



## รายงานฉบับสมบูรณ์

### โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

**ชื่อโครงการ** การผลิตน้ำมันจากพอลิสไตรีนโดยไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ  
Oil production from Polystyrene by pyrolysis in semi-batch reactor

**ชื่อนิสิต** นางสาวณัฐชยา บุญเลิศ เลขประจำตัว 6032915223  
นายเอกกิงเกียรติ ทาฟู เลขประจำตัว 6032921023

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

## บทคัดย่อ

**ชื่อโครงการ** การผลิตน้ำมันจากพอลิสไตรีนโดยไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ

Oil production from Polystyrene by pyrolysis in Semi-batch reaction

**รายชื่อนิสิตร่วมโครงการ**

1. นางสาวณัฐชยา บุญเลิศ
2. นายเถกิงเกียรติ ทาฟู

**อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ** ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์

**ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2563**

บรรณจุภัณฑ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันส่วนใหญ่เป็นพลาสติกที่ใช้แล้วทิ้ง ย่อมก่อให้เกิดปริมาณขยะพลาสติกมากขึ้นส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมรวมถึงการจัดการกับขยะพลาสติกที่เพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้เป็นการเปลี่ยนขยะพลาสติกประเภทพอลิสไตรีนไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อเพิ่มมูลค่าของขยะพลาสติก โดยมีวัตถุประสงค์คือ หาสภาวะในการแตกตัวของพลาสติกโพลิสไตรีนให้ได้เชื้อเพลิงเหลวที่ให้ผลผลิตมากที่สุดด้วยการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะขนาด 3 ลิตร และวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น (DGC) ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่ 400, 420, 450 และ 500 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาฟลูอิดคตะไลติกแครกกิงที่ใช้แล้ว ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จากผลการศึกษาที่ยังไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 420 เป็น 500 องศาเซลเซียส ร้อยละผลผลิตของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 78.70 เป็น 92.23 โดยน้ำหนัก ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลว (แนฟทา) เพิ่มขึ้นจาก 75.40 เป็น 84.50 โดยน้ำหนัก และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเดียวกัน ร้อยละผลผลิตของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 73.58 เป็น 91.63 โดยน้ำหนัก ร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลว (แนฟทา) เพิ่มขึ้นจาก 75.40 เป็น 84.00 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าสภาวะอุณหภูมิไพโรไลซิสที่สูงขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตของเหลวและการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น ผลการศึกษาจากการประเมินเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวพบว่า ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ร้อยละผลผลิตของเหลวสูงสุดคือ 93.15 โดยน้ำหนัก และจากการวิเคราะห์ DGC พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันส่วนใหญ่ประกอบด้วยแนฟทา ซึ่งทำให้เหมาะที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์เบนซิน หรือใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

ภาควิชาเคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

ณัฐชยา บุญเลิศ

สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง

ลายมือชื่อนิสิต

เถกิงเกียรติ ทาฟู

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

Dr. Thrapong Wittajant

## Abstract

**Title** Oil production from Polystyrene by pyrolysis in Semi-batch reaction

**By** Miss Natchaya Boonlerd

Mr. Takoengkiad Tafoo

**Advisor** Prof. Dr. Tharapong Vitidsant

Department of Chemical Technology, Faculty Science, Chulalongkorn University  
Academic year 2020

---

On a daily basis, most individuals utilize plastic packaging in single-use manner which causes environmental problems. Additionally, increased plastic management is another contributing cause. This research paper is the study of the conversion of polystyrene plastic waste to liquid fuel by the pyrolysis process to add a generous amount of value to such waste. The objective of this study is to determine the rupture conditions of polystyrene plastics to obtain liquid fuel by pyrolysis in a 3-liter semi-batch reactor and analyze the composition using Distillation Gas Chromatography (DGC). The variables in this study are different the temperature of 400, 420, 450 and 500 degrees Celsius and the catalyst of this experiment is spent Fluid Catalytic Cracking 1 percent by weight. The results have shown that when the temperature increases from 420 to 500 degrees Celsius, the liquid yield percentage increases from 78.70 to 92.23 wt%, liquid products dispersion (Naphtha) increases from 75.40 to 84.50 wt% and when the catalyst is used in the same temperature the liquid yield increases from 73.58 to 91.63 wt%, liquid product dispersion (Naphtha) increases from 75.40 to 84.00 wt%, indicating the increase in temperature of the pyrolysis process. As a result, there is an increased liquid yield and increased dispersion of liquid products. The results of the quantitative and qualitative evaluation shown that, at 450 degrees Celsius and the use of the catalyst, highest liquid yield of 93.15 wt% was achieved, and according to the DGC analysis, most oil products consisted of Naphtha. Which makes it suitable to be used as a gasoline engine fuel or to used as a feedstock in the petrochemical industry.

Department of Chemical Technology

Student's signature ณัชชญา บุญเลิศ

Field of study Ful technology

Student's signature เอกวิทย์เกียรติ ทานู

Advisor's signature 

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความกรุณาของศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่ให้ความร่วมมือช่วยเหลือและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงการวิจัยนี้ ผู้จัดทำโครงการจึงขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ผู้อำนวยการศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ที่ได้ให้การเอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทำโครงการวิจัย รวมถึงถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสสำหรับการต่อยอดในโครงการวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้จัดการสิริชัย รัตนวราหะ และนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องวิจัย รวมถึงช่างเทคนิคของศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและคำปรึกษาทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้จัดทำโครงการ

ณัฐชยา บุญเลิศ

เถกิงเกียรติ ทาฟู



## สารบัญ

| เรื่อง  | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย                               | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ                            | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ                               | ค    |
| สารบัญ  | ง    |
| สารบัญตาราง                                   | ฉ    |
| สารบัญภาพ                                     | ช    |
| บทที่ 1 บทนำ                                  | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ                    | 1    |
| 1.3 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย                    | 1    |
| 1.4 วิธีการดำเนินงาน                          | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                 | 2    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง         | 3    |
| 2.1 พอลิสไตรีน (Polystyrene)                  | 3    |
| 2.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)                     | 4    |
| 2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite)                        | 5    |
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                     | 7    |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย                    | 9    |
| 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์                      | 9    |

| เรื่อง   | หน้า |
|--|------|
| 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี   | 12   |
| 3.3 วิธีดำเนินการทดลอง   | 13   |
| 3.4 วิธีการใช้เครื่อง Gas chromatograph  | 16   |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน   | 18   |
| 4.1 ศึกษาสถานะในการแตกตัวของพลาสติกพอลิस्टาไร์น โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา                | 18   |
| 4.2 ศึกษาสถานะในการแตกตัวของพลาสติกพอลิस्टาไร์น โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา                   | 20   |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ  | 24   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง   | 24   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ   | 25   |
| บรรณานุกรม   | 26   |
| ภาคผนวก  | 28   |
| ภาคผนวก ก การคำนวณร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลว, ของแข็ง และแก๊ส<br>ของพอลิस्टาไร์น    | 28   |
| ภาคผนวก ข ตารางบันทึกข้อมูลการทดลองที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่สภาวะต่าง ๆ             | 29   |
| ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)<br>ของน้ำมันไพโรไลซิส | 37   |

## สารบัญตาราง

| ตาราง  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 4.1.1 แสดงผลร้อยละที่ได้ของผลิตภัณฑ์จากการไฟโรไลซิส                             | 18   |
| ตารางที่ 4.1.2 แสดงผลร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไฟโรไลซิส                | 19   |
| ตารางที่ 4.2.1 แสดงผลร้อยละที่ได้ของผลิตภัณฑ์จากการไฟโรไลซิส                             | 20   |
| ตารางที่ 4.2.2 แสดงผลร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไฟโรไลซิส                | 21   |
| ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 420 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC | 29   |
| ตารางที่ ข-2 ข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 420 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC    | 31   |
| ตารางที่ ข-3 ข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 450 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC | 33   |
| ตารางที่ ข-4 ข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 450 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC    | 34   |
| ตารางที่ ข-5 ข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 500 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC | 35   |
| ตารางที่ ข-6 ข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 500 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC    | 36   |

## สารบัญภาพ

| ภาพประกอบที่   | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนเป็นพอลิสไตรีน   | 3    |
| รูปที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสและการนำไปใช้ประโยชน์   | 4    |
| รูปที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์  | 6    |
| รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ขนาด 3 ลิตร (Semi-batch reactor)  | 9    |
| รูปที่ 3.2 เครื่อง Agilent 7890A Gas Chromatography  | 10   |
| รูปที่ 3.3 มุมมองด้านหน้าของ Agilent 7890A Gas Chromatography  | 11   |
| รูปที่ 3.4 มุมมองด้านหลังของ Agilent 7890A Gas Chromatography  | 11   |
| รูปที่ 3.5 GC Column DB-HT SIMDIS (AG145-1001)   | 12   |
| รูปที่ 3.6 ขวดยาкулท์ขนาดไม่เกิน 1x1 เซนติเมตร   | 13   |
| รูปที่ 3.7 ตัวเร่งปฏิกริยา Spent FCC   | 13   |
| รูปที่ 3.8 การบรรจุขวดยาкулท์และตัวเร่งปฏิกริยาในเครื่องปฏิกรณ์  | 14   |
| รูปที่ 3.9 การประกอบเครื่องปฏิกรณ์   | 14   |
| รูปที่ 3.10 น้ำมันจากการไพโรไลซิสขวดยาкулท์  | 15   |
| รูปที่ 3.11 กากน้ำมันที่เหลือจากการไพโรไลซิสขวดยาкулท์   | 15   |
| รูปที่ 4.1 แสดงผลของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา  | 22   |
| รูปที่ 4.2 แสดงผลของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยา   | 22   |
| รูปที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลว<br>โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา                       | 23   |
| รูปที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลว<br>โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกริยา FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก | 23   |
| รูปที่ ค-1 แสดงสภาวะ 420 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกริยา Spent FCC   | 37   |
| รูปที่ ค-2 แสดงสภาวะ 450 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกริยา Spent FCC   | 38   |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ ค-3 แสดงสภาวะ 500 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC                  | 39 |
| รูปที่ ค-4 แสดงสภาวะ 420 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก | 40 |
| รูปที่ ค-5 แสดงสภาวะ 450 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก | 41 |
| รูปที่ ค-6 แสดงสภาวะ 500 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก | 42 |

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

ในปัจจุบันโลกของเรามีปริมาณการใช้เชื้อเพลิงมากถึง 100.71 พันล้านบาร์เรลต่อวัน<sup>[1]</sup> การผลิตเชื้อเพลิงจากแหล่งปิโตรเลียมยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสิ่งที่สำคัญคือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่มีอย่างจำกัด ย่อมนำไปสู่ภาวะขาดแคลนเชื้อเพลิงในอนาคต การหาแหล่งพลังงานอื่น ๆ ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อนำมาใช้ทดแทนหรือลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาเหล่านี้ แต่เนื่องจากการบริโภคที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์ที่ใช้พลาสติก PS (Polystyrene) และปัญหาการกำจัดขยะที่เพิ่มขึ้นทำให้นักวิจัยหลายคนเปลี่ยนขยะเหล่านี้เป็นผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิง<sup>[2]</sup> ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ พลาสติก PS มีประโยชน์ด้านการเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่ทนต่อความร้อน โดยขึ้นรูปเป็นจาน, ชาม และช้อนพลาสติกที่มีน้ำหนักเบา ไม่เป็นอันตรายมากจนเกินไป แต่การใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ต้องใช้งานเพียงครั้งเดียวแล้วทิ้งเท่านั้น ไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ เพราะเป็นพลาสติกที่เสียรูปได้ง่าย<sup>[3]</sup> ขยะพลาสติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยจะต้องตัดสายโซ่ให้สั้นลงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนให้เป็นสายโซ่ขนาดสั้นด้วยความร้อน 400-500 องศาเซลเซียส ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษออกมาภายนอก ซึ่งผลผลิตที่ได้สามารถแบ่งออกเป็นแก๊ส น้ำมัน และของแข็ง โดยแก๊สและน้ำมันสามารถนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ โดยดีเซล (Diesel) มีองค์ประกอบคาร์บอน 15-20 ตัว และเบนซิน (Gasoline) มีองค์ประกอบคาร์บอน 6-15 ตัว<sup>[4]</sup>

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อหาภาวะในการแตกตัวของพลาสติกพอลิสไตรีน (Polystyrene) ให้ได้เชื้อเพลิงเหลวที่ให้ผลผลิตมากที่สุด

