

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

กระบวนการไพโรไลซิสของกะลาปาล์มน้ำมัน

PYROLYSIS OF PALM OIL SHELL



ร/พ.  
1852 17  
2549

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72137  
วัน,เดือน,ปี..... 11 ส.ย. 2550

b. 117b38b3  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# PYROLYSIS OF PALM OIL SHELL



**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN  
CHEMICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                      |   |             |                      |
|----------------------|---|-------------|----------------------|
| ปริญญานิพนธ์เรื่อง   | กระบวนการไพโรไลซิสของกะลาปาล์มน้ำมัน  |             |                      |
| โดย                  | นายเกียรติคุณ   | ไชยชนะ      | เลขประจำตัว 46010061 |
|                      | นายสหพล   | ชัยอนุรักษ์ | เลขประจำตัว 46010819 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา     | ผศ.ดร. ดวงกมล   | ณ ระนอง     |                      |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ผศ.ดร. อรรถศักดิ์   | จารีย์      |                      |
| ปริญญานิพนธ์         | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี<br>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์<br>สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |             |                      |

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสของกะลาปาล์มน้ำมันด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากกะลาปาล์มน้ำมัน และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ในขั้นต้นทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ใช้กะลาปาล์มน้ำมันขนาด 0.25-0.84 และ 0.84-1.50 มิลลิเมตร ภายใต้สภาวะปฏิบัติงานคือ อุณหภูมิ 350-550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 50-300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เวลาที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส ตั้งแต่ 30-90 นาที สัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพา 0-15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำไพโรไลซิส คือ เลือกใช้กะลาปาล์มน้ำมันที่มีขนาด 0.84-1.50 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เวลาที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 60 นาที และไม่มีการเติมไอน้ำในแก๊สพา ซึ่งจะทำได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพในผลิตภัณฑ์มากที่สุดถึง 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโตกราฟแบบ FID พบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบหลัก คือ ฟีนอล (50.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน) กรดแอซิดิก (26.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน) เมทานอล (3.9 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน) และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ (19.7 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน) สภาวะที่เหมาะสมดังกล่าวจะเป็นแนวทางในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับสังเคราะห์น้ำมันชีวภาพอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title      Pyrolysis of Palm Oil Shell

By                    Mr. Keattikhun                    Chaichana                    ID.NO. 46010061

                          Mr. Sahapon                        Chaianuruk                    ID.NO. 46010819

Advisor            Assist. Prof. Dr. Duangkamol    Na-Ranong

Co-advisor        Assist. Prof. Dr. Attasak            Jaree

Report for        Bachelor Degree of Engineering (Chemical Engineering)

                          Department of Chemical Engineering

                          Faculty of Engineering

                          King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

## ABSTRACT

In this study, pyrolysis of palm oil shell has been investigated using a semi-batch reactor to determine the optimal conditions for the production of bio-oil. The obtained information was used for the design of a continuous reactor. The preliminary experiments were conducted in a semi-batch reactor using palm oil shell with particle sizes of 0.25-0.84 and 0.84-1.50 mm, temperature of 350-550 °C, the flow rate of nitrogen in the ranges of 50-300 cm<sup>3</sup>/min, pyrolysis time of 30-90 mins, and a fraction of water vapor in a carrier gas of 0-15 vol%. The optimal conditions were operated at the particle size of 0.84-1.50 mm, temperature of 500 °C, the flow rate of nitrogen of 200 cm<sup>3</sup>/min, and the pyrolysis time of 60 mins without water vapor during the pyrolysis. The maximum bio-oil in the product of 61.3 wt% was observed. The compositions of the bio-oil was analysed by a gas chromatograph with a FID detector and found phenol (50.2 %C), acetic acid (26.2 %C), methanol (3.9 %C) and other hydrocarbon compounds (19.7 %C). Accordingly, the obtained optimal conditions were used as a guidelines to design a reactor for the continuous bio-oil production.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมงานวิจัย คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อรรถศักดิ์ จารีย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และให้ความอนุเคราะห์ในการวัดคุณสมบัติทางกายภาพของสาร

ขอขอบคุณ คุณรัตนกร ขวงสวัสดิ์ ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือช่วยเหลือต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณพิมพ์ใจ ภูษนะกิจ เจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยเหลือการประสานงานนอกสถานที่ การเงิน และคำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ คุณพรรณิภา ถาโชกชัย นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยเหลือ และให้คำแนะนำต่างๆ

สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกครอบครัวของคณะผู้วิจัยที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้สามารถทำปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่า และประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาโทฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับ ณ ที่นี้

เกียรติคุณ ไชยชนะ  
สหพล ชัยอนุรักษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

|   |      |
|---|------|
|   | หน้า |
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญตาราง.....  | VII  |
| สารบัญรูป.....  | IX   |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....   | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย.....   | 2    |
| 1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....  | 2    |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....  | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 4    |
| 2.1 เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวล.....   | 4    |
| 2.1.1 การเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีทางชีวเคมี<br>(Biochemical Conversion Process).....     | 4    |
| 2.1.2 การเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีทางความร้อน<br>(Thermochemical Conversion Process)..... | 4    |
| 2.2 กระบวนการไพโรไลซิส.....   | 5    |
| 2.2.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส.....  | 7    |
| 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส.....   | 8    |
| 2.2.3 การใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส.....                         | 8    |
| 2.3 ปาล์มน้ำมัน.....  | 9    |
| 2.3.1 ปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมัน.....   | 9    |
| 2.3.2 กระบวนการแปรรูปปาล์มน้ำมัน.....   | 10   |
| 2.3.3 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่อเนื่องน้ำมันปาล์ม.....  | 14   |
| 2.3.4 วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมัน.....  | 16   |
| 2.3.5 ประโยชน์ของวัสดุเหลือทิ้งจากการสกัดปาล์มน้ำมัน.....                                       | 17   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....  | 23   |
| บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย .....  | 28   |
| 3.1 การทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง.....  | 28   |
| 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....   | 28   |
| 3.1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง .....  | 28   |
| 3.1.3 วิธีการทดลอง.....  | 28   |
| 3.2 การทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....  | 31   |
| 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....   | 31   |
| 3.2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง .....  | 31   |
| 3.2.3 วิธีการทดลอง.....  | 31   |
| 3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์.....   | 33   |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....   | 34   |
| 4.1 การไฟโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุที่ทำงานแบบกึ่งต่อเนื่อง .....  | 34   |
| 4.1.1 การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ .....   | 34   |
| 4.1.2 อิทธิพลของขนาดวัตถุดิบที่ใช้ทำไฟโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์ .....   | 36   |
| 4.1.3 อิทธิพลของอัตราการป้อนแก๊สในโตรเจนที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์.....   | 37   |
| 4.1.4 อิทธิพลของเวลาทำไฟโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์.....  | 40   |
| 4.1.5 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ทำไฟโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์ .....   | 42   |
| 4.1.6 อิทธิพลของไอน้ำที่ใช้ทำไฟโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์.....   | 45   |
| 4.1.7 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิส<br>กะลาปาล์มน้ำมัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ..... | 47   |
| 4.2 ความสัมพันธ์ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องกับแบบต่อเนื่อง .....   | 49   |
| 4.2.1 อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน (แก๊สพา).....   | 49   |
| 4.2.2 เวลาที่ใช้ไฟโรไลซิส .....  | 49   |
| 4.2.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการไฟโรไลซิส.....  | 49   |
| 4.2.4 สัดส่วนของไอน้ำที่เติมในแก๊สพา.....  | 49   |
| 4.3 การทดลองไฟโรไลซิสโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง .....  | 50   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 51   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....                  | 51   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....                      | 51   |
| เอกสารอ้างอิง.....                       | 52   |
| ภาคผนวก.....                             | 54   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่      | หน้า |
|---------------|------|
| ตารางที่ 2.1  | 5    |
| ตารางที่ 2.2  | 7    |
| ตารางที่ 2.3  | 10   |
| ตารางที่ 2.4  | 15   |
| ตารางที่ 2.5  | 17   |
| ตารางที่ 2.6  | 18   |
| ตารางที่ 2.7  | 18   |
| ตารางที่ 2.8  | 19   |
| ตารางที่ 2.9  | 20   |
| ตารางที่ 2.10 | 20   |
| ตารางที่ 2.11 | 22   |
| ตารางที่ 2.12 | 26   |
| ตารางที่ 4.1  | 47   |
| ตารางที่ ก.1  | 54   |
| ตารางที่ ข.1  | 55   |
| ตารางที่ ข.2  | 56   |
| ตารางที่ ข.3  | 56   |
| ตารางที่ ค.1  | 57   |
| ตารางที่ ค.2  | 58   |
| ตารางที่ ค.3  | 58   |
| ตารางที่ ค.4  | 59   |
| ตารางที่ ง.1  | 60   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่     |  | หน้า |
|--------------|--|------|
| ตารางที่ ง.2 | องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่างๆ .....      | 61   |
| ตารางที่ ง.3 | องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจนต่างๆ .....      | 61   |
| ตารางที่ ง.4 | องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวโดยมีการป้อนไอน้ำเข้าไปในแก๊สพา .....       | 62   |
| ตารางที่ จ.1 | ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการทำไพโรไลซิส ..... | 63   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

| รูปที่         |  | หน้า |
|----------------|--|------|
| รูปที่ 2.1     | กระบวนการไพโรไลซิส .....   | 6    |
| รูปที่ 2.2     | พื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันของแต่ละจังหวัดในภาคต่างๆ .....  | 10   |
| รูปที่ 2.3     | กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานสกัดแบบมาตรฐาน .....  | 11   |
| รูปที่ 2.4     | กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานสกัดแบบรวมหรือหีบผสม .....  | 12   |
| รูปที่ 2.5     | กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี.....  | 13   |
| รูปที่ 2.6     | กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางกายภาพ .....   | 14   |
| รูปที่ 2.7     | วัสดุส่วนต่างๆ ที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานอุตสาหกรรม.....   | 16   |
| รูปที่ 2.8     | ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลว .....   | 23   |
| รูปที่ 2.9     | ผลของขนาดวัตถุดิบที่มีต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลว .....   | 24   |
| รูปที่ 2.10    | ผลของอัตราการป้อนแก๊สที่มีต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลว .....   | 25   |
| รูปที่ 3.1     | ชุดการทดลองไพโรไลซิสแบบกึ่งต่อเนื่อง .....   | 30   |
| รูปที่ 3.2     | ชุดการทดลองไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง .....   | 32   |
| รูปที่ 4.1(ก.) | การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาต่างๆ โดยใช้อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 50 ลบ.ซม./นาที่ : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มม. อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที .....  | 35   |
| รูปที่ 4.1(ข.) | การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาต่างๆ โดยใช้อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 100 ลบ.ซม./นาที่ : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มม. อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที ..... | 35   |
| รูปที่ 4.2     | สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส : เวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลบ.ซม./นาที่.....  | 36   |
| รูปที่ 4.3     | สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มม. อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที.....  | 37   |
| รูปที่ 4.4     | เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มม. อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที.....  | 37   |
| รูปที่ 4.5     | องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มม. อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที .....   | 38   |
| รูปที่ 4.6     | สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มม. อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลบ.ซม./นาที่ ...   | 40   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่      | หน้า   |
|-------------|--|
| รูปที่ 4.7  | เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว : ขนาดวัดดูดิบ 0.84-1.50 มม.<br>อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลบ.ซม./นาที่ ...40  |
| รูปที่ 4.8  | องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัดดูดิบ<br>0.84-1.50 มม. อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน<br>200 ลบ.ซม./นาที่ .....41   |
| รูปที่ 4.9  | สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส:ขนาดวัดดูดิบ 0.84-1.50 มม.<br>อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลบ.ซม./นาที่ และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที....42  |
| รูปที่ 4.10 | เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว : ขนาดวัดดูดิบ 0.84-1.50 มม.<br>อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลบ.ซม./นาที่ และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที....42  |
| รูปที่ 4.11 | องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส:ขนาดวัดดูดิบ<br>0.84-1.50 มม. อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลบ.ซม./นาที่ และเวลา<br>ทำไพโรไลซิส 60 นาที.....43   |
| รูปที่ 4.12 | สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัดดูดิบ 0.84-1.50 มม.<br>อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลบ.ซม./นาที่ เวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที<br>และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส.....45      |
| รูปที่ 4.13 | เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว : ขนาดวัดดูดิบ 0.84-1.50 มม.<br>อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลบ.ซม./นาที่ เวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที<br>และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส .....45           |
| รูปที่ 4.14 | องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัดดูดิบ<br>0.84-1.50 มม. อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลบ.ซม./นาที่ เวลาทำไพโรไลซิส<br>60 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส .....46 |
| รูปที่ 4.15 | องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัดดูดิบ<br>0.84-1.50 มม. อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลบ.ซม./นาที่ เวลาทำไพโรไลซิส<br>60 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส .....48 |
| รูปที่ 4.16 | ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองโดยใช้ชุดการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง<br>(ซ้าย) และผลิตภัณฑ์จากชุดการทดลองแบบต่อเนื่อง (ขวา).....50   |
| รูปที่ ฉ.1  | เครื่องมือวัดค่าความร้อน (Bomb calorimeter) ..... 64   |
| รูปที่ ฉ.2  | เครื่องมือวัดความหนาแน่น (Density meter) .....65   |
| รูปที่ ฉ.3  | เครื่องมือวัดความหนืด (Viscometer) .....66   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปาล์มน้ำมันเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทดแทนจำพวกชีวมวลที่สำคัญ และเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกมากในพื้นที่ทางภาคใต้ของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2548 ประเทศไทยมีผลผลิตปาล์มน้ำมันสูงถึง 5 ล้านตัน หรือคิดเป็น 3 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตทั่วโลก และเป็นผู้ผลิตอันดับที่ 4 ของโลกรองจาก มาเลเซีย อินโดนีเซีย และไนจีเรีย [1] จากการที่ปาล์มน้ำมันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง และรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมให้นำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพอย่างเร่งด่วนในปัจจุบัน ทำให้อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มซึ่งเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีวัสดุเหลือทิ้งจำพวก ก้านใบ ทะลายปาล์ม เส้นใย และกะลา เป็นจำนวนมากในแต่ละปี มีแนวโน้มที่จะปล่อยวัสดุเหลือทิ้งออกมามากยิ่งขึ้น แม้ว่าปัจจุบันจะมีความพยายามนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์รูปแบบต่างๆ เช่น นำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ วัสดุคลุมดิน แล้วก็ตาม แต่มีแนวโน้มว่าวิธีการกำจัดที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจะไม่เพียงพอต่อปริมาณวัสดุเหลือทิ้งที่เพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องหาวิธีการกำจัดที่เหมาะสมเพื่อไม่ให้ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

กระบวนการไพโรไลซิส นับว่าเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางเลือกหนึ่ง เพราะนอกจากจะสามารถใช้กำจัดวัสดุเหลือทิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ยังได้สารเคมีต่างๆ ที่มีคุณค่าจากกระบวนการไพโรไลซิสด้วย โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ของเหลว อาจนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือสารเคมีทดแทน นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ของเหลวยังสามารถขนส่ง และจัดเก็บได้ง่าย เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ปัจจุบันกระบวนการไพโรไลซิสนิยมทำโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidised bed) แต่ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด คือ ลักษณะไฮโดรไดนามิกส์ภายในฟลูอิดไคซ์เบดมีความซับซ้อนมาก ทำให้ง่ายในการปฏิบัติงานสูง การขยายขนาดทำได้ยาก [2] งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของกะลาปาล์มน้ำมันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุที่ทำงานแบบกึ่งต่อเนื่อง และพัฒนาให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นแนวทางใหม่สำหรับการทำไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน เพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุซึ่งทำงานแบบกึ่งต่อเนื่อง
- 1.2.2 เพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้งาน โดยวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้
- 1.2.3 เพื่อพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุสำหรับการทำไพโรไลซิสให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมันภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุซึ่งทำงานแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยมีปัจจัยที่เลือกพิจารณา คือ ขนาดของวัตถุดิบ (0.25-0.84 และ 0.84-1.50 มิลลิเมตร) อุณหภูมิ (350, 400, 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส) อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน (50, 100, 200 และ 300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที) เวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส (30, 60 และ 90 นาที) และสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพา (0, 5 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกวิเคราะห์สัดส่วนของกากของแข็ง ของเหลว และแก๊สที่เกิดขึ้น จากนั้นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น ความหนืด ค่าความร้อน และค่าความเป็นกรด-เบส) และองค์ประกอบทางเคมีต่อไป เมื่อทราบสภาวะที่เหมาะสมในการทำไพโรไลซิสด้วยกระบวนการแบบกึ่งต่อเนื่องแล้ว จึงนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทำไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

## 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

- 1.4.1 ค้นคว้า และรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม
- 1.4.2 ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อทราบปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน
- 1.4.3 ทำการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด
- 1.4.4 วิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
- 1.4.5 พัฒนาชุดทดลองที่ใช้ในการสกัดให้เป็นแบบต่อเนื่อง

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.5.1 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไฟโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน
- 1.5.2 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวปริมาณมากที่สุด
- 1.5.3 ทราบแนวทางที่เหมาะสมในการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์
- 1.5.4 ออกแบบระบบไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่องซึ่งมีค่าการลงทุนต่ำและสามารถนำไปขยายขนาด ประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวล [3]

เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีค่ามากขึ้น ในปัจจุบันที่นิยมทำกัน แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ

#### 2.1.1 การเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีทางชีวเคมี (Biochemical Conversion Process)

เช่น การเปลี่ยนของแข็งให้เป็นของเหลวโดยวิธีทางชีวเคมี (Biochemical liquefaction) และการเปลี่ยนของแข็งให้เป็นแก๊สโดยใช้เซลล์ขนาดเล็ก (Microbial gasification) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนชีวมวลไปเป็นแอลกอฮอล์หรือผลิตภัณฑ์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ

#### 2.1.2 การเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีทางความร้อน (Thermochemical Conversion Process)

กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ตามสถานะที่ใช้ และตามผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ

- ก) กระบวนการเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) ซึ่งจะให้ความร้อนออกมาตามชนิดของชีวมวล ความร้อนที่ได้มักนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิ และความดันสูง เพื่อใช้ขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า
- ข) กระบวนการแก๊สลิฟิเคชัน (Gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง หรือแก๊สชีวภาพ (Biogas) โดยมีองค์ประกอบเป็นแก๊สคาร์บอน ไดออกไซด์ มีเทน ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ เพื่อใช้สำหรับขับเคลื่อนกังหันแก๊ส (Gas turbine)
- ค) กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูง ในสถานะไร้อากาศ ทำให้เกิดการแตกสลายตัวของชีวมวล เกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลว และแก๊สผสม

กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี เป็นกระบวนการที่ใช้สถานะในการดำเนินการที่รุนแรงน้อยกว่ากระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้วิธีทางความร้อน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวิธีทางชีวเคมีจะไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ตารางที่ 2.1 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนองค์ประกอบของชีวมวล โดยวิธีชีวเคมี และวิธีทางความร้อน

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเปลี่ยนองค์ประกอบของชีวมวล [3]

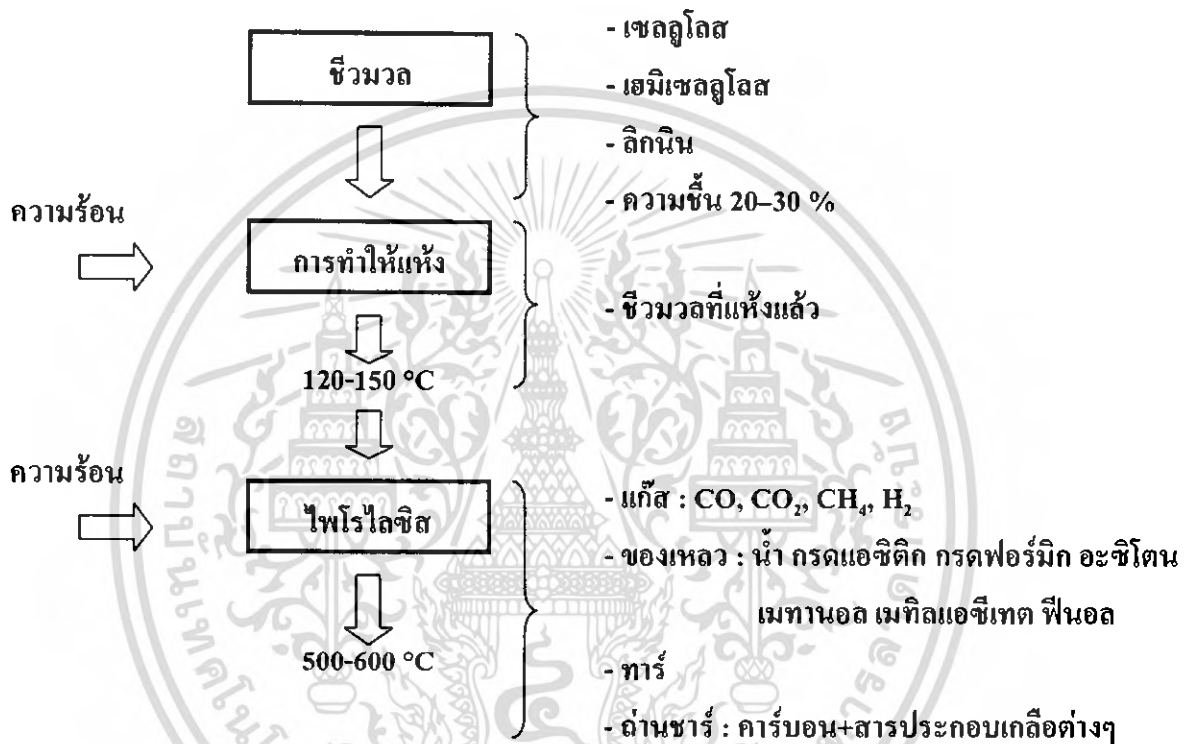
|            | การใช้ประโยชน์           | วิธีชีวเคมี | วิธีใช้พลังงานความร้อน |
|------------|--------------------------|-------------|------------------------|
| เชื้อเพลิง | สารแต่งเติม              | √           | √                      |
|            | แอลกอฮอล์                | √           | √                      |
|            | ถ่านชาร์                 |             | √                      |
|            | ดีเซล                    |             | √                      |
|            | กระแสไฟฟ้า               |             | √                      |
|            | น้ำมันเตา                |             | √                      |
|            | แก๊ส                     | √           | √                      |
|            | เบนซิน                   |             | √                      |
|            | ไฮโดรเจน                 | √           | √                      |
| สารเคมี    | อะซีโตน                  | √           |                        |
|            | บิวทานอล                 | √           |                        |
|            | เอทานอล                  | √           | √                      |
|            | ไฮโดรเจน                 | √           | √                      |
|            | มีเทน                    | √           | √                      |
|            | สารอื่นๆที่มีลักษณะเฉพาะ | √           | √                      |
|            | เมทานอล                  |             | √                      |
|            | เรซิน                    |             | √                      |

