

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันคอกทานตะวัน  
โดยใช้ตัวทำละลาย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันดอกทานตะวัน  
โดยใช้ตัวทำละลาย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Production of biodiesel from transesterification  
of sunflower oil using solvents



THIS SENIOR PROJECT IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมัน  
ดอกทานตะวันโดยใช้ตัวทำละลาย

โดย นายชินทร ตริ่มังมิตร  
นายธาดา ททรัพย์พัฒนา

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์

ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์

(ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์)

ผศ.รินฤดี เบญจางคประเสริฐ

(ผศ.รินฤดี เบญจางคประเสริฐ)

ดร.ธีรพร สุธีวงศ์

สุธีวงศ์

(ดร.ธีรพร สุธีวงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                    |  |
|--------------------|--|
| ปริญญานิพนธ์เรื่อง | การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันดอกทานตะวันโดยใช้ตัวทำละลาย |
| โดย                | นายชินนทร ตริ่มังมิตร<br>นายธาดา ทรัพย์พิพัฒนา   |
| ปริญญา             | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  |
| ภาควิชา            | วิศวกรรมเคมี   |
| ปีการศึกษา         | 2557   |
| อาจารย์ที่ปรึกษา   | ดร.ธนาวรรณ พิณรัตน์  |

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันดอกทานตะวันเพื่อผลิตไบโอดีเซลโดยใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้ตัวทำละลายเพื่อช่วยให้ระบบเข้าใกล้เอค-พันซ์และลดอิทธิพลของความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของสารตั้งต้นทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น และพบว่าผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 56.33 เมื่อไม่ใส่ตัวทำละลาย เป็น 69.07-81.58 เมื่อมีการเติมตัวทำละลายร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน ที่สภาวะ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 กรดซัลฟิวริกร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน การปั่น-กวน 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที เมื่อศึกษาเปรียบเทียบตัวทำละลาย 3 ชนิดได้แก่ อะซิโตน เฮกเซน และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ โดยใช้กรดซัลฟิวริกในช่วงร้อยละ 0.5-3 และปริมาณเตตระ-เมทิลบิวทิลอีเทอร์ ในช่วงร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนักน้ำมัน ปริมาณอัตราส่วนร้อยละเมทานอลต่อ-น้ำมัน 10:1-30:1 รวมทั้งความเร็วรอบของการปั่นกวนในช่วง 200-600 รอบต่อนาที โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะทอนอุณหภูมิและความดันสูงในการทำปฏิกิริยา ผลผลิตไบโอดีเซลโดยการเปรียบเทียบค่าความหนืดของสารตัวอย่างหลังทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถคำนวณเป็นปริมาณไบโอดีเซล โดยสามารถหาที่เพิ่มขึ้นได้จากการวิเคราะห์ พบว่าตัวทำละลายเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์และเฮกเซนให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากกว่าอะซิโตน ตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกมีอิทธิพลมากที่สุดในการเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซล และการปั่นกวน 200 รอบต่อนาทีเพียงพอในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวทำ-ละลายเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ที่เหมาะสมคือร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมัน และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันดอกทานตะวันผลผลิตไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                     |  |
|---------------------|--|
| <b>Report title</b> | Biodiesel from Transesterification of Sunflower Oil using Solvents |
| <b>By</b>           | Chanintorn Treemingmitra<br>Tada Sappipattana                      |
| <b>Degree</b>       | Bachelor of Engineering  |
| <b>Program</b>      | Chemical Engineering   |
| <b>Year</b>         | 2014   |
| <b>Advisor</b>      | Dr.Tanawan Pinnarat  |

### Abstract

This project studied the transesterification of sunflower oil to produce biodiesel using sulfuric acid as a catalyst and using solvents, which assist the homogeneous of the mixture leading to reduction of diffusion limit. The study showed that biodiesel yield was increased from 56.33 % to 69.07-81.58 % upon addition of a solvent at 20 %wt oil at temperature of 120°C, molar ratio of methanol to sunflower oil 30:1, sulfuric acid content of 0.5 %wt oil, stirring rate rate 200 rpm for 20 minutes. In addition, the effect of various parameters were studied, that are: types of solvent (acetone, hexane, methyl tert-butyl ether), amount of sulfuric acid 0.5-3 %wt oil, amount of solvent methyl tert-butyl ether 10-30 %wt oil, molar ratio of methanol to oil 10:1-30:1 and the speed of stirring 200-600 rpm. The reactions were performed in a batch reactor, which can withstand high temperature and pressure. Biodiesel yields were obtained by using correlation, which relate the viscosity of the sample to biodiesel yield. From the analyses found that hexane and methyl tert-butyl ether gave higher biodiesel yield than acetone. The amount of sulfuric acid has strong on effect biodiesel yield. The stirring rate rate of 200 rpm is enough for this reaction. Amount of solvent methyl tert-butyl ether in the range of study has insignificant influence on biodiesel yield. Therefore, 10 %wt oil of methyl tert-butyl ether is appropriate. When molar ratio of methanol to oil increases, the reaction will shift forward to produce more biodiesel.

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำปริญญาบัตรขอขอบคุณ ดร.ธนวรรณ พิณรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่มอบความรู้ ให้ คำแนะนำ คำปรึกษา และชี้แนะข้อบกพร่อง พร้อมทั้งช่วยแก้ปัญหาในด้านต่างๆ จนสามารถ ดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ประกอบ กิจไชยา อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ- วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ และให้ยืม อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

กราบขอบพระคุณ ผศ.รื่นฤดี เบญจางคประเสริฐ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ- วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ

กราบขอบพระคุณ ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวะ- วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษาใน เรื่องการใช้เครื่องมือการทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดี และให้ยืมอุปกรณ์การทดลอง

กราบขอบพระคุณ ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ- วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ

ขอขอบคุณนางสาวปัทม์ ศรีเบญจลักษณ์ นายพนารท ก้องไพรินทร์ นายเปรม เตชะวุฒิธร ที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจ

ขอขอบคุณการให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือ และการสนับสนุนทางการเงินจากภาควิชา วิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ทุนวิจัยจากกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในการทำปริญญาบัตรครั้งนี้ และขอขอบคุณ คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ ที่คอยดูแลเรื่องอุปกรณ์และเครื่องมือการทดลอง ช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นให้ คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือตลอดจนวิธีการเก็บรักษาเครื่องมือ และขอขอบคุณ คุณพิมพ์ใจ ภู- ชนะกิจ และคุณดารุณี ผลโพธิ์ ขอขอบคุณเรื่องการดูแลใบอนุญาตการใช้เครื่องมือจาก ทางภาควิชาวิศวกรรมเคมี

ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ผู้ซึ่งให้การสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจ ตลอดการดำเนินงานจนสำเร็จการศึกษา

นายชินนทร ตรีมิ่งมิตร

นายธาดา ทรัพย์พิพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา !!! และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

|   |      |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | III  |
| สารบัญ.....   | IV   |
| สารบัญตาราง.....  | VI   |
| สารบัญรูป.....  | VII  |
| รายการสัญลักษณ์.....  | VIII |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์.....                                       | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....  | 2    |
| 1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....  | 2    |
| 1.3.1 อิทธิพลของตัวทำละลาย.....   | 2    |
| 1.3.2 ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา.....  | 2    |
| 1.3.3 อิทธิพลของการปั่นกวน.....   | 2    |
| 1.3.4 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลาย.....   | 2    |
| 1.3.5 อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน.....                                   | 2    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                             | 3    |
| 2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดัน.....   | 5    |
| 2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน.....                         | 6    |
| 2.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....                                | 7    |
| 2.4 อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา.....                                     | 8    |
| 2.5 อิทธิพลของการใช้ตัวทำละลาย.....   | 9    |
| 2.6 ทฤษฎีจลนพลศาสตร์.....   | 10   |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....   | 13   |
| 3.1 การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....                      | 13   |
| 3.1.1 อุปกรณ์.....  | 13   |
| 3.1.2 สารเคมี.....  | 13   |
| 3.1.3 วิธีการทดลอง.....   | 14   |
| 3.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์.....  | 14   |
| บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ข้อมูล.....                                   | 16   |
| 4.1 อิทธิพลของชนิดตัวทำละลาย.....   | 16   |
| 4.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยา.....   | 17   |
| 4.3 อิทธิพลของอัตราเร็วในการปั่นกวน.....  | 18   |
| 4.4 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลาย.....   | 20   |
| 4.5 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน.....                           | 21   |
| 4.6 ระยะเวลาการเพิ่มและลดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง..... | 21   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 5 สรุปผลและปัญหาที่พบในการดำเนินงานและการแก้ไข.....  | 23   |
| เอกสารอ้างอิง.....   | 24   |
| ภาคผนวก.....   | 27   |
| ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณ.....  | 28   |
| ภาคผนวก ข วิธีการดำเนินงาน.....  | 30   |
| ภาคผนวก ค ทฤษฎี JOBACK.....  | 40   |
| ภาคผนวก ง ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของ<br>กรดไขมันในประเทศไทย..... | 44   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

|  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน.....      | 4    |
| ตารางที่ 2.2 วิธีหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา.....   | 11   |
| ตารางที่ 4.1 ค่าความมีขั้ว (Dielectric constant) ของตัวทำละลายอะซีโตน เฮกเซน และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์..... | 17   |
| ตารางที่ ข.1 สภาวะ และปริมาณสารตั้งต้นที่ศึกษา.....  | 30   |
| ตารางที่ ค.1 ค่าคงที่พันธะของเมทานอลจากตาราง JOBACK.....   | 42   |
| ตารางที่ ค.2 ค่าคงที่พันธะของกรดโอเลอิกจากตาราง JOBACK.....  | 42   |
| ตารางที่ ค.3 ค่าคงที่พันธะของเมทิลโอเลอิตจากตาราง JOBACK.....  | 42   |
| ตารางที่ ค.4 ค่าคงที่พันธะของกลีเซอรอลจากตาราง JOBACK.....   | 43   |
| ตารางที่ ค.5 สรุปค่าพลังงานของแต่ละสารจากการใช้ตาราง JOBACK.....   | 43   |
| ตารางที่ ง.1 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล.....  | 44   |
| ตารางที่ ง.2 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน.....                                  | 45   |



## สารบัญรูป

|   | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยา ก) แบบเบส ข) แบบกรด.....  | 8    |
| รูปที่ 2.2 วิธีการหาค่า $\ln k_0$ และ $E_a/R$ จากกราฟที่ได้จากสมการอาร์เรเนียส.....                                 | 12   |
| รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมี ที่ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง (Autoclave).....   | 13   |
| รูปที่ 4.1 อิทธิพลของชนิดตัวทำละลาย.....  | 16   |
| รูปที่ 4.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลผลิตไบโอดีเซล.....  | 18   |
| รูปที่ 4.3 อิทธิพลของอัตราเร็วของการปั่นกวนต่อผลผลิตไบโอดีเซล.....  | 19   |
| รูปที่ 4.4 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายต่อผลผลิตไบโอดีเซล.....  | 20   |
| รูปที่ 4.5 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายต่อผลผลิตไบโอดีเซล.....  | 21   |
| รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก่อนทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิ<br>และทนความดันสูง..... | 22   |
| รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ลดลงหลังทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิ<br>และทนความดันสูง.....      | 22   |
| รูปที่ ข.1 ตำแหน่งการฉีดน้ำเข้าทางแก๊สขาเข้า.....   | 31   |
| รูปที่ ข.2 สารตัวอย่าง และตัวเครื่องปฏิกรณ์.....  | 31   |
| รูปที่ ข.3 ตำแหน่งสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและความดันสูง.....  | 32   |
| รูปที่ ข.4 ทิศทางการขึ้นนืดให้แน่นเป็นเส้นทแยงมุมของฉนวนกันความร้อน.....  | 32   |
| รูปที่ ข.5 แผงควบคุมเครื่อง.....  | 33   |
| รูปที่ ข.6 ตำแหน่งการวางส่วนหัวของเครื่องปฏิกรณ์.....   | 34   |
| รูปที่ ข.7 เครื่องวัดความหนืดแบบคว่ำ (Cannon-Fenske Routine Viscometers).....                                       | 36   |
| รูปที่ ข.8 เครื่องวัดความหนืดในขวดเก็บอุณหภูมิ.....   | 36   |
| รูปที่ ข.9 เครื่องวัดความหนืดแบบหงาย (Cannon-Fenske Routine Viscometers).....                                       | 37   |

# รายการสัญลักษณ์

|  | หน่วย                             |
|--|-----------------------------------|
| $k_e$ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่สมดุล.....  | ขึ้นกับอันดับของปฏิกิริยา         |
| $k_1$ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาไปข้างหน้า.....  | ขึ้นกับอันดับของปฏิกิริยา         |
| $k_0$ ค่าความถี่ในการชนของโมเลกุลในปฏิกิริยา.....  | ขึ้นกับอันดับของปฏิกิริยา         |
| $k_{-1}$ ค่าคงที่ของปฏิกิริยาย้อนกลับ.....   | ขึ้นกับอันดับของปฏิกิริยา         |
| $\alpha$ อันดับของปฏิกิริยา.....   | ไม่มี                             |
| $\beta$ อันดับของปฏิกิริยา.....  | ไม่มี                             |
| $\kappa$ อันดับของปฏิกิริยา.....   | ไม่มี                             |
| $\gamma$ อันดับของปฏิกิริยา.....   | ไม่มี                             |
| $x_{cal}$ ค่าแปรผันทางเคมีที่ได้จากการคำนวณ.....   | ไม่มี                             |
| $x_{exp}$ ค่าแปรผันทางเคมีที่ได้จากการทดลอง.....   | ไม่มี                             |
| $E_a$ ค่าพลังงานกระตุ้น.....   | $\text{kJ mol}^{-1}$              |
| $R$ ค่าคงที่ของแก๊ส.....   | $\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$ |
| $T$ อุณหภูมิสัมบูรณ์.....  | $\text{K}$                        |
| $\varepsilon$ ค่าความถี่.....  | ไม่มี                             |
| $\Theta_i$ สัดส่วนจำนวนโมลของสาร $i$ ต่อสารตั้งต้นบรรทัดฐาน ณ เวลาเริ่มต้นของการทำปฏิกิริยา..... | ไม่มี                             |
| $C_p$ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่.....  | $\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$ |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

พลังงานหลักที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพลังงานจากปิโตรเลียมซึ่งการใช้พลังงานชนิดนี้ก่อให้เกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม เช่น การปล่อยแก๊สเรือนกระจกซึ่งโดยส่วนใหญ่คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) รวมทั้งแก๊สที่เป็นอันตราย เช่น  $\text{SO}_x$   $\text{NO}_x$  และฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลนำไปสู่ผลกระทบร้ายแรง ได้แก่ สภาวะแก๊สเรือนกระจก ฝนกรด และการเสื่อมของสุขภาพมนุษย์และมลภาวะของสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังมีปัญหาด้านราคาเชื้อเพลิงที่สูงขึ้น เนื่องจากแต่เดิมมีเชื้อเพลิงที่อยู่ตามผิวโลกตื้นๆ แต่ต่อมาต้องใช้ต้นทุนที่สูงขึ้นในการขุดเจาะ เพราะเชื้อเพลิงอยู่ลึกขึ้นและต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการขุดเจาะ [1] ปัญหาเหล่านี้จึงเป็นที่มาของการศึกษาเพื่อหาพลังงานที่สะอาดขึ้น และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมคือ พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้จากแหล่งที่สามารถผลิตหรือก่อกำเนิดพลังงานนั้นอย่างต่อเนื่องไม่หมดไป และยังสามารถนำมาใช้ได้ซ้ำ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานคลื่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานเคมีจากไฮโดรเจน พลังงานชีวมวล เป็นต้น พลังงานหมุนเวียนกลายเป็นหัวข้อที่น่าสนใจไปสู่การวิจัยสำหรับนักวิจัยในระดับชาติและระดับนานาชาติ แต่การใช้พลังงานหมุนเวียนยังไม่เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพราะมีราคาแพงกว่าพลังงานจากปิโตรเลียม จึงมีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเพื่อลดต้นทุนของพลังงานหมุนเวียนที่คำนึงถึงวัตถุดิบ กระบวนการผลิตรวมทั้งการทำให้ผลิตภัณฑ์มีความบริสุทธิ์ โดยพลังงานหมุนเวียนจากพลังงานชีวมวลอย่างหนึ่งที่น่าสนใจคือ ไบโอดีเซล [2-3]