#### 1.3 ตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

1. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

## 1.4 วิธีการดำเนินงาน

### ก. แผนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมวัสดุพลาสติกพอลิสไตรีน ตัวเร่งปฏิกิริยา
3. เตรียมเครื่องมือและเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะสำหรับทำไพโรไลซิส (Pyrolysis) ระดับ Bench scale
4. ทดลองหาสภาวะตัวแปรที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยวิธีไพโรไลซิส (Pyrolysis) โดยมีตัวแปร ดังนี้
  - อุณหภูมิ 400, 420, 450 และ 500 องศาเซลเซียส
  - ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ปริมาณ 1 โดยน้ำหนัก
5. วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์
  - วิธี DGC (Distillation Gas Chromatography) สำหรับน้ำมันที่ได้จากกระบวนการ
6. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง
7. จัดทำเล่มรายงานวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพิ่มมูลค่าของขยะพลาสติกพอลิสไตรีนโดยการเปลี่ยนรูปพลาสติกให้อยู่ในรูปของน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 พอลิสไตรีน (Polystyrene)

พอลิสไตรีน (Polystyrene) คือเป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นมาจากสไตรีนมอนอเมอร์ ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากปิโตรเลียม เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก คือหลอมเป็นของเหลวได้ โดยที่อุณหภูมิห้องจะอยู่ในสถานะของแข็ง แต่จะหลอมละลายเมื่อได้รับความร้อนและกลับสู่สภาพเดิมเมื่อเย็นตัวลง พอลิสไตรีนนั้นมีราคาถูก ยืดหยุ่นได้จำกัด และง่ายต่อการขึ้นรูป [5]



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนเป็นพอลิสไตรีน [6]

##### 2.1.1 สมบัติของพอลิสไตรีน

พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแบบอสัณฐาน เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนโมโนเมอร์ ผลึกพอลิสไตรีนจะมีลักษณะใส ไม่มีสี มีความตึงแข็งสูง (High stiffness) เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี น้ำไม่ซึมผ่าน ทนต่อกรดอ่อนแต่ไม่สามารถทนทานต่อกรดซัลฟูริกเข้มข้นและตัวออกซิไดซ์ที่แข็งแรง เช่น กรดไนตริก น้ำคลอรีน น้ำโบรมีน และสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ สามารถรวมตัวในสารละลายอินทรีย์ โดยพอลิสไตรีนมีสมบัติต่างๆ ดังนี้ [7,8]

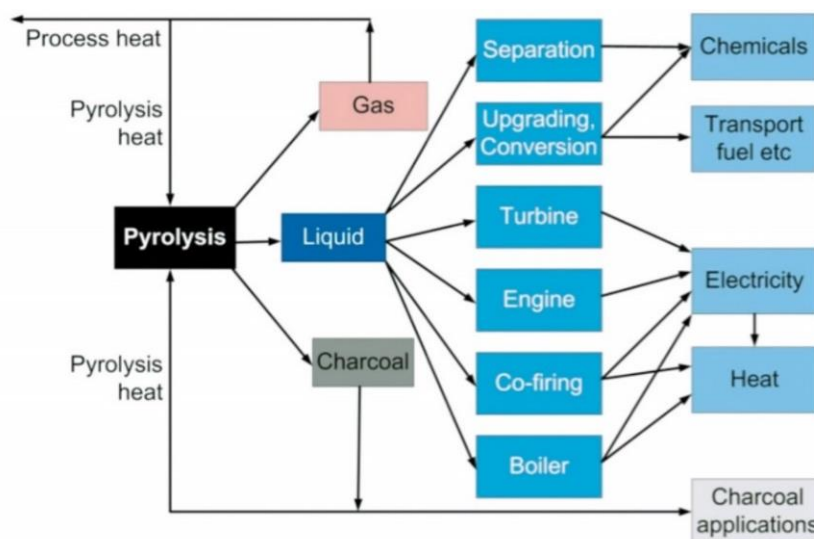
|                                   |                 |                    |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------|
| ความหนาแน่น (Density)             | 0.0376 – 0.0387 | lb/in <sup>3</sup> |
| ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) | 1.05            | g/cm <sup>3</sup>  |
| ความทนแรงดึง (Tensile strength)   | 7000            | psi                |
| ความยืดหยุ่น (Flexural strength)  | 12,000          | psi                |



|                                       |                   |          |
|---------------------------------------|-------------------|----------|
| ดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow index)     | 1.2 – 2.8         | g/10 min |
| จุดเริ่มอ่อนตัว (Vicat softening)     | 110               | °C       |
| จุดเริ่มการแตกตัว (Degradation point) | > 300             | °C       |
| มวลโมเลกุลเฉลี่ย (MW)                 | 200,000 – 300,000 |          |

## 2.2 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิส คือกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้ความร้อน ในสภาวะไร้อากาศ โดยเกิดการแตกของพันธะโมเลกุลในองค์ประกอบ จากสายโซ่พันธะเคมียาว กลายเป็นสายโซ่สั้นส่วนที่เป็นองค์ประกอบ คาร์บอนระเหยได้กลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิง บางส่วนที่ถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลว (น้ำมัน)<sup>[9]</sup>



รูปที่ 2.2 ผลลัพธ์จากกระบวนการไพโรไลซิสและการนำไปใช้ประโยชน์<sup>[10]</sup>

### 2.2.1 ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ผลลัพธ์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิส ได้แก่ ถ่าน น้ำมัน และแก๊สไม่กลั่นตัว สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย

1. ถ่าน มักถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้สำหรับผลิตความร้อนไอน้ำและไฟฟ้า ถ่านที่ผลิตได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องปฏิกรณ์ภายในกระบวนการ โดยค่าความร้อนถ่านมีค่า 15-30 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ถ่านที่เกิดจากการเผาไหม้

ถ่านสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ นอกจากนี้ถ่านยังมีคุณสมบัติที่ดีเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน

**2. น้ำมัน** จากกระบวนการไพโรไลซิส มีความหนืดสูง มีความเป็นกรดทำให้มีคุณสมบัติกัดกร่อน อุณหภูมิจุดติดสูง มีคุณสมบัติไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำมันจากปิโตรเลียม สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย วิธีการง่ายที่สุดคือ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) หรือกังหันแก๊ส (Gas turbine) สำหรับเผาไหม้เพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์

อย่างไรก็ดี การใช้น้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยตรงโดยไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ จะทำให้เกิดปัญหาหลาย ประการ เช่น ปัญหาการกัดกร่อนเนื่องจากคุณสมบัติด้านความเป็นกรด การจุดติดยากเนื่องจากปริมาณน้ำที่มีมากเกินไป นอกจากนี้ยังมีปริมาณเถ้าสูง ซึ่งทำให้เกิดการอุดตันในเครื่องยนต์ ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์ที่หลากหลายของน้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิส ส่งผลให้มีการนำน้ำมันที่ผลิตได้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ทดแทนเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม โดยผ่านการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน ในแต่ละประเภทการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันเป็นการทำให้น้ำมันกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่ามากขึ้น โดยการเปลี่ยนคุณสมบัติบางประการของน้ำมันให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม เช่น ลดปริมาณออกซิเจน ปรับปรุงคุณสมบัติด้านความเป็นกรด ลดความหนืด เป็นต้น

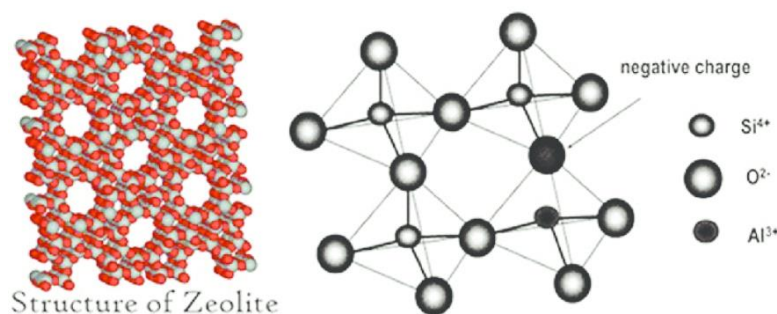
นอกจากนี้น้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิสสามารถนำไปผลิตสารเคมีต่างๆ โดยผ่านกระบวนการแยก เช่น กลีโกลเซียม เพื่อใช้ดักจับซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO<sub>x</sub>) ปύจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง คาร์บอนิลกับแอมโมเนีย ผลิตแอลดีไฮด์ เรซินและพลาสติก รวมถึงเมทานอล กรดอะซิติก และอะซิโตน

**3. แก๊สไม่กลั่นตัว** แก๊สส่วนใหญ่จากกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย CH<sub>4</sub> CO<sub>2</sub> CO และ H<sub>2</sub> โดยทั่วไปจะนำกลับมาเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนภายในกระบวนการ หรือส่งไปยังกระบวนการอื่นเพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้า

### 2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์เป็นโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของหน่วยทรงสี่หน้าของซิลิเกตและอะลูมิเนต จากการก่อตัวที่เป็นระเบียบดังกล่าวทำให้ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์เกิดมีรูพรุนและโพรงที่มีขนาดใหญ่เพียงพอกับการแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ นอกจากนี้ยังสามารถเกิดกระบวนการดูดซับและคายซับโมเลกุล

สารอินทรีย์จากขนาดเล็กจนถึงขนาด 1 นาโนเมตร พบว่ามากกว่าร้อยละ 90 จะเป็นการประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและและอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน<sup>[11]</sup>



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์<sup>[12]</sup>

### 2.3.1 ประโยชน์ของซีโอไลต์

1. ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิเลชัน (Alkylation) และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) เป็นต้น
2. สารดูดซับ (Sorption agent) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด
3. สารลดความกระด้าง (Water softener)
4. สารแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin)
5. ส่วนผสมในผงซักฟอก (Detergent builders) เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผสมทำผงซักฟอก คือมีค่าความจุ (Capacity) และจลนพลศาสตร์สูง (Kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคตไอออนเกิดขึ้นได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วย

### 2.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดซ์ (FCC catalyst)<sup>[13]</sup>

ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดซ์ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กที่มีความเป็นรูพรุนของออกไซด์ของซิลิกอนและอะลูมินัม โดยอะลูมินัมจะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งที่เป็นกรดบรอนสเตด (Bronsted) หรือลิวอิส (Lewis) ซึ่งตำแหน่งที่เป็นกรดเหล่านี้เป็นองค์ประกอบสำคัญที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาการคาร์โบเคชัน (Carbocation) ซึ่งเป็นสาเหตุของการแตกตัวของโมเลกุลน้ำมันที่หน่วยการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพฟลูอิดซ์ เมื่ออนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกพาไปกับไอของสารป้อน อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีสมบัติคล้ายของไหล (Fluidize) ทำให้สามารถ

ไหลเวียนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์และหน่วยฟื้นฟูสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 75 ไมครอน

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Williams, Elizabeth A. และ Williams, Paul T. <sup>[14]</sup> ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) 6 ชนิด ที่มีมากกว่า 2 ใน 3 ของการโพลีเมอร์ (polymer) ในยุโรปตะวันตก ได้แก่ high density polyethylene (HDPE), low density polyethylene (LDPE), polystyrene (PS), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET) และ polyvinyl chloride (PVC) โดยการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) คงที่ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อัตราความร้อนที่ใช้คือ 25 องศาเซลเซียสต่อนาที ถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 700 องศาเซลเซียส จากนั้นพลาสติกทั้ง 6 ชนิด ถูกผสมเข้าด้วยกันเพื่อจำลองเป็นเศษพลาสติกของขยะมูลฝอยชุมชนที่พบในยุโรป หลังจากตรวจสอบผลของการผสมที่มีต่อผลของการผลิตและองค์ประกอบ พบว่าโพลีเมอร์ที่ศึกษาไม่ได้ทำปฏิกิริยาอย่างอิสระ แต่สังเกตเห็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวอย่าง ผลผลิตที่ได้จากการผสมพลาสติกที่ 700 องศาเซลเซียส คือแก๊ส 9.63% น้ำมัน 75.11% ถ่าน 2.87% และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 2.31% ซึ่งแก๊สที่พบได้แก่ H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, CO<sub>2</sub> และ CO องค์ประกอบของน้ำมันวิเคราะห์โดยใช้ Fourier Transform infra-red spectrometry และ size exclusion chromatography จากการวิเคราะห์พบว่าส่วนใหญ่มีสารประกอบอะลิฟาติก (Aliphatic) ที่มีสารประกอบอะโรมาติก (Aromatic) ในปริมาณเล็กน้อย