## 2.2 กระบวนการไพโรไลซิส

ไพโรไลซิส [4] คือ กระบวนการที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของสารอินทรีย์ โดยใช้ความร้อนสูง ในสภาวะที่ไร้อากาศ เกิดที่อุณหภูมิระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส เป็นกระบวนการทางเคมีแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible reaction) พันธะภายในโมเลกุลของสารอินทรีย์จะแตกตัวเนื่องจากความร้อนที่ได้รับเข้าไป องค์ประกอบที่ระเหยได้จะกลายเป็นแก๊ส เช่น มีเทน ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นต้น แก๊สบางส่วนจะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลว เรียกว่าน้ำมันชีวภาพ มีองค์ประกอบ เช่น กรดแอซิติก (Acetic acid) เมทานอล (Methanol) เป็นต้น ส่วนองค์ประกอบที่ระเหยไม่ได้ จะกลายเป็นของแข็งหรือที่เรียกว่า ถ่านชาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการไพโรไลซิสแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 โดยเริ่มจากการทำให้ชีวมวลซึ่งประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่มีความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 20–30 โดยน้ำหนัก ให้ปราศจากน้ำ โดยกระบวนการทำให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 120–150 องศาเซลเซียส จากนั้นชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 500–600 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายพันธะทางเคมีของโมเลกุล ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สต่างๆ และของเหลว



รูปที่ 2.1 กระบวนการไพโรไลซิส [3]

การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส จะขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ธรรมชาติของวัสดุ เวลา อุณหภูมิ ขนาดวัตถุดิบที่ใช้ เป็นต้น

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) เป็นวิธีที่ใช้กันมานานสำหรับการผลิตถ่านไม้ ส่วนกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) ซึ่งมีอัตราการให้ความร้อนสูง เวลาที่สารอยู่ในระบบสั้น และมีการลดอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ลงอย่างรวดเร็ว มักจะใช้เพื่อผลิตของเหลว

ของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และสารประกอบคาร์บอนที่เกิดจากการสลายตัวของสารประกอบอินทรีย์

ของเหลวจะเป็นของผสมของน้ำ และสารอินทรีย์ ประกอบด้วยกรด แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน เอสเทอร์ อนุพันธ์ที่มีโครงสร้างเป็นวง (Heterocyclic derivatives) และสารประกอบฟีนอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันดิน หรือทาร์ จะประกอบด้วยยางเหนียว สารมัธยันคาร์โบไฮเดรต (Intermediate carbohydrates) ฟีนอล แอโรแมติก และแอลดีไฮด์

ส่วนแก๊ส จะประกอบด้วย มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไออน้ำ ไฮโดรเจน และแก๊สของสารอินทรีย์ชั้นสูง

การสลายตัวขั้นปฐมภูมิของชีวมวล (Primary decomposition) จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส เป็นกระบวนการแตกตัวของโครงสร้างภายในโมเลกุล ส่วนการสลายตัวจากความร้อนในขั้นทุติยภูมิ (Secondary thermolysis) จะเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส เป็นกระบวนการสร้างสารแอโรแมติก

เมื่อเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสกับกระบวนการเผาไหม้แบบธรรมดา พบว่ากระบวนการไพโรไลซิสมีข้อดีกว่ากระบวนการเผาไหม้แบบธรรมดา คือ ได้น้ำมันชีวภาพจากปฏิกิริยา และในกระบวนการเผาไหม้แบบธรรมดานั้น จำเป็นต้องติดตั้งระบบปรับปรุงคุณภาพแก๊สที่เกิดขึ้นก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ เพราะอาจจะมีกาเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดแก๊สมลภาวะ

### 2.2.1 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส [5]

กระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- ก) Anhydrous pyrolysis เป็นกระบวนการที่ไม่มีไอน้ำเข้าไปเกี่ยวข้องในการเผา มักจะทำการที่อุณหภูมิสูงกว่า 430 องศาเซลเซียส ใช้สำหรับการผลิตถ่านไม้ และเชื้อเพลิงเหลว
- ข) Hydrous pyrolysis เป็นกระบวนการที่มีไอน้ำเข้าไปเกี่ยวข้อง ใช้ในการเผาสารอินทรีย์ให้เป็นน้ำมันดิบเบา
- ค) Vacuum pyrolysis เป็นการเผาสารอินทรีย์ในสภาวะสูญญากาศ เพื่อที่จะใช้ลดจุดเดือดของสารอินทรีย์ลง

กระบวนการไพโรไลซิสยังสามารถแบ่งตามสภาวะที่ใช้ได้เป็น 3 ประเภท ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจำแนกประเภทของกระบวนการไพโรไลซิสตามสภาวะที่ใช้ [4]

| Type  | Residence Time            | Heating Rate                          | Tcmp. Max (°C ) | Main Product |
|-------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------|--------------|
| Slow  | Hrs – Days<br>5 – 30 min. | Very low<br>< 10 °C.sec <sup>-1</sup> | 400 - 600       | Solid        |
| Fast  | 0.5 – 5 sec.              | 10-100 °C.sec <sup>-1</sup>           | 600 - 650       | Liquid       |
| Flash | < 0.5 sec.                | > 100 °C.sec <sup>-1</sup>            | 1000            | Gas          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส [4]

- ก) องค์ประกอบของวัสดุ (Compositions of material) เป็นสิ่งที่จะกำหนดผลิตภัณฑ์ที่ได้
- ข) อุณหภูมิ (Temperature) เป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด ที่ส่งผลกระทบต่อส่วนประกอบและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยสามารถแบ่งช่วงของอุณหภูมิได้เป็น 3 ช่วง คือ
- ช่วงแรก คือ อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิที่บรรยากาศปกติ จนถึงอุณหภูมิประมาณ 135 องศาเซลเซียส ในขั้นนี้สารที่ระเหยออกมาส่วนใหญ่ จะเป็นความชื้นในวัสดุ
  - ขั้นที่สอง อุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 135-400 องศาเซลเซียส สารที่ระเหยได้ประมาณ 75 %จะถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงนี้
  - ขั้นที่สาม อยู่ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่ไม่เกิน 600 องศาเซลเซียส โดยที่หลังจากอุณหภูมิเกิน 600 องศาเซลเซียสไปแล้ว กระบวนการไพโรไลซิสจะสิ้นสุดลงจะไม่มีสารระเหยออกมาอีก
- ค) ความดัน (Pressure) จะมีผลต่อส่วนประกอบของแก๊สที่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิตั้งแต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้น การไพโรไลซิสชีวมวลจะมีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทนจะลดลง และที่ความดันสูงๆ ปริมาณของสารที่ระเหยได้จะลดลง แต่มีการผลิตแก๊สไฮโดรคาร์บอนเบาออกมา และที่ความดันต่ำๆ ปริมาณสารที่ระเหยได้จะเพิ่มขึ้น
- ง) อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ปริมาณของของเหลวที่ได้จะลดลง เมื่อมีการเพิ่มอัตราการให้ความร้อน
- จ) ขนาดของวัตถุดิบ (Particle size) วัสดุขนาดใหญ่ จะมีพื้นที่ผิวน้อย การให้ความร้อนจะช้ากว่าวัสดุในที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นอุณหภูมิจึงจะต่ำกว่าวัสดุที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิในวัสดุที่มีขนาดใหญ่ ก็เป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ ทำให้ปริมาณสารที่ระเหยได้น้อยกว่าวัสดุที่มีขนาดเล็ก
- ฉ) ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic agent) การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ประมาณ 10 %

## 2.2.3 การใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

- ก) ฟีนอล ใช้เป็นสารเคมีในอุตสาหกรรมพลาสติก สารยึดติด
- ข) กรดแอซิดิก ใช้ผลิตน้ำส้มสายชู ไวนิลอะซิเตท เป็นต้น
- ค) เมทานอล ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีพวก พอร์มอลดีไฮด์ กรดแอซิดิก รวมทั้งใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ปาล์มน้ำมัน

ในสิ่งมีชีวิตทั้งพืช และสัตว์จะมีแหล่งกักเก็บพลังงานหรือสะสมพลังงานไว้ภายใน ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อเปลี่ยนรูปให้เป็นพลังงานได้ แหล่งสะสมพลังงานดังกล่าวจะถูกเก็บไว้ในรูปของมวลสารหรือสสารทางชีวภาพ หรือที่เรียกว่า ชีวมวล

ศูนย์วิจัย และฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม [1] ได้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับชีวมวลในส่วนของข้อมูล และการใช้ประโยชน์ชีวมวลในประเทศไทยไว้ว่า ชีวมวลหมายถึง มวลสารหรือสสารที่ได้จากสิ่งมีชีวิต ทั้งพืชหรือสัตว์ ซึ่งมวลสารเหล่านี้จะเป็นแหล่งกักเก็บหรือสะสมพลังงานเคมี สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อเปลี่ยนรูปให้เป็นพลังงานได้

แหล่งชีวมวลที่สำคัญส่วนใหญ่ได้จากพืชเป็นหลัก ได้แก่ วัสดุที่เหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น แกลบ ฟางข้าว กะลามะพร้าว ชานอ้อย เหง้ามันสำปะหลัง กาก และเส้นใยปาล์ม นอกจากนี้ยังมีเศษไม้ที่ได้จากการแปรรูปไม้ ส่วนชีวมวลที่ได้จากสัตว์ เช่น มูลสัตว์ เป็นต้น

พลังงานที่ได้จากพืชนั้น เป็นพลังงานจากแสงอาทิตย์ที่ถูกเก็บสะสมไว้ในพืช โดยกระบวนการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ให้เป็นสารประกอบที่เรียกว่า คาร์โบไฮเดรต (แป้ง น้ำตาลและเซลลูโลส) โดยพลังงานจากแสงอาทิตย์จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีในรูปของพันธะเคมีของสารประกอบเหล่านี้ ซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นอาหารในการเจริญเติบโตตามส่วนต่างๆ ของพืช เช่น ราก ลำต้น ใบ ดอก และผล ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่สามารถหาได้โดยทั่วไป และที่สำคัญมีราคาถูกกว่าเชื้อเพลิงหรือพลังงานชนิดอื่นๆ

จะเห็นว่าในส่วนต่างๆ ของพืชจะมีพลังงานสะสมอยู่ภายใน จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่นักวิจัยหลายสาขาพยายามศึกษาค้นคว้า เพื่อนำพลังงานดังกล่าวมาใช้ประโยชน์

ในการทำวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์ชีวมวลในรูปของกะลาปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ปาล์มน้ำมัน [6-7] หมายถึง พืชชนิดต้นใบเลี้ยงเดี่ยวชนิดหนึ่ง ที่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* Jacq และ *Elaeis oleifera*.

### 2.3.1 ปริมาณการผลิตปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันสามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่เป็นเขตรมรุ่ม มีอากาศร้อน และฝนตกชุก รายงานภาวะการผลิตทางการเกษตรเปรียบเทียบกับเนื้อที่เพาะปลูกรายปีของปาล์มน้ำมันพบว่า ปาล์มน้ำมันมีการปลูกกันมากในพื้นที่ภาคใต้ของประเทศไทย แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 จังหวัดที่มีเนื้อที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันสูงสุด 5 อันดับแรกในปี พ.ศ. 2549

| ระดับข้อมูล (จังหวัด) | เนื้อที่ฮินตัน (ไร่) |
|-----------------------|----------------------|
| กระบี่                | 728,528              |
| สุราษฎร์ธานี          | 787,152              |
| ชุมพร                 | 408,857              |
| ตรัง                  | 102,249              |
| รวมทั้งประเทศ         | 2,176,851            |

ที่มา : ฝ่ายระบบสารสนเทศการผลิตทางการเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร [8]

ภาคใต้ของไทยมีลักษณะภูมิอากาศที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปาล์มน้ำมัน แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 พื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันของแต่ละจังหวัดในภาคต่างๆ [1]

จากรูปที่ 2.2 พื้นที่สีเข้ม แสดงถึงพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่เพาะปลูกในระดับ 10,000 – 500,000 ไร่ พบว่าทางภาคใต้ของไทย มีปริมาณการปลูกปาล์มน้ำมันประมาณร้อยละ 95 ของพื้นที่การเพาะปลูกปาล์มทั้งประเทศ [1]

**2.3.2 กระบวนการแปรรูปปาล์มน้ำมัน**

เกษตรกรชาวสวนปาล์มจะขายผลปาล์มสด (Fresh fruit bunches) ให้กับโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (Oil mill) เพื่อผ่านกระบวนการแปรรูปในการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil : CPO) และจำหน่ายต่อให้กับโรงงานกลั่น (Refinery) เพื่อผ่านกรรมวิธีการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (RBD palm oil)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

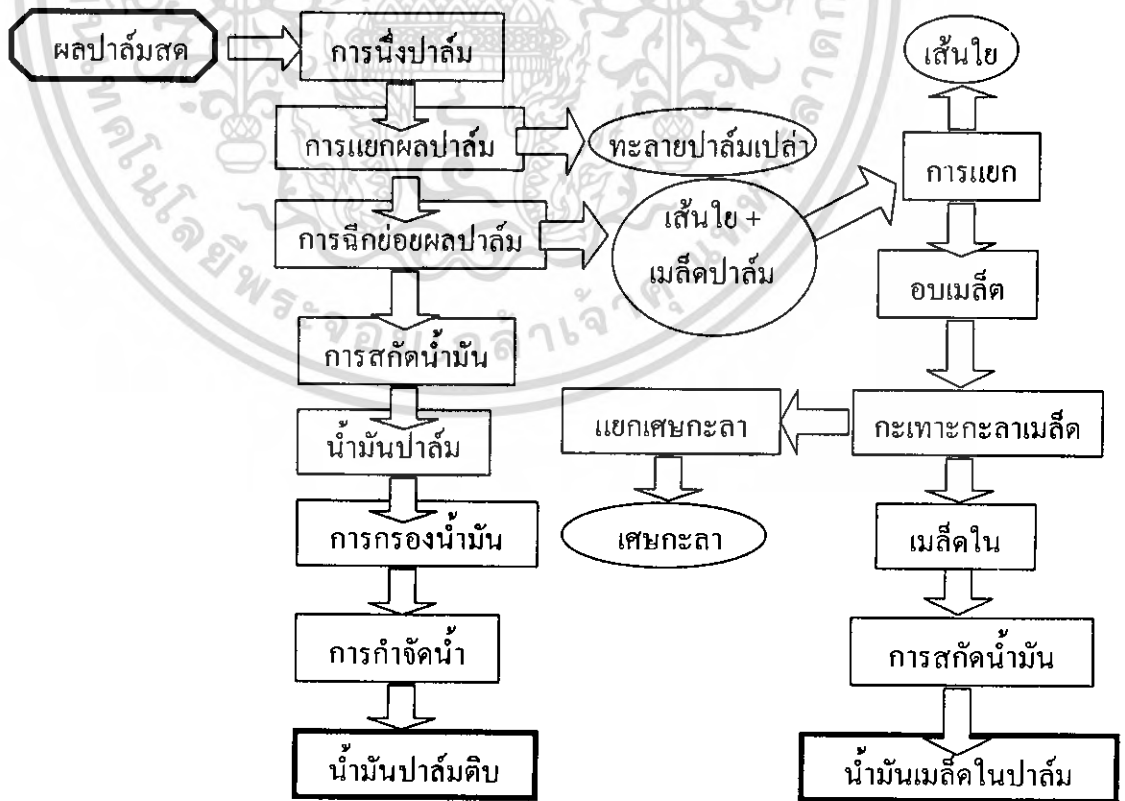
กระบวนการแปรรูป สามารถแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม และ โรงงานกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

ก) โรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โรงงานสกัดน้ำมันออกจากปาล์มสดในประเทศไทย แบ่งได้ เป็น 2 ประเภท ตามเทคโนโลยีการผลิต ดังนี้

- โรงงานสกัดแบบมาตรฐาน เป็นโรงงานที่มีขนาดใหญ่ และมีกระบวนการผลิตเป็นแบบ มาตรฐาน มีกำลังการผลิต 10 – 60 ตันทะลายปาล์มสดต่อชั่วโมง เป็นกระบวนการสกัด แบบแยกเปลือก และเมล็ดออกจากกัน ผลผลิตที่ได้เป็นน้ำมันดิบ 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์ม ดิบ (Crude Palm Oil : CPO) สกัดได้จากผลปาล์มสด (Fresh fruit bunch) มีลักษณะเป็น น้ำมันข้น มีสีส้มขุ่น ณ อุณหภูมิปกติ เมื่ออุ่นด้วยความร้อนน้ำมันจะใส และมีสีส้มอม แดง ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์ม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องอื่นๆ

น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Crude Palm Kernel Oil : KO) สกัดได้จากเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel) มีลักษณะเป็นน้ำมันข้น มีสีเหลืองขุ่น ณ อุณหภูมิปกติ เมื่ออุ่นด้วยความร้อน น้ำมันจะใส และมีสีเหลืองอมส้ม ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการกลั่นน้ำมันเมล็ดใน ปาล์ม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องอื่นๆ

ในการสกัดน้ำมันปาล์มในโรงงานขนาดใหญ่จะใช้วัตถุดิบหลัก คือ ผลปาล์มสดทั้ง ทะลาย ขั้นตอนการผลิต แสดงดังรูปที่ 2.3

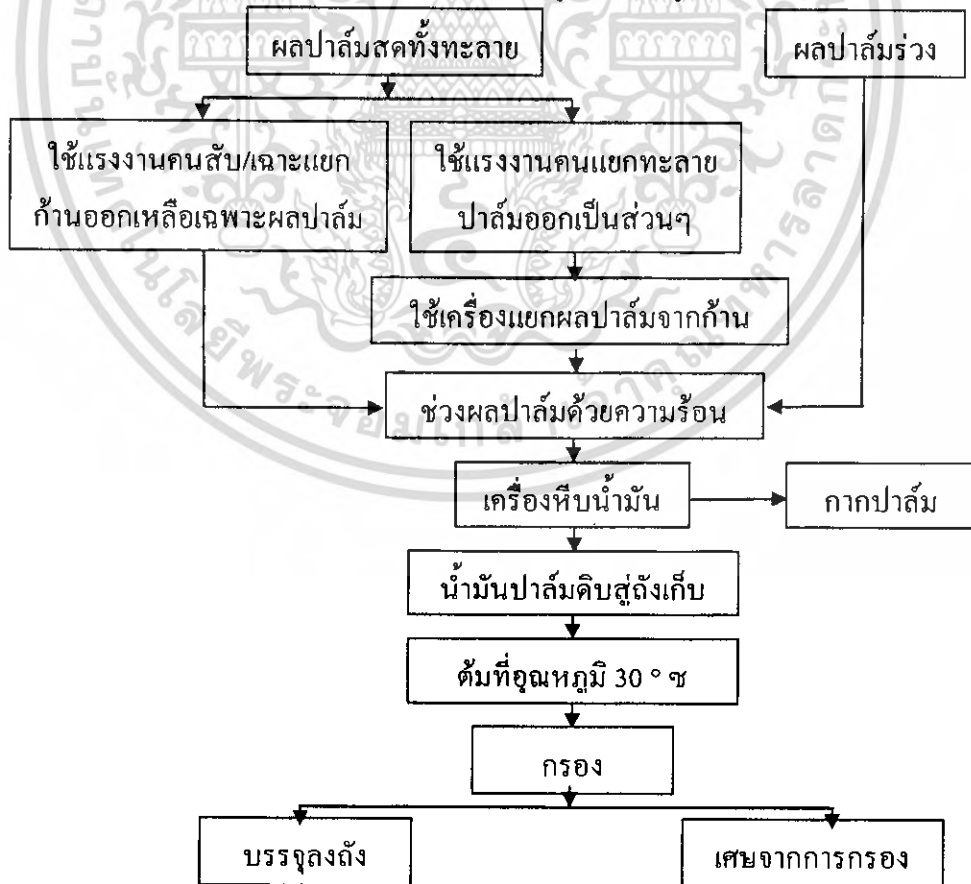


รูปที่ 2.3 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานสกัดแบบมาตรฐาน [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสกัดจะเริ่มจากการนำผลปาล์มทั้งทะลายไปนึ่ง หรืออบด้วยความร้อน โดยใช้ไอน้ำ (Sterilization) เพื่อหยุดการทำงานของเอนไซม์ที่จะเร่งการเกิดกรดไขมันอิสระ และช่วยให้ผลปาล์มหลุดออกจากทะลายปาล์มได้ง่าย นอกจากนี้ยังทำให้เนื้อปาล์มนุ่ม ง่ายต่อการหีบน้ำมันออก จากนั้นแยกผลปาล์ม (Bunch stripping) ด้วยเครื่องเหวี่ยง แยกผลปาล์มออกจากทะลายเปล่า แล้วฉีกย่อยผลปาล์มออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ เนื้อปาล์ม ส่วนที่สอง คือ กากเส้นใย และเมล็ดปาล์ม เนื้อปาล์มจะส่งเข้าเครื่องหีบน้ำมัน แล้วนำไปกรอง และสกัดความชื้นเพื่อให้น้ำมันมีอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น ก่อนที่จะส่งเข้าสู่โรงงานกลั่นน้ำมันบริสุทธิ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในส่วนแรก คือน้ำมันปาล์มดิบ สำหรับส่วนที่สอง กากเส้นใย และเมล็ดปาล์มจะนำไปแยกออกจากกัน เส้นใยจะนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ส่วนของเมล็ดจะนำไปอบแล้วแยกส่วนของกะลา และเมล็ดในออกจากกัน เมล็ดในที่ได้เมื่อนำไปสกัดน้ำมัน จะได้น้ำมันเมล็ดในปาล์ม

