

# บันทึกหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การนำกลับสารเคมีมูลค่าสูงจากตะกอนน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเชิงเร่ง

Recovery of useful chemicals from sludge by catalytic reaction



ปริญญาโทนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา ๒๕๕๐

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Recovery of useful chemicals from sludge by catalytic reaction**



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

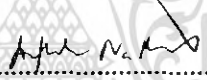
**2007**

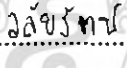
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

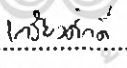
|                      |   |
|----------------------|---|
| หัวข้อปริญญานิพนธ์   | การนำกลับสารเคมีมูลค่าสูงจากตะกอนน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเชิงเร่ง |
| นักศึกษา             | นางสาวทรายแก้ว ทิพนันท์ รหัสประจำตัว 47010272                 |
|                      | นายธนาเดช กาญจนพันธ์ รหัสประจำตัว 47010318                    |
| ปริญญา               | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต   |
| สาขาวิชา             | วิศวกรรมเคมี  |
| พ.ศ.                 | 2550  |
| อาจารย์ที่ปรึกษา     | ผศ.ดร.ดวงกมล ฌ ระนอง  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ดร.วัลย์รัตน์ สุขสมัย   |

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผศ.ดร.ดวงกมล ฌ ระนอง)

  
.....กรรมการ  
(ดร.วัลย์รัตน์ สุขสมัย)

  
.....กรรมการ  
(ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                             |  |             |          |
|-----------------------------|--|-------------|----------|
| <b>ปริญญานิพนธ์เรื่อง</b>   | การนำกลับสารเคมีมูลค่าสูงจากตะกอนน้ำเสียด้วย   |             |          |
|                             | ปฏิกิริยาเชิงเร่ง                              |             |          |
| <b>โดย</b>                  | นางสาวทรายแก้ว                                 | ทิพนันท์    | 47010272 |
|                             | นายธนาเดช                                      | กาญจนพันธุ์ | 47010318 |
| <b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>     | ผศ.ดร.ดวงกมล                                   | ณ ระนอง     |          |
| <b>อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม</b> | ดร.วัลย์รัตน์                                  | สุขสมัย     |          |
| <b>ปริญญานิพนธ์</b>         | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี           |             |          |
|                             | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์          |             |          |
|                             | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |             |          |

### บทคัดย่อ

กระบวนการนำกลับสารเคมีมูลค่าสูงจากตะกอนน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเชิงเร่ง แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียในสภาวะไร้อากาศ ที่ 773 K เพื่อให้ได้น้ำมันจากการไพโรไลซิส น้ำมันจากการไพโรไลซิสดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทดสอบปฏิกิริยาออกซิเดทีฟแคตริกกิ่งบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ พบว่า ปริมาณคาร์บอนที่นำกลับได้ในน้ำมันไพโรไลซิสมีประมาณร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก น้ำมันไพโรไลซิสนี้จะถูกนำมาทดสอบปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์เกรดการค้า ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์เกรดการค้าที่ส่งเสริมด้วยเซอร์โคเนีย ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนและวิธีตกตะกอนร่วมกับเซอร์โคเนีย การทดสอบปฏิกิริยากระทำที่สภาวะอุณหภูมิ 673 K ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการไหลของสารตั้งต้นเท่ากับ 4 ชั่วโมง การทดสอบปฏิกิริยาใช้เวลา 1 ชั่วโมง ผลจากการทดสอบปฏิกิริยาแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์สามารถนำกลับสารเคมีจำพวกเมทานอล คีโตนและฟีนอล โดยสามารถเพิ่มความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยการเติมเซอร์โคเนีย ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมจากเหล็กไนเตรดสามารถลดปริมาณคาร์บอนตกค้างบนตัวเร่งปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้ยังพบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยวิธีเคลือบฝัง โดยใช้ปริมาณเซอร์โคเนียร้อยละ 5 สามารถผลิตสารเคมีจำพวกเมทานอลและกรดแอสซิติค ในขณะที่การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวด้วยวิธีตกตะกอนร่วม โดยใช้ปริมาณเซอร์โคเนียร้อยละ 10 สามารถลดปริมาณองค์ประกอบที่ไม่ทราบชนิดในน้ำมันไพโรไลซิสและสามารถผลิตเมทานอล แอซิโตนและเมทิลเอทิลคีโตน

**Report Title** Recovery of useful chemicals from sludge by catalytic reaction

**By** Miss. Sinekaew Tippanun 47010272  
Mr. Tanadech Kanjanapan 47010318

**Advisor** Asst. Prof. Dr. Duangkamol Na-Ranong

**Co-advisor** Dr. Walairat Suksamai

**Report for** Bachelor Degree of Engineering (Chemical Engineering)  
Department of Chemical Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

## ABSTRACT

Recovery of useful chemicals (methanol, acetone and phenol) from palm oil mill effluent sludge using FeOx catalyst has been experimentally demonstrated in this study. The recovery process was divided into two steps: the sludge was pyrolysed in an inert atmosphere at 773 K to obtain liquid product called bio-oil and the bio-oil was employed as a reactant for oxidative cracking over the FeOx catalysts. The result showed that carbon was recovered in the bio-oil due to the pyrolysis approximately 16%. The catalytic cracking of the bio-oil was tested over a commercial FeOx(FeOx<sub>com</sub>), a ZrO<sub>2</sub> impregnated in the FeOx<sub>com</sub>, a FeOx prepared by precipitation method and a co-precipitated Zr-FeOx. The reaction was performed under the condition of T= 673 K, W/F= 4 h and the reaction time = 1 h. The result showed that the catalytic activity of FeOx catalyst can be enhanced by supporting ZrO<sub>2</sub> on it. FeOx prepared by Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O can reduce carbonaceous coke. Furthermore ZrO<sub>2</sub>(5)/FeOx prepared by impregnation method using FeOx(FeOx<sub>com</sub>) can produce methanol and acetone. While ZrO<sub>2</sub>(10)/FeOx prepared by co-precipitation method, can reduce “others” in pyrolysis oil and produce methanol acetone and MEK.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ดวงกมล ณะระนอง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความช่วยเหลือตลอดจนให้ความรู้ในการทำงานวิจัยครั้งนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.วัลย์รัตน์ สุขสมัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำแนะนำ ความรู้ และความช่วยเหลืออย่างมากในการวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณรัตนภรณ์ ยวงสวัสดิ์ และคุณพรธนิภา ฤาโชคชัยที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความช่วยเหลือช่วยเหลือต่างๆ เสมอมา

ขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณพิมพ์ใจ ภูษนะกิจ เจ้าหน้าที่ธุรการประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยเหลือการประสานงานนอกสถานที่ การเงินและคำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้คณะผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกครอบครัวของคณะผู้วิจัยที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้สามารถทำปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาโทฉบับนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับ ณ ที่นี้

ทรายแก้ว ทิพนันท์

ธนาเดช กาญจนพันธุ์

# สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | ก    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | ข    |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | ค    |
| สารบัญ.....   | ง    |
| สารบัญตาราง.....  | ช    |
| สารบัญรูป.....  | ซ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....                               | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....                                      | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย.....   | 2    |
| 1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....  | 2    |
| 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....  | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                            | 4    |
| 2.1 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม.....                                     | 4    |
| 2.2 วัสดุเหลือทิ้งจากการสกัดน้ำมันปาล์ม.....                          | 5    |
| 2.3 Decanter.....   | 6    |
| 2.4 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการทางชีวภาพ..... | 7    |
| 2.4.1 การลดความร้อนของน้ำเสีย.....                                    | 7    |
| 2.4.2 ระบบไร้อากาศ.....   | 7    |
| 2.4.3 ระบบมีอากาศ.....  | 8    |
| 2.5 ชีวมวลและกระบวนการแปรรูปชีวมวล.....                               | 9    |
| 2.5.1 ชีวมวล.....   | 9    |
| 2.5.2 กระบวนการแปรรูปชีวมวล.....                                      | 9    |
| 2.6 การไฟโรซิส.....   | 10   |
| 2.6.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาและบทบาทในกระบวนการไฟโรไลซิส.....               | 11   |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 12   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....   | 17   |
| 3.1 การเตรียมน้ำมันไพโรไลซิสจากกากตะกอนน้ำเสีย.....  | 17   |
| 3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....   | 17   |
| 3.1.2 วิธีการทดลอง.....  | 18   |
| 3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝัง.....  | 18   |
| 3.2.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....   | 18   |
| 3.2.2 วิธีการทดลอง.....  | 18   |
| 3.3 การทดสอบปฏิกิริยา.....   | 19   |
| 3.3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....   | 19   |
| 3.3.2 วิธีการทดลอง.....  | 19   |
| 3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบ.....  | 20   |
| 3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....  | 20   |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....  | 21   |
| 4.1 การเตรียมน้ำมันไพโรไลซิสจากกากตะกอนน้ำเสีย.....  | 21   |
| 4.1.1 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส.....  | 21   |
| 4.1.2 องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิส.....  | 22   |
| 4.2 การทดสอบปฏิกิริยา.....   | 25   |
| 4.2.1 องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์.....   | 25   |
| 4.2.2 ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของเหล็กออกไซด์ชนิดต่างๆ.....                                     | 27   |
| 4.2.3 อิทธิพลของวิธีการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมเซอร์โคเนียด้วยวิธีเคลือบฝัง.....              | 29   |
| 4.2.4 อิทธิพลของตัวส่งเสริมเซอร์โคเนียบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง.....  | 30   |
| 4.2.5 อิทธิพลของตัวส่งเสริมเซอร์โคเนียบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีคตะกอนร่วม..... | 31   |
| 4.2.6 อิทธิพลของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝังและวิธีคตะกอนร่วม.....                     | 32   |
| 4.2.7 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....  | 33   |
| 4.2.8 ผลของอุณหภูมิ.....   | 34   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง (ต่อ) |      |
| 4.2.9 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....      | 35   |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....    | 36   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....                      | 36   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....                          | 37   |
| เอกสารอ้างอิง.....                           | 38   |
| ภาคผนวก ก.....                               | 40   |
| ภาคผนวก ข.....                               | 41   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบไร้อากาศ.....   | 8    |
| ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียด้วยบ่อแอโรบิก.....   | 8    |
| ตารางที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะของน้ำเสียจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซีย.....  | 12   |
| ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบโดยประมาณ (%) ของน้ำเสียจาก<br>โรงงานหีบน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซีย.....   | 13   |
| ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบที่เป็นกรดไขมันของ rape-seed เปรียบเทียบกับ POME.....  | 14   |
| ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบที่ได้จากการไพโรไลซิส.....   | 14   |
| ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนในน้ำมันไพโรไลซิส....  | 22   |
| ตารางที่ 4.2 ปริมาณองค์ประกอบในน้ำมันไพโรไลซิสที่ทราบชนิดแน่ชัดจากการวิเคราะห์ด้วย<br>เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID..... | 23   |
| ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสจากการวิเคราะห์ด้วย<br>เครื่อง GC/MS (ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย).....                           | 24   |
| ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบปฏิกิริยา<br>โดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS(ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย).....           | 26   |
| ตารางที่ ก.1 สารตั้งต้นและสัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสจากตะกอนน้ำเสีย.....   | 40   |
| ตารางที่ ข.2 ส่วนประกอบในน้ำมันไพโรไลซิสและสูตรโครงสร้าง.....   | 41   |

## สารบัญรูป

| รูปที่      | หน้า  |
|-------------|---|
| รูปที่ 2.1  | กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม..... 5   |
| รูปที่ 2.2  | วัสดุส่วนต่างๆ ที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย<br>เมื่อเดือนธันวาคม พ.ศ.2546.....6  |
| รูปที่ 2.3  | กระบวนการไพโรไลซิส.....11   |
| รูปที่ 3.1  | อุปกรณ์การทำไพโรไลซิส.....17  |
| รูปที่ 3.2  | ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบปฏิกิริยา.....19  |
| รูปที่ 4.1  | กราฟแสดงสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส.....21  |
| รูปที่ 4.2  | โครมาโทแกรมของน้ำมันไพโรไลซิสจากการวิเคราะห์<br>ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID.....22   |
| รูปที่ 4.3  | โครมาโทแกรมของน้ำมันไพโรไลซิสจาก<br>การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS (ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย).....23   |
| รูปที่ 4.4  | โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบปฏิกิริยา<br>โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา $ZrO_2(5) \cdot FeOx$ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS<br>(ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย).....25 |
| รูปที่ 4.5  | กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยาด้วยเหล็กออกไซด์ที่เตรียมต่างกัน...27   |
| รูปที่ 4.6  | กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยาด้วย<br>$ZrO_2(5)/FeOx$ ที่ปรับสภาพต่างกัน.....29   |
| รูปที่ 4.7  | กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยา<br>ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง.....30   |
| รูปที่ 4.8  | กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยา<br>ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนร่วม.....31   |
| รูปที่ 4.9  | กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยา<br>ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง.....32   |
| รูปที่ 4.10 | กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วย $ZrO_2(7.7) \cdot FeOx$ .....33  |
| รูปที่ 4.11 | กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยา<br>ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา $ZrO_2(7.7) \cdot FeOx$ .....34  |
| รูปที่ 4.12 | XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการใช้ทดสอบปฏิกิริยา.....35   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญปัญหา

จากปัญหาราคาน้ำมันที่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดจนปัญหาภาวะวิกฤตการณ์โลกรื้อน ส่งผลให้มนุษย์ตระหนักถึงความสำคัญของการใช้พลังงานอย่างเป็นประโยชน์มากขึ้น ตลอดจนให้ความสำคัญในการหาแหล่งพลังงานชนิดใหม่ เพื่อทดแทนพลังงานจากได้พื้นพิภพ หนึ่ง การนำเอาพลังงานชีวมวลมาใช้ประโยชน์เพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากน้ำมันจึงเป็นอีก ทางเลือกหนึ่งที่หน่วยงานต่างๆ ให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะพืชที่ถูกกล่าวถึงเป็นอย่างมาก คือปาล์มน้ำมัน โดยในปัจจุบันประเทศไทยมีนโยบายการส่งเสริมการนำปาล์มน้ำมันมา ผลิตไบโอดีเซลทำให้มีโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง(54 โรงงาน) มีกำลังการผลิต น้ำมันปาล์มรวมประมาณ 535,000 ตัน / ปี [1]

ปาล์มน้ำมันนอกจากจะเป็นพืชน้ำมันที่มีบทบาทสำคัญในธุรกิจน้ำมันพืชเพื่อการบริโภค และเป็นวัตถุดิบอุตสาหกรรมต่อเนื่องอีกหลายอุตสาหกรรมแล้ว ปาล์มน้ำมันยังเป็นพืชที่น่าจับตามองว่า ในอนาคตจะมีบทบาทสำคัญในการนำไปใช้ผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจะเป็แหล่งพลังงาน ทดแทนในอนาคต โดยขั้นตอนต่าง ๆ ในการหีบปาล์มจำเป็นต้องใช้น้ำและพลังงานมาก ทำให้เกิด น้ำเสียเป็นจำนวนมากเช่นกัน จากข้อมูลของกระทรวงพลังงานพ.ศ.2546 1 ตันปาล์มสดสามารถ สกัดน้ำมันปาล์มได้ร้อยละ 16 (ประมาณ 230 ลิตร) และจะมีน้ำเสียเกิดขึ้นร้อยละ 27 (ประมาณ 0.40 ลูกบาศก์เมตร) ดังนั้นใน 1 ปี อุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มโดยรวมจะมีปริมาณน้ำเสียรวม ทั้งสิ้น 1.11 ล้านลูกบาศก์เมตรต่อปี [2]

ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนไม่เหมาะในการนำมาใช้ในการบำบัด น้ำเสียจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์ม เนื่องจากใช้เวลาในการบำบัดนานทำให้เปลืองพื้นที่ในการ บำบัด จึงควรพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ปริมาณมากในระยะเวลาสั้นมาทดแทน การใช้ปฏิกิริยาเชิงเร่งในการนำกลับสารเคมีจากน้ำเสียถือเป็นแนวทางหนึ่งที่มีความเป็นไปได้สูง ทั้งนี้เพราะกากตะกอนน้ำเสียที่ถูกแยกออกโดย decanter จะมีส่วนผสมของเส้นใยและไขมันเป็น หลัก เมื่อนำไปไพโรไลซิสจะได้น้ำมันที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดปะปนอยู่ จึง สามารถนำกลับสารเคมีที่มีมูลค่าสูงจากน้ำเสียได้เมื่อเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการนำกลับสารเคมีมูลค่าสูงจาก กากตะกอนน้ำเสียโรงงานหีบน้ำมันปาล์ม และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรปฏิบัติงานต่างๆ ที่มีผลต่อ ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการนำกลับสารเคมีมูลค่าสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับสารเคมีจากตะกอนน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเชิงเร่ง

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อการทำปฏิกิริยา ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ วิธีการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวส่งเสริม และการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองโดยเริ่มจากนำกากตะกอนน้ำเสียไปไพโรไลซิสเพื่อให้ได้น้ำมัน แล้วจึงนำน้ำมันที่ได้ไปทดสอบปฏิกิริยาการนำกลับสารเคมี โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุที่ปฏิบัติงานภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันคงที่ และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี โดยเลือกพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยา คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ (เหล็กออกไซด์เกรดการค้า เหล็กออกไซด์เกรดการค้าปรับสภาพด้วยไอน้ำ และเหล็กออกไซด์ที่เตรียมขึ้น) วิธีการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา (การปรับสภาพด้วยไอน้ำ ก่อนและหลังการเคมเซอร์โคเนีย) วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (วิธีการเคลือบฝังและวิธีการตกตะกอนร่วม) ปริมาณตัวส่งเสริม (วิธีการเคลือบฝัง: ร้อยละ 0, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก และวิธีการตกตะกอนร่วม: ร้อยละ 0, 5, 7.7, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก) และการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ครั้งแรก และใช้ซ้ำ)

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

- 1.4.1 ค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม
- 1.4.2 ศึกษางานวิจัยในด้านปฏิกิริยาเชิงเร่งที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.3 เตรียมสารตั้งต้นจากการไพโรไลซิส
- 1.4.4 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา
- 1.4.5 ทำการทดสอบปฏิกิริยา เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับสารเคมี
- 1.4.6 ปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยา
- 1.4.7 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองและสรุปผลการทดลอง
- 1.4.8 จัดทำรายงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา เพื่อให้ได้สารเคมีจำพวกเมทานอล คีโตนและฟินอลในปริมาณมากที่สุด

1.5.2 ทราบข้อมูลเบื้องต้นในการที่จะนำไปปรับปรุงกระบวนการเพื่อการพัฒนาต่อไป



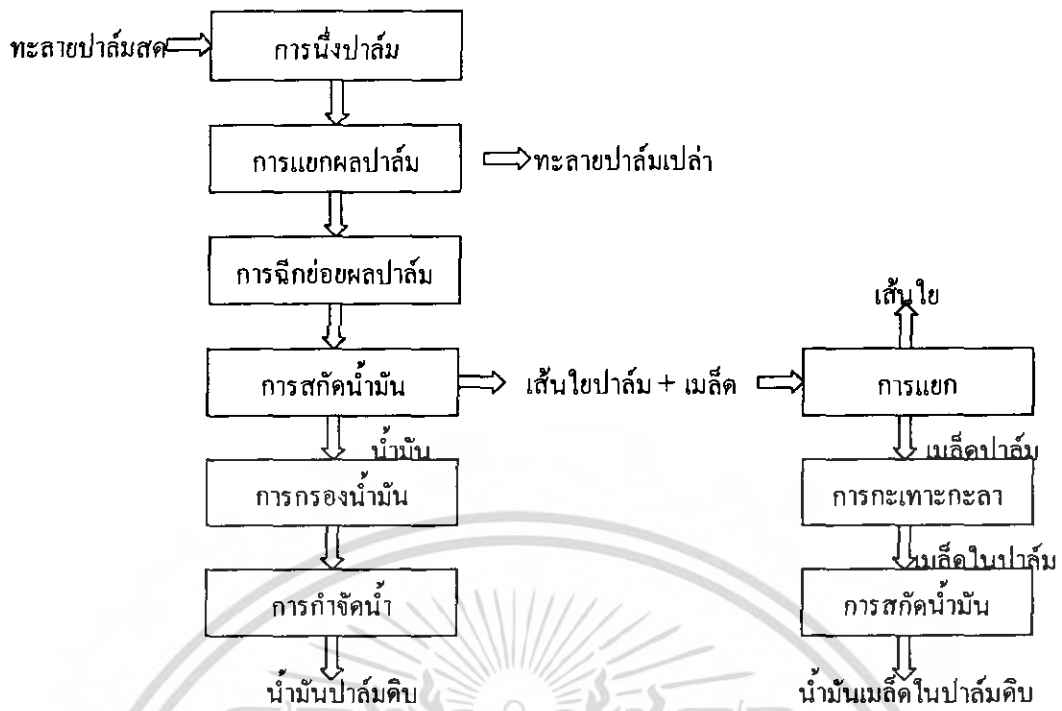
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม [3]

เริ่มจากการนำทะลายปาล์มอบด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 120 – 130 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 45 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นเวลา 45 นาที การอบทะลายมีจุดประสงค์ในการทำลายปฏิกิริยาไลโปไลซิสที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในผลปาล์มและทำให้ผลปาล์มอ่อนนุ่มและหลุดออกจากทะลายได้ง่าย ทะลายปาล์มที่อบแล้วจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องแยกผลปาล์มออกจากทะลายซึ่งส่วนใหญ่เป็นเครื่องแบบโรตารี หมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 23 รอบต่อนาที ทะลายปาล์มเปล่าจะถูกลำเลียงเข้าสู่เตาเผาทะลายเพื่อทำเป็นปุ๋ยคอกไป ส่วนผลปาล์มก็ถูกนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยผลปาล์ม ซึ่งมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอก ข้างในมีใบพัดกววนผลปาล์มให้เส้นใยฉีกย่อยออกจากเมล็ด และเซลล์น้ำมันแตกตัวออกมาเพื่อง่ายต่อการหีบน้ำมัน เวลาที่ใช้กวนนานประมาณ 15 ถึง 20 นาที จากนั้นจะถูกป้อนเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัดซึ่งส่วนมากเป็นเกลียวอัดคู่ทำงานโดยอัตโนมัติ น้ำมันที่สกัดได้จะถูกส่งไปยังถังรองซึ่งแยกน้ำมันออกจากน้ำกับเศษเส้นใยและสิ่งสกปรกอื่นๆ ในขั้นแรก แล้วนำไปเข้าเครื่องเหวี่ยงเพื่อให้น้ำมันใสสะอาดขึ้น จากนั้นนำไปไล่ความชื้นให้ได้ตามมาตรฐาน จากนั้นนำไปเก็บในถังเก็บน้ำมันขนาดใหญ่ ส่วนกากปาล์มจะถูกนำมาแยกเอาเส้นใยออกจากเมล็ดด้วยเครื่องแยกเส้นใยซึ่งส่วนใหญ่จะใช้แรงลมเป่าให้เส้นใยลอยไปตามท่อไปเข้าเตาของหม้อกำเนิดไอน้ำ เมล็ดที่แยกเส้นใยออกแล้วจะถูกอบทำให้แห้งและขัดให้สะอาด จากนั้นนำไปคัดขนาดและกะเทาะเมล็ดด้วยเครื่องกะเทาะซึ่งใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เมล็ดที่กะเทาะแล้วจะถูกนำไปแยกเศษกะลาออกจากเมล็ดในด้วยเครื่องแยกเศษกะลาซึ่งอาจใช้แบบไฮดรอลิกโคลน คือแยกด้วยน้ำหรือใช้แรงลมก็ได้ จากนั้นเมล็ดในจะถูกนำมาอบให้แห้งให้มีความชื้นไม่เกิน 7% ก่อนนำไปหีบน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.1

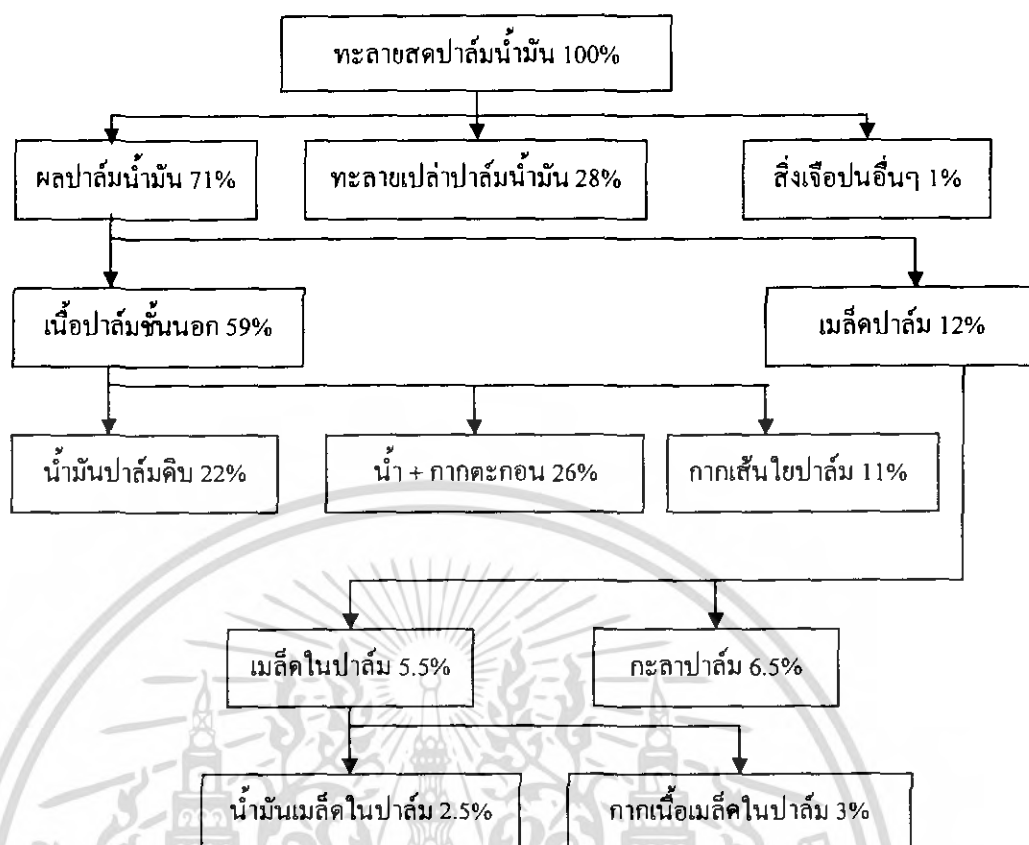


รูปที่ 2.1 กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม [4]

ขั้นตอนทั้งหมดนี้จำเป็นต้องใช้น้ำและพลังงานเป็นปริมาณมาก และยังทำให้เกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการนึ่งผลปาล์มและการแยกน้ำออกจากน้ำมัน ซึ่งในน้ำเสียนั้นจะมีสิ่งสกปรกในรูปของไขมัน น้ำมัน และสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่มาก น้ำเสียเหล่านี้จึงถูกส่งเข้าสู่ decanter เพื่อแยกตะกอนออกมาก่อนส่งเข้าสู่ระบบบำบัดต่อไป

## 2.2 วัสดุเหลือทิ้งจากการสกัดน้ำมันปาล์ม [5]

ในการสกัดน้ำมันปาล์มเมื่อพิจารณาจากผลปาล์มทั้งทะลาย 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีวัสดุเหลือทิ้งเกิดขึ้น เช่น ทะลายเปล่า กากเส้นใยปาล์ม กากเนื้อเมล็ดในปาล์ม กะลาปาล์ม น้ำและกากตะกอน ในสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า มีปริมาณน้ำและกากตะกอนและสิ่งสกปรกสูงถึง 26% จากทะลายปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 2.2 วัสดุส่วนต่างๆ ที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย  
เมื่อเดือนธันวาคม พ.ศ.2546 [5]

### 2.3 Decanter [6]

Decanter เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้แยกของผสมระหว่างของแข็งและของเหลว โดยใช้แรงเหวี่ยงศูนย์กลาง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม รวมไปถึงโรงงานบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการแยกเกิดขึ้นคล้ายๆ กับถังตกตะกอน แต่ในกรณีของ decanter นี้จะมี bowl ซึ่งมีลักษณะคล้ายกรวยและมีสกรูเพื่อหมุนด้วยความเร็วที่ต่างกัน โดยส่วนแรกของ bowl จะเป็นทรงกระบอก ซึ่งมีทางเข้าของของผสมระหว่างของเหลวและของแข็งเข้ามา ในขั้นตอนนี้จะทำการแยกน้ำส่วนใหญ่ออก น้ำจะถูกปล่อยออกไป ส่วนของแข็งที่ยังเหลืออยู่ จะถูกสกรูดันไปในอีกส่วนหนึ่งของ bowl ซึ่งมีลักษณะเป็นโคน ในขั้นตอนนี้สกรูมีอัตราการหมุนน้อยลง ทำให้ของแข็งเกิดการอัดตัวกันแน่น ของแข็งนี้จะถูกปล่อยออกจาก decanter โดยของแข็งที่ได้จะมีปริมาณน้ำน้อยลง เพื่อให้เป็นของแข็งที่เหมาะสมในการฝังกลบ ตาก หรือเผาต่อไป

## 2.4 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการทางชีวภาพ [7]

น้ำเสียจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์มเป็นน้ำเสียที่มีไขมันและของแข็งแขวนลอยสูง เมื่อผ่านการแยกน้ำมัน, ไขมัน และของแข็งแขวนลอยในขั้นต้นแล้ว จะถูกป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งมีทั้งการบำบัดแบบไร้อากาศและแบบเติมอากาศ สำหรับการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีวภาพมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 2.4.1 การลดความร้อนของน้ำเสีย

อุณหภูมิที่เหมาะสมของระบบการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ คือ 37 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมีอุณหภูมิ 75 – 90 องศาเซลเซียส ทำให้กระบวนการทางชีวภาพเริ่มต้นขึ้นเร็วมากภายใต้สภาวะไร้อากาศ เกิดกรดขึ้นในระบบเนื่องจากการเปลี่ยนน้ำมันและไขมันให้กลายเป็นกรดไขมันโดยเอนไซม์ ซึ่งกรดไขมันที่เกิดขึ้นมีกลิ่นเหม็น เพื่อเป็นการลดปัญหาดังกล่าวจึงจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของน้ำเสียลง โดยใช้ทางระบายน้ำที่มีระยะทางยาวๆ หรือใช้บ่อลดความร้อน