Nabeel Ahmada,b , Faisal Abnisaa,c และ Wan Mohd Ashri Wan Daud <sup>[15]</sup> การศึกษานี้ได้นำยางธรรมชาติ (NR) ไปทำให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้เทคนิคไฮดรอลิกไพโรไลซิส (Hydrous pyrolysis technique) การศึกษาได้ดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่อุณหภูมิต่างกัน (300 – 400 °C) โดยมีอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อยางธรรมชาติที่แตกต่างกัน (1:1 – 5:1) และเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างกัน (15 – 75 นาที) จากนั้นจึงประเมินผลของพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันต่อผลิตภัณฑ์ของเหลวในแง่ของปริมาณและคุณภาพ ผลการวิจัยพบว่าร้อยละผลผลิตของเหลวสูงสุดคือ 76 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 375 °C, อัตราส่วน H<sub>2</sub>O/มวลสาร 3:1 และเวลา 30 นาที ในบรรดาพารามิเตอร์พบว่าอุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นผลในเชิงบวกต่อคุณภาพและปริมาณของน้ำมันเหลว ผลการศึกษาลักษณะเฉพาะพบว่าน้ำมันมีความหนาแน่นของพลังงานสูงมีปริมาณออกซิเจนและกำมะถันต่ำและไม่เป็นกรด การวิเคราะห์ GC – MS แสดงให้เห็นว่าน้ำมันที่ได้นั้นมีองค์ประกอบอัลคีน, อะโรมาติกส์และอัลคิล จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าน้ำมันจาก NR มีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงมากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันที่ได้จากเศษยาง นอกจากนี้การผลิต

น้ำมันจากไฮดรอสโฟโรไลซิสของ NR ในมาเลเซียสามารถเพิ่มศักยภาพด้านพลังงานได้ประมาณ 15 PJ/ปี หรือเทียบเท่ากับน้ำมัน 2.5 ล้านบาร์เรลต่อปี

Ki-Bum Parka, Yong-Seong Jeongb, Begum Guzelciftcia และ Joo-Sik Kim <sup>[16]</sup> ศึกษาการไพโรไลซิสของพอลิสไตรีนโดยที่ดำเนินการในกระบวนการสองขั้นตอนต่อเนื่องที่มีเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูและเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไธด์เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม วัตถุประสงค์หลักคือการผลิตน้ำมันที่อุดมไปด้วยเบนซีน, โทลูอิน, เอทิลเบนซีนและไซลีนแทนน้ำมันไพโรไลซิสพอลิสไตรีนทั่วไปซึ่งมีมอนอเมอร์สไตรีนในปริมาณสูงและมีเสถียรภาพในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำ มีการตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน (ในเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสอง) และชนิดของตัวกลางฟลูอิดไธด์ที่มีต่อการกระจายและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ผลผลิตสูงสุดของเบนซีน, โทลูอิน, เอทิลเบนซีนและไซลีนอยู่ที่อุณหภูมิ 780 °C ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์ น้ำมันและสไตรีนให้ร้อยละผลผลิตที่ 780 °C เท่ากับ 86 และ 26 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในการประเมินคุณสมบัติเชื้อเพลิงของน้ำมันไพโรไลซิสได้ทำการตรวจสอบค่าความร้อน, API gravity, ความหนืด, ความหนาแน่น, ปริมาณเถ้า, จุดไหลเท, จุดวาบไฟและ pH ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าน้ำมันไพโรไลซิสเป็นแหล่งที่ดีของเบนซีน, โทลูอิน, เอทิลเบนซีนและไซลีน และสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันเบนซินหรือน้ำมันดีเซลได้เมื่อผสมกับน้ำมันที่มีปริมาณอะโรมาติกต่ำ

## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ (Semi-batch reactor) รูปทรงกระบอกแนวนอน ขนาด 3 ลิตร ภายในเครื่องปฏิกรณ์มีฮีตเตอร์ (Heater) ให้ความร้อน 3 ตัว มีแผงควบคุมและชุดอุปกรณ์สำหรับควบแน่นไอน้ำมัน สามารถทำการทดลองภายใต้สภาวะไร้อากาศที่ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส มีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) 2 เส้น ทางด้านบนสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์และทางแก๊สออกระหว่างทำการทดลอง ดังรูป 3.1



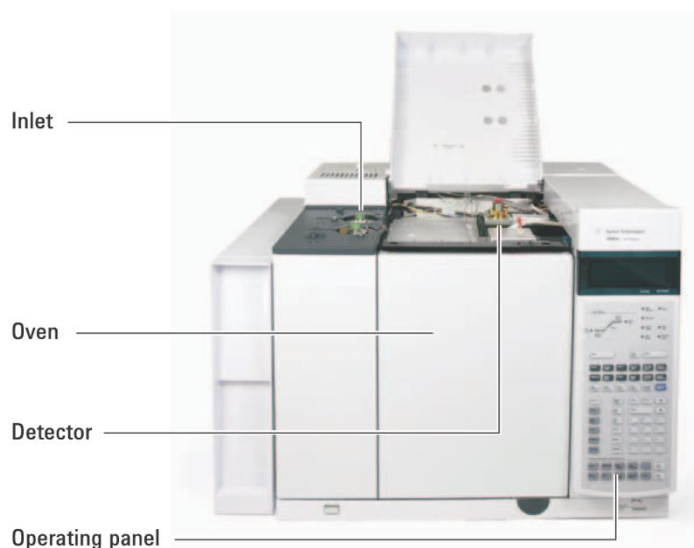
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ ขนาด 3 ลิตร (Semi-batch reactor)

### 3.1.2 เครื่อง Agilent 7890A Gas Chromatography

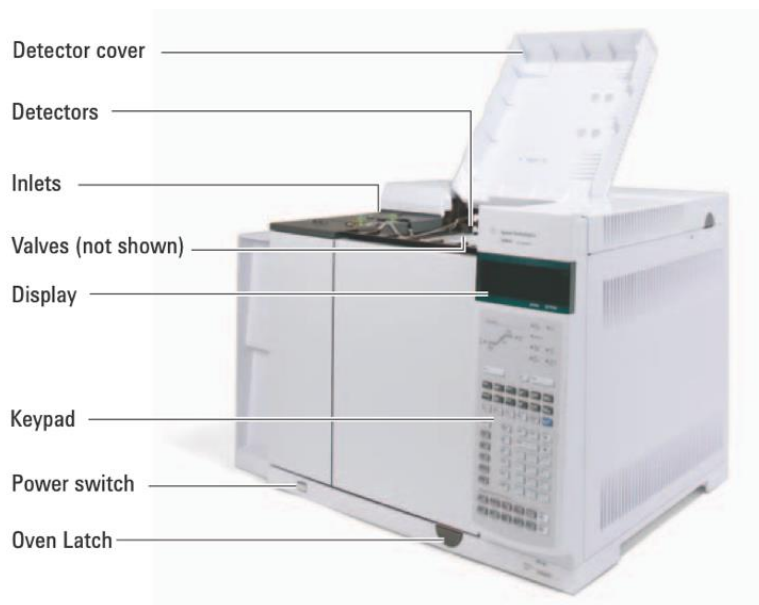
Chromatography คือ การแยกส่วนผสมของสารประกอบออกเป็นส่วนประกอบแต่ละส่วน มี 3 ขั้นตอนหลักที่เกี่ยวข้องกับการแยกและระบุส่วนประกอบของส่วนผสมโดยใช้ GC

1. การฉีดตัวอย่างเข้าไปใน GC (เกิดขึ้นที่ทางเข้า)
2. แยกตัวอย่างออกเป็นส่วนประกอบแต่ละส่วน (เกิดขึ้นภายในคอลัมน์ในเตาอบ)
3. ตรวจหาสารประกอบที่อยู่ในตัวอย่าง (เกิดขึ้นในเครื่องตรวจจับ)

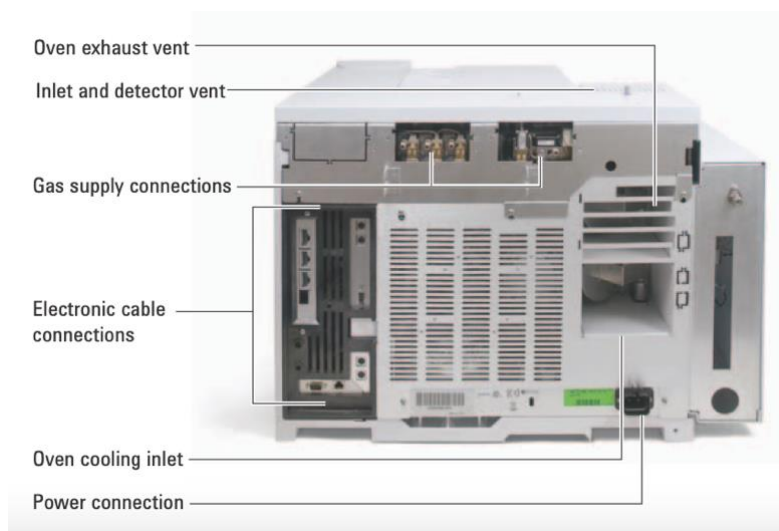
ในระหว่างกระบวนการนี้ ข้อความสถานะจาก Agilent 7890A GC จะปรากฏขึ้นและผู้ใช้งานสามารถเปลี่ยนแปลงการตั้งค่าพารามิเตอร์ได้ผ่านแผงควบคุมการทำงาน



รูปที่ 3.2 เครื่อง Agilent 7890A Gas Chromatography



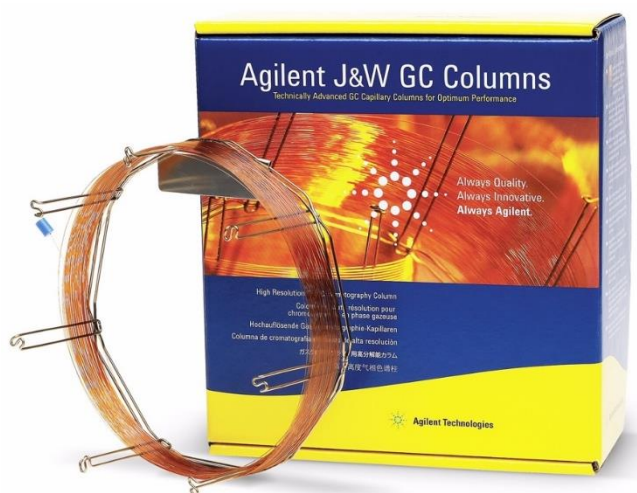
รูปที่ 3.3 มุมมองด้านหน้าของ Agilent 7890A Gas Chromatography



รูปที่ 3.4 มุมมองด้านหลังของ Agilent 7890A Gas Chromatography



### 3.1.3 GC Column DB-HT SIMDIS 5 m, 0.53 mm, 0.15 $\mu\text{m}$ (AG145-1001)



รูปที่ 3.5 GC Column DB-HT SIMDIS (AG145-1001)

- 3.1.4 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
- 3.1.5 เครื่องซังดิจิตอล ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.1.6 ขวดโหลแก้ว + ฝา
- 3.1.7 ถาดอะลูมิเนียม
- 3.1.8 บีเกอร์
- 3.1.9 กรรไกร
- 3.1.10 ถุงมือ

## 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.2.1 Polystyrene plastic (ขวดยาคุลท์)
- 3.2.2 Spent Fluid catalytic cracking catalyst
- 3.2.3 Nitrogen gas

### 3.3 วิธีดำเนินการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมวัสดุ

1. ตัดขวดยาคูลท์เป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดไม่เกิน 1x1 เซนติเมตร



รูปที่ 3.6 ขวดยาคูลท์ขนาดไม่เกิน 1x1 เซนติเมตร

2. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 3.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC

#### 3.3.2 กำหนดปริมาณวัสดุและสภาวะในการทดลอง

1. พลาสติก Polystyrene (ขวดยาคูลท์) ปริมาณ 300 กรัม
2. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 400, 420, 450 และ 500 องศาเซลเซียส
3. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 ml/min
4. ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้ว

