิทยาศาสตร์ และบุคลากรของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ในการสนับสนุนเอื้ออำนวยความสะดวกพร้อมของสถานที่ ให้คำแนะนำ ดูแลตลอดการดำเนินงานด้วยความเอาใจใส่เพื่อให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะวัฒนธรรมสิ่งแวดล้อมและการท่องเที่ยวเชิงนิเวศที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องมือวิทยาศาสตร์ในการเก็บข้อมูลและมอบทุนอุดหนุนการศึกษาสำหรับนิสิตผู้มีสมรรถภาพสูง เข้าศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 รวมถึงคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ห้องปฏิบัติการในการทำการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้ให้การสนับสนุนทุกท่าน ผู้ซึ่งเป็นที่ให้การอบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ และกำลังใจในการฝ่าฟันอุปสรรคเพื่อให้บรรลุเป้าหมาย

อรเทพิน อาภาญวงค์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ .....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.5 นิยามคำศัพท์เฉพาะ .....	4
1.6 กรอบแนวคิดงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 ขยะมูลฝอยชุมชน .....	6
2.2 พลาสติก .....	7
2.2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต.....	7
2.2.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง.....	8
2.2.3 พอลิไวนิลคลอไรด์.....	8
2.2.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ .....	8
2.2.5 พอลิพรอพิลีน .....	8
2.2.6 พอลิสไตรีน.....	9

2.2.7 อื่นๆ .....	9
2.3 การกำเนิดของปิโตรเลียม .....	11
2.4 ปิโตรเลียมดิบ .....	12
2.5 กระบวนการไพโรไลซิส .....	13
2.5.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส .....	14
2.5.2 ประเภทเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส .....	16
2.5.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส .....	18
2.5.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส .....	20
2.6 กระบวนการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน .....	21
2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา .....	25
2.7.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ .....	25
2.7.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวិวิพันธ์ .....	25
2.8 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิพันธ์ .....	26
2.8.1 การเคลือบฝัง .....	27
2.8.2 การตกตะกอน .....	27
2.9 ถ่านกัมมันต์ .....	27
2.9.1 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ .....	28
2.9.2 การผลิตถ่านกัมมันต์ .....	28
2.9.3 ประเภทของถ่านกัมมันต์ตามลักษณะทางกายภาพ .....	29
2.10 ไดโกลไมต์ .....	30
2.11 การออกแบบการทดลอง .....	31
2.11.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล .....	31
2.11.2 โปรแกรมดีไซน์เอ็กเปอร์ท์ .....	32

2.11.3 การออกแบบส่วนประสมกลาง .....	33
2.12 การศึกษาอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกัน .....	34
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	42
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	42
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	42
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง .....	42
3.2.2 เครื่องมือในการวิเคราะห์น้ำมันไพโรไลซิส .....	43
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	45
3.4 ขั้นตอนการทำการทดลอง .....	49
บทที่ 4 ผลการศึกษา .....	51
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเคมีของพลาสติก .....	51
4.1.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพลาสติก .....	51
4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของพลาสติก .....	53
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	55
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิส ด้วยเทคนิคการ เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	55
4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิส ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ .....	56
4.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติความพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิส .....	57
4.3 การศึกษาอิทธิพลและผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ .....	58
4.3.1 การศึกษาอิทธิพลและผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ของเหลว .....	58

4.3.2 การศึกษาอิทธิพลและผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เคโรซีน .....	66
4.3.3 คำนวณภาวะที่เหมาะสมต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ด้วย Ease Design-Expert .....	73
4.4 ผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อร้อยละผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์.....	79
4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ .....	79
4.4.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	81
4.4.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ .....	82
4.4.4 ผลของอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของพลาสติกประเภท พอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์.....	83
4.4.5 ผลของอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับโดไลไมต์ที่ฝังเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ .....	86
4.5 การวิเคราะห์สมบัติผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบน้ำมันไพโรไลซิส.....	89
4.5.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของน้ำมันไพโรไลซิส.....	89
4.5.2 วิเคราะห์และยืนยันโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ .....	91
4.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเทคนิค แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	93
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	115
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	115
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	116
บรรณานุกรม .....	117
ภาคผนวก.....	123
ภาคผนวก ก. การวิเคราะห์องค์ประกอบของพลาสติกและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส ...	124

1. การวิเคราะห์สมบัติความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว.....	124
2. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน.....	125
3. การวิเคราะห์น้ำมันไพโรไลซิสเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ .....	126
3.1 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) .....	126
3.2 แก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) .....	127
ภาคผนวก ข. การใช้ Ease Design-Expert.....	129
ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ FT-IR.....	133
ภาคผนวก ง. การวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน ตามคาบจุดเดือด (Boiling Distribution) .....	138
ภาคผนวก จ. ข้อมูลดิบที่ได้จากการไพโรไลซิส .....	145
ภาคผนวก ฉ. การวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรมิเตอร์ผลิตภัณฑ์ จากการไพโรไลซิส .....	148
ประวัติผู้เขียน.....	179

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แนวทางการใช้ประโยชน์ของพลาสติก.....	9
ตาราง 2 การกลั่นตามคาบจุดเดือด .....	13
ตาราง 3 การเปรียบเทียบสมบัติและปัจจัยต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์กับตัวเร่งปฏิกิริยา วิวิธ พันธ์ .....	26
ตาราง 4 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง .....	46
ตาราง 5 การออกแบบพื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมัน โดยการออกแบบการทดลองแบบ ส่วนประสมกลาง.....	47
ตาราง 6 การออกแบบการทดลอง เพื่อหาผลการทำงานร่วมกันของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับ พอลิ เอทิลีน โดยนำภาวะที่ดีที่สุดจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางมาใช้ ในการ ทดลอง .....	48
ตาราง 7 การออกแบบการทดลองเพื่อหาผลการทำงานร่วมกันของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับ ไดโกลไมต์ที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ โดยนำภาวะที่ดีที่สุดจากการออกแบบการทดลองแบบ ส่วนประสมกลาง และใช้อัตราส่วนของพลาสติกที่ดีที่สุดที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เพื่อหา ผลการทำงานร่วมกันของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีนมาใช้ในการทดลอง .....	48
ตาราง 8 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของขยะพลาสติกตามมาตรฐานอ้างอิง การ ทดสอบ .....	54
ตาราง 9 การวิเคราะห์องค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิสด้วยเทคนิคเอกซเรย์ ฟลูออเรสเซนซ์.....	56
ตาราง 10 พื้นผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง.....	57
ตาราง 11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติก บรรจุ ภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ .....	58
ตาราง 12 การทดสอบแบบจำลองจากวิธีผลรวมกำลังสองของการตอบสนองเป็นผลิตภัณฑ์ ของเหลว .....	60

ตาราง 13 การทดสอบ lack of fit ของการตอบสนองเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว ..... 60

ตาราง 14 แบบจำลองที่เหมาะสมของการตอบสนองเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวจากวิธีการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง ..... 61

ตาราง 15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการตอบสนองการแตกสลายพลาสติกบรรจุภัณฑ์ไปเป็นของเหลว ..... 61

ตาราง 16 การทดสอบแบบจำลองจากวิธีผลรวมกำลังสองของการตอบสนองเป็นองค์ประกอบในช่วงคาบจุดเดือดเคโรซีน ..... 66

ตาราง 17 การทดสอบ lack of fit ของการตอบสนองเป็นองค์ประกอบในช่วงคาบจุดเดือดเคโรซีน ..... 67

ตาราง 18 แบบจำลองที่เหมาะสมของการตอบสนองเป็นองค์ประกอบจำพวกเคโรซีนจากวิธีการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง ..... 67

ตาราง 19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการตอบสนองการแตกสลายพลาสติกบรรจุภัณฑ์ไปเป็นเคโรซีน ..... 68

ตาราง 20 ขอบเขตของการหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสม ..... 73

ตาราง 21 ผลการคำนวณภาวะดำเนินการที่เหมาะสมจากโปรแกรม Ease Design-Expert ..... 73

ตาราง 22 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จาก Ease Design-Expert จากการไฟโรไลซิสขยะพลาสติก บรรจุภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ..... 77

ตาราง 23 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันไฟโรไลซิสด้วยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ..... 89

ตาราง 24 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันไฟโรไลซิสด้วยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยา ถ่านกัมมันต์และเหล็กบนโดโลไมต์ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก .... 90

ตาราง 25 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันไฟโรไลซิส ..... 91

ตาราง 26 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50  
มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก โดยไม่ใช้ ตัวเร่ง  
ปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี  
แมสสเปคโตรเมตรี..... 93

ตาราง 27 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50  
มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก และตัวเร่ง  
ปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตร  
เมตรี ..... 99

ตาราง 28 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 460 และ 480 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของ แก๊ส  
ไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก  
ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใน  
อัตราส่วน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรเมตรี..... 100

ตาราง 29 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25 และ  
75 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่ง  
ปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน  
0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรเมตรี ..... 108

ตาราง ๓.4 30 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50  
มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก และตัวเร่ง  
ปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปคโตรเมตรี  
..... 156

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นและการจัดการในปี 2561 – 2565 .....	7
ภาพประกอบ 2 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในการผลิตเรซินพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท .....	8
ภาพประกอบ 3 เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะที่มีการติดตั้งใบกวน .....	17
ภาพประกอบ 4 เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง .....	18
ภาพประกอบ 5 แบบจำลองโครงสร้างการดูดซับของถ่านกัมมันต์ .....	28
ภาพประกอบ 6 พื้นที่ผิวการตอบสนอง (Response surface plot) จาก Ease Design-Expert .	33
ภาพประกอบ 7 ตำแหน่งในการทดลองของการออกแบบส่วนประสมกลาง .....	34
ภาพประกอบ 8 แผนผังเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ .....	43
ภาพประกอบ 9 เครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ .....	43
ภาพประกอบ 10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ .....	44
ภาพประกอบ 11 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น .....	44
ภาพประกอบ 12 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ .....	45
ภาพประกอบ 13 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเทคนิคบอมบ์ .....	45
ภาพประกอบ 14 (ก) การแตกสลายเชิงความร้อนของพอลิเอทิลีน (ข) การแตกสลายเชิงความร้อนของพอลิพรอพิลีน (ค) การแตกสลายเชิงความร้อนของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ .....	53
ภาพประกอบ 15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกริยา ถ่านกัมมันต์ โดโลไมต์ และเหล็กบนโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก .....	55
ภาพประกอบ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Normal % Probability พล็อตกับ Externally Studentized Residuals .....	63
ภาพประกอบ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals พล็อตกับ Predicted .....	63

ภาพประกอบ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals พล็อตกับ Run Number.....	64
ภาพประกอบ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals พล็อตกับพารามิเตอร์อุณหภูมิ .....	64
ภาพประกอบ 20 แบบจำลองแสดงร้อยละผลได้ของของเหลวจากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ (ก) อุณหภูมิกับอัตราการไหลของไนโตรเจน (ข) อุณหภูมิกับร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา (ค) อัตราการไหลของไนโตรเจนกับร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา.....	65
ภาพประกอบ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Normal % Probability พล็อตกับ Externally Studentized Residuals .....	69
ภาพประกอบ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals พล็อตกับ Predicted.....	70
ภาพประกอบ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals พล็อตกับ Run Number.....	70
ภาพประกอบ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals พล็อตกับพารามิเตอร์อุณหภูมิ .....	71
ภาพประกอบ 25 แบบจำลองแสดงร้อยละผลได้ขององค์ประกอบในช่วงจุดเดือดของเคโรซีนจากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ (ก) อุณหภูมิกับอัตราการไหลแก๊สของไนโตรเจน (ข) อุณหภูมิกับร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา (ค) อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนกับร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา ....	72
ภาพประกอบ 26 การตอบสนองแบบ contour ของภาวะดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการไฟโรไลซิสของพลาสติกบรจัวร์ที่ให้อะไรร้อยละผลได้ของน้ำมันและองค์ประกอบเคโรซีนสูงที่สุด .	77
ภาพประกอบ 27 พื้นที่ผิวตอบสนองของภาวะดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการไฟโรไลซิสของพลาสติกบรจัวร์ที่ให้อะไรร้อยละผลได้ของน้ำมันและองค์ประกอบเคโรซีนสูงที่สุด .....	78
ภาพประกอบ 28 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซิส (อัตราส่วนของพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5).....	79

ภาพประกอบ 29 ร้อยละผลได้ผลิตรากพืชของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้ไนโตรเจน (อัตราส่วนของพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5) .....	81
ภาพประกอบ 30 ร้อยละผลได้ผลิตรากพืชของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ (อัตราส่วนของพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที) .....	82
ภาพประกอบ 31 ร้อยละผลได้ผลิตรากพืชของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพลาสติก พอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน (ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที) .....	83
ภาพประกอบ 32 ผลการเสริมและหักล้างกันของกระบวนการไฟโรไลซิสของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน (ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที) .....	84
ภาพประกอบ 33 ร้อยละผลได้ผลิตรากพืชของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดไลไมต์ร้อยละ 5 (อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที).....	86
ภาพประกอบ 34 ผลการเสริมและหักล้างกันของกระบวนการไฟโรไลซิสของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดไลไมต์ร้อยละ 5 (อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที) .....	87
ภาพประกอบ 35 โครงสร้างของน้ำมันไฟโรไลซิส ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่ออนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก .....	91

## บทที่ 1

### บทนำ

ในปัจจุบันมีการเติบโตทางเศรษฐกิจส่งผลต่อการใช้พลังงานหรือน้ำมันจากฟอสซิล (fossil fuel) เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ปริมาณสำรองของพลังงานฟอสซิลที่มีปริมาณจำกัดและมีการคาดการณ์ว่าจะหมดไปในระยะเวลาไม่นาน และในขณะที่ปัจจุบันทั่วโลกกำลังให้ความสนใจเกี่ยวกับการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะภูมิอากาศ จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์เกิดความสนใจในการพัฒนาพลังงานสะอาดเพื่อทดแทนพลังงานฟอสซิล

สถานการณ์ปัจจุบันขยะพลาสติกมีปริมาณมากตามจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้น ก่อให้เกิดความกังวลในการเพิ่มของขยะพลาสติก ซึ่งขยะพลาสติกส่วนใหญ่มาจากแหล่งชุมชน และอุตสาหกรรม ส่งผลต่อการก่อกำเนิดของหลุมฝังกลบขนาดใหญ่และยากต่อการกำจัด ขยะพลาสติกในสิ่งแวดล้อมเนื่องจากพลาสติกใช้เวลาในการย่อยสลายเป็นเวลานาน การย่อยสลายตัวของพลาสติกใช้ระยะเวลานาน ขยะพลาสติกเหล่านี้ส่วนใหญ่ประกอบด้วย โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) และโพลีพรอพิลีน (PP) เป็นต้น แต่เดิมบรรจุภัณฑ์ที่นิยมใช้ในท้องตลาดเป็น ขวดพลาสติกจึงมีแนวทางในการเปลี่ยนบรรจุภัณฑ์ขวดพลาสติกไปเป็นถุงพลาสติกแบบรีฟิล ซึ่งบรรจุภัณฑ์พลาสติกประเภทดังกล่าวเป็นพลาสติกประเภทที่ 7 เมทัลไลต์ (metalized films) หรืออลูมิเนียมฟอยล์ (aluminium foil bag) ที่มีส่วนประกอบของพลาสติกมากกว่าสองชนิดขึ้นไป และไม่ใช่พลาสติก ซึ่งประกอบด้วยโพลีพรอพิลีน โพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต โพลีเอสเตอร์ (PE) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) พิล์มไนลอน (NY) และ พิล์มอลูมิเนียม (Al) ประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้ความร้อน กาว หรือสารเคมีชนิดอื่น ๆ มาเป็นสารเชื่อมประสานระหว่าง ชั้นฟิล์มตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานบรรจุสินค้าเพื่อไม่ให้สินค้าได้รับความเสียหายและยืดอายุ ของสินค้าให้นานยิ่งขึ้น (งามทิพย์ ภูวโรดม, 2557) ส่งผลให้ยากต่อการรีไซเคิล (recycle) หรือรีユส (reuse) เนื่องจากการรีไซเคิลจะต้องทำการแยกชั้นฟิล์มออกจากกันก่อนจะนำเข้าสู่กระบวนการ รีไซเคิลซึ่งไม่คุ้มค่าในการลงทุน แต่ขยะพลาสติกดังกล่าวสามารถเข้าสู่กระบวนการ เปลี่ยนสภาพของวัสดุให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ไม่เหมือนกับผลิตภัณฑ์เดิม (upcycling product) พร้อมทั้งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ดียิ่งขึ้น ผลิตภัณฑ์ใหม่ ที่ได้หลังเข้าสู่กระบวนการดังกล่าวได้เป็นวัสดุปูถนน หรือเฟอร์นิเจอร์ต่าง ๆ แต่วิธีดังกล่าว ไม่เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับขยะพลาสติก การเพิ่มมูลค่าให้กับขยะพลาสติกสามารถทำได้

โดยการนำพลาสติกประเภทเมทัลไลต์มาเปลี่ยนสภาพให้กลายเป็นรูปแบบน้ำมันที่เพิ่มมูลค่าสูงขึ้น (บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน), 2566)

แนวทางในการนำขยะพลาสติกมาแปรรูปให้เป็นพลังงานสามารถดำเนินการได้ด้วยเทคโนโลยีที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีความร้อนในการแก้ไขปัญหาการกำจัดขยะอย่างไม่เหมาะสมเพื่อเป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดพลาสติก (Budsareechai et al., 2019) โดยนำมาแปรรูปเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูงสุดในทดแทนความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นโดยใช้กระบวนการเคมีความร้อนในภาวะไร้ออกซิเจนหรือกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการแตกตัวแตกสลายของสารประกอบหรือวัสดุต่าง ๆ เช่น ความร้อน (thermal degradation) ขนาดปานกลาง (400 – 800 องศาเซลเซียส) ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณที่น้อยมากโดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจำแนกได้เป็น 3 สถานะ ตามภาวะที่เกิดขึ้น คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ของเหลวมีลักษณะคล้ายน้ำมัน และของแข็งหรือถ่านชาร์ขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบและภาวะที่ดำเนินการ เช่น อุณหภูมิ และอัตราเร็วในการให้ความร้อน ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิสมักให้แก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์ (synthesis gas) ในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาจึงมักนำแก๊สเชื้อเพลิงนี้มาใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการสลายตัวของสารที่ระเหยได้ง่ายออกจากวัตถุดิบ (devolatilization) ส่วนขั้นที่สองเป็นการแตกตัวของวัตถุดิบเอง โดยองค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่ภาวะที่ใช้จะแตกตัวได้เป็นโมเลกุลที่เล็กลงเรื่อย ๆ ตามเวลาหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสจนถึงการเกิดการแตกตัวแบบสมบูรณ์ของวัตถุดิบ โดยอุณหภูมิในแต่ละขั้นตอนแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบ หากใช้ภาวะดำเนินการที่ให้ความร้อนและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เกินความเหมาะสม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบก็อาจกลับมารวมกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่เป็นของแข็งเหนียวติดตามอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นผลผลิตที่ไม่ต้องการในบางครั้งอาจมีการเติมไฮโดรเจนหรือไอน้ำเข้าไปในกระบวนการไพโรไลซิสด้วย ปัจจุบันจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสของวัสดุตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งที่เป็นสารชีวมวล และพอลิเมอร์จากขยะพลาสติกไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงหรือผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูง และจัดว่าเป็นเทคนิคการแปรสภาพขยะพลาสติกให้สามารถเปลี่ยนรูปเป็นทรัพยากรที่มีคุณค่า เช่น เป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งเป็นวิธีการที่มีต้นทุนต่ำ ยั่งยืน และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม จึงสามารถปรับให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มผลผลิต และผลิตผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่หลากหลาย (Chang, 2023)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการแปรสภาพของขยะพลาสติกซึ่งมีพอลิเมอร์หลายชนิดปะปนกัน และจัดให้อยู่ในกลุ่มพอลิเมอร์กลุ่มอื่น ๆ ซึ่งไม่สามารถนำมาแปรสภาพกลับไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มี

องค์ประกอบของพอลิเมอร์ชนิดเดิมได้แต่มีศักยภาพในการแปรรูปด้วยกระบวนการไพโรไลซิสไปเป็นสารพลังงาน จึงศึกษาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ให้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงอากาศยานโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบการทดลอง และประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) ในการหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Respond Surface Methodology)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดในการกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (semi-bath reactor)
2. ศึกษาอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับโดไลไมต์ที่ฝังเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ในการไพโรไลซิสขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะดำเนินการที่ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ดีที่สุดจาก Ease Design-Expert ด้วยการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง และหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองจากการไพโรไลซิสขยะพลาสติกโดยใช้ถ่านกัมมันต์และโดไลไมต์ที่ฝังเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พร้อมทั้งศึกษาอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน และอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับโดไลไมต์ที่ฝังเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบภาวะดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่เป็นเคโรซีนมากที่สุด รวมถึงอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของชนิดพอลิเมอร์จากขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในปฏิกิริยาเชิงแตกตัวเชิงตัวเร่ง
2. เพื่อนำขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์เหลือทิ้งมาแปรสภาพเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีมูลค่าสูง เป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่าตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy)

### 1.5 นิยามคำศัพท์เฉพาะ

1. ขยะพลาสติก หมายถึง พลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้ว ไม่เป็นที่ต้องการ หรือเสื่อมสภาพการใช้งานสามารถมาจากครัวเรือน ร้านค้า อาหาร โรงพยาบาล โรงงาน โดยไม่จำแนกประเภทของพลาสติกกับวัสดุ หรือสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ

2. พลาสติกบรรจุภัณฑ์ คือ การนำวัสดุต่าง ๆ เช่น แก้ว โลหะ พลาสติก กระดาษ เป็นต้น มาใช้ในการห่อผลิตภัณฑ์ เพื่อป้องกันความเสียหาย อำนวยความสะดวก รวมถึงรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์

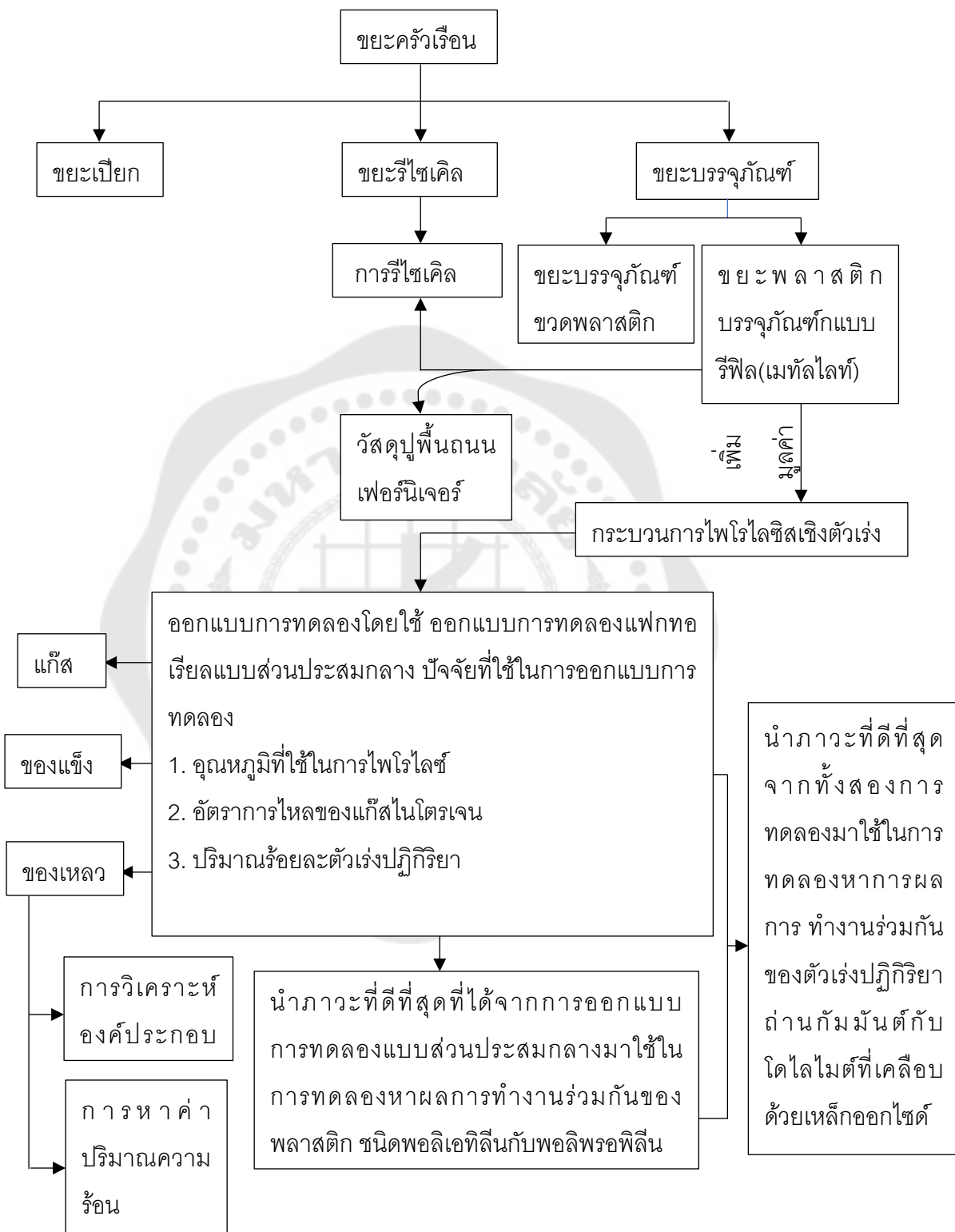
3. ไพโรไลซิส คือ กระบวนการแตกสลายของสารประกอบหรือวัสดุต่าง ๆ ซึ่งความร้อนปานกลาง (400 -800 องศาเซลเซียส) ในภาวะไร้ออกซิเจน โดยสัดส่วนร้อยละผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ

4. เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ คือ เตาเผาแบบถึงกวนอุณหภูมิสูง โดยให้แก๊สตัวพาเคลื่อนที่ผ่านวัตถุดิบ เมื่อให้ความร้อนจะเกิดการแตกตัวของวัตถุดิบเป็นสารระเหย ผ่านหน่วยทำความเย็นเพื่อควบแน่นเป็นของเหลวหรือน้ำมัน ส่วนแก๊สที่ไม่ควบแน่นจะระเหยออกไป และส่วนที่เหลือจากการแตกตัวจะอยู่ในรูปของแข็ง

5. น้ำมันไพโรไลซิส คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยให้ความร้อนแก่พลาสติก เกิดการแตกตัวของสารตั้งต้น และควบแน่นของสารระเหยไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันที่คุณสมบัติเทียบเท่าน้ำมันดิบ รวมถึงสามารถนำมาเข้าสู่กระบวนการกลั่นใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิง โดยส่วนใหญ่จะมีการนำไปปรับปรุงคุณภาพก่อนนำไปใช้งาน

6. น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับอากาศยาน คือ น้ำมันที่มีจุดเดือดอุณหภูมิช่วงกลางระหว่างอุณหภูมิ 200 - 250 องศาเซลเซียส และมีจำนวนคาร์บอนอะตอมระหว่าง  $C_{12} - C_{15}$

1.6 กรอบแนวคิดงานวิจัย



## บทที่ 2

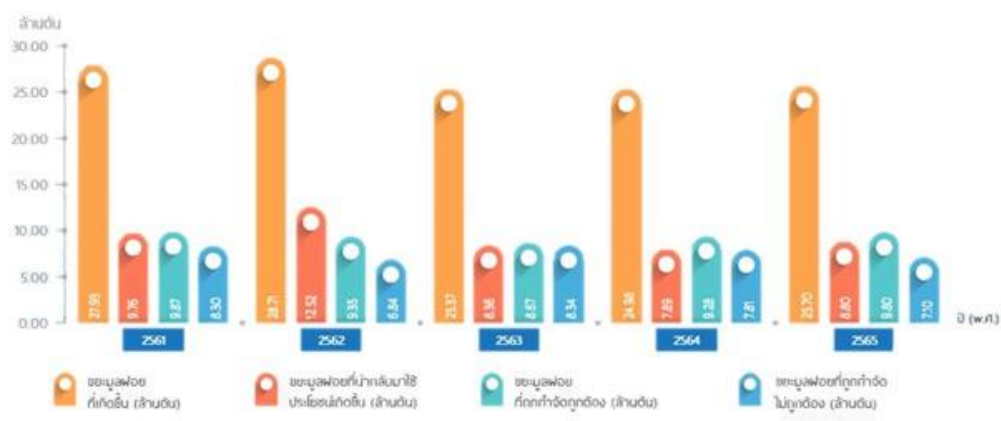
### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้มีการค้นคว้า รวบรวมข้อมูลทฤษฎี บทความทางวิชาการ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ โดยได้ศึกษาในหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

#### 2.1 ขยะมูลฝอยชุมชน

การพัฒนาและเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศส่งผลต่อการย้ายถิ่นฐานจากชนบทเข้าสู่ชุมชนเมืองเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งในปัจจุบันประชากรมีพฤติกรรมการสังสินค้าแบบบนออนไลน์และรูปแบบธุรกิจที่เปลี่ยนไปจากเดิม เปลี่ยนจากการขายสินค้าหน้าร้านเป็นแพลตฟอร์มออนไลน์ต่าง ๆ เนื่องจากมีความสะดวกสบาย และง่ายต่อการสังสินค้าล้วนเป็นปัจจัยที่ส่งเสริมการเพิ่มขึ้นของขยะมูลฝอยชุมชน ขยะบรรจุภัณฑ์ และขยะที่เกิดขึ้นจากการผลิตและการบริโภค ถึงแม้ว่าพฤติกรรมดังกล่าวจะเป็นผลดีต่อระบบเศรษฐกิจ แต่ส่งผลให้มีขยะมูลฝอยประเภทบรรจุภัณฑ์หรือพลาสติกใช้ครั้งเดียวทิ้ง (single use plastic) เพิ่มมากขึ้น ขยะมูลฝอยที่ภาครัฐต้องแบกรับหน้าที่เพิ่มมากขึ้นมีองค์ประกอบที่ยากต่อการกำจัดเนื่องจากไม่ได้รับการคัดแยกอย่างถูกวิธี เช่น ผ้าอ้อม หน้ากากอนามัยใช้แล้ว ซากอิเล็กทรอนิกส์ พลาสติกใช้ครั้งเดียวทิ้ง เป็นต้น ความสามารถในการบริหารจัดการสถานที่กำจัดขยะมูลฝอยไม่มีศักยภาพเพียงพอต่อการรองรับปริมาณขยะมูลฝอยที่เพิ่มสูงขึ้น ประกอบกับขาดกฎหมายและกฎระเบียบที่จะรองรับจึงเป็นหน้าที่ของภาครัฐที่ต้องแบกรับหน้าที่การกำจัดขยะมูลฝอยอย่างต่อเนื่อง

สถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชนปี 2565 มีขยะมูลฝอย ชุมชนเกิดขึ้น 25.7 ล้านตัน (เพิ่มขึ้นจากปี 2564 ร้อยละ 3 โดยปี 2564 มีขยะมูลฝอยเกิดขึ้น 24.98 ล้านตัน) ขยะมูลฝอยมีการคัดแยกและนำกลับไปใช้ประโยชน์จำนวน 8.8 ล้านตัน (ร้อยละ 34 ของปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น) (เพิ่มขึ้นจาก ปี 2564 ร้อยละ 12 ปี 2564 มี 7.89 ล้านตัน) ส่งผลให้ขยะมูลฝอยชุมชนได้รับการกำจัดอย่างถูกต้องมี 9.8 ล้านตัน (ร้อยละ 38 ของปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น) (เพิ่มขึ้นจากปี 2564 ร้อยละ 6 ปี 2564 มี 9.28 ล้านตัน) และกำจัดไม่ถูกต้องมี 7.1 ล้านตัน (ร้อยละ 28 ของปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้น) (ลดลงจากปี 2564 ร้อยละ 9 ปี 2564 มี 7.81 ล้านตัน) (กรมควบคุมมลพิษ, 2565)



ภาพประกอบ 1 ปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นและการจัดการในปี 2561 – 2565

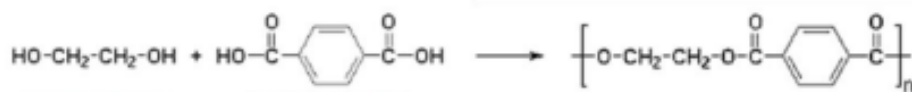
ที่มา: (กรมควบคุมมลพิษ, 2565)

## 2.2 พลาสติก

สารประกอบอินทรีย์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากการกลั่นน้ำมันดิบ มักนำมาใช้ประโยชน์เป็นของใช้ในชีวิตประจำวันที่หลากหลาย เช่น ภาชนะบรรจุภัณฑ์ ขวดน้ำ อุปกรณ์ทางการแพทย์ ถุงพลาสติก เฟอร์นิเจอร์ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนรถยนต์ ท่อประปา เป็นต้น โดยทั่วไปพลาสติกสามารถจำแนกออกเป็น 7 กลุ่ม สามารถสรุปชนิดของพลาสติก และแนวทางการใช้ประโยชน์ได้ดังตาราง 1

### 2.2.1 พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต

เป็นพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ระหว่างกรดเทเรฟทาเลต (terephthalic acid หรือ TPA) กับเอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol, ethanediol หรือ EG) โดยมีน้ำหรือเกิดจากมอนอเมอร์จากปฏิกิริยาระหว่างไดเมทิลเทเรฟทาเลต (dimethyl terephthalate) กับเอทิลีนไกลคอล และเกิดเมทานอลในปฏิกิริยาออกมาเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ในการผลิตพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2566) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ของใช้ เครื่องสำอาง และน้ำดื่ม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่แข็งแรงทนแรงยึด แรงกระแทก แรงเสียดสีได้ดี ไม่เปราะแตกง่าย พร้อมทั้งสามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สจึงถูกนำมาใช้เป็นขวดน้ำอัดลม ซึ่งเป็นพลาสติกที่สามารถรีไซเคิลเป็นเส้นใยสังเคราะห์ในการยัดหมอน เส้นใยสำหรับทำเสื่อกันหนาวพรม และเส้นใยสังเคราะห์ในการยัดหมอน (MTEC ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2557)



เอทิลีนไกลคอล

กรดเทเรพทาติก

พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลท

ภาพประกอบ 2 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในการผลิตเรซินพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลท

ที่มา: (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2566)

### 2.2.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง

เป็นพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนที่มีค่าความหนาแน่นสูง โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นกิ่งก้านมาก ทนสารเคมี นิยมนำมาใช้ประโยชน์กับบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงและใส เช่น ถัง ขวด ถัง ถาด แม้แต่บรรจุภัณฑ์นมเพื่อยืดอายุผลิตภัณฑ์เนื่องจากป้องกันความชื้นได้ดี รวมถึงม้านั่ง แท่งไม้เทียมสำหรับทำรั้ว ขวดน้ำยาทำความสะอาด และอื่น ๆ ที่ได้มาจากกระบวนการรีไซเคิล (MTEC ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2557)

### 2.2.3 พอลิไวนิลคลอไรด์

พอลิไวนิลคลอไรด์ (polyvinylchloride, PVC) เป็นพลาสติกที่สามารถเปลี่ยนสมบัติโดยการใส่สารเติมแต่งทำให้พอลิไวนิลคลอไรด์เป็นที่นิยมและใช้มากในอุตสาหกรรมอื่น ๆ มากกว่าอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ โดยทั่วไปมักใช้ผลิตท่อน้ำประปา แต่เมื่อพอลิไวนิลคลอไรด์ใส่สารเติมแต่งจะนิ่มขึ้นจึงนำมาผลิตเป็นสายยางใส ฟิล์มยืดถนอมอาหาร แผ่นกระเบื้องยาง ฝ้าปูโต๊ะพลาสติก ประตู วงกบ และหนังเทียม รวมถึงท่อประปา กรวยจราจร และม้านั่งเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการรีไซเคิล (MTEC ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2557)

### 2.2.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

เป็นพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนมีความหนาแน่นต่ำ จึงมีความทนทานที่น้อยกว่าทนความร้อนได้ต่ำ มีความใสและคุณสมบัติยืดตัวสูง นิยมนำมาทำเป็นฟิล์มยืดถนอมอาหารบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารเย็น ซึ่งสามารถนำกลับมารีไซเคิลเป็นถุงดำ ถุงซ้อปบั้ง หรือถังขยะ (MTEC ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2557)

### 2.2.5 พอลิพรอพิลีน

เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกหรือพลาสติกที่สามารถขึ้นรูปโดยใช้ความร้อน วัสดุมีน้ำหนักเบาที่สุดในเทอร์โมพลาสติก พอลิพรอพิลีนนิยมนำมารีไซเคิลเป็นกล่องเบตเตอรีรถยนต์ กรวยสำหรับน้ำมัน และอื่น ๆ (MTEC ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2557)

## 2.2.6 พอลิสไตรีน


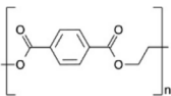
มีมอโนเมอร์สไตรีนเป็นสารตั้งต้นจัดรูปเรียงต่อกันเป็นพลาสติกสายอะโรมาติก พลาสติกชนิดนี้มีความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีสีขาว โปร่งใส เนื้อเปราะ และแตกง่าย จึงไม่นิยมนำพลาสติกประเภทนี้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ของเหลวต่าง ๆ เนื่องจากมีโอกาสแตกได้ ส่วนมากจะถูกนำมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบของโฟมบรรจุอาหารจะมีน้ำหนักเบา เนื่องจากโครงสร้างของโฟมมีพอลิสไตรีนอยู่เพียงร้อยละ 2 - 5 ที่เหลือเป็นอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่าง และสามารถนำกลับมารีไซเคิลได้เป็นไม้แขวนเสื้อ กล้องวิดีโอ ไม้บรรทัด หรือของใช้อื่น ๆ (MTEC ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2557) พอลิสไตรีนสามารถจำแนกได้ 2 ชนิด

1. Expanded polystyrene (EPS) พอลิสไตรีนที่นำไปผสมกับสารที่สามารถทำให้ขยายตัวออกมาเป็นกล่องโฟม นิยมใช้กันอย่างมากเนื่องจากน้ำหนักเบา
2. Extruded polystyrene (XPS) พอลิสไตรีนที่นำไปผสมกับสารป้องกันการติดไฟและขยายตัว จึงมีคุณสมบัติต้านไอน้ำ กักเก็บความร้อน ทนต่อสภาพภูมิอากาศมักนิยมทำเป็นแผ่นฉนวนป้องกันความร้อน







## 2.2.7 อื่น ๆ

ซึ่งไม่ได้ระบุชื่อจำเพาะและไม่ใช่พลาสติกทั้ง 6 ชนิด ในข้างต้น แต่เป็นพลาสติกที่นำมาหลอมใหม่อาจเป็นได้ทั้งพอลิคาร์บอเนต (polycarbonate, PC) โคพอลิเอสเตอร์ (copolyester ยี่ห้อ Tritan) และอื่น ๆ (MTEC ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2557)

ตาราง 1 แนวทางการใช้ประโยชน์ของพลาสติก

สัญลักษณ์	ชนิดพลาสติก	ตัวย่อ	สูตรโครงสร้าง	สูตรโมเลกุล	การนำไปใช้ประโยชน์
	พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลท	PET หรือ PETE		$(C_{10}H_8O_4)_n$	ขวดเครื่องดื่มอาหาร ภาชนะบรรจุฟิล์ม เส้นใยสำหรับเสื้อผ้า เครื่องใช้ไฟฟ้า ชิ้นส่วน และอื่น ๆ

ตาราง 1 (ต่อ)

สัญลักษณ์	ชนิดพลาสติก	ตัวย่อ	สูตรโครงสร้าง	สูตรโมเลกุล	การนำไปใช้ประโยชน์
	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง	HDPE	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$	$(\text{C}_2\text{H}_4)_n$	ขวดแข็ง ท่อ ของเล่น แผ่นรองน้ำกันซึม กระดานตกแต่ง สำหรับการก่อสร้าง ท่อระบายน้ำ สายไฟ
	พอลิไวนิลคลอไรด์	PVC	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\   \quad   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$	$(\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl})_n$	สายเคเบิล ท่อน้ำ กรอบหน้าต่าง กระเบื้องปูพื้น
	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ	LDPE	$\left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\   \quad   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$	$(\text{C}_2\text{H}_4)_n$	ภาชนะบรรจุ ขวดอ่อน ท่ออ่อน ถุง วัสดุเหนียว วัสดุขึ้นรูปของอุปกรณ์ ห้องปฏิบัติการ
	พอลิพรอพิลีน	PP	$\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$	$(\text{C}_3\text{H}_6)_n$	ขวดน้ำดื่ม ฝาขวด ภาชนะบรรจุอาหาร หลอดดื่ม
	พอลิสไตรีน	PS	$\left[ \begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5 \\   \\ -\text{C}-\text{C}- \\   \quad   \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$	$(\text{C}_8\text{H}_8)_n$	ภาชนะบรรจุอาหาร ฉนวนอาคาร ขวด บรรจุภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้า
	พอลิคาร์บอเนต	PC	$\left[ \begin{array}{c} \text{O} \quad \text{C}_6\text{H}_4 \quad \text{C}(\text{CH}_3)_2 \quad \text{C}_6\text{H}_4 \quad \text{O} \\   \quad \quad \quad   \quad \quad \quad   \\ \text{C} \quad \quad \quad \text{C} \quad \quad \quad \text{C} \\    \quad \quad \quad   \\ \text{O} \quad \quad \quad \text{O} \end{array} \right]_n$	$[(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{C}_6\text{H}_4\text{OH})_2]_n$	ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ สัญญาณไฟจราจร หน้าต่าง การจัดเก็บ ข้อมูล เช่นคอมแพคดิสก์ ดีวีดี

ที่มา: (Wang et al., 2021)

### 2.3 การกำเนิดของปิโตรเลียม

1. ทฤษฎีทางอนินทรีย์ (inorganic theory) ทฤษฎีนี้กล่าวว่าน้ำมันได้กำเนิดจาก แคลเซียมคาร์ไบด์ (calcium carbide) ที่มีอยู่มากมายภายใต้ผิวโลก เมื่อถูกสลายตัวโดย ทำปฏิกิริยากับน้ำใต้พื้นดินอาจเกิดเป็นแก๊สอะเซทิลีน (acetylene) แก๊สนี้จะถูกกักมันตภาพรังสี ชนิด  $\alpha$  particle ซึ่งมีอยู่ใต้ผิวโลกทำให้แก๊สรวมตัวกันด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันทำให้เกิด ไฮโดรคาร์บอนที่โมเลกุลใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ จนสุดท้ายกลายเป็นน้ำมันดิบอยู่ใต้ผิวโลก พวกที่ สนับสนุนทฤษฎีนี้ก็อ้างการทดลองที่ทำขึ้นโดยนำแคลเซียมคาร์ไบด์มาสลายด้วยน้ำในห้องทดลอง ซึ่งนอกจากจะได้แก๊สอะเซทิลีนแล้วพบว่ามีความดันน้ำมันเกิดขึ้นเล็กน้อยอยู่เสมอ ทฤษฎีนี้ปัจจุบัน ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากไม่อาจอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ อื่นหลายอย่างได้ นอกจากนี้ข้อสนับสนุน ทฤษฎีก็มีน้อยมาก ไม่มีหลักฐานที่จะมาอ้างอิงได้เพียงพอ (ปราโมทย์ ไชยเวช, 2555)

2. ทฤษฎีทางอินทรีย์ (organic theory) ทฤษฎีนี้ใช้หลักการทางอินทรีย์เคมีกับชีวเคมี เป็นทฤษฎีที่มีความน่าเชื่อถือสูงสุด นักธรณีวิทยาปิโตรเลียมส่วนใหญ่เชื่อในลำดับการกำเนิด ปิโตรเลียมของปิโตรเลียมสามระยะ ในระยะแรกอินทรีย์วัตถุที่แพร่กระจายอยู่ในหินดินดาน ดิน เหนียว กววด ททราย และตะกอนละเอียดอื่นๆ เกิดการสะสมหรือทับถมภายใต้สภาวะที่มีความดัน ความร้อน และจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ไทรการย่อยสลายทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน หากไฮโดรเจนและคาร์บอนอยู่ในรูปของอินทรีย์วัตถุของแข็งที่มีความซับซ้อนทางเคมีมากเมื่อ สะสมอยู่ในชั้นหินการสะสมในหินดินดานมีกลไกในการแปลงสารนี้เป็นน้ำมันทั้งในหินดินดาน ระหว่างช่องว่างของชั้นหินหรือชั้นที่มีรูพรุนเรียกว่า หินต้นกำเนิด (source rock) ระยะถัดมา สารอินทรีย์หรือปิโตรเลียมจะเคลื่อนออกจากชั้นหินในระหว่างการบดอัด ความดัน และความร้อน เข้าไปในหินทรายหรือหินคาร์บอเนตที่มีรูพรุนและซึมผ่านได้โดยรอบ การเคลื่อนที่จากหินต้น กำเนิดไปยังยังหินกักเก็บ (Reservoir Rock) เรียกว่าการอพยพเบื้องต้น ระยะสุดท้ายเมื่อหินต้น กำเนิดมายังหินกักเก็บแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นปิโตรเลียมผ่านกระบวนการที่ไม่เป็นที่ทราบ แน่ชัด การเคลื่อนที่ในครั้งที่สองจะเจอกับชั้นหินที่สามารถซึมผ่านได้น้อยจึงเกิดเป็น โครงสร้าง กักเก็บน้ำมัน (Reservoir Trap)

ในปัจจุบันมีหลักฐานทางธรณีวิทยาประกอบยืนยันได้ เหตุที่ทฤษฎี ทางอินทรีย์ได้รับความเชื่อถือมากเพราะมีข้อสนับสนุนต่าง ๆ ดังนี้ (ปราโมทย์ ไชยเวช, 2555)

1. ในการวิเคราะห์น้ำมันอย่างละเอียดปรากฏว่าพบสารที่มีลักษณะเป็นสารประกอบที่มี คุณสมบัติออกปติกัลลิแอกติฟ (optically active compound) ซึ่งเป็นลักษณะจำเพาะของสิ่งที่มี ชีวิตจึงเป็นการสนับสนุนว่าน้ำมันเกิดจากการที่สิ่งมีชีวิตย่อยสลายโดยแบคทีเรีย

2. วิเคราะห์น้ำมันสารแยกประเภทสเตอริโอและฮอร์โมนออกมาได้เป็นการยืนยันว่าน้ำมันต้องเกิดจากสิ่งมีชีวิตที่มีสารประกอบพวกนี้

3. น้ำมันดิบมีสารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน และออกซิเจนอยู่ในไฮโดรคาร์บอนธาตุดังกล่าวเป็นธาตุสำคัญของสิ่งมีชีวิต เกิดจากการที่โปรตีนในสิ่งมีชีวิตจะสลายตัวเป็นกรดอะมิโน ซึ่งจะย่อยสลายต่อไปเป็นกำมะถัน ไนโตรเจน และออกซิเจน จึงเป็นข้อสนับสนุนที่น้ำมันเกิดจากสิ่งมีชีวิต

4. น้ำมันดิบมีแร่โลหะปนอยู่ โลหะที่พบมากในน้ำมัน คือ วาเนเดียม (vanadium) ซึ่งจะมีอยู่ในสัตว์ทะเลที่เป็นองค์ประกอบในระบบเผาผลาญและแร่เหล็กในเลือดคน การพบวาเนเดียมแทบทุกแห่งเป็นการยืนยันว่าน้ำมันต้องมาจากสัตว์ทะเล

## 2.4 บีโตรเลียมดิบ

น้ำมันปิโตรเลียมดิบ (crude oil) เป็นสารผสมที่ซับซ้อนขององค์ประกอบส่วนใหญ่ที่สุดคือ ไฮโดรคาร์บอนประเภทต่าง ๆ ตั้งแต่โมเลกุลเล็กสุดจนถึงโมเลกุลใหญ่ รวมทั้งมีสารอินทรีย์ที่มีกำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน สารประกอบโลหะบางชนิด และอาจมีแก๊สละลายอยู่ ลักษณะและคุณสมบัติของน้ำมันดิบที่แตกต่างกันเพราะสัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนประเภทต่าง ๆ แตกต่างกันไปแล้วแต่ที่มา ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญในการกำหนดคุณค่าของน้ำมันมีวิธีการ และกระบวนการผลิตที่เหมาะสมในการกลั่นต่อไป