### 2.4.2 ระบบไร้อากาศ (Anaerobic system)

การบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศเหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และของแข็งเจือปนอยู่เป็นปริมาณมาก โดยบ่อสำหรับการบำบัดแบบไร้อากาศจะถูกออกแบบให้มีการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบในอัตราสูงมากจนสาหร่ายและการเติมออกซิเจนจากผิวหน้าด้านบนของบ่อเกิดขึ้นไม่ทัน และของแข็งในน้ำเสียจะตกลงสู่ก้นบ่อก่อนจะถูกย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศต่อไป การบำบัดด้วยวิธีนี้จะทำให้ได้ก๊าซชีวภาพซึ่งอาจรวบรวมไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้

บ่อที่ใช้ในการบำบัดแบบไร้อากาศมีอยู่ 2 ประเภท คือ บ่อแบบเปิดและบ่อแบบปิด ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบ ไร้อากาศ

| ประเภทของบ่อ          | ข้อดี   | ข้อเสีย  |
|-----------------------|---|--|
| 1. บ่อไร้อากาศแบบเปิด | 1. การก่อสร้างระบบทำได้ง่าย<br>2. การดำเนินการไม่ซับซ้อนและมีการบำรุงรักษาน้อย                                  | 1. ต้องใช้พื้นที่มาก<br>2. ไม่สามารถเก็บแก๊สชีวภาพได้<br>3. มีกลิ่นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และกรดอินทรีย์                                      |
| 2. บ่อไร้อากาศแบบปิด  | 1. ใช้พื้นที่ขนาดเล็กกว่าบ่อไร้อากาศแบบเปิด<br>2. สามารถนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ได้<br>3. ไม่มีกลิ่นเหม็นรบกวน | 1. มีราคาสูง<br>2. จำเป็นต้องมีระบบความปลอดภัยที่พิเศษเพื่อป้องกันการระเบิด<br>3. ต้องมีอุปกรณ์เพิ่มเติมสำหรับการเก็บแก๊สไว้เพื่อใช้ประโยชน์ |

#### 2.4.3 ระบบมีอากาศ (Aerobic system)

เป็นการบำบัดน้ำเสียโดยใช้อากาศ ในกรณีที่น่าน้ำทิ้งไปใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยในการปลูกพืช โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มอาจไม่จำเป็นต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียแบบอื่นหลังจากการบำบัดแบบไร้อากาศ แต่หากโรงงานต้องการปล่อยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จำเป็นต้องมีระบบแบบมีอากาศร่วมด้วย

บ่อแอโรบิกเป็นบ่อที่มีแบคทีเรียและสาหร่ายแขวนลอยอยู่ เป็นบ่อที่มีความลึกไม่มากนัก เพื่อให้ออกซิเจนกระจายทั่วทั้งบ่อและมีสภาพเป็นแอโรบิกตลอดความลึก โดยอาศัยออกซิเจนจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย และการเติมอากาศที่ผิวหน้า และยังสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ส่วนหนึ่ง โดยอาศัยแสงแดดอีกด้วย บ่อแอโรบิกมีข้อดีและข้อจำกัดดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของการบำบัดน้ำเสียด้วยบ่อแอโรบิก

| ข้อดี  | ข้อเสีย  |
|--|--|
| 1. ค่าลงทุนก่อสร้างต่ำ<br>2. ประสิทธิภาพของระบบสูง<br>3. มีกากตะกอนและกลิ่นเหม็นเกิดขึ้นน้อย<br>4. การดำเนินการและบำรุงรักษาง่าย | 1. ค่าใช้จ่ายสูงในส่วนของค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับเครื่องเติมอากาศ<br>2. ต้องมีการรักษาดูแลและซ่อมบำรุงเครื่องเติมอากาศอย่างสม่ำเสมอ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ชีวมวลและกระบวนการแปรรูปชีวมวล [8]

### 2.5.1 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) หมายถึงอินทรีย์สารที่ได้จากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญของโลก ชีวมวลสามารถนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลแบ่งตามแหล่งที่มาได้ดังนี้

1. พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops)
2. เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agricultural residues)
3. ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues)
4. ของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน

ตัวอย่างชีวมวล เช่น

แกลบ ได้จากการสีข้าวเปลือก

ชานอ้อย ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย

เศษไม้ ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือ ไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้

กากปาล์ม ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด

กากมันสำปะหลัง ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ชังข้าวโพด ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก

กากและกะลามะพร้าว ได้จากการนำมะพร้าวมาปอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าว

ลำเห็ดได้จากการผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น

### 2.5.2 กระบวนการแปรรูปชีวมวล

กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ มีดังนี้คือ

ก. การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และ เศษไม้

ข. การผลิตก๊าซ (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน

ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้กับกังหันแก๊ส

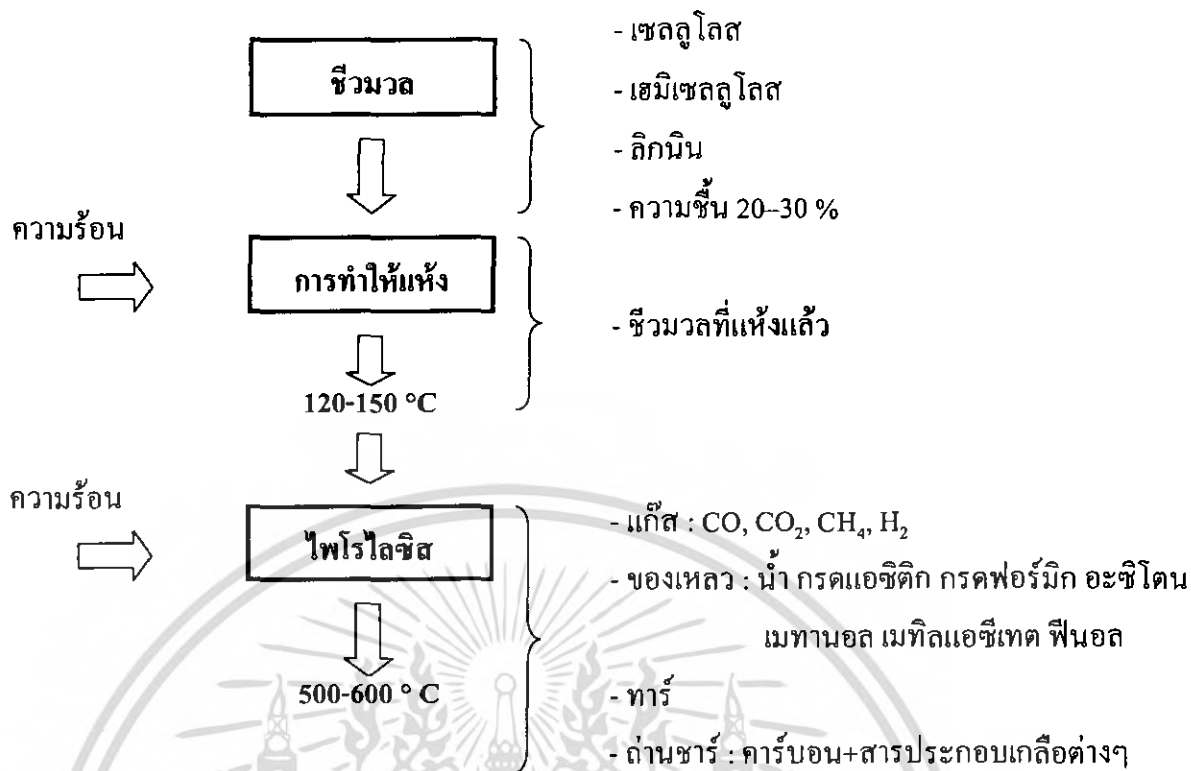
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค. การหมัก (fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า
- ง. การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้
- กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน
  - กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการ transesterification เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล
  - กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่นกระบวนการไพโรไลซิส เมื่อวัสดุการเกษตรได้รับความร้อนสูงในสภาวะไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบของเหลวและแก๊สผสม

## 2.6 การไพโรไลซิส [9]

การไพโรไลซิสคือกระบวนการสลายตัวของสารด้วยความร้อนในที่อับอากาศในช่วงอุณหภูมิ 500-800 °C โดยได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ แก๊ส (คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์, และแก๊สไฮโดรคาร์บอน), ของเหลว (สารละลายอินทรีย์และน้ำมันดิน (Tar)) และของแข็ง (ถ่านไม้) ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของมวลชีวภาพและวิธีการให้ความร้อน มวลชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต ได้แก่ เศษพืชที่เหลือทิ้งจากการเกษตรหรือจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เช่น ชานอ้อย, ฟางข้าว, เปลือกข้าว, ไม้และเปลือกไม้ชนิดต่างๆ เป็นต้น

กระบวนการไพโรไลซิสแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 โดยเริ่มจากการทำให้ชีวมวลซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ที่มีความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักให้ปราศจากน้ำ โดยอาศัยกระบวนการทำให้แห้งที่อุณหภูมิประมาณ 120-150 °C จากนั้นชีวมวลจะถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิประมาณ 500-600 °C เพื่อทำลายพันธะทางเคมีของโมเลกุลได้เป็นผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สต่างๆ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน และผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สามารถกลั่นตัวได้ เช่น น้ำ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก อะซิโตน เมทานอล เมทิลอะซิเตท ฟีนอล เป็นต้น รวมทั้งพวกทาร์และชาร์



รูปที่ 2.3 กระบวนการไพโรไลซิส [10]

### 2.6.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาและบทบาทในกระบวนการไพโรไลซิส [11]

การปรับปรุงน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสให้มีคุณภาพที่ดีขึ้นจะสามารถส่งเสริมให้การไพโรไลซิสมีคุณค่าและความคุ้มค่าเพิ่มมากขึ้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมีร่วมกับกระบวนการไพโรไลซิส เป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันที่ได้ โดยทั่วไป ตัวเร่งปฏิกิริยาคือ สารประกอบทางเคมีที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น โดยเมื่อหลังจากการช่วยทำปฏิกิริยาแล้วตัวมันเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวร และ/หรือ ไม่เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติและความสามารถในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยการเติมธาตุชนิดต่างๆ ลงไปบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไป ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทำหน้าที่หลักดังต่อไปนี้ คือ

- ช่วยในการแตกตัวของวัตถุดิบ
- ช่วยให้เลือกผลิตภัณฑ์ของน้ำมันและก๊าซได้อย่างเฉพาะเจาะจง
- ช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันจะมีองค์ประกอบและคุณสมบัติที่ต่างกัน การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างถูกต้องและเหมาะสม จึงเป็นเรื่องที่สำคัญในการปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณภาพน้ำมันและก๊าซที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสให้มีคุณสมบัติตามต้องการได้ การใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสสามารถทำได้โดยใส่รวมลงไปในตัวถุดิบ หรือใส่ลงไปในส่วนท้ายของปฏิกรณ์ หรืออาจมีการสร้างปฏิกรณ์อีกเครื่องแยกออกไปจากปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเพื่อใช้เป็นปฏิกรณ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาในการปรับปรุงคุณภาพของผลผลิตที่ได้จากปฏิกรณ์ไพโรไลซิสก็ได้

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำเสียจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์ม (Palm oil mill effluent) เกิดจากขั้นตอนการนึ่งปาล์ม การทำไฮโดรไลโซลของน้ำเสีย และการแยกกากหรือตะกอน [12] โดยประมาณได้ว่าน้ำเสียจากการหีบน้ำมันปาล์มมีปริมาณ 0.9 – 1.5 ลูกบาศก์เมตรต่อปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ (CPO) 1 ตัน โดยน้ำเสียดังกล่าวมีคาร์บอนในรูปสารประกอบอินทรีย์เป็นปริมาณมากจึงทำให้มีค่า BOD (Biochemical oxygen demand) มากกว่า 20 g/l และมีส่วนประกอบของไนโตรเจนประมาณ 0.2 – 0.5 g/l ในรูปของแอมโมเนียและไนโตรเจนรวม ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะเฉพาะของน้ำเสียจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์มในประเทศมาเลเซีย

| Parameter                 | Concentration (mg/L) | Element    | Concentration (mg/L) |
|---------------------------|----------------------|------------|----------------------|
| Oil and grease            | 4,000 – 6,000        | Potassium  | 2,270                |
| Biochemical oxygen demand | 25,000               | Magnesium  | 615                  |
| Chemical oxygen demand    | 50,000               | Calcium    | 439                  |
| Total solid               | 40,500               | Phosphorus | 180                  |
| Suspended solids          | 18,000               | Iron       | 46.5                 |
| Total volatile solids     | 34,000               | Boron      | 7.6                  |
| Total Nitrogen            | 750                  | Zinc       | 2.3                  |
| Ammonicals nitrogen       | 35                   | Manganese  | 2                    |
|                           |                      | Copper     | 0.89                 |

Habib และคณะ [13] ศึกษาสารอาหารที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์ม เพื่อใช้เป็นอาหารเลี้ยงสิ่งมีชีวิตได้น้ำ เช่น หนอนในน้ำ พบว่า น้ำเสียจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์มประกอบด้วยสารอินทรีย์ปริมาณสูง ได้แก่ โปรตีน, lipid, กรดอะมิโน, กรดไขมัน, แคลโรทิน และยัง

มีเส้นใยและอื่นๆ เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย องค์ประกอบ โดยประมาณของน้ำเสียดังกล่าวจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์มเป็นดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบโดยประมาณ (%) ของน้ำเสียดังกล่าวจากโรงงานหีบน้ำมันปาล์มในประเทศไทย

| องค์ประกอบ            | เปอร์เซ็นต์   |
|-----------------------|---------------|
| Moisture              | 6.99 ± 0.14   |
| Crude protein         | 12.75 ± 1.30  |
| Crude lipid           | 10.21 ± 1.24  |
| Ash                   | 14.88 ± 1.35  |
| Carbohydrate          | 29.55 ± 2.44  |
| Nitrogen free extract | 26.39 ± 2.33  |
| Total carotene        | 0.019 ± 0.001 |

สำหรับกรดอะมิโนมีส่วนประกอบของ Aspartic acid และ Glutamic acid เป็นปริมาณ 9.66 ± 0.15 % และ 10.88 ± 0.13 % ตามลำดับ และนอกจากนั้นยังมีกรดอะมิโนชนิดอื่นๆ อีก เช่น Glycine, Alanine, Methionine, Lysine เป็นต้น และสำหรับกรดไขมันมีส่วนประกอบของ Palmitic acid, Oleic acid, Myristic acid, Stearic acid, Linoleic acid เป็นปริมาณ 22.45 ± 1.88 %, 14.54 ± 1.25 %, 12.66 ± 0.12 %, 10.41 ± 0.54 %, 9.53 ± 1.20 % และกรดไขมันชนิดอื่นๆ เช่น Linolenic acid, Lauric acid เป็นต้น