- โรงงานสกัดแบบรวมหรือหีบผสม เป็นโรงงานที่มีขนาดเล็ก โรงงานประเภทนี้ จะใช้ผลปาล์มร่วงเป็นวัตถุดิบส่วนใหญ่ และอาจจะมีผลปาล์มสดบ้างในปริมาณเล็กน้อย กระบวนการสกัดน้ำมันจะหีบเอาน้ำมันปาล์มออกจากผลปาล์มสด และเมล็ดในปาล์ม ได้น้ำมันดิบจากผล และเมล็ดในที่ผสมกันอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.4



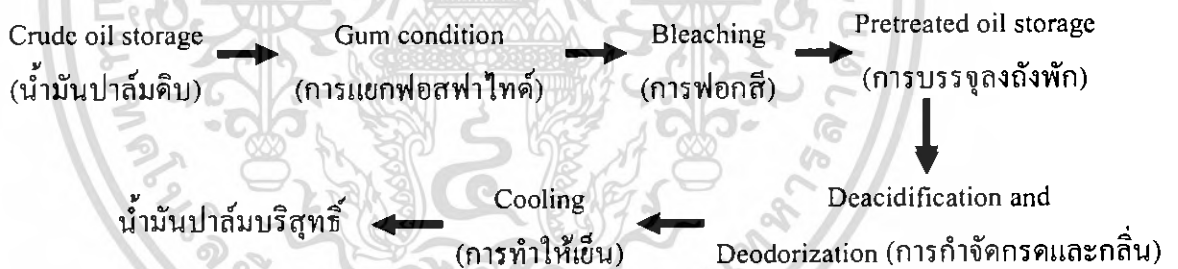
รูปที่ 2.4 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานสกัดแบบรวมหรือหีบผสม [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสกัดจะเริ่มจาก นำผลปาล์มสดทั้งทะลายที่มีปริมาณเล็กน้อยมาล้าง หรือ ฉေး โดยใช้แรงงานคน เพื่อแยกผลปาล์มและทะลายปาล์มออกจากกัน ส่วนของทะลายปาล์มจะส่งเข้าเครื่องแยกผลปาล์มออกจากกัน ผลปาล์มที่ได้จะนำไปรวมกับผลปาล์มในต้อนต้น และผลปาล์มร่วงที่มีปริมาณมาก เพื่อช่วงผลปาล์มด้วยความร้อน แล้วหีบ น้ำมัน ได้น้ำมัน และกากปาล์ม น้ำมันปาล์มดิบจะส่งเข้าสู่ถังเก็บ คัมให้ร้อนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากนั้นกรองเอาส่วนที่ปนเปื้อนออกไป น้ำมันที่ได้จะบรรจุลงถึงข้อเสียของการสกัดแบบนี้ คือ ได้น้ำมันดิบที่ใหม่ และฟอกสียาก อัตราส่วนของกรดไขมันอิสระค่อนข้างสูง

ข) โรงกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ เป็นขั้นตอนในการกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ในน้ำมันเพื่อให้ได้น้ำมันที่มีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานที่กำหนด สามารถจำหน่ายกระบวนการกลั่นน้ำมันบริสุทธิ์ออกเป็น 2 ระบบ คือ กระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางเคมี

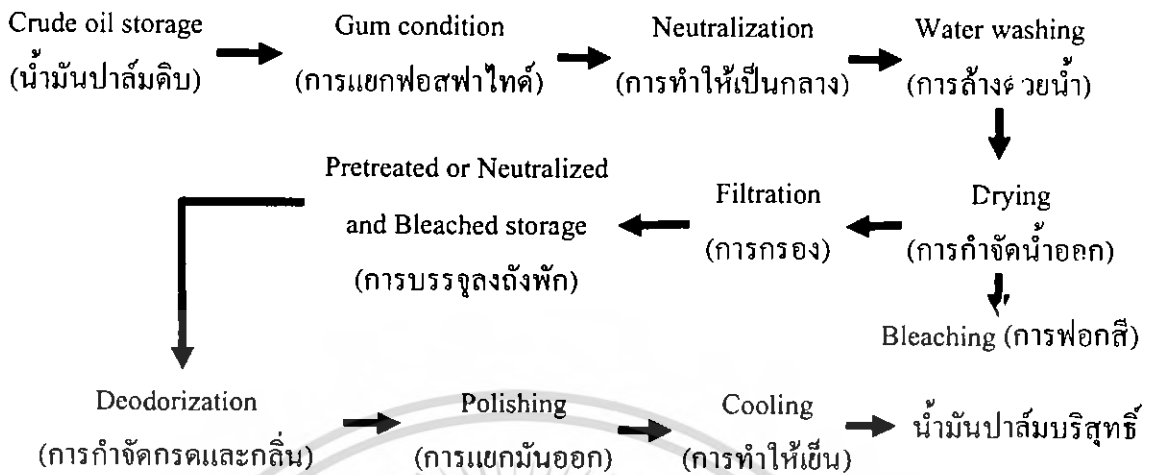
- กระบวนการทางเคมี (Chemical refining process) เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีเกือบทุกขั้นตอน เริ่มจากนำน้ำมันปาล์มดิบมาแยกฟอสฟาไทด์ออกโดยใช้กรดฟอสฟอริก ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงถึงกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี



รูปที่ 2.5 กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางเคมี [9, 10]

เมื่อเติมกรดฟอสฟอริกแล้ว จะกำจัดกรดไขมันอิสระโดยใช้สาร โซดาไฟ จากนั้นนำน้ำมันไปไล่ความชื้น และฟอกสีด้วยดินฟอกสี กรองดินฟอกสีออก และผ่านไปยังกระบวนการกำจัดกลิ่น โดยใช้ไอน้ำเพื่อแยกเอากรดที่เหลืออยู่ พร้อมทั้งแอลดีไฮด์ และคีโตนซึ่งเป็นตัวทำให้น้ำมันเหม็นหืนห็นออก ก็จะได้ น้ำมันบริสุทธิ์ หรือ น้ำมันอาร์บีดี (RBD : Refining, Bleaching, Deodorization)

- กระบวนการทางกายภาพ (Physical refining process) เป็นกระบวนการที่นำน้ำมันปาล์มดิบมากำจัดสิ่งเจือปนพวกฟอสฟาไทด์ออก โดยใช้กรดฟอสฟอริก ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงถึงกระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางกายภาพ



รูปที่ 2.6 กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการทางกายภาพ [9-10]

เมื่อเติมกรดฟอสฟอริก สารที่เจือปนอยู่จะรวมตัวเป็นก้อน ฟอกสีน้ำมันด้วยดินฟอกสี และผ่านเข้าเครื่องกรอง เพื่อแยกเอาดินฟอกสี และตะกอนที่เจือปนออกจากนั้น กำจัดกรด และกลิ่น เพื่อแยกเอากรดไขมันอิสระ แอลคิลไฮด์ และคีโตนออกโดยวิธีการพ่นไอน้ำที่อุณหภูมิ 240 – 260 องศาเซลเซียส จะได้น้ำมันอาร์บีดี

โดยทั่วไปแล้ว ในการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ มักจะนิยมใช้วิธีการทางกายภาพ เนื่องจากข้อได้เปรียบ คือ ต้นทุนการผลิตต่อหน่วยต่ำ เพราะใช้สารเคมีน้อยกว่า กระบวนการทางเคมี และยังได้ปริมาณน้ำมันที่มากกว่า

### 2.3.3 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมต่อเนื่องน้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์ม และน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระชนิดต่างๆ ซึ่งเมื่อนำมาแยก และทำให้บริสุทธิ์ จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่อเนื่องได้อย่างมากมาย กรดโอเลอิกเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว และกรดสเตียริกเป็นกรดไขมันอิ่มตัว กรดทั้งสองชนิดเป็นกรดที่สำคัญที่ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง เพื่อการอุปโภคต่างๆ

การใช้ประโยชน์จากน้ำมันปาล์มของอุตสาหกรรมต่อเนื่องเพื่อการอุปโภค และบริโภค แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การใช้ไขมันปาล์มในอุตสาหกรรมเพื่อการอุปโภคและบริโภค [9]

| ประเภทของอุตสาหกรรม   | ร้อยละ |
|---|--------|
| อุตสาหกรรมเพื่อการบริโภค  | 60     |
| อุตสาหกรรมสบู่  | 10.5   |
| อุตสาหกรรมของว่างและขบเคี้ยว                                      | 9.5    |
| อุตสาหกรรมบริโภคอื่น ๆ เช่น พลาสติก เครื่องสำอาง และยางรถยนต์ ฯลฯ | 7      |
| อุตสาหกรรมบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป                                     | 5.5    |
| อุตสาหกรรมนมข้นหวานและนมจืด                                       | 5      |
| อุตสาหกรรมครีมเทียม   | 1.5    |
| อุตสาหกรรมเนยขาวและเนยเทียม                                       | 1      |

ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องน้ำมันปาล์มมีดังนี้

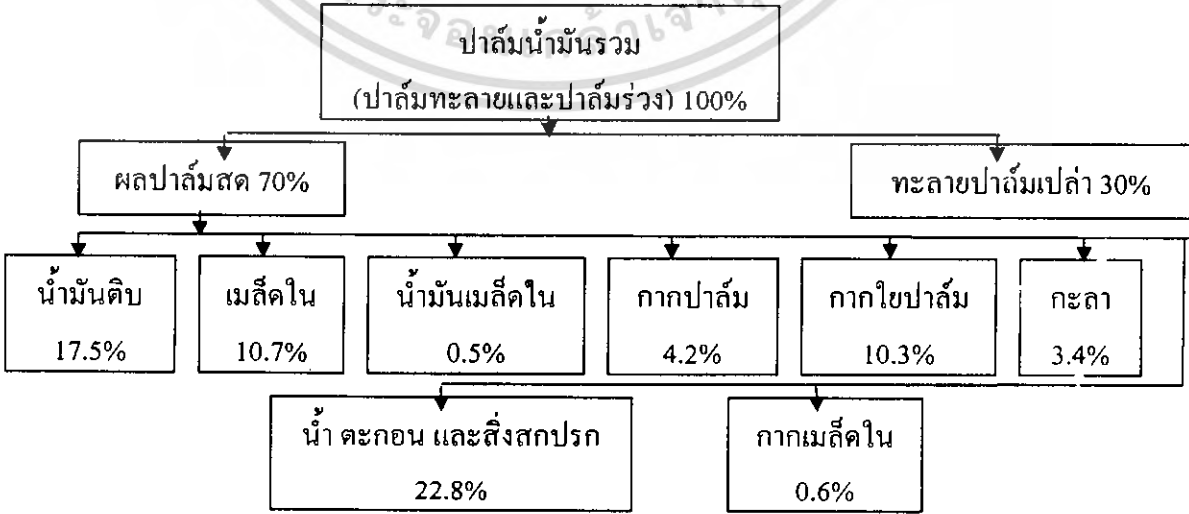
- ก) น้ำมันปรุงอาหาร ตามปกติน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้อง มี 2 ส่วน คือ น้ำมันส่วนใสหรือโอเลอิน ร้อยละ 65-70 และน้ำมันส่วนที่ข้น ร้อยละ 30-35 น้ำมันปรุงอาหารจะได้รับการนำเอาน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์มาแยกส่วนเอาเฉพาะน้ำมันส่วนใสออกมา โดยกระบวนการแยกส่วน น้ำมันโอเลอินมีสภาพเป็นของเหลวใสที่อุณหภูมิ 18-20 องศาเซลเซียส แต่ถ้าลดอุณหภูมิลงมาถึง 7 องศาเซลเซียส น้ำมันจะเริ่มข้นเป็นตะกอน ดังนั้นจึงต้องนำไปผสมกับน้ำมันชนิดอื่นที่มีจุดขุ่นดำ (Cloud point) เช่น ถ้าผสมกับน้ำมันถั่วเหลืองในอัตราส่วน 50 : 50 จุดขุ่นจะลดลงมาเหลือประมาณ 0.5 องศาเซลเซียส
- ข) มาการีนหรือเนยเทียม มักทำมาจากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม เพราะสมบัติทางกายภาพเหมาะกับการทำมาการีน ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็ง และมีคุณสมบัติพิเศษ คือ ละลายได้รวดเร็วเมื่อสัมผัสลิ้น เนื่องจากมาการีนที่ผลิตได้มีหลายแบบ ดังนั้นจึงมีสูตรการทำแตกต่างกันไป โดยทั่วไปในเชิงอุตสาหกรรม มักใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ร้อยละ 60 น้ำมันเมล็ดในร้อยละ 30 และน้ำมันสเตียรีนร้อยละ 10
- ค) น้ำมันสำหรับทอดในอุตสาหกรรม เนื่องจากน้ำมันชนิดนี้มีราคาถูก และมีคุณสมบัติอยู่ตัว ได้ดีกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ คือ ไม่ทำปฏิกิริยากับอากาศเมื่อถูกความร้อนจนมีกลิ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งมักจะใช้น้ำมันปาล์มเติมกับไฮโดรเจน ซึ่งมีคุณสมบัติอยู่ตัว และยังทำให้วัสดุที่นำมาทอดกรอบอีกด้วย เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมมันฝรั่งทอด โคนัท ข้าวเกรียบทอด และบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ง) เนยขาว น้ำมันปาล์มที่ฟอกบริสุทธิ์สามารถนำมาแปรรูปให้เป็นเนยขาวได้ โดยทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เนยขาวนำมาผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เค้ก คุกกี้ หน้าขนมเค้ก ทำไส้ขนมปังกรอบ ทำขนมพาย เป็นต้น
- จ) น้ำมันปาล์มเติมไฮโดรเจน (Hydrogenated palm oil) ทั้งน้ำมันปาล์ม และน้ำมันเมล็ดในปาล์มเมื่อนำมาเติมไฮโดรเจน จะทำให้น้ำมันมีกรดไขมันอิ่มตัวสูง จึงเป็นของแข็ง และอยู่ตัวไม่ออกซิไดส์กับอากาศ นำมาใช้เป็นน้ำมันทอดกรอบหรือเวเฟอร์ และเครื่องสำอาง ส่วนน้ำมันเมล็ดในที่เติมไฮโดรเจนแล้ว มักนำมาทำทอฟฟี่ เคลือบช็อกโกแลต ขนมปังกรอบ ไอศกรีม เป็นต้น
- ฉ) นมข้นหวาน น้ำมันปาล์มนำมาใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมนมข้นหวาน เนื่องจากมีคุณสมบัติเหมาะสมหลายอย่าง เช่น ไม่มีกลิ่น
- ช) ไอศกรีม นำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตไอศกรีมร่วมกับน้ำมันมะพร้าวอย่างละครึ่ง
- ซ) สนุ้ น้ำมันปาล์มสามารถนำมาใช้ผลิตสนุ้ได้ทั้งปาล์มสดเคียวร้อยละ 40 น้ำมันปาล์มร้อยละ 40 และใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มหรือน้ำมันมะพร้าวร้อยละ 10
- ฌ) ใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ โดยการนำน้ำมันปาล์มผสมกับเมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol) และโซดาไฟ (Sodium hydroxide) ได้เมทิลเอสเทอร์ (Methyl ester) ซึ่งมีคุณสมบัติเทียบเท่าน้ำมันดีเซลใช้กับเครื่องยนต์ได้ กรรมวิธีดังกล่าวเรียกว่าการนึ่งน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์มาผลิตเป็นไบโอดีเซล (Bio diesel)

2.3.4 วัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการสกัดปาล์มน้ำมัน

ในการสกัดปาล์มน้ำมันเมื่อพิจารณาจากผลปาล์มทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีวัสดุเหลือทิ้งเกิดขึ้น เช่น ทะลายเปล่า กากปาล์ม กากใบปาล์ม กากเมล็ดใน กะลาปาล์ม และตะกอนสิ่งสกปรก ในสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบที่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วัสดุส่วนต่างๆ ที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานอุตสาหกรรม [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 ประโยชน์ของวัสดุเหลือทิ้งจากการสกัดปาล์มน้ำมัน [6, 9]

ทะลายปาล์มเปล่าที่ได้หลังจากแยกผลปาล์มออกไปแล้ว จะนำไปดึ่งเป็นเส้นใยกลับไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต ทะลายเปล่า (สด) ไม่นิยมใช้เป็นเชื้อเพลิง เนื่องจากติดไฟยาก ค่อนข้างมาก และจะต้องทำให้แห้งก่อน ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น จึงใช้คลุมหน้าดินเพื่อรักษาความชื้นในดินในลักษณะของปุ๋ยชีวภาพ ให้เกิดการย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยเพิ่มธาตุอาหารในดิน เหมาะสมสำหรับใช้ในพื้นที่แห้งแล้ง นอกจากนี้ยังใช้เป็นวัสดุเพาะเห็ดต่างๆ ได้ด้วย ในแต่ละจังหวัดจะมีปริมาณการใช้ประโยชน์จากทะลายปาล์มเปล่าที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ปริมาณและการใช้ประโยชน์จากทะลายปาล์มเปล่าของแต่ละจังหวัด [6]

| จังหวัด         | ปริมาณและการใช้ประโยชน์จากทะลายปาล์มเปล่าของโรงงาน (ตันปี) |               |            |            |           |
|-----------------|--|---------------|------------|------------|-----------|
|                 | ทั้งหมด  | คลุมดิน, ปุ๋ย | เชื้อเพลิง | ให้ชาวบ้าน | เหลือทิ้ง |
| กระบี่          | 243,754  | 98,823        | -          | 40,000     | 104,933   |
| สุราษฎร์ธานี    | 134,114  | 35,000        | -          | -          | 99,114    |
| ชุมพร           | 38,300   | 19,800        | 1,800      | -          | 16,700    |
| สตูล            | 24,505   | -             | -          | -          | 24,505    |
| ตรัง            | 66,880   | 80            | 13,685     | -          | 53,115    |
| ชลบุรี          | 11,155   | 8,660         | -          | -          | 4,295     |
| ประจวบคีรีขันธ์ | -  | -             | -          | -          | -         |
| รวม             | 518,708  | 160,568       | 15,485     | 40,000     | 302,660   |
| ร้อยละ          | 100  | 30.9          | 3.0        | 7.7        | 58.4      |

จากตารางที่ 2.5 จะเห็นว่าปริมาณทะลายปาล์มเปล่าทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือทิ้งจากโรงงาน จะประกอบไปด้วยวัสดุเหลือทิ้งในปริมาณที่สูงที่สุด 58.4 เปอร์เซ็นต์ นักวิจัยหลายๆ สาขา พยายามศึกษาค้นคว้าในการที่จะเอาวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว มาใช้ให้ประโยชน์สูงสุด

เส้นใยผลปาล์ม หรือกากใยปาล์ม เป็นส่วนของเปลือกชั้นนอกที่ล้อมรอบกะลาปาล์มไว้ ด้านในมีสีเหลืองอมแดง ชุ่มด้วยน้ำมันที่นำไปสกัดเป็นน้ำมันปาล์มดิบออกหมดแล้ว ลักษณะเป็นเส้นฝอย หรือขุยเล็กๆ ส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิง แสดงดังตารางที่ 2.6

72137

ตารางที่ 2.6 ปริมาณและการใช้ประโยชน์จากกากไฮปาล์มของโรงงาน (ต้นปี) ของแต่ละจังหวัด [6]

| จังหวัด      | ปริมาณและการใช้ประโยชน์จากกากไฮปาล์มของโรงงาน (ต้นปี) |               |            |            |           |
|--------------|---|---------------|------------|------------|-----------|
|              | ทั้งหมด   | คลุมดิน, ปุ๋ย | เชื้อเพลิง | ให้ชาวบ้าน | เหลือทิ้ง |
| กระบี่       | 86,624  | -             | 39,921     | -          | 16,703    |
| สุราษฎร์ธานี | 83,600  | -             | 82,600     | -          | 1,000     |
| ชุมพร        | 2,260   | 840           | 1,410      | -          | -         |
| สตูล         | 10,647  | -             | 7,800      | -          | 2,847     |
| ตรัง         | 25,718  | -             | 21,871     | 500        | 3,347     |
| รวม          | 178,839   | 840           | 153,602    | 500        | 23,897    |
| ร้อยละ       | 100   | 0.5           | 85.8       | 0.3        | 13.4      |