การวิเคราะห์หาคูณค่าของน้ำมันดิบอย่างละเอียดเพื่อทราบองค์ประกอบ และคุณสมบัติของส่วนต่าง ๆ ในน้ำมันดิบ การหาปริมาณ และองค์ประกอบของแก๊สที่มีอยู่ด้วยวิธีเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) แล้วนำน้ำมันมา กลั่นแยกเป็นส่วนย่อย ๆ ในห้องทดลองโดยใช้เครื่องกลั่นซึ่งมีหอแยกที่มีความสามารถในการแยกเท่ากับหลายขั้นตอนตามทฤษฎี เพื่อว่าอุณหภูมิทุกจุดที่วัดได้เป็นจุดเดือดแท้จริงของสารยอดที่กลั่นออกมาในขณะนั้น เรียกว่าการกลั่นหาจุดเดือดต่อเนื่องอย่างแท้จริง (True Boiling Point Distillation) เป็นการกลั่นแยกที่สมบูรณ์ (ปราโมทย์ไชยเวช, 2555) ดังตาราง 2

ตาราง 2 การกลั่นตามคาบจุดเดือด

ผลิตภัณฑ์	C-atom	จุดเดือด (องศาเซลเซียส)
แนฟทา	$C_2 - C_{12}$	IBP – 200
เคโรซีน	$C_{12} - C_{15}$	200 – 250
ดีเซล	$C_{15} - C_{33}$	250 – 370
กากน้ำมัน	$> C_{33}$	370 - FBP

หมายเหตุ: IBP = initial boiling point และ FBP = final boiling point

## 2.5 กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในการแตกสลายของสารประกอบ หรือวัสดุต่าง ๆ ด้วยความร้อนปานกลางที่ 500 – 800 องศาเซลเซียส (ฉันทบุรณ์ ถาวรวรรณ, 2563) ในภาวะไร้ออกซิเจน เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแบบไม่สามารถย้อนกลับได้ โดยเกิดจากการแตกของพันธะโมเลกุลในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นให้กลายเป็นไฮโดรคาร์บอนสายสั้น ส่วนองค์ประกอบคาร์บอนระเหยกกลายเป็นแก๊สเชื้อเพลิง บางส่วนควบแน่นในหน่วยควบแน่นกลั่นมาเป็นของเหลวลักษณะคล้ายน้ำมัน กระบวนการไพโรไลซิสจำแนกผลิตภัณฑ์ออกเป็น 3 สถานะ ได้แก่ ของเหลวที่มีคุณสมบัติคล้ายน้ำมัน ของแข็งหรือถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ และแก๊สประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน อีเทน เป็นต้น โดยปริมาณและอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์แปรผันตามสารตั้งต้น อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน ตัวเร่งปฏิกิริยา และประเภทเตาปฏิกรณ์ เป็นต้น (Lord & Pfannkoch, 2012)

กระบวนการไพโรไลซิสในขั้นตอนแรกจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวของสารตั้งต้นไปเป็นสารระเหย (devolatilization) ขั้นที่สองเป็นการแตกตัวขององค์ประกอบสารตั้งต้นที่สามารถแตกตัวได้ที่ภาวะที่กำลังดำเนินการก็จะเกิดการแตกตัวของสารตั้งต้นเป็นโมเลกุลขนาดเล็กลงตามอุณหภูมิหรือระยะเวลาดำเนินการ จนกระทั่งเกิดการแตกตัวขั้นสมบูรณ์ของสารตั้งต้น โดยอุณหภูมิแต่ละขั้นตอนแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น แต่ถ้ามีการใช้ภาวะดำเนินการที่รุนแรง เช่นการให้ความร้อน และระยะเวลาดำเนินการสูงเกินไป อาจส่งผลให้สารระเหยที่ได้จากการแตกตัวของสารตั้งต้นแตกตัวต่อไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการเป็นของแข็งชั้นเหนียวติดตามอุปกรณ์ซึ่งขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นและภาวะดำเนินการที่เลือกใช้ และบางครั้งอาจมีการเติมไอน้ำหรือไฮโดรเจนเข้าในกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อเปลี่ยนการกระจายตัวของสารระเหยส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากเติมไอน้ำในปริมาณพอเหมาะจะเป็นในตัวกลาง

ของกระบวนการส่งผลต่อการเพิ่มความดันให้กับกระบวนการทำให้วัตถุดิบเกิดเป็นของไหลได้ง่ายมากขึ้น รวมถึงการเติมไฮโดรเจนจะรบกวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบของสารตั้งต้น (วิรุณ โมนะตระกูล, 2562)

### 2.5.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกเป็น 5 ประเภทหลัก (วิซชากร จารุศิริ และคณะวิจัย, 2563) ได้แก่

#### 1. ไพโรไลซิสแบบช้า

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) เป็นวิธีการดั้งเดิมที่ถูกนำมาแปรรูปใช้ในการผลิตถ่านจากไม้ โดยให้อุณหภูมิความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในภาวะดำเนินการอุณหภูมิต่ำประมาณ 400 - 600 องศาเซลเซียส (วิรุณ โมนะตระกูล, 2562) มีอัตราการให้ความร้อนต่ำด้วยอัตรา 3 - 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ในภาวะไร้ออกซิเจนและใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง ในการสลายตัวเชิงความร้อนภายในองค์ประกอบของชีวมวลเพื่อเพิ่มผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์ ถ้ากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเกิดขึ้นที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิสูงโดยมีอัตราการให้ความร้อนช้าหรือรักษาอุณหภูมิให้คงที่ จะให้ผลิตภัณฑ์ทั้งในรูปของแก๊สจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ ของเหลวและชาร์หากควบคุมกระบวนการให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำและให้ความร้อนช้าส่งผลให้เกิดถ่านชาร์มากขึ้นแต่สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่ไม่ต้องการให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็ง มักจะมีภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 500 - 600 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ และใช้เวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง

#### 2. ไพโรไลซิสแบบเร็ว

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงเชิงเคมีในการเปลี่ยนชีวมวลให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพหรือของเหลวเป็นหลัก และผลิตภัณฑ์ของแข็งเล็กน้อยในภาวะไร้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิปานกลาง 400 - 650 องศาเซลเซียส ระยะเวลาของไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นประมาณ 0.5 - 3 วินาที (Huo et al., 2020) ซึ่งมีหน่วยลดอุณหภูมิที่เป็นหน่วยควบคุม และหน่วยทำความเย็นเพื่อควบแน่นไอระเหยจากการสลายตัวให้เกิดการกลั่นตัวเป็นของเหลวอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนและน้ำ การกระจายตัวขององค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำมันขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล และภาวะดำเนินการเช่น ถ้าดำเนินการที่อุณหภูมิสูงมากเกินไปมักจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งจะอยู่ในรูปถ่านชาร์ และผลิตภัณฑ์แก๊สที่เหลืออยู่ซึ่งเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้สามารถนำไปใช้เป็นแก๊สป้อนกลับหรือแก๊สเชื้อเพลิงสำหรับให้ความร้อน

แก่เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส โดยทั่วไปสัดส่วนร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพประมาณร้อยละ 60 – 75 โดยน้ำหนัก ถ่านชาร์ประมาณร้อยละ 15 – 25 โดยน้ำหนัก และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ประมาณร้อยละ 10 – 15 โดยน้ำหนัก วัตถุประสงค์ที่ตั้งต้นมีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์จึงต้องนำชีวมวลมาทำให้แห้งและมีขนาดเล็กหรือต่ำกว่า 3 มิลลิเมตร ชีวมวลที่มีความชื้นสูงจะลดปริมาณและคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ ส่วนชีวมวลขนาดใหญ่จะขัดขวางการถ่ายเทความร้อนจนนำไปสู่การเปลี่ยนชีวมวลที่ไม่สมบูรณ์ น้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบที่มีซัลเฟอร์และไม่มีซัลเฟอร์สามารถใช้สารเคมีในการสกัดน้ำมันได้ดังนี้ คีโตน กรดอะซิติก อะซิโตน เมทานอล และกรดฟอร์มิก เป็นต้น

### 3. แฟลชไพโรไลซิส

กระบวนการแฟลชไพโรไลซิส (flash pyrolysis) คล้ายกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ มีภาวะดำเนินการอยู่ที่อุณหภูมิ 400 - 600 องศาเซลเซียส ซึ่งอัตราการให้ความร้อนมากกว่า 100 องศาเซลเซียสต่อวินาที แต่จะมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของสารระเหยในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยระยะเวลาสั้นมาก (ประมาณ 1 วินาที หรือน้อยกว่า) โดยภายใต้ภาวะดำเนินการนี้ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสประมาณร้อยละ 70 - 75 โดยน้ำหนัก และร้อยละผลได้ของแข็งหรือถ่านชาร์เกิดในปริมาณน้อย

### 4. ไฮโดรไพโรไลซิส

กระบวนการไฮโดรไพโรไลซิส (hydro pyrolysis) เป็นการสลายตัวเชิงความร้อนของชีวมวลในภาวะแก๊สไฮโดรเจนที่มีการอัดความดัน แต่ใช้ภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 150 - 220 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรไพโรไลซิสจะเกิดเป็นของเหลวโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของอนุมูลอิสระ (free radical) ที่เกิดขึ้นระหว่างการสลายตัวของชีวมวล ทำให้เกิดความเสถียรและมีการรวมตัวเป็นถ่านชาร์ในปริมาณที่ลดลงของเหลวหรือน้ำมันจากกระบวนการไฮโดรไพโรไลซิสประกอบด้วย ไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าน้ำมันไพโรไลซิสประเภทอื่น (Ding et al., 2020)

### 5. ไฮดรอลไพโรไลซิส

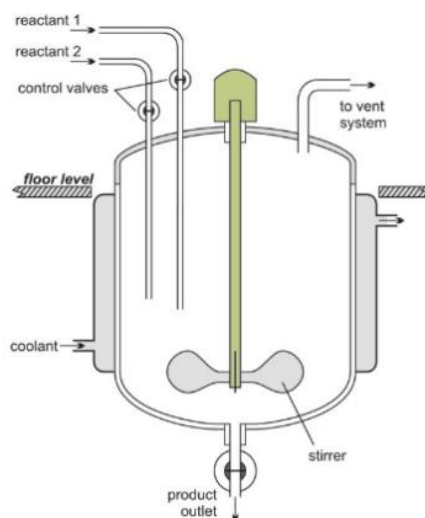
กระบวนการไฮดรอลไพโรไลซิส (hydrous pyrolysis) เป็นการสลายตัวเชิงความร้อนของชีวมวลในตัวกลางที่เป็นน้ำร้อนอัดความดัน ทำให้ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ร่วมกับปฏิกิริยาการสลายตัวเชิงความร้อนของชีวมวลได้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮดรอลไพโรไลซิสเป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบเป็นสารประกอบจำพวกออกซิเจนเนต หรือมีออกซิเจน

เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากมีออกซิเจนจากโมเลกุลของน้ำร่วมทำปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส (McCollom et al., 1999)

### 2.5.2 ประเภทเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสใช้สำหรับการแตกสลายเชิงความร้อนของวัตถุดิบและเกิดการแตกตัวของสารระเหยไปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ลักษณะต่าง ๆ ที่มีการให้ความร้อน โดยออกแบบให้มีอัตราการให้ความร้อน มีการควบคุมอุณหภูมิ และเวลาในเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ความจำเพาะของผลิตภัณฑ์ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

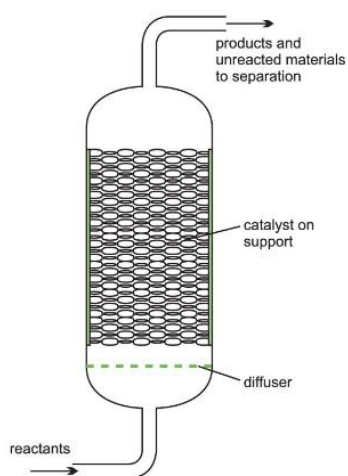
1. เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) และเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (semi-batch reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะเป็นระบบปิด สารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ไม่มีการไหลเข้าหรือไหลออกในขณะที่กำลังเกิดปฏิกิริยา ซึ่งข้อดี คือ การให้สารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์มีระยะเวลาที่นานมากขึ้นในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ค่าผลิตภัณฑ์จากการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นได้สูงขึ้น แต่ข้อเสีย คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหลากหลายต่ออัตราการผลิตหนึ่งกะ ต้นทุนแรงงานต่อกะสูง และมีความยากในการผลิตในสเกลที่มีขนาดใหญ่ เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะสามารถที่จะเติมสารตั้งต้นเข้าเครื่องปฏิกรณ์ และนำผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้ในเวลาเดียวกันจึงมีความยืดหยุ่นในการเติมสารตั้งต้นที่เวลานานมากขึ้นจึงเป็นข้อได้เปรียบในการเลือกจำเพาะต่อปฏิกิริยา ส่วนข้อเสีย คือ ค่าแรงงานสูงจึงเหมาะที่จะทำในสเกลเล็ก ๆ การไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและแบบกึ่งกะจะใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 300 - 800 องศาเซลเซียส สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส โดยทำการผสมตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นแล้วใส่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ บางเครื่องเครื่องปฏิกรณ์มีการติดตั้งอุปกรณ์ในการกวน



ภาพประกอบ 3 เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะที่มีการติดตั้งใบกวน

ที่มา: (The Essential Chemical Industry, 2013)

2. เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor) และเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธซ์เบด (fluidized bed reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ ตัวเร่งปฏิกิริยามักจะอยู่ในรูปของเม็ดและอัดตัวแน่นในเบดนิ่ง เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้จะออกแบบง่ายแต่มีข้อจำกัดบางข้อ เช่น พลาสติกที่ป้อนเข้า มีขนาดอนุภาคและรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการป้อน รวมทั้งการจำกัดเรื่องการทำปฏิกิริยาบนพื้นที่ก่อกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยา และในบางภาวะเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ที่ใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสขั้นทุติยภูมิ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นแรกสามารถที่จะป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ได้ง่ายซึ่งจะประกอบด้วยของเหลวและแก๊ส



ภาพประกอบ 4 เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

ที่มา: (The Essential Chemical Industry, 2013)

### 2.5.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการไพโรไลซิส มีดังนี้ (ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, 2562)

#### 1. องค์ประกอบของสารตั้งต้น

สารตั้งต้นในที่นี้ คือ พลาสติก มีความสำคัญต่อกระบวนการไพโรไลซิสเนื่องจากประเภทของพลาสติกแต่ละประเภทมีองค์ประกอบที่จำเพาะซึ่งส่งผลต่อช่วงของอุณหภูมิในการแตกสลายตัว รวมถึงส่งผลต่อองค์ประกอบอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิส ของแข็ง และแก๊สที่เกิดขึ้น

#### 2. อุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส

ในช่วงแรกอุณหภูมิมิมีผลอย่างมากต่อการแตกสลายของสารตั้งต้นหรือสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่จะจัดรูปเป็นร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยช่วงของอุณหภูมิมิส่งผลต่อปริมาณของไอรระเหยและองค์ประกอบของไอรระเหย การไพโรไลซิสแบ่งออกได้ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิมิระหว่าง 200 - 300 องศาเซลเซียส จะเป็นการระเหยของน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาคออกมาและมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย ต่อมาช่วงที่สอง คือ ช่วงอุณหภูมิมิระหว่าง 300 - 500 องศาเซลเซียส จะมีการแตกตัวทางความร้อนและชีวมวลจะปลดปล่อยสารระเหยประมาณ 3 ใน 4 ของสารระเหยทั้งหมด และในช่วงสุดท้ายที่อุณหภูมิมิระหว่าง 500 - 800 องศาเซลเซียส

จะมีการปลดปล่อยแก๊สออกมาพร้อมกับการแปลงสภาพของถ่านชาร์ แก๊สที่ปลดปล่อยออกมามาก เป็นไฮโดรเจนซึ่งเป็นแก๊สที่ไม่ควมแน่น ดังนั้นอุณหภูมิจะมีผลต่อปฏิกิริยาการไพโรไลซิส

### 3. อัตราการให้ความร้อน

ปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบ และปริมาณสารระเหยหรือแก๊ส อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที เป็นการให้อัตราความร้อนต่ำ คือ ผลต่างของ อุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าอุณหภูมิดังกล่าว การใช้อัตราการให้ความร้อนดังกล่าวส่งเสริมการ เปลี่ยนสถานะของสารตั้งต้นเป็นแก๊สเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนการให้อุณหภูมิที่มีผลต่างมากกว่า ประมาณ 105 องศาเซลเซียสต่อวินาที ถือเป็นการให้อุณหภูมิแบบเร็ว ผลิตภัณฑ์ส่วนมากเป็นชาร์ จะเกิดในอัตราการให้ความร้อนต่ำ ส่วนอัตราการให้ความร้อนที่สูงจะได้ชาร์ลดลง

### 4. เวลาในการไพโรไลซิส

เวลาที่พลาสติกสัมผัสความร้อนหรือเวลาที่พลาสติกอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็น ปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ คือ ต้องมีเวลานานเพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอน ความร้อนไปยังอนุภาคพลาสติก และเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสอย่างสมบูรณ์ (วิชากร จารุศิริ, 2561) หากเวลาที่พลาสติกสัมผัสความร้อนน้อยเกินไปจะเกิดการสลายตัวเชิง ความร้อนน้อย และหากเวลาที่พลาสติกสัมผัสความร้อนมากเกินไป จะทำให้เกิดการสลายตัวเชิง ความร้อนมากและส่งผลให้ได้ปริมาณแก๊สเพิ่มมากขึ้น เพราะสารระเหยต่าง ๆ เกิดการสลายตัวขึ้น ทุกัญมิตต่อไปได้อีก และปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันไพโรไลซิสจะมีแนวโน้มของร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์ลดลงตามไปด้วย

### 5. ความดัน

ความดันเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์สารระเหยอย่างมาก เนื่องจาก เมื่อให้ความดันเพิ่มมากขึ้นทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณลดลง ในทางกลับกันถ้าให้ความดันต่ำจะ ทำให้ผลิตภัณฑ์สารระเหยเพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาการแตกตัวจะเกิดได้ดีที่ ความดันสูง ทำให้เกิดแก๊สที่ได้มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนได้เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ให้ ความดันต่ำปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นแก๊สลดลงส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว น้ำมันทาร์ และถ่านชาร์เพิ่มมากขึ้น

### 6. ขนาดของอนุภาค

ขนาดของอนุภาคเป็นปัจจัยที่ควรให้ความสำคัญอีกปัจจัยหนึ่ง เนื่องจากขนาด ของอนุภาคส่งผลกระทบต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ เพราะขนาดอนุภาคของสารตั้งต้นมี ความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อนไปยังพลาสติกที่ป้อนเข้าสู่ระบบ การที่สารตั้งต้นมี

อนุภาคนาโนเล็กจะมีพื้นผิวที่สูงซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเครื่องปฏิกรณ์สูง และเกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้นทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าอนุภาคที่ใหญ่ แต่หากอนุภาคมีขนาดเล็กเกินไปเมื่อเกิดการสลายตัวขั้นแรกจะสลายตัวต่อไปยังขั้นทุติยภูมิได้อย่างรวดเร็วจนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น

#### 7. อัตราการไหลของแก๊สตัวพา

อัตราการไหลของแก๊สตัวพาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากมีอิทธิพลต่อการกระจายผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส อัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่สูงจะทำให้แก๊สตัวพาขจัดสารระเหยต่าง ๆ ออกจากเครื่องปฏิกรณ์เร็วจึงทำให้สารระเหยที่ควบแน่นได้ออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไปจนเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงขึ้น และทำให้ถ่านชาร์ที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สามารถแตกตัวทางความร้อนได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามหากอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่สูงเกินไปจะทำให้สารระเหยต่าง ๆ ออกจากเครื่องปฏิกรณ์เร็วเกินไปเช่นเดียวกัน และอาจทำให้ไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ถ้าอัตราการไหลของแก๊สตัวพาต่ำจะทำให้สารระเหยต่าง ๆ อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานส่งผลให้เกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิสูงขึ้นจนได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณของน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ลดลง

#### 2.5.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

สารอินทรีย์ถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสจะเจอกับความร้อนที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการจะเกิดการแตกสลายเชิงความร้อน สารอินทรีย์เปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถแบ่งออกเป็น 3 สถานะ ดังนี้ (วิชากร จารุศิริ และคณะวิจัย, 2563)

##### 1. ผลิตภัณฑ์ของแข็ง

ของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสหรือถ่านชาร์มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ในปริมาณที่สูงมักถูกใช้ประโยชน์เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการใด ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ แอนทราซีน แนฟทาลีน ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงภายในครัวเรือน ร้านอาหาร และอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาอิฐ หม้อไอน้ำ การอบแห้งผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เนื่องจากถ่านชาร์เป็นเชื้อเพลิงที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อม หรือสามารถนำถ่านชาร์ไปเผาความร้อนเป็นการกระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์ซึ่งมีคุณสมบัติในการดับกลิ่นและมีส่วนประกอบของกำมะถัน ในปริมาณที่น้อย เมื่อทำการเผาไหม้จะส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมได้น้อยอีกด้วย

## 2. ผลิตภัณฑ์ของเหลว

ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสหรือน้ำมันไพโรไลซิสเป็นองค์ประกอบของสารเคมีต่าง ๆ ซึ่งใช้คุณสมบัติการกลั่นในการจำแนกประเภทของน้ำมันได้ 5 ส่วน ดังนี้ น้ำมันเบา (light oil) คือ เบนซิน เบนโซลดิบ โทลูอิน มีจุดเดือดอุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) คือ ไพริดีน ฟีนอล มีจุดเดือดอุณหภูมิระหว่าง 200 - 250 องศาเซลเซียส น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) คือ ไดเมทิล แนพทาซีน มีจุดเดือดอุณหภูมิระหว่าง 250 - 300 องศาเซลเซียส น้ำมันแอนทาซีน (anthracence) คือ ฟลูออรีน ฟีนานทีน มีจุดเดือดอุณหภูมิระหว่าง 250 - 300 องศาเซลเซียส พีทซ์ (pitch) คือ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (red wax) ที่เหลือจากการกลั่นจะมีจุดเดือดอุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส

## 3. ผลิตภัณฑ์แก๊ส

แก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สแก๊สอินทรีย์และอินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย รวมทั้งสามารถนำมีเทนไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนหรือผลิตกระแสไฟฟ้า แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน และแอมโมเนียปนในปริมาณเล็กน้อย

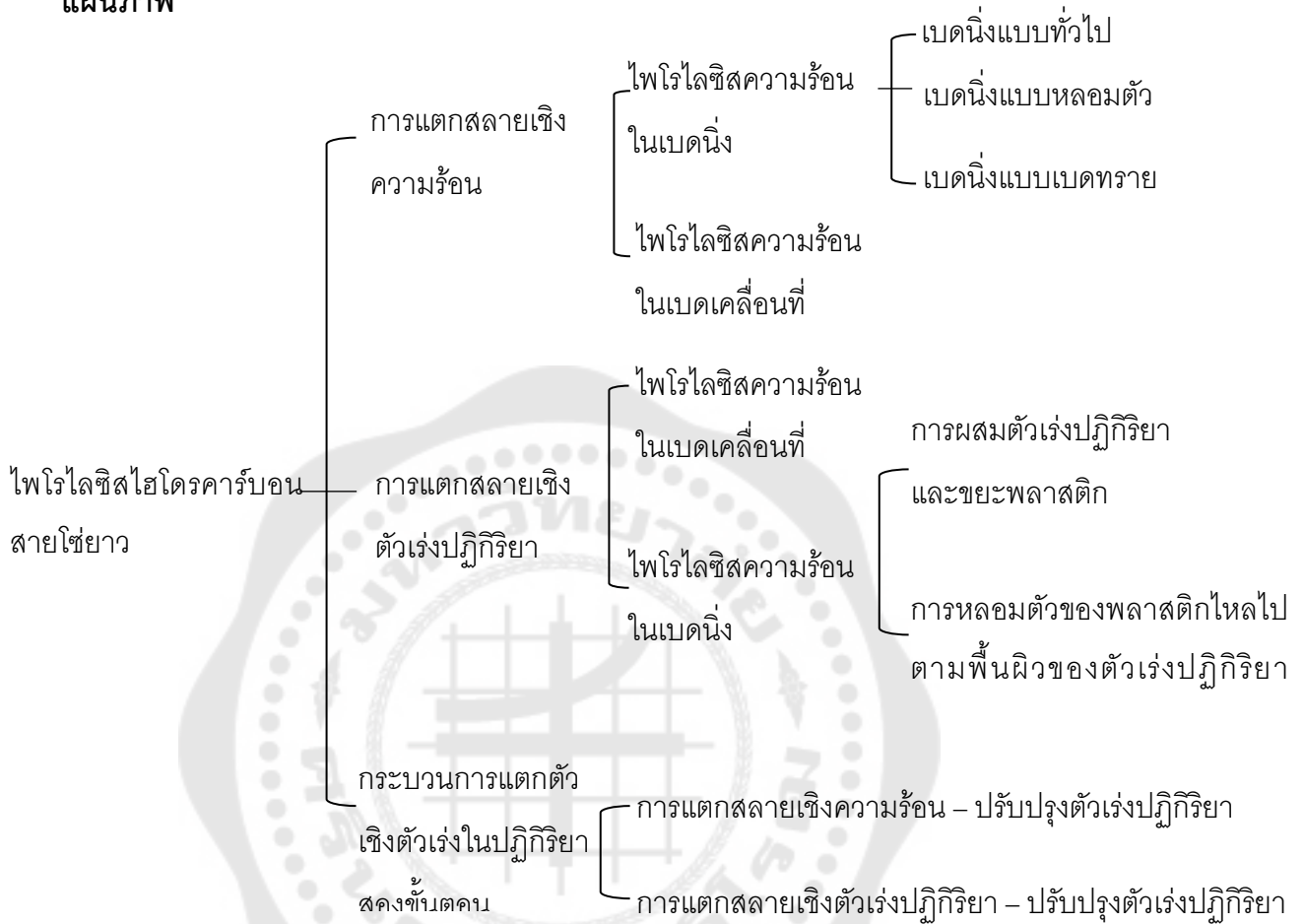
### 2.6 กระบวนการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

กระบวนการแตกสลายทางเคมีความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน มักเลือกใช้ปฏิกิริยาตามจุดมุ่งหมายของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการไพโรไลซิส จะอาศัยหลักการของการแตกสลายสายโซ่พอลิเมอร์จากอิทธิพลของอุณหภูมิ โดยมักดำเนินการที่อุณหภูมิตั้งแต่ 350 - 550 องศาเซลเซียส โดยขึ้นอยู่กับประเภทและคุณภาพของพอลิเมอร์ ซึ่งอาจออกแบบการทดลองได้จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) และเทคนิค Differential Thermal Gravimetric Analysis (DTG) เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกสลายเชิงความร้อน นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ในกระบวนการมีวัตถุประสงค์เพื่อให้กระบวนการดีพอลิเมอร์เซชันของขยะพลาสติกเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และช่วยลดอุณหภูมิในการแตกตัวของสารตั้งต้นอีกด้วย ดังนั้นเมื่อป้อนขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ และมีโครงสร้างซับซ้อนที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์หลากหลายชนิด จะทำให้เกิดการแตกตัวในขั้นต้นไป เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเป็นสายโซ่ยาว เมื่อได้รับความ อุณหภูมิ ที่ สูง ขึ้นที่

350 – 500 องศาเซลเซียส จะได้แก๊สจากการแตกตัวที่เป็นสารประกอบของไฮโดรคาร์บอนถูกนำออกจากเตาปฏิกรณ์ด้านบนเข้าสู่หน่วยควบแน่นโดยใช้น้ำเย็นเพื่อทำหน้าที่ควบแน่นไอของแก๊สไฮโดรคาร์บอนให้เป็นน้ำมันเหลวที่มีขนาดของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน  $C_5 - C_{28}$  ออกมา โดยน้ำมันเหลวนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดตั้งแต่  $C_5 - C_{28}$  มีสีน้ำตาลเข้ม มีความหนืดหรืออัตราการไหลเทใกล้เคียงกับน้ำมันเตา มีค่าความร้อนใกล้เคียงน้ำมันดีเซลคุณภาพดี สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงโดยการเผาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ หรือหากนำมาหมุนลำดับส่วนเพื่อแยกองค์ประกอบตามกรรมวิธีกลั่นน้ำมันดิบด้วย Simulated Distillation Gas Chromatography ใช้วิธีการตาม ASTM D 2887 ซึ่งวิเคราะห์ของเหลวตามคาบจุดเดือดของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมสามารถแบ่งออกเป็นองค์ประกอบที่เป็นแนฟทา เคโรซีน น้ำมันแก๊สออยล์ชนิดเบา น้ำมันแก๊สออยล์ชนิดหนัก และกากน้ำมัน



กระบวนการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีกระบวนการหลักแสดงในแผนภาพ



1. การแตกสลายเชิงความร้อน (thermal cracking) เป็นกระบวนการแตกสลายเชิงความร้อนในภาวะไร้ออกซิเจนหรือมีการกำจัดปริมาณออกซิเจน โดยใช้แก๊สตัวพา เช่น แก๊สเฉื่อยหรือแก๊สไฮโดรเจน เป็นกระบวนการแตกสลายเชิงความร้อน หรืออาจเรียกว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิสอย่างง่าย มีกระบวนการไม่ซับซ้อน เป็นกระบวนการที่ทำให้โมเลกุลขนาดใหญ่ของสารไฮโดรคาร์บอนชนิดหนักแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลงโดยใช้ความร้อนในการย่อยสลายพลาสติกเพื่อได้เป็นพลังงาน รวมถึงพันธะไฮโดรคาร์บอนที่มีช่วงจุดเดือดกว้าง นอกจากนี้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ยังต่ำ (ส่วนใหญ่เป็นแก๊สโซลีน และน้ำมันดีเซล) โดยน้ำมันแก๊สโซลีนประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโอเลฟินที่มีค่าออกเทน (Research Octane Number: RON) มีค่า RON ต่ำ ส่วนผลิตภัณฑ์ดีเซลจะมีจุดเยือกแข็งสูง แต่มีค่าดัชนีซีเทน (cetane index) ต่ำ ผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่ของพอลิเอทิลีนจากการแตกสลายเชิงความร้อนมักได้ผลิตภัณฑ์จำพวกอนุพันธ์ของแอลเคน (alkanes) และ  $\alpha$ -alkenes (วิชากร จารุศิริ, 2544)

2. การแตกสลายเชิงตัวเร่ง (catalytic cracking) กระบวนการแตกสลายเชิงความร้อนในภาวะไร้ออกซิเจนหรือมีการกำจัดปริมาณออกซิเจน โดยใช้แก๊สตัวพา เช่น แก๊สเฉื่อยหรือแก๊สไฮโดรเจน เป็นกระบวนการแตกสลายเชิงความร้อน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย เพื่อให้เกิดกระบวนการแตกสลายเชิงความร้อน และจัดตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ให้ค่าการเลือกเกิด (selectivity) ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ กระบวนการนี้จะมีปฏิกิริยาเฉพาะอย่าง เช่น การแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (chain scission) การเคลื่อนย้ายไฮโดรเจน (hydrogen transfer) และกระบวนการรวมตัว (condensation) โดยจะเกิดภายใต้อุณหภูมิและความดันที่แน่นอน จะขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะมีน้ำหนักโมเลกุลและโครงสร้างที่แน่นอน ตัวเร่งที่มีการใช้งานเป็นส่วนใหญ่ คือ silica-alumina โดยจะมีพื้นผิวเป็นกรดและสามารถให้ไฮโดรเจนได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเป็นตัวเพิ่มพันธะ isomerization และ isomeric hydrocarbon ในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้จะเกิดถ่านโค้กเป็นจำนวนมากที่เกิดขึ้นจะสะสมบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียการทำงานในที่สุด การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่จึงกระทำไดยาก (กันตธีรา คำภีระ, 2560)

กระบวนการแตกสลายเชิงความร้อนและการแตกสลายเชิงตัวเร่ง จะเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง จำนวนไอโซเมอร์และอะโรมาติกจึงสามารถเกิดเป็นจำนวนมากในระยะเวลาดังนั้น ๆ โดยปกติตัวเร่งปฏิกิริยาจะผสมรวมเข้ากับพลาสติกเกิดเป็นถ่านโค้ก ในขั้นตอนนี้เม็ดทรายที่อยู่ในพลาสติกจะรวมกับตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นไปไดยากที่จะนำตัวเร่งปฏิกิริยาห้กลับมาใช้ใหม่ แนวทางในการแก้ไขและพัฒนากระบวนการต่าง ๆ เช่น ขั้นตอนการทำความสะอาดพลาสติก และการหลอมละลายพลาสติกก่อนเข้ารวมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

3. Cracking-Catalytic Reforming สามารถเรียกอีกชื่อว่าการแตกตัวเชิงตัวเร่งในปฏิกิริยาสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกพลาสติกพอลิเมอร์จะถูกแตกสลายไปเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนภายใต้อุณหภูมิสูงผ่านตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อช่วยในการเปลี่ยนรูปผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จึงมีคุณภาพค่อนข้างสูง โดยในผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วยพันธะไฮโดรคาร์บอนที่มีช่วงจุดเดือดหลายจุด ในขณะที่สัดส่วนของน้ำมันเบา เช่น แก๊โซลีน และ ดีเซล จะเกิดน้อยและมีคุณภาพต่ำจะต้องปรับปรุงในส่วนของค่า RON จำนวนของไอโซเมอร์ การเกิดเป็นไซโคพาราฟิน (cycloparaffins) และอะโรมาติกสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการเปลี่ยนรูป นอกจากนี้ในขั้นตอนการแตกสลายเชิงความร้อนอาจมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไปด้วย เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จึงมีคุณภาพสูง ในกระบวนการดังกล่าวยังสามารถ Cracking-Catalytic Reforming

แล้วสามารถนำมาใช้ในการจัดการกับขยะพลาสติก นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยายังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (regeneration) ใช้ได้อีกครั้ง ด้วยเทคโนโลยีดังกล่าวได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว และประยุกต์ใช้งานในด้านอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง (วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ, 2554)

## 2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) คือ สิ่งทำให้อัตราปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเร็วขึ้นแล้วทำให้หรือเพิ่มอัตราการเข้าสู่สมดุลของปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะสัมผัสชั่วคราวกับสารตั้งต้นพร้อมทั้งสร้างพันธะร่วมกันอย่างน้อยหนึ่งตัว ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่ถูกใช้ตลอดปฏิกิริยาแต่จะมีส่วนร่วมเพียงบางขั้นตอน แล้วจะไม่ได้รับผลกระทบและอยู่ในสภาพเดิมหลังจากจบปฏิกิริยา (Luo et al., 2011)

### 2.7.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเนื้อเดียวกับสารตั้งต้นสามารถศึกษากลไกของปฏิกิริยาด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปีต่าง ๆ (Román-Martínez & Salinas-Martínez de Lecea, 2013) มีความจำเพาะต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงในการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยามีวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ที่รวมกันเป็นเนื้อเดียวกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มีทั้งตัวเร่งปฏิกิริยากรด และตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ข้อดี คือ มีประสิทธิภาพเร่งปฏิกิริยาดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ ต้นทุนในการผลิตต่ำ ลดปัญหาการสลายตัวของผลิตภัณฑ์เนื่องจากปฏิกิริยาอยู่ในภาวะปกติ ข้อเสีย คือ แยกผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา กับสารตั้งต้นออกจากกันได้ยากเนื่องจากอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน หลังขั้นตอนการแยกอาจต้องเพิ่มวิธีการกำจัดของเสีย (การะเกด เทศศร, 2556)

### 2.7.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งเนื้อผสมไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีวัฏภาคแตกต่างจากสารตั้งต้น เป็นสารที่มีการกระจายตัวระดับนาโนซึ่งจะดูดซับสารตั้งต้นและควบคุมการแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอย่างรวดเร็วและควบคุมได้ (Bligaard & Nørskov, 2008) ผลิตภัณฑ์ส่วนมากเป็นของแข็งมีการกระจายตัวของอนุภาคสูงบนพื้นที่ผิวบนตัวรองรับ มีความเสถียรสูงสามารถทนความร้อนและสารเคมี ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีพื้นที่ก่อกัมมันต์ (active site) สำหรับการดูดซับ (adsorption) สารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาแล้วคายผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาด้วยการคายซับ (desorption) เพื่อดูดซับสารตั้งต้นเข้ามาใหม่แล้วเกิดปฏิกิริยาต่อไป ข้อดี คือ แยกผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา กับสารตั้งต้นออกจากกันได้ง่ายเนื่องจากอยู่ในวัฏภาคเดียวกัน

มีคุณสมบัติคงประสิทธิภาพการใช้งานหลายรอบการใช้งาน และทนต่อภาวะดำเนินการที่รุนแรง ข้อเสีย คือ ประสิทธิภาพและความจำเพาะในการเร่งปฏิกิริยาต่ำ และมีอะตอมที่ถูกฝังอยู่ด้านในอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวนมากซึ่งไม่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (พฤษัย พงษ์วัน, 2555)

ตาราง 3 การเปรียบเทียบสมบัติและปัจจัยต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์กับตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

สมบัติและปัจจัย	ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์	ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์
- ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาเพื่อเข้าสู่สมดุลเมื่อเทียบปริมาณโลหะที่เท่ากัน	สูง	แปรค่าได้
- สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา	สูง	แปรค่าได้
- ภาวะของปฏิกิริยา	ไม่รุนแรง	รุนแรง
- อายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา	แปรค่าได้	นาน
- ความไวของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเกิดพอยซัน	ต่ำ	สูง
- ปัญหาจากการรแพร่	ไม่มี	อาจเกิดขึ้นได้
- การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่	แพง	ทำไม่ได้
- การปรับสมบัติเชิงโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเปลี่ยนอะตอมที่เป็นองค์ประกอบ	อาจทำได้	ทำไม่ได้

ที่มา: (พฤษัย พงษ์วัน, 2555)

## 2.8 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalysts preparation) พิจารณาจากสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สำคัญ ได้แก่ พื้นที่ผิว เสถียรภาพ และความทนทาน เนื่องจากคุณสมบัติและประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับวิธีที่การเตรียม โดยการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามี 2 วิธีหลัก ดังนี้

### 2.8.1 การเคลือบฝัง

การเคลือบฝัง (impregnation) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด และง่ายสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรม โดยใช้โลหะกัมมันต์ในสารละลายเติมเต็มภายในรูพรุน ซึ่งสารตั้งต้นโลหะกัมมันต์ต้องละลายได้ดีในน้ำหรือตัวทำละลายอื่น ๆ เช่น กลีโกลิอะเอซีเทต กลีโกลิอะไนเตรต กลีโกลิอะคลอไรด์ เป็นต้น และต้องมีความเข้มข้นของปริมาณสารละลายโลหะที่ใช้เติมรูพรุนตัวรองรับได้พอดี ซึ่งจะต้องให้ความร้อนแก่ตัวรองรับหรือกำจัดความชื้นในรูพรุนโดยการดูดอากาศช่วยให้สารละลายแพร่เข้าสู่รูพรุนได้ดีขึ้น แล้วทำการหยุดสารละลายในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ผิวหน้าภายนอกของตัวรองรับเปียกพอดี เพื่อให้โลหะกัมมันต์ทั้งหมดในสารละลายเข้าไปเติมเต็มภายในรู จึงจะต้องให้ความร้อนแก่ตัวรองรับ

### 2.8.2 การตกตะกอน

การตกตะกอน (precipitation) เป็นวิธีการเติมสารละลายมากกว่า 1 ชนิด ที่เป็นเกลือของโลหะลงในสารละลาย จำพวกอัลคาไลไนไฮดรอกไซด์ แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์หรือแอมโมเนียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดการตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ และให้ความร้อนเปลี่ยนตะกอนให้อยู่ในรูปโลหะออกไซด์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

#### 1. การตกตะกอนร่วม

การเชื่อมโยงข้ามทางเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่า 1 ชนิด นำมาละลายให้อยู่ในรูปของสารละลายแล้วผสมเข้ากับตัวรองรับ แล้วทำการเติมสารก่อตะกอน (precipitant) ลงไปนำไปอบแห้งหรือเผา เพื่อไล่ความชื้นและสิ่งปนเปื้อนออก

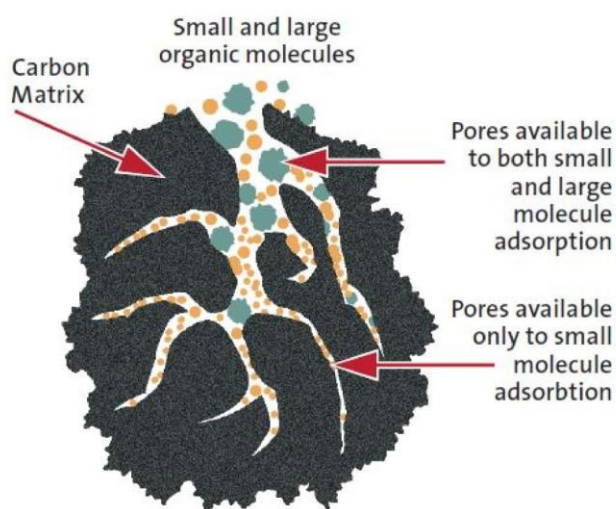
#### 2. การตกตะกอนและเคลือบฝังบนตัวรองรับ

เป็นเทคนิคการเติมโลหะ เช่น เหล็ก นิกเกิล แมกนีเซียม เป็นต้น ให้อยู่ในรูปของสารละลายแล้วทำการเติมตัวรองรับลงในสารละลาย และปรับปริมาตรน้ำให้ได้ตามอัตราส่วนตัวรองรับต่อปริมาตรน้ำที่ 1 ต่อ 4 นำไปกวนพร้อมกันพร้อมให้ความร้อน การเติมสารก่อตะกอนจะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไปพอกออยู่บนตัวรองรับ แล้วหลังจากนั้นล้างด้วยน้ำหรือสารก่อตะกอนจึงทำการอบแห้งแล้วนำไปเผา ตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นเม็ดผงไฮโดรเจล และไฮโดรโซล

## 2.9 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) คือ เป็นตัวดูดซับคาร์บอนที่สังเคราะห์จากวัสดุคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนสูง มีปริมาณเถ้าต่ำ (Ngu, 2024) ที่ได้จากการนำถ่านไปกระตุ้นด้วย

วิธีทางกายภาพหรือสารเคมีก่อนการใช้งานเพื่อให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่าน เกิดรอยแตกหรือรูพรุนในระดับนาโนเมตรก่อนการใช้งาน ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนจำนวนมากที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กได้มากยิ่งขึ้น (จวีวรรณ, 2562) ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แบบจำลองโครงสร้างการดูดซับของถ่านกัมมันต์

ที่มา: (Vayo, 2565)

### 2.9.1 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ผงถ่านกัมมันต์ (powdered activated carbon) นิยมใช้ในการผลิตยารักษาโรค การล้างผัก เป็นสารดูดซับ (Okoniewska et al., 2008) ใช้ในการแยกแก๊ส และทำให้แก๊สบริสุทธิ์ เพื่อใช้สำหรับการกำจัดความชื้นจากแก๊ส ลดมลพิษและกักเก็บแก๊สธรรมชาติ ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ (Sircar et al., 1996) ใช้ในอุตสาหกรรมหรือครัวเรือน ที่ต้องการทำให้น้ำมันความบริสุทธิ์มากขึ้น และกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์

### 2.9.2 การผลิตถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ผลิตจากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น กะลามะพร้าว ไม้ และเมล็ดพืช เป็นต้น ซึ่งกระบวนการผลิตมี 2 วิธี (จวีวรรณ เพ็งพิทักษ์, 2562) ได้แก่

1. การกระตุ้นทางกายภาพ (physical reactivation) มีสองขั้นตอน ในขั้นแรกเป็นกระบวนการทำให้เกิดถ่านหรือคาร์บอนไนเซชัน โดยการนำวัตถุดิบตั้งต้นมาไพโรไลซิสในภาวะแก๊สเฉื่อยที่อุณหภูมิ 300 – 800 องศาเซลเซียส จะเกิดการแตกของพันธะที่มีความเสถียรน้อยกว่าจะปล่อยสารระเหยง่ายของวัตถุดิบตั้งต้นที่อยู่ในรูปของแก๊สและทาร์ รวมถึงถ่านที่มีโครงสร้างรูพรุนเบื้องต้น คือ มีความสามารถในการดูดซับต่ำ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ปล่อยออกมาระหว่างการแตกตัวส่วนใหญ่เป็นทาร์แล้วเกิดการรีพอลิเมอไรเซชันและควบแน่นอยู่บนพื้นผิวของอนุภาค ทำให้เกิดการปิดกั้นรูพรุน ขั้นตอนที่สองเป็นการกำจัดคราบทาร์ออกถือเป็นการขยายรูพรุนและเพิ่มความสามารถในการดูดซับ โดยนำถ่านมากระตุ้นภาวะของคาร์บอนไดออกไซด์หรือไอน้ำที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 – 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งนำไปสู่การแปรสภาพเป็นแก๊สบางส่วนของถ่านทำให้เกิดโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ และเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ การกระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เอื้อต่อการเกิดรูพรุนขนาดเล็ก ในขณะที่การกระตุ้นด้วยไอน้ำจะทำให้รูพรุนกว้างขึ้น ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมด้วยไอน้ำจึงมีรูพรุนขนาดเล็กที่ต่ำกว่า โดยมีรูพรุนขนาดกลางและใหญ่สูงขึ้น (Pallarés et al., 2018)

2. การกระตุ้นด้วยสารเคมี (chemical activation) เป็นการนำวัตถุดิบตั้งต้นชุบด้วยสารเคมีที่จะกระตุ้นการทำงาน เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซิงค์คลอไรด์ และกรดฟอสฟอริก จากนั้นวัตถุดิบตั้งต้นจะถูกนำไปผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส แล้วนำมาล้างเพื่อกำจัดสารเคมีกระตุ้นออกจากผลิตภัณฑ์ เพื่อนำสารกระตุ้นกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งในระดับอุตสาหกรรมการกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพเป็นที่ต้องการมากกว่า เนื่องจากสามารถควบคุมและพัฒนารูพรุนขนาดเล็กได้มากขึ้น และจำกัดข้อกำหนดสำหรับสารเคมี พร้อมทั้งช่วยลดต้นทุนของกระบวนการและมลภาวะที่เกี่ยวข้อง (Pallarés et al., 2018) ในบางครั้งการกระตุ้นด้วยวิธีดังกล่าวส่งผลให้พบสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ได้อีกด้วย

### 2.9.3 ประเภทของถ่านกัมมันต์ตามลักษณะทางกายภาพ

1. ถ่านกัมมันต์แบบผง (powdered activated carbon) ถ่านกัมมันต์ผงในรูปแบบดั้งเดิมของถ่านเหมาะกับการเติมใส่ของเหลวโดยตรงมากกว่าการเติมลงในท่อ แล้วให้ของเหลวไหลผ่านผงถ่าน จะเป็นการลดการสูญเสียผงถ่านได้ง่ายกว่า ข้อเสีย คือ ปัจจุบันไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ (Newcombe, 2006) ที่นิยมใช้ในปัจจุบันโดยทั่วไปมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 – 0.25 มิลลิเมตร

2. ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด (granular activated carbon) มีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่เหมาะสำหรับดูดซับแก๊ส ไอระเหย กรองอากาศ มีอัตราการแพร่กระจายที่เร็วกว่า

และพื้นผิวภายนอกเล็กกว่า รวมถึงการนำไปวางเพื่อกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์ตามครัวเรือน ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดมีราคาสูงกว่าแบบผงประมาณสองถึงสามเท่า แต่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ การใช้งานถ่านกัมมันต์แบบเม็ดเป็นกระบวนการหลักในการกำจัดอินทรีย์วัตถุ รวมถึงมลพิษขนาดเล็ก (Brandt et al., 2017) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 – 5 มิลลิเมตร

