



ไพโรไลซิสกะลามะพร้าวเพื่อน้ำมันชีวภาพ

Coconut Shell Pyrolysis for Bio-oil

พุทธิพร คงน่วม

Puttiphon Kongnum

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Chemical Engineering

Prince of Songkla University

2557

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

๑


|         |              |           |
|---------|--------------|-----------|
| เลขที่  | TP156.P9     | พ.ศ. 2557 |
| Bip Key | 420775       |           |
|         | 20 พ.ย. 2560 |           |

ชื่อวิทยานิพนธ์           ไฟโรไลซิสกะลามะพร้าวเพื่อน้ำมันชีวภาพ  
ผู้เขียน                   นางสาว พุทธิพร คงนุ่ม  
สาขาวิชา                 วิศวกรรมเคมี


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนะวิไล)

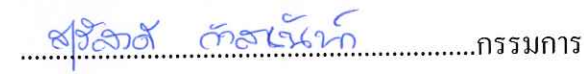
คณะกรรมการสอบ

  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บรรเจิด จงสมจิตร)

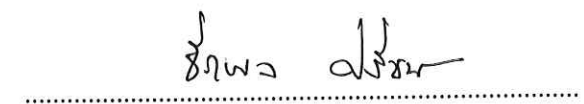
  
.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนะวิไล)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกามาศ เจษฎ์พัฒนานนท์)

  
.....กรรมการ  
(ดร.สุทธรรม สุขมณี)

  
.....กรรมการ  
(ดร.สุรัสวดี กังสนันท์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

  
.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ..........

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุกฤทธิรา รัตนวิไล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....พุทธิพร คงนุ่ม.....

(นางสาวพุทธิพร คงนุ่ม)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....พุทธิพร.....คงนุ้ม.....

(นางสาวพุทธิพร คงนุ้ม)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ ไพโรไลซิสกะลามะพร้าวเพื่อนำมันชีวภาพ

ผู้เขียน นางสาวพุทธิพร คงนุ่ม

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา 2556

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จากกะลามะพร้าว โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งด้วยอัตราการให้ความร้อน 30 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Thermal pyrolysis) และผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic pyrolysis) เรียกว่า ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ (Organic liquid product, OLP) ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแยกได้ 2 เฟส ได้แก่ ของเหลวอินทรีย์เฟสเบา (Light fraction, LF) และของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก (Heavy fraction, HF) การไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ช่วงอุณหภูมิ 350 - 550 องศาเซลเซียส ช่วงอัตราการไหลของไนโตรเจน 5 - 15 มิลลิลิตรต่อนาที และช่วงขนาดของกะลามะพร้าว 0 - 12.5 มิลลิเมตร สำหรับการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ช่วงอุณหภูมิ ( $x_1$ ) 450 - 550 องศาเซลเซียส ช่วงขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_2$ ) 6.5 - 15.5 มิลลิเมตร และช่วงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ ) 0.5 - 4.5 กรัม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส ได้แก่ ของแข็ง (Char) ของเหลว (Liquid) และก๊าซ (Gas) ประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) นำมาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบการทดลองโดยวิธี Box Box-Behnken design (BBD) แบบ 3 ตัวแปรอิสระ และ 3 ตัวแปรตาม ใช้หาสภาวะที่เหมาะสมที่ร้อยละผลได้มากที่สุดของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก และแก๊ส โซลีน ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์วิเคราะห์เพื่อหาค่าประกอบของแก๊สโซลีนด้วยเครื่อง Gas chromatograph with flame ionization detector (GC-FID) พบว่า อัตราการไหลของไนโตรเจนไม่มีนัยสำคัญต่อการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด 38.60 ที่สภาวะอุณหภูมิ 492.07 องศาเซลเซียส ขนาดของกะลามะพร้าว 12.46 มิลลิเมตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น

(6)

จะทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีค่าลดลง ตัวแปรอุณหภูมิมีอิทธิพลมากที่สุดต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ตามสมการทางคณิตศาสตร์  $Y_{OLP} = -176.9 + 0.796x_1 + 3.221x_2 - 0.000808x_1^2 - 0.127x_2^2 + 0.167x_3^2 - 0.107x_2x_3$  ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมากที่สุด 6.21 ที่สภาวะอุณหภูมิ 505.82 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม ขนาดของกะลามะพร้าว (ในช่วงขนาด 6.5-15.5 มิลลิเมตร) ไม่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก ตามสมการทางคณิตศาสตร์  $Y_{HF} = -66.24 + 0.288x_1 - 0.000283x_1^2 + 0.372x_3^2 - 0.00449x_1x_3$  และร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด 0.098 ที่สภาวะอุณหภูมิ 499.30 องศาเซลเซียส ขนาดของกะลามะพร้าว 12.67 มิลลิเมตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.35 กรัม ตัวแปรอุณหภูมิมีอิทธิพลมากที่สุดต่อร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน ตามสมการทางคณิตศาสตร์  $Y_{Gasoline} = -5.919 + 0.02196x_1 + 0.08415x_2 - 2.1995e-05x_1^2 - 0.00349x_2^2 - 0.00503x_3^2 + 0.00187x_2x_3$  ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย GC-MS พบว่า ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสเบา มีกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ และผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก มีฟินอลเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่

|                      |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|
| <b>Thesis Title</b>  | Coconut Shell Pyrolysis for Bio-oil |
| <b>Author</b>        | Miss Puttiphon Kongnum              |
| <b>Major Program</b> | Chemical Engineering                |
| <b>Academic Year</b> | 2013                                |

### ABSTRACT

In this research organic liquid product was produced from coconut shell via fast pyrolysis process which carried out in a fixed bed reactor with heating rate of 30 °C/min under nitrogen atmosphere for 60 minutes. The liquid product without catalyst was thermal pyrolysis and the liquid product using HZSM-5 zeolite catalyst was catalytic pyrolysis called organic liquid product (OLP). The OLP was separated into two fraction including light fraction (LF) and heavy fraction (HF). This research the pyrolysis of coconut shell without catalyst by used temperature of 350, 450 and 550 °C, flow rate of nitrogen of 5, 10 and 15 ml/min and particle size of coconut shell of 0-6.5, 6.5-9.5 and 9.5-12.5 mm then the pyrolysis using catalyst by used temperature ( $x_1$ ) of 450, 500 and 550 °C, particle size of coconut shell ( $x_2$ ) of 6.5-9.5, 9.5-12.5 and 12.5-15.5 mm and weight of catalyst ( $x_3$ ) of 0.5, 2.5 and 4.5 g. Products obtained from the pyrolysis of coconut shell is liquid, char and gas products. Response surface methodology (RSM) was developed by performing 15 experiments based on Box-Behnken design (BBD) of a three factor, three level central composite designs to evaluate and it was found that the optimize condition of catalytic pyrolysis for yield of OLP, yield of HF and yield of gasoline. Gasoline was analyzed with Gas chromatograph with flame ionization detector (GC-FID). The results show that flow rate of nitrogen was not significant independent variable on liquid product for thermal pyrolysis. The optimum yield of OLP, 38.60 wt%, was obtained at temperature of 492.07 °C, particle size of coconut shell of 12.46 mm and weight of catalyst of 0.5 g. The weight of catalyst decreased from minimum of experiments. The temperature was found to be the most important significant on OLP yield for catalytic pyrolysis. The quadratic model for OLP yield is  $Y_{OLP} = -176.9 + 0.796x_1 + 3.221x_2 - 0.000808x_1^2 - 0.127x_2^2 + 0.167x_3^2 - 0.107x_2x_3$ . The optimum yield of HF, 6.21 wt%, was obtained at temperature of 505.82 °C and weight of catalyst of 0.5 g with not significant of particle size of coconut shell between ranges from 6.5 to 15.5 mm. The quadratic model for HF yield is  $Y_{HF} = -66.24 + 0.288x_1 - 0.000283x_1^2 + 0.372x_3^2 - 0.00449x_1x_3$ . The optimum yield of

(8)

gasoline, 0.098 wt%, was obtained at temperature of 499.30 °C, particle size of coconut shell of 12.67 mm and weight of catalyst of 2.35 g. The temperature was found to be the most important significant on gasoline yield for catalytic pyrolysis. The quadratic model for HF yield is  $Y_{\text{Gasoline}} = -5.919 + 0.02196x_1 + 0.08415x_2 - 2.1995e-05x_1^2 - 0.00349x_2^2 - 0.00503x_3^2 + 0.00187x_2x_3$ . The analytical results of liquid product from catalytic pyrolysis using the gas chromatography – mass spectroscopy (GC-MS), acetic acid was mainly found in the light fraction and phenol was mainly found in the heavy fraction.

Keywords: Biomass, Pyrolysis, Bio-oil



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากการสนับสนุนและความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายๆ ท่านดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุกฤทธิรา รัตนวิไล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่กรุณาให้คำปรึกษาคอยชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา อีกทั้งยังช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บรรเจิด จงสมจิตร ประธานกรรมการจาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ผกามาศ เกษภูพัฒนานนท์ ดร. สุธรรม สุขมณี และ ดร. สุรัสวดี กังสนันท์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย ที่จัดสรรเงินทุนในการวิจัย รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน ที่มีส่วนช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์ ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีคามคืออยู่บ้าง ผู้จัดทำขอมอบให้ท่านทั้งหลายที่ได้กล่าวถึงข้างต้น ส่วนความบกพร่องที่อาจจะเกิดขึ้น ผู้จัดทำขอน้อมรับไว้แต่เพียงผู้เดียว

พุทธิพร คงนุ่น

## สารบัญ

| เรื่อง                                   | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ                                 | (3)  |
| ABSTRACT                                 | (5)  |
| กิตติกรรมประกาศ                          | (9)  |
| สารบัญ                                   | (10) |
| รายการตาราง                              | (12) |
| รายการภาพประกอบ                          | (15) |
| บทที่ 1 บทนำ                             |      |
| 1.1 บทนำต้นเรื่อง                        | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย              | 2    |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย                       | 3    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ            | 3    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง    |      |
| 2.1 ชีวมวล                               | 4    |
| 2.2 กะลามะพร้าว                          | 6    |
| 2.3 การไฟโรไลซิส                         | 7    |
| 2.4 น้ำมันชีวภาพ                         | 10   |
| 2.5 วิธีการฟื้นผิวผลตอบสนอง              | 10   |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง                | 13   |
| บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ         |      |
| 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง | 19   |
| 3.2 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง                | 23   |
| 3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์                  | 34   |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์             |      |
| 4.1 ขั้นตอนการบดกะลามะพร้าวและแยกขนาด    | 37   |
| 4.2 ข้อมูลเบื้องต้นในการไฟโรไลซิส        | 39   |
| 4.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฟโรไลซิส       | 39   |

## สารบัญ (ต่อ)

| เรื่อง   | หน้า |
|--|------|
| 4.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกะลามะพร้าวด้วยเครื่อง TGA               | 41   |
| 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกะลามะพร้าว   | 43   |
| 4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม RSM  | 44   |
| 4.7 กิจกรรมที่ 1: การไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา                            | 45   |
| 4.8 กิจกรรมที่ 2: การไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา                               | 48   |
| 4.9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์                        | 61   |
| 4.10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแบบใช้<br>ตัวเร่งปฏิกิริยา | 62   |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง   |      |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง   | 66   |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ   | 67   |
| เอกสารอ้างอิง  | 68   |
| ภาคผนวก  |      |
| ภาคผนวก ก กราฟมาตรฐาน  | 72   |
| ภาคผนวก ข วิธีและสภาวะที่ใช้วิเคราะห์  | 80   |
| ภาคผนวก ค ตารางผลการคำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส                   | 83   |
| ภาคผนวก ง ตารางผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สโซลีน                                | 87   |
| ภาคผนวก จ ข้อมูลเบื้องต้นของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย          | 96   |
| ภาคผนวก ฉ การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน   | 98   |
| ประวัติผู้เขียน  | 104  |

## รายการตาราง

| ตาราง |   | หน้า |
|-------|---|------|
| 2-1   | เปรียบเทียบระหว่างกระบวนการไฟโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็ว  | 8    |
| 2-2   | ข้อมูลการวิเคราะห์และปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไฟโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง  | 15   |
| 3-1   | แสดงสภาวะการทดลองโดยการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ Box-Behnken design เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อัตราการไหลของไนโตรเจน และขนาดของกะลามะพร้าว ของการไฟโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา          | 29   |
| 3-2   | แสดงการออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิค RSM แบบ Box-Behnken design เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อัตราการไหลของไนโตรเจน และขนาดของกะลามะพร้าว ของการไฟโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา | 30   |
| 3-3   | แสดงสภาวะการทดลองโดยการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ Box-Behnken design เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ของการไฟโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา             | 31   |
| 3-4   | แสดงการออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิค RSM แบบ Box-Behnken design เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ของการไฟโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา    | 32   |
| 4-1   | แสดงร้อยละของกะลามะพร้าวตามขนาดต่างๆ หลังจากบดด้วยเครื่องบดลอสแอนเจลีส เพื่อการไฟโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา   | 37   |
| 4-2   | แสดงร้อยละของกะลามะพร้าวตามขนาดต่างๆ หลังจากบดด้วยเครื่องบดลอสแอนเจลีส เพื่อการไฟโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  | 38   |
| 4-3   | แสดงข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการไฟโรไลซิส   | 39   |
| 4-4   | แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกะลามะพร้าว   | 43   |
| 4-5   | เปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนจากชีวมวลที่แตกต่างกัน   | 44   |

### รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง |  | หน้า |
|-------|--|------|
| 4-6   | แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองวิธีการพ่นฝิวผลตอบสนองของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา   | 45   |
| 4-7   | แสดงร้อยละผลได้ของไอโซออกเทนจากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และขนาดของกะลามาะพร้าว 9.5-12.5 มิลลิเมตร  | 47   |
| 4-8   | แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองวิธีการพ่นฝิวผลตอบสนองของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  | 48   |
| 4-9   | ผลการคาดคะเนของสภาวะที่เหมาะสมของแบบจำลองวิธีการพ่นฝิวผลตอบสนองที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เมื่อทำการทดลองซ้ำและการทดลองที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ               | 49   |
| 4-10  | แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองวิธีการพ่นฝิวผลตอบสนองของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักจากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา   | 53   |
| 4-11  | ผลการคาดคะเนของสภาวะที่เหมาะสมของแบบจำลองวิธีการพ่นฝิวผลตอบสนองที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมากที่สุด ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักเมื่อทำการทดลองซ้ำและการทดลองที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ | 53   |
| 4-12  | แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองวิธีการพ่นฝิวผลตอบสนองของร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนจากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา   | 56   |
| 4-13  | ผลการคาดคะเนของสภาวะที่เหมาะสมของแบบจำลองวิธีการพ่นฝิวผลตอบสนองที่ให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนเมื่อทำการทดลองซ้ำและการทดลองที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ   | 57   |

### รายการตาราง (ต่อ)

| ตาราง |   | หน้า |
|-------|---|------|
| 4-14  | แสดงการเปรียบเทียบระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนและคลอโรเบนซินจากการทดลองซ้ำตามสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนที่ได้จากการคาดคะเน และการทดลองที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ | 61   |
| 4-15  | แสดงการวิเคราะห์ห้วงค้ำประกอบธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์  | 62   |
| 4-16  | แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ทั้งเฟสเบาและเฟสหนัก จาก<br>การวิเคราะห์ด้วย GC-MS   | 63   |
| 4-17  | แสดงองค์ประกอบของก๊าซจากการวิเคราะห์ด้วย GC-MS  | 65   |
| ค-1   | แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบ<br>ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  | 83   |
| ค-2   | แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบ<br>ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา   | 85   |
| ค-3   | แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  | 86   |
| ง-1   | แสดงร้อยละผลได้ของ Pentene และ Isooctane ในเฟสเบา และเฟสหนัก  | 87   |
| ง-2   | แสดงร้อยละผลได้ของ Benzene และ Toluene ในเฟสเบา และเฟสหนัก  | 88   |
| ง-3   | แสดงร้อยละผลได้ของ Ethyl benzene และ p-xylene ในเฟสเบา และเฟส<br>หนัก   | 89   |
| ง-4   | แสดงร้อยละผลได้ของ m-xylene และ o-xylene ในเฟสเบา และเฟสหนัก  | 90   |
| ง-5   | แสดงร้อยละผลได้ของ Chlorobenzene และ 1,3-dichlorobenzene ในเฟส<br>เบาและเฟสหนัก   | 91   |
| ง-6   | แสดงร้อยละผลได้ของ 1,4-dichlorobenzene และ 1,2-dichlorobenzene<br>ในเฟสเบาและเฟสหนัก  | 92   |
| ง-7   | แสดงร้อยละผลได้ของทุกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ศึกษา  | 94   |
| ง-8   | แสดงร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน ได้แก่ Isooctane Benzene Toluene<br>Ethyl benzene p-xylene m-xylene และ o-xylene  | 95   |
| จ-1   | แสดงข้อมูลเบื้องต้นของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกี่ยวข้องกับ<br>งานวิจัย   | 96   |

## รายการภาพประกอบ

| ภาพประกอบ | หน้า   |    |
|-----------|--|----|
| 2-1       | โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของชีวมวล  | 5  |
| 2-2       | ส่วนประกอบของผลมะพร้าว 100 กิโลกรัม  | 6  |
| 2-3       | สมการไพโรไลซิส   | 7  |
| 2-4       | ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของชีวมวล  | 8  |
| 2-5       | จุดของการออกแบบบ็อกซ์-เบ้น์เคน   | 12 |
| 2-6       | แบบโครงสร้างการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำน้ำมันชีวภาพจากกะลาปาล์ม   | 13 |
| 2-7       | แบบโครงสร้างการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำน้ำมันชีวภาพจากแกลบ   | 16 |
| 3-1       | เครื่องบดลอสแอนเจลีส   | 20 |
| 3-2       | (ก) เครื่องเขย่าตะแกรงร้อน (ข) กะลามะพร้าว   | 20 |
| 3-3       | แบบโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการไพโรไลซิส  | 21 |
| 3-4       | แบบโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา  | 22 |
| 3-5       | เครื่องควบแน่นกับดักน้ำแข็ง  | 23 |
| 3-6       | ขั้นตอนการเตรียมกะลามะพร้าวก่อนการไพโรไลซิส  | 24 |
| 3-7       | ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา   | 25 |
| 3-8       | ขั้นตอนการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา   | 26 |
| 3-9       | ขั้นตอนการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  | 27 |
| 3-10      | อุปกรณ์สำหรับการไพโรไลซิสในห้องทดลอง (ก) ถังไนโตรเจน (ข) เตาปฏิกรณ์สำหรับการไพโรไลซิส (ค) เตาปฏิกรณ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา (ง) เครื่องควบแน่นกับดักน้ำแข็ง   | 28 |
| 3-11      | โปรแกรม RSM สำหรับออกแบบการทดลอง   | 29 |
| 4-1       | กะลามะพร้าวเพื่อการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด (ก) 0-6.5 มิลลิเมตร (ข) 6.5-9.5 มิลลิเมตร และ (ค) 9.5-12.5 มิลลิเมตร และเพื่อการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด (ง) 0-6.5 มิลลิเมตร (จ) 6.5-9.5 มิลลิเมตร และ (ฉ) 9.5-12.5 มิลลิเมตร | 38 |

### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ  | หน้า |
|--|------|
| 4-2 (ก) ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา<br>(ข) ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  | 39   |
| 4-3 ถ่านที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด (ก) 0-6.5 มิลลิเมตร<br>(ข) 6.5-9.5 มิลลิเมตร และ (ค) 9.5-12.5 มิลลิเมตร และเพื่อการไพโรไลซิสแบบ<br>ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด (ง) 0-6.5 มิลลิเมตร (จ) 6.5-9.5 มิลลิเมตร และ (ฉ) 9.5-<br>12.5 มิลลิเมตร | 40   |
| 4-4 ตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ก่อนไพโรไลซิส (ข) หลังไพโรไลซิส (ค) หลังจากการปรับ<br>สภาพที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส  | 41   |
| 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกะลามะพร้าวขนาด 0-6.5 มิลลิเมตร ที่เหลือ<br>จากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย TGA  | 42   |
| 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกะลามะพร้าวขนาด 6.5-9.5 มิลลิเมตร ที่เหลือ<br>จากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย TGA  | 42   |
| 4-7 โปรแกรม RSM สำหรับวิเคราะห์ผล  | 44   |
| 4-8 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว<br>อินทรีย์ กับอุณหภูมิ ( $x_1$ ) และขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_2$ )   | 51   |
| 4-9 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว<br>อินทรีย์ กับอุณหภูมิ ( $x_1$ ) และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ )  | 51   |
| 4-10 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว<br>อินทรีย์ กับขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_2$ ) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ )  | 52   |
| 4-11 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว<br>อินทรีย์เฟสหนัก กับอุณหภูมิ ( $x_1$ ) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ )   | 55   |
| 4-12 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนกับอุณหภูมิ<br>( $x_1$ ) และขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_2$ )   | 59   |
| 4-13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนกับอุณหภูมิ<br>( $x_1$ ) และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ )  | 59   |



### รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ   | หน้า |
|---|------|
| 4-14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนกับขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_2$ ) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ ) | 60   |
| 4-15 ปฏิกิริยา Phenol hydrogenation   | 63   |
| 4-16 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเฟสเบตา (ภาพบน) และเฟสหนัก (ภาพล่าง)           | 64   |
| 4-17 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซจากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา   | 65   |
| ก-1 กราฟมาตรฐานอัตราการไหลของไนโตรเจน   | 72   |
| ก-2 กราฟมาตรฐานของ Benzene สำหรับแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  | 73   |
| ก-3 กราฟมาตรฐานของ Isooctane สำหรับแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  | 73   |
| ก-4 กราฟมาตรฐานของ Pentene  | 74   |
| ก-5 กราฟมาตรฐานของ Isooctane  | 74   |
| ก-6 กราฟมาตรฐานของ Benzene  | 75   |
| ก-7 กราฟมาตรฐานของ Toluene  | 75   |
| ก-8 กราฟมาตรฐานของ Ethylbenzene   | 76   |
| ก-9 กราฟมาตรฐานของ p-xylene   | 76   |
| ก-10 กราฟมาตรฐานของ m-xylene  | 77   |
| ก-11 กราฟมาตรฐานของ o-xylene  | 77   |
| ก-12 กราฟมาตรฐานของ Chlorobenzene   | 78   |
| ก-13 กราฟมาตรฐานของ 1,3-dichlorobenzene   | 78   |
| ก-14 กราฟมาตรฐานของ 1,4-dichlorobenzene   | 79   |
| ก-15 กราฟมาตรฐานของ 1,2-dichlorobenzene   | 79   |
| ข-1 Thermogravimetric Analyzer (TGA)  | 80   |
| ข-2 Gas Chromatograph – Flame Ionization (GC-FID)   | 81   |
| ข-3 Gas Chromatograph – Mass Selective Detector (GC-MS)   | 82   |

### สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

|        |  |
|--------|--|
| wt%    | = ร้อยละ (เปอร์เซ็นต์) โดยน้ำหนัก                        |
| °C     | = องศาเซลเซียส   |
| ml/min | = มิลลิลิตรต่อนาที                                       |
| mm     | = มิลลิเมตร  |
| g      | = กรัม   |
| °C/min | = องศาเซลเซียสต่อนาที                                    |
| RSM    | = วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface methodology) |
| OLP    | = ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ (Organic liquid product)      |
| LF     | = ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสเบา (Light fraction)        |
| HF     | = ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก (Heavy fraction)       |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำด้านเรื่อง

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด ทำให้ไม่เพียงพอต่อความต้องการ จึงจำเป็นต้องมองหาพลังงานทางเลือกชนิดใหม่มาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล เป็นต้น ในอนาคตมนุษย์ยังคงต้องใช้พลังงานฟอสซิลจนกระทั่งเชื้อเพลิงเหล่านี้ค่อยๆ หหมดไป อีกทั้งพลังงานทดแทนที่กำลังได้รับการพัฒนาที่ยังไม่สามารถทดแทนแหล่งพลังงานฟอสซิลได้อย่างเพียงพอกับความต้องการที่มีเพิ่มสูงขึ้นทุกปี (Peter, 2009)

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีเศษหรือกากจากของเหลือทิ้งจากการทำการเกษตรเป็นจำนวนมาก ดังนั้นชีวมวลจึงเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ พืชชีวมวลที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมีหลายรูปแบบ เช่น แกลบได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อยได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ได้จากการแปรรูปไม้ยางพารา กากปาล์มได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ชังข้าวโพดได้จากการสีข้าวโพด และกะลามะพร้าวได้จากการผลิตกะทิ กะลามะพร้าวเป็นชีวมวลที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานทดแทนได้ และเป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่มีมากทางภาคตะวันออกและภาคใต้ของประเทศไทย เนื่องจากคนไทยใช้เนื้อมะพร้าว เพื่อบริโภคและส่งออก จึงทำให้มีวัสดุเหลือใช้จากมะพร้าวเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะกะลามะพร้าว จุดเด่นอีกประการหนึ่งของกะลามะพร้าวคือ มีปริมาณเถ้าต่ำและปริมาณฮัลคาไลน์สูง ดังนั้นการเลือกใช้ชีวมวลจากกะลามะพร้าวเป็นพลังงานทดแทนเพื่อผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ (Siengchum, 2012)

น้ำมันชีวภาพเป็นน้ำมันที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจากชีวมวลโดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) มีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวอินทรีย์ สีดำ น้ำตาลเข้ม หรืออาจจะเป็นสีน้ำตาลอมแดงขึ้นอยู่กับปัจจัยในการทำปฏิกิริยา มีความเป็นกรด และมีกลิ่นฉุน การไพโรไลซิสเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนชีวมวลไปเป็นเชื้อเพลิง โดยการสลายตัวของสารด้วยความร้อนในที่อับอากาศในช่วงอุณหภูมิ 500-800 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์หลัก 3 ชนิด ได้แก่ ก๊าซ ของแข็ง และของเหลวหรือที่เรียกว่า น้ำมันชีวภาพ (Nugranad, 1997) ผลิตภัณฑ์ทั้ง 3

ชนิด สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานในหลายรูปแบบ เช่น ก๊าซสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์ของเหลวใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือสกัดเป็นสารเคมี และผลิตภัณฑ์ของแข็งนำไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้และลักษณะทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่ใช้ในการไพโรไลซิส เช่น ชนิดของชีวมวล อุณหภูมิ (Temperature) อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) อัตราการไหลของก๊าซเฉื่อย เป็นต้น การไพโรไลซิสสามารถแบ่งตามอัตราการให้ความร้อนคือ การไพโรไลซิสแบบช้าให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นของแข็ง และการไพโรไลซิสแบบเร็วให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นของเหลว งานวิจัยนี้เลือกศึกษาผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นหลัก จึงเลือกใช้การไพโรไลซิสแบบเร็ว (Bridgwater, 2004)

ชีวมวลที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีพันธะออกซิเจนอยู่มาก ทำให้เชื้อเพลิงมีค่าความร้อนน้อยลง จึงมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันด้วยการกำจัดพันธะออกซิเจน และช่วยเพิ่มองค์ประกอบของอะโรมาติก ทำให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น เรียกว่า การคะตะไลติกไพโรไลซิส (Catalytic pyrolysis) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่ คือ HZSM-5

งานวิจัยนี้เลือกใช้กะลามะพร้าวเป็นชีวมวลในการไพโรไลซิสด้วยเตาปฏิกรณ์แบบนิ่ง (Fixed-bed reactor) ทั้งแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลของไนโตรเจน ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ด้วย Gas Chromatography-Flame Ionization (GC-FID) เพื่อหาองค์ประกอบของแก๊สโซลีน (Gasoline) และวิเคราะห์ด้วย Gas Chromatography-Mass Spectroscopy (GC-MS) เพื่อหาองค์ประกอบทั้งหมดที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- (1) หาสภาวะที่เหมาะสมและศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลของไนโตรเจน และขนาดของกะลามะพร้าว
- (2) หาสภาวะที่เหมาะสมและศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

(1) ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสจากกะลามะพร้าวแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อัตราการไหลของไนโตรเจน และขนาดของกะลามะพร้าว

(2) ศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก และร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน ที่ได้จากการไพโรไลซิสจากกะลามะพร้าวแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) เรียนรู้การออกแบบและสร้างเครื่องไพโรไลซิส ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์

(2) สามารถพัฒนาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากของเหลือใช้จากธรรมชาติ เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในอนาคต

(3) ทราบสภาวะที่เหมาะสมและปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิส เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของของเหลวอินทรีย์ที่มีความใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ได้จริง

(4) เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงได้

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

#### 2.1 ชีวมวล

ชีวมวล หมายถึง วัสดุที่ได้จากธรรมชาติ อาจเป็นสิ่งมีชีวิตหรือส่วนประกอบของธรรมชาติ รวมทั้งสิ่งเหลือทิ้งจากสิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างทดแทนได้ ชีวมวลส่วนใหญ่มาจากพืช โดยพืชจะนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อผลิตก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ดังนั้นเมื่อนำชีวมวลจากพืชมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงโดยการเผา ทำให้ไม่เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก เช่น แกลบ เศษไม้ กากปาล์ม ชังข้าวโพด กากมันสำปะหลัง และกะลามะพร้าว เป็นต้น (Laohalidanond, 2007) ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีองค์ประกอบของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แสดงดังภาพประกอบ 2-1

##### 2.1.1 โครงสร้างของชีวมวล

##### 2.1.1.1 โครงสร้างทางกายภาพ

เชื้อเพลิงจะมีลักษณะแตกต่างกันตามชนิด เช่น น้ำมันดิบมีลักษณะเป็นของเหลวสีดำ ก๊าซธรรมชาติมีลักษณะเป็นก๊าซ และชีวมวลมีลักษณะเป็นของแข็งซึ่งอาจถือได้ว่าอยู่ในประเภทเดียวกับถ่านหิน แต่รูปร่างแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถนำไปแปรสภาพโดยผ่านการไพโรไลซิสกลายเป็นน้ำมันชีวภาพ ซึ่งน้ำมันชีวภาพจะมีลักษณะทางกายภาพและสีแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชีวมวล

##### 2.1.1.2 โครงสร้างทางเคมี

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของชีวมวล แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

(1) การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) คือ การวิเคราะห์หาโครงสร้างองค์ประกอบของเชื้อเพลิง ประกอบด้วย

- ความชื้น (Moisture) หรือน้ำ เนื่องจากชีวมวลเป็นผลผลิตทางการเกษตร ชีวมวลส่วนใหญ่จึงมีความชื้นค่อนข้างสูง การนำชีวมวลมาเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

- ส่วนที่เป็นสารระเหย (Volatile matter) คือส่วนที่ถูกเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นชีวมวลที่มีค่า Volatiles matter สูง เป็นชีวมวลที่ติดไฟง่าย

- คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ยังมีค่ามาก ค่าความร้อนยิ่งสูง

- จี๊เถ้า (Ash) หรือส่วนเผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่มีสัดส่วนจี๊เถ้าเล็กน้อย ยกเว้นฟางข้าวและแกลบมีปริมาณจี๊เถ้าค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก (Tsai, 2006)

(2) การวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาสัดส่วนของธาตุซึ่งประกอบด้วย 4 ธาตุหลัก คือ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) และธาตุอื่นๆ ที่มีสัดส่วนน้อย คือ กำมะถัน และคลอรีน

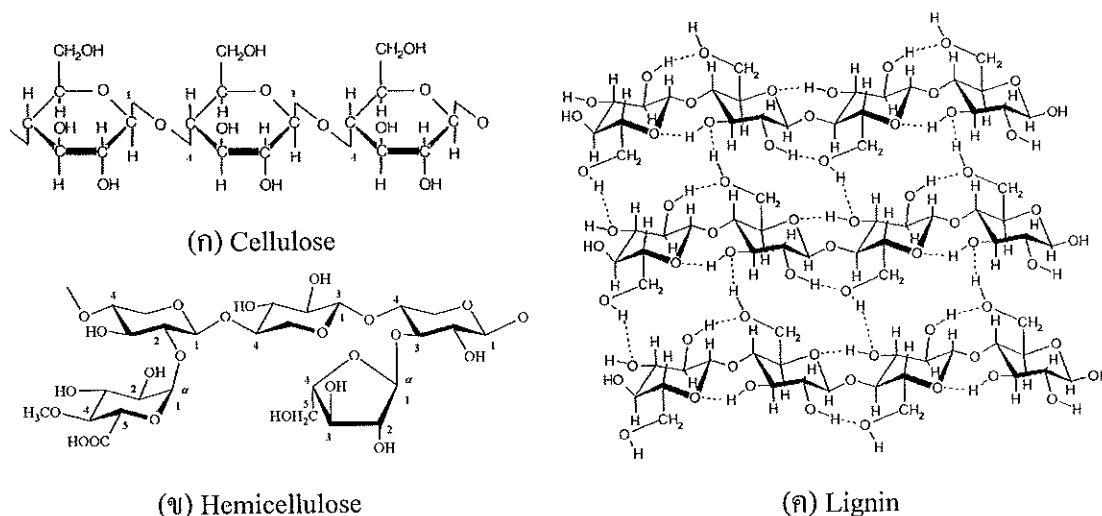
### 2.1.2 การวิเคราะห์ทางเคมี (Chemical analysis)

การวิเคราะห์ทางเคมีของชีวมวลเป็นการวิเคราะห์ส่วนประกอบเคมีจำพวก เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ลิกนิน (Lignin) และเพคติน (Pectin)

### 2.1.3 ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงชีวมวล (Heating value)

2.1.3.1 ค่าความร้อนต่ำ (Lower Heating Value, LHV) หมายถึง ค่าความร้อนเชื้อเพลิงค่าต่ำ เป็นค่าที่คิดไว้แล้วว่า ไอน้ำจากการเผาไหม้นั้นอยู่ในสภาพเป็นไอ และความชื้นของเชื้อเพลิงหลังการเผาไหม้ต้องอยู่ในสภาพที่เป็นไอและได้ใช้ความร้อนจำนวนเท่ากับความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอไปเรียบร้อยแล้ว