### 3.3.3 ขั้นตอนการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักขวดยาคุลท์ตามปริมาณที่กำหนดและบันทึกน้ำหนักก่อนทำการทดลอง
2. ชั่งน้ำหนักขวดโหลแก้วสำหรับใส่น้ำมันที่ได้จากการทดลองและจดบันทึกน้ำหนักขวด
3. บรรจุขวดยาคุลท์และตัวเร่งปฏิกิริยาลงในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.8 การบรรจุขวดยาคุลท์และตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์

4. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์ และเปิดแผงควบคุมพร้อมทั้งกำหนดอุณหภูมิที่ทำการทดลอง



รูปที่ 3.9 การประกอบเครื่องปฏิกรณ์

5. เปิดถังไนโตรเจนและปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนตามที่กำหนด
6. ตรวจสอบเครื่องปฏิกรณ์ก่อนทำการทดลองว่าเกิดการรั่วไหลและอุดตันไหม
  - การรั่วไหล ตรวจสอบโดยนำน้ำสบู่ฉีดตามข้อต่อที่มีการไขหรือประกอบ
  - การอุดตัน ตรวจสอบจากการไหลของแก๊สไนโตรเจน โดยในขวดรูปชมพู่ที่ใส่น้ำไว้  
ต้องมีฟองขึ้นตลอดเวลา
7. หลังจากตรวจสอบเครื่องปฏิกรณ์แล้ว ทำการเปิดเครื่องเพื่อทำการทดลอง
8. เมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 250 องศาเซลเซียส ทำการเปิดไบวาล์ว
9. เมื่ออุณหภูมิแก๊สขาออกประมาณ 100 องศาเซลเซียส บันทึกอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ อุณหภูมิแก๊สขาออก และปริมาณน้ำมัน
10. บันทึกทั้ง 3 ค่า ทุก ๆ 5 นาที จนกว่าน้ำมันหยุดไหล หรือสังเกตจากอุณหภูมิแก๊สขาออก ประมาณ 50 องศาเซลเซียส
11. หลังจากเสร็จการทดลอง นำน้ำมันและกากของแข็งที่เหลือจากทดลองไปชั่งน้ำหนักและคำนวณ %yield



รูปที่ 10 น้ำมันจากการไพโรไลซิสขวดยาคุลท์



รูปที่ 11 กากน้ำมันที่เหลือจากการไพโรไลซิสขวดยาคุลท์

12. นำน้ำมันที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่อง Gas Chromatograph โดยใช้เทคนิค Distillation Gas Chromatography (DGC)

### 3.4 วิธีการใช้เครื่อง Gas Chromatograph

#### 3.4.1 วิธีเปิดเครื่อง Agilent 7890A Gas Chromatography

1. ตรวจสอบแรงดันของแหล่งแก๊ส สำหรับแรงดันที่จำเป็นดูรายการตรวจสอบการเตรียมไซต์ Agilent GC, MSD และ ALS
2. เปิด Carrier และ Detector Gases ที่แหล่งกำเนิดและเปิด Local Shutoff Valve
3. เปิด Coolant ที่แหล่งกำเนิด (หากใช้งาน)
4. เปิดเครื่อง GC และรอให้เครื่องเปิดสำเร็จ จะแสดงผลบนหน้าจอ
5. หากนำออก ให้ติดตั้งคอลัมน์
6. ตรวจสอบส่วนของคอลัมน์ (Column) ไม่มีการรั่วไหล
7. เลือกวิธีการวิเคราะห์
8. รอให้เครื่อง Detector เสถียรก่อนที่จะรับข้อมูล

#### 3.4.2 วิธีป้อนวิธีการวิเคราะห์จาก Keypad

1. กด [Load][Seq.]
2. ป้อนหมายเลข Sequence ที่ต้องการ Load
3. กด [On/Yes] เพื่อป้อน Sequence หรือกด [Off/No] เพื่อยกเลิกการป้อน

### 3.4.3 วิธีเริ่มวิเคราะห์แบบ Sequence

1. ป้อน Sequence (ดูที่ “To load a sequence”.)
2. กด [Seq. Control]
3. ตรวจสอบสถานะของ Sequence:
  - Running – Sequence กำลังทำงาน
  - Ready/Wait – เครื่องมือไม่พร้อม (เนื่องจากอุณหภูมิของเตาอบ, อุณหภูมิในการปรับสมดุล)
  - Paused – Sequence หยุดชั่วคราว
  - Stopped - ไปยังขั้นตอนที่ 4
  - Aborted – Sequence หยุดลงโดยไม่ต้องรอให้การทำงานสิ้นสุด (ดูที่ “Aborting a sequence”)
  - No sequence – Sequence ปิดอยู่หรือไม่ได้กำหนดไว้
4. เลื่อนไปที่ Strat Sequence และกด [Enter] เพื่อเปลี่ยนสถานะเป็น กำลังทำงาน ไฟ LED จะสว่างและติดค้างไว้จนกว่า Sequence จะเสร็จสมบูรณ์ Sequence จะคงยังทำงานต่อไปจนกว่าจะดำเนินการตามลำดับทั้งหมดหรือถูกยกเลิก

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 ศึกษาภาวะในการแตกตัวของพลาสติกพอลิสไตรีน โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC

- ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พลาสติกพอลิสไตรีนไม่เกิดการแตกตัวออกเป็นผลิตภัณฑ์หรือน้ำมัน เนื่องจากพลังงานความร้อนไม่เพียงพอที่จะสลายโมเลกุลโซ่ยาวของพอลิสไตรีนให้เป็นโมเลกุลโซ่สั้น ๆ เช่น ของเหลว หรือ แก๊ส แต่เกิดเป็น wax เกิดขึ้น การศึกษาที่สภาวะนี้จึงไม่สามารถดำเนินการต่อได้ ส่งผลให้ต้องมีการปรับช่วงอุณหภูมิในการดำเนินการเพิ่มจาก 400 °C เป็น 420 °C

##### ตารางที่ 4.1.1 แสดงผลร้อยละผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแต่ละอุณหภูมิ

| อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | ร้อยละผลิตภัณฑ์ |         |      |
|----------------------------|-----------------|---------|------|
|                            | ของเหลว         | ของแข็ง | แก๊ส |
| 420                        | 78.70           | 14.80   | 6.50 |
| 450                        | 90.52           | 5.12    | 4.36 |
| 500                        | 92.23           | 4.73    | 3.04 |

จากตารางที่ 4.1.1 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 420 °C เป็น 500 °C ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 78.70 เป็น 92.23 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าสภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แตกสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสายยาวเป็นสายสั้น ๆ และส่งเสริมปฏิกิริยาการระเหยซึ่งช่วยเพิ่มร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว แต่ในสภาวะอุณหภูมิที่ลดลงร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของแข็งจะมีปริมาณสูงขึ้นประมาณ 14.80 โดยน้ำหนัก ที่ 420 °C เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ให้มาไม่เพียงพอที่จะสลายโมเลกุลโซ่ยาวของพอลิสไตรีนให้เป็นโมเลกุลของโซ่ที่สั้นกว่า เช่น ของเหลว หรือ ก๊าซ ดังนั้นสภาวะที่ให้ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ คือ 500 องศาเซลเซียส โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.1.2 แสดงผลร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสแต่ละอุณหภูมิ

| อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | ร้อยละการกระจายของผลิตภัณฑ์ของเหลว |         |       |           |
|----------------------------|------------------------------------|---------|-------|-----------|
|                            | แนฟทา                              | เคโรซีน | ดีเซล | กากน้ำมัน |
| 420                        | 84.50                              | 0.80    | 14.60 | 0.10      |
| 450                        | 76.80                              | 1.00    | 18.60 | 3.60      |
| 500                        | 75.40                              | 0.80    | 19.10 | 4.70      |

จากตารางที่ 4.1.2 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการไพโรไลซิส ร้อยละการกระจายของเคโรซีนไม่แตกต่างกันมาก ส่วนร้อยละการกระจายของแนฟทาจะลดลง แต่ในทางกลับกันร้อยละการกระจายของดีเซลและกากน้ำมันจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีองค์ประกอบของแนฟทาเป็นส่วนใหญ่



#### 4.2 ศึกษาสถานะในการแตกตัวของพลาสติกพอลิโอสไตรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.2.1 แสดงผลร้อยละผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแต่ละอุณหภูมิ

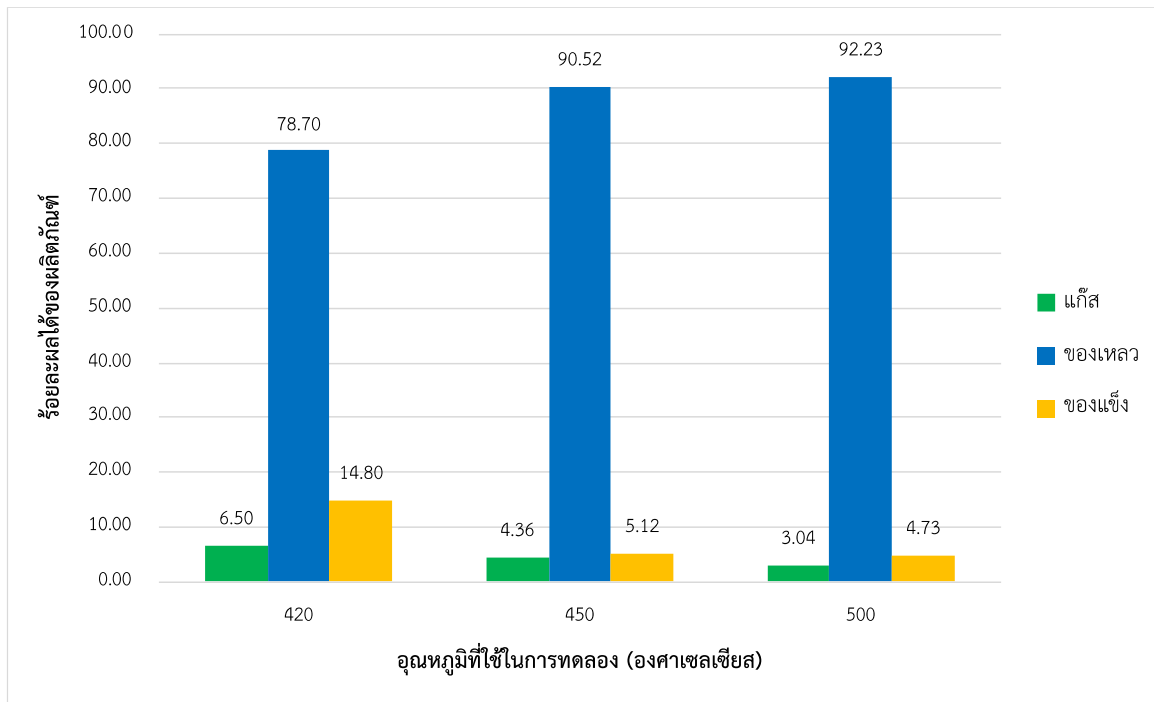
| อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | ร้อยละผลิตภัณฑ์ |         |       |
|----------------------------|-----------------|---------|-------|
|                            | ของเหลว         | ของแข็ง | แก๊ส  |
| 420                        | 73.58           | 10.12   | 16.30 |
| 450                        | 93.15           | 5.40    | 1.45  |
| 500                        | 91.63           | 3.20    | 5.17  |

จากตารางที่ 4.2.1 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 420 °C เป็น 500 °C ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 73.58 เป็น 91.63 โดยน้ำหนัก แต่หากเทียบอุณหภูมิจาก 450 °C เป็น 500 °C ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงจาก 93.15 เป็น 91.63 โดยน้ำหนัก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ประกอบด้วย y-zeolite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยากรดทำหน้าที่แตกสายโซ่พอลิเมอร์ การแตกสายโซ่พอลิเมอร์จึงแตกง่ายขึ้น ส่งผลให้เกิดการแตกตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันหรือการแตกตัวขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) ทำให้ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มสูงขึ้นจาก 1.45 เป็น 5.17 โดยน้ำหนัก แต่ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงจาก 5.40 เป็น 3.20 โดยน้ำหนัก ดังนั้นสถานะที่ให้ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ คือ 450 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

