

การสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคด้วย
ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์
ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

SYNTHESIS OF BIOFUELS FROM NON EDIBLE OILS BY
ACTIVATED CARBON AND Fe/ACTIVATED CARBON CATALYSTS
IN A BATCH REACTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2557

KMITL-2014-EN-M-220-019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF BIOFUELS FROM NON EDIBLE OILS BY
ACTIVATED CARBON AND Fe/ACTIVATED CARBON CATALYSTS
IN A BATCH REACTOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KMITL-2014-EN-M-220-019



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้ KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

Thesis Title Synthesis of Biofuels from Non Edible Oils by Activated Carbon and Fe/Activated Carbon Catalysts in a Batch Reactor

นักศึกษา นายภาณุวัฒน์ จำปาศรี

รหัสประจำตัว 55614806

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-220-019

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ | | ลายมือชื่อ |
|--------------------------|------------------------|--|
| ดร.นริศรา | ทองบุญชู |  |
| ดร.สันติ | วัฒนานุสรณ์ |  |
| ศ.ดร.ธราพงษ์ | วิฑิตสานต์ |  |
| ดร.กุลนันท์ | เกียรติกิตติพงษ์ |  |
| รศ.ดร.อัญชลีพร | วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2556 เวลา 08.30-10.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร CCA ชั้น 4 ห้องประชุมสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อ (ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์) ในด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
คนบตี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2556

| | |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ |
| นักศึกษา | นายภาณุวัฒน์ จำปาศรี |
| รหัสประจำตัว | 55614806 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเคมี |
| พ.ศ. | 2557 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะภายใต้ความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ชนิดของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค (น้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป) ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (คาร์บอนกัมมันต์ (AC) และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ (Fe/AC)) อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 1 และ 5 wt% (1-wt% Fe/AC และ 5-wt% Fe/AC) อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค 0.5, 1.0 และ 1.5 wt% (0.05, 0.10 และ 0.15 กรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค 10 กรัม) อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 390, 415 และ 440 องศาเซลเซียส และเวลาทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที ผลลัพธ์เชิงปริมาณพิจารณาจากผลได้ของของเหลว (Liquid yield) สูงที่สุด และเชิงคุณภาพคือของเหลวที่ได้มีปริมาณเนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์เบาสูงที่สุด การวิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวใช้แก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph) ตามมาตรฐาน ASTM D2887 พบว่าการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคทั้งสามชนิดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเดียวกันได้ผลใกล้เคียงกัน ภาวะที่เหมาะสมต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ คือ อุณหภูมิและเวลาทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส และ 30 นาที ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา AC 0.5 wt% และ 1-wt% Fe/AC 0.5 wt% สำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วย AC 0.5 wt% ได้ส่วนที่เป็นแก๊ส ของเหลว และของแข็ง เท่ากับ 12.36, 84.95 และ 2.69 wt% ตามลำดับ ส่วนกรณีของ 1-wt% Fe/AC 0.5 wt% ได้ 6.58, 89.63 และ 3.79 wt% ตามลำดับ องค์ประกอบในของเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปประกอบด้วยเนฟทา 7.76–12.52 เคโรซีน 8.09–10.95 แก๊สออยล์เบา 25.45–27.01 แก๊สออยล์หนัก 5.08–9.22 และกากน้ำมันหนัก 31.95–36.92 wt% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบที่พบก่อนการแตกตัว กล่าวได้ว่า คาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่มีรูพรุนแบบ micropore สามารถแตกโมเลกุลของกากน้ำมันหนักและแก๊สออยล์หนักในน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคเป็นองค์ประกอบที่มีมูลค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-----------------------|---|
| Thesis | Synthesis of Biofuels from Non Edible Oils by Activated Carbon and Fe/Activated Carbon Catalysts in a Batch Reactor |
| Student | Mr. Panuwat Jumpasri |
| Student ID. | 55614806 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Chemical Engineering |
| Year | 2014 |
| Thesis Advisor | Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum |

ABSTRACT

This research synthesized biofuels by cracking of non edible oils in a batch reactor at a constant hydrogen pressure of 1 barg. Several parameters were investigated: types of non edible oils (Tung oil, Jatropha oil and Rapeseed oil), types of catalysts (AC and Fe/AC), weight ratios of Fe on activated carbon 1 and 5 wt% (1-wt% Fe/AC and 5-wt% Fe/AC), weight ratios of catalyst to non edible oil of 0.5, 1.0 and 1.5 wt% (0.05, 0.10 and 0.15 g catalyst : 10 g non edible oil), reaction temperature of 390, 415 and 440 °C and reaction time of 30, 45 and 60 minutes. The quantitative results in terms of the maximum liquid yield, and the qualitative results in terms of the highest amount of naphtha, kerosene and light gas oils were considered. The compositions in liquid fraction were analyzed by the simulated distillation gas chromatograph based on ASTM D2887. The results of cracking of non edible oils by using the same catalyst were not significantly different. The optimum conditions were reaction temperature of 390 °C and reaction time of 30 min by using AC 0.5 wt% and 1-wt% Fe/AC 0.5 wt%. Cracking of Tung oil by AC 0.5 wt%, gas, liquid and solid fractions were found to be 12.36, 84.95 and 2.69 wt%, respectively. In the case of 1-wt% Fe/AC 0.5 wt%, gas, liquid and solid fractions of 6.58, 89.63 and 3.79 wt% were obtained. The compositions of liquid fraction from Tung oil, Jatropha oil and Rapeseed oil cracking consisted of naphtha 7.76 – 12.52, kerosene 8.09 – 10.95, light gas oils 25.45 – 27.01, heavy gas oils 5.08 – 9.22 and long residue 31.95 - 36.92 wt%. Compared with the compositions of non edible oils before cracking, it can be concluded that AC and Fe/AC catalysts having microporous structure are suitable for cracking long residue and heavy gas oils in non edible oils to more valuable components.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร. ธารพงษ์ วิทิตสานต์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาจารย์ ดร. ปิยะนาถ สมมณี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้ ให้แนวทางและความช่วยเหลือในการแก้ปัญหา สำหรับการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ศูนย์การเรียนรู้และบริการวิชาการเครือข่ายแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือ อุปกรณ์ และสถานที่ทำวิจัย

ขอบพระคุณอาจารย์ ดร. นริศรา ทองบุญชู อาจารย์ ดร. สันติ วัฒนานุกรณ์ และอาจารย์ ดร. กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

คุณความดีและประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ขอมอบให้แต่บิดา มารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ครูและคณาจารย์ทุกท่านที่อบรม สั่งสอน และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ รวมทั้งผู้มีพระคุณที่ไม่ได้กล่าวนาม หากวิทยานิพนธ์นี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

ภาณุวัฒน์ จำปาศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| สารบัญรูป..... | XI |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 7 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 7 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ..... | 7 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 8 |
| 2.1 สถานการณ์พลังงานของโลกและประเทศไทยและนโยบายพลังงานของประเทศ..... | 8 |
| 2.2 ชีวมวล..... | 10 |
| 2.2.1 วิธีการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน..... | 12 |
| 2.3 เชื้อเพลิงชีวภาพ..... | 18 |
| 2.4 น้ำมันพืช..... | 20 |
| 2.4.1 น้ำมันตุง..... | 23 |
| 2.4.2 น้ำมันสบู่ดำ..... | 24 |
| 2.4.3 น้ำมันเมล็ดเรป..... | 26 |
| 2.5 คาร์บอนกัมมันต์..... | 27 |
| 2.5.1 กระบวนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์..... | 27 |
| 2.5.2 โครงสร้างทางกายภาพของคาร์บอนกัมมันต์..... | 31 |
| 2.5.3 โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์..... | 33 |
| 2.5.4 การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์..... | 35 |
| 2.5.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์..... | 38 |
| 2.5.6 การเคลือบฝังโลหะบนคาร์บอนกัมมันต์..... | 40 |
| 2.6 การแตกตัวด้วยความร้อนและการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 41 |
| 2.7 การแตกตัวของน้ำมันพืชด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 45 |
| 2.8 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม..... | 47 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 48 |
| บทที่ 3 สารเคมี เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง | 53 |
| 3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี..... | 55 |
| 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง..... | 55 |
| 3.3 เครื่องมือวิเคราะห์และโปรแกรมที่ใช้..... | 57 |
| 3.4 วิธีการทดลอง..... | 58 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล | 64 |
| 4.1 สมบัติของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 64 |
| 4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรпок่อนการแตกตัว..... | 64 |
| 4.1.2 อุณหภูมิการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) | 65 |
| 4.1.3 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Autosorb โดยวิธีบรูเนอร์ เอมเมตต์ และเทลเลอร์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด..... | 66 |
| 4.2 การแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ | 68 |
| 4.2.1 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของ น้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์..... | 68 |
| 4.2.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุงต่อ ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการ แตกตัว | 70 |
| 4.2.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบใน ของเหลวที่ได้จากการแตกตัว | 71 |
| 4.2.4 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนกัมมันต์ | 73 |
| 4.3 การแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์..... | 74 |
| 4.3.1 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัว ของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ | 74 |
| 4.3.2 ผลของอัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลว ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง..... | 75 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|-----|
| 4.3.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบใน ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง..... | 76 |
| 4.3.4 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบน คาร์บอนกัมมันต์ | 78 |
| 4.4. การแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันเมล็ดเรปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอน กัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์..... | 79 |
| 4.5. สมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง | 81 |
| 4.6. การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น..... | 82 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 85 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 85 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 85 |
| บรรณานุกรม | 87 |
| ภาคผนวก | 94 |
| ภาคผนวก ก การวิเคราะห์อุณหภูมิการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer..... | 95 |
| ภาคผนวก ข การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัว ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น..... | 96 |
| ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่ง ปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเครื่อง Autosorb | 101 |
| ภาคผนวก ง การวิเคราะห์สมบัติของของเหลวที่ได้จากการแตกโมเลกุลของน้ำมันตุงในการ เป็นเชื้อเพลิง..... | 105 |
| ภาคผนวก จ ตัวอย่างการคำนวณปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัว ของน้ำมันตุงด้วยคาร์บอนกัมมันต์ 0.5 wt% อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ..... | 106 |
| ภาคผนวก ฉ ผลการคำนวณปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวของ น้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป | 108 |
| ภาคผนวก ช ตัวอย่างการคำนวณการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการ แตกตัวจากผลวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลอง การกลั่น..... | 112 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VU อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| ภาคผนวก ข องค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น | 115 |
| ภาคผนวก ฉ การใช้โปรแกรม Design Expert 6.0.10 | 119 |
| ภาคผนวก ฉู มาตรฐาน ASTM D2887 | 123 |
| ประวัติผู้เขียน | 132 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาการแตกตัววัตถุชนิดต่างๆ ด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 4 |
| 2.1 พลังงานจากชีวมวลเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น..... | 13 |
| 2.2 เทคโนโลยีไพโรไลซิส..... | 14 |
| 2.3 ตัวอย่างภาวะของไพโรไลซิสและผลิตภัณฑ์ที่ได้..... | 14 |
| 2.4 เปรียบเทียบภาวะของไพโรไลซิส ลิควิแฟชัน และแกซิฟิเคชัน และผลิตภัณฑ์ที่ได้..... | 16 |
| 2.5 ชนิดของกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืช..... | 22 |
| 2.6 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกรดไขมันในน้ำมันพืชที่ lipid number ต่าง ๆ..... | 22 |
| 2.7 ข้อเปรียบเทียบระหว่างต้นสบูดำกับปาล์มน้ำมัน..... | 24 |
| 2.8 สมบัติของน้ำมันสบูดำและน้ำมันดีเซล..... | 26 |
| 3.1 การกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวปิโตรเลียมตามคาบจุดเดือดตาม มาตรฐาน ASTM D2887..... | 57 |
| 3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์..... | 59 |
| 3.3 จำนวนการทดลองจากการออกแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ สำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุง ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์..... | 60 |
| 3.4 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบน คาร์บอนกัมมันต์..... | 60 |
| 3.5 จำนวนการทดลองจากการออกแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ สำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุง ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์..... | 61 |
| 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันตุง น้ำมันสบูดำ และน้ำมันเมล็ดเรปก่อนการแตกตัว..... | 64 |
| 4.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์..... | 67 |
| 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จาก การแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์..... | 69 |
| 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จาก การแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์..... | 75 |
| 4.5 สมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง..... | 82 |
| 4.6 การแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคนอกจากงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น..... | 84 |
| 5.1 ผลการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบูดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยความร้อนร่วมกับ ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์..... | 86 |

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| ค.1 | ภาวะที่ใช้วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเครื่อง Autosorb.....103 |
| ฉ.1 | ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์.....108 |
| ฉ.2 | ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์.....109 |
| ฉ.3 | ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ.....111 |
| ฉ.4 | ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันเมล็ดเรบด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ.....111 |
| ช.1. | องค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ.....113 |
| ช.1. | ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ.....115 |
| ช.2. | ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ.....116 |
| ช.3. | ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 5-wt% Fe/AC ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ.....116 |
| ช.4. | ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ.....116 |
| ช.5. | ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ.....118 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด X ว่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|--|
| ช.6. | ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันเมสตีลเรปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ118 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 2.1 | สัดส่วนการใช้พลังงานของกลุ่มประเทศ OECD และกลุ่มนอกประเทศ OECD ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 – 2040.....9 |
| 2.2 | วัฏจักรคาร์บอนของการใช้พลังงานจากชีวมวลและพลังงานจากฟอสซิล.....10 |
| 2.3 | องค์ประกอบของชีวมวล.....11 |
| 2.4 | ค่า Atomic O/C ratio และ Atomic H/C ratio ของถ่านหินและชีวมวล.....12 |
| 2.5 | การแปรรูปชีวมวลร่วมกันของไพโรไลซิส ลิกวิแฟกชัน และการเผาไหม้.....16 |
| 2.6 | กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อนเคมีแต่ละวิธี ผลิตภัณฑ์ที่ได้ และการใช้ประโยชน์.....17 |
| 2.7 | กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพยุคที่ 1 จากวัตถุดิบที่ใช้บริโภค และยุคที่ 2 จากวัตถุดิบที่ไม่ใช่บริโภค.....19 |
| 2.8 | โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์.....20 |
| 2.9 | โมเลกุลของกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันพืช.....21 |
| 2.10 | ขั้นตอนการสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ.....25 |
| 2.11 | แผนผังของการผลิตคาร์บอนกัมมันต์.....27 |
| 2.12 | ปฏิกิริยาการคาร์บอนไนซ์.....29 |
| 2.13 | ภาพถ่าย SEM ของไม้ก่อนและหลังการคาร์บอนไนซ์.....29 |
| 2.14 | ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของถ่านชาร์.....30 |
| 2.15 | การเกิดโครงสร้างของแกรไฟต์จากการให้ความร้อน.....32 |
| 2.16 | การเคลื่อนที่ของไอเล็กตรอนในโครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์.....32 |
| 2.17 | โครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์ ก) มุมมองผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ข) มุมมองสัญลักษณ์ของแกรไฟต์.....33 |
| 2.18 | ขนาดของรูพรุนในวัสดุคาร์บอนและเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบขนาดของรูพรุน.....34 |
| 2.19 | หมู่ฟังก์ชันที่พบมากบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์.....34 |
| 2.20 | หมู่ฟังก์ชันที่ทำให้พื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์มีสภาพเป็นกรด.....35 |
| 2.21 | หมู่ฟังก์ชันที่ทำให้พื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์มีสภาพเป็นเบส.....35 |
| 2.22 | ไอโซเทิร์มของการดูดซับ.....36 |
| 2.23 | ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ของสารตั้งต้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา.....38 |
| 2.24 | การแพร่ของสารตั้งต้นจากกระแสน้ำไหลภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยา.....38 |
| 2.25 | การแพร่ของสารตั้งต้นเข้าไปภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา.....39 |
| 2.26 | การดูดซับทางเคมีของสาร A บนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา.....39 |
| 2.27 | การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจากโมเลกุล A ไปเป็น B.....39 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.28 ปฏิกริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกริยา | 45 |
| 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ปริมาตร 70 มิลลิลิตร | 55 |
| 3.2 (ก) ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และ (ข) ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ | 56 |
| 3.3 ชุดอุปกรณ์สำหรับการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ | 56 |
| 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น | 57 |
| 3.5 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ | 58 |
| 4.1 อุณหภูมิการแตกตัวด้วยความร้อนของ (ก) น้ำมันตุง (ข) น้ำมันสบู่ดำ และ (ค) น้ำมันเมล็ดเรป ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer | 65 |
| 4.2 (ก - ข) คาร์บอนกัมมันต์ที่กำลังขยาย 70 เท่า และ 400 เท่า (ค - ง) 1-wt% Fe/AC และ 5-wt% Fe/AC ที่กำลังขยาย 400 เท่า | 67 |
| 4.3 Half-normal probability plot ของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการ แตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกริยาคาร์บอนกัมมันต์ | 69 |
| 4.4 Interaction plot ของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ คาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 และ 1.5 wt% อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส และเวลา 30 และ 60 นาที ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกริยา คาร์บอนกัมมันต์ | 70 |
| 4.5 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของ น้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกริยาคาร์บอนกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว | 71 |
| 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการ แตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกริยาคาร์บอนกัมมันต์ 0.5 wt% ที่เวลา 30 นาที และ ความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว | 72 |
| 4.7 ผลของเวลาต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัว ของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกริยาคาร์บอนกัมมันต์ 0.5 wt% ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว | 73 |
| 4.8 Cube plot แสดงร้อยละผลได้ของของเหลวที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ต่อ น้ำมันตุง 0.5 และ 1.5 wt% อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส และเวลา 30 และ 60 นาที | 73 |
| 4.9 Half-normal probability plot ของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการ แตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ | 74 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.10 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว | 76 |
| 4.11 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% ที่เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว | 77 |
| 4.12 ผลของเวลาต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว | 78 |
| 4.13 Cube plot แสดงร้อยละผลได้ของของเหลวที่อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 1 และ 5 wt% อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 และ 1.5 wt% อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส และเวลา 30 และ 60 นาที | 79 |
| 4.14 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ | 80 |
| 4.15 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% | 81 |
| ข.1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี | 96 |
| ข.2 ค่า retention time ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน | 98 |
| ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ retention time ของสารมาตรฐานไฮโดรคาร์บอน | 98 |
| ข.4 โครมาโทแกรมจากการแยกองค์ประกอบของของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี | 100 |
| ข.5 การกระจายตัวตามคาบจุดเดือดขององค์ประกอบในของเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 | 100 |
| ค.1 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ | 103 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| ค.2 | ไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC..... | 104 |
| ค.3 | ไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยา 5-wt% Fe/AC..... | 104 |
| ช.1 | ตัวอย่างกราฟแสดงการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมัน ตุ้งด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อม ซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 (ใช้ 1-wt% Fe/AC อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ)..... | 112 |
| ฅ.1 | ตัวเลือกสำหรับออกแบบ 2-Level Factorial Design ของโปรแกรม Design Expert..... | 119 |
| ฅ.2 | หน้าต่างกำหนดตัวแปรที่ศึกษาก่อนวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert | 119 |
| ฅ.3 | ตัวอย่างการกรอกข้อมูลลงในหน้าต่างกำหนดตัวแปรที่ศึกษา..... | 120 |
| ฅ.4 | หน้าต่างกำหนด Response ของการทดลอง..... | 120 |
| ฅ.5 | วิธีการกรอกข้อมูลลงในหน้าต่างจำนวนการทดลองที่ต้องทำ..... | 121 |
| ฅ.6 | วิธีเลือก Response ที่ต้องการวิเคราะห์..... | 121 |
| ฅ.7 | ตัวอย่างกราฟ Half-normal probability plot ที่ใช้โปรแกรม Design Expert วิเคราะห์ผล | 122 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

วิกฤตการณ์พลังงานโลกและความผันผวนของราคาน้ำมันดิบ ทำให้หลายประเทศตระหนักถึงความจำเป็นในการหาแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีศักยภาพและยั่งยืนที่สามารถทดแทนแหล่งพลังงานจากน้ำมันดิบเพื่อความมั่นคงทางพลังงาน สำหรับประเทศไทยซึ่งต้องพึ่งพาพลังงานจากการนำเข้าน้ำมันดิบ รัฐบาลโดยกระทรวงพลังงานได้จัดทำแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ.2555-2564) (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2012-2021) เพื่อส่งเสริมสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเป็นร้อยละ 25 ของการใช้พลังงานขั้นต้นทั้งประเทศ โดยนำพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานจากชีวมวล (Biomass) มาผลิตไฟฟ้าทดแทนแก๊สธรรมชาติ และนำเชื้อเพลิงชีวภาพต่างๆ มาใช้ทดแทนน้ำมันในภาคขนส่ง (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2556)

เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) เป็นเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์ที่เป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานทดแทนที่ผลิตได้จากชีวมวล เช่น พืชน้ำมัน น้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโกลิน น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว เศษวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ทะลายปาล์ม ดังนั้นจึงเหมาะสมสำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม เชื้อเพลิงชีวภาพยังอาจผลิตได้จากเศษวัสดุและของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย พลาสติกที่ใช้แล้ว น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว เป็นต้น (ศิริรัตน์ จิตการคำ. 2552; วรรณุช แจงสว่าง. 2551) เชื้อเพลิงชีวภาพอาจได้จากการแตกโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโกลิน น้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยความร้อน (Thermal cracking or Pyrolysis) การแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) หรือการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Thermal and catalytic cracking) (Speight, J.G. 2011; Basu, P. 2010; Maher, K.D. and Bressler, D.C. 2007; นคร ทิพวงศ์. 2553) องค์ประกอบโมเลกุลที่มีค่าในของเหลวที่ได้จากการแตกตัว เช่น แนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา ทั้งนี้การใช้วัตถุดิบจากพืชที่ใช้บริโกลินนั้นต้องคำนึงถึงการจัดแบ่งสัดส่วนให้เหมาะสมต่อการใช้บริโกลินและการใช้สำหรับผลิตพลังงาน รวมทั้งต้องวางแผนและจัดการกำหนดพื้นที่ในการเพาะปลูกทั้งพืชที่ใช้บริโกลิน พืชที่ให้น้ำมันที่ไม่ใช่บริโกลิน และพืชชนิดอื่นๆ ผลกระทบทางตรงจากการใช้พืชที่ใช้บริโกลินในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพคือทำให้ราคาอาหารปรับตัวสูงขึ้น ผลกระทบทางอ้อม เช่น การแทรกแซงราคาสินค้าทางการเกษตรโดยภาครัฐเพื่อแก้ปัญหาราคาที่ตกต่ำ ทำให้ผู้ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพต้องแบกรับภาระต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้น (สุรเกียรติ์ จักรธรานนท์. 2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากสารตั้งต้นประเภทน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค เช่น น้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปจึงเป็นทางเลือกที่น่าทำหาย

ต้นน้ำมันตุงเป็นไม้ป่าโตเร็ว ขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ทนต่อสภาพภูมิอากาศ ขอบแสงแดด ให้ผลผลิตต่อไร่ค่อนข้างสูงภายใน 3 - 4 ปี เมื่อโตเต็มที่ คือประมาณ 1,200-1,500 กิโลกรัมต่อไร่ เนื้อภายในเมล็ดมีปริมาณน้ำมันสูงถึงร้อยละ 60 - 70 ค่าความร้อน (Heating value) ของน้ำมันตุงประมาณ 39.07 เมกะจูลต่อกิโลกรัม มีค่าความร้อนใกล้เคียงกับน้ำมันเตาที่ได้จากน้ำมันปิโตรเลียม คือ 40.87 ± 0.94 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แต่ค่าความหนืดของน้ำมันตุงสูงมากถึง 91.16 เซนติสโตก (cSt) จึงไม่สามารถใช้กับเครื่องยนต์ของรถยนต์ ถ้าไม่ได้ทำการแตกโมเลกุล สำหรับต้นสบู่ดำเป็นพืชที่ปรับตัวเข้ากับสภาพแห้งแล้งได้ดี ให้ผลผลิตมากที่สุดภายใน 3 ปี (มากกว่า 800 กิโลกรัมต่อไร่) เมื่อปลูกในประเทศไทยผลผลิตต่อไร่ของต้นสบู่ดำต่ำกว่าต้นน้ำมันตุง 1 - 2 เท่า ทำให้ต้นทุนในการเพาะปลูกและเก็บเกี่ยวสูง ส่วนต้นเมล็ดเรปเป็นพืชเมืองหนาว ไม่เหมาะที่จะปลูกในประเทศไทยซึ่งมีภูมิอากาศร้อนชื้น ในทวีปยุโรปส่วนใหญ่ใช้น้ำมันเมล็ดเรปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซล (Nicolas, C. et al. 2013; Waterlox Coatings Corporation. 2011; Organisation for Economic Co-operation and Development. 1997)

งานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป สรุปโดยสังเขปดังนี้ (รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1.1)

รวีวรรณ สวัสดิ์รักษา (2552) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM5 ได้ของเหลว 60.50 wt% ซึ่งประกอบด้วยเนฟทา 38.35 wt% แก๊สออยล์เบา 17 wt%

Ramya, G. et al. (2012) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM5 และ AlMCM-41 ได้ของเหลว 29 และ 39 wt% ตามลำดับ

ชุตติมาพร วรรณวงษ์ (2556) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้ว ได้ของเหลว 85.37 wt% ประกอบด้วยเนฟทา 10.36 wt% แก๊สออยล์เบาและแก๊สออยล์หนักรวม 44.82 wt%

Junming, X. et al. (2010) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันตุงและน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ของเหลวที่ได้ 76 - 81 wt%

ธนาทิพย์ ศรีสูงค์ (2554) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ MgO ได้ของเหลว 37 - 39 wt% ซึ่งประกอบด้วยเนฟทาประมาณ 19-21 wt%

ภาณุพันธ์ พรหมบุตร (2556) สังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Fluid catalytic cracking catalyst (FCC) ที่ใช้แล้ว ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ภายใต้บรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ผลการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคทั้งสามชนิดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิและเวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด คือ 390 องศาเซลเซียส และ 30 นาที ปริมาณของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้ว 1 wt% เท่ากับ 78.00 wt% ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา CaO 3 wt% เท่ากับ 76.50 wt% และด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา MgO 1 wt% เท่ากับ 77.22 wt% องค์ประกอบในของเหลวที่ได้ประกอบด้วย แนฟทา 8.72 - 12.68 เคโรซีน 9.69 - 12.05 แก๊สออยล์เบา 22.95 - 23.66 แก๊สออยล์หนัก 4.43 - 4.78 และกากน้ำมันหนัก (Long residue หรือ Residue) 26.52 - 30.72 wt%

Buzetzi, E. et al. (2011) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันเมล็ดเรปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM5 ได้ของเหลว 77 wt%

จากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา เห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM5, FCC ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ MgO ค่อนข้างเหมาะสมสำหรับการแตกโมเลกุลขนาดใหญ่ของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนใจศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันตุง น้ำมันสบูดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะภายใต้บรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งช่วยกระตุ้นการแตกโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอน และเพิ่มความเสถียรให้กับของเหลวที่ได้ นอกจากนี้การเติมแก๊สไฮโดรเจนจะช่วยกำจัดโค้กที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Basu, P. 2010; ธารพงษ์ วิทิตสานต์. 2554) คาร์บอนกัมมันต์มีความน่าสนใจเพราะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาถูก มีรูพรุนแบบ micropore มีพื้นที่ผิวสูงประมาณ 500 ตารางเมตรต่อกรัม จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาคาร์บอนกัมมันต์สามารถแตกโมเลกุลขนาดใหญ่ แม้ว่าส่วนใหญ่จะไม่ใช่น้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค เช่น ใช้แตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว (ศิริธิดา อินสุข. 2547; ประชาธรัตน์ แต่ภักดี. 2547; จินตนา สุมารินทร์. 2549; วิชชากร จารุศิริ. 2551) ได้ของเหลวจากการแตกตัวสูง 57.21 - 75.65 wt% ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นแก๊สออยล์เบาประมาณ 11.27 - 21.68 wt% Li, M. et al. (2007) และ Tran, T.V. et al. (2012) ใช้คาร์บอนกัมมันต์กับน้ำมันเตาและกากจากกันหอกลั่นสุญญากาศ ปีหมา ชูช่วย (2544) และ Lothongkum A.W. et al. (2013) ศึกษาการใช้คาร์บอนกัมมันต์แตกโมเลกุลของพลาสติก วิชชากร จารุศิริ (2551) และประชาธรัตน์ แต่ภักดี (2547) ศึกษาการใช้คาร์บอนกัมมันต์แตกโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

ดังนั้นตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (คาร์บอนกัมมันต์ (AC) และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ (Fe/AC)) อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 1 และ 5 wt% (1-wt% Fe/AC และ 5-wt% Fe/AC) อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืช 0.5, 1.0 และ 1.5 wt% (หรือ 0.05, 0.10 และ 0.15 กรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืช 10 กรัม) อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 390, 415 และ 440 องศาเซลเซียส และเวลาทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาการแตกตัววัตถุดิบชนิดต่างๆ ด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา

| | รวิวรรณ สวัสดิ์รักษา (2552) | Ramya, G. et al. (2012) | | ชุตินาพร วรรณวงษ์ (2556) | Junming, X. et al. (2010) | ธนาทิพย์ ศรีสูงศักดิ์ (2554) | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|--|--|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------|-------|-------|
| เครื่องปฏิกรณ์ | แบบกะ | แบบเบดบรรจุ | | แบบกะ | แบบต่อเนื่อง | | แบบกะ | | |
| สารตั้งต้น | น้ำมันสุปุด้า | น้ำมันสุปุด้า | | น้ำมันสุปุด้า | น้ำมันตุง | | น้ำมันตุง | | |
| ตัวเร่งปฏิกิริยา | H-ZSM5 | H-ZSM5 | AlMCM-41 | FCC ที่ใช้แล้ว | CaO | CaO | CaO | MgO | |
| ปริมาณสารตั้งต้น (g) | 20 | n/a | n/a | 10 | n/a | n/a | 20 | 20 | |
| อัตราการป้อนสารตั้งต้น | - | 4.6 h ⁻¹ (WHSV) | 4.6 h ⁻¹ (WHSV) | - | 50 g/h | 50 g/h | - | - | |
| ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารตั้งต้น (wt%) | 6.35 | 5 g _{cat} ·g _{oil} ⁻¹ | 5 g _{cat} ·g _{oil} ⁻¹ | 1 | 3 | 5 | 2.5 | 2.5 | |
| อุณหภูมิ (°C) | 426 | 400 | 400 | 410 | 450 - 500 | 450 - 500 | 440 | 402 | |
| เวลา (min) | 56 | 60 | 60 | 30 | n/a | n/a | 38 | 30 | |
| ความดันของแก๊สไฮโดรเจน (barg) | 6.8 | n/a | n/a | 1 | n/a | n/a | 1 | 1 | |
| ปริมาณของเหลวที่ได้ (wt%) | 60.50 | 29 | 39 | 85.37 | 81 | 76 | 37.55 | 38.83 | |
| องค์ประกอบ ในของเหลวที่ได้ (wt%) | แนฟทา | 38.35 | n/a | 18.33 | 10.36 | n/a | n/a | 19.16 | 21.43 |
| | เคโรซีน | 0.31 | n/a | 6.63 | 6.06 | n/a | n/a | 11.58 | 8.37 |
| | แก๊สออยล์เบา | 16.44 | n/a | 14.04 | 44.82 | n/a | n/a | 5.71 | 8.01 |
| | แก๊สออยล์หนัก | 1.56 | n/a | n/a | | n/a | n/a | n/a | n/a |
| | กากน้ำมันหนัก | 3.84 | n/a | n/a | 24.13 | n/a | n/a | n/a | n/a |
| ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น (%) | 93.62 | 62 | 65 | n/a | n/a | n/a | n/a | n/a | |

หมายเหตุ n/a คือ not available (ไม่ได้ระบุไว้ในบทความ)

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาการแตกตัววัตถุดิบชนิดต่างๆ ด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (ต่อ)

| | | ภาณพันธ์ พรหมบุตร (2556) | | | | | | | | | Buzetcki, E. et al. (2011) | ศิวธิตา อินสุข (2547) | วิชชากร จารุศิริ (2551) |
|-------------------------------------|---------------|--------------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|----------------|-------|-------|----------------------------|----------------------------------|---|
| เครื่องปฏิกรณ์ | | แบบกะ | | | | | | | | | แบบกะ | แบบกะ | แบบต่อเนื่อง |
| สารตั้งต้น | | น้ำมันตุง | | | น้ำมันสุญ่ดำ | | | น้ำมันเมล็ดเรป | | | น้ำมัน เมล็ดเรป | น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และ ABS | น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และ โพรพิลีน |
| ตัวเร่งปฏิกิริยา | | FCC ที่ใช้แล้ว | CaO | MgO | FCC ที่ใช้แล้ว | CaO | MgO | FCC ที่ใช้แล้ว | CaO | MgO | H-ZSM5 | 5- wt% Fe/AC | 5- wt% Fe/AC |
| ปริมาณสารตั้งต้น (g) | | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | n/a | 15 | - |
| อัตราการป้อนสารตั้งต้น | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1.23 g/min |
| ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารตั้งต้น (wt%) | | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | 10 | 2.5 | n/a |
| อุณหภูมิ (°C) | | 390 | 390 | 390 | 390 | 390 | 390 | 390 | 390 | 390 | 350-440 | 450 | 550 |
| เวลา (min) | | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 78 | 90 | - |
| ความดันของแก๊สไฮโดรเจน (barg) | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | n/a | 6.89 | n/a |
| ปริมาณของเหลวที่ได้ (wt%) | | 78.00 | 76.50 | 77.22 | 78.84 | 77.89 | 77.13 | 77.80 | 76.81 | 76.10 | 77 | 60.52 | n/a |
| องค์ประกอบในของเหลวที่ได้ (wt%) | แนฟทา | 12.68 | 9.95 | 8.72 | 12.88 | 10.16 | 10.09 | 13.39 | 11.49 | 12.59 | n/a | 38.60 | 50.95 |
| | เคโรซีน | 10.73 | 12.05 | 9.69 | 7.78 | 11.95 | 9.46 | 7.27 | 10.16 | 10.90 | n/a | 7.14 | 10.38 |
| | แก๊สออยล์เบา | 23.40 | 22.95 | 23.66 | 25.43 | 25.45 | 22.63 | 22.44 | 25.40 | 22.17 | n/a | 12.20 | 21.68 |
| | แก๊สออยล์หนัก | 4.67 | 4.78 | 4.43 | 8.33 | 3.88 | 4.39 | 6.41 | 2.82 | 4.76 | n/a | 1.40 | 10.92 |
| | กากน้ำมันหนัก | 26.52 | 26.77 | 30.72 | 24.42 | 26.45 | 30.56 | 28.29 | 29.50 | 25.68 | n/a | 3.15 | 16.99 |
| ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น (%) | | 66.28 | 65.89 | 62.00 | 63.73 | 66.41 | 61.30 | 62.49 | 64.21 | 66.29 | n/a | n/a | n/a |

หมายเหตุ (1) n/a คือ not available (ไม่ได้ระบุไว้ในบทความ) (2) AC = Activated carbon

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาการแตกตัววัสดุชนิดต่างๆ ด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (ต่อ)

| | จินตนา สุมารินทร์ (2549) | ประชารัตน์ แต่ภักดี (2547) | พิรพจน์ เพทายพนากิจ และคณะ (2555) | Li, M. et al. (2007) | Tran, T.V. et al. (2012) | ปัทมา ชูช่วย (2544) | Lothongkum A.W. et al. (2013) | |
|--|----------------------------------|---|--|-------------------------|------------------------------|------------------------|--|-------|
| เครื่องปฏิกรณ์ | แบบท่อ | แบบกะ | แบบกะ | แบบกะ | แบบกะ | แบบกะ | แบบกะ | |
| สารตั้งต้น | น้ำมัน หล่อลื่น ที่ใช้แล้ว | น้ำมัน หล่อลื่นที่ใช้แล้ว PP และ PS | น้ำมัน หล่อลื่นที่ใช้แล้ว | น้ำมันเตา | กากจากกันหอกลิ้น สุญญากาศ | พอลิบิวทีน-1 | น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วผสม พลาสติกที่ใช้แล้ว | |
| ตัวเร่งปฏิกิริยา | Fe/AC | 5- wt% Fe/AC | USY ซีโอไลต์ | Fe/AC | AC | Fe/AC | AC | |
| ปริมาณสารตั้งต้น (g) | - | 15 | 20 | 110 | 45 | 20 | 10 | |
| อัตราการป้อนสารตั้งต้น | 2.77 g/min | - | - | - | - | - | - | |
| ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารตั้งต้น (wt%) | 1 | 0.8 | 1 | 0.11 | 17.78 | n/a | 2.5 | |
| อุณหภูมิ (°C) | 430 - 450 | 430 | 390 | 430 | 400 | 410 | 430 | |
| เวลา (min) | - | 75 | 30 | 60 | 30 | 60 | 30 | |
| ความดันของแก๊สไฮโดรเจน (barg) | n/a | 1 | 3 | 60 | 34.5 | 40 | 1 | |
| ปริมาณของเหลวที่ได้ (wt%) | 57.21 – 57.36 | 75.65 | 68.54 | n/a | n/a | 88.57 | 79.69 | |
| องค์ประกอบใน ของเหลวที่ได้ (wt%) | แนฟทา | 18.81 – 20.31 | 46.34 | 37.25 | 9.13 | 13 | 45.76 | 33.20 |
| | เคโรซีน | 3.96 – 4.01 | 10.22 | 21.50 | n/a | 34.9 | 13.77 | 14.62 |
| | แก๊สออยล์เบา | 11.27 – 11.87 | 11.98 | 14.38 | 31.37 | | 9.59 | 19.72 |
| | แก๊สออยล์หนัก | 2.40 – 2.64 | 2.76 | 15.00 | n/a | 27.1 | 6.89 | 2.49 |
| | กากน้ำมันหนัก | 19.22 – 20.28 | 4.55 | 11.87 | 59.50 | 11.2 | 12.56 | 9.66 |
| ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น (%) | n/a | n/a | n/a | n/a | 69.2 | n/a | n/a | |

หมายเหตุ (1) n/a คือ not available (ไม่ได้ระบุไว้ในบทความ) (2) AC = Activated carbon

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 สังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรบด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์
- 1.2.2 ทหาภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่ได้ปริมาณของเหลวสูงสุด และได้การเลือกเกิดเนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์เบา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาและหาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะภายใต้บรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่
 - ชนิดของสารตั้งต้น ได้แก่ น้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรบ
 - ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ คาร์บอนกัมมันต์ และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์
 - อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 1 และ 5 wt%
 - อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารตั้งต้น 0.5, 1 และ 1.5 wt%
 - อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 390, 415 และ 440 องศาเซลเซียส
 - เวลาทำปฏิกิริยา 30, 45 และ 60 นาที
- 1.3.2 คำนวณปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัว
- 1.3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว และสมบัติการเป็นเชื้อเพลิง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 องค์ความรู้และทางเลือกในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรบ
- 1.4.2 สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่มีราคาถูกและหาได้ง่ายสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

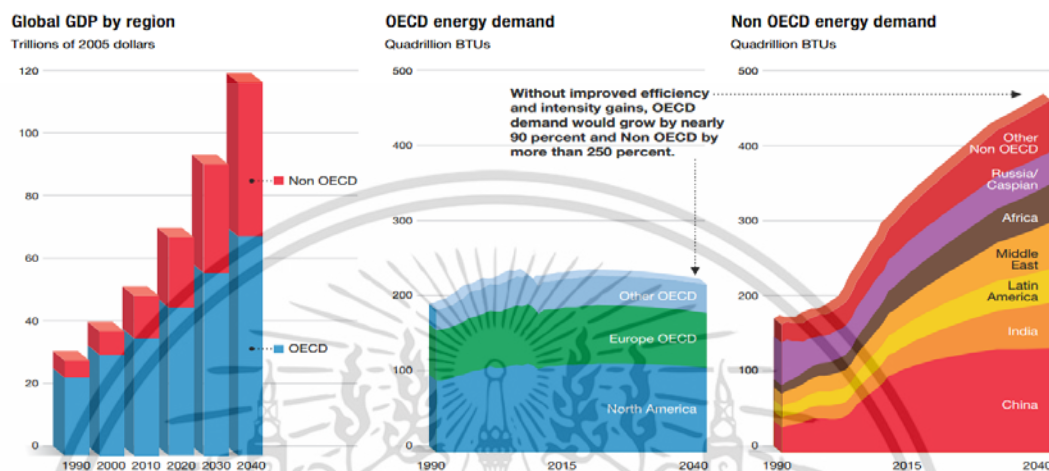
2.1 สถานการณ์พลังงานของโลกและประเทศไทยและนโยบายพลังงานของประเทศ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2549; ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2550; Exxon Mobil. 2012; สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2556; ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน. 2556)

พลังงานทดแทนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ พลังงานทดแทนพลังงานหลักที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งมาจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป หรือพลังงานสิ้นเปลือง เช่น น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน หินน้ำมัน นิวเคลียร์ และพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ได้หรือพลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากชีวมวล (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2549) Exxon Mobil (2012) คาดการณ์ว่าความต้องการใช้พลังงานจากปี ค.ศ. 2030 - 2040 ของกลุ่มประเทศพัฒนาแล้วที่เป็นสมาชิกขององค์การเพื่อความร่วมมือและการพัฒนาทางเศรษฐกิจ (Organization for Economic Co-operation and Development: OECD) เช่น ยุโรปญี่ปุ่น และสหรัฐอเมริกาจะอยู่ในระดับที่ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากประเทศเหล่านี้ตระหนักถึงความสำคัญของพลังงาน และมีระบบการจัดการพลังงานที่มีประสิทธิภาพ ส่วนความต้องการพลังงานของประเทศกำลังพัฒนาที่อยู่นอกกลุ่ม OECD จะเพิ่มขึ้นอย่างก้าวกระโดดเป็น 60% ดังรูปที่ 2.1 สาเหตุเพราะการเพิ่มของประชากรโลกที่คาดว่าจะเพิ่มขึ้นอีก 25 % เป็น 9,000 ล้านคน แหล่งพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในภาคเศรษฐกิจหลัก 4 ประเภท ได้แก่ ภาคการผลิตไฟฟ้า ภาคอุตสาหกรรม ภาคการขนส่ง และภาคที่อยู่อาศัย/ภาคธุรกิจการค้า มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน อย่างไรก็ตามเมื่อเศรษฐกิจพัฒนาจนอยู่ตัว ความต้องการพลังงานถ่านหินจะลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากนโยบายด้านสิ่งแวดล้อมที่รณรงค์ลดการปล่อยคาร์บอนจากถ่านหิน หลายประเทศจึงใช้พลังงานหมุนเวียนทดแทนการใช้พลังงานถ่านหิน ส่วนความต้องการพลังงานน้ำมันและแก๊สธรรมชาติยังคงอยู่ในระดับที่สูง

สำหรับประเทศไทยสำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ (สศช.) รายงานอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจครึ่งปีแรกของปี พ.ศ. 2556 ขยายตัวร้อยละ 4.1 และคาดการณ์ว่าเศรษฐกิจในปี พ.ศ. 2556 จะขยายตัวร้อยละ 3.8 - 4.3 จากด้านการบริโภค และการลงทุน ซึ่งส่งผลต่อสถานการณ์พลังงานในประเทศ ดังนี้ การใช้พลังงานในช่วง 6 เดือนแรกของปี พ.ศ. 2556 เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.4 อยู่ที่ระดับ 2,025 เทียบเท่าพันบาร์เรลน้ำมันดิบต่อวัน การผลิตพลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นต้นอยู่ที่ระดับ 1,107 เทียบเท่าพันบาร์เรลน้ำมันดิบต่อวัน เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.5 เมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปี พ.ศ. 2555 การนำเข้าพลังงานสุทธิอยู่ที่ระดับ 1,145 เทียบเท่าพันบาร์เรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำมันดิบต่อวัน ซึ่งเพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันของปี พ.ศ. 2555 ร้อยละ 4.4 เห็นได้ว่าประเทศไทยจำเป็นต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศถึงประมาณ 51 % ซึ่งนับเป็นภาระของประเทศอย่างยิ่ง ดังนั้นกระทรวงพลังงานจึงกำหนดนโยบายด้านพลังงานของประเทศเพื่อความมั่นคงด้านพลังงานดังนี้



รูปที่ 2.1 สัดส่วนการใช้พลังงานของกลุ่มประเทศ OECD และกลุ่มนอกประเทศ OECD ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1990 – 2040 (Exxon Mobil. 2012)

1. นโยบายความมั่นคงด้านการจัดหาพลังงานเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการพลังงานของประเทศ และลดการพึ่งพาพลังงานจากต่างประเทศ โดยพยายามผลิตและจำหน่ายพลังงานให้เหมาะสม รวมถึงการจัดหาพลังงานหมุนเวียน หรือพลังงานทดแทนอื่นๆ และการใช้แหล่งพลังงานที่หลากหลาย

2. นโยบายด้านการอนุรักษ์พลังงาน การใช้พลังงานมีประสิทธิภาพ การพัฒนาพลังงานทดแทน และกำหนดเป้าหมายให้การใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ส่งเสริมการศึกษาและการวิจัยพัฒนาด้านพลังงาน ทั้งนี้แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2555 - 2564 (Alternative Energy Development Plan: AEDP 2012 - 2021) ได้กำหนดเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนเป็นร้อยละ 25 ของการใช้พลังงานทั้งประเทศ จากการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานจากชีวมวล และพลังงานจากขยะ ผลิตไฟฟ้าแทนการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงและแก๊สธรรมชาติ และส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนประเภทเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น เอทานอล ไบโอดีเซลโดยตรงในภาคการขนส่ง หรือผสมเอทานอลกับน้ำมันแก๊ซอลีนเป็นน้ำมันแก๊ซอล (Gasohol) แทนน้ำมันแก๊ซอลีน ผสมเอทานอลกับน้ำมันดีเซลเป็นน้ำมันดีเซล หรือผสมไบโอดีเซลกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนโดยปริมาตร 2 - 5 เป็นน้ำมัน B2 - B5 แทนน้ำมันดีเซล

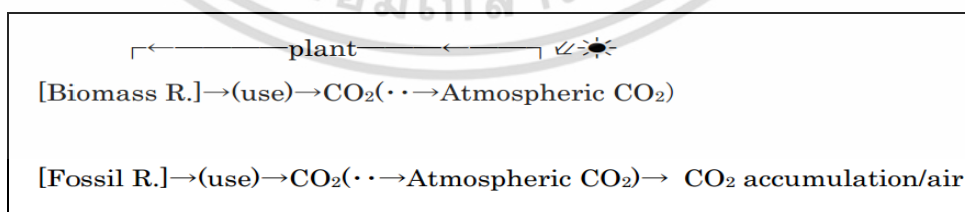
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นโยบายราคาและการปฏิรูปตลาดพลังงาน ส่งเสริมการแข่งขันและเพิ่มบทบาทของภาคเอกชนในกิจการผลิตพลังงานไฟฟ้าและแก๊สธรรมชาติ ให้เกิดการแข่งขันด้านราคาและคุณภาพ เพื่อผู้บริโภคจะมีทางเลือกได้รับบริการที่ดี มีคุณภาพ และราคาที่เป็นธรรม ซึ่งช่วยลดภาระการลงทุนของภาครัฐ

4. นโยบายด้านสิ่งแวดล้อมพลังงาน ให้ความสำคัญกับการป้องกันและแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการผลิตและใช้พลังงาน ส่งเสริมการใช้เชื้อเพลิงสะอาดที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย และส่งเสริมการควบคุมมลพิษ โดยใช้เทคโนโลยีการควบคุมมลพิษที่มีประสิทธิภาพ ภายใต้มาตรฐานที่เหมาะสม รวมทั้งกำหนดมาตรการต่างๆ ที่ลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2.2 ชีวมวล (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. 2550; Speight, J.G. 2011; Basu, P. 2010; Dahlquist, E. 2012; Yogoyama, S. 2008; วรรณช แจงสว่าง, 2551)

เชื้อเพลิงชีวภาพและเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์สามารถลดปัญหาภาวะโลกร้อนซึ่งเกิดจากแก๊สเรือนกระจกโดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันและถ่านหิน แม้ว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลจะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศเช่นกัน แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นี้สามารถหมุนเวียนกลับเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช (Photosynthesis) จึงไม่เกิดการสะสมและถือเป็นการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (Yokoyama, S. 2008) ดังรูปที่ 2.2 เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีชีวมวลมาก เป็นที่ทราบกันว่าชีวมวลได้จากสิ่งมีชีวิตหรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิต สารอินทรีย์ต่าง ๆ พืชที่มีส่วนประกอบของแป้งและน้ำตาล วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร ชีวมวลสามารถให้พลังงานจากกระบวนการแปรรูปทางความร้อน การแปรรูปทางกายภาพ-เคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีโดยอาศัยจุลินทรีย์



รูปที่ 2.2 วัฏจักรคาร์บอนของการใช้พลังงานจากชีวมวลและพลังงานจากฟอสซิล (Yogoyama, S. 2008)

โดยทั่วไปแบ่งชีวมวลได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. ชีวมวลธรรมดา (Conventional biomass) เช่น ไม้ชนิดต่าง ๆ ผลผลิตทางการเกษตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (Biomass waste) เช่น ฟางข้าว กากอ้อย ทะลายปาล์ม กะลามะพร้าว เหง้ามันสำปะหลัง เศษไม้ มูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร และของเสียจากชุมชน

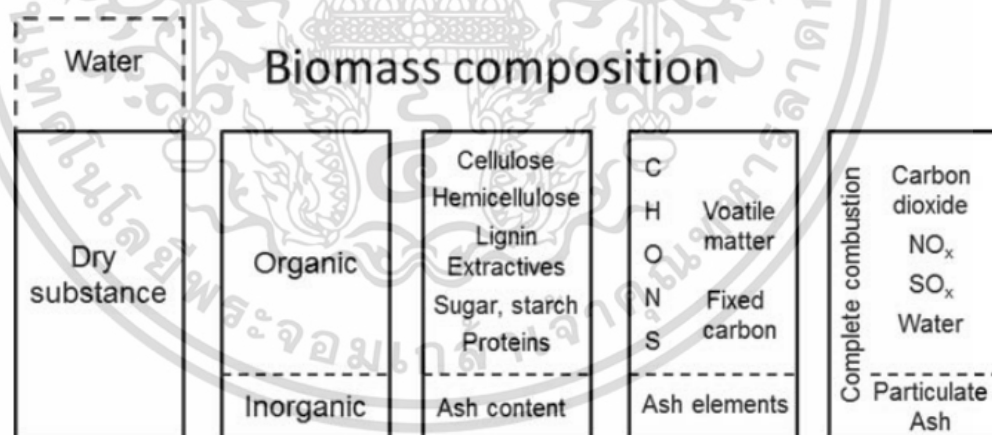
3. ชีวมวลจากการเพาะปลูก (Plantation biomass) คือ พืชชีวมวลที่ปลูกเพื่อใช้ผลิตพลังงาน เช่น ปาล์มน้ำมันเพื่อผลิตไบโอดีเซล การปลูกอ้อยเพื่อผลิตเอทานอล

รูปที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบหลักของชีวมวล 3 ส่วน คือ

1. ความชื้น (Moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในชีวมวล ชีวมวลส่วนใหญ่มีความชื้นค่อนข้างสูงเพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ต้องไล่ความชื้นออกให้เหลือไม่เกิน 50% ก่อนใช้ผลิตพลังงาน เช่น การเผาไหม้ชีวมวลโดยตรงเพื่อผลิตความร้อน (Direct combustion)

2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance) ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เช่น เซลลูโลส แป้ง และน้ำตาล แบ่งออกเป็นส่วนที่ระเหยได้ง่าย (Volatile matters) และส่วนที่เผาไหม้ได้ยาก (Fixed carbon volatiles matters)

3. ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ (Non combustible substance) คือ ส่วนที่เป็นขี้เถ้า (Ash) ที่เกิดจากสารอนินทรีย์ในชีวมวล ชีวมวลส่วนใหญ่มีขี้เถ้าประมาณ 1 – 3 % ยกเว้นแกลบและฟางข้าวมีส่วนที่เป็นขี้เถ้าประมาณ 10 – 20 %



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของชีวมวล (Dahlquist, E. 2012)

เทคโนโลยีพลังงานชีวมวลแบ่งได้ตามแหล่งที่มาของวัตถุดิบ เช่น ขยะมูลฝอยชุมชน มูลสัตว์ น้ำเสีย ของเหลือจากอุตสาหกรรม และอื่นๆ ซึ่งแต่ละวัตถุดิบมีเทคโนโลยีการแปลงพลังงานอยู่หลายเทคโนโลยีที่ต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม

เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

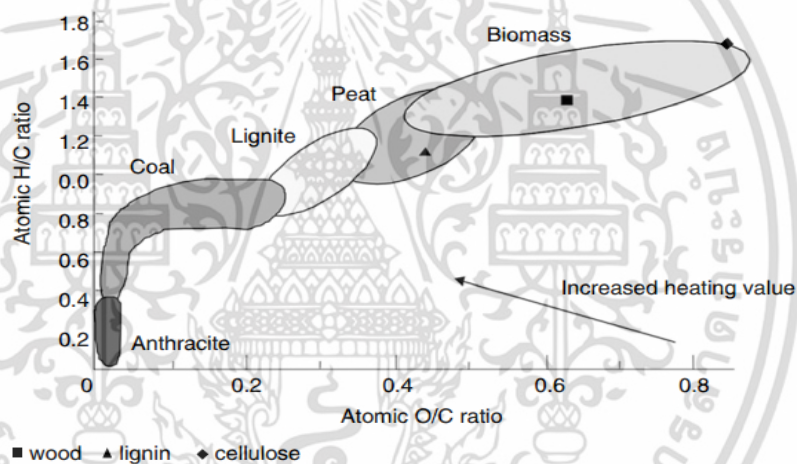
- ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

- แกสซิฟิเคชัน (Gasification)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเผาด้วยความร้อนสูง (Incineration)
- การหมักไร้อากาศ (Anaerobic digestion)
- เชื้อเพลิงแห้งจากขยะมูลฝอย (Refuse derived fuel: RDF)
- แก๊สชีวภาพจากขยะฝังกลบ (Landfill gas)
- เตาเผาถ่านประสิทธิภาพสูง (Carbonization)

ข้อจำกัดของชีวมวล คือ มีสัดส่วนอะตอมของออกซิเจน/อะตอมของคาร์บอน (Atomic O/C ratio) และสัดส่วนอะตอมของไฮโดรเจน/อะตอมของคาร์บอน (Atomic H/C ratio) สูง ดังรูปที่ 2.4 จึงทำให้ชีวมวลมีค่าความร้อนต่ำ ดังนั้นการผลิตพลังงานจากชีวมวลจำเป็นต้องแปรรูปชีวมวลก่อน เช่น ด้วยการเผาไหม้ และการแตกตัวด้วยความร้อนหรือการไพโรไลซิส (Thermal cracking or Pyrolysis) จึงจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความร้อนสูงเหมาะสำหรับเป็นเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.4 ค่า Atomic O/C ratio และ Atomic H/C ratio ของถ่านหินและชีวมวล (Basu, P. 2010)

2.2.1 วิธีการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน (Bridgwater, A.V. and Grassi, G. 1991; Bridgwater, A.V. 2000; Boyle, G. 1996; Basu, P. 2010; Speight J.G. 2011; Lorenzini G., 2010; วรรณุช แจ้งสว่าง. 2551; นคร ทิพยวงศ์. 2553)

การแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน คือ การแตกตัวของสารอินทรีย์ในชีวมวลให้ได้พลังงาน วิธีการแปรรูปชีวมวลแบ่งออกเป็น

1. การแปรรูปทางความร้อนเคมี (Thermochemical conversion) เช่น การเผาไหม้โดยตรง ไพโรไลซิส แกซิฟิเคชัน และลิกวิแฟกชัน เป็นต้น
2. การแปรรูปทางกายภาพ-เคมี (Physico-chemical conversion) เช่น การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การแปรรูปทางชีวเคมี (Biochemical conversion) เช่น กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน กระบวนการหมักเพื่อผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น

การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลโดยใช้ความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจน สารอินทรีย์ในชีวมวลจะเกิดการสันดาปและให้พลังงาน น้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณความชื้นของชีวมวล และอุณหภูมิในการเผาไหม้ เป็นต้น พลังงานที่ได้จากชีวมวลขึ้นอยู่กับประเภทของชีวมวล ดังตัวอย่างที่แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พลังงานจากชีวมวลเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น (วรณูช แจงสว่าง. 2551)

| เชื้อเพลิง | พลังงาน | |
|--------------------|---------------|------------------------|
| | จิกะจูลต่อตัน | จิกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร |
| ไม้ (ความชื้น 20%) | 15 | 10 |
| กระดาษ | 17 | 9 |
| ฟาง | 14 | 1.4 |
| หญ้าสด | 14 | 10 |
| อ้อย | 9 | 1.5 |
| ขยะ | 4 | 3 |
| น้ำมันปิโตรเลียม | 42 | 34 |
| แก๊สธรรมชาติ | 55 | 0.04 |
| ถ่านหิน | 28 | 50 |

ไพโรไลซิส (Pyrolysis) คือ การแตกโมเลกุลของชีวมวลด้วยความร้อนหรือด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 190 องศาเซลเซียส ในภาวะปราศจากออกซิเจนหรือในที่ที่จำกัดและควบคุมปริมาณออกซิเจนให้เหลือน้อยที่สุด ปฏิกิริยาเคมีเป็นแบบย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible chemical reactions) ทำให้โมเลกุลของสารอินทรีย์ในชีวมวลมีขนาดเล็กลง ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็ง (เช่น ถ่านชาร์ และขี้เถ้า (Ash)) ของเหลว (เช่น น้ำมัน น้ำ น้ำมันดิน (Tar)) และแก๊สต่างๆ (เช่น แก๊สไฮโดรคาร์บอน มีเทน ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์) บางครั้งอาจเติมแก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า และทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนที่เติมเข้าไปจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันลดลง สำหรับเทคโนโลยีและคุณลักษณะของไพโรไลซิสชนิดต่างๆ สรุปในตารางที่ 2.2 – 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 เทคโนโลยีไพโรไลซิส (Bridgwater, A.V. and Grassi, G. 1991)

| เทคโนโลยีไพโรไลซิส | เวลาคงอยู่ (Residence time) | อัตราการให้ ความร้อน (Heating rate) | อุณหภูมิ สูงสุด (°C) | ผลิตภัณฑ์หลัก |
|---------------------------|-----------------------------------|---|----------------------------|-------------------------------------|
| Carbonization | Hours - days | ต่ำมาก | 500 | ถ่านชาร์ |
| Conventional pyrolysis | 5 – 30 min | ต่ำ | 600 | น้ำมันชีวภาพ ถ่านชาร์ และแก๊ส |
| Fast pyrolysis | 0.5 – 5 s | ค่อนข้างสูง | 650 | น้ำมันชีวภาพ |
| Flash pyrolysis | | | | น้ำมันชีวภาพ |
| - Liquid | < 1 s | สูง | < 650 | แก๊สเชื้อเพลิง และ |
| - Gas | < 1 s | สูง | < 650 | ผลิตภัณฑ์เคมี |
| Ultra pyrolysis | < 0.5 s | สูงมาก | 1,000 | แก๊สเชื้อเพลิง และ ผลิตภัณฑ์เคมี |
| Vacuum pyrolysis | 2 – 30 s | ปานกลาง | 400 | น้ำมันชีวภาพ |
| Hydropyrolysis | < 10 s | สูง | < 500 | น้ำมันชีวภาพ และ ผลิตภัณฑ์เคมี |
| Methanopyrolysis | < 10 s | สูง | > 700 | ผลิตภัณฑ์เคมี |

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างภาวะของไพโรไลซิสและผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Bridgwater, A.V. and Grassi, G. 1991)

| ตัวแปร | | | Carbonization | Conventional | Flash | |
|---------------|---------|-------------------------|---------------|--------------|-------------|-------------|
| | | | | | อุณหภูมิต่ำ | อุณหภูมิสูง |
| อุณหภูมิ (°C) | | | 300 - 500 | 400 - 600 | 450 - 600 | 700 - 900 |
| ความดัน (bar) | | | 1 | 0.1 - 1 | 1 | 1 |
| ผลิตภัณฑ์ | แก๊ส | Yield, %wt | สูงสุด 150 | สูงสุด 60 | สูงสุด 30 | สูงสุด 80 |
| | | HHV, MJ/Nm ³ | 3 - 6 | 5 - 10 | 10 - 20 | 15 - 20 |
| | ของเหลว | Yield (dry basis), wt% | สูงสุด 25 | สูงสุด 30 | สูงสุด 70 | สูงสุด 20 |
| | | HHV, MJ/Nm ³ | 20 | 20 | 24 | 22 |
| | ของแข็ง | Yield, wt% | สูงสุด 40 | สูงสุด 30 | สูงสุด 15 | สูงสุด 15 |
| | | HHV, MJ/Nm ³ | 30 | 30 | 30 | 30 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกซิฟิเคชัน (Gasification) คือ กระบวนการทางเคมีในการสลายโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอน เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิลและเชื้อเพลิงที่ไม่ใช่ฟอสซิลให้มีขนาดเล็กกลายเป็นแก๊สชีวมวล โพรดิวเซอร์แก๊ส แก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และแก๊สสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ แกซิฟิเคชันเป็นกระบวนการต่อเนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิส แต่จะเกิดที่อุณหภูมิ 1,000 – 1,500 องศาเซลเซียส แบ่งแกซิฟิเคชันตามประเภทของสารตั้งต้นที่ใช้ได้ดังนี้

1. แกซิฟิเคชันแบบใช้อากาศ (Air blown gasification) เป็นการผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้อากาศทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงในชั้นเผาไหม้ (Combustion zone) แต่แก๊สชีวมวลที่ได้จะมีแก๊สไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เพราะแก๊สไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลักของอากาศ ทำให้แก๊สชีวมวลมีค่าความร้อนเชื้อเพลิงต่ำ

2. แกซิฟิเคชันแบบใช้แก๊สออกซิเจน (Oxidative gasification) เป็นการผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้แก๊สออกซิเจนทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงแทนอากาศ อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าแกซิฟิเคชันแบบใช้อากาศ แก๊สชีวมวลที่ได้มีค่าความร้อนสูงขึ้น เพราะไม่มีแก๊สไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ แต่ในทางปฏิบัติไม่นิยมเพราะออกซิเจนบริสุทธิ์มีราคาแพง

3. แกซิฟิเคชันแบบใช้ไอน้ำ (Steam gasification) เป็นการผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้ไอน้ำทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง วิธีนี้จะช่วยเพิ่มปริมาณแก๊สชีวมวล เพราะในไอน้ำมีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ แต่มีข้อจำกัดคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 800 องศาเซลเซียส

4. แกซิฟิเคชันแบบใช้แก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen gasification) เป็นการผลิตแก๊สชีวมวลโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงที่ภาวะจำกัดอากาศหรือไม่ใช้ออกซิเจน ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงประมาณ 750 องศาเซลเซียส และต้องใช้ความดันสูงถึง 20 MPa ส่วนใหญ่แก๊สชีวมวลที่ได้จะเป็นแก๊สมีเทน

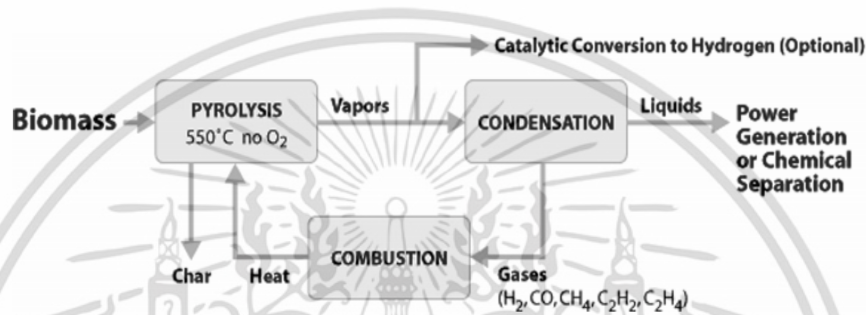
ลิกวิแฟกชัน (Liquefaction) คือ กระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลของแข็งหรือแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสหรือจากกระบวนการแกซิฟิเคชันให้เป็นของเหลวโดยใช้อุณหภูมิ 250 - 400 องศาเซลเซียส และความดัน 100 - 200 บาร์เกจ อาจให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากกว่า 50 wt% แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

- ลิกวิแฟกชันทางตรง (Direct liquefaction) คือ การเปลี่ยนชีวมวลของแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์โดยใช้ความร้อน

- ลิกวิแฟกชันทางอ้อม (Indirect liquefaction) คือ การเปลี่ยนแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสหรือจากกระบวนการแกซิฟิเคชันให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Cu/ZnO, Co/SiO₂, Ni-Al₂O₃

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อนเคมีทั้งการเผาไหม้โดยตรง ไพโรไลซิส แกซิฟิเคชัน และลิกวิแฟชันสามารถทำงานร่วมกันเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความหลากหลาย ส่วนผลพลอยได้ (By-products) จากกระบวนการสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ในรูปที่ 2.5 แสดงการแปรรูปชีวมวลด้วยการไพโรไลซิสโดยใช้แก๊สที่เกิดจากกระบวนการลิกวิแฟชันเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเผาไหม้และให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งช่วยลดค่าเชื้อเพลิงได้ ความแตกต่างของกระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อนเคมีแต่ละวิธี ภาวะที่ใช้ และผลิตภัณฑ์ที่ได้ สรุปลงในตารางที่ 2.4 และรูปที่ 2.6

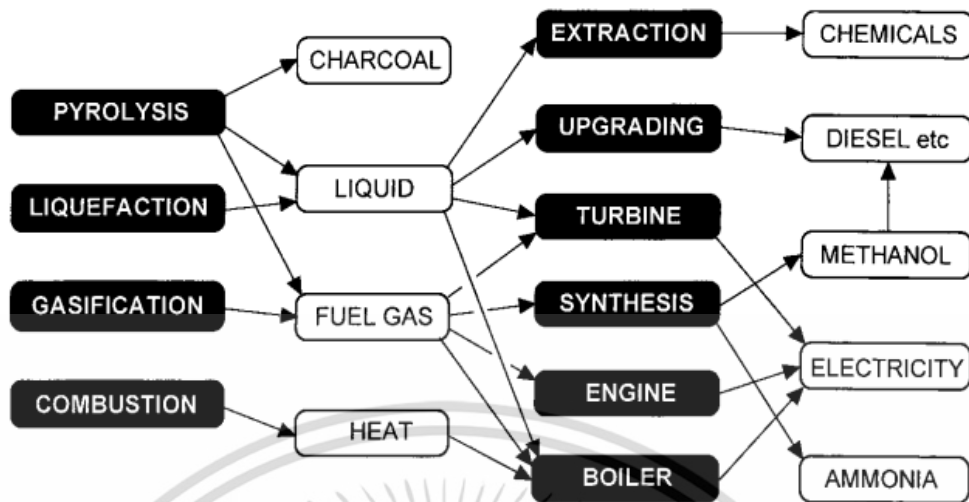


รูปที่ 2.5 การแปรรูปชีวมวลร่วมกันของไพโรไลซิส ลิกวิแฟชัน และการเผาไหม้ (Speight J.G. 2011)

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบภาวะของไพโรไลซิส ลิกวิแฟชัน และแกซิฟิเคชัน และผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Bridgwater, A.V. and Grassi, G. 1991)

| ตัวแปร | | Pyrolysis | | Liquefaction | Gasification | |
|-----------------------|---------|-------------------------|-----------|--------------|---------------|---------------|
| | | Slow | Flash | | | |
| ความชื้นของสารตั้งต้น | | ต่ำ | ต่ำมาก | ต่ำมาก | สูงสุด 50% | |
| อุณหภูมิ (°C) | | 400 – 600 | 450 – 900 | 250 – 400 | 1,000 – 1,500 | |
| ความดัน (bar) | | 0.01 – 1 | 1 | 100 – 200 | สูงสุด 20 | |
| ผลิตภัณฑ์ | แก๊ส | Yield, wt% | สูงสุด 40 | สูงสุด 70 | 20 | 100 – 250 |
| | | HHV, MJ/Nm ³ | 5 – 10 | 10 – 20 | 2 – 6 | 5 – 15 |
| | ของเหลว | Yield (dry basis), wt% | สูงสุด 30 | สูงสุด 70 | สูงสุด 50 | สูงสุด 3 |
| | | HHV, MJ/Nm ³ | 23 | 23 | 30 | 23 |
| | ของแข็ง | Yield, wt% | 30 | สูงสุด 15 | สูงสุด 25 | ขี้เถ้า (Ash) |
| | | HHV, MJ/Nm ³ | 30 | 30 | 30 | – |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อนเคมีแต่ละวิธี ผลิตภัณฑ์ที่ได้ และการใช้ประโยชน์ (Bridgwater, A.V. 2000)

การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน คือ การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้บริโภค น้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค หรือน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว กับเอทานอล หรือเมทานอล ที่อุณหภูมิ 50 - 100 องศาเซลเซียส และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสารละลายต่างซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ ได้กลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้อาจสูงถึง 40 wt% ซึ่งต้องแยกออกจากไบโอดีเซลเพื่อให้ไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น ส่วนกลีเซอรอลที่ได้สามารถใช้ในอุตสาหกรรมผลิตสบู่

ไบโอดีเซลเป็นวาระแห่งชาติ ในเชิงเศรษฐศาสตร์และเชิงเศรษฐศาสตร์พลังงาน ไบโอดีเซลช่วยลดการนำเข้าน้ำมันเพราะสามารถผลิตได้ในประเทศ สามารถใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ และใช้พลังงานค่าน้ำมันดีเซลได้ ในเชิงสิ่งแวดล้อม ไบโอดีเซลช่วยลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการหมักชีวมวลเพื่อผลิตแอลกอฮอล์ (Alcoholic fermentation) คือ การใช้จุลินทรีย์เพื่อผลิตเอทิลแอลกอฮอล์หรือเอทานอล เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลพลอยได้ เอทานอลที่เกิดขึ้นสามารถใช้ผสมกับน้ำมันแก๊ซอลีนเป็นน้ำมันแก๊ซอล เช่น น้ำมัน E10 ผสมเอทานอลกับน้ำมันแก๊ซอลีนในอัตราส่วนโดยปริมาตร ร้อยละ 10 ต่อ 90 ตามลำดับ

การผลิตเอทานอลจากผลิตผลทางการเกษตรโดยกระบวนการหมักประกอบด้วยกระบวนการหลัก 3 ขั้นตอน

1. การจัดหาวัตถุดิบในการผลิต วัตถุดิบที่นิยมใช้ คือ ผลิตผลทางการเกษตรที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ เช่น มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวโพด วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบเป็นน้ำตาลสามารถหมักได้ทันที แต่ถ้าเป็นแป้งต้องเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาลก่อนโดยอาจใช้กรดหรือเอนไซม์

2. กระบวนการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum) และการหมัก ต้องการเชื้อจุลินทรีย์ที่แข็งแรงและมีปริมาณมากเพียงพอสำหรับใช้ในการหมักโดยใช้เชื้อยีสต์ *Saccaromyces*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cerevisiae ซึ่งต้องปรับและควบคุมภาวะของการหมัก ยีสต์สายพันธุ์นี้สามารถผลิตเอทานอลได้สูง และทนสภาพแวดล้อมที่มีเอทานอลได้ดีกว่าสายพันธุ์อื่น

3. กระบวนการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์ เอทานอลที่ได้จากการหมักมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 8 - 12 โดยปริมาตร จะต้องไม่มีน้ำปนอยู่ จึงต้องทำเอทานอลให้บริสุทธิ์โดยใช้วิธีต่างๆ เช่น การกลั่นลำดับส่วน การดูดซับสิ่งเจือปนต่างๆ ในเอทานอลด้วยวัสดุที่มีรูพรุน เป็นต้น

ข้อจำกัดของกระบวนการหมักเพื่อผลิตแอลกอฮอล์ คือ เกิดน้ำกากสาซึ่งเป็นของเสียที่มีน้ำตาล สารอินทรีย์ และยีสต์ปนอยู่มาก จึงจำเป็นต้องบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักก่อนปล่อยทิ้งลงสู่สิ่งแวดล้อม

2.3 เชื้อเพลิงชีวภาพ (Naik, S.N. et al. 2010; Vogelwohl, T. 2011)

เชื้อเพลิงชีวภาพ คือ เชื้อเพลิงที่ได้จากชีวมวลโดยใช้กระบวนการแปรรูปต่างๆ เช่น ไพโรไลซิส กระบวนการหมัก ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน เป็นต้น เชื้อเพลิงชีวภาพแตกต่างจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เพราะเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถฟื้นฟูหรือสร้างขึ้นใหม่ได้ เพราะพืชที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสามารถปลูกทดแทน และเชื้อเพลิงชีวภาพไม่เกิดการสะสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ สามารถแบ่งเชื้อเพลิงชีวภาพได้จากองค์ประกอบโมเลกุลของเชื้อเพลิงชีวภาพดังนี้

1. เชื้อเพลิงชีวภาพที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygenated biofuels) ได้แก่ เอทานอล บิวทานอล และไบโอดีเซล
2. เชื้อเพลิงชีวภาพที่มีไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (Hydrocarbon biofuels) ได้แก่ pyrolysis oil น้ำมันแก๊สลิ้นสังเคราะห์ (Green gasoline), green jet และ น้ำมันดีเซลสังเคราะห์ (Green diesel)

เชื้อเพลิงชีวภาพที่แบ่งตามแหล่งที่มา ได้แก่

1. เชื้อเพลิงชีวภาพปฐมภูมิ (Primary biofuels) คือ เชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากธรรมชาติและไม่ได้ผ่านกระบวนการทางความร้อนเคมี เช่น ไม้ฟืน เปลือกไม้ เป็นต้น
2. เชื้อเพลิงชีวภาพทุติยภูมิ (Secondary biofuels) คือ เชื้อเพลิงชีวภาพในรูปแก๊ส (เช่น แก๊สสังเคราะห์ แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน) ของเหลว (เช่น pyrolysis oil เอทานอล และไบโอดีเซล) และของแข็งที่ได้จากการแปรรูปเชื้อเพลิงชีวภาพปฐมภูมิ ส่วนใหญ่ใช้สำหรับการขนส่ง และกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมที่ใช้อุณหภูมิสูง

แบ่งยุคของการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพทุติยภูมิตามวัตถุดิบที่ใช้ ดังนี้

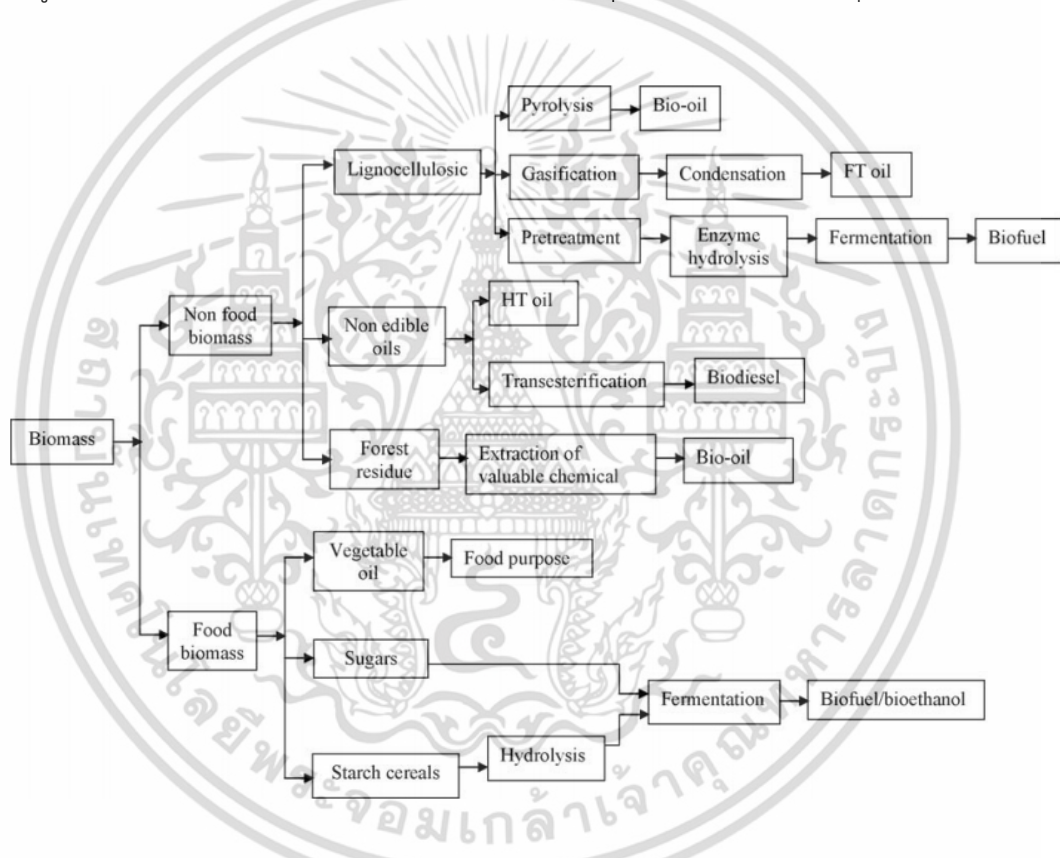
- ยุคที่ 1 (1st Generation) คือ การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากวัตถุดิบที่ใช้บริโภคโดยการแปรรูปทางกายภาพ-เคมี และการแปรรูปทางชีวเคมี วัตถุดิบที่ใช้ เช่น มันสำปะหลัง อ้อย ข้าวโพด และน้ำมันพืชที่ใช้บริโภค เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง ข้อจำกัดของการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในยุคที่ 1 คือ อาจทำให้ขาดแคลนแหล่งอาหารของมนุษย์และสัตว์ และขาดแคลนพื้นที่เพาะปลูก ถ้าไม่จัดแบ่งวัตถุดิบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพและสำหรับบริโภค หรือไม่จัดแบ่งพื้นที่เพาะปลูกให้เหมาะสม

- ยุคที่ 2 (2nd Generation) คือ การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพโดยการแปรรูปทางความร้อนเคมี และทางชีวเคมีจากพืชที่ไม่ใช่สำหรับบริโภค หรือจากวัตถุดิบที่ไม่ใช่บริโภคประเภทวัสดุเหลือทิ้งต่างๆ ทางการเกษตร อุตสาหกรรม และชุมชน เช่น แกลบ ฟางข้าว เศษไม้ น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว พลาสติกที่ใช้แล้ว และกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย

รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพในยุคที่ 1 และ 2 และวัตถุดิบที่ใช้



รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพยุคที่ 1 จากวัตถุดิบที่ใช้บริโภค และยุคที่ 2 จากวัตถุดิบที่ไม่ใช่บริโภค (Naik, S.N. et al. 2010)

- ยุคที่ 3 (3rd Generation) คือ การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากสาหร่ายน้ำจืดและสาหร่ายทะเล มีข้อดีคือวัตถุดิบมีราคาถูก และไม่ต้องแบ่งพื้นที่เพาะปลูกกับพืชอื่นที่ใช้และไม่บริโภค เพราะเพาะเลี้ยงได้ในแหล่งน้ำจืดหรือในทะเล

- ยุคที่ 4 (4th Generation) คือ การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้เทคโนโลยีการตัดต่อพันธุกรรมพืช เช่น การตัดต่อพันธุกรรมสาหร่ายให้สามารถสะสมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงเป็นพิเศษ แต่ข้อจำกัดขณะนี้ คือ มีราคาแพง และยังไม่สามารถทำได้ในเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

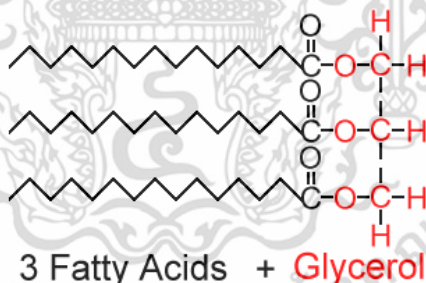
2.4 น้ำมันพืช (Axtell, B.L. 1992; Shahidi, F. 2005; ตารณี เจริญสุข. 2554)

น้ำมันพืช (Vegetable oil) คือ น้ำมันที่สกัดได้จากส่วนต่างๆ ของพืชน้ำมัน (Oil crop) ส่วนใหญ่สกัดได้จากเมล็ด เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง ส่วนน้ำมันปาล์มและน้ำมันมะกอกมีน้ำมันอยู่ในผนังผลชั้นกลาง การสกัดน้ำมันจากเมล็ดของพืชน้ำมันนิยมใช้ 2 วิธีหลัก ได้แก่

1. การสกัดเชิงกล (Mechanical extraction) คือ การใช้แรงบีบอัดเมล็ดของพืชน้ำมัน ได้แก่ การบีบอัดแบบเย็น (Cold pressing) โดยการใช้แรงกดทำให้เมล็ดของพืชแตกแล้วบีบน้ำมันออกมา น้ำมันที่ได้สามารถนำน้ำมันมาใช้ได้เลย แต่ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ จะได้ปริมาณน้ำมันน้อยและมีน้ำมันตกค้างในกากสูง การบีบอัดแบบร้อน (Hot pressing) เป็นการใช้แรงเชิงกลบีบอัดเมล็ดพืชของน้ำมันร่วมกับการใช้ความร้อน

2. การสกัดโดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent extraction) วิธีนี้เหมาะสำหรับการผลิตน้ำมันพืชเพื่อใช้ในการบริโภค เพราะให้ปริมาณน้ำมันที่สูงกว่าวิธีการสกัดเชิงกล ตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัด ได้แก่ ปิโตรเลียมอีเทอร์ แอซีโตน และเฮกเซน การสกัดด้วยวิธีนี้จึงมีน้ำมันติดที่กากเพียงเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 0.5 สำหรับตัวทำละลายที่ใช้จะถูกระเหยออก

ส่วนประกอบหลักของน้ำมันพืช คือ ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ดังรูปที่ 2.8 ประกอบด้วย กลีเซอรอล (Glycerol) 1 โมเลกุล และกรดไขมัน (Fatty acid) 3 โมเลกุล ซึ่งไม่ละลายน้ำ และไม่ระเหยที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 2.8 โครงสร้างโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์

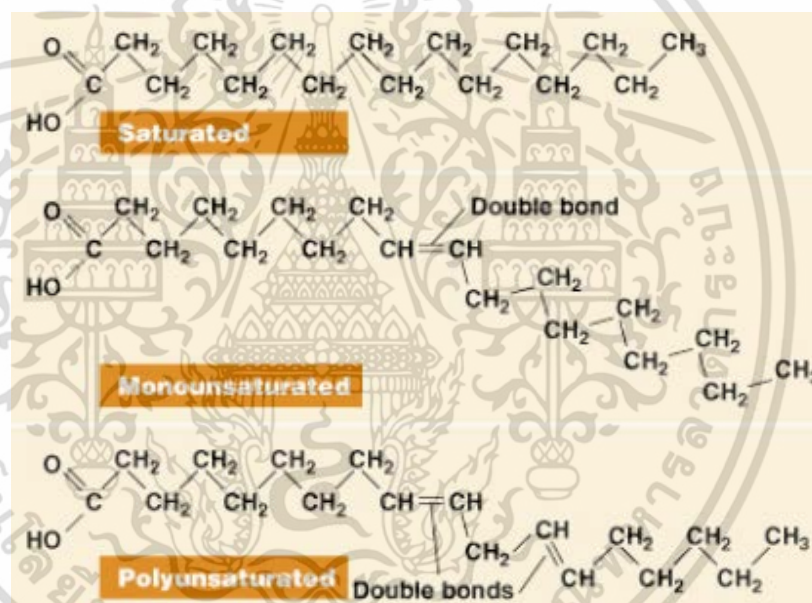
กรดไขมันเป็นกรดอินทรีย์ที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน มีสูตรทั่วไป คือ $R - COOH$ ลักษณะสูตรโครงสร้างของกรดไขมันประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เรียกว่า หัวโซ่คาร์บอน (R) และหมู่คาร์บอกซิล ($COOH$) กรดไขมันมีหลายชนิด ทุกชนิดจะมีหน่วยคาร์บอกซิลหนึ่งหน่วย ความแตกต่างของกรดไขมันแต่ละชนิดแสดงด้วยลักษณะโมเลกุลของหัวโซ่คาร์บอน กรดไขมันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) คือ กรดไขมันที่พันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลเป็นพันธะเดี่ยว ดังรูปที่ 2.9 มีสูตรทั่วไป คือ $C_nH_{2n+1}COOH$ มีความเสถียร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจึงไม่เกิดการเหม็นหืน มีจุดหลอมเหลวสูงกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) ที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากัน กรดไขมันอิ่มตัวที่พบมากที่สุด ได้แก่ กรดปาล์มมิติก (C16:0 ตัวเลขข้างหน้าและหลังเครื่องหมาย : หมายถึง จำนวนอะตอมคาร์บอนและพันธะคู่) ซึ่งพบในน้ำมันปาล์ม น้ำมันเมล็ดฝ้าย เป็นต้น

2. กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) เป็นกรดไขมันที่พันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลเป็นพันธะคู่ (Polyunsaturated fatty acid) พันธะคู่อาจมีมากกว่า 1 ตำแหน่ง กรดไขมันไม่อิ่มตัวพบมากในน้ำมันพืชหลายชนิด เช่น น้ำมันเมล็ดเรป น้ำมันข้าวโพด น้ำมันมะกอก เป็นต้น กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่พบมากในน้ำมันพืช คือ กรดโอเลอิก (C18:1) และ ไลโนเลอิก (C18:2)

ตารางที่ 2.5 -2.6 แสดงกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืชส่วนใหญ่ และปริมาณสัดส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวของน้ำมันพืชบางชนิด



รูปที่ 2.9 โมเลกุลของกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันพืช (Shallin B, 2013)

ตารางที่ 2.5 ชนิดของกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืช (Shahidi, F; 2005)

| ชนิดของกรดไขมัน | Lipid number | ตำแหน่งไอโซเมอร์ |
|------------------|--------------|------------------|
| Saturated | | |
| - ลอริก | 12:0 | - |
| - ไมริสติก | 14:0 | - |
| - ปาล์มมิติก | 16:0 | - |
| - สเตียริก | 18:0 | - |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ชนิดของกรดไขมันที่พบในน้ำมันพืช (ต่อ) (Shahidi, F; 2005)

| ชนิดของกรดไขมัน | Lipid number | ตำแหน่งไอโซเมอร์ |
|--------------------------|--------------|------------------|
| Monounsaturated | | |
| - โอเลอิก | 18:1 | 9c |
| - เพโทรเซเลนิก | 18:1 | 6c |
| - อีรูซิก | 22:1 | 13c |
| Polyunsaturated | | |
| - ไลโนเลอิก | 18:2 | 9c12c |
| - ไลโนเลอิก (α) | 18:3 | 9c12c15c |
| - ไลโนเลอิก (γ) | 18:3 | 6c9c12c |

ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกรดไขมันในน้ำมันพืชที่ lipid number ต่าง ๆ (ดัดแปลงจาก Shahidi, F; 2005, Chen, Y.H. 2012)

| ชนิดของน้ำมันพืช | Lipid number | | | | |
|-----------------------------------|--------------|------|------|------|------|
| | 16:0 | 18:0 | 18:1 | 18:2 | 18:3 |
| เนยโกโก้ | 26 | 34 | 35 | - | - |
| ข้าวโพด | 13 | 3 | 31 | 52 | 1 |
| เมล็ดฝ้าย | 27 | 2 | 18 | 51 | Tr |
| ลินสีด | 6 | 3 | 38 | 41 | Tr |
| มะกอก | 10 | 2 | 78 | 7 | 1 |
| ปาล์ม | 44 | 4 | 39 | 11 | Tr |
| ดอกคำฝอย | 7 | 3 | 14 | 75 | - |
| เมล็ดเรป (ชนิดมีกรดอีรูซิกสูง) | 3 | 1 | 16 | 14 | 10 |
| เมล็ดเรป (ชนิดมีกรดอีรูซิกต่ำ) | 4 | 2 | 56 | 26 | 10 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกรดไขมันในน้ำมันพืชที่ lipid number ต่าง ๆ (ต่อ) (ดัดแปลงจาก Shahidi, F; 2005, Chen, Y.H. 2012)

| ชนิดของน้ำมันพืช | Lipid number | | | | |
|---------------------|--------------|------|------|------|------|
| | 16:0 | 18:0 | 18:1 | 18:2 | 18:3 |
| น้ำมันตุง | 10.2 | 3.7 | 7.1 | 1.8 | 82.3 |
| น้ำมันสบู่ดำ | 14.9 | 6 | 41.2 | 37.4 | - |
| น้ำมันถั่วเหลือง | 11 | 4 | 22 | 53 | 8 |
| น้ำมันงา | 9 | 6 | 41 | 43 | - |
| น้ำมันเมล็ดทานตะวัน | 6 | 5 | 20 | 60 | Tr |

หมายเหตุ ตัวเลขข้างหน้าและหลังเครื่องหมาย : หมายถึง จำนวนอะตอมคาร์บอนและพันธะคู่ ตามลำดับ

Tr คือ Trace (ตรวจพบน้อยกว่า 0.1 wt%)

พืชน้ำมันที่ไม่ใช่บรีโคมมีองค์ประกอบที่เป็นพิษแก่การบริโภค เช่น กรดไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic acid) ในน้ำมันสบู่ดำ อาการของสัตว์ที่เกิดจากสารพิษของกรดไฮโดรไซยานิก คือ กล้ามเนื้อขาดออกซิเจน ทำให้หายใจขัด ตัวสั่น ชักกระตุก และอาจถึงตายได้ ในรายที่รุนแรงจะแสดงอาการภายใน 10-15 นาที และตายภายใน 2-3 นาที ส่วนกรดอีรูจิก (Erucic acid) ในน้ำมันเมล็ดเรป ทำให้เกิดการสะสมของไขมันในเลือด ดังนั้นน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บรีโคมเหล่านี้จึงเหมาะสำหรับใช้ประโยชน์ในด้านอื่น เช่น ใช้เคลือบผิวไม้และโลหะ ใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่น หรือใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพ น้ำมันพืชที่ไม่ใช่บรีโคมที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ น้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป

2.4.1 น้ำมันตุง (ณัฐวุฒิ ดุษฎี. 2554; Yi-Hung, C. 2010; Waterlox Coatings Corporation. 2011)

น้ำมันตุง (Tung oil) ได้จากต้นน้ำมันตุง (Tung oil tree) ซึ่งมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Vernicia fordii* เป็นพืชน้ำมันที่มีถิ่นกำเนิดที่ตอนกลางและตะวันตกของประเทศจีน จึงมีอีกชื่อหนึ่งว่า China wood oil tree ปัจจุบันพบได้มากในประเทศจีนตอนใต้ บริเวณป่าทางภาคเหนือของประเทศไทย (ซึ่งจะเรียกว่าต้นมะเขายาหิน) เวียดนาม พม่า และลาว Tung เป็นคำที่มาจากภาษาจีนหมายถึง หัวใจ (Heart) ซึ่งมาจากลักษณะของใบต้นน้ำมันตุงที่คล้ายรูปหัวใจ ต้นน้ำมันตุงเป็นไม้ป่าโตเร็ว ขึ้นได้เองตามธรรมชาติ ชอบดินร่วนที่มีฤทธิ์เป็นกรด pH 5.5 - 6.0 ทนต่อสภาพภูมิอากาศ ชอบแสงแดด เมื่อโตเต็มที่สูงประมาณ 12 เมตร มีอายุระหว่าง 50-60 ปี การปลูกต้นน้ำมันตุงในปีที่ 1 - 2 จะยังไม่ให้ผลผลิต เริ่มให้ผลผลิตในปีที่ 3 เป็นต้นไป ปีที่ 3 จะเริ่มให้ผลผลิตประมาณ 575 กิโลกรัม/ไร่/ปี เมล็ดต้นน้ำมันตุงค่อนข้างกลม เมื่อสดจะมีสีเขียว มีขนาด 4 - 4.5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนึ่งผลประกอบด้วยเมล็ด 3 เมล็ด เนื้อภายในเมล็ดมีปริมาณน้ำมันสูงถึงร้อยละ 60 - 70 น้ำมันที่สกัดได้ประมาณ 339 กิโลกรัม/ไร่/ปี นิยมใช้น้ำมันตุงเคลือบเงาเนื้อไม้เพื่อรักษาเนื้อไม้ให้คงทน ค่าความร้อนขั้นต่ำ (Lower heating value หรือ LHV) ของน้ำมันตุงประมาณ 39.07 เมกะจูลต่อกิโลกรัม มีค่าความหนืดสูงถึง 91.16 เซนติสโตก (cSt) ใช้ได้กับเครื่องยนต์รอบต่ำ เช่น รถไถ เครื่องมือทางการเกษตร แต่ไม่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ในรถยนต์ ทำให้ต้องแตกโมเลกุล หรือใช้สังเคราะห์ไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิเฟเคชัน

2.4.2 น้ำมันสบู่ดำ (รักษ ฤกษ์ พฤษชาติ. 2549; Arif, M. and Ahmed, Z. 2009; Carels, N. 2012; Nicolas, C. 2012)

สบู่ดำ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Jatropha curcas* Linn. เป็นพืชที่อยู่ในวงศ์ไม้ยางพารา *Euphorbiaceae* เช่นเดียวกับสบู่แดง โป๊ยเซียน มันสำปะหลัง มะยม เป็นต้น สบู่ดำจัดเป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สามารถปลูกได้ในพื้นที่ที่แห้งแล้งหรือดินไม่ดี ต้องการน้ำน้อยกว่าปาล์มน้ำมัน 4 เท่า ต้นสูงประมาณ 2 - 7 เมตร อายุยืนไม่น้อยกว่า 20 ปี มีลำต้นเกลี้ยงเกล่า ใบ ผล และเมล็ด มีกรดไฮโดรไซยานิกซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ ระยะเวลาตั้งแต่ออกดอกจนถึงผลแก่ใช้เวลาประมาณ 60 - 90 วัน ผลมีขนาดปานกลาง ลักษณะกลม เปลือกหนาปานกลาง ขนาดความยาวของเมล็ดโดยเฉลี่ย 1.7 - 1.9 เซนติเมตร ความหนา 0.8 - 0.9 เซนติเมตร น้ำหนักของสบู่ดำ 100 เมล็ด ประมาณ 69.8 กรัม ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบระหว่างต้นสบู่ดำกับปาล์มน้ำมัน ให้ผลได้สูงเมื่อปลูกในพื้นที่ฝนตกชุก สามารถเริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ภายในปีแรกประมาณ 64 กิโลกรัมต่อไร่ และให้ผลผลิตมากที่สุดภายใน 3 ปี มากกว่า 800 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งให้คาร์บอนเครดิต (Carbon credit) 360 บาทต่อไร่ต่อปี

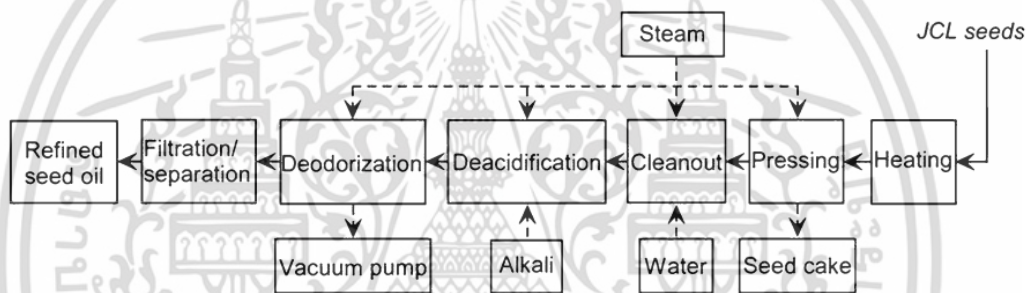
ตารางที่ 2.7 ข้อเปรียบเทียบระหว่างต้นสบู่ดำกับปาล์มน้ำมัน (รักษ ฤกษ์ พฤษชาติ. 2549)

| ข้อเปรียบเทียบ | ต้นสบู่ดำ | ปาล์มน้ำมัน |
|--------------------|--|---|
| ผลผลิต | น้อยกว่า | สูงกว่า |
| ระยะเวลาให้ผลผลิต | 1 ปี | 4 ปี |
| ปริมาณน้ำมัน | 35% | 19% |
| สภาพภูมิอากาศ | สามารถทนสภาพร้อนและแห้งแล้งได้ดี | ต้องปลูกในพื้นที่ที่มีความชื้นสูง |
| ความต้องการน้ำ | 50 ลิตร/ต้น/วัน | 200 ลิตร/ต้น/วัน |
| ประโยชน์/โอกาสอื่น | มีสรรพคุณทางยา สร้างมูลค่าเพิ่มได้สูง ไม่ใช้บริโภค พัฒนาพันธุ์ได้หลากหลาย | น้ำมันใช้บริโภค มีข้อจำกัดในการพัฒนาพันธุ์ |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะที่จัดทำขึ้นในอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสกัดน้ำมันสบู่ดำ แสดงดังรูปที่ 2.10

1. เก็บผลสบู่ดำขณะที่ผลสุกมีสีเหลืองถึงสีดำ
2. แกะเปลือกเมล็ดสบู่ดำ นำเมล็ดไปตากแดด หรือให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 - 70 องศาเซลเซียส
3. ทีบเมล็ดสบู่ดำด้วยระบบไฮดรอลิกหรือระบบอัดเกลียว ซึ่งเมล็ดสบู่ดำที่ทีบแล้วจะให้น้ำมันประมาณ 25 - 30 % (Pressing)
4. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในน้ำมันสบู่ดำที่ได้เพื่อลดความเป็นกรด (Deacidification)
5. กลั่นน้ำมันสบู่ดำด้วยไอน้ำแรงดันสูงเพื่อกำจัดกลิ่น (Deodorization)
6. กรองสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันสบู่ดำ (Filtration/Separation)