การผลิตพลังงานไบโอดีเซลในประเทศไทยเป็นหัวข้อที่น่าสนใจเพราะประเทศไทยเป็นประเทศที่อุดมสมบูรณ์ทางด้านเกษตรกรรม มีวัตถุดิบที่สามารถนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงไบโอดีเซล เช่น น้ำมันจากต้นสบู่ดำ น้ำมันจากต้นปาล์ม เป็นต้น น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์นั้นมีความหนืดสูงจึงยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับเครื่องยนต์โดยตรงเพราะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ต้องผ่านกระบวนการลดความหนืดจึงสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้ ซึ่งวิธีการลดความหนืดมีหลายวิธีแต่นิยมใช้คือ การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันคือ การนำไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่อยู่ในน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์สายโซ่สั้นเกิดผลผลิตไบโอดีเซล นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าช่วยซึ่งที่นิยมใช้มีอยู่ 2 แบบ คือ การใช้เบสหรือใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การใช้เบสจะช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วที่อุณหภูมิต่ำ แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้สารตั้งต้น (ไตรกลีเซอไรด์) ที่มีความบริสุทธิ์สูงซึ่งมีราคาแพง ถ้าสารตั้งต้นไม่เป็นไตรกลีเซอไรด์บริสุทธิ์ มีสิ่งเจือปนเป็นกรดไขมันอิสระ และ/หรือน้ำจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยา เมื่อกรดไขมันอิสระรวมกับเอกซอร์เป็นเอกซอร์ที่สว่นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบสจะเกิดเป็นสบู่ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงทำให้ไบโอดีเซลที่ต้องการลดลง และการแยกผลิตภัณฑ์ระหว่างไบโอดีเซลกับสบู่ทำได้ยาก และถ้าสารตั้งต้นมีน้ำจะส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระกับกลีเซอรอล ส่งผลให้กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับเบสเกิดเป็นสบู่อีก [4] แต่สารตั้งต้นที่มีราคาถูกส่วนใหญ่จะมีสารปนเปื้อนอยู่มากเช่น น้ำมันที่ใช้หลังปรุงอาหารแล้ว หรือสารตั้งต้นที่มีศักยภาพสูงเช่น น้ำมันจากต้นสบู่ดำ น้ำมันจากต้นปาล์ม หรือน้ำมันที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทำน้ำมันให้บริสุทธิ์หรือสาหร่าย จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส ถ้าสารตั้งต้นมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงเหมาะกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดมากกว่า เพราะการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (กรดไขมันอิสระรวมกับแอลกอฮอล์และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล) ไปพร้อมกันทั้งสองปฏิกิริยา แต่ถ้าในปฏิกิริยาแบบกรดมีน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องจะทำให้กรดทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้กรดประสิทธิภาพลดลง ส่งผลให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้นได้ไม่ดีเท่าที่ควร [5]

การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแม้จะแก้ปัญหาสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระสูงได้แต่ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าและใช้อุณหภูมิสูง รวมทั้งยังใช้อัตราส่วนแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันในปริมาณมากเนื่องจากกรดทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส รวมทั้งสารตั้งต้นสองชนิดคือ (ไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์) ไม่ผสมกันเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของสารทั้งสองนั้นมีน้อย จึงควรใช้ตัวทำละลาย และ/หรือการปั่นกววนเพื่อลดแรงตึงผิวของสารตั้งต้นทั้งสองชนิดระหว่างไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นและใช้อุณหภูมิที่ต่ำลง เพื่อให้เกิดผลผลิตที่เป็นน้ำมันไบโอดีเซลมากขึ้น ดังนั้นปริญาณีพนธ์ครั้งนี้จึงศึกษาการใช้ตัวทำละลายในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญาณีพนธ์

เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันดอกทานตะวัน โดยใช้กรดซัลฟิวริกร่วมกับตัวทำละลาย และหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอดีเซล

## 1.3 ขอบเขตของปริญาณีพนธ์

- 1.3.1 ศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายอะซีโตน เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ (MTBE) และเฮกเซน
- 1.3.2 ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรดซัลฟิวริก) 0.5 1 และ 3 ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมัน
- 1.3.3 ศึกษาอิทธิพลของการปั่นกววนที่ความเร็ว 200 300 400 และ 600 รอบต่อนาที
- 1.3.4 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายร้อยละ 5 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักของน้ำมัน
- 1.3.5 ศึกษาอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันช่วง 10:1 20:1 และ 30:1 โดยใช้เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยทั่วไปนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้สามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็ว โดยที่ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ (ที่ได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์) กับแอลกอฮอล์โดยมีการให้ความร้อน เกิดเป็นอัลคิลเอสเทอร์หรือไบโอดีเซล และมีสารข้างเคียงที่เกิดขึ้นคือ กลีเซอรอล ดังแสดงในสมการที่ (2.1)



วัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอดีเซลมีผลอย่างมากกับการเลือกใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และสภาวะที่เหมาะสม ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยา คือ ปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำที่มีอยู่ในสารตั้งต้น โดยงานวิจัยของ Kusdiana และ Saka [6] แสดงให้เห็นว่าปริมาณกรดไขมันอิสระเพียงร้อยละ 20 จะทำให้ร้อยละผลผลิตของไบโอดีเซลลดลง ถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลลดลงร้อยละ 65 เทียบกับการใช้วัตถุดิบบริสุทธิ์ที่สามารถผลิตไบโอดีเซลได้เกือบร้อยละ 100 นอกจากนี้ น้ำที่ปริมาณเพียงร้อยละ 1 จะส่งผลกระทบต่อร้อยละการผลิตไบโอดีเซลอย่างมาก ซึ่งถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะลดผลผลิตไบโอดีเซลลงประมาณร้อยละ 10 และถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะลดผลผลิตไบโอดีเซลลงประมาณร้อยละ 20 [6] เพราะน้ำและกรดไขมันอิสระทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงขึ้น สำหรับกรณีตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส น้ำสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล ตามสมการที่ (2.2) และกรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับเบสเกิดเป็นสบู่ในปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน ตามสมการที่ (2.3) นอกจากส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลลดลงแล้วจะทำให้การแยกสารผลิตภัณฑ์กับสารที่ไม่ต้องการนั้นยากขึ้นอีกด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสจะใช้ได้ดีกับวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูงเท่านั้น ซึ่งปกติวัตถุดิบมีราคาแพงทำให้ต้นทุนสูง สำหรับสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระอยู่เป็นจำนวนมากเช่น น้ำมันพืชใช้แล้ว พืชน้ำมันที่ไม่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ หรือสาหร่าย สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีถ้าทำการแยกน้ำออก ก่อนเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกรดไขมันอิสระสามารถทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยากรดเกิดเป็นไบโอดีเซลและน้ำได้ในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันแสดงดังในสมการที่ (2.4) และหากไม่ทำการแยกน้ำออกจากสารตั้งต้น กรดจะเกิดการแตกตัวในน้ำทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของกรดลดลง [5]

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด



นอกจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดและเบส ยังมีนักวิจัยบางส่วนได้ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์เข้าช่วยในการทำปฏิกิริยาโดยที่สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระและน้ำปนเปื้อน [7-9] อีกหนึ่งวิธีการที่น่าสนใจคือ การใช้สภาวะเหนือวิกฤตของแอลกอฮอล์ ที่สภาวะนี้คุณสมบัติของน้ำมันและแอลกอฮอล์จะมีการเปลี่ยนแปลง โดยสารตั้งต้นทั้งสองชนิดสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ในสภาวะดังกล่าว ประกอบกับอุณหภูมิและความดันที่สูงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีและรวดเร็ว รวมทั้งการทำปฏิกิริยา ณ สภาวะนี้ไม่มีความจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งสิ่งเจือปน (กรดไขมันอิสระและน้ำ) ไม่มีผลต่อปฏิกิริยา [6], [10-11]

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

| วิธีการ                 | สภาวะ         |                  |                                   | ชนิดของสิ่งเจือปน |      | เวลา (นาที) | ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล | อ้างอิง |
|-------------------------|---------------|------------------|-----------------------------------|-------------------|------|-------------|-----------------------|---------|
|                         | อุณหภูมิ (°C) | ความดัน (bar)    | อัตราส่วนโดยโมล (เมทานอล: น้ำมัน) | กรดไขมันอิสระ     | น้ำ  |             |                       |         |
| ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส | 65            | P <sup>sat</sup> | 12:1                              | มีผล              | มีผล | 180         | 95                    | [12]    |
|                         | 55            | P <sup>sat</sup> | 6:1                               | มีผล              | มีผล | 30          | 100                   | [13]    |
| ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด | 65            | P <sup>sat</sup> | 30:1                              | ไม่มีผล           | มีผล | 4,140       | 99                    | [14]    |
|                         | 200           | P <sup>sat</sup> | 30:1                              | ไม่มีผล           | มีผล | 300         | 85                    | [15]    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) เปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน

| วิธีการ                     | สภาวะ         |               |                                   | ชนิดของสิ่งเจือปน |         | เวลา (นาที) | ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล | อ้างอิง |
|-----------------------------|---------------|---------------|-----------------------------------|-------------------|---------|-------------|-----------------------|---------|
|                             | อุณหภูมิ (°C) | ความดัน (bar) | อัตราส่วนโดยโมล (เมทานอล: น้ำมัน) | กรดไขมันอิสระ     | น้ำ     |             |                       |         |
| ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์ | 50            | $P^{sat}$     | 1:1                               | ไม่มีผล           | ไม่มีผล | 480         | 96                    | [8]     |
|                             | 37            | $P^{sat}$     | 5:1                               | ไม่มีผล           | ไม่มีผล | 3,600       | 94                    | [9]     |
| สภาวะเหนือวิกฤต             | 255           | $P^{sat}$     | 9:1                               | ไม่มีผล           | ไม่มีผล | 25          | 90                    | [10]    |
| วิกฤต                       | 400           | 200           | 40:1                              | ไม่มีผล           | ไม่มีผล | 40          | 96                    | [11]    |

หมายเหตุ  $P^{sat}$  คือ ความดันไอของระบบ

สภาวะที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของแต่ละวิธีมีความแตกต่างกัน ซึ่งเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ ความดัน อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยอิทธิพลของแต่ละตัวแปรจะกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป

## 2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดัน

อุณหภูมิและความดันถือเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยตรงเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ภายในโมเลกุลทำให้สารตั้งต้นนั้นทำปฏิกิริยากัน ผลผลิตไบโอดีเซลจะเกิดได้รวดเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสอุณหภูมิทำปฏิกิริยามักนิยมใช้ใกล้จุดเดือดของแอลกอฮอล์ ที่ความดัน 1 บรรยากาศประมาณ 50 องศาเซลเซียส โดย Rashid และ Anwar ทำการศึกษาอุณหภูมิ 35 50 และ 65 องศาเซลเซียส พบว่าให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลที่ประมาณ 90 ใกล้เคียงกันทั้งสามอุณหภูมิ โดยใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน คือ 6:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 และทำการปั่นกววน 600 รอบต่อนาที [16]

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเมื่อใช้อุณหภูมิที่ต่ำประมาณอุณหภูมิห้อง (25 และ 30 องศาเซลเซียส) อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน (สำหรับคลอเรลลา วากาลิส, *Chlorella vulgaris*) คือ 180:1 กรดซัลฟิวริกความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ปริมาณของไบโอดีเซลจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นคือร้อยละ 5 ถึง 10 หลังทำปฏิกิริยาโดยใช้เวลานานถึง 6 ชั่วโมง แต่เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นที่ 60 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณร้อยละผลผลิตสูงถึง 95 อย่างไรก็ตามเมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 70 องศาเซลเซียส ปริมาณร้อยละผลผลิตเมทิลเอสเทอร์ ลดลงเหลือ 81 ทั้งนี้มาจากเมทานอลเกิดการระเหยทำให้ลดความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา [17]

โดยทั่วไปการทำปฏิกิริยาจะมีการให้ความดันกับระบบเล็กน้อย 2-3 บาร์ (bar) เพื่อให้เมทานอลกลั่นตัวกลับลงมาอยู่ในสภาวะของเหลวให้มากที่สุด

สำหรับการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดวิกฤตของแอลกอฮอล์ (โดยทั่วไปใช้เมทานอล) ประมาณ 240-270 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีในระยะเวลาสั้น 15 นาที โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสารตั้งต้นอยู่ในเฟสเดียวกันที่สภาวะดังกล่าวและประกอบกับสภาวะอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็ว [18-19] แต่อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันไม่ควรมีค่าสูงเกิน 300 องศาเซลเซียส เพราะจะเกิดการแตกตัวของผลิตภัณฑ์ และมีการเปลี่ยนจากไอโซเมอร์แบบ cis เป็น trans ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์น้อยลงถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารตั้งต้นที่มีพันธะคู่มาก ซึ่งมีความไม่อิ่มตัวสูง [18]

## 2.2 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

แอลกอฮอล์เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (ปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.1)) การทำปฏิกิริยาโดยเริ่มต้นน้ำมันปริมาณ 1 โมลจะใช้แอลกอฮอล์ปริมาณ 3 โมล แต่โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้ปริมาณแอลกอฮอล์มากเกินไป เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมัน และเป็นการผลักดันให้ปฏิกิริยาเกิดในทิศทางของผลิตภัณฑ์มากขึ้นสำหรับข้อมูลส่วนนี้ของปริญญาานิพนธ์นี้ กล่าวถึงรายละเอียดเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งเป็นแบบชนิดเบสและชนิดกรด

โดยทั่วไปการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันไม่มากซึ่งการทดลองของ Agarwal และคณะ [20] ศึกษาในช่วง 3:1 ถึง 10:1 ที่สภาวะอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 จะมีค่าผลผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดที่ร้อยละ 98.5 และเมื่อเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ผลิตภัณฑ์จะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 10:1 ซึ่งได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 94.1 เพราะปริมาณของแอลกอฮอล์ส่งผลทำให้ความเข้มข้นรวมของสารตั้งต้นลดลงเกิดการเจือจาง จึงทำให้เกิดผลผลิตไบโอดีเซลน้อยลง นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงว่าเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมากกว่า 9:1 ยังทำให้การแยกกลีเซอรอลยากขึ้นอีกด้วย [20]

อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะใช้มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชนิดเบส จากการทดลองของ Soriano และคณะ [21] ที่สภาวะ 75 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดร้อยละ 5 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง ศึกษาที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 12:1 24:1 42:1 และ 60:1 พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 6:1 ได้ผลผลิตไบโอดีเซลต่ำมากประมาณร้อยละ 20 และที่อัตราส่วนโดย-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 24:1 จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงสุดร้อยละ 86 และถ้าอัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันมากกว่า 42:1 จะทำให้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ลดลงเพราะการเพิ่มปริมาณแอลกอฮอล์ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจางลง [21]

นอกจากนี้การใช้แอลกอฮอล์ที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นจะทำให้การเข้าทำปฏิกิริยายากขึ้น และทำให้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลลดลงจาก 90 เป็น 77 และ 70 เมื่อใช้เมทานอล เอทานอล และโพรพานอล ตามลำดับสำหรับระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เท่ากัน [22] โดยส่วนใหญ่แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ คือ เมทานอล เพราะหาง่ายและราคาถูก ทำให้ต้นทุนต่ำ และสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี

### 2.3 อิทธิพลของชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ดังที่ได้กล่าวข้างต้นการเลือกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบเป็นหลัก และปริมาณของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลอย่างมากต่อร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

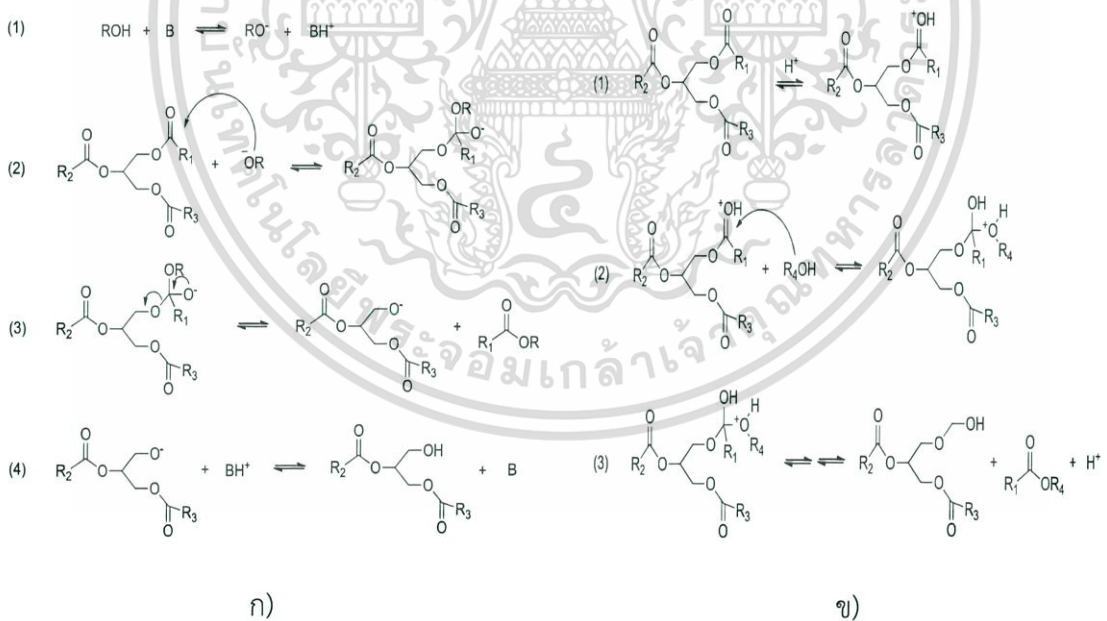
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสนิยมมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเพราะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่า แต่ Ramadhas และคณะ [23] นำสารตั้งต้นที่มีกรดไขมันอิสระเจือปนทดลองศึกษาปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 0.3-1 โดยน้ำหนักน้ำมัน ที่สภาวะอุณหภูมิ  $45 \pm 5$  องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 9:1 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที พบว่าปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 ได้ผลผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดประมาณร้อยละ 98 และลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา เพราะอาจมีสบู่เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจากสมการ (2.3)

ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสแต่เหมาะสำหรับน้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระปนเปื้อน โดยในการทดลองที่ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเมื่อใช้ร้อยละ 1 2 และ 4 โดยน้ำหนักน้ำมัน ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน 10:1 เมทานอลต่อไดเมทิลอีเทอร์ 1.76:1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ได้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดคือ 95 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดร้อยละ 4 แต่การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลายเนื้อเดียวกันจะทำให้ขั้นตอนในการแยกไบโอดีเซลยากขึ้น [24]