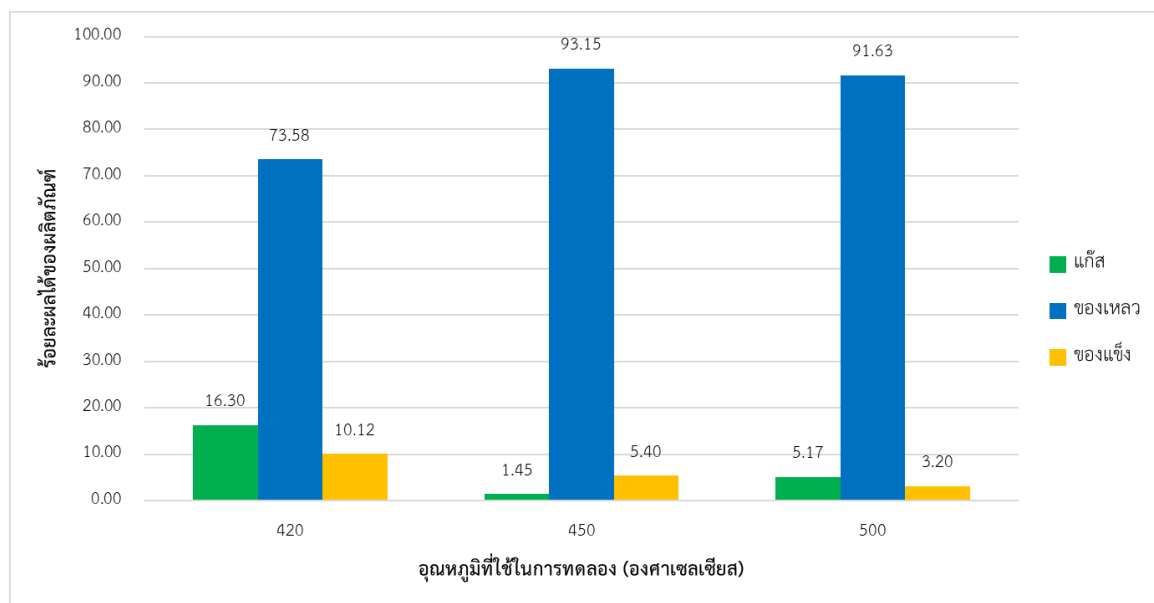
ตารางที่ 4.2.2 แสดงผลร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิส

| อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | ร้อยละการกระจายของผลิตภัณฑ์ของเหลว |         |       |           |
|----------------------------|------------------------------------|---------|-------|-----------|
|                            | แนฟทา                              | เคโรซีน | ดีเซล | กากน้ำมัน |
| 420                        | 84.00                              | 0.90    | 14.70 | 0.40      |
| 450                        | 75.90                              | 0.90    | 19.20 | 4.00      |
| 500                        | 75.40                              | 0.70    | 20.20 | 3.70      |

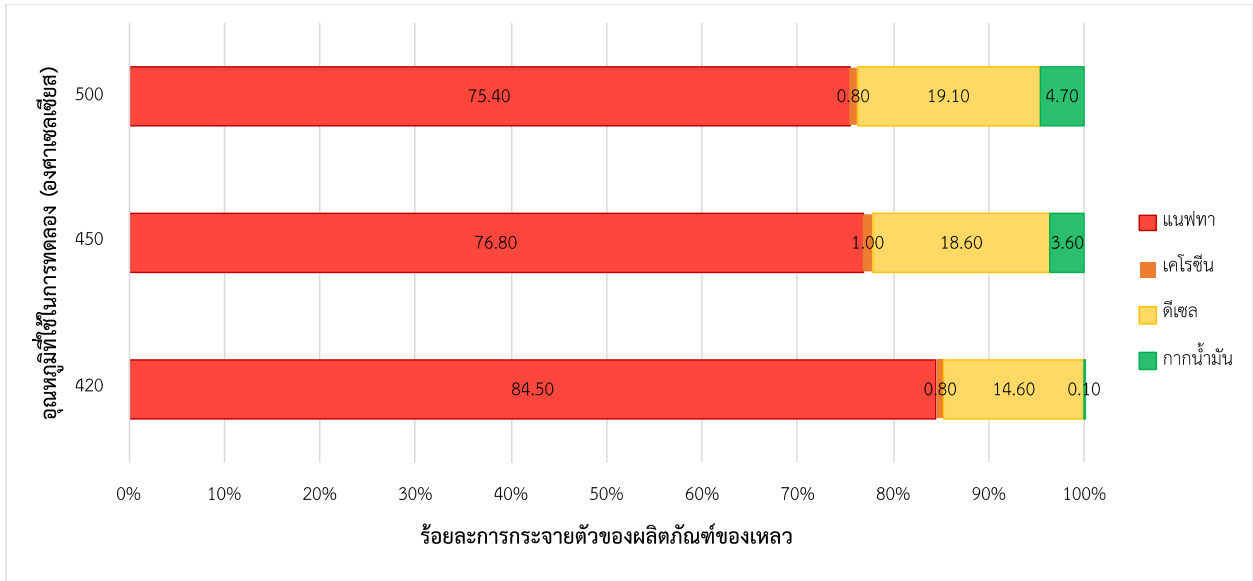
จากตารางที่ 4.2.2 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการไพโรไลซิส ร้อยละการกระจายของเคโรซีนไม่แตกต่างกันมาก ส่วนร้อยละการกระจายของแนฟทาจะลดลง แต่ในทางกลับกันร้อยละการกระจายของดีเซลและกากน้ำมันจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีองค์ประกอบของแนฟทาเป็นส่วนใหญ่ เช่นเดียวกับการศึกษาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



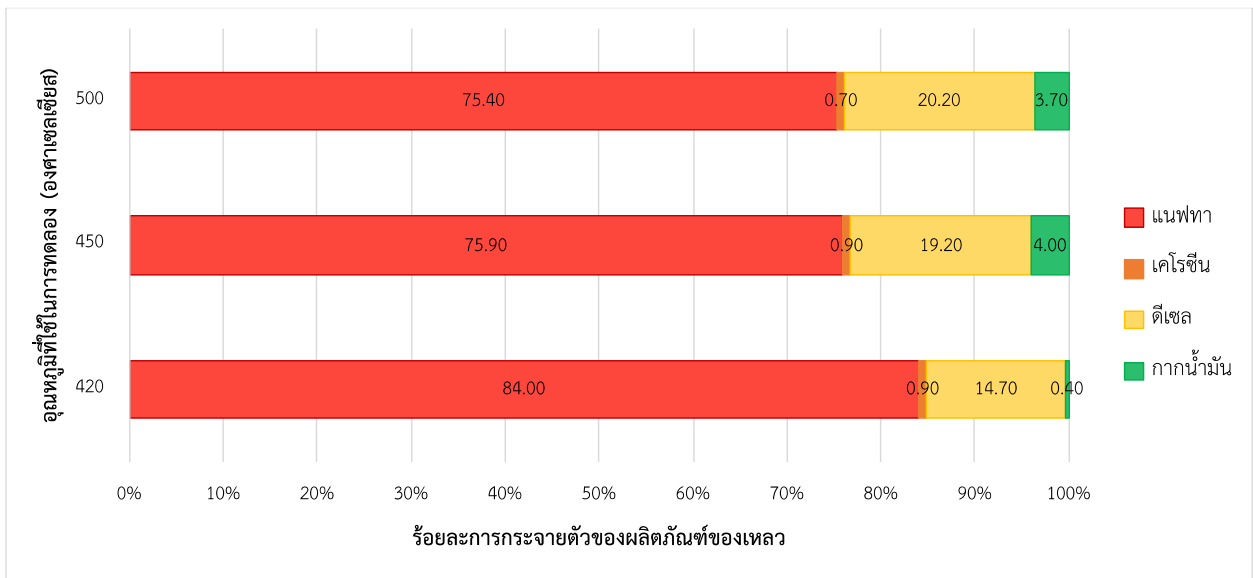
รูปที่ 4.1 แสดงผลของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.2 แสดงผลของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองต่อร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเปลี่ยนขยะพลาสติกประเภทพอลิสไตรีนไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อเพิ่มมูลค่าของขยะพลาสติก โดยมีวัตถุประสงค์คือ หาสภาวะในการแตกตัวของพลาสติกพอลิสไตรีนให้ได้เชื้อเพลิงเหลวที่ให้ผลผลิตมากที่สุดด้วยการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะขนาด 3 ลิตร ดังนั้นสภาวะที่ดีที่สุดในการแตกตัวของพอลิสไตรีนที่ให้ผลผลิตเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุดคือ 450 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าเท่ากับ 93.15 โดยน้ำหนัก

##### 5.1.1 ศึกษาสภาวะในการแตกตัวของพลาสติกพอลิสไตรีน โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากผลการทดลอง พบว่าการศึกษาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อสภาวะอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แตกสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสายยาวเป็นสายสั้น ๆ และส่งเสริมปฏิกิริยาการระเหยซึ่งช่วยเพิ่มร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ดังนั้นสภาวะที่ให้ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ คือ 500 องศาเซลเซียส โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าเท่ากับ 92.23 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้การวิเคราะห์ผลเชิงคุณภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือน้ำมันส่วนใหญ่ประกอบด้วย แนฟทา ทำให้น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสนั้นเหมาะที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์เบนซิน หรือใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

##### 5.1.2 ศึกษาสภาวะในการแตกตัวของพลาสติกพอลิสไตรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลอง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC มีผลต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC จะช่วยให้พอลิเมอร์แตกสายโซ่ง่ายขึ้น ดังนั้นหากสภาวะอุณหภูมิมีค่าสูงเกินไป จะส่งผลให้เกิดการแตกตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันหรือการแตกตัวขั้นทุติยภูมิ (Secondary cracking) ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สเกิดขึ้น ทำให้สภาวะที่ให้ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะ คือ 450 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าเท่ากับ 93.15 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้การ

วิเคราะห์ผลเชิงคุณภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ พบว่าองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือน้ำมันส่วนใหญ่ประกอบด้วย แนฟทา เช่นเดียวกับการศึกษาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการศึกษาตัวแปรเกี่ยวกับตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ควรเพิ่มปริมาณร้อยละในการดำเนินงาน เพื่อให้เห็นผลความแตกต่างของร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว
2. ในการศึกษางานวิจัยนี้ควรเก็บผลิตภัณฑ์แก๊สไว้ตรวจสอบร้อยละผลผลิตเพื่อให้ผลที่ได้แม่นยำมากขึ้น
3. ก่อนเริ่มทำการทดลองครั้งใหม่ควรทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์และไบกวนให้สะอาดไม่มีคราบจากน้ำมันเกาะติดหรือหลงเหลืออยู่เลย เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อผลการทดลองในครั้งถัดไป
4. ควรมีเครื่องมือในการเตรียมวัตถุดิบที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากพลาสติกพอลิโอสไทรีนมีความเหนียวยากต่อการตัดให้เป็นขนาดตามที่ต้องการ อาจทำให้ได้รับบาดเจ็บต่อผู้ดำเนินงาน
5. เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งกะที่ใช้ในงานวิจัยนี้เหมาะแก่การป้อนวัตถุดิบที่เป็นของเหลวมากกว่าของแข็ง จึงมีความลำบากในการป้อนวัตถุดิบของแข็งสำหรับเริ่มทำการทดลอง

## บรรณานุกรม

- [1] U.S. Energy Information Administration. (2563). **Short-Term Energy Outlook**. [Online]. Available from: [https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/global\\_oil.php](https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/global_oil.php)
- [2] สำนักงานวิชาการ สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร. (2559). **ขยะพลาสติก:ภัยใกล้ตัว**. [Online]. Available from: [https://library2.parliament.go.th/ejournal/content\\_af/2559/feb2559-7.pdf](https://library2.parliament.go.th/ejournal/content_af/2559/feb2559-7.pdf)
- [3] Watana Bhand Packaging System Co. (2559). **โพลีสไตรีน(PS) คืออะไร**. [Online]. Available from: <https://www.watanabhand.co.th/โพลีสไตรีน/>
- [4] สำนักงานวิชาการ สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร. (2559). **น้ำมันเชื้อเพลิงผลผลิตจากขยะพลาสติก**. [Online]. Available from: [https://library2.parliament.go.th/ejournal/content\\_af/2559/oct2559-1.pdf](https://library2.parliament.go.th/ejournal/content_af/2559/oct2559-1.pdf)
- [5] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2563). **พอลีสไตรีน**. [Online]. Available from: <https://th.wikipedia.org>
- [6] Kumar Sarang. (2557). **ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนเป็นพอลีสไตรีน**. [Online]. Available from: <https://www.meritnation.com>
- [7] Mackey G.A., Westphal R.C., Plastic Recycling. New York: Hanser Publish, 1992.
- [8] Feldman D., Barbalata A. Synthetic polymer. London: Chapman & Hall, 1996.
- [9] Arthur Konze. (2004). **กระบวนการผลิต Pyrolysis**. [Online]. Available from: <http://www.neutron.rmutphysics.com>
- [10] กุลนันท์ วิจารณ์กร และดร.อมรชัย อารณวิธานพ. (2558). **ไพโรไลซิส (Pyrolysis)**. Available from: [http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn241\\_p61-64.pdf](http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn241_p61-64.pdf)
- [11] ศิริสุข ลอยหา. (2541). **ซีโอไลต์และเทคโนโลยีซีโอไลต์**. วารสารวิทยาศาสตร์ มข., 41(1), 1. Available from: <https://pubhtml5.com>
- [12] Afrodita Zendelska. (2559). **โครงสร้างของซีโอไลต์**. [Online]. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-zeolite\\_fig1\\_307437555](https://www.researchgate.net/figure/Structure-of-zeolite_fig1_307437555)
- [13] นายเอกวิทย์ เพ็ชรอนุรักษ์. (2544). **การศึกษาการเกิดไค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาในสภาพพลูอิดซ์ของนอร์มัลเฮกซะเดเคน** (วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต). สงขลา. มหาลัยสงขลานครินทร์. Available from: <https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2599/5/211237.pdf>
- [14] Elizabeth A. Williams, Paul T. Williams. The pyrolysis of individual plastics and a plastic mixture in a fixed bed reactor. Journal of Chemical Technology & Biotechnology 1999;70:9-20.
- [15] Nabeel Ahmada,b , Faisal Abnisaa,c, Wan Mohd Ashri Wan Daud. Liquefaction of natural rubber to liquid fuels via hydrous pyrolysis. Fuel 2018;218:227-235.