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบู่ดำ (Nicolas, C. 2012)

สามารถใช้น้ำมันสบู่ดำเติมในเครื่องยนต์ได้ทันที (เทียบเท่าน้ำมัน B100) แต่ต้องใช้กับเครื่องยนต์หมุนช้าเท่านั้น เช่น เครื่องสูบน้ำ รถไถเดินตาม เครื่องมือการเกษตรต่าง ๆ ถ้าใช้กับเครื่องยนต์หมุนเร็วจะมีอุปสรรคเนื่องจากส่วนใหญ่ น้ำมันสบู่ดำจะเป็นไขและมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ดังตารางที่ 2.8 ซึ่งทำให้เครื่องยนต์หนืดและเครื่องรวนได้ หากไม่มีระบบกรองน้ำมันสบู่ดำที่ดี การอุดตันหัวฉีดน้ำมันจะเร็วกว่าปกติ และหากหยุดใช้เครื่องยนต์นานๆ จะเกิดยางเหนียวเกาะที่ปั๊มเชื้อเพลิงและหัวฉีด

ตารางที่ 2.8 สมบัติของน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันดีเซล (ดัดแปลงจาก Arif, M. and Ahmed, Z. 2009)

| สมบัติ | น้ำมันสบู่ดำ | น้ำมันดีเซล |
|----------------------------------|--------------|-------------|
| ความหนืด (C.S.) 30 °C | 5.51 | 3.6 |
| ความหนาแน่น (g/cm ³) | 0.92 | 0.85 |
| จุดเยือกแข็ง (°C) | 2 | -14 |
| เลขซีเทน | 38 | 47 - 59 |
| จุดวาบไฟ (°C) | 40 | 80 |
| % Carbon | 0.64 | 0.15 |
| % Sulphur | 0.13 - 0.16 | 1 - 1.2 |
| ค่าสปอนนิฟิเคชัน | 188 - 198 | - |

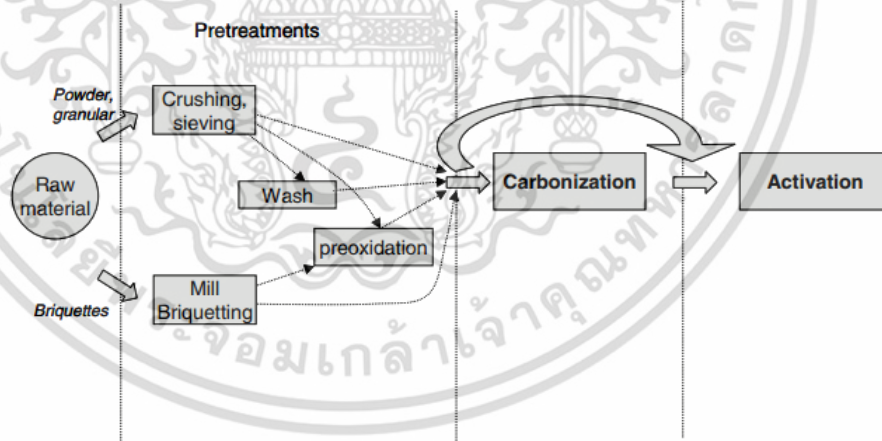
2.4.3 น้ำมันเมล็ดเรป (Organisation for Economic Co-operation and Development. 1997)

ต้นเมล็ดเรป (Rapeseed tree) จัดอยู่ในกลุ่ม *Brassicaceae* มีสองสายพันธุ์คือ *Oleiferous rape* และ *Rutabaga* มีดอกสีเหลือง เมล็ดเหมือนเมล็ดงา พบมากในเขตอบอุ่นแถบเมดิเตอร์เรเนียน และเอเชียกลาง ปลูกมากในสหภาพยุโรป แคนาดา สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย สาธารณรัฐประชาชนจีน และสาธารณรัฐอินเดีย จำนวนการปลูกเพื่อเพื่อผลิตเป็นน้ำมันพืชมากเป็นอันดับสองรองจากน้ำมันถั่วเหลือง ไม่สามารถปลูกได้ในพื้นที่หนาวจัด แต่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิระหว่าง 12 - 30 องศาเซลเซียส ในเมล็ดเรปมีน้ำมัน 39.9 - 44.5 wt% และโปรตีน 41.6 - 47.0 wt% น้ำมันที่ได้จากเมล็ดเรปมีกรดอีรูซิกซึ่งมีความเป็นพิษต่อมนุษย์สูงถึง 50 wt% และกลูโคซิโนเลต (Glucosinolates) ที่ทำให้มีรสขม จึงไม่ใช่บริโภค น้ำมันเมล็ดเรปใช้ผลิตน้ำมันหล่อลื่นสามารถใช้ได้โดยตรงกับเครื่องยนต์ หรือใช้ผลิตไบโอดีเซล ปัจจุบันเมล็ดเรปเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดในยุโรป คือ มีส่วนแบ่งในการผลิตถึงร้อยละ 80 ของวัตถุดิบอื่นๆ ทั้งหมด ซึ่งประเทศเยอรมันเป็นผู้นำในการนำไบโอดีเซลมาใช้แทนน้ำมันดีเซลและเป็นผู้นำทางด้านเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้วัตถุดิบจากเมล็ดเรป ประเทศฝรั่งเศส และสเปนใช้เมล็ดเรปเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลเช่นกัน ในปี ค.ศ. 1979 ประเทศแคนาดา โดย The Western Canadian Oilseed Crushers Association ได้พัฒนาและจดทะเบียนต้นเมล็ดเรปสายพันธุ์คาโนลา (Canola) ที่มีปริมาณกรดอีรูซิกในน้ำมันต่ำ คือ น้อยกว่า 2 wt% และมีกลูโคซิโนเลตน้อยกว่า 3 มิลลิกรัมต่อกรัม

2.5 คาร์บอนกัมมันต์ (Bansal, R.C. and Goyal, M. 2005; Basu, P. 2010; Teresa, J.B. 2006; Harry, M. and Francisco, R.R. 2006; Strand, G. 2001; ธารพงษ์ วิทิตศานต์. 2554)

คาร์บอนกัมมันต์ คือ วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น วัสดุชีวมวล ถ่านหิน หรือยางรถยนต์ใช้แล้ว เป็นต้น ที่ผ่านกระบวนการก่อกัมมันต์ ทำให้วัสดุนั้นมีโครงสร้างเป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง คาร์บอนกัมมันต์มีลักษณะแบบอสัณฐาน (Amorphous) พื้นที่ผิว 90 - 95% ของคาร์บอนกัมมันต์ประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กกว่า 2 นาโนเมตร (Micropores) นอกจากนั้นประกอบด้วยรูพรุนขนาดใหญ่กว่า 2 นาโนเมตร (Meso- and macropores) ขนาดและรูปร่างของรูพรุนมีความสำคัญต่อการดูดซับ (Adsorption) ธาตุองค์ประกอบทั่วไปในคาร์บอนกัมมันต์ ได้แก่ C 88%, H 0.5%, N 0.5%, S 1% และ O 6 - 7 % ปริมาณของธาตุองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตหรือปริมาณธาตุในวัตถุดิบ สามารถใช้ประโยชน์คาร์บอนกัมมันต์ได้หลายด้าน เช่น ใช้ทำสารเคมีให้บริสุทธิ์ ใช้ดูดซับสิ่งเจือปนในสารเคมีเพื่อนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.1 กระบวนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ แสดงในรูปที่ 2.11 ประกอบด้วย



รูปที่ 2.11 แผนผังของการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ (Teresa, J.B. 2006)

ก. การเลือกและเตรียมวัตถุดิบ

การเลือกและเตรียมวัตถุดิบเพื่อเข้ากระบวนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะมีผลต่อการกำหนดคุณลักษณะของคาร์บอนกัมมันต์ ปัจจัยสำคัญในการเลือกและเตรียมวัตถุดิบ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

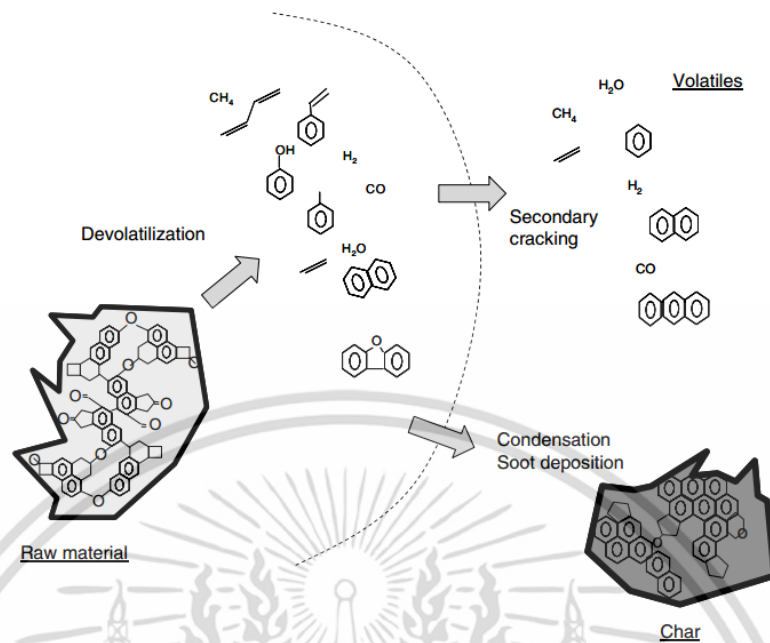
1. ต้นทุนของวัตถุดิบ วัตถุดิบที่นำมาผลิตคาร์บอนกัมมันต์ควรมีต้นทุนที่คุ้มค่ากับการลงทุน อีกทั้งต้องพิจารณาพื้นที่ตั้งของโรงงานที่ผลิต และความสะดวกในการขนส่ง ส่วนใหญ่การผลิตคาร์บอนกัมมันต์ในระดับอุตสาหกรรม นิยมใช้ถ่านหินและกะลามะพร้าวเป็นวัตถุดิบเพราะมีราคาถูก
2. วัตถุดิบที่ใช้ควรมีสารอนินทรีย์ (Inorganic matter) ต่ำ เพราะสารอนินทรีย์อาจทำให้ความจุในการดูดซับ (Adsorption capacity) ของคาร์บอนกัมมันต์ลดลง
3. ความชื้นในวัตถุดิบ ควรมีค่าต่ำที่สุด เพื่อลดพลังงานในการคาร์บอนไนซ์ (Carbonize) และลดเวลาในการผลิต รวมทั้งลดมลภาวะจากควัน การลดความชื้นทำโดยใช้เตาอบหรือตากแดด ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศในที่ผลิต
4. การลดขนาด วัตถุดิบบางประเภทจำเป็นต้องลดขนาดให้เท่ากันสม่ำเสมอ เพื่อให้การกระจายของความร้อนในขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ทั่วถึง
5. การกักเก็บวัตถุดิบ วัตถุดิบที่พร้อมสำหรับขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ต้องเก็บในที่ที่มีความชื้นต่ำและมีอากาศถ่ายเทสะดวกเพื่อป้องกันการติดไฟด้วยตนเอง (Autoignition)

ข. การเตรียมวัตถุดิบก่อนการคาร์บอนไนซ์

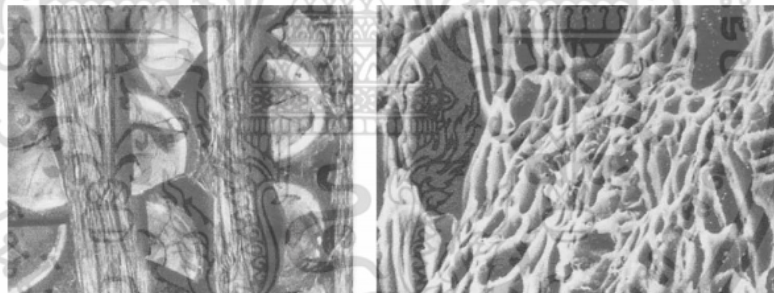
1. การล้างสิ่งสกปรกต่างๆ จากวัตถุดิบที่ผ่านขั้นตอนการคัดขนาดด้วยน้ำหรือกรด
2. การลดและคัดขนาดของวัตถุดิบ วัตถุดิบที่บดแล้วจะถูกนำมาอัดก้อน บางครั้งอาจเติมตัวประสานก่อนการอัดเป็นก้อน จากนั้นนำมาตัดและคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อน
3. Air - preoxidation ที่อุณหภูมิ 180 - 300 องศาเซลเซียส สำหรับวัตถุดิบที่เป็น Coking coal เพื่อป้องกันการเกิดของเหลวระหว่างการคาร์บอนไนซ์

ค. การคาร์บอนไนซ์

ขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์แสดงดังรูปที่ 2.12 การคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์เพราะทำให้วัตถุดิบเกิดโครงสร้างรูพรุน เป็นกระบวนการทางความร้อนในภาวะจำกัดอากาศ ที่อุณหภูมิ 200 - 500 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้สูงขึ้น และเพื่อไล่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก (Devolatilization) ความชื้น ไฮโดรเจน ออกซิเจน แก๊สไนโตรเจน โครงสร้างวงแหวนแอโรมาติกจะเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำหรือถ่านชาร์ รูปที่ 2.13 แสดงความเป็นรูพรุนของวัตถุดิบหลังการคาร์บอนไนซ์



รูปที่ 2.12 ปฏิกิริยาการคาร์บอไนซ์ (Teresa, J.B. 2006)

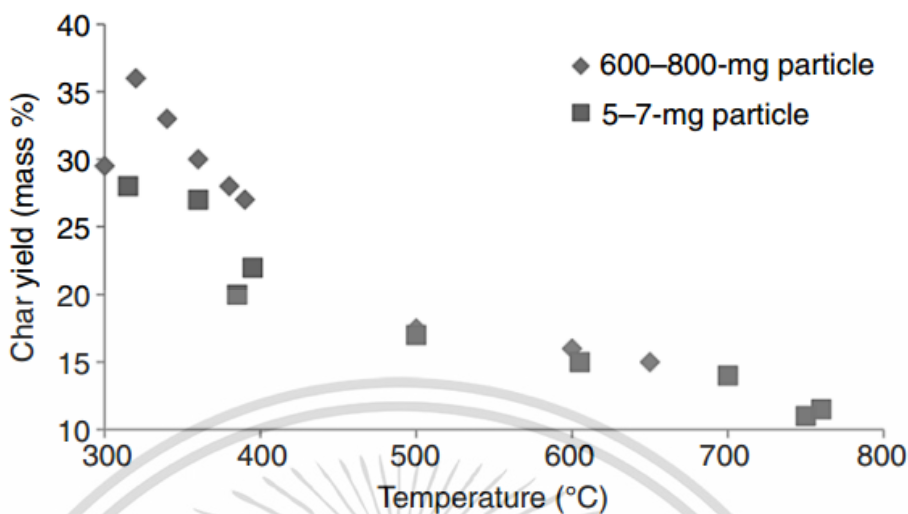


รูปที่ 2.13 ภาพถ่าย SEM ของไม้ก่อนและหลังการคาร์บอไนซ์ (Teresa, J.B. 2006)

ปัจจัยที่สำคัญต่อการคาร์บอไนซ์ของวัตถุดิบเพื่อให้ได้ถ่านชาร์ที่มีสมบัติตามต้องการ คือ มีรูพรุนเพิ่มขึ้นและไม่มีสิ่งเจือปน มีดังนี้

1. อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายในโครงสร้างของวัตถุดิบ เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดของการคาร์บอไนซ์ เพราะมีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์มากที่สุด ปริมาณสารระเหยในวัตถุดิบจะลดลงและได้ถ่านชาร์ที่มีรูพรุนเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่จากรูปที่ 2.14 จะเห็นว่าผลได้ของถ่านชาร์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นการคาร์บอไนซ์ควรใช้อุณหภูมิระหว่าง 300 – 400 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของถ่านชาร์ (Basu, P. 2010)

2. อัตราการให้ความร้อน ส่งผลต่อขนาดของรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ที่ได้ กล่าวคือ การเพิ่มอัตราความร้อนอย่างรวดเร็วมีผลให้ปริมาณสารระเหยในวัตถุดิบถูกปลดปล่อยอย่างรวดเร็ว และทำให้การเรียงตัวของคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของถ่านชาร์มีความเป็นระเบียบน้อย เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ทำให้ถ่านชาร์ที่ได้มีรูพรุนแบบ mesopore และ macropore ดังนั้นในขั้นตอนการกระตุ้น ตัวกระตุ้นจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในรูพรุนของถ่านชาร์ได้ง่าย อัตราการให้ความร้อนที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรมคือ $100 - 300 \text{ K h}^{-1}$

3. ตัวกลางของปฏิกิริยาคาร์บอนไนซ์ ตัวกลางที่เป็นแก๊สมีผลต่อปฏิกิริยาคาร์บอนไนซ์ เนื่องจากกระบวนการคาร์บอนไนซ์แก๊สและไอจะถูกพาออกไปอย่างรวดเร็ว แก๊สที่ใช้ในการคาร์บอนไนซ์ มี 2 ชนิด คือ แก๊สเฉื่อย ที่นิยมใช้ คือ ไนโตรเจน และแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ ถ้าใช้แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้เป็นตัวกลางของปฏิกิริยาคาร์บอนไนซ์ ปริมาณถ่านชาร์ที่ได้จะน้อยกว่าการใช้แก๊สเฉื่อย แต่ถ่านชาร์มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับตัวกระตุ้นสูงกว่า

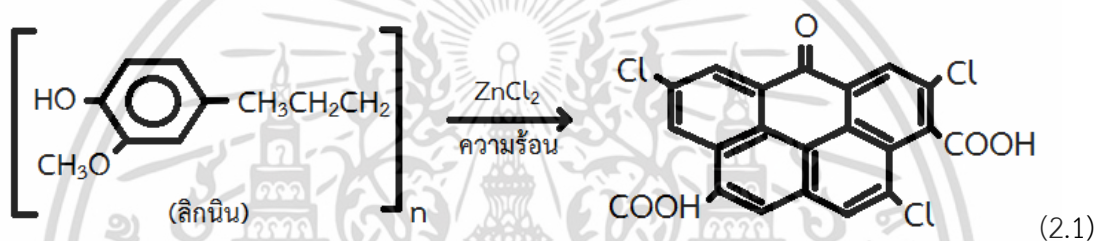
4. ธรรมชาติของวัตถุดิบ วัตถุดิบแต่ละชนิดมีภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันในการคาร์บอนไนซ์ คาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบต่างชนิดกัน อาจใช้วิธีกระตุ้นที่ต่างกันทั้งนี้เพื่อให้ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุดและเหมาะสมกับการนำไปใช้ เช่น การคาร์บอนไนซ์วัตถุดิบประเภทถ่านหินลิกไนต์จะทำที่อุณหภูมิต่ำและใช้เวลาน้อยกว่าวัตถุดิบประเภทกะลามะพร้าว เพราะถ่านหินเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างมานานจากการทับถมของพืชกับแร่ธาตุต่าง ๆ จึงมีค่าคาร์บอนคงตัวมากกว่า ดังนั้นเมื่อถูกคาร์บอนไนซ์การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบในวัตถุดิบจึงน้อยกว่ากะลามะพร้าวที่เป็นชีวมวล

ง. การกระตุ้น (Activation)

คือ การกระตุ้นถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์เพื่อผลิตคาร์บอนกัมมันต์ แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท ดังนี้

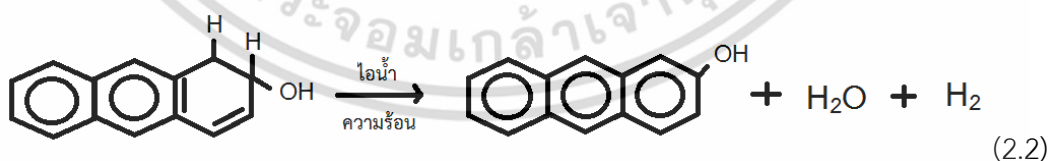
1. การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นการผลิตคาร์บอนกัมมันต์โดยใช้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยากับผิวของถ่านชาร์ เช่น สมการที่ (2.1) โดยใช้ความร้อนเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือ ใช้อุณหภูมิ 400 – 600 องศาเซลเซียส แต่มีข้อจำกัด คือ มีสารเคมีตกค้างในคาร์บอนกัมมันต์ จึงต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าว นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้ต้องทนการกัดกร่อนได้ดี



2. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

เป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ผิวของถ่านชาร์ มีการจัดเรียงตัวโครงสร้างใหม่ ดังสมการที่ (2.2) ทำให้คาร์บอนกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น นิยมใช้แก๊สออกซิเดชันต่าง ๆ เช่น ไอน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สออกซิเจนในการกระตุ้น ปฏิกิริยากระตุ้นนี้อาจใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้ความร้อนสูงถึง 1,200 องศาเซลเซียส ข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อจำกัดคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าการกระตุ้นด้วยสารเคมี



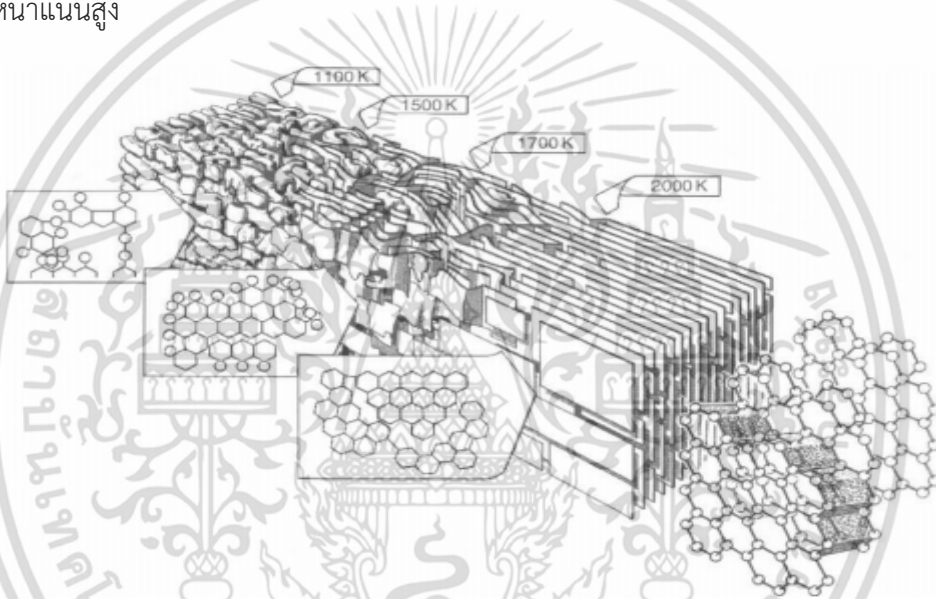
2.5.2 โครงสร้างทางกายภาพของคาร์บอนกัมมันต์ (ธราพงษ์ วิทิตศานต์. 2554)

ไม่มีหลักฐานที่แน่ชัดในการอธิบายโครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์ แต่มีความพยายามที่จะอธิบายโครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์จากการยึดเกาะกันของคาร์บอนตามโครงสร้างของแกรไฟต์ หรือการจัดเรียงตัวเป็นผลึกเล็กๆ รายละเอียดของแต่ละทฤษฎีอธิบายได้ดังนี้

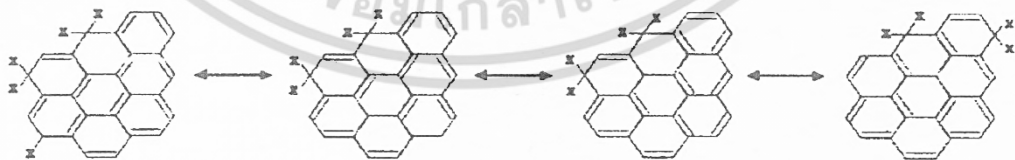
โครงสร้างรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์มีลักษณะเป็นกลุ่มของคาร์บอนซึ่งลักษณะคล้าย

แกรไฟต์ กล่าวคือ อะตอมของคาร์บอนเรียงตัวเป็นชั้น ดังรูปที่ 2.15 แต่ละชั้นห่างกันประมาณ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.335 นาโนเมตร ระหว่างชั้นยึดเหนี่ยวด้วยแรงแวนเดอวาลส์ (Van der Waals forces) ที่ไม่ค่อยแข็งแรง แต่ละชั้นประกอบด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างรูปหกเหลี่ยม แต่ละอะตอมของคาร์บอนใช้ซิกมาอิเล็กตรอนสร้างพันธะเดียวกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ความยาวพันธะระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งตัวเป็นไพอิเล็กตรอนใช้สร้างพันธะที่ไม่อึดตัวหรือพันธะคู่ โดยทั่วไปคาร์บอนกัมมันต์จะมีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่ อะตอมคาร์บอนบางตัวต้องรับอิเล็กตรอนดังกล่าวไว้ ทำให้มีความหนาแน่นประจุสูง อะตอมดังกล่าวปล่อยให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังอะตอมข้างเคียงเพื่อลดความหนาแน่นของประจุ แสดงดังรูปที่ 2.16 เพื่อให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้ทำให้พื้นผิวรูพรุนมีความสามารถดูดซับสารด้วยประจุที่มีความหนาแน่นสูง



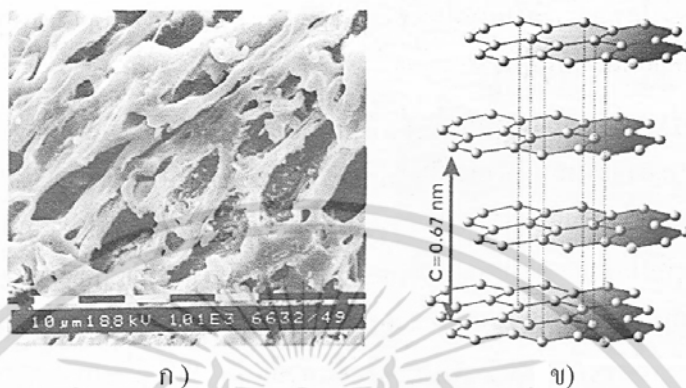
รูปที่ 2.15 การเกิดโครงสร้างของแกรไฟต์จากการให้ความร้อน (Harry, M. and Francisco, R.R. 2006)



รูปที่ 2.16 การเคลื่อนที่ของไพอิเล็กตรอนในโครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์ (ธราพงษ์ วิทิตสานต์. 2554)

ส่วนแนวคิดที่ว่าโครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์แตกต่างจากแกรไฟต์และเป็นผลึกที่เล็กมาก (Microcrystalline) มีคาร์บอนประกอบกันเป็นวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างผลึกเล็กๆ มีขนาดประมาณ 150 อังสตรอม และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะห่างระหว่างผลึกเล็กๆ เท่ากับ 20-50 อังสตรอม ดังรูปที่ 2.17 การจัดเรียงตัวของผลึกเล็กเหล่านี้ทำให้เกิดรูพรุนทั่วไปบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ และรูพรุนขนาดเล็กที่เกิดขึ้นจะมีความสามารถในการดูดซับสูง



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์ ก) มุมมองผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ข) มุมมองสัญลักษณ์ของแกรไฟต์ (ธราพงษ์ วิทิตสานต์. 2554)

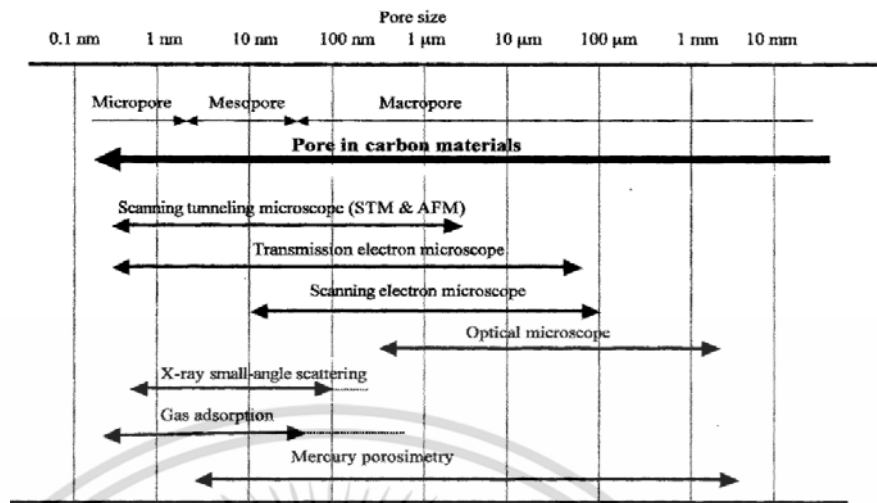
การจำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดของรูพรุนด้วยระบบ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ดังนี้

- Micropore ขนาดรูพรุนเล็กกว่า 2 nm ปริมาตรรูพรุน 0.15–0.70 cm^3/g ซึ่งครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 95% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด
- Mesopore ขนาดรูพรุน 2-50 nm ปริมาตรรูพรุน 0.1–0.2 cm^3/g ปริมาตรของรูพรุนประเภทนี้มีไม่เกิน 5% ของพื้นที่ผิวทั้งหมด
- Macropore ขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 50 nm ปริมาตรรูพรุน 0.2–0.4 cm^3/g ปริมาตรของรูพรุนประเภทนี้มีน้อยมาก ไม่เกิน 0.5 m^2/g ของพื้นที่ผิวทั้งหมด

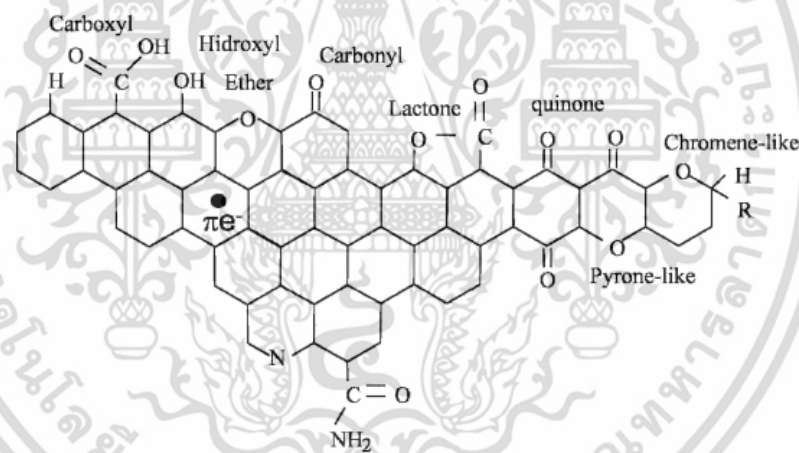
วิธีการตรวจสอบขนาดของรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ใช้เครื่องมือต่างๆ ดังรูปที่ 2.18 การตรวจสอบขนาดและปริมาตรของรูพรุนที่นิยม คือ Gas adsorption

2.5.3 โครงสร้างทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์

สมบัติทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต กล่าวคือ ในกระบวนการกระตุ้นคาร์บอนกัมมันต์จะทำให้อะตอมของคาร์บอนเกิดพันธะกับอะตอมอื่นเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ข้างแอโรเมติกส์ เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่างๆ (Functional groups) บนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ เช่น คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล คาร์บอนิล ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 ขนาดของรูพรุนในวัสดุคาร์บอนและเทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบขนาดของรูพรุน (Teresa, J.B. 2006)

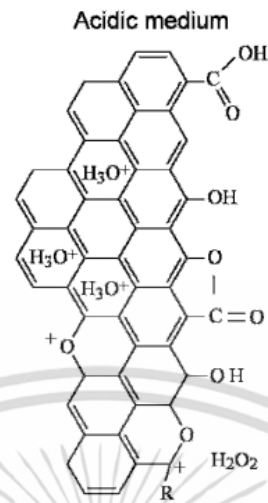


รูปที่ 2.19 หมู่ฟังก์ชันที่พบมากบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ (Teresa, J.B. 2006)

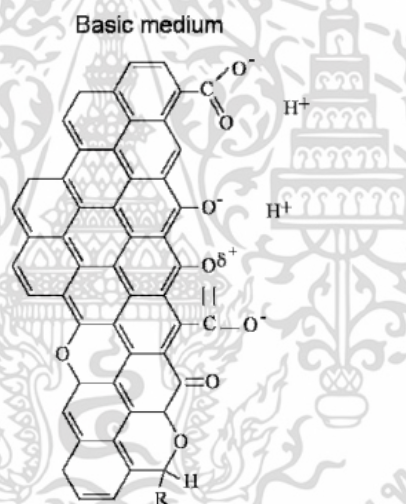
สำหรับหมู่ฟังก์ชันแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. หมู่ฟังก์ชันชนิดกรด แสดงดังรูปที่ 2.20 เกิดในคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิที่ไม่สูงมาก เช่น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล ฟีนอล แลคโตน คีโตน ควิโนน เป็นต้น ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ชนิดนี้สามารถดูดซับโมเลกุลเบสได้ดี
2. หมู่ฟังก์ชันชนิดเบส แสดงดังรูปที่ 2.21 เกิดในคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 – 900 องศาเซลเซียส เช่น หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล ผิวของคาร์บอนกัมมันต์ชนิดนี้สามารถดูดซับโมเลกุลกรดได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 หมู่ฟังก์ชันที่ทำให้พื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์มีสภาพเป็นกรด (Teresa, J.B. 2006)



รูปที่ 2.21 หมู่ฟังก์ชันที่ทำให้พื้นผิวของคาร์บอนกัมมันต์มีสภาพเป็นเบส (Teresa, J.B. 2006)

2.5.4 การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีของคาร์บอนกัมมันต์

การดูดซับ เป็นกระบวนการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างผิวหน้า (Interface) สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 พื้นผิว เช่น ของเหลวกับของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง สารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) เช่น คาร์บอนกัมมันต์

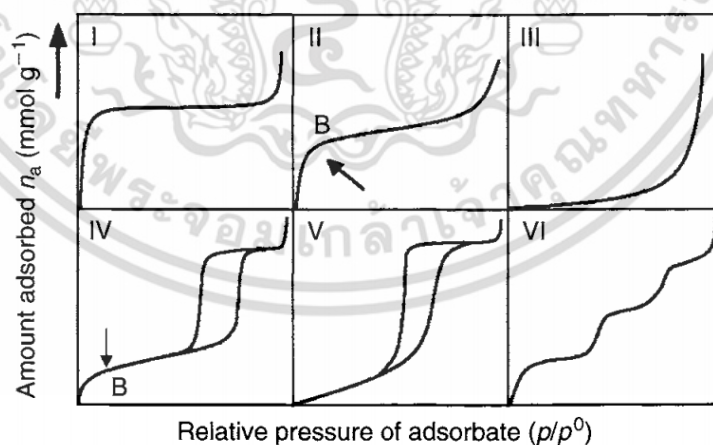
การดูดซับมี 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) ปัจจัยเอกสารถึงเป็นเอกสารถึงสวณเวสส่าหึงการเซ็งจ่านเพือการศกษ่าเท่านัน เมืออนุญาดเท่าน่าเบเซ็งประเอะชนต่นการศกษ่าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อึกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ แรงยึดเหนี่ยวของการดูดซับทางกายภาพ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ ข้อดี คือ สามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุล ตัวถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า ซึ่งจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ คือ จำนวนชั้นจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวดูดซับที่สูงขึ้น ส่วนการดูดซับทางเคมี เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เกิดจากแรงทางพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน พลังงานของการดูดซับทางเคมีมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล การแยกตัวถูกดูดซับออกจากผิวของตัวดูดซับทำได้ยาก

ความสามารถในการดูดซับของคาร์บอนกัมมันต์ขึ้นกับปัจจัยต่อไปนี้

- พื้นที่ผิวทั้งหมด คาร์บอนกัมมันต์ที่ดีต้องมีพื้นที่ผิวมาก
- ขนาดและรูปร่างของรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ ต้องเหมาะสมกับขนาดและรูปร่างของตัวถูกดูดซับ
- ชนิดของวัสดุที่ใช้สังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์ หากใช้วัสดุที่มีเนื้อแน่น เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม และถ่านหิน เมื่อถูกกระตุ้นจะเกิดรูพรุนขนาดเล็กและได้พื้นที่ผิวสูง
- ชนิดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ บนพื้นผิวรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์

ไอโซเทิร์มของการดูดซับแบ่งได้ 6 แบบ ดังรูปที่ 2.22 (ธราพงษ์ วิทิตสานต์. 2554)



รูปที่ 2.22 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Harry, M. and Francisco, R.R. 2006)

ไอโซเทิร์มแบบที่ I เป็นไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) เป็นการดูดซับของตัวดูดซับที่เป็นของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Micropore) เช่น คาร์บอนกัมมันต์ ซีโอไลต์ การดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในรูพรุนขนาดเล็กและดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยประมาณ $0.5 P/P_0$ ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทิร์มแบบที่ I คือ การดูดซับของแอมโมเนียบนผิวถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 273 K

ไอโซเทิร์มแบบที่ II เป็นไอโซเทิร์มที่มีรูปแบบซิกมอยด์ หรือแบบเอส (Sigmoid or S-shaped) ซึ่งเป็นรูปแบบของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (Macropore) อาจเกิดการดูดซับหลายชั้น (Multilayer) จากกราฟไอโซเทิร์มตรงบริเวณจุด B ดังรูปที่ 2.23 แสดงการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ที่เสร็จสมบูรณ์ จากนั้นเมื่อความดันสูงขึ้นจึงจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ

ไอโซเทิร์มแบบที่ III เป็นรูปแบบของการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่อ่อน พบในวัสดุที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทิร์มแบบที่ III คือ การดูดซับของไอน้ำบนผิวถ่านที่ไม่มีรูพรุน

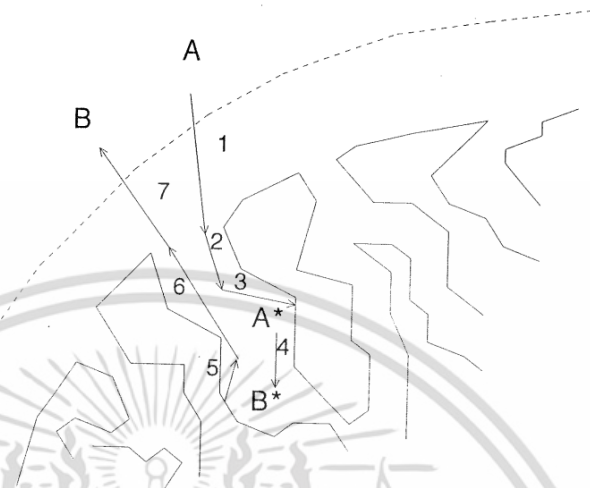
ไอโซเทิร์มแบบที่ IV พบในตัวดูดซับที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 15 – 1,000 อังสตรอม ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีการดูดซับที่เพิ่มเติมในรูพรุน และการเปลี่ยนแปลงระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลจากการควบแน่นภายในรูพรุนขนาดเล็กที่เป็นคอขวดของตัวดูดซับ (Capillary condensation in pores) ลักษณะเส้นกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับไอโซเทิร์มแบบที่ II ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B แสดงถึงการดูดซับที่เต็มขั้นแรกอย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่น การดูดซับไอของเบนซีนบนเหล็กออกไซด์เจลที่อุณหภูมิ 320 K

ไอโซเทิร์มแบบที่ V พบในตัวดูดซับที่แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่เป็นแก๊สกับผิวของตัวดูดซับมีค่าน้อย มีลักษณะคล้ายกับไอโซเทิร์มแบบที่ IV แต่แบบที่ V สามารถเกิดการควบแน่นในรูพรุนที่เป็นคอขวดเมื่อให้ความดันของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น การดูดซับของไอน้ำบนถ่านหินที่อุณหภูมิ 373 K

ไอโซเทิร์มแบบที่ VI ไอโซเทิร์มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) พบไม่บ่อย การดูดซับเกิดทีละชั้นบนพื้นผิวที่มีหลายชั้น เป็นการดูดซับที่มีความเป็นระเบียบสูง ความชันของเส้นไอโซเทิร์มขึ้นกับอุณหภูมิของการดูดซับ

สำหรับความสัมพันธ์ของชนิดไอโซเทิร์มกับพื้นที่ผิวภายในรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยา อธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีไอโซเทิร์มชนิดที่ I มีพื้นที่ผิวภายในรูพรุนสูงที่สุด เพราะมีรูพรุนขนาดเล็กและความพรุนสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีไอโซเทิร์มชนิดที่ II และ III จะมีพื้นที่ผิวภายในรูพรุนน้อยที่สุด เพราะมีรูพรุนขนาดใหญ่และเป็นวัสดุที่มีความพรุนต่ำ

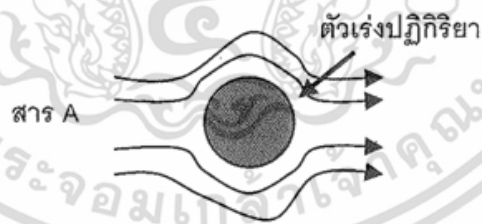
2.5.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์



รูปที่ 2.23 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ของสารตั้งต้นบนตัวเร่งปฏิกิริยา (Moulijn, J.A. et. al. 1993)

รูปที่ 2.23 แสดงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ของสารตั้งต้น A เป็นผลิตภัณฑ์ B บนตัวเร่งปฏิกิริยา 7 ขั้นตอน ดังนี้

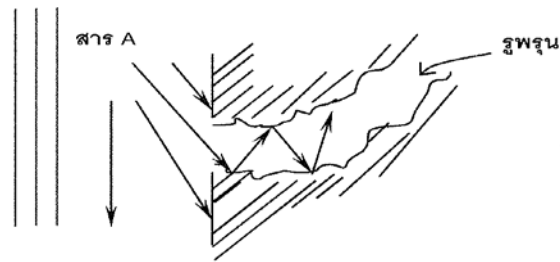
1. การแพร่ของสารตั้งต้นจากภายนอก (External diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้น A จากกระแสของไหลผ่านผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังชั้นขอบเขต (Boundary layer) ที่ล้อมรอบตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.24 ขั้นตอนนี้ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี



รูปที่ 2.24 การแพร่ของสารตั้งต้นจากกระแสของไหลภายนอกตัวเร่งปฏิกิริยา (จตุพร วิทยาคูณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547)

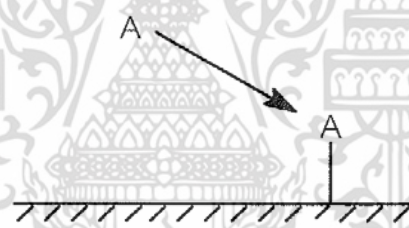
2. การแพร่ของสารตั้งต้นเข้าไปภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (Internal pore diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้น A จากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาผ่านเข้าไปภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.25 เนื่องจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดและรูปร่างที่ไม่แน่นอน ทำให้การแพร่ในขั้นตอนนี้มีการชนกัน ทั้งการชนกันระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น A และการชนกับผนังของรูพรุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



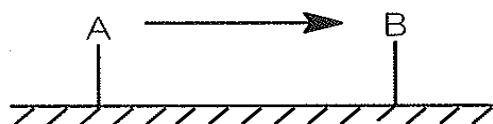
รูปที่ 2.25 การแพร่ของสารตั้งต้นเข้าไปภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547)

3. การดูดซับ เป็นการดูดซับของสารตั้งต้น A ไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในการเร่งปฏิกิริยาจะเป็นการดูดซับทางเคมีเสมอ คือ เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารตั้งต้น A ในกรณีนี้เรียกว่าตัวถูกดูดซับ กับผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง ในกรณีนี้เรียกว่าตัวดูดซับ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.26 การดูดซับนี้ทำให้เกิดการจับติดของสารตั้งต้นเป็นชั้นเดียวที่ผิวน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.26 การดูดซับทางเคมีของสาร A บนผิวน้ำของตัวเร่งปฏิกิริยา (จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547)

4. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) ชั้นตอนนี้ปฏิกิริยาเกิดที่พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา โมเลกุลของสารตั้งต้น A เกิดปฏิกิริยาเคมีไปเป็นผลิตภัณฑ์ B ที่ตำแหน่งซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา หรือบริเวณที่เกิดการเร่งปฏิกิริยา (Active sites) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การเกิดปฏิกิริยาบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจากโมเลกุล A ไปเป็น B (จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การคายซับ (Desorption) ขั้นตอนนี้โมเลกุลของผลิตภัณฑ์ B จะเกิดการคายหรือหลุดออกจากผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังการสิ้นสุดของปฏิกิริยา เป็นการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีขั้นตอนสุดท้าย

6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นการแพร่ของผลิตภัณฑ์ B ผ่านรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยากลับไปสู่ผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 4 เกิดไม่สมบูรณ์ ในขั้นตอนนี้ก็จะมีสารตั้งต้น A แพร่ออกมาด้วย

7. การแพร่ของผลิตภัณฑ์ B จากผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังชั้นขอบเขตที่ล้อมรอบตัวเร่งปฏิกิริยา และกระแสของไหล ถ้าปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์จะมีสารตั้งต้น A แพร่ออกมาด้วยเช่นกัน

2.5.6 การเคลือบฝังโลหะบนคาร์บอนกัมมันต์

เนื่องจากโครงสร้างของคาร์บอนกัมมันต์มีพื้นที่ผิวภายในสูง ดังนั้นคาร์บอนกัมมันต์จึงสามารถดูดซับสารได้หลายชนิด การใช้สารเคมีหรือโลหะบางชนิดเคลือบฝัง (Impregnate) บนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ สามารถช่วยให้คาร์บอนกัมมันต์เกิดการดูดซับหรือทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับเร็วขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกลไกการดูดซับโดยใช้ปฏิกิริยาเคมี ซึ่งกรณีนี้ตัวถูกดูดซับจะถูกตรึงด้วยพันธะทางเคมี สาเหตุสำคัญ 4 ประการที่ต้องเคลือบฝังสารเคมีหรือโลหะบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ คือ

1. เพื่อให้คาร์บอนกัมมันต์มีประสิทธิภาพการดูดซับคงที่
2. เพิ่มประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาจากการทำงานร่วมกันระหว่างคาร์บอนกัมมันต์และสารที่เคลือบฝัง
3. เพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างของตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยา
4. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับและการเร่งปฏิกิริยา

การเคลือบฝังคาร์บอนกัมมันต์ทำได้ 2 วิธี คือ

1. การเคลือบฝังแบบเปียก (Wet impregnation) สามารถทำได้โดยเติมคาร์บอนกัมมันต์ในสารละลายของเกลือโลหะที่ปริมาณมากเกินไป เกลือโลหะจะแพร่กระจายเข้าคาร์บอนกัมมันต์ จากนั้นทำให้ร้อนเพื่อให้เกลือโลหะที่อยู่บนคาร์บอนกัมมันต์สลายตัวให้เกลือโลหะออกไซด์เกาะบนผิวของคาร์บอนคาร์บอนกัมมันต์

2. การเคลือบฝังแบบแห้ง (Dry impregnation) คาร์บอนกัมมันต์จะถูกพ่นด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสม ปริมาตรสารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณเท่ากับปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของคาร์บอนกัมมันต์หรือน้อยกว่าเล็กน้อย เพื่อควบคุมปริมาณขององค์ประกอบที่ว่างไวบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรรมวิธีหลังการเคลือบฝัง คือ การเผาที่อุณหภูมิสูง (Calcination) และการรีดิวซ์เป็นโลหะ (Reduction to the metal) เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการ เช่น สารที่ไม่เสถียร สารที่ระเหยได้ง่าย อุณหภูมิที่ใช้ต้องสูงพอเพื่อทำให้เกิดสภาพเริ่มต้นของการรวมตัวของผลึก (Incipient sintering) แต่ต้องไม่ให้เกิดการรวมตัวของผลึกที่มากเกินไป (Excessive sintering) ซึ่งอาจทำให้พื้นที่ผิวของคาร์บอนกัมมันต์และตำแหน่งว่างไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลง โลหะออกไซด์ที่เคลือบฝังบนคาร์บอนกัมมันต์จะถูกรีดิวซ์เป็นโลหะในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องโดยใช้แก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 300 – 400 องศาเซลเซียส

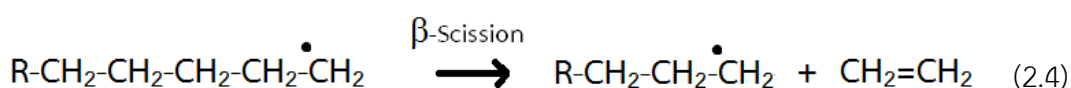
2.6 การแตกตัวด้วยความร้อนและการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552; ธารพงษ์ วิจิตรศานต์. 2554; Basu, P. 2010)

การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการแตกไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กลงโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีขนาดสายโซ่คล้ายกับเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม ในระหว่างเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน อาจได้ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนที่มีความว่างไวในการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะส่วนที่มีแขนของโอเลฟินส์ซึ่งจะสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อและสามารถทำปฏิกิริยากันเองได้ กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) และเกิดต่อไปอย่างต่อเนื่อง ขั้นตอนแรกความร้อนจะไปสลายสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน ทำให้ได้อนุมูลอิสระที่จะทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และดึงไฮโดรเจนออกจากอัลเคน เนื่องจากอนุมูลอิสระที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่สอง (2° radical) จะมีความเสถียรมากกว่าอนุมูลอิสระที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่หนึ่ง จะได้ผลิตภัณฑ์อัลเคนที่มีโมเลกุลเล็กลง ดังสมการที่ (2.3)

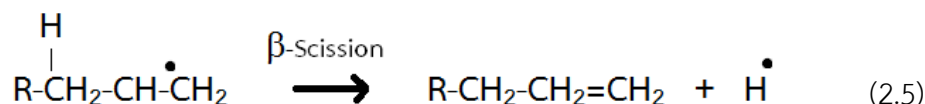


อนุมูลอิสระในขั้นเริ่มต้นทำปฏิกิริยาต่อไปอย่างต่อเนื่อง การแตกตัวเริ่มจากอนุมูลอิสระเข้าไปยังพันธะคาร์บอนที่ตำแหน่ง β เกิดอนุมูลอิสระใหม่ (β -Scission) ซึ่งทำให้ภายในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเกิดความไม่เสถียร ส่งผลให้เกิดขั้นตอนการถ่ายโอนโมเลกุลของไฮโดรเจน (Chain transfer) เพื่อทำให้โมเลกุลเกิดความเสถียร และเกิดเป็นสารต่างๆ ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง พร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ต่อไปเรื่อยๆ ดังสมการที่ (2.4)-(2.6)

β -Scission



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Chain transfer

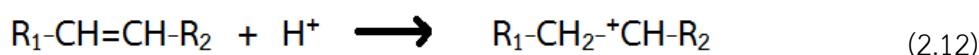
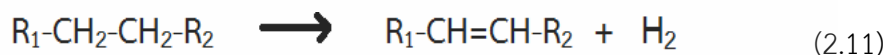


ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นหยุดปฏิกิริยา (Termination step) อนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากันเอง เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจจะเกิดเป็นโมเลกุลใหญ่ 1 โมเลกุล หรือแตกเป็นโมเลกุล 2 โมเลกุล ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ



กลไกของการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในกรณีการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Thermal and catalytic cracking) ประกอบด้วย

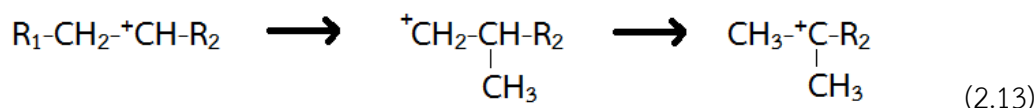
1. ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดไอออนคาร์บอนเนียม (Carbonium ion) เกิดจากการสูญเสียไฮโดรเจนจากไฮโดรคาร์บอนที่มีประจุลบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด ส่งผลให้เกิดเป็นไอออนคาร์บอนเนียมที่มีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า ซึ่งเสถียรภาพของไอออนคาร์บอนเนียมที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน ไอออนคาร์บอนเนียมที่มีโครงสร้างแบบตติยภูมิ (Tertiary ion) จะมีเสถียรภาพสูงกว่าไอออนคาร์บอนเนียมที่มีโครงสร้างแบบทุติยภูมิ (Secondary ion) และปฐมภูมิ (Primary ion) ดังสมการที่ (2.11)-(2.12)



สัญลักษณ์ R_1 และ R_2 แทน หมู่อัลคิลที่ 1 และ 2

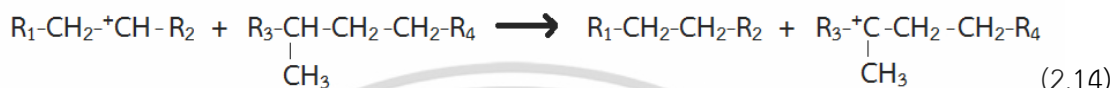
2. ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไอออนเมทิลคาร์โบเนียม เกิดจากการที่เสถียรภาพของไอออนคาร์โบเนียมมีความแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน ดังสมการที่ (2.13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

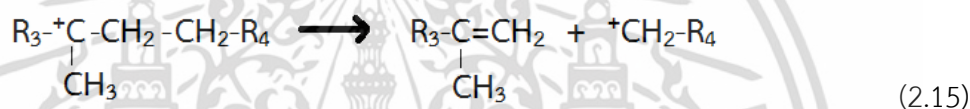


R_1 คือ CH_3

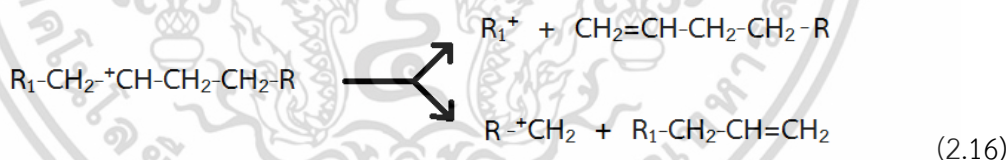
3. เกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ (Hydride transfer) ปฏิกริยาจะเกิดระหว่างไอออนคาร์บอนเนียมกับสายโซ่ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังสมการที่ (2.14)



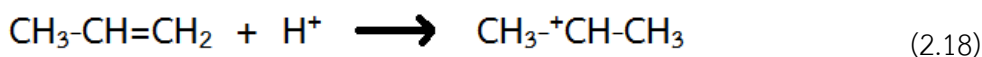
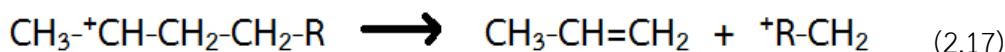
ไอออนคาร์บอนเนียมที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (β - fission) ที่ตำแหน่ง β ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบโอเลฟินส์และคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง ส่วนใหญ่จะเป็น primary carbonium ion ดังสมการที่ (2.15)



เกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ (Hydride transfer) โดยปฏิกริยาจะเกิดระหว่างไอออนคาร์บอนเนียมกับสายโซ่ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังสมการที่ (2.16)



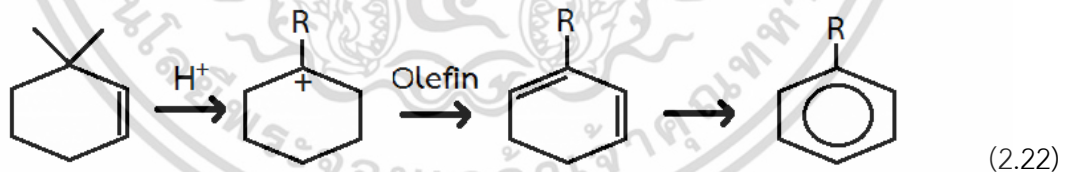
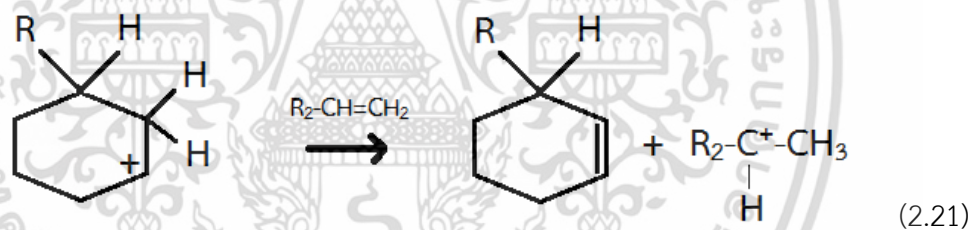
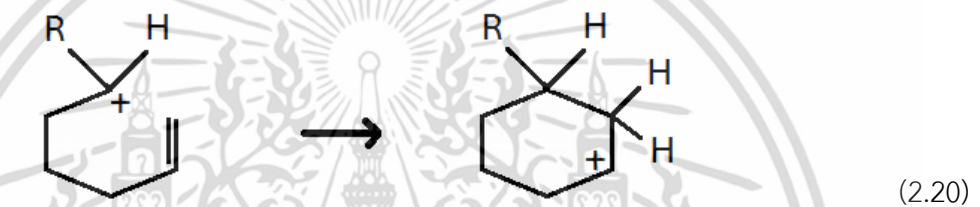
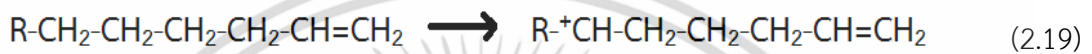
กรณีที่ R_1 คือ H การเกิด β - fission จะเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังสมการที่ (2.17) ซึ่งจะได้โพรพีนเป็นผลิตภัณฑ์และเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนได้เป็นโมเลกุลที่อยู่ในรูปไอออนคาร์บอนเนียม ซึ่งไม่สามารถเกิด β - fission ต่อได้ แสดงดังสมการที่ (2.18) จากนั้น isopropyl carbonium ion จะถ่ายโอนเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ให้กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นได้โพรเพนเกิดขึ้น หรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอนซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน



(Isopropyl carbonium ion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปฏิกริยาไฮโดรไซคลิกเซชัน (Dehydrocyclization) เป็นปฏิกริยาการเกิดวงแหวนแอโรแมติก โดยโอเลฟินส์จะเกิดเป็นไอออนคาร์บอนเนียม จากนั้นจะเกิดปฏิกริยา β - fission ได้ไอออน olefin carbonium ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดการเคลื่อนย้ายไอออนไฮโดรด์จากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกริยา ได้ไอออน allylic carbonium ที่มีเสถียรภาพ และเกิดการรับโปรตอนจากไซโคลเฮกซะไดอิน (Cyclohexadiene) ในปฏิกริยาขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบแอโรแมติก ดังสมการที่ (2.19)-(2.22)

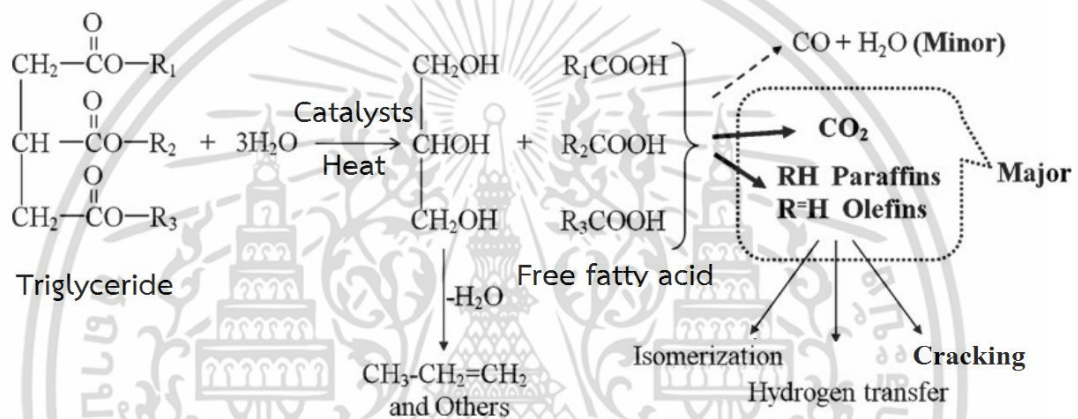


ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกริยาการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาจะได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินส์สูง องค์ประกอบของวงแหวนเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารแอโรแมติกและโอเลฟินส์มาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดไอ และโค้ก (Coke) ที่เกาะบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกริยา ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวของรูพรุนและความว่องไวในการเกิดปฏิกริยาของตัวเร่งปฏิกริยาลดลงจนตัวเร่งปฏิกริยาเกิดการเสื่อมสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การแตกตัวของน้ำมันพืชด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Maher, K.D. et al. 2007; Tani, H. et al. 2011)

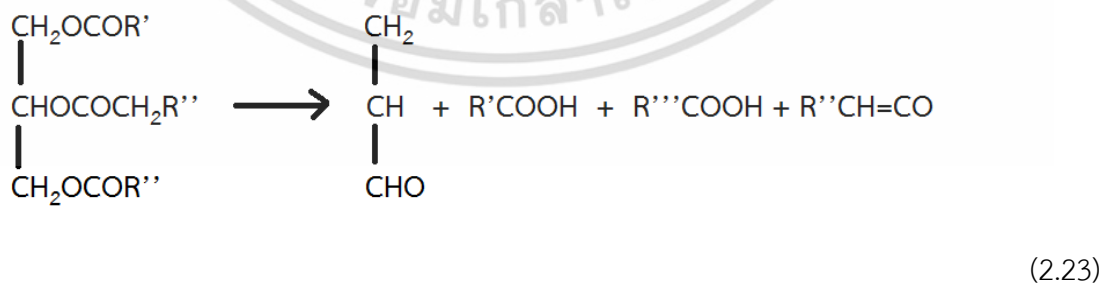
ในการแตกตัวของน้ำมันพืชด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ภาวะเหมาะสม ในกรณีที่น้ำมันพืชมีน้ำปนอยู่จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ได้กลีเซอรอลและกรดคาร์บอกซิลิกซึ่งเป็นกรดไขมันอิสระ ดังรูปที่ 2.28 ส่วนกรณีน้ำมันพืชที่ไม่มีน้ำปนอาจแตกตัวได้กรดไขมันอิสระ สารประกอบคีโตน และสารประกอบอะโรมาติก (อัลดีไฮด์ชนิดหนึ่ง) ซึ่งจะเกิดการแตกโมเลกุลต่อและเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (2.23)-(2.38) ได้สารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟินส์และโอเลฟินส์ เช่น แก๊สไฮโดรคาร์บอน แก๊สโซลีน เคโรซีน แก๊สออยล์เบา และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



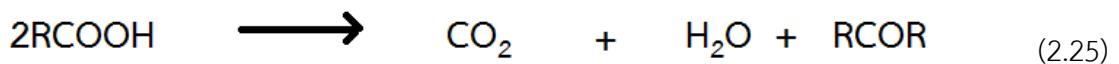
รูปที่ 2.28 ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา (Tani, H. et al. 2011)

ขั้นตอนการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่มีน้ำปนอยู่ (Maher, K.D. et al. 2007)

(1) การแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ (Decomposition of triglyceride)

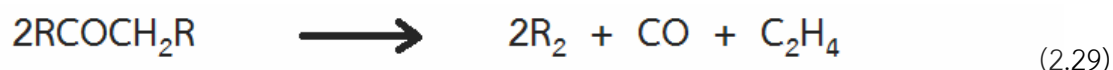
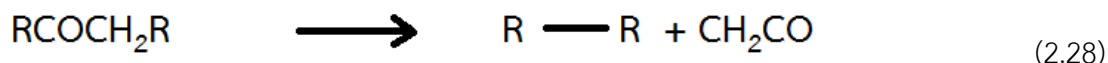
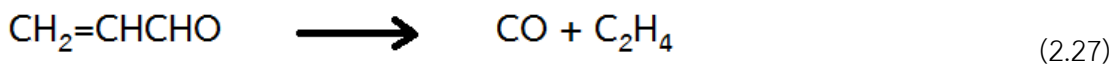
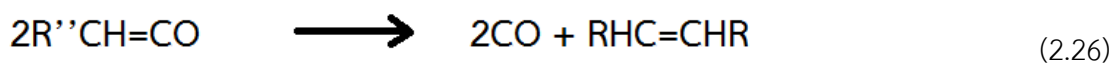


(2) การแตกตัวของกรดไขมันอิสระ (Decomposition of free fatty acids)

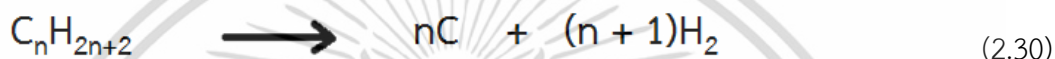


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

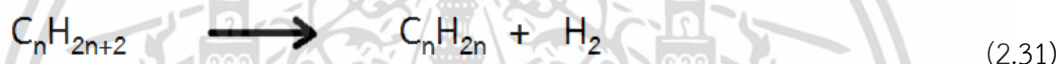
(3) การแตกตัวของคีตินและอะโครลีน (Decomposition of ketene and acrolein)



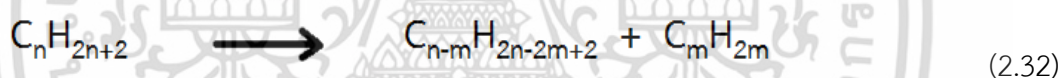
(4) การแตกตัวเป็นธาตุ (Decomposition into elements)



(5) เกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของพาราฟินส์ (Dehydrogenation of paraffins)

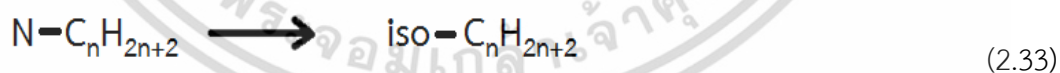


(6) การแตกตัวของพาราฟินส์ออกเป็น 2 โมเลกุล (Splitting Decomposition of paraffins)

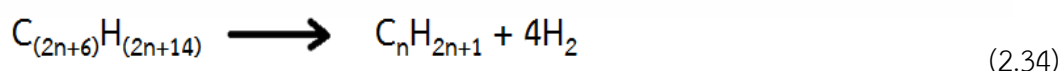


(7) เกิดปฏิกิริยาอัลคิเลชันของพาราฟินส์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของข้อที่ (6) (Alkylation of paraffins, reverse of ข้อที่ (6))

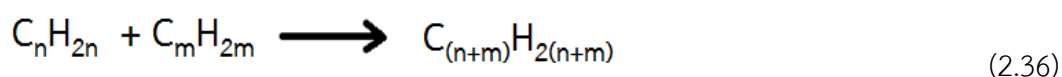
(8) เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของพาราฟินส์ (Isomerization of paraffins)



(9) เกิดปฏิกิริยาการเป็นวงแหวนแอโรแมติกของพาราฟินส์ (Aromatic cyclization of paraffins)

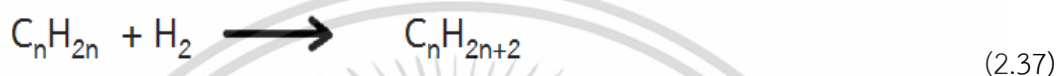


(10) เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโอเลฟินส์ (Polymerization of olefins)

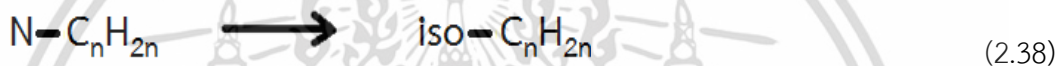


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (11) เกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอไรเซชันของโอเลฟินส์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของข้อที่ (10) (Depolymerization of olefins, reverse of ข้อที่ (10))
- (12) การแตกตัวของโอเลฟินส์เป็นไดโอเลฟินส์ (Decomposition of olefins to diolefins)
- (13) การแตกตัวของโอเลฟินส์เป็นโมเลกุลอะเซทิลีน (Decomposition of olefins to acetylenic hydrocarbons)
- (14) เกิดปฏิกิริยาแอโรมาติกส์ของวงแหวนโอเลฟินส์ (Aromatization of cyclization of olefins)
- (15) เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของโอเลฟินส์ (Hydrogenation of olefins)



- (16) เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของโอเลฟินส์ (Isomerization of olefins)

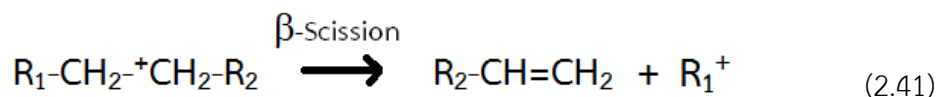
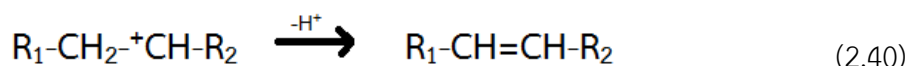


2.8 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (ปราโมทย์ ไชยเวช, 2552; ธารพงษ์ วิทิตศานต์, 2554; Basu, P. 2010)

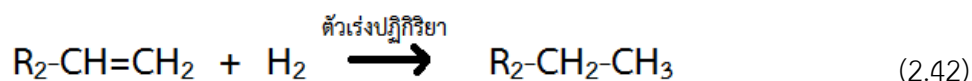
การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมแก๊สไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีกิ่งจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินส์และแนฟทีน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจากการเกิดไอออนคาร์บอนเนียมบริเวณพื้นผิวที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการที่ (2.39)



ไอออนคาร์บอนเนียมอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่และกำจัดโปรตอนออกจากโอเลฟินส์ หรือแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินส์และไอออนคาร์บอนเนียมตัวใหม่ จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนและการตั้งไฮโดรเจน โอเลฟินส์ที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนจะกลายเป็นสารประกอบประเภทพาราฟินส์ ดังสมการที่ (2.40)-(2.42)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การเติมแก๊สไฮโดรเจนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่อิ่มตัว และการเติมแก๊สไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถกำจัดโค้กบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย การแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์สูง จึงต้องควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างเหมาะสม เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา หรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการแตกโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค ได้แก่ น้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป เช่น

รวีวรรณ สวัสดิ์รักษา (2552) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันสบู่ดำด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM5 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจน 6.8 บาร์เกจ เมื่อใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 6.35 wt% อุณหภูมิ 426 องศาเซลเซียส และเวลา 56 นาที ได้ค่าการแปลงผัน (Conversion) ของสารตั้งต้น 93.62% ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็ง 25, 60.5 และ 14.5 wt% องค์ประกอบในของเหลวมีเนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์หนัก และกาน้ำมันหนัก 38.35, 0.31, 16.44, 1.56 และ 3.84 wt% ตามลำดับ และเมื่อแตกโมเลกุลโดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวที่ภาวะเดียวกันได้ของเหลวเพิ่มขึ้นเป็น 65 wt% แต่เนฟทาลดลงเหลือ 20.10 wt%

Junming, X. et al. (2010) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค เช่น น้ำมันตุง และน้ำมันสบู่ดำด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องภายใต้ความดันบรรยากาศ ภาวะที่ศึกษา คือ อัตราการป้อนสารตั้งต้น 50 กรัมต่อชั่วโมง อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 450 - 500 องศาเซลเซียส พบว่าการแตกโมเลกุลของน้ำมันตุงที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ต่อน้ำมันตุง 3 wt% ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว 81 และของแข็ง 7.5 wt% ส่วนกรณีการแตกโมเลกุลของน้ำมันสบู่ดำ ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ต่อน้ำมันสบู่ดำ 5 wt% ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว 76 และของแข็ง 10 wt% องค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกโมเลกุลมีสมบัติคล้ายกับน้ำมันดีเซล

ธนาทิพย์ ศรีสุวงศ์ (2554) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ MgO ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ พบว่าที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ต่อน้ำมันตุง 2.5 wt% อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส เวลา 38 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว 37.55 wt% ซึ่งประกอบด้วยเนฟทา 19.16 เคโรซีน 11.58 และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สออกไซด์เบา 5.71 wt% ส่วนกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO ต่อน้ำมันตุง 2.5 wt% ที่อุณหภูมิ 402 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว 38.83 wt% ซึ่งประกอบด้วยแนฟทา 21.43 เคโรซีน 8.37 และแก๊สออกไซด์เบา 8.01 wt% นอกจากนี้ได้ทดสอบผลของความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1, 3 และ 5 บาร์เกจ ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และเวลาคงที่ พบว่าความดันของแก๊สไฮโดรเจนไม่มีผลต่อผลได้ของของเหลว และองค์ประกอบในของเหลว

Buzetcki, E. et al. (2011) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดเรปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ภาวะที่ทำการปฏิกิริยา คือ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันเมล็ดเรป 10 wt% ระหว่างอุณหภูมิ 350 - 440 องศาเซลเซียส และเวลาทำการปฏิกิริยา 25 - 95 นาที สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM5 ที่เวลาทำการปฏิกิริยา 78 นาที ให้ปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และยางเหนียว (Bitumen) 3, 77 และ 20 wt% ตามลำดับ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา NH₄Y คาร์บอนกัมมันต์ และแร่เบนทอนิต (Bentonite) ให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว 80 - 88 wt% แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะใช้เวลาทำการปฏิกิริยา 50 - 78 นาที ซึ่งนานกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด NaY และ CL (Clinoptilolite) ที่ให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว 82 - 90 wt% แต่ใช้เวลาทำการปฏิกิริยาเพียง 20 - 40 นาที

ภาณุพันธ์ พรหมบุตร (2556) สังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Fluid Catalytic Cracking (FCC) ที่ใช้แล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะภายใต้บรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ผลการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคทั้งสามชนิดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ อุณหภูมิและเวลาทำการปฏิกิริยาที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด คือ 390 องศาเซลเซียส และ 30 นาที ปริมาณของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้ว 1 wt% ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO 3 wt% และตัวเร่งปฏิกิริยา MgO 1 wt% เท่ากับ 78.00, 76.50 และ 77.22 wt% องค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวประกอบด้วยแนฟทา 8.72 - 12.68 เคโรซีน 9.69 - 12.05 แก๊สออกไซด์เบา 22.95 - 23.66 แก๊สออกไซด์หนัก 4.43 - 4.78 และกากน้ำมันหนัก (Long residue หรือ Residue) 26.52 - 30.72 wt%

ชุตินาพร วรรณวงษ์ (2556) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ขนาด 70 มิลลิลิตร พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้วต่อน้ำมันสบู่ดำ 1 wt% ที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ได้แก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง 12.75, 85.37 และ 1.88 wt% องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวประกอบด้วยแนฟทา 10.36 เคโรซีน 6.06 แก๊สออกไซด์เบาและแก๊สออกไซด์หนัก 44.82 และกากน้ำมันหนัก 24.13 wt% นอกจากนี้ได้ทดสอบผลของความดันของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สไฮโดรเจน 1, 3 และ 5 บาร์เกจ พบว่าความดันของแก๊สไฮโดรเจนไม่มีผลต่อผลได้ของของเหลวและองค์ประกอบในของเหลวเมื่ออัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันสปูตา อุณหภูมิ และเวลาคงที่

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ เช่น

ปัทมา ชูช่วย (2544) ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ อุณหภูมิ 385-425 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-90 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 20-40 kg/cm² ต่อการแตกตัวของพอลิบิวทีน-1 ไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ พบว่าที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 40 kg/cm² ร้อยละโดยน้ำหนักของแก๊ส 6.86 ผลิตภัณฑ์ของเหลว 88.57 (ประกอบด้วย แนฟทา 45.76 เคโรซีน 13.77 แก๊สออยล์เบา 9.59 แก๊สออยล์หนัก 6.89 และ กากน้ำมันหนัก 12.56 wt%) และของแข็ง 4.57 ตามลำดับ

ศิวธิดา อินสุข (2547) ศึกษาการแตกตัวของอะคริโลไนไทรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างอะคริโลไนไทรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 4 : 6 ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5 wt% อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 90 นาที ความดันของแก๊สไฮโดรเจน 100 psi ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด 60.52 wt% (ประกอบด้วยแนฟทา 38.60 เคโรซีน 7.64 แก๊สออยล์เบา 13.17 แก๊สออยล์หนัก 1.48 และกากน้ำมันหนัก 4.44 wt%) แก๊ส 24.21 และของแข็ง 13.50 wt%

ประชารัตน์ แท้ภักดี (2547) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วผสมกับพลาสติกพอลิพรอพิลีน (PP) และพลาสติกพอลิสไตรีน (PS) ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ขนาด 70 มิลลิลิตร ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน วัตถุประสงค์ที่ใช้ทั้งหมด 15 กรัม ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 50 : PP 25 : PS 25 (PP : PS เท่ากับ 50 : 50) และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 60 : PP 28 : PS 12 (PP : PS เท่ากับ 70 : 30) อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 1, 5 และ 10 wt% อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.15 – 1.5 (0.1-1.5 กรัม ของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ต่อวัตถุประสงค์ 15 กรัม) อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 390-450 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 45-105 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1-10 บาร์เกจ ภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 50 : PP 25 : PS 25 อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 5 wt% อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.8 wt% อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลา 75 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ได้แก๊ส 17.37 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลิตภัณฑ์ของเหลว 75.65 wt% (ประกอบด้วยแนฟทา 46.34 เคโรซีน 10.02 แก๊สออยล์เบา 11.98 แก๊สออยล์หนัก 2.76 และกากน้ำมันหนัก 4.55 wt%) และของแข็ง 6.98 wt%

จินตนา สุมารินทร์ (2549) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 5-wt% Fe/AC ในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 0.1 – 1.0 wt% อุณหภูมิ 390 – 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสายป้อน 0.34 – 3.30 กรัมต่อนาที พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัว คือ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 1 wt% อุณหภูมิ 430 – 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสายป้อน 2.77 กรัมต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว 57.21 – 57.36 wt% ซึ่งประกอบด้วยแนฟทา 18.81 – 20.31 เคโรซีน 3.96 – 4.01 แก๊สออยล์เบา 11.27 – 11.87 แก๊สออยล์หนัก 2.40 – 2.64 และกากน้ำมันหนัก 19.22 – 20.28 wt%

Li, M. et al. (2007) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันเตาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์และนิกเกิลบนคาร์บอนกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่ความดัน 6 MPa การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือด คือ อุณหภูมิต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส 9.13 wt% อุณหภูมิ 180 – 360 องศาเซลเซียส 31.37 wt% อุณหภูมิ 360 – 450 องศาเซลเซียส 32.75 wt% และอุณหภูมิสูงกว่า 450 องศาเซลเซียส 26.75 wt%

วิซชากร จารุศิริ (2551) ศึกษาผลของอุณหภูมิ อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน และอัตราการไหลของสารป้อนผสมระหว่างน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และพรอพิลีนต่อการแตกตัวด้วยความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารป้อน ได้แก่ น้ำมันพืชที่ใช้แล้ว น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว และพรอพิลีน เท่ากับ 0.7 : 0.1 : 0.2 อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 5 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลของสารป้อน 1.23 กรัมต่อนาที บนตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt% เหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ได้ร้อยละของแนฟทาสูงที่สุด 50.95 เคโรซีน 10.38 แก๊สออยล์เบา 21.68 แก๊สออยล์หนัก 10.92 และ กากน้ำมันหนัก 16.99 โดยน้ำหนัก

กรกช จันทโรสภาพิศ (2552) ศึกษาการแตกตัวของไขวัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 10 wt% เหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 0.25 – 1 wt% อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 400 – 430 องศาเซลเซียส เวลา 30 – 90 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 – 5 บาร์เกจ พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัว คือ อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 0.75 wt% อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 69.51 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ได้แก๊ส 29.37 ผลิตภัณฑ์ของเหลว 68.14

(ประกอบด้วยแนฟทา 33.68 เคโรซีน 9.22 แก๊สออยล์เบา 21 wt% กากน้ำมันหนัก 4.30 wt%) และของแข็ง 2.45 wt% ร้อยละของการแปลงผัน 95.29 wt%

Tran, T.V. et al. (2012) ศึกษาการแตกตัวของโมเลกุลของกากจากกันหอกลั่นสุญญากาศ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีใบกวน ที่อัตราการให้ความร้อน 30 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจนที่ความดัน 3.45 MPa ได้ค่าการแปลงผัน 69.2 wt% ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วย แนฟทา 13 ดิสทิลเลตช่วงกลาง 34.9 แก๊สออยล์หนัก 27.1 และกากน้ำมันหนัก 11.2 wt%

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการแตกโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว พลาสติกใช้แล้ว และ น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เช่น

Levent, D. et al. (1999) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการแตกตัวของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่ใช้แล้ว 100 กรัม ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2CO_3 , Silica-alumina และ HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันดอกทานตะวันที่ใช้แล้ว 10 wt% อุณหภูมิ 400 และ 420 องศาเซลเซียส เวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2CO_3 ที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวสูงสุด 32.83 โดยน้ำหนัก ที่ค่าการแปลงผัน 73.17 %

ตลพร ชูเกียรติสกุล และคณะ (2553) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนของ HZSM-5 ต่อน้ำมันพืชใช้แล้ว 0.5 wt% ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว 71.48 wt% (ประกอบด้วยแนฟทา 42.89 เคโรซีน 5.60 แก๊สออยล์ 15.52 และกากน้ำมันหนัก 7.47 wt%) แก๊ส 22.14 และของแข็ง 6.38 wt%

กรวิกา วงษ์ผาบ และคณะ (2553) ศึกษาการแตกตัวของพลาสติกที่ใช้แล้วชนิดพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงด้วยความร้อนร่วมกับ USY ซีโอไลต์ที่ผ่านการใช้งานแล้วจาก โรงกลั่นน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน พบว่าที่อัตราส่วนของ USY ซีโอไลต์ต่อพอลิโพรพิลีนที่ใช้แล้ว 5 wt% อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว 69.81 wt% (ประกอบด้วยแนฟทา 47.59 เคโรซีน 5.26 แก๊สออยล์เบา 13.74 แก๊สออยล์หนัก 0.51 และกากน้ำมันหนัก 2.70 wt%) แก๊ส 20.33 wt% และของแข็ง 9.86 wt% สำหรับการแตกตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วที่ภาวะการทดลองเดียวกันได้ผลิตภัณฑ์ของเหลว 22 wt% แก๊ส 12 wt% และของแข็ง 66 wt% ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้น้อยกว่าในกรณีของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ใช้แล้วค่อนข้างมากเนื่องจากพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิด

ความหนาแน่นสูงมีพันธะที่แข็งแรง การแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวต้องใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาณุพันธ์ พรหมบุตร และคณะ (2555) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ MgO ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ พบว่าการแตกโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีองค์ประกอบเป็นแนฟทาสูงกว่าการแตกโมเลกุลที่ใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว เมื่อใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ MgO ต่อน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว 3 wt% ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที ได้แก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็งใกล้เคียงกัน คือ 26.24 - 26.35, 70.23 - 70.49 และ 3.16 - 3.53 wt% ตามลำดับ องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ที่ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น 86.53% ประกอบด้วยแนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์หนัก และกากน้ำมันหนัก 24.60, 6.42, 24.05, 2.25 และ 13.17 wt% และสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา MgO ที่ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น 85.20% ประกอบด้วยแนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์หนัก และกากน้ำมันหนัก 24.93, 5.55, 23.00, 2.28 และ 14.47 wt% ตามลำดับ

ธนภัทร ลีอัมคง และคณะ (2555) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2CO_3 และ K_2CO_3 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดไม่แสดงผลอย่างมีนัยต่อความแตกต่างของผลได้และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว เมื่อใช้อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2CO_3 และ K_2CO_3 ต่อน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว 1 wt% ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที ได้ปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็งใกล้เคียงกัน เท่ากับ 30.88 - 31.44, 63.32 - 64.93 และ 3.63 - 5.80 wt% ตามลำดับ องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2CO_3 ที่ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น 87.06% ประกอบด้วยแนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์หนัก และกากน้ำมันหนัก 19.48, 5.84, 24.68, 2.27 และ 12.66 wt% และสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา K_2CO_3 ที่ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น 88.03% ประกอบด้วยแนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์หนัก และกากน้ำมันหนัก 17.73, 5.69, 25.33, 2.85 และ 11.72 wt% ตามลำดับ

พีรพจน์ เพทายพนาภิก และอรชชา คุณคำ (2555) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา USY ซีโอไลต์ที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ พบว่าที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา USY ซีโอไลต์ที่ใช้แล้วต่อน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว 1 wt% อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 3 บาร์เกจ ได้แก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง 25.66, 68.54 และ 5.80 wt% ตามลำดับ องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวประกอบด้วยแนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์หนัก และกากน้ำมันหนัก 37.25, 21.50, 14.38, 15.00 และ 11.87 wt% ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทดสอบผลของความดันของ

แก๊สไฮโดรเจน 1, 3 และ 5 บาร์เกจ ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และเวลาคงที่ พบว่าความดันของแก๊สไฮโดรเจนไม่มีผลต่อผลได้และองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลว

Lothongkum, A.W. et al. (2013) ศึกษาการแตกโมเลกุลของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วผสมกับพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับคาร์บอนกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ขนาด 70 มิลลิลิตร ภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจนคงที่ 0.1 MPa พบว่าที่อัตราส่วนของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วกับพลาสติกที่ใช้แล้ว 30 : 70 wt% ปริมาณคาร์บอนกัมมันต์ 2.5 wt% อุณหภูมิและเวลาทำปฏิกิริยา 430 องศาเซลเซียส และ 30 นาที ได้แก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็ง 19.56, 79.69 และ 0.75 wt% ตามลำดับ องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวประกอบด้วยแวนฟทา 33.20 เคโรซีน 14.62 แก๊สออยล์เบา 19.72 แก๊สออยล์หนัก 2.49 และกากน้ำมันหนัก 9.66 wt%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

สารเคมี เครื่องมือ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. น้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค ได้แก่ น้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป
2. คาร์บอนกัมมันต์ (Activated carbon) จากห้องวิจัยถ่านกัมมันต์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. แก๊สไฮโดรเจนความบริสุทธิ์ 99.99%
4. $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ รีเอเจนต์เกรด
5. น้ำกลั่น

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ทดลอง

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ดังรูปที่ 3.1 เป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ปริมาตร 70 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) SUS 316 ด้านบนมีฝาปิดทำจากสแตนเลส ชุดวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบเค (K type) และมีชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊สและวาล์วนิรภัย สามารถทดลองได้ถึงอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะปาสคัล



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ปริมาตร 70 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล ดังรูปที่ 3.2 (ก) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดความร้อนและตัวจ่ายกระแสไฟ
3. ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ ใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์แกว่ง ดังรูปที่ 3.2 (ข)



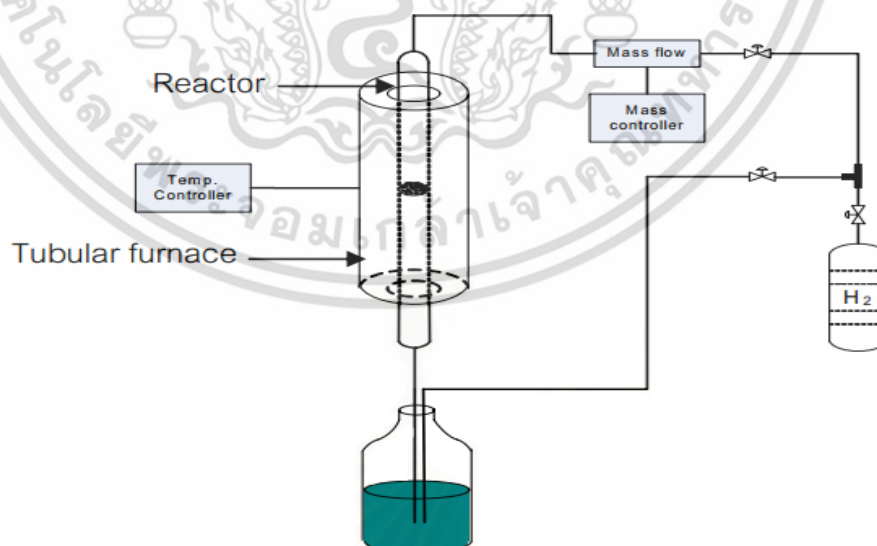
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และ (ข) ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์

4. ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยเครื่องดูดอากาศที่ต่อเข้ากับชุดเครื่องแก้ว เพื่อกรองแยกของเหลวออกจากของแข็งแบบสุญญากาศผ่านกระดาษกรอง (Filter paper)
5. ชุดอุปกรณ์สำหรับการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์สำหรับการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

6. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ขดลวดให้ความร้อน กำลัง 400 วัตต์
8. ตู้อบ
9. เต้าเผา
10. นาฬิกาจับเวลา
11. เครื่องแก้ว เช่น บีกเกอร์ กรวยกรอง แท่งแก้วคนสาร ขวดใส่สารตัวอย่าง เป็นต้น

3.3 เครื่องมือวิเคราะห์และโปรแกรมที่ใช้

1. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatograph) ดังรูปที่ 3.4 ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A ใช้ตัวตรวจวัดแบบ Flame ionize detector (FID) และคอลัมน์แบบแคปิลลารี (Capillary column) เส้นผ่านศูนย์กลาง 530 ไมครอน ความยาว 10 เมตร รุ่น CP-SIL 5 CB มีเฟสนิ่ง (Stationary phase) เป็น Dimethylpolysiloxane ความหนาของชั้นฟิล์มของเฟสนิ่งในคอลัมน์ 2.65 ไมครอน เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นใช้วิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวประเภทปิโตรเลียมตามคาบจุดเดือดของสาร ตามมาตรฐาน ASTM D2887 ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

ตารางที่ 3.1 การกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวปิโตรเลียมตามคาบจุดเดือดตามมาตรฐาน ASTM D2887 (ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552)

| ช่วงจุดเดือด (°C) | ประเภทองค์ประกอบ |
|-------------------|--|
| IBP ≤ 200 | แก๊โซลีน/แนฟทา (C ₅ - C ₁₁) |
| 200 ≤ 250 | เคโรซีน (C ₁₁ - C ₁₄) |
| 250 ≤ 350 | แก๊สออยล์เบา (C ₁₄ - C ₂₀) |
| 350 ≤ 370 | แก๊สออยล์หนัก (C ₂₀ - C ₂₃) |
| 370 ≤ FBP | กากน้ำมันหนัก (> C ₂₃) |

หมายเหตุ IBP : Initial boiling point (จุดเดือดเริ่มต้น)

FBP : Final boiling point (จุดเดือดสุดท้าย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) ใช้วิเคราะห์อุณหภูมิการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค

3. เครื่อง Autosorb ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น AUTOSORB-1MP ใช้วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ พื้นที่ผิวทั้งหมด ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน

4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

5. เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb calorimeter) Ika C2000 ดังรูปที่ 3.5 ใช้วิเคราะห์ค่าความร้อนของสาร

6. วิสโคมิเตอร์ (Viscometer) แบบหลอด (Capillary viscometer) 100 R452 ขนาดมาตรฐาน 100 ตารางมิลลิเมตร ใช้วิเคราะห์ความหนืดของสาร



รูปที่ 3.5 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

7. โปรแกรม Design Expert 6.0.10 และ Minitab R.15 ใช้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค

3.4 วิธีการทดลอง

1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ : 5 wt%-Fe/AC (ธราพงษ์ วิจิตรสานต์, 2554)

1. คัดขนาดคาร์บอนกัมมันต์ด้วยตะแกรงร่อนให้อยู่ในช่วง 0.850 – 0.685 mm
2. ชั่งคาร์บอนกัมมันต์ 50 กรัม และ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 15.63 กรัม
3. ละลายสาร $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ที่ชั่งไว้ในน้ำกลั่นปริมาณพอประมาณจน $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ละลายหมด
4. ค่อยๆ เติม สารละลาย $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ที่เตรียมไว้บนคาร์บอนกัมมันต์ กวนและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนกว่าจะแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำของผสมคาร์บอนกัมมันต์และ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ที่แห้งไปอบเพื่อไล่ความชื้นเหลือที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน
6. แบ่งคาร์บอนกัมมันต์ที่อบแล้วใส่ถ้วยเผา (Crucible) และเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
7. ก่อนนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการเคลือบฝัง (Impregnate) แล้วไปใช้งาน ต้องรีดิวซ์ด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่อัตราการไหล 120 มิลลิลิตรต่ออนาที อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2. วิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบในน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป ก่อนการแตกตัวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887

3. วิเคราะห์อุณหภูมิการแตกตัวด้วยความร้อนและอุณหภูมิการแตกตัวสูงสุดของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป ประมาณ 20 มิลลิกรัม ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) เพื่อกำหนดอุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่จะศึกษา

4. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเครื่อง Autosorb ได้แก่ พื้นที่ผิวทั้งหมด ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน

5. ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ (2^k Factorial experimental design) สำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ด้วยโปรแกรม Design Expert 6.0.10 ดังตารางที่ 3.2 – 3.5 (การทดลองตามการออกแบบการทดลองนี้แสดงผลในตารางที่ ซ.1-4 ภาคผนวก ซ.)