สำหรับการใช้งานสามารถเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารตั้งต้น คือของเหลวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) หรือสามารถเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) มักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง สามารถทำการแยกออกได้ง่ายหลังการทำปฏิกิริยา [15]

## 2.4 อิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ ถ้าเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสและกรด ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสจะเกิดปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่าเนื่องจากเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า ดังแสดงในกลไกการเกิดปฏิกิริยา รูปที่ 2.1 [5] โดยรูป ก) ขั้นที่ (1) คือ เบสทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอลคอกไซด์ ( $RO^-$ ) และตัวเร่งปฏิกิริยาโปรตอนเนต ( $BH^+$ ) ขั้นที่ (2) คือ การเข้าทำปฏิกิริยา nucleophilic attack ของแอลคอกไซด์ที่หมู่คาร์บอนิล (carbonyl) ของไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็น tetrahedral intermediate ในขั้นที่ (2) และแตกตัวออกเป็นแอลคิลเอสเทอร์และไตรกลีเซอไรด์ในขั้นที่ (3) และไตรกลีเซอไรด์จะดึงโปรตอนออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา ( $BH^+$ ) ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับไปใช้ได้อีกครั้งในขั้นที่ (4) ส่วนการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้กรดเป็นตัวเร่งแสดงดังรูป ข) ขั้นที่ (1) คือ การได้รับโปรตอนที่หมู่คาร์บอนิลโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด ขั้นที่ (2) คือ เกิด nucleophilic attack ของแอลกอฮอล์จะเกิดเป็น tetrahedral intermediate ขั้นที่ (3) คือ เมื่อเกิดการแตกตัวของโมเลกุลจะได้ เอสเทอร์ ไตรกลีเซอไรด์ และได้ตัวเร่งปฏิกิริยา  $H^+$  กลับมาด้วยและได้ไตรกลีเซอไรด์ทำปฏิกิริยาต่อในลักษณะเดียวกันจะได้เป็นโมโนกลีเซอไรด์ และกลีเซอรอลพร้อมทั้งเกิดแอลคิลเอสเทอร์ 3 โมเลกุลเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยา



B : ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส

$R_1, R_2, R_3$  : สายโซ่คาร์บอนของกรดไขมันอิสระ

$R, R_4$  : หมู่แอลคิลของแอลกอฮอล์

รูปที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยา ก) แบบเบส ข) แบบกรด [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเปรียบเทียบจากตารางที่ 2.1 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรดจะใช้ช่วงระยะเวลา 300-4,140 นาที [14-15] ซึ่งนานกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสที่มีช่วงระยะเวลา 30-180 นาที [12-13] เพื่อให้ได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 95-100 และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์จะใช้ระยะเวลานานถึง 480-3,600 นาที [8-9] ส่วนการทำปฏิกิริยาในสภาวะเหนือวิกฤตจะใช้ช่วงระยะเวลาสั้นที่สุดคือ 25-40 นาที [10-11]

## 2.5 อิทธิพลของการใช้ตัวทำละลาย

การใช้ตัวทำละลายสามารถช่วยลดการใช้อุณหภูมิที่มีค่าสูง และลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาได้

การเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบส (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) สามารถเกิดที่อุณหภูมิต่ำ 25 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ตัวทำละลายเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ (MTBE) หรือไดเอทิลอีเทอร์ (DEE) หรือไดเมทิลอีเทอร์ (DME) หรือเตตระไฮโดรฟูแลน (THF) ที่สภาวะการเขย่าความเร็ว 2.6 เฮิร์ตส์ เวลาการทำปฏิกิริยา 10 นาที อัตราส่วนโดยโมลตัวทำละลายต่อเมทานอลใช้น้อยที่สุดที่ต้องการให้สารละลายกัน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน และเมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลายทั้งหมดพบว่าร้อยละไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นผกผันกับค่าความหนืดของตัวทำละลาย โดยไดเมทิลอีเทอร์มีประสิทธิภาพมากที่สุด ให้ปริมาณไบโอดีเซลถึงร้อยละ 80 แต่ถ้าไม่ใช้ตัวทำละลายจะได้ผลผลิตไบโอดีเซลเพียงเล็กน้อยร้อยละ 60 นอกจากนี้ถ้าอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันดอกทานตะวันเพิ่มขึ้น อิทธิพลของตัวทำละลายจะลดลง ถ้าเพิ่มอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 8:1 ร้อยละไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวทำละลายต่างชนิดกันจะไม่มี ความแตกต่าง และให้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 99 เนื่องจากเมทานอลมีส่วนทำหน้าที่เป็นสารละลายด้วย ทำให้น้ำมันและเมทานอลผสมกันได้ดีขึ้น [25]

Pena และคณะ [26] ได้ศึกษาวิจัยการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันละหุ่ง และใช้ตัวทำละลายคือ เฮกเซน จากผลการทดลองพบว่าถ้าไม่มีการเพิ่มตัวทำละลายจะได้ไบโอดีเซลร้อยละ 86.4 แต่เมื่อเพิ่มตัวทำละลายเพียงร้อยละ 15 โดยปริมาตร ส่งผลให้เกิดไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 93.7 โดยใช้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสคือ โซเดียมเมทอกไซด์ (Sodium Methoxide) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันคือ 6:1 และใช้เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที

Alhassan และคณะ [27] ได้ศึกษาวิจัยการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้น้ำมันฝ้าย และใช้ตัวทำละลายคือ ไดเอทิลอีเทอร์ จากผลการทดลองพบว่าถ้าเพิ่มตัวทำละลายร้อยละ 10 โดยปริมาตร ได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 70 แต่เมื่อเพิ่มตัวทำละลายเป็นร้อยละ 20 โดยปริมาตร ได้ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นร้อยละ 97 โดยใช้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างเมทานอลและน้ำมันคือ 6:1 และใช้เวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที งานวิจัยของ Thanh และคณะ [28] ใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายให้ผลที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คล้ายคลึงกัน คือ ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล 98 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ใช้อะซิโตนร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักน้ำมัน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 4.5:1 และใช้เวลาการทำปฏิกิริยา 30 นาที

การเพิ่มตัวทำละลายในปฏิกิริยามีอิทธิพลอย่างมากต่อการเพิ่มปริมาณไบโอดีเซล แต่จากการค้นคว้าข้อมูลสังเกตได้จากงานวิจัยหลายเรื่องพบว่านิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบสในการศึกษา [26-27] แต่มีงานวิจัยส่วนน้อยเท่านั้นที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดคู่กับตัวทำละลาย ปริมาณนิพนธ์นี้สนใจการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและใช้ตัวทำละลายเพราะ สามารถใช้สารตั้งต้นที่มีราคาถูกได้ และตัวทำละลายจะช่วยให้สภาวะที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลไม่สูงมากอีกด้วย จึงเป็นการลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลลงได้

ส่วนการหาร้อยละผลได้ที่เป็นไปได้มากที่สุดของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันทางทฤษฎีจะกล่าวในหัวข้อที่ 2.6

## 2.6 ทฤษฎีจลนพลศาสตร์

จากที่ได้กล่าวไว้ในเบื้องต้น จะพบว่าร้อยละผลได้ของไบโอดีเซลปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีค่ามากหรือน้อยแตกต่างกันตามสภาวะที่ใช้ ดังนั้นในส่วนนี้กล่าวถึงการหาค่าการแปรผันทางเคมีของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่เป็นไปได้มากที่สุดจากทฤษฎีของ JOBACK ตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เขียนสมการของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน



ขั้นตอนที่ 2 เขียนสมการอัตราของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันตามกฎของ Power Law จะแสดงดังสมการที่ (2.5)

$$Rate = k_1 C_{TG}^{\alpha} C_{MeOH}^{\beta} - k_{-1} C_{FAME}^{\kappa} C_{Glycerol}^{\gamma} \quad (2.5)$$

ขั้นตอนที่ 3 เขียนสมการอัตราของการใช้ไปของน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้นั้นเป็นแบบระบบปิดไม่มีการไหลเข้า-ออกของสารระหว่างทำปฏิกิริยา

$$-\frac{dC_{TG}^{\alpha}}{dt} = Rate \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 นำสมการของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจากสมการที่ (2.5) มาแทนลงในสมการที่ (2.6) แล้วแปลงสมการในรูปของค่าการแปรผันทางเคมีของน้ำมันในตอนเริ่มต้น ( $x$ ) โดยสมมติให้จากสมการที่ (2.5) ไม่เกิดปฏิกิริยาผันกลับได้เนื่องจากที่สมดุลปฏิกิริยามีค่าการแปรผันทางเคมีที่สถานะสมดุลร้อยละ 99.99 ซึ่งหาได้จากจากทฤษฎีของ JOBACK แสดงดัง ภาคผนวก ค ได้เป็นสมการที่ (2.7)

$$-\frac{dC_{TG_0}^\alpha (1-x_{cal})}{dt} = k_1 C_{TG_0}^{\alpha+\beta} (1-x)^\alpha (\Theta_{MeOH} - 3x)^\beta \quad \text{โดยที่} \quad \Theta_{MeOH} = \frac{C_{MeOH}^\beta}{C_{TG_0}^\alpha} \quad (2.7)$$

ขั้นตอนที่ 5 จากขั้นตอนที่ 4 จัดรูปสมการ (2.7) ให้อยู่ในรูปการเปลี่ยนแปลงของค่าแปรผันทางเคมีจากการคำนวณตามสมการที่ (2.8)

$$\frac{dx_{cal}}{dt} = k_1 (C_{TG_0}^\beta) (1-x)^\alpha (\Theta_{MeOH} - 3x)^\beta \quad (2.8)$$

ขั้นตอนที่ 6 แก่สมการ (2.8) จากขั้นตอนที่ 5 จะได้ค่าแปรผันทางเคมีจากการคำนวณที่อยู่ในรูปของฟังก์ชัน ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k_1$ ) เลขจำนวนโมล  $\alpha$  เลขจำนวนโมล  $\beta$  และเวลา ( $t$ )

$$x_{cal} = f(k_1, \alpha, \beta, t) \quad (2.9)$$

ขั้นตอนที่ 7 ทำการทดลองที่เวลาในช่วงที่สนใจ เพื่อหาค่าแปรผันทางเคมีที่ได้จากการทดลอง และแทนค่าแปรผันทางเคมีที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ (2.9) ได้จากขั้นตอนที่ 6 เพื่อนำมาทำการถดถอยโดยหาผลต่างและใช้ผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (sum square error) ให้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เพื่อหาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k_1$ ) ตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 วิธีแก้หาค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $k_1$ )

| t (min) | $x_{cal}$                  | $x_{exp}$ | $(X_{cal}-X_{exp})^2$            |
|---------|----------------------------|-----------|----------------------------------|
| 5       | $f(k_1, \alpha, \beta, t)$ | $C_3$     | $f(k_1, t) - X_{exp}$            |
| 10      | $f(k_1, \alpha, \beta, t)$ | $C_{12}$  | ↓                                |
| 15      | $f(k_1, \alpha, \beta, t)$ | $C_{15}$  |                                  |
| 20      | $f(k_1, \alpha, \beta, t)$ | $C_{20}$  |                                  |
|         |                            |           | $\sum (X_{cal} - X_{exp})^2 = 0$ |

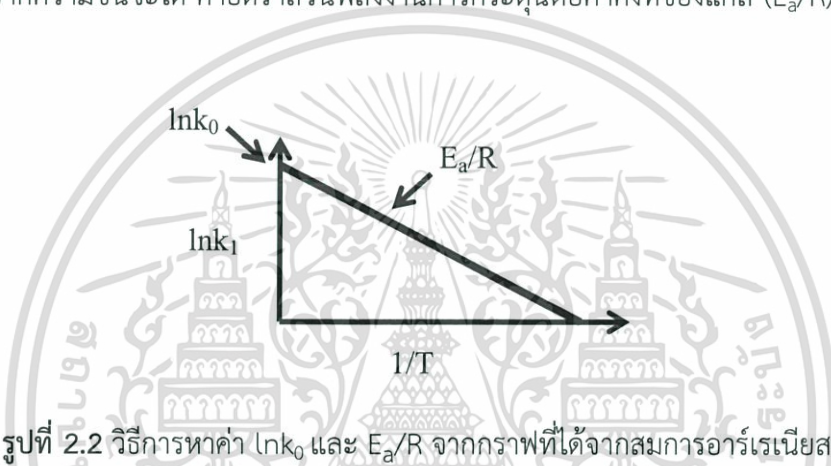
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 8 ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการอาร์เรเนียสดังสมการที่ (2.10) ทำการคูณลอการิทึมธรรมชาติ ( $\ln$ ) ทั้งสองข้างของสมการที่ (2.10) ให้ได้สมการที่ (2.11) เพื่อทำการสร้างกราฟเส้นตรง

$$k_1 = k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (2.10)$$

$$\ln k_1 = \ln k_0 - \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.11)$$

ขั้นตอนที่ 9 พล็อตกราฟเส้นตรงโดยให้แกน  $y$  คือ  $\ln k_1$  และแกน  $x$  คือ ส่วนกลับของอุณหภูมิที่ต้องการ โดยใช้อย่างน้อย 5 อุณหภูมิ ( $1/T$ ) จากกราฟจะได้จุดตัดแกน  $y$  คือ ค่าคงที่ในการชนของโมเลกุล ( $\ln k_0$ ) และจากความชันจะได้ ค่าอัตราส่วนพลังงานการกระตุ้นต่อค่าคงที่ของแก๊ส ( $E_a/R$ ) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 วิธีการหาค่า  $\ln k_0$  และ  $E_a/R$  จากกราฟที่ได้จากสมการอาร์เรเนียส

จากที่กล่าวมา ทำให้ทราบว่าค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิ ค่าพลังงานการกระตุ้นมีผลต่อค่าการแปรผันทางเคมี และสามารถใช้อุณหพลศาสตร์มาเพื่อใช้ทำนายค่าแปรผันทางเคมีในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลองโดยผ่านสมการอาร์เรเนียส

ในการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันต้องคำนึงถึงปัจจัยที่ได้กล่าวมา ร่วมกันเพื่อให้ได้ผลผลิตที่เหมาะสม โดยเริ่มต้นจากการเลือกวัตถุดิบ และวิธีการที่เหมาะสมกับวัตถุดิบดังกล่าวและทำการปรับปรุงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งคือ อุณหภูมิและความดัน อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และการใช้ตัวทำละลาย ปริมาณอินพุตนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของตัวทำละลายต่อตัวเร่งปฏิกิริยาแบบกรด และสภาวะที่สำคัญต่างๆซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในบทต่อไป

## บทที่ 3

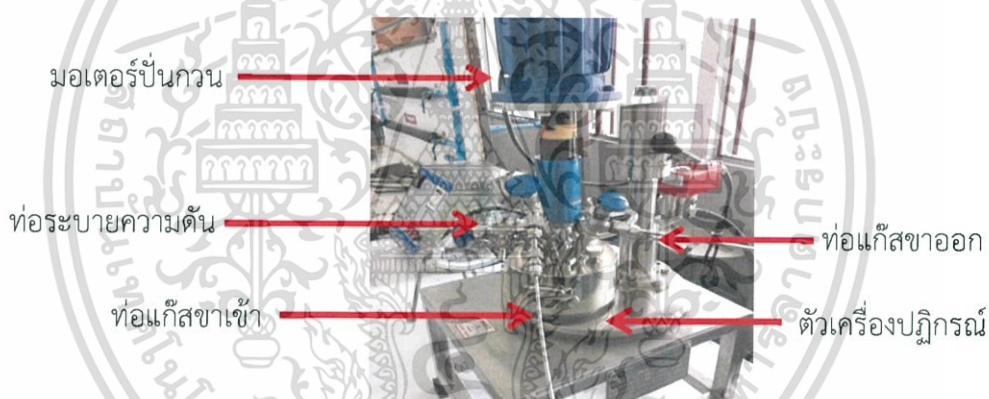
### วิธีการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์นี้ทำการศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันดอกทานตะวัน รายละเอียดวิธีการดำเนินปริญญานิพนธ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ การผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เคมีที่ทนอุณหภูมิและความดันสูง (Autoclave) และส่วนที่สองคือ การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของผลผลิตไบโอดีเซล

#### ตอนที่ 3.1 การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์เคมีที่ทนอุณหภูมิและความดันสูง (Autoclave) ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์เคมี ที่ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง (Autoclave)

2. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. บีกเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร
4. ถังใส่ปั๊มหล่อเย็น 2 ถัง
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก
6. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
7. ประแจปากตายเบอร์ 20 และประแจเลื่อน

##### 3.1.2 สารเคมี

1. น้ำมันดอกทานตะวัน (Sunflower oil, น้ำมันตรามรกต)
2. เมทานอล (Methanol) ความเข้มข้นร้อยละ 99.85 โดยปริมาตร
3. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 95 – 97 โดยปริมาตร (Conc.  $H_2SO_4$  – AR Grade, QREC)
4. อะซิโตนเข้มข้น 99.5 โดยปริมาตร (Acetone - AR Grade, J.T.Baker)
5. เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ (tert-butyl methyl ether – Analytical Reagent Grade,

ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท BST Elastomer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนัก เมทานอล น้ำมันดอกทานตะวัน ตัวทำละลาย และกรดซัลฟิวริกตามปริมาณที่ต้องการศึกษา ผสมสารตั้งต้นในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร  
ตัวแปรที่ศึกษา: ปริมาณอะซิโตน 10 20 และ 30 ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมัน  
ปริมาณเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ 10 20 และ 30 ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมัน  
ปริมาณเฮกเซน 10 20 และ 30 ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมัน  
ปริมาณกรดซัลฟิวริก 0.5 1 และ 3 ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมัน  
ความเร็วรอบการปั่นกวน 200 300 400 และ 600 รอบต่อนาที  
ปริมาณเมทานอล 10 20 และ 30 ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมัน  
หมายเหตุ วิธีการเตรียมสารอย่างละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก)
2. เตรียมความพร้อมเครื่องทอนอุณหภูมิและความดันสูง (Autoclave: Amar equipment PVT LTD) ตามรูปที่ 3.1 และทำการตรวจสอบการรั่วไหล (Check leak)
3. เมื่อเครื่องพร้อมใช้งานตั้งอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา 120 องศาเซลเซียส ทำการหมุนรอบความเร็ว (รอบต่อนาที: rpm) ตามที่ต้องการศึกษา เมื่อระดับอุณหภูมิถึงที่กำหนด จึงเริ่มทำปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 20 นาที
4. หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จทำการปิดสวิตซ์เครื่องปั่นกวน ปิดเครื่องกำเนิดความร้อน และเปิดการหล่อเย็นแบบอัตโนมัติ นำผลิตภัณฑ์ออกและเติมน้ำกลั่นปริมาณ 30 มิลลิลิตรเพื่อหยุดปฏิกิริยาทันที
5. นำผลิตภัณฑ์ตัวอย่างใส่กรวยแยกตั้งทิ้งข้ามคืนเพื่อรอแยกชั้นโดย ชั้นบนคือ ไบโอดีเซล และชั้นล่างคือ กลีเซอรอล น้ำกลั่น กรดซัลฟิวริก และเมทานอล ไซแยกส่วนชั้นกลีเซอรอลทิ้ง
6. หลังจากนั้นจะทำการล้างด้วยน้ำเพื่อล้างเมทานอลและกรดซัลฟิวริกที่คงเหลืออยู่ในชั้นน้ำมัน โดยใช้น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร เป็นจำนวน 3 ครั้ง แยกชั้นน้ำมันออก และเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเพื่อรอการตรวจวิเคราะห์ต่อไป

### ตอนที่ 3.2 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ในปริณญาณิพนธ์นี้ใช้การเทียบจากค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity) จากงานวิจัยของ Borges และคณะได้หาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดพลวัต และผลผลิตของไบโอดีเซลตามสมการที่ (3.1) [29]

$$\%yield = 158.5e^{[(-Kinematic\ viscosity \cdot Density)/6.8]} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืดพลวัตสามารถหาได้จากความหนืดไคเนมาติก (kinematic viscosity) และความหนาแน่น จากสมการที่ (3.2) โดยการตรวจวัดความหนืดไคเนมาติกด้วย Cannon-Fenske Routine Viscometers เบอร์ 150 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D445 และตรวจวัดค่าความหนาแน่นด้วย Pyconometer และนำค่าที่ได้ไปหาค่าผลผลิตไบโอดีเซลตามสมการ (3.1)

$$\text{Dynamic viscosity} = \text{Kinematic viscosity} \cdot \text{Density} \quad (3.2)$$

หมายเหตุ วิธีการทดลองเป็นขั้นตอนอย่างละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

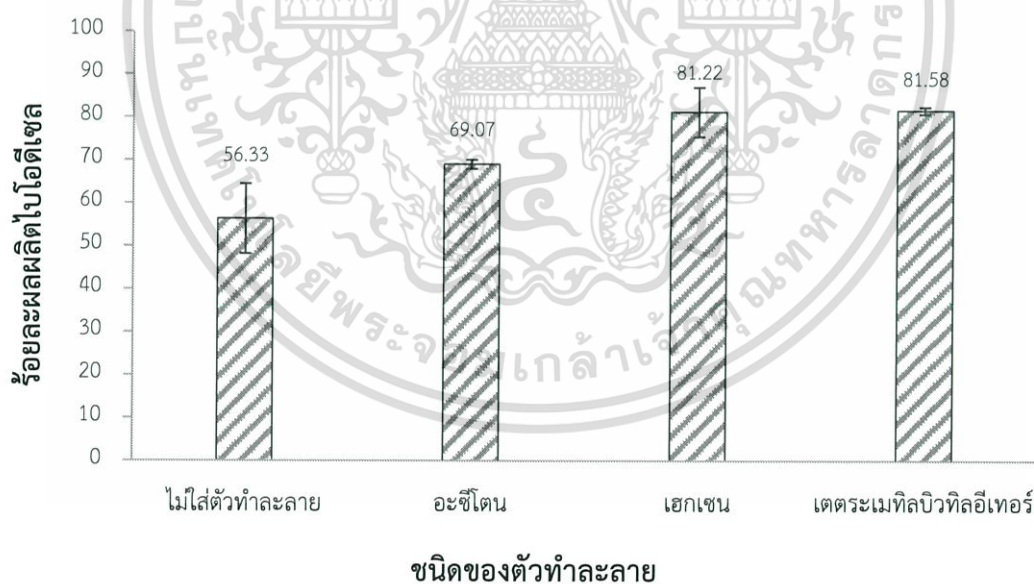
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์ผล

ปฏิญญาพันธนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน 5 ประเภท คือ ชนิดของตัวทำละลาย ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราเร็วในการปั่นกววน ปริมาณของตัวทำละลาย และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน อิทธิพลทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นจะแสดงในหัวข้อต่อไป

#### 4.1 อิทธิพลของชนิดตัวทำละลาย

การใช้ตัวทำละลายในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะช่วยลดความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของสารตั้งต้นระหว่างน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอลและยังส่งผลให้สามารถใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ลดลงอีกด้วย ดังนั้นจึงทำการศึกษาเปรียบเทียบผลระหว่างการทดลองที่ไม่ใส่ตัวทำละลาย และใส่ตัวทำละลายโดยใช้ชนิดของตัวทำละลาย 3 ชนิด คือ อะซีโตน เฮกเซน และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวทำละลายชนิดต่างๆ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 อิทธิพลของชนิดตัวทำละลาย ที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 ตัวทำละลายร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่ใช้ตัวทำละลายได้ร้อยละผลผลิตไบโอดีเซล 56.33 แต่เมื่อมีการเพิ่มตัวทำละลายจะทำให้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 69.07 81.22 และ 81.58 สำหรับกรณีของอะซีโตน เฮกเซน และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ตามลำดับ เนื่องจากตัวทำละลายจะช่วยทำให้สารตั้งต้น คือ น้ำมันดอกทานตะวันและเมทานอลละลายเข้ากันได้ดีขึ้นทำให้เกิดปฏิกริยาได้ดีกว่าปฏิกริยาที่ไม่มีตัวทำละลาย จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าตัวทำละลายเฮกเซนและเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่มากกว่าอะซีโตนและมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณาจากค่าความมีขี้ (Dielectric constant) จากตารางที่ 4.1 ถ้ามีตัวทำละลายค่าความมีขี้้น้อยจะทำให้ละลายในน้ำมันได้ดีกว่าอะซีโตนที่มีค่าความมีขี้้นมาก และเมื่อละลายในน้ำมันจะส่งผลให้ช่วยลดความหนืดของน้ำมันทำให้สามารถเข้าทำปฏิกริยากับเมทานอลได้ง่ายขึ้นและได้ผลผลิตไบโอดีเซลสูงขึ้น แต่ตัวทำละลายเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์สามารถต้านทานการน็อคของเครื่องยนต์อีกทั้งช่วยให้การเผาไหม้ดีขึ้นและสะอาดขึ้น จึงเลือกเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์เป็นตัวทำละลายเพื่อศึกษาอิทธิพลอื่นๆต่อไป

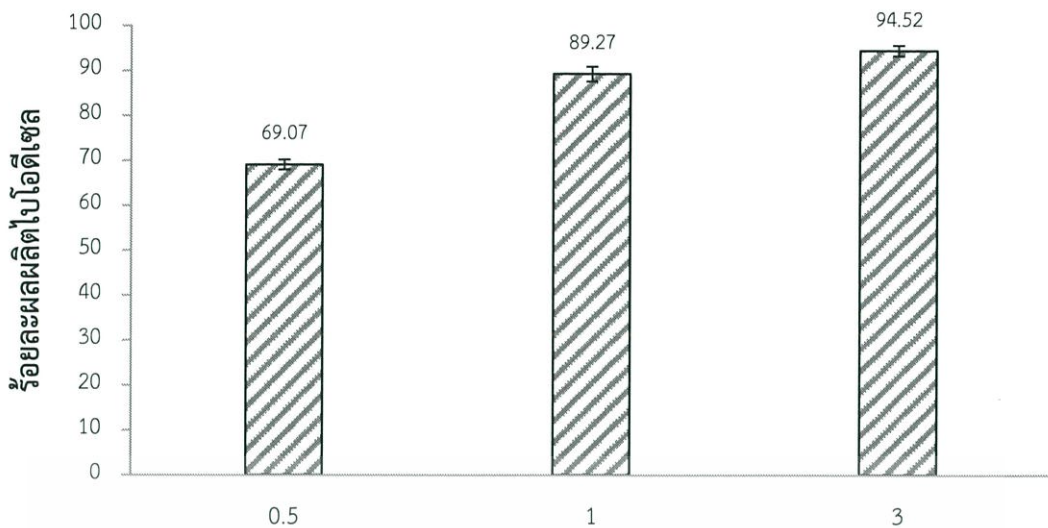
ตารางที่ 4.1 ความมีขี้ (Dielectric constant) ของตัวทำละลายอะซีโตน เฮกเซน และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์

| ตัวทำละลาย       | น้ำมันดอกทานตะวัน | เมทานอล | อะซีโตน | เฮกเซน | เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ |
|------------------|-------------------|---------|---------|--------|-------------------------|
| ค่าความมีขี้ (ε) | 3.109             | 32.6    | 20.7    | 1.89   | 2.6                     |

หมายเหตุ ที่ 20 องศาเซลเซียส อะซีโตน เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ น้ำมันดอกทานตะวัน เมทานอล ที่ 25 องศาเซลเซียส เฮกเซน

#### 4.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกริยา

ตัวเร่งปฏิกริยามีหน้าที่ลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกริยาทำให้ปฏิกริยาเกิดได้เร็วขึ้น และตัวเร่งปฏิกริยาที่ศึกษาในปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสำหรับปริญญานิพนธ์นี้ คือ กรดซัลฟิวริก และศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกริยาที่ร้อยละ 0.5 1 และ 3 ดังรูปที่ 4.2



#### ปริมาณกรดซัลฟิวริก (ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมัน)

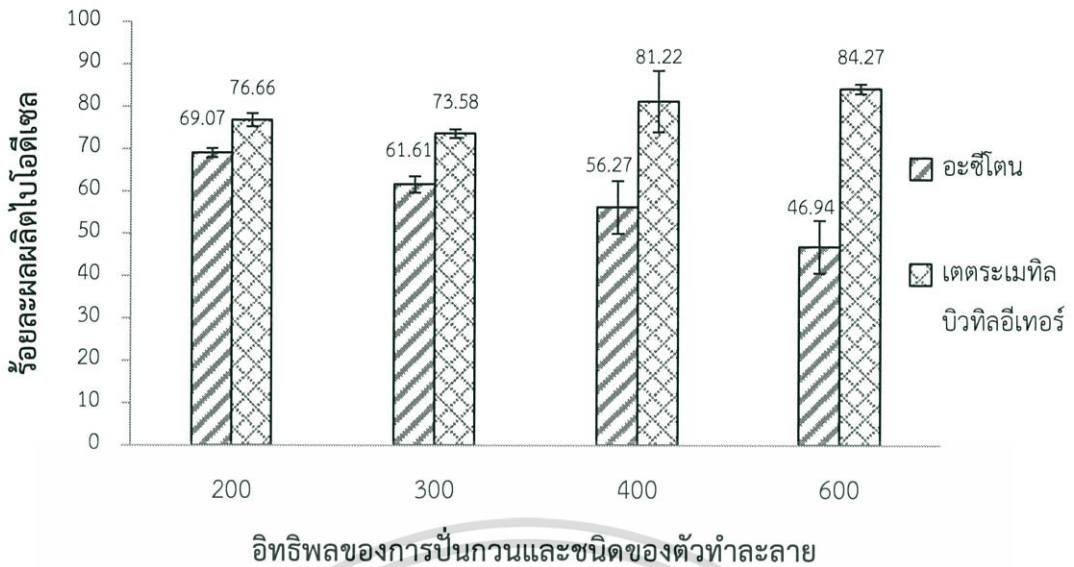
รูปที่ 4.2 อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลผลิตไบโอเอติเชลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 อะซิโตนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันจาก 0.5 ถึง 3 ผลผลิตไบโอเอติเชลจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 69.07 เป็นร้อยละ 94.52 แต่ในปริภูมิตั้งนี้ จะเลือกใช้ ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน เพื่อศึกษาปัจจัยอื่นต่อ เนื่องจากการใช้กรดซัลฟิวริกในปริมาณมาก (ร้อยละ 3) จะทำให้เกิดการกัดกร่อนจึงเลือกใช้กรดซัลฟิวริกในปริมาณร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน และอีกเหตุผลหนึ่งคือ ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมัน 0.5 ยังได้ผลผลิตไบโอเอติเชลที่ไม่สูงมาก (ร้อยละ 69.07) การศึกษาที่สภาวะนี้จึงนำไปสู่การสังเกตอิทธิพลอื่นและเห็นการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตไบโอเอติเชลได้ชัดเจนว่าการใช้กรดในปริมาณมากเพราะถ้ามีผลผลิตไบโอเอติเชลสูงมากแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากอิทธิพลอื่นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

#### 4.3 อิทธิพลของอัตราเร็วในการปั่นกววน

การปั่นกววนเป็นอิทธิพลหนึ่งที่สำคัญสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เพราะน้ำมันดอกทานตะวันและเมทานอลที่เป็นสารตั้งต้นจะไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นจึงต้องมีการปั่นกววนให้สารตั้งต้นทั้งสองมีโอกาสสัมผัสกันได้มากขึ้นโดยใช้ตัวทำละลายเข้าช่วย และทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันมากขึ้น โดยอัตราเร็วในการปั่นกววนที่ศึกษา คือ อัตราเร็วรอบที่ 200 300 400 และ 600 รอบต่อนาทีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

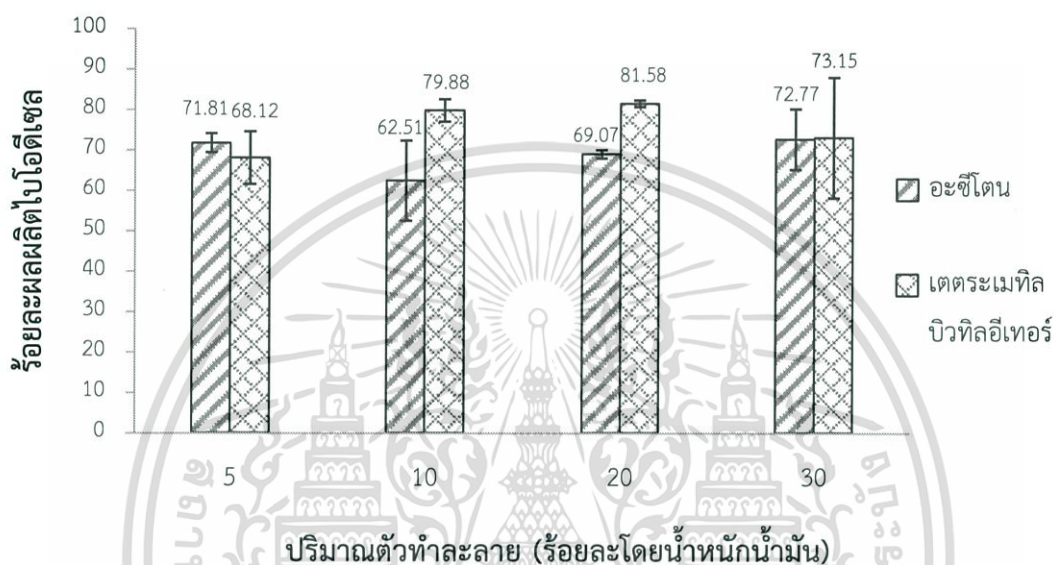


รูปที่ 4.3 อิทธิพลของอัตราเร็วของการปั่นกวนต่อผลผลิตไปโอตีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน และเวลา 20 นาที โดยกราฟของเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์มีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 20:1 เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมัน (1 โมล) และกราฟของอะซีโตนมีอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1 อะซีโตนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน (3 โมล)

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่ากราฟของเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ เมื่ออัตราเร็วในการปั่นกวนเพิ่มขึ้นผลผลิตไปโอตีเซลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากน้ำมัน เมทานอล และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์สามารถผสมกันได้เป็นอย่างดี เมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการปั่นกวนผลผลิตไปโอตีเซลจึงไม่ส่งผลมากนัก ดังนั้นจึงเลือกอัตราเร็วในการปั่นกวนที่ 200 รอบต่อนาทีที่เป็นอัตราเร็วในการปั่นกวนที่ต่ำที่สุด และในส่วนของกราฟอะซีโตนจะเห็นว่า เมื่ออัตราเร็วในการปั่นกวนเพิ่มขึ้นผลผลิตไปโอตีเซลจะลดลงกรณีเมื่อเติมอะซีโตนลงในสารผสมน้ำมันดอกทานตะวันและเมทานอล สารผสมยังเกิดการแยกตัว และการปั่นกวนที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ช่วยให้ผลผลิตไปโอตีเซลมากขึ้น เนื่องจากตำแหน่งของใบพัดไม่เหมาะสม หรืออาจปั่นกวนอยู่แค่ในเฟสเดียวทำให้สารตั้งต้นไม่เข้ากันตามที่ตั้งสมมติฐานเอาไว้ ดังนั้นอัตราเร็วในการปั่นกวนที่ 200 รอบต่อนาที จึงได้ผลผลิตไปโอตีเซลสูงที่สุดคือร้อยละ 69.07

