



การประยุกต์ใช้ดินฟอกในกระบวนการล้างไบโอดีเซล  
Application of Bleaching Earth on Biodiesel Washing Process

โชคดี มณีรัตน์  
Chokdee Maneerat

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Chemical Engineering  
Prince of Songkla University

2552

๑ ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์  
TP๑๕๑. B46 ๖๑๒ ๒๕๕๒ จ.๒  
311002  
Lib. Key 10 ๓๖ ๒๕๕๒

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้ดินฟอกในกระบวนการล้างใบโอดีเซล  
ผู้เขียน นางสาวโชคดี มณีรัตน์  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สัทหัชชัย กลั่นพิกุล)

.....กรรมการ

(ดร.สุธรรม สุขมณี)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

|                 |  |
|-----------------|--|
| ชื่อวิทยานิพนธ์ | การประยุกต์ใช้ดินฟอกในกระบวนการล้างไบโอดีเซล |
| ผู้เขียน        | นางสาวโชคดี มณีรัตน์                         |
| สาขาวิชา        | วิศวกรรมเคมี                                 |
| ปีการศึกษา      | 2552   |

### บทคัดย่อ

การผลิตไบโอดีเซลซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญในปัจจุบัน เป็นการผลิตแบบทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน โดยเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ และใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังมีการเกิดปฏิกิริยาสะaponนิฟิเคชันจากการทำปฏิกิริยาของด่างกับไขมันหรือกรดไขมันอิสระได้เป็นสบู่ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกจากไบโอดีเซลก่อนนำไปใช้ งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการกำจัดสบู่ในเมทิลเอสเตอร์ เพื่อนำไปสู่การลดปริมาณน้ำเสีย

จากกระบวนการล้างไบโอดีเซล โดยศึกษา 2 กระบวนการคือ การตกจมสบู่และการใช้ดินฟอก (BE) เป็นวัสดุดูดซับสบู่ในไบโอดีเซล เริ่มจากการศึกษาความสามารถในการตกจมสบู่ในไบโอดีเซล โดยดำเนินการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ ใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันและการแยกกลีเซอริน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการตกจมสบู่ในไบโอดีเซลคือไบโอดีเซลต้องผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลก่อน ซึ่งสามารถกำจัดสบู่ได้มากกว่า 87% การกำจัดสบู่โดยใช้ดินฟอกเป็นวัสดุดูดซับ แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการกำจัดสบู่แบบกะ เพื่อศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดูดซับสบู่ของดินฟอก ได้แก่ ความเข้มข้นสบู่เริ่มต้นในช่วง 1,000-8,000 ppm สัดส่วนดินฟอกที่ใช้ในช่วง 0.25 ถึง 3% โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการดูดซับ ศึกษาในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 120°C และศึกษาการนำดินฟอกกลับมาใช้ใหม่ ตรวจสอบปริมาณสบู่ในผลผลิตด้วย AOCs method ผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอกเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสบู่เริ่มต้นจนถึง 6,000 ppm ซึ่งให้ค่าการดูดซับสูงสุด 0.39 g soap/g BE และลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของดินฟอก อุณหภูมิที่ 120°C ให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดถึง 0.92 g soap/g BE จากการใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลหลังระเหย เมทานอล การนำดินฟอกกลับมาใช้ใหม่ มีการฟื้นฟูดินฟอกโดยสกัดสิ่งปนเปื้อนด้วยอะซิโตน และการเผาที่ 500°C ซึ่งให้ประสิทธิภาพการดูดซับ 72% เมื่อเทียบกับดินฟอกใหม่ จากนั้นกระบวนการแบบต่อเนื่องจึงถูกศึกษาโดยตั้งปฏิกรณ์แบบคอลัมน์บรรจุ (Packed Column) โดยศึกษาการใช้ดินฟอกดูดซับแบบผง ดินฟอกอัดเม็ดซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร และยาว 4