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

| ตัวแปร | | ระดับ | |
|--------|-------------------------------------|--------------|--------------|
| | | ระดับต่ำ (-) | ระดับสูง (+) |
| A | อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)* | 0.5 | 1.5 |
| B | อุณหภูมิ (°C) | 390 | 440 |
| C | เวลา (min) | 30 | 60 |

หมายเหตุ *อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 และ 0.15 กรัม ต่อน้ำมันพืช 10 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 จำนวนการทดลองจากการออกแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ สำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

| การทดลอง | อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (min) |
|----------|------------------------------------|---------------|------------|
| 1 | 0.5 | 390 | 30 |
| 2 | 0.5 | 390 | 60 |
| 3 | 0.5 | 440 | 30 |
| 4 | 0.5 | 440 | 60 |
| 5 | 1.5 | 390 | 30 |
| 6 | 1.5 | 390 | 60 |
| 7 | 1.5 | 440 | 30 |
| 8 | 1.5 | 440 | 60 |
| ค่ากลาง | 1 | 415 | 45 |

หมายเหตุ : (1) การทดลองที่ 1 – 8 ทดลองซ้ำ 1 ครั้งทุกการทดลอง (2) ค่ากลางทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

| ตัวแปร | | ระดับ | |
|--------|--|--------------|--------------|
| | | ระดับต่ำ (-) | ระดับสูง (+) |
| A | อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ (wt%) | 1 | 5 |
| B | อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)* | 0.5 | 1.5 |
| C | อุณหภูมิ (°C) | 390 | 440 |
| D | เวลา (นาที) | 30 | 60 |

หมายเหตุ *อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 และ 0.15 กรัม ต่อน้ำมันพืช 10 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 จำนวนการทดลองจากการออกแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ สำหรับการแตกตัวของ น้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

| การทดลอง | อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ (wt%) | อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (min) |
|----------|--|------------------------------------|---------------|------------|
| 1 | 1 | 0.5 | 390 | 30 |
| 2 | 1 | 0.5 | 390 | 60 |
| 3 | 1 | 0.5 | 440 | 30 |
| 4 | 1 | 0.5 | 440 | 60 |
| 5 | 1 | 1.5 | 390 | 30 |
| 6 | 1 | 1.5 | 390 | 60 |
| 7 | 1 | 1.5 | 440 | 30 |
| 8 | 1 | 1.5 | 440 | 60 |
| 9 | 5 | 0.5 | 390 | 30 |
| 10 | 5 | 0.5 | 390 | 60 |
| 11 | 5 | 0.5 | 440 | 30 |
| 12 | 5 | 0.5 | 440 | 60 |
| 13 | 5 | 1.5 | 390 | 30 |
| 14 | 5 | 1.5 | 390 | 60 |
| 15 | 5 | 1.5 | 440 | 30 |
| 16 | 5 | 1.5 | 440 | 60 |
| ค่ากลาง | 3 | 1 | 415 | 45 |

หมายเหตุ : (1) การทดลองที่ 1 – 16 ทดลองซ้ำ 1 ครั้งทุกการทดลอง (2) ค่ากลางทดลองซ้ำ 2 ครั้ง

6. การทดสอบการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป

6.1 กรองของแข็งออกจากน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโกล

6.2 ชั่งน้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์แบบกะก่อนการทดลอง เริ่มทดสอบกับน้ำมันตุง 10 กรัม และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตามที่กำหนดในตารางที่ 3.2 – 3.5 ในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วประกอบส่วนต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์

6.3 ไล่อากาศภายในเครื่องปฏิกรณ์ออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจน 3 ครั้ง จากนั้นอัดแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์มีขนาดเล็ก ปริมาตรเพียง 70 มิลลิลิตร และแก๊สไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ใช้ไม่ใช่สารตั้งต้นหลัก จึงไม่จำเป็นต้องคำนวณปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ต้องใช้กับน้ำมันพืชที่ไม่ใช่ปรีโกล

6.4 ต่อเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์โมคัปเปิล และขดลวดความร้อน จากนั้นหุ้มฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง เปิดชุดควบคุมอุณหภูมิ ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา และเริ่มจับเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่ต้องการศึกษาหลังจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา

6.5 ทำการทดลองที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิทำปฏิกิริยา และเวลาทำปฏิกิริยา ดังแสดงในตารางที่ 3.2– 3.5

6.6 เมื่อครบเวลาที่ต้องการศึกษา ถอดฉนวนและขดลวดให้ความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์ให้อุณหภูมิลดลง จนใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง จากนั้นค่อยๆ ปลดปล่อยแก๊สที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ออก (ถ้าปล่อยแก๊สโดยที่อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ยังไม่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง อาจทำให้ไอบางส่วนที่ยังไม่ควบแน่นเป็นของเหลวถูกปล่อยออกไป และทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน)

6.7 เปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ ชั่งน้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์หลังการทดลอง เพื่อคำนวณปริมาณแก๊สโดยใช้สมการที่ (3.1)

$$\text{ปริมาณของแก๊ส} = \text{น.น.ของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนการทดลอง} - \text{น.น.เครื่องปฏิกรณ์หลังการทดลอง} \quad (3.1)$$

6.8 แยกของเหลวออกจากของแข็งด้วยการกรองแบบสุญญากาศ ใช้ทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์ด้วยทิชชูที่อบไล่ความชื้นและชั่งน้ำหนักไว้แล้ว เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลคำนวณ จากนั้นนำของแข็งและกระดาษทิชชูห่อด้วยกระดาษฟอยล์ที่อบไล่ความชื้นและชั่งน้ำหนักแล้ว ไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และชั่งน้ำหนัก ปริมาณปริมาณของแข็งโดยใช้สมการที่ (3.2)

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณของของแข็ง} &= \text{น.น.หลังอบของกระดาษกรอง กระดาษทิชชู กระดาษฟอยล์ และกากของแข็ง} \\ &- \text{น.น.ก่อนอบของกระดาษกรอง กระดาษทิชชู และกระดาษฟอยล์} \end{aligned} \quad (3.2)$$

6.9 ปริมาณปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวจากสมการที่ (3.3)

$$\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว} = \text{น.น.ของน้ำมันตุ้ง} - \text{น.น.ของแก๊ส} - \text{น.น.ของของแข็ง} \quad (3.3)$$

6.10 ละลายผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ด้วยสารละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 โดยปริมาตร เพื่อใช้วิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 และคำนวณองค์ประกอบที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.11 เปลี่ยนชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจากคาร์บอนกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ทดสอบซ้ำในขั้นตอน 6.1 - 6.10

6.12 เลือกอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันตุงที่ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุดและมีองค์ประกอบของแกโซลีน เคโรซีน และแก๊สไฮโดรคาร์บอนสูงสุด สำหรับทดสอบการแตกตัวของน้ำมันตุงโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

6.13 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

6.14 ใช้ภาวะที่ดีที่สุดที่ระบุในข้อ 6.13 ทดสอบกับน้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป

6.15 เปรียบเทียบผลการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคทั้งสามชนิด

7. วิเคราะห์สมบัติผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองที่ภาวะที่ดีที่สุด ได้แก่ ค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D240 และความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445 เปรียบเทียบกับน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคก่อนการแตกตัว และน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค ได้แก่ น้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ เพื่อสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีองค์ประกอบมีมูลค่า เช่น แนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์เบา ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัว และองค์ประกอบในของเหลว ได้แก่ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์) อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค อุณหภูมิทำปฏิกิริยา และเวลาทำปฏิกิริยา ยืนยันภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคในเชิงปริมาณ คือ ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด และในเชิงคุณภาพ คือ ได้แนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์เบาในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวสูงที่สุดด้วยโปรแกรม Minitab R.15 และโปรแกรม Design Expert 6.0.10

4.1 สมบัติของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปก่อนการแตกตัว

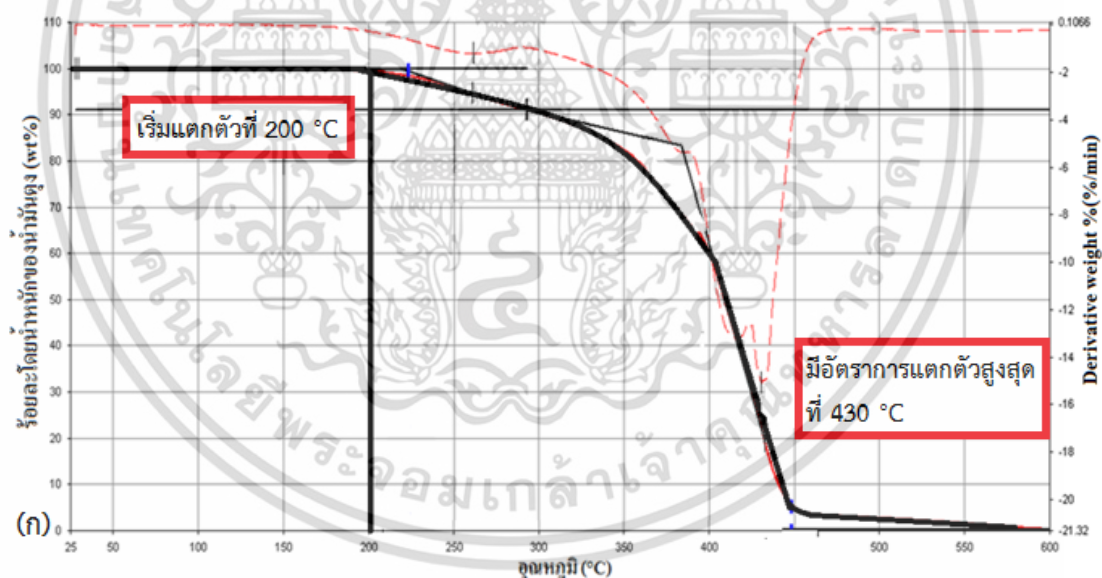
การกระจายตัวขององค์ประกอบในน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปก่อนการแตกตัวที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 แสดงดังตารางที่ 4.1 พบแก๊สออยล์หนัก 20.5 - 32.8 และกากน้ำมันหนักถึง 60 - 72.5 wt% ส่วน แนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์เบาที่มีสมบัติเหมาะสมในการเป็นเชื้อเพลิงพบน้อยมาก แสดงว่าน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปก่อนการแตกตัวไม่เหมาะที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปก่อนการแตกตัว

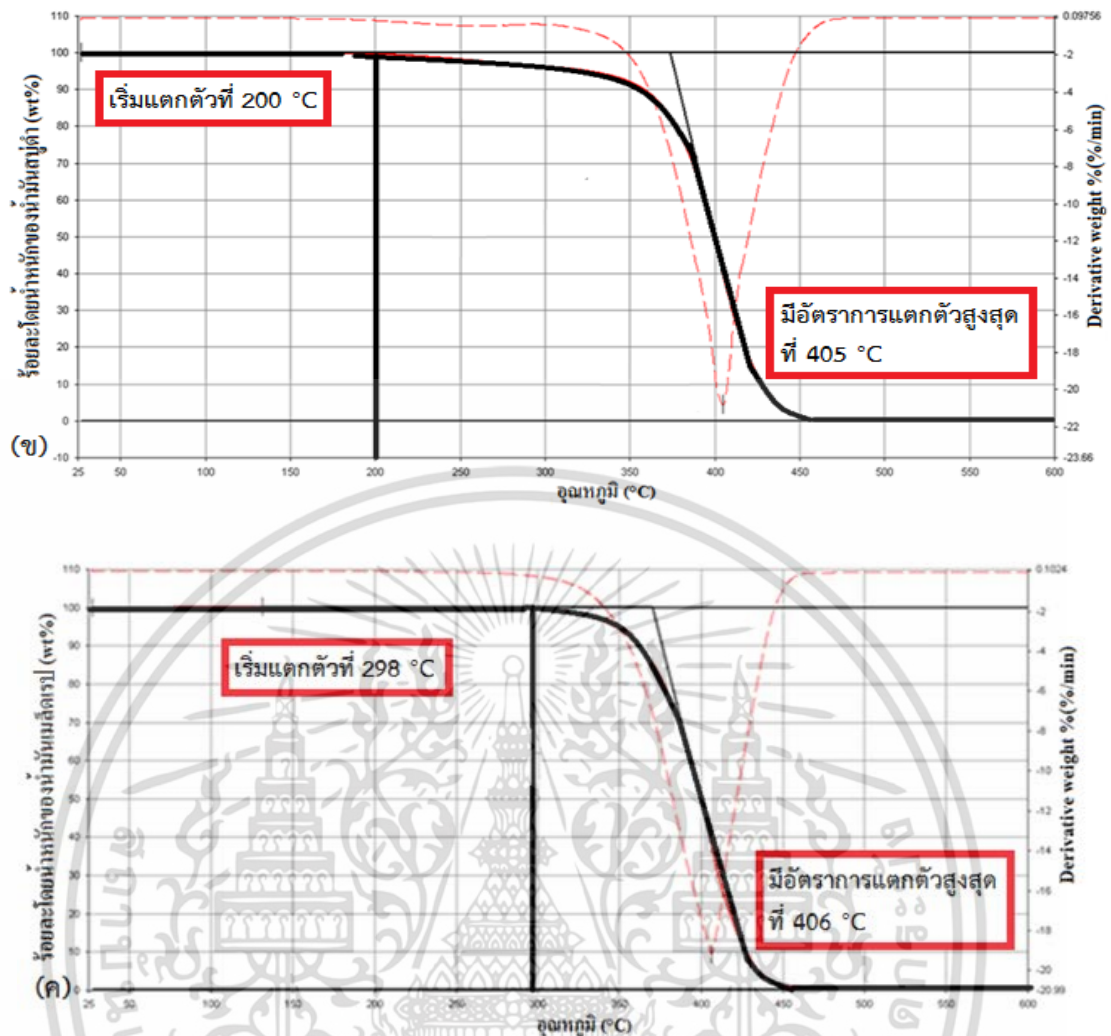
| องค์ประกอบ | แนฟทา | เคโรซีน | แก๊สออยล์เบา | แก๊สออยล์หนัก | กากน้ำมันหนัก |
|----------------|-------|---------|--------------|---------------|---------------|
| ชนิดของน้ำมัน | (wt%) | (wt%) | (wt%) | (wt%) | (wt%) |
| น้ำมันตุง | 3.2 | 0.4 | 1.4 | 22.5 | 72.5 |
| น้ำมันสบู่ดำ | 4.4 | 0.3 | 4.7 | 32.8 | 60 |
| น้ำมันเมล็ดเรป | 4.4 | 0.3 | 2.8 | 20.5 | 72.0 |

4.1.2 อุณหภูมิการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA)

รูปที่ 4.1 แสดงผลวิเคราะห์อุณหภูมิการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยเครื่อง TGA ตั้งแต่ 50 - 600 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ซึ่งเห็นได้ว่าน้ำมันตุงและน้ำมันสบู่ดำ เริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ส่วนน้ำมันเมล็ดเรปเริ่มแตกตัวที่อุณหภูมิ ประมาณ 300 องศาเซลเซียส น้ำมันทั้งสามชนิดมีอัตราการแตกตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 405 - 430 องศาเซลเซียส และจากการทดสอบการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาใน เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่อุณหภูมิต่ำกว่า 390 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง บางส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวเกิดไข (Wax) สันนิษฐานว่าเพราะน้ำมันตุงยังแตกตัวไม่ สมบูรณ์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าที่รายงานในงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึง ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป ด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 390 องศาเซลเซียส คือ 390, 415 และ 440 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิการแตกตัวด้วยความร้อนของ (ก) น้ำมันตุง (ข) น้ำมันสบู่ดำ และ (ค) น้ำมันเมล็ดเรปที่ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิการแตกตัวด้วยความร้อนของ (ก) น้ำมันตุง (ข) น้ำมันสบู่ดำ และ (ค) น้ำมันเมล็ดเรปที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (ต่อ)

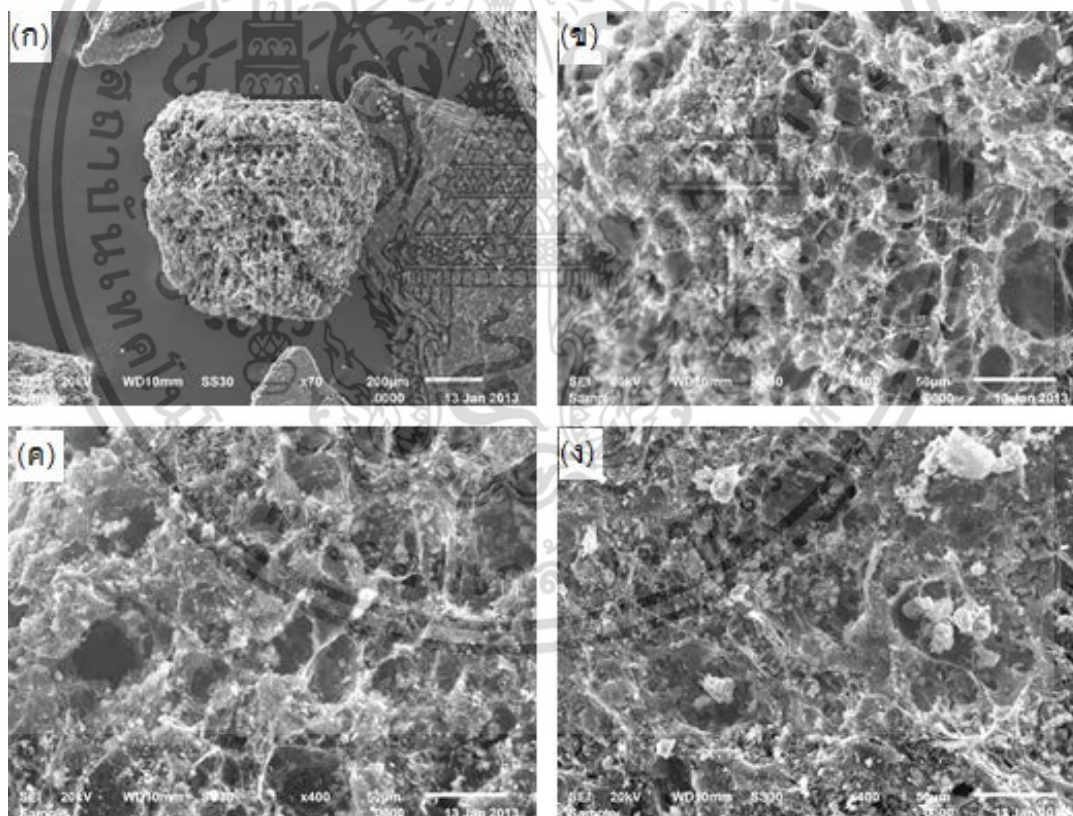
4.1.3 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Autosorb โดยวิธี บรุนเนอร์ เอ็มเมตต์ และเทลเลอร์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

จากผลวิเคราะห์ในตารางที่ 4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน 14.80 - 15.20 อังสตรอม และมีพื้นที่ผิวรูพรุนสูงประมาณ 500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งเมื่อแบ่งตามระบบ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) จัดเป็นรูพรุนแบบ micropore ซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทิร์มของการดูดซับแบบที่ I หรือไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) ที่แสดงไว้ในรูปที่ ค.1-ค.3 ในภาคผนวก ค. และภาพถ่าย SEM ดังนั้นเนื่องจากคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ผลิตจากกะลามะพร้าว เมื่อถูกกระตุ้นและเคลือบฝังด้วยโลหะโดยการเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัมมันต์ พื้นที่ผิวทั้งหมดและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงสูงขึ้น ซึ่งแตกต่างกับคาร์บอนกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินในงานของวิชาการ จารุศิริ. (2551) ซึ่งโครงสร้างมีความแข็งแรง ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ พื้นที่ผิวทั้งหมดและปริมาตรรูพรุนจะลดลงเพราะอะตอมของเหล็กจะสะสมในโครงสร้างนั้น

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

| ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา | พื้นที่ผิวทั้งหมด (m ² /g) | ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g) | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เฉลี่ยของรูพรุน (Å) | ลักษณะรูพรุน ตามระบบ IUPAC |
|----------------------|--|---------------------------------------|---|----------------------------------|
| Activated carbon | 466.5 | 0.0863 | 15.20 | Micropore |
| 1-wt% Fe/AC | 549.0 | 0.0978 | 14.80 | Micropore |
| 5-wt% Fe/AC | 613.4 | 0.1293 | 15.20 | Micropore |



รูปที่ 4.2 (ก - ข) คาร์บอนกัมมันต์ที่กำลังขยาย 70 เท่า และ 400 เท่า (ค - ง) 1-wt% Fe/AC และ 5-wt% Fe/AC ที่กำลังขยาย 400 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Federico J.C. and Georgina C.L. (2004) หาขนาดโมเลกุลของพาราฟินส์แบบเส้นตรงและแบบกิ่งจากแก๊สโครมาโทกราฟีด้วยวิธี DFT Quantum Chemical Calculation พบว่าไฮโดรคาร์บอน $C_5 - C_8$ ช่วงแก๊สโครมาโทกราฟี มีขนาดโมเลกุลประมาณ 4.30 - 7.08 อังสตรอม Bryden, K.J. (2013) พบว่าพาราฟินส์และแอโรมาติกส์ใน Shale oil ที่ช่วงอุณหภูมิจุดเดือด 370 - 540 องศาเซลเซียส มีขนาดโมเลกุลประมาณ 10 - 30 อังสตรอม สำหรับ Cher, Y.Y. et al. (2013) พบว่าพาราฟินส์ไฮโดรคาร์บอน $C_{14} - C_{34}$ ที่ช่วงอุณหภูมิจุดเดือด 370 - 540 องศาเซลเซียส มีขนาดโมเลกุลประมาณ 12 - 20 อังสตรอม และโมเลกุลของแอโรมาติกส์ไฮโดรคาร์บอน $C_{14} - C_{60}$ มีขนาดประมาณ 12 - 25 อังสตรอม ดังนั้นจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและลักษณะของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คาดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความจำเพาะเจาะจงต่อการเร่งปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของแก๊สไฮโดรคาร์บอนหนักและกาน้ำมันหนักในน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปให้ได้ผลิตภัณฑ์ประเภทเนฟทา (แก๊สโครมาโทกราฟี) และแก๊สไฮโดรคาร์บอนได้ดี

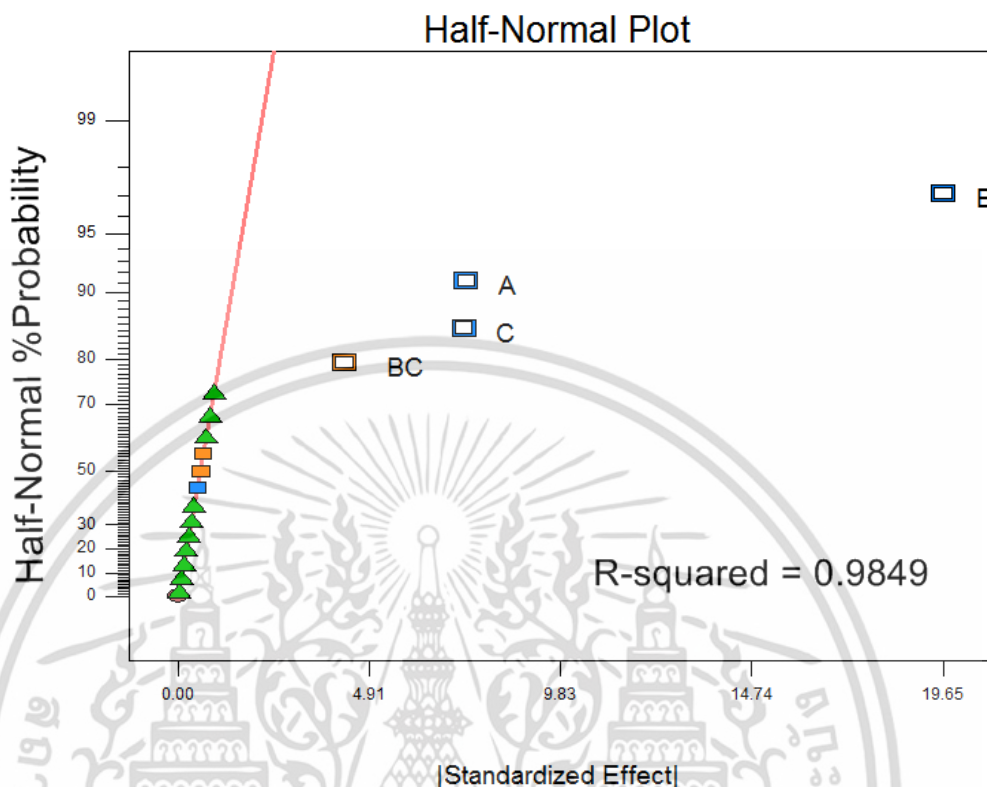
4.2 การแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

4.2.1 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

การแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ที่ศึกษาโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ (2^k Factorial experimental design) ได้ร้อยละผลได้ของของเหลว 50.25 - 84.95 wt% เมื่อใช้โปรแกรม Design Expert 6.0.10 วิเคราะห์ร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวและพล็อตกราฟ Half-normal probability plot ดังรูปที่ 4.3 พบว่าตัวแปร A (อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา) B (อุณหภูมิทำปฏิกิริยา) C (เวลาทำปฏิกิริยา) และ BC (อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาทำปฏิกิริยา) เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า Response ซึ่งในที่นี้คือ ร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง ตัวแปร B เบี่ยงเบนมากที่สุด แสดงว่าอุณหภูมิทำปฏิกิริยามีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันตุงมากที่สุด นอกจากนี้จากตารางที่ 4.3 เมื่อใช้โปรแกรม Design Expert 6.0.10 วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง พบว่า p-value ของตัวแปร A, B, C และ BC ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าทุกตัวแปรมีผลต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง (ตัวแปร B มีผลมากที่สุด เพราะค่า Mean square และ F value สูงที่สุด ส่วนตัวแปร A และ C มีผลรองจากตัวแปร B และอันตรกิริยา BC มีผลน้อยที่สุด) และเมื่อพิจารณาการพล็อต Interaction plot จากโปรแกรม Minitab R.15 ในรูปที่ 4.4 มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับที่สังเกตได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนว่าอันตรกิริยา BC มี

นัยสำคัญต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง เพราะเส้นทึบ (เป็นตัวแทนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่ำสุดของ C คือ 30 นาที) และเส้นประ (เป็นตัวแทนของค่าสูงสุดของ C คือ 60 นาที) ในช่อง B*C มีโอกาสตัดกัน

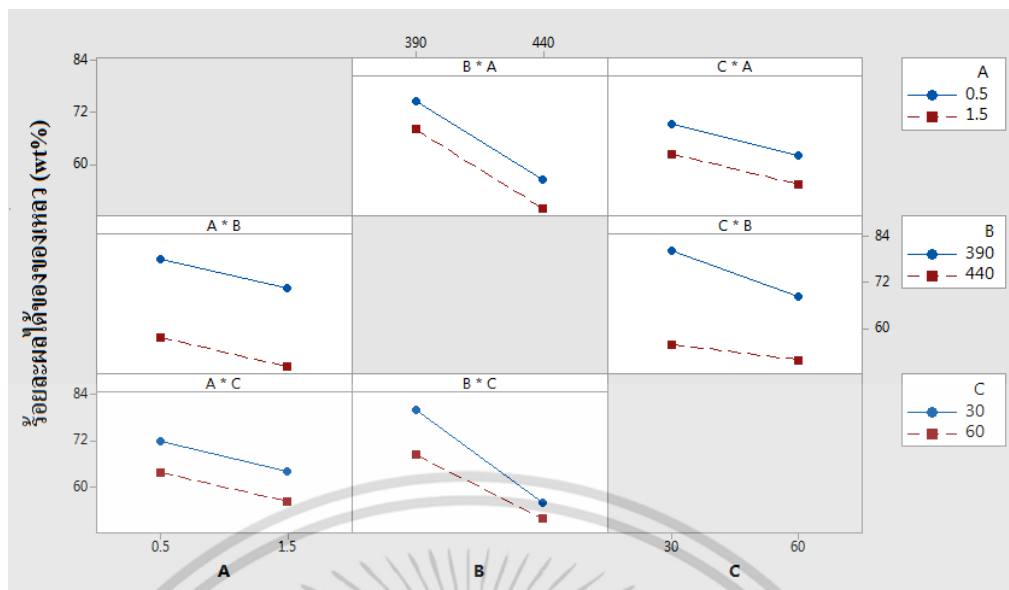


รูปที่ 4.3 Half-normal probability plot ของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

| ตัวแปร | Degree of freedom | Mean square | F value | p-value (Probability > F) |
|---|-------------------|-------------|---------|------------------------------|
| A (อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา) | 1 | 220.00 | 90.51 | < 0.0001 (Significant) |
| B (อุณหภูมิทำปฏิกิริยา) | 1 | 1,545.08 | 635.63 | < 0.0001 (Significant) |
| C (เวลาทำปฏิกิริยา) | 1 | 216.16 | 88.93 | < 0.0001 (Significant) |
| BC | 1 | 73.66 | 30.30 | 0.0001 (Significant) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

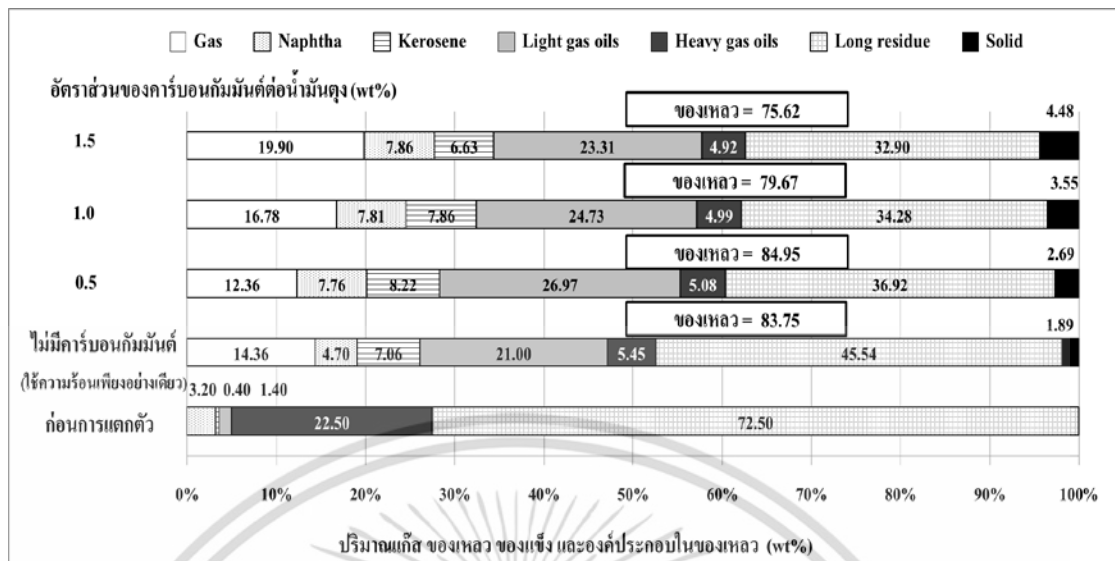


รูปที่ 4.4 Interaction plot ของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ คาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 และ 1.5 wt% อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส และเวลา 30 และ 60 นาที ต่อยร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

4.2.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุงต่อปริมาณแก๊สของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัว

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าในกรณีการแตกตัวที่ใช้ความร้อนร่วมกับคาร์บอนกัมมันต์ (0.5, 1.0 และ 1.5 wt%) และกรณีที่ใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (ไม่มีคาร์บอนกัมมันต์) ปริมาณกากน้ำมันหนัก (Long residue) ที่วิเคราะห์ได้ในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับการแตกตัวที่ใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (ประมาณ ≥ 10 wt%) และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวโดยใช้คาร์บอนกัมมันต์จะมีแนฟทาสูงกว่า อธิบายได้ว่าคาร์บอนกัมมันต์สามารถคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงหรือเล็กกว่าขนาดรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ (ขนาดรูพรุนที่วิเคราะห์ได้ 15.20 อังสตรอม) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Xijun, H. et al. (1999) ดังนั้นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน $C_5 - C_8$ ในระดับแนฟทา ($C_5 - C_{11}$) ที่มีขนาด 4.30 - 7.08 อังสตรอม (Federico J.C. และ Georgina C.L. 2004) และโมเลกุลของพาราฟินส์และแอโรมาติกส์ขนาด 10 - 30 อังสตรอม (Bryden, K.J. 2013) จะสามารถผ่านออกจากรูพรุนของคาร์บอนกัมมันต์ได้ นอกจากนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยายังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาการแตกตัวครั้งที่ 2 ของกรดไขมันสายยาว (Long-chain fatty acid) ในน้ำมันพืชได้สูงกว่าการแตกตัวโดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว (Prado, C.M.R. and Filho, N.R.A. 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว

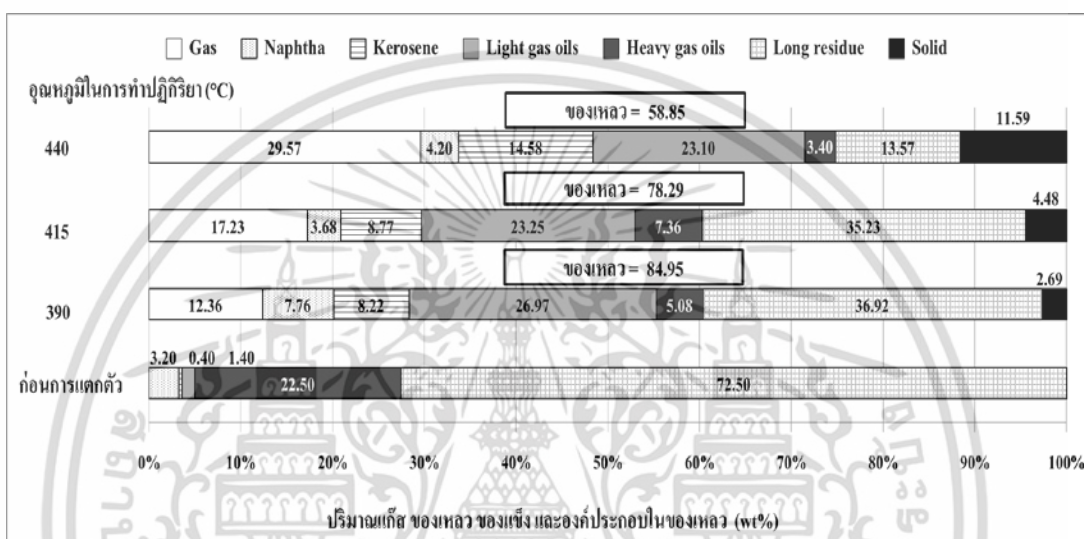
จากรูปที่ 4.5 เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุงจาก 0.5 เป็น 1.5 wt% กากน้ำมันหนักในน้ำมันตุงที่แตกตัวเป็นของเหลวจะแตกตัวต่อเป็นแก๊สและของแข็งได้มากขึ้น ทำให้ส่วนที่เป็นของเหลวลดลง คาร์บอนกัมมันต์สามารถแตกไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชได้เช่นเดียวกับ HZSM-5 ทำให้ได้ heavy oxygenated hydrocarbons เช่น สารประกอบคีโตน และอัลดีไฮด์ ซึ่งจะแตกตัวต่อเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรคาร์บอน สำหรับของแข็งที่เกิดขึ้นอธิบายได้ว่าเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนหนักเช่นเดียวกับที่ได้ อธิบายโดย Katikaneni, S.P.R. et al. (1996) สรุปได้ว่าอัตราส่วนของคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 wt% เหมาะสมกว่า 1.5 wt% ในการแตกตัวของน้ำมันตุง

4.2.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัว

การแตกตัวของน้ำมันตุงที่ 390, 415 และ 440 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนของคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 wt% ในเวลา 30 นาที ดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณแก๊สและของแข็งจะเพิ่มขึ้น ส่วนของเหลวที่ได้จากการแตกตัวลดลงอย่างชัดเจน (จาก 84.95 เป็น 58.85 wt%) อธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูง ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของกากน้ำมันหนักจะแตกตัวต่อเป็นแก๊สต่างๆ มากขึ้น (แก๊สเพิ่มขึ้นจาก 12.36 เป็น 29.57 wt%) นอกจากนี้ยังเกิด

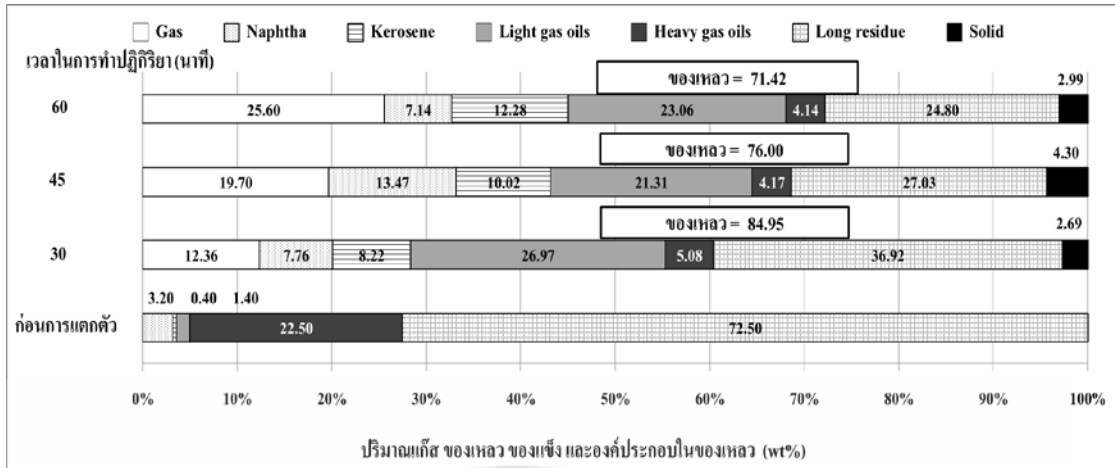
carbonaceous hydrocarbons สะสมบนผิวของคาร์บอนกัมมันต์ร่วมกับของแข็งจากปฏิกิริยา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอไรเซชันของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนหนัก ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Carlos, C. et al. (2011) ซึ่งศึกษาการแตกตัวของพอลิเอทิลีนด้วยคาร์บอนกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 450-700 องศาเซลเซียส พบว่าสาเหตุที่ผลิตภัณท์ของเหลวลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะคาร์บอนกัมมันต์เสื่อมสภาพ (Deactivation) จากการสะสมของโค้ก (Coke) ดังนั้นในงานวิจัยนี้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันตุง คือ 390 องศาเซลเซียส ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวทั้งหมด 84.95 wt% ประกอบด้วยแนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา และแก๊สออยล์หนัก 7.76, 8.22, 26.97 และ 5.08 wt% ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ 0.5 wt% ที่เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว

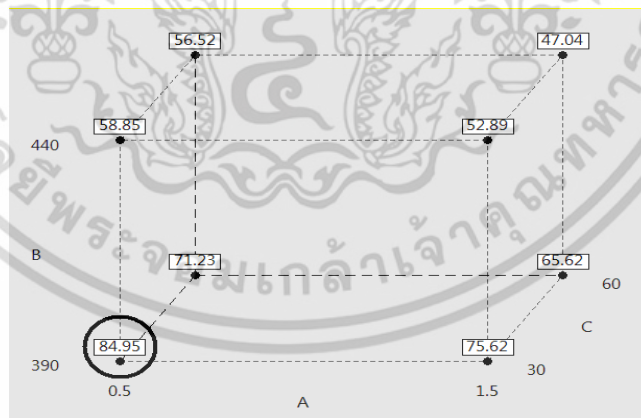
รูปที่ 4.7 แสดงผลของเวลาทำปฏิกิริยาต่อการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ 0.5 wt% ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เมื่อเวลาทำปฏิกิริยานานขึ้นจาก 30 เป็น 45 และ 60 นาที กากน้ำมันหนักและของผลิตภัณท์ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวจะแตกตัวเป็นแก๊สและโมเลกุลขนาดเล็กเพิ่มขึ้น ปริมาณของเหลวจึงลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้เวลาทำปฏิกิริยาที่ได้ของเหลวจากการแตกตัวสูงที่สุด คือ 30 นาที ซึ่งมีองค์ประกอบของแนฟทา 7.76 และแก๊สออยล์เบา 26.97 wt%



รูปที่ 4.7 ผลของเวลาต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ 0.5 wt% ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว

4.2.4 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

จาก Cube plot ในรูปที่ 4.8 ยืนยันว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 wt% อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที เป็นภาวะที่เหมาะสมต่อการแตกตัวของน้ำมันตุงในเชิงปริมาณได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด 84.95 wt% และในเชิงคุณภาพได้ แนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์เบาในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการแตกตัว 7.76, 8.22 และ 26.97 wt% ตามลำดับ



หมายเหตุ : A = อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง B = อุณหภูมิ C = เวลา

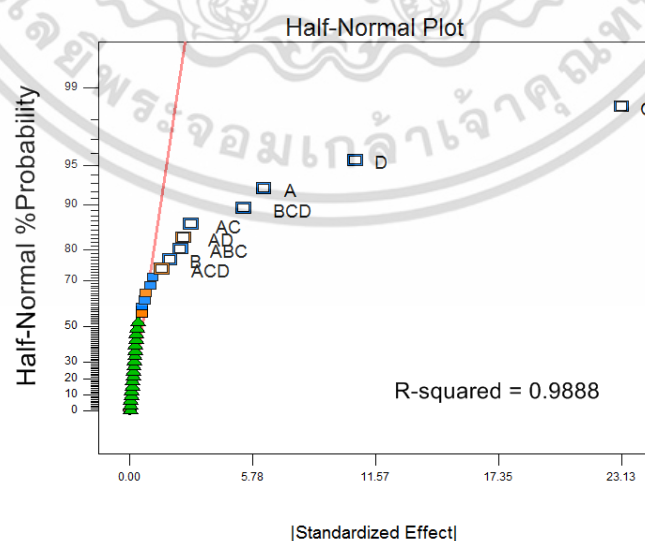
รูปที่ 4.8 Cube plot แสดงร้อยละผลได้ของของเหลวที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 และ 1.5 wt% อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส และเวลา 30 และ 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

4.3.1 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

การแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ (2^k Factorial experimental design) เมื่อใช้โปรแกรม Design Expert 6.0.10 วิเคราะห์ผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวและพล็อตกราฟ Half-normal probability plot ดังรูปที่ 4.9 พบว่าตัวแปร A (อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์) B (อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา) C (อุณหภูมิ) D (เวลา) AC (อันตรกิริยาระหว่างอัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์และอุณหภูมิ) AD (อันตรกิริยาระหว่างอัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์และเวลา) ABC (อันตรกิริยาระหว่างอัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิ) ACD (อันตรกิริยาระหว่างอัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ อุณหภูมิ และเวลา) และ BCD (อันตรกิริยาระหว่างอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และเวลา) เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อค่า Response คือ ร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง ตัวแปร C เบี่ยงเบนมากที่สุด แสดงว่าอุณหภูมามีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์มากที่สุด นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงจากตารางที่ 4.4 พบว่าค่า p-value ของตัวแปร A, B, C, D, AC, AD, ABC, ACD และ BCD ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าทุกตัวแปรมีผลต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง และยืนยันว่าตัวแปร C คืออุณหภูมามีผลมากที่สุด เพราะค่า Mean square และ F value สูงที่สุด



รูปที่ 4.9 Half-normal probability plot ของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้

จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ในเชิงพาณิชย์ การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาต ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของของตัวแปรต่างๆ ต่อร้อยละผลได้ของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

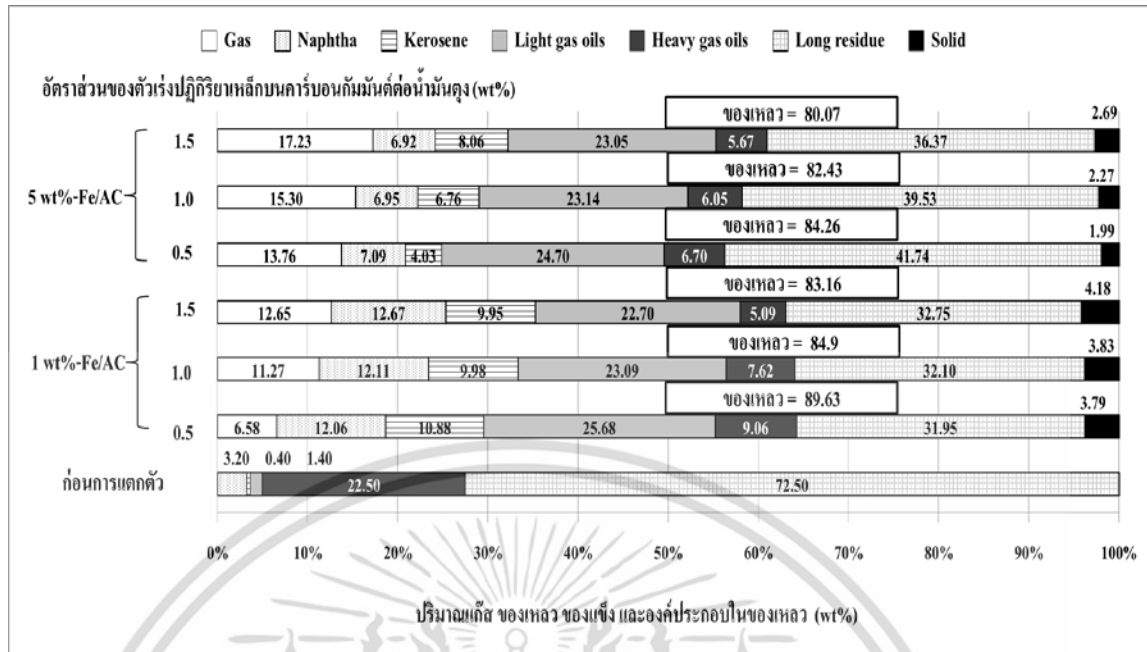
| ตัวแปร | Degree of freedom | Mean square | F value | p-value (Probability > F) |
|---|-------------------|-------------|----------|---------------------------|
| A (อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์) | 1 | 318.34 | 113.54 | < 0.0001 (significant) |
| B (อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา) | 1 | 28.33 | 10.10 | 0.0040 (significant) |
| C (อุณหภูมิทำปฏิกิริยา) | 1 | 4,281.59 | 1,527.04 | < 0.0001 (significant) |
| D (เวลาทำปฏิกิริยา) | 1 | 900.90 | 321.31 | < 0.0001 (significant) |
| AC | 1 | 65.92 | 23.51 | < 0.0001 (significant) |
| AD | 1 | 51.08 | 18.22 | 0.0003 (significant) |
| ABC | 1 | 45.24 | 16.14 | 0.0005 (significant) |
| ACD | 1 | 18.53 | 6.61 | 0.0168 (significant) |
| BCD | 1 | 228.93 | 81.65 | < 0.0001 (significant) |

4.3.2 ผลของอัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง

รูปที่ 4.10 ผลเชิงปริมาณของการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันตุง 0.5 wt% เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา 5-wt% Fe/AC ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันตุง 1.5 wt% พบว่าปริมาณของเหลวสูงสุดที่ได้จากการแตกตัวลดลงจาก 89.63 เป็น 80.07 wt% และเกิดแก๊สเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์เพียงอย่างเดียว การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC และอัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 wt% ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC สูงกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะเหล็กที่เคลือบฝังบนคาร์บอนกัมมันต์เพิ่มตำแหน่งว่างในการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนกัมมันต์ และธาตุในตระกูลโลหะมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนจึงเร่งปฏิกิริยาได้ดี (ธราพงษ์ วิทิตานต์. 2554) ทั้งนี้ถ้าอัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์มาก (5-wt% Fe/AC) จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จะแตกตัวต่อเป็นแก๊ส

ดังนั้นสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ภาวะที่เหมาะสมคือ 1-wt% Fe/AC ที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 wt%



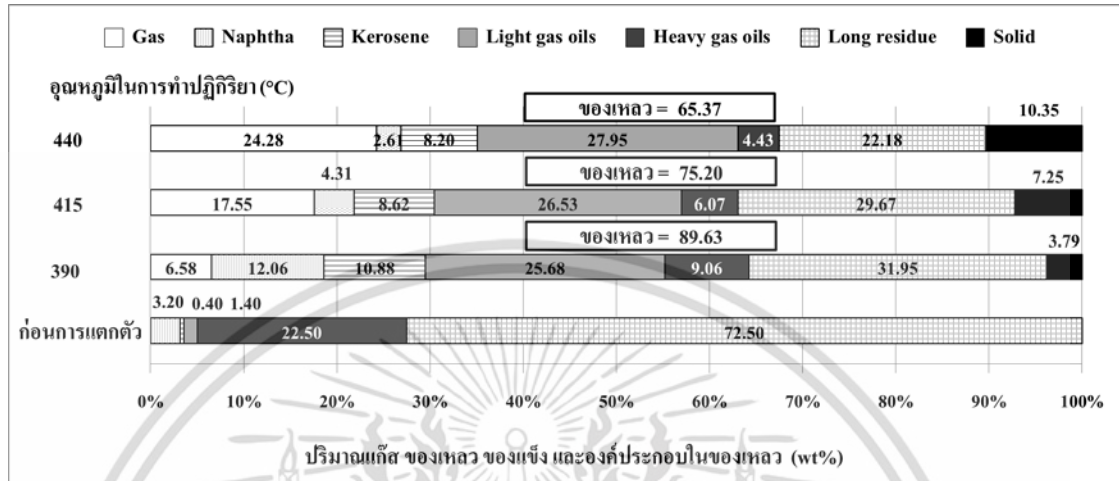
รูปที่ 4.10 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว

4.3.3 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง

รูปที่ 4.11 แสดงการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC 0.5 wt% ที่อุณหภูมิ 390-440 องศาเซลเซียส ในเวลา 30 นาที พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 390 ถึง 440 องศาเซลเซียส ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ลดลงอย่างชัดเจนจาก 89.63 เหลือ 65.37 wt% ส่วนปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นประมาณ 4 เท่า (จาก 6.58 เป็น 24.28 wt%) องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เป็นเนฟทาและเคโรซีนลดลง (ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC 0.5 wt% ที่ได้กล่าวมา ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ลดลงจาก 84.95 เหลือ 58.85 wt% ในขณะที่ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 12.36 เป็น 29.57 wt%) แสดงว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ต้องการเกิดการแตกตัวต่อเป็นแก๊สเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Tani, H. et al. (2011) ซึ่งศึกษาการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชเป็นดิสทิลเลตกลาง (Middle-distillate hydrocarbon) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO นักวิจัยอธิบายว่าแก๊สที่เพิ่มขึ้นคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรคาร์บอนซึ่งเกิดจากการแตกตัวของกรดไขมันและกลีเซอรอลในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์

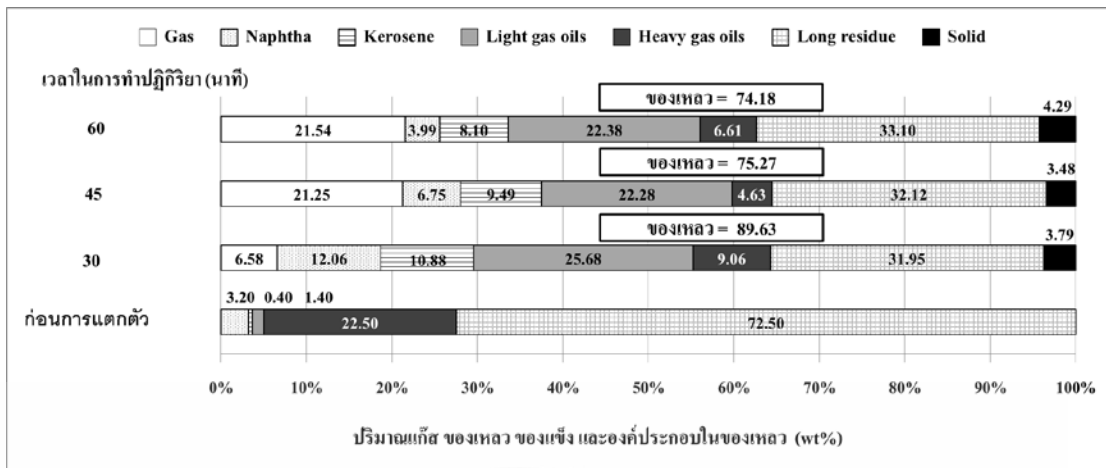
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปได้ว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับ 1-wt% Fe/AC 0.5 wt% คือ 390 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% ที่เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว

รูปที่ 4.12 แสดงผลของเวลา 30-60 นาที ต่อการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC 0.5 wt% ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเวลาทำปฏิกิริยานานขึ้นถึง 60 นาที ของเหลวจะแตกตัวเป็นแก๊สและโมเลกุลขนาดเล็กเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่า (กรณีของ AC 0.5 wt% แก๊สเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า) ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวจึงลดลง ในงานวิจัยนี้เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC 0.5 wt% ปริมาณของเหลวที่ได้จากการแตกตัวสูงที่สุด 89.63 wt% และมีองค์ประกอบที่เป็นแนฟทา 12.36 wt% และแก๊สออยล์เบา 10.88 wt%

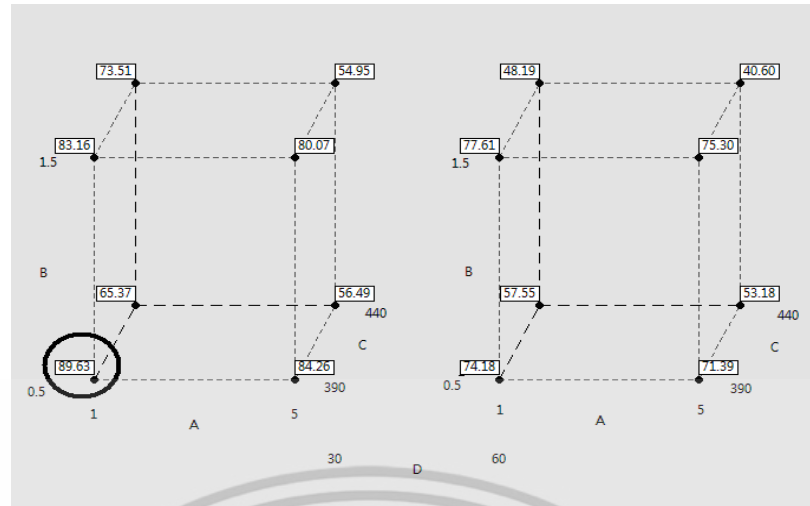


รูปที่ 4.12 ผลของเวลาต่อปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ เปรียบเทียบกับก่อนการแตกตัว