3. ถ่านกัมมันต์แบบอัดแท่ง (extruded activated carbon) เหมาะสำหรับการกรอง และดูดซับแก๊สเพราะมีความแข็งแรงเชิงกลสูงและมีปริมาณฝุ่นต่ำ มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.81 – 45 มิลลิเมตร

4. ถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (impregnated carbon) ถ่านกัมมันต์ที่เติมสารอนินทรีย์ลงในโครงสร้าง เช่น โลหะเงิน ไอโอดีน ไอออนบวกจำพวกอะลูมิเนียม แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) ลิเทียม (Li) แคลเซียม (Ca) ทำให้นำไปใช้ฆ่าเชื้อโรคได้ และใช้ในระบบกรองน้ำ

5. ถ่านกัมมันต์เคลือบพอลิเมอร์ (polymer-coated carbon) ถ่านกัมมันต์ถูกนำไปเคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่เข้ากันได้ทางชีวภาพ (biocompatible polymer) ทำให้ผิวถ่านมีความเรียบและความสามารถในการซึมผ่านของสารได้ โดยไม่ปิดกั้นรูพรุนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการแพทย์เป็นการใช้ดูดซับสารพิษออกจากเลือด

## 2.10 โดโลไมต์

โดโลไมต์ (dolomite) เป็นแร่ธาตุธรรมชาติได้จากตะกอนของแคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) ทับถมกันมีส่วนประกอบทางเคมีในรูปแคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) มีแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 30.4 แมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 21.7 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 47.9 โดยปกติโดโลไมต์มีสัดส่วนของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อแมกนีเซียมคาร์บอเนตประมาณ 1:1 โดยโดโลไมต์ที่พบในธรรมชาติจะมีลักษณะเป็นรูปผลึกหกเหลี่ยม สีเหลืองขมเขียว บางครั้งจะโค้งเป็นรูปคล้ายอานม้า สามารถพบผลึกรูปทรงอื่น ๆ ได้เล็กน้อยอาจพบเป็นเม็ดหยาบหรือเม็ดเล็กที่เกาะตัวกัน ปกติสีของโดโลไมต์จะมีสีเนื้ออมชมพู สีขาว เทา เขียว น้ำตาล สีดำ หรือไม่มีสี เนื้อแร่เป็นแบบโปร่งใสและโปร่งแสง พื้นที่ในประเทศไทยที่มีการพบโดโลไมต์ ได้แก่ จังหวัดกาญจนบุรี จังหวัดพังงา จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดกระบี่ เป็นต้น โดโลไมต์ที่พบเกิดขึ้นแบบทุติยภูมิ ซึ่งเกิดจากการที่หินปูนที่มีอยู่แต่เดิมถูกแทนที่ด้วยธาตุแมกนีเซียม การนำโดโลไมต์ไปใช้ประโยชน์เป็นหินก่อสร้าง ทำปูนซีเมนต์ บางชนิดใช้ทำฉนวนกันไฟในการบุเตาถลุงเหล็ก รวมถึงเป็นเตาหลอมเหล็กกล้าขั้นต้น มีการนำโดโลไมต์ไปบดเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมแก้วบาง เช่น พกแก้วแผ่น และใช้เป็นหินประดับเนื่องจากโดโลไมต์เป็นสินแร่หลักของโลหะแมกนีเซียม รวมไปถึงการนำไปใช้ประโยชน์ในทางด้านการเกษตรในการ

ช่วยปรับค่าความเป็นกรดในดินและน้ำ สามารถเป็นธาตุอาหารรองหรือเสริมให้แก่พืชได้ เนื่องจากโดโลไมต์มีลักษณะทางเคมีเป็นด่าง จึงนิยมนำมาใช้ในการปรับสภาพดินในพื้นที่ทางการเกษตรที่มีสภาพเป็นกรดให้มีความเป็นด่างเพิ่มขึ้น

## 2.11 การออกแบบการทดลอง

### 2.11.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเป็นการศึกษาผลของปัจจัย (factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น โดยที่แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-) กับสูง (+) โดยผลตอบ (response) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของปัจจัยหนึ่ง ผลหลัก (main effect) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัย เนื่องจากว่ามันเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง (ปราเมศ ชูติมา, 2545) การศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยหรืออันตรกิริยา (interactions) กรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปัจจัย A B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถแยกได้ 3 ประเภท ดังนี้ (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551)

#### 1. ผลกระทบหลักหรือผลกระทบปัจจัยเดียว (main effect)

ผลกระทบที่พิจารณาปัจจัยเดียว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A B และ C

#### 2. ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two-Factors หรือ 2-ways interactions)

ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของ AB BC และ AC

#### 3. ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three-Factors หรือ 3-ways interactions)

ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกัน ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC การทดลองแฟกทอเรียลแบ่งออกได้เป็น 2 กรณีหลัก คือ

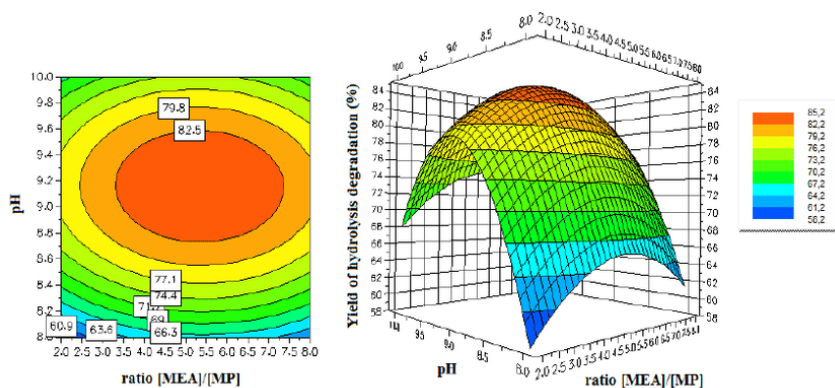
1) การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment) เป็นการทดลองที่ทำขึ้นสำหรับศึกษาปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปได้ทุกกรณี ซึ่งศึกษาผลกระทบปัจจัยเดียวที่เป็นปัจจัยหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย จำนวนการทดลองทั้งหมดที่เป็นไปได้ (ไม่มีทำซ้ำ) มีค่า  $a^n$  โดยที่  $a$  = จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา  $n$  = จำนวนปัจจัยในกรณีศึกษา ในกรณีที่ต้องการศึกษา 4 ปัจจัย แต่ละปัจจัยศึกษาที่ 3 ระดับ เพราะฉะนั้นจำนวนของการศึกษาจะเป็น  $3^4$  จึงเรียกรูปการทดลองนี้  $3^4$  แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ ( $3^4$  Full Factorial Experiment) (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551) ข้อดีของการทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ คือ ความเป็นออร์ทอกอนัล (orthogonality) ไม่มีโครงสร้างที่ซ้ำซ้อน และศึกษาได้ทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม

ข้อเสีย คือ ต้องใช้เวลาและทรัพยากรจำนวนมากในการทำการทดลอง (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551)

2) การทดลองแฟกทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment) นิยมใช้ในการทดลองที่มีทรัพยากรอย่างจำกัด โดยทั่วไปนิยมใช้ศึกษาที่ 2 ระดับกรณีความสัมพันธ์แผนการทดลอง  $2^{k-p}$  หรือ  $3^{k-p}$  เป็นรูปแบบการทดลองแบบออร์ทอกอนัล ซึ่งผู้ทดลองสามารถศึกษาความสัมพันธ์ของผลกระทบหลักและร่วมได้ตามที่ต้องการแต่ไม่ใช่ทั้งหมด ข้อดี คือ ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลอง เนื่องจากการทดลองที่ใช้ลดรูปลงจากการทดลองเต็มรูป ข้อเสีย คือ การตีความผลกระทบที่เกิดขึ้นของปัจจัยจะมีความยากขึ้น เกิดจากความซ้ำซ้อนในโครงสร้างของผลกระทบ (ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, 2551)

### 2.11.2 โปรแกรมดีไซน์เอ็กเพิร์ต

พัฒนาขึ้นจากบริษัท state-Ease ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1998 และได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง Ease Design-Expert เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่สามารถศึกษาเรียนรู้ได้ง่ายเป็นโปรแกรมที่จะช่วยในการออกแบบการทดลองให้มีระยะเวลาในการทดลองที่สั้นลง ช่วยประหยัดทรัพยากร เวลา ค่าใช้จ่ายในการทำการทดลองเนื่องจากการทดลองที่โปรแกรมวิเคราะห์ออกมา จะทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นได้ตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไปจนถึง 50 ตัวแปรต้นที่ต้องการทดสอบความสัมพันธ์กับตัวแปรตามได้ในการออกแบบการทดลองเพียงครั้งเดียว สาเหตุนี้โปรแกรมดังกล่าวจึงเป็นที่นิยมในหมู่นักวิจัยทางวิศวกรรม ทางการแพทย์ และการทดลองวิทยาศาสตร์ เป็นต้น เมื่อนักวิจัยทำการทดลองตามการออกแบบของ Ease Design-Expert ครบทุกการทดลองแล้ว สามารถนำผลการทดลองที่ได้มาสร้างแบบจำลองในการทำนาย (predicted model) ของตัวแปรตามที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนค่าตัวแปรต้นต่าง ๆ ที่ต้องการทำการศึกษา ซึ่งแบบจำลองในการทำนายที่เลือกจะดูวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบความเหมาะสมทางสถิติ (Analysis of variance, ANOVA) หลังจากการทดสอบความเหมาะสมทางสถิติแล้ว Ease Design-Expert สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม โดยสามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อจำกัด (optimization) ของตัวแปรต้นและตัวแปรตามให้ตัวแปรตามสูงสุดตามค่าที่กำหนดไว้ ความสัมพันธ์ที่ได้จะออกมาในรูปแบบของกราฟพื้นที่ผิวการตอบสนอง (Response surface plot) เป็นรูปกราฟสามมิติที่แสดงความสัมพันธ์ได้อย่างชัดเจน



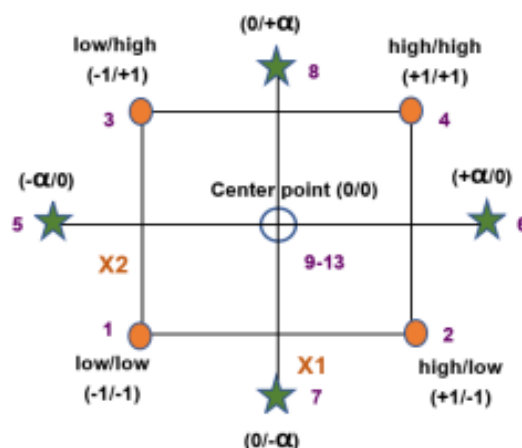
ภาพประกอบ 6 พื้นที่ผิวการตอบสนอง (Response surface plot) จาก Ease Design-Expert

ที่มา: (Boudjema, 2015)

### 2.11.3 การออกแบบส่วนประสมกลาง

การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) คือ การออกแบบ  $2^k$  ถูกมาใช้พิตแบบจำลองอันดับหนึ่ง แล้วพบว่าแบบจำลองนี้ไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ใช้จึงทำการพิตแบบจำลองอันดับที่สองโดยการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกน เพื่อให้สามารถใส่พจน์ควอดราติกลงในแบบจำลองได้ การออกแบบส่วนประสมกลางเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์ 2 ตัวในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนด คือ ระยะทาง  $\alpha$  ของรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบกับจำนวนจุดศูนย์กลาง  $n_c$  ซึ่งการเติมจุดศูนย์กลางให้แก่การออกแบบ  $2^k$  จะทำการทดลองจำนวน  $n$  เปรดิเคตที่จุด  $x_i = 0$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) จุดกลางที่เติมเข้าไปไม่ส่งผลต่อการประมาณค่าตามปกติของการออกแบบ  $2^k$  เมื่อเติมจุดศูนย์กลางเข้าไป  $k$  ที่ถูกเติมไปจะถูกสมมติให้เป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (ปราเมศ ชูติมา, 2545)

การออกแบบส่วนประสมกลางเป็นเทคนิคออกแบบที่ใช้ตัวแปรต้น 2 ตัวแปรเป็นหลัก โดยตัวแปรทั้งสองตัวจะส่งผลต่อตัวแปรตาม เทคนิคนี้สามารถศึกษาระยะห่างระหว่างตัวแปรต้นและจุดกึ่งกลางดังกล่าวต่อไปนี้ได้แก่ -1 0 และ 1 โดยตำแหน่งการทดลอง คือ  $2n$  เมื่อ  $n$  หมายถึงจำนวนตัวแปรต้น กรณีที่มีตัวแปรต้นเป็น 2 ปัจจัย จะมี 4 ตำแหน่งการทดลอง รวมถึงอีก 1 ตำแหน่งการทดลองที่เป็นตรงกลาง (center point) ซึ่งตำแหน่งในการทดลองแสดงรายละเอียดดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 ตำแหน่งในการทดลองของการออกแบบส่วนประสมกลาง

ที่มา: (ปิยะวดี ศรีวิชัย, 2021)

สิ่งที่ควรระมัดระวังในการกำหนดค่าของตัวแปรต้น คือ การกำหนดค่าตัวแปรให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของ  $-1$  และ  $+1$  เนื่องจากผู้วิจัยจะต้องทำการแทนค่าจริงลงในตัวแปรต้น ซึ่ง  $-1$  เป็นค่าที่ต่ำที่สุด และค่า  $+1$  เป็นค่าที่สูงที่สุด ซึ่งในบางกรณีที่ตัวแปรต้นไม่สามารถมีค่าติดลบได้ เนื่องจากช่วงความห่างของ  $-1$  และ  $+1$  ที่ไม่เหมาะสมกับการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรมจึงทำให้ค่า  $-\alpha$  ที่ได้ออกมาจากการออกแบบการทดลองมีค่าติดลบ และไม่สามารถทำการทดลองได้ เช่น ค่าความเป็นกรดต่างที่ไม่สามารถติดลบหรือมีทศนิยมหลาย ๆ ตำแหน่งได้ เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยไม่สามารถตรวจวัดได้ที่มีความละเอียดดังกล่าว ดังนั้นการแทนค่าจริงลงในโปรแกรมต้องคำนึงความเหมาะสมของตัวแปรต้นที่ต้องการศึกษาด้วย (ปิยะวดี ศรีวิชัย, 2021) ในกรณีการไฟโรไลซิสจะต้องใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาหะระหว่างการทำการทดลองไม่สามารถขาดได้ โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางที่มีตัวแปรต้น 4 ปัจจัย ถ้าแทนค่าต่ำสุดของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที) ด้วย 20 ค่าสูงสุด 80 ค่ากลางที่ได้จากโปรแกรมเป็น 50 ส่วนค่า  $-\alpha$  ที่ได้จะเป็น  $-10$  ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ จึงต้องมีการปรับแก้ค่าจริงที่ใช้ใส่ลงในโปรแกรม เพราะฉะนั้นจึงจะต้องใช้ความระมัดระวังในการใช้การออกแบบดังกล่าวในการออกแบบการทดลอง

## 2.12 การศึกษาอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกัน

การหาอิทธิพลเสริมกันหรือหักล้างกัน (synergistic study) ของสารป้อน (feedstock) 2 ชนิด ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ หรือการหาอิทธิพลเสริมกันหรือหักล้างกัน การเปรียบเทียบระหว่าง

ค่าจริงที่ได้จากการทดลองของสองสารป้อนต่อผลิตภัณฑ์กับค่าที่ได้จากการคำนวณเชิงทฤษฎี ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (Ba et al., 2023)

$$\Delta Y = Y_{\text{Therical}} - Y_{\text{actual}} \quad (2.1)$$

$$Y_{\text{Therical}} = W_1 X_1 + W_2 X_2 \quad (2.2)$$

เมื่อ  $Y_{\text{Therical}}$  คือ ค่าที่ได้จากทฤษฎี

$Y_{\text{actual}}$  คือ ค่าที่ได้จากการทดลอง

$W_1$  คือ สัดส่วนโดยมวลของสารป้อนชนิดที่ 1

$W_2$  คือ สัดส่วนโดยมวลของสารป้อนชนิดที่ 2

$X_1$  คือ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เมื่อใช้สารป้อนชนิดที่ 1

$X_2$  คือ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เมื่อใช้สารป้อนชนิดที่ 2

การศึกษาอิทธิพลเสริมกันหรือหักล้างกัน ช่วยให้สามารถอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยา หรืออันตรกิริยาระหว่างสารป้อน 2 ชนิดที่เข้าร่วมกันในปฏิกิริยา ส่งผลต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา และให้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมาน้อยตามอิทธิพลเสริมกันหรือหักล้างกันของสารป้อน

### 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Khazaal and Abdulaaima (2023) ศึกษาประสิทธิภาพในการรีไซเคิลขยะพลาสติกในชุมชนที่เป็นแหล่งเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญ ขยะพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก ได้แก่ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำถูกเปลี่ยนให้เป็นน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (ThPP) และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ (Cat-PP) โดยใช้พลาสติก 500 กรัม แล้วเปิดแก๊สไนโตรเจน 2 บาร์ เพื่อไล่ออกซิเจนออกจากระบบเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นให้อัตราความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนได้อุณหภูมิที่ต้องการ นำพลาสติกวิเคราะห์กราวิเมตริกของเทอร์โมภายใต้อุณหภูมิ 25 – 500 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มอุณหภูมิ 5 และ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าอุณหภูมิต่ำสุดของการเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการย่อยสลายของพอลิสไตรีน 291 – 422 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที การย่อยสลายพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง 334 – 425 องศาเซลเซียส ที่การให้อัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แต่อย่างไรก็ตามพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงให้ความหนาแน่นสูงสุด 0.94 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวสูงสุด 190 องศาเซลเซียส ซึ่งพลาสติกชนิดนี้มีพลังงานกระตุ้นสูงสุดเมื่อเทียบกับพลาสติกชนิดอื่น ๆ และอัตราการให้ความร้อนที่เหมาะสมต่อ

พลาสติกอยู่ที่ 5 องศาเซลเซียสก่อนหน้าที่ การวิเคราะห์เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น  $500 - 4,000 \text{ cm}^{-1}$  พบว่าน้ำมันมีส่วนประกอบของแอลิฟาติกกับอะโรมาติกเป็นหลัก และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ การให้ร้อยละของเหลวของพลาสติก พอลิพรอพิลีน > พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ > พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง > พอลิสไตรีน จากเครื่องไพโรไลซิสแบบกึ่งกะอยู่ที่ร้อยละ 67.6 - 59.25 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้ของเหลวที่ได้จากพอลิพรอพิลีนมีร้อยละของเหลวที่เป็นแก๊ส (C<sub>6</sub> - C<sub>12</sub>) อยู่ร้อยละ 77.5 โดยมีไอโซพาราฟินสูงสุดร้อยละ 12.52 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับน้ำมันไพโรไลซิสของพลาสติกชนิดอื่น ร้อยละของเหลวจากพลาสติก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ > พอลิพรอพิลีน > พอลิสไตรีน > พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo-w/ซีโอไลต์ (Z-503) ส่งผลต่อการแตกตัวซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของแก๊สเมื่อเทียบกับน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการนี้อยู่ที่ร้อยละ 55.1 - 68.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้แนวโน้มการได้น้ำมันไพโรไลซิสเป็นดีเซล (C<sub>12</sub> - C<sub>24</sub>) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสกับน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไป สรุปได้ว่าน้ำมันไพโรไลซิสสามารถเป็นหนึ่งตัวเลือกต่อจากน้ำมันทั่วไปที่จะสามารถเลือกใช้งานได้ เพื่อเป็นหนึ่งในทางเลือกแนวทางการใช้พลังงานที่มีศักยภาพสูงพร้อมกับเทคโนโลยีรีไซเคิลที่มีประสิทธิภาพที่จะช่วยแก้ไขปัญหามลภาวะจากพลาสติก

Moorthy Rajendran et al. (2023) ศึกษาการผลิตน้ำมันด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกหลากหลายชนิด ได้แก่ ถุงใส่ขนมปัง ถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน ถุงพลาสติกใส่ช้อนส้อมที่วางขวดพลาสติก ที่หุ้มสายเคเบิล นำมาตัดให้มีขนาด 3 เซนติเมตร โดยปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิระหว่าง 340 - 440 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทดลองหนึ่ง การทดลองจะใช้เวลาหนึ่งชั่วโมง ขยะพลาสติกจะแตกตัวที่อุณหภูมิที่เหมาะสมไปเป็นสารระเหย แล้วถูกส่งต่อไปในหน่วยควบแน่นที่มีระบบหมุนเวียนน้ำเพื่อทำให้สารระเหยกลั่นตัวเป็นน้ำมัน จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ 425 องศาเซลเซียสได้ร้อยละของของเหลวที่ดีที่สุด น้ำมันไพโรไลซิสกับน้ำมันดีเซลทั่วไปมีคุณสมบัติคล้ายกัน แต่จะต่างกันที่ค่าความหนืดที่น้ำมันดีเซลทั่วไปมีค่าความหนืดต่ำกว่า อาจมีสาเหตุมาจากเนฟทาเบาและเนฟทาหนักในน้ำมัน ส่วนคุณสมบัติอื่น ๆ ของน้ำมันไพโรไลซิสกับน้ำมันดีเซลทั่วไปมีค่าดังนี้ ค่าความร้อน 42.58 เมกะจูลต่อกิโลกรัม กับ 44.27 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ความหนาแน่น 783 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร กับ 837 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความถ่วงจำเพาะเอพีไอ 43.67 กับ มากกว่า 31.1 และเลขซีเทน 52.7 กับ 53.7 คุณสมบัติดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าน้ำมันทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน

ผลการวิเคราะห์เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ยืนยันพบพันธะ C-H C=C และ =C-H ผลจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรีพบอะโรมาติกมากที่สุด ซึ่งอยู่ในช่วงของคาร์บอน C<sub>9</sub> – C<sub>17</sub> น้ำมันไพโรไลซิสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในการผลิตความร้อนและเป็นพลังงาน ส่วนของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสส่วนใหญ่จะนำไปทำเป็นวัสดุปูพื้นถนน

Janarthanan and Sivanandi (2022) ศึกษาการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก ได้แก่ พอลิพรอปิลีน พอลิเอทิลีน และพอลิสไตรีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ โดยทำการล้างขยะให้สะอาดแล้วนำไปบดย่อยให้เป็นผงแล้วนำมาขึ้นรูปใหม่ให้มีขนาดเฉลี่ย 0.5 เซนติเมตร ใช้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 10 มิลลิลิตรต่ออนาที และอุณหภูมิสูงสุดที่ 500 องศาเซลเซียส โดยทำการใส่วัสดุดิบที่อุณหภูมิ 350 – 450 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละของเหลวสูงสุดร้อยละ 78 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิระหว่าง 370 – 380 องศาเซลเซียส ได้ค่าความร้อนของของเหลว 38.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม นำน้ำมันไพโรไลซิสวิเคราะห์กาวิเมตริกของเทอร์โมแกรวิเมตริก ผลการวิเคราะห์ระบุว่าพลาสติกเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสแล้วแตกตัวเต็มที่เมื่ออุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ทำการวิเคราะห์ เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าในน้ำมันไพโรไลซิสมีส่วนประกอบของหมู่แอลเคนกับ สารประกอบอะโรมาติก และวิเคราะห์เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ ผลการวิเคราะห์ยืนยันสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ในช่วง C<sub>7</sub> – C<sub>40</sub> สรุปได้ว่าเชื้อเพลิงไพโรไลซิสที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับดีเซล จึงได้มีการนำไปทดลองใช้ในเครื่องยนต์ต่อนเดียวดีเซลแบบสี่สูบ โดยการผสมอัตราส่วนของเชื้อเพลิงไพโรไลซิสกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนร้อยละ 0 - 100 โดยน้ำหนัก แล้วทำการเติมน้ำมันใส่ในเครื่องยนต์ตั้งแต่ร้อยละ 25 - 100 จากการศึกษาสมรรถนะและการปล่อยไอเสียของเครื่องยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของน้ำมันดีเซลทั่วไปพบว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพเมื่อเติมน้ำมันใส่เครื่องยนต์เต็มถัง โดยมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเบรกลดลงร้อยละ 6 ไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่หมดลดลงร้อยละ 4 ลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 2 แต่ในทางกลับกันมีการปล่อย NO<sub>x</sub> สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ผลการศึกษายืนยันว่าเชื้อเพลิงไพโรไลซิสอาจเป็นพลังงานเชื้อเพลิงทางเลือกในเครื่องยนต์ดีเซลได้

Nasution et al. (2022) ศึกษาการเปลี่ยนขบวนการพลาสติกพอลิเอทิลีนเทอร์พทาเลตไปเป็นน้ำมันเบนซินด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยนำขวดไปทำความสะอาดแล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาตัดให้เป็นสี่เหลี่ยมขนาด 1 – 2 มิลลิเมตร ในกระบวนการไพโรไลซิสใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบน HZSM5-70 เตรียมด้วยวิธีการ

เคลือบฝังเปียก กระบวนการเร่งปฏิกิริยาถูกดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อโดยอัตราการป้อนคงที่ 2.5 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ นิกเกิลบน HZSM5-70 ร้อยละ 2 – 10 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 400 – 500 องศาเซลเซียส การเพิ่มขึ้นของปัจจัยใดปัจจัยหนึ่งไม่ว่าเป็นปัจจัยใดส่งผลให้ได้ปริมาณของเหลวลดลงแต่จะเพิ่มคุณภาพของน้ำมัน น้ำมันที่มีคุณภาพดีที่สุดอยู่ที่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่เคลือบด้วยนิกเกิลร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์เครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปัจจัยมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของอะลิฟาติกและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ขณะเดียวกันก็ลดปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ได้แก่ กรด แอลกอฮอล์ และคีโตนในน้ำมัน ผลการวิเคราะห์เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ ยืนยันว่าส่วนประกอบของน้ำมันร้อยละ 33.39 โดยน้ำหนัก เป็นน้ำมันเบนซิน ( $C_5 - C_{12}$ ) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM5-70 กับนิกเกิลบน HZSM5-70 สามารถเพิ่มเบนซินขึ้นเป็นอย่างมากจากร้อยละ 33.39 เป็น 66.48 และ 85.05 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ รวมถึงสามารถลดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการได้จากร้อยละ 39.38 เป็น 10.75 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ HZSM5-70 กับนิกเกิลบน HZSM5-70 หลังจากการใช้งานห่ารอบ ประสิทธิภาพในการใช้งานลดลงประมาณร้อยละ 3 เพราะฉะนั้นนิกเกิลบน HZSM5-70 จึงมีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาสูงกว่าและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

Chen et al. (2022) การไพโรไลซิสร่วมโดยใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนของสาหร่ายคลอเรลลา (*C. vulgaris*) กับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ก่อนทำการทดลองเตรียมสาหร่ายคลอเรลลาให้มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมโครเมตร รวมถึงพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99 ให้มีขนาดเล็กกว่า 200 ไมโครเมตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การศึกษานี้ศึกษาอัตราส่วนของสาหร่ายคลอเรลลากับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในอัตราส่วน 1 ต่อ 0.4 ต่อ 1.2 ต่อ 1.1 ต่อ 1.1 ต่อ 2 และ 1 ต่อ 4 โดยน้ำหนัก และร้อยละของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของสาหร่ายคลอเรลลากับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก (C1HP1) เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ในขณะที่ถ่านกัมมันต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดพร้อมทั้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการไพโรไลซิสร่วมของ C1HP1 นอกจากนี้ไฮโดรคาร์บอนและแอลกอฮอล์ในน้ำมันชีวภาพของกลุ่ม C1HP1 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากการมีส่วนร่วมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ในขณะที่สารประกอบ

ที่มีไนโตรเจนลดลงร้อยละ 75.75 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับกลุ่ม Pure *C. vulgaris* (PC) ซึ่งส่งเสริมการก่อดัวของแอมโมเนีย และไฮโดรเจนไซยาไนด์การเติมถ่านกัมมันต์ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ใน C1HP1 ช่วยเพิ่มไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 48.88 โดยน้ำหนัก และสารประกอบที่มีออกซิเจนลดลงร้อยละ 45.62 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับกลุ่มของ PC ที่ส่งเสริมการก่อดัวของน้ำ คาร์บอนมอนนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปการมีส่วนร่วมของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และถ่านกัมมันต์จะเพิ่มประสิทธิภาพการไพโรไลซิสของสาหร่ายคลอเรลลา และมีผลดีต่อการลดการเกิดไนโตรเจนและออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ

Buyang et al. (2023) ศึกษาการเปลี่ยนน้ำมันที่ใช้แล้วจากครัวเรือน 1500 กรัม ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสไปเป็นน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะขนาด 10 ลิตร โดยการ ใช้โดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 350 450 และ 550 องศาเซลเซียส เริ่มเก็บน้ำมันชีวภาพเมื่อแก๊สออกอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสจากห้องเตาปฏิกรณ์ที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวดีที่สุดในร้อยละ 79 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นที่ 550 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อความสามารถในการแตกของ พันธะทำให้มีร้อยละของแข็งลดลงแต่ร้อยละแก๊สเพิ่มมากขึ้น เมื่อไม่ใช้โดโลไมต์ (0%FD) กับใช้ โดโลไมต์ร้อยละ 1 3 และ 6 โดยน้ำหนัก รวมถึงโดโลไมต์แคลไซต์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก (6%CD) พบว่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงจากร้อยละ 73.46 เป็น 68.37 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ โดโลไมต์ร้อยละ 1 (1%FD) กับ 6 โดยน้ำหนัก (6%FD) และแก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 23.71 เป็น 30.99 โดยน้ำหนัก แต่ของแข็งลดลงจาก 1.82 เป็น 0.63 โดยน้ำหนัก เมื่อไม่ใช้โดโลไมต์ (0%FD) กับใช้โดโลไมต์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก (6%FD) ผลการวิเคราะห์เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปคโตรมิเตอร์ พบว่าการเพิ่มขึ้นของไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นตามร้อยละของโดโลไมต์ให้ ร้อยละสูงสุด 56.23 โดยน้ำหนัก ที่โดโลไมต์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก (6%FD) ส่วนการไม่ใช้ โดโลไมต์ให้ผลิตภัณฑ์คาร์บอกซิลิก ไฮโดรคาร์บอน และคีโตนร้อยละ 85.7 12.81 และ 1.39 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดโลไมต์จึงมีส่วนสำคัญในการเพิ่มร้อยละของไฮโดรคาร์บอน และลดการ เกิดออกซิเจนที่ก่อให้เกิดกรดคาร์บอกซิลิก เมื่อศึกษาระยะเวลาในการไพโรไลซิสที่ 15 30 35 60 และ 75 ใช้โดโลไมต์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก (6%FD) พบว่าไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 38.99 เป็น 57.27 โดยน้ำหนัก

Hwang et al. (2021) ศึกษาเปลี่ยนคลอรีเนเตทพาราฟินแวกซ์ ( $\geq 23$ ) (คลอรีน 0.14 wt%) ไปเป็นเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์เตาเผา แบบหมุนที่ให้ความร้อนภายนอก (externally heated rotary kiln reactor) ที่อุณหภูมิ

300 – 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการดำเนินเครื่องอยู่ที่ 10 – 15 ชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติ (HY ซีโอไลต์) ที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 3 5 และ 20 โดยน้ำหนัก กระบวนการไพโรไลซิสเริ่มจากเตรียมคลอรีเนตพาราฟินแวกซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อให้ป้อน HPLC สามารถป้อนวัดดูดซับ 0.29 กรัมต่ออนาที ใส่ในเตาปฏิกรณ์ พร้อมทั้งมีเส้นแบ่งระหว่างป้อน HPLC กับ quartz bulb-reactor ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเป็นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งอยู่ภายในเตาปฏิกรณ์ ใช้ Weight Hourly Space Velocity (WHSV) ที่ 2 ต่อชั่วโมง หรือใช้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิตรต่ออนาที และตรวจวัดอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ให้มีอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส หลังจากที่สารตั้งต้นเปลี่ยนสภาพเป็นสารระเหยจะถูกควบแน่นครั้งแรกในหน่วยควบแน่นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แล้วควบแน่นครั้งที่สองที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส รวมถึงกรดไฮโดรคลอริกที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะถูกดักจับไว้ในน้ำแล้วเข้าสู่กระบวนการแก๊สโครมาโทกราฟีต่อไป ผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนของเหลวที่คุ้มค่าที่สุดส่วนมากเป็นน้ำมันเบนซิน น้ำมันก๊าด และดีเซล ร้อยละ 66.9 โดยน้ำหนัก จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ธรรมชาติที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีปริมาณคลอรีนต่ำมากเมื่อใช้ซีโอไลต์เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีสองคุณสมบัติ คือ ช่วยในการแตกตัว และกำจัดคลอรีนของเหล็กออกไซด์ การเคลือบร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ของเหล็กออกไซด์บนซีโอไลต์ธรรมชาติที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการแตกตัวของคลอรีเนตพาราฟินแวกซ์ต่ำ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีผลรวมตำแหน่งกรดต่ำที่สุด แต่ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีปริมาณคลอรีนต่ำที่สุด (60 ppm) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะถูกสะสมโดยไค้กและคลอรีนจำนวนมาก แต่สามารถฟื้นฟูให้กลับมาใช้ใหม่ได้โดยการให้ความร้อนที่ 700 องศาเซลเซียส

Ndiaye et al. (2023) ศึกษาการไพโรไลซิสขยะพลาสติกในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะไปเป็นน้ำมันเกรดเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนสำหรับการใช้งานต่าง ๆ การศึกษานี้ใช้ส่วนผสมของขยะพลาสติกพอลิเอทิลีนเทเรฟธาเลทร้อยละ 58 โดยน้ำหนัก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก พอลิพรอพิลีนร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก และพอลิสไตรีนร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เตรียมขยะพลาสติก 1 กิโลกรัม ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ 100 กรัม ดำเนินการที่อุณหภูมิ 300 350 และ 500 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 60 มิลลิตรต่ออนาที พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสให้ร้อยละของเหลวสูงสุดที่ร้อยละ 17 โดยน้ำหนัก ร้อยละของแข็งกับแก๊สต่ำสุดที่ร้อยละ 13.7 และ 67.5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และการไพโรไลซิสด้วย

การแตกตัวเชิงความร้อนที่เวลาการเกิดปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ไปในทิศทางเดียวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลลัพธ์ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ต่ำสามารถอธิบายได้จากอัตราส่วนของพลาสติกที่ใช้ในการทดลองเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่ได้โดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรมิเตอร์ ค่าความร้อน ค่าความหนืด ผลการวิเคราะห์เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปียืนยันพบหมู่ฟังก์ชันอะลิฟาติก และอะโรมาติกโดยมีหมู่อะลิฟาติกมากกว่า ผลการวิเคราะห์เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรมิเตอร์ของน้ำมันไพโรไลซิสมีส่วนประกอบของไฮโดรคาร์บอนสูงสุดเป็น octatriacontyl pentafluoropropionate และน้ำมันไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสารประกอบมากกว่าน้ำมันเครื่อง ( $C_{16} - C_{35}$ ) ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อน ค่าความหนืดของน้ำมันไพโรไลซิสกับน้ำมันไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้ 33.132 เมกะจูลต่อกิโลกรัม กับ 33.175 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และ 2.750 cSt กับ 3.333 cSt ตามลำดับ

Huo et al. (2020) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์และแมกนีเซียมออกไซด์ โดยทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิการทดลองต่อผลผลิตและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดคงที่ ทำการใส่พลาสติกที่บดเป็นผง ถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพด ตามด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ ใช้ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยากับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ 2 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดต่อแมกนีเซียมออกไซด์ 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 160 มิลลิลิตรต่ออนาที เป็นเวลา 20 นาที ก่อนดำเนินการให้ความร้อน จากนั้นปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 70 มิลลิลิตรต่ออนาที แล้วดำเนินการให้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ได้ผลผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 60.9 โดยน้ำหนัก เพิ่มเป็นร้อยละ 72 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และลดลงเหลือร้อยละ 68.5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรมิเตอร์พบว่าแอลเคนในช่วง  $C_8 - C_{16}$  เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น 450 500 และ 600 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 450 ถึง 600 องศาเซลเซียส ซึ่งผลิตภัณฑ์น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานได้รับการส่งเสริมอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิทดลองเพิ่มขึ้นจาก 450 เป็น 600 องศาเซลเซียส

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

ศึกษากระบวนการในการออกแบบภาวะดำเนินการที่เหมาะสมโดยใช้ Ease Design-Expert ในการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบส่วนประสม และกลางหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสม ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานในช่วงของเคโรซีน ศึกษาปัจจัย ผลการทำงานร่วมกันของพลาสติกและตัวเร่งปฏิกิริยา

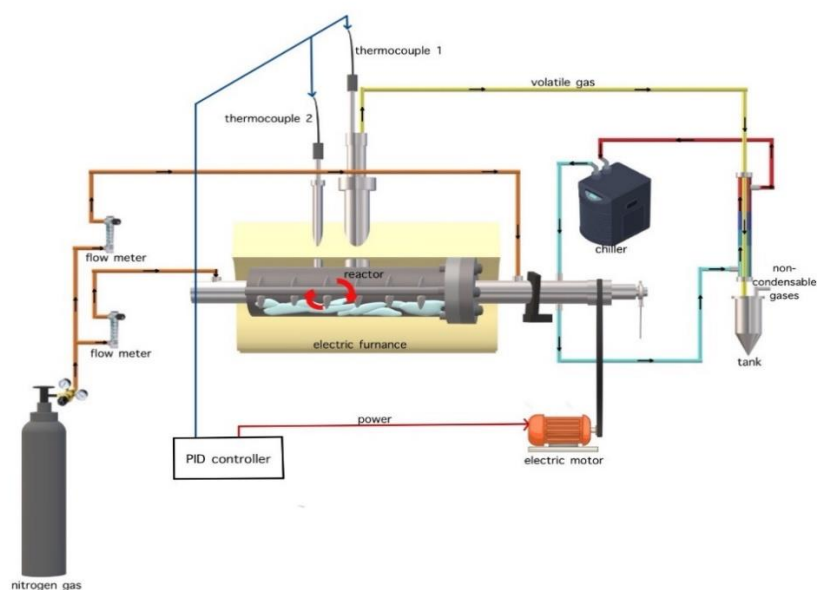
#### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์
2. แก๊สไนโตรเจนที่ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 (บริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด, ประเทศไทย)
3. ถ่านกัมมันต์ (ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาฯ, ประเทศไทย)
4. โดโลไมต์ (ศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาฯ, ประเทศไทย)
5. เฟอร์ริกไนเตรตนาโนไฮเดรต (Ferric nitrate,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) (CARLO ERBA Reagents SAS BP, ประเทศอิตาลี)
6. อะซิโตน (commercial grade, บริษัท โพลีซายน์ เซอร์วิส จำกัด, ประเทศไทย)

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะรูปทรงกระบอกแนวนอนขนาด 3 ลิตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ ให้ความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์โดยการจ่ายไฟฟ้าไปยังขดลวดให้ความร้อน 3 ตัว สามารถทำอุณหภูมิสูงสุด 500 องศาเซลเซียส มีเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) 2 เส้น สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ และสารระเหยขาออก ระหว่างทำการทดลองที่จะควบแน่นในหน่วยควบแน่น จากเครื่องทำความเย็น ยี่ห้อ M-LAB รุ่น CH-30-1 HP ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสกลั่นเป็นของเหลว



ภาพประกอบ 8 แผนผังเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ

2. ตู้อบลมร้อนแบบมีพัดลม ยี่ห้อ BINDER รุ่น FD 115
3. เครื่องชั่งตวงวัด 2 ตำแหน่ง ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น ML-SERIES
4. Ease Design-Expert ด้วยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล และใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง

### 3.2.2 เครื่องมือในการวิเคราะห์น้ำมันไพโรไลซิส

1. เครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (Organic Elemental Analyzer หรือ CHN Analyser) ยี่ห้อ Leco รุ่น CHN628 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของน้ำมันไพโรไลซิส



ภาพประกอบ 9 เครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์

2. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS) โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ SHIMADZU รุ่น GC-2010 Plus และเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น GCMS-QP2020 คอลัมน์ชนิด Capillary column ยี่ห้อ J&W Scientific รุ่น DB-HT-SIMDIS ขนาด 5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.530 มิลลิเมตร สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิส



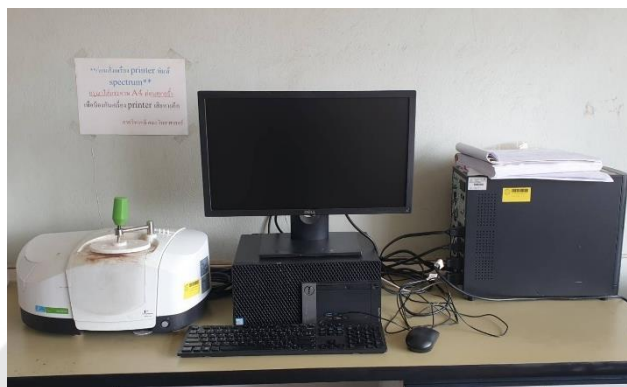
ภาพประกอบ 10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์

3. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Distillation Gas chromatograph, DGC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A คอลัมน์ชนิด Capillary column ยี่ห้อ J&W Scientific รุ่น DB-HT-SIMDIS ขนาด 5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.530 มิลลิเมตร โดยใช้ อุณหภูมิเตาอบ 30 องศาเซลเซียส อุณหภูมิขาเข้า 50 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิตัวตรวจหา (detector temperature) 375 องศาเซลเซียส สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสตามช่วงจุดเดือดมาตรฐาน ASTM D2887



ภาพประกอบ 11 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

4. เครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์หมอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) ยี่ห้อ PerkinElmer Scientific รุ่น Spectrum Two FT-IR Spectrometer สำหรับวิเคราะห์และยืนยันโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันน้ำมันไฟโรว์ไลซิส



ภาพประกอบ 12 เครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์หมอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

5. เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเทคนิคบอมบ์ (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500 สำหรับวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนของน้ำมันไฟโรว์ไลซิส



ภาพประกอบ 13 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเทคนิคบอมบ์

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่าง

1. นำขยะพลาสติกบรจุกัณฑ์มาตัดให้มีขนาด 1×1 นิ้ว แล้วอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

#### 3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์

1. นำถ่านกัมมันต์อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และเก็บในโถดูดความชื้น

3.3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนโดโลไมต์ โดยการเตรียมเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักด้วยวิธีการเคลือบฝังแบบเปียก

1. นำโดโลไมต์ 50 กรัม ใส่ในขวดชมพูขนาด 1,000 มิลลิลิตร แล้วเติมเฟอริกไนเตรต นานไฮเดรตร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 800 มิลลิลิตร ปิดแบริ
2. นำมาควนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปกรอง
3. นำสารอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
4. นำสารไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

### 3.3.4 การออกแบบการทดลอง

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงศึกษากระบวนการในการออกแบบภาวะดำเนินการ ที่เหมาะสมโดยใช้ Ease Design-Expert ในการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบส่วน ประสมกลาง ในการหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ ในช่วงคาบจุดเดือดที่เป็นเคโรซีนหรือน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน

ตาราง 4 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับ		
	ระดับต่ำ (-1)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (1)
อุณหภูมิในการไพโรไลซ์ (องศาเซลเซียส)	440	460	480
อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตร/นาที)	50	75	100
ร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา (โดยน้ำหนัก)	10	12.5	15

ตาราง 5 การออกแบบพื้นผิวตอบสนองร้อยละผลได้ของน้ำมัน โดยการออกแบบการทดลองแบบ ส่วนประสมกลาง

std	ตัวแปร		
	อุณหภูมิในการไฟโรไลซ์ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตร/นาที)	ร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา (โดยน้ำหนัก)
1	440	50	10
2	480	50	10
3	440	100	10
4	480	100	10
5	440	50	15
6	480	50	15
7	440	100	15
8	480	100	15
9	426.36	75	12.5
10	493.64	75	12.5
11	460	32.96	12.5
12	460	117.04	12.5
13	460	75	8.3
14	460	75	16.7
15	460	75	12.5
16	460	75	12.5
17	460	75	12.5
18	460	75	12.5
19	460	75	12.5
20	460	75	12.5

ตาราง 6 การออกแบบการทดลอง เพื่อหาผลการทำงานร่วมกันของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน โดยนำภาวะที่ดีที่สุดจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางมาใช้ในการทดลอง

อัตราส่วนระหว่าง	
พอลิพรอพิลีน	พอลิเอทิลีน
1	0
0.8	0.2
0.6	0.4
0.5	0.5
0.4	0.6
0.2	0.8
0	1

ตาราง 7 การออกแบบการทดลองเพื่อหาผลการทำงานร่วมกันของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับโดไลไมต์ที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ โดยนำภาวะที่ดีที่สุดจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง และใช้อัตราส่วนของพลาสติกที่ดีที่สุดที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เพื่อหาผลการทำงานร่วมกันของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีนมาใช้ในการทดลอง

อัตราส่วนระหว่าง	
Ac	5% Fe-DM
1	0
0.8	0.2
0.6	0.4
0.5	0.5
0.4	0.6
0.2	0.8
0	1

### 3.4 ขั้นตอนการทำงานทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักขยะพลาสติกที่ผ่านการตัด 250 กรัม จากนั้นนำไปบรรจุลงในส่วนเตาปฏิกรณ์ และทำการขันน็อตให้แน่นเพื่อป้องกันการรั่วไหล
2. ทำการประกอบส่วนเครื่องปฏิกรณ์และอุปกรณ์ โดยต่อท่อหน่วยควบแน่นจากเครื่องทำความเย็นซึ่งจะทำน้ำหล่อเย็นและส่งผ่านท่อที่ต่ออยู่กับส่วนเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อทำการควบแน่นสารระเหยจากกระบวนการไพโรไลซิส ทำการต่อท่อแก๊สไนโตรเจนเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ เพื่อไล่แก๊สออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบ และคล้องสายพานที่ไบกวนเข้ากับมอเตอร์ เพื่อทำการกวนขยะพลาสติกขณะเผาไหม้
3. ทำการตั้งอุณหภูมิ และปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตามภาวะดำเนินการที่กำหนดดังตาราง 5 จากนั้นทำการเปิดเครื่องปฏิกรณ์ที่ตู้ชุดควบคุมแบบดิจิทัล
4. เมื่อทำการเปิดเครื่องปฏิกรณ์ให้เริ่มทำงาน ทำการจับเวลาทุก ๆ 5 นาที เพื่อบันทึกค่าอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ อุณหภูมิของแก๊สขาออก (gas out) อัตราอบหมุนของไบกวน และปริมาณการไหลของน้ำมัน
5. เมื่ออุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์อยู่ที่ประมาณ 300 องศาเซลเซียสให้เริ่มเปิดมอเตอร์ไบกวนที่ตู้ชุดควบคุมแบบดิจิทัล และเมื่ออุณหภูมิของแก๊สอยู่ที่ประมาณ 70 องศาเซลเซียสให้เริ่มทำการเก็บน้ำมัน และทำการวัดปริมาณการไหลของน้ำมันทุก ๆ 5 นาที
6. เมื่อน้ำมันเริ่มไหลออกมาน้อยกว่า 1 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง ถือว่าสิ้นสุดการดำเนินการทดลอง จากนั้นปิดเครื่องปฏิกรณ์ที่ตู้ชุดควบคุมแบบดิจิทัล ปล่อยให้เตาปฏิกรณ์เย็นโดยยังคงเปิดแก๊สไนโตรเจนตลอดเวลา
7. ทำการชั่งน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ที่ใช้บรรจุของเหลว และชั่งก่อนการทดลอง เมื่อเตาปฏิกรณ์เย็น ทำการเก็บของแข็งมาชั่งน้ำหนัก และนำของเหลวทั้งหมดที่ได้จากการทดลองไปชั่งน้ำหนัก
8. ทำความสะอาดเตาปฏิกรณ์ และไบกวนด้วยอะซิโตน
9. นำของแข็งที่ได้เข้าสู่อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
10. ทำการคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสได้