มิลลิเมตร) และดินฟอกแบบสเลอรี่ พบว่าการใช้ดินฟอกแบบสเลอรี่สามารถดูดซับสบูได้ดีที่สุด และจากการทดสอบการขจัดสบูโดยใช้กระบวนการตกจมร่วมกับการดูดซับด้วยดินฟอกในระบบ แบบคอลัมน์บรรจุ ปริมาณดินฟอก 15 กรัม พบว่าสามารถขจัดสบูในไบโอดีเซล 2.76 ลิตร ได้ 100% จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการนำกระบวนการตกจมและการดูดซับโดยใช้ดินฟอกมา ใช้ในกระบวนการล้างไบโอดีเซล

|                      |   |
|----------------------|---|
| <b>Thesis Title</b>  | Application of Bleaching Earth on Biodiesel Washing Process |
| <b>Author</b>        | Miss Chokdee Maneerat                                       |
| <b>Major Program</b> | Chemical Engineering  |
| <b>Academic Year</b> | 2009  |

### Abstract

Nowadays, Biodiesel one of the most important renewable energy, is produced by transesterification of triglycerides with an alcohol in the presence of an alkaline catalyst to speed the reaction. However, a soap is formed from saponification of free fatty acid with an alkaline catalyst. It must be removed from the biodiesel fuel. Water washing is the conventional method for soap removal. But this method, produces the wastewater discharged to environment.

This research deals with possible method of soap removal from biodiesel lead to reduce biodiesel wastewater. In this reseach, soap removal was proceeded by two strategies; sedimentation and adsorption using bleaching earth (BE) as adsorbent. First, the sedimentation of soap was investigated. The results show that the soap removal efficiency by sedimentation was above 87% occurred with removal of methanol. In the second strategy, the adsorption of soap from biodiesel onto the BE was carried out in the batch system to investigate the capability and removal efficiency of using BE as adsorbent for the soap removal. The key examined parameters were initial soap concentration range of 1,000-8,000 ppm, BE amount rang from 0.25-3.00 w/w% of biodiesel, temperatures range of atmospheric temperature to 120<sup>0</sup>C. The results show that the adsorption capability onto BE under atmospheric condition increased with increasing initial soap concentration and it approached a plateau after the concentration reach to about 6,000 ppm with the maximum adsorption capability was 0.39 g soap/g BE. And the adsorption capability decreased with increasing amount of BE. The best temperature for soap adsorption onto BE was 120<sup>0</sup>C (The adsorption capability was 0.92 g soap/g BE). In addition, the regeneration of spent BE by extraction using acetone and calcination at 500<sup>0</sup>C for 30 minutes was carried out. The adsorption efficiency of regenerated bleaching earth was 72%. Further study, the adsorption using bleaching earth (BE) as adsorbent was carried out in continuous system using packed column. This process study at using fine bleaching, pressed bleaching earth to cylinder (Diameter = 2 mm,

High = 4 mm), and slurry of bleaching earth. The results show that using slurry of bleaching earth in Packed column could adsorbed soap in biodiesel more than using fine bleaching and pressed bleaching earth to cylinder. Finally, the test of sedimentation of soap together with adsorption in packed column by using 15 g of bleaching earth and 2.76 L of unwashed biodiesel was investigated. From the test, found that the removal efficiency of soap was 100%. These results show an ideal method for the soap removal from biodiesel.

## กิจกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ก็ด้วยความรู้และประสบการณ์ที่คณาจารย์ได้ให้คำปรึกษาแนะนำเป็นอย่างดี ซึ่งผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ดร.ชาคริต ทองอุไร ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแก้ไข ตรวจสอบ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลชนาฐ ประเสริฐสิทธิ์ และดร.สุธรรม สุขมณี กรรมการผู้แทน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความกรุณาแนะนำท้วงติง และตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์เพิ่มเติมอันทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนการทำวิจัยในการศึกษา การประยุกต์ใช้ดินฟอกในกระบวนการล้างไบโอดีเซล ขอขอบพระคุณบริษัท Actochem (Thai) Industries co.,LTD ที่เอื้อเฟื้อดินฟอกเพื่อใช้ในการทำวิจัย

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี เจ้าหน้าที่จากสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิจัยและให้ความสะดวกในการติดต่อประสานงาน ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการทำวิจัยมาตลอด ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ที่ให้กำลังใจทั้งในการศึกษา ประโยชน์และความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแต่ คุณพ่อ คุณแม่ พี่น้องและเพื่อนๆ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในด้านต่างๆ และเสริมสร้างกำลังใจจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