- [16] Ki-Bum Parka, Yong-Seong Jeongb, Begum Guzelciftcia, Joo-Sik Kim. Two-stage pyrolysis of polystyrene: Pyrolysis oil as a source of fuels or benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes. *Applied Energy* 2020;259:114240.
- [17] นางสาวอราดา วงศ์สุภลักษณ์. (2547). การแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด (วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. Available from: <https://cuir.car.chula.ac.th/xmlui/bitstream/handle/123456789/3415/Arada.pdf?sequence=3&isAllowed=y>



### ภาคผนวก ก

การคำนวณร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลว, ของแข็ง และแก๊ส ของพอลิสไตรีน

#### 1. การคำนวณร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์

โดยการคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส แสดงดังสมการ 1 – 3 ต่อไปนี้

- ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของเหลว (%Liquid yield)

$$\text{Yield of Oil} = \frac{\text{weight of Oil}}{\text{weight of PS}} \times 100\% \quad (1)$$

- ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (%Solid yield)

$$\text{Yield of Solid} = \frac{\text{weight of Solid}}{\text{weight of PS}} \times 100\% \quad (2)$$

- ร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์แก๊ส (%Gas yield)

$$\text{Yield of Gas} = 100\% - (\text{Yield of Oil} + \text{Yield of Solid}) \quad (3)$$

## ภาคผนวก ข

## ตารางบันทึกข้อมูลการทดลองที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสที่สภาวะต่าง ๆ

ตารางที่ ข-1 บันทึกข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 420 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC

- พลาสติกพอลิไธรีน 300.05 กรัม และ อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร/นาที

| Time<br>(min) | T <sub>Gas out</sub><br>(°C) | T <sub>Reactor</sub><br>(°C) | Volume<br>(mL) | Time<br>(min) | T <sub>Gas out</sub><br>(°C) | T <sub>Reactor</sub><br>(°C) | Volume<br>(mL) |
|---------------|------------------------------|------------------------------|----------------|---------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| 0             | 32                           | 28                           | -              | 130           | 148                          | 372                          | 14.0           |
| 5             | 32                           | 30                           | -              | 135           | 147                          | 374                          | 14.0           |
| 10            | 32                           | 42                           | -              | 140           | 147                          | 378                          | 13.0           |
| 15            | 33                           | 62                           | -              | 145           | 144                          | 381                          | 13.0           |
| 20            | 34                           | 95                           | -              | 150           | 144                          | 382                          | 11.0           |
| 25            | 35                           | 137                          | -              | 155           | 143                          | 383                          | 12.0           |
| 30            | 35                           | 192                          | -              | 160           | 141                          | 384                          | 11.0           |
| 35            | 36                           | 242                          | -              | 165           | 140                          | 385                          | 10.0           |
| 40            | 37                           | 277                          | -              | 170           | 138                          | 387                          | 8.2            |
| 45            | 38                           | 297                          | -              | 175           | 134                          | 387                          | 7.4            |
| 50            | 38                           | 319                          | -              | 180           | 129                          | 388                          | 6.2            |
| 55            | 39                           | 340                          | -              | 185           | 124                          | 389                          | 5.0            |
| 60            | 40                           | 354                          | -              | 190           | 120                          | 391                          | 4.0            |
| 65            | 43                           | 376                          | -              | 195           | 115                          | 392                          | 3.6            |

|     |     |     |      |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 70  | 60  | 375 | -    | 200 | 111 | 393 | 2.8 |
| 75  | 88  | 369 | 3.6  | 205 | 106 | 394 | 2.4 |
| 80  | 118 | 370 | 8.0  | 210 | 105 | 395 | 2.2 |
| 85  | 134 | 373 | 13.0 | 215 | 102 | 396 | 2.0 |
| 90  | 139 | 372 | 13.0 | 220 | 100 | 397 | 2.0 |
| 95  | 144 | 372 | 15.0 | 225 | 94  | 397 | 1.6 |
| 100 | 148 | 372 | 16.0 | 230 | 94  | 398 | 1.6 |
| 105 | 149 | 370 | 16.0 | 235 | 92  | 398 | 1.4 |
| 110 | 149 | 370 | 16.0 | 240 | 89  | 399 | 1.2 |
| 115 | 149 | 370 | 16.0 | 245 | 86  | 400 | 1.2 |
| 120 | 151 | 370 | 15.0 | 250 | 84  | 400 | 1.0 |
| 125 | 149 | 370 | 15.0 |     |     |     |     |

ตารางที่ ข-2 บันทึกข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 420 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

- พลาสติกพอลิสไตรีน 300.00 กรัม และ อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร/นาที

| Time (min) | T <sub>Gas out</sub> (°C) | T <sub>Reactor</sub> (°C) | Volume (mL) | Time (min) | T <sub>Gas out</sub> (°C) | T <sub>Reactor</sub> (°C) | Volume (mL) |
|------------|---------------------------|---------------------------|-------------|------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| 0          | 33                        | 27                        | -           | 140        | 151                       | 383                       | 12.0        |
| 5          | 34                        | 32                        | -           | 145        | 146                       | 385                       | 12.0        |
| 10         | 35                        | 46                        | -           | 150        | 141                       | 386                       | 11.0        |
| 15         | 35                        | 72                        | -           | 155        | 137                       | 387                       | 11.0        |
| 20         | 36                        | 110                       | -           | 160        | 135                       | 387                       | 10.0        |
| 25         | 37                        | 154                       | -           | 165        | 133                       | 388                       | 7.2         |
| 30         | 37                        | 206                       | -           | 170        | 132                       | 389                       | 8.2         |
| 35         | 38                        | 244                       | -           | 175        | 129                       | 390                       | 5.4         |
| 40         | 39                        | 279                       | -           | 180        | 126                       | 391                       | 5.0         |
| 45         | 40                        | 306                       | -           | 185        | 120                       | 392                       | 4.6         |
| 50         | 41                        | 328                       | -           | 190        | 115                       | 392                       | 3.8         |
| 55         | 43                        | 348                       | -           | 195        | 112                       | 393                       | 3.0         |
| 60         | 45                        | 371                       | -           | 200        | 109                       | 393                       | 2.6         |
| 65         | 56                        | 376                       | -           | 205        | 108                       | 394                       | 2.8         |
| 70         | 76                        | 379                       | -           | 210        | 106                       | 394                       | 2.4         |

|     |     |     |      |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| 75  | 85  | 376 | -    | 215 | 105 | 394 | 2.4 |
| 80  | 118 | 375 | 11.0 | 220 | 104 | 395 | 2.0 |
| 85  | 132 | 374 | 11.0 | 225 | 101 | 395 | 2.0 |
| 90  | 138 | 373 | 13.0 | 230 | 99  | 395 | 1.8 |
| 95  | 142 | 373 | 13.0 | 235 | 93  | 396 | 1.6 |
| 100 | 148 | 372 | 16.0 | 240 | 93  | 397 | 1.6 |
| 105 | 150 | 371 | 17.0 | 245 | 96  | 397 | 1.6 |
| 110 | 153 | 370 | 17.0 | 250 | 94  | 397 | 1.4 |
| 115 | 156 | 370 | 17.0 | 255 | 93  | 397 | 1.4 |
| 120 | 157 | 372 | 18.0 | 260 | 91  | 397 | 1.2 |
| 125 | 155 | 375 | 16.0 | 265 | 89  | 397 | 1.2 |
| 130 | 153 | 377 | 14.0 | 270 | 84  | 397 | 1.0 |
| 135 | 152 | 380 | 11.0 | 275 | 84  | 397 | 1.0 |

ตารางที่ ข-3 บันทึกข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 450 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC

- พลาสติกพอลิสไตรีน 300.0 กรัม และ อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร/นาที

| Time (min) | T <sub>Gas out</sub> (°C) | T <sub>Reactor</sub> (°C) | Volume (mL) | Time (min) | T <sub>Gas out</sub> (°C) | T <sub>Reactor</sub> (°C) | Volume (mL) |
|------------|---------------------------|---------------------------|-------------|------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| 0          | 27                        | 22                        | -           | 60         | 219                       | 400                       | 47          |
| 5          | 28                        | 25                        | -           | 65         | 219                       | 410                       | 42          |
| 10         | 29                        | 40                        | -           | 70         | 200                       | 422                       | 41          |
| 15         | 29                        | 66                        | -           | 75         | 180                       | 432                       | 27          |
| 20         | 30                        | 111                       | -           | 80         | 155                       | 444                       | 19          |
| 25         | 31                        | 200                       | -           | 85         | 137                       | 453                       | 12          |
| 30         | 31                        | 264                       | -           | 90         | 125                       | 458                       | 6.2         |
| 35         | 31                        | 377                       | -           | 95         | 113                       | 460                       | 3.8         |
| 40         | 33                        | 388                       | -           | 100        | 103                       | 461                       | 2.2         |
| 45         | 128                       | 398                       | 11          | 105        | 92                        | 462                       | 1.8         |
| 50         | 178                       | 399                       | 43          | 110        | 83                        | 462                       | 1.6         |
| 55         | 207                       | 398                       | 53          | 115        | 74                        | 462                       | 1.0         |

ตารางที่ ข-4 บันทึกข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 450 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

- พลาสติกพอลิสไตรีน 300.00 กรัม และ อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร/นาที

| Time (min) | T <sub>Gas out</sub> (°C) | T <sub>Reactor</sub> (°C) | Volume (mL) | Time (min) | T <sub>Gas out</sub> (°C) | T <sub>Reactor</sub> (°C) | Volume (mL) |
|------------|---------------------------|---------------------------|-------------|------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| 0          | 34                        | 34                        | -           | 60         | 220                       | 406                       | 49          |
| 5          | 35                        | 40                        | -           | 65         | 221                       | 415                       | 45          |
| 10         | 35                        | 69                        | -           | 70         | 200                       | 425                       | 39          |
| 15         | 35                        | 117                       | -           | 75         | 173                       | 435                       | 28          |
| 20         | 35                        | 172                       | -           | 80         | 148                       | 445                       | 17          |
| 25         | 35                        | 243                       | -           | 85         | 134                       | 454                       | 11          |
| 30         | 36                        | 267                       | -           | 90         | 120                       | 457                       | 5.2         |
| 35         | 36                        | 288                       | -           | 95         | 103                       | 459                       | 4.2         |
| 40         | 39                        | 391                       | -           | 100        | 97                        | 468                       | 1.8         |
| 45         | 139                       | 403                       | 18          | 105        | 89                        | 461                       | 1.6         |
| 50         | 184                       | 403                       | 42          | 110        | 83                        | 461                       | 1.6         |
| 55         | 212                       | 403                       | 48          | 115        | 79                        | 461                       | 1.0         |

ตารางที่ ข-5 บันทึกข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 500 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC

- พลาสติกพอลิสไตรีน 300.00 กรัม และ อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร/นาที

| Time<br>(min) | T <sub>Gas out</sub><br>(°C) | T <sub>Reactor</sub><br>(°C) | Volume<br>(mL) | Time<br>(min) | T <sub>Gas out</sub><br>(°C) | T <sub>Reactor</sub><br>(°C) | Volume<br>(mL) |
|---------------|------------------------------|------------------------------|----------------|---------------|------------------------------|------------------------------|----------------|
| 0             | 27                           | 44                           | -              | 60            | 221                          | 415                          | 49             |
| 5             | 27                           | 49                           | -              | 65            | 213                          | 428                          | 37             |
| 10            | 27                           | 71                           | -              | 70            | 183                          | 442                          | 31             |
| 15            | 28                           | 111                          | -              | 75            | 155                          | 457                          | 16             |
| 20            | 27                           | 188                          | -              | 80            | 131                          | 463                          | 8.2            |
| 25            | 27                           | 249                          | -              | 85            | 115                          | 466                          | 4.4            |
| 30            | 27                           | 373                          | -              | 90            | 102                          | 468                          | 2.5            |
| 35            | 27                           | 392                          | -              | 95            | 92                           | 470                          | 2.2            |
| 40            | 104                          | 386                          | 2.2            | 100           | 82                           | 470                          | 1.6            |
| 45            | 167                          | 402                          | 35             | 105           | 73                           | 471                          | 1.2            |
| 50            | 208                          | 401                          | 57             | 110           | 68                           | 471                          | 1.0            |
| 55            | 223                          | 404                          | 60             |               |                              |                              |                |



ตารางที่ ข-6 บันทึกข้อมูลการทดลองที่สภาวะ 500 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

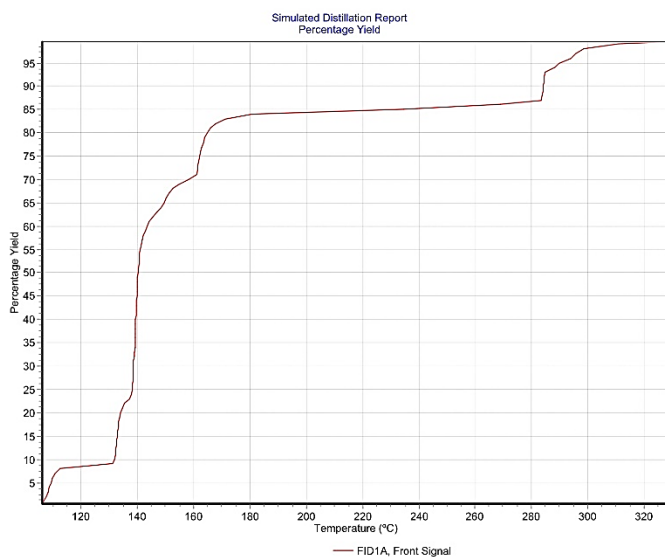
- พลาสติกพอลิสไตรีน 300.00 กรัม และ อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 50 มิลลิลิตร/นาที

| Time (min) | T <sub>Gas out</sub> (°C) | T <sub>Reactor</sub> (°C) | Volume (mL) | Time (min) | T <sub>Gas out</sub> (°C) | T <sub>Reactor</sub> (°C) | Volume (mL) |
|------------|---------------------------|---------------------------|-------------|------------|---------------------------|---------------------------|-------------|
| 0          | 36                        | 33                        | -           | 70         | 196                       | 393                       | 41.0        |
| 5          | 37                        | 46                        | -           | 75         | 204                       | 397                       | 38.0        |
| 10         | 37                        | 62                        | -           | 80         | 207                       | 403                       | 40.0        |
| 15         | 37                        | 83                        | -           | 85         | 204                       | 410                       | 38.0        |
| 20         | 37                        | 116                       | -           | 90         | 196                       | 419                       | 32.0        |
| 25         | 38                        | 154                       | -           | 95         | 180                       | 429                       | 26.0        |
| 30         | 38                        | 215                       | -           | 100        | 153                       | 440                       | 17.0        |
| 35         | 39                        | 268                       | -           | 105        | 129                       | 446                       | 7.4         |
| 40         | 41                        | 316                       | -           | 110        | 115                       | 450                       | 4.4         |
| 45         | 42                        | 342                       | -           | 115        | 104                       | 454                       | 2.4         |
| 50         | 45                        | 365                       | -           | 120        | 95                        | 456                       | 2.0         |
| 55         | 128                       | 386                       | 12.0        | 125        | 88                        | 457                       | 1.8         |
| 60         | 152                       | 393                       | 21.0        | 130        | 82                        | 458                       | 1.4         |
| 65         | 180                       | 392                       | 36.0        | 135        | 76                        | 459                       | 1.0         |

## ภาคผนวก ค

## การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) ของน้ำมันไพโรไลซิส

รูปที่ ค-1 แสดงสถานะ 420 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC

Simulated Distillation Engineering Report  
6/1msumarin -- 08-Jan-21, 11:41:23 -- D2887.M  
C:\Chem32\1\DATA\nk\D2887 2021-01-08 10-01-53\105F0401.D (GC DATA FILE)

## Percentage Yield Table

| ... Front Signal |        |
|------------------|--------|
| Temp. (Deg. C)   |        |
| IBP: 0.5%        | 106.00 |
| 5.00%            | 109.00 |
| 10.00%           | 132.00 |
| 15.00%           | 133.00 |
| 20.00%           | 134.00 |
| 25.00%           | 138.00 |
| 30.00%           | 139.00 |
| 35.00%           | 139.00 |
| 40.00%           | 140.00 |
| 45.00%           | 140.00 |
| 50.00%           | 140.00 |
| 55.00%           | 141.00 |
| 60.00%           | 143.00 |
| 65.00%           | 143.00 |
| 70.00%           | 158.00 |
| 75.00%           | 162.00 |
| 80.00%           | 165.00 |
| 85.00%           | 235.00 |
| 90.00%           | 284.00 |
| 95.00%           | 290.00 |
| FBP: 99.5%       | 329.00 |

Total ... Front Signal: 100.000 %

Agilent SimDis Report  
1/8/2021 1:19:57 PM  
Agilent TechnologiesCalibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
Blank: C:\Chem32\1\DATA\CS2\RUN001527.D  
Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
SimDis Properties: custom properties6/1m  
C:\Chem32\1\DATA\nk\D2887 2021-01-08 10-01-53\105F0401.D (GC DATA FILE)Simulated Distillation Report  
Agilent Technologies  
1/8/2021 1:22:06 PM

sumarin -- 08-Jan-21, 11:41:23 -- D2887.M

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
Blank: C:\Chem32\1\DATA\CS2\RUN001527.D  
Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
SimDis Properties: custom properties

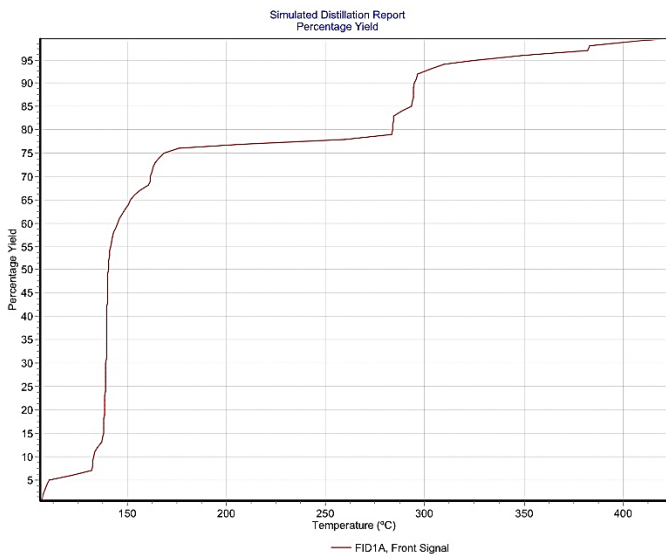
Total ... Front Signal: 100.000 %

Custom Cut Point Table

| Temp. (Deg. C)   | FID1A, Front Signal |
|------------------|---------------------|
| 0.00 to 200.00   | 84.5%               |
| 200.00 to 250.00 | 0.8%                |
| 250.00 to 370.00 | 14.6%               |
| 370.00 to 390.00 | 0.1%                |

รูปที่ ค-2 แสดงสภาวะ 450 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC

Simulated Distillation Engineering Report  
 14/1 M  
 sumarin -- 15-Jan-21, 10:59:22 -- D2887.M  
 C:\Chem32\1\DATA\ink\D2887 2021-01-15 10-27-21\103F0201.D (GC DATA FILE)



Percentage Yield Table

| ... Front Signa | Temp. (Deg. C) |
|-----------------|----------------|
| IBP: 0.5%       | 106.00         |
| 5.00%           | 111.00         |
| 10.00%          | 133.00         |
| 15.00%          | 138.00         |
| 20.00%          | 139.00         |
| 25.00%          | 139.00         |
| 30.00%          | 139.00         |
| 35.00%          | 140.00         |
| 40.00%          | 140.00         |
| 45.00%          | 140.00         |
| 50.00%          | 141.00         |
| 55.00%          | 142.00         |
| 60.00%          | 145.00         |
| 65.00%          | 152.00         |
| 70.00%          | 162.00         |
| 75.00%          | 169.00         |
| 80.00%          | 284.00         |
| 85.00%          | 293.00         |
| 90.00%          | 295.00         |
| 95.00%          | 325.00         |
| FBP: 99.5%      | 422.00         |

Total ... Front Signa: 100.000 %

Agilent SimDis Report  
 1/15/2021 1:47:15 PM  
 Agilent Technologies

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
 Blank: C:\Chem32\1\DATA\ink\D2887 2021-01-15 10-27-21\101F0401.D  
 Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
 SimDis Properties: custom properties

14/1 M  
 C:\Chem32\1\DATA\ink\D2887 2021-01-15 10-27-21\103F0201.D (GC DATA FILE)

Simulated Distillation Report  
 Agilent Technologies  
 1/15/2021 1:47:37 PM

sumarin -- 15-Jan-21, 10:59:22 -- D2887.M

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
 Blank: C:\Chem32\1\DATA\ink\D2887 2021-01-15 10-27-21\101F0401.D  
 Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
 SimDis Properties: custom properties

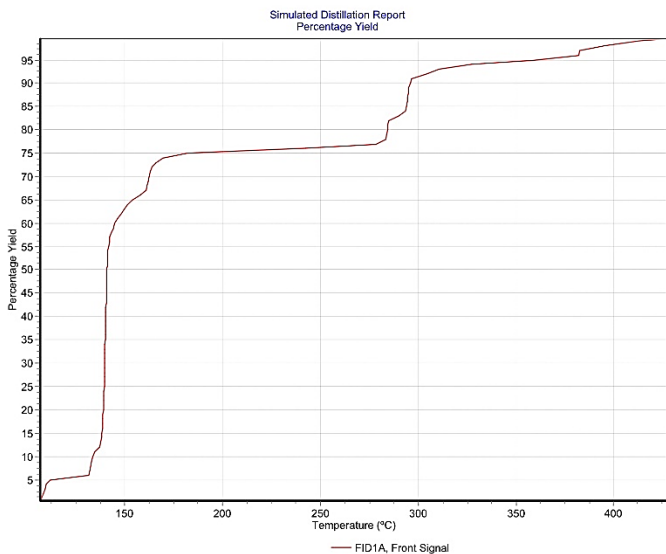
Total ... Front Signa: 100.000 %

Custom Cut Point Table

| Temp. (Deg. C)   | FID1A, Front Signal |
|------------------|---------------------|
| 0.00 to 200.00   | 76.8%               |
| 200.00 to 250.00 | 1.0%                |
| 250.00 to 370.00 | 18.6%               |
| 370.00 to 450.00 | 3.6%                |

รูปที่ ค-3 แสดงสภาวะ 500 องศาเซลเซียส โดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC

Simulated Distillation Engineering Report  
 13/1  
 sumarin -- 15-Jan-21, 10:28:58 -- D2887.M  
 C:\Chem32\1\DATA\nk\D2887 2021-01-15 10-27-21\102F0101.D (GC DATA FILE)