จากตารางที่ 2.6 จะเห็นว่าปริมาณกากไฮปาล์มทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานประกอบด้วยกากไฮปาล์มที่ใช้ทำเชื้อเพลิงในปริมาณที่สูงที่สุด 85.8 เปอร์เซ็นต์สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องจักร และหม้อไอน้ำในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มได้เป็นอย่างดี เนื่องจากติดไฟได้ง่าย และมีความชื้นน้อยมาก

กะลาปาล์ม เป็นส่วนที่หุ้มเมล็ดในปาล์ม มีลักษณะที่แข็งมาก แยกออกจากเปลือกนอกที่หีบน้ำมันออกแล้ว โรงงานส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเช่นเดียวกับกากไฮปาล์ม บางส่วนนำไปขายให้โรงงานที่ทำการสกัดน้ำมันปาล์มจากเมล็ดในปาล์ม ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ปริมาณและการใช้ประโยชน์จากกะลาปาล์มของโรงงาน (ต้นปี) ของแต่ละจังหวัด [6]

| จังหวัด      | ปริมาณและการใช้ประโยชน์จากกะลาปาล์มของโรงงาน (ต้นปี) |            |        |           |
|--------------|--|------------|--------|-----------|
|              | ทั้งหมด  | เชื้อเพลิง | ขาย    | เหลือทิ้ง |
| กระบี่       | 28,948   | 17,450     | 11,498 | -         |
| สุราษฎร์ธานี | 16,666   | 9,028      | 6,122  | 616       |
| ชุมพร        | 705  | 360        | 245    | -         |
| สตูล         | 5,282  | 600        | -      | 1,682     |
| ตรัง         | 9,100  | 4,620      | 4,480  | -         |
| รวม          | 59,601   | 35,058     | 22,345 | 2,198     |
| ร้อยละ       | 100  | 58.8       | 37.5   | 3.7       |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.7 จะเห็นว่าปริมาณกะลาปาล์มทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือทิ้งจากโรงงาน ประกอบด้วยกะลาปาล์มที่ใช้ทำเชื้อเพลิงในปริมาณที่สูงที่สุด 58.8 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เหลือจะนำไปขาย

กากปาล์ม จะประกอบไปด้วย กากใยปาล์ม กะลาปาล์ม และกากเมล็ดในปาล์ม รวมเป็นแผ่นเดียวกัน จะพบในโรงงานที่มีขนาดเล็กที่ทำการหีบ และสกัดน้ำมันจากปาล์มน้ำมัน โดยไม่มีการแยกกะลา และเมล็ดในปาล์ม กากปาล์มจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเช่น ในโรงเผาอิฐ แต่ส่วนใหญ่จะขายให้แก่โรงงานอาหารสัตว์เพื่อทำอาหารสัตว์ ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ปริมาณและการใช้ประโยชน์จากกากปาล์มของ โรงงาน (ตันปี) ของแต่ละจังหวัด [6]

| จังหวัด      | ปริมาณและการใช้ประโยชน์จากกากปาล์มของ โรงงาน (ตันปี) |            |        |           |
|--------------|--|------------|--------|-----------|
|              | ทั้งหมด  | เชื้อเพลิง | ขาย    | เหลือทิ้ง |
| กระบี่       | 22,882   | 4,380      | 2,630  | -         |
| สุราษฎร์ธานี | 9,400  | -          | 7,800  | 1,600     |
| ชุมพร        | 26,486   | 1          | 26,485 | -         |
| ตรัง         | 3,050  | 50         | -      | -         |
| ชลบุรี       | 9,919  | -          | 3,000  | 9,919     |
| รวม          | 71,737   | 4,431      | 39,915 | 27,391    |
| ร้อยละ       | 100  | 6.2        | 55.6   | 38.2      |

จากตารางที่ 2.8 จะเห็นว่าปริมาณกากปาล์มทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือทิ้งจากโรงงานประกอบด้วยกากปาล์มที่นำไปขายในปริมาณที่สูงที่สุด 55.6 เปอร์เซ็นต์ และนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในปริมาณเล็กน้อย

นอกจากนี้เมล็ดในปาล์มที่มีกะลาหุ้ม สามารถส่งจำหน่ายได้ แต่ส่วนที่ไม่มีกะลาหุ้ม หลังจากกะเทาะกะลาแล้ว จะใช้ทำอาหารสัตว์

ปริมาณการใช้วัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ของปาล์มน้ำมันจากโรงงานสกัดปาล์มน้ำมันทั้งส่วนของทะลายปาล์มเปล่า กากใยปาล์ม กะลาปาล์ม และกากปาล์ม ในหน่วยตันต่อปี แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปริมาณการใช้วัสดุเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมันของโรงงานสกัดปาล์มน้ำมัน พ.ศ.2546 [6]

| ลักษณะ<br>วิธีการใช้<br>ประโยชน์ | ชนิดและปริมาณที่ใช้ |      |            |      |           |      |          |      | ปริมาณ<br>ทั้งหมด<br>(ตัน/ปี) |
|----------------------------------|---------------------|------|------------|------|-----------|------|----------|------|-------------------------------|
|                                  | ทะลายปาล์มเปล่า     |      | กากใยปาล์ม |      | กะลาปาล์ม |      | กากปาล์ม |      |                               |
|                                  | (ตัน/ปี)            | %    | (ตัน/ปี)   | %    | (ตัน/ปี)  | %    | (ตัน/ปี) | %    |                               |
| ปริมาณ                           | 518,708             | 100  | 178,839    | 100  | 59,601    | 100  | 71,737   | 100  | 767,765                       |
| เชื้อเพลิง                       | 15,485              | 3.0  | 153,602    | 85.8 | 35,058    | 58.8 | 4,431    | 6.2  | 202,576                       |
| ขาย                              | -                   | -    | -          | -    | 22,345    | 37.5 | 39,915   | 55.6 | 62,260                        |
| คลุมดิน                          | 160,563             | 30.9 | 840        | 0.5  | -         | -    | -        | -    | 161,403                       |
| อาหารสัตว์                       | -                   | -    | -          | -    | -         | -    | -        | -    | -                             |
| ให้ชาวบ้าน                       | 40,000              | 7.7  | 500        | 0.3  | -         | -    | -        | -    | 40,500                        |
| รวม                              | 216,048             | 41.6 | 154,949    | 86.6 | 57,403    | 96.3 | 44,346   | 61.8 | 472,739                       |
| คงเหลือ                          | 302,660             | 58.4 | 23,897     | 13.4 | 2,198     | 3.7  | 27,391   | 38.2 | 295,025                       |

จากตารางที่ 2.9 จะเห็นว่าในปีหนึ่งๆ เกิดวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ จากโรงงานสกัดปาล์มน้ำมัน ทั้งทะลายปาล์มเปล่า กากใยปาล์ม กะลาปาล์ม และกากปาล์มในปริมาณมาก และมีการนำวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวกลับมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ขาย ใช้คลุมดิน นำไปทำเป็นอาหารสัตว์ และให้ชาวบ้าน แต่ยังมีส่วนที่ยังเหลือประมาณ 3 ใน 8 ส่วนของวัสดุเหลือทิ้งที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์ ซึ่งจะนำไปฝังกลบ และเผา ซึ่งการเผาจะก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้ ประกอบกับวัสดุเหลือทิ้งของปาล์มน้ำมันเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลประเภทอื่นๆ จะมีราคาสูงกว่า ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ราคาชีวมวล ณ วันที่ 4 สิงหาคม 2549 [11]

| ชีวมวล          | จังหวัด      | ราคา (บาท/ตัน) |
|-----------------|--------------|----------------|
| แกลบ            | สุรินทร์     | 500            |
| ฟางข้าว         | นครปฐม       | 1,000          |
| ปึกไม้ยางพารา   | กระบี่       | 750            |
| กะลาปาล์ม       | สุราษฎร์ธานี | 1,300          |
|                 | กระบี่       | 1,100          |
| ทะลายปาล์มเปล่า | สุราษฎร์ธานี | 50             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.10 จะเห็นว่าชีวมวลในส่วนที่ได้จากปาล์มน้ำมัน กะลาปาล์มน้ำมันมีราคาขายที่สูงกว่าทะลายปาล์มเปล่า และชีวมวลชนิดอื่นๆ จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่การวิจัยนี้เลือกส่วนของกะลาปาล์มมาศึกษาเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับกะลาปาล์ม ในการที่จะนำพลังงานของกะลาปาล์มที่สะสมอยู่ภายในมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ประกอบกับเหตุผลที่ว่าปาล์มน้ำมันมีแนวโน้มในการปลูกเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่า แนวโน้มในการปลูกปาล์มน้ำมันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547-2550 เพิ่มขึ้นในลักษณะเชิงเส้น ส่งผลให้วัสดุเหลือทิ้งก็จะเพิ่มขึ้นด้วย การศึกษาวิจัยนี้จึงมีความเป็นไปได้สูงในการรองรับต่อสถานการณ์ที่เกิดขึ้นดังกล่าว เมื่อประกอบกับปัญหาการขาดแคลนพลังงานของโลก หากสามารถนำพลังงานที่ได้จากกะลาปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานทดแทน แทนพลังงานประเภทอื่นๆ ที่มีปริมาณลดน้อยลงเรื่อยๆ ก็จะเป็นประโยชน์ต่อมนุษย์ ในการที่จะมีพลังงานเพื่ออำนวยความสะดวกต่อมนุษย์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

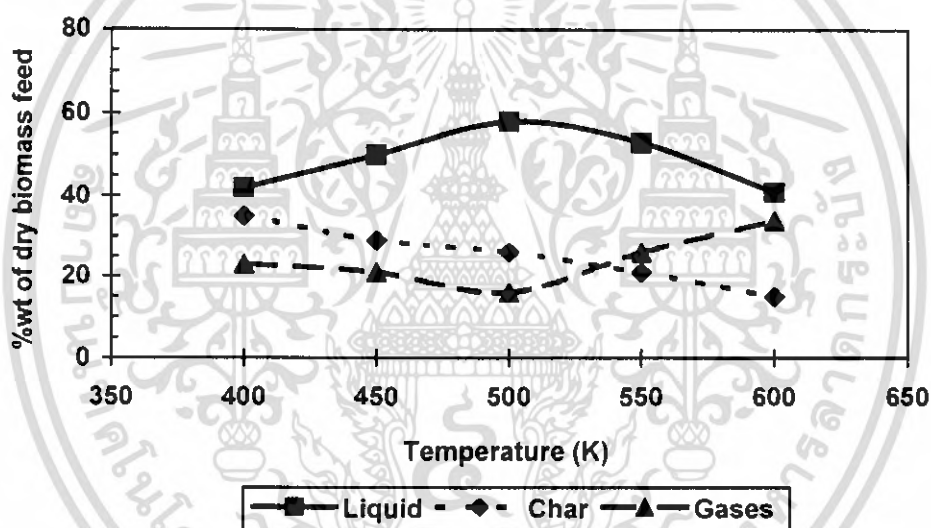


## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบัน กระบวนการไพโรไลซิสได้มีการศึกษา และวิจัยอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความน่าสนใจ โดยเฉพาะเชื้อเพลิงเหลวอันเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญ ทั้งนี้งานวิจัยต่างๆ ทำการทดลองที่สภาวะแตกต่างกัน และทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน เพื่อที่จะใช้ในการอ้างอิงงานวิจัย

Mohammad Nurul Islam และคณะ [13] ได้ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ อัตราการป้อนแก๊ส ไนโตรเจน และขนาดของวัตถุดิบ ที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ และมีทราซซิลิกาบรรจุภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว

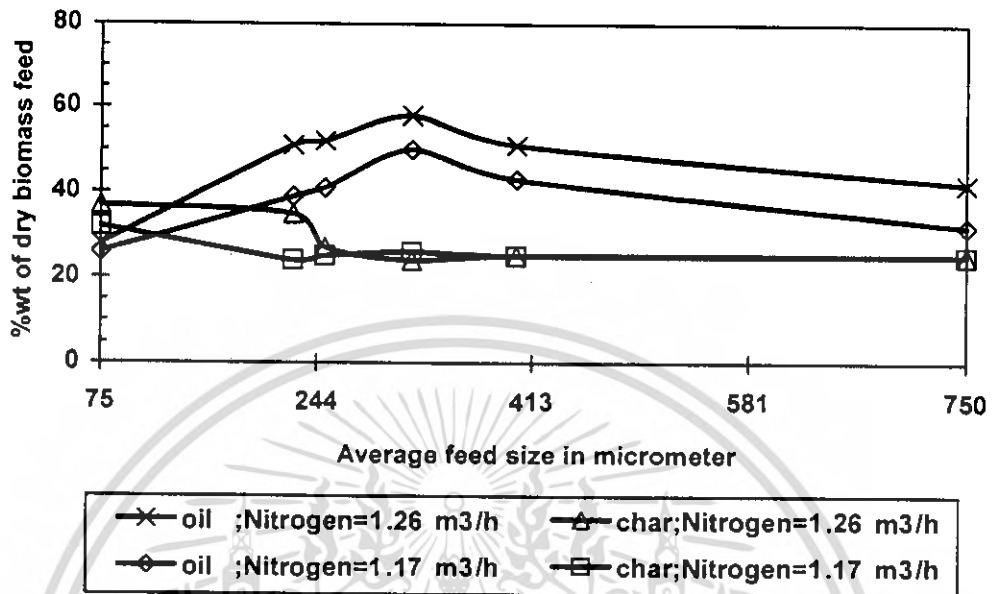


รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลว [13]

จากรูปที่ 2.8 ทดลองที่อุณหภูมิ 400, 450, 500, 550 และ 600 องศาเซลเซียส กับขนาดวัตถุดิบในช่วง 212-425 ไมโครเมตร จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ร้อยละโดยน้ำหนักของของเหลวจากกระบวนการไพโรไลซิสเมื่อเทียบกับน้ำหนักของสารตั้งต้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 42 ที่ 400 องศาเซลเซียส จนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 58 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิสุดท้าย 600 องศาเซลเซียส มีร้อยละโดยน้ำหนักของของเหลวเท่ากับ 41 ดังนั้นการทดลองที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จึงได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด

สาเหตุเพราะ จากการศึกษาการสลายตัวของกะลาปาล์มน้ำมัน โดยใช้การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกะลาปาล์มน้ำมัน โดยใช้ความร้อน พบว่ากะลาปาล์มน้ำมันจะสลายตัวได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่านี้จะทำให้

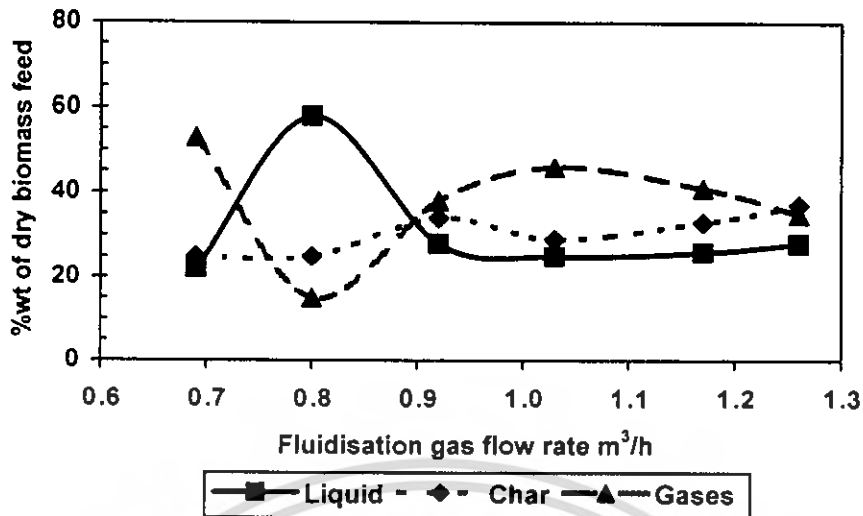
เกิดปฏิกิริยาได้ไม่สมบูรณ์ ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่านี้จะเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิขึ้น ซึ่งทั้ง 2 กรณีจะส่งผลให้ได้ปริมาณของของเหลวน้อย



รูปที่ 2.9 ผลของขนาดวัตถุดิบที่มีต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลว [13]

รูปที่ 2.9 แสดงร้อยละ โดยน้ำหนักของของเหลว และของแข็ง ที่สัมพันธ์กับสารชีวมวลขนาดต่างๆ ที่อุณหภูมิภายในเบดเคลื่อนที่ 500 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออัตราการป้อนแก๊สเข้าคองที่เท่ากับ 1.26 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ได้ปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของของเหลวมากที่สุด คือ ร้อยละ 58 โดยน้ำหนัก และของแข็งร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก ด้วยขนาดวัตถุดิบเฉลี่ย 318 ไมโครเมตร (212-425 ไมโครเมตร) และที่ขนาดวัตถุดิบน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร จะได้ของเหลว ร้อยละ 26 โดยน้ำหนัก และได้ของแข็งร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก และที่ขนาดวัตถุดิบมากกว่า 750 ไมโครเมตร (เฉลี่ยจาก 500 ไมโครเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร) ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็งเท่ากับ 42 และ 45 โดยน้ำหนักตามลำดับ ส่วนเมื่อใช้อัตราการป้อนแก๊สเข้าเท่ากับ 1.17 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง พบว่าที่วัตถุดิบขนาด 212-425 ไมโครเมตร จะได้ของเหลวสูงที่สุด คือ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก และของแข็งร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

จากการทดลองพบว่า วัตถุดิบที่มีขนาดเล็กจะได้รับความร้อนสูงมาก และจะถูกพัดพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์เร็ว ทำให้ได้ปริมาณของแข็งมาก และปริมาณของเหลวน้อยลง ส่วนวัตถุดิบที่มีขนาดใหญ่จะได้รับความร้อนที่ไม่เพียงพอ ทำให้เกิดไพโรไลซิสได้ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 2.10 ผลของอัตราการป้อนแก๊สพาหที่มีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว [13]

จากรูปที่ 2.10 แสดงปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักของของเหลว ของแข็ง และแก๊สที่สัมพันธ์กับสารชีวมวลที่ป้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดวัตถุดิบน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร โดยที่อัตราการป้อนแก๊ส 0.80 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จะได้ของเหลวร้อยละ 36 โดยน้ำหนัก ของแข็งร้อยละ 29 โดยน้ำหนัก และเมื่ออัตราการป้อนแก๊สลดลงเป็น 0.69 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ปริมาณของเหลวจะลดลงเหลือร้อยละ 22 โดยน้ำหนัก ของแข็งร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และเมื่ออัตราการป้อนแก๊สเพิ่มเป็น 1.26 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ปริมาณของเหลวจะมีค่าเป็นร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก ของแข็งร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก

ที่เป็นเช่นนี้ เพราะเมื่ออัตราการป้อนแก๊สต่ำ การเกิดฟลูอิดเซชัน และไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว จะเกิดได้อย่างไม่สมบูรณ์ และยังอาจจะเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิขึ้นด้วย ทำให้ได้ของเหลวน้อย ส่วนที่อัตราการป้อนแก๊สสูง จะทำให้เวลาที่ใช้เพื่อให้ความร้อนแก่วัตถุดิบไม่พอ รวมทั้งวัตถุดิบจะถูกพัดออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการไพโรไลซิสได้อย่างไม่สมบูรณ์ จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อย และได้ของแข็งมาก

Mohammad Nurul Islam และคณะ [13] ยังได้วิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันที่ได้จากการทำไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ พบว่าน้ำมันที่ได้มีความเข้มข้นของสารพาราฟินต่ำมาก และไม่มีสารพหุวงวน polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) Elliott [14] ได้กล่าวสนับสนุนว่า ไม่มีส่วนประกอบของ PAH ในน้ำมันจากการไพโรไลซิส แต่หากมีการปนเปื้อนของสารจำพวก PAH ในสิ่งแวดล้อมจะเกิดผลเสียที่ร้ายแรง เนื่องจากสารจำพวกนี้ประกอบไปด้วยสารก่อมะเร็งเสียเป็นส่วนใหญ่ จากนั้นได้นำน้ำมันที่ได้วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟลูออโรกราฟฟีอินฟราเรด พบว่ามีสารแอมโรแมติกที่เป็นพวกสารประกอบของฟีนอล และมีความเข้มข้นของกรด

แอสติกสูง จากการที่มีสารประกอบพวกฟีนอล น้ำมันที่ได้จึงเหมาะกับการนำไปเพิ่มมูลค่าโดยใช้เป็นสารเคมี