4.3.4 ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

Cube plot ในรูปที่ 4.13 ที่สร้างจากโปรแกรม Minitab R.15 ที่อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 1 และ 5 wt% (1-wt% และ 5-wt% Fe/AC) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 และ 1.5 wt% อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส และเวลา 30 และ 60 นาที ยืนยันได้ว่าภาวะที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันตุงในเชิงปริมาณได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงสุด (89.63 wt%) และในเชิงคุณภาพได้แนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์เบาในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวสูง (แนฟทา 12.06 เคโรซีน 10.88 และแก๊สออยล์เบา 25.68 wt%) คือ อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 1 wt% อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ต่อน้ำมันตุง 0.5 wt% อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส และเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หมายเหตุ : A = อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ B = อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ต่อ น้ำมันตุง C = อุณหภูมิ D = เวลา

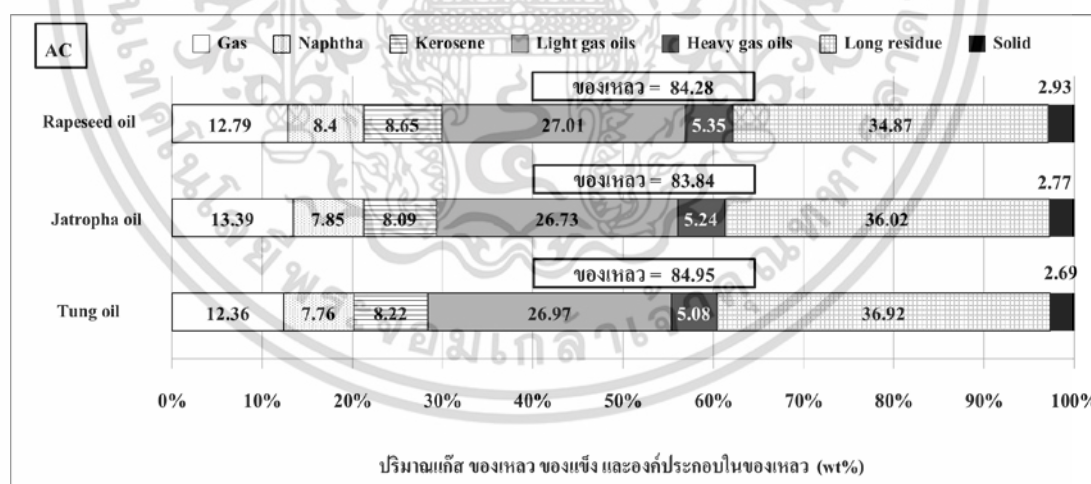
รูปที่ 4.13 Cube plot แสดงร้อยละผลได้ของของเหลวที่อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 1 และ 5 wt% อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ต่อ น้ำมันตุง 0.5 และ 1.5 wt% อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส และเวลา 30 และ 60 นาที

4.4 การแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

รูปที่ 4.14 - 4.15 แสดงการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ที่ภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้กล่าว มา (AC 0.5 wt%, 1-wt% Fe/AC 0.5 wt%) ในภาพรวมเมื่ออุณหภูมิและเวลาทำปฏิกิริยาคงที่ คือ 390 องศาเซลเซียส และ 30 นาที ที่ความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ปริมาณแก๊ส ผลิตภัณฑ์ ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโกลทั้ง สามชนิดด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนกัมมันต์ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับกับกรณีตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ เพราะน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป มีองค์ประกอบหลักคือ ไตรกลีเซอไรด์และมีขนาดโมเลกุลใกล้เคียงกัน (Shahidi, F; 2005; Yi-Hung, C. 2010) (ภาคผนวก ฉ. แสดงปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งจากการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมัน เมล็ดเรป ภาคผนวก ซ. แสดงองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัว) ผลการทดลองที่ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่ใกล้เคียงกัน เช่น ภาณุพันธ์ พรหมบุตร (2556) ที่ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งพบว่าการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโกลทั้งสามชนิดไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญ แต่ให้ค่าการแปลงผันของปฏิกิริยาการแตกตัวสูงกว่างานวิจัยนี้ สำหรับงานของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

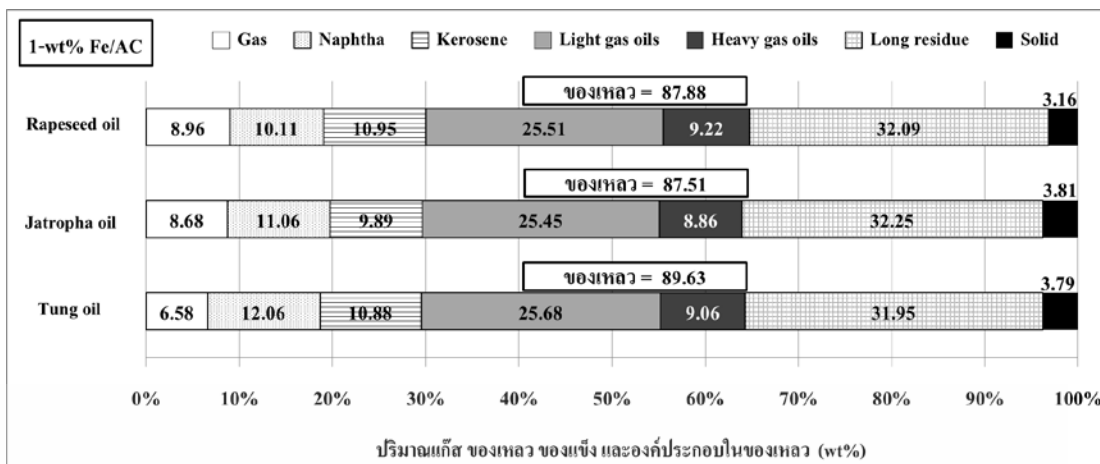
Doronin, V.P. et al. (2013) ที่ศึกษาผลของชนิดของน้ำมันพืช ได้แก่ น้ำมันปาล์ม น้ำมันเมล็ดเรป น้ำมันดอกทานตะวัน และน้ำมันมัสตาร์ดต่อการเกิดแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ก็พบว่าชนิดของน้ำมันพืชที่ศึกษาไม่แสดงความแตกต่างต่อปริมาณของแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัว ดังนั้นกล่าวได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนแบบ micropore (AC และ Fe/AC) และแบบ mesopore (FCC, CaO และ MgO) สามารถเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของกากน้ำมันหนักในน้ำมันพืชให้ได้โมเลกุลที่มีมูลค่าสูงกว่า คือ แนฟทา เครโซลีน และแก๊สออยล์เบาได้ อย่างไรก็ตามการแตกตัวของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม และน้ำมันละหุ่ง โดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวในงานวิจัยของ Lima, D.G. et al. (2004) ก็พบว่าชนิดของน้ำมันพืชที่ศึกษาไม่มีความแตกต่างของปริมาณของแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้เช่นกัน

ผลการทดสอบการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปในรูปที่ 4.14– 4.15 ด้วย AC 0.5 wt%, 1-wt% Fe/AC 0.5 wt% โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันตุง คือ อุณหภูมิและเวลาทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส และ 30 นาที ที่ความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ พบว่ามีค่าการแปลงผันประมาณ 55 – 57 % ได้แก๊ส 6.58 – 13.39 wt% ผลิตภัณฑ์ของเหลว 83.84 – 89.63 wt% สำหรับปริมาณของแข็งที่พบค่อนข้างต่ำ 2.69 – 3.81 wt% เมื่อวิเคราะห์ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวขององค์ประกอบที่เป็นแนฟทา 7.76 – 12.52 เครโซลีน 8.09 – 10.95 แก๊สออยล์เบา 25.45 – 27.01 แก๊สออยล์หนัก 5.08 – 9.22 และกากน้ำมันหนัก 31.95 - 36.92 wt%



รูปที่ 4.14 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt%

4.5 สมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติของตัวอย่างของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ 0.5 wt% ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ในการเป็นเชื้อเพลิง เปรียบเทียบกับสมบัติของน้ำมันตุงก่อนการแตกตัว และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม คือ แนฟทา เคโรซีน ดีเซล และน้ำมันเตา พบว่าของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงมีค่าความหนืดลดลงมากเมื่อเทียบกับก่อนการแตกตัว แต่ก็ยังสูงกว่าความหนืดของแนฟทา เคโรซีน และดีเซล เพราะยังมีกากน้ำมันหนักประมาณ 36.92 wt% อยู่ สำหรับค่าความร้อนสูงขึ้นเล็กน้อย ภาพรวมของสมบัติของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวใกล้เคียงกับน้ำมันเตา

ตารางที่ 4.5 สมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง (Staffel, I. 2011¹; Exxon Mobil Refining and Supply. 2013²; การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2556³)

| | ความหนืด (cSt) (40°C) | ค่าความร้อน (MJ/kg) |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| น้ำมันตุงก่อนการแตกตัว | 91.16 | 39.07 |
| ของเหลวที่สังเคราะห์ได้ | 10.25 | 41.26 |
| แนฟทา | 0.37 – 0.64 ² | 44.15 ± 0.74 ¹ |
| เคโรซีน | 1.48 ² | 43.69 ± 0.51 ¹ |
| ดีเซล | 4.64 ² | 42.91 ± 0.46 ¹ |
| น้ำมันเตา | 68.17 ² | 40.87 ± 0.94 ¹ |
| น้ำมันเตาชนิดที่ 1 | ไม่สูงกว่า 80 (50°C) ³ | ไม่ต่ำกว่า 41.84 ³ |
| น้ำมันเตาชนิดที่ 2 | ไม่สูงกว่า 180 (50°C) ³ | ไม่ต่ำกว่า 41.42 ³ |
| น้ำมันเตาชนิดที่ 3 | ไม่สูงกว่า 230 (50°C) ³ | ไม่ต่ำกว่า 41.42 ³ |
| น้ำมันเตาชนิดที่ 4 | ไม่สูงกว่า 280 (50°C) ³ | ไม่ต่ำกว่า 41.42 ³ |
| น้ำมันเตาชนิดที่ 5 | ไม่สูงกว่า 30 (100°C) ³ | ไม่ต่ำกว่า 41.42 ³ |

4.6 การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของกรกช จันทร์โสภานพิศ (2552) ที่ศึกษาการแตกไขว้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10-wt% Fe/AC 0.75 wt% กรดไขมันของไขว้ คือ C_{18:1}, C_{18:0} และ C_{16:0} ส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมัน Eleostearic (C_{18:3}) มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าน้ำมันตุง ดังนั้นกรดไขมันของไขว้จึงแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น แก๊สไฮโดรคาร์บอนได้ง่าย (Axtell, B.L. 1992; Danian, Z. 1996) ปริมาณของเหลวที่ได้จากการแตกตัวจึงน้อยกว่าในงานวิจัยนี้

งานวิจัยของธนาทิพย์ ศรีสูงค์ (2554) ที่ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันตุงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ สังเกตได้ว่าที่เวลาทำปฏิกิริยาใกล้เคียงกัน ตัวเร่งปฏิกิริยา AC 0.5 wt%, 1-wt% Fe/AC 0.5 wt% จากงานวิจัยนี้สามารถแตกโมเลกุลของน้ำมันตุงได้ของเหลวสูงกว่ามาก (> 60 wt%) แต่ต้องค้ประกอบที่เป็นแนฟทาต่ำกว่า แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์เหมาะสมในการเกิดแนฟทา มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

เปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Lothongkum A.W. et al. (2013) ที่ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วผสมกับพลาสติกพอลิโพรพิลีนใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับคาร์บอนกัมมันต์ การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคในงานวิจัยนี้ได้ผลิตภัณท์เหลวและแนฟทานน้อยกว่าการแตกตัวของน้ำมันพืชผสมกับพลาสติกพอลิโพรพิลีนอย่างเห็นได้ชัด เพราะพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่มีคาร์บอนต่อกันเป็นสายยาวจึงแตกตัวได้ผลิตภัณท์เหลวและแนฟตามากกว่าน้ำมันพืชที่มีไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบ

งานวิจัยของชุตติมาพร วรรณวงษ์ (2556) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 70 มิลลิลิตร ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้ว 1 wt% ที่ใช้ 10 กรัม ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส (สูงกว่างานวิจัยนี้) เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดและขนาดเดียวกัน ปริมาณน้ำมันสบู่ดำเท่ากัน พบว่าได้ผลิตภัณท์ของเหลวและองค์ประกอบใกล้เคียงกัน เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้ในงานนี้ และตัวเร่งปฏิกิริยา FCC มีลักษณะเป็น molecular sieve เช่นเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 การแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคจากงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

| | ธนาทิพย์ ศรีสุวงศ์ (2554) | | ชุตินาพร วรรณวงษ์ (2556) | กรกช จันทร์โสภาทิศ (2552) | งานวิจัยนี้ | | | | | | |
|--|---------------------------------|-------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------|----------------|-------------|-------|
| | แบบกะ | | แบบกะ | แบบกะ | แบบกะ | | | | | | |
| สารตั้งต้น | น้ำมันตุง | | น้ำมันสบู่ดำ | ไขวัว | น้ำมันตุง | | น้ำมันสบู่ดำ | | น้ำมันเมล็ดเรป | | |
| ตัวเร่งปฏิกิริยา | CaO | MgO | FCC ที่ใช้แล้ว | 10-wt% Fe/AC | AC | 1-wt% Fe/AC | AC | 1-wt% Fe/AC | AC | 1-wt% Fe/AC | |
| ปริมาณสารตั้งต้น (g) | 20 | 20 | 10 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | |
| อัตราการป้อนสารตั้งต้น | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารตั้งต้น (wt%) | 2.5 | 2.5 | 1 | 0.75 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | |
| อุณหภูมิ (°C) | 440 | 402 | 410 | 410 | 390 | 390 | 390 | 390 | 390 | 390 | |
| เวลา (min) | 38 | 30 | 30 | 60 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | |
| ความดันแก๊สไฮโดรเจน (barg) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| ปริมาณของเหลวที่ได้ (wt%) | 37.55 | 38.83 | 85.37 | 68.14 | 84.95 | 89.63 | 83.84 | 87.51 | 84.28 | 87.88 | |
| องค์ประกอบ ในของเหลว ที่ได้ (wt%) | แนฟทา | 19.16 | 21.43 | 10.36 | 33.68 | 7.76 | 12.06 | 7.85 | 11.06 | 8.40 | 10.11 |
| | เคโรซีน | 11.58 | 8.37 | 6.06 | 9.22 | 8.22 | 10.88 | 8.09 | 9.89 | 8.65 | 10.95 |
| | แก๊สไฮโดรคาร์บอน | 5.71 | 8.01 | 44.82 | 20.23 | 26.97 | 25.68 | 26.73 | 25.45 | 27.01 | 25.51 |
| | แก๊สไฮโดรคาร์บอนหนัก | n/a | n/a | | n/a | 5.08 | 9.06 | 5.24 | 8.86 | 5.35 | 9.22 |
| | กากน้ำมันหนัก | n/a | n/a | 24.13 | 4.30 | 36.92 | 31.95 | 36.02 | 32.25 | 34.87 | 32.09 |
| ค่าการแปลงผันสารตั้งต้น (%) | n/a | n/a | n/a | 95.29 | 55.79 | 56.83 | 55.54 | 55.70 | 56.52 | 55.34 | |

หมายเหตุ n/a คือ not available (ไม่ได้ระบุไว้ในบทความ)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

เชื้อเพลิงชีวภาพที่สังเคราะห์จากการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค (น้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป) เป็นพลังงานทางเลือกที่มีศักยภาพและยั่งยืนสอดคล้องกับแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25 % ใน 10 ปี เพื่อนำมาใช้ในภาคขนส่งและภาคอุตสาหกรรมทดแทนการใช้น้ำมันปิโตรเลียม พลังงานชีวมวลเหมาะสมกับประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม เพราะวัตถุดิบสามารถผลิตได้เองในประเทศ นอกจากนี้ต้นน้ำมันตุงและต้นสบู่ดำที่ใช้ในโครงการนี้เป็นพืชโตเร็ว ปลูกได้ในพื้นที่แห้งแล้ง เหมาะกับสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย ส่วนต้นน้ำมันเมล็ดเรปปลูกได้ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ใช้สามารถสังเคราะห์ได้เองจากวัสดุเหลือทิ้งจากภาคการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม เป็นต้น

โมเลกุลแก๊สออกไซด์หนักและกาน้ำมันหนักในน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค สามารถถูกเปลี่ยนเป็นองค์ประกอบที่มีมูลค่าสูงกว่า เช่น แนฟทา เคโรซีน และแก๊สออกไซด์เบาได้ด้วยการแตกตัวด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ซึ่งมีความสามารถในการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ เพราะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนแบบ micropore และมีพื้นที่ผิวรูพรุนสูงประมาณ 500 ตารางเมตรต่อกรัม การเคลือบฝังเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์กระตุ้นและเพิ่มตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ธาตุตระกูลโลหะมีความสามารถในการดึงโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจึงเร่งปฏิกิริยาได้ดี ในภาวะของการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ 1wt%-Fe/AC 0.5 wt% จึงให้ผลได้ของแนฟทาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ AC 0.5 wt% (12.06 และ 7.76 wt% ตามลำดับ)

ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภค มีสมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันเตาจากการกลั่นปิโตรเลียม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของของเหลวที่ได้จากการแตกตัว คือ อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิและเวลาทำปฏิกิริยา กล่าวได้ว่าอุณหภูมิทำปฏิกิริยามีผลสูงที่สุด

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการวิจัยที่ได้จากโครงการนี้

1. ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเดียวกัน ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และองค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป ค่อนข้างใกล้เคียงกัน

2. ภาวะที่ดีที่สุดของการแตกตัวของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด คือ อุณหภูมิและเวลาทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส และ 30 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.5 wt% ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคทั้งสามชนิด ประมาณ 84 - 90 wt%

3. องค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา AC 0.5 wt% และ 1-wt% Fe/AC 0.5 wt% ประกอบด้วยเนฟทา 7.76 - 12.52 เคโรซีน 8.09 - 10.95 แก๊สออยล์เบา 25.45 - 27.01 แก๊สออยล์หนัก 5.08 - 9.22 และกากน้ำมันหนัก 31.95 -36.92 wt%

ตารางที่ 5.1 ผลการแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์

| สารตั้งต้น | น้ำมันตุง | | น้ำมันสบู่ดำ | | น้ำมันเมล็ดเรป | | |
|---|---------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| | AC | 1-wt% Fe/AC | AC | 1-wt% Fe/AC | AC | 1-wt% Fe/AC | |
| ตัวเร่งปฏิกิริยา | AC | 1-wt% Fe/AC | AC | 1-wt% Fe/AC | AC | 1-wt% Fe/AC | |
| อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารตั้งต้น (wt%) | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | |
| ปริมาณแก๊ส (wt%) | 12.36 | 6.58 | 13.39 | 8.68 | 12.79 | 8.96 | |
| ปริมาณของเหลว (wt%) | 84.95 | 89.63 | 83.84 | 87.51 | 84.28 | 87.88 | |
| องค์ประกอบในของเหลว (wt%) | เนฟทา | 7.76 | 12.06 | 7.85 | 11.06 | 8.40 | 10.11 |
| | เคโรซีน | 8.22 | 10.88 | 8.09 | 9.89 | 8.65 | 10.95 |
| | แก๊สออยล์เบา | 26.97 | 25.68 | 26.73 | 25.45 | 27.01 | 25.51 |
| | แก๊สออยล์หนัก | 5.08 | 9.06 | 5.24 | 8.86 | 5.35 | 9.22 |
| | กากน้ำมันหนัก | 36.92 | 31.95 | 36.02 | 32.25 | 34.87 | 32.09 |
| ปริมาณของแข็ง (wt%) | 2.69 | 3.79 | 2.77 | 3.81 | 2.93 | 3.16 | |
| ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น (%) | 55.79 | 56.83 | 55.54 | 55.70 | 56.52 | 55.34 | |

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรประดับ pilot scale โดยใช้ภาวะที่ดีที่สุดจากงานวิจัยนี้

5.2.2 ทดสอบประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคทั้งสามชนิดที่สังเคราะห์ในระดับ pilot scale ในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์ขนาดเล็กหรือรถจักรยานยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- กรกช จันทรโสภาพิศ. 2552. “การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขว้วบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์.” ปรินญา
นิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กรวิภา วงษ์ผาบ กฤษณพล เสกภูเขียว และกัญญาวีร์ อุ่นเสื่อ. 2553. “การแตกตัวของพลาสติกที่ใช้
แล้วชนิดพอลิโพรพิลีนและพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงด้วย USY ซีโอไลต์.” ปรินญานิพนธ์
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2556. **คุณลักษณะของน้ำมันเตา.** [Online]. Available :
http://www2.egat.co.th/fuel/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=82
- จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. **การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐานและการประยุกต์.**
กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- จินตนา สุมารินทร์. 2549. “การแตกตัวด้วยไฮโดรเจนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา
เหล็ก/ถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ.” ปรินญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชุตินมพันธ์ ภิรมยาภรณ์ ปิยวัฒน์ อัคระผดุง และศิริกัลยา สุวจิตตานนท์. 2556. **การศึกษาลักษณะ
สมบัติของอนุภาคผงปูนซีเมนต์.** [Online]. Available : http://pindex.ku.ac.th/file_research/Eng-9.pdf.
- ชุตินภาพร วรรณวงษ์. 2556. “ไพโรไลซิสน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใน
เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์.” ปรินญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐวุฒิ ดุษฎี. 2554. “ศักยภาพในการปลุกมะเขือเทศเพื่อควบคุมอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมแบบครบวงจร
และการผลิตไบโอดีเซลด้วยเทคนิคไมโครเวฟ/อัลตราโซนิก.” สำนักงานคณะกรรมการวิจัย
แห่งชาติ (วช.).
- ดลพร ชูเกียรติสกุล นันทพร เสรีประชารัตน์ และสุวนีย์ นาทะคำ. 2553. “การแตกตัวของน้ำมันพืช
ผสมใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.” ปรินญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร
บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ดารณี เจริญสุข. 2554. “น้ำมันเมล็ดยางพารากับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม.” **วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**. 5(3) : 25.
- ธนภัทร ลือมันคง ธีรพงศ์ เอี่ยมกุลวรพงษ์ และนพพล มันคง. 2554. “การแตกตัวของน้ำมันพืชผสม
ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา Na_2CO_3 และ K_2CO_2 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.”
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ธนาทิพย์ ศรีสูงศักดิ์. 2554. “การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันตุงเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิจิตรพันธุ์ชนิดเบส.” ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธราพงษ์ วิจิตรศานต์. 2554. **ถ่านกัมมันต์ การผลิตและการนำไปใช้.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นคร ทิพย์วงศ์. 2553. **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล.** กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- บัณฑิต ฟุ้งธรรมสาร. 2550. **ทางเลือกพลังงานเพื่อดับโลกร้อน Energy’s Future Beyond Carbon.** กรุงเทพฯ : วี วิชส์ สำนักพิมพ์.
- บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553. **สารานุกรมเปิดโลกปิโตรเลียมและพลังงาน.** กรุงเทพฯ : บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน).
- ปัทมา ชูช่วย. 2544. “การแตกตัวของพอลิบิวทีน-1 เป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.” ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประจักษ์รัตน์ แต่ภักดี. 2547. “การแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552. **ปิโตรเลียมเทคโนโลยี.** กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พีรพจน์ เพทายพนากิจ และอรสา คุณค้ำ. 2555. “การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา USY ซีโอไลต์ที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.” ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ภาณุพันธ์ พรหมบุตร ภาณุวัฒน์ จำปาศรี และยุทธวัตร รุจิขจร. 2554. “การแตกตัวของน้ำมันพืชผสมใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ MgO ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ.” ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- แมน อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2555. **หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.** กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รักษ์ พฤษชาติ. 2549. **การปลูกและการพัฒนาสบู่ดำเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล**. นนทบุรี : นีออน บุ๊คมีเดีย.
- รวีวรรณ สวัสดิ์รักษา. 2552. “การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวุ้นบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์.” **ปริญญา นิตยสารวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**
- วิซชากร จารุศิริ. 2551. “การแตกตัวของพลาสติก น้ำมันพืช และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยความร้อนเป็นแก๊สโซลีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.” **วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิตภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**
- วรณัฐ แจ็งสว่าง. 2551. **พลังงานหมุนเวียน**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2549. “พลังงานทดแทน.” **วิศวกรรมสาร. 59(2) : 44.**
- ศิริรัตน์ จิตการคำ. 2552. **จากขยะสู่น้ำมัน เทคโนโลยีผลิตพลังงานทางเลือกที่ดูแลสิ่งแวดล้อม**. กรุงเทพฯ : วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2550. **รายงานฉบับสมบูรณ์ ยุทธศาสตร์ครั้งที่ 5 เทคโนโลยีวัสดุเพื่อพัฒนาพลังงานทดแทน ภายใต้แผนยุทธศาสตร์เทคโนโลยีวัสดุแห่งชาติพ.ศ. 2550-2559**. พิมพ์ครั้งที่ 1. จัดพิมพ์โดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน. 2556. **สถานการณ์พลังงานไทยในช่วง 6 เดือนแรกและแนวโน้มปี 2556**. [Online]. Available : http://doc-epo.eppo.go.th/Energy Situation/EnerSituation_YF.htm.
- ศิวิธดา อินสุข. 2547. “การแตกตัวของอะครีโลไนโตรส-บิวทาไดอิน-สไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.” **ปริญญา นิตยสารวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.**
- สุรเชียร จักรธรานนท์. 2556. “ประสบการณ์การเป็นผู้ผลิตไบโอดีเซล.” ใน **งานวิศวกรรมแห่งชาติ 2556**. 14-16 พฤศจิกายน 2556 อิมแพ็คอารีนา เมืองทองธานี กรุงเทพฯ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2556. **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25% ใน 10 ปี (พ.ศ. 2555 - 2564)**. [Online]. Available : [http://www.eppo.go.th/power/powerN PICP/File/\(10\).pdf](http://www.eppo.go.th/power/powerN PICP/File/(10).pdf).
- Arif, M. and Ahmed, Z. 2009. **BIO-DIESEL Jatropha Curcas (A Promising Source)**. Delhi : Satish Serial Publishing House.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Axtell, B.L. 1992. **Minor Oil Crops From Research by Fairman RM.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bansal, R.C. and Goyal, M. 2005. **Activated Carbon Adsorption.** New York : CRC Press Taylor and Francis Group.
- Basu, P. 2010. **Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory.** London : Elsevier Ltd.
- Bridgwater, A.V. and Grassi, G. 1991. **Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilisation.** London : Elsevier Ltd.
- Bridgwater, A.V. and Peacocke, G.V.C. 2000. "Fast Pyrolysis Processes for Biomass." **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** 4(1) : 1-73.
- Bryden, K.J., Habib Jr., E.T. and Topete, O.A. 2013. September. "Processing Shale Oil in FCC: Challenges and Opportunities." **Hydrocarbon Processing Magazine.** pp. 25-32.
- Buzetzi, E., Sidorová, K., Cvenegrošová, Z., Kaszonyi, A. and Cvenegroš, J. 2011. "The Influence of Zeolite Catalysts on the Products of Rapeseed Oil Cracking." **Fuel Processing Technology.** 92(8) : 1623-1631.
- Carlos, C., Yovana, S.G., M., Carmen, M., and Pedro, R. 2011. "Thermal and Catalytic Degradation of Polyethylene Wastes in The Presence of Silica Gel, 5A Molecular Sieve and Activated Carbon." **Journal of Hazardous Materials.** 187(1-3) : 101-112.
- Cher, Y.Y., Schiller, K. and Koebel, J. 2012. "Enhanced bottoms cracking and process flexibility with Midas FCC catalyst." **Catalagram.** 112 : 3-9.
- Dahlquist, E. 2012. **Biomass as Energy Source: Resource Systems and Application.** New York : CRC Press.
- Danian, Z., Milford, A.H. 1996. "Preparation and Properties of Methyl Esters of Beef Tallow." **Bioresource Technology.** 57(2) : 137-142.
- Doranin, V.P., Potapenko O.V., Lipin, P.V. and Sorokina, T.P. 2013. "Catalytic Cracking of Vegetable Oils and Vacuum Gas Oil." **Fuel.** 106 : 757-765.
- Exxon Mobil. 2012. **The Outlook for Energy : A View to 2040.** Texas : Corporate Headquarters.
- Exxon Mobil Refining and Supply. 2013. **Detailed Assay Info For Crude Oil.** [online]. Available : http://www.exxonmobil.com/crudeoil/about_crudes_erha.aspx.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Federico, J.C. and Georgina, C.L. 2004. "Molecular Size Evaluation of Linear and Branched Paraffins from the Gasoline Pool by DFT Quantum Chemical Calculations." **Fuel**. 83(16) : 2183-2188.
- Harry, M. and Francisco, R.R. 2006. **Activated Carbon**. London : Elsevier Ltd.
- Junming, X., Jianchun, J., Jie, C. and Yunjuan, S. 2010. "Biofuel Production from Catalytic Cracking of Woody Oils." **Bioresource Technology**. 101(14) : 5586-5591.
- Katikaneni, S.P.R, Adijaye, J.D., Idem, R.O. and Bakhshi, N.N. 1996. "Catalytic Conversion of Canola Oil Over Potassium-impregnated HZSM-5 Catalysts: C-2 – C-4 Olefin Production and Model Reaction Studies." **Industrial & Engineering Chemistry Research**. 35(10) : 3332-3346.
- Lima, D.G., Soares, V.C.D., Ribeiro, E.B., Carvalho, D.A., Cardoso, E.C.V., Rassi, F.C., Mundium, K.C., Rubim, J.C. and Suarez, P.A.Z. 2004. "Diesel-like Fuel Obtained by Pyrolysis of Vegetable Oils." **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 71(2) : 987-986.
- Lothongkum, A.W., Mankong, N., Bumrunghthaichan, E. and Vitidsant, T. 2013. "Cracking of Used Vegetable Oil Mixed with Polypropylene Waste in the Presence of Activated Carbon." PID-5 : 1-6 in **Proceedings of the 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Chemical Engineering 2013**. Pattaya : King Mongkut's Institute Technology Ladkrabang and Burapha University.
- Lorenzini, G., Biserni, C. and Flacco, G. 2010. **Solar Thermal and Biomass Energy**. Southampton : WIT Press.
- Maher, K.D. and Bressler, D.C. 2007. "Pyrolysis of Triglyceride Materials for the Production of Renewable Fuels and Chemicals." **Bioresource Technology**. 98(12) : 2351 - 2368.
- Moulijn, J.A., van Leeuwen, P.W.N.M. and van Santen, R.A. 1993. **Catalysis an Integrated Approach to Homogeneous, Heterogeneous and Industrial Catalysis**. Amsterdam : Elsevier Science Publishers B.V.
- Naik, S.N., Goud, V.V., Rout, P.K. and Dalai, A.K. 2010. "Production of First and Second Generation Biofuels: A Comprehensive Review." **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 14(2) : 578-597.

- Nicolas, C., Mulpuri, S. and Bir, B. editors. 2012. **Jatropha, Challenge for a New Energy Crop**. New York : Springer.
- Organisation for Economic Co-operation and Development. 1997. **Consensus Document on the Biology of Brassica Napus L. (Oilseed Rape)**. Paris : OECD.
- Prado, C.M.R. and Filho, N.R.A. 2009. "Production and Characterization of the Biofuels Obtained by Thermal Cracking and Thermal Catalytic Cracking of Vegetable Oils." **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 86(2) : 338 – 347.
- Ramya, G., Sudhakar, R., Amala Infant Joice, J., Ramakrishnan, R. and Sivakumar, T. 2012. "Liquid Hydrocarbon Fuels from Jatropha Oil Through Catalytic Cracking Technology Using AlMCM-41/ZSM-5 Composite Catalysts." **Applied Catalysis A: General**. 433-454 : 170 – 178.
- Shahidi, F. 2005. **Edible Oil and Fat Products: Chemistry, Properties and Health Effects**. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc.
- Shallin, B. 2013. **Lecture 7 : Lipids**. [Online]. Available : http://facweb.northseattle.edu/sbusch/Lecture_7.pdf.
- Speight, J.G. editor. 2011. **The Biofuels Handbook**. Cambridge : RSC Publishing.
- Staffel, I. 2011. **the Energy and Fuel Data Sheet**. University of Birmingham, UK.
- Strand, G. 2001. **Activated Carbon for Purification of Alcohol and Some Useful Distillation Tips**. Malmoe : Gert Strand.
- Tani, H., Hasegawa, T., Shimouchi, M., Asami, K., and Fujimoto, K. 2011. "Selective Catalytic Decarboxy Cracking of Triglyceride to Middle-distillate Hydrocarbon." **Catalyst Today**. 164(1) : 410-414.
- Teresa J.B. editor. 2006. **Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation**. London : Elsevier Ltd.
- Tran, T.V., Jae-Hyuk, L., Jae, W.R., Ik-Sung, A. and Chang-Ha, L. 2012. "Hydrocracking of Vacuum Residue with Activated Carbon in Supercritical Hydrocarbon Solvents." **Fuel**. 94 : 556-562.
- Vogelpohl, T. 2011. "First and Next Generation Biofuels." in **Workshop "Exploring New Technologies"**. Berlin : Institute for Ecological Economy Research – IÖW.
- Waterlox Coatings Corporation. 2011. **History of Tung Oil**. Cleveland : Waterlox Coating Corporation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Xijun, H., Qiao, S. and Do, D.D. 1999. "Multicomponent Adsorption Kinetics of Gases in Activated Carbon : Effect of Pore Size Distribution." **Langmuir**. 15(19) : 6428-6437.
- Yi-Hung, C., Jih-Hong, C., Ching-Yuan, C. and Chia-Chi, C., 2010. "Biodiesel Production from Tung (*Vernicia montana*) Oil and Its Blending Properties in Different Fatty Acid Compositions." **Bioresource Technology**. 101(24) : 9521-9526.
- Yokoyama, S. editor. 2008. **The Asian Biomass Handbook**. The Japan Institute of Energy.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์อุณหภูมิการแตกตัว ของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer

Thermogravimetric analysis (TGA) (แมน อมรสิทธิ์ และคณะ. 2555)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงมวลหรือน้ำหนักของสารเมื่อได้รับความร้อนในเตาเผาภายใต้บรรยากาศที่ควบคุม สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเทียบกับเวลาหรืออุณหภูมิ การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ คือ การวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบ การวิเคราะห์เชิงปริมาณวิเคราะห์ได้จากน้ำหนักและเอนทัลปีที่เปลี่ยนแปลงของสารตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง Thermogravimetry มีวิธีการทำ 3 วิธี ได้แก่

1. Isothermal thermogravimetry วิธีการนี้ใช้วัดมวลของสารตัวอย่าง (Sample mass) เป็นฟังก์ชันกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่
2. Quasi-iso thermal thermogravimetry วิธีการนี้สารตัวอย่างจะถูกเผาจนได้มวลคงที่ในแต่ละชุดเมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น
3. Dynamic thermogravimetry วิธีการนี้สารตัวอย่างจะถูกเผาในสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่แน่นอนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ส่วนประกอบของเครื่อง Thermogravimetric analyzer มีดังนี้

1. เครื่องชั่ง (Recording balance) เป็น analytical balance ที่มี sensitivity สูง อยู่ในระดับ 1 ไมโครกรัม และน้ำหนักสูงสุดที่ชั่งได้คือ 1 กรัม ในกรณีทั่วไปตัวอย่างการทดลองที่ใช้กับ TGA จะใช้น้ำหนักเพียง 10 - 50 มิลลิกรัม
2. เตาเผา อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 1,000 - 1,500 องศาเซลเซียส
3. เครื่องควบคุมระบบ heating, cooling และการเก็บข้อมูล ตลอดจนคำนวณการเปลี่ยนแปลงมวลของสารตัวอย่างต่ออุณหภูมิและพล็อตกราฟ
4. ถ้วยแพลตินัมหรืออะลูมิเนียม เป็นวัสดุสำหรับใส่สารตัวอย่าง และสารอ้างอิง จะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน
5. แก๊สที่ใช้ คือ He, N₂, CO₂ หรืออากาศ ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

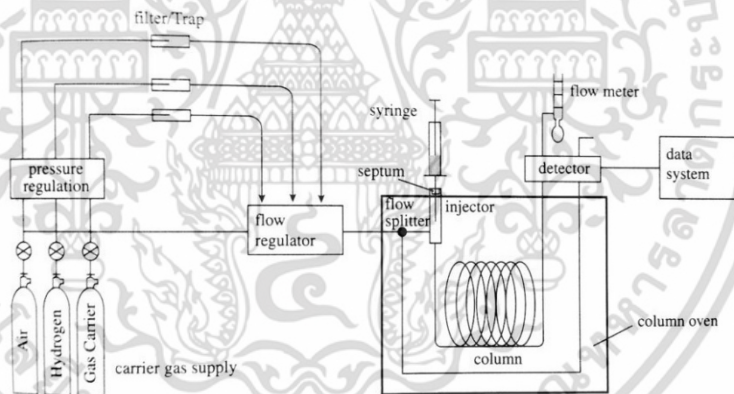
ในงานวิจัยนี้ วิเคราะห์น้ำมันพืชที่ไม่ใช้บริโภคภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน ระหว่างอุณหภูมิ 20 - 600 องศาเซลเซียส ที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลว ที่ได้จากการแตกตัวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี พร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) (แมน อมรสิทธิ์ และคณะ. 2555)

แก๊สโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกสารตัวอย่างซึ่งเป็นของผสมออกจากกัน แต่มีข้อจำกัดว่าสารตัวอย่างนั้นจะต้องสามารถเปลี่ยนให้เป็นแก๊สและมีความเสถียรที่อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยอาศัยหลักความแตกต่างของความสามารถในการเคลื่อนที่และกระจายตัวผ่านเฟสคงที่ของแต่ละองค์ประกอบในสารตัวอย่าง ทำให้สารแต่ละชนิดสามารถแยกออกจากกันได้ ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์นี้สามารถบอกได้ทั้งชนิดและปริมาณของสารตัวอย่าง เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงดังรูปที่ ข.1 มีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ ข.1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (แมน อมรสิทธิ์ และคณะ. 2555)

1. แก๊สที่ใช้งานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี มี 3 ชนิด คือ
 - 1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สพา (Carrier gas) ของสารหรือแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์
 - 1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ใน Flame ionization detector (FID)
 - 1.3 อากาศเพื่อใช้ผสมกับแก๊สไฮโดรเจนใน FID
2. Gas traps และ filters เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งานสะอาดและบริสุทธิ์ขึ้น มีดังนี้

2.1 Molecular sieve trap ใช้ดูดความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Oxygen trap เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน

2.3 Hydrocarbon filter ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมัน สำหรับแก๊สพาต้องผ่าน filter และอากาศต้องผ่าน charcoal filter

3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สพา

4. ส่วนที่จะฉีดสารตัวอย่างเข้าคอลัมน์ (Injection port)

5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนสำคัญที่สุด ใช้สำหรับแยกสาร นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจากทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้สนิม อาจอยู่ในรูป U tube ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1 - 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง (Inner diameter) 3 - 6 มิลลิเมตร ในการแยกสารสเตียรอยด์ ยา หรือสารประกอบชีวภาพ ใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้ว นอกจากนี้ยังมีคอลัมน์แบบแคปิลลารี (Capillary column) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 1 มิลลิเมตร แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

5.1 Wall-coated open tubular (WCOT) เป็นคอลัมน์ที่มีเฟสคงที่ (Stationary phase) เป็นของเหลวเคลือบเป็นฟิล์มบางๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10 - 100 เมตร

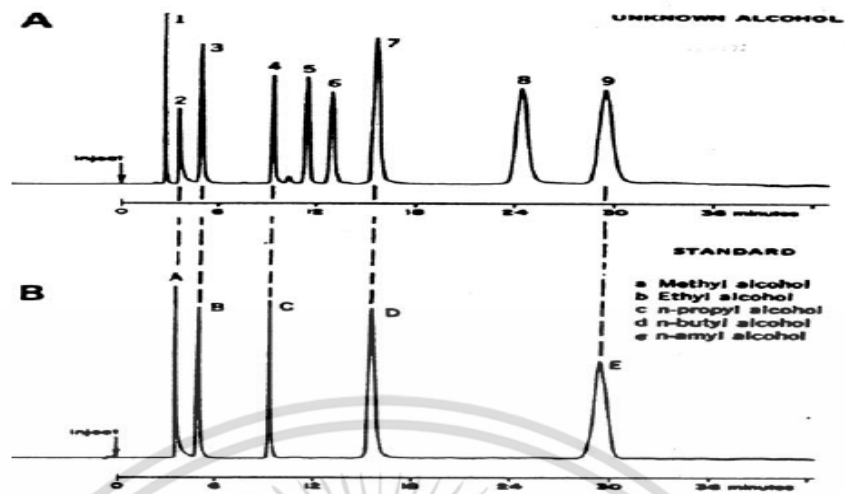
5.2 Support coated open tubular (SCOT) เป็นคอลัมน์ที่มีตัวรองรับหรือเมทริกซ์บรรจุอยู่ภายใน ความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10 - 100 เมตร

5.3 Micropacked column เป็นคอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7 - 1.0 เมตร

6. Flame ionization detector สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ (Flame) ทำให้แตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัด (Detector) มีขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ตัวตรวจวัดชนิด FID นี้เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด

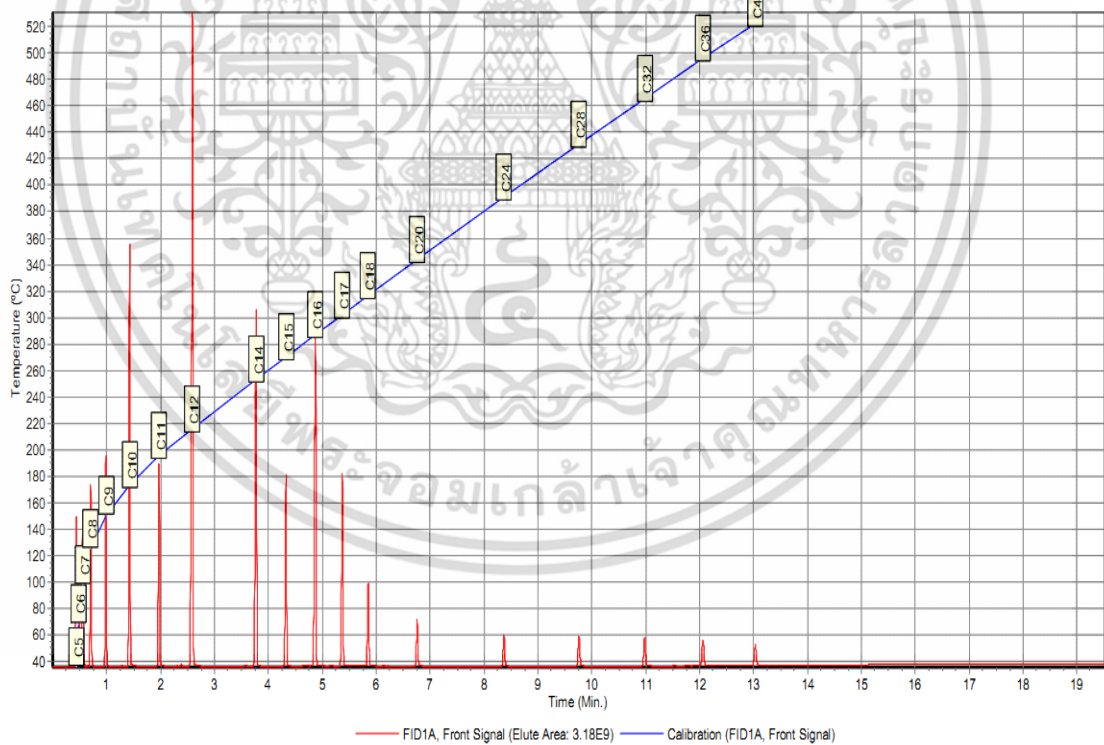
การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

Retention time คือ เวลาที่สารแต่ละชนิดใช้เคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นับจากเวลาเริ่มต้นของการวิเคราะห์ถึงตำแหน่งเวลาที่ตัวตรวจวัด อ่านค่าสัญญาณสูงสุด (Peak) จากการตรวจวัดของสารตัวอย่างนั้น ซึ่ง retention time เป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดที่ขึ้นกับอัตราการไหลของแก๊สพา และอุณหภูมิที่ใช้กับคอลัมน์ เมื่อให้การวิเคราะห์อยู่ในสภาวะคงที่ ค่า retention time ของสารต่างๆ ที่ใช้วิเคราะห์ควรมีค่าคงที่หรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังนั้นการตรวจพิสูจน์องค์ประกอบของสารตัวอย่างต้องทำการวิเคราะห์ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานในภาวะเดียวกัน เพื่อนำค่า retention time มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.2 ค่า retention time ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน (แม่นยำ อมรสิทธิ์ และคณะ. 2555)

สำหรับการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ retention time ของสารมาตรฐานไฮโดรคาร์บอน แสดงดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ retention time ของสารมาตรฐานไฮโดรคาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 จะวิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวตามคาบจุดเดือด (ปราโมทย์ ไซเวช. 2552) ดังนี้

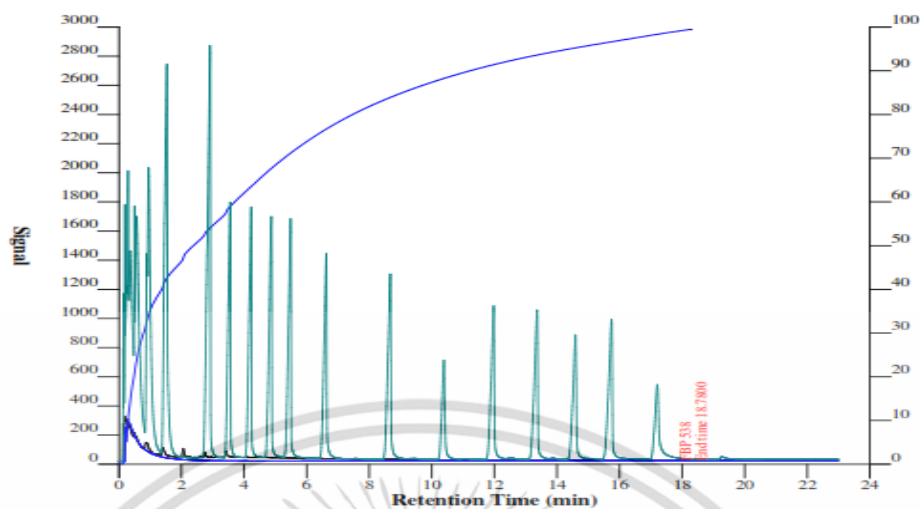
| | | |
|----------------------|---|-----------------------------------|
| IBP \leq 200 °C | = | แก๊โซลีน/แนฟทา (Gasoline/Naphtha) |
| 200 °C \leq 250 °C | = | เคโรซีน (Kerosene) |
| 250 °C \leq 350 °C | = | แก๊สออยล์เบา (Light gas oils) |
| 350 °C \leq 370 °C | = | แก๊สออยล์หนัก (Heavy gas oils) |
| 370 °C \leq FBP | = | กากน้ำมันหนัก (Long residue) |

ละลายของเหลวด้วยคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) ในอัตราส่วน 1:100 โดยปริมาตร วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatograph) ดังรูปที่ 3.6 ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A ใช้ตัวตรวจวัดแบบ Flame ionize detector และคอลัมน์แบบแคปิลลารี เส้นผ่านศูนย์กลาง 530 ไมครอน ความยาว 10 เมตร รุ่น CP-SIL 5 CB มีเฟสนิ่ง (Stationary phase) เป็น Dimethylpolysiloxane ความหนาของชั้นฟิล์มของเฟสนิ่งที่อยู่ในคอลัมน์ 2.65 ไมครอน