ดังสมการ 3.1 – 3.3

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ของเหลว (\%Yield Liquid)} = \frac{W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของเหลว (กรัม)}}}{W_{\text{พลาสติก (กรัม)}}} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (\%Yield Solid)} = \frac{W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของแข็ง (กรัม)}}}{W_{\text{พลาสติก (กรัม)}}} \times 100 \quad (3.2)$$

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแก๊ส (\%Yield Gas)} = \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว (โดยกรัม)} - \text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง(โดยกรัม)} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของเหลว}} &= \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลอง} \\ W_{\text{ผลิตภัณฑ์ของแข็ง}} &= \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการทดลอง} \\ W_{\text{พลาสติก}} &= \text{น้ำหนักของพลาสติกที่ใช้ในการทดลอง} \end{aligned}$$

11. นำภาวะที่ดีที่สุดจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (ตาราง 5) มาใช้ในการทดลองเพื่อหาผลการทำงานร่วมกันของพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน ดังตาราง 6

12. นำภาวะที่ดีที่สุดจากการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (ตาราง 5) และ อัตราส่วนของพลาสติกที่ดีที่สุดจากการทดลอง (ตาราง 6) มาใช้ในการทดลองเพื่อหาผลการทำงานร่วมกันของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับโดไลไมต์ที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ดังตาราง 7

13. วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนของน้ำมันไพโรไลซิส ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์

14. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปกโตรมิเตอร์ และเครื่องดิสทิลเลชันแก๊สโครมาโทกราฟี

15. วิเคราะห์และยืนยันโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันไพโรไลซิสด้วย เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

16. วิเคราะห์หาค่าปริมาณ ความร้อน ของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่อง บอมบ์แคลอรีมิเตอร์

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

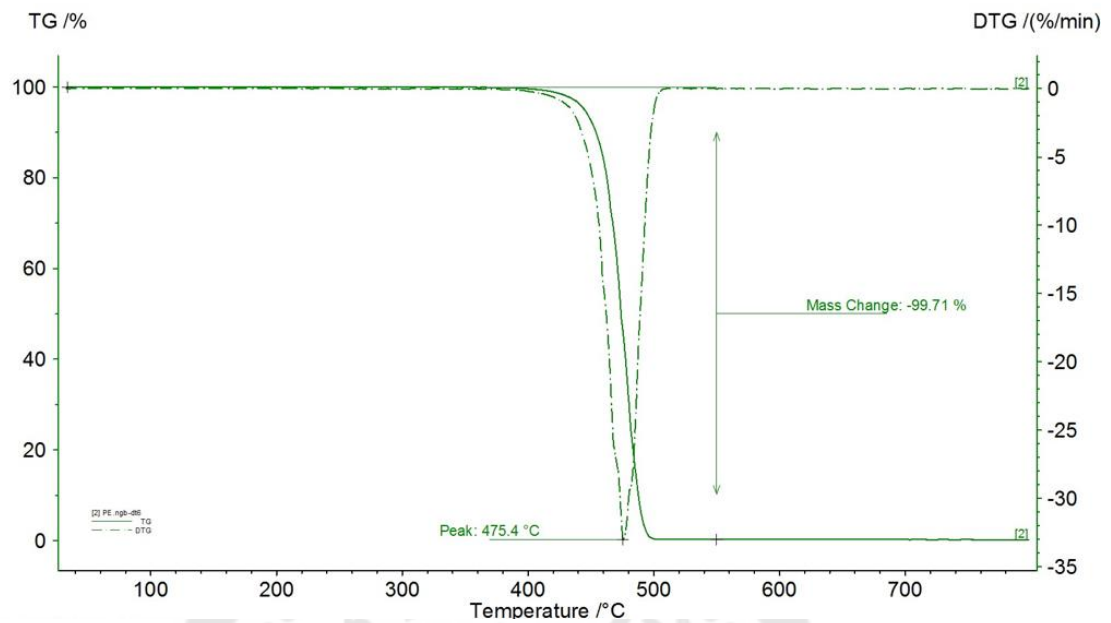
ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเคโรซีน ได้แก่ อัตราส่วนของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน อุณหภูมิในการไพโรไลซ์ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงในช่วงคาบจุดเดือดของเคโรซีนหรือน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับอากาศยานจากภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพเคมีของพลาสติก

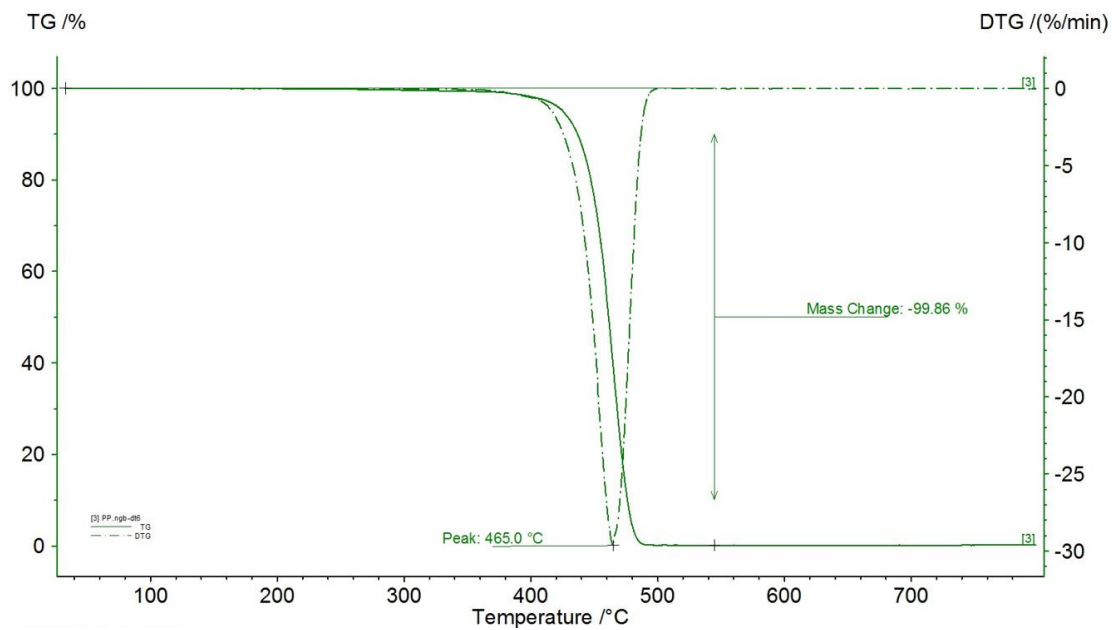
##### 4.1.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพลาสติก

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพลาสติกด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA) เครื่องวิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุด้วยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารในช่วงอุณหภูมิ 40 - 800 องศาเซลเซียสภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าจุดที่มีความชันมากที่สุดคือช่วงอุณหภูมิที่มีการแตกสลายเชิงความร้อนและการเปลี่ยนแปลงมวลสูงสุด จึงใช้ภาวะนี้มาใช้ในการดำเนินการการออกแบบการทดลองโดยภาวะที่ใช้ในการออกแบบการทดลองหรือภาวะที่ใช้ในการดำเนินการไพโรไลซิสไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิดังกล่าวจาก ภาพประกอบ 14 พบว่าพอลิเอทิลีนมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 435 - 500 องศาเซลเซียส พอลิพรอพิลีนมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 410 - 500 องศาเซลเซียส และขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 395 - 505 องศาเซลเซียส ทำให้ทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกสลายเชิงความร้อนของพลาสติกแต่ละชนิด

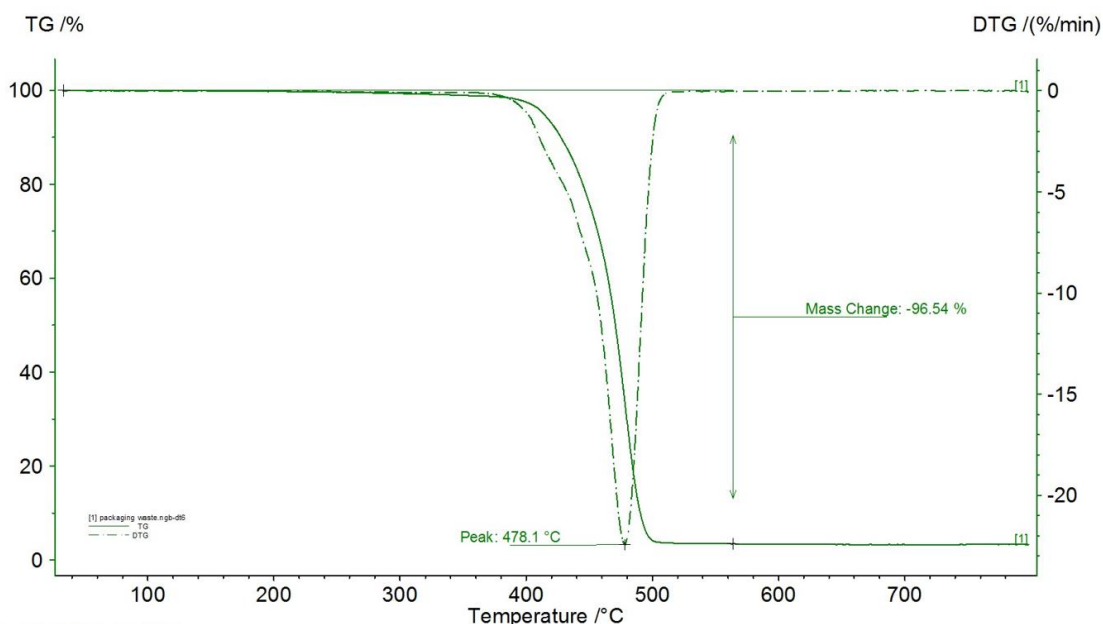
ร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคงเหลือของพอลิเอทิลีน 0.29 โดยน้ำหนักคิดเป็น 0.035 มิลลิกรัม ร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคงเหลือของพอลิพรอพิลีน 0.14 โดยน้ำหนัก คิดเป็น 0.016 มิลลิกรัม ร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคงเหลือของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ 3.46 โดยน้ำหนัก คิดเป็น 0.392 มิลลิกรัม ร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคงเหลือของพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีนมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์มีส่วนประกอบที่เป็นพลาสติกและไม่ใช่พลาสติกเป็นองค์ประกอบเพื่อตอบสนองของวัตถุประสงค์การใช้งานส่งผลให้มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคงเหลือสูงกว่าพลาสติกทั้งสองชนิด



ภาพประกอบ 14 (ก) การแตกสลายเชิงความร้อนของพอลิเอทิลีน



ภาพประกอบ 14 (ข) การแตกสลายเชิงความร้อนของพอลิพรอพิลีน



ภาพประกอบ 14 (ค) การแตกสลายเชิงความร้อนของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์

ภาพประกอบ 14 (ก) การแตกสลายเชิงความร้อนของพอลิเอทิลีน

(ข) การแตกสลายเชิงความร้อนของพอลิพรอพิลีน

(ค) การแตกสลายเชิงความร้อนของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์

#### 4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของพลาสติก

การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์ในเบื้องต้นเพื่อหาปริมาณของความชื้น สารระเหย เถ้า และปริมาณคาร์บอน เพื่อบ่งบอกองค์ประกอบขั้นต้น ด้วยวิธีการ ASTM D7582

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาส่วนประกอบของธาตุหลัก ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ด้วยวิธีการ ASTM D5373

การวิเคราะห์หาค่าความร้อน (heating value) ด้วยเทคนิคบอมป์ ด้วยวิธีการ ASTM D5865

ตาราง 8 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของขยะพลาสติกตามมาตรฐานอ้างอิง การทดสอบ

สมบัติทางกายภาพเบื้องต้น	PP	PE	packaging waste plastic (PWP)
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
สารระเหย (volatiles matter)	97.24	96.13	92.28
คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)	2.76	3.87	2.89
ขี้เถ้า (ash)	n.d.	n.d.	4.83
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
คาร์บอน (C)	84.11	83.24	83.35
ไฮโดรเจน (H)	15.89	16.76	14.73
ไนโตรเจน (N)	n.d.	n.d.	n.d.
ออกซิเจน (O)*	n.d.	n.d.	1.92
H/C (โมล/โมล)	2.27	2.42	2.12
O/C (โมล/โมล)	n.a.	n.a.	0.02
ค่าความร้อน (heating value) (MJ/kg)	41.82	42.85	39.08

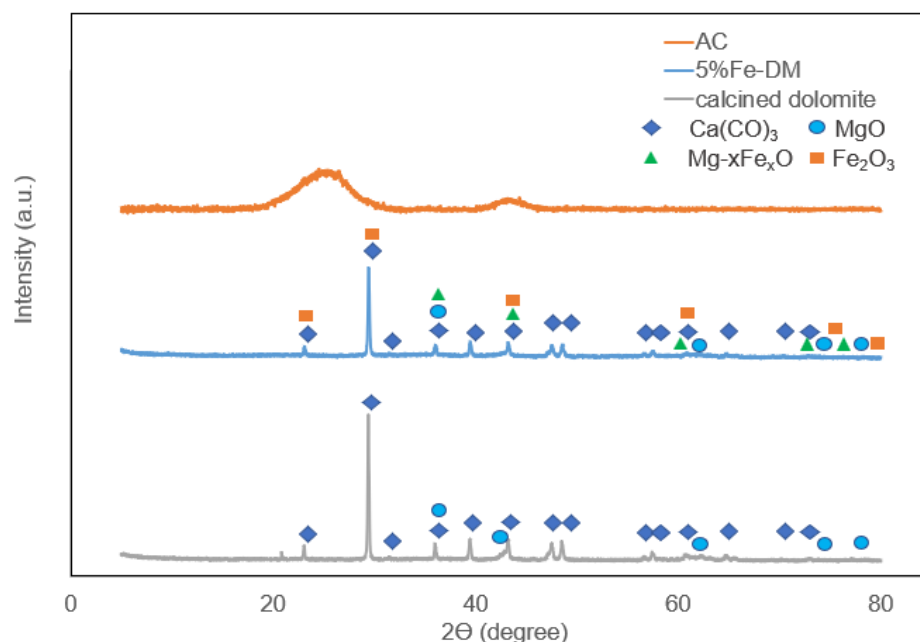
หมายเหตุ: n.d. คือ not detect และ n.a. คือ not applicable

จากตาราง 8 แสดงส่วนประกอบต่างๆของพลาสติกที่นำมาใช้ในการทดลอง พอลิพรอพิลีนวิเคราะห์แบบประมาณ พบว่าประกอบด้วยสารระเหยร้อยละ 97.24 โดยน้ำหนัก คาร์บอนคงตัวร้อยละ 2.76 โดยน้ำหนัก ไม่พบขี้เถ้า และวิเคราะห์แบบแยกประกอบด้วยคาร์บอน ร้อยละ 84.11 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 15.89 โดยน้ำหนัก ไม่พบไนโตรเจน ไม่พบออกซิเจน โดยอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนร้อยละ 2.27 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของออกซิเจนต่อ คาร์บอนนำมาใช้ไม่ได้ และค่าความร้อน 22.31 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ทำการวิเคราะห์พอลิเอทิลีน วิเคราะห์แบบประมาณพบว่าประกอบด้วย สารระเหยร้อยละ 96.13 โดยน้ำหนัก คาร์บอน คงตัวร้อยละ 3.87 โดยน้ำหนัก ไม่พบขี้เถ้า และวิเคราะห์แบบแยกธาตุประกอบด้วยคาร์บอน ร้อยละ 83.24 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 16.76 โดยน้ำหนัก ไม่พบไนโตรเจน ไม่พบออกซิเจน

อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนร้อยละ 2.42 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอน นำมาใช้ไม่ได้ และค่าความร้อน 23.28 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ส่วนของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ วิเคราะห์แบบประมาณพบว่าประกอบด้วยสารระเหยง่ายร้อยละ 92.28 โดยน้ำหนัก คาร์บอน คงตัวร้อยละ 2.89 โดยน้ำหนัก ซี้ไถ้ร้อยละ 4.83 โดยน้ำหนัก และวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 83.35 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 14.73 โดยน้ำหนัก ไม่พบไนโตรเจน ไม่พบออกซิเจน อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนร้อยละ 2.12 โดยน้ำหนัก ส่วนของออกซิเจนต่อคาร์บอนร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก และค่าความร้อน 20.45 เมกะจูลต่อกิโลกรัมขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์มีค่าความร้อนต่ำกว่าพลาสติกจำพวกพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีน เนื่องจากพลาสติกบรรจุภัณฑ์ มักทำจากองค์ประกอบของพลาสติกที่มีองค์ประกอบของทั้งพอลิพรอพิลีนและพอลิเอทิลีนโดยจะมีการใช้ตัวประสานเช่นกาวหรือวัสดุพอลิเมอร์อื่น ๆ ในการประสานพลาสติกให้มีความหนาและแข็งแรงคงทน

#### 4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

##### 4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิส ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



ภาพประกอบ 15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา ถ่านกัมมันต์ โดโลไมต์ และเหล็กบนโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer: XRD) จากภาพประกอบ 15 เป็นรูปการมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานวิจัย ได้แก่ ถ่านกัมมันต์พบว่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนถ่านกัมมันต์ไม่พบพีคลักษณะแหลม พบเพียงพีคที่มีลักษณะกว้าง 2 พีคที่ 2 theta เท่ากับ  $20^{\circ}$  -  $30^{\circ}$  และ 2 theta เท่ากับ  $40^{\circ}$  -  $45^{\circ}$  และการเคลือบฝังแบบเปียกของ  $5\%Fe(NO)_3 \cdot 9H_2O$  บนโดโลไมต์ พบว่าแสดงโครงสร้างเมื่อทำการเคลือบฝังโลหะเหล็กบนของโดโลไมต์ แล้วทำให้โครงสร้างหลักที่ไม่แตกต่างจากแคลไซต์โดโลไมต์ซึ่งประกอบด้วย  $Ca(CO)_3$  และ  $MgO$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโดโลไมต์ และพบการพีคของ  $Mg \cdot xFe \cdot O$  ที่ 2 theta เท่ากับ  $36.5^{\circ}$   $42.5^{\circ}$   $61.4^{\circ}$   $73.4^{\circ}$   $77.6^{\circ}$  และพบพีคของ  $Fe_2O_3$  ที่ 2 theta เท่ากับ  $23.5^{\circ}$   $31.4^{\circ}$   $36.5^{\circ}$   $42.5^{\circ}$   $61.2^{\circ}$   $74.4^{\circ}$  และ  $78.8^{\circ}$  และพบว่าพื้นที่พีคแสดงโครงสร้างของแคลไซต์โดโลไมต์มีระดับพลังงาน (intensity) ลดต่ำลงเมื่อมีการเคลือบฝังด้วยโลหะเหล็กออกไซด์แสดงว่าวิธีการเคลือบฝัง  $5\%Fe(NO)_3 \cdot 9H_2O$  บนโดโลไมต์ไม่ทำให้โครงสร้างและการจัดเรียงตัวของโครงสร้างโดโลไมต์เปลี่ยนแปลงไป

#### 4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิสด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

การวิเคราะห์องค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิสด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence spectrometry: XRF)

ตาราง 9 การวิเคราะห์องค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิสด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์

element	compound	concentration (wt.%)			
		activated carbon	dolomite	5% Fe-dolomite	10% Fe-dolomite
Al	$Al_2O_3$	n.d.	0.19	0.22	0.18
Si	$SiO_2$	0.08	0.39	0.67	0.55
Ti	$TiO_2$	n.d.	0.06	0.06	n.d.
Na	$Na_2O$	0.42	0.33	0.41	0.83
Mg	$MgO$	0.16	33.01	31.82	31.72
P	$P_2O_5$	0.02	0.02	0.02	n.d.
K	$K_2O$	0.54	n.d.	n.d.	n.d.

ตาราง 9 (ต่อ)

element	compound	concentration (wt.%)			
		activated carbon	dolomite	5% Fe-dolomite	10% Fe-dolomite
Ca	CaO	0.08	59.82	54.85	53.19
S	SO <sub>3</sub>	0.03	0.06	0.11	0.11
Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.23	5.82	9.14
other	Other	1.91	5.89	6.02	4.28

หมายเหตุ: n.d. คือ not detect

#### 4.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติความพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิส

การวิเคราะห์คุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ โดโลไมต์ และเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 5 ประกอบด้วย พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (SBET) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) และขนาดรูพรุน (pore size) ด้วยเทคนิค Brunauer Emmelt Teller: BET ซึ่งเป็นปัจจัย สมบัติ และการสร้างจะส่งผลต่อการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

ตาราง 10 พื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวบีทีที (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)	ขนาดรูพรุน (นาโนเมตร)
ถ่านกัมมันต์	830.77	0.05	2.37
โดโลไมต์	19.95	0.10	18.79
เหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	18.77	0.10	19.46

จากตาราง 10 ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิว 830.77 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.05 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 2.37 นาโนเมตร โดโลไมต์มีพื้นที่ผิว 19.95 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 18.79 นาโนเมตร และเหล็กบนโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พื้นที่ผิว 18.77 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 19.46 นาโนเมตร ขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีขนาดอยู่ในช่วง 2 - 50 นาโนเมตร จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง (mesoporous)

#### 4.3 การศึกษาอิทธิพลและผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

การทดลองแบบแฟกทอเรียล และการออกแบบส่วนประสมกลาง เพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีตัวแปรตอบสนอง (response) 2 ตัวแปร คือ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์ของเหลวกับร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนจากการแตกตัวเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา

##### 4.3.1 การศึกษาอิทธิพลและผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว

ตาราง 11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ

std	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ (%wt.)	
	อุณหภูมิในการไพโรไลซ์ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตร/นาที)	ร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา (โดยน้ำหนัก)	liquid yield	kerosene fraction
1	440	50	10	82.47	24.04
2	480	50	10	64.63	17.03
3	440	100	10	75.37	21.25
4	480	100	10	68.76	19.02
5	440	50	15	75.11	24.03
6	480	50	15	59.18	18.15
7	440	100	15	72.36	22.27
8	480	100	15	67.45	20.45
9	426.36	75	12.5	86.37	22.52
10	493.64	75	12.5	54.63	19.57
11	460	32.96	12.5	53.15	20.72
12	460	117.04	12.5	67.64	19.93

ตาราง 11 (ต่อ)

std	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ (%wt.)	
	อุณหภูมิในการ ไพโรไลซิส (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตร/นาที)	ร้อยละตัวเร่ง ปฏิกิริยา (โดยน้ำหนัก)	liquid yield	kerosene fraction
13	460	75	8.3	70.68	19.54
14	460	75	16.7	71.93	21.25
15	460	75	12.5	71.31	20.92
16	460	75	12.5	72.04	21.27
17	460	75	12.5	71.63	21.34
18	460	75	12.5	71.68	20.87
19	460	75	12.5	72.02	20.91
20	460	75	12.5	71.56	20.88

การทดลองแบบแฟกทอเรียล และการออกแบบส่วนประสมกลางเพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการแตกตัวเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์บนถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ตาราง 11 แสดงผลร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอยู่ในช่วงร้อยละ 53.15 – 86.37 โดยน้ำหนัก และได้ผลวิเคราะห์ทางสถิติจาก Ease Design-Expert ดังต่อไปนี้

ตาราง 12 การทดสอบแบบจำลองจากวิธีผลรวมกำลังสองของการตอบสนองเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	p-value	Prob > F
Mean vs Total	97995.8	1	97995.8			
<u>Linear vs Mean</u>	<u>782.483653</u>	<u>3</u>	<u>260.8279</u>	<u>10.349045</u>	<u>0.0005</u>	<u>Suggested</u>
2FI vs Linear	72.5218375	3	24.17395	0.950212	0.4450	
<u>Quadratic vs 2FI</u>	<u>169.705159</u>	<u>3</u>	<u>56.56839</u>	<u>3.5130755</u>	<u>0.0570</u>	<u>Suggested</u>
Cubic vs Quadratic	120.887397	4	30.22185	4.5180281	0.0504	Aliased
Residual	40.1350088	6	6.689168			
Total	99181.5331	20	4959.077			

ตาราง 13 การทดสอบ lack of fit ของการตอบสนองเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	p-value	Prob > F
Linear	<u>402.854669</u>	<u>11</u>	<u>36.62315</u>	<u>463.89738</u>	<u>&lt; 0.0001</u>	<u>Suggested</u>
2FI	330.332831	8	41.2916	523.03163	< 0.0001	
<u>Quadratic</u>	<u>160.627673</u>	<u>5</u>	<u>32.12553</u>	<u>406.92705</u>	<u>&lt; 0.0001</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	39.7402755	1	39.74028	503.3813	< 0.0001	Aliased
Pure Error	0.39473333	5	0.078947			

ตาราง 14 แบบจำลองที่เหมาะสมของการตอบสนองเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวจากวิธีการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง

Source	Std. Dev.	R-square	Adjusted R-Squared	Predicted R-Square	Press	
Linear	5.02026769	0.659916	0.5961497	0.38772	726.0006	Suggested
2FI	5.04386577	0.721078	0.5923441	0.2288908	914.3297	
Quadratic	4.01275972	0.8642	0.7419802	0.0279299	1218.85	Suggested
Cubic	2.58634262	0.966152	0.8928138	6.3884238	8760.698	Aliased

การวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล และการออกแบบส่วนประสมกลางเพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่าง ๆ จากตาราง 12 แสดงการทดสอบแบบจำลองที่มีตอบสนองเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นรูปแบบการทดลองแบบ Linear กับ Quadratic ให้ผลการแสดงการคำนวณจากค่า p-value ที่มีค่า probability > F น้อยกว่า 0.05 ถือว่ารูปแบบดังกล่าวมีความเหมาะสมกับข้อมูล โดยยืนยันด้วยการทดสอบ Lack of Fit จากตาราง 13 พบว่ารูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่โปรแกรมแนะนำเป็นรูปแบบ Linear กับ Quadratic แล้วตรวจสอบแบบจำลองที่ความเหมาะสมจากตาราง 14 พบว่าค่า R-square squared ของ Quadratic ที่มีค่ามากที่สุด บ่งบอกความเหมาะสม แม่นยำของแบบจำลอง พบว่าสมการ Quadratic มีความเหมาะสมมากที่สุด

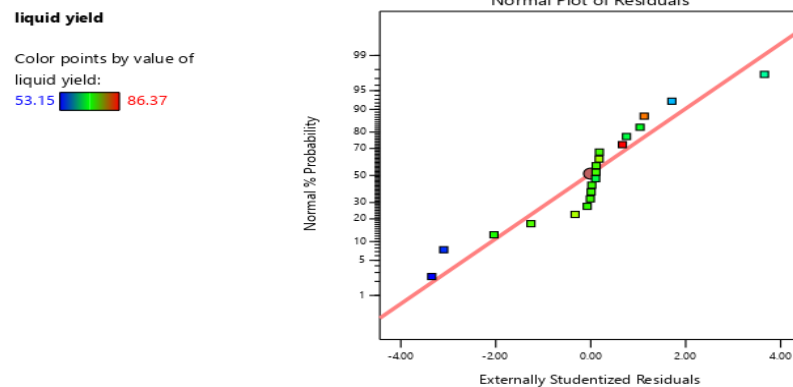
ตาราง 15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการตอบสนองการแตกสลายพลาสติกบรรจุภัณฑ์ไปเป็นของเหลว

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	p-value	Prob > F
Model	1024.711	9	113.857	7.0709	0.0026	significant
A-temperature	712.887	1	712.887	44.2725	< 0.0001	
B-N <sub>2</sub> flow rate	53.061	1	53.061	3.2952	0.0995	
C-%catalyst loading	16.536	1	16.536	1.0270	0.3348	
AB	61.883	1	61.883	3.8431	0.0784	

ตาราง 15 (ต่อ)

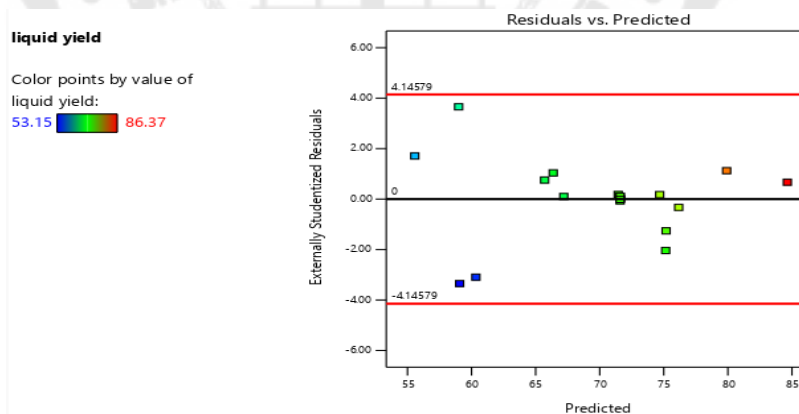
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	p-value	Prob > F
AC	1.629	1	1.629	0.1012	0.7570	
BC	9.010	1	9.010	0.5596	0.4717	
A <sup>2</sup>	1.455	1	1.455	0.0904	0.7699	
B <sup>2</sup>	152.678	1	152.678	9.4818	0.0117	
C <sup>2</sup>	5.229	1	5.229	0.3248	0.5813	
Residual	161.022	10	16.102			
Lack of Fit	160.628	5	32.126	406.9271	< 0.0001	significant
Pure Error	0.395	5	0.079			
Cor Total	1185.733	19				
Std. Dev.	4.013	R-Squared		0.864		
Mean	69.999	Adj R-Squared		0.742		
C.V. %	5.733	Pred R-Squared		-0.028		
PRESS	1218.850	Adeq Precision		10.246		

ตาราง 15 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 รูปแบบการออกแบบการทดลองกับอุณหภูมิให้ผลการแสดงการคำนวณจากค่า p-value ที่มีค่า probability > F น้อยกว่า 0.05 บ่งบอกว่าเงื่อนไขของรูปแบบการทดลองมีความสำคัญ และปัจจัยของอุณหภูมิเป็นอิทธิพลสำคัญต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว และค่า Lack of Fit มีค่า probability > F น้อยกว่า 0.05 บ่งบอกว่าสมการถดถอยที่ใช้กับข้อมูลมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่มีความเชื่อมั่นร้อยละ 95 รวมถึงค่า R-square บ่งบอกว่าตัวแบบคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมกับข้อมูลร้อยละ 0.864



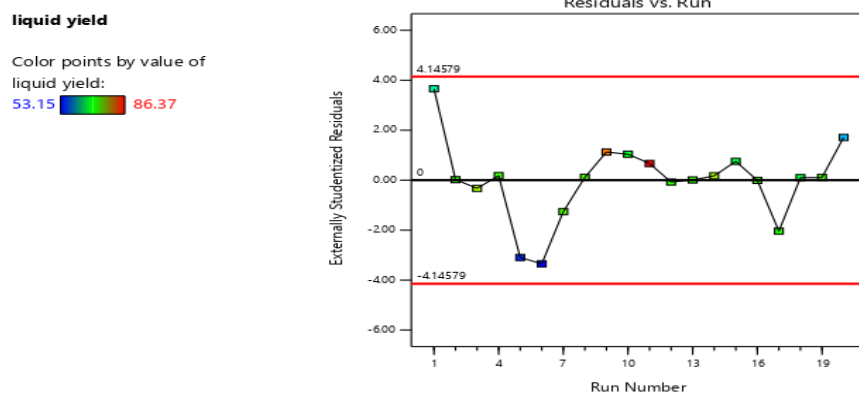
ภาพประกอบ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Normal % Probability พล็อตกับ Externally Studentized Residuals

การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงภาพประกอบ 16 พบว่ามีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทดลองไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีการแจกแจงปกติ



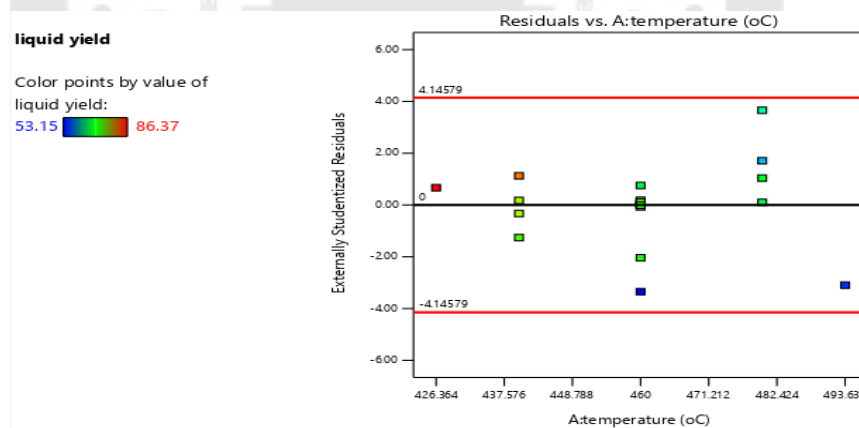
ภาพประกอบ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals พล็อตกับ Predicted

การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนจากภาพประกอบ 17 พบว่าประสิทธิภาพการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางลบและทางบวก แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพประกอบ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals  
พลอตกับ Run Number

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลจากภาพประกอบ 18 พบว่าประสิทธิภาพการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวไม่มีรูปแบบที่แน่นอน มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอของข้อมูลแสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ



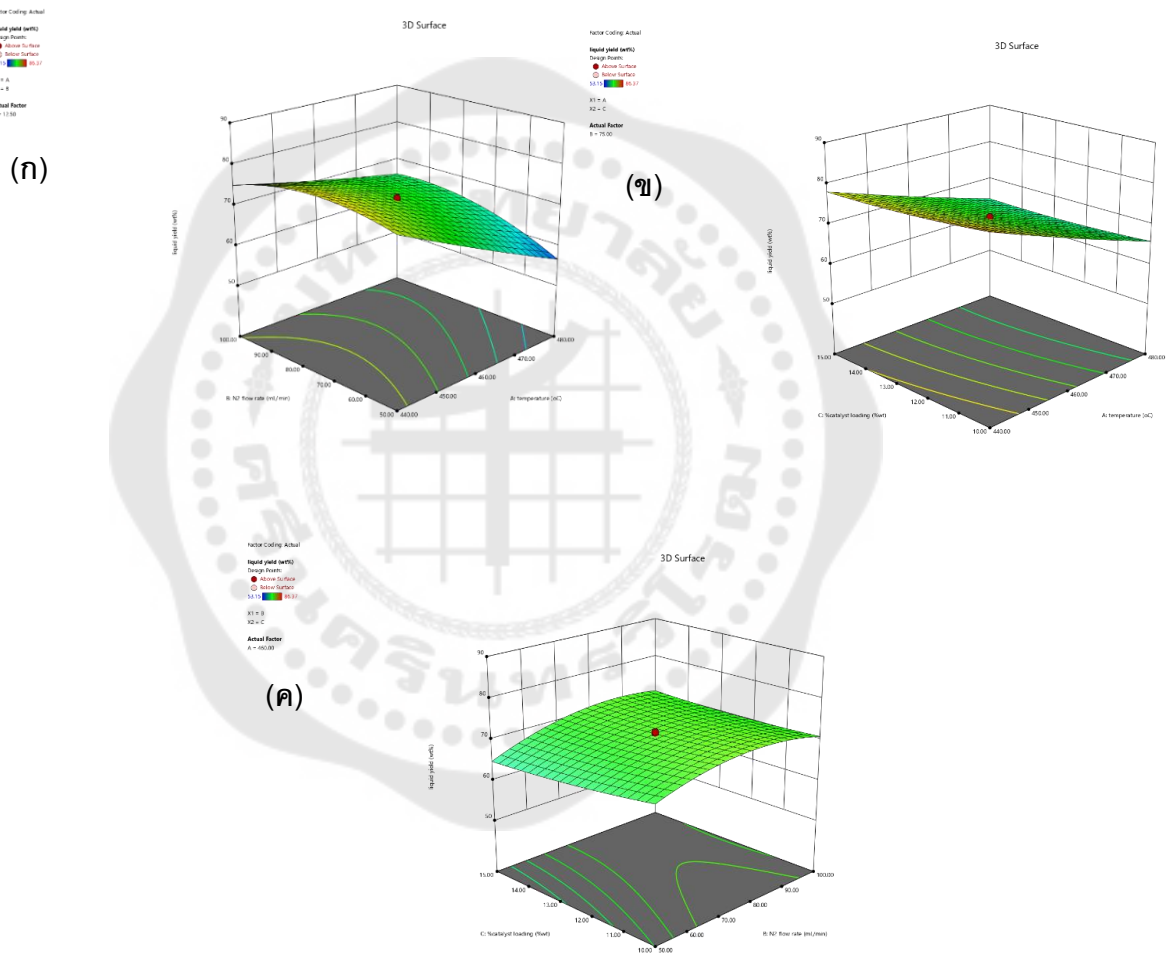
ภาพประกอบ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals  
พลอตกับพารามิเตอร์อุณหภูมิ

การตรวจสอบสมมติฐานของข้อมูลจากภาพประกอบ 19 พบว่าประสิทธิภาพการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางลบและทางบวก แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

จากแบบจำลองที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสขยะพลาสติกบรรจุก๊าซที่ไปเป็นของเหลวสามารถให้แบบจำลองที่เหมาะสมเป็นแบบจำลองแบบ Quadratic แสดงความสัมพันธ์

ระหว่างพารามิเตอร์ 2 ตัว และกำลังสองของแต่ละพารามิเตอร์ โดยให้สมการในเทอมของรหัส (code) และเทอมของค่าจริงในแต่ละพารามิเตอร์ซึ่งสามารถทำนายร้อยละการไหลไซลิสของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ตามลำดับ

$$\text{liquid yield (\%wt.)} = 71.593 - 7.225A + 1.971B - 1.100C + 2.781AB + 0.451AC + 1.061BC + 0.318A^2 - 3.255B^2 + 0.602C^2$$



ภาพประกอบ 20 แบบจำลองแสดงร้อยละผลได้ของของเหลวจากความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ (ก) คุณหมุมักับอัตราการไหลของไนโตรเจน (ข) คุณหมุมักับร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา (ค) อัตราการไหลของไนโตรเจนกับร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.3.2 การศึกษาอิทธิพลและผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เคโรซีน

การทดลองแบบแฟกทอเรียล และการออกแบบส่วนประสมกลางการทดลองแบบแฟกทอเรียล และการออกแบบส่วนประสมกลางเพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เคโรซีนจากการแตกตัวเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาของขยะพลาสติกบรจุภัณฑ์บนถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ตาราง 11 แสดงผลร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เคโรซีนอยู่ในช่วงร้อยละ 17.03 – 24.04 โดยน้ำหนัก และได้ผลวิเคราะห์ทางสถิติจาก Ease Design-Expert ดังต่อไปนี้

ตาราง 16 การทดสอบแบบจำลองจากวิธีผลรวมกำลังสองของการตอบสนองเป็นองค์ประกอบในช่วงคาบจุดเดือดเคโรซีน

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	p-value	
					Prob > F	
Mean vs Total	8651.136	1	8651.136			
Linear vs Mean	38.340	3	12.780	11.990	0.0002	
2FI vs Linear	10.289	3	3.430	6.590	0.0060	Suggested
Quadratic vs 2FI	1.072	3	0.357	0.628	0.6135	
Cubic vs Quadratic	5.313	4	1.328	20.925	0.0011	Aliased
Residual	0.381	6	0.063			
Total	8706.531	20	435.327			

ตาราง 17 การทดสอบ lack of fit ของการตอบสนองเป็นองค์ประกอบในช่วงคาบจุดเดือดเคโรซีน

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	p-value	Prob > F
Linear	16.826	11	1.530	33.504	0.0006	
<u>2FI</u>	<u>6.537</u>	<u>8</u>	<u>0.817</u>	<u>17.898</u>	<u>0.0028</u>	<u>Suggested</u>
Quadratic	5.465	5	1.093	23.941	0.0017	
Cubic	0.153	1	0.153	3.341	0.1271	Aliased
Pure Error	0.228	5	0.046			

ตาราง 18 แบบจำลองที่เหมาะสมของการตอบสนองเป็นองค์ประกอบจำพวกเคโรซีนจากวิธีการออกแบบการทดลองแบบประสมกลาง

Source	Std. Dev.	R-square	Adjusted R-Squared	Predicted R-Square	Press	
<u>Linear</u>	<u>1.032</u>	<u>0.634</u>	<u>0.435</u>	<u>31.299</u>	<u>1.032</u>	<u>Suggested</u>
2FI	0.721	0.821	0.539	25.557	0.721	
<u>Quadratic</u>	<u>0.755</u>	<u>0.805</u>	<u>0.243</u>	<u>41.942</u>	<u>0.755</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.252	0.978	0.387	33.958	0.252	Aliased

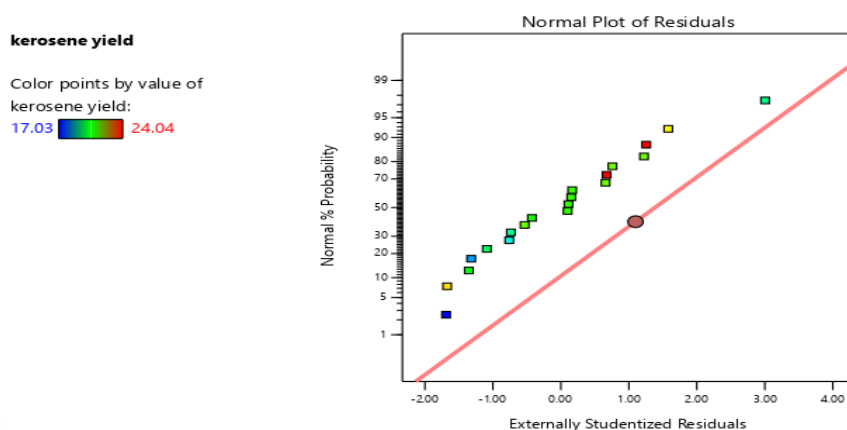
การวิเคราะห์หารูปแบบของสมการที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบ การทดลองแบบแฟกทอเรียล และการออกแบบส่วนประสมกลางเพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ของปัจจัยต่าง ๆ จากตาราง 16 แสดงการทดสอบแบบจำลองที่มีตอบสนองเป็นผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบจำพวกเคโรซีนเป็นรูปแบบการทดลองแบบ Linear กับ 2FI ให้ผลการแสดงการ คำนวณจากค่า p-value ที่มีค่า probability > F น้อยกว่า 0.05 ถือว่ารูปแบบดังกล่าว มีความเหมาะสมกับข้อมูล โดยยืนยันด้วยการทดสอบ Lack of Fit จากตาราง 17 พบว่ารูปแบบ ทางคณิตศาสตร์ที่โปรแกรมแนะนำเป็นรูปแบบ 2FI แล้วตรวจสอบแบบจำลองที่ความเหมาะสม จากตาราง 18 พบว่าค่า R-square squared ของ 2FI ที่มีค่ามากที่สุดบ่งบอกความเหมาะสม แม่นยำของแบบจำลอง พบว่าสมการ 2FI มีความเหมาะสมมากที่สุด

ตาราง 19 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการตอบสนองการแตกสลายพลาสติกบรรจุภัณฑ์ไปเป็นโครซิน

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F value	p-value	
					Prob > F	
Model	48.630	6	8.105	15.574	< 0.0001	significant
A-temperature	35.123	1	35.123	67.489	< 0.0001	
B-N <sub>2</sub> flow rate	0.185	1	0.185	0.355	0.5615	
C-%catalyst loading	3.033	1	3.033	5.828	0.0312	
AB	9.768	1	9.768	18.770	0.0008	
AC	0.296	1	0.296	0.570	0.4639	
BC	0.224	1	0.224	0.431	0.5228	
A <sup>2</sup>	6.766	13	0.520			
B <sup>2</sup>	6.537	8	0.817	17.898	0.0028	significant
C <sup>2</sup>	0.228	5	0.046			
Residual	55.395	19				
Lack of Fit	48.630	6	8.105	15.574	< 0.0001	significant
Pure Error	35.123	1	35.123	67.489	< 0.0001	
Cor Total	0.185	1	0.185	0.355	0.5615	
Std. Dev.	0.721	R-Squared		0.8779		
Mean	20.798	Adj R-Squared		0.8215		
C.V. %	3.469	Pred R-Squared		0.5386		
PRESS	25.557	Adeq Precision		14.1168		

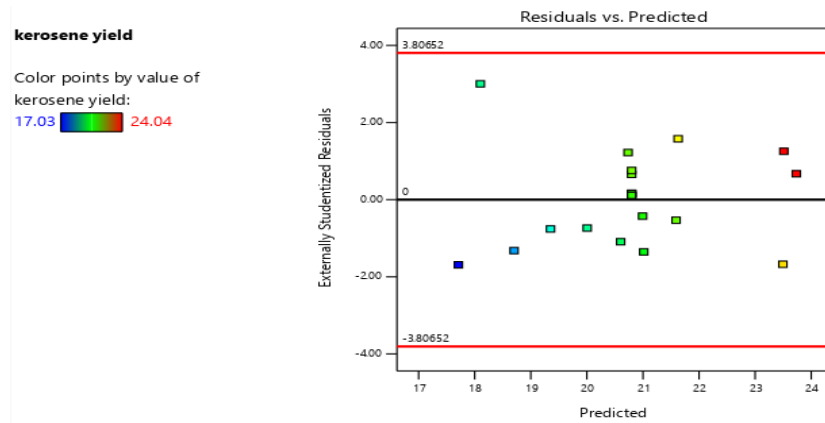
ตาราง 19 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เป็นการตรวจสอบแหล่งผันแปรของแบบจำลองที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 รูปแบบการออกแบบการทดลอง คุณภูมิ และร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาให้ผลการแสดงการคำนวณจากค่า p-value ที่มีค่า probability > F น้อยกว่า 0.05 บ่งบอกว่าเงื่อนไขของรูปแบบการทดลองมีความสำคัญ และปัจจัยของคุณภูมิเป็น

อิทธิพลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์องค์ประกอบจำพวกเคโรซีนสูงกว่าร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา สังเกตได้จากค่า F value ที่สูงกว่า และค่า Lack of Fit มีค่า probability > F น้อยกว่า 0.05 บ่งบอกว่าสมการถดถอยที่ใช้กับข้อมูลมีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 รวมถึงค่า R-square บ่งบอกว่าตัวแบบคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมกับข้อมูลร้อยละ 0.878



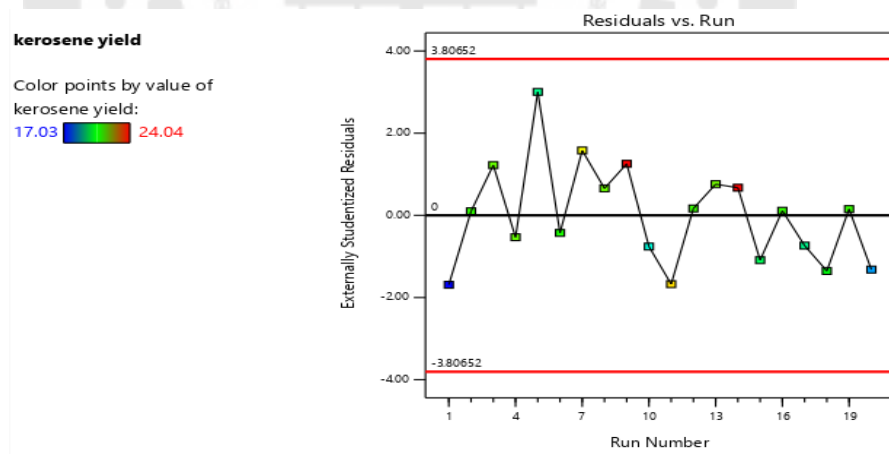
ภาพประกอบ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Normal % Probability พล็อตกับ Externally Studentized Residuals

การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ จากภาพประกอบ 21 พบว่ามีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนจากการทดลองไม่แสดงสิ่งผิดปกติให้เห็น จึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนมีการแจกแจงปกติ



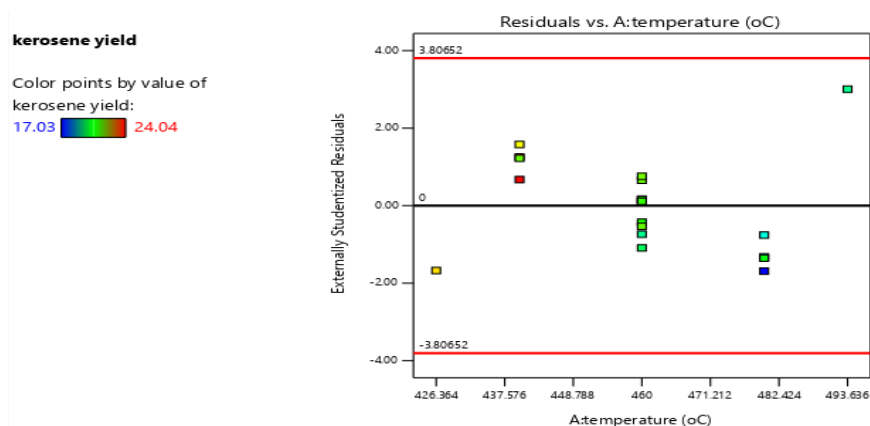
ภาพประกอบ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals  
พลอตกับ Predicted

การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนจากภาพประกอบ 22 พบว่าประสิทธิภาพการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางลบและทางบวก แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพประกอบ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals  
พลอตกับ Run Number

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลจากภาพประกอบ 23 พบว่าประสิทธิภาพการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนไม่มีรูปแบบที่แน่นอน มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอของข้อมูลแสดงว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระ



ภาพประกอบ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนที่ตกค้าง Externally Studentized Residuals  
พลอตกับพารามิเตอร์อุณหภูมิ

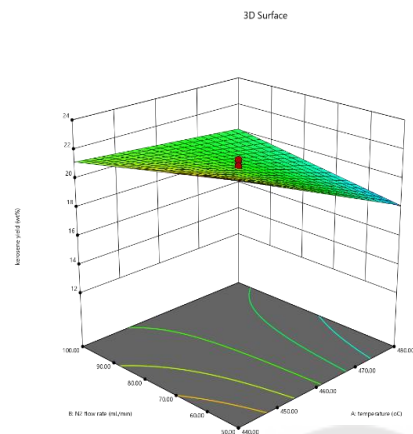
การตรวจสอบสมมติฐานของข้อมูลจากภาพประกอบ 24 พบว่าประสิทธิภาพการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั้งทางลบและทางบวก แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

จากแบบจำลองที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ไปเป็นเคโรซีนสามารถให้แบบจำลองที่เหมาะสมเป็นแบบจำลองแบบ 2FI แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ 2 ตัว โดยให้สมการในเทอมของรหัส (code) และเทอมของค่าจริงในแต่ละพารามิเตอร์ซึ่งสามารถทำนายร้อยละการไพโรไลซิสของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ไปเป็นเคโรซีนตามลำดับ

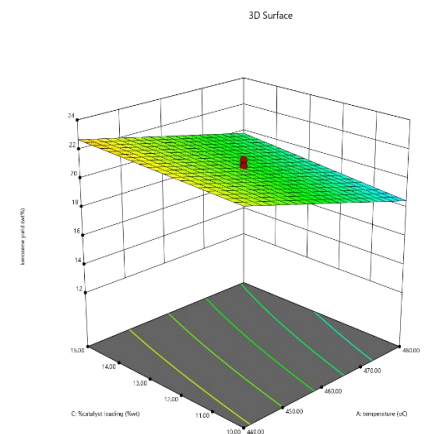
$$\text{kerosene yield (\%wt.)} = 20.798 - 1.604A - 0.116B + 0.471C + 1.105AB + 0.1925AC + 0.1675BC$$

Factor Coding Actual  
 Response yield (wt%)  
 100.00 100.00  
 97.00 97.00  
 94.00 94.00  
 91.00 91.00  
 88.00 88.00  
 85.00 85.00  
 82.00 82.00  
 79.00 79.00  
 76.00 76.00  
 73.00 73.00  
 70.00 70.00  
 67.00 67.00  
 64.00 64.00  
 61.00 61.00  
 58.00 58.00  
 55.00 55.00  
 52.00 52.00  
 49.00 49.00  
 46.00 46.00  
 43.00 43.00  
 40.00 40.00  
 37.00 37.00  
 34.00 34.00  
 31.00 31.00  
 28.00 28.00  
 25.00 25.00  
 22.00 22.00  
 19.00 19.00  
 16.00 16.00  
 13.00 13.00  
 10.00 10.00  
 7.00 7.00  
 4.00 4.00  
 1.00 1.00  
 0.00 0.00  
 Actual Factor  
 C = 12.00

(ก)



(ข)



Factor Coding Actual

Response yield (wt%)

100.00 100.00

97.00 97.00

94.00 94.00

91.00 91.00

88.00 88.00

85.00 85.00

82.00 82.00

79.00 79.00

76.00 76.00

73.00 73.00

70.00 70.00

67.00 67.00

64.00 64.00

61.00 61.00

58.00 58.00

55.00 55.00

52.00 52.00

49.00 49.00

46.00 46.00

43.00 43.00

40.00 40.00

37.00 37.00

34.00 34.00

31.00 31.00

28.00 28.00

25.00 25.00

22.00 22.00

19.00 19.00

16.00 16.00

13.00 13.00

10.00 10.00

7.00 7.00

4.00 4.00

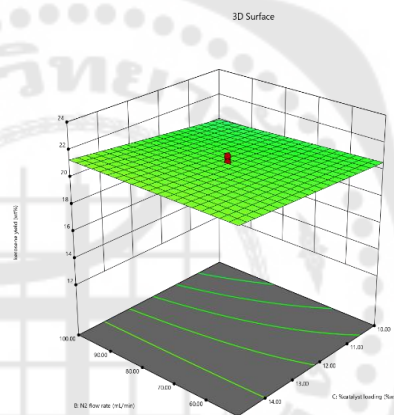
1.00 1.00

0.00 0.00

Actual Factor

A = 40.00

(ค)



ภาพประกอบ 25 แบบจำลองแสดงร้อยละผลได้ขององค์ประกอบในช่วงจุดเดือดของเคโรซีนจาก  
 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ (ก) คุณหมุมักับอัตราการไหลแก๊สของไนโตรเจน

(ข) คุณหมุมักับร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา

(ค) อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนกับร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4.3.3 คำนวณภาวะที่เหมาะสมต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ด้วย Ease Design-Expert

ตาราง 20 ขอบเขตของการหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสม

Name	Goal	Lower limit	Upper limit	Unit
Temp	is in range	440	480	°C
N <sub>2</sub>	is in range	50	100	mL/min
Catalyst	is in range	10	15	% wt.
Liquid yield	maximize	53.15	86.37	% wt.
Kerosene yield	maximize	17.03	24.04	% wt.