2.1.3.2 ค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value, HHV) หมายถึง ค่าความร้อนเชื้อเพลิงค่าสูง เป็นส่วนที่มีความชื้นปนอยู่ ความชื้นเกิดจากไอน้ำที่ได้จากการรวมตัวของไฮโดรเจนและออกซิเจนในขณะที่มีการเผาไหม้



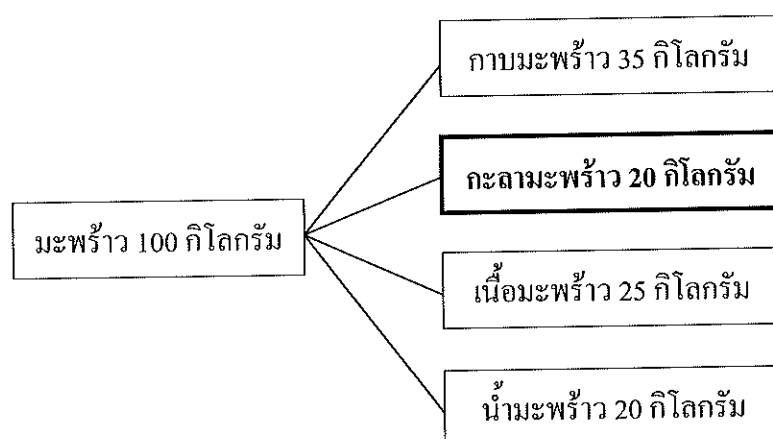
ภาพประกอบ 2-1 โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบหลักของชีวมวล (Michael, 2014)

## 2.2 กะลามะพร้าว

มะพร้าว (Coconut) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cocoas Nucifera Linn.* เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย เนื่องจากคนไทยรู้จักใช้เนื้อมะพร้าวเพื่อบริโภคในชีวิตประจำวันเป็นอาหารทั้งคาวและหวาน ซึ่งจากสำนักงานสถิติแห่งชาติได้เคยสำรวจพบว่า ประชากรไทย 1 คน จะบริโภคเนื้อมะพร้าวประมาณปีละ 8,273.2 กรัม หรือประมาณ 18 ผล ต่อคนต่อปี คิดเป็นร้อยละ 65 ของผลผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือประมาณร้อยละ 35 ของผลผลิตทั้งหมดจะใช้ในรูปของอุตสาหกรรมหรือส่งออกต่อไป

มะพร้าวเป็นพืชยืนต้น ใบมีลักษณะเป็นใบประกอบแบบขนนก ผลประกอบด้วย เอพิการ์ป (Epicarp) คือ เปลือกนอก ถัดไปข้างในจะเป็นมีโซคาร์ป (Mesocarp) หรือใยมะพร้าว ถัดไปข้างในเป็นส่วนเอนโดคาร์ป (Endocarp) หรือกะลามะพร้าว ซึ่งจะมีรูสีคล้ายอยู่ 3 รู สำหรับการงอกใหม่ของต้นอ่อน ถัดจากส่วนเอนโดคาร์ปเข้าไปจะเป็นส่วนของเอนโดสเปิร์ม (Endosperm) หรือเนื้อมะพร้าว ภายในมะพร้าวจะมีน้ำมะพร้าวซึ่งเมื่อมะพร้าวแก่ เอนโดสเปิร์มจะคูดน้ำมะพร้าวหมด

กะลามะพร้าว เป็นชีวมวลที่เหลือใช้จากมะพร้าว ซึ่งมะพร้าว 1 ผล จะได้กะลาร้อยละ 20 ดังภาพประกอบ 2-2 โดยส่วนมากมะพร้าวจะปลูกบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย (ประมาณร้อยละ 80) ซึ่งจะให้ผลผลิตตลอดปี แต่จะมีมากในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงสิงหาคม



ภาพประกอบ 2-2 ส่วนประกอบของผลมะพร้าว 100 กิโลกรัม



## 2.2.1 ประโยชน์ของกะลามะพร้าว

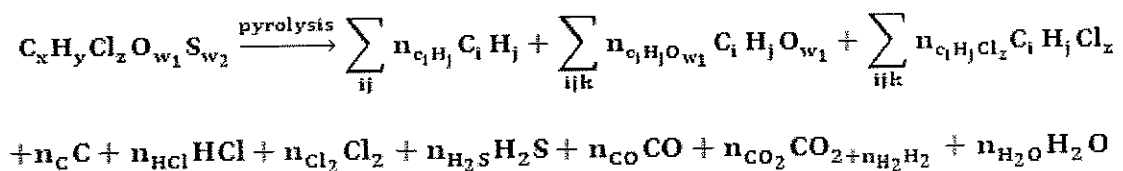
2.2.1.1 การนำกะลามะพร้าวมาตัดแปลงทำเป็นวัสดุใช้สอยภายในครัวเรือน เช่น ซ้อน ถ้วย และอุปกรณ์ตกแต่งบ้าน เป็นต้น

2.2.1.2 การนำถ่านชาร์กะลามะพร้าวที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization) มาใช้เป็นตัวดูดซับสีและกลิ่นในอุตสาหกรรมต่างๆ

2.2.1.3 การนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้โดยตรง

## 2.3 การไพโรไลซิส

Pyro เป็นภาษากรีก มีความหมายว่า ความร้อน ไพโรไลซิส จึงหมายถึง การทำปฏิกิริยาของสารใดสารหนึ่งกับความร้อน ซึ่งเป็นกระบวนการที่สารจะถูกสลายตัวส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ จะถูกย่อยสลายทางเคมีด้วยความร้อน ณ อุณหภูมิสูงๆ ในที่อับอากาศ ปราศจากออกซิเจน หรือควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เหลือน้อยที่สุด ทำให้เกิดการสลายของเนื้อวัสดุออกไปเป็นองค์ประกอบย่อยๆ ชนิดต่างๆ หรือองค์ประกอบที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม โดยสมการของการไพโรไลซิสดังภาพประกอบ 2-3 จะเห็นได้ว่า ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ถ่าน ก๊าซ และน้ำ



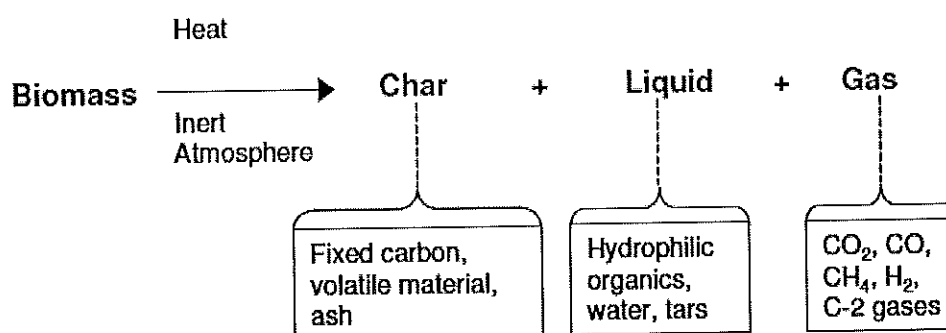
ภาพประกอบ 2-3 สมการไพโรไลซิส (Gonzalez, 2001)

2.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส (Paul, 1995) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ดังภาพประกอบ 2-4

2.3.1.1 ผลิตภัณฑ์ของก๊าซ (Gas product) ผลผลิตก๊าซที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยทั่วไปจะขึ้นกับชนิดชีวมวลและตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการ ก๊าซที่ได้จะมีพวกไฮโดรคาร์บอนอยู่ในระดับสูง บางส่วนเป็นมีเทน (Methane) และพวกไฮโดรคาร์บอนทั้งที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวจากกระบวนการเสื่อมสภาพทางความร้อนที่สลับซับซ้อน ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซจากการไพโรไลซิสส่วนใหญ่ คือ  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $C_2H_2$  และ  $C_2H_6$  (Gonzalez, 2001)

2.3.1.2 ผลผลิตภัณฑ์ของเหลว (Liquid product) เป็นผลผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกว่า น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ส่วนผลผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ Catalytic pyrolysis เรียกว่า ผลผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ (Organic liquid product, OLP)

2.3.1.3 ผลผลิตภัณฑ์ของแข็ง (Solid product) ปริมาณถ่านที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบช้าอยู่ที่ประมาณร้อยละ 30-40 ของน้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น ส่วนการไพโรไลซิสแบบเร็วจะได้ผลผลิตภัณฑ์ถ่านที่ต่ำมาก ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็ว แสดงดังตารางที่ 2-1



ภาพประกอบ 2-4 ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสของชีวมวล (Demirbas, 2002)

ตารางที่ 2-1 เปรียบเทียบระหว่างการกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็ว

| ไพโรไลซิสแบบช้า   | ไพโรไลซิสแบบเร็ว  |
|---|---|
| - ทำให้ได้ผลผลิตเป็นถ่านมาก   | - ทำให้ได้ผลผลิตเป็นของเหลวมาก                                      |
| - เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยามาก                                   | - เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาน้อย                                  |
| - อัตราการให้ความร้อนช้า  | - อัตราการให้ความร้อนเร็ว   |
| - ผลผลิตถ่านร้อยละ 25-35<br>ของเหลวร้อยละ 20-50<br>ก๊าซร้อยละ 20-50 | - ผลผลิตถ่านร้อยละ 10-25<br>ของเหลวร้อยละ 50-70<br>ก๊าซร้อยละ 10-30 |

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิส

#### 2.3.2.1 ส่วนประกอบของวัสดุ (Composition of material)

ส่วนประกอบของชีวมวลเป็นสิ่งสำคัญส่วนหนึ่งในการกำหนดผลิตภัณฑ์ของพวกสารระเหย (VM) การไพโรไลซิสโดยทั่วไปจะมีสารระเหยออกมาประมาณร้อยละ 60-80 ของน้ำหนักเริ่มต้น ในพวกถ่านหินสามารถทำนายปริมาณสารระเหยได้ โดยดูจากอัตราส่วนไฮโดรเจน (H) ต่อคาร์บอน (C) ซึ่งจะเพิ่มเป็นปริมาณแปรผันโดยตรง ซึ่ง Dryden (1975) ได้ให้สูตร Empirical สำหรับคำนวณหาค่าสารระเหยของพวกถ่านหินโดยไม่นำออกซิเจนมาคำนวณ จะได้  $VM (\%mass) = 97.3 (H/C) - 40.4$  (Hoffer, 2004)

#### 2.3.2.2 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุด อุณหภูมิมีส่วนกระทบถึงส่วนประกอบและปริมาณของสารระเหย อุณหภูมิของการไพโรไลซิสของชีวมวลสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นดังนี้

- (1) ขั้นแรก (The First state) คือ อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมিবรรยากาศปกติไปจนถึงอุณหภูมิประมาณ 135 องศาเซลเซียส ในขั้นนี้ สารระเหยที่ออกมาจากชีวมวลจะยังมีไม่มาก แต่สิ่งที่ออกมาคือความชื้นของชีวมวล
- (2) ขั้นที่สอง (The Second state) สารระเหยประมาณร้อยละ 75 จะถูกปลดปล่อยออกมา ซึ่งในขั้นนี้ อุณหภูมิจะอยู่ในช่วงประมาณ 135-400 องศาเซลเซียส
- (3) ขั้นที่สาม (The Third state) ในขั้นนี้จะเป็นกระบวนการผลิตถ่าน ซึ่งจะอยู่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป หลังจากอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ขึ้นไป การไพโรไลซิสของชีวมวลจะสิ้นสุดลง จะไม่มีสารระเหยออกมาอีก

#### 2.3.2.3 อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)

ปริมาณผลิตภัณฑ์ของของเหลวจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราการให้ความร้อน การไพโรไลซิสของชีวมวลเป็นปฏิกิริยาเคมีแบบง่าย ๆ สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง เนื่องจากอัตราการให้ความร้อนมีผลต่อการไพโรไลซิส ดังนั้นการเปลี่ยนแหล่งพลังงานความร้อนที่ต่างออกไปจะทำให้ผลผลิตไพโรไลซิสที่แตกต่าง แหล่งความร้อนอาจได้จาก 3 แหล่ง คือ เตาความร้อนที่ทำจากขดลวดไฟฟ้าหรือใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่คลื่นวิทยุ และการอาร์คด้วยกระแสไฟฟ้าแรงสูงคล้ายกับการตัดโลหะ (Alessio, 1998)

## 2.4 น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil)

น้ำมันชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย น้ำ สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่เป็นของผสมซับซ้อน (Complex mixture) สารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารประกอบแอลกอฮอล์ (Alcohols) สารประกอบอัลดีไฮด์ (Aldehyde) และอะเซตเตอริค (Acetadehyde)

ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบเร็วจะมีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำ มีสีน้ำตาลปนดำ (Dark-brown) โดยมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ โดยส่วนใหญ่จะไม่มี การแยกเฟสกัน ยกเว้นชีวมวลที่มีความชื้นสูงมากๆ ส่วนน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบช้าจะเป็นลักษณะของเหลวสีดำ มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ และมีความหนืดสูงกว่า

น้ำที่อยู่ในน้ำมันชีวภาพจะส่งผลกระทบต่อทำให้ลดค่าความร้อน มีผลต่อค่า pH ลดค่าความหนืด มีผลต่อค่าเสถียรภาพทางเคมีและทางฟิสิกส์ มีค่า pH อยู่ในช่วง 2-3 ซึ่งเป็นผลจากกรดอินทรีย์ (Organic acid) ที่มีอยู่ในน้ำมันชีวภาพ เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรดฟอร์มิก (Formic acid) เป็นต้น ทำให้มีสมบัติสามารถกัดกร่อนพวกโลหะได้

ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมัน มีองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญสำหรับแก๊สโซลีน (Gasoline) มากกว่าน้ำมันชีวภาพ

## 2.5 วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)

### 2.5.1 ความหมายของ RSM

วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองเป็นการรวบรวมข้อมูลทางสถิติและเทคนิคทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนา เพิ่มประสิทธิภาพและหาสภาวะที่เหมาะสม ประกอบด้วยกลุ่มของตัวแปรตามหลักคณิตศาสตร์และสถิติ ใช้หลักการเหล่านี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดยประกอบขึ้นจากผลตัวแปรอิสระ ซึ่งอาจมีตัวแปรเดียวหรือหลายตัวแปร ในการวิเคราะห์ผลของตัวแปรอิสระจากผลการทดลองมาสร้างเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปผลตอบสนองพื้นผิวตอบสนอง โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองกับข้อมูลดิบ แสดงดังสมการ 2-1

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2-1)$$

|        |                        |  |
|--------|------------------------|--|
| โดยที่ | $Y$                    | คือ ผลตอบสนองที่เกิดขึ้น                               |
|        | $f$                    | คือ ฟังก์ชันการทำงานที่ตัวแปรที่ยังไม่ทราบค่าผลตอบสนอง |
|        | $x_1, x_2, \dots, x_n$ | คือ ตัวแปรอิสระ  |
|        | $n$                    | คือ จำนวนตัวแปรอิสระ                                   |
|        | $\varepsilon$          | คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากแหล่งต่างๆ         |

### 2.5.2 การออกแบบการทดลองด้วยเทคนิค RSM มีรายละเอียด ดังนี้

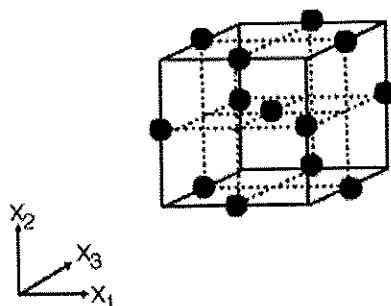
การกำหนดตัวแปรที่จะศึกษาประกอบด้วยตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม ซึ่งกระบวนการทางเคมีและชีวเคมีที่มีผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ มากมาย เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะระบุผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้จากทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ความจำเป็นที่เลือกตัวแปรบางตัวที่มีผลกระทบโดยตรง ในการทดลองมีความสำคัญที่ระบุตัวแปรอิสระ จะสามารถกำหนดทิศทางในการพัฒนาระดับความสำคัญของตัวแปรได้ เพราะจะเกี่ยวข้องต่อความสำเร็จในการหาสภาวะที่เหมาะสมโดยตรง

ผลการทดลองของตัวแปรอิสระแสดงในการพล็อตพื้นผิว (Surface plot) และมีการพล็อตแบบโครงร่าง (Contour plot) โดยการพล็อตแบบโครงร่างจะแสดงรูปร่างและตำแหน่งของการพล็อตพื้นผิวได้แม่นยำขึ้น การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) แบบจำลองของสมการกำลังสอง (Quadratic equation) ดังสมการที่ 2-2 โดยค่า  $Y$  เป็นตัวแปรตาม  $A_0, A_i, A_{ii}$  และ  $A_{ij}$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์แบบจุดตัด (Intercept) สัมประสิทธิ์เชิงเส้น (Linear) สัมประสิทธิ์กำลังสอง (Quadratic) และสัมประสิทธิ์เชิงซ้อน (Interaction) ตามลำดับ ขณะที่  $X_i$  และ  $X_j$  เป็นตัวแปรอิสระ ( $i \neq j$ )

สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำนวน 3 ตัวแปร

$$Y = \sum A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i X_i + \sum_{i=1}^3 A_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=i+1}^3 A_{ij} X_i X_j \quad (2-2)$$

การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design, BBD) เป็นการออกแบบสามระดับเพื่อฟิตพื้นผิวผลตอบสนอง สร้างขึ้นจากการออกแบบแฟกทอเรียล  $2^k$  กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนตัวแปรของการทดลองที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวแปร 3 ตัว รูปทรงเรขาคณิตของการออกแบบจะแสดงเป็น (0, -1 และ 1) การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี  $\sqrt{2}$  ดังภาพประกอบ 2-5 และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากจุดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-level combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปไม่ได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพของกระบวนการ



ภาพประกอบ 2-5 จุดของการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Uran, 2007)

กำหนดรหัส (Code) ของตัวแปรอิสระเพื่อใช้ในการออกแบบสถานะในการทดลองด้วยแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และทำการแปลงรหัสตัวแปรอิสระ (Code variables) ตามตัวแปรเดิมได้ดังสมการ 2-3

$$X = \left( \frac{x - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}}{\frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}} \right) \quad (2-3)$$

โดยที่ X คือ Code variable  
 x คือ ตัวแปรอิสระ  
 $x_{\min}$  คือ ค่าต่ำสุดของตัวแปรอิสระ  
 $x_{\max}$  คือ ค่าสูงสุดของตัวแปรอิสระ

### 2.5.3 ประโยชน์ของเทคนิค RSM

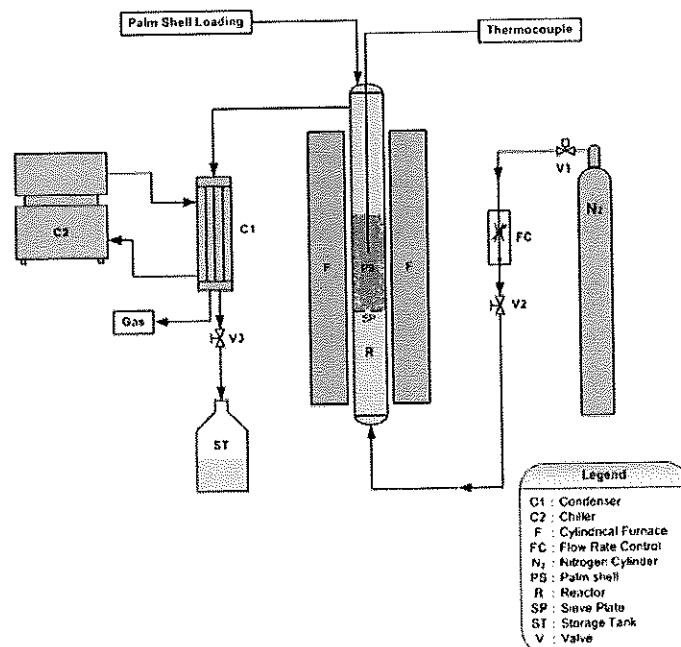
เทคนิค RSM มีประโยชน์มากเมื่อเปรียบเทียบกับ การหาสถานะที่เหมาะสมด้วยวิธีดั้งเดิม ได้แก่ การออกแบบด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองมีจำนวนชุดการทดลองน้อยกว่าวิธีดั้งเดิม ซึ่งแบบดั้งเดิมจะมีจำนวนการทดลองที่มากกว่าเพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมของระบบ แต่วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองมีความเป็นไปได้ที่จะเจอผลกระทบภายใน จากตัวแปรอิสระจากกระบวนการทางชีวเคมี ในสมการอย่างง่ายของวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองจะเพิ่มความเข้าใจผลที่เกิดจากการผสมกันของตัวแปรอิสระต่างๆ จากสมการพบว่า มีผลตอบสนองสอดคล้องกับการทดลองของตัวแปรอิสระต่างๆ จึงกล่าวได้ว่า เทคนิค RSM เป็นเครื่องมือที่เป็นประโยชน์มากต่อการหาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการทางชีวเคมีและกระบวนการทางเคมี (Uran, 2007)

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองแบบ BBD เนื่องจากช่วงขนาดของกะลามะพร้าวไม่สามารถกำหนดค่าความละเอียดได้อย่างแม่นยำแตกต่างจากการชั่งน้ำหนัก ถึงแม้ว่าวิธีการแบบ BBD จะมีความแม่นยำค่อนข้างน้อยกว่า CCD แต่ก็ยังเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 การไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Thermal pyrolysis)

การผลิตน้ำมันชีวภาพโดยกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ชีวมวลเป็นวัตถุดิบมีปัจจัยที่สำคัญหลายประการ โดย Faisal Abnisa และคณะ (2011) ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากกะลาปาล์ม (Palm shell) ในประเทศมาเลเซียเพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพโดยกระบวนการไพโรไลซิส ดำเนินการในเตาปฏิกรณ์เบดนิ่ง เริ่มจากการนำกะลาปาล์มอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบปริมาณเถ้า ความชื้น และคาร์บอนคงที่ และการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ผลการศึกษาพบว่า ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมีค่าสูงสุดที่ 46.1 โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 1.7-2 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และ อัตราการไหลของไนโตรเจน 200 ml/min น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกะลาปาล์มเป็นสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ของคาร์บอน ( $C_3$ ,  $C_5$ ,  $C_6$ ,  $C_7$ ,  $C_8$  และ  $C_9$ ) กับ Oxygenated aromatic (ArO) จำนวนมาก และยังพบอีกว่าน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบของน้ำร้อยละ 53 ค่า pH ต่ำ (2.5) และปริมาณออกซิเจนสูงถึงร้อยละ 71.40 โดยน้ำหนัก



ภาพประกอบ 2-6 แบบโครงสร้างการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  
เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพจากกะลาปาล์ม (Faisal Abnisa, 2011)

จากภาพประกอบ 2-6 เป็นแบบโครงสร้างการไพโรไลซิสสำหรับการทดลองจากกะลาปาล์มเพื่อให้ได้น้ำมันชีวภาพที่มากที่สุด จะเห็นได้ว่ามีเครื่องปฏิกรณ์สำหรับใส่กะลาปาล์ม ด้านข้างมีเตาปฏิกรณ์เพื่อให้ความร้อนเพื่อให้เกิดการไพโรไลซิส มีการป้อนก๊าซไนโตรเจนตลอดระยะเวลาการทดลอง เนื่องจากการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ต้องไม่มีออกซิเจนหรือมีน้อยมาก เพราะออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มีอยู่มากในชีวมวล ทำให้เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หรือก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นผลผลิตที่ไม่ต้องการ จึงต้องป้อนก๊าซเฉื่อยเข้าไปในกระบวนการไพโรไลซิส ไอน้ำมันที่ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ผ่านการควบแน่นกลายเป็นของเหลว

Tritti Siengchum และคณะ (2012) ได้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลจากกะลามะพร้าว โดยเริ่มจากการนำกะลามะพร้าวอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบโรตารี (Rotary grinder) เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 3-5 มิลลิเมตร ทำปฏิกิริยาด้วยเตาปฏิกรณ์เบดนิ่ง โดยใช้สถานะอัตราการให้ความร้อน 175 และ 75 องศาเซลเซียสต่ออนาที โดยใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพาและทำการควบแน่นโดยใช้กับดักเย็น (Cold trap) ผลการศึกษาพบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุด 61.0 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะอุณหภูมิ 615 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อนที่ 75 องศาเซลเซียสต่ออนาที

Ilknur Demiral และคณะ (2012) ได้ศึกษาผลิตผลน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสของซังข้าว โดยนำไปอบด้วยอากาศแห้งและบดด้วยเครื่องบดแบบโรตารี ทำปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์เบดนิ่ง งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการ ศึกษาอัตราการให้ความร้อน และศึกษาอัตราการไหลของไนโตรเจน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อนเป็น 7 และ 40 องศาเซลเซียสต่ออนาที ซึ่งเป็นการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็วตามลำดับ ส่วนการทดลองสุดท้ายทำปฏิกิริยาที่อัตราการไหลของไนโตรเจนต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดมีค่า 26.44 โดยน้ำหนัก โดยทำปฏิกิริยาที่สภาวะอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 40 องศาเซลเซียสต่ออนาที และอัตราการไหลของไนโตรเจน 0.1 ลิตรต่ออนาที ดังนั้นกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วให้ผลผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพมากกว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า

เปรียบเทียบงานวิจัยที่ศึกษาการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดง

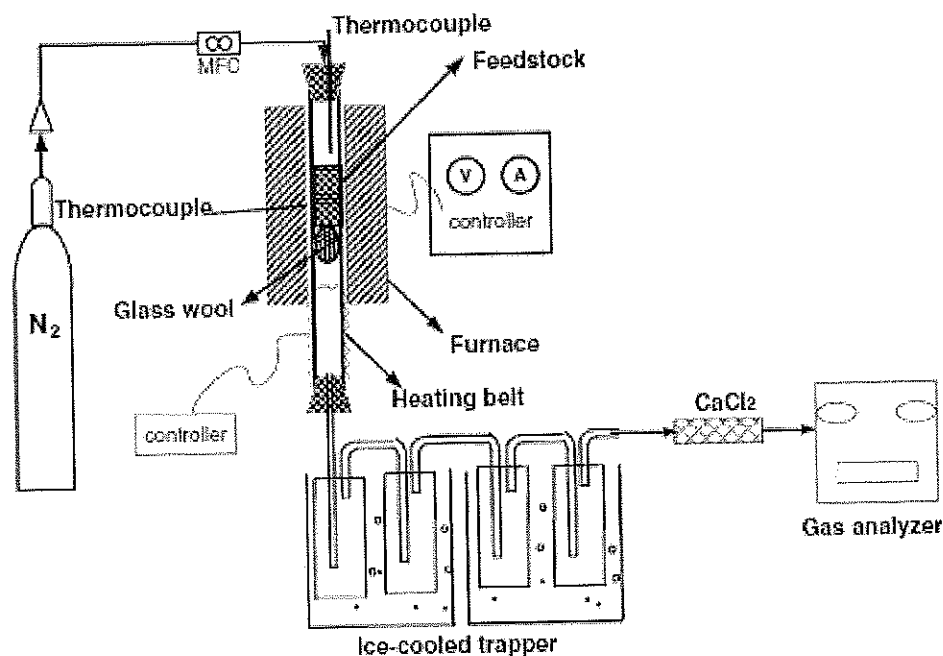


ตารางที่ 2-2 ข้อมูลการวิเคราะห์และปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  
ของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

| ชีวมวล      | ไพโรไลซิส              | ปัจจัยที่ให้ร้อยละผลได้<br>ของน้ำมันชีวภาพสูงสุด      | ผลได้ของ<br>น้ำมันชีวภาพ          | งาน<br>วิจัย        |
|-------------|------------------------|---|-----------------------------------|---------------------|
| กะลาปาล์ม   | แบบเร็ว                | อุณหภูมิ = 500 °C                                     | 46.1<br>เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนัก | Faisal A.<br>(2011) |
|             |                        | เวลา = 60 min   |                                   |                     |
|             |                        | ขนาดอนุภาค = 2 mm                                     |                                   |                     |
|             |                        | อัตราการไหล N <sub>2</sub> = 2 L/min                  |                                   |                     |
| กะลามะพร้าว | แบบเร็ว                | อุณหภูมิ = 615 °C                                     | 61.0<br>เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนัก | Tritti S.<br>(2012) |
|             |                        | อัตราการให้ความร้อน = 75 °C/min                       |                                   |                     |
| ซังข้าวโพด  | แบบช้า<br>(7 °C/min)   | อุณหภูมิ = 500 °C                                     | 26.4<br>เปอร์เซ็นต์<br>โดยน้ำหนัก | Ilknur D.<br>(2012) |
|             |                        | อัตราการให้ความร้อน = 40 °C/min<br>(ไพโรไลซิสแบบเร็ว) |                                   |                     |
|             | แบบเร็ว<br>(40 °C/min) | อัตราการไหล N <sub>2</sub> = 0.1 L/min                |                                   |                     |
|             |                        | อัตราการให้ความร้อน = 50 °C/min                       |                                   |                     |
|             |                        | ขนาดอนุภาค = 0.425-0.6 mm                             |                                   |                     |

## 2.6.2 การไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

Leiyu และคณะ (2013) ศึกษาการกะตะไลติกไพโรไลซิส จากแกลบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Zinc oxide ด้วยเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่สภาวะอัตราการให้ความร้อนคงที่ 25 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ อัตราการไหลของไนโตรเจน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ แบบโครงสร้างการไพโรไลซิสแสดงดังภาพประกอบ 2-7 จะเห็นได้ว่า โครงสร้างจะมีลักษณะคล้ายกับการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย ภายในเครื่องปฏิกรณ์จึงมีทั้งสารตั้งต้น (แกลบ) และตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่มากที่สุด สภาวะที่เหมาะสม อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 5 – 20 เปอร์เซ็นต์ของแกลบ จะทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพลดลง น้ำมันชีวภาพถูกวิเคราะห์หองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยเครื่อง Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS) พบว่า น้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนตั้งแต่  $C_6 - C_{12}$  ได้แก่ Alkanes Alkenes Phenol Benzene Toluene Carboxylic acids Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) Alcohols และ Furan ส่วนใหญ่จะเป็นคาร์บอนจำพวก Phenolic



ภาพประกอบ 2-7 แบบโครงสร้างการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  
เพื่อน้ำมันชีวภาพจากแกลบ (Leiyu และคณะ, 2013)

Amin และ Asmadi (2007) ศึกษาการไพโรไลซิสจากกะลาปาล์มเปล่า (Empty palm fruit bunch, EPFB) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง เพื่อให้ได้ผลผลิตน้ำมันชีวภาพที่มากที่สุดจากการออกแบบด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง หรือ ANOVA (Analysis of variance) ตัวอย่าง EPFB เตรียมโดยการบดให้ได้ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร อบที่อุณหภูมิ 100-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดความชื้นที่มีอยู่ใน EPFB สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเตรียมโดยการเผาในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุด 40.48 ที่สภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 20 นาที สัดส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารตั้งต้น 0.057 กรัมต่อกรัม น้ำมันชีวภาพถูกวิเคราะห์ด้วย GC-MS โดยแยกออกเป็น 2 เฟสคือ น้ำมันเฟสเบาและเฟสหนัก พบว่า น้ำมันเฟสหนักมีองค์ประกอบของพีนอลเป็นส่วนใหญ่

ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารประกอบอินทรีย์มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนที่ซับซ้อนอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ไฮโดรคาร์บอนที่ทำให้น้ำมันมีคุณภาพสูง คือ แก๊สโซลีน งานวิจัยนี้จึงศึกษาร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน โดยงานวิจัยของ Hong L. และคณะ (2009) ศึกษา ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนจากน้ำมันเมล็ดฝ้าย เปรียบเทียบระหว่างการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้และแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ผลิตภัณฑ์ของเหลวถูกวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบของแก๊สโซลีนด้วย GC-FID พบว่า การไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด 20.2 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะอุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียสต่อนาที และการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด 32.9 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะอุณหภูมิ 520 องศาเซลเซียสต่อนาที และของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบของ Aromatic hydrocarbon มากกว่าการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส เรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้แล้ว จะมีลักษณะสีดำเนื่องจากมี Coke เกาะอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยา ในทางอุตสาหกรรมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วจะไม่นำไปทิ้งหรือใช้เพียงแค่ครั้งเดียว เนื่องจากมีราคาที่ค่อนข้างแพง แต่จะถูกนำมาผ่านกระบวนการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ได้ อีก โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 550 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศมีออกซิเจน เรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ (Regenerated catalyst) จะมีลักษณะเป็นสีขาวคล้ายกับตัวเร่งปฏิกิริยาบริสุทธิ์ แต่คุณสมบัติอาจเปลี่ยนไปบ้าง ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เปรียบเทียบผลการศึกษาของตัวเร่งปฏิกิริยาบริสุทธิ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้ว และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ

Lopez และคณะ (2011) ศึกษา การไพโรไลซิสจากพลาสติกเหลือใช้ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชนิด Semi-batch ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของไนโตรเจน 1 ลิตรต่อนาที เปรียบเทียบผลการศึกษาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 4 แบบ ได้แก่ แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาบริสุทธิ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาใช้แล้ว และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพเตรียมได้จากการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศแบบมีออกซิเจน พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ามากกว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิด เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ของเหลวจึงน้อยลง เปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวแบบตัวเร่งปฏิกิริยาบริสุทธิ์และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวแบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวแบบตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ซ้ำ

Aguado และคณะ (2011) ศึกษาการไพโรไลซิสจาก Low density polyethylene (LDPE) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Ni บน Beta zeolite ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส โซลีนจากน้ำมันเฟสเบา และน้ำมันเฟสหนัก ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพซ้ำ 4 ครั้ง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ เตรียมได้จากการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่ความดันบรรยากาศแบบมีออกซิเจน พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ เพิ่มครั้งมากขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันเฟสเบาและน้ำมันเฟสหนักมีค่าลดลง ส่วนร้อยละผลได้ของแก๊ส โซลีนจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพครั้งที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นจากรอบแรกเล็กน้อย ส่วนครั้งที่ 3 และ 4 มีค่าใกล้เคียงกับครั้งที่ 2