จากนั้น ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้วิธีทดสอบแบบมาตรฐาน แล้วเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว และน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ แสดงดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสและการเปรียบเทียบ [13]

| คุณสมบัติทางกายภาพ   | Palm shell<br>pyrolysis oil | RTP wood<br>pyrolysis oil | Fast diesel |
|--|-----------------------------|---------------------------|-------------|
| Ash (ASTM D482)  | 0.1                         | < 0.3                     | 0.01        |
| Moisture content (wt %)<br>(ASTM 4928-89 and IP 386/90)                | 10                          | 15-31                     | -           |
| Calorific value (MJ.kg <sup>-1</sup> )<br>(ASTM D240)                  | 22.1                        | 22.1-24.3                 | 45-46       |
| Viscosity @ 50 °C (CST)<br>(ASTM D445-88 and IP 71/87)                 | 14.6                        | 35-53                     | 1.3-3.3     |
| Density @ 15 °C (kg.m <sup>-3</sup> )<br>(ASTM D4052-86 and IP 365/84) | 1.2                         | 1.1-1.3                   | 0.8         |
| pH   | 2.7                         | 2.8-3.8                   | -           |
| Flash point (°C)<br>(ASTM D93 and IP 34/88)                            | 54                          | -                         | 75          |
| Pour point (°C)<br>(ASTM D97-87 and IP 15/67)                          | < -10                       | -                         | -2          |
| Distillation (°C) (ASTM D86)   |                             |                           |             |
| IBP  | 94                          | -                         | 181         |
| 10%  | 100                         | -                         | 222         |
| 30%  | 120                         | -                         | -           |
| 50%  | 155                         | -                         | 267         |
| 70%  | 182                         | -                         | -           |
| 75%  | 190                         | -                         | -           |
| 90%  | -                           | -                         | 357         |
| Decomposed at  | 190                         | -                         | 367         |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามให้กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางธุรกิจ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MD Kawser, J และ Farid Nash, A [15] ทดลองทำไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่โดยมีทรายซิลิกาบรรจุภายในเครื่องปฏิกรณ์ และใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพา ได้นำของเหลวที่ได้จากการทดลองที่สภาวะ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊ส 1.26 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้วิธีแก๊สโครมาโตกราฟ แมสสเปกโทรเมทรี พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นฟินอลประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์

Serdar Yaman [16] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว พบว่าชีวมวลที่มีองค์ประกอบเป็นเซลลูโลสมากๆ ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จะประกอบด้วยกรด แอลกอฮอล์ คีโตน เอสเทอร์ อนุพันธ์ที่มีโครงสร้างเป็นวง และสารประกอบพวกฟินอล กรดที่ได้จากการไพโรไลซิสจะประกอบด้วยเมทานอล อะซิโตน ฟีนอล และน้ำ โดยเมทานอลจะเกิดจากหมู่เมทอกซิลของกรดยูโรนิก และจากการสลายโครงสร้างของเมทิลเอสเทอร์ และ/หรืออีเทอร์จากการสลายโครงสร้างของสารเพคติน กรดแอซิดิกเกิดจากหมู่แอซิดิลของเฮมิเซลลูโลส ส่วนแก๊สที่ได้จะประกอบด้วยแก๊สมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และแก๊สของสารอินทรีย์ชั้นสูง และจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชีวมวลโดยใช้ความร้อน จะสามารถแบ่งข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของชีวมวลได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ (สังเกตได้จากน้ำหนักของสารที่หายไปอย่างรวดเร็ว) คือกลุ่มแรกมีกระบวนการสลายตัว 2 ชั้นหลัก โดยเป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส สำหรับกลุ่มที่สองจะมีกระบวนการสลายตัว 3 ชั้นหลัก เป็นการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ในแต่ละชั้นหลักจะประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยจำนวนมาก

Ayhan Demirbas [17] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเช่นเดียวกัน และพบว่าการสลายตัวของชีวมวลเกิดขึ้น 3 ขั้นตอน คือ เฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 530 เคลวิน เซลลูโลสจะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 510–620 เคลวิน และลิกนินจะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 550–770 เคลวิน

## บทที่ 3

### การดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยนี้ ทำการทดลองเกี่ยวกับการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุที่ทำงานแบบกึ่งต่อเนื่อง เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดของวัตถุดิบ อุณหภูมิ อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน และเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส ที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตของเหลวให้ได้ปริมาณมาก แล้ววิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ความหนืด ค่าความร้อน ความเป็นกรด-เบส และองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ จากนั้นนำผลการทดลองจากการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องมาออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำงานแบบต่อเนื่อง เพื่อให้เหมาะสมที่จะนำไปขยายขนาด และปรับปรุงให้ใช้งานได้ในระดับอุตสาหกรรม

#### 3.1 การทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยมีหลักการทำงานดังนี้ กะลาปาล์มน้ำมันจะถูกบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ ซึ่งได้รับความร้อนจากเตาเผาด้านนอก อุณหภูมิของเตาเผาควบคุมได้จากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และมีการป้อนแก๊สในโตรเจนเข้าไปในระบบ เพื่อพาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสออกนอกเครื่องปฏิกรณ์ โดยอัตราการป้อนแก๊สในโตรเจนจะถูกควบคุมด้วยวาล์วควบคุมแก๊ส และมีการอุ่นแก๊สในโตรเจนให้ร้อนด้วยฮีตเตอร์ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วย ผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งถูกพาออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ในสถานะแก๊สจะเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส กลายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว ส่วนแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้จะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ และจะมีของแข็งที่เหลือจากการไพโรไลซิสอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์

##### 3.1.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ กะลาปาล์มน้ำมัน แก๊สในโตรเจน และน้ำแข็ง

##### 3.1.3 วิธีการทดลอง

เตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดลองดังรูปที่ 3.1 ปรับอุณหภูมิของเตาเผา และอัตราการป้อนแก๊สในโตรเจนให้ได้ตามต้องการ พร้อมทั้งอุ่นแก๊สในโตรเจนให้ร้อน เมื่ออุณหภูมิจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบ 3 จุด เป็นไปตามที่ต้องการ จึงเริ่มนำกะลาปาล์มน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ผ่านการอบแล้วใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ เริ่มจับเวลา จนเมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงหยุดการทดลอง นำของแข็งที่เหลือ และผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ภายในอุปกรณ์ควบแน่นมาชั่งน้ำหนัก เพื่อวิเคราะห์มวลสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 3.2 การทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

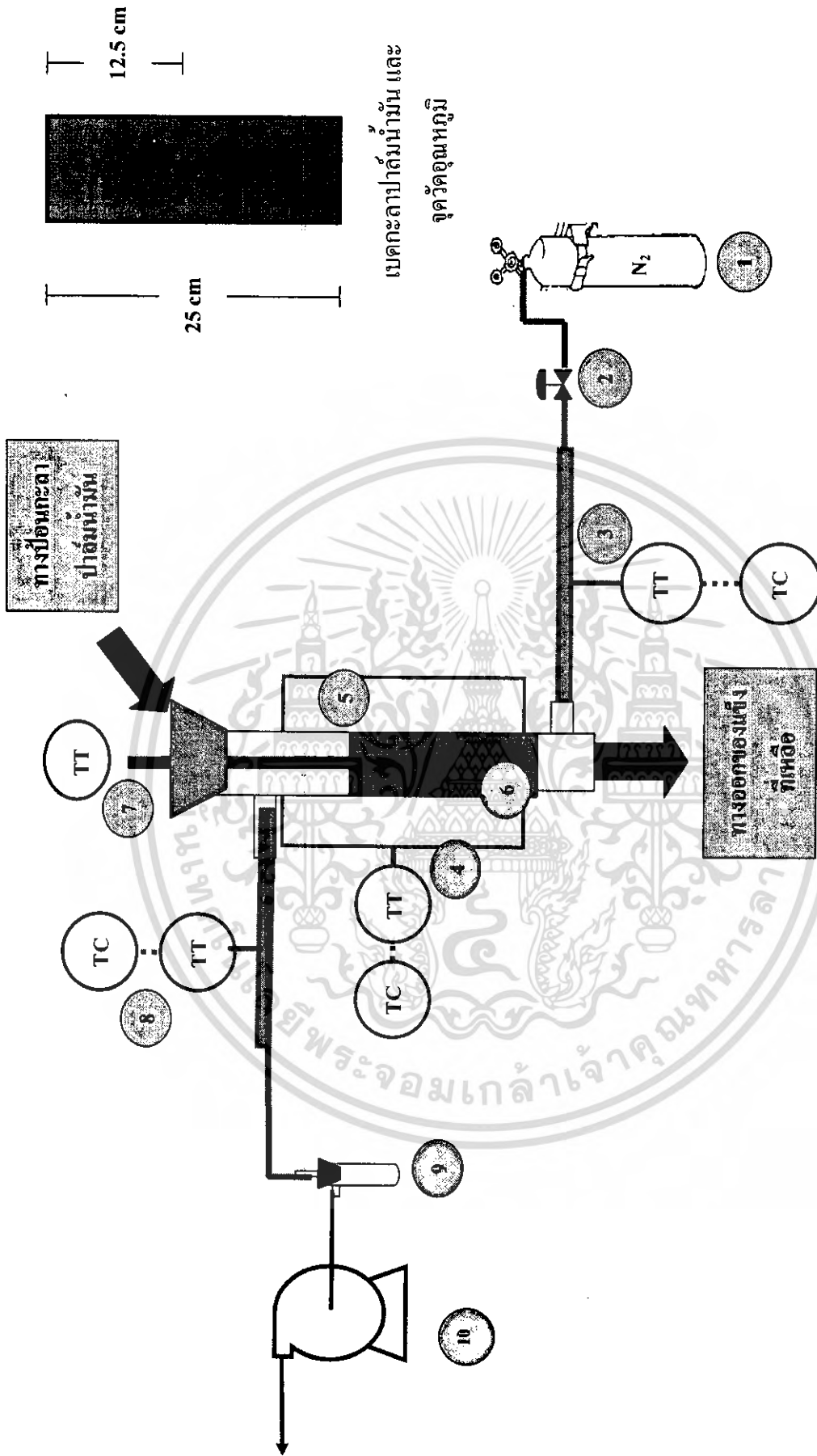
เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยมีหลักการทำงานดังนี้ กะลาปาล์มน้ำมันจะถูกป้อนลงในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้สกรูที่อยู่ทางด้านบนอย่างต่อเนื่อง เครื่องปฏิกรณ์จะได้รับความร้อนจากเตาเผาภายนอก ซึ่งควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาได้จากอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ แก๊สในโตรเจนจะถูกป้อนเข้าไปในระบบ เพื่อพาสติคภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการออกมา โดยควบคุมอัตราการป้อนแก๊สในโตรเจนจากวาล์วควบคุม และก่อนที่แก๊สในโตรเจนจะเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ จะมีการอุ่นแก๊สในโตรเจนให้ร้อนก่อน ผลิตภัณฑ์เบื้องต้นที่ได้ในสถานะแก๊ส จะถูกพาออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์โดยมีปั๊มสูญญากาศช่วยเพื่อให้สามารถพาออกมาได้ง่ายขึ้น แก๊สที่ถูกพาออกมาจากจะเข้าสู่เครื่องควบแน่น แก๊สส่วนที่ควบแน่นได้จะควบแน่นกลายเป็นของเหลว ส่วนแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้จะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ และของแข็งที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะถูกนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้สกรูที่อยู่ทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์

### 3.2.2 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ กะลาปาล์มน้ำมัน

### 3.2.3 วิธีการทดลอง

เตรียมเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่จะใช้ในการทดลองดังรูปที่ 3.2 เปิดปั๊มสูญญากาศ ปรับอุณหภูมิของเตาเผา และอัตราการป้อนแก๊สในโตรเจนให้ได้ตามต้องการ พร้อมทั้งอุ่นแก๊สในโตรเจนให้ร้อน เมื่ออุณหภูมิจากอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเป็นไปตามที่ต้องการ จึงเริ่มนำกะลาปาล์มน้ำมันที่ผ่านการอบแล้วป้อนลงในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้สกรูทางด้านบนอย่างต่อเนื่อง ปรับความเร็วของสกรูด้านบนตามที่ต้องการ เริ่มจับเวลา จนเมื่อครบเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาจึงเริ่มนำของแข็งที่เหลืออยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก โดยใช้สกรูด้านล่าง ปรับความเร็วของสกรูด้านล่าง และด้านบนให้สัมพันธ์กัน เพื่อให้ความสูงของเบดกะลาปาล์มน้ำมันภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ เมื่อทำการทดลองจนครบเวลาตามที่ต้องการจึงหยุดการทดลอง นำของแข็งที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ และผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ภายในอุปกรณ์ควบแน่นมาชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 3.2 ชุดการทดลองไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง (1.ถังแก๊สไนโตรเจน 2.วาล์วควบคุมแก๊ส 3.พรีซีเตอร์ 4.เตาเผา 5.เครื่องปฏิกรณ์ 6.กะลาปาล์มน้ำมัน 7.อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ 8.แถบวัดความร้อน 9.อุปกรณ์ควบคุมแรงดัน 10.ปั๊มสุญญากาศ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสภายใต้สภาวะต่างๆ จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติด้วยวิธีการดังนี้

- 3.3.1 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊สที่ได้ ทำโดยชั่งน้ำหนัก คำนวณจากสมการดุลมวลสาร  
(นน.กะลาปาล์มน้ำมันเริ่มต้น = นน.ของแข็งที่เหลือ + นน.ของเหลวที่ได้ + นน.แก๊ส)
- 3.3.2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ แบบ FID รุ่น GC14-B
- 3.3.3 ความเป็นกรด-เบส (pH) โดยใช้กระดาษลิตมัส
- 3.3.4 ความหนาแน่น (Density) ตามมาตรฐาน ASTM D 4052-86
- 3.3.5 ความหนืด (Viscosity) ตามมาตรฐาน ASTM D 445
- 3.3.6 ค่าความร้อน (Heating value) ตามมาตรฐาน ASTM D 240



## บทที่ 4

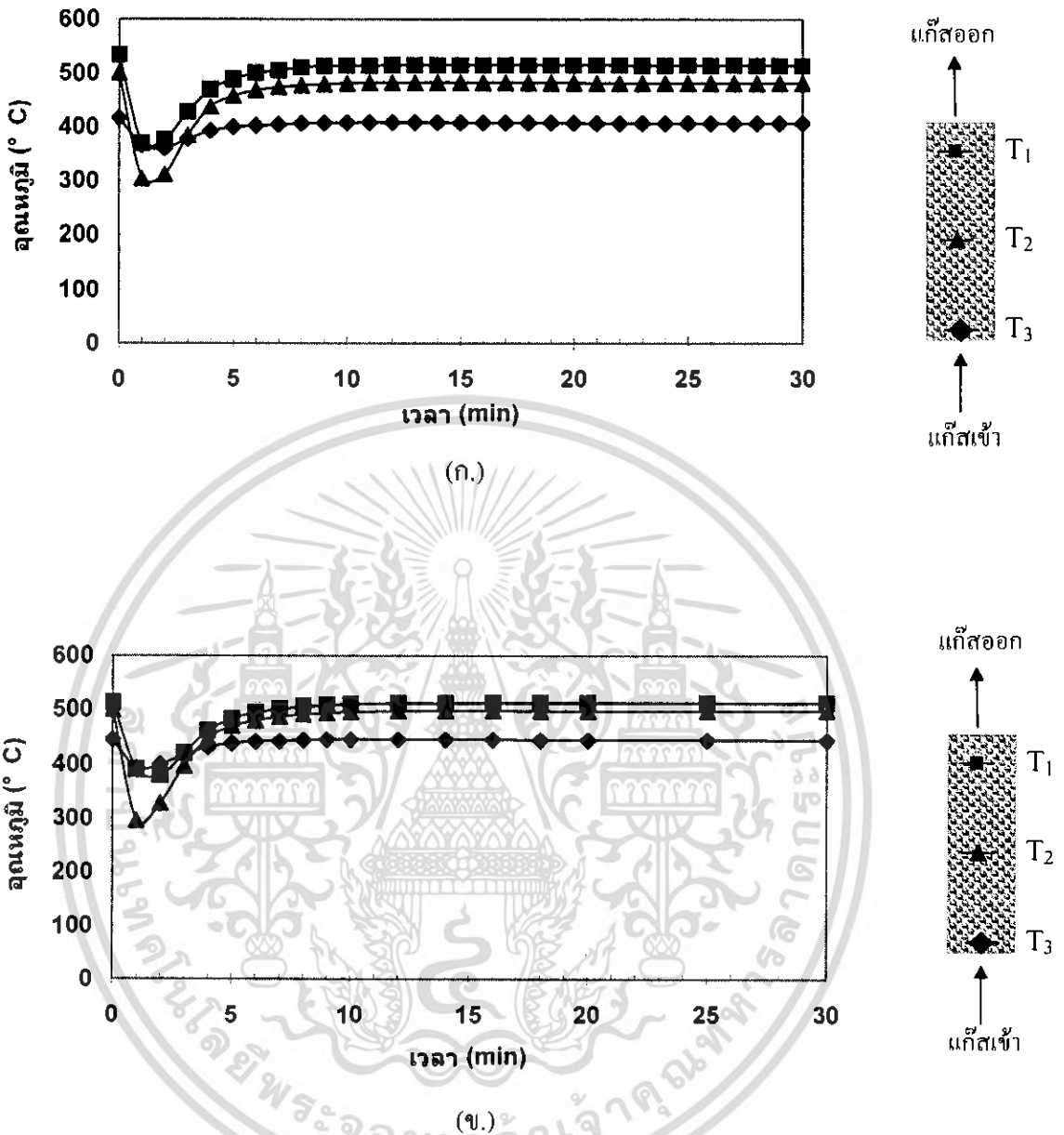
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การไฟโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุที่ทำงานแบบกึ่งต่อเนื่อง

##### 4.1.1 การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์

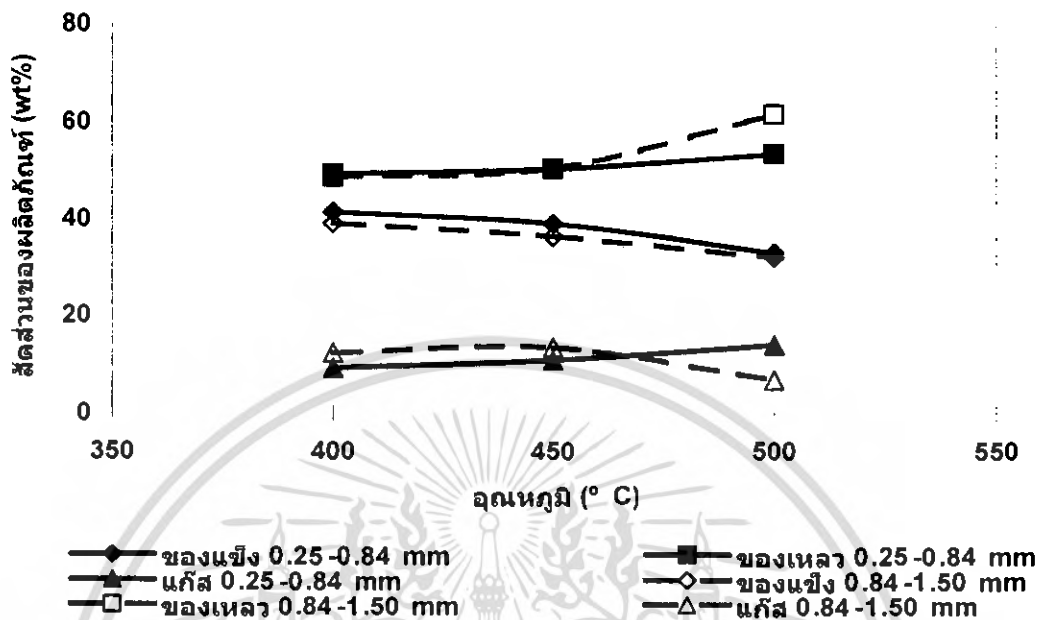
รูปที่ 4.1 (ก.)-(ข.) แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทำไฟโรไลซิส เมื่อใช้อัตราการป้อนแก๊สในโครเจน 50 และ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 2 นาทีแรกของการทำไฟโรไลซิส จากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าคงที่หลังจากทำไฟโรไลซิสผ่านไปนาน 10 นาที ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ปฏิกิริยาไฟโรไลซิสเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน [18] ทันทีที่ใส่วัตถุดิบลงไป วัตถุดิบจะคูดความร้อนจากแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์เข้าไปเพื่อใช้ในการแตกสลายพันธะภายในโมเลกุล และในช่วง 2 นาทีแรก เป็นช่วงที่สารตั้งต้นมีความเข้มข้นสูง ปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ความร้อนที่ถ่ายเทจากเตาเผาด้านนอกเข้าสู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถชดเชยการสูญเสียความร้อนได้ทัน แต่เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไประยะหนึ่ง ความเข้มข้นของสารตั้งต้นลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงลดต่ำลงด้วย อัตราการชดเชยความร้อนจากเตาเผาด้านนอกค่อยๆ เข้าใกล้อัตราการคูดความร้อนเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยา ทำให้อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่ออัตราการคูดความร้อนเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับอัตราการชดเชยความร้อนจากเตาเผา อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะเข้าสู่ค่าคงที่

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งภายในเครื่องปฏิกรณ์ในกรณีที่ใช้อัตราการป้อนแก๊สในโครเจน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิของแต่ละตำแหน่งคงที่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิก่อนเริ่มทำไฟโรไลซิส ต่างจากกรณีใช้อัตราการป้อนแก๊สในโครเจน 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ซึ่งอุณหภูมิของแต่ละตำแหน่งคงที่ที่อุณหภูมิเท่ากับค่าที่วัดได้ก่อนเริ่มทำไฟโรไลซิส ทำให้สรุปได้ว่า การเลือกใช้อัตราการป้อนแก๊สในโครเจน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะทำให้การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ดีพอ ดังนั้นจึงควรทำการทดลองโดยใช้อัตราการป้อนแก๊สในโครเจนมากกว่าหรือเท่ากับ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลาต่างๆ เมื่ออัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็น (ก.) 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ (ข.) 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที

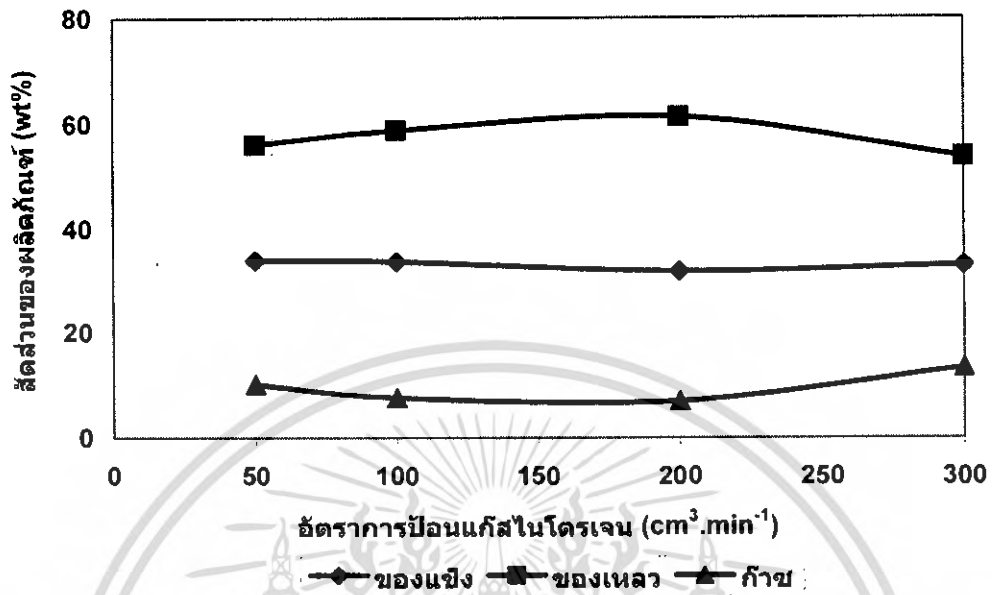
#### 4.1.2 อิทธิพลของขนาดวัตถุดิบที่ใช้ทำไฟโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์



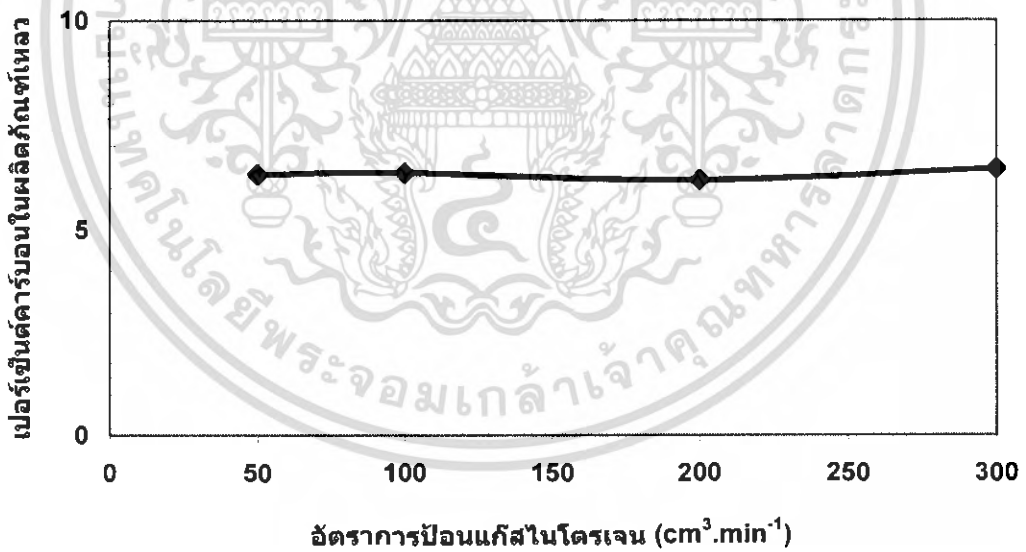
รูปที่ 4.2 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไฟโรไลซิส : เวลาทำไฟโรไลซิส 60 นาที อัตราการป้อนแก๊สในโครเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่อใช้วัตถุดิบขนาด 0.25-0.84 มิลลิเมตร เปรียบเทียบกับเมื่อใช้วัตถุดิบขนาด 0.84-1.50 มิลลิเมตร พบว่าในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไฟโรไลซิสระหว่าง 400-450 องศาเซลเซียส สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัตถุดิบทั้ง 2 ขนาดมีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกัน แต่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำไฟโรไลซิสเพิ่มเป็น 500 องศาเซลเซียส สัดส่วนของเหลวที่ได้จากการใช้วัตถุดิบที่มีขนาด 0.84-1.50 มิลลิเมตร จะได้ 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าเมื่อใช้วัตถุดิบขนาด 0.25-0.84 มิลลิเมตร ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่สัดส่วนของแก๊สที่ได้จากการใช้วัตถุดิบขนาด 0.25-0.84 มิลลิเมตร จะมีมากกว่าการใช้วัตถุดิบขนาด 0.84-1.50 มิลลิเมตร ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

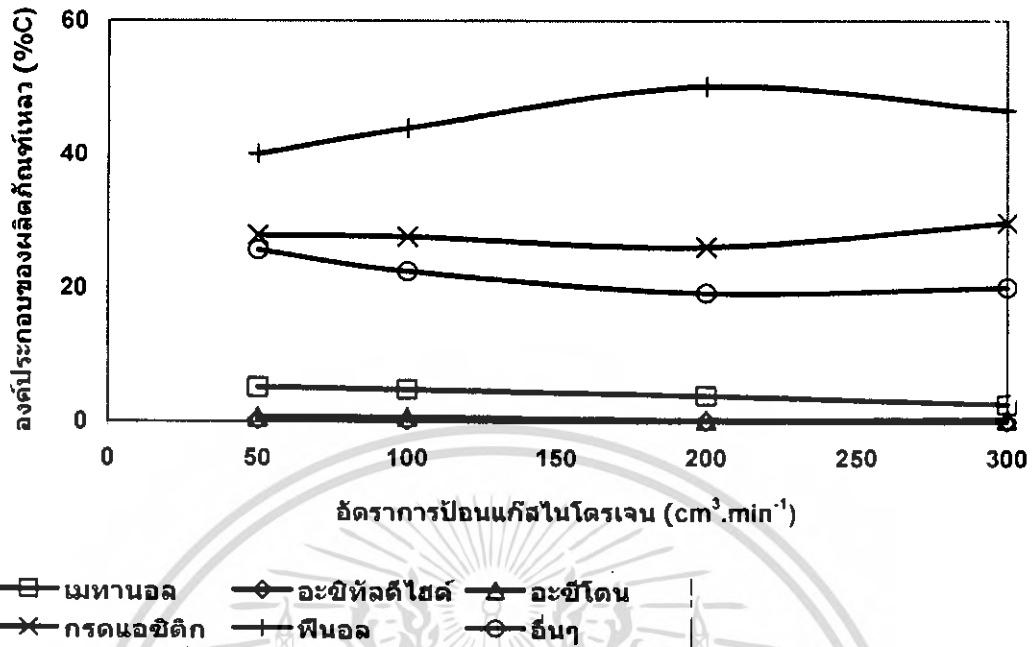
#### 4.1.3 อิทธิพลของอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.3 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที



รูปที่ 4.4 เปอร์เซนต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที



รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัดจุด 0.84-1.50 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที

รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และแก๊สเท่านั้น แต่ไม่ส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมากนัก และการเลือกใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จะทำให้ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดถึง 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ปริมาณของเหลวที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 56.1 เป็น 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่ออัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 50 เป็น 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1 ว่าอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ไม่สามารถทำให้การถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ดีพอ ดังนั้นอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์จึงต่ำกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้ นอกจากนี้เมื่ออัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนน้อย สารที่เกิดจากการสลายตัวของอนุภาคกะลาปาล์มน้ำมันจะเกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิ ทำให้ได้สารที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก สามารถควบแน่นได้ยาก ทำให้ได้สัดส่วนของแก๊สที่มาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammad Nurul Islam และคณะ [13] และเมื่ออัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็น 300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มีค่าลดลง 7.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนแก๊สเพิ่มขึ้นทำให้เวลาที่แก๊สผลิตภัณฑ์อยู่ในอุปกรณ์สำหรับควบแน่นสั้นลง จึงเกิดการควบแน่นได้ไม่สมบูรณ์

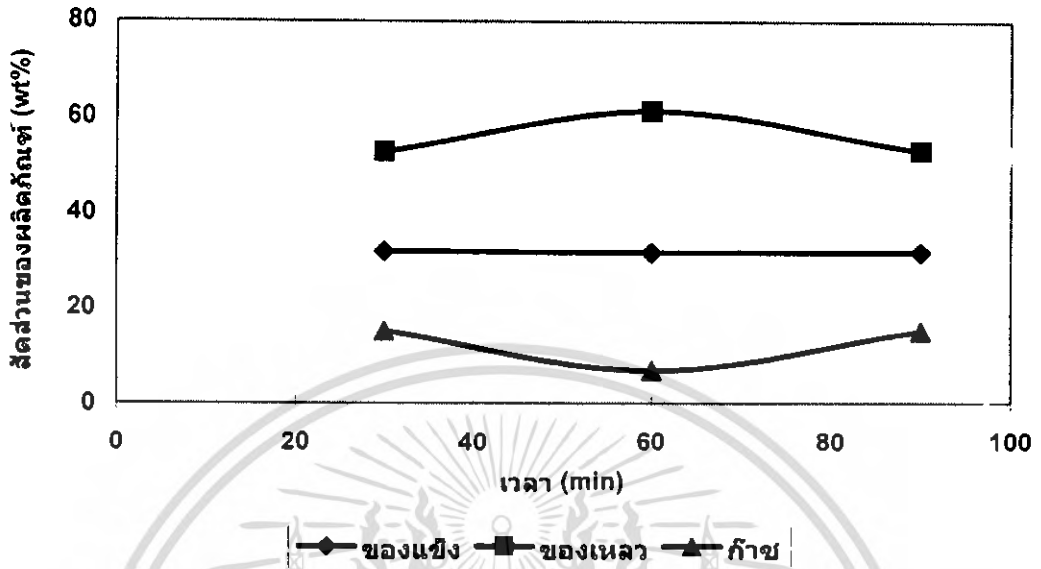
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมาวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่พบว่า มีปริมาณค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน โดยมีค่าประมาณ 6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.4

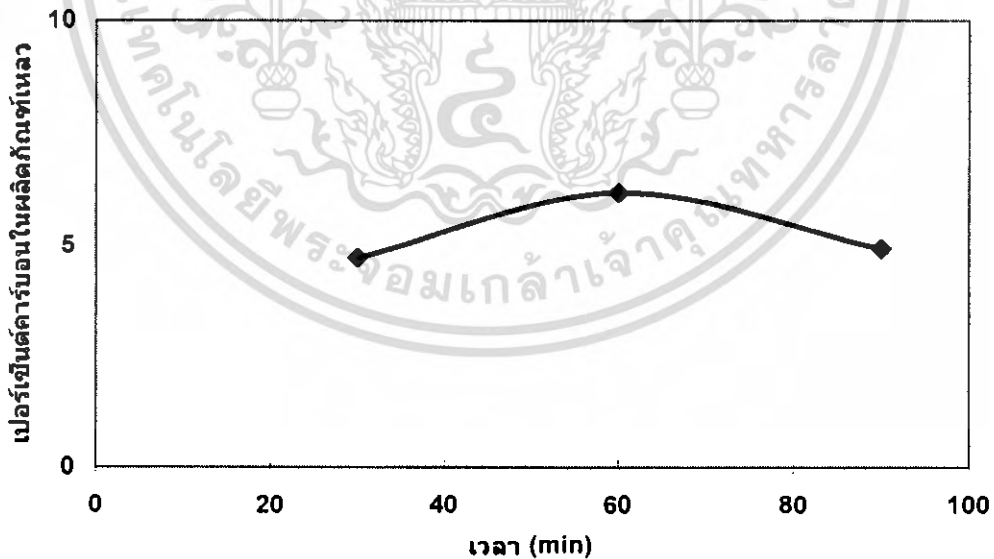
เมื่อวิเคราะห์หาชนิดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ พบว่ามีองค์ประกอบหลักคือ เมทานอล อะซีทัลดีไฮด์ อะซีโตน กรดแอซิดิก และฟินอล โดยปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ในผลิตภัณฑ์ของเหลว จะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนแก๊ส ดังรูปที่ 4.5 จากรูปพบว่า อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน จะส่งผลกระทบต่อปริมาณของฟินอลอย่างเห็นได้ชัดที่อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ปริมาณของฟินอลที่ได้คือ 50.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเมื่อใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็น 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน และมากกว่าเมื่อใช้อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็น 300 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ในขณะที่สัดส่วนขององค์ประกอบอื่นๆ มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก



4.1.4 อิทธิพลของเวลาทำไฟโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์

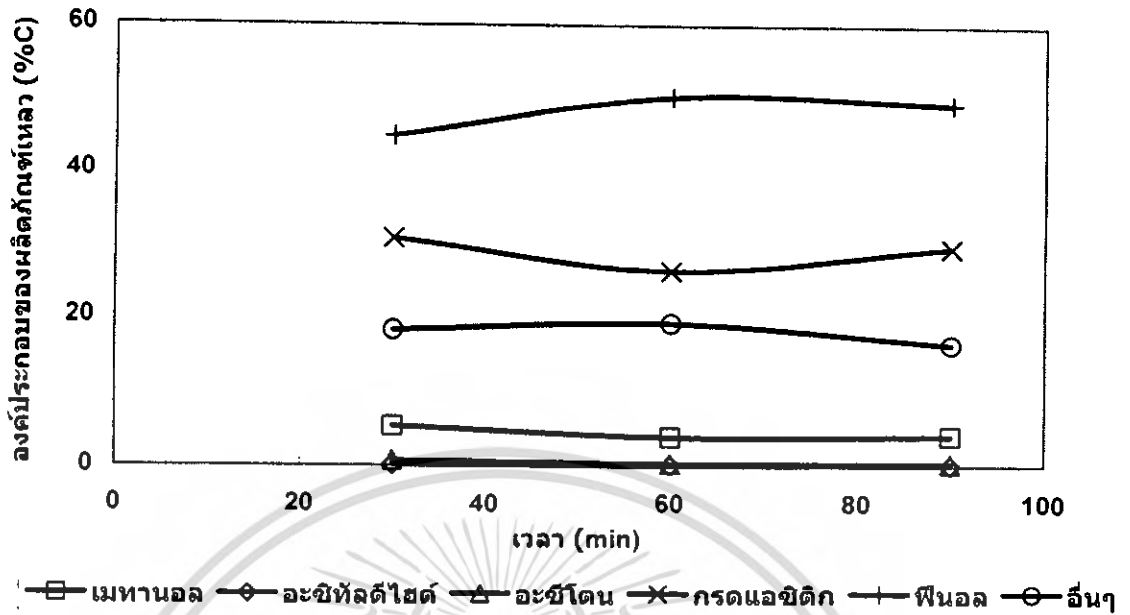


รูปที่ 4.6 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไฟโรไลซิส : ขนาดวัดถุติบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว: ขนาดวัดถุติบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50

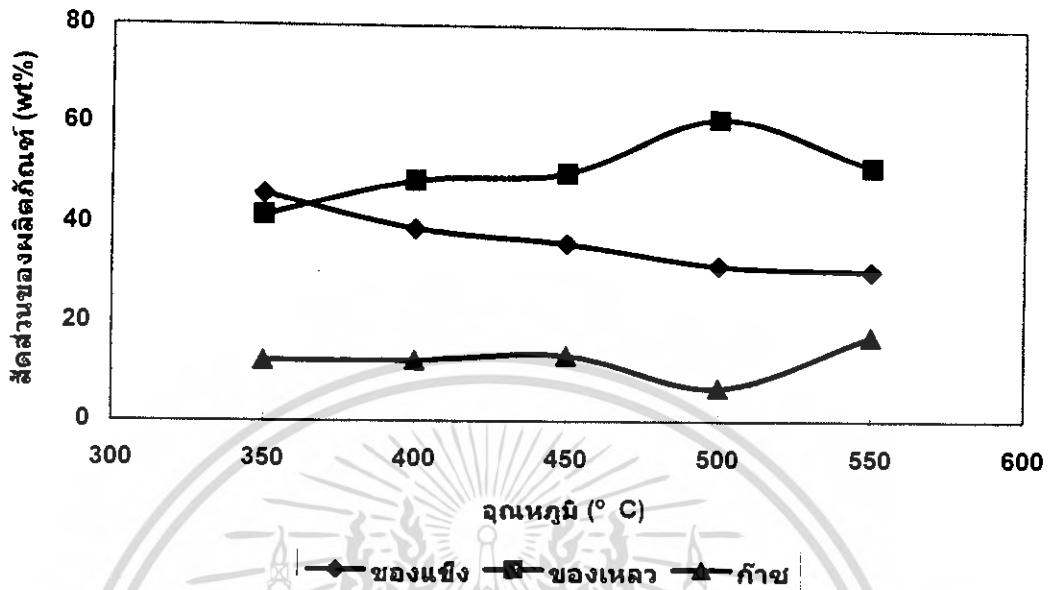
มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

จากรูปที่ 4.6 และ 4.8 แสดงผลของเวลาที่มีต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวตามลำดับ พบว่าสัดส่วนของของแข็งที่เกิดขึ้นมีค่าคงที่แม้ว่าเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะเปลี่ยนแปลงไปก็ตาม ในขณะที่สัดส่วนของเหลวที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 52.8 เป็น 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเวลาที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 60 นาที เนื่องจาก เวลาที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเพียง 30 นาที ไม่สามารถที่จะไพโรไลซิสวัตถุดิบได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อเพิ่มเวลาในการไพโรไลซิสให้นานขึ้นเป็น 90 นาที พบว่าปริมาณของเหลวที่ได้ลดลงถึง 8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากเมื่อเวลาผ่านไปผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในอุปกรณ์ควบแน่นจะถูกแก๊สพาออกไปอย่างต่อเนื่อง (สารตั้งต้นมีปริมาณมากช่วงแรก จากนั้น 60-90 นาที น้อยลงจนคงที่แทบไม่มีอะไรออกมาแล้ว) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้พบว่า คล้ายกับผลการทดลองในข้อที่ 4.3 กล่าวคือ มีฟีนอลปริมาณมากที่สุด โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส และค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสนานกว่า 60 นาที

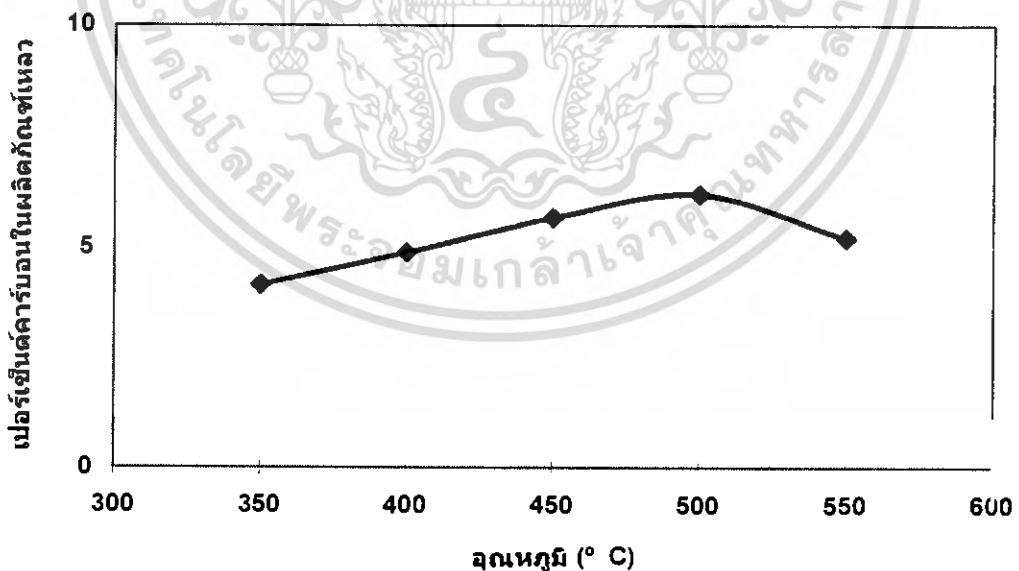
รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ประกอบอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เวลาในการทำไพโรไลซิสต่างๆ กัน พบว่าที่เวลาที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 60 นาที จะให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด คือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมากกว่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเป็น 30 และ 90 นาที ประมาณ

เอกสารนี้ 2 เปอร์เซ็นต์ งดงามไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.5 อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ทำไพโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์