โชคดี มณีรัตน์

## สารบัญ

|   | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ  | (3)  |
| ABSTRACT  | (5)  |
| กิตติกรรมประกาศ   | (7)  |
| สารบัญ  | (8)  |
| รายการตาราง   | (10) |
| รายการภาพประกอบ   | (11) |
| บทที่ 1 บทนำ  |      |
| 1.1 การใช้ไบโอดีเซลในประเทศไทย                                | 1    |
| 1.2 การผลิตไบโอดีเซล  | 2    |
| 1.2.1 ปฏิกิริยาการเกิดไบโอดีเซล                               | 2    |
| 1.2.2 การผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน  | 3    |
| 1.3 ปัญหาเรื่องสารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล | 5    |
| 1.4 วิธีการจัดสรรไนไบโอดีเซล                                  | 7    |
| 1.4.1 การล้างด้วยน้ำ  | 7    |
| 1.4.2 การล้างด้วยอากาศ  | 7    |
| 1.4.3 การกำจัดสบู่โดยใช้วัสดุดูดซับ                           | 8    |
| 1.5 สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย                              | 8    |
| 1.6 วัตถุประสงค์  | 9    |
| 1.7 ขอบเขตงานวิจัย  | 9    |
| 1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ                                 | 10   |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย                         |      |
| 2.1 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล                                 | 11   |
| 2.1.1 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลในสหรัฐอเมริกา                 | 11   |
| 2.1.2 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย                    | 19   |
| 2.2 คุณสมบัติไบโอดีเซล  | 22   |



## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.3 ผลไบโอดีเซลต่อเครื่องยนต์   | 27   |
| 2.4 การตกจม   | 28   |
| 2.4.1 ประเภทของการตกจม  | 28   |
| 2.4.2 การแยกกลีเซอรอล   | 31   |
| 2.5 การดูดซับ   | 32   |
| 2.5.1 ตัวดูดซับและกระบวนการดูดซับ   | 33   |
| 2.5.2 หลักการดูดซับ   | 33   |
| 2.5.3 เวลาการดูดซับและความสูงของเบด                                       | 37   |
| 2.5.4 วัสดุดูดซับ (ดินฟอก)  | 39   |
| 2.6 การวิเคราะห์ต้นทุน  | 40   |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย   |      |
| 3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง                               | 42   |
| 3.2 วิธีการวิจัย  | 45   |
| 3.3.1 การตกจมสปู  | 45   |
| 3.3.2 การดูดซับสปูโดยใช้ดินฟอกเป็นวัสดุดูดซับ                             | 48   |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์  |      |
| 4.1 การตกจมของสปูในไบโอดีเซล  | 55   |
| 4.1.1 ความสามารถการตกจมของสปูในไบโอดีเซล                                  | 55   |
| 4.1.2 ผลอัตราส่วนระหว่างส่วนสูงของไบโอดีเซลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจม | 57   |
| 4.1.3 ผลของเมทานอลต่อการตกจมสปูในไบโอดีเซล                                | 59   |
| 4.2 ความสามารถของดินฟอกที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ                              | 64   |
| 4.2.1 คุณสมบัติของดินฟอกที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ                             | 64   |
| 4.2.2 การดูดซับสปูในระบบแบบกะ (Batch)                                     | 66   |
| 4.2.3 การขจัดสปูโดยใช้ดินฟอกในระบบแบบ Packed Column                       | 78   |
| 4.2.4 ทดสอบการกำจัดสปูด้วยกระบวนการตกจมและการดูดซับ                       | 80   |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 4.3 วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเตอร์                                 | 82   |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง  | 84   |
| บรรณานุกรม  | 88   |
| ภาคผนวก   | 91   |
| ก. วิธีการวิเคราะห์   | 92   |
| ข. ตัวอย่างการคำนวณ   | 98   |
| ค. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสบู่อกับปริมาณกลีเซอรอล<br>และเก้าอี้ลเฟต | 102  |
| ประวัติผู้เขียน   | 105  |

## รายการตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 รายละเอียดข้อกำหนดทางคุณภาพไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D 6751                        | 24   |
| 2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548       | 25   |
| 2.3 ราคาวัตถุดิบและค่าไฟฟ้าในการผลิตไบโอดีเซล   | 41   |
| 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของดินฟอก  | 43   |
| 3.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินฟอก   | 44   |
| 4.1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสบู่ อุณหภูมิ สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการตกจม               | 62   |
| 4.2 คุณสมบัติของดินฟอก  | 65   |
| 4.3 แสดงคุณสมบัติของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการสกัดและการเผาไหม้                    | 75   |
| 4.4 แสดงปริมาณสบู่ในไบโอดีเซลในแต่ละขั้นตอน   | 80   |
| 4.5 แสดงต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลจากการใช้ดินฟอกในการกำจัดสบู่เปรียบเทียบกับกล้างด้วยน้ำ | 82   |
| ข1 ผลการทำ Standardization of 0.01 N HCl  | 90   |

## รายการภาพประกอบ

| ภาพประกอบที่  | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์                                 | 3    |
| 1.2 กระบวนการผลิตเมทิลเอสเตอ์ด้วยปฏิกริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน                                | 5    |
| 1.3 ปฏิกริยาสะปอนนิฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์                            | 6    |
| 1.4 ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันอิสระ                                    | 7    |
| 2.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลของ Crown Iron Works  | 12   |
| 2.2 แผนภาพกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของ Lurgi   | 15   |
| 2.3 แผนผังระบบผลิตไบโอดีเซลที่ Lurgi พัฒนาขึ้นและจดสิทธิบัตร                                  | 15   |
| 2.4 แผนผังกระบวนการผลิตของ Desmet Ballestra   | 16   |
| 2.5 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของ Greenline Industries                                      | 18   |
| 2.6 แผนผังกระบวนการผลิตของเครื่องไบโอดีเซลชุมชน   | 22   |
| 2.7 แสดงการแบ่งชนิดของการจมตัวของตะกอนตามความเข้มข้นของสารละลาย<br>และแรงเกาะกันระหว่างอนุภาค | 29   |
| 2.8 แสดงพฤติกรรมของการจมตัวของอนุภาค  | 30   |
| 2.9 แสดงแผนภาพการดูดซับของเบคคิงโดยมีของไหลเข้าสู่หอดูดซับอย่างต่อเนื่อง                      | 35   |
| 2.10 แสดงกระบวนการดูดซับในเบคคิง  | 35   |
| 2.11 แสดงเส้นกราฟไเบรคทลูเมื่อช่วงเวลากการถ่ายโอนมวล  | 37   |
| 2.12 แสดงการหาความจุการดูดซับของเบคโดยใช้วิธีพื้นที่เหนือเส้นกราฟไเบรคทลู                     | 38   |
| 3.1 เมทิลเอสเตอ์จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล   | 42   |
| 3.2 วัสดุดูดซับ (ดินฟอก)  | 43   |
| 3.3 แสดงตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนการระเหยเมทานอล  | 46   |
| 3.4 แสดงตัวอย่างไบโอดีเซลหลังระเหยเมทานอล   | 46   |
| 3.5 ตัวอย่างการทดสอบการตกจมในกระบอกตวงขนาด 500 ml   | 47   |
| 3.6 ชุดอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ BET Surface area  | 48   |
| 3.7 เครื่อง Mastersizer สำหรับวิเคราะห์ Particle Size Distribution                            | 48   |
| 3.8 แสดงการดูดซับสับด้วยดินฟอกในขวดรูปชมพู่   | 49   |
| 3.9 เครื่องกรองลดความดันที่ใช้สำหรับกรองดินฟอก  | 49   |