Percentage Yield Table

| ...  | Front Signa | Temp. (Deg. C) |
|------|-------------|----------------|
| IBP: | 0.5%        | 107.00         |
|      | 5.00%       | 112.00         |
|      | 10.00%      | 134.00         |
|      | 15.00%      | 138.00         |
|      | 20.00%      | 139.00         |
|      | 25.00%      | 140.00         |
|      | 30.00%      | 140.00         |
|      | 35.00%      | 140.00         |
|      | 40.00%      | 140.00         |
|      | 45.00%      | 141.00         |
|      | 50.00%      | 141.00         |
|      | 55.00%      | 142.00         |
|      | 60.00%      | 145.00         |
|      | 65.00%      | 154.00         |
|      | 70.00%      | 162.00         |
|      | 75.00%      | 182.00         |
|      | 80.00%      | 284.00         |
|      | 85.00%      | 294.00         |
|      | 90.00%      | 296.00         |
|      | 95.00%      | 359.00         |
| FBP: | 99.5%       | 428.00         |

Total ... Front Signa: 100.000 %

Agilent SimDis Report  
 1/15/2021 1:43:37 PM  
 Agilent Technologies

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
 Blank: C:\Chem32\1\DATA\nk\D2887 2021-01-15 10-27-21\101F0401.D  
 Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
 SimDis Properties: custom properties

13/1  
 C:\Chem32\1\DATA\nk\D2887 2021-01-15 10-27-21\102F0101.D (GC DATA FILE)

Simulated Distillation Report  
 Agilent Technologies  
 1/15/2021 1:44:59 PM

sumarin -- 15-Jan-21, 10:28:58 -- D2887.M

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
 Blank: C:\Chem32\1\DATA\nk\D2887 2021-01-15 10-27-21\101F0401.D  
 Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
 SimDis Properties: custom properties

Total ... Front Signa: 100.000 %

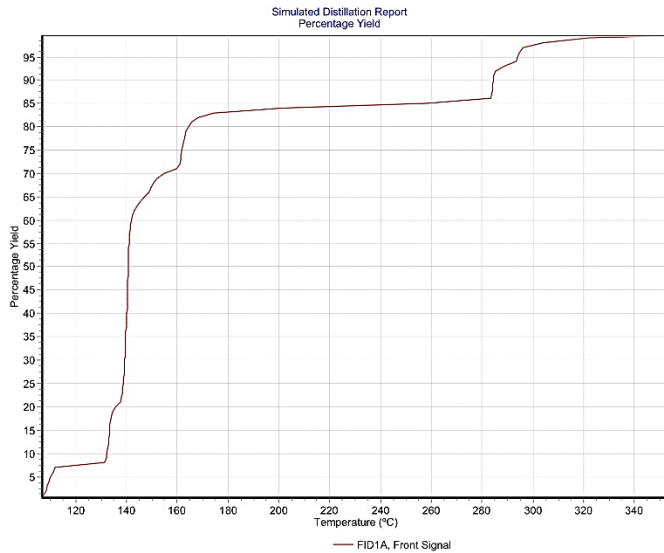
Custom Cut Point Table

| Temp. (Deg. C)   | FID1A, Front Signal |
|------------------|---------------------|
| 0.00 to 200.00   | 75.4%               |
| 200.00 to 250.00 | 0.8%                |
| 250.00 to 370.00 | 19.1%               |
| 370.00 to 435.00 | 4.7%                |

รูปที่ ค-4 แสดงสภาวะ 420 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

Simulated Distillation Engineering Report  
7/1

sumarin -- 08-Jan-21, 12:44:48 -- D2887.M  
C:\Chem32\1\DATA\ink\D2887 2021-01-08 10-01-53\107F0601.D (GC DATA FILE)



Percentage Yield Table

| ... Front Signal |        |
|------------------|--------|
| Temp. (Deg. C)   |        |
| IBP: 0.5%        | 107.00 |
| 5.00%            | 110.00 |
| 10.00%           | 132.00 |
| 15.00%           | 133.00 |
| 20.00%           | 136.00 |
| 25.00%           | 139.00 |
| 30.00%           | 139.00 |
| 35.00%           | 140.00 |
| 40.00%           | 140.00 |
| 45.00%           | 140.00 |
| 50.00%           | 141.00 |
| 55.00%           | 141.00 |
| 60.00%           | 142.00 |
| 65.00%           | 147.00 |
| 70.00%           | 155.00 |
| 75.00%           | 162.00 |
| 80.00%           | 164.00 |
| 85.00%           | 259.00 |
| 90.00%           | 285.00 |
| 95.00%           | 294.00 |
| FBP: 99.5%       | 354.00 |

Total ... Front Signal: 100.000 %

Agilent SimDis Report  
1/8/2021 1:24:40 PM  
Agilent Technologies

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
Blank: C:\Chem32\1\DATA\CS2\RUN001527.D  
Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
SimDis Properties: custom properties

7/1

C:\Chem32\1\DATA\ink\D2887 2021-01-08 10-01-53\107F0601.D (GC DATA FILE)

Simulated Distillation Report  
Agilent Technologies  
1/8/2021 1:25:03 PM

sumarin -- 08-Jan-21, 12:44:48 -- D2887.M

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
Blank: C:\Chem32\1\DATA\CS2\RUN001527.D  
Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
SimDis Properties: custom properties

Total ... Front Signal: 100.000 %

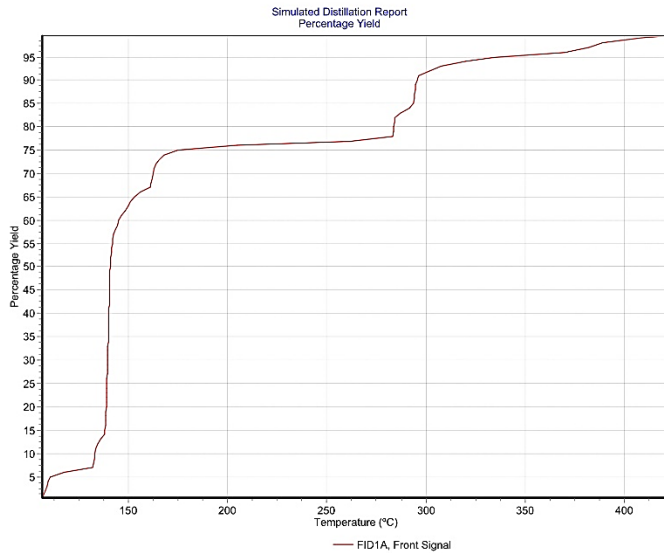
Custom Cut Point Table

| Temp. (Deg. C)   | FID1A, Front Signal |
|------------------|---------------------|
| 0.00 to 200.00   | 84.0%               |
| 200.00 to 250.00 | 0.9%                |
| 250.00 to 370.00 | 14.7%               |
| 370.00 to 440.00 | 0.4%                |

รูปที่ ค-5 แสดงสภาวะ 450 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

Simulated Distillation Engineering Report  
14/1 N

sumarin -- 15-Jan-21, 11:30:06 -- D2887.M  
C:\Chem32\1\DATA\nk\D2887 2021-01-15 10-27-21\104F0301.D (GC DATA FILE)



Percentage Yield Table

| ...  | Front Signal | Temp. (Deg. C) |
|------|--------------|----------------|
| IBP: | 0.5%         | 106.00         |
|      | 5.00%        | 111.00         |
|      | 10.00%       | 133.00         |
|      | 15.00%       | 138.00         |
|      | 20.00%       | 139.00         |
|      | 25.00%       | 139.00         |
|      | 30.00%       | 139.00         |
|      | 35.00%       | 140.00         |
|      | 40.00%       | 140.00         |
|      | 45.00%       | 140.00         |
|      | 50.00%       | 141.00         |
|      | 55.00%       | 142.00         |
|      | 60.00%       | 145.00         |
|      | 65.00%       | 153.00         |
|      | 70.00%       | 162.00         |
|      | 75.00%       | 175.00         |
|      | 80.00%       | 284.00         |
|      | 85.00%       | 294.00         |
|      | 90.00%       | 296.00         |
|      | 95.00%       | 335.00         |
| FBP: | 99.5%        | 423.00         |

Total ... Front Signal: 100.000 %

Agilent SimDis Report  
1/15/2021 1:48:58 PM  
Agilent Technologies

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
Blank: C:\Chem32\1\DATA\nk\D2887 2021-01-15 10-27-21\101F0401.D  
Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
SimDis Properties: custom properties

14/1 N  
C:\Chem32\1\DATA\nk\D2887 2021-01-15 10-27-21\104F0301.D (GC DATA FILE)

Simulated Distillation Report  
Agilent Technologies  
1/15/2021 1:49:02 PM

sumarin -- 15-Jan-21, 11:30:06 -- D2887.M

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
Blank: C:\Chem32\1\DATA\nk\D2887 2021-01-15 10-27-21\101F0401.D  
Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
SimDis Properties: custom properties

Total ... Front Signal: 100.000 %

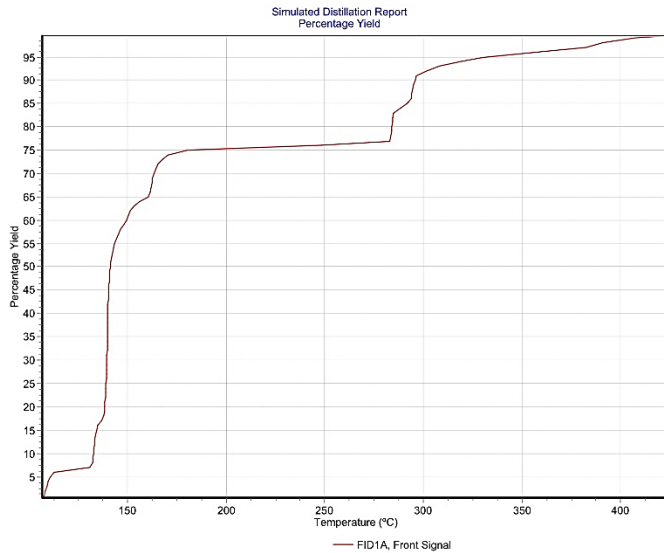
Custom Cut Point Table

| Temp. (Deg. C)   | FID1A, Front Signal |
|------------------|---------------------|
| 0.00 to 200.00   | 75.9%               |
| 200.00 to 250.00 | 0.9%                |
| 250.00 to 370.00 | 19.2%               |
| 370.00 to 450.00 | 4.0%                |

รูปที่ ค-6 แสดงสภาวะ 500 องศาเซลเซียส โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา Spent FCC ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

Simulated Distillation Engineering Report  
6/1n

sumarin -- 08-Jan-21, 12:13:12 -- D2887.M  
C:\Chem32\1\DATA\ink\D2887 2021-01-08 10-01-53\106F0501.D (GC DATA FILE)



Percentage Yield Table

| ... Front Signal |        |
|------------------|--------|
| Temp. (Deg. C)   |        |
| IBP: 0.5%        | 107.00 |
| 5.00%            | 111.00 |
| 10.00%           | 133.00 |
| 15.00%           | 134.00 |
| 20.00%           | 139.00 |
| 25.00%           | 139.00 |
| 30.00%           | 140.00 |
| 35.00%           | 140.00 |
| 40.00%           | 140.00 |
| 45.00%           | 141.00 |
| 50.00%           | 141.00 |
| 55.00%           | 143.00 |
| 60.00%           | 149.00 |
| 65.00%           | 161.00 |
| 70.00%           | 164.00 |
| 75.00%           | 181.00 |
| 80.00%           | 284.00 |
| 85.00%           | 292.00 |
| 90.00%           | 296.00 |
| 95.00%           | 331.00 |
| FBP: 99.5%       | 425.00 |

Total ... Front Signal: 100.000 %

Agilent SimDis Report  
1/8/2021 1:23:29 PM  
Agilent Technologies

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
Blank: C:\Chem32\1\DATA\CS2\RUN001527.D  
Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
SimDis Properties: custom properties

6/1n  
C:\Chem32\1\DATA\ink\D2887 2021-01-08 10-01-53\106F0501.D (GC DATA FILE)

Simulated Distillation Report  
Agilent Technologies  
1/8/2021 1:24:17 PM

sumarin -- 08-Jan-21, 12:13:12 -- D2887.M

Calibration: C:\Chem32\1\DATA\CS2\D2887 2019-08-04 21-26-48\102F0101.D\FID1A.ch  
Blank: C:\Chem32\1\DATA\CS2\RUN001527.D  
Qc Ref: C:\Chem32\1\DATA\cal 31-7-19\D2887 2019-07-31 14-01-19\103F0501.D  
SimDis Properties: custom properties

Total ... Front Signal: 100.000 %

Custom Cut Point Table

| Temp. (Deg. C)   | FID1A, Front Signal |
|------------------|---------------------|
| 0.00 to 200.00   | 75.4%               |
| 200.00 to 250.00 | 0.7%                |
| 250.00 to 370.00 | 20.2%               |
| 370.00 to 440.00 | 3.7%                |