### บทที่ 3

#### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

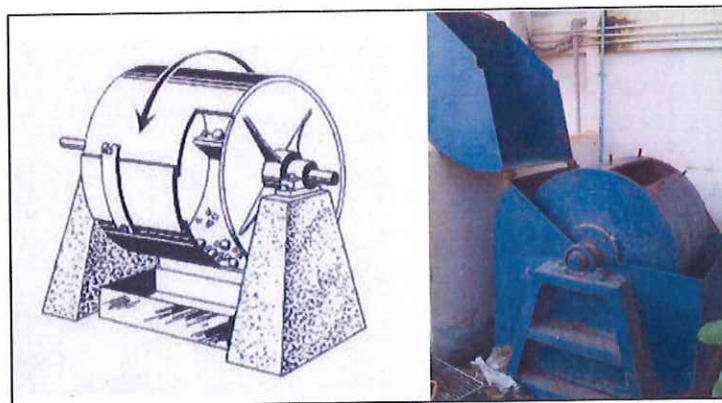
งานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสจากกะลามะพร้าว โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยอุณหภูมิ อัตราการไหลของไนโตรเจน และขนาดของกะลามะพร้าว ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Thermal pyrolysis)
2. ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยอุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก และร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic pyrolysis) ออกแบบการทดลองโดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง

#### 3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 ขั้นตอนการเตรียมกะลามะพร้าวก่อนการไพโรไลซิส

- (1) บดกะลามะพร้าวด้วยเครื่องลอสแอนเจลีส (Los Angeles Abrasion Machine) แสดงดังภาพประกอบ 3-1 พร้อมลูกเหล็กจำนวน 22 ลูก เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 57 มิลลิเมตร และน้ำหนักเฉลี่ย 600 กรัม
- (2) เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (High capacity sieve shaker) ภาพประกอบ 3-2 (ก)
- (3) ตะแกรงขนาด 2 นิ้ว (50 มิลลิเมตร), 3/2 นิ้ว (37.5 มิลลิเมตร), 1 นิ้ว (25 มิลลิเมตร), 3/4 นิ้ว (19 มิลลิเมตร), 1/2 นิ้ว (12.5 มิลลิเมตร), 3/8 นิ้ว (9.5 มิลลิเมตร) และ 1/4 นิ้ว (6.5 มิลลิเมตร)
- (4) เครื่องขังน้ำหนัก ถาด และโถดูดความชื้น (Desiccator)
- (5) กะลามะพร้าว 8,000 กรัม ดังภาพประกอบ 3-2 (ข)



ภาพประกอบ 3-1 เครื่องบดลอสแอนเจลีส



(ก)

(จ)

ภาพประกอบ 3-2 (ก) เครื่องเขย่าตะแกรงร้อน (ข) กะลามะพร้าว

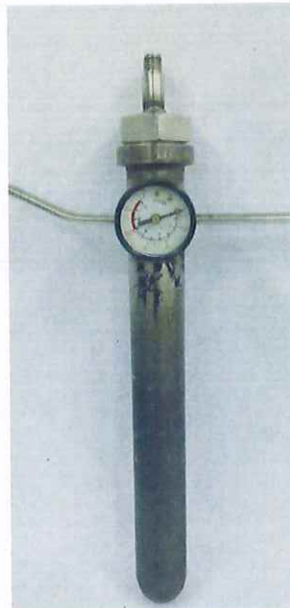
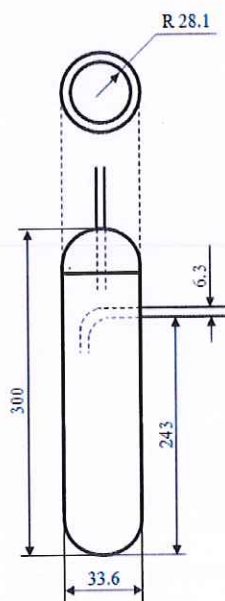
### 3.1.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

- (1) Zeolite Ammonium ZSM-5 ชนิดผง ( $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$ )
- (2) ถ้วยเซรามิก
- (3) เตาเผา (Furnace)
- (4) ไบแก๊ว
- (5) โถดูดความชื้นและขวดเก็บตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.1.3 ขั้นตอนการไพโรไลซิส

- (1) เครื่องปฏิกรณ์และเตาปฏิกรณ์
- (2) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เทปให้ความร้อน (Heating tape)
- (3) เครื่องควบแน่นกับดักน้ำแข็ง (Ice condenser trap)
- (4) เครื่องซังสาร ขวดเก็บตัวอย่าง ท่อยาง และถุงเก็บก๊าซ (Gas bag)

เครื่องปฏิกรณ์ทำหน้าที่เป็นภาชนะที่ใช้ในการบรรจุกะลามะพร้าวเพื่อทำการไพโรไลซิส โดยจะเป็นส่วนที่รับพลังงานความร้อนโดยตรงจากเตา และเกิดการไพโรไลซิสขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์นี้ ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์เป็นโลหะสแตนเลส (Stainless steel) เนื่องจากเป็นวัสดุที่สามารถเก็บความร้อนและมีการกระจายตัวของความร้อนได้ดี มีความทนทานแข็งแรง ไม่เกิดสนิม สามารถทนอุณหภูมิสูง และเป็นโลหะที่มีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี

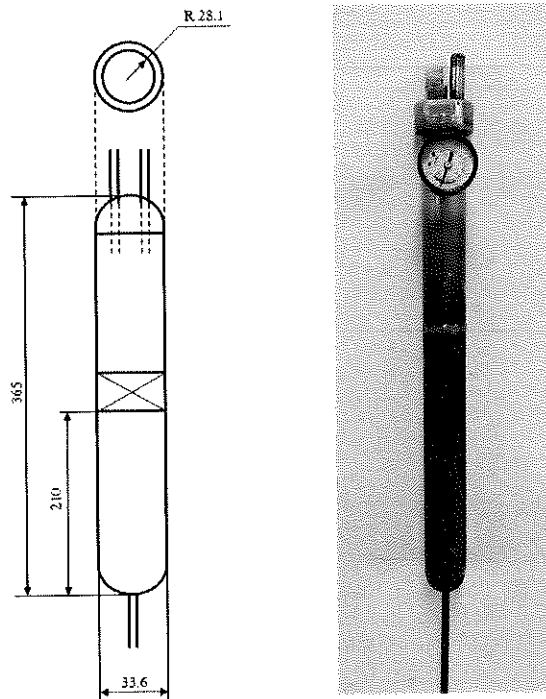


ภาพประกอบ 3-3 แบบโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการไพโรไลซิส (Reactor I)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการไพโรไลซิส (Reactor I) ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 28.1 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก

33.6 มิลลิเมตร และความสูง 300 มิลลิเมตร ซึ่งด้านบนมีท่อทางเข้าเพื่อป้อนก๊าซไนโตรเจนและท่อทางออกด้านข้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร เพื่อให้ไอของน้ำมันไหลออกจากเครื่อง Reactor I เข้าสู่เครื่องควบแน่น (สำหรับการทดลองแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา) หรือเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา (สำหรับการทดลองแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา) แบบโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการไพโรไลซิส แสดงดังภาพประกอบ 3-3

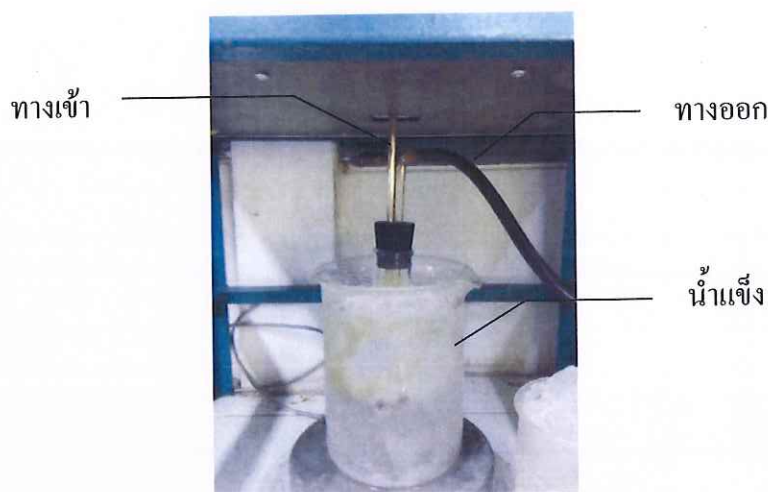
เครื่องปฏิกรณ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Reactor II) ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 28.1 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 33.6 มิลลิเมตร และความสูง 365 มิลลิเมตร ซึ่งด้านบนมีท่อทางเข้าของไอน้ำมันจากการไพโรไลซิสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร และทางเข้า Temperature controller สำหรับวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ สามารถใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาตรงกลางของเครื่องปฏิกรณ์ Reactor II โดยใช้ใยแก้วเป็นฐานรองบนตะแกรงเพื่อใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากใยแก้วทนความร้อนสูงและก๊าซไนโตรเจนสามารถไหลผ่านได้ แบบโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังภาพประกอบ 3-4



ภาพประกอบ 3-4 แบบ โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Reactor II)



เครื่องควบคุมกับดักน้ำแข็งเพื่อเป็นเครื่องควบคุมสารไฮโดรคาร์บอนและอื่นๆ ที่เกิดขึ้นหลังการไพโรไลซิส ซึ่งอยู่ในสถานะก๊าซ ใช้เครื่องควบคุม 5 ชุด ต่อกอกจากท่อทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีขนาดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิเมตร และบีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิเมตร แสดงดังภาพประกอบ 3-5

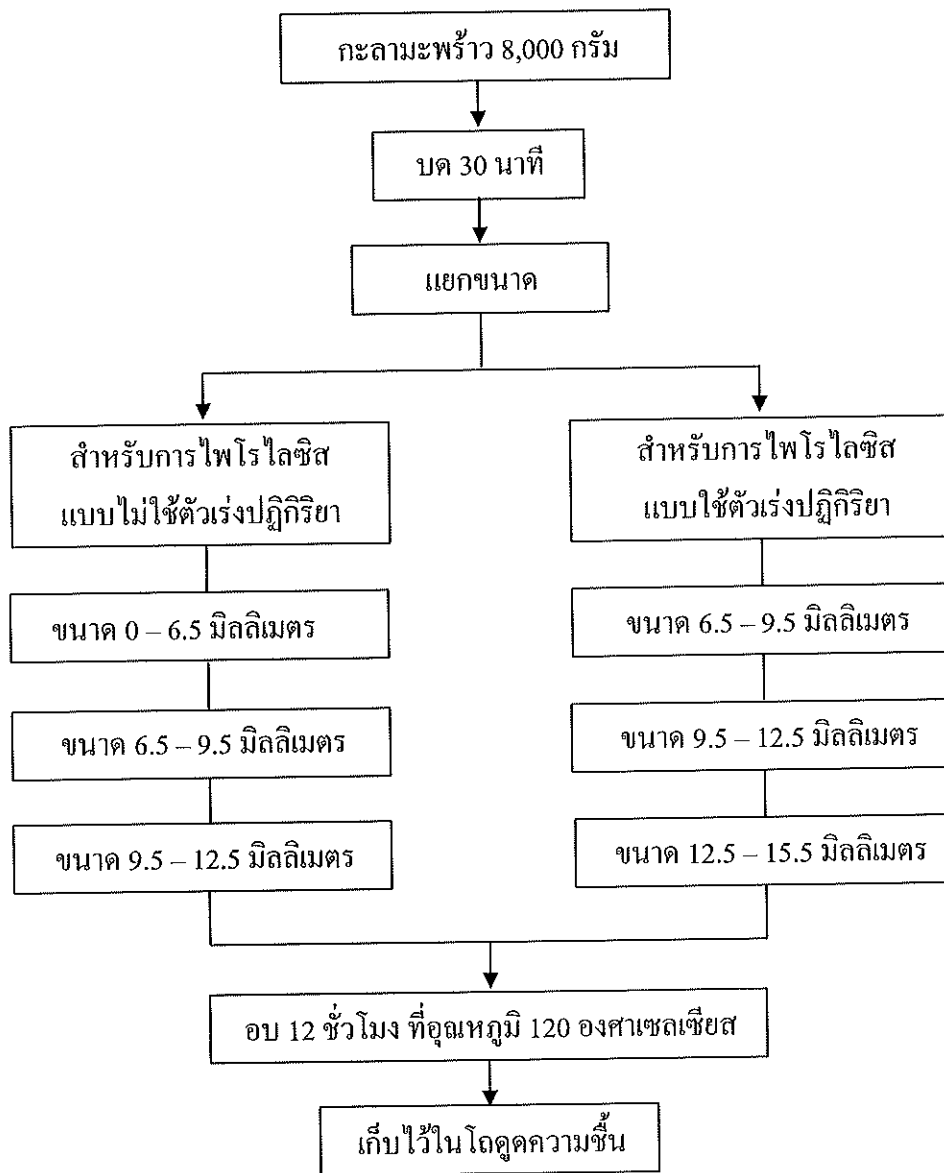


ภาพประกอบ 3-5 เครื่องควบคุมกับดักน้ำแข็ง

### 3.2 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

#### 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมกะลามะพร้าวก่อนการไพโรไลซิส

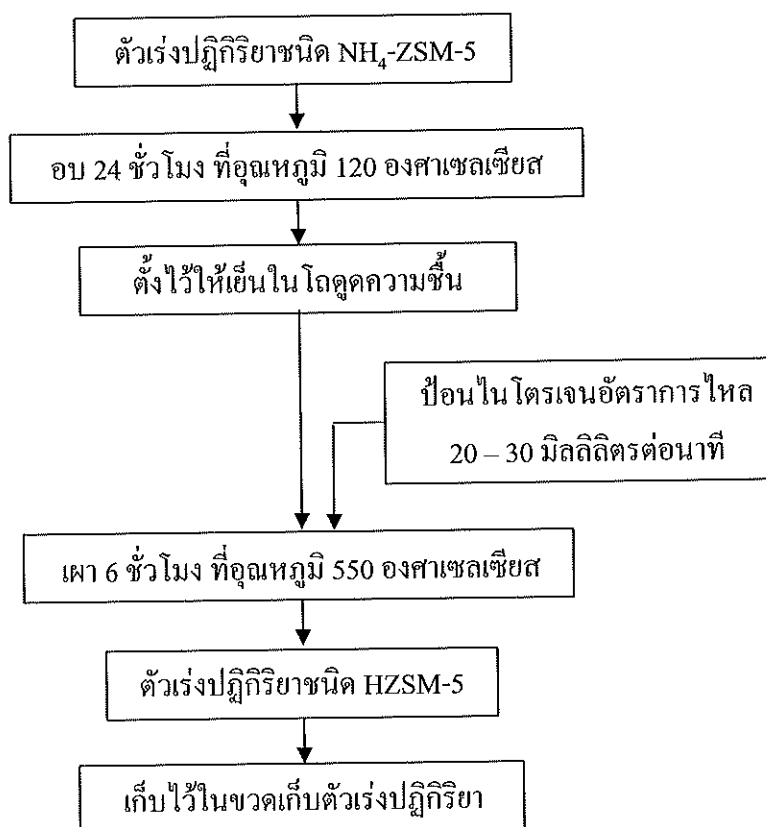
- (1) นำกะลามะพร้าวใส่เข้าไปในเครื่องลอสแอนเจลิส พร้อมลูกเหล็ก หมุนด้วยความเร็ว 35 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที
- (2) หลังจากนั้นนำไปแยกขนาดของกะลามะพร้าวด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน
- (3) เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) มีขนาดเล็ก จึงเลือกใช้กะลามะพร้าวที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0-12.5 มิลลิเมตร จะได้ขนาดที่แตกต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่ ขนาดของกะลามะพร้าว 0-6.5, 6.5-9.5 และ 9.5-12.5 มิลลิเมตร
- (4) นำกะลามะพร้าวอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
- (5) เก็บกะลามะพร้าวที่อบแล้ว ไว้ในโถดูดความชื้น ดังภาพประกอบ 3-6



ภาพประกอบ 3-6 ขั้นตอนการเตรียมกะลามะพร้าวก่อนการไพโรไลซิส

### 3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา (Natthagritt, 2011)

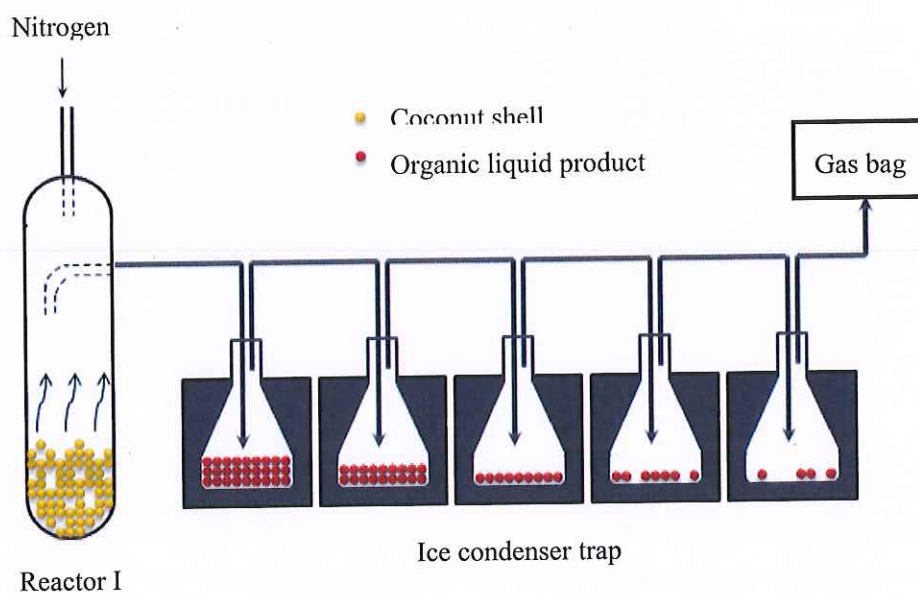
- (1) นำ  $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$  อบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (2) เก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อให้เกิดการเย็นตัว
- (3) นำ  $\text{NH}_4\text{-ZSM-5}$  เผาด้วยเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยป้อนอัตราการไหลของไนโตรเจน 20-30 มิลลิลิตรต่อนาที ดังแสดงดังภาพประกอบ 3-7
- (4) จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 เพื่อนำไปทำการทดลองสำหรับการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในกิจกรรมที่ 2



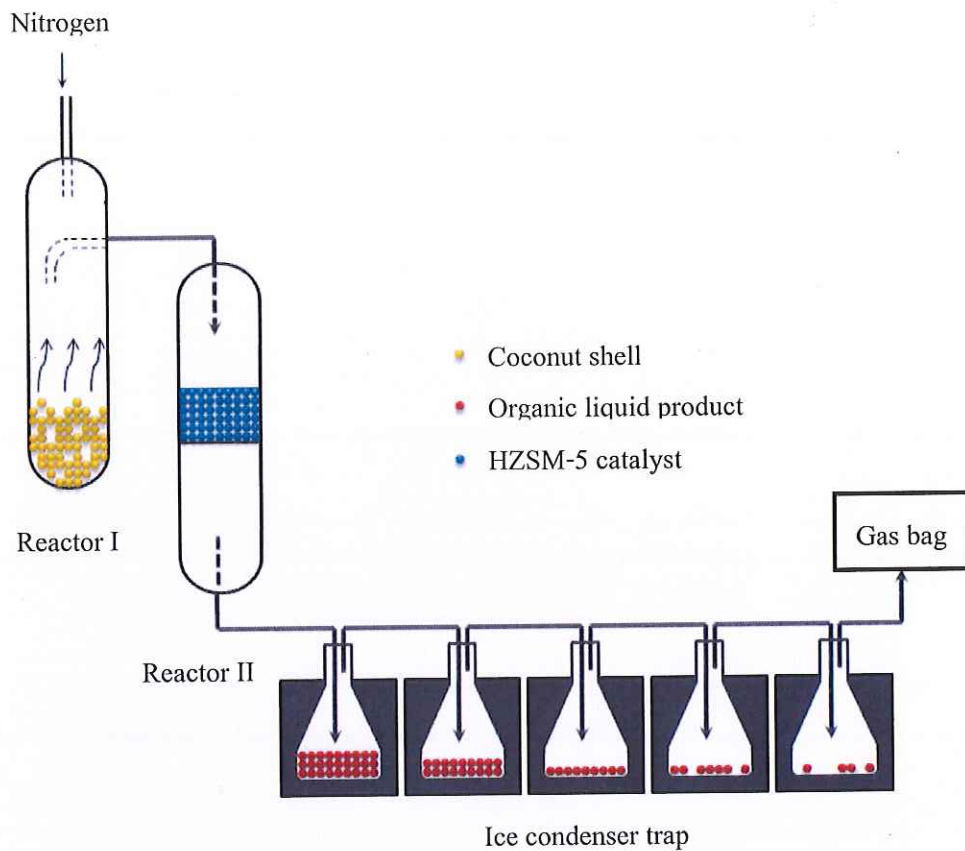
ภาพประกอบ 3-7 ขั้นตอนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.2.3 ขั้นตอนการไพโรไลซิส

เตรียมเครื่องสำหรับการไพโรไลซิส ต้องตรวจเช็คความพร้อมของเครื่อง เพื่อป้องกันการรั่วไหล นำกะลามะพร้าวใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 20 กรัม ปรับอัตราการไหลของไนโตรเจนตามสถานะที่ออกแบบ จากนั้นเปิดเตาปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิความร้อนตามสถานะที่ออกแบบ รอจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงอุณหภูมิที่กำหนดจึงเริ่มจับเวลา ทำการไพโรไลซิสเวลา 60 นาที ระหว่างการไพโรไลซิส ต้องคอยปรับอัตราการไหลของไนโตรเจนให้คงที่ และเติมน้ำแข็งใน Ice condenser trap อย่างต่อเนื่อง เมื่อครบ 60 นาที จึงปิดเตาปฏิกรณ์ รอให้อุณหภูมิเย็นถึงอุณหภูมิห้องจึงเก็บผลการทดลอง และปิดอัตราการไหลของไนโตรเจน นำผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการควบแน่นและของแข็งที่เหลือในเครื่องปฏิกรณ์ ชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปคำนวณ ส่วนก๊าซจะปล่อยทิ้งที่ความดันบรรยากาศต่อจากเครื่องควบแน่น สำหรับการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Thermal pyrolysis) แสดงผังภาพประกอบ 3-8



ภาพประกอบ 3-8 ขั้นตอนการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพประกอบ 3-9 ขั้นตอนการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เตรียมการทดลองคล้ายกับการทดลองแรก แต่ก่อนเปิดเตาปฏิกรณ์สำหรับไพโรไลซิส (Reactor I) จะต้องให้ความร้อนแก่ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อน โดยการเปิดเตาปฏิกรณ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Reactor II) จนกระทั่งความร้อนถึงอุณหภูมิตามสถานะที่ออกแบบ จากนั้นจึงเปิดเตาปฏิกรณ์แรก (Reactor I) ซึ่งมีเครื่องปฏิกรณ์ใส่กะลามะพร้าวเริ่มต้นสำหรับการไพโรไลซิส และทำตามขั้นตอนเช่นเดียวกับการทดลองแรก แสดงดังภาพประกอบ 3-9

ภาพประกอบ 3-10 แสดงอุปกรณ์สำหรับการไพโรไลซิสทั้งแบบไม่ใช้ตัวและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าเป็นเตาสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Reactor II) ซ้ายมือของเตาปฏิกรณ์ไฟฟ้าคือเตาปฏิกรณ์ทรงสูงสีขาวสำหรับการไพโรไลซิส (Reactor I) การไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่ใช้เตาปฏิกรณ์ไฟฟ้า (Reactor II) ดังนั้นท่อที่ออกจาก Reactor I จะไม่ผ่าน Reactor II แต่จะต่อตรงไปยัง Ice condenser trap โดยตรง



ภาพประกอบ 3-10 อุปกรณ์สำหรับการไพโรไลซิสในห้องทดลอง (ก) ถังไนโตรเจน  
 (ข) เต้าปฏิกิริยาสำหรับการไพโรไลซิส (ค) เต้าปฏิกิริยาสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา  
 (ง) เครื่องควบแน่นกับดักน้ำแข็ง

การออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม RSM แบบ Box-Behnken design ตัวอย่างโปรแกรม RSM แสดงดังภาพประกอบ 3-11 มีตัวแปรอิสระ คือ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิส 3 ปัจจัย ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิ 350-550 องศาเซลเซียส ช่วงอัตราการไหลของไนโตรเจน 5-15 มิลลิลิตรต่อนาที และช่วงขนาดของกะลามะพร้าว 0-12.5 มิลลิเมตร กำหนดรหัสของช่วงตัวแปรอิสระจากปัจจัยที่ศึกษา เพื่อใช้ในการออกแบบสภาวะในการทดลอง จะได้การทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3-1 จากนั้นจึงออกแบบสภาวะของการทดลองจากรหัสของตัวแปรอิสระที่ได้กำหนดไว้ จะได้สภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3-2 เป็นการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบทั้งหมด จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ป้อนลงไปโปรแกรม จะได้ผลการทดลองเป็นกราฟพื้นผิวสามมิติ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป

**Design an Experiment**

Input Data  
 Number of Factors: 3    # of Centerpoints: 3    Number of Responses: 1

All Factors are Quantitative     Show Aliasing (if applicable)     Randomize Worksheet

2 Level Screening Designs

Many Factors

|  |    |      |
|--|----|------|
| <input type="radio"/> Fractional Factorial Res 3 | 4  | Runs |
| <input type="radio"/> Placket - Burman           | 12 | Runs |

Higher Resolution

|  |   |      |
|--|---|------|
| <input type="radio"/> Fractional Factorial Res 4 | 8 | Runs |
| <input type="radio"/> Fractional Factorial Res 5 | 8 | Runs |
| <input type="radio"/> Full Factorial             | 8 | Runs |

Response Surface Designs

Second Order Models

|  |    |      |
|--|----|------|
| <input type="radio"/> Central Composite        | 14 | Runs |
| <input checked="" type="radio"/> Box - Behnken | 12 | Runs |

Central Composite Type

Circumscribed (Min & Max=Star Points)

Inscribed (Star Points outside Min & Max)

Face Centered

**Current Design (15 Runs)**  
 Box-Behnken design for 3 Factors  
 Model is quadratic  
 12 model runs and 3 centerpoints

Exit  
 Help  
 Make DOE

**Factor Definition**

| Factor Name        | Units | Low Value | High Value |
|--------------------|-------|-----------|------------|
| Temperature        |       | 450       | 550        |
| Particle-size      |       | 9.5       | 15.5       |
| Weight-of-catalyst |       | 0.5       | 4.5        |

Weight-of-catalyst    0.5    4.5

< Back <    OK

ภาพประกอบ 3-11 โปรแกรม RSM สำหรับออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 3-1 แสดงสภาวะการทดลองโดยการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ Box-Behnken design เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อัตราการไหลของไนโตรเจน และขนาดของกะลามะพร้าว ของการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| การทดลอง | อุณหภูมิ<br>(°C) | อัตราการไหลของไนโตรเจน<br>(ml/min) | ขนาดของกะลามะพร้าว<br>(mm) |
|----------|------------------|------------------------------------|----------------------------|
| 1        | 0                | 0                                  | 0                          |
| 2        | 0                | -1                                 | -1                         |
| 3        | -1               | 0                                  | 1                          |
| 4        | 1                | -1                                 | 0                          |
| 5        | 1                | 0                                  | -1                         |
| 6        | 0                | 1                                  | 1                          |
| 7        | 1                | 0                                  | 1                          |
| 8        | 0                | 0                                  | 0                          |
| 9        | 1                | 1                                  | 0                          |
| 10       | -1               | 0                                  | -1                         |
| 11       | 0                | -1                                 | 1                          |
| 12       | -1               | 1                                  | 0                          |
| 13       | 0                | 1                                  | -1                         |
| 14       | -1               | -1                                 | 0                          |
| 15       | 0                | 0                                  | 0                          |



ตารางที่ 3-2 แสดงการออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิค RSM แบบ Box-Behnken design เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ อัตราการไหลของไนโตรเจน และขนาดของกะลามะพร้าว ของการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| การทดลอง | อุณหภูมิ<br>(°C) | อัตราการไหลของไนโตรเจน<br>(ml/min) | ขนาดของกะลามะพร้าว<br>(mm) |
|----------|------------------|------------------------------------|----------------------------|
| 1        | 450              | 10                                 | 6.5-9.5                    |
| 2        | 450              | 5                                  | 0-6.5                      |
| 3        | 350              | 10                                 | 9.5-12.5                   |
| 4        | 550              | 5                                  | 6.5-9.5                    |
| 5        | 550              | 10                                 | 0-6.5                      |
| 6        | 450              | 15                                 | 9.5-12.5                   |
| 7        | 550              | 10                                 | 9.5-12.5                   |
| 8        | 450              | 10                                 | 6.5-9.5                    |
| 9        | 550              | 15                                 | 6.5-9.5                    |
| 10       | 350              | 10                                 | 0-6.5                      |
| 11       | 450              | 5                                  | 9.5-12.5                   |
| 12       | 350              | 15                                 | 6.5-9.5                    |
| 13       | 450              | 15                                 | 0-6.5                      |
| 14       | 350              | 5                                  | 6.5-9.5                    |
| 15       | 450              | 10                                 | 6.5-9.5                    |

สำหรับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส ช่วงขนาดของกะลามะพร้าว 6.5-15.5 มิลลิเมตร และช่วงปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5-4.5 กรัม อัตราการไหลของไนโตรเจนใช้ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 5 มิลลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อนคงที่ 30 องศาเซลเซียสต่อนาที กำหนดรหัสของช่วงตัวแปรอิสระจากปัจจัยที่ศึกษาเพื่อใช้ในการออกแบบสภาวะในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-3 จากนั้นจึงออกแบบสภาวะของการทดลองจากรหัสของตัวแปรอิสระที่ได้กำหนดไว้ จะได้สภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองดังตารางที่ 3-4

จะเห็นได้ว่า การออกแบบการทดลองของตัวแปรขนาดของกะลามะพร้าวสำหรับการไฟโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเปลี่ยนไปจากการออกแบบการทดลองของตัวแปรขนาดของกะลามะพร้าวสำหรับการไฟโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากขนาดของกะลามะพร้าวที่เล็กที่สุด (0-6.5 มิลลิเมตร) สำหรับการไฟโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะทางกายภาพเป็นผง ซึ่งแตกต่างจากขนาดของกะลามะพร้าวที่ใหญ่ขึ้น (6.5-9.5 และ 9.5-12.5 มิลลิเมตร) มีลักษณะเป็นชิ้น การวิเคราะห์ด้วย Thermogravimetric analysis (TGA) เพื่อหาน้ำหนักที่ของกะลามะพร้าวตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ พบว่า ขนาดของกะลามะพร้าว 0-6.5 และ 6.5-9.5 มิลลิเมตร มีความความแตกต่างกัน ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.4 (ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของกะลามะพร้าวด้วย TGA)

ตารางที่ 3-3 แสดงสภาวะการทดลองโดยการออกแบบด้วยเทคนิค RSM แบบ Box-Behnken design เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ของการไฟโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| การทดลอง | อุณหภูมิ<br>(°C) | ขนาดของกะลามะพร้าว<br>(mm) | ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา<br>(g) |
|----------|------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1        | 0                | -1                         | -1                            |
| 2        | 0                | 1                          | 1                             |
| 3        | 0                | 0                          | 0                             |
| 4        | 0                | 0                          | 0                             |
| 5        | 1                | 0                          | 1                             |
| 6        | 1                | 1                          | 0                             |
| 7        | 0                | 1                          | -1                            |
| 8        | 1                | 0                          | -1                            |
| 9        | -1               | 0                          | -1                            |
| 10       | -1               | 0                          | 1                             |
| 11       | 0                | 0                          | 0                             |
| 12       | 1                | -1                         | 0                             |
| 13       | 0                | -1                         | 1                             |
| 14       | -1               | 1                          | 0                             |
| 15       | -1               | -1                         | 0                             |

ตารางที่ 3-4 แสดงการออกแบบการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเทคนิค RSM แบบ Box-Behnken design เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ของการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| การทดลอง | อุณหภูมิ<br>(°C) | ขนาดของกะลามะพร้าว<br>(mm) | ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา<br>(g) |
|----------|------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1        | 500              | 6.5-9.5                    | 0.5                           |
| 2        | 500              | 12.5-15.5                  | 4.5                           |
| 3        | 500              | 9.5-12.5                   | 2.5                           |
| 4        | 500              | 9.5-12.5                   | 2.5                           |
| 5        | 550              | 9.5-12.5                   | 4.5                           |
| 6        | 550              | 12.5-15.5                  | 2.5                           |
| 7        | 500              | 12.5-15.5                  | 0.5                           |
| 8        | 550              | 9.5-12.5                   | 0.5                           |
| 9        | 450              | 9.5-12.5                   | 0.5                           |
| 10       | 450              | 9.5-12.5                   | 4.5                           |
| 11       | 500              | 9.5-12.5                   | 2.5                           |
| 12       | 550              | 6.5-9.5                    | 2.5                           |
| 13       | 500              | 6.5-9.5                    | 4.5                           |
| 14       | 450              | 12.5-15.5                  | 2.5                           |
| 15       | 450              | 6.5-9.5                    | 2.5                           |

สำหรับการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา งานวิจัยนี้ศึกษาร้อยละผลได้ 3 ชนิด ได้แก่ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ เฟสหนักและร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน นำผลการทดลองที่ได้ Input ลงใน โปรแกรม RSM ที่ได้ ออกแบบไว้แล้ว วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองนี้ จะแสดงผลการคาดคะเนของร้อยละผลได้ที่ดีที่สุด ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยอุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ค่าที่ได้เป็นเพียงการคาดคะเนจากโปรแกรมเท่านั้น จึงต้องทำการทดลองซ้ำอีกครั้งตาม ตามสภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดจาก โปรแกรม เพื่อยืนยันความแม่นยำของโปรแกรม

เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาค่อนข้างแพง ในทางอุตสาหกรรมจึงไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงครั้งเดียวแล้วทิ้ง แต่จะนำมาผ่านการปรับสภาพ (Regeneration) เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การปรับสภาพ สามารถเตรียมได้โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วเผาที่ความดันบรรยากาศที่มีออกซิเจน อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มีลักษณะเป็นสีขาวคล้ายกับตัวเร่งปฏิกิริยาบริสุทธิ์ ทำการไพโรไลซิสที่สภาวะเดียวกันกับสภาวะที่ได้จากการคาดคะเน เพื่อเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ชนิดระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาบริสุทธิ์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ

### 3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์

#### 3.3.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกะลามะพร้าวด้วย TGA

นำกะลามะพร้าวขนาด 0-6.5 และ 6.5-9.5 มิลลิเมตร วิเคราะห์ด้วย TGA จากศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน โดยศึกษาน้ำหนักที่หายไปเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทดลอง โดยนำตัวอย่างส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

#### 3.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของกะลามะพร้าว

นำกะลามะพร้าววิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ด้วย TGA เพื่อหาค่าความชื้น (moisture) สารระเหย (volatile mater) คาร์บอนคงตัว (fixed carbon) และขี้เถ้า (ash) และวิเคราะห์แบบละเอียด (Ultimate analysis) ด้วยเครื่อง CHNS-O analyzer เพื่อหาค่าไนโตรเจน (Nitrogen) คาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ซัลเฟอร์ (Sulphur) ออกซิเจน (Oxygen) สามารถคำนวณค่าความร้อนสูง (High Heating value) จากสมการ 3-1 และค่าความร้อนต่ำ (Low heating value) จากสมการ (3-2)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = \frac{338.2 \times C + 1442.8 \times (H - O/8)}{1000} \quad (3-1)$$

$$\text{LHV (MJ/kg)} = \text{HHV} - (0.218 \times H) \quad (3-2)$$

### 3.3.3 การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ (OLP) สามารถหาได้โดยการชั่งน้ำหนักของกะลามะพร้าวก่อนทำการไพโรไลซิสที่สภาวะต่างๆ และทำการชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสเบาและเฟสหนักรวมกัน จะได้น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิส แล้วนำมาคำนวณตามสูตรดังสมการที่ 3-2

$$\% \text{ OLP yield} = \frac{\text{OLP (g)}}{\text{Coconut shell sample (g)}} \times 100\% \quad (3-3)$$

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก (Heavy fraction, HF) สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ จากสมการที่ 3-4

$$\% \text{ HF yield} = \frac{\text{HF (g)}}{\text{Coconut shell sample (g)}} \times 100\% \quad (3-4)$$

การคำนวณร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน สามารถคำนวณได้จากตัวอย่างการทดลองการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างการทดลองที่ 9 ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสเบาของไอโซออกเทน (Isooctane) วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสเบาตัวอย่างการทดลองที่ 9 ด้วยเครื่อง GC-FID แล้วนำไปคำนวณด้วยกราฟมาตรฐานของไอโซออกเทนในภาคผนวก ก-3 จะได้ค่า 448.93 ppm จากนั้นนำมาคำนวณตามสมการข้างล่างเพื่อหาค่าร้อยละผลได้ของไอโซออกเทนที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสเบา

$$\begin{aligned} 448.93 \text{ ppm} &= \frac{448.93 \text{ mg isooctane}}{\text{liter LF}} \times \frac{1}{\text{density of isooctane}} \\ &= \frac{0.44893 \text{ g isooctane}}{\text{liter LF}} \times \frac{1 \text{ ml isooctane}}{0.692 \text{ g isooctane}} \times \frac{1 \text{ liter LF}}{1,000 \text{ ml LF}} \\ &= \frac{0.0006487 \text{ ml isooctane}}{\text{ml LF}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{0.0006487 \text{ ml isooctane}}{\text{ml LF}} \times \frac{\text{density of isooctane}}{\text{density of LF}} \\
&= \frac{0.0006487 \text{ ml isooctane}}{\text{ml LF}} \times \frac{0.692 \text{ g isooctane}}{\text{ml isooctane}} \times \frac{1 \text{ ml LF}}{1.035 \text{ g LF}} \\
&= \frac{0.0004337 \text{ g isooctane}}{\text{g LF}} \\
&= \frac{0.0004337 \text{ g isooctane}}{\text{g LF}} \times \frac{85.65 \text{ g LF}}{100 \text{ g OLP}} \times \frac{37.44 \text{ g OLP}}{100 \text{ g biomass}} \\
&= 0.01391 \text{ wt \% (\%yield of isooctane)}
\end{aligned}$$

(LF: Light fraction, OLP: Organic liquid product)

### 3.3.4 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ด้วยเครื่อง GC-FID เพื่อหาองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ Pentene, Isooctane, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, p-xylene, m-xylene, o-xylene, Chlorobenzene, 1,3-dichlorobenzene, 1,4-dichlorobenzene และ 1,2-dichlorobenzene สำหรับองค์ประกอบของแก๊สโซลีน มีองค์ประกอบที่สำคัญ ได้แก่ Pentene Isooctane Benzene Toluene Ethylbenzene p-xylene m-xylene และ o-xylene และวิเคราะห์ด้วยเครื่องGC-MS เพื่อหาองค์ประกอบทั้งหมดที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

### 3.3.5 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซ

นำก๊าซที่ได้จากการไพโรไลซิสที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดวิเคราะห์ด้วย GC-MS เพื่อหาองค์ประกอบทั้งหมดที่มีอยู่ในก๊าซ เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

### 3.3.6 การวิเคราะห์หาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

หาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์สามารถวิเคราะห์ได้โดยการหาองค์ประกอบของไนโตรเจน คาร์บอน ไฮโดรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจนด้วยเครื่อง CHNS-O analyzer

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 ขั้นตอนการบดกะลามะพร้าวและแยกขนาด

หลังจากแยกขนาดของกะลามะพร้าวด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน จะได้ปริมาณ ร้อยละตามขนาดต่างๆ ของกะลามะพร้าว ดังแสดงในตารางที่ 4-1 และ 4-2

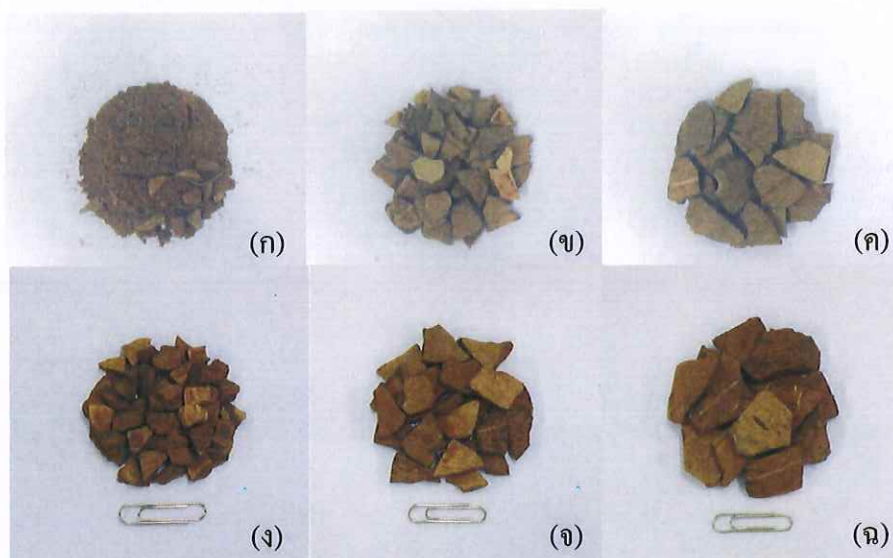
ตารางที่ 4-1 แสดงร้อยละของกะลามะพร้าวตามขนาดต่างๆ หลังจากบดด้วยเครื่องบด ลอสแอนเจลีส เพื่อการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| ตะแกรงเบอร์ (มิลลิเมตร) |        | กะลามะพร้าว    |        |
|-------------------------|--------|----------------|--------|
| ผ่าน                    | ค้าง   | น้ำหนัก (กรัม) | ร้อยละ |
| -                       | 12.5   | 5153.73        | 64.51  |
| 12.5                    | 9.5    | 1016.94        | 12.73  |
| 9.5                     | 6.5    | 1036.27        | 12.97  |
| 6.5                     | Bottom | 782.43         | 9.73   |
| รวม                     |        | 7989.37        | 99.94  |

เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเล็ก จึงเลือกใช้กะลามะพร้าวที่มีขนาดอยู่ในช่วง 0-12.5 มิลลิเมตร เพื่อการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Thermal pyrolysis) จะได้ขนาดที่แตกต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่ ขนาดของกะลามะพร้าว 0-6.5, 6.5-9.5 และ 9.5-12.5 มิลลิเมตร แสดงดังภาพประกอบ 4-1 และการทดลองสำหรับการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ขนาดของกะลามะพร้าวแตกต่างกัน 3 ช่วง ได้แก่ ขนาดของกะลามะพร้าว 6.5-9.5, 9.5-12.5 และ 12.5-15.5 มิลลิเมตร แสดงดังภาพประกอบ 4-2 โดยขนาดของกะลามะพร้าวที่เล็กที่สุด ที่ใช้สำหรับการทดลองการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นผงแตกต่างจากขนาดอื่นที่มีลักษณะเป็นชิ้น ลักษณะเป็นผงนี้มาจากส่วนของเยื่อหรือกาบที่อยู่ด้านนอกของกะลามะพร้าว

ตารางที่ 4-2 แสดงร้อยละของกะลามะพร้าวตามขนาดต่างๆ หลังจากบดด้วยเครื่องบด  
 ลอสมอนเจ็ลีส เพื่อการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| ตะแกรงเบอร์ (มิลลิเมตร) |        | กะลามะพร้าว    |        |
|-------------------------|--------|----------------|--------|
| ผ่าน                    | ค้าง   | น้ำหนัก (กรัม) | ร้อยละ |
| -                       | 15.5   | 402.93         | 31.07  |
| 15.5                    | 12.5   | 1833.21        | 14.90  |
| 12.5                    | 9.5    | 1016.94        | 16.28  |
| 9.5                     | 6.5    | 1036.27        | 17.22  |
| 6.5                     | Bottom | 782.43         | 20.53  |
| รวม                     |        | 7989.37        | 99.94  |



ภาพประกอบ 4-1 กะลามะพร้าวเพื่อการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด

(ก) 0-6.5 มิลลิเมตร (ข) 6.5-9.5 มิลลิเมตร และ (ค) 9.5-12.5 มิลลิเมตร

และเพื่อการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด

(ง) 0-6.5 มิลลิเมตร (จ) 6.5-9.5 มิลลิเมตร

และ (ฉ) 9.5-12.5 มิลลิเมตร



## 4.2 ข้อมูลเบื้องต้นในการไพโรไลซิส

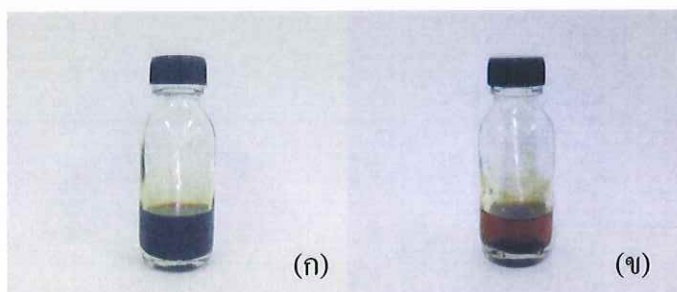
ตารางที่ 4-3 แสดงข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการไพโรไลซิส

| สภาวะที่ใช้                         | แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา | แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา |
|-------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| น้ำหนักกะลามะพร้าว (g)              | ≈ 20                      | ≈ 20                   |
| เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (min)    | 60                        | 60                     |
| อัตราการให้ความร้อน (°C/min)        | 30                        | 30                     |
| ช่วงอุณหภูมิในการไพโรไลซิส (°C)     | 350-550                   | 450-550                |
| ช่วงอัตราการไหลของไนโตรเจน (ml/min) | 5-15                      | 5                      |
| ช่วงขนาดของกะลามะพร้าว (mm)         | 0-12.5                    | 6.5-15.5               |
| ช่วงน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (g)  | -                         | 0.5-4.5                |

## 4.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

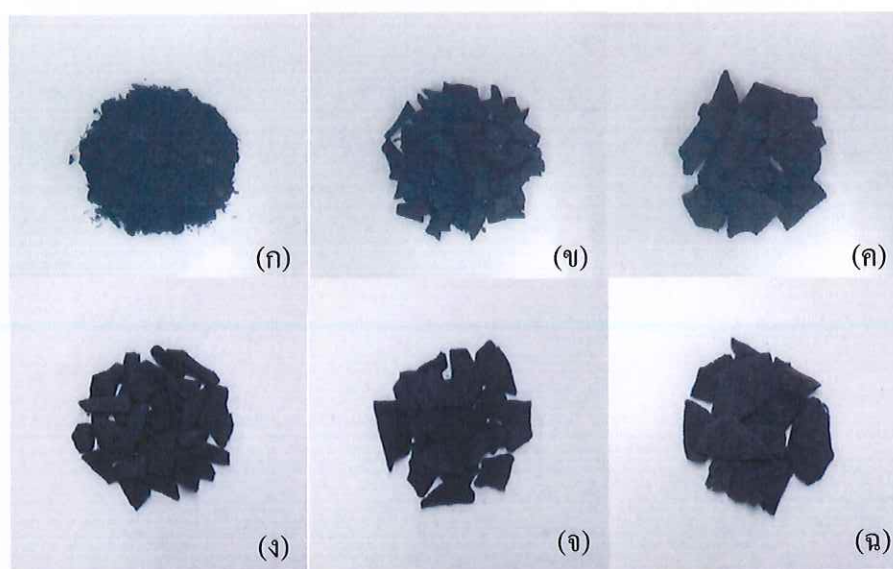
ผลลัพธ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีลักษณะเป็นสารละลายสีดำ เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีการแยกชั้นของของเหลว มีตะกอนเจือปนอยู่บ้าง แต่ค่อนข้างน้อย มีกลิ่นเหม็น ส่วนของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีลักษณะเป็นสารละลายสีน้ำตาลเข้ม แยกชั้นเป็น 2 เฟส ได้แก่ เฟสเบา (Light fraction, LF) และเฟสหนัก (Heavy fraction, HF) ผลลัพธ์ของของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส แสดงดังภาพประกอบ 4-2

ผลลัพธ์ก๊าซที่ได้จากการไพโรไลซิสมีกลิ่นเหม็นฉุน ไม่มีสี



ภาพประกอบ 4-2 (ก) ผลลัพธ์ของเหลวอินทรีย์จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  
(ข) ผลลัพธ์ของเหลวอินทรีย์จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลิตภัณฑ์ของของแข็งที่เหลือจากการไพโรไลซิสมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ มีกลิ่นเหม็น ซึ่งเหลืออยู่ภายในเตาปฏิกรณ์ ไม่มีการเกาะตัวกัน ลักษณะผลิตภัณฑ์ของของแข็งที่ได้ ดังภาพประกอบ 4-3 แบ่งออกเป็นถ่านที่เหลือจากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และ ถ่านที่เหลือจากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีขนาดลดลงเล็กน้อยจากขนาดของ กะลามะพร้าวก่อนการทดลอง ถ่านที่เหลือจากการไพโรไลซิสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทาง อุตสาหกรรมได้ เช่น นำไปแปรรูปอัดแท่งเป็นถ่านเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ใช้เป็นถ่านกัมมันต์ ถ่านหุงต้ม เป็นต้น



ภาพประกอบ 4-3 ถ่านที่ได้จากการไพโรไลซิส แบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด

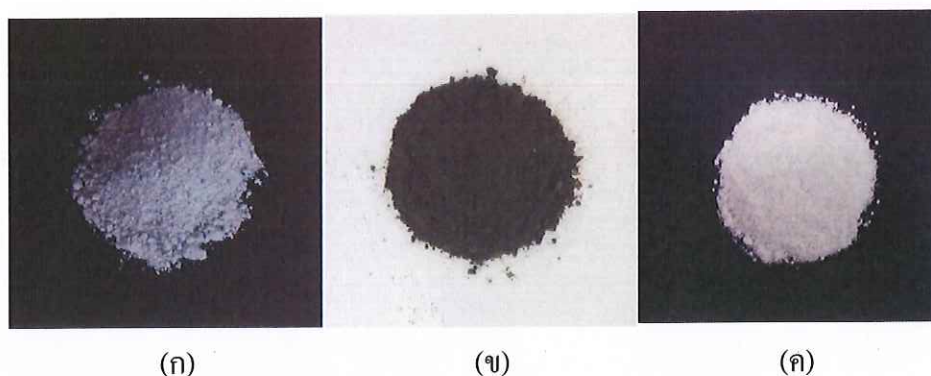
(ก) 0-6.5 มิลลิเมตร (ข) 6.5-9.5 มิลลิเมตร และ (ค) 9.5-12.5 มิลลิเมตร

และเพื่อการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาด

(ง) 0-6.5 มิลลิเมตร (จ) 6.5-9.5 มิลลิเมตร

และ (ฉ) 9.5-12.5 มิลลิเมตร

ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ใช้ก่อนการไพโรไลซิสจะมีลักษณะเป็นผงสีขาว หลังจากการไพโรไลซิส ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีสีดำ เนื่องจาก Coke และน้ำมันชีวภาพบางส่วน ที่เกาะอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยา ในทางอุตสาหกรรม ตัวเร่งปฏิกิริยามีราคาแพง เพื่อลดต้นทุนจึงต้องมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเผาที่ความดันบรรยากาศแบบมีออกซิเจนอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ มีลักษณะเป็นผงสีขาว คล้ายกับตัวเร่งปฏิกิริยาบริสุทธิ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิด แสดงดังภาพประกอบ 4-4



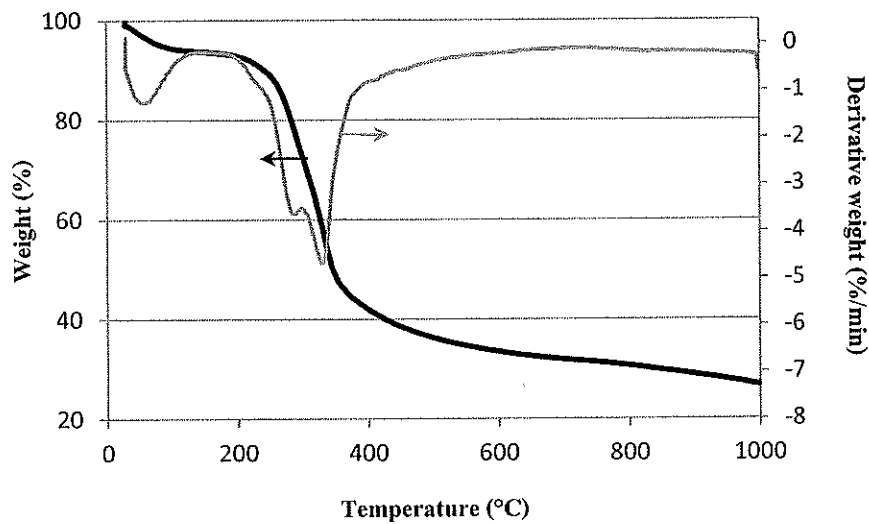
ภาพประกอบ 4-4 ตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) ก่อนไพโรไลซิส (ข) หลังไพโรไลซิส  
(ค) หลังจากการปรับสภาพที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกะลามะพร้าวด้วยเครื่อง TGA

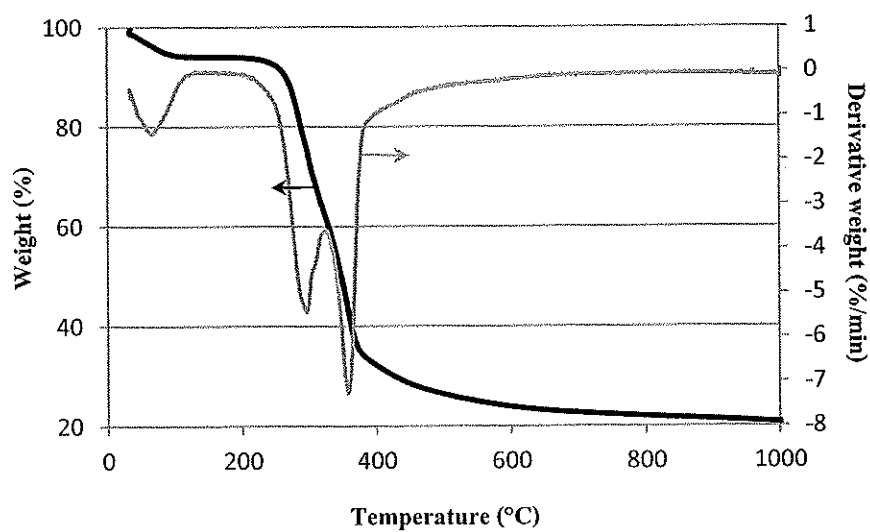
TGA เป็นเทคนิคสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกะลามะพร้าวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังภาพประกอบ 4-5 แสดงความสัมพันธ์น้ำหนักของกะลามะพร้าวขนาด 0-6.5 มิลลิเมตร ที่เหลือจากการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 50-1,000 องศาเซลเซียส จากผลการทดสอบพบว่า กะลามะพร้าวเริ่มมีการระเหยของน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยสังเกตจากพีค (Peak) แรกของเส้นน้ำหนักอนุพันธ์ (Derivative weight) แสดงให้เห็นว่าในกะลามะพร้าวมีความชื้นอยู่ จากนั้นที่อุณหภูมิ 350-550 องศาเซลเซียส มีการสลายตัวของสารอื่นๆ 2 ช่วง สังเกตได้จากจำนวนพีคของเส้นน้ำหนักอนุพันธ์ ซึ่งสารแต่ละตัวจะมีช่วงอุณหภูมิการสลายตัวที่แตกต่างกันออกไป แต่หลังจากอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส น้ำหนักของกะลามะพร้าวเริ่มลดลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งการสลายตัวเริ่มคงที่

ภาพประกอบ 4-6 แสดงความสัมพันธ์น้ำหนักของกะลามะพร้าวขนาด 6.5-9.5 มิลลิเมตร ที่เหลือจากการให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 50-1,000 องศาเซลเซียส พบว่า กราฟมีลักษณะคล้ายกับกะลามะพร้าวที่มีขนาด 0-6.5 มิลลิเมตร ดังนั้น จึงเลือกทำการไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 350-550 องศาเซลเซียส สำหรับการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic pyrolysis) เลือกใช้ช่วงอุณหภูมิ 450-550 องศาเซลเซียส เนื่องจากช่วงอุณหภูมิ 350-450 องศาเซลเซียส ไม่ใช่ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิส จากการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสจะเริ่มที่อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส (Faisal, 2011)

จากภาพประกอบ 4-5 และ 4-6 เส้นกราฟที่บสีดำคือ น้ำหนักที่หายไปของกะลามะพร้าวที่หายไปกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 30-1,000 องศาเซลเซียส และเส้นกราฟสีเทาคือ น้ำหนักที่หายไปของกะลามะพร้าวต่อเวลา 1 นาที กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 30-1,000 องศา



ภาพประกอบ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกะลามะพร้าวขนาด 0-6.5 มิลลิเมตร ที่เหลือจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย TGA



ภาพประกอบ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกะลามะพร้าวขนาด 6.5-9.5 มิลลิเมตร ที่เหลือจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วย TGA

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกะลามะพร้าว

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกะลามะพร้าวจะวิเคราะห์ 2 แบบ คือ Proximate analysis และ Ultimate analysis ดังแสดงในตารางที่ 4-4 โดย Proximate analysis จะวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Thermogravimetric analysis (TGA) เพื่อหาค่าองค์ประกอบของ Moisture Volatile mater Fixed carbon และ Ash และ Ultimate analysis จะวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ CHNS-O analyzer เพื่อหาค่าองค์ประกอบของไนโตรเจน (Nitrogen) คาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) ซัลเฟอร์ (Sulphur) และออกซิเจน (Oxygen) และสามารถหาค่าความร้อนสูง (High heating value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Low heating value, LHV) โดยการคำนวณจากสมการที่ 4-1 และ 4-2

$$\text{HHV (MJ/kg)} = \frac{338.2 \times C + 1442.8 \times (H - O/8)}{1000} \quad (4-1)$$

$$\text{LHV (MJ/kg)} = \text{HHV} - (0.218 \times H) \quad (4-2)$$

ตารางที่ 4-4 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกะลามะพร้าว

| Characteristics          |                                 | Value |
|--------------------------|---------------------------------|-------|
| Proximate analysis (wt%) | Moisture                        | 1.58  |
|                          | Volatile mater                  | 76.12 |
|                          | Fixed carbon                    | 21.61 |
|                          | Ash                             | 0.69  |
| heating value (MJ/kg)    | High heating value, HHV (MJ/kg) | 20.18 |
|                          | Low heating value, LHV (MJ/kg)  | 18.92 |

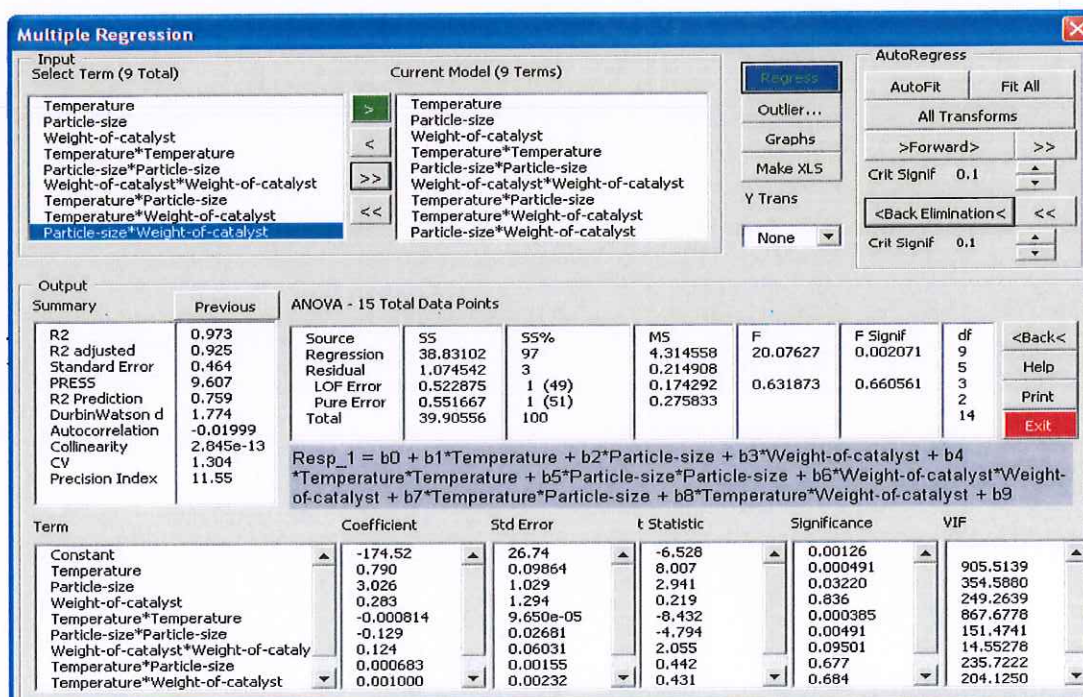
จากตารางที่ 4-4 พบว่ากะลามะพร้าวมีองค์ประกอบของ Volatile mater สูงถึงร้อยละ 76.12 มีความชื้นและขี้เถ้าค่อนข้างน้อย (ร้อยละ 1.58 และ 0.69 ตามลำดับ) ผลของกะลามะพร้าววิเคราะห์ด้วย CHNS-O analysis เพื่อหาค่าความร้อนสูง มีค่า 20.18 MJ/kg เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่ใช้ชีวมวลแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4-5 พบว่า กะลามะพร้าวมีค่าความร้อนสูงมากที่สุด ดังนั้นกะลามะพร้าวจึงเป็นชีวมวลที่ดีที่สุดสำหรับการไพโรไลซิส

ตารางที่ 4-5 เปรียบเทียบองค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนจากชีวมวลที่แตกต่างกัน

| Materials     | Elemental compositions |       |      |       | HHV<br>(MJ.kg) | Ref.                     |
|---------------|------------------------|-------|------|-------|----------------|--------------------------|
|               | N                      | C     | H    | O     |                |                          |
| Coconut shell | 0.13                   | 51.38 | 5.79 | 30.76 | 20.18          | This research            |
| Bagasse       | 0.20                   | 48.58 | 5.97 | 38.94 | 19.20          | Asadulla M. et al (2007) |
| Pine bark     | 0.21                   | 48.90 | 4.95 | 45.76 | 18.98          | Ahmed G. et al (2012)    |
| Rick husk     | 2.67                   | 48.59 | 8.27 | 40.47 | 17.21          | Leiyu Z. et al (2013)    |
| Corn cob      | 0.63                   | 49.32 | 5.35 | 44.70 | 16.66          | Ilknur D. et al (2012)   |

#### 4.6 การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม RSM

จากการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม RSM จะได้รับการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง จากนั้นทำการทดลองตามสภาวะที่ได้จากการออกแบบ นำผลการทดลองที่ได้ป้อนค่าลงไป ในโปรแกรม โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ให้ผลการทดลองเป็นกราฟพื้นผิวสามมิติและสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ผลได้มากที่สุด โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ผลแสดงดังภาพประกอบ 4-7



ภาพประกอบ 4-7 โปรแกรม RSM สำหรับวิเคราะห์ผล

#### 4.7 กิจกรรมที่ 1: การไฟโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

##### 4.7.1 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

ผลการทดลองจากการออกแบบโดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง สามารถวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์กับตัวแปรดำเนินการศึกษา จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ 4-3

$$y = -34.4 + 0.15x_1 + 8.33x_3 - 0.00013x_1^2 + 0.00834x_2^2 - 0.388x_3^2 \quad (4-3)$$

โดยที่  $350 \leq x_1 \leq 550$ ,  $5 \leq x_2 \leq 15$  และ  $6.5 \leq x_3 \leq 12.5$

(ใช้ค่า Maximum ของช่วงขนาดของกะลามะพร้าว)

เมื่อ

$y =$  ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

$x_1 =$  อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)

$x_2 =$  อัตราการไหลของไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)

$x_3 =$  ขนาดของกะลามะพร้าว (มิลลิเมตร)

ตารางที่ 4-6 แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จากการไฟโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| Term                          | Coefficient | Value    | Std Error | t Stat | P value  |
|-------------------------------|-------------|----------|-----------|--------|----------|
| Constant                      | $b_0$       | -34.40   | 8.820     | -3.900 | 0.00362  |
| Temperature                   | $b_1$       | 0.146    | 0.03491   | 4.173  | 0.00240  |
| Particle size                 | $b_2$       | 8.326    | 0.821     | 10.14  | 3.19e-06 |
| Temperature * Temperature     | $b_3$       | -0.00013 | 3.87e-05  | -3.36  | 0.00841  |
| Rate of $N_2$ * Rate of $N_2$ | $b_4$       | 0.00834  | 0.00260   | 3.21   | 0.01064  |
| Particle size * Particle size | $b_5$       | -0.388   | 0.0430    | -9.03  | 8.33e-06 |

โดยที่

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_3 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_3^2 \quad (4-4)$$

จากสมการที่ 4-3 แสดงถึงตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ อุณหภูมิที่ อัตราการไหลของไนโตรเจน และขนาดของกะลามะพร้าว เป็นสมการ Essential regression จากเทคนิค RSM ที่สามารถทำนายผลจากตัวแปร เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปร หากสัมประสิทธิ์ของตัวแปรที่มีค่าสูง (โดยไม่คิดเครื่องหมาย ซึ่งเครื่องหมายบวกแสดงถึงผลของตัวแปรอิสระที่แปรผันตรง และเครื่องหมายลบแสดงถึงผลของตัวแปรอิสระที่แปรผกผันกับตัวแปรตาม) ตัวแปรนั้นจะมีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ (y) สูงกว่าค่าที่มีสัมประสิทธิ์น้อยกว่า

นอกจากนี้สามารถพิจารณาจากค่า P value ของตัวแปร จากตารางที่ 4-6 ค่า P value ของตัวแปรที่มีค่าน้อยจะมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ อย่างมีนัยสำคัญ จากการพิจารณาจะเห็นได้ว่า ตัวแปรที่มีผลมากที่สุดคือ ขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_3$ ) ตัวแปรที่มีผลรองลงมาคือ อุณหภูมิ ( $x_1$ ) และอัตราการไหลของไนโตรเจน ( $x_2$ ) ตามลำดับ สำหรับค่า  $R_{adj}^2$  ควรมีค่าใกล้เคียงกับ  $R^2$  แสดงว่าแต่ละเทอมในแบบจำลองที่ได้ทั้งหมดส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ อย่างมีนัยสำคัญ พบว่า  $R^2$  และ  $R_{adj}^2$  มีค่า 0.97 และ 0.96 ตามลำดับ

จากการทดลองการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีตัวแปรอุณหภูมิ อัตราการไหลของไนโตรเจน และขนาดของกะลามะพร้าว พบว่าขนาดของกะลามะพร้าวเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุด และอัตราการไหลของไนโตรเจนแทบจะไม่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิส จากการวิเคราะห์ตามหลักการ Analysis of variance (ANOVA) สภาวะที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด 52.97 คือ ขนาดของกะลามะพร้าว 10.7 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของไนโตรเจน 15 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4.7.2 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของเบนซินและไอโซออกเทน

จากภาคผนวก ง วิเคราะห์หาองค์ประกอบของเบนซินและไอโซออกเทน พบว่าการทดลองทั้ง 15 ตัวอย่าง พบไอโซออกเทนเพียงแค่ 3 การทดลองเท่านั้น (การทดลองซ้ำ 1 คู่) และไม่มีพบเบนซินในทุกการทดลอง ดังนั้น การไพโรไลซิสจากกะลามะพร้าวโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สามารถหาสภาวะที่ดีที่สุดได้

การทดลองในกิจกรรมต่อไป จึงเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร่วมกับการไพโรไลซิสจากกะลามะพร้าว เนื่องจากอัตราการไหลของไนโตรเจนไม่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ จึงเลือกตัวแปรอุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ในการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม RSM เช่นเดียวกับการทดลองในกิจกรรมแรก