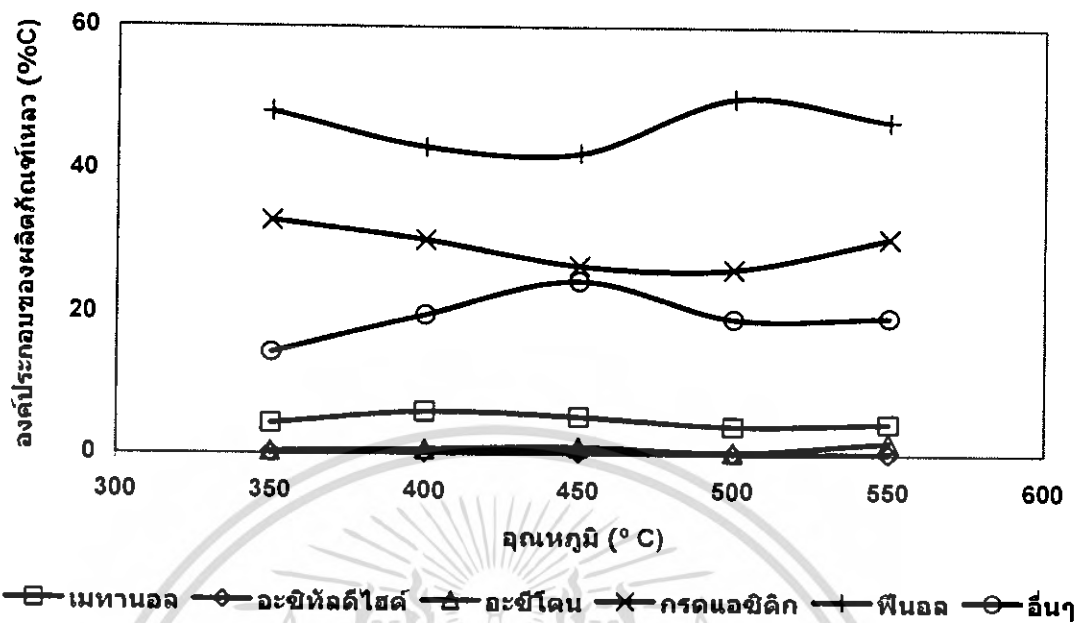


รูปที่ 4.9 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที



รูปที่ 4.10 เปอร์เซนต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลือจากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที

จากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ทั้งที่เป็นของเหลว ของแข็ง และแก๊ส อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสที่ทำให้ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุด 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก คือ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวจะลดลงจาก 61.3 มาเป็น 41.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสลดลงจาก 500 องศาเซลเซียส มาเป็น 350 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส วัตถุดิบจะเกิดการสลายตัวได้ไม่สมบูรณ์ สังเกตได้จากสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เหลืออยู่มาก และได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ayhan Demirbas [17] ที่พบว่าโครงสร้างของสารชีวมวลจะสลายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของเหลวที่ได้เมื่อใช้อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส และ 550 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเพิ่มจาก 500 องศาเซลเซียส เป็น 550 องศาเซลเซียส ปริมาณของเหลวที่ได้มีปริมาณต่ำลงถึง 9.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากเกิดการสลายตัวขั้นทุติยภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ได้ในเบื้องต้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กซึ่งควบแน่นได้ยาก สัดส่วนของ

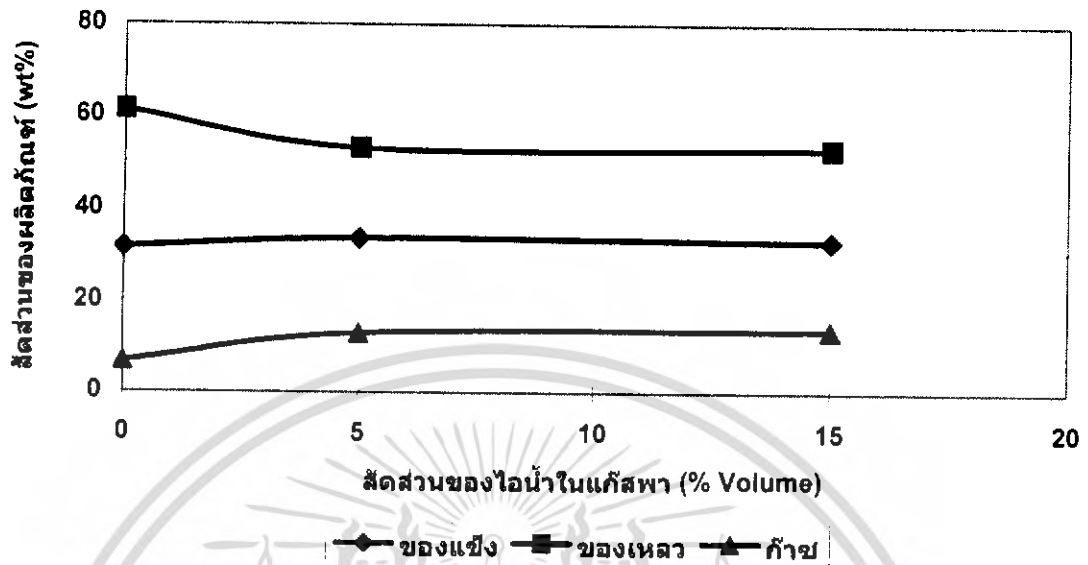
ผลิตภัณฑ์ของเหลวจึงลดลง และสัดส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สจึงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohammad Nurul Islam และคณะ [13]

รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสต่างๆ กัน พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด คือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเมื่อใช้อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเป็น 550 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงเหลือ 5.2 เปอร์เซ็นต์

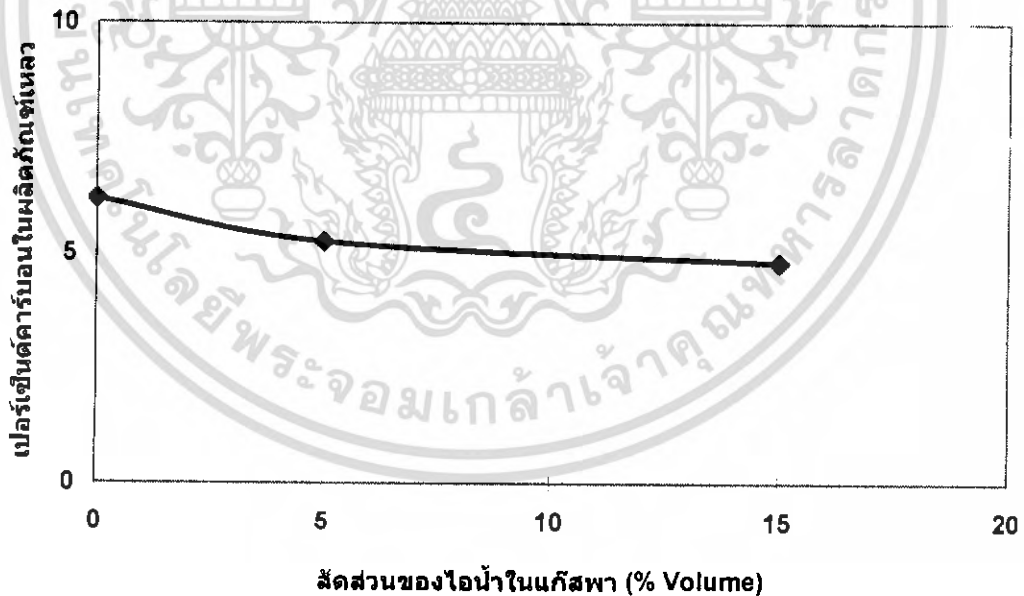
จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสจะส่งผลต่อสัดส่วนขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับผลของตัวแปรอื่นๆ โดยที่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสเป็น 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุด จะพบปริมาณของฟีนอลสูงสุด และปริมาณของกรดอะซิติกต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสอื่นๆ คือ 50.2 และ 26.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนตามลำดับ



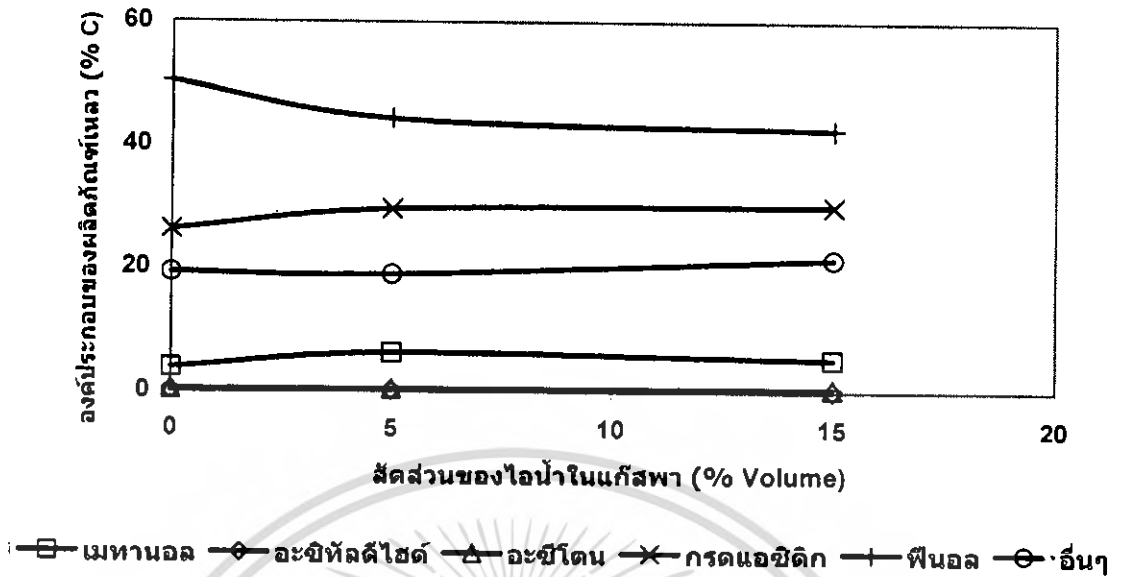
#### 4.1.6 อิทธิพลของไอน้ำที่ใช้ทำไฟโรไลซิสที่มีต่อการกระจายของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.12 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไฟโรไลซิส : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เวลาทำไฟโรไลซิส 60 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไฟโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เวลาทำไฟโรไลซิส 60 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไฟโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัตถุดิบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.12-4.14 แสดงผลของไอน้ำต่อการเกิดไพโรไลซิส จากผลการทดลองในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าการเติมไอน้ำเข้าสู่ระบบไม่ส่งผลต่อสัดส่วนของแข็งมากนัก แต่จะส่งผลให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง ขณะที่สัดส่วนของแก๊สเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเติมไอน้ำเข้าสู่ระบบสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวจะลดลงจาก 61.3 เป็น 53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในทั้ง 2 กรณี เนื่องจากไอน้ำในแก๊สพาจะช่วยในการแตกตัวของสารให้เกิดได้ดีขึ้น จึงได้สารที่มีโมเลกุลเล็กซึ่งสามารถควบแน่นได้ยาก จึงทำให้สัดส่วนของของเหลวลดลง และไปเพิ่มในสัดส่วนของแก๊สแทน เห็นได้จากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.13

รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพาเป็น 0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะมีค่าสูงสุด คือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพา จนเมื่อสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพาเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จะทำให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงต่ำสุดเหลือ 4.8 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า การที่มีไอน้ำในระบบจะทำให้ปริมาณของฟินอลในผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงจาก 50.2 เป็น 42.5 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน และทำให้ปริมาณของกรดแอซิดิกในผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นจาก 26.2 เป็น 30.1 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ในขณะที่สัดส่วนขององค์ประกอบอื่นๆ ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

#### 4.1.7 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากสถานะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิส กะลาปาล์มน้ำมันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

##### ก) ลักษณะทางกายภาพ

ตาราง 4.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองกับคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชนิดอื่นๆ (น้ำมันจากการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน ไม้ และน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว) โดยนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองในสถานะที่ได้สัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดมาวิเคราะห์ พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองมีสภาพเป็นกรด ความหนืดต่ำ มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ แต่มากกว่าน้ำ และน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าน้ำมันชนิดอื่นๆ จึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง

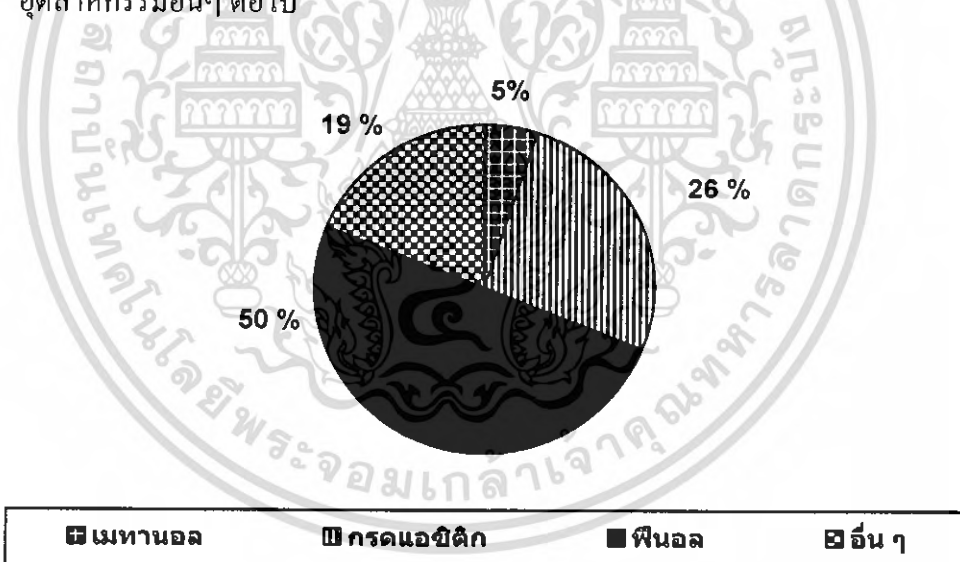
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองกับน้ำมันชนิดอื่นๆ

| คุณสมบัติ  | Palm shell<br>pyrolysis oil<br>(Experiment)* | Palm shell<br>pyrolysis oil<br>[13] | RTP wood<br>pyrolysis oil<br>[13] | Fast diesel<br>[13] |
|--|--|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Heating value (MJ.kg <sup>-1</sup> )<br>ASTM D240      | 12.68  | 22.1                                | 22.1-24.3                         | 45-46               |
| Viscosity @ 40 °C (cSt)<br>ASTM D445                   | 3.25   | 14.63                               | 35-53                             | 1.3-3.3             |
| Density @ 15 °C (g.cm <sup>-3</sup> )<br>ASTM D4052-86 | 1.08   | 1.2                                 | 1.11-1.25                         | 0.78                |
| pH   | 4  | 2.7                                 | 2.8-3.8                           | -                   |

\* สภาวะทดลอง : ขนาดวัดจุดดับ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และเวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที

ข) องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลว

รูปที่ 4.15 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทำไพโรไลซิส กะลาปาล์มน้ำมัน โดยนำผลิตภัณฑ์ของเหลวในสภาวะที่ได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ พบว่าสารที่พบมากที่สุด ในผลิตภัณฑ์ของเหลว คือ ฟีนอล ซึ่งพบประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน รองลงมา คือ กรดแอสติก พบประมาณ 26 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน ส่วนที่เหลือจะเป็น เมทานอล อะซีโตน อะซีทัลดีไฮด์ และสารอื่นๆ ซึ่งสารที่พบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองนี้มีองค์ประกอบที่คล้ายคลึงกับในงานวิจัยของ Mohammad Nurul Islam และคณะ [13] และงานวิจัยของ MD Kawser, J และ Farid Nash [15] ซึ่งในงานวิจัยทั้งสอง จะพบฟีนอลเป็นองค์ประกอบหลักในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลอง จากการที่พบฟีนอลเป็นองค์ประกอบหลักในผลิตภัณฑ์ของเหลว ประกอบกับค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับน้ำมันชนิดอื่นๆ จึงมีความเหมาะสมที่จะสกัดฟีนอลออกมา เพื่อนำไปใช้เป็นสารเคมีทั้งในอุตสาหกรรมพลาสติก สารยึดติดหรือ อุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการทำไพโรไลซิส : ขนาดวัดถุดิบ 0.84-1.50

มิลลิเมตร อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เวลาทำไพโรไลซิส 60 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส

คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองในสภาวะอื่นๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก ข.

## 4.2 ความสัมพันธ์ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องกับแบบต่อเนื่อง

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน และผลการทดลองที่ได้การไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมันด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องได้ โดยมีการเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสในทั้ง 2 ระบบดังนี้

### 4.2.1 อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน (แก๊สพา)

อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน จะมีผลต่อเวลาที่แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสในชั้นต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ถ้าแก๊สที่ได้อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานเกินไป จะทำให้เกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิของแก๊ส ส่งผลให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ต้องการลดลง ดังนั้นอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนจึงนำมาใช้ในการกำหนดขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

### 4.2.2 เวลาที่ใช้ไพโรไลซิส

เวลาที่ใช้ไพโรไลซิส จะมีผลต่อความสมบูรณ์ของการทำไพโรไลซิส ถ้าใช้เวลาน้อยเกินไป จะทำให้การไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมันเกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ หรือมีสารหลงเหลืออยู่ภายในอนุภาค ทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อย ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ทำไพโรไลซิส จึงนำมาใช้ในการกำหนดเวลาที่วัตถุดิบจะอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อไปถึงอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้า และออกจากเครื่องปฏิกรณ์

### 4.2.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส

ในระบบทั้ง 2 ระบบ จะใช้อุณหภูมิในการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมันที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส จะถูกกำหนดโดยประเภทของวัตถุดิบที่ใช้ (มีผลต่อการสลายตัวขององค์ประกอบของวัตถุดิบ) ซึ่งทั้ง 2 ระบบ ใช้วัตถุดิบประเภทเดียวกันคือ กะลาปาล์มน้ำมัน

### 4.2.4 สัดส่วนของไอน้ำที่เติมในแก๊สพา

ไอน้ำในแก๊สพาจะช่วยทำให้สารที่อยู่ในกะลาปาล์มน้ำมันแตกตัวได้ดีขึ้น แต่จะเป็นการแตกตัวที่มากเกินไปซึ่งส่งผลกระทบต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลว การเพิ่มสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพาจะทำให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง ดังนั้นจึงไม่ควรใช้ไอน้ำระหว่างการไพโรไลซิส

### 4.3 การทดลองไฟโรไลซิสโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

จากการทดลองไฟโรไลซิสโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องทำให้ทราบสถานะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด คือ ใช้ขนาดวัตต์ดูบ 0.84-1.50 มิลลิเมตร อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อนาที เวลาทำไฟโรไลซิส 60 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการทำไฟโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส จากนั้นได้นำสถานะดังกล่าวมาพัฒนา และออกแบบชุดการทดลองแบบต่อเนื่องที่สามารถทำไฟโรไลซิสให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวจากกะลาปาล์มน้ำมันได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องหยุดกระบวนการเพื่อเก็บผลิตภัณฑ์ ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวในการทดลองแต่ละครั้งในปริมาณที่มากกว่าการใช้ชุดการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 4.16 ขวดซ้ายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากชุดการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องและขวดขวาจากชุดการทดลองแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะต้องศึกษาต่อไปเพื่อเพิ่มคุณภาพ และทำให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์สำหรับการนำไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 4.16 ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองโดยใช้ชุดการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง (ซ้าย) และผลิตภัณฑ์จากชุดการทดลองแบบต่อเนื่อง (ขวา)

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ขนาดของวัตถุดิบ อุณหภูมิ อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน และเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส เป็นปัจจัยที่จำเป็นต้องพิจารณาในการเลือกสภาวะการไพโรไลซิส การป้อนไอน้ำในระหว่างการไพโรไลซิส จะทำให้ประสิทธิภาพการไพโรไลซิสลดลง

สภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการไพโรไลซิสกะลาปาล์มน้ำมัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด คือ ใช้กะลาปาล์มน้ำมันขนาด 0.84-1.50 มิลลิเมตร อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการไพโรไลซิส 60 นาที และไม่เติมไอน้ำในแก๊สพา ซึ่งทำให้ได้ปริมาณของเหลว 61.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีฟินอล 50.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน กรดแอซิดิก 26.2 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน เมทานอล 3.9 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ อีกประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์คาร์บอน เหมาะสมที่จะนำไปพัฒนาเพื่อใช้เป็นแหล่งสารเคมีทดแทน

การทดลองโดยชุดการทดลองแบบต่อเนื่องช่วยให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ และความสะดวกในการไพโรไลซิสกะลาปาล์มได้

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ในการทดลองควรปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบแน่นให้ดีขึ้น เพื่อที่จะสามารถเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ดียิ่งขึ้น
- 5.2.2 ศึกษาวิธีการแยกองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลว เพื่อหาโอกาสและความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพด้านสิ่งแวดล้อม. “ฐานข้อมูลชีวมวล”. [Online].Available : <http://202.149.101.4/biomass/index.asp.2548>.
- [2] วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. 2544. **จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- [3] “การส่งเสริมการใช้พลังงานจากชีวมวลของไทย”. [Online].Available : <http://www.eppo.go.th>.
- [4] ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพด้านสิ่งแวดล้อม. “การไพโรไลซิส”. [Online].Available : <http://202.149.101.4/biomass/info/technology/pyrolysis.html.2549>.
- [5] “Pyrolysis”. [Online].Available : <http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrolysis>.
- [6] ส่วนพัฒนาพลังงาน 2 สำนักพัฒนาพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. “รายงานการเก็บรวบรวมข้อมูลแหล่งพลังงานชีวมวลทางด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมจากพืชปาล์มน้ำมัน”. [Online].Available : <http://www.iie.or.th/iee2003/index.aspx.2546>.
- [7] วงศ์จร ทรัพย์เจริญวงศ์. “นโยบายในการแก้ปัญหาน้ำมัน และน้ำมันปาล์มของประเทศจากการค้าเสรีอาเซียนของภาครัฐ”. [Online].Available : <http://www.geocities.com/buucu2241/vong.doc.2543>.
- [8] ศูนย์สารสนเทศ กรมส่งเสริมการเกษตร. “สถิติการผลิตการเกษตรตามแหล่งปลูก (ตลอดปี) พืชปาล์มน้ำมันทั้งประเทศ ปี 2549”. [Online].Available : [http://production.doae.go.th/estimate/reportP7/reportP7\\_graph2.php.2549](http://production.doae.go.th/estimate/reportP7/reportP7_graph2.php.2549).
- [9] ศักดิ์ศิลป์ โชติกุล และพิชิตดา กุฎีรัตน์. “เอกสารวิชาการ เรื่อง ปาล์มน้ำมัน”. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย. 2545.
- [10] ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม. “Main Product”. [Online].Available : [http://www.cpi-th.com/home\\_e.html.2549](http://www.cpi-th.com/home_e.html.2549).
- [11] มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. “ราคาชีวมวล”. [Online].Available : <http://www.effe.or.th/images/biomass%20price.htm.2549>.
- [12] สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตร และสหกรณ์. “สถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย”. [Online].Available : <http://www.oae.go.th/statistic/yearbook48/.2548>.
- [13] Mohammad Nurul I., Ramlan Zailani and Farid Nasir A. “Pyrolytic oil from fluidised bed pyrolysis of oil palm shell and its characterization.” **Renewable Energy**., Vol. 17, 1999.