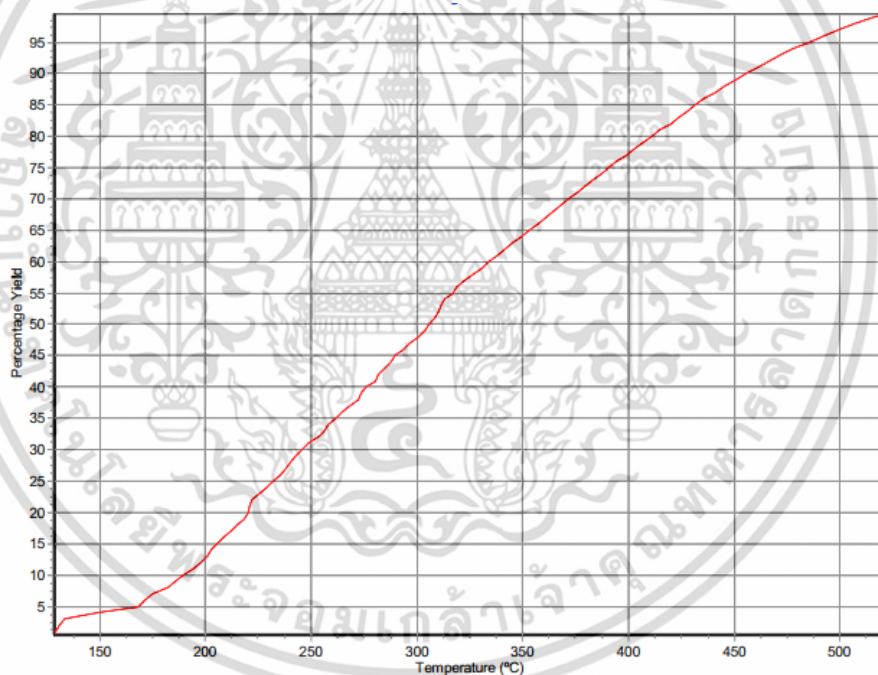
ภาวะที่ใช้ คือ อุณหภูมิหัวฉีด (Injector temperature) เท่ากับ 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ (Column temperature or oven temperature) จะตั้งตามโปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature program) และมีไนโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิ เริ่มต้นโปรแกรมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิสุดท้าย 430 องศาเซลเซียส แก๊สพาเป็นแก๊สฮีเลียม มีอัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วย split ratio เท่ากับ 2

กราฟแสดงการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวตามคาบจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ดังรูปที่ ข.4 จะเปลี่ยนเป็นกราฟกระจายตัวตามคาบจุดเดือด (Boiling point distribution plot) ด้วยโปรแกรมจำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 ดังรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.4 โครมาโทแกรมจากการแยกองค์ประกอบของของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ



รูปที่ ข.5 การกระจายตัวตามคาบจุดเดือดขององค์ประกอบในของเหลวจากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนกัมมันต์และเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ด้วยเครื่อง Autosorb

เครื่อง Autosorb (ชุดิณณท์ ภิรมยาภรณ์ และคณะ. 2556)

ใช้วิเคราะห์ปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับบนผิวสารดูดซับที่ความดันสมดุล (Equilibrium pressure) ได้จากปริมาณแก๊สที่ใส่เข้าไปในหลอดซึ่งมีสารตัวอย่างอยู่ อุณหภูมิการดูดซับต้องคงที่และต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) ของแก๊ส ขณะเกิดการดูดซับความดันในหลอดสารตัวอย่างจะเปลี่ยนไปจนกระทั่งเข้าสู่สมดุล ปริมาณของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดันสมดุลคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างปริมาณแก๊สที่ใส่เข้าไปกับปริมาณแก๊สที่อยู่ในช่องว่างรอบๆ (Void space) ของสารตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์การคายซับของแก๊สมีลักษณะการทำงานในลักษณะเดียวกันจากความดันและปริมาณที่วัดได้จากเครื่อง Autosorb สามารถคำนวณค่าต่างๆ ได้ ดังนี้

- พื้นที่ผิวโดยวิธี Brunauer, Emmett และ Teller (วิธี BET) แบบจุดเดียว (Single point) และแบบหลายจุด (Multi point)
- พื้นที่ผิวโดยวิธีแลงเมียร์
- การดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm)
- การกระจายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนและการกระจายของพื้นที่ผิว
- ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด

การวัดพื้นที่ผิวรูพรุนด้วยวิธีบีอีที (Brunauer, Emmett and Teller: BET) (จตุพร วิทยาคูณ และนุรักษ์ กฤษदानุรักษ์. 2547)

การวัดพื้นที่ผิวรูพรุนด้วยวิธีบีอีที คือ การดูดซับแก๊สไนโตรเจนของสารที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีลักษณะเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ภายใต้อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard temperature and pressure : STP) แก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับนั้นจะมีส่วนหนึ่งที่เคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลชั้นเดียว (Monolayer) และในขณะเดียวกันแก๊สไนโตรเจนส่วนที่เหลือจะเคลือบบนผิวของสารในลักษณะที่เป็นโมเลกุลหลายชั้น สามารถเขียนเป็นสมการของบีอีที (BET equation) แสดงดังสมการที่ ค.1

$$\frac{P}{v(P_0 - P)} = \frac{1}{v_m C} + \left(\frac{C-1}{v_m C} \right) \frac{P}{P_0} \quad (\text{ค.1})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ P คือ ความดันของแก๊สที่ใช้ขณะทำการทดลอง (mmHg)

P_0 คือ ความดันอิมัตวของแก๊สที่ถูกดูดซับ (mmHg)

v คือ ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับทั้งหมดที่ความดัน P (m^3)

v_m คือ ปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวด้วยความหนา 1 ชั้นโมเลกุล (m^3)

C คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการดูดซับ

จากสมการที่ (ค.1) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $[P/v(P_0-P)]$ กับ P/P_0 จะได้กราฟเส้นตรง ถ้ากำหนดให้ I คือ จุดตัดแกน Y ของเส้นตรง และ S คือ ค่าความชันของเส้นตรง

$$I = \frac{1}{v_m C} \quad \text{เมื่อ } P/P_0 = 0 \quad (\text{ค.2})$$

$$S = \frac{C-1}{v_m C} \quad (\text{ค.3})$$

จากสมการสามารถคำนวณค่า v_m ซึ่งสอดคล้องกับปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับเพียงชั้นเดียวได้ ดังสมการที่ (ค.4)

$$v_m = \frac{1}{I+S} \quad (\text{ค.4})$$

พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากสมการของบีอีที โดยนำปริมาตรของแก๊สที่ปกคลุมบนพื้นผิวของตัวดูดซับ หรือ v_m ที่ได้จากสมการที่ (ค.4) ไปคำนวณจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ 1 ชั้นโมเลกุล แล้วจึงนำไปคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะตัวเร่งปฏิกิริยาตามสมการที่ (ค.5)

$$S_{sp} = \frac{N_A a_{max} S_0}{W} \quad (\text{ค.5})$$

เมื่อ S_{sp} คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา (ตารางเมตรต่อกรัม)

N_A คือ เลขอาโวกาโดร เท่ากับ 6.02×10^{23} (จำนวนโมเลกุลต่อกรัมโมล)

a_{max} คือ จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ 1 ชั้นโมเลกุล เท่ากับ $v_m/22,414$

S_0 คือ พื้นที่ผิวหน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ เท่ากับ 1.62×10^{-20} (ตารางเมตร)

W คือ น้ำหนักของสารหรือตัวดูดซับ (กรัม)

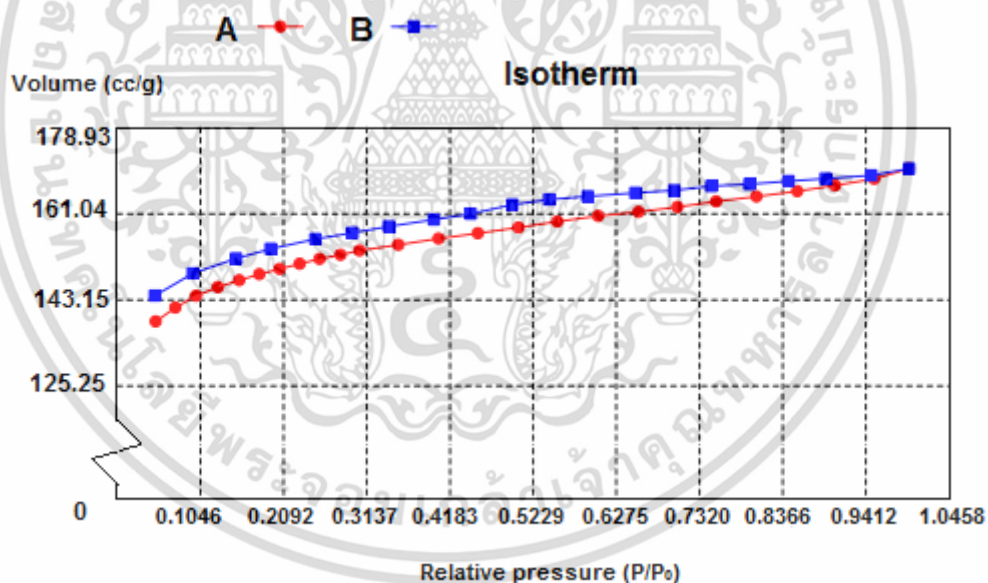
ภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ ค.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ภาวะที่ใช้วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเครื่อง Autosorb

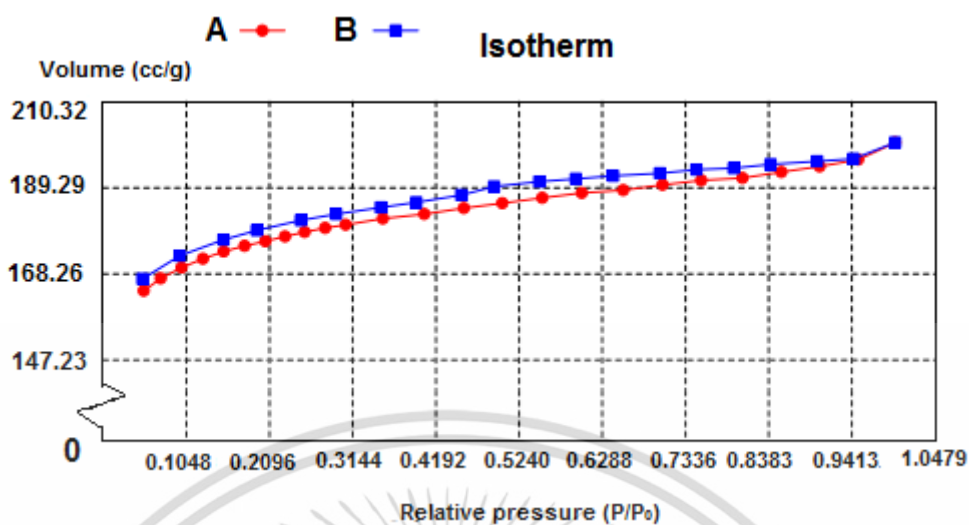
| ภาวะที่ใช้วิเคราะห์ | ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา | | |
|---|-------------------------|-------------|-------------|
| | AC | 1-wt% Fe/AC | 5-wt% Fe/AC |
| ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัม) | 0.0923 | 0.0935 | 0.0863 |
| ความดันอิ่มตัวของแก๊สที่ถูกดูดซับ (P_0) (mmHg) | 768.12 | 768.18 | 762.69 |
| อุณหภูมิของแก๊สไนโตรเจนขาออก ($^{\circ}\text{C}$) | 300 | 300 | 300 |
| เวลาที่ใช้วิเคราะห์ (นาที) | 388.7 | 376.9 | 395.4 |

จากรูปที่ ค.1 – ค.3 จะเห็นว่าไอโซเทิร์มของการดูดซับของตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์เป็นแบบที่ 1 แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีรูพรุนแบบ micropore

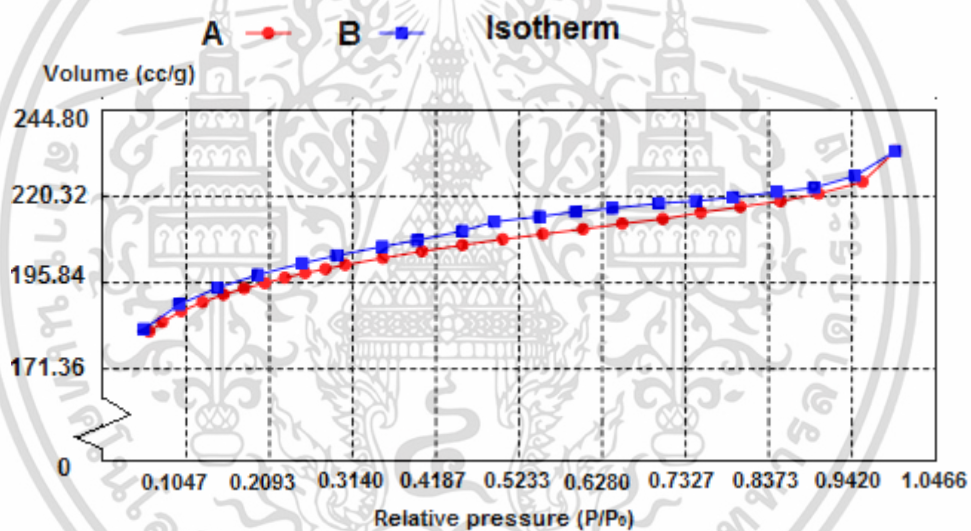


รูปที่ ค.1 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.2 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC



รูปที่ ค.3 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแก๊สไนโตรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยา 5-wt% Fe/AC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์สมบัติของของเหลวที่ได้จากการแตกโมเลกุลของ น้ำมันตุงในการเป็นเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ค่าความร้อน (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553)

ปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวจนสมบูรณ์ ตัวอย่างเชื้อเพลิงเหลวที่ต้องการวิเคราะห์ค่าความร้อนจะถูกบรรจุไว้ในถ้วยซึ่งแขวนอยู่ในบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนภายใต้ความดันสูง จุดระเบิดเชื้อเพลิงด้วยการผ่านไฟฟ้าไปยังลวดฟิวส์ที่ผูกเหนือตัวอย่าง เนื่องจากแคลอรีมิเตอร์ถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนถ่ายเทออกสู่ภายนอก บอมบ์ที่แช่ในน้ำจึงถ่ายโอนความร้อนจากการเผาไหม้ทั้งหมดให้น้ำ คำนวณค่าความร้อนจากอุณหภูมิของน้ำที่เพิ่มขึ้น เชื้อเพลิงเหลวมีค่าความร้อนเป็นปริมาณความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักหรือปริมาตรที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ เช่น กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม หรือกิโลแคลอรีต่อลิตร เป็นต้น

การวิเคราะห์ความหนืด (ปราโมทย์ ไชยเวช. 2552; บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). 2553)

ความหนืด คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของเหลวและการฉีกเป็นฝอยของน้ำมันในเครื่องยนต์ ถ้าความหนืดต่ำจะฉีกเป็นฝอยขนาดเล็กได้ง่าย ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ วิธีหาความหนืดของน้ำมันใช้เครื่องวัดความหนืด (Viscometer) ซึ่งใช้การจับเวลาที่ของเหลวปริมาณหนึ่งไหลผ่านรูมาตรฐานที่อุณหภูมิที่กำหนด

ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ค่าความร้อนของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ปริมาณ 0.37377 กรัม วิเคราะห์ค่าความร้อนได้ 41.26 MJ/kg สำหรับค่าความหนืดวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องวัดความหนืด ขนาดรูมาตรฐาน 100 ตารางมิลลิเมตร พบว่าเวลาที่ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงใช้ในการผ่านรูมาตรฐานเท่ากับ 15 นาที 45 วินาที เมื่อคำนวณเทียบกับค่าคงที่ความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ($0.01085 \text{ mm}^2/\text{s}^2$) ได้ค่าความหนืดของของเหลวเท่ากับ $10.25 \text{ mm}^2/\text{s}$ หรือ 10.25 เซนติสโตกส์

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จาก การแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนกัมมันต์ 0.5 wt% อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

$$\begin{aligned} \text{น้ำหนักของเหลวที่ได้} &= \text{น้ำหนักน้ำมันตุง} - \text{น้ำหนักแก๊ส} - \text{น้ำหนักของแข็ง} \\ \text{ปริมาณของเหลว} &= \left(\frac{\text{น้ำหนักของเหลวที่ได้}}{\text{น้ำหนักน้ำมันตุงที่ใช้}} \right) \times 100 \\ \text{ปริมาณแก๊ส} &= \left(\frac{\text{น้ำหนักของแก๊สที่ได้}}{\text{น้ำหนักน้ำมันตุงที่ใช้}} \right) \times 100 \\ \text{ปริมาณของแข็ง} &= \left(\frac{\text{น้ำหนักของแข็งที่ได้}}{\text{น้ำหนักน้ำมันตุงที่ใช้}} \right) \times 100 \end{aligned}$$

ตัวอย่าง การคำนวณปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งจากการแตกตัวของน้ำมันตุงที่ใช้ตัวเร่งคาร์บอนกัมมันต์ ปริมาณ 0.05 กรัม ต่อน้ำมันตุง 10.03 กรัม (AC 0.5 wt%) อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส และเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที ภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

ข้อมูลจากการทดลอง

| | | |
|--|--------|------|
| ปริมาณของน้ำมันตุง | 10.03 | กรัม |
| ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา | 0.05 | กรัม |
| น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์เปล่า | 945.00 | กรัม |
| น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนการทดลอง | 955.08 | กรัม |
| น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์หลังการทดลอง | 953.84 | กรัม |
| น้ำหนักกระดาษทิชชูและกระดาษกรองเปล่า | 6.43 | กรัม |
| น้ำหนักกระดาษทิชชูและกระดาษกรอง + กากของแข็งหลังอบ | 6.75 | กรัม |

วิธีการคำนวณ

| | | | |
|--------------------------------------|---|-----------------------|------|
| น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์เปล่า | = | 945.00 | กรัม |
| น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนการทดลอง | = | 945.00 + 10.03 + 0.05 | |
| | = | 955.08 | กรัม |
| น้ำหนักของเครื่องปฏิกรณ์หลังการทดลอง | = | 953.84 | กรัม |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|--------------------------|---|-----------------------------|
| ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น | = | 955.08 – 953.84 |
| | = | 1.24 กรัม |
| | = | (1.24/10.03) × 100 |
| | = | 12.36 wt% |
| ปริมาณของแข็งที่เกิดขึ้น | = | 6.75 – 6.43 – 0.05 |
| | = | 0.27 กรัม |
| | = | (0.27/10.03) × 100 |
| | = | 2.69 wt% |
| ปริมาณของเหลวที่ได้ | = | 10.03 – 1.24 – 0.27 |
| | = | 8.52 กรัม |
| | = | (8.52/10.03) × 100 |
| | = | 84.95 wt% |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ

ผลการคำนวณปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการ
การแตกตัวของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรป

- ตารางที่ ฉ.1 – ฉ.2 แสดงผลการทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ สำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุง ด้วยโปรแกรม Design Expert 6.0.10
- ตารางที่ ฉ.3 – ฉ.4 แสดงผลการทดลองการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำและน้ำมันเมล็ดเรปด้วยภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองการแตกตัวของน้ำมันตุง

ตารางที่ ฉ.1 ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วย ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

| การทดลอง | ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ น้ำมันพืช (wt%) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (min) | ปริมาณแก๊ส (wt%) | ปริมาณของเหลว (wt%) | ปริมาณของแข็ง (wt%) |
|----------|-------------------------------------|---------------|------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 0.5 | 390 | 30 | 12.36 | 84.95 | 2.69 |
| | | | | 14.97 | 82.24 | 2.79 |
| 2 | 0.5 | 390 | 60 | 25.90 | 71.23 | 2.87 |
| | | | | 26.89 | 70.12 | 2.99 |
| 3 | 0.5 | 440 | 30 | 29.57 | 58.85 | 11.59 |
| | | | | 30.19 | 58.21 | 11.60 |
| 4 | 0.5 | 440 | 60 | 32.34 | 56.52 | 11.14 |
| | | | | 34.29 | 54.13 | 11.58 |
| 5 | 1.5 | 390 | 30 | 19.90 | 75.62 | 4.48 |
| | | | | 22.64 | 73.17 | 4.19 |
| 6 | 1.5 | 390 | 60 | 32.33 | 62.25 | 5.42 |
| | | | | 29.48 | 65.62 | 4.90 |
| 7 | 1.5 | 440 | 30 | 36.83 | 52.89 | 10.28 |
| | | | | 39.86 | 50.25 | 9.89 |
| 8 | 1.5 | 440 | 60 | 37.10 | 50.27 | 12.63 |
| | | | | 39.12 | 47.04 | 13.84 |
| 9 | 1.0 | 415 | 45 | 25.91 | 63.87 | 10.22 |
| | | | | 25.50 | 65.14 | 9.36 |
| | | | | 26.95 | 62.98 | 10.07 |
| 10 | 1.0 | 390 | 30 | 16.78 | 79.67 | 3.55 |
| | | | | 19.60 | 76.59 | 3.81 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ.1 ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วย ความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ (ต่อ)

| การทดลอง | ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ น้ำมันพิซ (wt%) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (min) | ปริมาณแก๊ส (wt%) | ปริมาณของเหลว (wt%) | ปริมาณของแข็ง (wt%) |
|----------|-------------------------------------|---------------|------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 11 | 0.5 | 415 | 30 | 18.15 | 76.87 | 4.98 |
| | | | | 17.23 | 78.29 | 4.48 |
| 12 | 0.5 | 390 | 45 | 19.70 | 76.00 | 4.30 |
| | | | | 20.14 | 75.74 | 4.12 |
| 13 | 0 | 390 | 30 | 14.36 | 83.75 | 1.89 |

ตารางที่ ฉ.2 ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อน ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

| การทดลอง | อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ (wt%) | ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ น้ำมันพิซ (wt%) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (min) | ปริมาณแก๊ส (wt%) | ปริมาณของเหลว (wt%) | ปริมาณของแข็ง (wt%) |
|----------|--|-------------------------------------|---------------|------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | 1 | 0.5 | 390 | 30 | 6.58 | 89.63 | 3.79 |
| | | | | | 6.93 | 89.54 | 3.53 |
| 2 | 1 | 0.5 | 390 | 60 | 21.45 | 74.02 | 4.53 |
| | | | | | 21.54 | 74.18 | 4.29 |
| 3 | 1 | 0.5 | 440 | 30 | 24.95 | 62.93 | 12.12 |
| | | | | | 24.28 | 65.37 | 10.35 |
| 4 | 1 | 0.5 | 440 | 60 | 29.80 | 55.33 | 14.87 |
| | | | | | 28.09 | 57.55 | 14.39 |
| 5 | 1 | 1.5 | 390 | 30 | 12.65 | 83.16 | 4.18 |
| | | | | | 13.66 | 81.70 | 4.64 |
| 6 | 1 | 1.5 | 390 | 60 | 16.22 | 77.61 | 6.17 |
| | | | | | 19.49 | 74.56 | 5.95 |
| 7 | 1 | 1.5 | 440 | 30 | 20.32 | 73.51 | 6.18 |
| | | | | | 22.71 | 70.06 | 7.23 |
| 8 | 1 | 1.5 | 440 | 60 | 40.66 | 49.25 | 10.09 |
| | | | | | 42.10 | 48.19 | 9.71 |
| 9 | 5 | 0.5 | 390 | 30 | 13.76 | 84.26 | 1.99 |
| | | | | | 15.57 | 82.05 | 2.38 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.2 ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อน
ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ (ต่อ)

| การทดลอง | อัตราส่วนของเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ (wt%) | ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืช (wt%) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (min) | ปริมาณแก๊ส (wt%) | ปริมาณของเหลว (wt%) | ปริมาณของแข็ง (wt%) |
|----------|--|------------------------------------|---------------|------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 10 | 5 | 0.5 | 390 | 60 | 23.43 | 71.39 | 5.18 |
| | | | | | 25.72 | 68.73 | 5.55 |
| 11 | 5 | 0.5 | 440 | 30 | 31.34 | 53.94 | 14.72 |
| | | | | | 29.54 | 56.49 | 13.97 |
| 12 | 5 | 0.5 | 440 | 60 | 32.70 | 53.18 | 14.12 |
| | | | | | 34.02 | 52.69 | 13.29 |
| 13 | 5 | 1.5 | 390 | 30 | 17.23 | 80.07 | 2.69 |
| | | | | | 17.67 | 79.88 | 2.45 |
| 14 | 5 | 1.5 | 390 | 60 | 17.42 | 75.30 | 7.28 |
| | | | | | 17.15 | 75.22 | 7.63 |
| 15 | 5 | 1.5 | 440 | 30 | 31.07 | 54.95 | 13.98 |
| | | | | | 33.66 | 53.58 | 12.76 |
| 16 | 5 | 1.5 | 440 | 60 | 42.53 | 43.43 | 14.04 |
| | | | | | 45.12 | 40.6 | 14.28 |
| 17 | 1 | 1.0 | 390 | 30 | 12.77 | 83.52 | 3.71 |
| | | | | | 11.27 | 84.9 | 3.83 |
| 18 | 1 | 0.5 | 415 | 30 | 17.55 | 75.20 | 7.25 |
| | | | | | 18.56 | 74.48 | 6.96 |
| 19 | 1 | 0.5 | 390 | 45 | 21.25 | 75.27 | 3.48 |
| | | | | | 21.99 | 73.88 | 4.13 |
| 20 | 3 | 1.0 | 415 | 45 | 28.65 | 64.13 | 7.22 |
| | | | | | 28.00 | 65.13 | 6.87 |
| | | | | | 29.57 | 62.28 | 8.15 |
| 21 | 5 | 1.0 | 390 | 30 | 15.30 | 82.43 | 2.27 |
| | | | | | 15.66 | 81.58 | 2.76 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ จ.3 ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

| การทดลอง | ตัวเร่งปฏิกิริยา | ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืช (wt%) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (min) | ปริมาณแก๊ส (wt%) | ปริมาณของเหลว (wt%) | ปริมาณของแข็ง (wt%) |
|----------|------------------|------------------------------------|---------------|------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | AC | 0.5 | 390 | 30 | 13.39 | 83.84 | 2.77 |
| 2 | AC | 1.5 | 390 | 30 | 18.98 | 76.17 | 4.85 |
| 3 | 1-wt% Fe/AC | 0.5 | 390 | 30 | 8.68 | 87.51 | 3.81 |
| 4 | 1-wt% Fe/AC | 1.5 | 390 | 30 | 12.31 | 83.26 | 4.43 |
| 5 | No cat | 0 | 390 | 30 | 13.11 | 84.75 | 1.94 |

ตารางที่ จ.4 ปริมาณแก๊ส ของเหลว และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันเมล็ดเรปด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

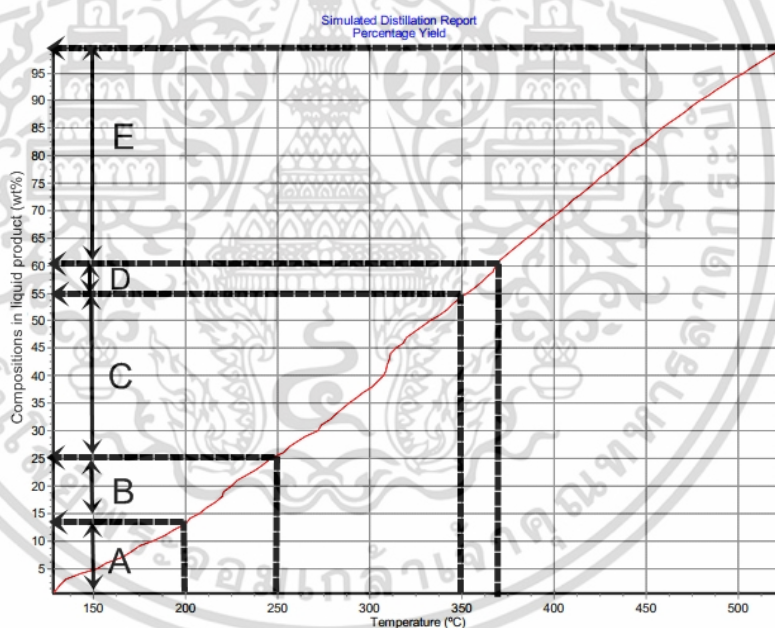
| การทดลอง | ตัวเร่งปฏิกิริยา | ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันพืช (wt%) | อุณหภูมิ (°C) | เวลา (min) | ปริมาณแก๊ส (wt%) | ปริมาณของเหลว (wt%) | ปริมาณของแข็ง (wt%) |
|----------|------------------|------------------------------------|---------------|------------|------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | AC | 0.5 | 390 | 30 | 12.79 | 84.28 | 2.93 |
| 2 | AC | 1.5 | 390 | 30 | 19.31 | 76.07 | 4.62 |
| 3 | 1-wt% Fe/AC | 0.5 | 390 | 30 | 8.96 | 87.88 | 3.16 |
| 4 | 1-wt% Fe/AC | 1.5 | 390 | 30 | 11.89 | 83.59 | 4.52 |
| 5 | No cat | 0 | 390 | 30 | 15.41 | 82.83 | 1.76 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC ที่ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันตุง 0.5 wt% (ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม : น้ำมันตุง 10 กรัม) อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส และเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที ภายใต้ความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ได้กราฟแสดงการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 ดังรูปที่ ข.1

ตัวอย่างการวิเคราะห์องค์ประกอบของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC ที่ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อน้ำมันตุง 0.5 wt% (ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม : น้ำมันตุง 10 กรัม) อุณหภูมิทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส และเวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที ภายใต้ความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ ได้กราฟแสดงการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ตัวอย่างกราฟแสดงการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM D2887 (ใช้ 1-wt% Fe/AC อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงตามคาบจุดเดือดของสาร (อ่านจากกราฟแสดงการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดในรูปที่ ข.1)

ตารางที่ ข.1 องค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 wt% อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

| คาบจุดเดือด (°C) | องค์ประกอบที่ได้ | ปริมาณองค์ประกอบในของเหลวที่ได้ |
|------------------|--------------------|---------------------------------|
| IBP ≤ 200 | Naphtha (A) | 13.46 |
| 200 ≤ 250 | Kerosene (B) | 12.14 |
| 250 ≤ 350 | Light gas oils (C) | 28.65 |
| 350 ≤ 370 | Heavy gas oils (D) | 10.11 |
| 370 ≤ FBP | Long residue (E) | 35.64 |
| Total | | 100 |

การคำนวณองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

— ส่วนที่เป็นแก๊ส

ปริมาณแก๊สทั้งหมดที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง = 6.58 wt%

— ส่วนที่เป็นของเหลว

ปริมาณของเหลวทั้งหมดที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุง (W) = 89.63 wt%

% Naphtha ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด = $\frac{A \times W}{100}$
 = $(13.46 \times 89.63)/100$
 = 12.06 wt%

% Kerosene ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด = $\frac{B \times W}{100}$
 = $(12.14 \times 89.63)/100$
 = 10.88 wt%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \% \text{ Light gas oils ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด} &= \frac{C \times W}{100} \\ &= (28.65 \times 89.63) / 100 \\ &= \mathbf{25.68 \text{ wt\%}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Heavy gas oils ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด} &= \frac{D \times W}{100} \\ &= (10.11 \times 89.63) / 100 \\ &= \mathbf{9.06 \text{ wt\%}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \% \text{ Long residue ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด} &= \frac{E \times W}{100} \\ &= (35.64 \times 89.63) / 100 \\ &= \mathbf{31.95 \text{ wt\%}} \end{aligned}$$

— ส่วนที่เป็นของแข็ง
ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ได้

$$= \mathbf{3.79 \text{ wt\%}}$$

— ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น (% Conversion)

องค์ประกอบของน้ำมันตุง น้ำมันสบู่ดำ และน้ำมันเมล็ดเรปก่อนการแตกตัว

| องค์ประกอบ | แนฟทา | เคโรซีน | แก๊สออยล์เบา | แก๊สออยล์หนัก | กากน้ำมันหนัก |
|---------------|-------|---------|--------------|---------------|---------------|
| ชนิดของน้ำมัน | (wt%) | (wt%) | (wt%) | (wt%) | (wt%) |
| น้ำมันตุง | 3.2 | 0.4 | 1.4 | 22.5 | 72.5 |

— ค่าการแปลงผันของสารตั้งต้น (% Conversion)

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{Long residue + Heavy gas oils}_{\text{ก่อนการแตกตัว}} - \text{Long residue + Heavy gas oils}_{\text{หลังการแตกตัว}}}{\text{Long residue + Heavy gas oils}_{\text{ก่อนการแตกตัว}}} \\ &= (72.50 + 22.50) - (31.95 + 9.06) / (72.50 + 22.50) \\ &= \mathbf{56.83\%} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

องค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวที่วิเคราะห์ด้วย
เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

- ตารางที่ ข.1 – ข.4 แสดงผลการทดลองตามการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ สำหรับการแตกตัวของน้ำมันตุง ด้วยโปรแกรม Design Expert 6.0.10
- ตารางที่ ข.5 – ข.6 แสดงผลการทดลองการแตกตัวของน้ำมันสบูดำและน้ำมันเมล็ดเรปด้วยภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองการแตกตัวของน้ำมันตุง

ตารางที่ ข.1 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา คาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

| Run No. | Experimental parameters | | | Conversion (%) | Fractions (wt%) | | | Compositions in liquid (wt%) | | | | |
|---------|-------------------------|-----------|------------|----------------|-----------------|--------|-------|------------------------------|----------|----------------|----------------|--------------|
| | Catalysts : Oil (wt%) | Temp (°C) | Time (min) | | Gas | Liquid | Solid | Naphtha | Kerosene | Light gas oils | Heavy gas oils | Long residue |
| 1 | 0.5 | 390 | 30 | 55.79 | 12.36 | 84.95 | 2.69 | 7.76 | 8.22 | 26.97 | 5.08 | 36.92 |
| 2 | 0.5 | 390 | 60 | 69.54 | 25.90 | 71.23 | 2.87 | 7.14 | 12.28 | 23.06 | 4.14 | 24.80 |
| 3 | 0.5 | 440 | 30 | 82.14 | 29.57 | 58.85 | 11.59 | 4.20 | 14.58 | 23.10 | 3.40 | 13.57 |
| 4 | 0.5 | 440 | 60 | 85.31 | 32.34 | 56.52 | 11.14 | 9.13 | 14.94 | 18.49 | 3.26 | 10.70 |
| 5 | 1.5 | 390 | 30 | 60.19 | 19.90 | 75.62 | 4.48 | 7.86 | 6.63 | 23.31 | 4.92 | 32.90 |
| 6 | 1.5 | 390 | 60 | 72.01 | 29.48 | 65.62 | 4.90 | 6.56 | 11.28 | 21.19 | 3.81 | 22.78 |
| 7 | 1.5 | 440 | 30 | 86.85 | 36.83 | 52.89 | 10.28 | 12.00 | 13.18 | 15.22 | 1.66 | 10.83 |
| 8 | 1.5 | 440 | 60 | 92.86 | 37.10 | 50.27 | 12.63 | 13.45 | 14.66 | 15.38 | 1.66 | 5.12 |
| 9 | 1 | 415 | 45 | 71.31 | 25.50 | 65.14 | 9.36 | 7.31 | 10.24 | 20.33 | 3.79 | 23.47 |
| 10 | 1 | 390 | 30 | 58.66 | 16.78 | 79.67 | 3.55 | 7.81 | 7.86 | 24.73 | 4.99 | 34.28 |
| 11 | 0.5 | 415 | 30 | 55.17 | 17.23 | 78.29 | 4.48 | 3.68 | 8.77 | 23.25 | 7.36 | 35.23 |
| 12 | 0.5 | 390 | 45 | 67.16 | 19.70 | 76.00 | 4.30 | 13.47 | 10.02 | 21.31 | 4.17 | 27.03 |
| 13 | 0 | 390 | 30 | 46.33 | 14.36 | 83.75 | 1.89 | 4.70 | 7.06 | 21.00 | 5.45 | 45.54 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ซ.2 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 1-wt% Fe/AC ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

| Run No. | Experimental parameters | | | Conversion (%) | Fractions (wt%) | | | Compositions in liquid (wt%) | | | | |
|---------|-------------------------|-----------|------------|----------------|-----------------|--------|-------|------------------------------|----------|----------------|----------------|--------------|
| | Catalysts : Oil (wt%) | Temp (°C) | Time (min) | | Gas | Liquid | Solid | Naphtha | Kerosene | Light gas oils | Heavy gas oils | Long residue |
| 1 | 0.5 | 390 | 30 | 56.83 | 6.58 | 89.63 | 3.79 | 12.06 | 10.88 | 25.68 | 9.06 | 31.95 |
| 2 | 0.5 | 390 | 60 | 58.20 | 21.54 | 74.18 | 4.29 | 3.99 | 8.10 | 22.38 | 6.61 | 33.10 |
| 3 | 0.5 | 440 | 30 | 71.99 | 24.28 | 65.37 | 10.35 | 2.61 | 8.20 | 27.95 | 4.43 | 22.18 |
| 4 | 0.5 | 440 | 60 | 82.18 | 28.09 | 57.55 | 14.39 | 5.35 | 11.80 | 23.47 | 3.34 | 13.59 |
| 5 | 1.5 | 390 | 30 | 60.17 | 12.65 | 83.16 | 4.18 | 12.67 | 9.95 | 22.70 | 5.09 | 32.75 |
| 6 | 1.5 | 390 | 60 | 61.52 | 16.22 | 77.61 | 6.17 | 9.62 | 9.47 | 21.96 | 5.52 | 31.04 |
| 7 | 1.5 | 440 | 30 | 65.43 | 20.32 | 73.51 | 6.18 | 3.42 | 10.06 | 27.18 | 4.67 | 28.17 |
| 8 | 1.5 | 440 | 60 | 86.73 | 40.66 | 49.25 | 10.09 | 2.36 | 13.24 | 21.04 | 2.87 | 9.74 |

ตารางที่ ซ.3 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 5-wt% Fe/AC ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

| Run No. | Experimental parameters | | | Conversion (%) | Fractions (wt%) | | | Compositions in liquid (wt%) | | | | |
|---------|-------------------------|-----------|------------|----------------|-----------------|--------|-------|------------------------------|----------|----------------|----------------|--------------|
| | Catalysts : Oil (wt%) | Temp (°C) | Time (min) | | Gas | Liquid | Solid | Naphtha | Kerosene | Light gas oils | Heavy gas oils | Long residue |
| 1 | 0.5 | 390 | 30 | 49.01 | 13.76 | 84.26 | 1.99 | 7.09 | 4.03 | 24.70 | 6.70 | 41.74 |
| 2 | 0.5 | 390 | 60 | 73.11 | 23.43 | 71.39 | 5.18 | 9.59 | 12.72 | 23.53 | 3.93 | 21.62 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา 5-wt% Fe/AC ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ (ต่อ)

| Run No. | Experimental parameters | | | Conversion (%) | Fractions (wt%) | | | Compositions in liquid (wt%) | | | | |
|---------|-------------------------|-----------|------------|----------------|-----------------|--------|-------|------------------------------|----------|----------------|----------------|--------------|
| | Catalysts : Oil (wt%) | Temp (°C) | Time (min) | | Gas | Liquid | Solid | Naphtha | Kerosene | Light gas oils | Heavy gas oils | Long residue |
| 3 | 0.5 | 440 | 30 | 80.48 | 29.54 | 56.49 | 13.97 | 2.68 | 11.72 | 23.55 | 3.32 | 15.22 |
| 4 | 0.5 | 440 | 60 | 90.21 | 32.70 | 53.18 | 14.12 | 9.75 | 15.51 | 18.61 | 2.72 | 6.58 |
| 5 | 1.5 | 390 | 30 | 55.75 | 17.23 | 80.07 | 2.69 | 6.92 | 8.06 | 23.05 | 5.67 | 36.37 |
| 6 | 1.5 | 390 | 60 | 66.66 | 17.42 | 75.30 | 7.28 | 3.24 | 10.66 | 29.72 | 5.14 | 26.53 |
| 7 | 1.5 | 440 | 30 | 86.55 | 31.07 | 54.95 | 13.98 | 4.77 | 14.76 | 22.64 | 3.09 | 9.69 |
| 8 | 1.5 | 440 | 60 | 97.80 | 42.53 | 43.43 | 14.04 | 16.13 | 14.00 | 11.21 | 0.82 | 1.27 |

ตารางที่ ข.4 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

| Run No. | Experimental parameters | | | Conversion (%) | Fractions (wt%) | | | Compositions in liquid (wt%) | | | | |
|-------------|-------------------------|-----------|------------|----------------|-----------------|--------|-------|------------------------------|----------|----------------|----------------|--------------|
| | Catalysts : Oil (wt%) | Temp (°C) | Time (min) | | Gas | Liquid | Solid | Naphtha | Kerosene | Light gas oils | Heavy gas oils | Long residue |
| 1-wt% Fe/AC | 1.0 | 390 | 30 | 58.19 | 11.27 | 84.90 | 3.83 | 12.11 | 9.98 | 23.09 | 7.62 | 32.10 |
| 1-wt% Fe/AC | 0.5 | 415 | 30 | 62.38 | 17.55 | 75.20 | 7.25 | 4.31 | 8.62 | 26.53 | 6.07 | 29.67 |
| 1-wt% Fe/AC | 0.5 | 390 | 45 | 61.32 | 21.25 | 75.27 | 3.48 | 6.75 | 9.49 | 22.28 | 4.63 | 32.12 |
| 3-wt% Fe/AC | 1.0 | 415 | 45 | 75.82 | 28.00 | 65.13 | 6.87 | 9.20 | 12.79 | 20.18 | 3.43 | 19.54 |
| 5-wt% Fe/AC | 1.0 | 390 | 30 | 52.02 | 15.30 | 82.43 | 2.27 | 6.95 | 6.76 | 23.14 | 6.05 | 39.53 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันสบู่อัดด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

| Catalysts | Experimental parameters | | | Conversion (%) | Fractions (wt%) | | | Compositions in liquid (wt%) | | | | |
|-------------|-------------------------|-----------|------------|----------------|-----------------|--------|-------|------------------------------|----------|----------------|----------------|--------------|
| | Catalysts : Oil (wt%) | Temp (°C) | Time (min) | | Gas | Liquid | Solid | Naphtha | Kerosene | Light gas oils | Heavy gas oils | Long residue |
| AC | 0.5 | 390 | 30 | 55.54 | 13.39 | 83.84 | 2.77 | 7.85 | 8.09 | 26.73 | 5.24 | 36.02 |
| 1-wt% Fe/AC | 0.5 | 390 | 30 | 55.70 | 8.68 | 87.51 | 3.81 | 11.06 | 9.89 | 25.45 | 8.86 | 32.25 |
| No-cat | 0.5 | 390 | 30 | 46.48 | 13.11 | 84.75 | 1.94 | 2.43 | 6.91 | 21.04 | 5.13 | 44.54 |

ตารางที่ ข.6 ปริมาณแก๊ส ของเหลว ของแข็ง และการกระจายตัวขององค์ประกอบในของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันเมล็ดเรบด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ที่ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์เกจ

| Catalysts | Experimental parameters | | | Conversion (%) | Fractions (wt%) | | | Compositions in liquid (wt%) | | | | |
|-------------|-------------------------|-----------|------------|----------------|-----------------|--------|-------|------------------------------|----------|----------------|----------------|--------------|
| | Catalysts : Oil (wt%) | Temp (°C) | Time (min) | | Gas | Liquid | Solid | Naphtha | Kerosene | Light gas oils | Heavy gas oils | Long residue |
| AC | 0.5 | 390 | 30 | 56.52 | 12.79 | 84.28 | 2.93 | 8.40 | 8.65 | 27.01 | 5.35 | 34.87 |
| 1-wt% Fe/AC | 0.5 | 390 | 30 | 55.34 | 8.96 | 87.88 | 3.16 | 10.11 | 10.95 | 25.51 | 9.22 | 32.09 |
| No-cat | 0.5 | 390 | 30 | 45.16 | 15.41 | 82.83 | 1.76 | 5.11 | 7.12 | 19.87 | 5.61 | 45.12 |

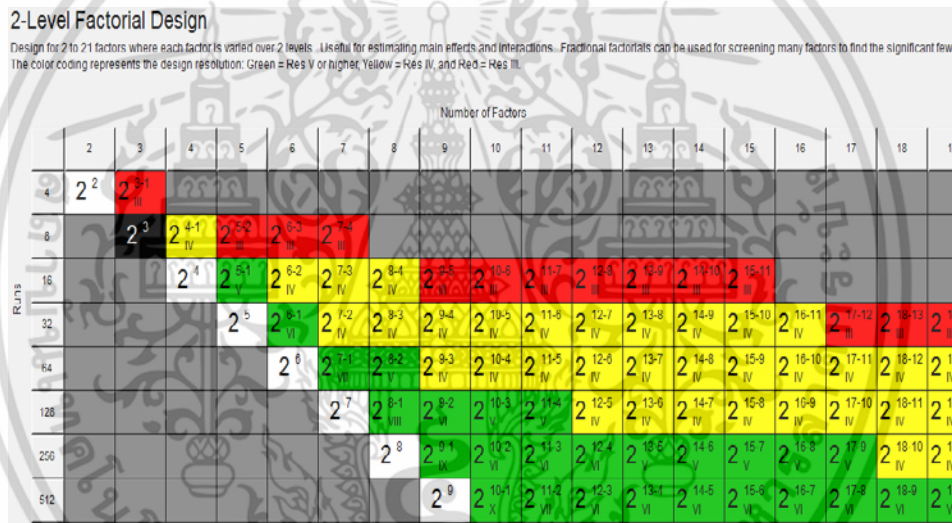
ภาคผนวก ฅ

การใช้โปรแกรม Design Expert 6.0.10

โปรแกรม Design Expert เป็นโปรแกรมสำหรับใช้ออกแบบการทดลอง (Design of experiment: DOE) เช่นเดียวกับโปรแกรม Minitab ซึ่งสามารถออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ ฯลฯ และวิเคราะห์ผลการทดลองและแสดงผลการทดลองเป็นแผนภูมิหรือกราฟ

การใช้โปรแกรม Design Expert

- เมื่อเข้าสู่โปรแกรม คลิกที่ file ----> New Design และเลือก 2-Level Factorial จะปรากฏตัวเลือกสำหรับออกแบบ 2-Level Factorial Design ดังรูปที่ ฅ.1



รูปที่ ฅ.1 ตัวเลือกสำหรับออกแบบ 2-Level Factorial Design ของโปรแกรม Design Expert

- เลือกจำนวนตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง เช่น ถ้าการทดลองมี 3 ตัวแปร ให้คลิกที่ 2³ หลังจากนั้นกรอกจำนวนครั้งของการทดลองที่ช่อง Replicates และกรอกจำนวนการทดลองซ้ำของค่ากลางที่ช่อง Center point per block จากนั้นคลิกที่ปุ่ม Continue จะปรากฏตารางดังรูปที่ ฅ.2

| | Name | Units | Type | Low | High |
|----|------|-------|---------|-----|------|
| A: | A | | Numeric | -1 | 1 |
| B: | B | | Numeric | -1 | 1 |
| C: | C | | Numeric | -1 | 1 |

รูปที่ ฅ.2 หน้าต่างกำหนดตัวแปรที่ศึกษาก่อนวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กรอกข้อมูลลงในตารางกำหนดตัวแปรที่ศึกษา ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ ฅ.3 หลังจากนั้นคลิกที่ปุ่ม Continue

| | Name | Units | Type | Low | High |
|----|-----------------|-------|---------|-----|------|
| A: | Catalyst ratios | wt% | Numeric | 0.5 | 1.5 |
| B: | Temperature | °C | Numeric | 390 | 440 |
| C: | Time | min | Numeric | 30 | 60 |

รูปที่ ฅ.3 ตัวอย่างการกรอกข้อมูลลงในหน้าต่ากำหนดตัวแปรที่ศึกษา

4. เลือก Response กรอกชื่อ Response เช่น Liquid yield แสดงในรูปที่ ฅ.4 เมื่อกรอกข้อมูลทั้งหมดเสร็จ คลิกที่ปุ่ม Continue

The screenshot shows a software interface for defining responses. At the top, there is a dropdown menu labeled 'Responses:' with the value '1' selected and a range '(1 to 999)' indicated. Below this is a table with two columns: 'Name' and 'Units'. The table contains one row with the text 'Liquid Yield' in the 'Name' column and 'wt%' in the 'Units' column.