สำหรับอัตราการไหลของไนโตรเจน ดังแสดงดังตารางที่ 4-7 พบว่า ที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 มิลลิลิตรต่อนาที พบองค์ประกอบของไอโซออกเทนมากที่สุด ดังนั้นในกิจกรรมที่ 2 จึงเลือกดำเนินการทดลองที่อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4-7 แสดงร้อยละผลได้ของไอโซออกเทนจากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สถานะอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และขนาดของกะลามะพร้าว 9.5-12.5 มิลลิเมตร

| Exp | Rate of N <sub>2</sub><br>(ml/min) | % yield of<br>OLP (wt%) | Area (pA*s) |           | Concentration<br>V%/V | %yield of<br>isooctane<br>(wt%) |
|-----|------------------------------------|-------------------------|-------------|-----------|-----------------------|---------------------------------|
|     |                                    |                         | Benzene     | Isooctane | Isooctane             |                                 |
| 1   | 2.5                                | 52.83                   | 0           | 0         | 0                     | 0                               |
| 2   | 5                                  | 48.12                   | 0           | 2.24e04   | 0.74                  | 0.0023                          |
| 3   | 10                                 | 50.42                   | 0           | 2231.98   | 0.072                 | 0.00023                         |
| 4   | 15                                 | 50.87                   | 0           | 2145.40   | 0.070                 | 0.00022                         |

Muhammad และ James (2013) ศึกษาการไพโรไลซิสจากแกลบแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด ZSM-5 ผลการทดลองพบว่าไม่มีเบนซินเป็นองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะพบองค์ประกอบของเบนซินในผลิตภัณฑ์ของเหลวแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

ตัวอย่างการคำนวณการทดลองที่ 2 ที่อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส และขนาดของกะลามะพร้าว 9-12.5 มิลลิเมตร ดังแสดงตามสมการนี้

$$\begin{aligned}
 & 0.74 \text{ ml/ml} = \text{Concentration (V\%/V)} \times \frac{\text{Density of isooctane}}{\text{Density of OLP}} \times \text{yield of OLP (wt\%)} \\
 & = \frac{0.0724895 \text{ ml isooctane}}{100 \text{ ml OLP}} \times \frac{0.690 \text{ g/ml isooctane}}{1.090 \text{ g/ml OLP}} \times \frac{48.12 \text{ g OLP}}{100 \text{ g Biomass}} \\
 & = 0.0023 \text{ wt \% (%yield of isooctane)}
 \end{aligned}$$

## 4.8 กิจกรรมที่ 2: การไฟโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4.8.1 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

ผลการทดลองจากการออกแบบ โดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง สามารถวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์กับตัวแปรดำเนินการศึกษา จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ 4-5

$$y = -176.91 + 0.796x_1 + 3.221x_2 - 0.000808x_1^2 - 0.127x_2^2 + 0.167x_3^2 - 0.107x_2x_3 \quad (4-5)$$

โดยที่  $450 \leq x_1 \leq 550$ ,  $9.5 \leq x_2 \leq 15.5$  และ  $0.5 \leq x_3 \leq 4.5$

(ใช้ค่า Maximum ของช่วงขนาดของกะลามะพร้าว)

เมื่อ  $y =$  ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

$x_1 =$  อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)

$x_2 =$  ขนาดของกะลามะพร้าว (มิลลิเมตร)

$x_3 =$  ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)

ตารางที่ 4-8 แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จากการไฟโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| Term                                    | Coefficient    | Value     | P value  | R <sup>2</sup>  |
|---|----------------|-----------|----------|---|
| Constant                                | b <sub>0</sub> | -176.91   | 6.63e-05 | R <sup>2</sup> = 0.96<br>R <sub>adj</sub> <sup>2</sup> = 0.93 |
| Temperature                             | b <sub>1</sub> | 0.796     | 2.43e-05 |   |
| Particle size                           | b <sub>2</sub> | 3.221     | 0.00099  |   |
| Temperature * Temperature               | b <sub>3</sub> | -0.000808 | 2.15e-05 |   |
| Particle size * Particle size           | b <sub>4</sub> | -0.127    | 0.00107  |   |
| Weight of catalyst * Weight of catalyst | b <sub>5</sub> | 0.167     | 0.00910  |   |
| Particle size * Weight of catalyst      | b <sub>6</sub> | -0.107    | 0.00067  |   |

โดยที่  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_3^2 + b_6x_2x_3 \quad (4-6)$

จากสมการที่ 4-6 แสดงถึงตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และจากตารางที่ 4-8 เมื่อพิจารณาค่า P value ของตัวแปรแต่ละตัว (ตัดตัวแปรอื่นๆ ที่มีค่า P value มากกว่า 0.05 ออก เนื่องจาก ไม่มีนัยสำคัญต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์) พบว่า อุณหภูมิ ( $x_1$ ) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด ส่วนขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_2$ ) และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ ) ทั้งสองตัวแปรนี้ต่างมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ค่อนข้างน้อย

แบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองของการทดลองนี้ มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.96 และ  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.93 โดยทฤษฎีแล้ว ถ้า  $R^2$  มีค่ามากกว่า 0.75 ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ และจากการคาดคะเนสถานะที่เหมาะสมตามแบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด

ตารางที่ 4-9 ผลการคาดคะเนของสถานะที่เหมาะสมของแบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เมื่อทำการทดลองซ้ำและการทดลองที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ

| Exp.        | Temperature (°C) | Particle size (mm) | Weight of catalyst (g) | %yield of OLP (wt %) |
|-------------|------------------|--------------------|------------------------|----------------------|
| Ranges      | 450-550          | 9.5-15.5           | 0.5-4.5                | -                    |
| RSM         | 492.07           | 12.46              | 0.5                    | 38.60                |
| Repeated    | 492              | 12.5               | 0.5                    | 38.95                |
| Regenerated | 492              | 12.5               | 0.5                    | 42.92                |

หมายเหตุ: ค่าของขนาดของกะลามะพร้าวเป็นค่าที่มากที่สุดของช่วง

จากตารางที่ 4-9 พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด 38.60 ต้องทำการไพโรไลซิสที่สถานะอุณหภูมิและขนาดของกะลามะพร้าว 492.07 องศาเซลเซียส และ 12.46 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่ากลางของช่วงที่ทำการทดลอง ส่วนปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 0.5 กรัม ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดของช่วงที่ทำการทดลอง จากการทดลองแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะเห็นว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะอยู่ในช่วงประมาณ 40-52 ซึ่งมีค่ามากกว่าการทดลองแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในช่วงประมาณ 32-38

จากงานวิจัยของ Leiyu และคณะ (2013) ได้ศึกษาการไพโรไลซิสของแกลบใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา zinc oxide ร้อยละ 5 10 15 และ 20 ของแกลบ พบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น จะให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่น้อยลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอน ทำให้มีขนาดของกะลามะพร้าวเล็กลง จนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซมากยิ่งขึ้น ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จึงน้อยลง

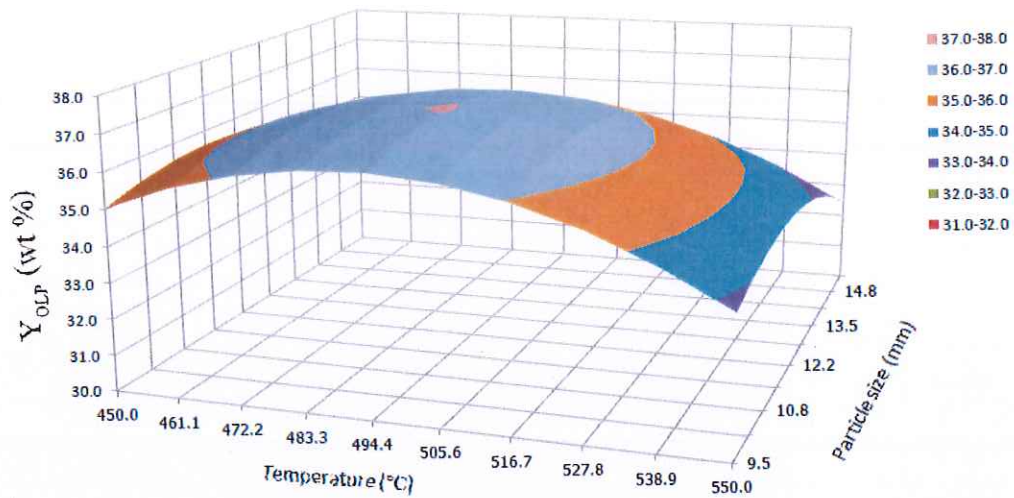
ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการคาดคะเนของวิธีการนี้ ที่อุณหภูมิ 492 องศาเซลเซียส (เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ไม่สามารถตั้งค่าอุณหภูมิในรูปของจุดทศนิยมได้) ขนาดของกะลามะพร้าว 9.5 – 12.5 มิลลิเมตร (เนื่องจากไม่สามารถควบคุมขนาดของกะลามะพร้าวให้ได้ 12.46 มิลลิเมตร อย่างแม่นยำ จึงเลือกใช้ขนาดที่มีความใกล้เคียงที่สุด) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ คือ 38.95 แต่เนื่องจาก  $R^2 = 0.96$  ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่แท้จริงจะต้องมีค่าไม่เกิน  $38.60 \div 0.96$  เท่ากับ 40.17 และมีค่าไม่ต่ำกว่า  $38.60 \times 0.961$  เท่ากับ 37.09 ดังนั้น ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์สูงสุดถือว่ายอมรับได้

และพบว่าเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยจากงานวิจัยของ Lopez และคณะ (2011) ได้ศึกษาการไพโรไลซิสของพลาสติกใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพชนิด ZSM-5 พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีค่าใกล้เคียงกันกับตัวเร่งปฏิกิริยาบริสุทธิ์

4.8.1.1 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบพื้นผิวผลตอบสนอง

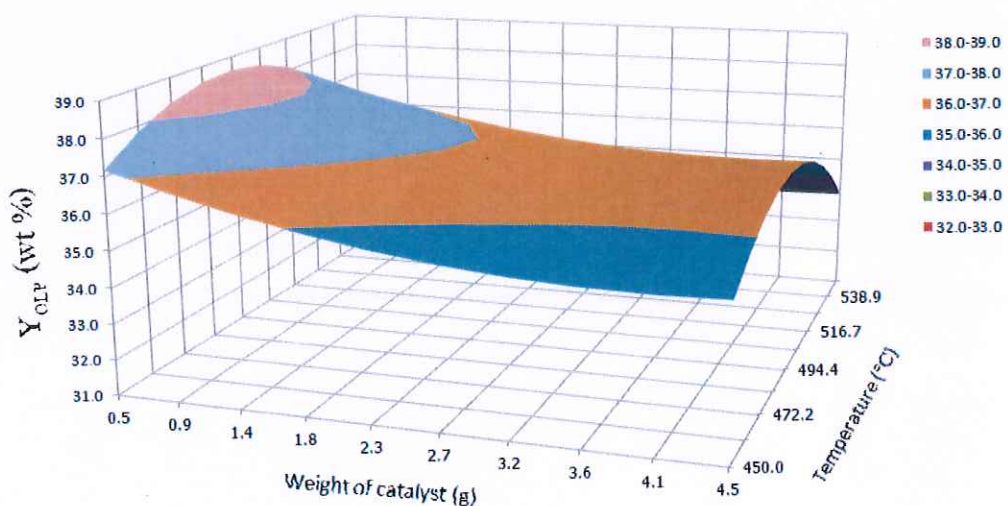
จากภาพประกอบ 4-8 แสดงการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ กับอุณหภูมิและขนาดของกะลามะพร้าว พบว่า ที่อุณหภูมิ 492.07 องศาเซลเซียส และที่ขนาดของกะลามะพร้าว 12.46 มิลลิเมตร จะให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด 38.60

จากภาพประกอบ 4-9 แสดงการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ กับอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ที่อุณหภูมิ 492.07 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด 38.60 จะเห็นได้ว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ลดลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีผลให้เกิดการแตกตัวของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้กลายเป็นก๊าซเพิ่มมากขึ้น

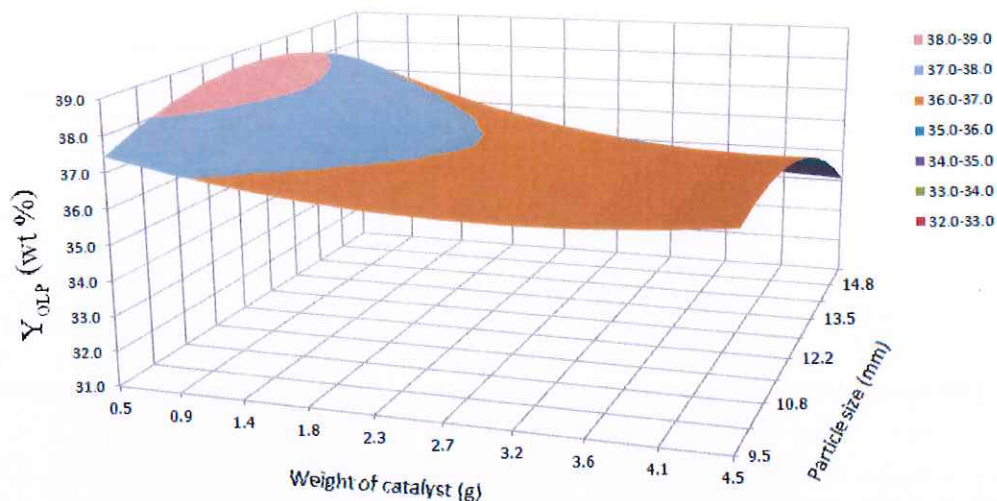


ภาพประกอบ 4-8 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ กับอุณหภูมิ ( $x_1$ ) และขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_2$ )

จากภาพประกอบ 4-10 แสดงการไฟโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ กับขนาดของกะลามะพร้าวและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ที่ขนาดของกะลามะพร้าว 12.46 มิลลิเมตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด 38.60



ภาพประกอบ 4-9 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ กับอุณหภูมิ ( $x_1$ ) และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ )



ภาพประกอบ 4-10 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ กับขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_2$ ) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ )

#### 4.8.2 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก

ผลการทดลองจากการออกแบบ โดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง สามารถวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักกับตัวแปรดำเนินการศึกษา จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่

4-7

$$y = -66.24 + 0.288x_1 - 0.000283x_1^2 + 0.372x_3^2 - 0.00449x_1x_3 \quad (4-7)$$

โดยที่

$$450 \leq x_1 \leq 550 \text{ และ } 0.5 \leq x_3 \leq 4.5$$

เมื่อ

$$y = \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก}$$

$x_1$  = อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)

$x_3$  = ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)

ตารางที่ 4-10 แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักจากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| Term                                    | Coefficient    | Value     | P value  | R <sup>2</sup>  |
|---|----------------|-----------|----------|---|
| Constant                                | b <sub>0</sub> | -66.24    | 0.0109   | R <sup>2</sup> = 0.91<br>R <sub>adj</sub> <sup>2</sup> = 0.87 |
| Temperature                             | b <sub>1</sub> | 0.288     | 0.00696  |   |
| Temperature * Temperature               | b <sub>2</sub> | -0.000283 | 0.00778  |   |
| Weight of catalyst * Weight of catalyst | b <sub>3</sub> | 0.372     | 2.89e-05 |   |
| Temperature * Weight of catalyst        | b <sub>4</sub> | -0.00449  | 7.58e-06 |   |

โดยที่  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_1^2 + b_3x_3^2 + b_4x_1x_3$  (4-8)

จากสมการที่ 4-7 แสดงถึงตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และจากตารางที่ 4-10 เมื่อพิจารณาค่า P value ของตัวแปรแต่ละตัว พบว่า ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (x<sub>3</sub>) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมากที่สุด และอุณหภูมิ (x<sub>1</sub>) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลน้อยที่สุด ส่วนขนาดของกะละมะพร้าว (x<sub>2</sub>) ไม่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก ในช่วงขนาดของกะละมะพร้าว 6.5 ถึง 15.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4-11 ผลการคาดคะเนของสภาวะที่เหมาะสมของแบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมากที่สุด ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักเมื่อทำการทดลองซ้ำ และการทดลองที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ

| Exp.        | Temperature (°C) | Particle size (mm) | Weight of catalyst (g) | %yield of HF (wt %) |
|-------------|------------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| Ranges      | 450-550          | 9.5-15.5           | 0.5-4.5                | -                   |
| RSM         | 505.82           | Insignificant      | 0.5                    | 6.21                |
| Repeated    | 506              | 12.5               | 0.5                    | 7.08                |
| Regenerated | 506              | 12.5               | 0.5                    | 12.95               |

หมายเหตุ: ค่าของขนาดของกะละมะพร้าวเป็นค่าที่มากที่สุดของช่วง

แบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองของการทดลองนี้ มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.91 และ  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.87 โดยทฤษฎีแล้ว ถ้า  $R^2$  มีค่ามากกว่า 0.75 ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ และจากการคาดคะเนสถานะที่เหมาะสมตามแบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4-11 พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมากที่สุด 6.21 ต้องทำการไพโรไลซิสที่สภาวะอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 505.82 องศาเซลเซียส และ 0.5 กรัม ตามลำดับ

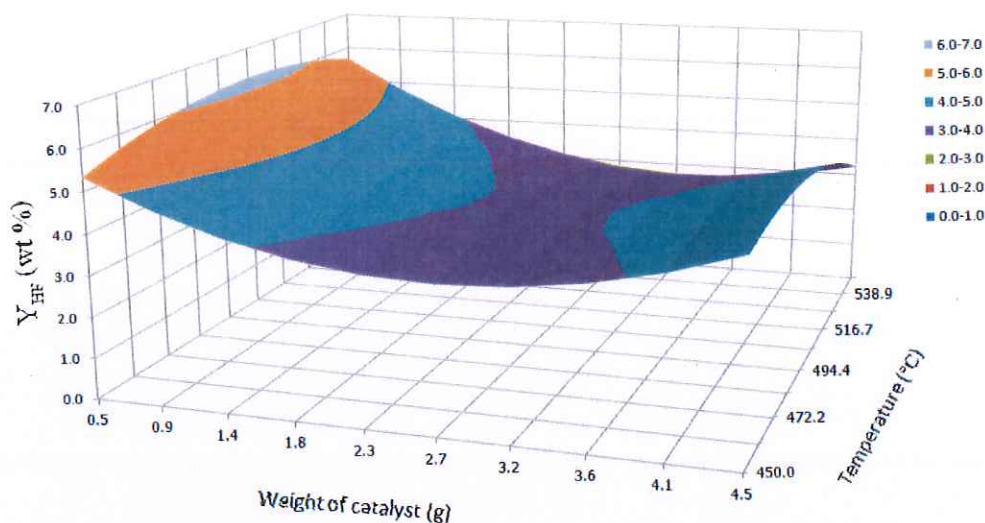
ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการคาดคะเนของวิธีการนี้ ที่อุณหภูมิ 506 องศาเซลเซียส ขนาดของกะลามาพร้าว 9.5 – 12.5 มิลลิเมตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก คือ 7.08 แต่  $R^2 = 0.91$  ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักที่แท้จริงจะต้องมีค่าไม่เกิน  $6.21 \div 0.909$  เท่ากับ 6.83 และมีค่าไม่ต่ำกว่า  $6.21 \times 0.91$  เท่ากับ 5.64 จะเห็นได้ว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมีค่ามากกว่าช่วงของค่าจากการทำนาย โดยมีค่าเบี่ยงเบนจากการคาดคะเน  $(7.08 - 6.83)/7.08$  เท่ากับ 0.035 มีความเบี่ยงเบนที่ค่อนข้างน้อย จึงถือว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักที่ได้จากการทำซ้ำมีค่าใกล้เคียงกับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักที่ได้จากการคาดคะเน

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ ทำการทดลองที่สภาวะเดียวกัน พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากงานวิจัยของ Aguado และคณะ (2011) ได้ศึกษาการไพโรไลซิสจาก LDPE ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลท์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพเพิ่มจำนวนครั้งมากขึ้น จะทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันเฟสหนักมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้เป็นไปทางตรงข้ามกับงานวิจัยของ Aguado และคณะ

#### 4.8.2.1 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเฟสหนักแบบพื้นผิวผลตอบสนอง

จากภาพประกอบ 4-11 แสดงการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก กับอุณหภูมิและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่อุณหภูมิ 505.82 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม จะให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมากที่สุด 6.21 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักลดลงที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.5 ถึง 3.32 กรัม ซึ่งร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมีค่าต่ำสุด 2.71 ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3.32 กรัม และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักเพิ่มขึ้นที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3.32 ถึง 4.5 กรัม





ภาพประกอบ 4-11 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว อินทรีย์เฟสหนัก กับอุณหภูมิ ( $x_1$ ) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_2$ )

#### 4.8.3 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

จากภาคผนวก ง วิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ของเหลว ได้แก่ Pentene, Isooctane, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, p-xylene, m-xylene, o-xylene, Chlorobenzene, 1,3-dichlorobenzene, 1,4-dichlorobenzene และ 1,2-dichlorobenzene พบว่า ไม่พบ Pentene ในผลิตภัณฑ์ของเหลวทั้งสองเฟส

จากการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองเมื่อพิจารณา สารประกอบไฮโดรคาร์บอนทุกตัว (Isooctane, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, p-xylene, m-xylene, o-xylene, Chlorobenzene, 1,3-dichlorobenzene, 1,4-dichlorobenzene และ 1,2-dichlorobenzene) พบว่า ค่า  $R^2 = 0.575$  และ  $R_{adj}^2 = -0.190$  ซึ่งไม่สามารถยอมรับได้ (ต้องมีค่ามากกว่า 0.75) ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาเฉพาะสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่จำเป็นสำหรับพลังงานเชื้อเพลิงสำหรับแก๊สโซลีน (Gasoline) ได้แก่ Isooctane, Benzene, Toluene, Ethylbenzene, p-xylene m-xylene และ o-xylene

ผลการทดลองจากการออกแบบโดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง สามารถวิเคราะห์หาสมการแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน กับตัวแปรดำเนินการศึกษา จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ดังแสดงในสมการที่ 4-9

$$y = -5.919 + 0.02196x_1 + 0.08415x_2 - 2.199e-5x_1^2 - 0.00349x_2^2 - 0.00503x_3^2 + 0.00187x_2x_3 \quad (4-9)$$

โดยที่  $450 \leq x_1 \leq 550$ ,  $9.5 \leq x_2 \leq 15.5$  และ  $0.5 \leq x_3 \leq 4.5$   
(ใช้ค่า Maximum ของช่วงขนาดของกะลามะพร้าว)

เมื่อ  $y =$  ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน  
 $x_1 =$  อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)  
 $x_2 =$  ขนาดของกะลามะพร้าว (มิลลิเมตร)  
 $x_3 =$  ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม)

ตารางที่ 4-12 แสดงข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองของร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนจากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| Term                                    | Coefficient    | Value       | P value  | R <sup>2</sup>  |
|---|----------------|-------------|----------|---|
| Constant                                | b <sub>0</sub> | -5.919      | 0.000337 | R <sup>2</sup> = 0.85<br>R <sub>adj</sub> <sup>2</sup> = 0.73 |
| Temperature                             | b <sub>1</sub> | 0.02196     | 0.000478 |   |
| Particle size                           | b <sub>2</sub> | 0.08415     | 0.01429  |   |
| Temperature * Temperature               | b <sub>3</sub> | -2.1995e-05 | 0.000472 |   |
| Particle size * Particle size           | b <sub>4</sub> | -0.00349    | 0.01188  |   |
| Weight of catalyst * Weight of catalyst | b <sub>5</sub> | -0.00503    | 0.04088  |   |
| Particle size * Weight of catalyst      | b <sub>6</sub> | 0.00187     | 0.05796  |   |

โดยที่  $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_3^2 + b_6x_2x_3 \quad (4-10)$

จากสมการที่ 4-9 แสดงถึงตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา และจากตารางที่ 4-12 เมื่อพิจารณาค่า P value ของตัวแปรแต่ละตัว พบว่า อุณหภูมิ ( $x_1$ ) เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด ส่วนขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_2$ ) และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ ) มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนรองลงมาตามลำดับ

แบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองของการทดลองนี้มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.85 และ  $R_{adj}^2$  เท่ากับ 0.73 โดยทฤษฎีแล้ว ถ้า  $R^2$  มีค่ามากกว่า 0.75 ถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ แต่ค่า  $R_{adj}^2$  มีค่าน้อยกว่า 0.75 เนื่องจากการทดลองอาจมีผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมซึ่งทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้ อันได้แก่ การทิ้งผลิตภัณฑ์ของเหลวไว้เป็นเวลานานทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพ เนื่องจากการวิเคราะห์หาค่าสารประกอบแก๊สโซลีนในแต่ละการทดลอง เก็บรักษาสภาพในระยะเวลาที่ไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4-13 ผลการคาดคะเนของสภาวะที่เหมาะสมของแบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองที่ให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนเมื่อทำการทดลองซ้ำและการทดลองที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ

| Exp.                | Temperature<br>(°C) | Particle size<br>(mm) | Weight of<br>catalyst (g) | yield of Gasoline<br>(wt %) |
|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Ranges              | 450-550             | 9.5-15.5              | 0.5-4.5                   | -                           |
| RSM                 | 499.30              | 12.67                 | 2.35                      | 0.098                       |
| Repeat catalyst     | 499                 | 12.5                  | 2.35                      | 0.30                        |
| Regenerate catalyst | 499                 | 12.5                  | 2.35                      | 0.17                        |

หมายเหตุ: ค่าของขนาดของกะลามะพร้าวเป็นค่าที่มากที่สุดของช่วง

จากการคาดคะเนสภาวะที่เหมาะสมตามแบบจำลองวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4-13 พบว่า ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด 0.098 ต้องทำการไพโรไลซิสที่สภาวะอุณหภูมิ 499.30 องศาเซลเซียส ขนาดของกะลามะพร้าว 12.67 มิลลิเมตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.35 กรัม

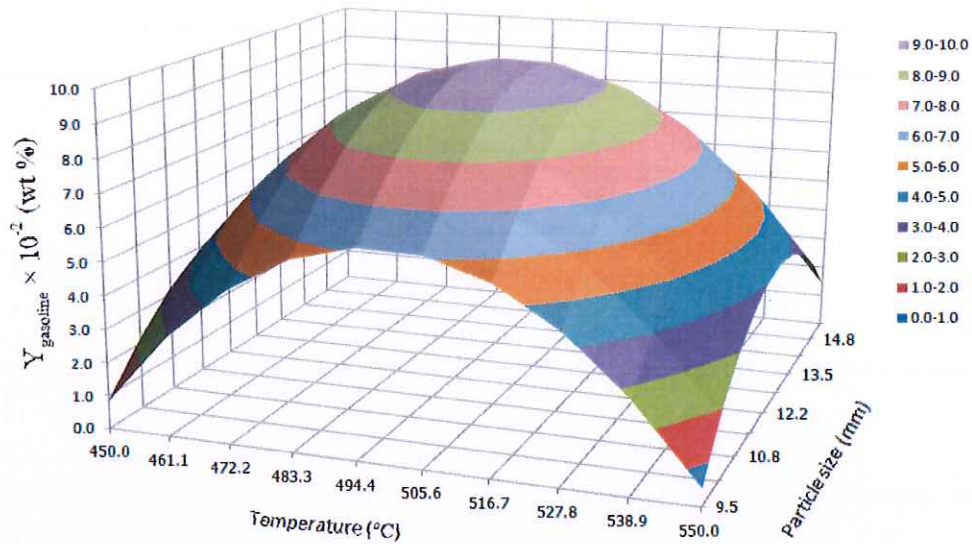
ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการคาดคะเน ที่อุณหภูมิ 499 องศาเซลเซียส ขนาดของกะลามะพร้าว 9.5 – 12.5 มิลลิเมตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.35 กรัม พบว่า ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน คือ 0.30 แต่จากการคาดคะเน ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนจะต้องมีค่าไม่เกิน 0.11 ดังนั้น ค่าที่ได้จากการทำซ้ำจึงมีค่ามากเกินไปกว่าที่ควร ได้จากการคาดคะเน 3 เท่า อย่างไรก็ตามก็เป็นผลได้ที่ดี เนื่องจากการศึกษานี้ ต้องการปริมาณของแก๊สโซลีนมากที่สุด Pual และ Patrick (1995) ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพจากการไพโรไลซิสจากไม้ พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพเพิ่มจำนวนครั้งมากขึ้น ทำให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วผ่านการปรับสภาพ แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยานั้นกลับมาใช้ใหม่ที่สภาวะการทดลองนี้ พบว่า ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน มีค่า 0.17 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าร้อยละผลได้ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาบริสุทธิ์ และมีประสิทธิภาพลดลงร้อยละ  $(0.30 - 0.17) \div 0.30 \times 100 = 42.10$

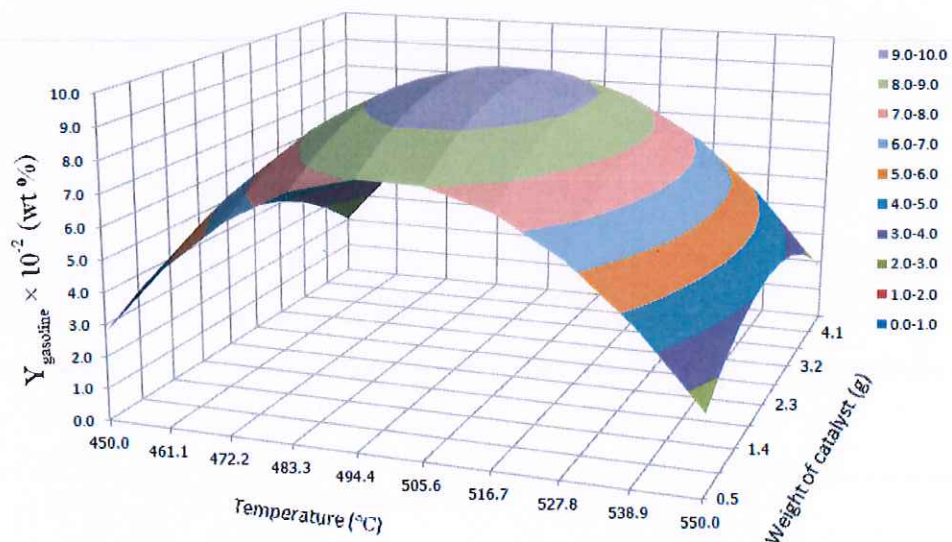
#### 4.8.3.1 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนแบบพื้นผิวผลตอบสนอง

จากภาพประกอบ 4-12 แสดงการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน กับอุณหภูมิและขนาดของกะลามะพร้าว พบว่า ที่อุณหภูมิ 499.30 องศาเซลเซียส และขนาดของกะลามะพร้าว 12.67 มิลลิเมตร จะให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด 0.098 แต่เนื่องจาก  $R^2 = 0.85$  ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนที่แท้จริงจะต้องมีค่าไม่เกิน  $0.098 \div 0.85$  เท่ากับ 0.11 และมีค่าไม่ต่ำกว่า  $0.098 \times 0.85$  เท่ากับ 0.083 ซึ่งค่านี้เป็นเพียงค่าที่ได้จากการคาดคะเนโดยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองเท่านั้น

จากภาพประกอบ 4-13 แสดงการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน กับอุณหภูมิและขนาดของกะลามะพร้าว พบว่า ที่อุณหภูมิ 499.30 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.35 กรัม จะให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด 0.098 และจากภาพประกอบ 4-14 แสดงการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน กับขนาดของกะลามะพร้าวและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ที่ขนาดของกะลามะพร้าว 12.67 มิลลิเมตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.35 กรัม จะให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด คือ 0.098

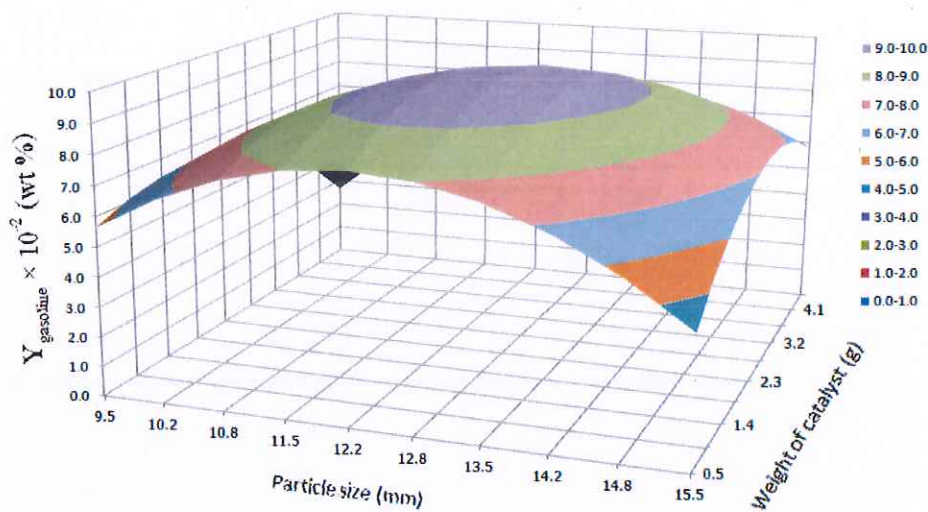


ภาพประกอบ 4-12 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนกับอุณหภูมิ ( $X_1$ ) และขนาดของกะลามะพร้าว ( $X_2$ )



ภาพประกอบ 4-13 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนกับอุณหภูมิ ( $X_1$ ) และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ( $X_3$ )

จากภาพประกอบทั้งสองดังกล่าว เมื่อพิจารณาความชัน พบว่า กราฟอุณหภูมิจะมีความชันมากที่สุด และขนาดของกะลามะพร้าวกับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีความชันน้อยใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด รองลงมาคือ ขนาดของกะลามะพร้าวและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามีอิทธิพลน้อยใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่อ้างอิงจากตารางที่ 4-10 เมื่อพิจารณาค่า p-value



ภาพประกอบ 4-14 กราฟพื้นผิวแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนกับขนาดของกะลามะพร้าว ( $x_2$ ) และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ( $x_3$ )

#### 4.8.4 การวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของสารประกอบคลอโรเบนซีน (Chlorobenzene)

พิจารณาสารประกอบคลอโรเบนซีน ได้แก่ Chlorobenzene 1,3-dichlorobenzene 1,4-dichlorobenzene และ 1,2-dichlorobenzene ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากวิธีการพื้นผิวตอบสนองที่ให้ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 4-14 จาก การทดลองซ้ำและการทดลองจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ พบว่า ร้อยละผลได้ของสารประกอบคลอโรเบนซีนมีค่ามากเมื่อเทียบกับร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน แต่สารประกอบคลอโรเบนซีนไม่มีส่วนสำคัญในองค์ประกอบของแก๊สโซลีน แต่คลอโรเบนซีนสามารถนำไปทำปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเบนซีนได้