ตาราง 21 ผลการคำนวณภาวะดำเนินการที่เหมาะสมจากโปรแกรม Ease Design-Expert

Number	temp (°C)	N <sub>2</sub> flow (mL/min)	catalyst (% wt.)	liquid yield (%wt.)	kerosene yield (%wt.)	Desirability	
1	440.00	50.00	10.00	79.91	23.51	0.86	<u>selected</u>
2	440.00	50.27	10.00	79.96	23.50	0.86	
3	440.00	50.00	10.02	79.87	23.51	0.86	
4	440.00	50.00	10.05	79.83	23.51	0.86	
5	440.00	51.59	10.00	80.19	23.42	0.86	
6	440.02	51.27	10.00	80.12	23.44	0.86	
7	440.00	51.83	10.00	80.23	23.41	0.86	
8	440.00	50.06	10.09	79.78	23.51	0.86	
9	440.00	52.45	10.00	80.33	23.38	0.86	
10	440.00	52.64	10.00	80.36	23.37	0.86	
11	440.00	50.00	10.13	79.72	23.52	0.86	
12	440.20	50.01	10.00	79.80	23.48	0.86	
13	440.00	53.99	10.00	80.56	23.29	0.86	

ตาราง 21 (ต่อ)

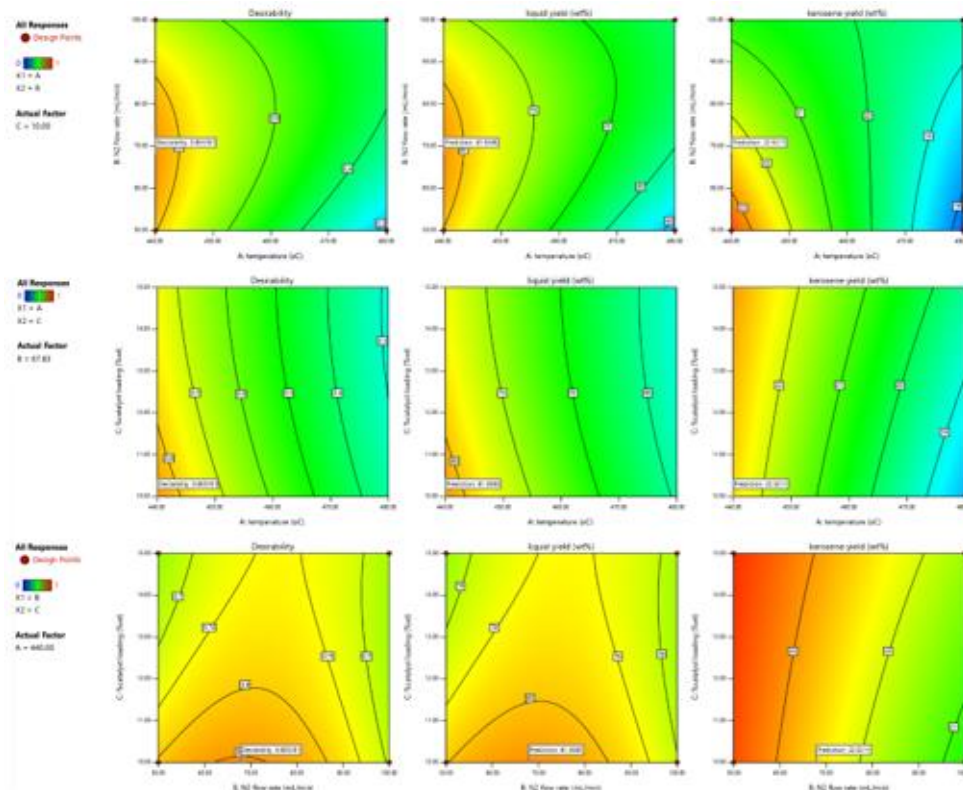
Number	temp (°C)	N <sub>2</sub> flow (mL/min)	catalyst (% wt.)	liquid yield (%wt.)	kerosene yield (%wt.)	Desirability
14	440.00	54.74	10.00	80.67	23.25	0.86
15	440.19	52.86	10.00	80.29	23.33	0.86
16	440.00	50.01	10.39	79.33	23.53	0.86
17	440.59	50.00	10.00	79.58	23.43	0.85
18	440.00	57.95	10.00	81.05	23.07	0.85
19	440.00	52.31	10.56	79.51	23.41	0.85
20	440.00	50.00	10.67	78.93	23.54	0.85
21	440.00	58.69	10.00	81.13	23.03	0.85
22	440.00	58.89	10.00	81.14	23.02	0.85
23	440.00	50.00	10.84	78.70	23.55	0.85
24	440.00	60.12	10.00	81.25	22.95	0.85
25	440.00	60.53	10.00	81.28	22.93	0.84
26	440.00	60.95	10.00	81.31	22.90	0.84
27	440.00	50.33	11.17	78.33	23.55	0.84
28	440.00	50.00	11.23	78.17	23.57	0.84
29	440.00	50.00	11.90	77.35	23.60	0.83
30	440.00	50.00	12.00	77.24	23.60	0.82
31	440.00	52.11	12.08	77.59	23.50	0.82
32	440.00	57.99	11.88	78.78	23.19	0.82
33	440.00	67.18	10.00	81.56	22.56	0.82
34	440.00	68.05	10.00	81.56	22.51	0.82
35	440.00	54.27	12.63	77.44	23.42	0.82
36	440.00	57.85	12.58	78.09	23.25	0.82
37	440.00	51.49	12.64	76.88	23.56	0.82

ตาราง 21 (ต่อ)

Number	temp (°C)	N <sub>2</sub> flow (mL/min)	catalyst (% wt.)	liquid yield (%wt.)	kerosene yield (%wt.)	Desirability
38	440.00	50.01	12.66	76.53	23.63	0.81
39	440.00	55.11	12.88	77.37	23.40	0.81
40	440.00	59.72	12.74	78.21	23.17	0.81
41	440.00	52.68	13.06	76.73	23.52	0.81
42	440.00	57.70	13.12	77.61	23.29	0.81
43	440.00	58.42	13.15	77.70	23.26	0.81
44	440.00	54.56	13.23	76.97	23.44	0.81
45	440.00	59.87	13.09	77.95	23.18	0.81
46	440.00	54.59	13.36	76.87	23.45	0.81
47	440.00	62.82	12.71	78.59	23.01	0.81
48	440.00	54.97	13.38	76.92	23.43	0.81
49	440.00	56.85	13.46	77.21	23.35	0.81
50	440.00	57.61	13.47	77.33	23.31	0.81
51	440.00	57.02	13.58	77.15	23.35	0.81
52	440.00	55.19	13.55	76.84	23.43	0.81
53	440.14	63.13	12.94	78.38	23.00	0.80
54	440.00	57.67	14.10	76.92	23.35	0.80
55	440.00	57.81	14.18	76.89	23.35	0.80
56	440.00	59.19	14.45	76.98	23.31	0.80
57	440.00	59.89	14.44	77.10	23.28	0.80
58	440.00	61.06	14.46	77.26	23.23	0.80
59	440.00	59.85	14.56	77.03	23.29	0.80
60	440.00	58.98	14.57	76.88	23.33	0.80
61	440.00	61.31	14.52	77.27	23.22	0.80

ตาราง 21 (ต่อ)

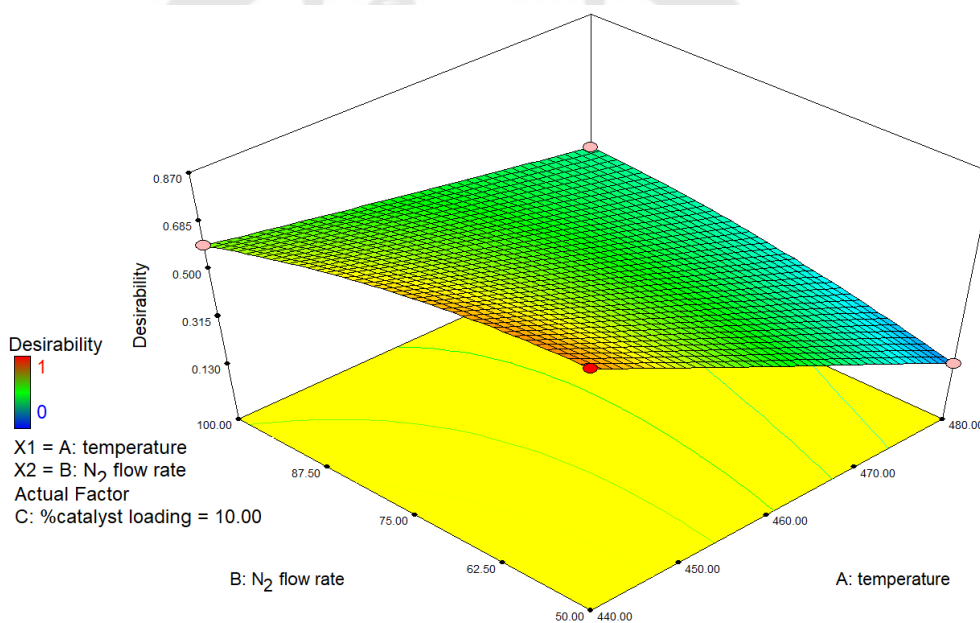
Number	temp (°C)	N <sub>2</sub> flow (mL/min)	catalyst (% wt.)	liquid yield (%wt.)	kerosene yield (%wt.)	Desirability
62	440.00	59.17	14.66	76.87	23.32	0.80
63	440.00	59.67	14.67	76.95	23.30	0.80
64	440.00	59.98	14.68	77.00	23.29	0.80
65	440.00	61.01	14.68	77.16	23.25	0.80
66	440.00	61.89	14.55	77.34	23.20	0.80
67	440.00	59.79	14.75	76.94	23.30	0.80
68	440.00	59.91	14.77	76.95	23.30	0.80
69	440.00	60.14	14.91	76.92	23.30	0.80
70	440.00	61.19	14.89	77.10	23.25	0.80
71	440.00	60.48	14.99	76.95	23.29	0.80
72	440.02	60.90	14.99	77.01	23.27	0.80
73	440.00	62.11	15.00	77.19	23.22	0.80
74	440.00	64.03	15.00	77.45	23.14	0.80
75	440.02	68.75	15.00	77.91	22.94	0.79
76	440.00	74.03	10.00	81.36	22.18	0.79
77	440.00	70.83	15.00	78.05	22.86	0.79
78	440.00	74.91	15.00	78.19	22.68	0.78
79	440.00	77.94	15.00	78.17	22.56	0.77
80	440.00	79.66	15.00	78.12	22.48	0.77
81	453.35	100.00	15.00	72.24	21.42	0.60



ภาพประกอบ 26 การตอบสนองแบบ contour ของภาวะดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการไฟโวลติสซยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ที่ให้อ้อยละผลได้ของน้ำมันและองค์ประกอบเคโรซีนสูงสุด ตาราง 22 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จาก Ease Design-Expert จากการไฟโวลติสซยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ภาวะจากการทดลองจริง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	440	440
อัตราส่วนของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	50	50
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ (โดยน้ำหนัก)	10	10
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว	79.91	81.86
ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีน	23.51	22.74

จากการวิเคราะห์ภาวะที่เหมาะสมในการพิจารณาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เคโรซีนมีอิทธิพลของตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ของเหลวและร้อยละ 79.91 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์เคโรซีนร้อยละ 23.51 โดยน้ำหนัก นำภาวะดังกล่าวมาดำเนินการทำการทดลองจริงพบว่าการทดลองจริงให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวและร้อยละ 81.86 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์เคโรซีนร้อยละ 22.74 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดลองร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวและร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนสอดคล้องกันที่ระดับความคลาดเคลื่อนร้อยละ 2.38 และ 3.39 ตามลำดับ

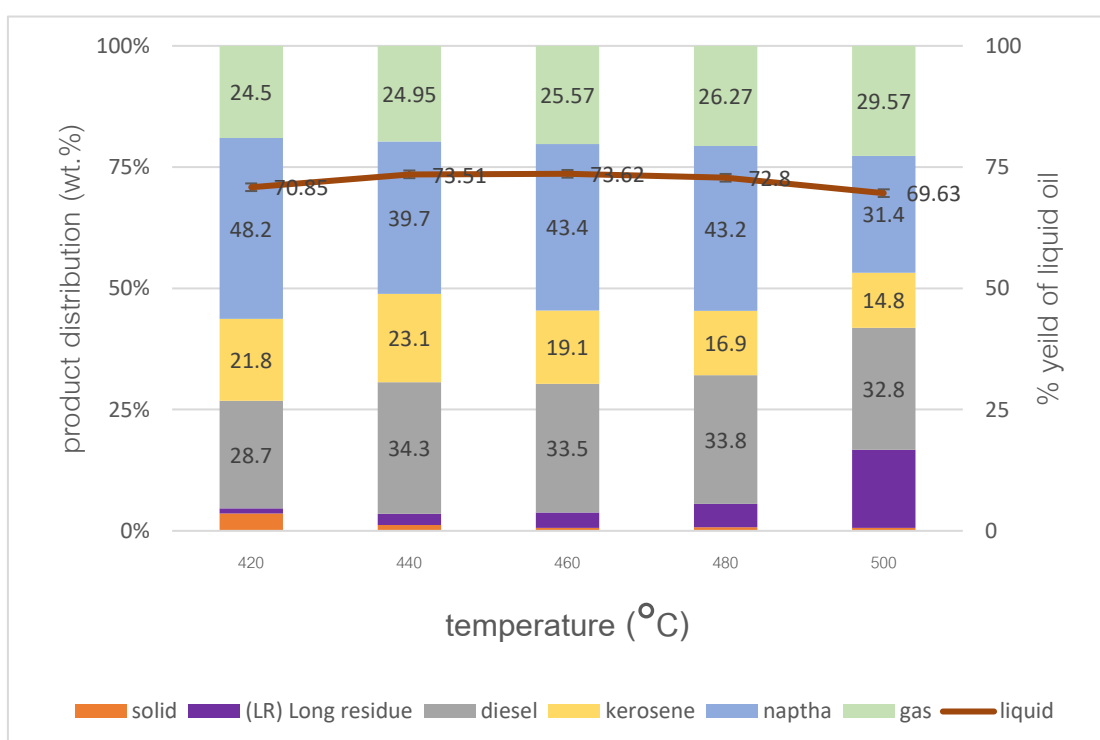


ภาพประกอบ 27 พื้นที่ผิวตอบสนองของภาวะดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับการไฟโรไลซิส  
ขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ที่ให้อ้อยละผลได้ของน้ำมันและองค์ประกอบเคโรซีนสูงที่สุด

#### 4.4 ผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อร้อยละผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์

จากการวิเคราะห์การทดลองด้วยวิธี ANOVA จึงทราบปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนจากกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกบนถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ซึ่งทำการศึกษาปัจจัยเหล่านี้ส่งผลอย่างไรโดยการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ค่าต่ำสุดถึงสูงสุดของแต่ละปัจจัยดังต่อไปนี้

##### 4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

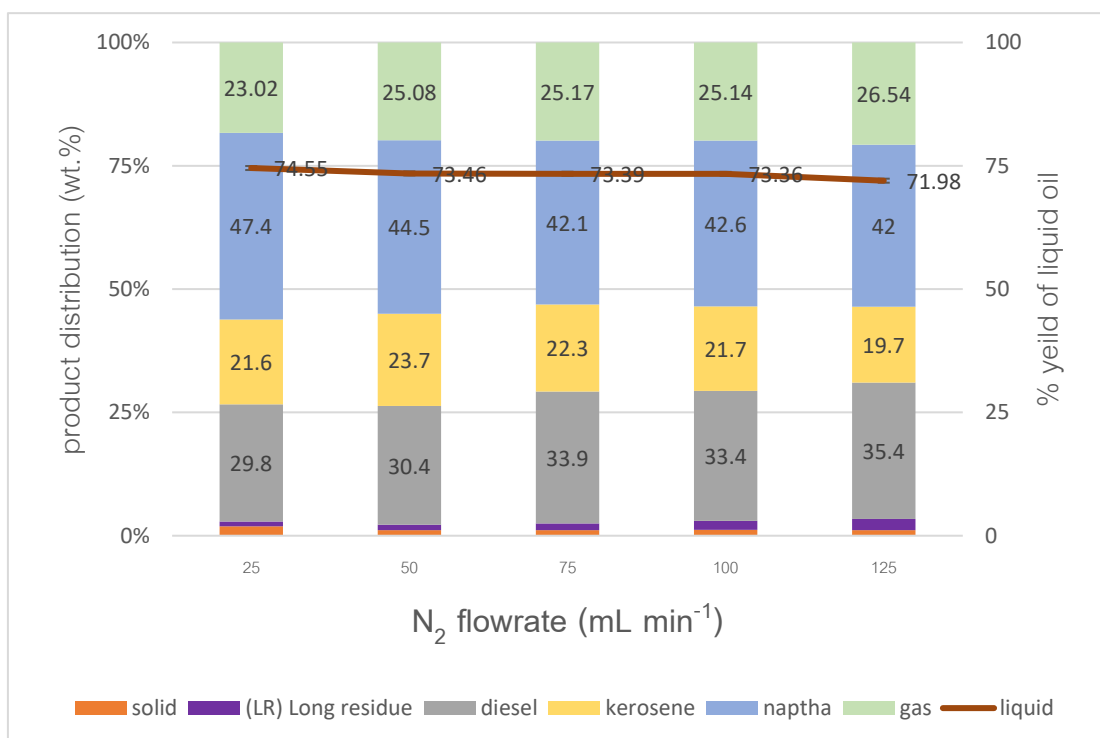


ภาพประกอบ 28 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส (อัตราส่วนของพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5)

ภาพประกอบ 28 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นที่ 460 องศาเซลเซียสจะให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวในปริมาณที่มากขึ้น การทดลองนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ ซึ่งอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมการสลายตัวของพลาสติก พลาสติกประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นหลัก ในโมเลกุลของพอลิเมอร์ยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ พันธะโควาเลนต์ เมื่อเข้าสู่กระบวนการ

ไพโรไลซิสโดยการใช้ความร้อนพลาสติกจะเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) พลาสติกเกิดการแตกสลายของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก อิทธิพลของอุณหภูมิทำให้สารระเหยที่มีขนาดกลางและขนาดเล็กเกิดการแตกสลายขั้นทุติยภูมิของสารระเหย พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส ส่งผลให้แก๊สเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 24.5 ถึง 29.57 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเกิดการแตกสลายตัวขั้นทุติยภูมิของสารระเหยผลิตภัณฑ์ของเหลวไปเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ส่งผลให้ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้น และอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 420 ถึง 460 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 70.85 ถึง 73.62 โดยน้ำหนัก รวมถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 420 ถึง 440 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ร้อยละผลิตภัณฑ์เคโรซีนเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 21.8 ถึง 23.1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากขณะที่สารระเหยอยู่ภายในเตาปฏิกรณ์มีช่วงของอุณหภูมิที่ความเหมาะสมกับแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่จะแตกตัวอยู่ในรูปของอนุโมลอิสระแล้วเกิดการจัดรูปของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนในช่วงของคาร์บอนอะตอมของผลิตภัณฑ์เคโรซีน ( $C_{12} - C_{15}$ ) ได้ดีที่สุดกว่าการใช้อุณหภูมิสูงในการไพโรไลซ์ (480 – 500 องศาเซลเซียส) ที่จะให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแก๊สเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากขณะที่สารระเหยอยู่ภายในเตาปฏิกรณ์เกิดการให้อัตราความร้อนอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้สารระเหยอยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่จะเกิดการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนไปเป็นเป็นผลิตภัณฑ์เคโรซีนนั้นน้อยลง ตรงกันข้ามอิทธิพลของอุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิของสารระเหยได้มากสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์เคโรซีน ( $C_{12} - C_{15}$ ) พบได้มากที่สุดจากอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส ที่ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีน 23.1 โดยน้ำหนัก

#### 4.4.2 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

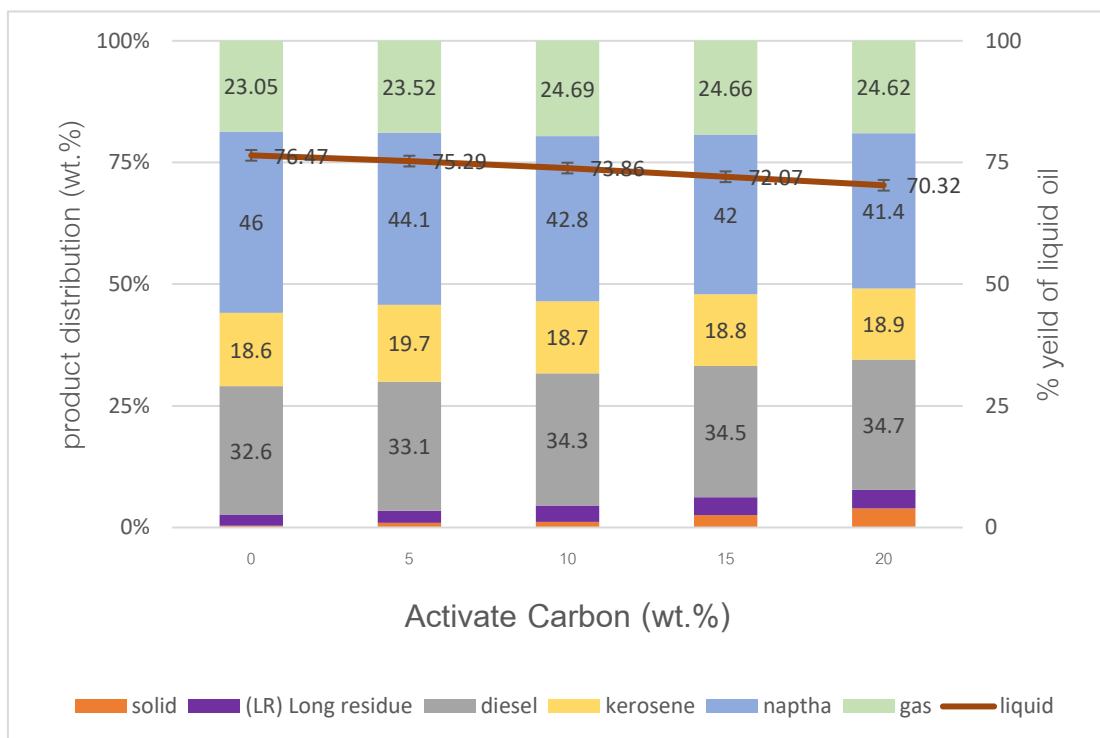


ภาพประกอบ 29 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (อัตราส่วนของพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลส์ 440 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5)

ภาพประกอบ 29 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่ำส่งผลต่อระยะเวลาของสารระเหยที่อยู่ภายในเตาปฏิกรณ์เป็นระยะเวลานาน จึงเกิดการแตกสลายของสายโซ่พอลิเมอร์เป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง แล้วเกิดการแตกสลายของไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำนวนมากส่งผลให้ได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวในปริมาณสูงซึ่งสัมพันธ์กับร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ลดลงกับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่สูงขึ้นจากร้อยละ 74.55 ถึง 71.98 โดยน้ำหนัก ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนสูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 23.02 ถึง 26.54 โดยน้ำหนัก และร้อยละผลิตภัณฑ์กาน้ำมันสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่สูงแปรผันต่อระยะเวลาของสารระเหยภายในเตาปฏิกรณ์ อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนสูงส่งผลต่อสารระเหยที่เกิดจากการแตกสลายเชิงความร้อนไปเป็นอนุภาคลิขระ และการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งอาจทำให้ไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ พบว่าอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน

50 มิลลิลิตรต่อนาที่ สามารถนำสารระเหยที่ออกมาจากเตาปฏิกรณ์ควบแน่นได้ร้อยละผลิตภัณฑ์  
เคโรซีนสูงสุดร้อยละ 23.7 โดยน้ำหนัก

#### 4.4.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

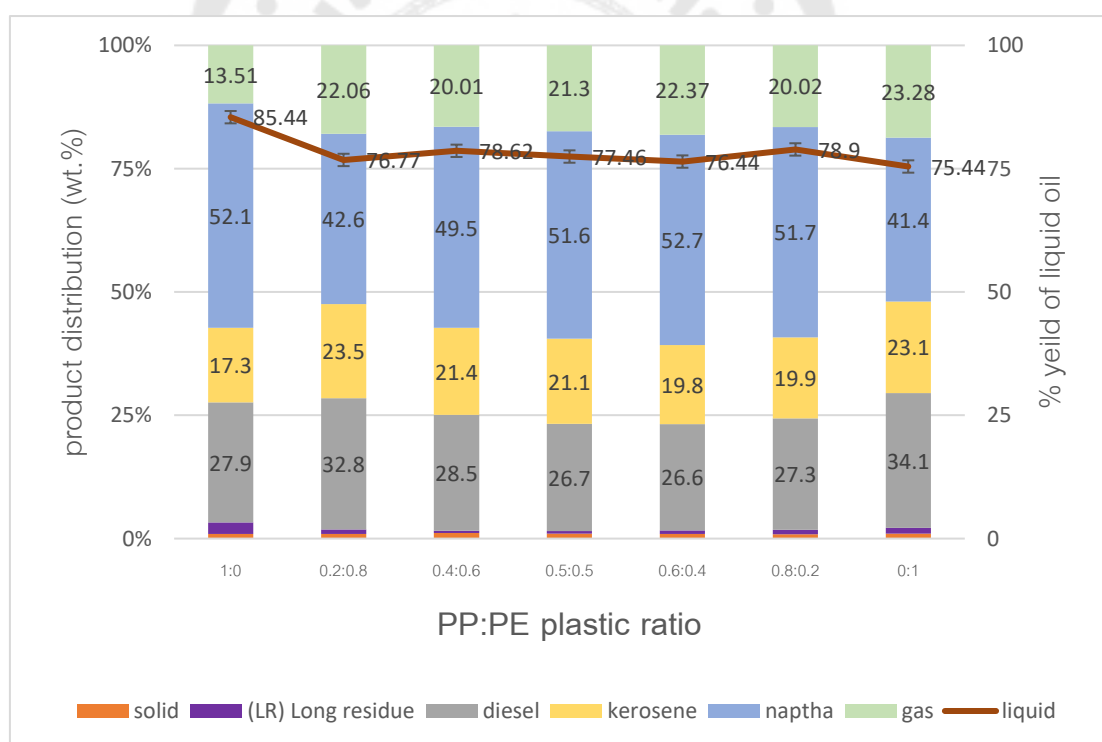


ภาพประกอบ 30 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา  
ถ่านกัมมันต์ (อัตราส่วนของพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่  
ใช้ในการไพโรไลส์ 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที่)

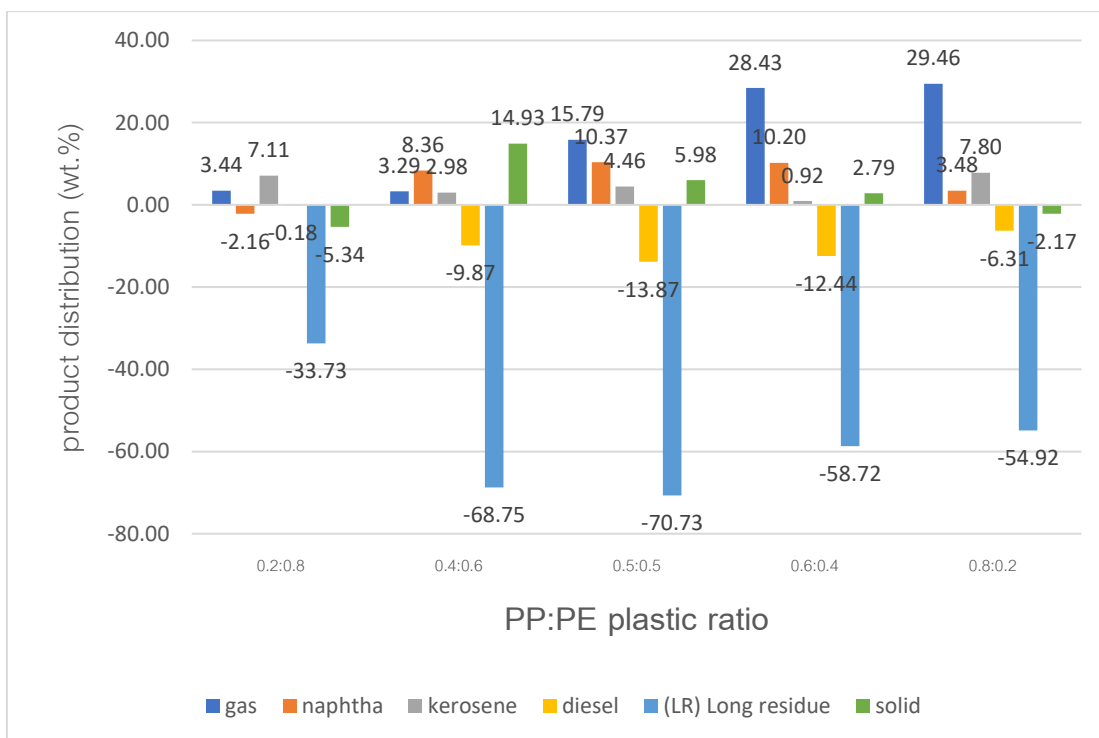
ภาพประกอบ 30 ปริมาณร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้  
ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงจาก 76.47 ถึง 70.32 โดยน้ำหนัก ตรงกันข้ามกับ  
ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สกับกากน้ำมันที่มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องในช่วงแรกเกิดการแตกสลาย  
เชิงความร้อนที่อุณหภูมิมีผลอย่างมากในการแตกสลายของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของพอลิเอทิลีน  
กับพอลิพรอพิลีนให้อยู่ในรูปของอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็น  
สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางพร้อมทั้งการแตกสลายเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์มีรูพรุน  
ขนาดกลาง และมีพื้นที่ก่อกัมมันต์สำหรับถ่ายโอนไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการแตกสลาย  
เชิงความร้อนในช่วงต้นจะส่งเสริมปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนที่ตำแหน่งของพื้นที่ก่อกัมมันต์  
ส่งผลให้เกิดการตัดของพันธะ C-C จำนวนมาก การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มพื้นที่

ก่อนกำมันต์ ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ การลดลงของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เนฟทาจาก 46 ถึง 41.4 โดยน้ำหนัก กับการเพิ่มขึ้นของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลจาก 32.6 ถึง 34.7 โดยน้ำหนัก และที่ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 เป็นต้นไป มีแนวโน้มการให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โครซีนลดลง ซึ่งให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โครซีนต่ำสุดที่การไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะเห็นได้ว่าการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกำมันต์ที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ผลิตภัณฑ์สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนในช่วงของโครซีน ( $C_{12}-C_{15}$ ) กล่าวได้ว่าพลาสติกเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันด้วยการแตกตัวเชิงความร้อน ซึ่งเกิดควบคู่กับการแตกตัวเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย ถ่านกำมันต์ที่มีรูพรุนในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับของโมเลกุลขนาดเล็กได้มากยิ่งขึ้น และคุณสมบัติที่มีความเป็นกรด

#### 4.4.4 ผลของอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของพลาสติกประเภทพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 31 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน (ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกำมันต์ร้อยละ 5 อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลส์ 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที)



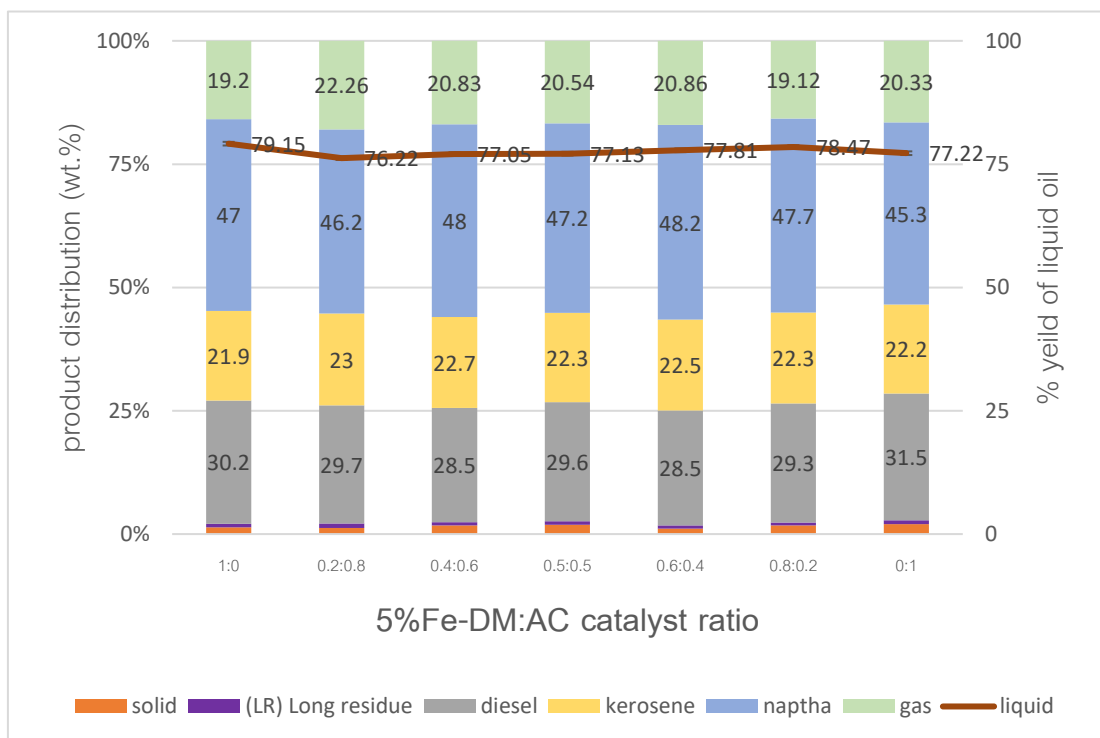
ภาพประกอบ 32 ผลการเสริมและหักล้างกันของกระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน (ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที)

ภาพประกอบ 31 แสดงอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของอัตราส่วนพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีนในภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าอัตราส่วนพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 1 ต่อ 0 และ 0 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดและต่ำสุดร้อยละ 85.44 และ 75.44 โดยน้ำหนัก ในทางกลับกันอัตราส่วนพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2 ต่อ 0.8 และ 1 ต่อ 0 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ของเคโรซีนสูงสุดและต่ำสุดร้อยละ 23.5 และ 17.3 โดยน้ำหนัก แสดงว่าพอลิเอทิลีนมีอิทธิพลการเสริมกันและหักล้างกับพอลิพรอพิลีนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนและร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว ในทางกลับกันพอลิพรอพิลีนมีอิทธิพลเสริมกันและหักล้างกันกับพอลิเอทิลีนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวและร้อยละของผลิตภัณฑ์เคโรซีน เนื่องจากโครงสร้างของพอลิเอทิลีนมีจำนวนคาร์บอนสามอะตอมสายโซ่โมเลกุลมีกิ่งก้านสาขาต่ำแสดงถึงความเป็นผลึกสูง และโครงสร้างของพอลิพรอพิลีนมีจำนวนคาร์บอนสองอะตอม สายโซ่โมเลกุลมีกิ่งก้านสาขาแสดงถึงความเป็นผลึกปานกลาง

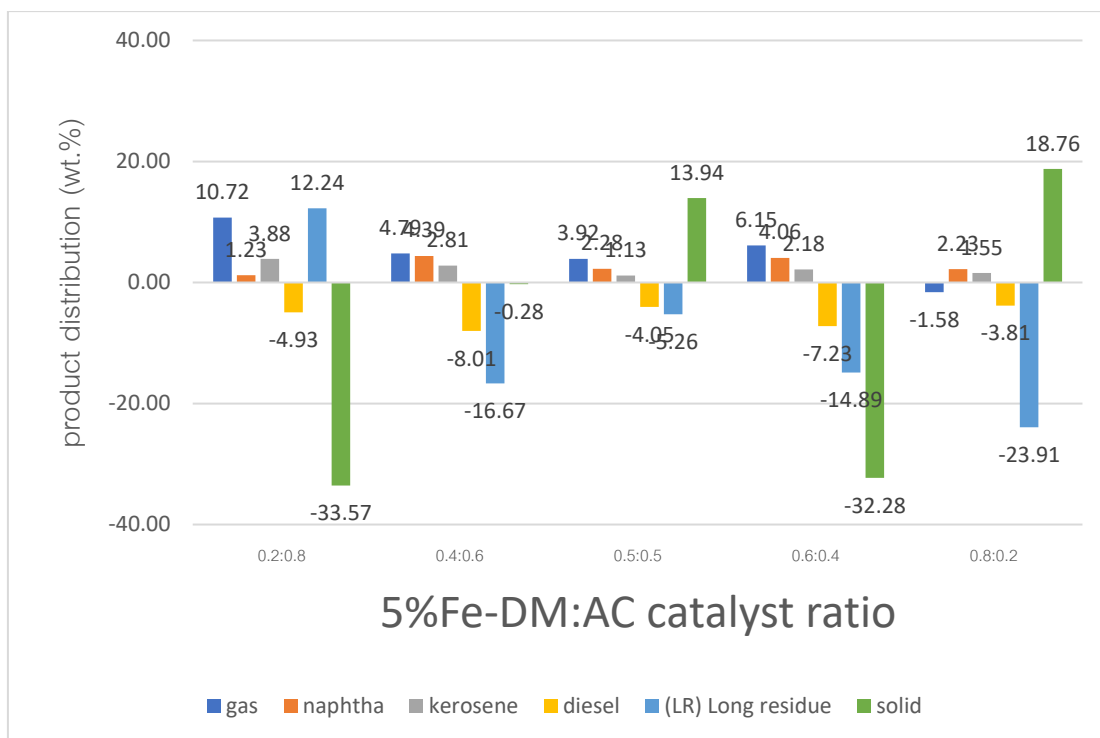
ในช่วงแรกสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกสลายเชิงความร้อนอยู่ในรูปของอนุภาคมูลอิสระ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางกับตัวเร่งปฏิกิริยา ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดกลาง เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวบนพื้นที่ก่อกัมมันต์ของถ่านกัมมันต์ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ที่  $C_5 - C_{15}$

ภาพประกอบ 32 อัตราส่วนของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2 ต่อ 0.8 โดยน้ำหนัก เป็นต้นไป ให้ผลการเสริมกันเชิงบวกต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าร้อยละ 3.44 ถึง 29.46 สามารถอธิบายได้ว่าสายโซ่โมเลกุลมีกิ่งก้านสาขาแสดงถึงความเป็นผลึกปานกลางของพอลิพรอพิลีนส่งเสริมการเกิดการแตกสลายขั้นทุติยภูมิ ในการตัดการโซ่ไฮโดรคาร์บอนกลางและขนาดเล็กที่ได้จากการแตกสลายเชิงความร้อนในช่วงแรกไปเป็นสารระเหยขนาดเล็กที่ไม่สามารถควบแน่นได้ อัตราส่วนของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2 ต่อ 0.8 ถึง 0.5 ต่อ 0.5 โดยน้ำหนัก และ 0.5 ต่อ 0.5 ถึง 0.8 ต่อ 0.2 โดยน้ำหนัก ให้ผลการเสริมกันเชิงลบต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลมีค่าร้อยละ -0.18 ถึง -13.87 และร้อยละ -13.87 ถึง -6.31 รวมถึงกากน้ำมันที่ให้ผลการเสริมกันเชิงลบที่อัตราส่วนพลาสติกต่อร้อยละ -33.73 ถึง -70.73 และ -70.73 ถึง -54.92 ที่อัตราส่วนของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2 ต่อ 0.8 โดยน้ำหนัก ให้ผลการเสริมกันเชิงลบร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลและกากน้ำมันน้อยที่สุด เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนมีกิ่งก้านสาขาต่ำแสดงถึงความเป็นผลึกสูงเกิดการแตกสลายของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนได้ช้า และไม่สนับสนุนการเกิดการแตกสลายขั้นทุติยภูมิ อัตราส่วนของพลาสติกพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2 ต่อ 0.8 กับ 0.8 ต่อ 0.2 โดยน้ำหนัก ให้ผลการเสริมกันเชิงบวกต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนสูงที่ค่าร้อยละ 7.11 และ 7.80

#### 4.4.5 ผลของอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับไดโกลไมต์ที่ฝังเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์



ภาพประกอบ 33 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนไดโกลไมต์ร้อยละ 5 (อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลส์ 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที)



ภาพประกอบ 34 ผลการเสริมและหักล้างกันของกระบวนการไพโรไลซิสของตัวเร่งปฏิกิริยา ถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดไลไมตรี้อยละ 5 (อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก คุณสมบัติที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที)

จากภาพประกอบ 33 แสดงอิทธิพลการเสริมกันหรือหักล้างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา ถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดไลไมตรี้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2 ต่อ 0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ในภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ทุกอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดไลไมตรี้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ไม่มีความแตกต่างกัน จึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดไลไมตรี้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ไม่มีการส่งเสริมหรือหักล้างกัน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียวเพียงต่อความต้องการของผลิตภัณฑ์และไม่เกิดความสิ้นเปลือง ในช่วงแรกอุณหภูมิมีผลอย่างมากในการแตกสลายของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนของพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีนให้อยู่ในรูปของอนุโมลอิสระทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง และเมื่อภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ที่แสดงจากอิทธิพลการแตกสลายเชิงความร้อนและการเปลี่ยนแปลง

น้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส พลาสติกทั้งสองชนิดเกิดการแตกตัวไปเป็นสายไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง เมื่อรับอิทธิพลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนโดโลไมต์ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทวิวิธพันธ์กรด การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนโดโลไมต์เป็นการเพิ่มพื้นที่ก่อกัมมันต์ส่งผลให้เป็นบริเวณที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการแตกสลายเชิงความร้อนในช่วงต้นจะมาส่งเสริมปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนที่ตำแหน่งของพื้นที่ก่อกัมมันต์เหล็กบนโดโลไมต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และเกิดการจัดโครงสร้างของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นไฮโดรคาร์บอนจำพวกอะลิฟาติกที่มีความอึดตัวในช่วงคาร์บอนอะตอมระหว่าง  $C_{12} - C_{15}$  นอกจากนี้ยังพบว่าสายโซ่ขนาดกลางและเล็ก สามารถแตกสลายเชิงความร้อนได้ต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนหรือไฮโดรคาร์บอนที่มีช่วงอะตอมตั้งแต่  $C_5 - C_{12}$  และแตกสลายต่อไปแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะปฏิกิริยา secondary cracking reaction