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบที่  | หน้า |
|---|------|
| 3.10 แสดงตัวทำละลายอะซิโตนหลังการสกัดสิ่งปนเปื้อนในดินฟอก   | 50   |
| 3.11 เตาเผาความร้อนสูง (Furnace)  | 51   |
| 3.12 แสดงคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ   | 52   |
| 3.13 แสดงลักษณะของดินฟอกอัดเม็ด   | 53   |
| 3.14 แสดงตัวอย่างกระบวนการดูดซับสบู่อด้วยดินฟอกในระบบ แบบเบคนิ่ง<br>โดยใช้ดินฟอกซึ่งมีลักษณะเป็นผงดูดซับในคอลัมน์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง<br>4 เซนติเมตร ยาว 17.3 เซนติเมตร  | 55   |
| 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นสบู่อที่แขวนลอยในไบโอดีเซล<br>ต่อความเข้มข้นสบู่อเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลเทียบกับเวลาที่<br>ใช้ในการตกจม   | 55   |
| 4.2 ลักษณะน้ำล้างของไบโอดีเซลที่ผ่านการตกจมเทียบกับไบโอดีเซลที่ไม่ผ่าน<br>การตกจม   | 56   |
| 4.3 แสดงผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่างความสูงของไบโอดีเซลต่อเส้นผ่าน<br>ศูนย์กลางของถังตกจม (H/D) ที่มีต่ออัตราส่วนความเข้มข้นสบู่อที่แขวนลอย<br>ในไบโอดีเซลต่อความเข้มข้นสบู่อเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) ที่แขวนลอยในไบโอดีเซล | 57   |
| 4.4 แสดงผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่างความสูงของไบโอดีเซลต่อเส้นผ่าน<br>ศูนย์กลางของถังตกจม (H/D) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสบู่อในไบโอดีเซล   | 58   |
| 4.5 ตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล  | 59   |
| 4.6 ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลและไม่ผ่านกระบวนการ<br>การระเหยเมทานอล   | 60   |
| 4.7 แสดงผลของเวลาและกระบวนการระเหยเมทานอลที่มีต่ออัตราส่วนความ<br>เข้มข้นสบู่อที่แขวนลอยในไบโอดีเซลต่อความเข้มข้นสบู่อเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) ที่แขวน<br>ลอยในไบโอดีเซล  | 61   |
| 4.8 แสดงผลการตกจมที่เวลา 15 นาที  | 63   |
| 4.9 แสดงผลการตกจมที่เวลา 1 ชั่วโมง  | 63   |
| 4.10 แสดงผลการตกจมที่เวลา 18 ชั่วโมง  | 64   |

## รายการภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.11 Pore Size Distribution ของดินฟอก  | 65   |
| 4.12 Particle Size Distribution ของดินฟอก  | 66   |
| 4.13 แสดงผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับสบูของดินฟอก                                     | 66   |
| 4.14 แสดงผลของความเร็วยวรอบต่อความสามารถในการดูดซับสบูของดินฟอก                            | 67   |
| 4.15 แสดงผลของปริมาณสบูที่แขวนลอยในไบ โอดีเซลเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับสบูของดินฟอก  | 68   |
| 4.16 Pore Size Distribution ของดินฟอกที่ผ่านและไม่ผ่านการใช้งาน                            | 69   |
| 4.17 แสดงผลสัดส่วนดินฟอกต่อประสิทธิภาพการกำจัดสบูที่แขวนลอยในไบ โอดีเซล                    | 70   |
| 4.18 แสดงผลสัดส่วนดินฟอกต่อความสามารถในการดูดซับสบูที่แขวนลอยในไบ โอดีเซล                  | 71   |
| 4.19 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับสบูที่แขวนลอยในไบ โอดีเซล                    | 72   |
| 4.20 แสดงลักษณะของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูเปรียบเทียบกับดินฟอกที่ไม่การ ใช้งาน               | 73   |
| 4.21 Pore Size Distribution ของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการสกัดและการเผา                  | 74   |
| 4.22 แสดงผลความสามารถในการดูดซับสบูของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูต่อเวลาในการดูดซับ             | 76   |
| 4.23 แสดงผลความสามารถในการดูดซับสบูของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูต่ออุณหภูมิในการดูดซับ         | 77   |
| 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสบูที่ถูกดูดซับในแต่ละแฟรกชันด้วยวิธีการกำจัดสบูแบบต่างๆ | 79   |
| 4.25 แสดงตัวอย่างไบ โอดีเซลที่ผ่านกระบวนการกำจัดสบู  | 81   |
| ค1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสบูและกลีเซอรอล  | 103  |
| ค2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสบูและเถ้าซิลเฟต   | 104  |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 การใช้ไบโอดีเซลในประเทศไทย