#### 4.4 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลาย

จากคำอธิบายข้างต้นตัวทำละลายจะช่วยลดความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของสารตั้งต้นและยังส่งผลให้ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาค่ำ แต่การเพิ่มตัวทำละลายทำให้ความเข้มข้นของระบบเจือจางลง ดังนั้นจึงศึกษาปริมาณตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยใช้ปริมาณตัวทำละลายร้อยละ 5 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน

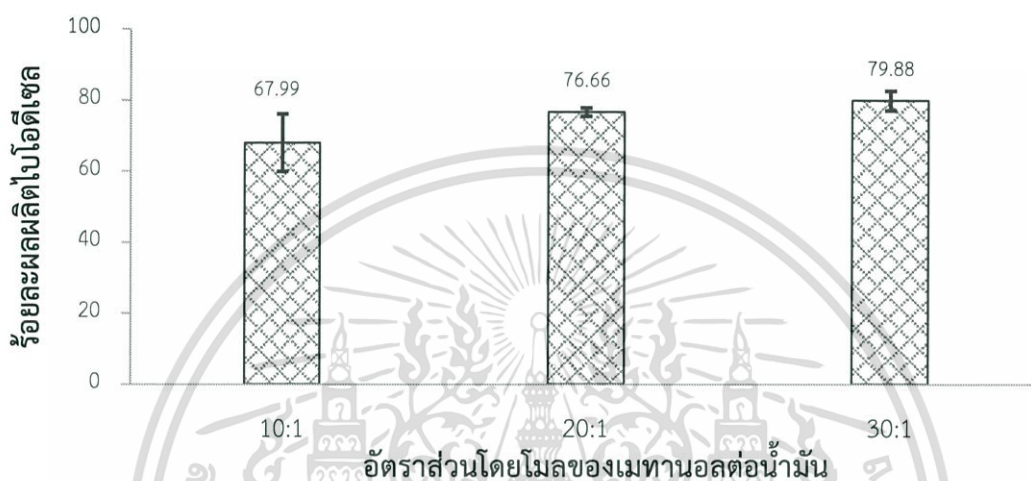


รูปที่ 4.4 อิทธิพลของปริมาณตัวทำละลายต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 30:1 ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที

จากรูปที่ 4.4 พบว่ากราฟของเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ มีผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มตัวทำละลายจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมัน และปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อเพิ่มตัวทำละลายเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน และผลผลิตไบโอดีเซลจะลดลงเมื่อตัวทำละลายเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนักน้ำมัน ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานเบื้องต้น คือ ตัวทำละลายจะช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไปจะไปเจือจางระบบ แต่สำหรับตัวทำละลายอะซีโตน พบว่าการเพิ่มตัวทำละลายไม่ส่งผลต่อระบบมากนัก เนื่องจากอะซีโตนส่งผลต่อระบบน้อย

#### 4.5 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน

การเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันไปข้างหน้ามากขึ้นส่งผลให้ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นแต่ผลเสียของการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันมากเกินไปอาจทำให้ความเข้มข้นของระบบและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจางลง ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 10:1 20:1 และ 30:1 ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันต่อผลผลิตไบโอดีเซลที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมัน ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และเวลา 20 นาที

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าอิทธิพลของสมดุลของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันที่ทำให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าแต่ยังเป็นช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมและไม่ทำให้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเจือจางลง ผลผลิตไบโอดีเซลจึงเพิ่มขึ้นจาก 67.99 จนถึง 79.88 ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 10:1 จนถึง 30:1 แต่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่ 20:1 และ 30:1 มีค่าใกล้เคียงกันดังนั้น อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันที่เหมาะสมที่สุดคือ 20:1 เพราะใช้ปริมาณน้อยกว่า 30:1 แต่ได้ผลผลิตไบโอดีเซลที่ใกล้เคียงกัน

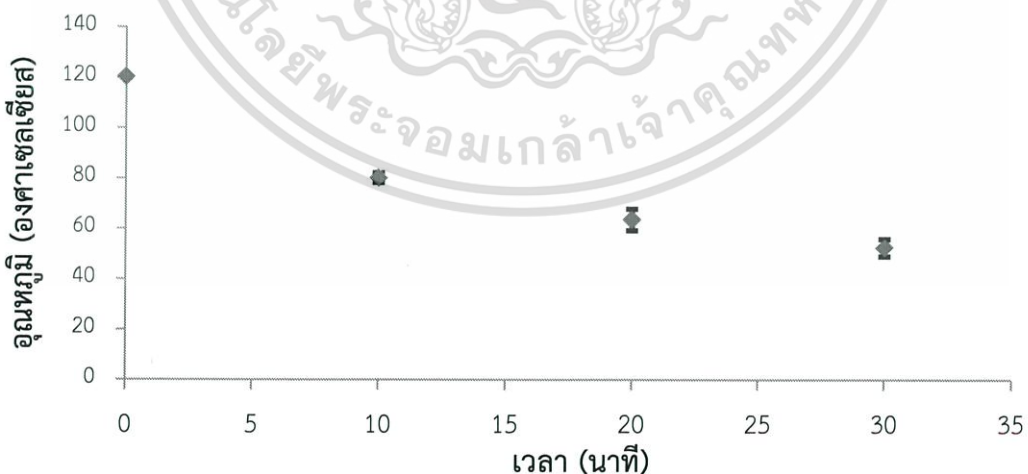
#### 4.6 ระยะเวลาที่ใช้ในการเพิ่มและลดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง

สำหรับการทำปฏิกิริยาในการทดลองครั้งนี้กำหนดให้มีระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 20 นาที แต่การให้ความร้อนแก่สารผ่านเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูงนั้นต้องใช้ระยะเวลาสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิและการลดอุณหภูมิตั้งแต่การทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นต้องใช้ระยะเวลาเพื่อลดอุณหภูมิของสารละลายภายในเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง ซึ่งเมื่อกำหนดอุณหภูมิเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำปฏิกิริยาที่ 120 องศาเซลเซียส จะใช้เวลา 45 นาที ในการเพิ่มอุณหภูมิไปสู่อุณหภูมิที่ต้องการ และใช้เวลาประมาณ 30 นาที ในการลดอุณหภูมิลงถึง 50 องศาเซลเซียสที่สามารถนำสารตัวอย่างออกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้ เวลาในการเพิ่มและลดอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 4.6 และ รูปที่ 4.7 ตามลำดับซึ่งจุดการทดลองที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง 6 ครั้ง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกินร้อยละ 7 ดังนั้นถ้ารวมเวลาดังกล่าว 75 นาทีจะทำให้เวลาที่แท้จริงในการทำปฏิกิริยามากกว่า 20 นาที ข้อมูลในส่วนนี้ทำให้การนำผลจากปริญญานิพนธ์นี้ไปใช้งานจริงต้องคำนึงถึงช่วงเวลาดังกล่าวด้วย



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นก่อนทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่ลดลงหลังทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและทนความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลและปัญหาที่พบในการดำเนินงานและการแก้ไข

ในการศึกษาอิทธิพลที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันดอกทานตะวัน 5 ปัจจัย คือ ชนิดของตัวทำละลาย ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราเร็วในการปั่นกวน ปริมาณของตัวทำละลาย และอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน เพื่อนำไปพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรม

จากการศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวทำละลาย 3 ชนิด คือ อะซีโตน เฮกเซน และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ พบว่าได้ผลผลิตไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นร้อยละ 10 เมื่อใช้ตัวทำละลายอะซีโตน และร้อยละ 20 เมื่อใช้ตัวทำละลายเฮกเซน และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ เพราะการใช้ตัวทำละลายในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะช่วยลดความต้านทานที่เกิดจากการแพร่ของสารตั้งต้นระหว่างน้ำมันดอกทานตะวันกับเมทานอล แต่เนื่องจาก เฮกเซน และเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์ มีความเป็นขั้วใกล้เคียงกับน้ำมันมากกว่าอะซีโตนจึงทำให้ส่งผลในการลดความหนืดสารตั้งต้นได้ดีกว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากรดซัลฟิวริกมีอิทธิพลมากที่สุดในการเพิ่มผลผลิตไบโอดีเซลซึ่งเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 0.5 1 และ 3 โดยน้ำหนักน้ำมัน จะได้ผลผลิตไบโอดีเซลร้อยละ 69.07 89.27 และ 94.52 ตามลำดับ เมื่อใช้ตัวทำละลายอะซีโตน แต่ในปริญญานิพนธ์นี้เลือกใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน เนื่องจากการศึกษา ณ สภาวะนี้จะทำให้สังเกตอิทธิพลอื่นและเห็นการเปลี่ยนแปลงของผลผลิตไบโอดีเซลซึ่งเกิดจากปัจจัยอื่นได้ชัดเจนกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่มาก สำหรับการใช้ตัวทำละลายเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์จะทำให้เมทานอลและน้ำมันละลายเป็นเนื้อเดียวกัน การปั่นกวนจึงช่วยเพียงทำให้สารตั้งต้นละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้รวดเร็วขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราเร็วในการปั่นกวนผลผลิตไบโอดีเซลจึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้น และในส่วนของตัวทำละลายอะซีโตนการเพิ่มอัตราเร็วในการปั่นกวนทำให้ผลผลิตไบโอดีเซลลดลง ดังนั้นอัตราเร็วในการปั่นกวน 200 รอบต่อนาทีเพียงพอ ส่วนการเพิ่มปริมาณตัวทำละลายจะทำให้เพิ่มผลผลิตไบโอดีเซล แต่ถ้าปริมาตรตัวทำละลายมากเกินไปจะเป็นการเจือจางระบบ จะเห็นได้ว่าร้อยละไบโอดีเซลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มตัวทำละลายเตตระเมทิลบิวทิลอีเทอร์จากร้อยละ 5 โดยน้ำหนักน้ำมัน เป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักน้ำมัน และเริ่มลดลงถ้าตัวทำละลายมากกว่าร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน ในส่วนของอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน การเพิ่มเมทานอลจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันไปข้างหน้ามากขึ้นส่งผลให้ผลผลิตไบโอดีเซลมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] J. G. Speight, "Chapter 5 - Drilling technology and well completion," in *subsea and deepwater oil and gas science and technology*, J. G. Speight, Ed. Boston: Gulf Professional Publishing, 2015, pp. 127–148.
- [2] สำนักงานนโยบายปิโตรเลียมและปิโตรเคมี สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, "การคำนวณราคาไบโอดีเซล (B100)," <http://www.eppo.go.th/>. [Online]. Available: <http://www.eppo.go.th/petro/B100/B100.htm>. [Accessed: 22-May-2015].
- [3] บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน), "ราคาน้ำมันบางจาก," . <http://www.bangchak.co.th/>. [Online]. Available: <http://www.bangchak.co.th/th/service stations.aspx>. [Accessed: 22-May-2015].
- [4] F. Ma, L.D. Clements, and M.A. Hanna, "The effects of catalyst, free fatty acids, and water on transesterification of beef tallow," *ASAE*, vol. 1998, no. 41(5), pp. 1261–1264.
- [5] E. Lotero, Y. Liu, D. E. Lopez, K. Suwannakarn, D. A. Bruce, and J. G. Goodwin, "Synthesis of biodiesel via acid catalysis," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 44, no. 14, pp. 5353–5363, Jul. 2005.
- [6] D. Kusdiana and S. Saka, "Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment," *Bioresour. Technol.*, vol. 91, no. 3, pp. 289–295, Feb. 2004.
- [7] C.-H. Liu, C.-C. Huang, Y.-W. Wang, D.-J. Lee, and J.-S. Chang, "Biodiesel production by enzymatic transesterification catalyzed by Burkholderia lipase immobilized on hydrophobic magnetic particles," *Appl. Energy*, vol. 100, pp. 41–46, Dec. 2012.
- [8] M. M. R. Talukder, P. Das, T. S. Fang, and J. C. Wu, "Enhanced enzymatic transesterification of palm oil to biodiesel," *Biochem. Eng. J.*, vol. 55, no. 2, pp. 119–122, Jul. 2011.
- [9] X. Li, X.-Y. He, Z.-L. Li, Y.-D. Wang, C.-Y. Wang, H. Shi, and F. Wang, "Enzymatic production of biodiesel from Pistacia chinensis bge seed oil using immobilized lipase," *Fuel*, vol. 92, no. 1, pp. 89–93, Feb. 2012.

- [10] P. D. Patil, V. G. Gude, A. Mannarswamy, S. Deng, P. Cooke, S. Munson-McGee, I. Rhodes, P. Lammers, and N. Nirmalakhandan, "Optimization of direct conversion of wet algae to biodiesel under supercritical methanol conditions," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 118–122, Jan. 2011.
- [11] G. Madras, C. Kolluru, and R. Kumar, "Synthesis of biodiesel in supercritical fluids," *Fuel*, vol. 83, no. 14–15, pp. 2029–2033, Oct. 2004.
- [12] X. Liu, H. He, Y. Wang, S. Zhu, and X. Piao, "Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst," *Fuel*, vol. 87, no. 2, pp. 216–221, Feb. 2008.
- [13] M. Cetinkaya and F. Karaosmanoglu, "Optimization of base-catalyzed transesterification reaction of used cooking oil," *Energy Fuels*, vol. 18, no. 6, pp. 1888–1895, Nov. 2004.
- [14] B. Freedman, E. H. Pryde, and T. L. Mounts, "Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils," *J. Am. Oil Chem. Soc.*, vol. 61, no. 10, pp. 1638–1643, Oct. 1984.
- [15] H. Sun, Y. Ding, J. Duan, Q. Zhang, Z. Wang, H. Lou, and X. Zheng, "Transesterification of sunflower oil to biodiesel on ZrO<sub>2</sub> supported La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 3, pp. 953–958, Feb. 2010.
- [16] U. Rashid and F. Anwar, "Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil," *Fuel*, vol. 87, no. 3, pp. 265–273, Mar. 2008.
- [17] M. K. Lam and K. T. Lee, "Catalytic transesterification of high viscosity crude microalgae lipid to biodiesel: Effect of co-solvent," *Fuel Process. Technol.*, vol. 110, pp. 242–248, Jun. 2013.
- [18] A. Demirbas, "Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 4, pp. 923–927, Apr. 2009.
- [19] H. Imahara, E. Minami, S. Hari, and S. Saka, "Thermal stability of biodiesel in supercritical methanol," *Fuel*, vol. 87, no. 1, pp. 1–6, Jan. 2008.
- [20] M. Agarwal, G. Chauhan, S. P. Chaurasia, and K. Singh, "Study of catalytic behavior of KOH as homogeneous and heterogeneous catalyst for biodiesel production," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 43, no. 1, pp. 89–94, Jan. 2012.

- [21] N. U. Soriano Jr., R. Venditti, and D. S. Argyropoulos, "Biodiesel synthesis via homogeneous Lewis acid-catalyzed transesterification," *Fuel*, vol. 88, no. 3, pp. 560–565, Mar. 2009.
- [22] R. D. Micic, M. D. Tomic, F. E. Kiss, E. B. Nikolic-Djoric, and M. D. Simikic, "Influence of reaction conditions and type of alcohol on biodiesel yields and process economics of supercritical transesterification," *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 717–726, Oct. 2014.
- [23] A. S. Ramadhas, S. Jayaraj, and C. Muraleedharan, "Biodiesel production from high FFA rubber seed oil," *Fuel*, vol. 84, no. 4, pp. 335–340, Mar. 2005.
- [24] G. Guan, K. Kusakabe, N. Sakurai, and K. Moriyama, "Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using acid catalysts in the presence of dimethyl ether," *Fuel*, vol. 88, no. 1, pp. 81–86, Jan. 2009.
- [25] G. Guan, N. Sakurai, and K. Kusakabe, "Synthesis of biodiesel from sunflower oil at room temperature in the presence of various cosolvents," *Chem. Eng. J.*, vol. 146, no. 2, pp. 302–306, Feb. 2009.
- [26] R. Peña, R. Romero, S. L. Martinez, M. J. Ramos, A. Martinez, and R. Natividad, "Transesterification of castor oil: Effect of catalyst and co-solvent," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 48, no. 3, pp. 1186–1189, Feb. 2009.
- [27] Y. Alhassan, N. Kumar, I. M. Bugaje, H. S. Pali, and P. Kathkar, "Co-solvents transesterification of cotton seed oil into biodiesel: Effects of reaction conditions on quality of fatty acids methyl esters," *Energy Convers. Manag.*, vol. 84, pp. 640–648, Aug. 2014.
- [28] L. T. Thanh, K. Okitsu, Y. Sadanaga, N. Takenaka, Y. Maeda, and H. Bandow, "A new co-solvent method for the green production of biodiesel fuel – Optimization and practical application," *Fuel*, vol. 103, pp. 742–748, Jan. 2013.
- [29] M. E. Borges, L. Díaz, J. Gavín, and A. Brito, "Estimation of the content of fatty acid methyl esters (FAME) in biodiesel samples from dynamic viscosity measurements," *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 3, pp. 597–599, Mar. 2011.

# ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีการคำนวณ

#### ก.1 การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันของตัวเร่งปฏิกิริยา และร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันของตัวทำละลาย

ในการคำนวณหาอัตราส่วนโดยโมลหรือโดยน้ำหนักจะคำนวณโดยอ้างอิงจากปริมาณน้ำมันดอกทานตะวันที่เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน



จาก 
$$\text{จำนวนโมล} = \frac{\text{น้ำหนักน้ำมัน}}{\text{มวลโมเลกุล (mol.wt)}} \quad (\text{ก.1})$$

ข้อมูลเพิ่มเติม

|                                    |                  |
|------------------------------------|------------------|
| มวลโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมัน | = 876 กรัมต่อโมล |
| มวลโมเลกุลของเมทานอล               | = 32 กรัมต่อโมล  |

ตัวอย่างการคำนวณ : น้ำมันดอกทานตะวันเริ่มต้น 45 กรัม ที่สภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 30:1 ปริมาณกรดซัลฟูริกร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน และปริมาณตัวทำละลายร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน

จาก 
$$\text{น้ำหนักของเมทานอล} = \frac{\text{โมลของเมทานอล}}{\text{โมลของน้ำมัน}} \cdot \frac{\text{น้ำหนักน้ำมัน}}{\text{มวลโมเลกุลน้ำมัน}} \cdot \text{มวลโมเลกุลเมทานอล} \quad (\text{ก.2})$$

จากสมการที่ (ก.2) คำนวณเพื่อหาปริมาณน้ำหนักเมทานอล เตรียมสำหรับการทำปฏิกิริยา โดยที่การทดลองนี้ใช้อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมัน คือ 30:1

- อัตราส่วนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 30:1

$$\text{น้ำหนักของเมทานอล} = \frac{30 \text{ โมลของเมทานอล}}{100 \text{ โมลของน้ำมัน}} \cdot \frac{45 \text{ กรัมของน้ำมัน}}{876 \text{ มวลโมเลกุลน้ำมัน}} \cdot 32 \text{ มวลโมเลกุลเมทานอล}$$

$$\text{น้ำหนักของเมทานอล} = 49.32 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันของตัวเร่งปฏิกิริยา

$$\text{จาก น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา} = \text{น้ำหนักน้ำมันเริ่มต้น} \cdot \frac{\text{ร้อยละตัวเร่งปฏิกิริยา}}{100} \quad (\text{ก.3})$$

จากสมการที่ (ก.3) คำนวณเพื่อหาร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันของตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อทำการศึกษาโดยใช้ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมันของตัวเร่งปฏิกิริยา

- ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน

$$\text{น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา} = 45 \text{ กรัม} \cdot \frac{0.5}{100}$$

$$\text{น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา} = 0.22 \text{ กรัม}$$

ร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันของตัวทำละลาย

$$\text{จาก น้ำหนักตัวทำละลาย} = \text{น้ำหนักน้ำมันเริ่มต้น} \cdot \frac{\text{ร้อยละตัวทำละลาย}}{100} \quad (\text{ก.4})$$

จากสมการที่ (ก.4) คำนวณเพื่อหาร้อยละโดยน้ำหนักน้ำมันของตัวทำละลาย เมื่อทำการศึกษาโดยใช้ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมันของตัวทำละลาย (ชนิดของตัวทำละลายที่ต่างกันจะไม่ส่งผลต่อน้ำหนักของตัวทำละลายที่ต้องการทำปฏิกิริยาเพราะว่าคำนวณโดยเทียบกับค่าน้ำหนักของน้ำมัน)

- ตัวทำละลายร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมัน

$$\text{น้ำหนักตัวทำละลาย} = 45 \text{ กรัม} \cdot \frac{20}{100}$$

$$\text{น้ำหนักตัวทำละลาย} = 9.00 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นถ้าน้ำมันดอกทานตะวันเริ่มต้น 45 กรัม ที่สภาวะอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันคือ 30:1 จะใช้เมทานอล 49.32 กรัม ปริมาณกรดซัลฟิวริกร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักน้ำมัน จะใช้กรดซัลฟิวริก 0.22 กรัม และปริมาณตัวทำละลายร้อยละ 20 โดยน้ำหนักน้ำมันจะใช้ตัวทำละลาย 9.00 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีการดำเนินงาน

ข.1 การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การทดลองอย่างละเอียด

1. ชั่งน้ำหนักสารคือ เมทานอล น้ำมันดอกทานตะวัน ตัวทำละลาย และกรดซัลฟิวริก ตามน้ำหนักที่ต้องการ โดยการศึกษาค้างนี้ใช้ปริมาณสารตั้งต้นแสดงดังตารางที่ ข.1

ตารางที่ ข.1 สภาวะ และปริมาณสารตั้งต้นที่ศึกษา

| ตัวแปรที่<br>ต้องการศึกษา       | MeOH:Oil | ชนิดของตัวทำละลาย    |                   |                     | กรด<br>ซัลฟิวริก<br>(%wt oil) | รอบการปั่น<br>กวน<br>(rpm) |
|---------------------------------|----------|----------------------|-------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------|
|                                 |          | อะซีโตน<br>(%wt oil) | MTBE<br>(%wt oil) | เฮกเซน<br>(%wt oil) |                               |                            |
| อิทธิพลของ<br>ตัวทำละลาย        | 30:1     | 0                    | 0                 | 0                   | 0.5                           | 200                        |
|                                 | 30:1     | 20                   | 0                 | 0                   | 0.5                           | 200                        |
|                                 | 30:1     | 0                    | 20                | 0                   | 0.5                           | 200                        |
|                                 | 30:1     | 0                    | 0                 | 20                  | 0.5                           | 200                        |
| ปริมาณ<br>ตัวทำละลาย            | 30:1     | 5, 10,<br>20, 30     | 0                 | 0                   | 0.5                           | 200                        |
|                                 | 30:1     | 0                    | 5, 10,<br>20, 30  | 0                   | 0.5                           | 200                        |
| ปริมาณกรด                       | 30:1     | 20                   | 0                 | 0                   | 0.5                           | 200                        |
|                                 | 30:1     | 20                   | 0                 | 0                   | 1                             | 200                        |
|                                 | 30:1     | 20                   | 0                 | 0                   | 3                             | 200                        |
| รอบการปั่นกวน                   | 30:1     | 20                   | 0                 | 0                   | 0.5                           | 300                        |
|                                 | 30:1     | 20                   | 0                 | 0                   | 0.5                           | 400                        |
|                                 | 30:1     | 20                   | 0                 | 0                   | 0.5                           | 600                        |
|                                 | 30:1     | 0                    | 10                | 0                   | 0.5                           | 300                        |
|                                 | 30:1     | 0                    | 10                | 0                   | 0.5                           | 400                        |
|                                 | 30:1     | 0                    | 10                | 0                   | 0.5                           | 600                        |
| อัตราส่วน<br>โดยโมล<br>MeOH:Oil | 10:1     | 0                    | 10                | 0                   | 0.5                           | 200                        |
|                                 | 20:1     | 0                    | 10                | 0                   | 0.5                           | 200                        |
|                                 | 30:1     | 0                    | 10                | 0                   | 0.5                           | 200                        |

อุณหภูมิ 120°C ความดัน  $P^{sat}$  เวลา 20 นาที (หมายเหตุ  $P^{sat}$  คือ ความดันไอของระบบ)  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักศึกษาเห็นว่าประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผสมสารตั้งต้นจากข้อ 1 ในขวดลูกกลมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร สำหรับแต่ละกรณี แล้วปิดจุกแก้ว
3. เตรียมความพร้อมเครื่อง Autoclave เริ่มจากใส่น้ำในถังใส่ปั๊มหล่อเย็นทั้ง 2 ถัง (หล่อเย็นสารตัวอย่างและหล่อเย็นอุปกรณ์) ใส่น้ำปริมาณครึ่งถัง แล้วค่อยวางปั๊มหล่อเย็น
4. ล้างท่อแก๊สขาเข้าและแก๊สขาออกเพื่อป้องกันสารเจือปนทำโดยฉีดน้ำเข้าทางท่อแก๊สขาเข้า ตามรูปที่ ข.1



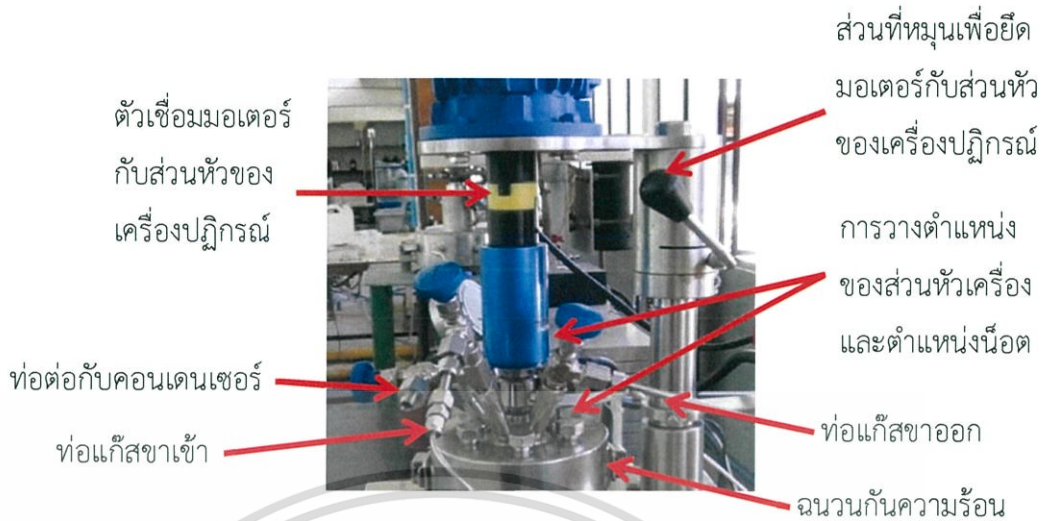
รูปที่ ข.1 ตำแหน่งการฉีดน้ำเข้าทางท่อแก๊สขาเข้า

5. ต่อท่อแก๊สไนโตรเจนขาเข้าและเป่าแก๊สเข้าไปเพื่อให้ตัวท่อของเครื่องปฏิกรณ์แห้งโดยทิศทางไหลของแก๊ส เข้าทางท่อแก๊สขาเข้า และออกทางท่อแก๊สขาออกเป็นไปตามรูปที่ ข.1 เช่นเดียวกับการไหลของน้ำล้าง
6. นำสารตั้งต้นใส่ตัวเครื่องปฏิกรณ์ตามรูปที่ ข.2 และนำไปวางในฐานของเครื่อง หลังจากนั้นนำส่วนหัวของเครื่องปฏิกรณ์ วางบนตัวเครื่องปฏิกรณ์ แล้วหมุนส่วนหัวเครื่องปฏิกรณ์ให้ตำแหน่งของท่อไม่ติดกับอุปกรณ์อื่นเพื่อสามารถติดตั้งท่อแก๊สขาเข้าและแก๊สขาออกได้ตามรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.2 สารตัวอย่าง และตัวเครื่องปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.3 ตำแหน่งสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ทนอุณหภูมิและความดันสูง

7. ใส่ฉนวนกันความร้อนและกดล็อก 2 ข้างพร้อมกันโดยทำการขันน็อตให้ตำแหน่งอยู่ระหว่างกลางของท่อที่ยื่นออกมาเพื่อให้ชั้นน็อตได้ง่ายขึ้นตามรูปที่ ข.3 โดยใช้ประแจปากตายเบอร์ 20 ทำการขันน็อตให้แน่นเป็นแนวเฉียงมุมตามรูปที่ ข.4 โดยเรียงลำดับน็อตตามตัวเลขเพื่อให้แน่นขึ้น และเป็นการคานแรงตามแนวทแยงมุม



ล็อคฉนวน

รูปที่ ข.4 ทิศทางการขันน็อตให้แน่นเป็นเส้นทแยงมุมของฉนวนกันความร้อน

8. เชื่อมต่อมอเตอร์ของเครื่องปั่นกับตัวหัวเครื่องปฏิกรณ์ และหมุนส่วนหัวของเครื่องปฏิกรณ์ให้แน่นตามรูปที่ ข.3
9. ต่อกท่อแก๊สขาเข้า แก๊สขาออก และท่อระบายความดันและใช้ประแจเลื่อนขันให้แน่น หลังจากนั้นทำการตรวจสอบการรั่วไหล (Check leak) โดยการปิดวาล์วแก๊สขาเข้า วาล์วแก๊สขาออก และวาล์วระบายความดันให้แน่นก่อนที่จะเปิดแก๊สจากถังตรวจสอบการรั่วไหล จนเกจความดันของถังความดันขึ้นจากนั้นทำการเปิด วาล์วแก๊สขาเข้าของเครื่อง แล้วสังเกตความดันของถังว่าตกลงหรือไม่ หลังจากเกจความดันฝั่งที่วัดความดันขาออกตกลงเพราะแก๊สได้เข้าไปในระบบเพราะมีการเปลี่ยนแปลงของความดันจึงทำการปิดวาล์ว

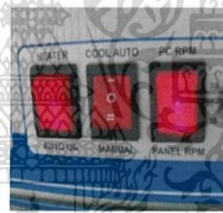
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สขาเข้า และปิดวาล์วของถังแก๊ส และทำการสอบการรั่วไหล ทำโดยใช้น้ำสบู่ฉีดตามข้อต่อ ถ้าเกิดการรั่วไหลของแก๊สจะมีฟองเกิดขึ้นตามข้อต่อของเครื่องถ้าเกิดเหตุการณ์แบบนี้ขึ้นต้องทำการถอดอุปกรณ์ทั้งหมดและติดตั้งใหม่ตั้งแต่เริ่มแรก หลังการตรวจสอบทำการเปิดวาล์วแก๊สขาออกเพื่อระบายแก๊สที่อยู่ในระบบออก และทำการปิดวาล์วแก๊สขาเข้า วาล์วแก๊สขาออก วาล์วต่อกับคอนเดนเซอร์ก่อนเปิดเครื่องเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีสารไหลออกจากท่อของเครื่องปฏิกรณ์

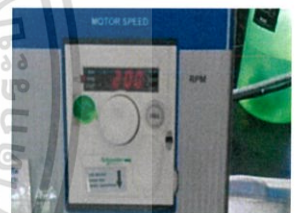
10. ทำการเปิดแผงควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่ทนอุณหภูมิและความดันสูง (Autoclave) ตำแหน่งของไฟครวดิจิตอลอยู่ที่ ALL OK ตามรูปที่ ข.5 ก) และปรับอุณหภูมิขึ้นตามที่กำหนด โดยเพิ่มความร้อนเป็นลำดับขั้น ขั้นละ 50 องศาเซลเซียส (กรณีอุณหภูมิเริ่มต้นคือ 30 องศาเซลเซียส กำหนดให้อุณหภูมิปรับค่าแรกคือ 80 องศาเซลเซียส) เพื่อให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิที่ละน้อย และทำการเปิดสวิตช์เครื่องกำเนิดความร้อน (Heater) และสวิตช์หล่อเย็นไปที่อัตโนมัติ (Cool Auto) หลังจากนั้นเปิดสวิตช์เครื่องปั่นกวน (Panel RPM) ตามรูปที่ ข.5 ข) ทำการหมุนรอบความเร็ว Speed (rpm) ตามที่ต้องการ โดยเลขจำนวนรอบการปั่นกวนจะแสดงที่จอตามรูปที่ ข.5 ค)



ก)



ข)



ค)

รูปที่ ข.5 แผงควบคุมเครื่อง ก) ตำแหน่งของไฟอยู่ที่ตำแหน่ง ALL OK

ข) สวิตช์เครื่องกำเนิดความร้อน (Heater) สวิตช์หล่อเย็น

อัตโนมัติ (Cool Auto) และสวิตช์การปั่นกวน

ค) เลขจำนวนรอบการปั่นกวน (rpm)

11. หลังจากตั้งอุณหภูมิแล้ว เมื่ออุณหภูมิที่ต้องการต่างกับอุณหภูมิที่กำหนดไว้ 20 องศาเซลเซียส นั่นคือ 60 กับ 80 องศาเซลเซียส ต้องปรับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีก 60 องศาเซลเซียส เพื่อให้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการทดลองคือ 120 องศาเซลเซียส
12. เมื่อระดับอุณหภูมิถึงที่กำหนดแล้ว หลังจากนั้นจึงเริ่มนับเวลาทำปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดไว้
13. ระหว่างที่ทำปฏิกิริยาระวังอย่าให้ระดับน้ำหล่อเย็นลดต่ำกว่าปั้มน้ำเพราะจะทำให้อากาศเข้าไปในปั้มน้ำ และทำให้ปั้มน้ำเสียหายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จทำการปิดสวิตช์เครื่องปั่นกวน และหมุนความเร็วการปั่นกวน ไประดับที่ 0 ปิดเครื่องกำเนิดความร้อน และเปิดการหล่อเย็นแบบอัตโนมัติ (Cool Auto) เป็นหล่อเย็นควบคุมแบบปรับเอง (Manual)
15. เมื่ออุณหภูมิลดลงเหลือ 50 องศาเซลเซียส สามารถถอดเครื่องปฏิกรณ์เพื่อนำผลิตภัณฑ์ออกได้
16. ปิดแผงควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ และปิดปั้มน้ำหล่อเย็น
17. ถอดส่วนประกอบของเครื่องโดยการเริ่มจากถอดท่อแก๊สขาเข้า ท่อแก๊สขาออกและท่อระบายความดัน และปลดมอเตอร์ของเครื่องออก
18. ยกส่วนหัวของเครื่องปฏิกรณ์ออกไปวางไว้ที่ตำแหน่งตามรูปที่ ข.6 และเช็ดตัวปั่นกวน และเช็ดให้แห้ง ปลดน็อตทั้ง 6 ตัว ตามแนวทแยงมุม ปลดฉนวนหุ้มความร้อนออก และยกตัวเครื่องปฏิกรณ์ออกเทใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และใส่น้ำกลั่นปริมาตร 30 มิลลิลิตร เพื่อหยุดปฏิกิริยา (ควรใส่ถุงมือกันความร้อนขณะจับเครื่องปฏิกรณ์)
19. นำตัวเครื่องปฏิกรณ์ไปทำความสะอาด และเช็ดให้แห้ง
20. ล้างส่วนท่อแก๊สที่อยู่ในส่วนของส่วนหัวของเครื่องปฏิกรณ์ตามขั้นตอนที่ 4 และ 5
21. ถอดปลั๊กของเครื่องออกให้หมดและตรวจสอบว่าวาล์วทั้งหมดถูกปิดอยู่ดังเดิม  
หมายเหตุ: ระวังอย่าให้น้ำหล่อเย็นลดต่ำลงและอย่าให้สายท่อปล่อยน้ำโดนปลั๊กไฟ