M.Predel และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาการไพโรไลซิส rape-seed ภายในปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซิ่งเบด โดยศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 500 – 700 °C ซึ่งในการทดลองนี้ได้รับรู้ส่วนประกอบของ rape-seed ไว้ ซึ่งพบว่าคล้ายส่วนประกอบของกรดไขมันชนิดที่มีในน้ำเสียดังกล่าวจากโรงงานน้ำมันปาล์ม [13] ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และได้ทำการแสดงองค์ประกอบที่ได้จากการไพโรไลซิสส่วนต่างๆ ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 ส่วนประกอบที่เป็นกรดไขมันของ rape-seed เปรียบเทียบกับ POME

| กรดไขมัน              | Wt.% in rape-seed | Wt. % in POME |
|-----------------------|-------------------|---------------|
| Myristic acid C 14:0  | 0.5               | 12.7          |
| Palmitic C 16:0       | 4                 | 22.5          |
| Stearic acid C 18:0   | 1                 | 10.4          |
| Oleic acid C 18:1     | 60                | 14.5          |
| Linoleic acid C 18:2  | 20                | 9.5           |
| Linolenic acid C 18:3 | 9                 | 4.7           |
| Icosenoic acid C 20:1 | 2                 | -             |
| Erucic acid C 22:1    | 2                 | -             |

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบที่ได้จากการไพโรไลซิส

| องค์ประกอบ            | Cellulose<br>[15] | Rape-seed<br>[14] | Shell<br>[16] |
|-----------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Methanol              | -                 | -                 | -             |
| Acetone               | -                 | -                 | /             |
| Ketone                | /                 | /                 | /             |
| Aldehyde              | /                 | /                 | /             |
| Acetic acid           | /                 | -                 | /             |
| Fatty acid            | -                 | /                 | -             |
| Furan and derivative  | -                 | -                 | /             |
| Amide                 | -                 | /                 | -             |
| Phenol and derivative | -                 | /                 | /             |
| Pyridine              | -                 | -                 | -             |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Maria do Carmo Rangel และคณะ [17] ศึกษาการเปรียบเทียบกระบวนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาคด้วยวิธีตกตะกอนและวิธีเคลือบฝังเพื่อใช้ในปฏิกิริยา water gas shift ผลิตไฮโดรเจนความบริสุทธิ์สูง พบว่าในการเติมโครเมียมไม่ว่าจะเป็น โดยวิธีเคลือบฝังหรือตกตะกอนต่างก็ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และยังพบว่าการเตรียมตัวเร่งด้วยวิธีเคลือบฝังสามารถทำให้เกิดอนุภาคของโครเมียมที่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้มากกว่าวิธีตกตะกอน นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมโครเมียมจะไปเพิ่มความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา และวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยามีผลอย่างมากต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบตกตะกอนจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมโดยวิธีเคลือบฝัง ทั้งนี้เนื่องจากภายหลังการทำปฏิกิริยาแล้วในกรณีของตัวเร่งที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนจะมีการลดลงของความว่องไวต่อพื้นที่อย่างมาก ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝังการลดลงของความว่องไวต่อพื้นที่ที่ไม่สามารถเอาชนะการเพิ่มขึ้นของความว่องไวที่มีผลมาจากพื้นที่ผิวจำเพาะที่มีอยู่มากจึงยังทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวสูงอยู่

Masuda และคณะ [18] ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีประโยชน์จากของเหลวเหลือทิ้งจากการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม โดยเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งได้แก่ rare earth metal exchanged Y-type (REY) zeolites, nickel supporting REY(Ni-REY) zeolites และเหล็กไฮดรอกไซด์ (FeOOH) เนื่องจาก REY และ Ni-REY นั้นสามารถเปลี่ยนโครงสร้างของน้ำมันหนักให้กลายเป็นเชื้อเพลิงเบาได้ และเหล็กไฮดรอกไซด์สามารถสลายองค์ประกอบของ phthalic acid ได้ จากการวิจัยพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการนำกลับ ฟีนอล แอซิโตน และบิวทาโนน โดยไม่ทำให้เกิดของแข็งตกค้างเป็นปริมาณมาก และสามารถเพิ่มความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้โดยการเติมตัวส่งเสริมเซอร์โคเนียโดยวิธีการเคลือบฝัง โดยเติมเซอร์โคเนียในปริมาณ 7.7 wt% จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพสูงสุด อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาคือ อุณหภูมิ 400 °C และอัตราส่วนของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการป้อนสารตั้งต้นประมาณ 0.9 h Fumoto และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่เติมตัวส่งเสริมเซอร์โคเนียด้วยวิธีตกตะกอนร่วมสามารถนำกลับคีโตนจากน้ำเสียโรงงานบำบัดน้ำเสียทั่วไปซึ่งเป็นชีวมวลประเภทอื่นได้ดีอีกด้วย

นอกจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนร่วมสามารถใช้ในการย่อยสลาย tar ที่ได้จากการ gasification ให้กลายเป็นแก๊สซึ่งมีไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก และแก๊สอื่นๆ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และเอทิลีน [20] ซึ่งพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำโดยไม่มีการรีเจนเนอเรชั่น ทำให้เกิดร้อยละผลได้ของคาร์บอนของแก๊สผลิตภัณฑ์สูงถึงร้อยละ 80 จากร้อยละ 40 ในกรณีที่ไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อมีการใช้ซ้ำเป็นจำนวนครั้งมากขึ้น ทำให้แก๊สที่ได้มีไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง แต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพในการทำให้เกิดปฏิกิริยา water gas shift นั้นลดลงตามจำนวนครั้งการใช้ซ้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายของค์ประกอบของชีวมวลนั้นมีความเสถียร

Watanabe และคณะ [21] ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากชีวมวล (กลูโคสและเซลลูโลส) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเซอร์โคเนียในสภาวะ supercritical water และได้มีการเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะเดียวกัน พบว่าไฮโดรเจนที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเซอร์โคเนียนั้นมีปริมาณมากกว่าสองเท่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเหตุผลที่เลือกใช้เซอร์โคเนียเนื่องจากมีความว่องไวในสภาวะที่มีน้ำ

Fumoto และคณะ [22] ได้ทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกพันธะของสารโมเลกุลใหญ่ที่อยู่ในน้ำมันที่หลงเหลือในกระบวนการกลั่นน้ำมันด้วยการทำปฏิกิริยากับไอน้ำ บนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ส่งเสริมด้วยเซอร์โคเนีย โดยไอน้ำจะถูกแยกเป็นส่วนๆ ก่อนด้วยเซอร์โคเนีย ซึ่งจะทำให้เกิดธาตุออกซิเจนและไฮโดรเจน โดยออกซิเจนนี้จะอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์และจะเป็นตัวออกซิไดส์คาร์บอนโมเลกุลใหญ่ในน้ำมันดังกล่าว ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารจำพวกคีโรซีนและแก๊สโซลีน ส่วนไฮโดรเจนที่ยังหลงเหลืออยู่นั้นจะเติมลงไปนในสารโมเลกุลเบาเหล่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่มีการส่งเสริมด้วยเซอร์โคเนียจะมีความว่องไวลดลงเมื่อนำมาทำปฏิกิริยาอีกครั้ง เนื่องจากเหล็กออกไซด์มีการเปลี่ยนวิฤภาคจากฮีมาไทต์เป็นแมกนีไทต์

จากผลงานวิจัยดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์โดยมีเซอร์โคเนียเป็นตัวส่งเสริม มีความเป็นไปได้สูงในการนำกลับสารเคมีจากชีวมวลประเภทต่างๆ ที่มีองค์ประกอบเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ในงานวิจัยนี้จึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวขึ้นมาเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของกระบวนการ และทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาเชิงเร่ง

บทที่ 3

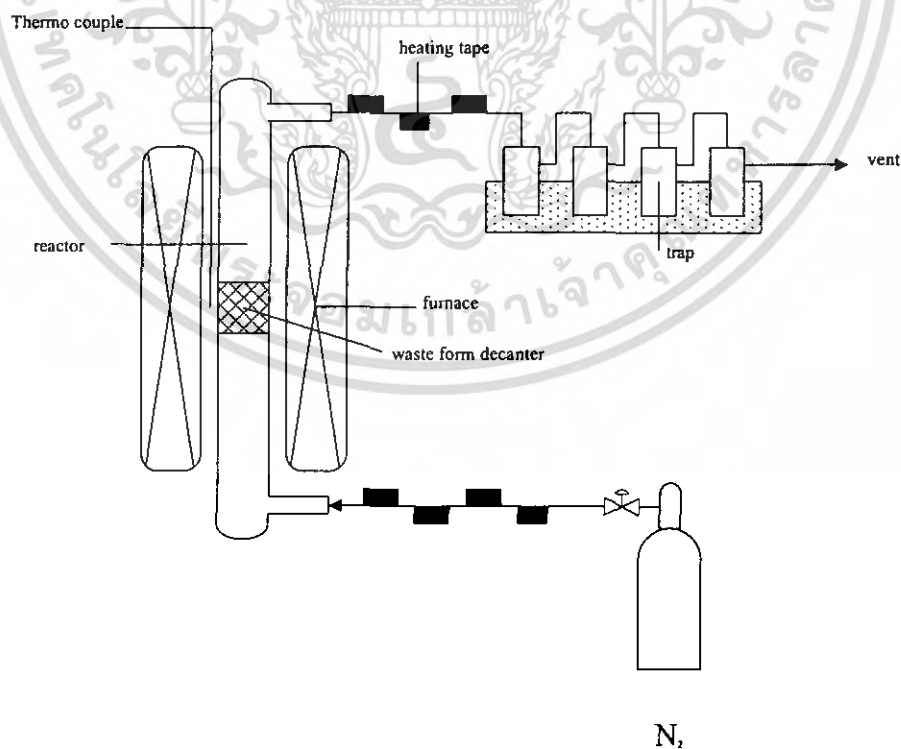
การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการนำกลับสารเคมีมูลค่าสูงจากกากตะกอนน้ำเสียโรงงานหีบน้ำมันปาล์ม และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรปฏิบัติงานต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการนำกลับสารเคมีมูลค่าสูง แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 2 ส่วน คือ การเตรียมน้ำมันไพโรไลซิสจากกากตะกอนน้ำเสีย และการทดสอบปฏิกิริยา

3.1 การเตรียมน้ำมันไพโรไลซิสจากกากตะกอนน้ำเสีย

3.1.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์การทำไพโรไลซิส ดังรูปที่ 3.1
2. กากตะกอนน้ำเสียจาก decanter
3. แก๊สไนโตรเจน (99.999%, PRAXAIR)
4. น้ำแข็ง



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์การทำไพโรไลซิส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาเอกสารให้อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 วิธีการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำไพโรไลซิสแสดงดังรูปที่ 3.1 โดยมีหลักการทำงาน คือ กากตะกอนน้ำเสียจาก decanter จะถูกบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งได้รับความร้อนจากเตาเผาภายนอก และมีการป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อพาสผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสออกนอกเครื่องปฏิกรณ์ โดยอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนจะถูกควบคุมด้วยวาล์วควบคุมแก๊ส และมีการอุ่นแก๊สไนโตรเจนให้ร้อนก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ผลิตภัณฑ์ซึ่งถูกพาออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ในสถานะแก๊สจะเคลื่อนที่เข้าสู่เครื่องควบแน่นที่อุณหภูมิ  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  กลายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว ส่วนแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้จะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ และจะมีของแข็งที่เหลือจากการไพโรไลซิสอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์

## 3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝัง (Impregnation)

### 3.2.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ปีม
2. บีกเกอร์ขนาด 250 ml จำนวน 2 ใบ
3. Magnetic stirrer
4. ครกบดสาร
5. เตาเผาอุณหภูมิสูง
6. ตะแกรงคัดขนาด
7. เหล็กออกไซด์เกรดการค้า ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Wako, Cat. No.096-04825, purity 95.0%)
8. เซอร์โคเนียมไนเตรดออกไซด์ไดไฮเดรต ( $\text{Zr}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , Wako, Cat. No.48066-00, purity 99.0%)
9. น้ำ RO

### 3.3.2 วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนัก  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Zr}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ตามต้องการ
2. ละลายสารทั้งสองด้วยน้ำ RO ลงในแต่ละบีกเกอร์
3. ปั่นกวน  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ในน้ำ RO เพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน
4. หยดสารละลาย  $\text{Zr}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ลงในบีกเกอร์ที่มี  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  พร้อมปั่นกวนตลอดเวลา
5. นำสารที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  จนแห้ง
6. บดให้เป็นผงละเอียด และนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
7. นำผงที่ได้ไปอัดเม็ดและคัดขนาดให้อยู่ในช่วง  $300 - 850\text{ }\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ เขียนย่อได้เป็น  $ZrO_2(Y)/FeOx$  โดย Y คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเซอร์โคเนีย

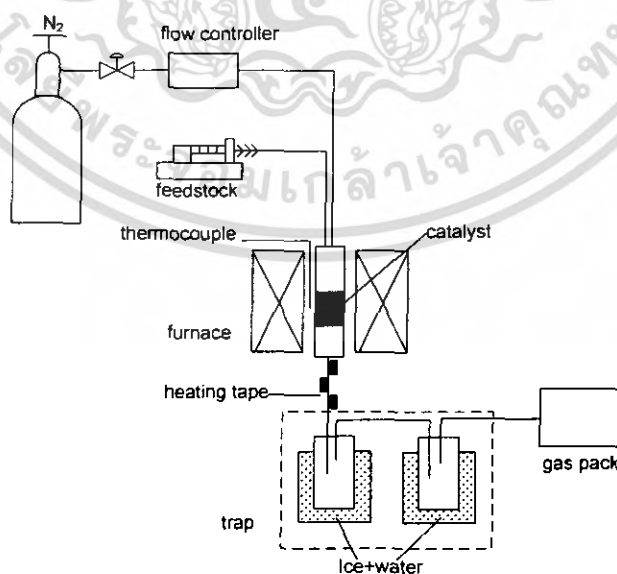
### 3.3 การทดสอบปฏิกิริยา (Reaction experiment)

#### 3.3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดอุปกรณ์สำหรับทดสอบปฏิกิริยา ดังรูปที่ 3.2
2. น้ำมันไพโรไลซิส
2. ไนโตรเจนบริสุทธิ์ 99.999%
3. น้ำแข็ง
4. หลอดหยด

#### 3.3.2 วิธีการทดลอง

การทดสอบปฏิกิริยาของน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสตะกอนน้ำเสียทำโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุที่ติดตั้งตามรูปที่ 3.2 ในการทดลองจะบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ตรงกึ่งกลางของเตาเผา ป้อนน้ำมันไพโรไลซิสเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วย syringe pump ( $F = 1 \text{ g/h}$ ) และใช้ไนโตรเจนเป็นแก๊สพา ( $v = 15 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ ) เมื่อสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์แล้วผลิตภัณฑ์จะออกจากเครื่องปฏิกรณ์โดยผ่านอุปกรณ์ควบแน่นที่อุณหภูมิ  $0^\circ\text{C}$  เพื่อดักจับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะถูกเก็บในถุงเก็บแก๊สซึ่งต่ออยู่ที่ทางออกของอุปกรณ์ควบแน่น



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์สำหรับการทดสอบปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบ

น้ำมันโพลีเอทิลีน วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID (GC; Shimadzu GC-17A; FID) และวิเคราะห์ด้วย GC/MS (GC; Agilent 6890N, MS; Agilent 5973) column DB-Wax ยาว 30 m. spit 50:1 Injector Volume ½ µL, Oven 240 °C, Temperature Program 100 °C – 230 °C (hold 2 hr) rate 3 °C/min และวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนด้วย CHNS analyzer (Perkin Elmer PE2400 SeriesII)

ผลิตภัณฑ์ของเหลว ถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID (GC; Shimadzu GC-17A; CP7549 Porapak Q, FID)

ผลิตภัณฑ์แก๊ส วิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID (GC; Shimadzu GC-17A; FID) และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดแบบ TCD (GC; Shimadzu GC – 8A; Activated carbon column, TCD)

### 3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา วิเคราะห์ด้วย X-Ray diffraction (XRD; Siemens; D8 Advance)

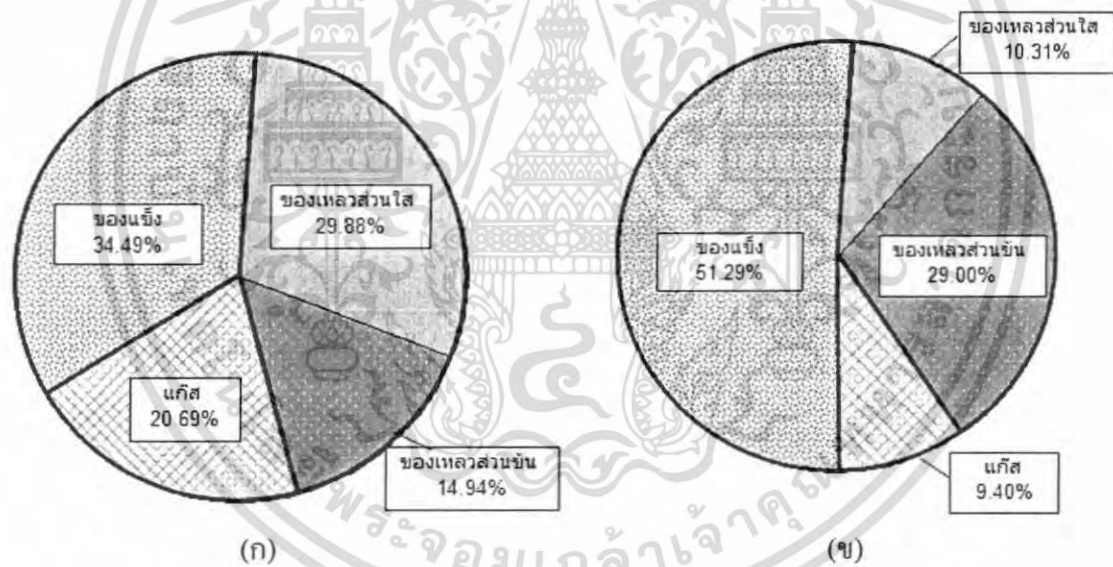
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การเตรียมน้ำมันไพโรไลซิสจากกากตะกอนน้ำเสีย

##### 4.1.1 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสกากตะกอนน้ำเสียทำขึ้นที่สภาวะอัตราการไหลของไนโตรเจน  $50 \text{ cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ , อุณหภูมิ  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 1 h ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้แก่ ของแข็ง, ของเหลว (ส่วนใสและส่วนขุ่น) และแก๊ส มีสัดส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักและสัดส่วนร้อยละ โดยน้ำหนักคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงสัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

(ก) ร้อยละ โดยน้ำหนัก

(ข) ร้อยละ โดยน้ำหนักคาร์บอน

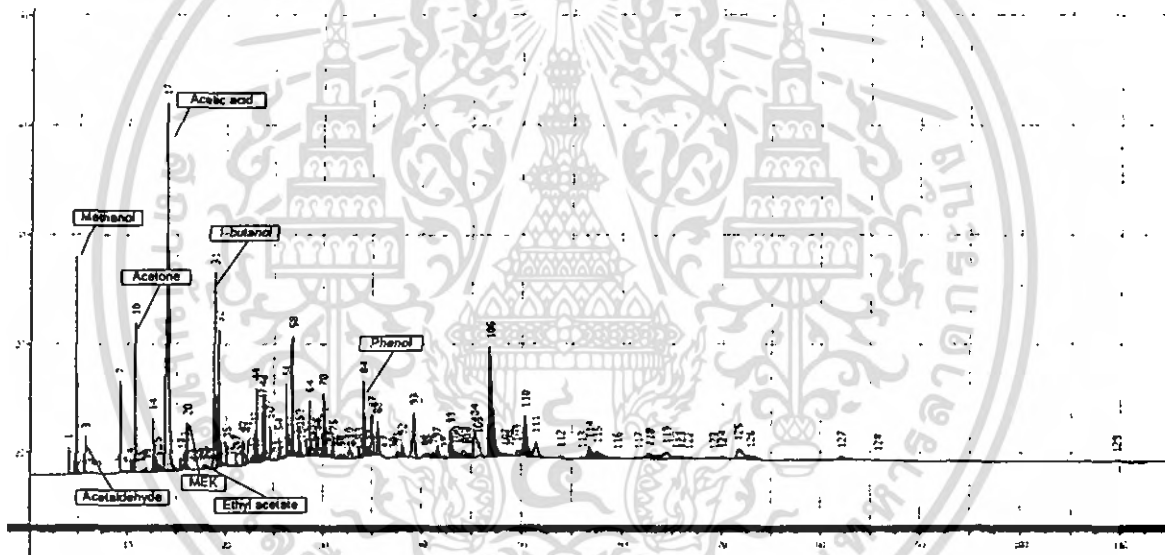
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิส

จากการวิเคราะห์ของเหลวส่วนใส (น้ำมันไพโรไลซิส) ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC; Shimadzu GC-17A; FID) พบว่ามีคาร์บอนอยู่ร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก แสดงโครมาโทแกรมได้ดังรูปที่ 4.2 และผลการวัดปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHNS/O analyzer แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนในน้ำมันไพโรไลซิส

| คาร์บอน<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไฮโดรเจน<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก) | ไนโตรเจน<br>(ร้อยละโดยน้ำหนัก) |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 12.629                        | 8.851                          | 0.510                          |



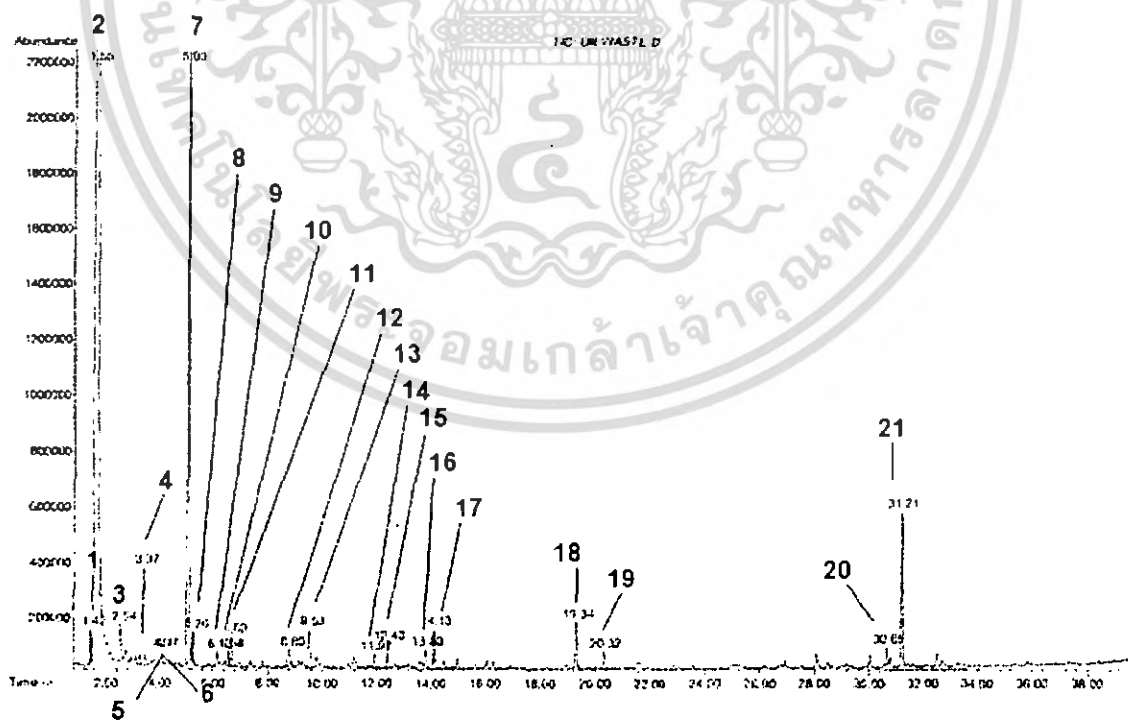
รูปที่ 4.2 โครมาโทแกรมของน้ำมันไพโรไลซิสจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID

จากรูปที่ 4.2 โครมาโทแกรมแสดงให้เห็นว่าในน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกากตะกอนน้ำเสียมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่มากกว่า 100 ชนิด โดยมีองค์ประกอบที่ทราบชนิดแน่ชัด คือ Methanol, Acetaldehyde, Acetone, Acetic acid, MEK, Ethyl acetate, 1-butanol และ Phenol ซึ่งมีปริมาณดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณองค์ประกอบในน้ำมันไพโรไลซิสที่ทราบชนิดแน่ชัดจากการวิเคราะห์ด้วย  
เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่มีตัวตรวจวัดแบบ FID

| องค์ประกอบ    | ปริมาณคาร์บอนร้อยละ |
|---------------|---------------------|
| methanol      | 4.2                 |
| acetaldehyde  | 0.6                 |
| acetone       | 2.2                 |
| acetic acid   | 20.0                |
| MEK           | 0.7                 |
| ethyl acetate | 0.1                 |
| 1-butanol     | 4.7                 |
| phenol        | 4.1                 |
| others        | 63.4                |
| รวม           | 100                 |

จากตารางที่ 4.2 พบว่า มีองค์ประกอบอื่นๆ เป็นปริมาณมากที่ยังไม่ทราบชนิดอยู่ซึ่งรวมเรียกว่า others จึงได้นำน้ำมันไพโรไลซิสไปวิเคราะห์ด้วย GC/MS ต่อไป แสดงผลได้ดังรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครมาโทแกรมของน้ำมันไพโรไลซิสจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS  
(ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของน้ำมันไพโรไลซิสจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS

(ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย)

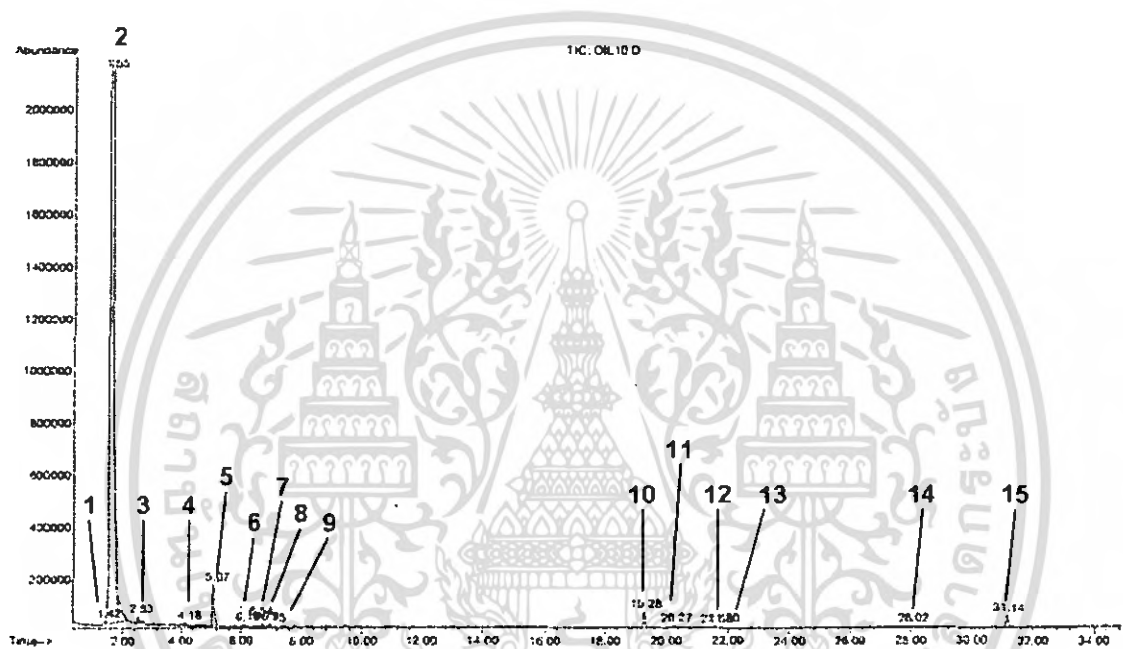
| พีคที่             | ชื่อสาร  | % ความ<br>นำเชื้อถือ             | พีคที่ | ชื่อสาร                                     | % ความ<br>นำเชื้อถือ |    |
|--------------------|--|----------------------------------|--------|---|----------------------|----|
| 1                  | methanamine  | 86                               | 16     | 3- amino-1,2,4- triazine                    | 53                   |    |
| 2                  | methyl Alcohol   | 2                                |        | 4(1H)-Pyrimidinone                          | 53                   |    |
| 3                  | pyridine   | 93                               |        | cyclopent-2-en-1,4- dione                   | 43                   |    |
|                    | 2-4 – pentadienenitrile                                | 93                               |        | 1H-Imidazole,1,2-dimethyl                   | 40                   |    |
|                    | 2-pyridenecarboxaldehyde                               | 64                               |        | 2-cyclopentene-1,4 –dione                   | 37                   |    |
|                    | picolinamide   | 64                               | 17     | 2-cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl     | 96                   |    |
| N-vinylpyridinium  | 53   | 1,2 –cyclopentanedione, 3-methyl |        | 90  |                      |    |
| 4                  | 2-propanone, 1-hydroxy                                 | 80                               |        | Phenol, 4-fluoro                            | 72                   |    |
| 5                  | 2-cyclopenten-1-one                                    | 87                               |        | 2-octene                                    | 64                   |    |
|                    | 2-cyclopenten-1-one, 3-methyl                          | 59                               |        | 1,2 -oxazinane -3-carbonitrile              | 58                   |    |
|                    | 1H-pyrazole, 3-methyl                                  | 46                               | 18     | phenol                                      | 93                   |    |
| 6                  | 2-cyclopenten-1-one, 2-methyl-                         | 93                               |        | 19  | 2-pyrrolidinone      | 87 |
| 7                  | acetic acid  | 91                               |        | (1,3)diazepan-2, 4-dione                    | 49                   |    |
| 8                  | 2-propanone, 1-(acetyloxy)                             | 64                               |        | 2(3H)-furanone, 5-butyldihydro              | 40                   |    |
|                    | 2,3 –butanedione                                       | 47                               |        | 1,3,2 –oxazaborolane, 2-buthyl              | 38                   |    |
|                    | 2-pentanone  | 47                               | 20     | 1,4:3,6-dianhydro- .alpha.-d-glucopyranose  | 95                   |    |
| 9                  | 1,4 –hexadiene, 2,5 –dimethyl-ethanone, 1-(2-furanyl)- | 80                               |        | 2-methyl 2-pentnoic acid                    | 50                   |    |
|                    | 2-furyl methyl ketone                                  | 45                               |        | 1-pentene, 3-ethyl                          | 50                   |    |
|                    | 2-furyl methyl ketone                                  | 45                               |        | ethyl ester of cyclopropane carboxylic acid | 47                   |    |
| 10                 | 2-cyclopenten-1-one, 3-methyl-                         | 94                               |        | 2-propanoic acid, 2-methyl-, ethyl ester    | 47                   |    |
|                    | 2,4 –dimethyl furan                                    | 72                               | 21     | 3-pyridinol                                 | 91                   |    |
| furan,2,4-dimethyl | 72   |                                  |        | 2(1H)-pyridinone                            | 80                   |    |
| 11                 | propanoic acid   | 90                               |        |   | 4-hydroxypyridine    | 78 |
|                    | butnoic acid   | 76                               |        |   | 2-hydroxypyridine    | 72 |
|                    | hexanoic acid  | 53                               |        | 2-aminopylazine                             | 64                   |    |
|                    | pentanoic acid   | 53                               |        |   |                      |    |
| 13                 | 2-furanmethanol  | 95                               |        |   |                      |    |
|                    | 3-furanmethanol  | 87                               |        |   |                      |    |
|                    | 2-(1,2 dideuteroxy ethyl)furan                         | 72                               |        |   |                      |    |
|                    | 14   | 2(5H)-furanone                   | 68     |   |                      |    |
|                    | 3,4 –dihydropyran                                      | 59                               |        |   |                      |    |
|                    | cyclopentanone   | 49                               |        |   |                      |    |
|                    | 2-methylbut-2-enal                                     | 43                               |        |   |                      |    |
|                    | 2-aminoxazole  | 43                               |        |   |                      |    |
|                    | 2-propenamide, N-methyl                                | 42                               |        |   |                      |    |
| 15                 | Acetamide  | 86                               |        |   |                      |    |
|                    | ethanamide   | 86                               |        |   |                      |    |
|                    | propanediamide   | 64                               |        |   |                      |    |
|                    | guanidine  | 56                               |        |   |                      |    |
|                    | guanidine(carbonate)                                   | 38                               |        |   |                      |    |
|                    | hydrazine, 1-methyl-1-propyl                           | 37                               |        |   |                      |    |
|                    | cyclobutanol   | 27                               |        |   |                      |    |
| 16                 | 4H-pyran-4-one   | 90                               |        |   |                      |    |
|                    | 4- cyclopentene-1,3 –dione                             | 59                               |        |   |                      |    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบปฏิกิริยา

### 4.2.1 องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่เติมเซอร์โคเนียด้วยวิธีตกตะกอนร่วมในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ( $ZrO_2(5) \cdot FeOx$ ) ที่สภาวะอัตราส่วนสารตั้งต้นเจือจางด้วยน้ำ 1:1, อุณหภูมิ  $400\text{ }^{\circ}C$ ,  $W/F=4\text{ h}$  ถูกนำไปวิเคราะห์คุณภาพด้วยเครื่อง GC/MS แสดงผลได้ดังรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $ZrO_2(5) \cdot FeOx$  วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS (ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย)

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดสอบปฏิกิริยาโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS  
(ใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลาย)

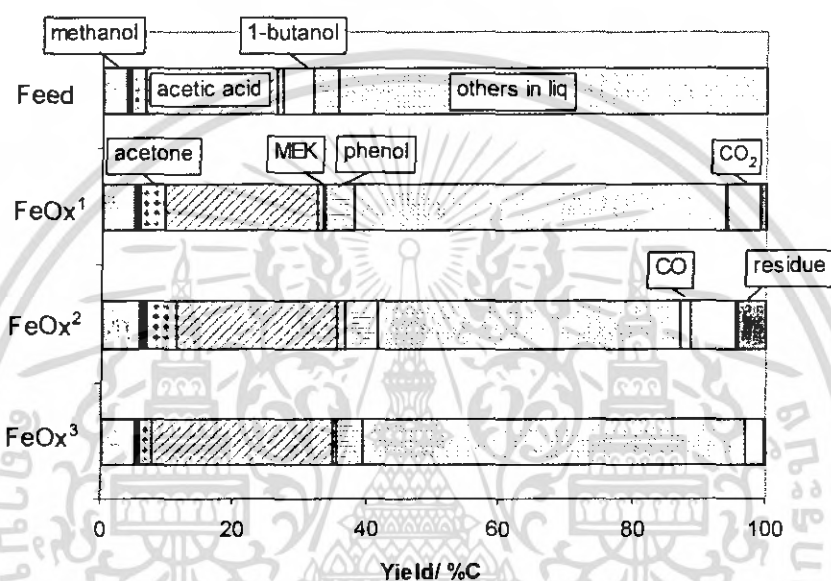
| พิกัด | ชื่อสาร                          | % ความน่าเชื่อถือ |
|-------|----------------------------------|-------------------|
| 1     | methanamine N,N-dimethyl-        | 46                |
| 2     | methyl alcohol                   | 2                 |
| 3     | pyridine                         | 81                |
|       | 2-4 – pentadienenitrile          | 70                |
|       | cyclobutane,1,2-bis(methylene)   | 64                |
| 4     | 2-cyclopenten-1-one, 2-methyl-   | 46                |
| 5     | acetic acid                      | 91                |
| 6     | 1,4-hexadiene, 2,5dimethyl-      | 52                |
|       | ethanone,1-(2-furanyl)-          | 38                |
|       | 2,4-hexadiene, 2,5-dimethyl-     | 35                |
| 7     | 2-cyclopenten-1-one, 3-methyl-   | 93                |
|       | furan,2,5-dimethyl-              | 53                |
|       | 1,3-butadiene,2-methyl-          | 46                |
| 8     | propanoic acid                   | 58                |
| 9     | 2,4-hexdiene, 2,5-dimethyl-      | 38                |
|       | 2cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl | 27                |
| 10    | phenol                           | 94                |
| 11    | 2-pyrrolidinone                  | 80                |
| 12    | phenol, 4-methyl-                | 45                |
| 13    | phenol, 3-methyl-                | 91                |
|       | phenol, 4-methyl-                | 53                |
| 14    | 3-pyridinol, 2-methyl-           | 86                |
| 15    | 3-pyridinol                      | 87                |

จากรูปที่ 4.3 – 4.4 และตารางที่ 4.3 – 4.4 พบว่า เมื่อนำสารตั้งต้น (น้ำมันไพโรไลซิส) ผ่านการทดสอบปฏิกิริยาแล้ว จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณ others ในของเหลวลดลงอย่างเห็นได้ชัด และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์เป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของเหล็กออกไซด์ชนิดต่างๆ

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ชนิดต่างๆ ได้แก่ เหล็กออกไซด์เกรดการค้า เหล็กออกไซด์เกรดการค้าปรับสภาพด้วยไอน้ำ (สภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพคือ อัตราการป้อนน้ำ  $5 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , อุณหภูมิ  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  นาน  $1 \text{ h}$ ) และเหล็กออกไซด์ที่เตรียมจาก  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  มาทำปฏิกิริยาภายใต้สภาวะอัตราส่วนสารตั้งต้นเจือจางด้วยน้ำ 1:1, อุณหภูมิ  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , W/F=4 h ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยาด้วยเหล็กออกไซด์ที่เตรียมต่างกัน

โดย  $\text{FeOx}^1$  คือ เหล็กออกไซด์เกรดการค้า,  $\text{FeOx}^2$  คือ เหล็กออกไซด์เกรดการค้าปรับสภาพด้วยไอน้ำ และ  $\text{FeOx}^3$  คือ เหล็กออกไซด์ที่เตรียมจาก  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (อัตราส่วนสารตั้งต้นเจือจางด้วยน้ำ 1:1, อุณหภูมิ  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , W/F=4 h)

จากรูปที่ 4.5 เมื่อนำสารตั้งต้นผ่านการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ 3 ลักษณะคือ ของเหลว แก๊ส และคาร์บอนตกค้างซึ่งอยู่ในรูปของแข็ง โดยปริมาณ others ในของเหลวลดลง และมีปริมาณองค์ประกอบอื่นๆ ของของเหลวต่างกัน การใช้เหล็กออกไซด์ทั้งสามชนิดสามารถทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของ methanol, acetone, acetic acid และ phenol เพิ่มขึ้นได้ เมื่อพิจารณาระหว่างองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้เหล็กออกไซด์เกรดการค้า ( $\text{FeOx}^1$ ) และเหล็กออกไซด์เกรดการค้าที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำ ( $\text{FeOx}^2$ ) พบว่า เหล็กออกไซด์เกรดการค้าที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไอน้ำสามารถทำให้เกิดสารเคมีที่ต้องการ (methanol, ketone และ phenol) ในปริมาณมากกว่า แต่มีข้อด้อยคือทำให้เกิดแก๊สใน

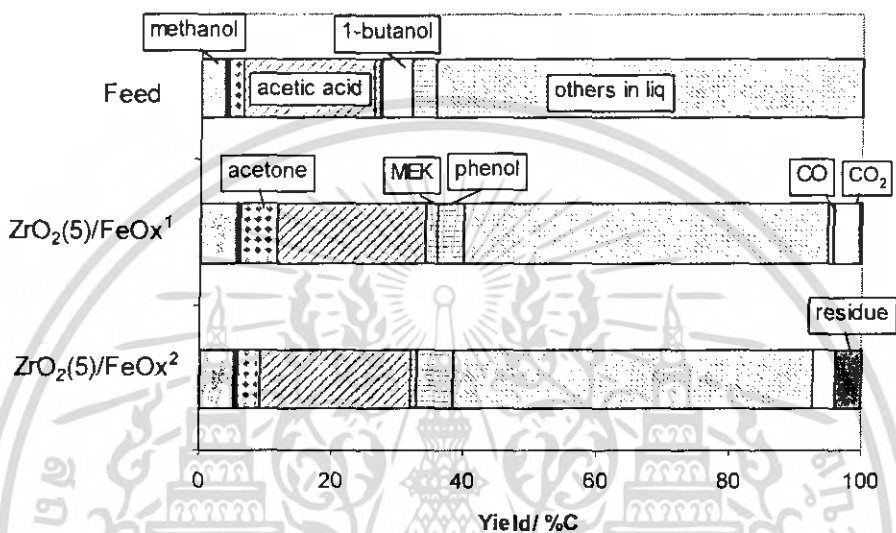
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณมาก และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเหล็กออกไซด์ที่เตรียมจาก  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ( $\text{FeOx}^3$ ) พบว่า แม้ปริมาณ others ลดลงไม่มาก แต่ทำให้เกิด acetic acid และ methanol เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่อยู่ในสถานะของเหลว สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้สะดวก และยังลดปริมาณคาร์บอนตกค้างได้อีกด้วย ในการทดลองต่อไปจึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์เกรดการค้าปรับสภาพด้วยไอน้ำก่อนทำปฏิกิริยาและเหล็กออกไซด์ที่เตรียมจาก  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  มาใช้และพัฒนาประสิทธิภาพต่อไป

สืบเนื่องมาจากงานวิจัยของ Masuda และคณะ [18] พบว่า การเติมตัวเร่งเสริมเซอร์โคเนียด้วยวิธีการเคลือบฝัง ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการนำกลับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีประโยชน์จากของเหลวเหลือทิ้งจากการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม ทำให้เพิ่มความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ และจากงานวิจัยของ Fumoto และคณะ [19] ใช้เหล็กออกไซด์ที่มีเซอร์โคเนียเป็นตัวเร่งเสริมในการนำกลับคีโตนจากน้ำเสียจากโรงงานบำบัดน้ำเสีย พบว่า มีประสิทธิภาพในการผลิตคีโตนได้เมื่อเติมเซอร์โคเนียในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งคาดว่าตัวเร่งเสริมเซอร์โคเนียนั้นทำหน้าที่ในการสลายโมเลกุลของน้ำให้เป็น ให้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน เป็นประโยชน์ต่อการทำปฏิกิริยา เนื่องจากสภาวะในการทำปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้มีน้ำเป็นส่วนประกอบด้วย ดังนั้นในการทดลองถัดไป จึงเลือกใช้เซอร์โคเนียเป็นตัวเร่งเสริม และศึกษาประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป

#### 4.2.3 อิทธิพลของวิธีการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมเซอร์โคเนียด้วยวิธีเคลือบฝัง

ในการทดลองนี้เติมตัวส่งเสริมเซอร์โคเนียในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยทำการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไอน้ำก่อนและหลังเติมเซอร์โคเนีย (สภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพคือ อัตราการป้อนน้ำ  $5 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , อุณหภูมิ  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  นาน 1 h) เพื่อศึกษาวิธีการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.6



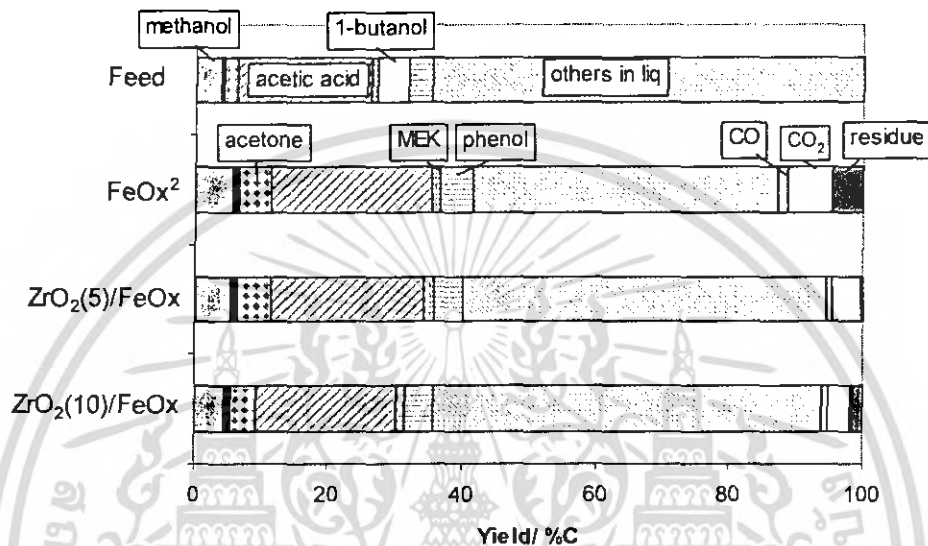
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยาด้วย  $\text{ZrO}_2(5)/\text{FeOx}$  ที่ปรับสภาพต่างกัน

โดย  $\text{ZrO}_2(5)/\text{FeOx}^1$  คือ เหล็กออกไซด์ที่เติมเซอร์โคเนียด้วยวิธีเคลือบฝังก่อน แล้วปรับสภาพด้วยไอน้ำ และ  $\text{ZrO}_2(5)/\text{FeOx}^2$  คือ เหล็กออกไซด์ปรับสภาพด้วยไอน้ำ แล้วนำมาเติมเซอร์โคเนียด้วยวิธีเคลือบฝัง (อัตราส่วนสารตั้งต้นเจือจางด้วยน้ำ 1:1, อุณหภูมิ  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W/F=4 \text{ h}$ )