จากภาพประกอบ 34 อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนโดโลไมต์ร้อยละ 5 กับถ่านกัมมันต์ 0.2 ต่อ 0.8 ถึง 0.6 ต่อ 0.4 โดยน้ำหนัก ให้ผลการเสริมกันเชิงบวกต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแก๊สในแนวโน้มที่ลดลงมีค่าร้อยละ 10.72 ถึง 6.15 เมื่ออัตราส่วน 0.8 ต่อ 0.2 โดยน้ำหนัก ให้ผลการเสริมกันเชิงลบต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแก๊สมีค่าร้อยละ -1.58 เนื่องจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นการเพิ่มพื้นที่ก่อกัมมันต์ส่งผลให้เป็นบริเวณที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเนื่องจากการแตกตัวเชิงความร้อนของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน และส่งเสริมการแตกสลายขั้นทุติยภูมิหรือสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางเป็นสารระเหยที่ไม่สามารถควบแน่นได้ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก กับถ่านกัมมันต์ในทุกอัตราส่วนให้ผลการเสริมกันเชิงบวก โดยเฉพาะอัตราส่วน 0.2 ต่อ 0.8 โดยน้ำหนัก ให้ผลการเสริมกันเชิงบวกสูงสุดต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โคโรซีนมีค่าร้อยละ 3.88 อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก กับถ่านกัมมันต์ทุกอัตราส่วนให้ผลการเสริมกันเชิงลบต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลทุกอัตราส่วน เนื่องจากในช่วงแรกพลาสติกเกิดการแตกสลายเชิงความร้อนของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเป็นอนุโมลอิสระ และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องร่วมกับการแตกสลายเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ได้มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ด้วยความแตกต่างของขนาดรูพรุน ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ในอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่สูงแปรผันตรงกับ

ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในการจัดรูปสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กในช่วงคาร์บอนอะตอม  $C_5 - C_{12}$  และสารระเหยที่ไม่สามารถควบแน่นได้

#### 4.5 การวิเคราะห์สมบัติผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบน้ำมันไพโรไลซิส

##### 4.5.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของน้ำมันไพโรไลซิส

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุด้วยวิธีการ ASTM D5373 และการวิเคราะห์หาค่าความร้อน (heating value) ด้วยเทคนิคบอมบ์ ด้วยวิธีการ ASTM D5865 ของน้ำมันไพโรไลซิสใช้เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน แสดงดังตาราง 23 และ 24

ตาราง 23 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการไพโรไลซิส		
	non catalyst	5% catalyst	5% catalyst
	PP:PE 0.5:0.5	PP:PE 0.5:0.5	PP:PE 0.2:0.8
คาร์บอน (C)	82.43	82.38	82.48
ไฮโดรเจน (H)	14.11	13.95	14.03
ไนโตรเจน (N)	n.d.	n.d.	n.d.
ออกซิเจน (O)*	n.d.	n.d.	n.d.
H/C (โมล/โมล)	2.05	2.03	2.04
O/C (โมล/โมล)	n.a.	n.a.	n.a.
ค่าความร้อน (heating value)(MJ/kg)	44.27	42.84	44.73

หมายเหตุ: n.d. คือ not detect และ n.a. คือ not applicable

จากตาราง 23 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของน้ำมันไพโรไลซิส พบว่าค่าคาร์บอน ไฮโดรเจน อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และค่าความร้อนของตัวอย่างน้ำมันทั้งสามมีความใกล้เคียงกัน และไม่พบค่าไนโตรเจนและออกซิเจนทุกตัวอย่าง

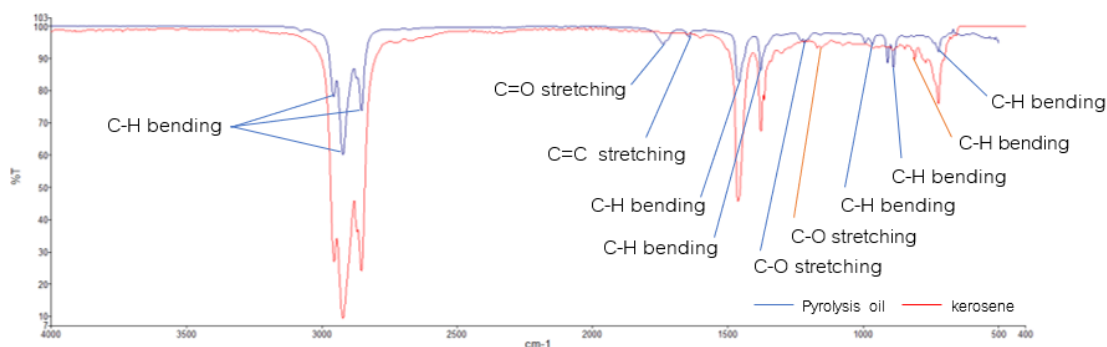
ตาราง 24 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวเร่งปฏิกิริยา ถ่านกัมมันต์และเหล็กบนโดโลไมต์ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการไพโรไลซิส		
	440 (°C)	460 (°C)	480 (°C)
คาร์บอน (C)	82.19	82.36	84.21
ไฮโดรเจน (H)	14.00	14.07	14.11
ไนโตรเจน (N)	n.d.	n.d.	n.d.
ออกซิเจน (O)*	n.d.	n.d.	n.d.
H/C (โมล/โมล)	2.04	2.05	2.05
O/C (โมล/โมล)	n.a.	n.a.	n.a.
ค่าความร้อน (heating value) (MJ/kg)	44.10	45.10	47.61

หมายเหตุ: n.d. คือ not detect และ n.a. คือ not applicable

จากตาราง 24 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของน้ำมันไพโรไลซิส พบว่าค่าคาร์บอน ไฮโดรเจน อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และค่าความร้อนของตัวอย่างน้ำมันทั้งสามมีความใกล้เคียงกันรวมถึงไม่พบค่าไนโตรเจนและออกซิเจนทุกตัวอย่าง และภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส มีค่าคาร์บอนสูงสุดซึ่งสอดคล้องการค่าความร้อนสูงสุด

#### 4.5.2 วิเคราะห์และยืนยันโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์



ภาพประกอบ 35 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

ภาพประกอบ 35 แสดงการวิเคราะห์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างน้ำมันไพโรไลซิสกับเคโรซีน จากภาพแสดงให้เห็นว่าพีคของน้ำมันไพโรไลซิสไม่สูงมากแต่ในส่วนของแพทเทิร์นพีคน้ำมันไพโรไลซิสมีความใกล้เคียงกับแพทเทิร์นพีคของเคโรซีนที่ความเชื่อมน้อยละ 93.7

ตาราง 25 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันไพโรไลซิส

ความยาวคลื่น	พันธะ	หมู่ฟังก์ชัน	ตัวอย่างน้ำมัน	เคโรซีน
721.08 cm <sup>-1</sup>	C-H bending	โมโนอะโรมาติก	✓	✓
809.91 cm <sup>-1</sup>	C-H bending	อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน		✓
887.97 cm <sup>-1</sup> และ 965.41 cm <sup>-1</sup>	C-H bending	หมู่แอลคีน	✓	
1162.50 cm <sup>-1</sup>	C-O stretching	แอลกอฮอล์ตติยภูมิ		✓
1217.16 cm <sup>-1</sup>	C-O stretching (asymmetric)	ไวนิลเอสเตอร์ซึ่งอยู่ใน หมู่เอเทอร์	✓	

ตาราง 25 (ต่อ)

ความยาวคลื่น	พันธะ	หมู่ฟังก์ชัน	ตัวอย่าง น้ำมัน	เคโรซีน
1377.54 cm <sup>-1</sup> และ 1457.48 cm <sup>-1</sup>	C-H bending (symmetric and asymmetric)	หมู่เมทิลในแอลเคน	✓	✓
1642.54 cm <sup>-1</sup>	C=C stretching	หมู่แอลคีน	✓	
1738.83 cm <sup>-1</sup>	C=O stretching	เอสเทอร์ซึ่งอยู่ใน หมู่คาร์บอนิล	✓	
2852.53 cm <sup>-1</sup> 2921.68 cm <sup>-1</sup> และ 2956.57 cm <sup>-1</sup>	C-H stretching (symmetric and asymmetric)	C-H แบบยืดของ หมู่เมทิลใน แอลเคน	✓	✓

การวิเคราะห์น้ำมันไพโรไลซิสด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันดังตาราง 23 พบว่าหมู่ฟังก์ชันของแอลเคนและแอลคีนเกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของพลาสติกและขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ ในส่วนของหมู่คาร์บอนิลและอีเทอร์ อาจเกิดจากไวนิลเอสเทอร์เรซิน กาวหรือสารเคมีชนิดอื่นๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน และเป็นสารเชื่อมประสานระหว่างชั้นฟิล์มตามวัตถุประสงค์ในการใช้งานบรรจุสินค้าตามข้อสันนิษฐานเนื่องจากการไม่มีการเปิดเผยส่วนประกอบของขยะพลาสติกบรรจุภัณฑ์ว่าเป็นสิ่งใด

#### 4.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรมิเตอร์

ตาราง 26 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรมิเตอร์

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst		
1.43	0.252		2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>
1.576	1.444		Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.629	0.206		2-Methyl-1-butene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>
1.689	0.057		1,4-Pentadiene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.755	0.120		Cyclopentene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.795	0.556		Pentane, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.896		7.283	1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
1.897	1.593		1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
1.944	0.441		n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
2.001	0.698		2-Butene, 2,3-dimethyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.09	0.073		2-Pentene, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.144	0.248		Cyclopentane, methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.207	0.276		2,4-Hexadiene, (E,E)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.24	0.258		Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.28	0.350		1-Pentene, 2,4-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.349	1.007		2,4-Dimethyl 1,4-pentadiene	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.538	0.055		Hexane, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.605	0.195		Cyclohexene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>

ตาราง 26 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	5% catalyst		
2.674	0.163		1-Hexene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.708	1.223		1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.804	0.892		Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.857	0.819		1,4-Hexadiene, 5-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.95	0.065		1,4-Hexadiene, 5-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.983	0.179		Cyclopentene, 1,5-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.056	0.147		Cyclopentane, 1-methyl-2-methylene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.096	0.493		Cyclohexane, methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.245	0.206		Cyclopentane, ethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.325	0.270		Cyclohexene, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.361	0.252		2,4-Hexadiene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.547	0.173		Cyclobutane, (1-methylethylidene)-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.58	0.755		Cyclopentane, ethylidene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.736	1.508		Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
3.739		7.973	Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
3.782	0.408		Cyclohexene, 1-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.935	0.180		3-Methylenecyclohexene	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub>
4.048	0.174		1-Heptene, 2-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.124	1.451		1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.21	0.326		1,4-Pentadiene, 2,3,3-trimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.267	1.016		Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
4.409	0.678		2,2-Dimethyl-3-heptene trans	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.638	0.303		Hexane, 2,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
4.668	0.321		1-Methyl-2-methylenecyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>

ตาราง 26 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	non catalyst		
4.794	1.493		Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.877	1.615		2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.891		13.115	2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.037	4.779		2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.043		22.695	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.139	0.278		1,3-Hexadiene, 3-ethyl-2-methyl-, (Z)-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.239	1.946	8.134	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.491	0.520		1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.65	0.228		6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.876	1.540		1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.912	0.462		Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
6.025	1.014		Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
6.121	0.374		Bicyclo[3.1.1]heptane, 2,6,6-trimethyl-, [1S-(1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)]-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.261	0.234		1,6-Octadiene, 2,5-dimethyl-, (E)-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.317	0.246		Cyclopentene, 1,4-dimethyl-5-(1- methylethyl)-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.845	0.264		Cyclohexane, (1-methylethylidene)-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
7.206	0.217		Mesitylene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.402	0.122		Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.508	0.318		5-Decene, (E)-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.628	2.084	8.964	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.677	0.409		2-Decene, 7-methyl-, (Z)-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
7.77	1.234		Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>

ตาราง 26 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	non catalyst		
7.85	0.248		cis-4-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.923	0.813		Nonane, 2,6-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.993	0.891		Decane, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
8.49	0.116		1-Decene, 5-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
8.779	0.569		2-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.839	0.528		3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.968	0.151		1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.087	1.439		5-Ethyl-1-nonene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.157	1.433		1-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.28	1.721		1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.409	1.204		Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
9.476	0.144		5-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.714	0.172		1H-Naphthalen-2-one, 3,4,5,6,7,8- hexahydro-4a,8a-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O
9.784	0.308		Bicyclo[3.1.1]heptan-2-one, 6,6-dimethyl-, (1R)-	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O
9.834	0.306		Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.202	0.877		(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O
10.242	0.326		Cyclohexane, (2,2-dimethylcyclopentyl)-	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>
10.378	0.201		1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.813	1.795		1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.935	1.386		Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
10.992	0.288		2-Dodecene, (E)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
11.446	0.204		Dodecane, 4,6-dimethyl-	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>

ตาราง 26 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	non catalyst		
12.044	0.599		Cyclopentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
12.15	0.484		Cyclopentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
12.249	1.765		1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.253		10.292	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.369	1.697		Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>
12.475	2.420		2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.479		10.866	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.575	1.345		2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.701	1.981		1-Octanol, 2-butyl-	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> O
12.704		10.678	1-Octanol, 2-butyl-	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> O
13.003	0.353		(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O
13.404	0.671		Cyclododecanemethanol	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O
13.6	1.755		1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.699	1.384		Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
14.867	1.796		1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
14.967	1.242		Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
15.266	0.908		1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
15.378	0.365		1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
15.591	0.767		1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
16.069	1.871		Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.158	2.169		Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
17.204	1.543		1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
17.287	1.511		Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
17.389	0.412		1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O

ตาราง 26 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	non catalyst	non catalyst		
17.731	1.239		1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
18.037	0.956		1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
18.286	1.615		1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>
18.368	1.554		Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
19.311	1.356		1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
19.384	1.431		Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>
19.935	0.791		1-Dodecanol, 2-octyl-	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub> O
20.297	1.304		1-Eicosene	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub>
20.36	1.868		Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
20.655	0.556		n-Nonadecanol-1	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub> O
21.292	1.225		Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>
22.185	1.016		Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>
22.982	0.486		1-Tricosene	C <sub>23</sub> H <sub>46</sub>
23.035	0.848		Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>
23.812	0.442		1-Tetracosene	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub>
23.855	0.669		Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>
24.645	0.470		Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>
25.405	0.431		Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>
26.139	0.223		Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>
26.846	0.154		Octacosane	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>

ตาราง 27 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรเมตรี

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	5% catalyst	10% catalyst		
1.895	5.744		1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
4.997		8.265	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.01	11.341		2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.879		9.393	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.883	9.231		1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
7.634		9.323	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.641	11.518		1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
9.283		9.518	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.29	10.446		1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
10.819		10.028	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.829	10.961		1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
12.259		10.322	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.263	11.234		1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
13.613	10.736		1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.723		10.727	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
14.881	9.282		1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
14.987		10.435	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
16.076	9.507		Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.178		11.075	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
17.31		10.914	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>

ตาราง 28 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 460 และ 480 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรเมตรี

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	440 (°C)	460 (°C)	480 (°C)		
1.377		0.116		Propene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
1.43	0.145	0.631		2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>
1.53		0.044		Butane, 2-methyl-	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.576	1.303	1.887		Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.629	0.169	0.271		2-Methyl-1-butene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>
1.649		0.162		1,3-Pentadiene, (Z)-	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.689	0.055	0.106		1,4-Pentadiene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.755	0.145	0.215		Cyclopentene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.792	0.507	0.558		Pentane, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.855		0.037		Pentane, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.858	0.030			Pentane, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.897	1.511	1.697		1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
1.945	0.807	0.869		1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
1.998	0.820	0.769		2-Butene, 2,3-dimethyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.041		0.201		1,3-Pentadiene, 3-methyl-, (Z)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.044	0.148			2-Hexene	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.087	0.083	0.083		2-Pentene, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.144	0.316	0.355		Cyclopentane, methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.203	0.151	0.168		2,4-Hexadiene, (E,E)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.236	0.186	0.193		Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>

ตาราง 28 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	440 (°C)	460 (°C)	480 (°C)		
2.28	0.284	0.257		1-Pentene, 2,4-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.336	0.918	0.939		Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.535	0.068	0.061		Hexane, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.601	0.201	0.198		Cyclohexene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.706		1.594		1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.708	1.618			1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.807	1.383	1.249		Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.854	0.762	0.597		1,4-Hexadiene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.89	0.166	0.147		(Z)-2-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.946	0.075	0.070		1,4-Hexadiene, 5-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.983	0.272	0.242		Cyclopentene, 1,5-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.056	0.189	0.206		Cyclopentane, 1-methyl-2-methylene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.096	0.683	0.660		Cyclohexane, methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.245	0.312	0.280		Cyclopentane, ethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.321	0.252			Cyclohexene, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.325		0.253		Cyclohexene, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.361	0.337	0.309		2,4-Hexadiene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.544	0.237	0.204		Cyclobutane, (1-methylethylidene)-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.573	0.715	0.649		1-Ethylcyclopentene	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.729	1.456	1.317		Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
3.779	0.569	0.517		Cyclohexene, 1-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.932	0.193	0.151		3-Methylenecyclohexene	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub>
4.124		1.935		1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.128	2.103			1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>

ตาราง 28 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	440 (°C)	460 (°C)	480 (°C)		
4.207		0.253		1,4-Pentadiene, 2,3,3-trimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.21	0.264			1,4-Pentadiene, 2,3,3-trimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.267		1.465		Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
4.274	1.611			Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
4.366		0.140		2-Octene, (Z)-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.37	0.167			2-Octene, (Z)-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.41	0.518	0.439		2,2-Dimethyl-3-heptene trans	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.499		0.136		Cyclopropane, (2,2-dimethylpropylidene)-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.632		0.397		Hexane, 2,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
4.635	0.498			Hexane, 2,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
4.662	0.284	0.295		1-Methyl-2-methylenecyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.788	0.798	0.753		Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.821	0.316	0.255		Cyclohexane, ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.867		1.061		2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.874	1.654		10.759	2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.007	2.864	3.160		2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.013			18.467	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.07	0.134			1-Propylcyclopentene	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
5.123	0.181	0.185		1-Methyl-2-methylenecyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
5.222	1.245	1.240		Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.312	0.151	0.116		Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
5.468	0.340			1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.644		0.109		6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.647	0.116			6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>

ตาราง 28 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	440 (°C)	460 (°C)	480 (°C)		
5.866			8.519	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.873		2.178		1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.879	2.500			1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.909		0.311		2,4,6-Trimethyl-3-heptene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
5.916	0.333			2,4,6-Trimethyl-3-heptene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
6.029		1.521		Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
6.035	1.827			Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
6.118		0.423		Cyclohexane, 1,2,3-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
6.125	0.508			Bicyclo[3.1.1]heptane, 2,6,6-trimethyl-, [1S-(1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)]-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.317	0.269			Cyclopentene, 1,4-dimethyl-5-(1- methylethyl)-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.841		0.285		Cyclopentene, 1-butyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
6.845	0.392			Cyclopentene, 1-butyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
7.087		0.409		Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.09	0.415			Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.203	0.300	0.214		Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.399		0.211		Mesitylene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.402	0.293			Mesitylene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.508		0.338		5-Decene, (E)-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.618			10.031	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.631		2.792		1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.641	3.080			1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.774		1.662		Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>

ตาราง 28 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	440 (°C)	460 (°C)	480 (°C)		
7.784	1.887			Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>
7.85		0.313		2-Decene, (Z)-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.853	0.341			4-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.916		0.526		Nonane, 2,6-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.92	0.565			Nonane, 2,6-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.986		0.666		Decane, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.989	0.738			Decane, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
8.139	0.323			Benzene, 1,2,3-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
8.776		0.199		2-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.779	0.637			2-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.832		0.137		3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.839	0.680			3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.074		0.806		1-Undecene, 7-methyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.283		2.462		1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.293	3.087			1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.416		1.739		Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
9.419	2.219			Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
9.476		0.242		2-Undecene, (Z)-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.482	0.447			2-Undecene, (Z)-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.605		0.163		Cyclopentane, 1,2-dipropyl-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.781		0.215		Bicyclo[3.1.1]heptan-2-one, 6,6-dimethyl-, (1R)-	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O

ตาราง 28 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	440 (°C)	460 (°C)	480 (°C)		
9.788	0.341			Bicyclo[3.1.1]heptan-2-one, 6,6-dimethyl-, (1R)-	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O
10.799			8.908	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.816		2.371		1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.826	2.767			1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.939		1.837		Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
10.952	2.097			Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
10.992		0.323		2-Dodecene, (Z)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.999	0.351			2-Dodecene, (Z)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
12.047	0.657			Cyclopentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
12.14		0.538		6-Tridecene, (Z)-	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.143	0.584			4-Nonene, 5-butyl-	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.239			8.816	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.253		2.573		1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.266	3.042			1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.372		2.077		Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>
12.382	2.491			Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>
12.458			8.842	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.462		1.500		1-Decanol, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.468	1.060			1-Decanol, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.568	0.805			2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.684			7.446	1-Decanol, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
13.474		0.634		1,9-Tetradecadiene	C <sub>14</sub> H <sub>26</sub>
13.587			7.771	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>

ตาราง 28 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	440 (°C)	460 (°C)	480 (°C)		
13.603		2.642		1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.613	3.039			1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.706		2.068		Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
13.719	2.449			Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
13.749		0.313		7-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.756	0.489			2-Tetradecene, (E)-	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.875		0.183		3-Tetradecene, (E)-	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.879	0.229			1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
14.874		2.416		1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
14.881	2.527			Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
14.974		1.980		Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
14.984	2.291			Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
16.072	2.436			Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.075		2.716		Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.168		2.682		Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
16.175	2.716			Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
17.2	1.881			1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>
17.207		2.521		1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>
17.297		2.419		Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
17.3	2.571			Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
17.725		0.491		1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
18.027	0.353			Heptadecane, 3-methyl-	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
18.276	1.365			1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>
18.289		1.887		1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>

ตาราง 28 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	440 (°C)	460 (°C)	480 (°C)		
18.372	2.462			Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
18.375		2.004		Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
19.298	0.958			1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
19.314		1.891		1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
19.387	2.109			Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>
19.397		2.291		Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>
20.277	0.694			1-Eicosene	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub>
20.357	1.793			Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
20.36		10.441		Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
20.37		2.263		Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
21.283	1.384			Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>
21.299		1.911		Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>
22.172	1.043			Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>
22.189		1.640		Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>
23.025	0.706			Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>
23.042		1.450		Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>
23.808		0.343		1-Tetracosene	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub>
23.845	0.451	1.131		Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>
23.858	0.306			Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>
24.635		0.979		Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>
25.395	0.197			Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>
25.405		0.735		Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>
26.132	0.128			Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>
26.139		0.512		Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>

ตาราง 28 (ต่อ)

R.T (min)	Area%			Name of compound	Molecular formula
	440 (°C)	460 (°C)	480 (°C)		
26.842	0.080			Octacosane	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>
26.846		0.401		Octacosane	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>
27.529		0.268		Nonacosane	C <sub>29</sub> H <sub>60</sub>

ตาราง 29 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25 และ 75 มิลลิลิตรต่ออนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	25 (mL/min)	75 (mL/min)		
1.377	0.017	0.064	Propene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
1.43	0.297	0.548	2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>
1.526	0.027	0.034	Butane, 2-methyl-	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.576	1.561	1.993	Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.629	0.217	0.288	2-Pentene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>
1.649		0.178	1,3-Pentadiene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.689	0.075	0.117	1,3-Pentadiene, (E)-	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.755	0.174	0.222	Cyclopentene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.792	0.557	0.564	Pentane, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.855	0.035	0.064	Pentane, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.897	1.601	1.952	1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>

ตาราง 29 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	25 (mL/min)	75 (mL/min)		
1.945	0.867	1.048	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.998	0.875	0.894	2-Butene, 2,3-dimethyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.034		0.274	1,3-Pentadiene, 3-methyl-, (Z)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.044	0.163		3-Hexene	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.087	0.095	0.136	2-Pentene, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.14	0.351		Cyclopentane, methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.144		0.466	Cyclopentane, methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.203	0.192	0.244	2,4-Hexadiene, (E,E)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.236	0.232	0.308	Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.276	0.348	0.358	1-Pentene, 2,4-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.336	1.048		2,4-Hexadiene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.336		1.258	Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.535	0.066	0.059	Hexane, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.601	0.221	0.253	Cyclohexene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.708	1.705	1.898	1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.804	1.421	1.568	Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.854	0.764	0.774	1,4-Hexadiene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.89	0.181	0.195	(Z)-2-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.946	0.079	0.096	1,4-Hexadiene, 5-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.98		0.308	Cyclopentene, 4,4-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.983	0.280		1,4-Pentadiene, 3,3-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.053	0.211	0.308	Cyclopentane, 1-methyl-2-methylene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.096	0.723	0.861	Cyclohexane, methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.242	0.329	0.358	Cyclopentane, ethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>

ตาราง 29 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	25 (mL/min)	75 (mL/min)		
3.321	0.259	0.296	Cyclohexene, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.361	0.378	0.461	Cyclohexene, 4-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.54	0.251	0.258	Cyclobutane, (1-methylethylidene)-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.573	0.742	0.924	Cyclopentane, ethylidene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.729	1.481	1.507	Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
3.779	0.603	0.696	Cyclohexene, 1-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.932	0.165	0.220	3-Methylenecyclohexene	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub>
4.128	2.144	2.258	1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.207	0.279		1,4-Pentadiene, 2,3,3-trimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.21		0.328	1,4-Pentadiene, 2,3,3-trimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.27	1.658	1.741	Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
4.366	0.156	0.197	2-Octene, (Z)-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.41	0.491	0.572	2,2-Dimethyl-3-heptene trans	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.499	0.155	0.159	Cyclopropane, (2,2-dimethylpropylidene)-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.635	0.503		Hexane, 2,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
4.662	0.349	0.428	1-Methyl-2-methylenecyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.788	0.853	0.956	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.821	0.338	0.345	Cyclohexane, ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.867		1.132	2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.871	1.628		2,3-Dimethyl-3-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.003	3.054		2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.01		3.742	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.07	0.207	0.150	1-Propylcyclopentene	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
5.123	0.242	0.253	Methyl ethyl cyclopentene	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>

ตาราง 29 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	25 (mL/min)	75 (mL/min)		
5.222	1.295	1.514	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.312	0.152	0.106	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
5.469	0.376		1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.644	0.145	0.118	Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.737	0.369		2,4,6-Trimethyl-3-heptene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
5.783	0.226	0.241	Cyclohexane, 1,2,3-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.879	2.598	2.562	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.912	0.355	0.337	Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
6.032	1.760	1.772	Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
6.121		0.511	1-Ethyl-4-methylcyclohexane	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
6.121	0.528		Cyclohexane, 1-methyl-4-(2-hydroxyethyl)-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O
6.314	0.399	0.373	Cyclopentene, 1,4-dimethyl-5-(1-methylethyl)-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.443	0.254	0.215	Cyclohexene, 1-propyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
6.529	0.209		Cyclohexane, propyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
6.53		0.303	Cyclohexane, propyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
6.841	0.397		Cyclohexane, (1-methylethylidene)-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
6.845		0.388	Cyclohexane, (1-methylethylidene)-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
7.087	0.525	0.489	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.203	0.360	0.241	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.399	0.265	0.167	Mesitylene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.508	0.372	0.439	trans-4-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.638	3.277		1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.777		1.957	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>

ตาราง 29 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	25 (mL/min)	75 (mL/min)		
7.78	1.934		Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>
7.85		0.350	2-Decene, (Z)-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.853	0.366		2-Decene, (Z)-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.916		0.589	Nonane, 2,6-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.92	0.585		Nonane, 2,6-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.986		0.735	Decane, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.989	0.756		Decane, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
8.779	0.619		2-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.835	0.686		3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.287		3.140	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.29	2.869		1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.419	1.918	2.112	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
9.479	0.275	0.280	2-Undecene, (Z)-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
10.823		3.223	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.826	2.789		1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.942		2.190	Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
10.949	2.118		Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
10.995		0.353	2-Dodecene, (Z)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.999	0.359		2-Dodecene, (Z)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
12.14		0.751	4-Nonene, 5-butyl-	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.259		3.255	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.263	3.023		1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.379	2.490	2.439	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>
12.465	0.980		1-Decanol, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O

ตาราง 29 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	25 (mL/min)	75 (mL/min)		
12.681	0.930		1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
13.49		0.818	5-Tetradecene, (Z)-	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.61	2.994	3.259	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.709		2.381	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
13.716	2.399		Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
13.753	0.395	0.389	2-Tetradecene, (E)-	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
14.877	2.429	2.720	1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
14.974		2.187	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
14.98	2.192		Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
16.069	2.750		Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.072		2.845	Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.168		2.936	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
16.172	2.870		Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
17.2	2.116		1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>
17.204		2.276	1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>
17.293		2.480	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
17.297	2.709		Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
18.272	1.525	1.682	1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>
18.279	2.501		1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>
18.365		2.291	Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
18.369	0.932		Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
19.298		1.141	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
19.301	2.015	1.934	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
19.381	0.930		Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>

ตาราง 29 (ต่อ)

R.T (min)	Area%		Name of compound	Molecular formula
	25 (mL/min)	75 (mL/min)		
20.35	1.518	1.652	Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
21.213		0.477	Henicos-1-ene	C <sub>21</sub> H <sub>42</sub>
21.276	1.190		Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>
22.165		1.197	Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>
23.018	0.871	0.794	Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>
23.838	0.536	0.436	Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>
24.632	0.348	0.299	Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>
25.392	0.260	0.175	Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>
26.129	0.144	0.109	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันไฟโรไลซิสด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรเมตรีแสดงให้เห็นว่าการไฟโรไลซิสของพลาสติกบรรจุภัณฑ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะจากการแตกตัวเชิงความร้อนและการแตกตัวเชิงตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และเกิดการจัดโครงสร้างของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สามารถแบ่งประเภทของชนิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เป็น 4 กลุ่ม คือ อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน อะลิไซคลิกไฮโดรคาร์บอน อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และอื่น ๆ พบว่ามีองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนช่วง C<sub>12</sub> – C<sub>15</sub> สอดคล้องกับร้อยละที่ได้ในคาบจุดเดือดของเคโรซีน

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของพลาสติกบรรจุภัณฑ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ เพื่อภาวะที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนมากที่สุด โดยการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล และการออกแบบส่วนประสมกลาง โดยมีตัวแปร ที่ศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 420 – 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25 – 125 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0 - 20 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น จากนั้นนำผลการทดลองวิเคราะห์ด้วย Ease Design-Expert พบว่าภาวะดำเนินการที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ผลได้ ผลิตภัณฑ์ของเหลวและร้อยละ 81.86 โดยน้ำหนัก ผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนร้อยละ 22.74 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดลองร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวและร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีน สอดคล้องกันที่ระดับ %Error ที่ร้อยละ 2.83 และ 3.39 ตามลำดับ และในการทดลองจริงพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ฉะนั้นจึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพลาสติก พอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีนที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 สรุปผลได้ว่า พอลิเอทิลีนมีอิทธิพลการเสริมกันและหักล้างกับพอลิพรอพิลีนต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เคโรซีน และร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว ในทางกลับกันพอลิพรอพิลีนมีอิทธิพลเสริมกันและหักล้างกัน กับพอลิเอทิลีนต่อร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวและร้อยละของผลิตภัณฑ์เคโรซีน

จากการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา ถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดไลไมต์ร้อยละ 5 ที่อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2 ต่อ 0.8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที สรุปผลได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดไลไมต์ไม่มีการส่งเสริมหรือหักล้างกัน และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียวเพียงพอต่อความต้องการของ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาภาวะที่เหมาะสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องเพื่อประยุกต์ใช้ในการผลิตระดับอุตสาหกรรม
2. การศึกษาผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปกลั่นแยกผลิตภัณฑ์เคโรซีน เพื่อนำไปทำการทดลองในเครื่องยนต์ต่อไป



## บรรณานุกรม

- Ba, Y., Cen, K., Wang, L., Jia, D., Kan, T., & Chen, D. (2023). Study on synergistic effect of co-pyrolysis of wood chips and its gasification tar on the biochar and subsequent activated carbon upgrading using response surface method. *Industrial Crops and Products*, 205, 117558. Retrieved 2023/12/01/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669023013237>
- Bligaard, T., & Nørskov, J. K. (2008). Chapter 4 - Heterogeneous Catalysis. In A. Nilsson, L. G. M. Pettersson, & J. K. Nørskov (Eds.), *Chemical Bonding at Surfaces and Interfaces* (pp. 255-321). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-044452837-7.50005-8>
- Boudjema, H. (2015). Optimization of Hydrolysis Degradation of Neurotoxic Pesticide Methylparathion Using a Response Surface Methodology (RSM). สืบค้นจาก DOI: 10.9790/5736-08514352
- Brandt, M. J., Johnson, K. M., Elphinston, A. J., & Ratnayaka, D. D. (2017). Chapter 10 - Specialized and Advanced Water Treatment Processes. In M. J. Brandt, K. M. Johnson, A. J. Elphinston, & D. D. Ratnayaka (Eds.), *Twort's Water Supply (Seventh Edition)* (pp. 407-473). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100025-0.00010-7>
- Budsareechai, S., Hunt, A. J., & Ngernyen, Y. (2019). Catalytic pyrolysis of plastic waste for the production of liquid fuels for engines. *RSC Adv*, 9(10), 5844-5857. <https://doi.org/10.1039/c8ra10058f>
- Buyang, Y., Nugraha, R. E., Holillah, H., Bahruji, H., Suprpto, S., Jalil, A. A., Muryani, M., & Prasetyoko, D. (2023). Dolomite catalyst for fast pyrolysis of waste cooking oil into hydrocarbon fuel. *South African Journal of Chemical Engineering*, 45, 60-72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.04.007>
- Chang, S. H. (2023). Plastic waste as pyrolysis feedstock for plastic oil production: A review. *Sci Total Environ*, 877, 162719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162719>

- Chen, C., Fan, D., Zhao, J., Qi, Q., Huang, X., Zeng, T., & Bi, Y. (2022). Study on microwave-assisted co-pyrolysis and bio-oil of *Chlorella vulgaris* with high-density polyethylene under activated carbon. *Energy*, 247, 123508. Retrieved 2022/05/15/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054422200411X>
- Ding, Y. L., Wang, H. Q., Xiang, M., Yu, P., Li, R. Q., & Ke, Q. P. (2020). The Effect of Ni-ZSM-5 Catalysts on Catalytic Pyrolysis and Hydro-Pyrolysis of Biomass. *Front Chem*, 8, 790. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00790>
- Huo, E., Lei, H., Liu, C., Zhang, Y., Xin, L., Zhao, Y., Qian, M., Zhang, Q., Lin, X., Wang, C., Mateo, W., Villota, E. M., & Ruan, R. (2020). Jet fuel and hydrogen produced from waste plastics catalytic pyrolysis with activated carbon and MgO. *Science of The Total Environment*, 727, 138411. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138411>
- Hwang, K.-R., Choi, S.-A., Choi, I.-H., & Lee, K.-H. (2021). Catalytic cracking of chlorinated heavy wax from pyrolysis of plastic wastes to low carbon-range fuels: Catalyst effect on properties of liquid products and dechlorination. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155, 105090. Retrieved 2021/05/01/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237021000760>
- Janarthanan, K., & Sivanandi, P. (2022). Extraction and characterization of waste plastic pyrolysis oil for diesel engines. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132924. Retrieved 2022/09/15/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622025173>
- Khazaal, R. M., & Abdulaaima, D. A. (2023). Valuable oil recovery from plastic wastes via pressurized thermal and catalytic pyrolysis. *Energy Conversion and Management: X*, 20, 100430. Retrieved 2023/10/01/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174523000867>
- Lord, H. L., & Pfannkoch, E. A. (2012). 2.27 - Sample Preparation Automation for GC Injection. In J. Pawliszyn (Ed.), *Comprehensive Sampling and Sample Preparation* (pp. 597-612). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00061-2>

- Luo, Y., Matejic, T., Ng, C.-K., Nunnally, B., Porter, T., Raso, S., Rouse, J., Shang, T., & Steckert, J. (2011). 8 - Characterization and Analysis of Biopharmaceutical Proteins. In S. Ahuja & S. Scypinski (Eds.), *Separation Science and Technology* (Vol. 10, pp. 283-359). Academic Press.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375680-0.00008-5>
- McCullom, T. M., Simoneit, B. R., & Shock, E. L. (1999). Hydrous pyrolysis of polycyclic aromatic hydrocarbons and implications for the origin of PAH in hydrothermal petroleum. *Energy Fuels*, 13(2), 401-410. <https://doi.org/10.1021/ef980089i>
- Moorthy Rajendran, K., Kumar, D., Yadav Lamba, B., & Kumar Ghodke, P. (2023). Production and characterization of plastic oil from mixed plastic waste through the pyrolysis process. *Materials Today: Proceedings*. Retrieved 2023/03/04/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323008210>
- MTEC ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2557). ประเภทและการใช้งานพลาสติก. สืบค้นจาก <https://www.mtec.or.th/bio-plastic/what-is-plastic/plastic-usage.html>
- Nasution, F., Husin, H., Mahidin, Abnisa, F., Tirta Yani, F., Maulinda, L., & Ahmadi. (2022). Conversion of pyrolysis vapors derived from non-biodegradable waste plastics (PET) into valuable fuels using nickel-impregnated HZSM5-70 catalysts. *Energy Conversion and Management*, 273, 116440. Retrieved 2022/12/01/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422012183>
- Ndiaye, N. K., Derkyi, N. S. A., & Amankwah, E. (2023). Pyrolysis of plastic waste into diesel engine-grade oil. *Scientific African*, 21, e01836.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01836>
- Newcombe, G. (2006). Chapter 8 - Removal of natural organic material and algal metabolites using activated carbon. In G. Newcombe & D. Dixon (Eds.), *Interface Science and Technology* (Vol. 10, pp. 133-153). Elsevier.  
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1573-4285\(06\)80077-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1573-4285(06)80077-3)
- Ngu, L. H. (2024). Carbon Capture Technologies. In M. A. Abraham (Ed.), *Encyclopedia of Sustainable Technologies (Second Edition)* (pp. 358-377). Elsevier.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00028-0>

- Okoniewska, E., Lach, J., Kacprzak, M., & Neczaj, E. (2008). The trial of regeneration of used impregnated activated carbons after manganese sorption. *Desalination*, 223(1), 256-263. Retrieved 2008/03/01/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916407008612>
- Pallarés, J., González-Cencerrado, A., & Arauzo, I. (2018). Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. *Biomass and Bioenergy*, 115, 64-73. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.015>
- Román-Martínez, M. C., & Salinas-Martínez de Lecea, C. (2013). Chapter 3 - Heterogenization of Homogeneous Catalysts on Carbon Materials. In S. L. Suib (Ed.), *New and Future Developments in Catalysis* (pp. 55-78). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53876-5.00003-9>
- Sircar, S., Golden, T. C., & Rao, M. B. (1996). Activated carbon for gas separation and storage. *Carbon*, 34(1), 1-12. Retrieved 1996/01/01/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000862239500128X>
- The Essential Chemical Industry. (2013). *Chemical reactor*. สืบค้นจาก <https://www.essentialchemicalindustry.org/processes/chemical-reactors.html>
- Wang, Z., Burra, K. G., Lei, T., & Gupta, A. K. (2021). Co-pyrolysis of waste plastic and solid biomass for synergistic production of biofuels and chemicals-A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 84, 100899. Retrieved 2021/05/01/, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036012852030109X>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2565). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2565 บริษัท เอเชีย คอนเน็กซ์ จำกัด. สืบค้นจาก [https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2023/08/pcdnew-2023-08-31\\_07-45-46\\_415782.pdf](https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2023/08/pcdnew-2023-08-31_07-45-46_415782.pdf)
- กันตธีรา คำภีระ. (2560). ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเบสต่อผลผลิตน้ำมันชีวภาพของไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง [วิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. <http://doi.org/10.14457/CU.the.2017.784>
- การะเกด เทศศร. (2556). ตัวเร่งปฏิกิริยานาโน : เทคโนโลยีการเร่งปฏิกิริยายุคใหม่. สืบค้นจาก <https://ojs.lib.buu.ac.th/index.php/science/article/view/2821>

- งามทิพย์ ภู่วโรดม. (2557). วัสดุอ่อนตัวสำหรับบรรจุภัณฑ์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ คณะ  
อุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ. สืบค้นจาก  
[https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr\\_es/kukr/search\\_detail/result/197258](https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/kukr/search_detail/result/197258)
- ฉวีวรรณ เฟื่องพิทักษ์. (2562). ถ่านกัมมันต์. สืบค้นจาก  
[http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss\\_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf](http://lib3.dss.go.th/fulltext/dss_knowledge/chem-2-62-charcoal.pdf)
- ฉันทบุรณ์ ถาวรวรรณ. (2563). การศึกษาการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไล  
ซิส. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์, 15-32.
- บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน). (2566). โครงการ *Upcycling Upstyling* โดย GC  
เพื่อการรักษาโลกอย่างยั่งยืน. สืบค้นจาก  
<https://sustainability.pttgcgroup.com/th/projects/52/upcycling-upstyling>
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา, พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. (2551). การออกแบบและวิเคราะห์การ  
ทดลอง. บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ. (2562). การผลิตเชื้อเพลิงเหลวทดแทนดีเซลจากกระบวนการไพโรไลซิส  
ขยะพลาสติกและชีวมวล. สืบค้นจาก <http://eresource.car.chula.ac.th/chula-ejournals/openpdf/openpdf.php?id=11192>
- ปราเมศ ชูติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ ไชยเวช. (2555). ปีโตรเลียมเทคโนโลยี. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยะวดี ศรีวิชัย, ชุมาพร รหัสีดา. (2021). The Use of Design Expert Program to Study the  
Relationship Between Two Variables. สืบค้นจาก  
[http://sciencejournal.pbru.ac.th/phocadownloadpap/2021\\_2/4-2021-18-2-p34-43.pdf](http://sciencejournal.pbru.ac.th/phocadownloadpap/2021_2/4-2021-18-2-p34-43.pdf)
- พฤษัย พงษ์วัน. (2555). ผลของไอออนโลหะทรานซิชันต่อความสามารถการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของ  
อนุภาคนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์โดยวิธีซอล-เจลแบบตัดแปรง. สืบค้นจาก  
<http://cmuir.cmu.ac.th/handle/6653943832/35222>
- วิซชากร จารุศิริ. (2544). กระบวนการร่วมของพอลิพรอพิลีนกับแอนทราไซต์โดยใช้เหล็กบนถ่านกัม  
มันต์ [วิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].
- วิซชากร จารุศิริ และคณะวิจัย. (2563). นวัตกรรมการผลิตพลังงานสะอาดจากชีวมวลและของเสีย.
- วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. (2554). เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง. บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- วิรุณ โมณะตระกูล, รัชพล สันติวรากรพจน์ศิริ, นทร์ ติมปิ่นนันทน์. (2562). โครงการผลิตน้ำมัน

เชื้อเพลิงโดยกระบวนการไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกชุมชนกรณีศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏ  
มหาสารคาม. สืบค้นจาก [http://research.rmu.ac.th/rdi-  
mis/upload/fullreport/1631606114.pdf](http://research.rmu.ac.th/rdi-mis/upload/fullreport/1631606114.pdf)

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2566). พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต *Polyethylene Terethphalate*  
(PET). สืบค้นจาก [https://packaging.oie.go.th/new/admin\\_control\\_new/html-  
demo/file\\_technology/7650328941.pdf](https://packaging.oie.go.th/new/admin_control_new/html-demo/file_technology/7650328941.pdf)





## ภาคผนวก ก.

### การวิเคราะห์องค์ประกอบของพลาสติกและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

#### 1. การวิเคราะห์สมบัติความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

วิธีการวิเคราะห์ความชื้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐาน (Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis: ASTM D7582) ด้วยเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) รุ่น TGA701 จากบริษัท LECO จำกัด ซึ่งใช้กันปัจจุบันเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ซึ่งสามารถให้ความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวออกมาได้ทันทีจากการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก และการสลายตัวของความชื้น สารอินทรีย์ และเหลือเฉพาะน้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายเนื่องจากความร้อน

#### อุปกรณ์

1. เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) รุ่น TGA701 จากบริษัท LECO จำกัด
2. ถ้วยครุชชีเบิล
3. desiccator

#### วิธีการทดลอง

1. เฝาครุชชีเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทิ้งให้เย็นใน desiccator
2. ใส่ครุชชีเบิลลงในเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก พร้อมบันทึกน้ำหนักครุชชีเบิล
3. ใส่พลาสติกลงในครุชชีเบิลประมาณ 1 กรัม
4. ตั้งอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยกำหนดอุณหภูมิสูงสุด 900 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน
5. รวผลการวิเคราะห์

สูตรการคำนวณในเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

$$\text{Moisture} = ((W + W_1) - W_1) / W \times 100$$

โดย Moisture คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

W1 คือ น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาปิด (กรัม)

W2 คือ น้ำหนักของครุชชีเบิลรวมกับน้ำหนักชีวมวลที่เสียไปในช่วง 0 - 120 องศาเซลเซียส (กรัม)

$$\text{Ash} = (W_3 \times W_4) / W \times 100$$

โดย Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

W<sub>3</sub> คือ น้ำหนักของครุชชีเบิลรวมกับน้ำหนักเถ้า (กรัม)

W<sub>4</sub> คือ น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาปิด (กรัม)

W คือ น้ำหนักของชีวมวล (กรัม)

$$\text{Volatile matter} = (W_5 \times W_6) / W \times 100$$

โดย Volatile matter คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย

W<sub>5</sub> คือ น้ำหนักของครุชชีเบิลรวมกับน้ำหนักชีวมวลก่อนเผา (กรัม)

W<sub>6</sub> คือ น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาปิดกับน้ำหนักชีวมวลหลังเผา (กรัม)

W คือ น้ำหนักของชีวมวล (กรัม)

$$\text{Fixed carbon} = 100 - \text{Moisture} - \text{Ash} - \text{Volatile matter}$$

โดย Fixed carbon คือ ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว

Moisture คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

Volatile matter คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย

## 2. การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

เครื่องวิเคราะห์ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ (Organic Elemental Analyzer หรือ CHN Analyser) ยี่ห้อ Leco รุ่น CHN628 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ของน้ำมันไพโรไลซิส ตัวอย่างจะถูกหลอมภายใต้สภาวะบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนภายในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction furnace) โดยซัลเฟอร์จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) และคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนให้เป็น สารประกอบ

คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หลังจากขั้นตอนการเผาไหม้แก๊สจะเดินทางผ่านตัวกรองฝุ่นและดูดความชื้นออกเพื่อทำให้แก๊สบริสุทธิ์มากขึ้น ในขั้นตอนต่อไป เซลล์เฟอร์ไดออกไซด์จะถูกวัดที่ชุดตรวจจับสัญญาณแบบอินฟราเรด (Infrared cells) ในเครื่อง หลังจากการวัดค่าเซลล์เฟอร์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะถูกออกซิเดชัน เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สเซลล์เฟอร์ไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นเซลล์เฟอร์ไดออกไซด์ ปริมาณคาร์บอนจะถูกตรวจวัดสัญญาณด้วยเซลล์อินฟราเรด

### 3. การวิเคราะห์น้ำมันไพโรไลซิสเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์

#### 3.1 แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสาร ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถแยกสารตัวอย่างที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อน และหลากหลายได้ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วและแม่นยำต่อการวิเคราะห์สูง โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถแบ่งเป็น 2 วิธีการ คือ การใช้เฟสอยู่กับที่ที่เป็นของแข็ง เรียกว่า “gas-solid chromatography” (GSC) และ การใช้เฟสอยู่กับที่ที่เป็นของเหลว เรียกว่า “gas-liquid chromatography” (GLC) ซึ่งทั้งสองวิธีมีเฟสเคลื่อนที่ที่เป็นแก๊ส นอกจากนี้แก๊สโครมาโทกราฟีใช้กับสารที่สามารถเกิดการระเหยกลายเป็นไอได้ ณ อุณหภูมิของคอลัมน์เท่านั้น จึงทำให้แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่ใช้แยกสารประกอบทางเคมีหรือสารประกอบอินทรีย์เท่านั้น และ แก๊สโครมาโทกราฟีสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณโดยทั่วไปมีส่วนประกอบ ดังนี้

#### 1. แก๊สที่ใช้งานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี มี 3 ชนิด คือ

1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สตัวพา (Carrier Gases) เพื่อจะพาไอของสารหรือแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์

1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ใน Flame Ionization Detector (FID)

1.3 อากาศ เพื่อใช้ผสมกับไฮโดรเจนใน FID

2. ตัวระบายแก๊ส (Gas Traps) และฟิลเตอร์ (Filters) เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่ใช้งาน สะอาดและบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบปลอกกระสุน (Cartridge) คือ

2.1 ตัวระบายคัตขนาดโมเลกุล (Molecular Sieve Trap) ไซโตดูดความชื้น

2.2 ตัวระบายออกซิเจน (Oxygen Trap) เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน

2.3 ฟิลเตอร์ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Filter) ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมันสำหรับแก๊สตัวพาควรจะต้องผ่าน Filter อากาศควรจะต้องผ่าน Charcoal Filter

3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

4. ส่วนที่จะฉีดสารเข้าคอลัมน์ (Injection Port) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความร้อนให้สาร ตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ

5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจากทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้สนิม อาจอยู่ในรูป U Tube ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง (Inner Diameter) 3 – 6 มิลลิเมตร อาจมีการใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้ว ในการแยกสารสเตียรอยด์ ยา หรือสารประกอบชีวภาพนอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดเล็ก (Capillary Column) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

5.1 คอลัมน์ของเฟสหยุดนิ่ง Wall-Coated Open Tubular (WCOT) คอลัมน์ที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลว เคลือบเป็นฟิล์มบาง ๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10 - 100 เมตร

5.2 คอลัมน์ที่มีตัวรองรับ Support Coated Open Tubular (SCOT) คอลัมน์ที่มีตัวรองรับหรือเมทริกซ์ บรรจุอยู่ภายใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10 - 100 เมตร

5.3 คอลัมน์ขนาดเล็ก (Micropacked Column) คอลัมน์ขนาดเล็กมีความยาวประมาณ 0.7 - 1.0 เมตร

6. ตัวตรวจวัดเอฟไอดี Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลว ไฟ (Flame) ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัด มีขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออน ซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นตัวตรวจวัดชนิด FID ที่นิยมใช้มากที่สุด

### 3.2 แก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS)

แก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตรมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่มีการต่อเครื่องแมสสเปคโตรมิเตอร์ร่วมด้วย เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยให้ผลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่แม่นยำกว่าแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งในแมสสเปคโตรมิเตอร์จะมีฐานข้อมูล (Library) เพื่อความถูกต้องโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารมาตรฐานเข้ามาเปรียบเทียบกับเป็นข้อดีของเทคนิค โดยหลักการทำงานจะแบ่งเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนของแก๊สโครมาโทกราฟีทำหน้าที่แยกองค์ประกอบของสารผสมโดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนของสารแต่ละชนิดบนเฟสคงที่ภายใต้การพาของเฟสเคลื่อนที่เดียวกัน ส่วนของแมสสเปคโตรมิเตอร์จะ

ได้รับสารประกอบเชิงเดี่ยวจากส่วนของแก๊สโครมาโทกราฟี และทำการกระตุ้นทำให้เกิดการแตกตัวอยู่ในรูปของประจุเรียกว่า ไอออนโมเลกุลลาร์ (Molecular ion: M<sup>+</sup> or M<sup>-</sup>)

จากการวิเคราะห์น้ำมันจากการไพโรไลซิสที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ และเหล็กบนโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรมิเตอร์



## ภาคผนวก ข. การใช้ Ease Design-Expert

1. เข้าสู่โปรแกรม คลิกที่ file >>> new design >>> respond surface >>> Central Composite แล้วทำการใส่ตัวแปรที่ต้องการศึกษา แสดงดังภาพ ข.1 โดยเลือก numeric factor เป็น 3 ตามจำนวนตัวแปร และใส่ข้อมูลในตาราง

Name ใส่ชื่อตัวแปรที่ต้องการศึกษา

Units หน่วยของตัวแปรที่ศึกษา

Low ใส่ขอบเขตต่ำสุดของตัวแปรที่ศึกษา

High ใส่ขอบเขตสูงสุดของตัวแปรที่ศึกษา

จากนั้นกด Next>>

**Central Composite Design**

Each numeric factor is set to 5 levels: plus and minus alpha (axial points), plus and minus 1 (factorial points) and the center point. If categoric factors are added, the central composite design will be duplicated for every combination of the categoric factor levels.