รูปที่ ข.6 ตำแหน่งการวางส่วนหัวของเครื่องปฏิกรณ์หลังทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข.2 การวิเคราะห์ข้อมูลผลผลิตไบโอดีเซลโดยเทียบจากค่าความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity)

### อุปกรณ์

1. เครื่องวัดความหนืด (Cannon-Fenske Routine Viscometers) เบอร์ 150
2. ขวดวัดความหนาแน่น (Pycnometer) ปริมาตร 10.1018 มิลลิลิตร
3. ขวดเก็บอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิคงที่ ความร้อน และฟิวเจอร์บอร์ดเจาะรู สำหรับทำการวัดความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส
4. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น IKA C-MAG HS7
5. กรวยแยก
6. ขวยัดกรวยแยก
7. น้ำกลั่น
8. ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร และ 400 มิลลิลิตร

### สารเคมี

1. อะซีโตน (Acetone - Commercial Grade) ใช้สำหรับล้างเครื่องแก้ว
2. น้ำกลั่น

### การแยกน้ำมันไบโอดีเซล

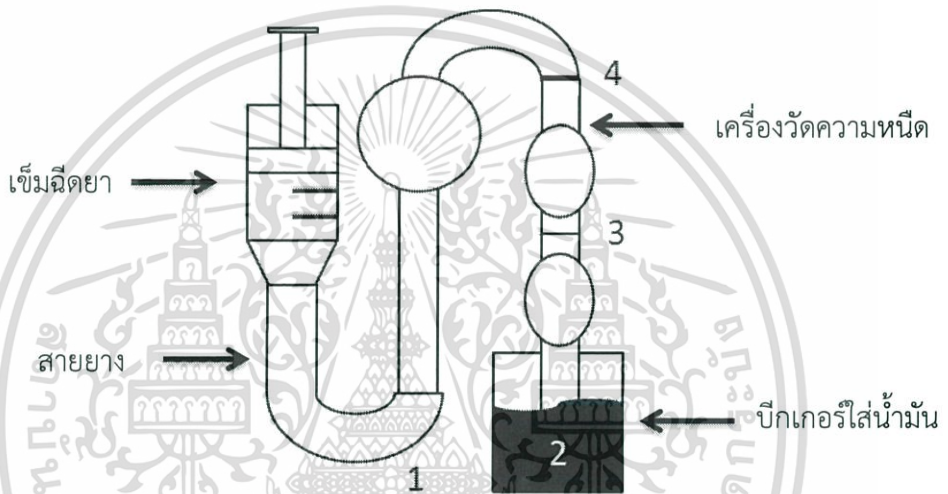
1. นำสารตัวอย่างจากการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์มาวางในตู้ดูดควันเพื่อระเหยอะซีโตนและเมทานอลออกไปเป็นเวลา 1 วัน สารตัวอย่างจะแยกออกจากกันเป็น 2 ชั้น โดยชั้นบนคือ น้ำมันไบโอดีเซล และชั้นล่างคือ กลีเซอรอล
2. เมื่อสารตัวอย่างที่ระเหยอะซีโตนและเมทานอลแล้วนำมาใส่ในกรวยแยกสาร และนำส่วนที่เป็นชั้นล่างซึ่งเป็นกลีเซอรอลออกมาใส่ปีกเกอร์เพื่อนำไปใส่ในขวดเก็บสารที่เตรียมไว้ (waste bottle) และฉีดน้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร ลงในกรวยแยกเพื่อล้างเมทานอลอะซีโตน และกรดซัลฟิวริกที่เหลือออก โดยทำซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง
3. นำชั้นน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่น ใส่ปีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร และเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อทำการตรวจวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การวัดค่าความหนืดไคน์มาติกของน้ำมันไบโอดีเซล

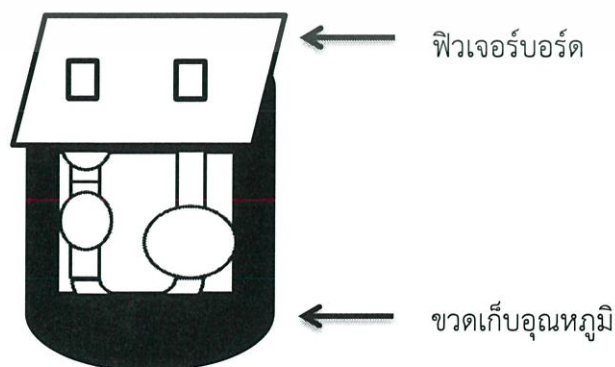
ตรวจวัดความหนืดด้วยเครื่องมือ Cannon-Fenske Routine Viscometers เบอร์ 150 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 445 มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ต้มน้ำจนถึงอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และนำน้ำใส่ขวดเก็บอุณหภูมิ
2. ต่อสายยางและเข็มฉีดยากับเครื่องวัดความหนืด (จุดที่ 1) คว่ำเครื่องวัดความหนืดลงในปีกเกอร์ที่ใส่สารตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ต้องการทดสอบ (จุดที่ 2) ดังรูปที่ ข.7 ใช้เข็มฉีดยาดูดน้ำมันถึงจนขีด (จุดที่ 4)



รูปที่ ข.7 เครื่องวัดความหนืดขณะดูดน้ำมัน (Cannon-Fenske Routine Viscometers)

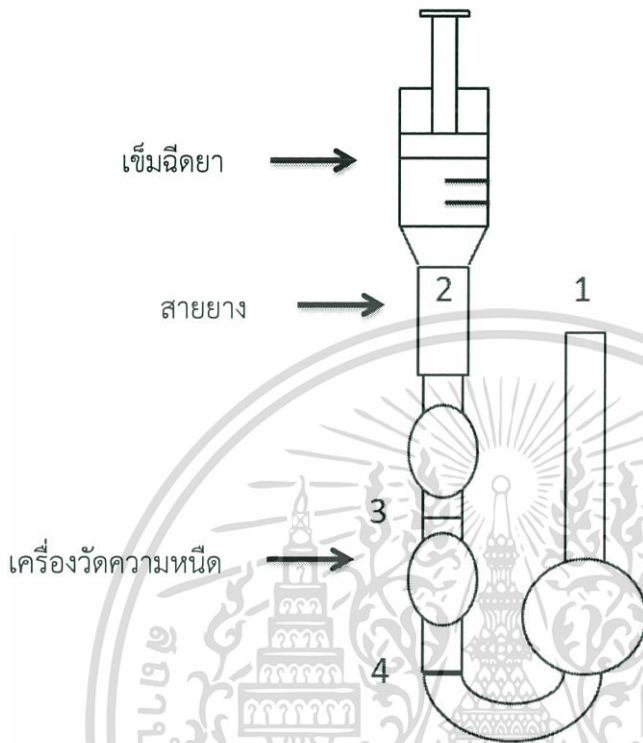
3. หายเครื่องวัดความหนืดขึ้นและใส่เครื่องวัดความหนืดลงในช่องของฟิวเจอร์บอร์ด (จุดที่ 1 และ 2) วางเครื่องวัดความหนืดที่ใส่ฟิวเจอร์บอร์ดลงในขวดเก็บอุณหภูมิโดยให้ฟิวเจอร์บอร์ดอยู่บนขวดเก็บอุณหภูมิดังรูปที่ ข.8



รูปที่ ข.8 เครื่องวัดความหนืดในขวดเก็บอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปล่อยทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของน้ำมันเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส
5. ต่อสายยางและเข็มฉีดยา (จุดที่ 2) ตูดน้ำมันให้เกินขีด (จุดที่ 3) เล็กน้อย เพื่อจับเวลาดังรูปที่ ข.9



รูปที่ ข.9 เครื่องวัดความหนืดขณะทำการวัด (Cannon-Fenske Routine Viscometers)

6. จับเวลาเมื่อน้ำมันไหลลงมาถึงขีด (จุดที่ 3) และหยุดเวลาเมื่อน้ำมันไหลลงมาถึงขีด (จุดที่ 4) ทำการจับเวลาซ้ำ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย
7. นำเวลาจากการทดลองคูณค่าคงที่เครื่องวัดความหนืด (Viscometer constant) จะได้ความหนืดไคเนมาติก (Kinematic viscosity) ตามสมการที่ (ข.1) และใช้ค่าความหนืดไคเนมาติกเพื่อหาผลผลิตไบโอดีเซลต่อไป

จาก 
$$v = C \times t \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่  $v$  คือ ความหนืดไคเนมาติก (Kinematic viscosity) มีหน่วยเป็น cSt (Centistokes หรือ  $\text{mm}^2/\text{s}$ )

$C$  คือ ค่าคงที่ของเครื่องวัดความหนืดมีหน่วยเป็น cSt/s (0.03901 cSt/s)

$t$  คือ เวลาในการไหลที่ได้จากการจับเวลา มีหน่วยเป็น s (วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. หลังจากทำการทดลองนำเครื่องวัดความหนืดมาทำความสะอาดโดยใช้ตัวทำละลายอะซีโตน เริ่มจากคูตะอะซีโตนในลักษณะเดียวกับน้ำมัน เพื่อล้างน้ำมันที่ตกค้างโดยใช้อะซีโตนให้ทั่วถึง และนำอะซีโตนที่ใช้แล้วใส่ในขวดเก็บสารเคมี (waste bottle)

### การวัดค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซล

1. นำขวดวัดความหนาแน่น (Pycnometer) มาชั่งน้ำหนักและจดบันทึก ( $m_1$ )
2. นำสารตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ต้องการทดสอบเทลงขวดวัดความหนาแน่น และใช้ฝาปิดไล่อากาศที่อยู่ในน้ำมันให้เคลื่อนที่ออกไปยังด้านบน และนำไปชั่งน้ำหนัก ( $m_2$ )
3. หาค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซล จากสมการ (ข.2)

จาก 
$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{ข.2})$$

โดยที่  $m_1$  คือ มวลของพิคโนมิเตอร์ มีหน่วยเป็น กรัม  
 $m_2$  คือ มวลของพิคโนมิเตอร์และน้ำมันตัวอย่าง มีหน่วยเป็น กรัม  
 $V$  คือ ปริมาตรของขวดพิคโนมิเตอร์ ที่ผ่านการสอบเทียบมีค่า 10.10 มิลลิลิตร

### การหาความหนืดพลวัต

การหาค่าความหนืดพลวัตคิดจากการนำค่าความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซลจากสมการที่ ข.1 มาคูณค่าความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซลจากสมการที่ (ข.2) ดังสมการที่ (ข.3)

จาก 
$$\eta = \rho \times v \quad (\text{ข.3})$$

โดยที่  $\eta$  คือ ความหนืดพลวัต มีหน่วยเป็น cP  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น กรัมต่อมิลลิลิตร  
 $v$  คือ ความหนืดไคนีมาติก มีหน่วยเป็น cSt  
 ตัวอย่างการคำนวณ ค่าความหนืดของน้ำมันไบโอดีเซล ความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซล ความหนืดพลวัต และผลผลิตไบโอดีเซล (% yield) โดยใช้เครื่องวัดความหนืดเบอร์ 150

### ข้อมูลเบื้องต้น

ระยะเวลาการไหลของสารตัวอย่าง 130 วินาที

น้ำหนักน้ำมัน + พิคโนมิเตอร์ 26.30 กรัม

น้ำหนักขวดพิคโนมิเตอร์ 17.39 กรัม

ปริมาตรพิคโนมิเตอร์ 10.1018 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความหนืดไคเนมาติก (Kinematic Viscosity)

จากสมการ (ข.1)

$$v = C \times t$$

$$v = 0.03901 \text{ cSt/s} \times 130 \text{ s}$$

$$v = 5.07 \text{ cSt}$$

- ความหนาแน่นของน้ำมันไบโอดีเซล

จากสมการ (ข.2)

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

$$\rho = \frac{26.30 - 17.39}{10.1018}$$

$$\rho = 0.89 \frac{\text{g}}{\text{ml}}$$

- ความหนืดพลวัต (Dynamic viscosity)

จากสมการ (ข.3)

$$\eta = \rho \times v$$

$$\eta = 0.882 \text{ g/ml} \times 5.0713 \text{ cSt}$$

$$\eta = 4.47 \text{ cP}$$

- ผลผลิตไบโอดีเซล

จากสมการ (3.1)

$$\% \text{yield} = 158.5 e^{-\left[ \frac{(-\text{Kinematic viscosity} \cdot \text{Density})}{6.8} \right]}$$

จากงานวิจัยของ Borges [27]

$$\% \text{yield} = 158.5 e^{-\left[ \frac{(-\eta)}{6.8} \right]}$$

$$\% \text{yield} = 158.5 e^{-\left[ \frac{(-4.473)}{6.8} \right]}$$

$$\% \text{yield} = 82.10\%$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### ทฤษฎี JOBACK

เพื่อศึกษาร้อยละผลได้ที่เป็นไปได้ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่สภาวะสมดุล โดยใช้ทฤษฎีของ JOBACK

เริ่มจากสมการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันดังสมการที่ (ค.1)



จาก (ค.1) เขียนสมการในรูปของกฎอัตราได้ดังสมการที่ (ค.2)

$$Rate = k_1 C_{TG}^\alpha C_{MeOH}^\beta - k_{-1} C_{FAME}^K C_{Glycerol}^\gamma \quad (\text{ค.2})$$

แปลงให้อยู่ในรูปที่สภาวะสมดุลจะได้ดังสมการ (ค.3)

$$K_e = \frac{C_{FAME}^K C_{Glycerol}^\gamma}{C_{TG}^\alpha C_{MeOH}^\beta} \quad (\text{ค.3})$$

$$\begin{aligned} C_{TG}^\alpha &= C_{TG_0}^\alpha (1-x)^\alpha \\ C_{MeOH}^\beta &= C_{MeOH_0}^\beta (\Theta_{MeOH} - 3x)^\beta \\ C_{FAME}^K &= C_{FAME_0}^K (\Theta_{FAME} + 3x)^K \\ C_{Glycerol}^\gamma &= C_{Glycerol_0}^\gamma (\Theta_{Glycerol} + x)^\gamma \end{aligned}$$

แทนค่าความเข้มข้นต่างๆลงในสมการ (ค.3) จะได้สมการ (ค.4)

$$K_e = \frac{(C_{TG_0}^K (\Theta_{FAME} + 3x)^K) (C_{TG_0}^\gamma (\Theta_{Glycerol} + x)^\gamma)}{(C_{TG_0}^\alpha (1-x)^\alpha) (C_{MeOH_0}^\beta (\Theta_{MeOH} - 3x)^\beta)} \quad (\text{ค.4})$$

โดยสามารถหาค่าแปรผันทางเคมี (x) ได้จากสมการ (ค.4)

$$K_e = K_0 K_1 K_2 \quad (\text{ค.5})$$

ค่า  $K_e$  จากสมการ (ค.5) โดยสามารถหาได้จากการนำค่า  $K_0$   $K_1$   $K_2$  ซึ่งหาจากสมการ (ค.6) – (ค.8)

มาคูณกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_0 = \exp\left(\frac{-\Delta G_f^0}{RT_0}\right) \quad (\text{ค.6})$$

$$K_1 = \exp\left(\frac{\Delta H_f^0}{RT_0}\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)\right) \quad (\text{ค.7})$$

$$K_2 = \exp\left(-\frac{1}{T} \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} dT + \int_{T_0}^T \frac{\Delta C_p^0}{R} \frac{dT}{T}\right) \quad (\text{ค.8})$$

คำนวณค่า  $\Delta G_f^0$ ,  $\Delta H_f^0$  และ  $C_p^0$  ตามทฤษฎีของ JOBACK ดังสมการ (ค.9) - (ค.11)

$$\Delta G_f^0(298.15 \text{ K}) = 53.88 + N_k \Delta gfk \quad (\text{kJ mol}^{-1}) \quad (\text{ค.9})$$

$$\Delta H_f^0(298.15 \text{ K}) = 68.29 + N_k \Delta hfk \quad (\text{kJ mol}^{-1}) \quad (\text{ค.10})$$

$$C_p^0(T) = \left\{ \sum_k N_k C_p Ak - 37.93 \right\} + \left\{ \sum_k N_k C_p Bk - 0.21 \right\} T \\ \left\{ \sum_k N_k C_p Ck - 3.91E - 04 \right\} T^2 + \left\{ \sum_k N_k C_p Dk - 2.06E - 07 \right\} T^3 \quad (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (\text{ค.11})$$