จากวิกฤตการณ์ด้านราคาน้ำมันเชื้อเพลิงจากปีโตรเลียมที่เกิดขึ้นเป็นระยะ ทำให้หลายประเทศได้หาแนวทางพัฒนาพลังงานทดแทนอื่น เพื่อลดการนำเข้าพลังงานเชื้อเพลิงจากต่างประเทศและแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อม ในปี พ.ศ. 2549 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานสูง คิดเป็นมูลค่าถึงร้อยละ 15.6 ของมูลค่าผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ (GDP-Gross Domestic Product) ถึงแม้ว่ามีปริมาณการใช้ลดลงตามลำดับจากปี พ.ศ. 2545 ที่มีการใช้สูงถึง 16.4% ของ GDP ก็ตาม แต่มูลค่าการนำเข้าพลังงานยังสูงขึ้นตามราคาน้ำมันตลาดโลกที่สูงขึ้นในรอบ 5 ปีที่ผ่านมา ในปี พ.ศ. 2549 มีมูลค่าการนำเข้าพลังงานของประเทศสูงถึง 873,565 ล้านบาท เนื่องจากประเทศไทยมีการใช้พลังงานในภาคการขนส่งสูงถึงร้อยละ 36 โดยมีการใช้น้ำมันดีเซลในภาคการขนส่งประมาณ 50 ล้านลิตรต่อวัน และน้ำมันเบนซินประมาณ 20 ล้านลิตรต่อวัน ในขณะเดียวกันประเทศไทยมีวัตถุดิบทางการเกษตรจำนวนมาก ที่สามารถใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพได้ หากมีการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพทดแทนน้ำมันดีเซลและเบนซินได้ จะเป็นการลดการพึ่งพาแหล่งพลังงานจากต่างประเทศ เพิ่มความมั่นคงและเสถียรภาพของประเทศด้านเศรษฐกิจและสังคมในภาพรวม

พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวฯ มีพระราชดำริให้เตรียมรับปัญหาด้านพลังงานเชื้อเพลิงมากกว่า 40 ปี โดยได้มีการพัฒนาพลังงานทดแทน ตามแนวพระราชดำรินโยบายส่วนพระองค์สวนจิตรลดา ทรงเล็งเห็นถึงความสำคัญในการพึ่งตนเองด้านพลังงาน และมีกระแสพระราชดำรัสพระราชทานแก่คณะบุคคลที่เข้าเฝ้าฯ ถวายพระพรในโอกาสวันเฉลิมพระชนมพรรษา ณ ศาลาดุสิดาลัย สวนจิตรลดาพระราชวังดุสิต เมื่อวันที่ 4 ธันวาคม 2548 และ 4 ธันวาคม 2550 เกี่ยวกับเรื่องส่งเสริมการใช้น้ำมันปาล์มเป็นพลังงานทดแทน และการสร้างโรงงานไบโอดีเซลของประเทศ ประเทศไทยกำหนดเป้าหมายในการส่งเสริมให้มีการใช้ไบโอดีเซลเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซล โดยกำหนด เดือนเมษายน 2551 ให้มีการใช้ไบโอดีเซลเป็นส่วนผสมในน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ร้อยละ 2 ทั่วประเทศ และให้มีการใช้ไบโอดีเซลเป็นส่วนผสมในน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ร้อยละ 5 ทั่วประเทศภายในปี 2554 โดยใช้ปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซล ดังนั้นเพื่อส่งเสริมให้มีวัตถุดิบเพียงพอต่อการผลิตไบโอดีเซล กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จึงได้กำหนด

เป้าหมายในการเพิ่มพื้นที่ปลูกปาล์มอีก 2.5 ล้านไร่ ภายในปีพ.ศ. 2555 ในเวลาเดียวกัน รัฐบาลได้มีมาตรการส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซล และมาตรการควบคุมและจัดการ โดยกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนตร์การเกษตร หรือที่เรียกว่าไบโอดีเซลชุมชน และไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน มีผลบังคับใช้ตั้งแต่ 21 กรกฎาคม 2549 และตั้งแต่ 7 มิถุนายน 2550 ตามลำดับ