Numeric factors: 3 (2 to 50)  Horizontal  Enter factor ranges in terms of  $\pm 1$  levels  
 Categoric factors: 0 (0 to 10)  Vertical  Enter factor ranges in terms of alphas

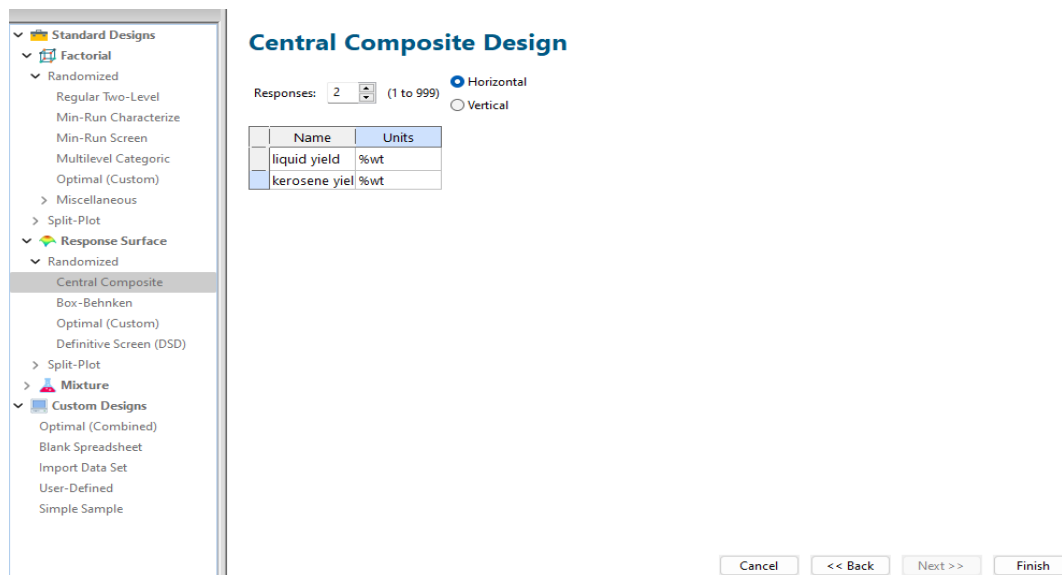
	Name	Units	Low	High	-alpha	+alpha
A [Numeric]	temperature	C	440	480	426.364	493.636
B [Numeric]	N2 flow rate	mL/min	50	100	32.9552	117.045
C [Numeric]	% catalyst	%wt	10	15	8.29552	16.7045

Type: Full Blocks: 1

Points  
 Non-center points: 14  
 Center points: 6  
 alpha = 1.68179 Options... 20 Runs

ภาพประกอบ ข.1 ตารางตัวแปร Central Composite Design

2. ทำการเลือกจำนวนตัวแปรตอบสนองในช่อง response แล้วใส่ชื่อลงในช่อง Name และหน่วยของตัวแปรตอบสนองในช่อง Units จากนั้นกด finish



ภาพประกอบ ข.2 ตารางตัวแปรตอบสนอง Central Composite Design

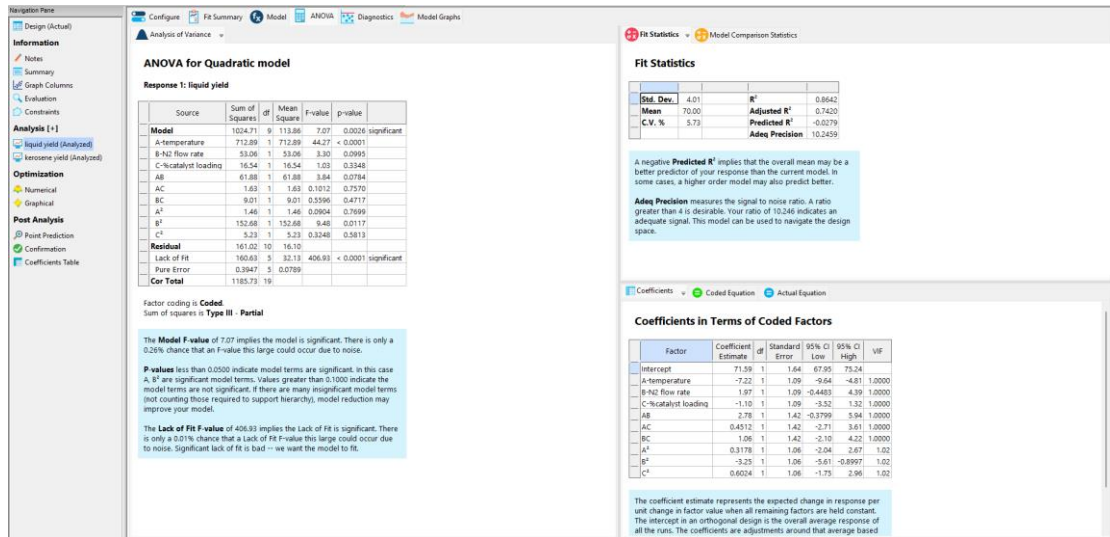
3. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองใส่ลงใส่ตารางให้ครบถ้วน

Std	Run	Factor 1 A:temperature C	Factor 2 B:N2 flow rate mL/min	Factor 3 C:% catalyst %wt	Response 1 liquid yield %wt	Response 2 kerosene yield %wt
7	1	440	100	15	72.36	22.27
8	2	480	100	15	67.45	20.45
9	3	426.364	75	12.5	86.37	22.52
6	4	480	50	15	59.18	18.15
3	5	440	100	10	75.37	21.25
11	6	460	32.9552	12.5	53.15	20.72
14	7	460	75	16.7045	71.93	21.25
20	8	460	75	12.5	71.56	20.88
1	9	440	50	10	82.47	24.04
5	10	440	50	15	75.11	24.03
19	11	460	75	12.5	72.02	20.91
2	12	480	50	10	64.63	17.03
15	13	460	75	12.5	71.31	20.92
4	14	480	100	10	68.76	19.02
13	15	460	75	8.29552	70.68	19.54
17	16	460	75	12.5	71.63	21.34
10	17	493.636	75	12.5	54.63	19.57
12	18	460	117.045	12.5	67.64	19.93
16	19	460	75	12.5	72.04	21.27
18	20	460	75	12.5	71.68	20.87

ภาพประกอบ ข.3 ตารางการทดลองจาก Ease Design-Expert ด้วยการออกแบบการทดลองแบบ

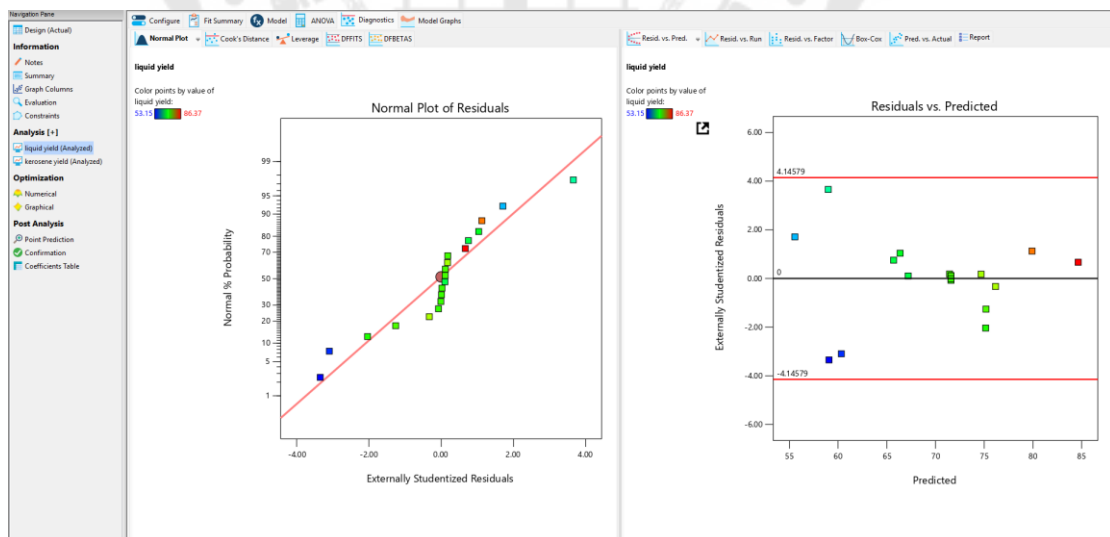
CCD

4. กต Analysis ตามด้วย liquid yield และ kerosene yield เพื่อวิเคราะห์ผล ANOVA



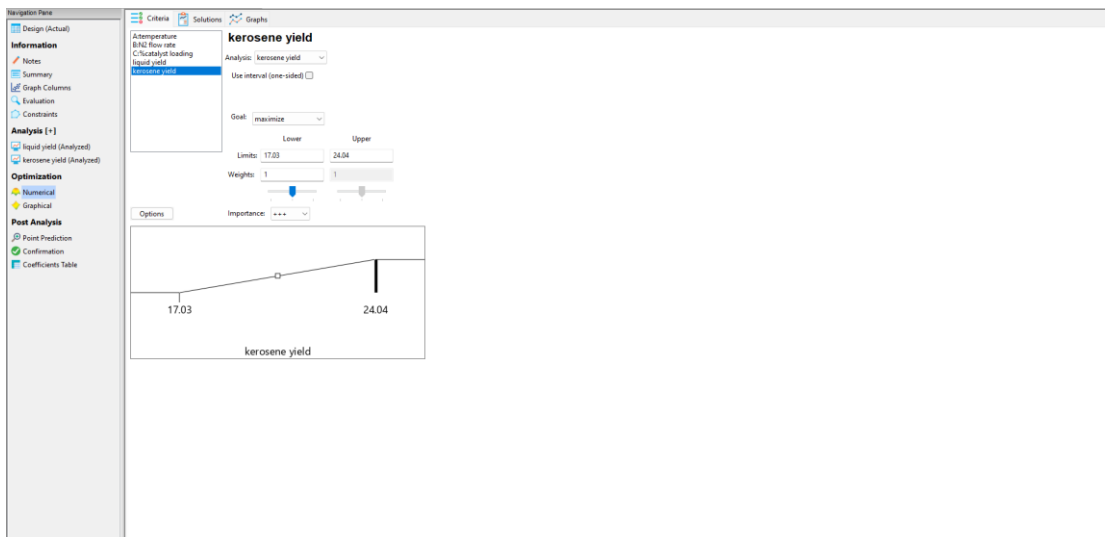
ภาพประกอบ ข.4 ผลการวิเคราะห์ ANOVA

5. กต Analysis ตามด้วย liquid yield และ kerosene yield และ Diagnostics แสดงกราฟระหว่างความสัมพันธ์

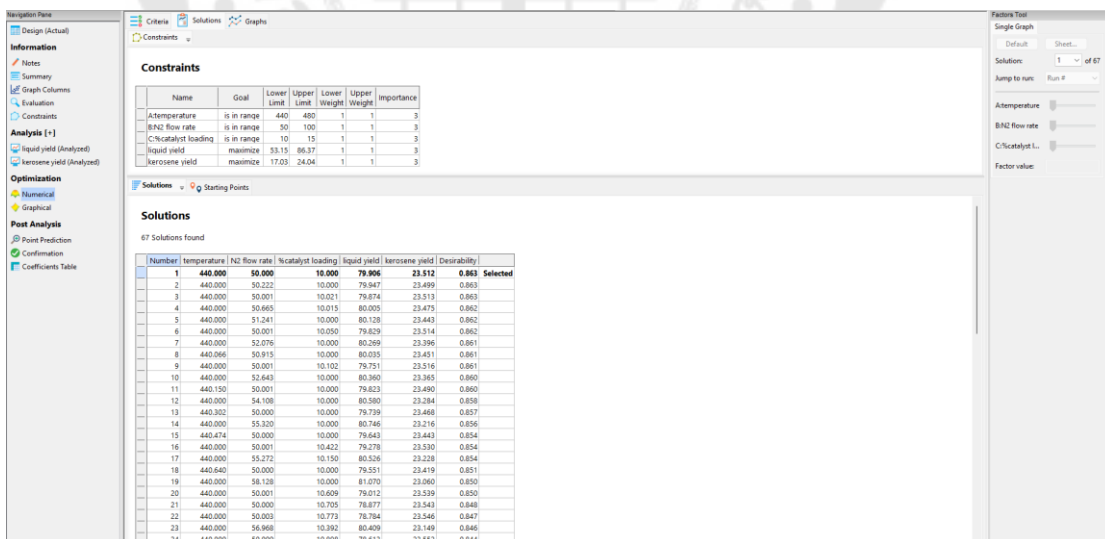


ภาพประกอบ ข.5 กราฟระหว่างความสัมพันธ์

6. กัด optimization เพื่อวิเคราะห์ภาวะดำเนินการที่เหมาะสม โดยการกำหนดค่า goal ของตัวแปรตอบสนองทั้งสองตัวเป็น maximize และตัวแปรกำหนดค่า goal เป็น in range แล้วกัด Solutions



ภาพประกอบ ข.6 การกำหนดค่าเป้าหมายในการหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสม



ภาพประกอบ ข.7 ตารางการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองที่เหมาะสม

## ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ FT-IR

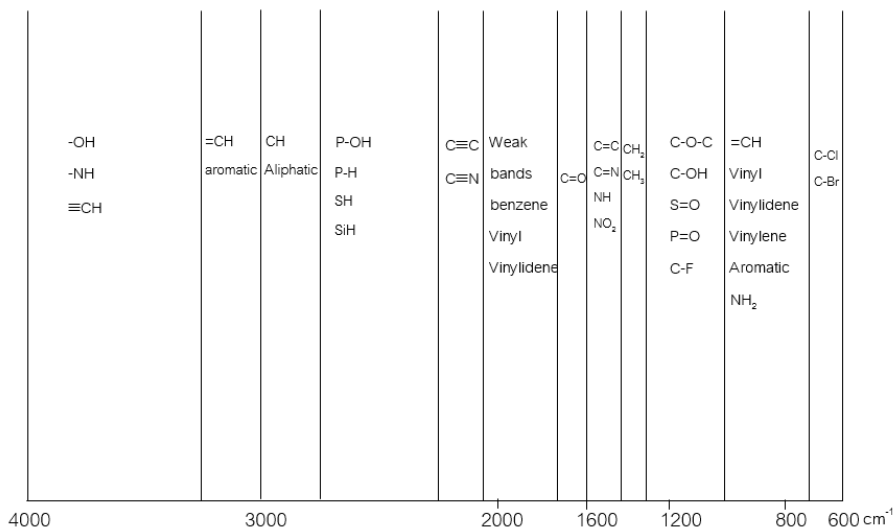
วิเคราะห์และยืนยันโครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันไพโรไลซิสด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

การแปลความหมายของการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer จะพิจารณาแถบการดูดกลืน Infrared Spectrum เป็น 3 ช่วง คือ

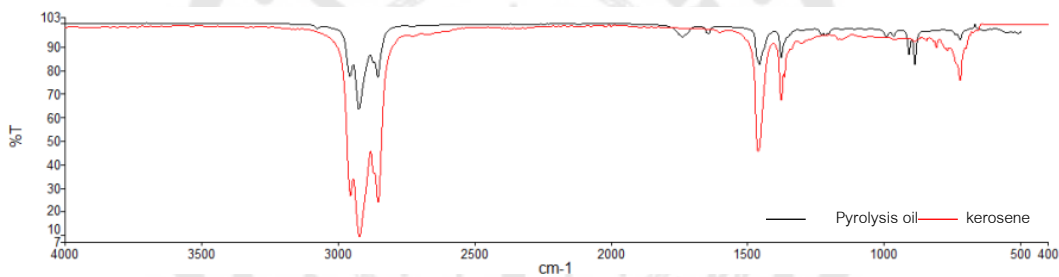
1. ย่านความถี่  $1300 - 1400 \text{ cm}^{-1}$  เรียกว่า Functional group regional เป็นย่านที่บอกถึงชนิดของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ซึ่งหากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันใดในย่านนี้จะเป็นการยืนยันว่าไม่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่ในโมเลกุลสารที่สนใจ แต่ทั้งนี้การแปลความหมายต้องทำอย่างระมัดระวังเนื่องจากโครงสร้างบางตัวอาจให้แถบดูดกลืนที่กว้างจนสังเกตได้ยาก

2. ย่านความถี่  $910 - 1300 \text{ cm}^{-1}$  เรียกว่า Finger print regional ซึ่งแถบดูดกลืนในย่านนี้มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แถบที่ปรากฏจะมีลักษณะเฉพาะตัวของโมเลกุลแต่ละชนิด อันจะมีประโยชน์ในการยืนยันว่าสาร 2 ตัวที่สงสัยเป็นสารเดียวกันหรือไม่ โดยทำการเทียบสเปกตรัมของสารที่เตรียมในตัวอย่างชนิดเดียวกัน หากปรากฏแถบการดูดกลืนในย่านนี้ทับกันทุกตัว แสดงว่าเป็นสารตัวเดียวกัน

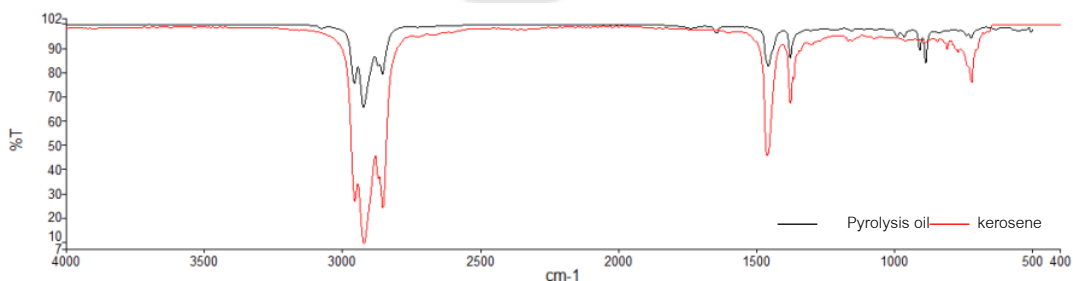
3. ย่านความถี่  $650 - 910 \text{ cm}^{-1}$  จะบ่งบอกถึงการจัดตัวของหมู่แทนที่บนวงแหวนสารประกอบอะโรมาติก ซึ่งหากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนบริเวณนี้ ย่อมแสดงว่าสารที่สนใจไม่มีองค์ประกอบเป็นอะโรมาติก



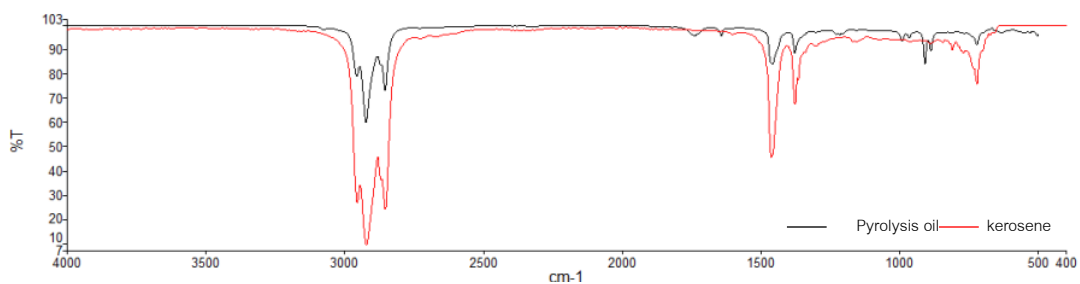
ภาพประกอบ ค.1 แถบการดูดกลืนของ Infrared Spectra ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ



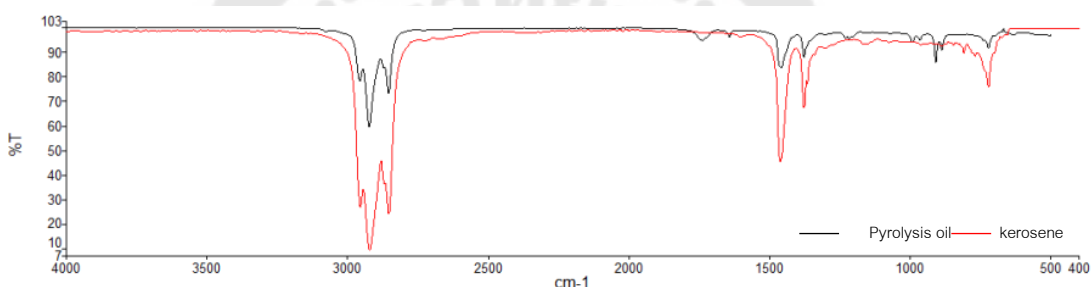
ภาพประกอบ ค.2 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที



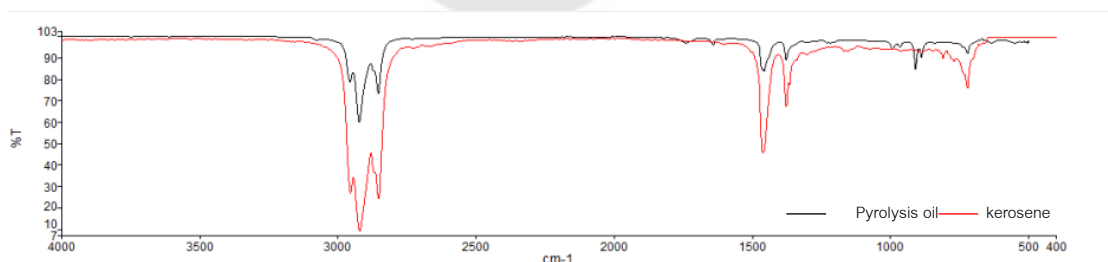
ภาพประกอบ ค.3 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



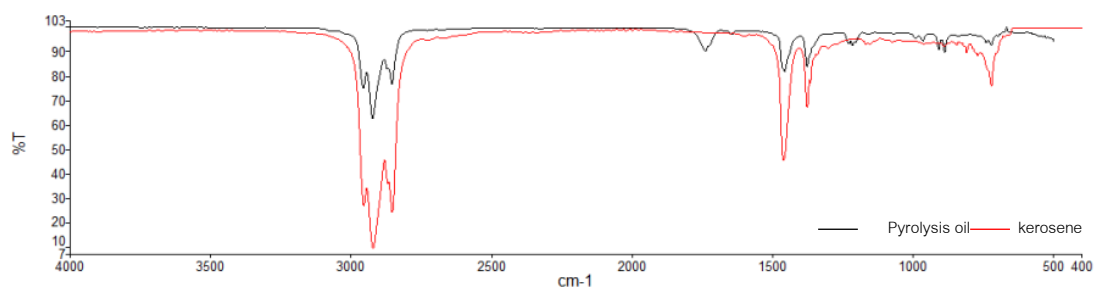
ภาพประกอบ ค.4 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



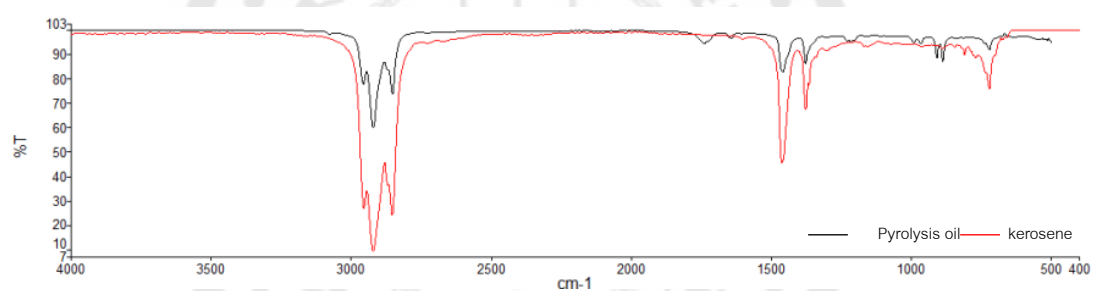
ภาพประกอบ ค.5 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



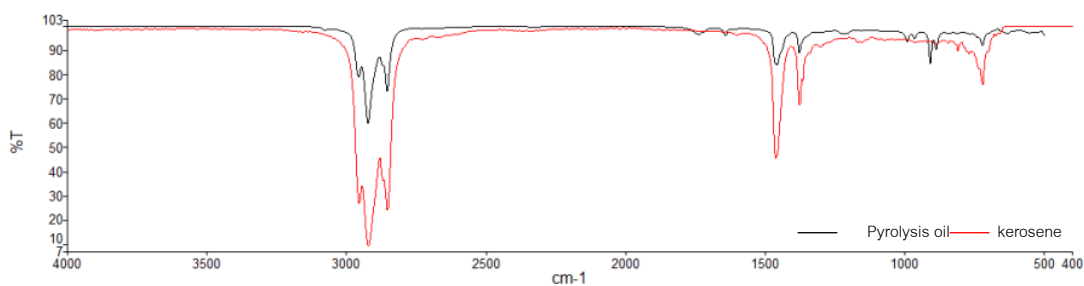
ภาพประกอบ ค.6 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก



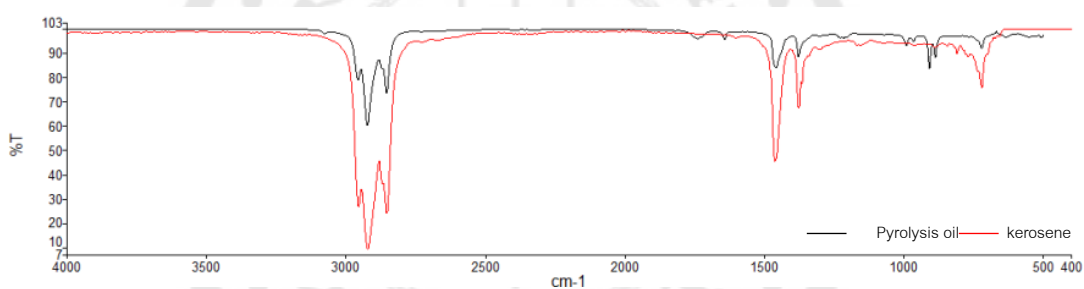
ภาพประกอบ ค.7 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 460 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ ค.8 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 480 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ ค.9 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ ค.10 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก

**ภาคผนวก ง.**  
**การวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน**  
**ตามคาบจุดเดือด (Boiling Distribution)**

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด โดยใช้เครื่องมือ Simulated Distillation Gas Chromatography ของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วิธีการตาม ASTM D2887 ซึ่งมีภาวะของเครื่องมือเป็น

Open tubular column capillary columns: RTX 2887

อุณหภูมิเริ่มต้น 40 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิสุดท้าย 350 °C

ชนิดตัวตรวจหา FID detector

ปริมาณตัวอย่าง 0.1  $\mu$ L

แก๊สตัวพา helium

อัตราการให้ความร้อน 10 °C /min

ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปกราฟแสดงค่า % Recovery ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งสามารถทำการคำนวณหาปริมาณขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดของการวิเคราะห์หาคุณภาพน้ำมันดิบ (Crude oil Evaluation) ได้เป็น

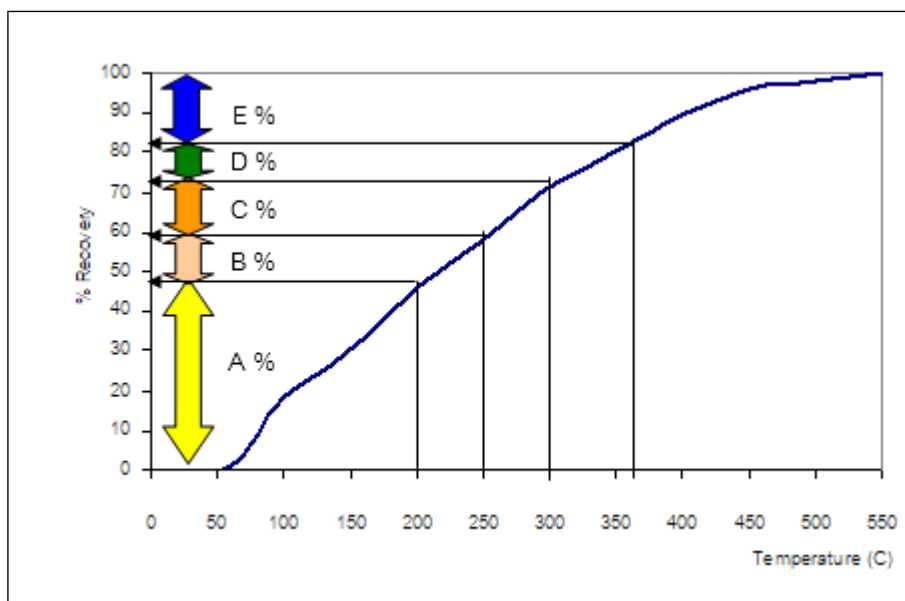
อุณหภูมิเริ่มต้น – 200 องศาเซลเซียส = แก๊โซลีน

200 – 250 องศาเซลเซียส = เคโรซีน

250 – 300 องศาเซลเซียส = แก๊สออยล์เบา

250 – 370 องศาเซลเซียส = แก๊สออยล์หนัก

370 – อุณหภูมิสุดท้าย = กากน้ำมัน



ภาพประกอบ ง.1 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น และการคำนวณปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ

การคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดือด

ปริมาณ naphtha ที่อ่านจากกราฟ A%

$$\text{ดังนั้น \% naphtha ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{A \times W}{100}$$

ปริมาณ kerosene ที่อ่านจากกราฟ B%

$$\text{ดังนั้น \% kerosene ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{B \times W}{100}$$

ปริมาณ light gas oil ที่อ่านจากกราฟ C%

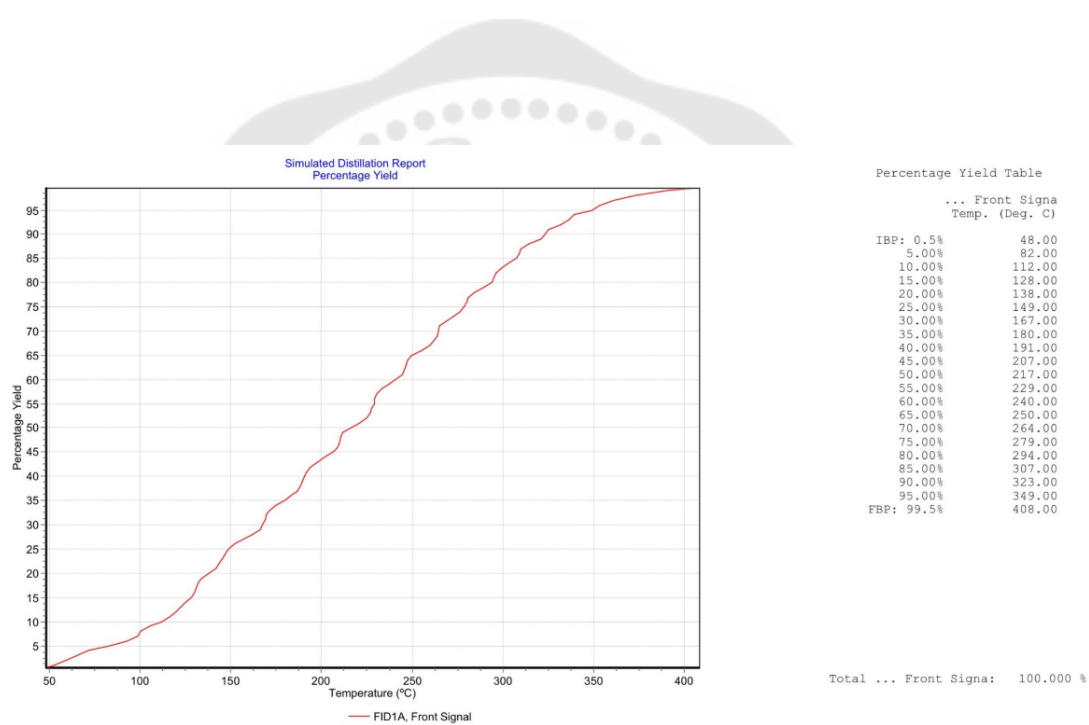
$$\text{ดังนั้น \% light gas oil ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{C \times W}{100}$$

ปริมาณ gas oil ที่อ่านจากกราฟ D%

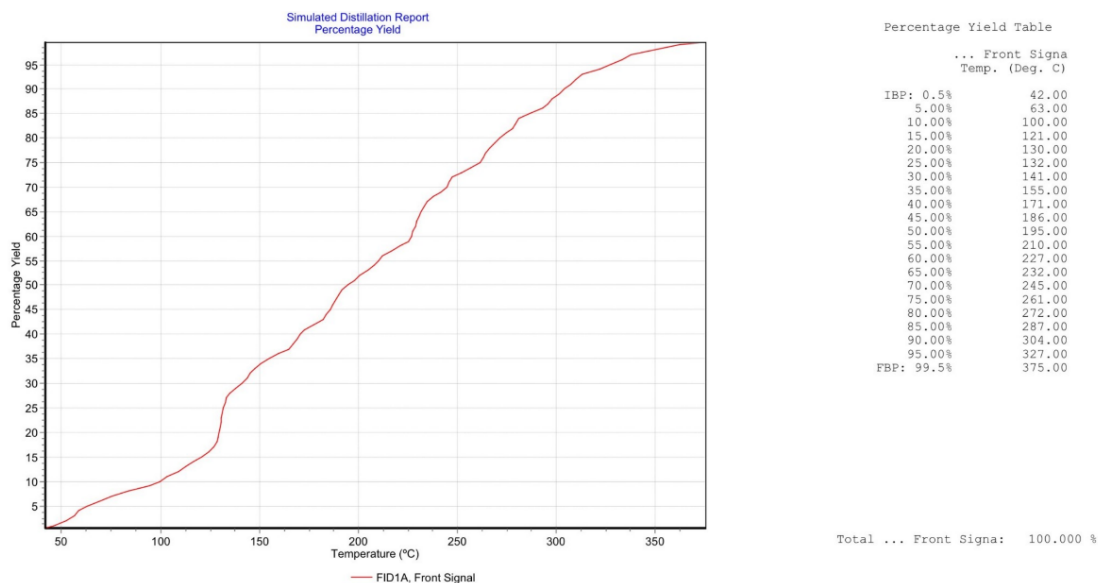
$$\text{ดังนั้น \% gas oil ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{D \times W}{100}$$

ปริมาณ long residue ที่อ่านจากกราฟ E%

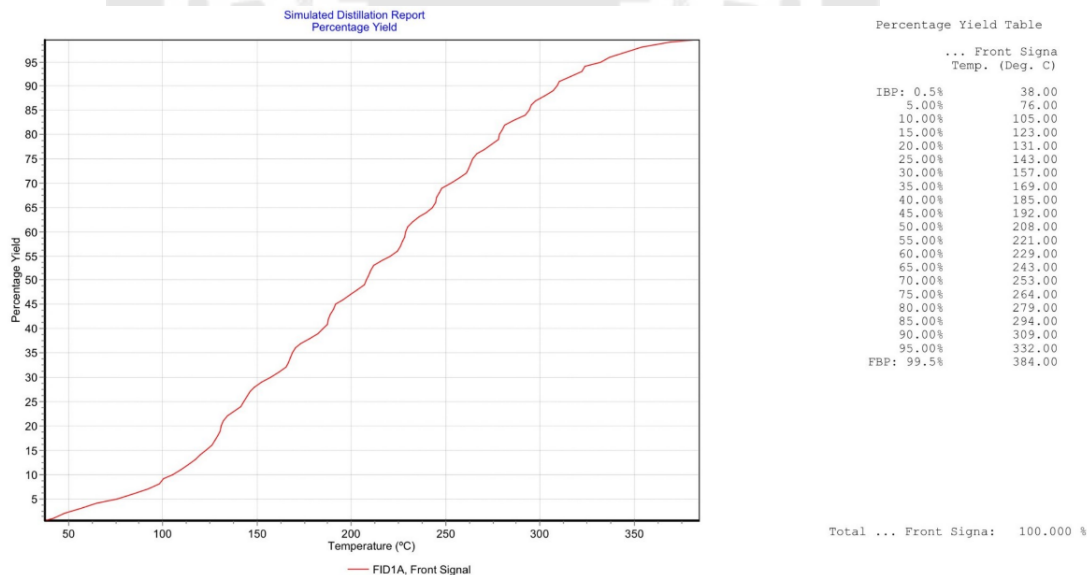
$$\text{ดังนั้น \% long residue ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{E \times W}{100}$$



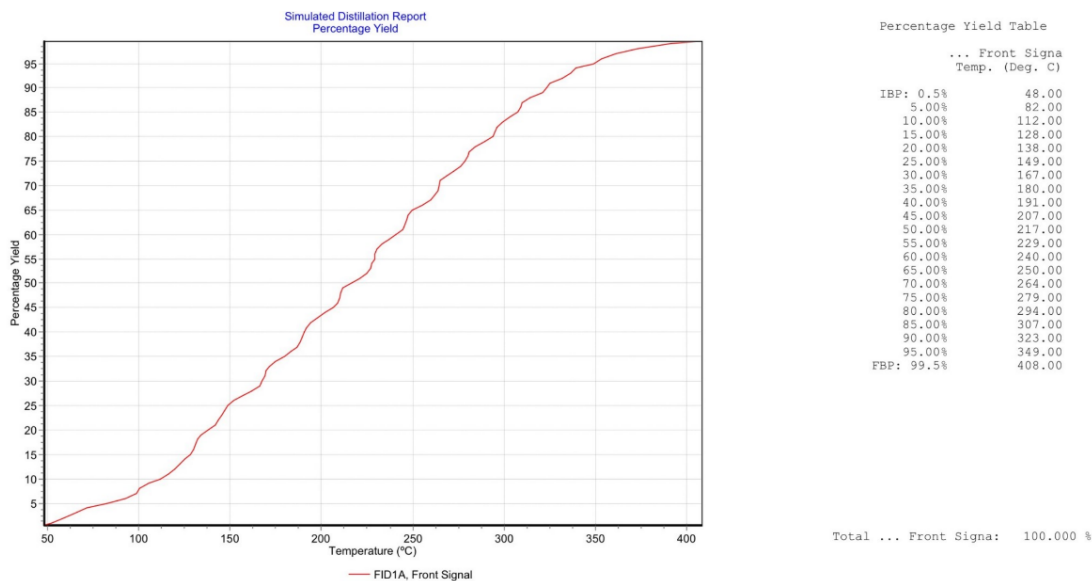
ภาพประกอบ ง.1 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที



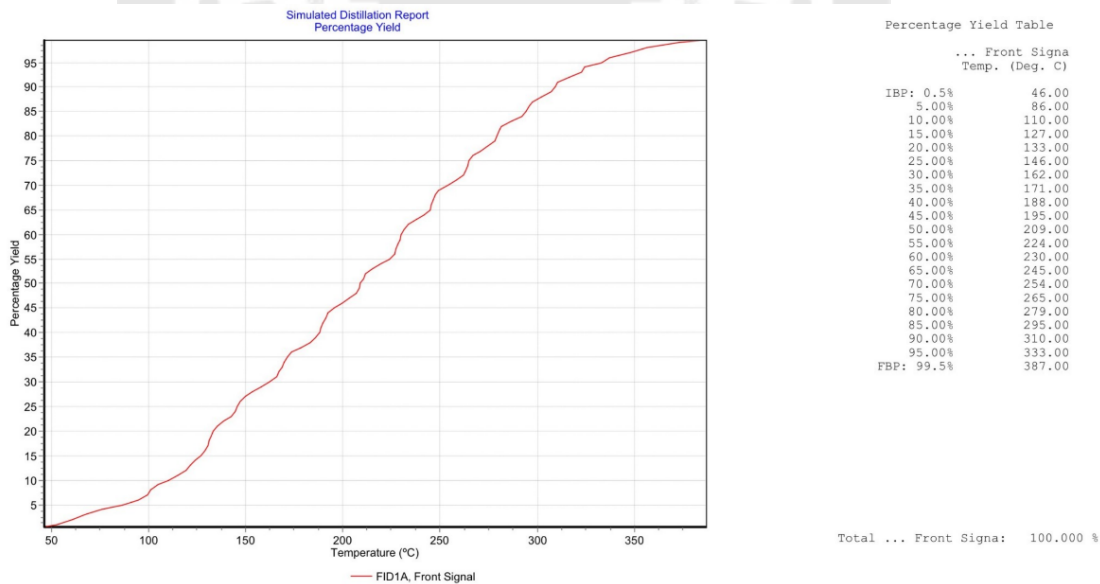
ภาพประกอบ ง.2 โครงสร้างของน้ำมันไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



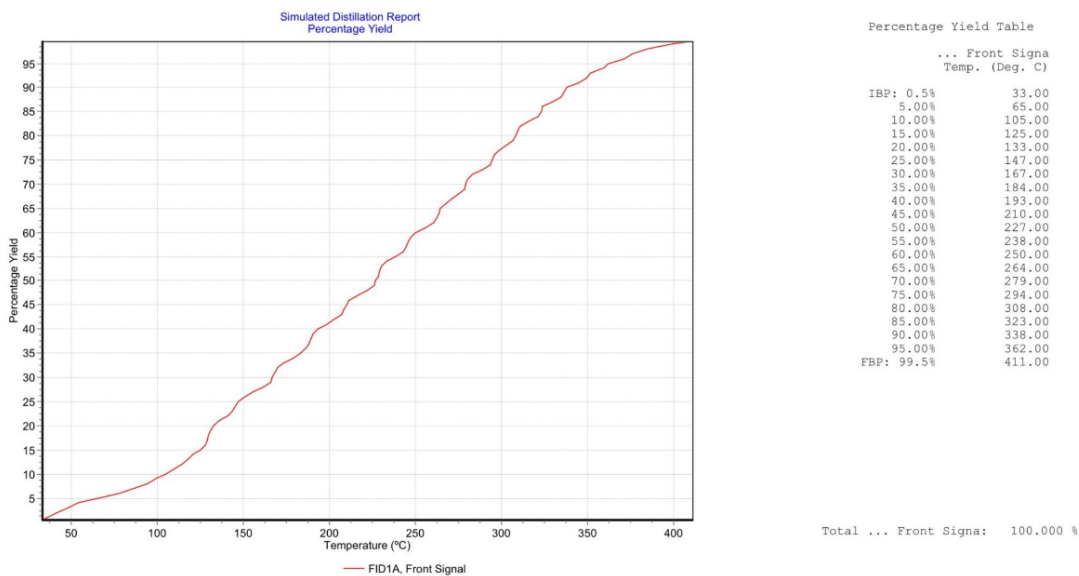
ภาพประกอบ ง.3 โครงสร้างของน้ำมันไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของ แก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



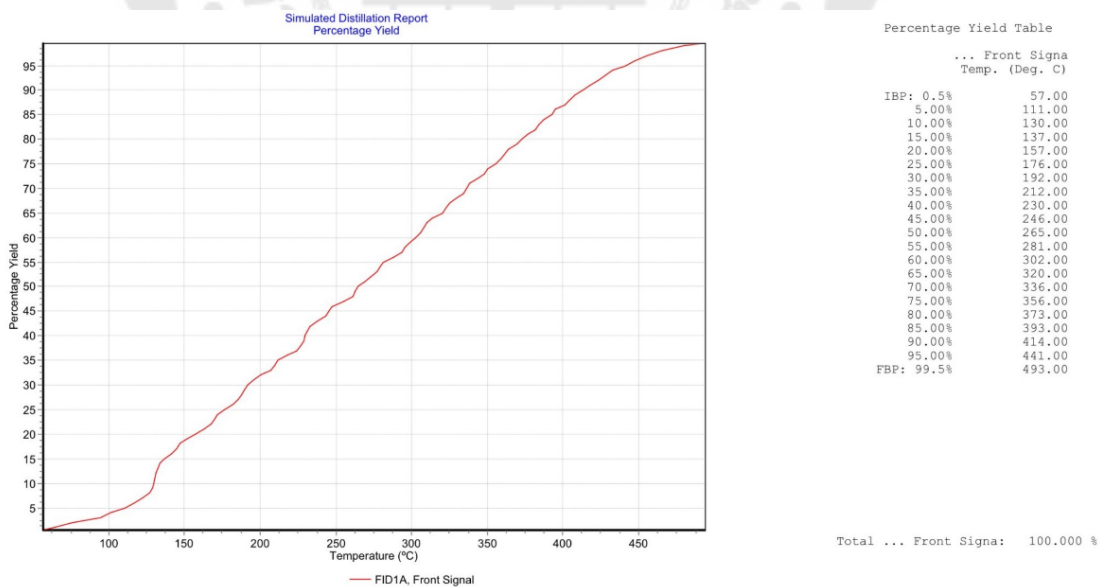
ภาพประกอบ ง.4 โครงสร้างของน้ำมันไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