ค่า  $N_k C_p Ak$ ,  $N_k C_p Bk$ ,  $N_k C_p Ck$ ,  $N_k C_p Dk$  เป็นค่าคงที่ได้จากรายของ JOBACK แสดงดังตารางที่ (ค.1) - (ค.4)

หลังจากที่หาค่าจากสมการ (ค.9) - (ค.11) นำมาแทนค่าในสมการ (ค.6) - (ค.8) เพื่อไปแทนหาค่า  $K_e$  จากสมการ (ค.5) และไปหาค่าแปรผันทางเคมีที่สภาวะสมดุลของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน จากสมการ (ค.3)

**ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาร้อยละผลได้ที่มากที่สุดของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้ทฤษฎีของ JOBACK**

โดยตั้งสมมติฐานว่าปฏิกิริยาเป็นแบบ Elementary rate law และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 120 องศาเซลเซียส

ชั้นแรกดูโครงสร้างของสารและใช้ค่าคงที่จากตาราง JOBACK ดังนี้

โดยผลรวมคือ จำนวนหมู่ ( $N_k$ ) คูณกับค่าคงที่  $hfk$   $gfk$   $CpAk$   $CpBk$   $CpCk$   $CpDk$

โครงสร้างของเมทานอล:  $CH_3-OH$

ตารางที่ ค.1 ค่าคงที่พันธะของเมทานอลจากตาราง JOBACK

| Group MeOH | $N_k$ | $hfk$   | $gfk$   | $CpAk$ | $CpBk$    | $CpCk$   | $CpDk$     |
|------------|-------|---------|---------|--------|-----------|----------|------------|
| $CH_3(1)$  | 1     | -76.45  | -43.96  | 19.5   | -8.08E-03 | 1.53E-04 | -9.67E-08  |
| $OH(1)$    | 1     | -208.04 | -189.2  | 25.7   | -6.91E-02 | 1.77E-04 | -9.88E-08  |
| ผลรวม      |       | -284.49 | -233.16 | 45.2   | -7.72E-02 | 3.30E-04 | -1.955E-07 |

โครงสร้างของกรดโอเลอิก:  $CH_3-(CH_2)_4-CH=CH-CH_2-CH=CH-(CH_2)_7-COOH$

ตารางที่ ค.2 ค่าคงที่พันธะของกรดโอเลอิกจากตาราง JOBACK

| Group Oleic | $N_k$ | $hfk$   | $gfk$   | $CpAk$ | $CpBk$    | $CpCk$    | $CpDk$     |
|-------------|-------|---------|---------|--------|-----------|-----------|------------|
| $CH_3(1)$   | 1     | -76.45  | -43.96  | 19.5   | -8.08E-03 | 1.53E-04  | -9.67E-08  |
| $=CH_2(1)$  | 14    | -9.63   | 3.77    | 23.6   | 3.81E-02  | 1.72E-04  | 1.03E-07   |
| $=CH(2)$    | 2     | 37.97   | 48.53   | -8     | 1.05E-01  | -9.63E-05 | 3.56E-08   |
| $COOH(1)$   | 1     | -426.72 | -387.87 | 24.1   | 4.27E-02  | 8.04E-05  | -6.87E-08  |
| ผลรวม       |       | -562.05 | -281.99 | 358    | 7.78E-01  | 2.45E-03  | 1.3478E-06 |

โครงสร้างของเมทิลโอเลอิก:  $CH_3(CH_2)_6CH_2-CH=CH-CH_2-(CH_2)_5-CH_2-COO-CH_3$

ตารางที่ ค.3 ค่าคงที่พันธะของเมทิลโอเลอิกจากตาราง JOBACK

| Group Methylolate | $N_k$ | $hfk$   | $gfk$   | $CpAk$ | $CpBk$    | $CpCk$    | $CpDk$    |
|-------------------|-------|---------|---------|--------|-----------|-----------|-----------|
| $CH_3(1)$         | 1     | -76.45  | -43.96  | 19.5   | -8.08E-03 | 1.53E-04  | -9.67E-08 |
| $=CH_2(1)$        | 15    | -9.63   | 3.77    | 23.6   | 3.81E-02  | 1.72E-04  | 1.03E-07  |
| $=CH(2)$          | 2     | 37.97   | 48.53   | -8     | 1.05E-01  | -9.63E-05 | 3.56E-08  |
| $COO(1)$          | 1     | -337.92 | -301.95 | 24.5   | 4.02E-02  | 4.02E-05  | -4.52E-08 |
| ผลรวม             |       | -454.5  | -150.51 | 314.7  | 9.01E-01  | 2.03E-03  | 1.14E-06  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของกลีเซอรอล:  $\text{CH}_2\text{OH}-\text{CHOH}-\text{CH}_2\text{OH}$

ตารางที่ ค.4 ค่าคงที่พื้นระของกลีเซอรอลจากตาราง JOBACK

| Group<br>Glycerol | $N_k$ | $h_{fk}$ | $g_{fk}$ | $C_{pAk}$ | $C_{pBk}$ | $C_{pCk}$ | $C_{pDk}$ |
|-------------------|-------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| (2) $\text{CH}_2$ | 2     | -9.63    | 3.77     | 23.6      | 3.81E-02  | 1.72E-04  | 1.03E-07  |
| (3) $\text{CH}$   | 1     | 79.3     | 77.71    | 24.5      | 2.71E-02  | 1.11E-04  | 6.78E-08  |
| (1) $\text{OH}$   | 3     | -208.04  | -189.2   | 25.7      | -6.91E-02 | 1.77E-04  | -9.88E-08 |
| ผลรวม             |       | -564.08  | -482.35  | 148.8     | -1.04E-01 | 9.86E-04  | -2.26E-08 |

ขั้นตอนที่ 2 นำค่าคงที่ที่เป็นผลรวมจากตารางที่ (ค.1) – (ค.4) ไปใส่ในสมการที่ (ค.9) - (ค.11) เพื่อที่จะได้ค่าดังตารางที่ ค.5

ตารางที่ ค.5 สรุปค่าพลังงานของแต่ละสารจากการใช้ตาราง JOBACK

| สารเคมี      | $\Delta G$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ) | $\Delta H$ ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ) | $\Delta C_p$ ( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| MEOH         | -179.28                             | -216.2                              | 50.68  |
| Oleic        | -228.11                             | -493.76                             | 1120.5   |
| Methyloleate | -96.63                              | -386.21                             | 1047.54  |
| Glycerol     | -428.47                             | -495.79                             | 255.56   |
| ผลรวม        | -245.42                             | -289.22                             | 276.26   |

ขั้นตอนที่ 3 นำค่าที่ได้จากตารางที่ ค.5 แทนค่าลงสมการ ค.6 ค.7 และ ค.8 เพื่อหา  $K_e$  สมการ ค.5

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อได้ค่า  $K_e$  นำไปหาค่าการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาจากสมการ ค.4 โดยแปลงสมการให้อยู่ในรูปของ ปฏิกิริยาแบบ Elementary rate law แสดงดังสมการ ค.12

$$K_e = \frac{(C_{TG_0} (\Theta_{FAME} + 3x))^3 (C_{TG_0} (\Theta_{Glycerol} + x))}{(C_{TG_0} (1-x))(C_{TG_0} (\Theta_{MeOH} - 3x))^3} \quad (\text{ค.12})$$

แทนค่า  $K_e$  เพื่อหาค่าการแปรผันทางเคมี (x) โดยแทนค่าความเข้มข้น ตามจำนวนของการทดลอง จะได้ค่า  $x=99.99\%$  สามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันมีปฏิกิริยาผันกลับน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซล  
ประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันในประเทศไทย

ตารางที่ ง.1 ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล

| รายการ | ข้อกำหนด   | อัตราสูงสุด               | น้ำมันดีเซล |         | วิธีทดสอบ *               |
|--------|--|---------------------------|-------------|---------|---------------------------|
|        |  |                           | หมุนเร็ว    | หมุนช้า |                           |
| 1      | ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 15.6/15.6 องศาเซลเซียส (Specific Gravity at 15.6/15.6°C)                 | ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า | 0.81        | -       | ASTM D 1298               |
| 2      | จำนวนซีเทน (Cetane Number) หรือ ดัชนีซีเทน (Calculate Cetane Index)                                | ไม่ต่ำกว่า                | 47          | 45      | ASTM D 613<br>ASTM D 976  |
| 3      | ความหนืด เซนติสโตกส์ (Viscosity, cST)  | ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า | 1.8         | -       | ASTM D 445                |
|        | 3.1 ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (at 40°C)   |                           |             |         |                           |
|        | หรือ 3.2 ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (at 50°C)  | ไม่สูงกว่า                | 4.1         | 8.0     | ASTM D 97                 |
| 4      | จุดไหลเท องศาเซลเซียส (Pour Point, °C)   | ไม่สูงกว่า                | -           | 6.0     |                           |
| 5      | กำมะถันร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %wt.)  | ไม่สูงกว่า                | 10          | 16      | ASTM D 4294<br>ASTM D 130 |
| 6      | การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper Strip Corrosion)   | ไม่สูงกว่า                | หมายเลข 1   | 1.5     | ASTM D 2274               |
| 7      | เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ,กรัม/ลูกบาศก์เมตร (Oxidation Stability, g/m <sup>3</sup> ) | ไม่สูงกว่า                | -           | -       | ASTM D 189                |
| 8      | กากถ่านร้อยละโดยน้ำหนัก (Carbon Residue, %wt.)   | ไม่สูงกว่า                | 0.05        | -       | ASTM D 2709               |
| 9      | น้ำและตะกอนร้อยละโดยน้ำหนัก (Water and Sediment, %wt.)   | ไม่สูงกว่า                | 0.05        | -       | ASTM D 482                |
| 10     | เถ้าร้อยละโดยน้ำหนัก (Ash, %wt.)   | ไม่สูงกว่า                | 0.01        | 0.3     | ASTM D 93                 |
| 11     | จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)  | ไม่ต่ำกว่า                | 52          | 52      | ASTM D 86                 |
| 12     | การกลั่น องศาเซลเซียส (Distillation, °C)   | ไม่สูงกว่า                | 357         | -       |                           |
|        | อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตรใน อัตราร้อยละเก้าสิบ (90% recovered)                          | ไม่สูงกว่า                | 11          | -       | ASTM D 2425               |
| 13     | โพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน ร้อยละโดยน้ำหนัก (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, % wt.)        |                           |             | -       |                           |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ ง.1 (ต่อ) ลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล

| รายการ | ข้อกำหนด  | อัตราสูงต่ำ   | น้ำมันดีเซล              |                              | วิธีทดสอบ *  |
|--------|---|---|--------------------------|------------------------------|--|
|        |   |   | หมุนเร็ว                 | หมุนช้า                      |  |
| 14     | สี (Colour)<br>14.1 ชนิดของสี (Hue)<br><br>14.2 ความเข้มของสี (Intensity)                     | ไม่ต่ำกว่า<br><br>ไม่ต่ำกว่า<br>และ<br>ไม่สูงกว่า         | เหลือง<br><br>-<br><br>4 | น้ำตาล<br><br>4.5<br><br>7.5 | (1) เปรียบเทียบสีและปริมาณเนื้อสีกับน้ำมันมาตรฐานที่เตรียมขึ้นใหม่โดยใช้สีละลายในน้ำมันก่อนการย้อมสีให้มีปริมาณเท่ากับที่กำหนดแล้วนำมาบรรจุแยกกันในภาชนะที่ใช้ในการวัดสีตามวิธีทดสอบ ASTM D 1500 แล้วตรวจพินิจด้วยสายตา หรือ<br>(2) ASTM D 2392<br>ASTM D 1500 |
| 15     | ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ร้อยละโดยปริมาตร (Methyl Ester of Fatty Acid, % vol.) | ไม่ต่ำกว่า<br>และ<br>ไม่สูงกว่า                           | 4.5<br><br>5             | -<br><br>-                   | EN 14078   |
| 16     | คุณสมบัติการหล่อลื่น ไมโครเมตร (Lubricity, $\mu\text{m}$ )                                    | ไม่สูงกว่า  | 460                      |                              | CEC F-06-A-96  |
| 17     | สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additive)  | ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน |                          |                              |  |

หมายเหตุ \* วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้  
ที่มา : ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน พ.ศ. 2556

## ตารางที่ ง.2 ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

| รายการ | ข้อกำหนด  | อัตราสูงต่ำ                     | วิธีทดสอบ *                   |
|--------|---|---------------------------------|-------------------------------|
| 1      | เมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก (Methyl Ester, % wt.)  | ไม่ต่ำกว่า                      | 96.5<br>EN 14103              |
| 2      | ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส กิโลกรัม/เมตร <sup>3</sup> (Density at 15°C, $\text{kg}/\text{m}^3$ )      | ไม่ต่ำกว่า<br>และ<br>ไม่สูงกว่า | 860<br><br>900<br>ASTM D 1298 |
| 3      | ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เซนติสโตกส์ (Viscosity at 40°C, cST)  | ไม่ต่ำกว่า<br>และ<br>ไม่สูงกว่า | 3.5<br><br>5.0<br>ASTM D 445  |
| 4      | จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส (Flash Point, °C)   | ไม่ต่ำกว่า                      | 120<br>ASTM D 93              |
| 5      | กำมะถันร้อยละโดยน้ำหนัก (Sulphur, %wt.)   | ไม่สูงกว่า                      | 0.0010<br>ASTM D 2622         |
| 6      | กากถ่านร้อยละโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (Carbon Residue, on 10% distillation residue, %wt.) | ไม่สูงกว่า                      | 0.30<br>ASTM D 4530           |
| 7      | จำนวนซีเทน (Cetane Number)  | ไม่ต่ำกว่า                      | 51<br>ASTM D 613              |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง.2 (ต่อ) ลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

| รายการ | ข้อกำหนด   | อัตราสูงสุด   |           | วิธีทดสอบ *              |
|--------|--|---|-----------|--------------------------|
| 8      | เถ้าซัลเฟตร้อยละโดยน้ำหนัก   | ไม่สูงกว่า  | 0.02      | ASTM D 874               |
| 9      | (Sulfated Ash, %wt.)   |   |           |                          |
| 10     | น้ำร้อยละโดยน้ำหนัก  | ไม่สูงกว่า  | 0.050     | ASTM D 2709              |
| 10     | (Water, %wt.)  |   |           |                          |
| 11     | สิ่งปนเปื้อนทั้งหมดร้อยละโดยน้ำหนัก  | ไม่สูงกว่า  | 0.0024    | ASTM D 5452              |
| 11     | (Total Contaminate, %wt.)  |   |           |                          |
| 12     | การกัดกร่อนแผ่นทองแดง  | ไม่สูงกว่า  | หมายเลข 1 | ASTM D 130               |
| 12     | (Copper Strip Corrosion)   |   |           |                          |
| 13     | เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ชั่วโมง | ไม่ต่ำกว่า  | 6         | EN 14112                 |
| 13     | (Oxidation Stability at 110°C, hours)                                      |   |           |                          |
| 14     | ค่าความเป็นกรด มิลลิลิตร/มิลลิกรัม   | ไม่สูงกว่า  | 0.50      | ASTM D 664               |
| 14     | (Acid Value, mg KOH/g)   |   |           |                          |
| 15     | ค่าไอโอดีน กรัมไอโอดีน/100 กรัม  | ไม่สูงกว่า  | 120       | EN 14111                 |
| 15     | (Iodine Value, g Iodine/100 g)   |   |           |                          |
| 16     | กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก                                 | ไม่สูงกว่า  | 12.0      | EN 14103                 |
| 16     | (Linolenic Acid Methyl Ester, %wt.)  |   |           |                          |
| 17     | เมทานอล ร้อยละโดยน้ำหนัก   | ไม่สูงกว่า  | 0.20      | EN 14110                 |
| 17     | (Methanol, %wt.)   |   |           |                          |
| 18     | โมโนกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก  | ไม่สูงกว่า  | 0.80      | EN 14105                 |
| 18     | (Monoglyceride, %wt.)  |   |           |                          |
| 19     | ไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละโดยน้ำหนัก   | ไม่สูงกว่า  | 0.20      | EN 14105                 |
| 19     | (Triglyceride, %wt.)   |   |           |                          |
| 20     | กลีเซอรินอิสระ ร้อยละโดยน้ำหนัก  | ไม่สูงกว่า  | 0.02      | EN 14105                 |
| 20     | (Free glycerin, %wt.)  |   |           |                          |
| 21     | กลีเซอรินทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก  | ไม่สูงกว่า  | 0.25      | EN 14105                 |
| 21     | (Total glycerin, %wt.)   |   |           |                          |
| 22     | โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม                      | ไม่สูงกว่า  | 5.0       | EN 14108 และ<br>EN 14109 |
| 22     | (Group I metals (Na+K) mg/kg)  |   |           |                          |
| 23     | โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) มิลลิกรัม/กิโลกรัม                     | ไม่สูงกว่า  | 5.0       | prEN 14538               |
| 23     | (Group II metals (Ca+Mg) mg/kg)  |   |           |                          |
| 24     | ฟอสฟอรัส ร้อยละโดยน้ำหนัก  | ไม่สูงกว่า  | 0.0010    | ASTM D 4951              |
| 24     | (Phosphorus, %wt.)   |   |           |                          |
| 25     | สารเติมแต่ง (ถ้ามี)  | ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน |           |                          |
| 25     | (Additive)   |   |           |                          |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้