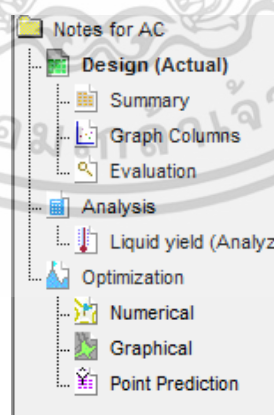
รูปที่ ฅ.4 หน้าต่ากำหนด Response ของการทดลอง

5. หลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงหน้าต่าจำนวนการทดลองทั้งหมด ตัวอย่างเช่น ในงานวิจัยมีผลการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง และทดลองซ้ำการทดลองละ 1 ครั้ง ทดลองค่ากลาง 1 การทดลอง และทดลองซ้ำค่ากลาง 2 ครั้ง จะได้ผลการทดลองทั้งหมด 19 การทดลอง จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ศึกษาในงานวิจัยกรอกลงในหน้าต่าโปรแกรม แสดงในรูปที่ ฅ.5

| Std | Run | Block | Factor 1 A:A the ratios of ca | Factor 2 B:B temperature | Factor 3 C:C time | Response 1 Liquid yield wt% |
|-----|-----|---------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 7 | 1 | Block 1 | 1.50 | 440.00 | 30.00 | 52.89 |
| 9 | 2 | Block 1 | 0.50 | 390.00 | 60.00 | 71.42 |
| 4 | 3 | Block 1 | 1.50 | 390.00 | 30.00 | 73.17 |
| 18 | 4 | Block 1 | 1.00 | 415.00 | 45.00 | 65.14 |
| 6 | 5 | Block 1 | 0.50 | 440.00 | 30.00 | 56.11 |
| 14 | 6 | Block 1 | 0.50 | 440.00 | 60.00 | 54.13 |
| 1 | 7 | Block 1 | 0.50 | 390.00 | 30.00 | 84.95 |
| 15 | 8 | Block 1 | 1.50 | 440.00 | 60.00 | 50.27 |
| 17 | 9 | Block 1 | 1.00 | 415.00 | 45.00 | 63.87 |
| 16 | 10 | Block 1 | 1.50 | 440.00 | 60.00 | 47.04 |
| 11 | 11 | Block 1 | 1.50 | 390.00 | 60.00 | 65.62 |
| 3 | 12 | Block 1 | 1.50 | 390.00 | 30.00 | 75.62 |
| 13 | 13 | Block 1 | 0.50 | 440.00 | 60.00 | 56.52 |
| 2 | 14 | Block 1 | 0.50 | 390.00 | 30.00 | 82.24 |
| 10 | 15 | Block 1 | 0.50 | 390.00 | 60.00 | 70.12 |
| 5 | 16 | Block 1 | 0.50 | 440.00 | 30.00 | 58.85 |
| 8 | 17 | Block 1 | 1.50 | 440.00 | 30.00 | 50.25 |
| 19 | 18 | Block 1 | 1.00 | 415.00 | 45.00 | 62.98 |
| 12 | 19 | Block 1 | 1.50 | 390.00 | 60.00 | 62.25 |

รูปที่ ๓.5 วิธีกรอกข้อมูลลงในหน้าต่างจำนวนการทดลองที่ต้องทำ

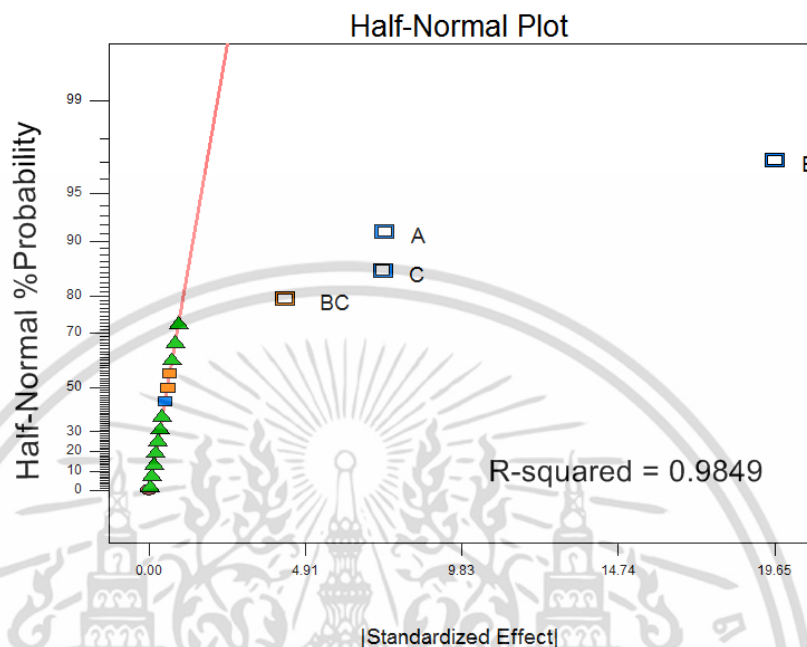
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองโดยโปรแกรม Design Expert โดยคลิกข้อมูลที่ต้องการให้โปรแกรมวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น ต้องการวิเคราะห์ Liquid yield ให้คลิกที่ปุ่ม Liquid yield ในแถบเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ผล ดังรูปที่ ๓.6 จากนั้นคลิกที่ปุ่ม Effect



รูปที่ ๓.6 วิธีเลือก Response ที่ต้องการวิเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อคลิกที่ปุ่ม Effect เลือกกราฟที่ต้องการวิเคราะห์ผล ตัวอย่างเช่นเลือก Half-normal plot โปรแกรมจะแสดงกราฟดังรูปที่ ฅ.7



รูปที่ ฅ.7 ตัวอย่างกราฟ Half-normal probability plot ที่ใช้โปรแกรม Design Expert วิเคราะห์ผล

ถ้าตัวแปร A, B, C และ อันตรกิริยาระหว่าง BC เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงดังรูป แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ผลต่อค่า Response และตัวแปร B เบี่ยงเบนมากที่สุด แสดงว่าตัวแปร B มีผลต่อ Response มากที่สุด

โปรแกรม Design Expert 6.0.10 สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ของตัวแปรต่างๆ โดยพิจารณาจากค่า p-value ของตัวแปรนั้น ถ้าค่า p-value ของตัวแปร ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อค่า Response ตัวแปรที่มีค่า Mean square และ F value สูงที่สุด แสดงว่าตัวแปรนั้นมีผลต่อค่า Response มากที่สุด

ภาคผนวก ก

มาตรฐาน ASTM D2887



Designation: D2887 – 08



Designation: 406

Standard Test Method for Boiling Range Distribution of Petroleum Fractions by Gas Chromatography^{1,2}

This standard is issued under the fixed designation D2887; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers the determination of the boiling range distribution of petroleum products. The test method is applicable to petroleum products and fractions having a final boiling point of 538°C (1000°F) or lower at atmospheric pressure as measured by this test method. This test method is limited to samples having a *boiling range* greater than 55.5°C (100°F), and having a vapor pressure sufficiently low to permit sampling at ambient temperature.

NOTE 1—Since a *boiling range* is the difference between two temperatures, only the constant of 1.8°F/°C is used in the conversion of the temperature range from one system of units to another.

1.2 This test method is not to be used for the analysis of gasoline samples or gasoline components. These types of samples must be analyzed by Test Method D3710.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as standard. The inch-pound units given in parentheses are for information only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards*:³

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D02 on Petroleum Products and Lubricants and is the direct responsibility of Subcommittee D02.04.04 on Chromatographic Distribution Methods.

Current edition approved Dec. 1, 2008. Published January 2009. Originally approved in 1973. Last previous edition approved in 2006 as D2887–06a. DOI: 10.1520/D2887-08.

² This standard has been developed through the cooperative effort between ASTM and the Institute of Petroleum, London. The IP and ASTM logos imply that the ASTM and IP standards are technically equivalent, but their use does not imply that both standards are editorially identical.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

D86 Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure

D1160 Test Method for Distillation of Petroleum Products at Reduced Pressure

D2892 Test Method for Distillation of Crude Petroleum (15-Theoretical Plate Column)

D3710 Test Method for Boiling Range Distribution of Gasoline and Gasoline Fractions by Gas Chromatography

D4057 Practice for Manual Sampling of Petroleum and Petroleum Products

D4626 Practice for Calculation of Gas Chromatographic Response Factors

D6708 Practice for Statistical Assessment and Improvement of Expected Agreement Between Two Test Methods that Purport to Measure the Same Property of a Material

E260 Practice for Packed Column Gas Chromatography

E355 Practice for Gas Chromatography Terms and Relationships

E516 Practice for Testing Thermal Conductivity Detectors Used in Gas Chromatography

E594 Practice for Testing Flame Ionization Detectors Used in Gas or Supercritical Fluid Chromatography

3. Terminology

3.1 *Definitions*—This test method makes reference to many common gas chromatographic procedures, terms, and relationships. Detailed definitions of these can be found in Practices E260, E355, and E594.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard*:

3.2.1 *area slice*—the area, resulting from the integration of the chromatographic detector signal, within a specified retention time interval. In area slice mode (see 6.3.2), peak detection parameters are bypassed and the detector signal integral is recorded as area slices of consecutive, fixed duration time intervals.

3.2.2 *corrected area slice*—an area slice corrected for baseline offset, by subtraction of the exactly corresponding area slice in a previously recorded blank (non-sample) analysis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 *cumulative corrected area*—the accumulated sum of corrected area slices from the beginning of the analysis through a given retention time, ignoring any non-sample area (for example, solvent).

3.2.4 *final boiling point (FBP)*—the temperature (corresponding to the retention time) at which a cumulative corrected area count equal to 99.5 % of the total sample area under the chromatogram is obtained.

3.2.5 *initial boiling point (IBP)*—the temperature (corresponding to the retention time) at which a cumulative corrected area count equal to 0.5 % of the total sample area under the chromatogram is obtained.

3.2.6 *slice rate*—the time interval used to integrate the continuous (analog) chromatographic detector response during an analysis. The slice rate is expressed in hertz (for example, integrations or slices per second).

3.2.7 *slice time*—the time associated with the end of each contiguous area slice. The slice time is equal to the slice number divided by the slice rate.

3.2.8 *total sample area*—the cumulative corrected area, from the initial area point to the final area point, where the chromatographic signal is considered to have returned to baseline after complete sample elution.

3.3 Abbreviations:

3.3.1 A common abbreviation of hydrocarbon compounds is to designate the number of carbon atoms in the compound. A prefix is used to indicate the carbon chain form, while a subscripted suffix denotes the number of carbon atoms (for example, normal decane = $n\text{-C}_{10}$; isotetradecane = $i\text{-C}_{14}$).

4. Summary of Test Method

4.1 The boiling range distribution determination by distillation is simulated by the use of gas chromatography. A nonpolar packed or open tubular (capillary) gas chromatographic column is used to elute the hydrocarbon components of the sample in order of increasing boiling point. The column temperature is raised at a reproducible linear rate and the area under the chromatogram is recorded throughout the analysis. Boiling points are assigned to the time axis from a calibration curve obtained under the same chromatographic conditions by analyzing a known mixture of hydrocarbons covering the boiling range expected in the sample. From these data, the boiling range distribution can be obtained.

5. Significance and Use

5.1 The boiling range distribution of petroleum fractions provides an insight into the composition of feedstocks and products related to petroleum refining processes. The gas chromatographic simulation of this determination can be used to replace conventional distillation methods for control of refining operations. This test method can be used for product specification testing with the mutual agreement of interested parties.

5.2 Boiling range distributions obtained by this test method are essentially equivalent to those obtained by true boiling point (TBP) distillation (see Test Method D2892). They are not

equivalent to results from low efficiency distillations such as those obtained with Test Method D86 or D1160.

6. Apparatus

6.1 *Chromatograph*—The gas chromatograph used must have the following performance characteristics:

6.1.1 *Detector*—Either a flame ionization or a thermal conductivity detector may be used. The detector must have sufficient sensitivity to detect 1.0 % dodecane with a peak height of at least 10 % of full scale on the recorder under conditions prescribed in this test method and without loss of resolution as defined in 9.3.1. When operating at this sensitivity level, detector stability must be such that a baseline drift of not more than 1 % of full scale per hour is obtained. The detector must be capable of operating continuously at a temperature equivalent to the maximum column temperature employed. Connection of the column to the detector must be such that no temperature below the column temperature exists.

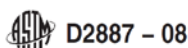
NOTE 2—It is not desirable to operate a thermal conductivity detector at a temperature higher than the maximum column temperature employed. Operation at higher temperature generally contributes to higher noise levels and greater drift and can shorten the useful life of the detector.

6.1.2 *Column Temperature Programmer*—The chromatograph must be capable of linear programmed temperature operation over a range sufficient to establish a retention time of at least 1 min for the IBP and to elute compounds up to a boiling temperature of 538°C (1000°F) before reaching the upper end of the temperature program. The programming rate must be sufficiently reproducible to obtain retention time repeatability of 0.1 min (6 s) for each component in the calibration mixture described in 7.8.

6.1.3 *Cryogenic Column Cooling*—Column starting temperatures below ambient will be required if samples with IBPs of less than 93°C (200°F) are to be analyzed. This is typically provided by adding a source of either liquid carbon dioxide or liquid nitrogen, controlled through the oven temperature circuitry. Excessively low initial column temperature must be avoided to ensure that the stationary phase remains liquid. The initial temperature of the column should be only low enough to obtain a calibration curve meeting the specifications of the method.

6.1.4 *Sample Inlet System*—The sample inlet system must be capable of operating continuously at a temperature equivalent to the maximum column temperature employed, or provide for on-column injection with some means of programming the entire column, including the point of sample introduction, up to the maximum temperature required. Connection of the column to the sample inlet system must be such that no temperature below the column temperature exists.

6.1.5 *Flow Controllers*—The gas chromatograph must be equipped with mass flow controllers capable of maintaining carrier gas flow constant to $\pm 1\%$ over the full operating temperature range of the column. The inlet pressure of the carrier gas supplied to the gas chromatograph must be sufficiently high to compensate for the increase in column backpressure as the column temperature is raised. An inlet pressure of 550 kPa (80 psig) has been found satisfactory with the packed columns described in Table 1. For open tubular



D2887 – 08

TABLE 1 Typical Operating Conditions

| Packed Columns | 1 | 2 | 3 | 4 | Open Tubular Columns | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------|----------|----------------|----------------|
| Column length, m (ft) | 1.2 (4) | 1.5 (5) | 0.5 (1.5) | 0.6 (2) | Column length (m) | 7.5 | 5 | 10 |
| Column outside diameter, mm (in.) | 6.4 (1/4) | 3.2 (1/8) | 3.2 (1/8) | 6.4 (1/8) | Column inner diameter (mm) | 0.53 | 0.53 | 0.53 |
| Liquid phase | OV-1 | SE-30 | UC-W98 | SE-30 | Stationary phase | DB-1 | HP-1 | HP-1 |
| Percent liquid phase | 3 | 5 | 10 | 10 | Stationary phase thickness (m) | 1.5 | 0.88 | 2.65 |
| Support material | S ^A | G ^B | P ^C | P ^C | Carrier gas | nitrogen | helium | helium |
| Support mesh size | 60/80 | 60/80 | 80/100 | 60/80 | Carrier gas flow rate, mL/min | 30 | 12 | 12 |
| Initial column temperature, °C | -20 | -40 | -30 | -50 | Initial column temperature, °C | 40 | 35 | 35 |
| Final column temperature, °C | 360 | 350 | 360 | 390 | Final column temperature, °C | 340 | 350 | 350 |
| Programming rate, °C/min | 10 | 6.5 | 10 | 7.5 | Programming rate, °C/min | 10 | 10 | 20 |
| Carrier gas | helium | helium | N ₂ | helium | Detector | FID | FID | FID |
| Carrier gas flow, mL/min | 40 | 30 | 25 | 60 | Detector temperature, °C | 350 | 380 | 370 |
| Detector | TC | FID | FID | TC | Injector temperature, °C | 340 | cool on-column | cool on-column |
| Detector temperature, °C | 360 | 370 | 360 | 390 | Sample size, µL | 0.5 | 1 | 0.1–0.2 |
| Injection port temperature, °C | 360 | 370 | 350 | 390 | Sample concentration mass % | 25 | 2 | neat |
| Sample size, µ | 4 | 0.3 | 1 | 5 | | | | |

^A Diatoport S; silane treated.

^B Chromosorb G (AW-DMS).

^C Chromosorb P, acid washed.

columns, inlet pressures from 10 to 70 kPa (1.5 to 10 psig) have been found to be suitable.

6.1.6 *Microsyringe*—A microsyringe is needed for sample introduction.

NOTE 3—Automatic sampling devices or other sampling means, such as indium encapsulation, can be used provided: the system can be operated at a temperature sufficiently high to completely vaporize hydrocarbons with atmospheric boiling points of 538°C (1000°F), and the sampling system is connected to the chromatographic column avoiding any cold temperature zones.

6.2 *Column*—Any column and conditions may be used that provide separation of typical petroleum hydrocarbons in order of increasing boiling point and meet the column performance requirements of 9.3.1 and 9.3.3. Successfully used columns and conditions are given in Table 1.

6.3 *Data Acquisition System*:

6.3.1 *Recorder*—A 0 to 1 mV range recording potentiometer or equivalent, with a full-scale response time of 2 s or less may be used.

6.3.2 *Integrator*—Means must be provided for determining the accumulated area under the chromatogram. This can be done by means of an electronic integrator or computer-based chromatography data system. The integrator/computer system must have normal chromatographic software for measuring the retention time and areas of eluting peaks (peak detection mode). In addition, the system must be capable of converting the continuously integrated detector signal into area slices of fixed duration. These contiguous area slices, collected for the entire analysis, are stored for later processing. The electronic range of the integrator/computer (for example, 1 V, 10 V) must be within the linear range of the detector/electrometer system used. The system must be capable of subtracting the area slice of a blank run from the corresponding area slice of a sample run.

NOTE 4—Some gas chromatographs have an algorithm built into their operating software that allows a mathematical model of the baseline profile to be stored in memory. This profile is automatically subtracted from the detector signal on subsequent sample analyses to compensate for

any baseline offset. Some integration systems also store and automatically subtract a blank analysis from subsequent analytical determinations.

7. Reagents and Materials

7.1 *Purity of Reagents*—Reagent grade chemicals shall be used in all tests. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents conform to the specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society where such specifications are available.⁴ Other grades may be used, provided it is first ascertained that the reagent is of sufficiently high purity to permit its use without lessening the accuracy of the determination.

7.2 *Liquid Phase for Columns*—Methyl silicone gums and liquids provide the proper chromatographic hydrocarbon elution characteristics for this test method.

7.3 *Solid Support for Packed Columns*—Chromatographic grade diatomaceous earth solid support material within a particle size range from 60 to 100 sieve mesh size is recommended.

7.4 *Carrier Gas*—Helium or nitrogen of high purity. (**Warning**—Helium and nitrogen are compressed gases under high pressure.) Additional purification is recommended by the use of molecular sieves or other suitable agents to remove water, oxygen, and hydrocarbons. Available pressure must be sufficient to ensure a constant carrier gas flow rate (see 6.1.5).

7.5 *Hydrogen*—Hydrogen of high purity (for example, hydrocarbon free) is used as fuel for the flame ionization detector (FID). (**Warning**—Hydrogen is an extremely flammable gas under high pressure.)

⁴ *Reagent Chemicals, American Chemical Society Specifications*, American Chemical Society, Washington, DC. For Suggestions on the testing of reagents not listed by the American Chemical Society, see *Annual Standards for Laboratory Chemicals*, BDH Ltd., Poole, Dorset, U.K., and the *United States Pharmacopoeia and National Formulary*, U.S. Pharmacopoeial Convention, Inc. (USPC), Rockville, MD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.6 *Air*—High purity (for example, hydrocarbon free) compressed air is used as the oxidant for the flame ionization detector (FID). (**Warning**—Compressed air is a gas under high pressure and supports combustion.)

7.7 *Column Resolution Test Mixture*—For packed columns, a nominal mixture of 1 mass % each of *n*-C₁₆ and *n*-C₁₈ paraffin in a suitable solvent, such as *n*-octane, for use in testing the column resolution. (**Warning**—*n*-octane is flammable and harmful if inhaled.) The calibration mixture specified in 7.8.2 may be used as a suitable alternative, provided the concentrations of the *n*-C₁₆ and *n*-C₁₈ components are nominally 1.0 mass % each. For open tubular columns, use the mixture specified in 7.8.3.

7.8 *Calibration Mixture*—An accurately weighed mixture of approximately equal mass quantities of *n*-hydrocarbons dissolved in carbon disulfide (CS₂). (**Warning**—Carbon disulfide is extremely volatile, flammable, and toxic.) The mixture shall cover the boiling range from *n*-C₅ to *n*-C₄₄, but does not need to include every carbon number (see Note 5).

7.8.1 At least one compound in the mixture must have a boiling point lower than the IBP of the sample and at least one compound in the mixture must have a boiling point higher than the IBP of the sample. Boiling points of *n*-paraffins are listed in Table 2.

TABLE 2 Boiling Points of Normal Paraffins^{A,B}

| Carbon Number | Boiling Point, °C | Boiling Point, °F | Carbon Number | Boiling Point, °C | Boiling Point, °F |
|---------------|-------------------|-------------------|---------------|-------------------|-------------------|
| 1 | -162 | -259 | 23 | 380 | 716 |
| 2 | -89 | -127 | 24 | 391 | 736 |
| 3 | -42 | -44 | 25 | 402 | 755 |
| 4 | 0 | 31 | 26 | 412 | 774 |
| 5 | 36 | 97 | 27 | 422 | 791 |
| 6 | 69 | 156 | 28 | 431 | 809 |
| 7 | 98 | 209 | 29 | 440 | 825 |
| 8 | 126 | 258 | 30 | 449 | 840 |
| 9 | 151 | 303 | 31 | 458 | 856 |
| 10 | 174 | 345 | 32 | 466 | 870 |
| 11 | 196 | 385 | 33 | 474 | 885 |
| 12 | 216 | 421 | 34 | 481 | 898 |
| 13 | 235 | 456 | 35 | 489 | 912 |
| 14 | 254 | 488 | 36 | 496 | 925 |
| 15 | 271 | 519 | 37 | 503 | 937 |
| 16 | 287 | 548 | 38 | 509 | 948 |
| 17 | 302 | 576 | 39 | 516 | 961 |
| 18 | 316 | 601 | 40 | 522 | 972 |
| 19 | 330 | 626 | 41 | 528 | 982 |
| 20 | 344 | 651 | 42 | 534 | 993 |
| 21 | 356 | 674 | 43 | 540 | 1004 |
| 22 | 369 | 695 | 44 | 545 | 1013 |

^A API Project 44, October 31, 1972 is believed to have provided the original normal paraffin boiling point data that are listed in Table 2. However, over the years some of the data contained in both API Project 44 (Thermodynamics Research Center Hydrocarbon Project) and Test Method D2887 have changed, and they are no longer equivalent. Table 2 represents the current normal paraffin boiling point values accepted by Subcommittee D02.04 and found in all test methods under the jurisdiction of Section D02.04.0H.

^B Test Method D2887 has traditionally used *n*-paraffin boiling points rounded to the nearest whole degree for calibration. The boiling points listed in Table 2 are correct to the nearest whole number in both degrees Celsius and degrees Fahrenheit. However, if a conversion is made from one unit to the other and then rounded to a whole number, the result will not agree with the table value for a few carbon numbers. For example, the boiling point of *n*-heptane is 98.425°C, which is correctly rounded to 98°C in the table. However, converting 98.425°C gives 209.165°F, which rounds to 209°F, while converting 98°C gives 208.4°F, which rounds to 208°F. Carbon numbers 2, 4, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 25, 27, and 32 are affected by rounding.

7.8.1.1 If necessary, for the calibration mixture to have a compound with a boiling point below the IBP of the sample, propane or butane can be added to the calibration mixture, non-quantitatively, by bubbling the gaseous compound into the calibration mixture in a septum sealed vial using a gas syringe.

NOTE 5—Calibration mixtures containing normal paraffins with the carbon numbers 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 24, 28, 32, 36, 40, and 44 have been found to provide a sufficient number of points to generate a reliable calibration curve.

7.8.2 *Packed Columns*—The final concentration should be approximately ten parts of the *n*-paraffin mixture to one hundred parts of CS₂.

7.8.3 *Open Tubular Columns*—The final concentration should be approximately one part of the *n*-paraffin mixture to one hundred parts of CS₂.

7.9 *Reference Gas Oil No. 1*—A reference sample that has been analyzed by laboratories participating in the test method cooperative study. Consensus values for the boiling range distribution of this sample are given in Table 3.

8. Sampling

8.1 Samples to be analyzed by this test method must be obtained using the procedures outlined in Practice D4057.

8.2 The test specimen to be analyzed must be homogeneous and free of dust or undissolved material.

9. Preparation of Apparatus

9.1 *Chromatograph*—Place in service in accordance with the manufacturer's instructions. Typical operating conditions are shown in Table 1.

9.1.1 When a FID is used, regularly remove the deposits formed in the detector from combustion of the silicone liquid phase decomposition products. These deposits will change the response characteristics of the detector.

9.1.2 If the sample inlet system is heated above 300°C (572°F), a blank analysis must be made after a new septum is installed to ensure that no extraneous detector response is produced by septum bleed. At the sensitivity levels commonly employed in this test method, conditioning of the septum at the operating temperature of the sample inlet system for several hours will minimize this problem. A recommended practice is to change the septum at the end of a series of analyses rather than at the beginning of the series.

9.2 Column Preparation:

9.2.1 *Packed Columns*—Any satisfactory method that will produce a column meeting the requirements of 9.3.1 and 9.3.3 can be used. In general, use liquid phase loadings of 3 to 10 %. Condition the column at the maximum operating temperature to reduce baseline shifts due to bleeding of the column substrate. The column can be conditioned very rapidly and effectively using the following procedure:

9.2.1.1 Connect the column to the inlet but leave the detector end free.

9.2.1.2 Purge the column thoroughly at ambient temperature with carrier gas.

9.2.1.3 Turn off the carrier gas and allow the column to depressurize completely.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 3 Test Method D2887 Reference Gas Oil No. 1^A

| % Off | Batch 1 | | Batch 2 | | Allowable Difference | |
|-------|---------|-----|---------|-----|----------------------|------|
| | °C | °F | °C | °F | °C | °F |
| IBP | 114 | 238 | 115 | 240 | 7.6 | 13.7 |
| 5 | 143 | 289 | 151 | 304 | 3.8 | 6.8 |
| 10 | 169 | 336 | 176 | 348 | 4.1 | 7.4 |
| 15 | 196 | 384 | 201 | 393 | 4.5 | 8.1 |
| 20 | 221 | 429 | 224 | 435 | 4.9 | 8.7 |
| 25 | | | 243 | 470 | | |
| 30 | 258 | 496 | 259 | 499 | 4.7 | 8.4 |
| 35 | | | 275 | 527 | | |
| 40 | 287 | 548 | 289 | 552 | 4.3 | 7.7 |
| 45 | | | 302 | 576 | | |
| 50 | 312 | 594 | 312 | 594 | 4.3 | 7.7 |
| 55 | | | 321 | 611 | | |
| 60 | 332 | 629 | 332 | 629 | 4.3 | 7.7 |
| 65 | 343 | 649 | 343 | 649 | | |
| 70 | 354 | 669 | 354 | 668 | 4.3 | 7.7 |
| 75 | 364 | 688 | 365 | 690 | | |
| 80 | 376 | 709 | 378 | 712 | 4.3 | 7.7 |
| 85 | 389 | 732 | 391 | 736 | | |
| 90 | 404 | 759 | 407 | 764 | 4.3 | 7.7 |
| 95 | 425 | 797 | 428 | 803 | 5.0 | 9.0 |
| FBP | 475 | 887 | 475 | 888 | 11.8 | 21.2 |

^A Consensus results for Batch 2 obtained from 30 laboratories in 1995 (supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:D02-1407).

9.2.1.4 Seal off the open end (detector) of the column with an appropriate fitting.

9.2.1.5 Raise the column temperature to the maximum operating temperature.

9.2.1.6 Hold the column at this temperature for at least 1 h with no flow through the column.

9.2.1.7 Cool the column to ambient temperature.

9.2.1.8 Remove the cap from the detector end of the column and turn the carrier gas back on.

9.2.1.9 Program the column temperature up to the maximum several times with normal carrier gas flow. Connect the free end of the column to the detector.

9.2.1.10 An alternative method of column conditioning that has been found effective for columns with an initial loading of 10 % liquid phase consists of purging the column with carrier gas at the normal flow rate while holding the column at the maximum operating temperature for 12 to 16 h, while detached from the detector.

9.2.2 *Open Tubular Columns*—Open tubular columns with cross-linked and bonded stationary phases are available from many manufacturers and are usually pre-conditioned. These columns have much lower column bleed than packed columns. Column conditioning is less critical with these columns but some conditioning may be necessary. The column can be conditioned very rapidly and effectively using the following procedure.

9.2.2.1 Once the open tubular column has been properly installed into the gas chromatograph and tested to be leak free, set the column and detector gas flows. Before heating the column, allow the system to purge with carrier gas at ambient temperature for at least 30 min.

9.2.2.2 Increase the oven temperature about 5 to 10°C per minute to the final operating temperature and hold for about 30 min.

9.2.2.3 Cycle the gas chromatograph several times through its temperature program until a stable baseline is obtained.

9.3 System Performance Specification:

9.3.1 *Column Resolution*—The column resolution, influenced by both the column physical parameters and operating conditions, affects the overall determination of boiling range distribution. Resolution is therefore specified to maintain equivalence between different systems (laboratories) employing this test method. Resolution is determined using Eq 1 and the C₁₆ and C₁₈ paraffins from a column resolution test mixture analysis (see 7.7 and Section 10), and is illustrated in Fig. 1. Resolution (*R*) should be at least three, using the identical conditions employed for sample analyses:

$$R = 2(t_2 - t_1) / [1.699(w_2 + w_1)] \quad (1)$$

where:

R = resolution,

*t*₁ = time(s) for the *n*-C₁₆ peak maximum,

*t*₂ = time(s) for the *n*-C₁₈ peak maximum,

*w*₁ = peak width(s), at half height, of the *n*-C₁₆ peak, and

*w*₂ = peak width(s), at half height, of the *n*-C₁₈ peak.

9.3.2 *Detector Response Calibration*—This test method assumes that the detector response to petroleum hydrocarbons is proportional to the mass of individual components. This must be verified when the system is put in service, and whenever any changes are made to the system or operational parameters. Analyze the calibration mixture using the identical procedure to be used for the analysis of samples (see Section 10). Calculate the relative response factor for each *n*-paraffin (relative to *n*-decane) in accordance with Practice D4626 and Eq 2:

$$F_n = (M_n/A_n)/(M_{10}/A_{10}) \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

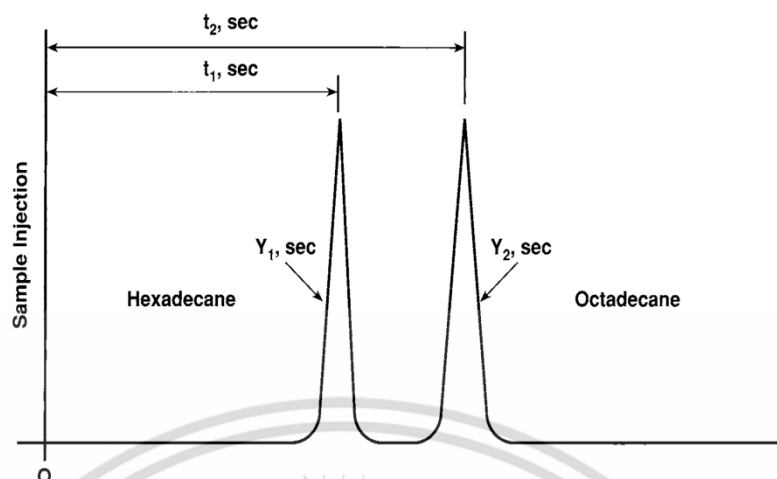


FIG. 1 Column Resolution Parameters

where:

F_n = relative response factor,
 M_n = mass of the n -paraffin in the mixture,
 A_n = peak area of the n -paraffin in the mixture,
 M_{10} = mass of the n -decane in the mixture, and
 A_{10} = peak area of the n -decane in the mixture.

The relative response factor (F_n) of each n -paraffin must not deviate from unity (1) by more than $\pm 10\%$.

9.3.3 *Column Elution Characteristics*—The column material, stationary phase, or other parameters can affect the elution order of non-paraffinic sample components, resulting in deviations from a TBP versus retention time relationship. If stationary phases other than those referenced in 7.3 are used, the retention times of a few alkylbenzenes (for example, *o*-xylene, *n*-butyl-benzene, 1,3,5-triisopropylbenzene, *n*-decyl-benzene, and tetradecylbenzene) across the boiling range should be analyzed to make certain that the column is separating in accordance with the boiling point order (see Appendix XI).

10. Calibration and Standardization

10.1 *Analysis Sequence Protocol*—Define and use a predetermined schedule of analysis events designed to achieve maximum reproducibility for these determinations. The schedule will include cooling the column oven to the initial starting temperature, equilibration time, sample injection and system start, analysis, and final upper temperature hold time.

10.1.1 After chromatographic conditions have been set to meet performance requirements, program the column temperature upward to the maximum temperature to be used and hold that temperature for the selected time. Following the analysis sequence protocol, cool the column to the initial starting temperature.

10.1.2 During the cool down and equilibration time, ready the integrator/computer system. If a retention time or detector response calibration is being performed, use the peak detection mode. For samples and baseline compensation determinations, use the area slice mode of integration. The recommended slice rate for this test method is 1.0 Hz (one slice per second). Other slice rates may be used if within the limits of 0.02 and 0.2 %

of the retention time of the final calibration component (C_{44}). Larger slice rates may be used, as may be required for other reasons, if provision is made to accumulate (bunch) the slice data to within these limits prior to determination of the boiling range distribution.

10.1.3 At the exact time set by the schedule, inject either the calibration mixture or sample into the chromatograph; or make no injection (baseline blank). At the time of injection, start the chromatograph time cycle and the integrator/computer data acquisition. Follow the analysis sequence protocol for all subsequent repetitive analyses or calibrations. Since complete resolution of sample peaks is not expected, do not change the detector sensitivity setting during the analysis.

10.2 *Baseline Compensation Analysis*—A baseline compensation analysis, or baseline blank, is performed exactly like an analysis except no injection is made. A blank analysis must be performed at least once per day. The blank analysis is necessary due to the usual occurrence of chromatographic baseline instability and is subtracted from sample analyses to remove any nonsample slice area from the chromatographic data. The blank analysis is typically performed prior to sample analyses, but may be useful if determined between samples or at the end of a sample sequence to provide additional data regarding instrument operation or residual sample carryover from previous sample analyses. Attention must be given to all factors that influence baseline stability, such as column bleed, septum bleed, detector temperature control, constancy of carrier gas flow, leaks, instrument drift, and so forth. Periodic baseline blank analyses should be made, following the analysis sequence protocol, to give an indication of baseline stability.

NOTE 6—If automatic baseline correction (see Note 4) is provided by the gas chromatograph, further correction of area slices may not be required. However, if an electronic offset is added to the signal after baseline compensation, additional area slice correction may be required in the form of offset subtraction. Consult the specific instrumentation instructions to determine if an offset is applied to the signal. If the algorithm used is unclear, the slice area data can be examined to determine if further correction is necessary. Determine if any offset has been added to the compensated signal by examining the corrected area slices of those time slices that precede the elution of any chromatographic unretained

substance. If these corrected area slices (representing the true baseline) deviate from zero, subtract the average of these corrected area slices from each corrected area slice in the analysis.

10.3 Retention Time Versus Boiling Point Calibration —In order to analyze samples, a retention time versus boiling point calibration must be performed. Inject an appropriate aliquot (0.2 to 2.0 μL) of the calibration mixture (see 7.8) into the chromatograph, using the analysis sequence protocol. Obtain a normal (peak detection) data record in order to determine the peak retention times and the peak areas for each component. Collect a time slice area record if a boiling range distribution report is desired.

10.3.1 Inspect the chromatogram of the calibration mixture for evidence of skewed (non-Gaussian shaped) peaks. Skewness is often an indication of overloading the sample capacity of the column that will result in displacement of the peak apex relative to nonoverloaded peaks. Distortion in retention time measurement and hence errors in boiling point temperature determination will be likely if column overloading occurs. The column liquid phase loading has a direct bearing on acceptable

sample size. Reanalyze the calibration mixture using a smaller sample size or a more dilute solution to avoid peak distortion.

10.3.2 Prepare a calibration table based upon the results of the analysis of the calibration mixture by recording the time of each peak maximum and the boiling point temperature in degrees Celsius (or Fahrenheit) for every component in the mixture. *n*-Paraffin boiling point temperatures are listed in Table 2.

10.3.3 Plot the retention time of each peak versus the corresponding normal boiling point temperature of that component in degrees Celsius (or Fahrenheit) as shown in Fig. 2.

10.3.4 Ideally, the retention time versus boiling point temperature calibration plot would be linear, but it is impractical to operate the chromatograph such that curvature is eliminated completely. The greatest potential for deviation from linearity will be associated with the lower boiling point paraffins. They will elute from the column relatively fast and have the largest difference in boiling point temperature. In general, the lower the sample IBP, the lower will be the starting temperature of

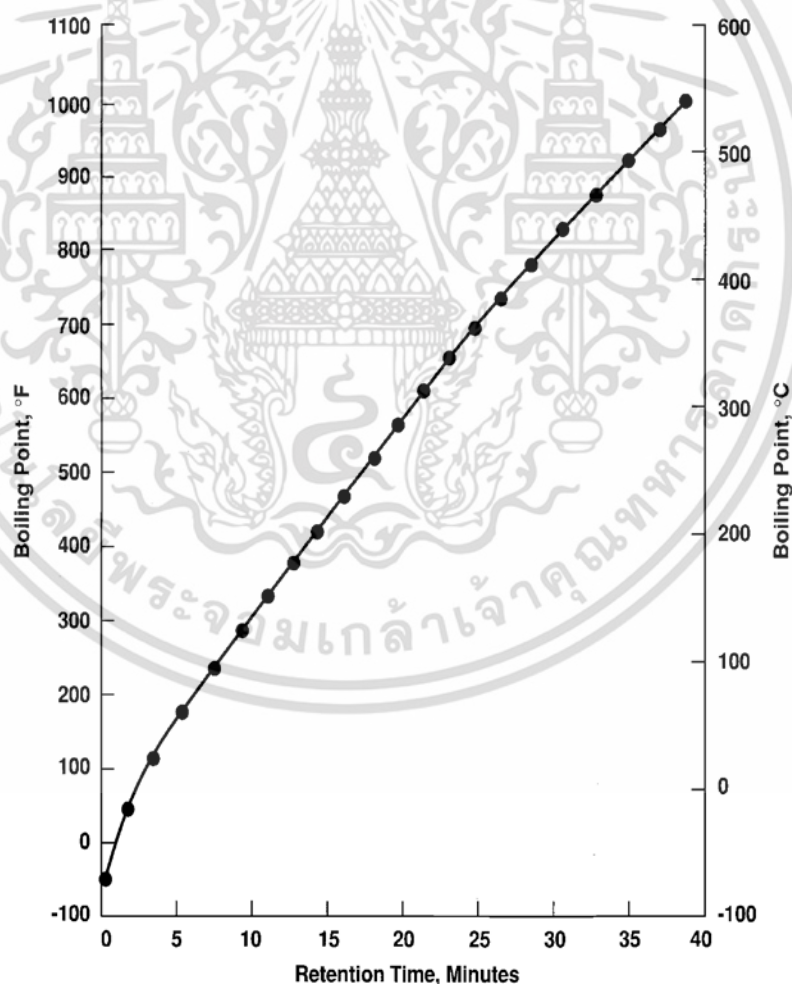
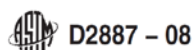


FIG. 2 Typical Calibration Curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



the analysis. Although extrapolation of the curve at the upper end is more accurate, calibration points must bracket the boiling range of the sample at both the low and high ends.

10.4 *Reference Gas Oil Analysis*—The Reference Gas Oil No. 1 sample is used to verify both the chromatographic and calculation processes involved in this test method. Perform an analysis of the gas oil following the analysis sequence protocol. Collect the area slice data and provide a boiling point distribution report as in Sections 12 and 13.

10.4.1 The results of this reference analysis must agree with the values given in Table 3 within the range specified by the test method reproducibility (see 14.1.2). If it does not meet the criteria in Table 3, check that all hardware is operating properly and all instrument settings are as recommended by the manufacturer. Rerun the retention boiling point calibration as described in 10.3.

10.4.2 Perform this reference gas oil confirmation test at least once per day or as often as required to establish confidence in consistent compliance with 10.4.1.

11. Procedure

11.1 Sample Preparation:

11.1.1 The amount of sample injected must not overload the column stationary phase nor exceed the detector linear range. A narrow boiling range sample will require a smaller amount injected than a wider boiling range sample.

11.1.1.1 To determine the detector linear range, refer to Practice E594 for flame ionization detectors or Practice E516 for thermal conductivity detectors.

11.1.1.2 The column stationary phase capacity can be estimated from the chromatogram of the calibration mixture (see 9.3.2). Different volumes of the calibration standard can be injected to find the maximum amount of a component that the stationary phase can tolerate without overloading (see 10.3.1). Note the peak height for this amount of sample. The maximum sample signal intensity should not exceed this peak height.

11.1.2 Samples that are of low enough viscosity to be sampled with a syringe at ambient temperature may be injected neat. This type of sample may also be diluted with CS₂ to control the amount of sample injected to comply with 11.1.1.

11.1.3 Samples that are too viscous or waxy to sample with a syringe may be diluted with CS₂.

11.1.4 Typical sample injection volumes are listed below.

Packed Columns:

| Stationary Phase Loading, % | Neat Sample Volume, μL |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| 10 | 1.0 |
| 5 | 0.5 |

Open Tubular Columns:

| Film Thickness, μm | Neat Sample Volume, μL |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| 0.8 to 1.5 | 0.1 to 0.2 |
| 1.8 to 3.0 | 0.1 to 0.5 |
| 3.0 to 5.0 | 0.2 to 1.0 |

11.2 *Sample Analysis*—Using the analysis sequence protocol, inject a sample aliquot into the gas chromatograph. Collect a contiguous time slice area record of the entire analysis.

12. Calculation

NOTE 7—See Appendix X3 for the recommended calculation algorithm.⁵

12.1 Correct the sample area slices for nonsample detector response by subtracting each blank analysis area slice (as determined in 10.2) from each sample area slice at the equivalent slice time. Also see Note 6 regarding automatic baseline correction. Sum the corrected area slices to obtain the cumulative corrected areas for each time interval during the run.

12.2 At the point on the chromatogram where the baseline at the end of the run first becomes steady as the total area point, record the total cumulative corrected area counts. Move back along the chromatogram until a cumulative area equals 99.5 % of the total area. Mark this point as the FBP.

NOTE 8—Location of the FBP may be the most difficult step in this test method. Some samples have extremely long tailing end portions due to gradually decreasing quantities of heavy materials. This fact, coupled with the natural tendency of the chromatographic baseline to rise at the end of the run due to septum or column bleed or elution of traces of heavy compounds from previous samples, can preclude the possibility of the chromatogram returning precisely to the original baseline established prior to the IBP of the sample. Thus, the most satisfactory procedure is to inspect the chromatogram and the area counts at each interval near the end of the run to determine the point at which the rate of change per second of the chromatographic signal has reached a constant low value of no greater than 0.00001 % of the total area counts. In some rather unusual cases, a sample may have individual peaks, separated at the end of the run, which return to baseline between the peaks. In such cases, the total area point of the sample obviously is somewhere beyond the last detectable peak.

12.3 Observe the area counts at the start of the run, until the point is reached where the cumulative area count is equal to 0.5 % of the total area (see 12.2). Mark this point as the IBP of the sample.

12.4 Divide the cumulative area at each interval between the initial and FBPs by the total area (see 12.2) and multiply by 100. This will give the cumulative percent of the sample recovered at each time interval.

12.5 Tabulate the cumulative percent recovered at each interval and the retention time at the end of the interval. Using linear interpolation where necessary, determine the retention time associated with each percent between 1 and 99.


12.6 For each percent and its associated retention time, determine the corresponding boiling temperature from the calibration table (see 10.3.2).

13. Report

13.1 Report the temperature to the nearest 0.5°C (1°F) at 1 % intervals between 1 and 99 % and at the IBP (0.5 %) and the FBP (99.5 %).

NOTE 9—If a plot of the boiling point distribution curve is desired, use graph paper with uniform subdivisions and use either retention time or

⁵ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:D02-1477.


D2887 – 08

temperature as the horizontal axis. The vertical axis will represent the boiling range distribution (0 to 100 %). Plot each boiling temperature against its corresponding normalized percent. Draw a smooth curve connecting the points.

14. Precision and Bias⁶

14.1 *Precision*—The precision of this test method as determined by the statistical examination of the interlaboratory test results is as follows:

14.1.1 *Repeatability*—The difference between successive test results obtained by the same operator with the same apparatus under constant operating conditions on identical test material would, in the long run, in the normal and correct operation of the test method, exceed the following values by only one case in twenty (see Table 4).

14.1.2 *Reproducibility*—The difference between two single and independent results obtained by different operators working in different laboratories on identical test material would, in the long run, exceed the following values only one case in twenty (see Table 5).

NOTE 10—This precision estimate is based on the analysis of nine samples by 19 laboratories using both packed and open tubular columns. The range of results found in the round robin are listed in Table 6.

14.2 *Bias*—The procedure in Test Method D2887 for determining the boiling range distribution of petroleum fractions by gas chromatography has no bias because the boiling range distribution can only be defined in terms of a test method.

⁶ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:D02-1406.

TABLE 4 Repeatability

NOTE 1— x = the average of the two results in °C and y = the average of the two results in °F.

| % Off | Repeatability | |
|---------|----------------------|----------------------|
| | °C | °F |
| IBP | 0.011 x | 0.011 ($y - 32$) |
| 5 % | 0.0032 ($x + 100$) | 0.0032 ($y + 148$) |
| 10–20 % | 0.8 | 1.4 |
| 30 % | 0.8 | 1.4 |
| 40 % | 0.8 | 1.4 |
| 50–90 % | 1.0 | 1.8 |
| 95 % | 1.2 | 2.2 |
| FBP | 3.2 | 5.8 |

TABLE 5 Reproducibility

NOTE 1— x = the average of the two results in °C and y = the average of the two results in °F.

| % Off | Reproducibility | |
|---------|---------------------|---------------------|
| | °C | °F |
| IBP | 0.066 x | 0.06 ($y - 32$) |
| 5 % | 0.015 ($x + 100$) | 0.015 ($y + 148$) |
| 10–20 % | 0.015 ($x + 100$) | 0.015 ($y + 148$) |
| 30 % | 0.013 ($x + 100$) | 0.013 ($y + 148$) |
| 40 % | 4.3 | 7.7 |
| 50–90 % | 4.3 | 7.7 |
| 95 % | 5.0 | 9.0 |
| FBP | 11.8 | 21.2 |

TABLE 6 Round Robin Range of Results

| % Off | Range of Results, °C | Range of Results, °F |
|-------|----------------------|----------------------|
| IBP | 112–213 | 234–415 |
| 5 % | 133–286 | 271–547 |
| 10 % | 139–312 | 282–594 |
| 20 % | 151–341 | 304–646 |
| 30 % | 161–358 | 322–676 |
| 40 % | 171–370 | 340–698 |
| 50 % | 182–381 | 360–718 |
| 60 % | 196–390 | 385–734 |
| 70 % | 206–401 | 403–754 |
| 80 % | 219–412 | 426–774 |
| 90 % | 233–426 | 451–799 |
| 95 % | 241–437 | 466–819 |
| FBP | 274–475 | 525–887 |

14.2.1 A rigorous, theoretical definition of the boiling range distribution of petroleum fractions is not possible due to the complexity of the mixture as well as the unquantifiable interactions among the components (for example, azeotropic behavior). Any other means used to define the distribution would require the use of a physical process, such as a conventional distillation or gas chromatographic characterization. This would therefore result in a method-dependent definition and would not constitute a true value from which bias can be calculated.

15. Keywords

15.1 boiling range distribution; correlation; distillation; gas chromatography; petroleum; petroleum fractions; petroleum products; simulated distillation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

| | |
|---|--|
| ชื่อ-นามสกุล | นายภาณุวัฒน์ จำปาศรี |
| วัน-เดือน-ปีเกิด | 13 สิงหาคม 2532 |
| สถานที่เกิด | จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ |
| ประวัติการศึกษา | |
| 2545-2550 | ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย รังสิต |
| 2551-2556 | หลักสูตรปริญญาตรีเก้าวหน้า ปริญญาตรี (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง GPA 2.98 ปริญญาโท (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง GPA 3.50 |
| ทุนวิจัยที่ได้รับ | ทุนจากงบประมาณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ประจำปี 2556 |
| ประสบการณ์การทำงานกับภาคอุตสาหกรรม | |
| เม.ย.-มิ.ย. 2554 | การฝึกงานภาคฤดูร้อน ฝ่ายผลิตคาโปรแลคตัม บริษัท อุเบะ เคมีคอลส์ (เอเชีย) จำกัด (มหาชน) |
| ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในงานประชุมวิชาการ | |
| 1. | ภาณุวัฒน์ จำปาศรี นพพล มั่นคง ภาณุพันธ์ พรหมบุตร ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และอัญชลีพร วาริตสวัสต์ หล่อทองคำ. “การแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21 วันที่ 10-11 พฤศจิกายน 2554 ณ ศูนย์ประชุมนานาชาติฉลองสิริราชสมบัติครบ 60 ปี อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา. Tcr009 หน้า 1-5. |
| 2. | ภาณุพันธ์ พรหมบุตร ภาณุวัฒน์ จำปาศรี ยุทธวัตร รุจิขจร ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และ อัญชลีพร วาริตสวัสต์ หล่อทองคำ “การแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ MgO ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ” การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22 ระหว่างวันที่ 25 – 26 ตุลาคม 2555 |
| 3. | ภาณุวัฒน์ จำปาศรี ปิยะนาถ สมมณี อัญชลีพร วาริตสวัสต์ หล่อทองคำ และธราพงษ์ วิทิตสานต์. “การแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับคาร์บอนกัมมันต์และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ” วิศวกรรมสาร มก. (In press) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้