- [14] Elliot, DC. "Relation of reaction time and temperature to chemical composition of pyrolysis oils" In: Soltes J, Milne, TA, editors. **"Pyrolysis oils from biomass, producing, analyzing upgrading"** American Chemical Society, 1998. pp. 44-53
- [15] MD Kawser, J and Farid Nash A., "Oil Palm Shell as a source of phenol." **Journal of Oil Palm Research.**, Vol. 12, June 2000. pp. 86-94
- [16] Serdar Yaman. "Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks." **Energy Conversion and Management.**, Vol. 45, 2004. pp. 651-671
- [17] Ayhan Demirbas. "Partly chemical analysis of liquid fraction of flash pyrolysis products from biomass in the presence of sodium carbonate." **Energy Conversion and Management.**, Vol. 43, 2002. pp. 1801-1809
- [18] **"Thermal methods of municipal waste treatment"**. [Online]. Available : <http://www.Biffaward.org/downloads/projectfiles/1826-00237.pdf>.2548.
- [19] **"Pyrolysis"**. [Online]. Available : <http://www.p2pays.org/ref/11/10504/html/usa/pyro.htm>

## ภาคผนวก ก

### ผลการทดลองไพโรไลซิส

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลการทดลองที่สภาวะต่างๆ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

| ครั้งที่ | สภาวะที่ใช้ในการทดลอง      |  |               |                       | สัดส่วนผลิตภัณฑ์<br>(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) |         |      |
|----------|----------------------------|--|---------------|-----------------------|---|---------|------|
|          | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อน<br>แก๊สไนโตรเจน<br>(ลบ.ซม./นาท) | เวลา<br>(นาท) | ขนาดวัตถุดิบ<br>(มม.) | ของแข็ง                                     | ของเหลว | แก๊ส |
| 1.       | 500                        | 100  | 60            | 0.84-1.50             | 33.6  | 58.8    | 7.6  |
| 2.       | 500                        | 300  | 60            | 0.84-1.50             | 33.0  | 53.8    | 13.2 |
| 3.       | 500                        | 50   | 60            | 0.84-1.50             | 33.8  | 56.1    | 10.1 |
| 4.       | 350                        | 200  | 60            | 0.84-1.50             | 46.0  | 41.7    | 12.3 |
| 5.       | 400                        | 200  | 60            | 0.84-1.50             | 39.0  | 48.6    | 12.4 |
| 6.       | 500                        | 250  | 60            | 0.84-1.50             | 33.1  | 52.5    | 14.4 |
| 7.       | 550                        | 200  | 60            | 0.84-1.50             | 30.8  | 51.8    | 17.4 |
| 8.       | 450                        | 200  | 60            | 0.84-1.50             | 36.2  | 50.3    | 13.5 |
| 9.       | 500                        | 200  | 90            | 0.84-1.50             | 31.8  | 53.1    | 15.1 |
| 10.      | 500                        | 200  | 30            | 0.84-1.50             | 32.1  | 52.8    | 15.1 |
| 11.      | 500                        | 200  | 60            | 0.84-1.50             | 31.8  | 61.3    | 6.9  |
| 12.*     | 500                        | 200  | 60            | 0.84-1.50             | 33.7  | 53.3    | 13.0 |
| 13.**    | 500                        | 200  | 60            | 0.84-1.50             | 33.2  | 53.1    | 13.7 |
| 14.      | 400                        | 200  | 60            | 0.25-0.84             | 41.4  | 49.3    | 9.3  |
| 15.      | 450                        | 200  | 60            | 0.25-0.84             | 38.9  | 52.2    | 10.9 |
| 16.      | 500                        | 200  | 60            | 0.25-0.84             | 32.8  | 53.2    | 14.0 |

หมายเหตุ \* ใช้ไอน้ำในแก๊สพา 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

\*\* ใช้ไอน้ำในแก๊สพา 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

## ภาคผนวก ข

### ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลว

ตารางที่ ข.1 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อุณหภูมิในการไฟโรไลซิสต่างๆ

| สารตัวอย่าง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊ส ในโครเจน (ลบ.ซม./นาที) | เวลา (นาที) | ขนาดตัวดูดซับ (มม.) | ค่าความร้อน (เมกกะจูล/กก.) | ความหนาแน่น (ก./ลบ.ซม.) | ความหนืด (เซนติสต็อก) | ค่าความเป็นกรด-เบส |
|-------------|-------------------------|---|-------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------|
| 1           | 350                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50           | 10.76                      | 1.06                    | -                     | 4                  |
| 2           | 400                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50           | 9.74                       | 1.05                    | -                     | 4                  |
| 3           | 450                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50           | 13.57                      | 1.07                    | -                     | 4                  |
| 4           | 500                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50           | 12.68                      | 1.08                    | 3.25                  | 4                  |
| 5           | 550                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50           | 14.04                      | 1.06                    | -                     | 4                  |

ตารางที่ ข.2 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เวลาที่ใช้ในการ ไพรโอไลซิสต่างๆ

| สาร<br>ตัวอย่าง | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊ส<br>ไนโตรเจน (ลบ.ชม./นาฬิกา) | เวลา<br>(นาฬิกา) | ขนาดตัวตัดดิบ<br>(มม.) | ค่าความร้อน<br>(เมกกะจูล/กก.) | ความหนาแน่น<br>(ก./ลบ.ชม.) | ความหนืด<br>(เซนติสโตรก) | ค่าความเป็น<br>กรด-เบส |
|-----------------|----------------------------|--|------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1               | 500                        | 200  | 30               | 0.84-1.50              | 13.79                         | 1.08                       | -                        | 4                      |
| 2               | 500                        | 200  | 60               | 0.84-1.50              | 12.68                         | 1.08                       | 3.25                     | 4                      |
| 3               | 500                        | 200  | 90               | 0.84-1.50              | 13.90                         | 1.07                       | -                        | 4                      |

ตารางที่ ข.3 คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อัตราการป้อนแก๊สใน ไตรเจนต่างๆ

| สาร<br>ตัวอย่าง | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊ส<br>ไนโตรเจน (ลบ.ชม./นาฬิกา) | เวลา<br>(นาฬิกา) | ขนาดตัวตัดดิบ<br>(มม.) | ค่าความร้อน<br>(เมกกะจูล/กก.) | ความหนาแน่น<br>(ก./ลบ.ชม.) | ความหนืด<br>(เซนติสโตรก) | ค่าความเป็น<br>กรด-เบส |
|-----------------|----------------------------|--|------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1               | 500                        | 50   | 60               | 0.84-1.50              | 12.21                         | 1.08                       | -                        | 4                      |
| 2               | 500                        | 100  | 60               | 0.84-1.50              | 12.76                         | 1.08                       | -                        | 4                      |
| 3               | 500                        | 200  | 60               | 0.84-1.50              | 12.68                         | 1.08                       | 3.25                     | 4                      |
| 4               | 500                        | 300  | 60               | 0.84-1.50              | 12.90                         | 1.04                       | -                        | 4                      |

## ภาคผนวก ค

### ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว

ตารางที่ ค.1 ปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อุณหภูมิในการไฟโรไลซิสต่างๆ

| สารตัวอย่าง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊ส ในโตรเจน (ลบ.ซม./นาท) | เวลา (นาท) | ขนาดวัตถุดิบ (มม.) | ปริมาณคาร์บอน (เปอร์เซ็นต์) | ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว (เปอร์เซ็นต์) | ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ของเหลว (เปอร์เซ็นต์) |
|-------------|-------------------------|--|------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|
| 1           | 350                     | 200                                    | 60         | 0.84-1.50          | 10.0                        | 41.7                                 | 4.2  |
| 2           | 400                     | 200                                    | 60         | 0.84-1.50          | 10.1                        | 48.6                                 | 4.9  |
| 3           | 450                     | 200                                    | 60         | 0.84-1.50          | 11.1                        | 50.3                                 | 5.7  |
| 4           | 500                     | 200                                    | 60         | 0.84-1.50          | 10.1                        | 61.3                                 | 6.2  |
| 5           | 550                     | 200                                    | 60         | 0.84-1.50          | 10.1                        | 51.8                                 | 5.2  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เวลาที่ใช้ในการไฟโรไลซิสต่างๆ

| สารตัวอย่าง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊ส ในโตรเจน (ลบ.ซม./นาที) | เวลา (นาที) | ขนาดวัสดุดิบ (มม.) | ปริมาณคาร์บอน (เปอร์เซ็นต์) | ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว (เปอร์เซ็นต์) | ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ของเหลว (เปอร์เซ็นต์) |
|-------------|-------------------------|---|-------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|
| 1           | 500                     | 200                                     | 30          | 0.84-1.50          | 9.0                         | 52.8                                 | 4.7  |
| 2           | 500                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50          | 10.1                        | 61.3                                 | 6.2  |
| 3           | 500                     | 200                                     | 90          | 0.84-1.50          | 9.3                         | 53.1                                 | 4.9  |

ตารางที่ ค.3 ปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจนต่างๆ

| สารตัวอย่าง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊ส ในโตรเจน (ลบ.ซม./นาที) | เวลา (นาที) | ขนาดวัสดุดิบ (มม.) | ปริมาณคาร์บอน (เปอร์เซ็นต์) | ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว (เปอร์เซ็นต์) | ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ของเหลว (เปอร์เซ็นต์) |
|-------------|-------------------------|---|-------------|--------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|
| 1           | 500                     | 50                                      | 60          | 0.84-1.50          | 11.3                        | 56.1                                 | 6.3  |
| 2           | 500                     | 100                                     | 60          | 0.84-1.50          | 10.8                        | 58.8                                 | 6.4  |
| 3           | 500                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50          | 10.1                        | 61.3                                 | 6.2  |
| 4           | 500                     | 300                                     | 60          | 0.84-1.50          | 12.0                        | 53.8                                 | 6.5  |

ตารางที่ ค.4 ปริมาณคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลวโดยมีการป้อนไอน้ำเข้าไปในแก๊สพา

| สารตัวอย่าง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊สในโตรเจน (ลบ.ซม./นาท) | สัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพา (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) | เวลา (นาท) | ขนาดตัวดูดซับ (มม.) | ปริมาณคาร์บอน (เปอร์เซ็นต์) | ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว (เปอร์เซ็นต์) | ปริมาณคาร์บอนทั้งหมดในผลิตภัณฑ์ของเหลว (เปอร์เซ็นต์) |
|-------------|-------------------------|---------------------------------------|---|------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|
| 1           | 500                     | 200                                   | 0   | 60         | 0.84-1.50           | 10.1                        | 61.3                                 | 6.2  |
| 2           | 500                     | 190                                   | 5   | 60         | 0.84-1.50           | 9.9                         | 53.3                                 | 5.3  |
| 3           | 500                     | 170                                   | 15  | 60         | 0.84-1.50           | 9.1                         | 53.1                                 | 4.8  |

## ภาคผนวก ง

### ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว

ตารางที่ ง.1 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อุณหภูมิในการไฟโรไลซิสต่างๆ

| สารตัวอย่าง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊ส ในโตรเจน (ลบ.ซม./นาที) | เวลา (นาที) | ขนาดวัดจุดดับ (มม.) | องค์ประกอบของสาร (เปอร์เซ็นต์คาร์บอน) |              |         |            |       |       |
|-------------|-------------------------|---|-------------|---------------------|---------------------------------------|--------------|---------|------------|-------|-------|
|             |                         |   |             |                     | เมทานอล                               | อะซิโกลีไฮด์ | อะซิโตน | กรดแอซิดิก | ฟินอล | อื่นๆ |
| 1           | 350                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50           | 4.3                                   | 0.1          | 0.3     | 32.8       | 48.2  | 14.3  |
| 2           | 400                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50           | 5.9                                   | 0.2          | 0.7     | 30.2       | 43.2  | 19.8  |
| 3           | 450                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50           | 5.2                                   | 0.2          | 0.9     | 26.7       | 42.4  | 24.6  |
| 4           | 500                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50           | 3.9                                   | 0.1          | 0.3     | 26.2       | 50.2  | 19.3  |
| 5           | 550                     | 200                                     | 60          | 0.84-1.50           | 4.3                                   | 0.1          | 0.6     | 30.5       | 46.0  | 18.5  |

ตารางที่ ง.2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เวลาที่ใช้ในการไฟโรไลซิสต่างๆ

| สาร<br>ตัวอย่าง | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊ส<br>ไนโตรเจน (ลบ.ซม./นาที) | เวลา<br>(นาที) | ขนาดวัดดูดิบ<br>(มม.) | องค์ประกอบของสาร (เปอร์เซ็นต์คาร์บอน) |               |         |            |       |       |
|-----------------|----------------------------|--|----------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------|---------|------------|-------|-------|
|                 |                            |  |                |                       | เมทานอล                               | อะซิทัลดีไฮด์ | อะซิโตน | กรดแอซิดิก | ฟินอล | อื่นๆ |
| 1               | 500                        | 200  | 30             | 0.84-1.50             | 5.4                                   | 0.2           | 0.7     | 30.7       | 44.7  | 18.3  |
| 2               | 500                        | 200  | 60             | 0.84-1.50             | 3.9                                   | 0.1           | 0.3     | 26.2       | 50.2  | 19.3  |
| 3               | 500                        | 200  | 90             | 0.84-1.50             | 4.1                                   | 0.2           | 0.4     | 29.5       | 49.3  | 16.5  |

ตารางที่ ง.3 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่อัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนต่างๆ

| สาร<br>ตัวอย่าง | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊ส<br>ไนโตรเจน (ลบ.ซม./นาที) | เวลา<br>(นาที) | ขนาดวัดดูดิบ<br>(มม.) | องค์ประกอบของสาร (เปอร์เซ็นต์คาร์บอน) |               |         |            |       |       |
|-----------------|----------------------------|--|----------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------|---------|------------|-------|-------|
|                 |                            |  |                |                       | เมทานอล                               | อะซิทัลดีไฮด์ | อะซิโตน | กรดแอซิดิก | ฟินอล | อื่นๆ |
| 1               | 500                        | 50   | 60             | 0.84-1.50             | 5.2                                   | 0.3           | 0.7     | 27.9       | 40.1  | 25.8  |
| 2               | 500                        | 100  | 60             | 0.84-1.50             | 4.9                                   | 0.2           | 0.7     | 27.6       | 44.0  | 22.6  |
| 3               | 500                        | 200  | 60             | 0.84-1.50             | 3.9                                   | 0.1           | 0.3     | 26.2       | 50.2  | 19.3  |
| 4               | 500                        | 300  | 60             | 0.84-1.50             | 2.7                                   | 0.1           | 0.5     | 29.8       | 46.7  | 20.2  |

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวโดยมีการป้อนไอน้ำเข้าไปในแก๊สพา

| สารตัวอย่าง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนไอน้ำในแก๊สพา (ลบ.ซม./นาที) | สัดส่วนของไอน้ำในแก๊สพา (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) | เวลา (นาที) | ขนาดวัดอุณหภูมิตัว (มม.) | องค์ประกอบของสาร (เปอร์เซ็นต์คาร์บอน) |         |             |       |       |      |
|-------------|-------------------------|---|---|-------------|--------------------------|---------------------------------------|---------|-------------|-------|-------|------|
|             |                         |   |   |             |                          | เมทานอล                               | อะซิโตน | กรดแอสซิติค | ฟินอล | อื่นๆ |      |
| 1           | 500                     | 200                                     | 0   | 60          | 0.84-1.50                | 3.9                                   | 0.1     | 0.3         | 26.2  | 50.2  | 19.3 |
| 2           | 500                     | 190                                     | 5   | 60          | 0.84-1.50                | 6.4                                   | 0.2     | 0.5         | 29.7  | 44.2  | 19.0 |
| 3           | 500                     | 170                                     | 15  | 60          | 0.84-1.50                | 5.3                                   | 0.2     | 0.5         | 30.1  | 42.5  | 21.4 |



## ภาคผนวก จ

### พื้นที่ผิวภายในของผลิตภัณฑ์ของแข็ง

ตารางที่ จ.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้จากการทำไพโรไลซิส

| สารตัวอย่าง | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | อัตราการป้อนแก๊ส ไนโตรเจน (องศาเซลเซียส) | เวลา (นาที) | ขนาดวัตตุดิบ (มม.) | พื้นที่ผิวภายในของแข็ง (ตร.ม./ก.) |
|-------------|-------------------------|--|-------------|--------------------|-----------------------------------|
| 1           | 500                     | 200                                      | 60          | 0.84-1.50          | 62.13                             |
| 2           | 550                     | 200                                      | 60          | 0.84-1.50          | 213.85                            |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### เครื่องมือวัดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เหลว

#### ค่าความร้อน (Heating value)

ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงเมื่อเทียบกับต่อ 1 หน่วยน้ำหนัก วัดได้ด้วยเครื่องมือวัดค่าความร้อน (Bomb calorimeter) ดังรูปที่ ฉ.1 ตามมาตรฐาน ASTM D 240 ทั้งนี้ต้องเติม Benzoic acid ลงไปช่วยในการจุดระเบิดของเครื่อง



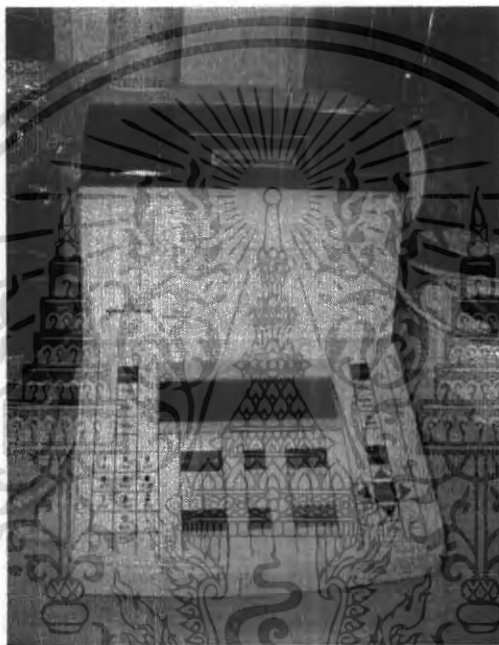
รูปที่ ฉ.1 เครื่องมือวัดค่าความร้อน (Bomb calorimeter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของสารใดๆ คือ มวล (น้ำหนัก) ต่อปริมาตรของสารนั้นๆ ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D4052 วัดได้ด้วยเครื่องวัดความหนาแน่น ดังรูปที่ จ.2 (Density meter) และเขียนความสัมพันธ์ของความหนาแน่นได้ดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นของสารใดๆ ที่ 15 องศาเซลเซียส} = \frac{\text{น้ำหนักของสาร (กรัม)}}{\text{ปริมาตรของสาร (ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$$



รูปที่ จ.2 เครื่องมือวัดความหนาแน่น (Density meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ ถ้าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนืดสูงเกินไปจะแตกตัวเป็นสะเกอองยาก ในทางเชื้อเพลิงจะไม่สามารถเผาไหม้ได้อย่างสมบูรณ์ แต่ถ้ามีความหนืดต่ำจนเกินไปจะก่อให้เกิดการอุดตันจากการสะสมของคาร์บอนในอุปกรณ์ของการเผาไหม้ ทำให้เกิดประกายไฟขึ้น ในการวัดความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 หน่วยวัดความหนืด คือ เซนติสโตก (Centistokes) โดยจับเวลาที่ปริมาตรไหลด้วยน้ำหนักตัวเองผ่านเครื่องมือวัดความหนืด (Viscometer) ดังรูปที่ ๓.3 ภายใต้สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส ในทางเชื้อเพลิงความหนืดจะเป็นตัวกำหนดว่าควรอุ่นสารจนมีอุณหภูมิเท่าไรจึงจะสูบได้อย่างสะดวก

การวัดเริ่มด้วย การจับเวลาที่ของเหลวจำนวนหนึ่งไหลผ่านหลอดแก้วเล็กๆ ที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้ว (Calibrated glass capillary) นำน้ำมันตัวอย่างใส่ใน viscometer ด้วยปริมาตรที่แน่นอนตามขนาดและชนิดของ Viscometer ที่ใช้ นำไปแช่ใน viscometer bath ซึ่งโดยปกติใช้เวลาประมาณ 30 นาที แล้วปล่อยให้น้ำมันตัวอย่างไหลอย่างอิสระภายใต้แรงดึงดูดของโลกผ่านหลอดแก้วเล็ก ๆ โดยเริ่มจับเวลาเมื่อส่วนบน (Head level) ของน้ำมันตัวอย่างไหลถึงจุดจับเวลาจุดแรก (Start mark) และหยุดเมื่อถึงจุดจับเวลาจุดที่สอง (Stop mark) นำเวลาที่ได้ไปคูณด้วยค่าคงที่ของ Viscometer (Viscometer constant) ค่าที่ได้ คือ Kinematic viscometer ซึ่งมีหน่วยเป็น เซนติสโตก (cSt)



รูปที่ ๓.3 เครื่องมือวัดความหนืด (Viscometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้