การทดลองที่ทำซ้ำสภาวะที่เหมาะสมจากการคาดคะเนของโปรแกรม RSM พบร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนและคลอโรเบนซีน 0.3 และ 2.97 ตามลำดับ และจากการทดลองด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ พบร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนและคลอโรเบนซีน 0.17 และ 1.36 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการไพโรไลซิสจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับสภาพ ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ทั้งแก๊สโซลีนและคลอโรเบนซีนลดลง

ตารางที่ 4-14 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนและคลอโรเบนซีนจากการทดลองซ้ำตามสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนที่ได้จากการคาดคะเน และการทดลองที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ

| Experiment          | yield gasoline (wt %) | %yield of Chlorobenzene (wt %) |                     |                     |                     | yield of Chlorobenzene (wt %) |
|---------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
|                     |                       | Chlorobenzene                  | 1,3-dichlorobenzene | 1,4-dichlorobenzene | 1,2-dichlorobenzene |                               |
| Repeat catalyst     | 0.30                  | 0.00664                        | 0.00348             | 2.87                | 0.0911              | 2.97                          |
| Regenerate catalyst | 0.17                  | 0.00183                        | 0.00178             | 1.28                | 0.0763              | 1.36                          |

#### 4.9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวทั้งเฟสเบา (LF) และเฟสหนัก (HF) ด้วยเครื่อง CHNS-O analyzer เพื่อหาองค์ประกอบของไนโตรเจน คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และค่าความร้อน ดังแสดงในตารางที่ 4-15 จะเห็นได้ว่า ผลิตภัณฑ์ของเหลวเฟสหนักจะมีค่าความร้อนสูง 27.15 MJ/kg ซึ่งมีความมากกว่าค่าความร้อนสูงของเฟสเบา เนื่องจากปริมาณคาร์บอนจะพบในของเหลวเฟสหนักมากกว่าเฟสเบา นอกจากนี้ ออกซิเจนที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำที่พบในของเหลวเฟสเบาเป็นจำนวนมาก ทำให้ค่าความร้อนลดลงด้วย เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์จากการไพโรไลซิสด้วยชีวมวลที่แตกต่างกันคือ แกลบและเปลือกสนมีค่าความร้อนสูง 26.45 และ 29.70 MJ/kg ตามลำดับ พบว่า ค่าความร้อนสูงของงานวิจัยนี้และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4-15 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์

| Materials     | Liquid product  | Element (%) |       |       |       | HHV (MJ/kg) | LHV (MJ/kg) | Ref.                   |
|---------------|-----------------|-------------|-------|-------|-------|-------------|-------------|------------------------|
|               |                 | N           | C     | H     | O     |             |             |                        |
| Coconut shell | Light           | 0.08        | 17.66 | 9.30  | 23.57 | 15.14       | 13.11       | This research          |
|               | Heavy           | 0.19        | 58.25 | 6.91  | 13.99 | 27.15       | 25.64       |                        |
| Rice husk     | Zinc oxide cat. | 2.08        | 49.73 | 12.57 | 35.62 | 26.45       | -           | Faisal A. et al (2011) |
| Pine bark     | HZSM-5 cat.     | <0.01       | 70.15 | 6.75  | 22.93 | 29.70       | -           | Ahmet G. etal (2012)   |

#### 4.10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

##### 4.10.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง GC-MS โดยของเหลวที่ได้จะแยกออกเป็น 2 เฟส คือ เฟสเบา (LF) และเฟสหนัก (HF) แสดงดังภาพประกอบ 4-16 จากตารางที่ 4-16 พบว่า LF มีองค์ประกอบของกรดอะซิติก (Acetic acid) เป็นหลักถึงร้อยละ 56.21 ส่วนร้อยละ 25.18 คาดว่าน่าจะเป็นองค์ประกอบของน้ำ เนื่องจาก Judit Adam (2005) ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าในผลิตภัณฑ์ของเหลวมีองค์ประกอบของน้ำประมาณร้อยละ 20-30 จะเห็นได้ว่าในผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มีองค์ประกอบของน้ำอยู่มาก ทำให้ค่าความร้อนลดลง จึงต้องมีการพัฒนางานวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพ สำหรับผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมีองค์ประกอบของฟีนอล (Phenol) เป็นหลักประมาณร้อยละ 36.41

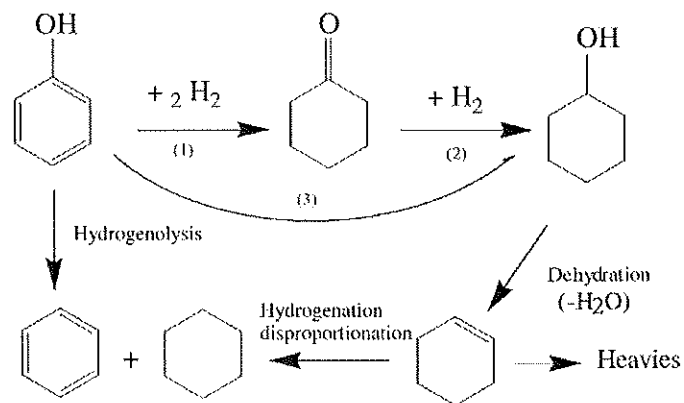
ฟีนอลที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักสามารถนำไปผ่านกระบวนการ Phenol hydrogenation แสดงดังภาพประกอบ 4-15 ให้ได้เบนซิน เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันและนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป จะเห็นได้ว่า เมื่อฟีนอลทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน มี Cyclohexanol เป็นสาร Intermediate ผ่านการ Dehydration จึงจะได้เป็นผลิตภัณฑ์เบนซิน

จากการศึกษาของ Amin และ Asmadi (2007) การไพโรไลซิสจากกะลาปาล์มเปล่า (Empty palm fruit bunch, EPFB) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 นำน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสทั้งเฟสบน (Upper layer) และเฟสด่าง (Bottom layer) วิเคราะห์ด้วย GC-MS พบว่า น้ำมันเฟสด่างมีองค์ประกอบของฟีนอลเป็นหลัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

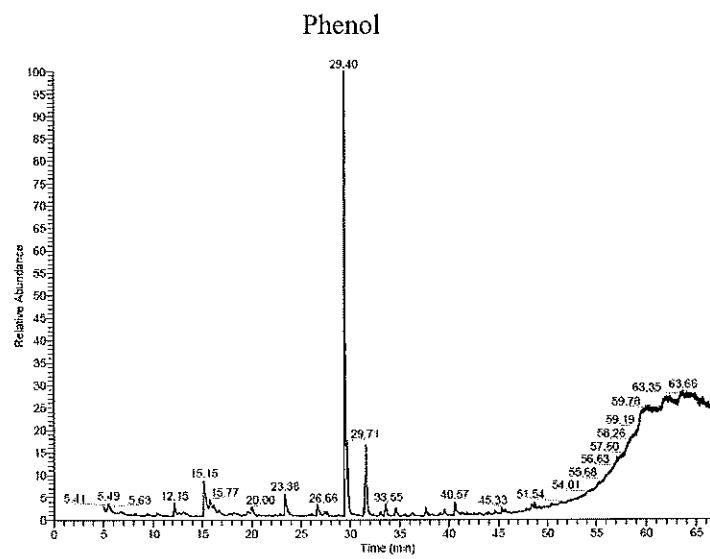
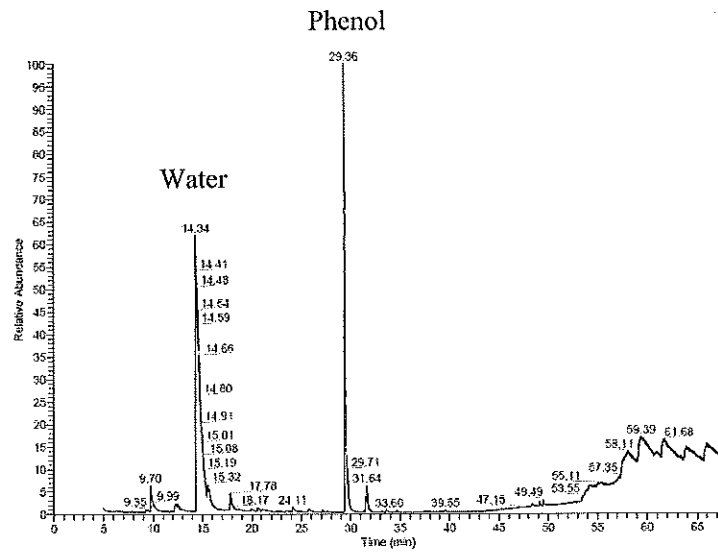


ตารางที่ 4-16 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ทั้งเฟสเบาและเฟสหนัก จากการวิเคราะห์ด้วย GC-MS

| Light fraction |       |                                | Heavy fraction |       |                                  |
|----------------|-------|--------------------------------|----------------|-------|----------------------------------|
| Area%          | RT    | Composition                    | Area%          | RT    | Composition                      |
| 56.21          | 14.34 | Acetic acid                    | 36.41          | 29.41 | Phenol                           |
| 25.18          | 29.37 | Not identified                 | 8.07           | 29.71 | Phenol, 2-methyl-o-Cresol        |
| 3.27           | 9.71  | 2-Propanone, 1-hydroxy-Acetol  | 7.56           | 15.16 | Acetic acid                      |
| 2.95           | 29.71 | Phenol, 2-methyl-o-Cresol      | 7.21           | 31.61 | Phenol, 3,5-dimethyl-3,5-Xylenol |
| 2.00           | 17.79 | Propanoic acid                 | 4.18           | 23.38 | Azulene Cyclopentacycloheptene   |
| 1.81           | 31.64 | Phenol, 4-methyl-p-Cresol      | 2.67           | 15.77 | 2-Furancarboxaldehyde Furfural   |
| 0.85           | 15.68 | 2-Furancarboxaldehyde Furfural | 2.66           | 31.53 | Phenol, 3,5-dimethyl-3,5-Xylenol |
| 0.83           | 12.45 | Not identified                 | 1.95           | 5.49  | Benzene, 1,4-dimethyl-p-Xylene   |
| 0.38           | 49.48 | Quinhydrone                    | 1.89           | 16.13 | Not identified                   |
| 0.21           | 49.11 | 1,4-Benzenediol, 2-methyl      | 1.87           | 33.55 | Phenol, 3,4-dimethyl-3,4-Xylenol |



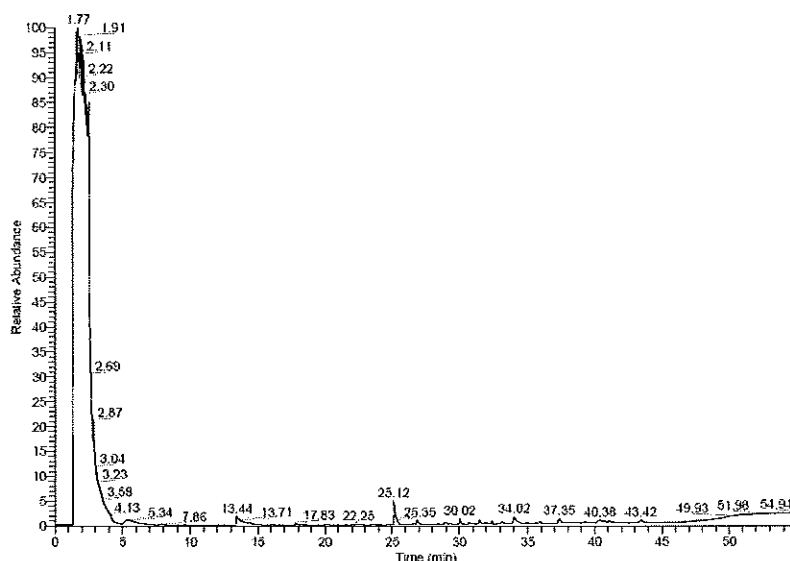
ภาพประกอบ 4-15 ปฏิกิริยา Phenol hydrogenation



ภาพประกอบ 4-16 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิส  
แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเฟสเบ (ภาพบน) และเฟสหนัก (ภาพล่าง)

#### 4.10.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่อง GC-MS แสดงดังภาพประกอบ 4-17 และตารางที่ 4-17 จะเห็นได้ว่า ก๊าซมีองค์ประกอบของ 1-Propanol, 2-amino เป็นหลัก ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ประเภท Volatile สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมต่อไปได้



ภาพประกอบ 4-17 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซจากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4-17 แสดงองค์ประกอบของก๊าซจากการวิเคราะห์ด้วย GC-MS

| Area% | RT   | Composition                                  | Area% | RT    | Composition                          |
|-------|------|--|-------|-------|--------------------------------------|
| 32.92 | 2.05 | 1-Propanol, 2-amino                          | 0.73  | 25.12 | Phenol                               |
| 20.54 | 1.60 | 1-Propanol, 2-amino                          | 0.62  | 13.45 | Acetic acid                          |
| 8.04  | 2.56 | 1-Propanol, 2-amino                          | 0.31  | 34.03 | Dodecanoic acid                      |
| 7.75  | 1.77 | 1-Propanol, 2-amino                          | 0.28  | 37.35 | Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl) |
| 6.50  | 1.70 | 1-Propanol, 2-amino                          | 0.27  | 14.09 | 2-Furancarboxaldehyde                |
| 6.29  | 1.86 | 1-Propanol, 2-amino                          | 0.26  | 26.91 | Phenol, 3,5-dimethyl                 |
| 5.75  | 1.95 | 1-Propanol, 2-amino                          | 0.18  | 43.42 | Not identified                       |
| 3.44  | 2.49 | 1-Propanol, 2-amino                          | 0.17  | 5.60  | p-Xylene                             |
| 2.97  | 1.65 | 1-Propanol, 2-amino                          | 0.17  | 30.01 | Phenol, 2,6-dimethoxy                |
| 1.17  | 2.87 | 2-Methyl-2-(alpha-thienyl)<br>1,3-dithiolane | 0.14  | 31.49 | 4-Methoxy-3-(methoxymethyl)phenol    |

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการไพโรไลซิสจากกะลามะพร้าวทั้งแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบนิ่ง (Fixed-bed reactor) ผลผลิตที่ได้ออกได้แก่ ของเหลวของแข็ง เรียกว่า ถ่าน และก๊าซ โดยน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นสารละลายสีดำ เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่เกิดการแยกชั้น ส่วนของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นของเหลวแยกเป็น 2 เฟส ได้แก่ เฟสเบา (Light fraction, LF) มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อน และเฟสหนัก (Heavy fraction, HF) มีลักษณะเป็นสีดำ ผลผลิตของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส เรียกว่า ผลผลิตของเหลวอินทรีย์ (Organic liquid product, OLP)

การไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า อัตราการไหลของไนโตรเจนไม่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ โดยที่อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 มิลลิลิตรต่อนาทีจะมีองค์ประกอบของไอโซออกเทนมากที่สุด จากการทดลอง พบว่า ผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 40-52

การไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ออกแบบการทดลองด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response surface methodology, RSM) จะได้ผลการออกแบบ 15 การทดลอง ทำการทดลองตามสภาวะที่ได้ จากนั้นนำค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเฟสหนัก และร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนคำนวณด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบสนองได้ผลการคาดคะเนร้อยละผลได้ที่ดีที่สุด ที่สภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิ ขนาดของกะลามะพร้าว และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์มากที่สุด 38.60 ที่สภาวะอุณหภูมิ 492.07 องศาเซลเซียส ขนาดของกะลามะพร้าว 12.46 มิลลิเมตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม และพบว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ลดลง จากผลการทดลองแสดงว่าการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยาให้ผลได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ดีกว่าการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับการทำนายร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักของการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากที่สุด คือ 6.21 ที่สภาวะอุณหภูมิ 505.82 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม ส่วนขนาดของกะลามะพร้าวไม่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนัก จะเห็นได้ว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากขึ้นจะทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักลดลง และการทำนายร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด 0.098 ที่สภาวะอุณหภูมิ 499.30 องศาเซลเซียส ขนาดของกะลามะพร้าว 12.67 มิลลิเมตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 2.35 กรัม โดยอุณหภูมิมีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์และร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนมากที่สุด และขนาดของกะลามะพร้าวไม่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักในช่วงขนาดของกะลามะพร้าว 6.5-15.5 มิลลิเมตร

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมากที่สุด พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสเบามีกรดอะซิติก (Acetic acid) และน้ำ เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 56.21 และผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์เฟสหนักมีฟีนอลเป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 36.41

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสจากกะลามะพร้าวมีน้อย ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงกระบวนการที่ใช้ในการผลิต
2. การประยุกต์ใช้การไพโรไลซิสจากกะลามะพร้าวในทางอุตสาหกรรม จะต้องผลิตเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดที่ใช้ในการทดลอง ถ้าออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่มาก จะทำให้ความร้อนไม่สามารถถ่ายเทได้ถึงตรงกลางเครื่องปฏิกรณ์ ถ้าเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเล็กเกินไปก็จะทำให้สูญเสียพลังงานที่ให้ความร้อนแก่เครื่อง ดังนั้นการออกแบบเครื่องจะต้องไม่ให้มีขนาดใหญ่เกินไปหรือเล็กเกินไป

## เอกสารอ้างอิง

- Aguado J., Serrano D.P., Escola J.M., Briones L. (2013). "Deactivation and regeneration of a Ni supported hierarchical Beta zeolite catalyst used in the hydroreforming of the oil produced by LDPE thermal cracking." *Fuel*, 109, 679-686.
- Ahmed G., Sermin O., Suat U., Jale Y. (2012). "Comparison between the "one-step" and "two-step" catalytic pyrolysis of pine bark." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 97, 39-48.
- Alessio J.D., Lazzaro M., Massoli P. and Moccia V. (1998). "Thermo-optical investigation of burning biomass pyrolysis oil droplets." *Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*, 1915-1922.
- Amin N.A.S., Asmadi M. (2007). "Optimization of empty palm fruit bunch pyrolysis over HZSM-5 catalyst for production of bio-oil." *Chemical Reaction Engineering Group, Faculty of Chemical and Natural Resources Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, UTM Skudai, Johor, Malaysia*.
- Asadullah M., Rahman M.A., Ali M.M., Rahman M.S., Motin M.A., Sultan M.B. (2007). "Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse." *Fuel*, 86, 2514-2520.
- Bridgwater A.V. (2004). "Biomass fast pyrolysis." *Therm. Sci.*, 8, 21-49.
- Czernik S., Bridgwater A.V. (2004). "Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil." *Energy Fuels* 18, 590–598.
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency Ministry of Energy. (2556). *Biomass Energy*. Available: [http://www2.dede.go.th/renew/bio\\_p.htm](http://www2.dede.go.th/renew/bio_p.htm). (Accessed: 2013, February 5).
- Demirbas, A., Arin, G. (2002). An Overview of Biomass Pyrolysis. *Energy Sources*. 24, 471-482.

- Faisal Abnisa, W.M.A. Wan daud, W.N.W. Husin, J.N. Sahu (2011). "Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process." *Biomass Bioener.*, 35, 1863-1872.
- Gonzalez J.F., Enchinar J.M., Canito J.L. and Rodriguez J.J. (2001). "Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 58, 667-683.
- Hoffer B.W., Bonne R.L.C., Langeveld A.D., Griffiths C., Lok C.M., Moulijn J.A. (2004). "Enhancing the start-up of pyrolysis gasoline hydrogenation reactors by applying tailored exsitu presulfided Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysys" *Fuel*, 83, 1-8.
- Ilknur D., Alper E., Sevgi S. (2012). "Bio-oil production from pyrolysis of corncob." *Biomass Bioener.*, 36, 43-49.
- Judit Adam (2005). "Catalytic conversion of biomass to produce higher quality liquid bio-fuels", Ph.D. Trondheim; Norwegian University of Science and Technology, NO. 187, pp. 39.
- Laohalidanond, K. (2007). "The production of synthetic diesel from biomass." *CMU. J. Nat. Sci.*, 6(1), 127-139.
- Leiyu Z., Hongmin Y., Hao W., Meng W., Daqian C. (2013) "Catalytic pyrolysis of rice husk by mixing with zinc oxide: Characterization of bio-oil and its rheological behavior" *Fuel Processing Technology*, 106, 385-391.
- Lopez A., I. de Marco, B.M. Caballero, A. Adrados, M.F. Laresgoiti (2011). "Deactivation and regeneration of ZSM-5 zeolite in catalytic pyrolysis of plastic wastes." *Waste Management*, 31, 1852-1858.
- Michael S. Talmadge, Robert M. Baldwin, Mary J. Bidy, Robert L. McCormick (2014). "A perspective on oxygenated species in the refinery integration of pyrolysis oil" *Green Chemistry*, 16, 407-453.
- Muhammad S.A.B., James O.T. (2013). "Catalytic pyrolysis of rice husk for bio-oil production." *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 362-368.

- Natthagritt P. "Organic liquid product from catalytic cracking of refined palm oil." The 5<sup>th</sup> PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET), Phuket, May 2-3, 2011. Prince of Songkla University, Faculty of Engineering Hat Yai, Songkhla, Thailand 90112.
- Nugranad, N. (1997). "Pyrolysis of biomass". Ph. D. Dissertation, University of Leeds, Leeds.
- Paul T. Williams and Patrick A. Horne (1995). "The influence of catalyst regeneration on the composition of zeolite-upgraded biomass pyrolysis oils." *Fuel*, 74, 1839-1851.
- Paul T., Williams and Serpil Besler (1995) "Pyrolysis-thermogravimetric analysis of tires and tyre components." *Fuel* vol. 14 No. 9, 1277-1283.
- Peter A. (2009). "Biomass Pyrolysis Processes: Review of Scope, Control and Variability." UK Biochar Research Centre, 5.
- Sensoz S., Kaynar I. (2006). "Bio-oil production from soybean (*Glycine max L.*); fuel properties of Bio-oil." *Ind Crops Prod*, 23, 99-105.
- Siengchum T., Guzman F., Chuang S.S.C. (2012). "Analysis of gas products from direct utilization of carbon in a solid oxide fuel cell." *J Power Sources*, 213, 375-81.
- Tritti Siengchum, Mathew Isenberg, Steven S.C. (2013). "Fast pyrolysis of coconut biomass – An FTIR study." *Fuel*, 105, 559-565.
- Tsai W.T., Lee M.K., Chang Y.M. (2006). "Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor." *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 76, 230-237.
- Uran B. (2007). "The response surface methodology." Department of Mathematical Sciences Indiana University of South Bend.
- <http://www.sec.psu.ac.th/facilities.php> ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2556)



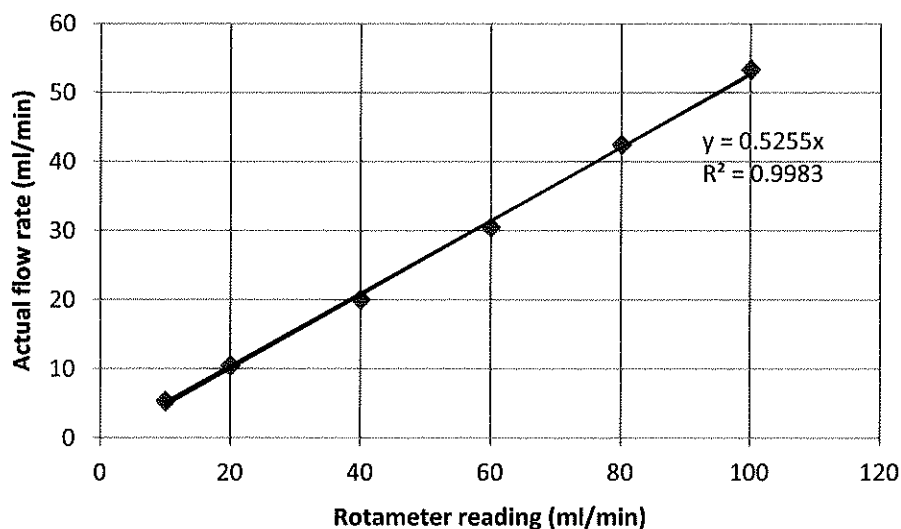
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## กราฟมาตรฐาน

## 1. กราฟมาตรฐานอัตราการไหลของไนโตรเจน

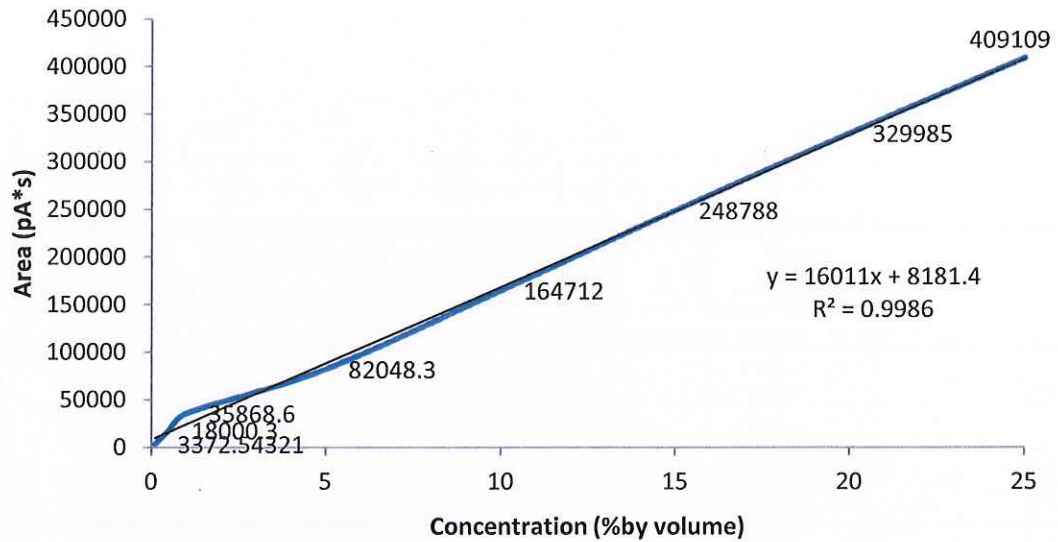
การสร้างกราฟมาตรฐานอัตราการไหลของไนโตรเจน สามารถทำได้โดยการวัดอัตราการไหลของไนโตรเจนโดยการแทนที่น้ำในขวดที่มีปริมาตร 20 มิลลิลิตร ใส่น้ำให้เต็มขวด แล้ววางคว่ำไว้บนอ่างที่มีน้ำอยู่ โดยไม่ให้มีอากาศอยู่ในขวด ใต้อ่างที่เป็นทางออกของก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในขวดที่คว่ำอยู่ จากนั้นปรับอัตราการไหลของไนโตรเจน 10 20 40 60 80 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ จับเวลาเมื่อเริ่มมีฟองก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่น้ำ และหยุดจับเวลาเมื่อฟองก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่น้ำจะหมดขวด จะได้อัตราการไหลจริง 20 มิลลิลิตรต่อเวลาที่ก๊าซไนโตรเจนเข้าไปแทนที่น้ำ ทำซ้ำสามครั้ง จะได้กราฟดังภาพประกอบ ก-1



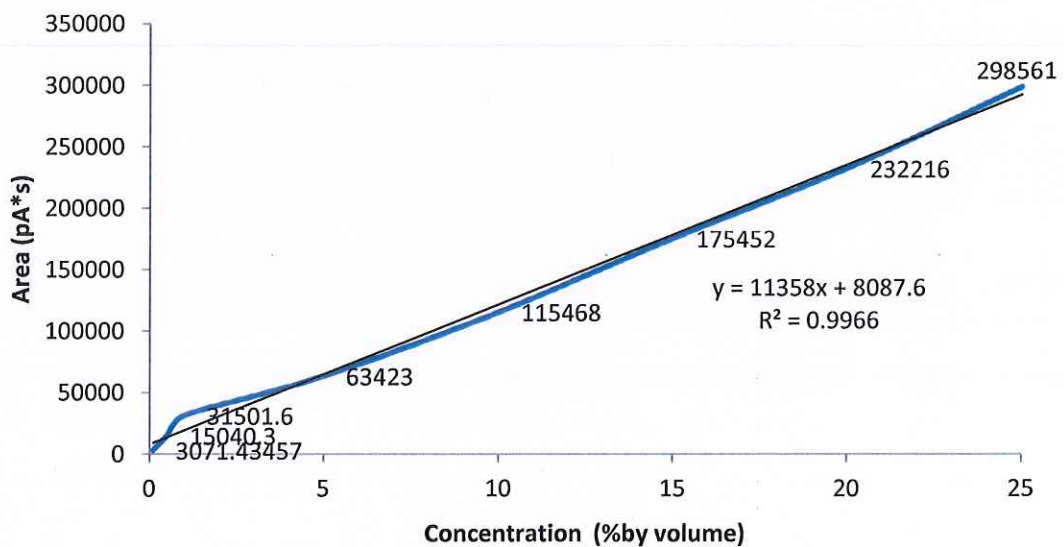
ภาพประกอบ ก-1 กราฟมาตรฐานอัตราการไหลของไนโตรเจน

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

#### 2. กราฟมาตรฐานของเบนซินและไอโซออกเทนสำหรับแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



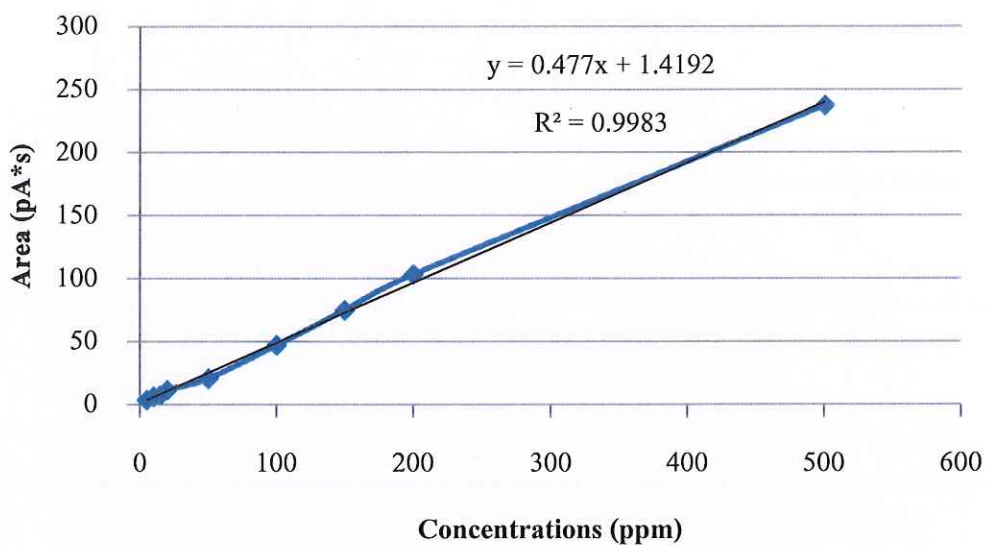
#### ภาพประกอบ ก-2 กราฟมาตรฐานของ Benzene สำหรับแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



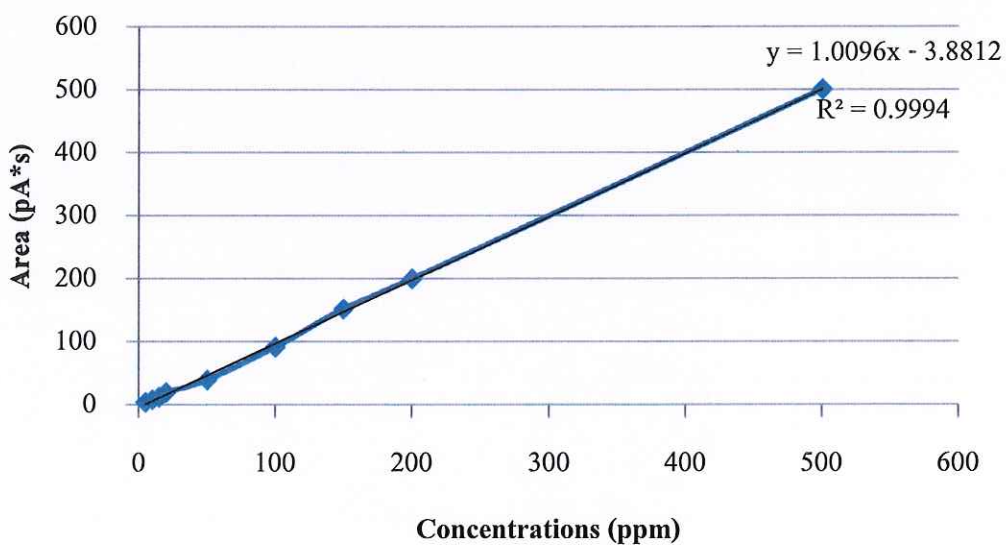
#### ภาพประกอบ ก-3 กราฟมาตรฐานของ Isooctane สำหรับแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

## 3. กราฟมาตรฐานของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สำหรับแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