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองนั้นสามารถทำให้เกิดปริมาณ methanol, acetic acid, ketone และ phenol เพิ่มขึ้นได้ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบของสารเคมีที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่เติมเซอร์โคเนียก่อน แล้วปรับสภาพด้วยไอน้ำ ( $\text{ZrO}_2(5)/\text{FeOx}^1$ ) และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ปรับสภาพด้วยไอน้ำ แล้วเติมเซอร์โคเนียด้วยวิธีเคลือบฝัง ( $\text{ZrO}_2(5)/\text{FeOx}^2$ ) พบว่า ปริมาณองค์ประกอบของสารเคมีที่ต้องการที่เกิดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{ZrO}_2(5)/\text{FeOx}^1$  มีปริมาณมากกว่า และไม่ทำให้เกิดคาร์บอนตกค้าง ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการเติมเซอร์โคเนียด้วยวิธีเคลือบฝังก่อนแล้วจึงปรับสภาพด้วยไอน้ำในการทดลองถัดไป

#### 4.2.4 อิทธิพลของปริมาณตัวส่งเสริมเซอร์โคเนียบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง

ผลการทดสอบการเติมตัวส่งเสริมเซอร์โคเนียบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ในปริมาณต่างๆ ด้วยวิธีการเคลือบฝัง โดยการเติมเซอร์โคเนียก่อนแล้วจึงปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยไอน้ำ (สภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพคือ อัตราการป้อนน้ำ  $5 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , อุณหภูมิ  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  นาน 1 h) แสดงได้ดังรูปที่ 4.7

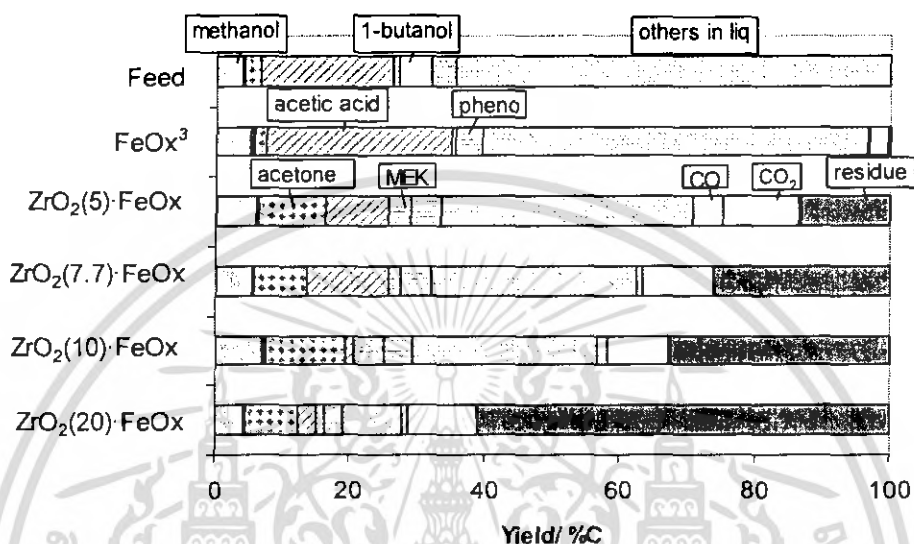


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝัง (อัตราส่วนสารตั้งต้นเจือจางด้วยน้ำ 1:1, อุณหภูมิ  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , W/F=4 h)

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า สิ่งที่พบจากการทดลองนี้คือ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่ไม่เติมตัวส่งเสริมจะทำให้เกิดคาร์บอนตกค้างเป็นปริมาณมาก เมื่อเติมเซอร์โคเนียร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้ปริมาณคาร์บอนตกค้างลดลง โดยยังมีปริมาณองค์ประกอบในของเหลวคล้ายคลึงกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ และยังทำให้มีปริมาณ acetone เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่อเติมเซอร์โคเนียถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า ปริมาณ methanol และ acetone ลดลง และเกิดคาร์บอนตกค้างขึ้นเป็นปริมาณเล็กน้อย ซึ่งน่าจะเกิดจากความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

#### 4.2.5 อิทธิพลของปริมาณตัวส่งเสริมเซอร์โคเนียบนตัวเร่งปฏิกิริยาหลักออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม

ในการทดลองนี้ศึกษาการเติมตัวส่งเสริมเซอร์โคเนียด้วยวิธีตกตะกอนร่วม โดยเติมเซอร์โคเนียในปริมาณแตกต่างกัน (ร้อยละ 5, 7.7, 10 และ 20 โดยน้ำหนัก) ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.8

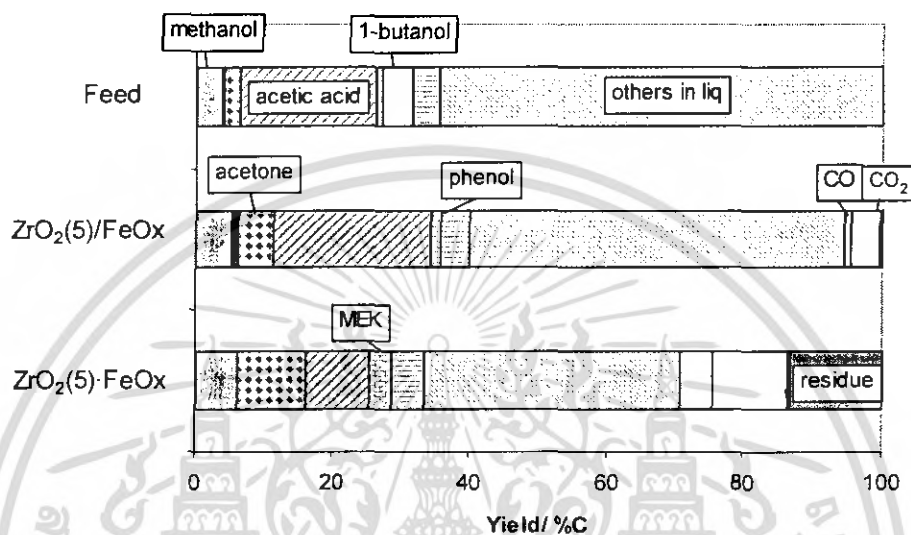


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีตกตะกอนร่วม (อัตราส่วนสารตั้งต้นเจือจางด้วยน้ำ 1:1, อุณหภูมิ 400 °C, W/F=4 h)

จากรูปที่ 4.8 สิ่งที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน คือ เมื่อเพิ่มปริมาณเซอร์โคเนีย ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณ others ในของเหลวลดลง แต่ทำให้เกิดคาร์บอนตกค้างเป็นปริมาณเพิ่มขึ้นที่ปริมาณเซอร์โคเนียร้อยละ 20 โดยน้ำหนักนั้นเกิดคาร์บอนตกค้างสูงถึงร้อยละ 60 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จะเห็นได้ว่า สารที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นคือ methanol, acetone และ phenol ในขณะที่ปริมาณ acetic acid ลดลงเป็นอย่างมาก แต่เมื่อปริมาณเซอร์โคเนียเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนักจะทำให้ปริมาณ methanol, ketone และ phenol มีแนวโน้มลดลง และปริมาณ acetic acid เริ่มมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณเซอร์โคเนียร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ได้ methanol, acetone และ MEK ในปริมาณมาก การทดลองในขั้นต่อไปจึงเลือกใช้ปริมาณเซอร์โคเนียไม่สูงนักเพื่อเปรียบเทียบผลของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 4.2.6 อิทธิพลของการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธีเคลือบฝิ่งและวิธีคกตะกอนร่วม

ในการทดลองนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลของวิธีเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับวิธีเคลือบฝิ่ง นั้นเตรียมโดยการเติมเซอร์โคเนียก่อน แล้วปรับสภาพด้วยไอน้ำก่อนทำปฏิกิริยา (สภาวะที่ใช้ในการปรับสภาพคือ อัตราการป้อนน้ำ  $5 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , อุณหภูมิ  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  นาน 1 h) ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

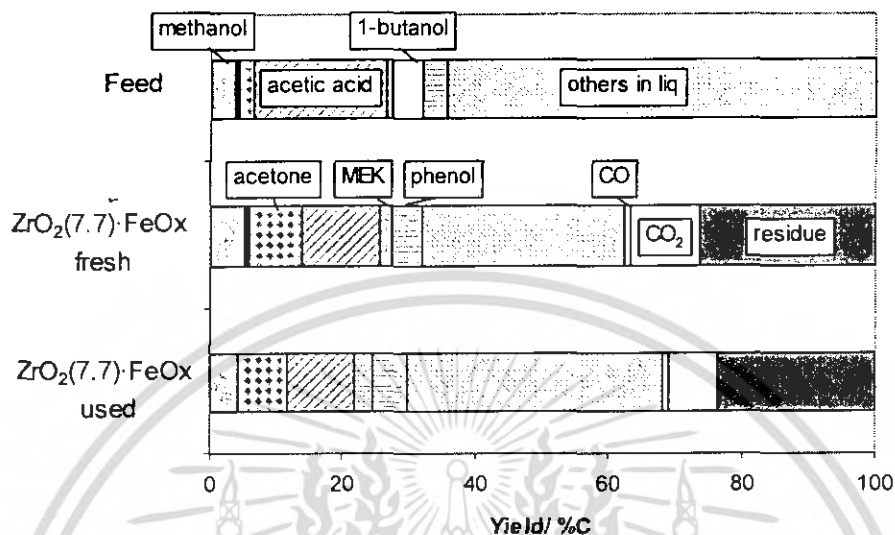


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝิ่ง ( $\text{ZrO}_2(5)/\text{FeOx}$ ) และวิธีคกตะกอนร่วม ( $\text{ZrO}_2(5)-\text{FeOx}$ ) (อัตราส่วนสารตั้งต้นเจือจางด้วยน้ำ 1:1, อุณหภูมิ  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $W/F=4 \text{ h}$ )

จากรูปที่ 4.9 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบฝิ่งนั้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณ others ลดลงน้อย แต่สามารถทำให้เกิด methanol และ acetic acid เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นองค์ประกอบที่อยู่ในของเหลว สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก และสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการคกตะกอนร่วมมีข้อด้อยคือ เกิดคาร์บอนตกค้างเป็นปริมาณมาก แต่ข้อดีคือสามารถทำให้เกิดสารเคมีที่ต้องการในปริมาณมาก และยังสามารถลดปริมาณ others ในของเหลวได้มากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีเคลือบฝิ่ง ในการทดลองถัดไปจึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมด้วยวิธีการคกตะกอนร่วม เพื่อศึกษาผลของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาคต่อไป

#### 4.2.7 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $ZrO_2(7.7)\cdot FeO_x$  ในศึกษาการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการใช้ครั้งแรกและใช้ซ้ำอีกครั้ง ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.10

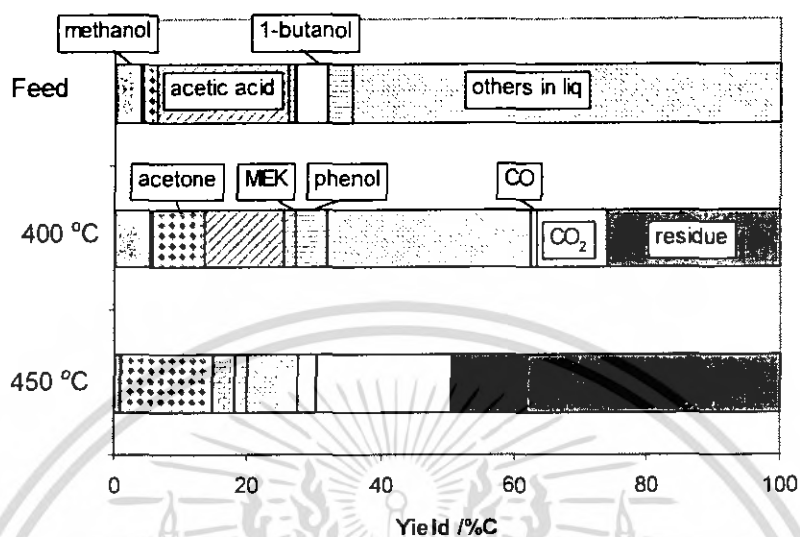


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบการเสื่อมสภาพด้วย  $ZrO_2(7.7)\cdot FeO_x$  (อัตราส่วนสารตั้งต้นเจือจางด้วยน้ำ 1:1, อุณหภูมิ 400 °C, W/F=4 h)

จากรูปที่ 4.10 จากกราฟจะเห็นได้ว่า องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองมีปริมาณ others ในของเหลวลดลง และมีสารเคมีที่ต้องการคือ methanol, ketone และ phenol เพิ่มขึ้น เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการใช้งานแล้วมาใช้ทดสอบปฏิกิริยา พบว่า แม้ประสิทธิภาพจะลดลง แต่ยังคงสามารถผลิตสารเคมีเหล่านี้จากน้ำมันไพโรไลซิสได้ แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่มีเซอร์โคเนียเป็นตัวส่งเสริมมีความเหมาะสมสำหรับการนำกลับสารเคมีเหล่านี้

#### 4.2.8 ผลของอุณหภูมิ

ในการทดลองนี้ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $ZrO_2(7.7) \cdot FeO_x$  เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

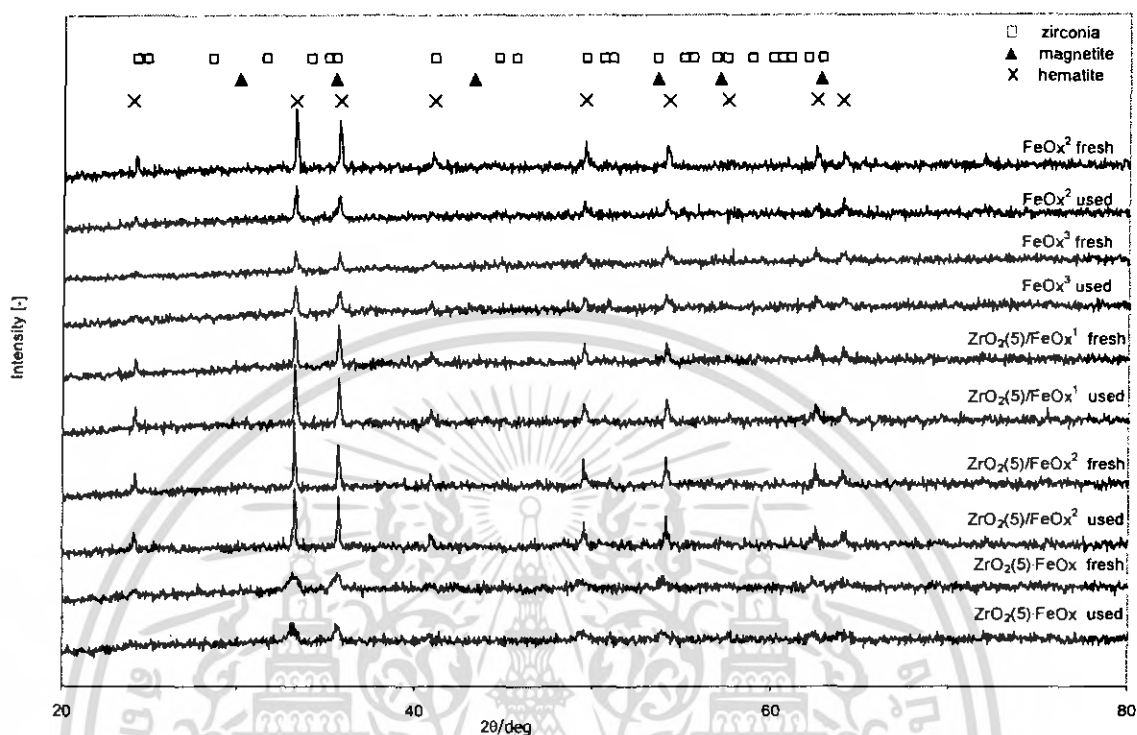


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงองค์ประกอบจากการทดสอบปฏิกิริยาคู่ตัวเร่งปฏิกิริยา  $ZrO_2(7.7) \cdot FeO_x$  (อัตราส่วนสารตั้งต้นเจือจางด้วยน้ำ 1:1, W/F=4 h)