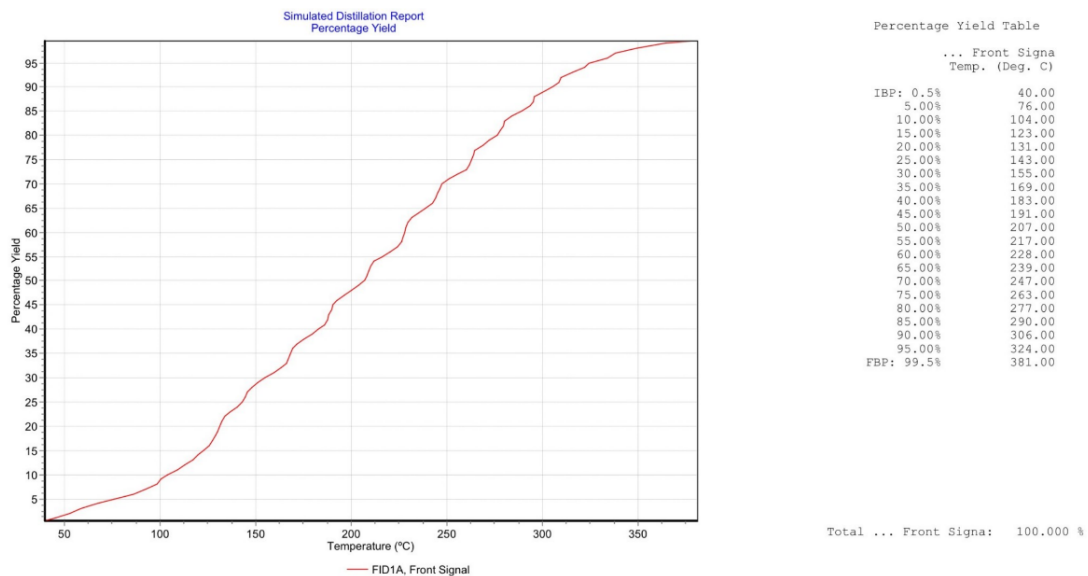
ภาพประกอบ ง.5 โครงสร้างของน้ำมันไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่ออนาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก



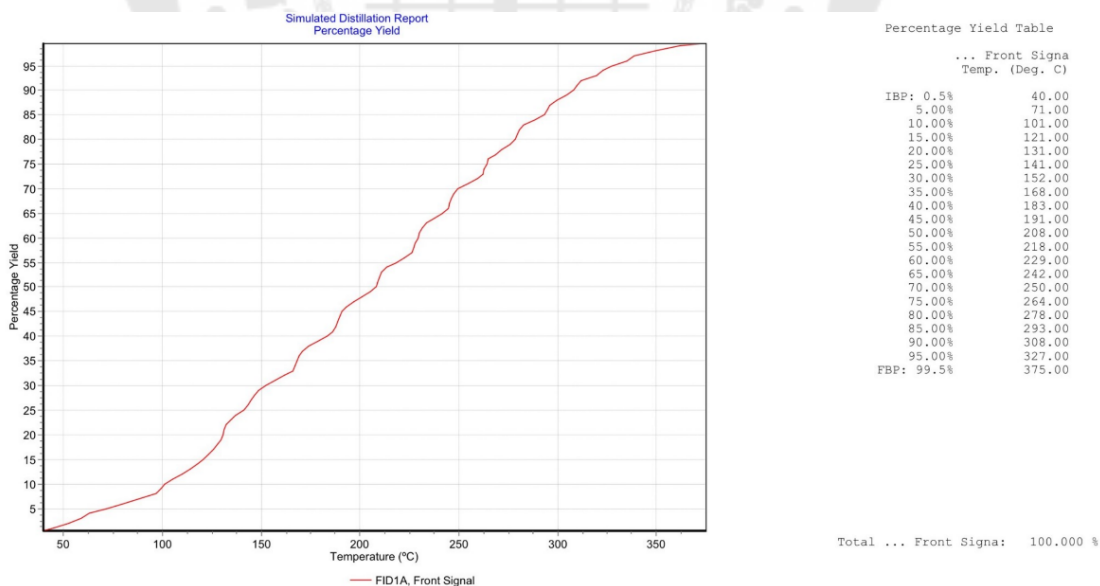
ภาพประกอบ ง.6 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 460 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ ง.7 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซ์ 480 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ ง.8 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ ง.9 โครงสร้างของน้ำมันไพโรไลซิสที่อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส 440 องศาเซลเซียส อัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดโลไมต์ ร้อยละ 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก

**ภาคผนวก จ.**  
**ข้อมูลดิบที่ได้จากการไพโรไลซิส**

ตาราง จ.1 นำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจากการออกแบบการทดลอง  
ด้วย Ease Design Expert

std	run	parameter			response (%wt.)						
		A	B	C	คงเหลือ	น้ำแข็ง	ขี้เถ้า	แก๊ส	ไพโรไลซิส	ขี้เถ้า	น้ำแข็ง
1	9	440	50	10	82.47	0.7	16.83	50.2	24	24.8	1
2	1	480	50	10	64.63	1.7	33.67	46.7	17.1	32.8	3.4
3	3	440	100	10	75.37	1.18	23.45	42.5	21.3	33.8	2.4
4	10	480	100	10	68.76	1.93	29.31	40.6	19	36.1	4.3
5	14	440	50	15	75.11	1.17	23.72	43.9	24.2	30.4	1.5
6	20	480	50	15	59.18	2.64	38.18	44	18.2	31.7	6.1
7	7	440	100	15	72.36	2.33	25.31	42.8	22.27	32.53	2.4
8	18	480	100	15	67.45	3.08	29.47	42.4	20.5	31.6	5.5
9	11	426.36	75	12.5	86.37	0.95	12.68	49.5	22.52	26.8	1.18
10	5	493.64	75	12.5	54.63	1.05	44.32	33.9	19.6	35.5	11
11	6	460	32.96	12.5	53.15	1.49	45.36	46.7	20.7	30	2.6
12	15	460	117.04	12.5	67.64	2.11	30.25	35.1	19.9	39.8	5.2
13	17	460	75	8.3	70.68	0.91	28.41	43.1	19.5	35.1	2.3
14	4	460	75	16.7	71.93	3.4	24.67	42.8	21.3	32.8	3.1
15	12	460	75	12.5	71.31	2.86	25.83	43.5	21	33.6	1.9
16	8	460	75	12.5	72.04	2.53	25.43	41.7	21.3	34.6	2.4
17	13	460	75	12.5	71.63	2.73	25.64	42.4	21.4	34	2.2
18	2	460	75	12.5	71.68	1.22	27.1	43	20.9	33.5	2.6
19	19	460	75	12.5	72.02	2.5	25.48	42.9	20.9	33.2	3
20	16	460	75	12.5	71.56	1.66	26.78	42.1	20.8	35.3	1.8

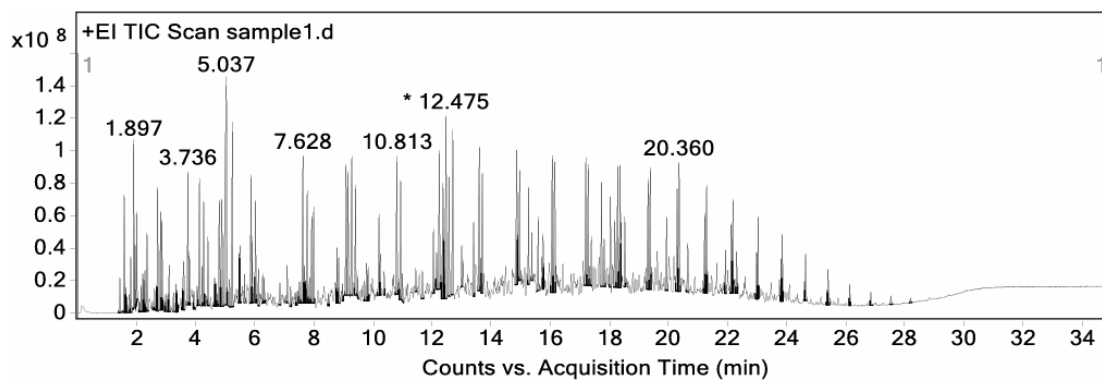
ตาราง ๑.2 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีนที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และ ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันตร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

การทดลอง	อัตราส่วนพลาสติก (โดยน้ำหนัก)		องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	PP	PE	ของเหลว	ของแข็ง	แก๊ส	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน
1	1	0	85.44	1.06	13.51	52.1	17.3	27.9	2.7
2	0.2	0.8	76.77	1.17	22.06	42.6	23.5	32.8	1.1
3	0.4	0.6	78.62	1.37	20.01	49.5	21.4	28.5	0.6
4	0.5	0.5	77.46	1.24	21.3	51.6	21.1	26.7	0.6
5	0.6	0.4	76.44	1.18	22.37	52.7	19.8	26.6	0.9
6	0.8	0.2	78.9	1.08	20.02	51.7	19.9	27.3	1.1
7	0	1	75.44	1.28	23.28	41.4	23.1	34.1	1.4

ตาราง ๑.3 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวเร่ง ปฏิกิริยา ถ่านกัมมันต์กับเหล็กบนโดไลไมต์ที่อัตราส่วนของพลาสติกพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที

การทดลอง	อัตราส่วน		องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)						
	ตัวเร่งปฏิกิริยา (โดยน้ำหนัก)		ของเหลว	ของแข็ง	แก๊ส	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน
	5% Fe-DM	AC							
1	1	0	79.15	1.64	19.2	47	21.9	30.2	0.9
2	0.2	0.8	76.22	1.52	22.26	46.2	23	29.7	1.1
3	0.4	0.6	77.05	2.12	20.83	48	22.7	28.5	0.8
4	0.5	0.5	77.13	2.33	20.54	47.2	22.3	29.6	0.9
5	0.6	0.4	77.81	1.33	20.86	48.2	22.5	28.5	0.8
6	0.8	0.2	78.47	2.14	19.12	47.7	22.3	29.3	0.7
7	0	1	77.22	2.45	20.33	45.3	22.2	31.5	1

**ภาคผนวก จ.**  
**การวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรมิเตอร์ผลิตภัณฑ์**  
**จากการไพโรไลซิส**



ภาพประกอบ จ.1 โครมาโทกราฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
 ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน  
 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก โดยไม่ใช้  
 ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรเมตรี

ตาราง จ.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
 ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน  
 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก โดยไม่ใช้  
 ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปคโตรเมตรี

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
1.43	0.252	2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>
1.576	1.444	Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.629	0.206	2-Methyl-1-butene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>
1.689	0.057	1,4-Pentadiene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.755	0.120	Cyclopentene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.795	0.556	Pentane, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.897	1.593	1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>

ตาราง ข.1 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
1.944	0.441	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
2.001	0.698	2-Butene, 2,3-dimethyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.09	0.073	2-Pentene, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.144	0.248	Cyclopentane, methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.207	0.276	2,4-Hexadiene, (E,E)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.24	0.258	Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.28	0.350	1-Pentene, 2,4-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.349	1.007	2,4-Dimethyl 1,4-pentadiene	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.538	0.055	Hexane, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.605	0.195	Cyclohexene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.674	0.163	1-Hexene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.708	1.223	1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.804	0.892	Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.857	0.819	1,4-Hexadiene, 5-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.95	0.065	1,4-Hexadiene, 5-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.983	0.179	Cyclopentene, 1,5-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.056	0.147	Cyclopentane, 1-methyl-2-methylene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.096	0.493	Cyclohexane, methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.245	0.206	Cyclopentane, ethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.325	0.270	Cyclohexene, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.361	0.252	2,4-Hexadiene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.547	0.173	Cyclobutane, (1-methylethylidene)-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.58	0.755	Cyclopentane, ethylidene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.736	1.508	Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
3.782	0.408	Cyclohexene, 1-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.935	0.180	3-Methylenecyclohexene	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub>

ตาราง ข.1 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
4.048	0.174	1-Heptene, 2-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.124	1.451	1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.21	0.326	1,4-Pentadiene, 2,3,3-trimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.267	1.016	Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
4.409	0.678	2,2-Dimethyl-3-heptene trans	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.638	0.303	Hexane, 2,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
4.668	0.321	1-Methyl-2-methylenecyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.794	1.493	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.877	1.615	2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.037	4.779	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.139	0.278	1,3-Hexadiene, 3-ethyl-2-methyl-, (Z)-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.239	1.946	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.491	0.520	1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.65	0.228	6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.876	1.540	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.912	0.462	Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
6.025	1.014	Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
6.121	0.374	Bicyclo[3.1.1]heptane, 2,6,6-trimethyl-, [1S-(1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)]-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.261	0.234	1,6-Octadiene, 2,5-dimethyl-, (E)-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.317	0.246	Cyclopentene, 1,4-dimethyl-5-(1-methylethyl)-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.845	0.264	Cyclohexane, (1-methylethylidene)-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
7.206	0.217	Mesitylene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.402	0.122	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.508	0.318	5-Decene, (E)-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>

ตาราง ข.1 (ต่อ)

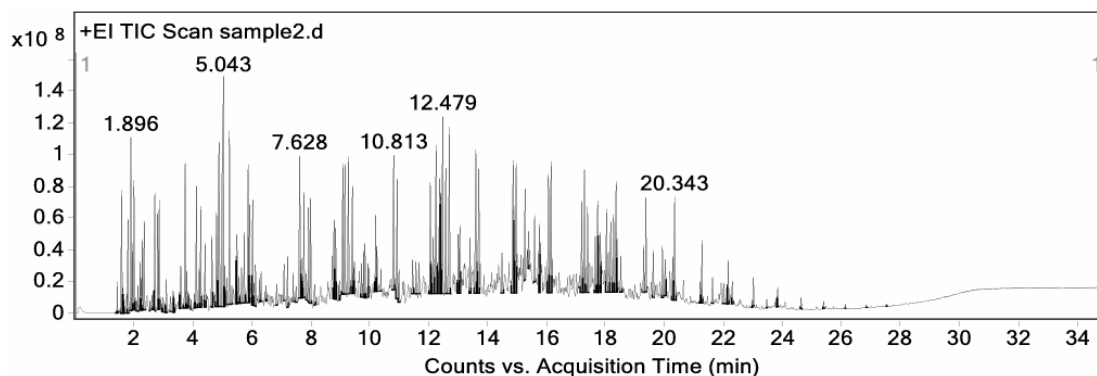
R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
7.628	2.084	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.677	0.409	2-Decene, 7-methyl-, (Z)-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
7.77	1.234	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>
7.85	0.248	cis-4-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.923	0.813	Nonane, 2,6-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.993	0.891	Decane, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
8.49	0.116	1-Decene, 5-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
8.779	0.569	2-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.839	0.528	3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.968	0.151	1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.087	1.439	5-Ethyl-1-nonene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.157	1.433	1-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.28	1.721	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.409	1.204	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
9.476	0.144	5-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.714	0.172	1H-Naphthalen-2-one, 3,4,5,6,7,8-hexahydro-4a,8a-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O
9.784	0.308	Bicyclo[3.1.1]heptan-2-one, 6,6-dimethyl-, (1R)-	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O
9.834	0.306	Cyclooctane, 1-methyl-3-propyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.202	0.877	(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O
10.242	0.326	Cyclohexane, (2,2-dimethylcyclopentyl)-	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>
10.378	0.201	1-Isopropyl-1,4,5-trimethylcyclohexane	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.813	1.795	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.935	1.386	Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
10.992	0.288	2-Dodecene, (E)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>

ตาราง ข.1 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
11.446	0.204	Dodecane, 4,6-dimethyl-	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
12.044	0.599	Cyclopentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
12.15	0.484	Cyclopentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
12.249	1.765	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.369	1.697	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>
12.475	2.420	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.575	1.345	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.701	1.981	1-Octanol, 2-butyl-	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> O
13.003	0.353	(2,4,6-Trimethylcyclohexyl) methanol	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub> O
13.404	0.671	Cyclododecanemethanol	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O
13.6	1.755	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.699	1.384	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
14.867	1.796	1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
14.967	1.242	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
15.266	0.908	1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
15.378	0.365	1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
15.591	0.767	1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
16.069	1.871	Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.158	2.169	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
17.204	1.543	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
17.287	1.511	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
17.389	0.412	1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
17.731	1.239	1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
18.037	0.956	1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
18.286	1.615	1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>

ตาราง ข.1 (ต่อ)

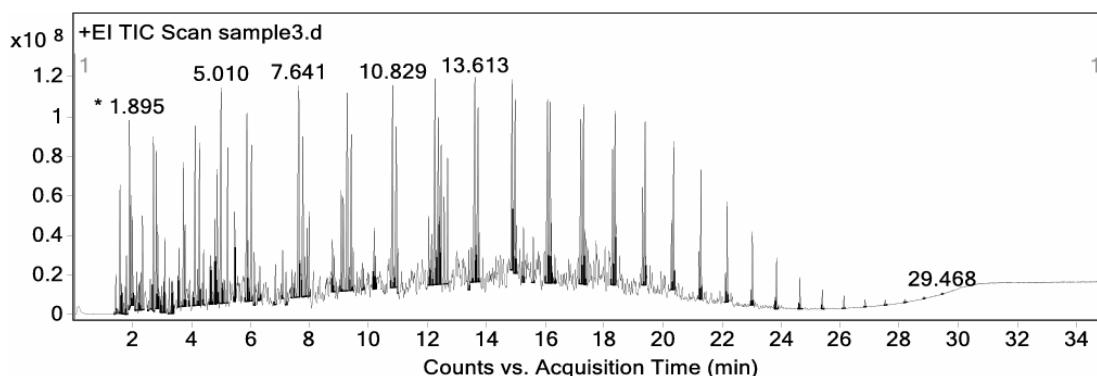
R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
18.368	1.554	Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
19.311	1.356	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
19.384	1.431	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>
19.935	0.791	1-Dodecanol, 2-octyl-	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub> O
20.297	1.304	1-Eicosene	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub>
20.36	1.868	Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
20.655	0.556	n-Nonadecanol-1	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub> O
21.292	1.225	Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>
22.185	1.016	Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>
22.982	0.486	1-Tricosene	C <sub>23</sub> H <sub>46</sub>
23.035	0.848	Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>
23.812	0.442	1-Tetracosene	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub>
23.855	0.669	Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>
24.645	0.470	Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>
25.405	0.431	Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>
26.139	0.223	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>
26.846	0.154	Octacosane	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>



ภาพประกอบ ข.2 โครมาโทกราฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

ตาราง ข.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.5:0.5 โดยน้ำหนัก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

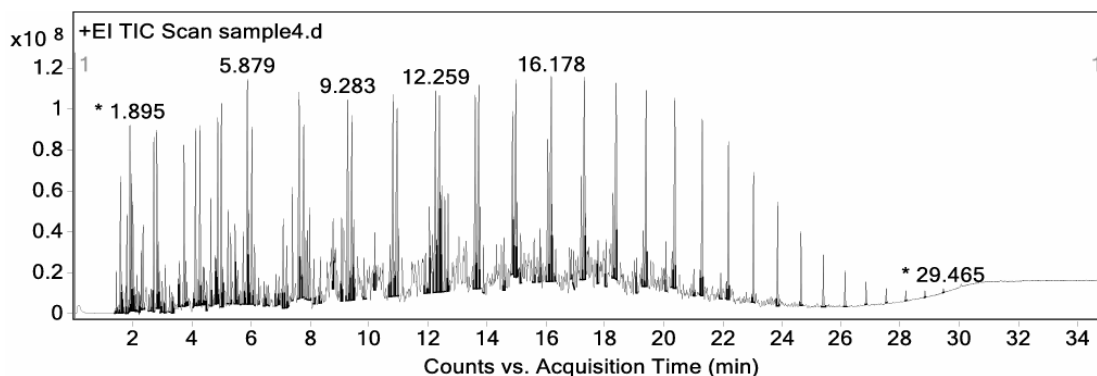
R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
1.896	7.283	1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
3.739	7.973	Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
4.891	13.115	2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.043	22.695	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.239	8.134	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
7.628	8.964	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
12.253	10.292	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.479	10.866	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.704	10.678	1-Octanol, 2-butyl-	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> O



ภาพประกอบ ข.3 โครมาโทกราฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

ตาราง ข.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

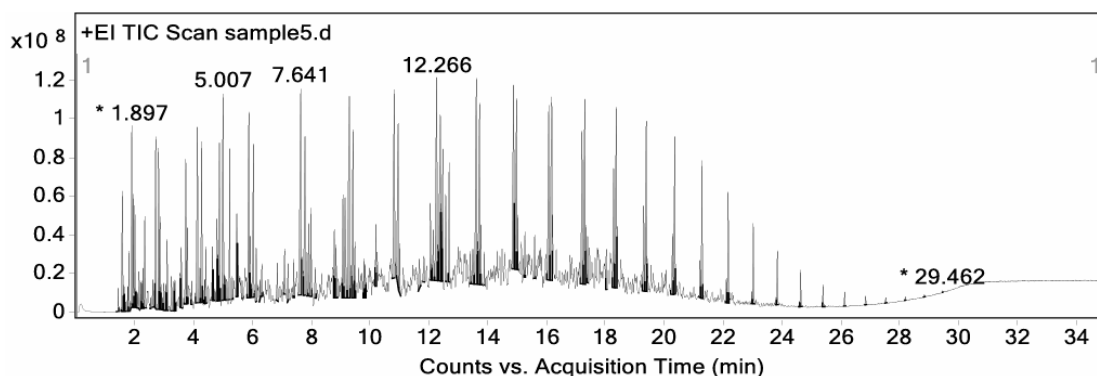
R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
1.895	5.744	1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
5.01	11.341	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.883	9.231	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
7.641	11.518	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
9.29	10.446	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
10.829	10.961	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
12.263	11.234	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
13.613	10.736	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
14.881	9.282	1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
16.076	9.507	Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>



ภาพประกอบ ข.4 โครมาโทกราฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร  
ต่อนาที และอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยา  
ถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

ตาราง ข.4 30 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50  
มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิพรอพิลีนกับพอลิเอทิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก  
และตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ  
แมสสเปคโตรเมตรี

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
4.997	8.265	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.879	9.393	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
7.634	9.323	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
9.283	9.518	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
10.819	10.028	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
12.259	10.322	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
13.723	10.727	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
14.987	10.435	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
16.178	11.075	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
17.31	10.914	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>



ภาพประกอบ ข.5 โครมาโทกราฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร  
ต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยา  
ถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8  
โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

ตาราง ข.5 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร  
ต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยา  
ถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8  
โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
1.43	0.145	2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>
1.576	1.303	Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.629	0.169	2-Methyl-1-butene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>
1.689	0.055	1,4-Pentadiene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.755	0.145	Cyclopentene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.792	0.507	Pentane, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.858	0.030	Pentane, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.897	1.511	1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
1.945	0.807	1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>

ตาราง ข.5 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
1.998	0.820	2-Butene, 2,3-dimethyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.044	0.148	2-Hexene	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.087	0.083	2-Pentene, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.144	0.316	Cyclopentane, methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.203	0.151	2,4-Hexadiene, (E,E)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.236	0.186	Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.28	0.284	1-Pentene, 2,4-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.336	0.918	Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.535	0.068	Hexane, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.601	0.201	Cyclohexene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.708	1.618	1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.807	1.383	Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.854	0.762	1,4-Hexadiene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.89	0.166	(Z)-2-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.946	0.075	1,4-Hexadiene, 5-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.983	0.272	Cyclopentene, 1,5-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.056	0.189	Cyclopentane, 1-methyl-2-methylene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.096	0.683	Cyclohexane, methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.245	0.312	Cyclopentane, ethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.321	0.252	Cyclohexene, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.361	0.337	2,4-Hexadiene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.544	0.237	Cyclobutane, (1-methylethylidene)-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.573	0.715	1-Ethylcyclopentene	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.729	1.456	Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
3.779	0.569	Cyclohexene, 1-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>

ตาราง ข.5 (ต่อ)

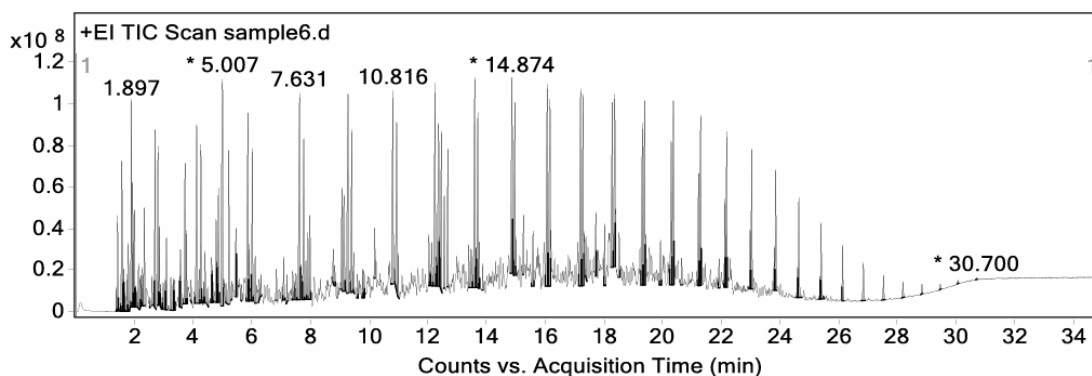
R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
3.932	0.193	3-Methylenecyclohexene	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub>
4.128	2.103	1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.21	0.264	1,4-Pentadiene, 2,3,3-trimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.274	1.611	Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
4.37	0.167	2-Octene, (Z)-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.41	0.518	2,2-Dimethyl-3-heptene trans	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.635	0.498	Hexane, 2,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
4.662	0.284	1-Methyl-2-methylenecyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.788	0.798	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.821	0.316	Cyclohexane, ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.874	1.654	2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.007	2.864	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.07	0.134	1-Propylcyclopentene	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
5.123	0.181	1-Methyl-2-methylenecyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
5.222	1.245	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.312	0.151	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
5.468	0.340	1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.647	0.116	6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.879	2.500	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.916	0.333	2,4,6-Trimethyl-3-heptene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
6.035	1.827	Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
6.125	0.508	Bicyclo[3.1.1]heptane, 2,6,6-trimethyl-, [1S-(1.alpha.,2.beta.,5.alpha.)]-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.317	0.269	Cyclopentene, 1,4-dimethyl-5-(1-methylethyl)-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.845	0.392	Cyclopentene, 1-butyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>

ตาราง ข.5 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
7.09	0.415	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.203	0.300	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.402	0.293	Mesitylene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.641	3.080	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.784	1.887	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>
7.853	0.341	4-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.92	0.565	Nonane, 2,6-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.989	0.738	Decane, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
8.139	0.323	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
8.779	0.637	2-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.839	0.680	3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.293	3.087	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.419	2.219	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
9.482	0.447	2-Undecene, (Z)-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.788	0.341	Bicyclo[3.1.1]heptan-2-one, 6,6-dimethyl-, (1R)-	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O
10.826	2.767	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.952	2.097	Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
10.999	0.351	2-Dodecene, (Z)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
12.047	0.657	Cyclopentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
12.143	0.584	4-Nonene, 5-butyl-	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.266	3.042	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.382	2.491	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>
12.468	1.060	1-Decanol, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.568	0.805	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
13.613	3.039	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>

ตาราง ข.5 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
13.719	2.449	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
13.756	0.489	2-Tetradecene, (E)-	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.879	0.229	1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
14.881	2.527	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
14.984	2.291	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
16.072	2.436	Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.175	2.716	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
17.2	1.881	1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>
17.3	2.571	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
18.027	0.353	Heptadecane, 3-methyl-	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
18.276	1.365	1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>
18.372	2.462	Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
19.298	0.958	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
19.387	2.109	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>
20.277	0.694	1-Eicosene	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub>
20.357	1.793	Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
21.283	1.384	Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>
22.172	1.043	Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>
23.025	0.706	Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>
23.845	0.451	Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>
24.635	0.306	Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>
25.395	0.197	Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>
26.132	0.128	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>
26.842	0.080	Octacosane	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>



ภาพประกอบ ข.6 โครมาโทกราฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 460 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน  
50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก  
ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก  
ในอัตราส่วน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

ตาราง ข.6 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสใน  
ภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 460 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร  
ต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยา  
ถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8  
โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
1.377	0.116	Propene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
1.43	0.631	2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>
1.53	0.044	Butane, 2-methyl-	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.576	1.887	Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.629	0.271	2-Methyl-1-butene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>
1.649	0.162	1,3-Pentadiene, (Z)-	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.689	0.106	1,4-Pentadiene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.755	0.215	Cyclopentene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.792	0.558	Pentane, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>

ตาราง ข.6 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
1.855	0.037	Pentane, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.897	1.697	1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
1.945	0.869	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.998	0.769	2-Butene, 2,3-dimethyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.041	0.201	1,3-Pentadiene, 3-methyl-, (Z)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.087	0.083	2-Pentene, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.144	0.355	Cyclopentane, methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.203	0.168	2,4-Hexadiene, (E,E)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.236	0.193	Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.28	0.257	1-Pentene, 2,4-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.336	0.939	Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.535	0.061	Hexane, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.601	0.198	Cyclohexene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.706	1.594	1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.807	1.249	Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.854	0.597	1,4-Hexadiene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.89	0.147	(Z)-2-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.946	0.070	1,4-Hexadiene, 5-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.983	0.242	Cyclopentene, 1,5-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.056	0.206	Cyclopentane, 1-methyl-2-methylene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.096	0.660	Cyclohexane, methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.245	0.280	Cyclopentane, ethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.325	0.253	Cyclohexene, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.361	0.309	Cyclohexene, 4-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.544	0.204	Cyclobutane, (1-methylethylidene)-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>

ตาราง ข.6 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
3.573	0.649	1-Ethylcyclopentene	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.729	1.317	Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
3.779	0.517	Cyclohexene, 1-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.932	0.151	3-Methylenecyclohexene	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub>
4.124	1.935	1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.207	0.253	1,4-Pentadiene, 2,3,3-trimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.267	1.465	Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
4.366	0.140	2-Octene, (Z)-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.41	0.439	2,2-Dimethyl-3-heptene trans	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.499	0.136	Cyclopropane, (2,2-dimethylpropylidene)-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.632	0.397	Hexane, 2,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
4.662	0.295	1-Methyl-2-methylenecyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.788	0.753	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.821	0.255	Cyclohexane, ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.867	1.061	2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.007	3.160	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.123	0.185	Cyclohexene, 1,2-dimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
5.222	1.240	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.312	0.116	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
5.644	0.109	6,6-Dimethylhepta-2,4-diene	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.873	2.178	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.909	0.311	2,4,6-Trimethyl-3-heptene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
6.029	1.521	Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
6.118	0.423	Cyclohexane, 1,2,3-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
6.841	0.285	Cyclopentene, 1-butyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>

ตาราง ข.6 (ต่อ)

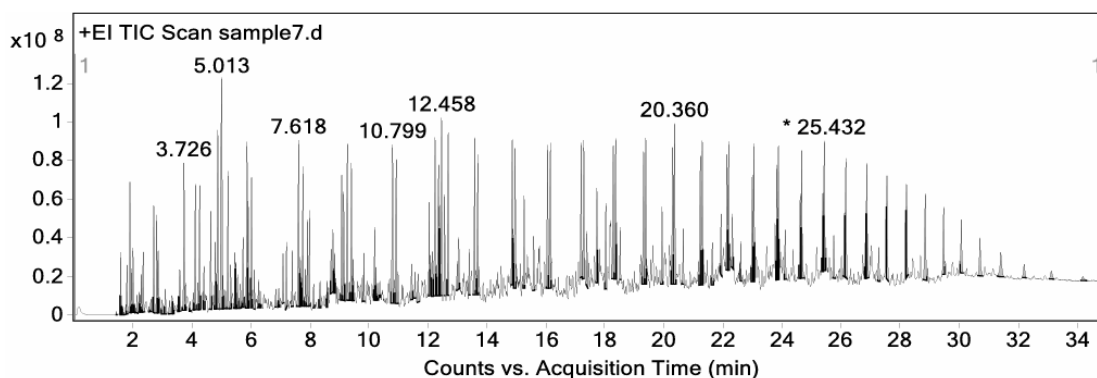
R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
7.087	0.409	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.203	0.214	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.399	0.211	Mesitylene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.508	0.338	5-Decene, (E)-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.631	2.792	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.774	1.662	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>
7.85	0.313	2-Decene, (Z)-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.916	0.526	Nonane, 2,6-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.986	0.666	Decane, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
8.776	0.199	2-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.832	0.137	3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.074	0.806	1-Undecene, 7-methyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.283	2.462	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.416	1.739	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
9.476	0.242	2-Undecene, (Z)-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.605	0.163	Cyclopentane, 1,2-dipropyl-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.781	0.215	Bicyclo[3.1.1]heptan-2-one, 6,6-dimethyl-, (1R)-	C <sub>9</sub> H <sub>14</sub> O
10.816	2.371	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.939	1.837	Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
10.992	0.323	2-Dodecene, (Z)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
12.14	0.538	6-Tridecene, (Z)-	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.253	2.573	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.372	2.077	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>
12.462	1.500	1-Decanol, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
13.474	0.634	1,9-Tetradecadiene	C <sub>14</sub> H <sub>26</sub>

ตาราง ข.6 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
13.603	2.642	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.706	2.068	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
13.749	0.313	7-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.875	0.183	3-Tetradecene, (E)-	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
14.874	2.416	1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
14.974	1.980	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
16.075	2.716	Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.168	2.682	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
17.207	2.521	1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>
17.297	2.419	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
17.725	0.491	1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
18.289	1.887	1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>
18.375	2.004	Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
19.314	1.891	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
19.397	2.291	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>
20.37	2.263	Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
21.299	1.911	Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>
22.189	1.640	Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>
23.042	1.450	Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>
23.808	0.343	1-Tetracosene	C <sub>24</sub> H <sub>48</sub>
23.858	1.131	Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>
24.645	0.979	Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>
25.405	0.735	Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>
26.139	0.512	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>
26.846	0.401	Octacosane	C <sub>28</sub> H <sub>58</sub>

ตาราง ข.6 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
27.529	0.268	Nonacosane	C <sub>29</sub> H <sub>60</sub>



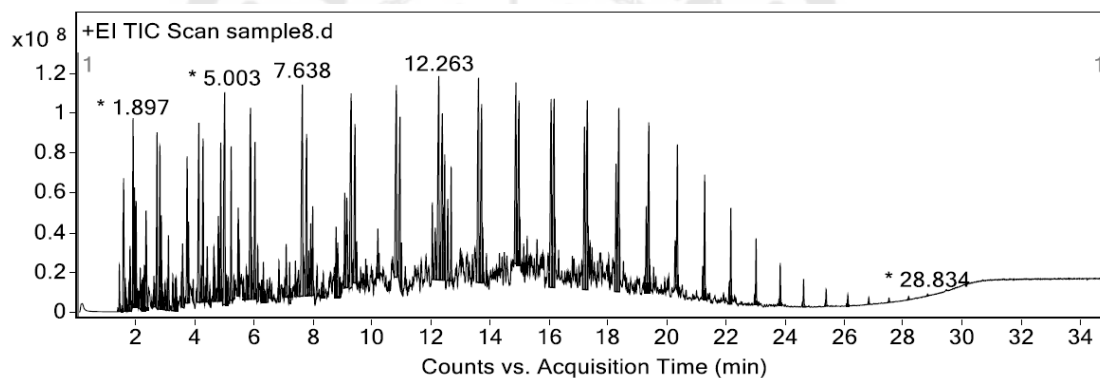
ภาพประกอบ ข.7 โครมาโทกราฟองค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลส์ 480 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

ตาราง ข.7 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลส์ 480 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปคโตรเมตรี

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
4.874	10.759	2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.013	18.467	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.866	8.519	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>

ตาราง ข.7 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
7.618	10.031	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
10.799	8.908	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
12.239	8.816	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.458	8.842	2-Isopropyl-5-methyl-1-heptanol	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.684	7.446	1-Decanol, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
13.587	7.771	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
20.36	10.441	Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>



ภาพประกอบ ข.8 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิส

ในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซิส 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี

ตาราง ข.8 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 25 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
1.377	0.017	Propene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
1.43	0.297	2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>
1.526	0.027	Butane, 2-methyl-	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.576	1.561	Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.629	0.217	2-Pentene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>
1.689	0.075	1,3-Pentadiene, (E)-	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.755	0.174	Cyclopentene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.792	0.557	Pentane, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.855	0.035	Pentane, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.897	1.601	1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
1.945	0.867	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.998	0.875	2-Butene, 2,3-dimethyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.044	0.163	3-Hexene	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.087	0.095	2-Pentene, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.14	0.351	Cyclopentane, methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.203	0.192	2,4-Hexadiene, (E,E)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.236	0.232	Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.276	0.348	1-Pentene, 2,4-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.336	1.048	2,4-Hexadiene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.535	0.066	Hexane, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.601	0.221	Cyclohexene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>

ตาราง ข.8 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
2.708	1.705	1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.804	1.421	Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.854	0.764	1,4-Hexadiene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.89	0.181	(Z)-2-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.946	0.079	1,4-Hexadiene, 5-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.983	0.280	1,4-Pentadiene, 3,3-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.053	0.211	Cyclopentane, 1-methyl-2-methylene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.096	0.723	Cyclohexane, methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.242	0.329	Cyclopentane, ethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.321	0.259	Cyclohexene, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.361	0.378	Cyclohexene, 4-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.54	0.251	Cyclobutane, (1-methylethylidene)-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.573	0.742	Cyclopentane, ethylidene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.729	1.481	Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
3.779	0.603	Cyclohexene, 1-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.932	0.165	3-Methylenecyclohexene	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub>
4.128	2.144	1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.207	0.279	1,4-Pentadiene, 2,3,3-trimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.27	1.658	Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
4.366	0.156	2-Octene, (Z)-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.41	0.491	2,2-Dimethyl-3-heptene trans	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.499	0.155	Cyclopropane, (2,2-dimethylpropylidene)-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.635	0.503	Hexane, 2,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
4.662	0.349	1-Methyl-2-methylenecyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.788	0.853	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>

ตาราง ข.8 (ต่อ)

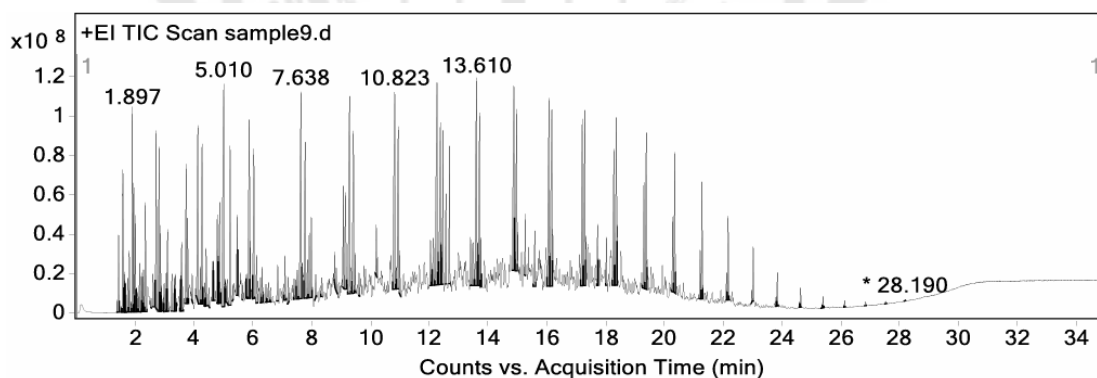
R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
4.821	0.338	Cyclohexane, ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.871	1.628	2,3-Dimethyl-3-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.003	3.054	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.07	0.207	1-Propylcyclopentene	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
5.123	0.242	Methyl ethyl cyclopentene	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
5.222	1.295	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.312	0.152	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
5.469	0.376	1,3-Heptadiene, 2,3-dimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.644	0.145	Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.737	0.369	2,4,6-Trimethyl-3-heptene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
5.783	0.226	Cyclohexane, 1,2,3-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.879	2.598	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.912	0.355	Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
6.032	1.760	Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
6.121	0.528	Cyclohexane, 1-methyl-4-(2-hydroxyethyl)-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O
6.314	0.399	Cyclopentene, 1,4-dimethyl-5-(1-methylethyl)-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.443	0.254	Cyclohexene, 1-propyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
6.529	0.209	Cyclohexane, propyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
6.841	0.397	Cyclohexane, (1-methylethylidene)-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
7.087	0.525	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.203	0.360	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.399	0.265	Mesitylene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.508	0.372	trans-4-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.638	3.277	1-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.78	1.934	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>

ตาราง ข.8 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
7.853	0.366	2-Decene, (Z)-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.92	0.585	Nonane, 2,6-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.989	0.756	Decane, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
8.779	0.619	2-Decene, 2,4-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
8.835	0.686	3-Decene, 2,2-dimethyl-, (E)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
9.29	2.869	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.419	1.918	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
9.479	0.275	2-Undecene, (Z)-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
10.826	2.789	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.949	2.118	Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
10.999	0.359	2-Dodecene, (Z)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
12.263	3.023	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.379	2.490	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>
12.465	0.980	1-Decanol, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> O
12.681	0.930	1-Decanol, 2-hexyl-	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub> O
13.61	2.994	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.716	2.399	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
13.753	0.395	2-Tetradecene, (E)-	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
14.877	2.429	1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
14.98	2.192	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
16.069	2.750	Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.172	2.870	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
17.2	2.116	1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>
17.297	2.709	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
18.272	1.525	1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>

ตาราง ข.8 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
18.365	2.501	Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
19.298	0.932	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
19.381	2.015	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>
20.35	1.518	Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
21.276	1.190	Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>
22.165	0.871	Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>
23.018	0.536	Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>
23.838	0.348	Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>
24.632	0.260	Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>
25.392	0.144	Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>
26.129	0.099	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>



ภาพประกอบ ข.9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิส

ในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซิส 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี

ตาราง ข.9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบอินทรีย์จากน้ำมันไพโรไลซิสในภาวะดำเนินการใช้ในการไพโรไลซ์ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราส่วนพอลิเอทิลีนกับพอลิพรอพิลีน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาถ่านกัมมันต์กับเหล็กที่เคลือบฝังด้วยเหล็กออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในอัตราส่วน 0.2:0.8 โดยน้ำหนัก ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรเมตรี

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
1.377	0.064	Propene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
1.43	0.548	2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>
1.526	0.034	Butane, 2-methyl-	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.576	1.993	Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1.629	0.288	2-Pentene, (E)-	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>
1.649	0.178	1,3-Pentadiene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.689	0.117	1,3-Pentadiene, (E)-	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.755	0.222	Cyclopentene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>
1.792	0.564	Pentane, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.855	0.064	Pentane, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.897	1.952	1-Pentene, 2-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
1.945	1.048	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
1.998	0.894	2-Butene, 2,3-dimethyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.034	0.274	1,3-Pentadiene, 3-methyl-, (Z)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.087	0.136	2-Pentene, 3-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.144	0.466	Cyclopentane, methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>
2.203	0.244	2,4-Hexadiene, (E,E)-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.236	0.308	Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.276	0.358	1-Pentene, 2,4-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.336	1.258	Cyclopentene, 1-methyl-	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.535	0.059	Hexane, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>

ตาราง ข.9 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
2.601	0.253	Cyclohexene	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>
2.708	1.898	1-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.804	1.568	Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
2.854	0.774	1,4-Hexadiene, 2-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.89	0.195	(Z)-2-Heptene	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
2.946	0.096	1,4-Hexadiene, 5-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
2.98	0.308	Cyclopentene, 4,4-dimethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.053	0.308	Cyclopentane, 1-methyl-2-methylene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.096	0.861	Cyclohexane, methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.242	0.358	Cyclopentane, ethyl-	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
3.321	0.296	Cyclohexene, 3-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.361	0.461	Cyclohexene, 4-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.54	0.258	Cyclobutane, (1-methylethylidene)-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.573	0.924	Cyclopentane, ethylidene-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.729	1.507	Heptane, 4-methyl-	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
3.779	0.696	Cyclohexene, 1-methyl-	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub>
3.932	0.220	3-Methylenecyclohexene	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub>
4.128	2.258	1-Octene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.21	0.328	1,4-Pentadiene, 2,3,3-trimethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.27	1.741	Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
4.366	0.197	2-Octene, (Z)-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.41	0.572	2,2-Dimethyl-3-heptene trans	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
4.499	0.159	Cyclopropane, (2,2-dimethylpropylidene)-	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.662	0.428	1-Methyl-2-methylenecyclohexane	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
4.788	0.956	Cyclohexane, 1,2,4-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>

ตาราง ข.9 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
4.821	0.345	Cyclohexane, ethyl-	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
4.867	1.132	2,3-Dimethyl-2-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.01	3.742	2,4-Dimethyl-1-heptene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.07	0.150	1-Propylcyclopentene	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
5.123	0.253	Methyl ethyl cyclopentene	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
5.222	1.514	Cyclohexane, 1,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.312	0.106	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>
5.644	0.118	Cyclohexene, 3,3,5-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
5.783	0.241	Cyclohexane, 1,2,3-trimethyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.879	2.562	1-Nonene	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
5.912	0.337	Cyclopentane, 1,2,3,4,5-pentamethyl-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
6.032	1.772	Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>
6.121	0.511	1-Ethyl-4-methylcyclohexane	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
6.314	0.373	Cyclopentene, 1,4-dimethyl-5-(1-methylethyl)-	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub>
6.443	0.215	Cyclohexene,1-propyl-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
6.53	0.303	Cyclohexane, propyl-	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>
6.845	0.388	Cyclohexane, (1-methylethylidene)-	C <sub>9</sub> H <sub>16</sub>
7.087	0.489	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.203	0.241	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.399	0.167	Mesitylene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>
7.508	0.439	trans-4-Decene	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.777	1.957	Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>
7.85	0.350	2-Decene, (Z)-	C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>
7.916	0.589	Nonane, 2,6-dimethyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
7.986	0.735	Decane, 2-methyl-	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>

ตาราง ข.9 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
9.287	3.140	1-Undecene	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
9.419	2.112	Undecane	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>
9.479	0.280	2-Undecene, (Z)-	C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>
10.823	3.223	1-Dodecene	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
10.942	2.190	Dodecane	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>
10.995	0.353	2-Dodecene, (Z)-	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub>
12.14	0.751	4-Nonene, 5-butyl-	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.259	3.255	1-Tridecene	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub>
12.379	2.439	Tridecane	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>
13.49	0.818	5-Tetradecene, (Z)-	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.61	3.259	1-Tetradecene	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
13.709	2.381	Tetradecane	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>
13.753	0.389	2-Tetradecene, (E)-	C <sub>14</sub> H <sub>28</sub>
14.877	2.720	1-Pentadecene	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub>
14.974	2.187	Pentadecane	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>
16.072	2.845	Cetene	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub>
16.168	2.936	Hexadecane	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
17.204	2.276	1-Heptadecene	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub>
17.293	2.480	Heptadecane	C <sub>17</sub> H <sub>36</sub>
18.279	1.682	1-Octadecene	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub>
18.369	2.291	Octadecane	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>
19.301	1.141	1-Nonadecene	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub>
19.381	1.934	Nonadecane	C <sub>19</sub> H <sub>40</sub>
20.35	1.652	Eicosane	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>
21.213	0.477	Henicos-1-ene	C <sub>21</sub> H <sub>42</sub>

ตาราง ข.9 (ต่อ)

R.T. (min)	Area%	Name of compound	Molecular formula
21.279	1.197	Heneicosane	C <sub>21</sub> H <sub>44</sub>
22.165	0.794	Docosane	C <sub>22</sub> H <sub>46</sub>
23.018	0.436	Tricosane	C <sub>23</sub> H <sub>48</sub>
23.838	0.299	Tetracosane	C <sub>24</sub> H <sub>50</sub>
24.632	0.175	Pentacosane	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>
25.392	0.109	Hexacosane	C <sub>26</sub> H <sub>54</sub>
26.129	0.061	Heptacosane	C <sub>27</sub> H <sub>56</sub>

ประวัติผู้เขียน