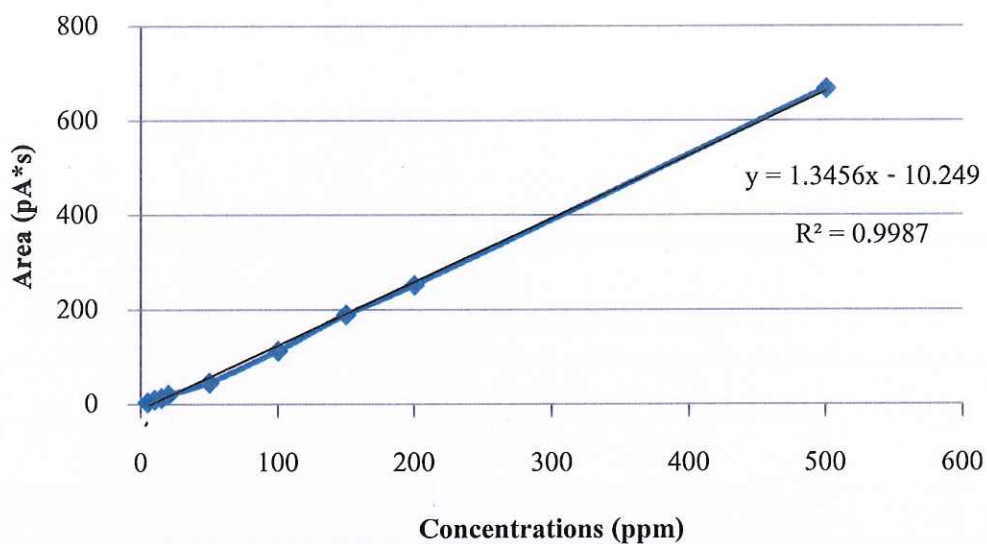


ภาพประกอบ ก-4 กราฟมาตรฐานของ Pentene

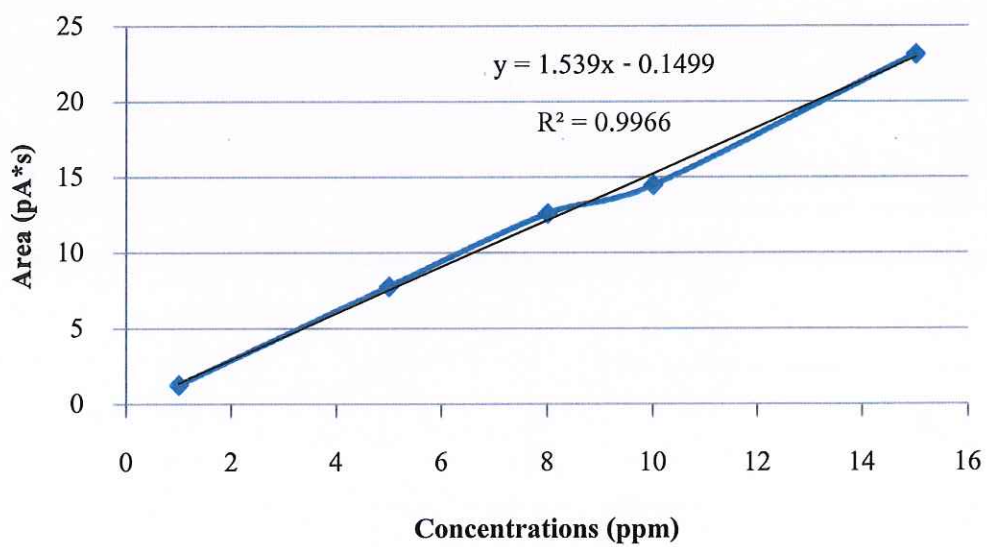


ภาพประกอบ ก-5 กราฟมาตรฐานของ Isooctane

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

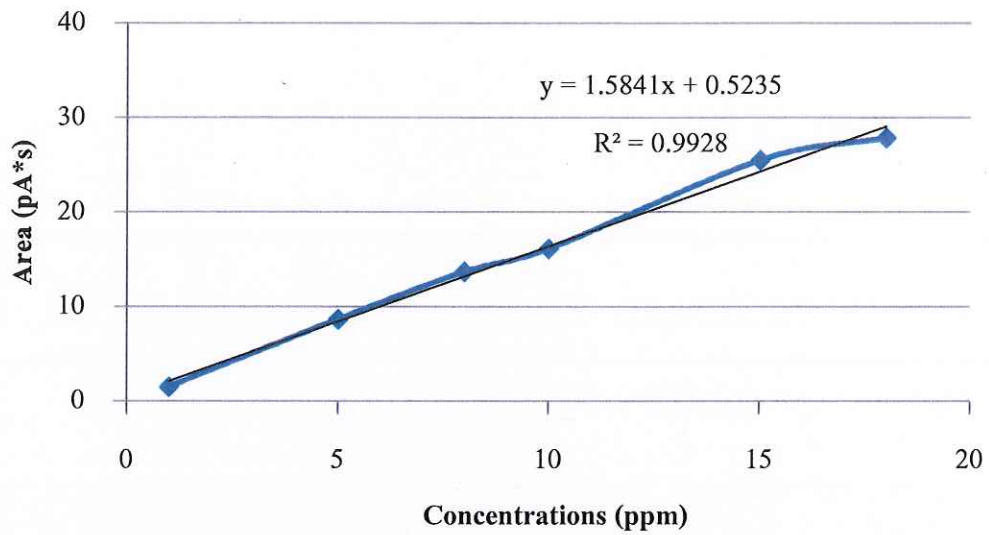


ภาพประกอบ ก-6 กราฟมาตรฐานของ Benzene

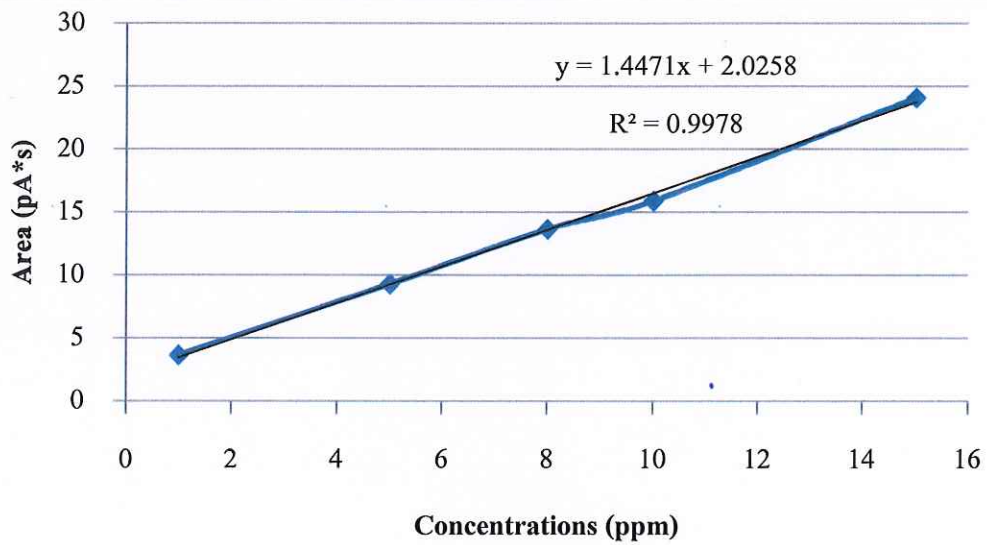


ภาพประกอบ ก-7 กราฟมาตรฐานของ Toluene

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

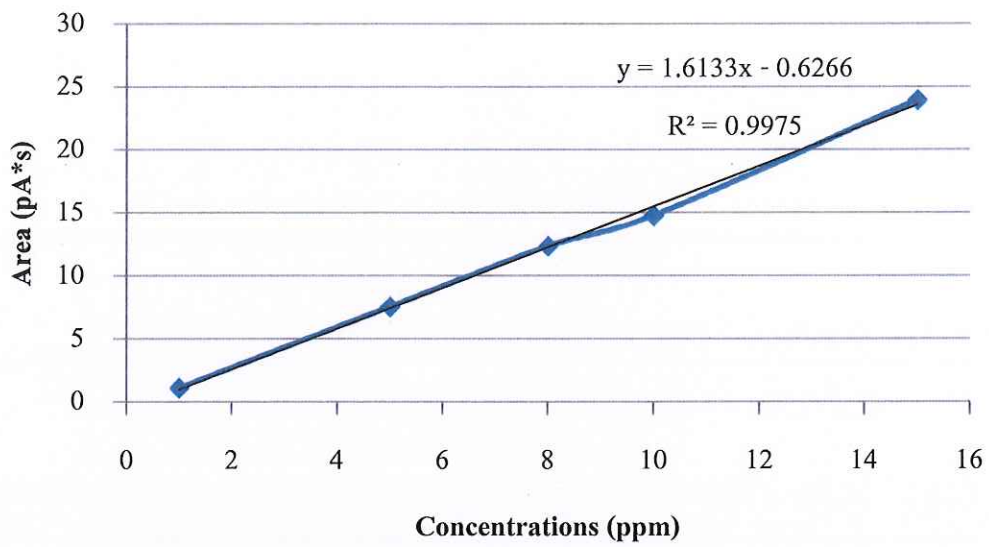


ภาพประกอบ ก-8 กราฟมาตรฐานของ Ethyl benzene

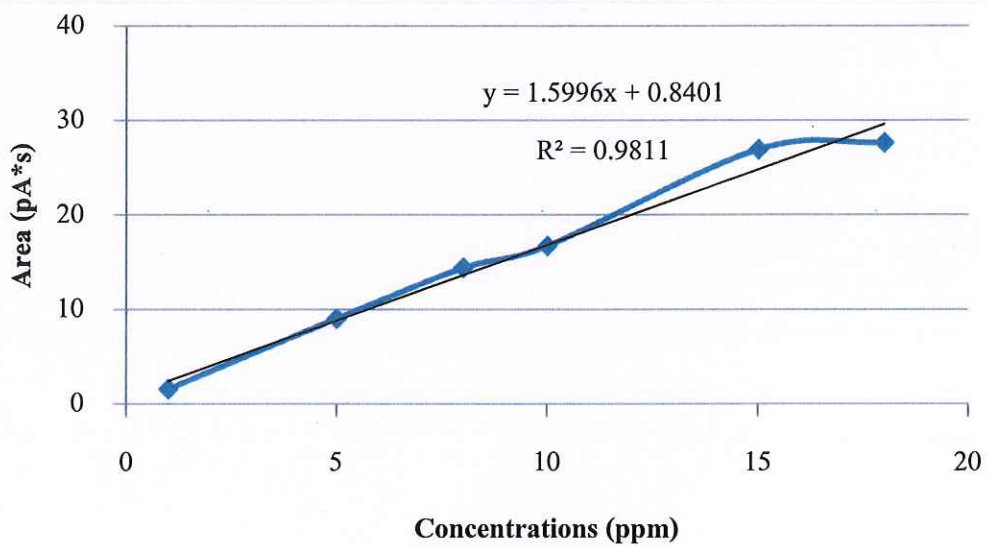


ภาพประกอบ ก-9 กราฟมาตรฐานของ p-xylene

## ภาคผนวก ก (ต่อ)

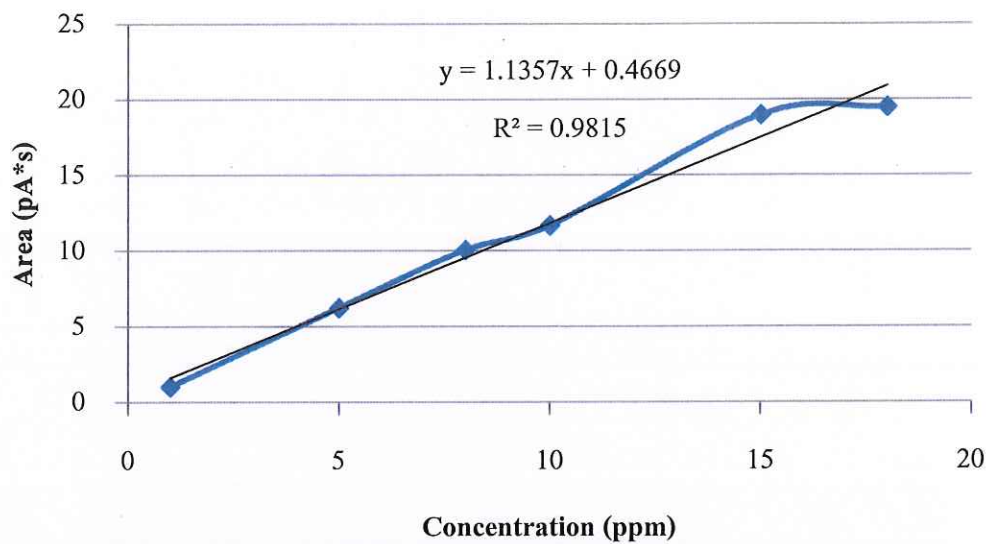


ภาพประกอบ ก-10 กราฟมาตรฐานของ m-xylene

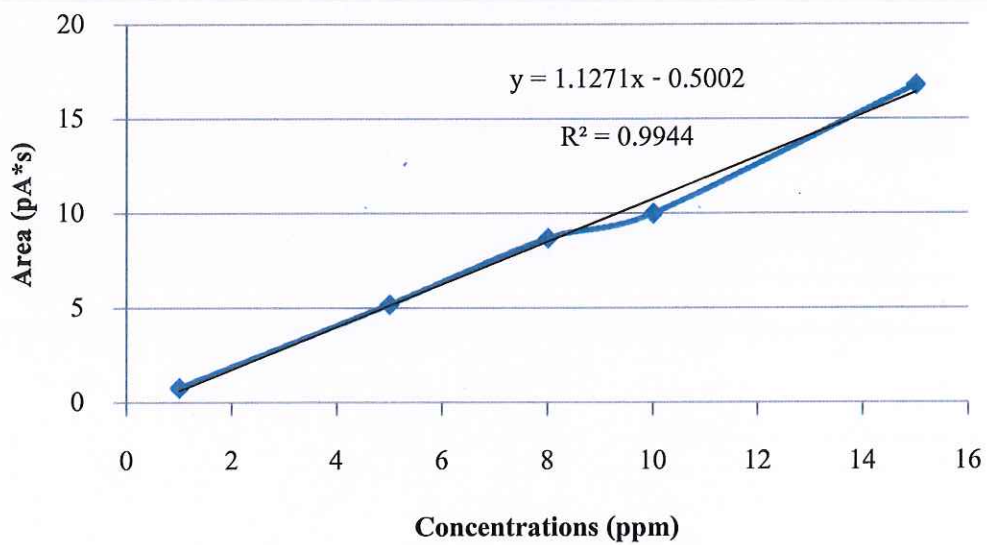


ภาพประกอบ ก-11 กราฟมาตรฐานของ o-xylene

## ภาคผนวก ก (ต่อ)



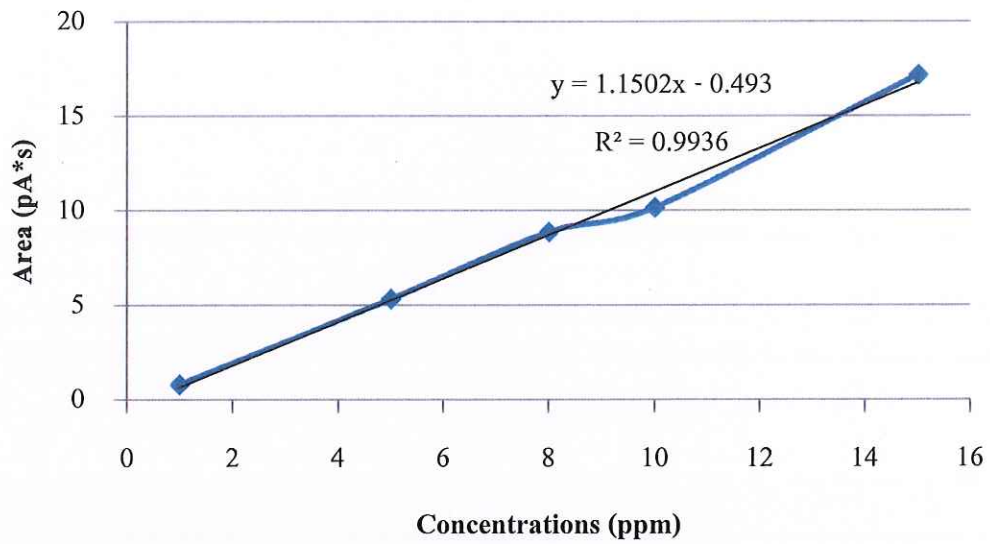
ภาพประกอบ ก-12 กราฟมาตรฐานของ Chlorobenzene



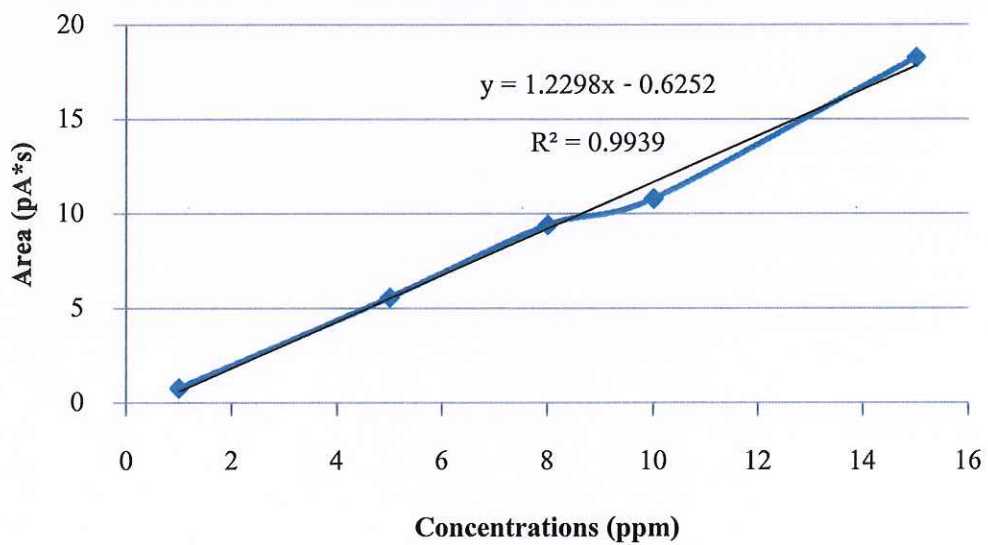
ภาพประกอบ ก-13 กราฟมาตรฐานของ 1,3-Dichlorobenzene



## ภาคผนวก ก (ต่อ)



ภาพประกอบ ก-14 กราฟมาตรฐานของ 1,4-Dichlorobenzene



ภาพประกอบ ก-15 กราฟมาตรฐานของ 1,2-Dichlorobenzene

## ภาคผนวก ข

### วิธีและสภาวะที่ใช้วิเคราะห์

#### 1. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analyzer (TGA)



ภาพประกอบ ข-1 Thermogravimetric Analyzer (TGA)

ที่มา : <http://www.sec.psu.ac.th/facilities.php> (สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2556)

##### 1.1 ยี่ห้อและรุ่นของเครื่องมือ

Thermogravimetric Analyzer ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น TGA7

##### 1.2 สภาวะการทดสอบ

1.2.1 ก๊าซ: ไนโตรเจน

1.2.2 โปรแกรมทดสอบ: ให้ความร้อนจาก 50-1,000 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหล 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

### 2. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatograph – Flame Ionization (GC-FID)



ภาพประกอบ ข-2 Gas Chromatograph – Flame Ionization (GC-FID)

ที่มา : <http://www.sec.psu.ac.th/facilities.php> (สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2556)

#### 2.1 ยี่ห้อและรุ่นของเครื่องมือ

ยี่ห้อ : Gas Chromatography with Flame Ionization Detector

รุ่น : 6890, Agilent Technologies, USA

#### 2.2 สภาวะการทดสอบ

Inlet temperature: 225 °C, Split ratio 10:1, Carrier (He) flow 1.0 ml/min

Oven Temperature: Initial temperature 50 °C hold 3 minutes

Column: HP-5, 30 m x 0.32 mm ID. x film thickness 0.25 µm

Detector temperature: 250 °C

Hydrogen flow: 35.0 ml/min

Make up flow: 35.0 ml/min

Air flow: 450 ml/min

## ภาคผนวก ข (ต่อ)

### 3. การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatograph – Mass (GC-MS)



ภาพประกอบ ข-3 Gas Chromatograph – Mass Spectrometer (GC-MS)

ที่มา : <http://www.sec.psu.ac.th/facilities.php> (สืบค้นเมื่อ 20 มีนาคม 2556)

#### 3.1 ยี่ห้อและรุ่นของเครื่องมือ

Gas Chromatograph – Mass Spectrometer, Trace GC Ultra <sup>รุ่น</sup> / ISQ MS, Thermo <sup>ยี่ห้อ</sup> Scientific Inc., USA.

#### 2.2 สภาวะการทดสอบ

| Gas Chromatograph                                | Mass Spectrometer                    |
|--|--------------------------------------|
| Inlet temperature: 220 °C, Split ratio 75:1      | Ionization mode: Electron Ionization |
| Oven temperature: Initial 35 °C, hold for 5 min. | Acquisition mode: Scan, 35-500 amu   |
| Constant flow: 1.0 ml/min                        | Ion source temp.: 245 °C             |
| Column: TR-WaxMS, 30 m., film 0.25 $\mu$ m       | Transfer line temp.: 245 °C          |
| ID. 0.25 mm.                                     | Solvent delay time: 5 min            |

## ภาคผนวก ก

## ตารางผลการคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

## 1. ผลการคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ก-1 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| การทดลอง | สภาวะที่ใช้ในการทดลอง |                                 |                 | น้ำหนักของกะลามะพร้าว (กรัม) |       | ร้อยละ |
|----------|-----------------------|---------------------------------|-----------------|------------------------------|-------|--------|
|          | อุณหภูมิ (°C)         | อัตราการไหลของไนโตรเจน (ml/min) | ขนาดอนุภาค (mm) | ก่อน                         | หลัง  |        |
| 1        | 450                   | 10                              | 6.5-9.5         | 20.01                        | 9.86  | 49.28  |
| 2        | 450                   | 5                               | 0-6.5           | 20.00                        | 8.65  | 43.25  |
| 3        | 350                   | 10                              | 9.5-12.5        | 20.13                        | 8.98  | 44.61  |
| 4        | 550                   | 5                               | 6.5-9.5         | 20.08                        | 10.15 | 50.55  |
| 5        | 550                   | 10                              | 0-6.5           | 20.00                        | 9.05  | 45.25  |
| 6        | 450                   | 15                              | 9.5-12.5        | 20.10                        | 10.00 | 49.75  |
| 7        | 550                   | 10                              | 9.5-12.5        | 20.01                        | 10.09 | 50.42  |
| 8        | 450                   | 10                              | 6.5-9.5         | 20.02                        | 9.93  | 49.60  |
| 9        | 550                   | 15                              | 6.5-9.5         | 20.03                        | 10.53 | 52.57  |
| 10       | 350                   | 10                              | 0-6.5           | 20.00                        | 7.84  | 39.20  |
| 11       | 450                   | 5                               | 9.5-12.5        | 20.09                        | 9.96  | 49.58  |
| 12       | 350                   | 15                              | 6.5-9.5         | 20.09                        | 9.62  | 47.88  |
| 13       | 450                   | 15                              | 0-6.5           | 20.00                        | 8.75  | 43.75  |
| 14       | 350                   | 5                               | 6.5-9.5         | 20.02                        | 8.83  | 44.10  |
| 15       | 450                   | 10                              | 6.5-9.5         | 20.04                        | 10.02 | 50.00  |

### ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตัวอย่างการคำนวณตารางที่ ก-1 หาค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างการทดลองที่ 1 สภาวะอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจน 10 มิลลิลิตรต่อนาที และขนาดอนุภาค 6.5 – 9.5 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์} &= \frac{\text{น้ำหนักของของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิส}}{\text{น้ำหนักของกะลามะพร้าวก่อนทำการไพโรไลซิส}} \times 100\% \\
 \text{ของเหลวอินทรีย์} &= \frac{9.86 \text{ g}}{20.01 \text{ g}} \times 100\% = 49.28 \text{ wt}\%
 \end{aligned}$$

## ภาคผนวก ค (ต่อ)

## 2. ตารางผลการคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส แบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ค-2 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| การทดลอง | สภาวะที่ใช้ในการทดลอง |                 |                            | น้ำหนักของกะลามะพร้าว (กรัม) |      | ร้อยละ |
|----------|-----------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------|------|--------|
|          | อุณหภูมิ (°C)         | ขนาดอนุภาค (mm) | ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (g) | ก่อน                         | หลัง |        |
| 1        | 500                   | 6.5-9.5         | 0.5                        | 20.09                        | 7.45 | 37.10  |
| 2        | 500                   | 12.5-15.5       | 4.5                        | 20.04                        | 6.76 | 33.73  |
| 3        | 500                   | 9.5-12.5        | 2.5                        | 20.18                        | 7.47 | 37.00  |
| 4        | 500                   | 9.5-12.5        | 2.5                        | 20.18                        | 7.57 | 37.50  |
| 5        | 550                   | 9.5-12.5        | 4.5                        | 20.10                        | 6.76 | 33.65  |
| 6        | 550                   | 12.5-15.5       | 2.5                        | 20.03                        | 6.59 | 32.90  |
| 7        | 500                   | 12.5-15.5       | 0.5                        | 20.00                        | 7.45 | 37.25  |
| 8        | 550                   | 9.5-12.5        | 0.5                        | 20.00                        | 7.13 | 35.65  |
| 9        | 450                   | 9.5-12.5        | 0.5                        | 20.03                        | 7.50 | 37.44  |
| 10       | 450                   | 9.5-12.5        | 4.5                        | 20.06                        | 7.03 | 35.04  |
| 11       | 500                   | 9.5-12.5        | 2.5                        | 20.00                        | 7.29 | 36.45  |
| 12       | 550                   | 6.5-9.5         | 2.5                        | 20.00                        | 6.74 | 33.71  |
| 13       | 500                   | 6.5-9.5         | 4.5                        | 20.00                        | 7.44 | 37.21  |
| 14       | 450                   | 12.5-15.5       | 2.5                        | 20.55                        | 6.92 | 33.67  |
| 15       | 450                   | 6.5-9.5         | 2.5                        | 20.11                        | 7.02 | 34.89  |

ภาคผนวก ก (ต่อ)

ตารางที่ ค-3 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

| Exp. | Productions (wt%) |       | Productions<br>in phase (wt%) |       | %yield of OLP<br>(wt%) |          |
|------|-------------------|-------|-------------------------------|-------|------------------------|----------|
|      | Bio-oil           | Char  | Light                         | Heavy | Light                  | Heavy    |
| 1    | 37.10             | 29.52 | 83.65                         | 16.35 | 31.03415               | 6.06585  |
| 2    | 33.73             | 29.44 | 87.71                         | 12.29 | 29.584583              | 4.145417 |
| 3    | 37.00             | 29.68 | 88.60                         | 11.40 | 32.782                 | 4.218    |
| 4    | 37.50             | 29.88 | 90.85                         | 9.15  | 34.06875               | 3.43125  |
| 5    | 33.65             | 28.56 | 90.50                         | 9.50  | 30.45325               | 3.19675  |
| 6    | 32.90             | 28.76 | 90.98                         | 9.02  | 29.93242               | 2.96758  |
| 7    | 37.25             | 29.35 | 81.76                         | 18.24 | 30.4556                | 6.7944   |
| 8    | 35.65             | 27.70 | 85.43                         | 14.57 | 30.455795              | 5.194205 |
| 9    | 37.44             | 30.90 | 85.65                         | 14.35 | 32.06736               | 5.37264  |
| 10   | 35.04             | 31.01 | 85.69                         | 14.31 | 30.025776              | 5.014224 |
| 11   | 36.45             | 30.05 | 88.98                         | 11.02 | 32.43321               | 4.01679  |
| 12   | 33.71             | 27.80 | 89.76                         | 10.24 | 30.258096              | 3.451904 |
| 13   | 37.21             | 29.65 | 86.76                         | 13.24 | 32.283396              | 4.926604 |
| 14   | 33.67             | 31.39 | 90.18                         | 9.82  | 30.363606              | 3.306394 |
| 15   | 34.89             | 33.12 | 90.29                         | 9.71  | 31.502181              | 3.387819 |

\*น้ำมันชีวภาพเฟสเบามีความหนาแน่น 1.035 g/ml

\*น้ำมันชีวภาพเฟสหนักมีความหนาแน่น 1.204 g/ml





## ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-2 แสดงร้อยละผลได้ของ Benzene และ Toluene ในเฟสเบา และเฟสหนัก

| Exp.   | Benzene                 |         |                                |        | Toluene                 |          |                                |        |
|--------|-------------------------|---------|--------------------------------|--------|-------------------------|----------|--------------------------------|--------|
|        | Concentrations<br>(ppm) |         | %yields $\times 10^{-3}$ (wt%) |        | Concentrations<br>(ppm) |          | %yields $\times 10^{-3}$ (wt%) |        |
|        | Light                   | OLP     | Light                          | OLP    | Light                   | OLP      | Light                          | OLP    |
| 1      | 83.35                   | 0       | 2.50                           | 0      | 146.33                  | 219.93   | 4.39                           | 1.11   |
| 2      | 75.60                   | 2248.19 | 2.16                           | 7.74   | 40.61                   | 217.75   | 1.161                          | 0.7497 |
| 3      | 229.01                  | 1985.66 | 7.25                           | 6.96   | 71.41                   | 183.18   | 2.26                           | 0.6417 |
| 4      | 162.19                  | 5385.18 | 5.34                           | 15.35  | 88.05                   | 20901.98 | 2.90                           | 59.57  |
| 5      | 78.42                   | 397.10  | 2.31                           | 1.05   | 44.11                   | 1512.05  | 1.30                           | 4.01   |
| 6      | 57.68                   | 23.25   | 1.67                           | 0.0573 | 0                       | 0        | 0                              | 0      |
| 7      | 78.48                   | 3912.94 | 2.31                           | 22.08  | 0                       | 171.93   | 0                              | 0.9702 |
| 8      | 90.25                   | 33.67   | 2.66                           | 0.1452 | 0                       | 0        | 0                              | 0      |
| 9      | 33.00                   | 0       | 1.02                           | 0      | 0                       | 0        | 0                              | 0      |
| 10     | 0                       | 0       | 0                              | 0      | 95.82                   | 334.02   | 2.78                           | 1.39   |
| 11     | 610.89                  | 3751.82 | 19.14                          | 12.52  | 102.64                  | 167.10   | 3.22                           | 0.5575 |
| 12     | 0                       | 0       | 0                              | 0      | 32.08                   | 141.58   | 0.9377                         | 0.4059 |
| 13     | 25.86                   | 0       | 0.8068                         | 0      | 0                       | 72.58    | 0                              | 0.297  |
| 14     | 32.66                   | 0       | 0.9581                         | 0      | 0                       | 0        | 0                              | 0      |
| 15     | 23.32                   | 0       | 0.7097                         | 0      | 0                       | 0        | 0                              | 0      |
| Repeat | 0                       | 0       | 0                              | 0      | 0                       | 61510.17 | 0                              | 240.54 |
| Regen. | 0                       | 6409.15 | 0                              | 26.85  | 0                       | 19350.26 | 0                              | 81.07  |

หมายเหตุ: Repeat คือ การทดลองที่ทำซ้ำจากสภาวะที่เหมาะสมที่สุด และ Regen. คือ การทดลองที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านการปรับสภาพ (Regenerated) ทำการทดลองที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

## ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-3 แสดงร้อยละผลได้ของ Ethyl benzene และ p-xylene ในเฟสเบา และเฟสหนัก

| Exp.   | Ethyl benzene           |          |                                |        | p-xylene                |         |                                |        |
|--------|-------------------------|----------|--------------------------------|--------|-------------------------|---------|--------------------------------|--------|
|        | Concentrations<br>(ppm) |          | %yields $\times 10^{-3}$ (wt%) |        | Concentrations<br>(ppm) |         | %yields $\times 10^{-3}$ (wt%) |        |
|        | Light                   | OLP      | Light                          | OLP    | Light                   | OLP     | Light                          | OLP    |
| 1      | 6.82                    | 60.37    | 0.244                          | 0.304  | 486.88                  | 38.33   | 14.60                          | 0.193  |
| 2      | 15.59                   | 269.90   | 0.446                          | 0.929  | 17.48                   | 5665.32 | 0.500                          | 19.51  |
| 3      | 29.41                   | 429.97   | 0.932                          | 1.51   | 123.80                  | 4399.58 | 3.92                           | 15.41  |
| 4      | 0                       | 3342.86  | 0                              | 9.53   | 0                       | 6245.85 | 0                              | 17.80  |
| 5      | 0                       | 513.99   | 0                              | 1.36   | 0                       | 966.06  | 0                              | 2.56   |
| 6      | 0                       | 12.61    | 0                              | 0.0311 | 0                       | 0       | 0                              | 0      |
| 7      | 0                       | 404.88   | 0                              | 2.28   | 0                       | 2967.64 | 0                              | 16.75  |
| 8      | 0                       | 0        | 0                              | 0      | 10.01                   | 0       | 0.294                          | 0      |
| 9      | 0                       | 0        | 0                              | 0      | 4.24                    | 0       | 0.131                          | 0      |
| 10     | 29.55                   | 69.84    | 0.857                          | 0.291  | 187.05                  | 92.59   | 5.43                           | 0.386  |
| 11     | 65.38                   | 399.42   | 2.05                           | 1.33   | 285.29                  | 4827.70 | 8.94                           | 16.11  |
| 12     | 4.50                    | 27.51    | 0.132                          | 0.0789 | 124.46                  | 16.20   | 3.64                           | 0.0464 |
| 13     | 0                       | 103.68   | 0                              | 0.424  | 4.54                    | 256.45  | 0.142                          | 1.05   |
| 14     | 0                       | 15.70    | 0                              | 0.0431 | 0                       | 6.03    | 0                              | 0.0166 |
| 15     | 0                       | 0        | 0                              | 0      | 0                       | 30.32   | 0                              | 0.0853 |
| Repeat | 42.13                   | 13503.65 | 1.555                          | 52.807 | 0                       | 0       | 0                              | 0      |
| Regen. | 8.92                    | 5139.49  | 0.338                          | 21.533 | 49.47                   | 9398.57 | 1.874                          | 39.378 |

## ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-4 แสดงร้อยละผลได้ของ m-xylene และ o-xylene ในเฟสเบา และเฟสหนัก

| Exp.   | m-xylene                |        |                                |        | o-xylene                |         |                                |        |
|--------|-------------------------|--------|--------------------------------|--------|-------------------------|---------|--------------------------------|--------|
|        | Concentrations<br>(ppm) |        | %yields $\times 10^{-3}$ (wt%) |        | Concentrations<br>(ppm) |         | %yields $\times 10^{-3}$ (wt%) |        |
|        | Light                   | OLP    | Light                          | OLP    | Light                   | OLP     | Light                          | OLP    |
| 1      | 0                       | 0      | 0                              | 0      | 210.79                  | 95.97   | 6.32                           | 0.484  |
| 2      | 0                       | 21.56  | 0                              | 0.0742 | 83.92                   | 91.98   | 2.40                           | 0.317  |
| 3      | 0                       | 20.93  | 0                              | 0.0733 | 94.32                   | 75.47   | 2.99                           | 0.264  |
| 4      | 0                       | 0      | 0                              | 0      | 0                       | 5898.54 | 0                              | 16.81  |
| 5      | 0                       | 0      | 0                              | 0      | 0                       | 0       | 0                              | 0      |
| 6      | 0                       | 134.82 | 0                              | 0.332  | 0                       | 0       | 0                              | 0      |
| 7      | 0                       | 17.84  | 0                              | 0.1007 | 0                       | 59.00   | 0                              | 0.333  |
| 8      | 0                       | 161.43 | 0                              | 0.696  | 0                       | 0       | 0                              | 0      |
| 9      | 3.94                    | 90.04  | 0.122                          | 0.402  | 0                       | 0       | 0                              | 0      |
| 10     | 0                       | 19.23  | 0                              | 0.0801 | 146.77                  | 114.21  | 4.26                           | 0.476  |
| 11     | 0                       | 7.70   | 0                              | 0.0257 | 144.06                  | 53.69   | 4.51                           | 0.179  |
| 12     | 0                       | 0      | 0                              | 0      | 70.76                   | 30.32   | 2.07                           | 0.0869 |
| 13     | 10.26                   | 440.40 | 0.320                          | 1.80   | 0                       | 98.39   | 0                              | 0.403  |
| 14     | 3.42                    | 567.62 | 0.100                          | 1.56   | 0                       | 0       | 0                              | 0      |
| 15     | 0                       | 319.02 | 0                              | 0.898  | 0                       | 26.92   | 0                              | 0.0758 |
| Repeat | 173.17                  | 86.01  | 6.393                          | 0.336  | 0                       | 244.39  | 0                              | 0.956  |
| Regen. | 92.65                   | 88.55  | 3.509                          | 0.371  | 0                       | 65.00   | 0                              | 0.274  |

## ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-5 แสดงร้อยละผลได้ของ Chlorobenzene และ 1,3-dichlorobenzene ในเฟสเบาและเฟสหนัก

| Exp.   | Chlorobenzene        |         |                                |       | 1,3-dichlorobenzene  |         |                                |       |
|--------|----------------------|---------|--------------------------------|-------|----------------------|---------|--------------------------------|-------|
|        | Concentrations (ppm) |         | %yields $\times 10^{-3}$ (wt%) |       | Concentrations (ppm) |         | %yields $\times 10^{-3}$ (wt%) |       |
|        | Light                | OLP     | Light                          | OLP   | Light                | OLP     | Light                          | OLP   |
| 1      | 8.50                 | 24.22   | 0.255                          | 0.122 | 92489.49             | 285.63  | 2773.268                       | 1.44  |
| 2      | 13.53                | 45.77   | 0.387                          | 0.158 | 73.53                | 175.17  | 2.102                          | 0.603 |
| 3      | 9.70                 | 106.03  | 0.307                          | 0.371 | 86.50                | 90.57   | 2.740                          | 0.317 |
| 4      | 0                    | 640.60  | 0                              | 1.83  | 0                    | 355.12  | 0                              | 1.01  |
| 5      | 67.71                | 0       | 1.99                           | 0     | 0                    | 0       | 0                              | 0     |
| 6      | 0                    | 0       | 0                              | 0     | 0                    | 0       | 0                              | 0     |
| 7      | 0                    | 166.17  | 0                              | 0.938 | 0                    | 1142.80 | 0                              | 6.45  |
| 8      | 0                    | 0       | 0                              | 0     | 0                    | 0       | 0                              | 0     |
| 9      | 0                    | 0       | 0                              | 0     | 97749.00             | 47.96   | 3028.55                        | 0.214 |
| 10     | 7.96                 | 34.72   | 0.231                          | 0.145 | 79135.04             | 378.15  | 2295.74                        | 1.57  |
| 11     | 10.50                | 146.70  | 0.329                          | 0.489 | 88537.57             | 1084.27 | 2774.45                        | 3.62  |
| 12     | 5.75                 | 52.43   | 0.168                          | 0.150 | 22.88                | 458.54  | 0.669                          | 1.31  |
| 13     | 0                    | 169.69  | 0                              | 0.694 | 111612.90            | 127.56  | 3481.39                        | 0.522 |
| 14     | 0                    | 0       | 0                              | 0     | 0                    | 63.04   | 0                              | 0.173 |
| 15     | 0                    | 0       | 0                              | 0     | 0                    | 0       | 0                              | 0     |
| Repeat | 0                    | 1697.19 | 0                              | 6.637 | 61.54                | 308.56  | 2.272                          | 1.207 |
| Regen. | 0                    | 435.98  | 0                              | 1.827 | 47.11                | 0       | 1.785                          | 0     |

ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตารางที่ ง-6 แสดงร้อยละผลได้ของ 1,4-dichlorobenzene และ 1,2-dichlorobenzene ในเฟสเบาและเฟสหนัก

| Exp.   | 1,4-dichlorobenzene     |          |                                |         | 1,2-dichlorobenzene     |         |                                |       |
|--------|-------------------------|----------|--------------------------------|---------|-------------------------|---------|--------------------------------|-------|
|        | Concentrations<br>(ppm) |          | %yields $\times 10^{-3}$ (wt%) |         | Concentrations<br>(ppm) |         | %yields $\times 10^{-3}$ (wt%) |       |
|        | Light                   | OLP      | Light                          | OLP     | Light                   | OLP     | Light                          | OLP   |
| 1      | 0                       | 19816.03 | 0                              | 99.83   | 169.16                  | 29.64   | 5.07                           | 0.149 |
| 2      | 41810.72                | 9161.10  | 1195.12                        | 31.54   | 0                       | 601.06  | 0                              | 2.07  |
| 3      | 55762.38                | 17858.67 | 1766.19                        | 62.56   | 65.09                   | 323.25  | 2.06                           | 1.13  |
| 4      | 42005.82                | 16870.30 | 1382.69                        | 48.08   | 0                       | 3643.74 | 0                              | 10.38 |
| 5      | 21270.12                | 12665.91 | 625.84                         | 33.63   | 0                       | 458.91  | 0                              | 1.22  |
| 6      | 35402.62                | 11724.02 | 1023.85                        | 28.90   | 0                       | 436.65  | 0                              | 1.08  |
| 7      | 58181.27                | 23376.85 | 1712.02                        | 131.92  | 0                       | 355.31  | 0                              | 2.01  |
| 8      | 75555.90                | 20585.05 | 2223.30                        | 88.81   | 58.75                   | 303.16  | 1.73                           | 1.31  |
| 9      | 0                       | 33700.09 | 0                              | 150.38  | 250.11                  | 116.96  | 7.75                           | 0.522 |
| 10     | 0                       | 30468.62 | 0                              | 126.89  | 532.52                  | 58.53   | 15.45                          | 0.244 |
| 11     | 0                       | 40017.48 | 0                              | 133.506 | 118.42                  | 358.44  | 3.71                           | 1.19  |
| 12     | 44943.39                | 16062.99 | 1313.91                        | 46.05   | 10.12                   | 516.98  | 0.296                          | 1.48  |
| 13     | 0                       | 49074.68 | 0                              | 200.81  | 113.53                  | 2042.10 | 3.54                           | 8.36  |
| 14     | 74788.64                | 33053.68 | 2194.06                        | 90.77   | 40.15                   | 2327.75 | 1.18                           | 6.39  |
| 15     | 26403.14                | 11418.02 | 803.63                         | 32.13   | 0                       | 1551.83 | 0                              | 4.37  |
| Repeat | 77644.14                | 1200.49  | 2866.58                        | 4.695   | 844.55                  | 15323.2 | 31.18                          | 59.92 |
| Regen. | 33815.24                | 178.38   | 1280.91                        | 0.747   | 473.93                  | 13937.6 | 17.95                          | 58.39 |

### ภาคผนวก ง (ต่อ)

ตัวอย่างการคำนวณตารางที่ ง-1 หาค่าร้อยละองค์ประกอบของไอโซออกเทนที่ได้จากการไพโรไลซิส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างการทดลองที่ 9 สภาวะอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 9.5 – 12.5 มิลลิเมตร และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม ที่ผลิตภัณฑ์ของเหลวเฟสเบา (Light fraction, LF) เมื่อคำนวณด้วยกราฟมาตรฐานแล้ว จะได้ Concentration 448.9327 ppm

$$\begin{aligned}
 448.93 \text{ ppm} &= \frac{448.93 \text{ mg isooctane}}{\text{liter LF}} \times \frac{1}{\text{density of isooctane}} \\
 &= \frac{0.44893 \text{ g isooctane}}{\text{liter LF}} \times \frac{1 \text{ ml isooctane}}{0.692 \text{ g isooctane}} \times \frac{1 \text{ liter LF}}{1000 \text{ ml LF}} \\
 &= \frac{0.0006487 \text{ ml isooctane}}{\text{ml LF}} \\
 &= \frac{0.0006487 \text{ ml isooctane}}{\text{ml LF}} \times \frac{\text{density of isooctane (g/ml)}}{\text{density of LF (g/ml)}} \\
 &= \frac{0.0006487 \text{ ml isooctane}}{\text{ml OLP}} \times \frac{0.692 \text{ g isooctane/ml isooctane}}{1.035 \text{ g LF/ml LF}} \\
 &= \frac{0.0004337 \text{ g isooctane}}{\text{g LF}} \\
 &= \frac{0.0004337 \text{ g isooctane}}{\text{g LF}} \times \% \text{yield of LF} \\
 &= \frac{0.0004337 \text{ g isooctane}}{\text{g LF}} \times \frac{85.65 \text{ g LF}}{100 \text{ g OLP}} \times \frac{37.44 \text{ g OLP}}{100 \text{ g biomass}} \\
 &= 0.0001391 \text{ wt \% (\%yield of isooctane)}
 \end{aligned}$$

## ภาคผนวก ง (ต่อ)

## 2. ตารางผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ง-7 แสดงร้อยละผลได้ของทุกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ศึกษา

| Exp.   | %yields of hydrocarbons<br>(wt%) |                | % yield of hydrocarbons (wt%) |
|--------|----------------------------------|----------------|-------------------------------|
|        | Light fraction                   | Heavy fraction |                               |
| 1      | 2.819659                         | 0.1093634      | 2.880140673                   |
| 2      | 1.220609                         | 0.0688735      | 1.231984351                   |
| 3      | 1.810711                         | 0.0941757      | 1.835680647                   |
| 4      | 1.390929                         | 0.1804256      | 1.443991662                   |
| 5      | 0.631438                         | 0.0438465      | 0.662680078                   |
| 6      | 1.028908                         | 0.0320441      | 1.053824505                   |
| 7      | 1.718824                         | 0.1928726      | 1.853336431                   |
| 8      | 2.236836                         | 0.0998103      | 2.315142562                   |
| 9      | 3.051487                         | 0.1536826      | 3.187419077                   |
| 10     | 2.334863                         | 0.1399251      | 2.440273756                   |
| 11     | 2.842493                         | 0.1750421      | 2.91730091                    |
| 12     | 1.329709                         | 0.0545091      | 1.364047643                   |
| 13     | 3.493477                         | 0.2176742      | 3.695314997                   |
| 14     | 2.201939                         | 0.1002377      | 2.292575356                   |
| 15     | 0.813517                         | 0.0384789      | 0.840124116                   |
| Repeat | 2.907984                         | 0.3670994      | 3.275083049                   |
| Regen. | 1.306370                         | 0.2304508      | 1.536820807                   |



ภาคผนวก ง (ต่อ)

3. ตารางผลการวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนจากการไพโรไลซิสแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ง-8 แสดงร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน ได้แก่ Isooctane Benzene Toluene Ethyl benzene p-xylene m-xylene และ o-xylene


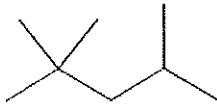

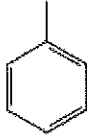
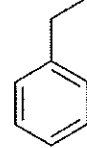

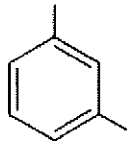
| Exp.   | %yields of gasoline (wt%) |                | %yields of gasoline (wt%) |
|--------|---------------------------|----------------|---------------------------|
|        | Light fraction            | Heavy fraction |                           |
| 1      | 0.041063719               | 0.00781823     | 0.048881949               |
| 2      | 0.022996471               | 0.03450128     | 0.057497751               |
| 3      | 0.039416768               | 0.029789791    | 0.069206558               |
| 4      | 0.008237028               | 0.119125499    | 0.127362527               |
| 5      | 0.003605298               | 0.008998677    | 0.012603974               |
| 6      | 0.005057027               | 0.002070903    | 0.007127931               |
| 7      | 0.006799157               | 0.051560724    | 0.058359881               |
| 8      | 0.011808259               | 0.009696058    | 0.021504317               |
| 9      | 0.01518512                | 0.002565847    | 0.017750968               |
| 10     | 0.023443755               | 0.011071171    | 0.034514926               |
| 11     | 0.064000801               | 0.03623298     | 0.100233781               |
| 12     | 0.01466207                | 0.005508853    | 0.020170922               |
| 13     | 0.00854132                | 0.00729504     | 0.01583636                |
| 14     | 0.006700593               | 0.002900972    | 0.009601565               |
| 15     | 0.009887533               | 0.001984298    | 0.011871731               |
| Repeat | 0.007948794               | 0.294638677    | 0.302587472               |
| Regen. | 0.005721206               | 0.169481052    | 0.175202258               |

## ภาคผนวก จ

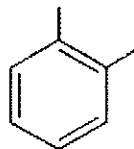
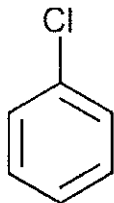
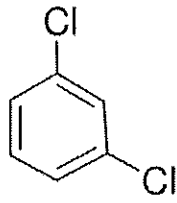
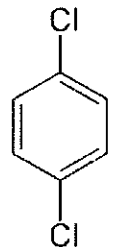
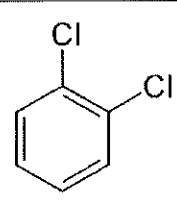
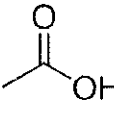
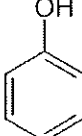
## ข้อมูลเบื้องต้นของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

## 1. ข้อมูลเบื้องต้นของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ตารางที่ จ-1 แสดงข้อมูลเบื้องต้นของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

| Chemical name                         | Chemical formula   | Molar mass (g/mol) | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Chemical structure  |
|---------------------------------------|--|--------------------|------------------------------|---|
| Pentene                               | C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>   | 70.13              | 0.64                         |    |
| Isooctane<br>(2,2,4-Trimethylpentane) | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>   | 114.23             | 0.692                        |  |
| Benzene                               | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>  | 78.11              | 0.8786                       |  |
| Toluene                               | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub><br>(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> )                  | 92.14              | 0.8669                       |  |
| Ethyl benzene                         | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub><br>(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ) | 106.17             | 0.8665                       |  |
| p-xylene                              | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub><br>(C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) | 106.17             | 0.861                        |  |
| m-xylene                              | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub><br>(C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) | 106.16             | 0.86                         |  |

ภาคผนวก จ (ต่อ)

| Chemical name                                  | Chemical formula   | Molar mass (g/mol) | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Chemical structure  |
|--|--|--------------------|------------------------------|---|
| o-xylene                                       | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub><br>(C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) | 106.17             | 0.88                         |    |
| Chlorobenzene                                  | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl   | 112.56             | 1.11                         |    |
| 1,3-dichlorobenzene<br>(meta-dichlorobenzene)  | C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>  | 147.00             | 1.288                        |   |
| 1,4-dichlorobenzene<br>(para-dichlorobenzene)  | C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>  | 147.00             | 1.25                         |  |
| 1,2-dichlorobenzene<br>(ortho-dichlorobenzene) | C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>  | 147.01             | 1.30                         |  |
| Acetic acid                                    | CH <sub>3</sub> COOH   | 60.05              | 1.049                        |  |
| Phenol   | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH   | 94.11              | 1.07                         |  |

ภาคผนวก จ

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

เรื่อง Catalytic Pyrolysis of Coconut Shell for Bio-oil

**IICBE Int'l Conference Proceedings**

**of**

***International Conference on Biological, Chemical  
and Environmental Sciences (BCES-2014)***

**Jan. 21-22, 2014**

**Patong Beach, Phuket (Thailand)**

Editors:

**Dr. Saji Baby**

**Prof. Dr. P. S. Sandhu**

**ISBN 978-93-82242-68-0**

Organized By:



**International Institute of Chemical, Biological & Environmental Engineering**  
[www.iicbe.org](http://www.iicbe.org)

# Catalytic Pyrolysis of Coconut Shell for Bio-oil

Puttiphon Kongnum, and Sukritthira Ratanawilai

**Abstract**—Bio-oils were produced from coconut shell via fast pyrolysis process without and with HZSM-5 zeolite catalyst which carried out in a fixed-bed reactor with heating rate 30 °C/min under nitrogen atmosphere. This research was investigated the effect of pyrolysis parameters amount catalyst by a response surface methodology (RSM) experimental design. The products of pyrolysis are produced bio-oil, char and gas. The results show that flow rate of nitrogen was not significant independent variable on bio-oil product for pyrolysis. The maximum yield of bio-oil, 38.93 wt%, was obtained at temperature of 491.57 °C, particle size of coconut shell of 12.5 mm and weight of catalyst of 0.5 g with flow rate of nitrogen of 5 ml/min.

**Keywords**—biomass, pyrolysis, bio-oil, catalytic pyrolysis

## I. INTRODUCTION

IN this present the world is facing a serious problem on the price of fuels getting higher. This is caused by the rapid decrease in the world reserve of fossil fuels, which is using up in near future [1]. As a renewable energy source, biomass is the largest global contributor of primary energy supply, can be convert to bio-oil by pyrolysis and has some advantages compared with conventional fossil fuel [2]. In Thailand, agricultural producer is a major with abundant agricultural resources and their by product could be used as biomass energy which are characterized into processing industry (such as rice husk from the rice mill, sugarcane bagasse, palm shell, coconut shell and corn cob), is mostly used for heat and electricity for the industry, and agricultural residues (such as sugarcane tops and leaves, rice straw, soybean stalk, cassava stalk and oil palm residues).

The heating value of heat available in bio-oil is one of the most important characteristics. The standard measurement of the energy content of heating values can be reported as higher heating value (HHV) and lower heating value (LHV). The difference between HHV and LHV is equal to the heat of vaporization of water formed by combustion of the fuel [3]. Table I shown that a data for HHV of representative of biomass.

Puttiphon Kongnum is with the Department of Chemical Engineering, Prince of Songkla University, Hadyai, Songkhla 90112 THA (e-mail: puttiphon.k@hotmail.com).

Sukritthira Ratanawilai is with the Department of Chemical Engineering, Prince of Songkla University, Hadyai, Songkhla 90112 THA (e-mail: sukritthira.b@psu.ac.th).

TABLE I  
HIGHER HEATING VALUE OF REPRESENTATIVE TYPES OF BIOMASS

| Biomass                | HHV (MJ/kg) |
|------------------------|-------------|
| Palm shell [4]         | 6.58        |
| Sunflower-oil cake [5] | 15.86       |
| Rice straw [6]         | 16.35       |
| Soybean cake [7]       | 18.17       |
| Sugarcane bagasse [6]  | 18.61       |
| Blast furnace slag [8] | 19.37       |
| Coconut shell [6]      | 22.83       |

Pyrolysis is the thermal degradation in the absence of oxidizing agent at 300 – 500 °C for converting biomass into bio-oil, gas and char. The bio-oil is liquid product from biomass by very quick exposure to heated particles in reactor. The char and gases produced are combusted to supply heat to the reactor.

Bio-oil is one of the pyrolysis products, known as pyrolysis liquid, bio-fuel-oil, pyrolysis oil, wood liquids wood oil. Generally, it is a dark-brown organic liquid and strong acid smell [4]. The bio-oil contains more than a hundreds of organic compounds that belong to alkanes, phenols, aromatic hydrocarbon, acids, aldehydes, ketones, alcohols, esters, furans.

The catalytic hydrogenation is important to select a catalyst with higher activity. Catalytic pyrolysis derived from pyrolysis of biomass is that oxygen containing bio-oils are catalytically decomposed to hydrocarbons with the removal of oxygenated groups. The zeolite catalyst, HZSM-5 has three-dimensional frameworks regular pore system that known as crystalline microporous aluminosilicates [9].

In this study, coconut shell was used to produce bio-oils based on pyrolysis process using a fixed-bed reactor amount catalyst (with HZSM-5) to optimize the bio-oil yield. The influence of several operating parameters such as temperature, flow rate of N<sub>2</sub>, particle size of coconut shell and weight of catalyst.

## II. EXPERIMENTAL

### A. Material and sample preparation

The coconut shell sample investigated in this study has been taken from Phatthalung located in Thailand. The coconut shell was ground with a rotary grinder and sieved. Then the sample was dried in oven at 120 °C for 12 h [10].

Tsai (2006) studied the proximate and ultimate analysis of coconut shell. The proximate and ultimate analysis have been

shown in Table II. HHV can be determined using the following as in (1). The LHV can be determined by using the HHV and weight percent of hydrogen in coconut shell according as shown in (2).

$$\text{HHV (MJ/kg)} = \frac{338.2 \times C + 1442.8 \times (H - O/8)}{1000} \quad (1)$$

$$\text{LHV (MJ/kg)} = \text{HHV} - (0.218 \times H) \quad (2)$$

### B. Catalyst preparation

The HZSM-5 catalytic was prepared by NH<sub>4</sub>-ZSM-5. NH<sub>4</sub>-ZSM-5 was dried in oven at 120 °C for 24 h. The dried catalytic was obtained by calcinations at 550 °C for 6 h, was conducted at nitrogen gas flow rate of 20-30 ml/min replaces the air under anaerobic condition [11].

### C. Pyrolysis procedure

The pyrolysis experiments were conducted in a fixed-bed reactor (ID: 28.1 mm, length 300 mm) equipped with a sweep gas (nitrogen) connection. The reactor was heated externally stainless steel by an electric furnace and stainless steel reactor, with the temperature being controlled.

The experiments were carried out in two series. In the first part, pyrolysis without catalyst to determine the effect of reaction temperature, the effect of flow rate of N<sub>2</sub> and the effect of particle size. The temperature was maintained at 350-550 °C, the flow rate of N<sub>2</sub> was maintained at 5-15 ml/min and the particle size was maintained at 0-12.5 mm. A response surface methodology was carried out by performing 15 experiments based on a three factor. After pyrolysis the bio-oil was condensed in a series of ice condenser traps maintained the temperature between -5 to 0 °C and collected in the reagent bottles. The uncondensed gases were flared to the atmosphere. After cooling down the liquid weighted, the char product was pushed out from the reactor and collected in the char

TABLE II  
PROXIMATE AND ULTIMATE ANALYSIS OF COCONUT SHELL

| Characteristics          | Value [6] |
|--------------------------|-----------|
| Proximate analysis (wt%) |           |
| Moisture                 | 11.26     |
| Volatile matter          | 85.36     |
| Ash                      | 0.693     |
| Ultimate analysis (wt%)  |           |
| Nitrogen                 | 0.13      |
| Carbon                   | 51.38     |
| Hydrogen                 | 5.79      |
| Sulphur                  | <0.01     |
| Oxygen                   | 30.76     |
| HHV (MJ/kg)              | 20.18     |
| LHV (MJ/kg)              | 18.92     |

collection bag and weighted. Gas weight was calculated from material balance.

The second part, which pyrolysis with HZSM-5 zeolite catalyst, was carried out to determine the effect of reaction temperature, the effect of particle size and the effect of weight of catalyst. The temperature was maintained at 450-550 °C, particle size was maintained at 6.5-15.5 mm and weight of catalyst was maintained at 0.5-4.5 g with flow rate of N<sub>2</sub> of 5 ml/min. The bio-oil and char products are calculated as Eq. (3) and the gas product was calculated by material balance.

$$\text{yield (wt\%)} = \frac{\text{Desired product (g)}}{\text{Coconut shell (g)}} \times 100\% \quad (3)$$

### D. Design of experiments

The response surface methodology (RSM) was developed by Box-Behnken Design (BBD). The independent variables considered were temperature (X<sub>1</sub>), flow rate of N<sub>2</sub> (X<sub>2</sub>) and particle size of coconut shell (X<sub>3</sub>) for without catalyst and Temperature (X<sub>4</sub>), particle size (X<sub>5</sub>) and weight of catalyst (X<sub>6</sub>). The low, center and high levels of each variable were designated as -1, 0 and +1 respectively as shown in Table III. In this study, the total number of experiments design was based on 3 factors and 3 levels that counted 15 runs [12].

The regression model was used to approximate the responses based on a second-order polynomial model as in (4) where Y is the response, β<sub>0</sub> is a constant coefficient, X are the independent variables and β<sub>i</sub>, β<sub>ii</sub> and β<sub>ij</sub> are interaction coefficients of linear, quadratic and the second order terms respectively.

TABLE III  
EXPERIMENTAL RANGE AND LEVELS OF THE INDEPENDENT VARIABLES AMOUNT CATALYST

| Variable                             | Pyrolysis without catalyst |             |     | Pyrolysis with catalyst |                |             |      |      |
|--------------------------------------|----------------------------|-------------|-----|-------------------------|----------------|-------------|------|------|
|                                      | Code                       | Real values |     |                         | Code           | Real values |      |      |
|                                      |                            | -1          | 0   | +1                      |                | -1          | 0    | +1   |
| Temperature (°C)                     | X <sub>1</sub>             | 350         | 450 | 550                     | X <sub>4</sub> | 450         | 500  | 550  |
| Flow rate of N <sub>2</sub> (ml/min) | X <sub>2</sub>             | 5           | 10  | 15                      | -              | -           | -    | -    |
| Particle size (mm)                   | X <sub>3</sub>             | 6.5         | 9.5 | 12.5                    | X <sub>5</sub> | 9.5         | 12.5 | 15.5 |
| Weight of catalyst (g)               | -                          | -           | -   | -                       | X <sub>6</sub> | 0.5         | 2.5  | 4.5  |

TABLE IV  
PARAMETER ESTIMATES AND THE STATISTICAL RESULTS  
OF RSM APPROXIMATION WITHOUT CATALYST

| Term                        | Value    | p-value     | Summary                               |
|-----------------------------|----------|-------------|---------------------------------------|
| Constant                    | -34.40   | 0.00362     |                                       |
| X <sub>1</sub>              | 0.146    | 0.00240     |                                       |
| X <sub>3</sub>              | 8.326    | 3.19306e-06 | R <sup>2</sup> = 0.974                |
| X <sub>1</sub> <sup>2</sup> | -0.00013 | 0.00841     | R <sub>adj</sub> <sup>2</sup> = 0.960 |
| X <sub>3</sub> <sup>2</sup> | 0.00834  | 0.01064     |                                       |
| X <sub>3</sub> <sup>2</sup> | -0.388   | 8.33053e-06 |                                       |

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 \quad (4)$$

### III. RESULTS AND DISCUSSION

#### A. Non-catalytic pyrolysis of coconut shell

RSM based on analysis of variance (ANOVA) for significance of the regression model. It indicates that the p-value is less than 0.05 means more significant of the corresponding term of model. The p-value over 0.05 that means the model term is insignificant. The terms of model are insignificant (X<sub>2</sub>, X<sub>12</sub>, X<sub>13</sub> and X<sub>23</sub>) were removed from regression model. ANOVA table shows for significance of model coefficients shown in Table IV.

The maximum bio-oil yield, 52.57 wt%, was obtained as particle size of coconut shell and temperature were significant respectively. The flow rate of nitrogen was not significant independent variable on bio-oil product for pyrolysis without catalyst. So the second part, which pyrolysis by using catalytic

#### B. Catalytic pyrolysis of coconut shell

The catalytic pyrolysis experiments were conducted while the temperature at 450-550 °C and particle size of coconut shell at 9.5-12.5 mm with a constant sweeping gas flow rate of N<sub>2</sub> (5 ml/min). The results were shown in Fig 1. The effects of temperature and particle size of coconut shell on the bio-oil yields of catalytic pyrolysis was observed that the bio-oil yields increased from 35.10 wt% to 38.93 wt% with the increasing temperature from 450 to 491.57 °C and with the particle size of coconut shell from 9.5-12.5 mm.

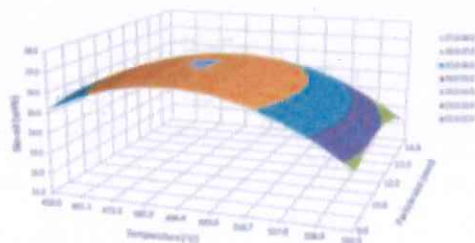


Fig 1 Effect of temperature and particle size of coconut shell on bio-oil yield

TABLE V  
PARAMETER ESTIMATES AND THE STATISTICAL RESULTS  
OF RSM APPROXIMATION WITH CATALYST

| Term                          | Value     | p-value | Summary                               |
|-------------------------------|-----------|---------|---------------------------------------|
| Constant                      | -190.53   | 0.00609 |                                       |
| X <sub>4</sub>                | 0.863     | 0.00270 |                                       |
| X <sub>5</sub>                | 2.828     | 0.07856 |                                       |
| X <sub>6</sub> <sup>2</sup>   | -0.000878 | 0.00244 | R <sup>2</sup> = 0.863                |
| X <sub>5</sub> <sup>2</sup>   | -0.110    | 0.08470 | R <sub>adj</sub> <sup>2</sup> = 0.761 |
| X <sub>6</sub> <sup>2</sup>   | 0.226     | 0.06903 |                                       |
| X <sub>5</sub> X <sub>6</sub> | -0.136    | 0.01486 |                                       |

The temperature was found to be the most important significant independent variable that affected the yield of bio-oil for catalytic pyrolysis that the p-value is less than others shown as table V.

### IV. CONCLUSION

Bio-oils were produced from pyrolysis of coconut shell in a fixed-bed reactor by using HZSM-5 zeolite as a catalyst at different parameter such as temperature, flow rate of N<sub>2</sub>, particle size of coconut shell and amount of catalyst. The results for pyrolysis, without catalyst show that the flow rate of N<sub>2</sub> was not significant. For catalytic pyrolysis, the temperature was the most significance independent variable for optimize the bio-oil yields.

### ACKNOWLEDGMENT

This research was supported the materials and financial by the graduate school of Prince of Songkla University, Songkhla Thailand

### REFERENCES

- [1] Peter A. (2009). "Biomass Pyrolysis Processes: Review of Scope, Control and Variability." UK Biochar Research Centre, 5.
- [2] A.V. Bridgwater, S. Czernik, "The status of biomass fast pyrolysis. In Fast Pyrolysis of Biomass," Ed. CPL Press: Newbury, UK, vol 2, 2002
- [3] Tritti Siengchuan, Mathew Isenberg, Steven S.C. (2013). "Fast pyrolysis of coconut biomass – An FTIR study." Fuel, 105, 559-565.
- [4] Faisal Abuissa, W.M.A. Wan daud, W.N.W. Husin, J.N. Sahu (2011). "Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process." Biomass Bioener., 35, 1863-1872.
- [5] F.G. Hasan (2002). "The production and evaluation of bio-oils from the pyrolysis of sunflower-oil cake." Biomass and bioenergy, 23, 307-314.
- [6] W.T Tsai (2006). "Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor." J. Anal. Appl. Pyrolysis., 76, 230-237.
- [7] S. Sensoz (2006). "Bio-oil production from soybean (Glycine max L.); fuel properties of Bio-oil." Industrial Crops and Products, 23, 99-105.
- [8] L. Siyi (2013). "Bio-oil production by pyrolysis of biomass using hot blast furnace slag." Renewable Energy, 50, 373-377.
- [9] W. Huang, "Production of light olefins by catalytic conversion of lignocellulosic biomass with HZSM-5 zeolite impregnated with 6 wt.% lanthanum." Bioresource Technology 121, 2012, pp 248-144.
- [10] Faisal Abuissa, W.M.A. Wan daud, W.N.W. Husin, J.N. Sahu (2011). "Utilization possibilities of palm shell as a source of biomass energy in Malaysia by producing bio-oil in pyrolysis process." Biomass Bioener., 35, 1863-1872.
- [11] Natthagratt P. Organic liquid product from catalytic cracking of refined palm oil. The 5<sup>th</sup> PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET), Phuket, May 2-3, 2011. Prince of Songkla University, Faculty of Engineering Hat Yai, Songkhla, Thailand 90112.

International Conference on Biological, Chemical and Environmental Sciences (BCES-2014) Jan. 21-22, 2014 Patong Beach, Phuket (Thailand)

- [12] Myers RH, Montgomery DC, Anderson-Cook CM. Response surface methodology. Process and product optimization using designed experiments. 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons, Inc.; 2009

**Puttiphon Kongnuan** was born in Satun, Thailand, in 1990. She received the B.Eng. degree at Chemical Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand in 2012.

**Sukritthira Ratanawilai** received the B.Eng. at Chemical Engineering, Prince of Songkla University, Thailand, the M.S. at Chemical Engineering, Colorado School of Mines, USA and Ph.D. at Chemical Engineering, Colorado School of Mines, USA.

She joined the Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand as an Assistant Professor.

Her current research interest in Catalyst development for biodiesel production, methyl and ethyl ester, Catalytic cracking for biogasoline and Application of adhesive from eposized natural rubber.



C0114053



**IICBE INT'L CONFERENCE**  
www.iicbe.org

*Certificate of Participation*

*This Certificate is awarded to  
Puttiphon Kongnum*

*Master Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,  
Prince of Songkla University, Thailand*

*for Paper Titled*

*Catalytic pyrolysis of coconut shell for bio-oil*

*in technical presentation, recognition and appreciation of research contributions to  
International Conference on Biological, Chemical and Environmental  
Sciences (BCES-2014)*



Jan. 21-22, 2014  
Patong Beach, Phuket (Thailand)

## ประวัติผู้เขียน

|              |                                       |                          |                     |
|--------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| ชื่อ สกุล    | นางสาวพุทธิพร คงนุ่น                  |                          |                     |
| รหัสประจำตัว | 5510120117                            |                          |                     |
| วุฒิการศึกษา |                                       |                          |                     |
|              | วุฒิ                                  | ชื่อสถาบัน               | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
|              | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต<br>(วิศวกรรมเคมี) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2554                |

## ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ทุนการศึกษาโครงการปริญญาตรี-โท 5 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และทุน  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

## การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Puttiphon Kongnum and Sukritthira Ratanawilai. 2014. Catalytic Pyrolysis of Coconut Shell for Bio-oil. IICBE International Conference on Biological Chemical and Environmental Sciences (BCES), Phuket, Jan. 21-22, 2014. Prince of Songkla University, Faculty of Engineering Hatyai, Songkhla, Thailand 90112.