จากรูปที่ 4.11 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงถึง 450 องศาเซลเซียส พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณ others ในของเหลวลดลงมาก และได้สาร ketone เป็นปริมาณมากพร้อมๆ กับเกิดแก๊สและคาร์บอนตกค้างเป็นปริมาณมาก ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงจึงไม่เหมาะกับการทดสอบปฏิกิริยา เนื่องจากได้ปริมาณของเหลวน้อย จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

#### 4.2.9 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวัด XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการใช้ทดสอบปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวนั้นแสดงพีคที่เป็นโครงสร้างของฮีมาไทต์ และไม่พบพีคที่แสดงเฟสของเซอร์โคเนีย ซึ่งคาดได้ว่าอนุภาคของเซอร์โคเนียนั้นมีความละเอียดและกระจายตัวอยู่ในเฟสฮีมาไทต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอย่างดี จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้น [18-19] พบว่าเฟสฮีมาไทต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์เป็นเฟสที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา partial oxidation และจากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีการเปลี่ยนจากเฟสฮีมาไทต์เป็นแมกนีไทต์ แสดงว่าไม่เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากใช้ทดสอบปฏิกิริยาแล้ว ดังนั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่มีเซอร์โคเนียเป็นตัวส่งเสริมจึงมีความสามารถสูงสำหรับการใช้ทดสอบปฏิกิริยาเพื่อนำกลับสารเคมีที่ต้องการ

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกากตะกอนน้ำเสียสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพ เพื่อให้ได้สารเคมีจำพวก methanol, ketone และ phenol โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ และสามารถเพิ่มความว่องไวได้โดยการเติมเซอร์โคเนีย จากการศึกษาประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของเหล็กออกไซด์ชนิดต่างๆ พบว่า เหล็กออกไซด์เกรดการค้าที่ปรับสภาพด้วยไอน้ำ สามารถทำให้เกิดเป็นสารเคมีที่ต้องการ และเหล็กออกไซด์ที่เตรียมจาก  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  ทำให้เกิดปริมาณของเหลวและลดปริมาณคาร์บอนตกค้างได้

ผลการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเติมตัวส่งเสริมเซอร์โคเนียด้วยวิธีการเคลือบฝัง โดยศึกษาอิทธิพลของวิธีการปรับสภาพและปริมาณเซอร์โคเนียที่เติม พบว่าการเติมเซอร์โคเนียก่อนแล้วปรับสภาพด้วยไอน้ำทำให้เกิดปริมาณของเหลวมากและลดคาร์บอนตกค้างได้ สำหรับวิธีตกตะกอนร่วม พบแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ เมื่อปริมาณเซอร์โคเนียเพิ่มขึ้น ทำให้ได้สารเคมีที่ต้องการเพิ่มขึ้น แต่เกิดคาร์บอนตกค้างเป็นปริมาณมาก และเมื่อทดสอบการเสื่อมสภาพ พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กออกไซด์ที่เติมเซอร์โคเนียด้วยวิธีการตกตะกอนร่วม เมื่อนำมาใช้ซ้ำอีกครั้ง ยังคงสามารถนำกลับสารเคมีที่ต้องการจากน้ำมันไพโรไลซิสได้ และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบปฏิกิริยา คือ 400 องศาเซลเซียส

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า มีความสามารถในการนำกลับสารเคมีจำพวก methanol, ketone และ phenol เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิ อัตราส่วนน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราการป้อนสารตั้งต้น ชนิดตัวส่งเสริม เป็นต้น
2. ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น การลดปริมาณคาร์บอนตกค้าง คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น
3. ศึกษาหาวิธีที่ใช้บ่งชี้องค์ประกอบอื่นๆ ที่อยู่ในของเหลว เพื่อเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์การทำปฏิกิริยา
4. ศึกษาวิธีการแยกองค์ประกอบที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ของเหลว เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ปราโมทย์ ป้องสุรธาร, “เปิดมิติใหม่ การนำวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเข้าช่วยในระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม.” กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, พฤษภาคม 2550.
- [2] สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, “ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Complete Stirred Tank Reactor (CSTR) ในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.” [Online]. Available: <http://203.155.74.91/elib/ebook/pdf/journal61.pdf>.
- [3] ชมรมเพื่อพัฒนา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, “ปาล์มน้ำมันและอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม: คู่มือเกษตรกร.” 2529.
- [4] วิชาการ.คอม, “การผลิตน้ำมันปาล์มไบโอดีเซล (CPO B100) จากน้ำมันปาล์มดิบ.” [Online]. Available: <http://www.vcharkam.com/vcafe/62205/8>.
- [5] ชีระ เอกสมทราเมษฐ์และคณะ, “เส้นทางสู่ความสำเร็จการผลิตปาล์มน้ำมัน.” ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตปาล์มน้ำมัน คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สงขลา, สิงหาคม 2548.
- [6] Centriquip, “Decanter Centrifuges.” [Online]. Available: <http://www.centriquip.co.uk/products.aspx?id=56>.
- [7] สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, “คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม.” โรงพิมพ์สำนักเลขาธิการคณะรัฐมนตรี, มิถุนายน 2540.
- [8] ประพนธ์ อุศิริจันทร์, “พลังงานชีวมวล.” กรมวิทยาศาสตร์ทหารเรือ [Online]. Available: [http://www.navy.mi.th/science/document-sci50/biomass\\_update.pdf](http://www.navy.mi.th/science/document-sci50/biomass_update.pdf).
- [9] ปิยรัตน์ วีระชาอุชัยและคณะ, “คุณลักษณะของน้ำมันชีวภาพจากการสลายมวลชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส.” การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 2 2549.
- [10] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, “การใช้พลังงานจากชีวมวล.” [Online]. Available: [http://www.eng.mut.ac.th/upload\\_file/article/148.doc](http://www.eng.mut.ac.th/upload_file/article/148.doc).
- [11] ศิริรัตน์ จิตการคำ, “ตัวเร่งปฏิกิริยาและบทบาทในกระบวนการไพโรไลซิส.” [Online]. Available: <http://www.vcharkam.com/varticle/408/3>. 2006.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] S. Sumathi, S.P. Chai, A.R. Mohamed, "Utilization of oil palm as a source of renewable energy in Malaysia." *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 2007.
- [13] M.A.B. Habib, F.M. Yusoff, S.M. Phang, K.J. Ang, S. Mohamed, "Nutritional values of chironomid larvae grown in palm oil mill effluent and algal culture." *Aquaculture.*, 1997, 95-105.
- [14] M. Predel, W. Kaminsky, "PYROLYSIS OF RAPE-SEED IN A FLUIDISED-BED REACTOR." *Bioresource Technology.*, 1998, 113 -117.
- [15] T. Hosoya, H. Kawamoto, S.saka, "Pyrolysis behaviors of wood and its constituent polymers At gasification temperature." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*, 2006, 328 – 322.
- [16] M. N. Islam, R. Zailani, F. N. Ani, "Pyrolytic oil from fluidised bed pyrolysis of oil palm shell and its characterization." *Renewable Energy.*, 1999, 73 – 84.
- [17] A. L. C. Pereira, G. J. P. Berrocal, S. G. Marchetti, A. Albornoz, A. O. de Souza, M. C. Rangel, "A comparison between the precipitation and impregnation methods for water gas shift catalysts." *JOURNAL OF MOLECULAR CATALYSIS.*, 2007, 67-72.
- [18] T. Masuda, Y. Kondo, M. Miwa, T. Shimotori, S.R. Mukai, K. Hashimoto, M. Takano, S.Kwasaki, S. Yoshida, "Recovery of useful hydrocarbons from oil palm waste using  $ZrO_2$  supporting  $FeOOH$  catalyst." *Chem. Eng. Sci.*, 2001, 897–904.
- [19] E. Fumoto, Y. Mizutami, T. Tago, T. Masuda, "Production of ketones from sewage sludge over zirconia-supporting iron oxide catalysts in a steam atmosphere." *Applied Catalysis B.*, 2006, 154 - 159.
- [20] M. A. Uddin, H. Tsuda, S. Wu1, E. Sasaoka, "Catalytic decomposition of biomass tars with iron oxide catalysts." *FUEL.*, 2008, 451 – 459.
- [21] M. Watanabe, H. Inomata, K. Arai, "Catalytic hydrogen generation from biomass (glucose and cellulose) with  $ZrO_2$  in supercritical water." *Biomass&Bioenergy.*, 2002, 405 – 410.
- [22] E. Fumoto, T. Tago, T. Masuda, "Production of Lighter Fuels by Cracking Petroleum Oils with Steam over Zirconia-Supporting Iron Oxide Catalyst." *Energys&Fuels.*, 2006, 1 – 6.

## ภาคผนวก ก

## สัดส่วนผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส

ตารางที่ ก.1 สารตั้งต้นและสัดส่วนของสารผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสจากตะกอนน้ำเสีย

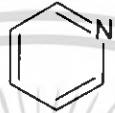
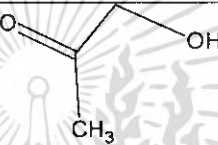

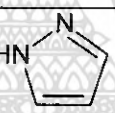
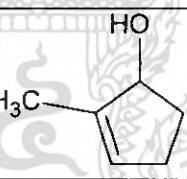
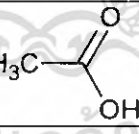
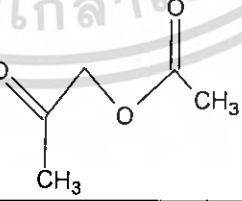
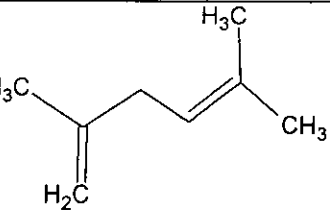
|            |                 | น้ำหนัก<br>(g) | น้ำหนัก<br>(wt%) | C<br>(wt%) | C<br>(g) | C recovery<br>(wt%) |
|------------|-----------------|----------------|------------------|------------|----------|---------------------|
| สารตั้งต้น | กากตะกอนน้ำเสีย | 20.68          |                  | 36.62      | 7.57     | -                   |
| ผลิตภัณฑ์  | ของแข็ง         | 7.13           | 34.49            | 54.46      | 3.88     | 51.29               |
|            | ของเหลวส่วนใส   | 6.18           | 29.88            | 12.63      | 0.78     | 10.31               |
|            | ของเหลวส่วนข้น  | 3.09           | 14.94            | 71.08      | 2.20     | 29.00               |
|            | แก๊ส            | 4.28           | 20.69            | -          | 0.71     | 9.40                |
|            | รวม             |                | 100              |            |          | 100                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

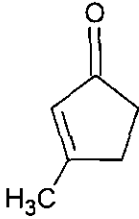
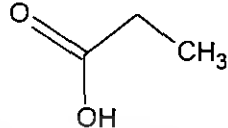
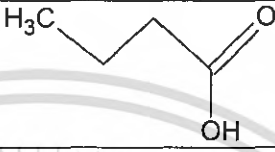
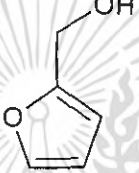
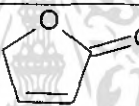
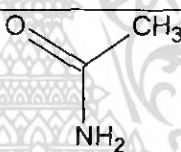

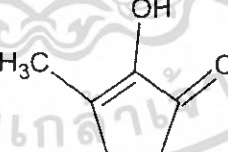
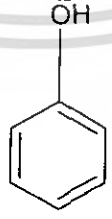
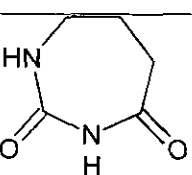
## ภาคผนวก ข

## ส่วนประกอบในน้ำมันไพโรไลซิสและสูตรโครงสร้าง

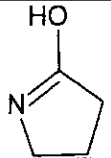

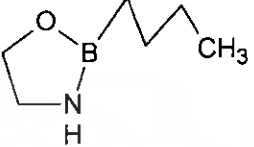
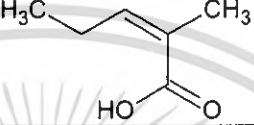

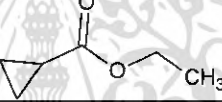
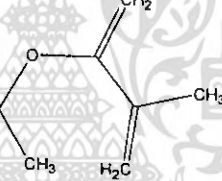

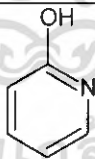
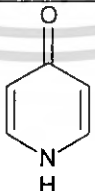
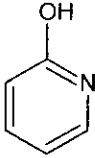
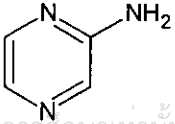
ตารางที่ ข.2 ส่วนประกอบในน้ำมันไพโรไลซิสและสูตรโครงสร้าง

| ชื่อสาร                        | โครงสร้าง  |
|--------------------------------|--|
| methanamine                    | $\text{NH}_3$  |
| methyl alcohol                 | $\text{H}_3\text{C}-\text{OH}$   |
| pyridine                       |     |
| 2-propanone, 1-hydroxy         |     |
| 2-cyclopenten-1-one            |    |
| 1H-pyrazole, 3-methyl          |   |
| 2-cyclopenten-1-one, 2-methyl- |   |
| acetic acid                    |   |
| 2-propanone, 1-(acetyloxy)     |  |
| 1,4 -hexadiene, 2,5 -dimethyl- |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ชื่อสาร                                 | โครงสร้าง   |
|---|---|
| 2-cyclopenten-1-one, 3methyl-           |    |
| propanoic acid                          |    |
| butnoic acid                            |   |
| 2-furanmethanol                         |    |
| 2(5H)-furanone                          |   |
| acetamide                               |  |
| 4H-pyran-4-one                          |  |
| 2-cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl |  |
| phenol                                  |  |
| (1,3)diazepan-2, 4-dione(49)            |  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| ชื่อสาร                                     | โครงสร้าง  |
|---|--|
| 2-pyrrolidinone                             |     |
| 2(3H)-furanone, 5-butylidihydro             |    |
| 1,3,2-oxazaborolane, 2-butyl                |    |
| 2-methyl, 2-pentanoic acid                  |    |
| 1-pentene, 3-ethyl                          |     |
| ethyl ester of cyclopropane carboxylic acid |    |
| 2-propanoic acid, 2-methyl-, ethyl ester    |   |
| 3-pyridinol                                 |  |
| 2(1H)-pyridinone                            |   |
| 4-hydroxypyridine                           |   |
| 2-hydroxypyridine                           |   |
| 2-aminopylazine                             |   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้