การผลิตไบโอดีเซลในประเทศ พบว่าโรงงานที่ได้รับอนุญาตจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ให้ผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ บางโรงงานยังมีปัญหาในการผลิตทั้งด้านคุณภาพไบโอดีเซล การใช้ประโยชน์ผลพลอยได้จากการผลิต และการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ การผลิตไบโอดีเซลในเชิงอุตสาหกรรมมีความจำเป็นต้องให้ได้ต้นทุนในการผลิตต่ำและมีค่าสมมูลพลังงานเป็นบวก รวมทั้งพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตให้สูงขึ้น เพื่อผลิตให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพสูงขึ้นและมีต้นทุนในการผลิตต่ำลง

ประโยชน์ของไบโอดีเซล ในด้านสิ่งแวดล้อม จากผลการทดลองของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยีของบริษัท ปตท. จำกัด(มหาชน) สรุปได้ว่าการผสมไบโอดีเซลในสัดส่วนต่างๆ ช่วยลดมลพิษทางอากาศซึ่งได้แก่ สารไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนนอกไซด์ สารมลพิษอนุภาค (PM) ฟอรัมาลดีไฮด์ อะเซทาลดีไฮด์ ได้ร้อยละ 10-20 และลดควันดำได้ร้อยละ 20 สำหรับไบโอดีเซล 100% ช่วยลดมลพิษทางอากาศได้ร้อยละ 20-40 และลดควันดำได้ถึงร้อยละ 60 National Biodiesel Board, USA ระบุว่าไบโอดีเซลช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยสู่บรรยากาศซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะเรือนกระจกถึง 78.5% เทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล (กระทรวงพลังงาน, 2551)

## 1.2 การผลิตไบโอดีเซล

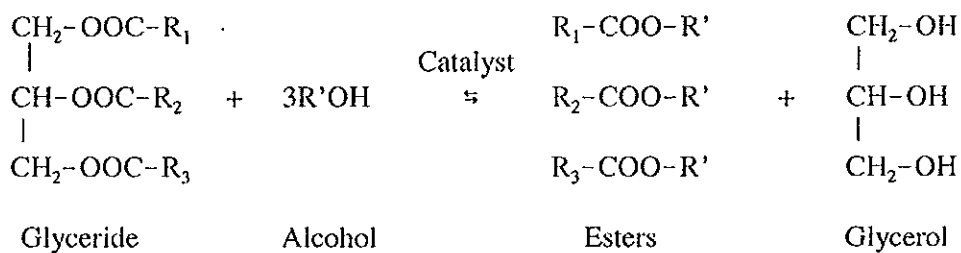
ไบโอดีเซลคือสารประเภทเอสเทอร์ ซึ่งไบโอดีเซลในคำจำกัดความของสากลคือทรัพยากรหมุนเวียนธรรมชาติ (Renewable resource, natural) เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ ไขมัน (น้ำมัน) ไขมันที่เกิดจากการปรุงอาหารที่ถูกนำมาแปรรูปเชิงเคมี โดยการทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ซึ่งนิยมใช้เมทิลแอลกอฮอล์หรือเอทิลแอลกอฮอล์ ได้ผลผลิตเป็นเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่มีการเผาไหม้สะอาด ไบโอดีเซลจัดอยู่ในกลุ่มน้ำมันดีเซลชีวภาพ สามารถนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมได้ในทุกสัดส่วนเนื่องจากสมบัติกายภาพคล้ายคลึงกันมาก และสามารถรักษามาตรฐานและคุณภาพได้ดีกว่าน้ำมันดีเซลชีวภาพชนิดอื่นๆ (ชาคริต และคณะ, 2544)

### 1.2.1 ปฏิกิริยาการเกิดไบโอดีเซล

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์ (เมทิลแอลกอฮอล์หรือเอทิลแอลกอฮอล์) กับ ไตรกลีเซอไรด์โดยใช้ด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไตร



กลีเซอไรด์ 1 โมล ทำปฏิกิริยากับเมทานอล 3 โมล ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้น 3 ขั้นตอนจาก ไตรกลีเซอไรด์ ไปเป็น ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และกลีเซอรอล แต่ละขั้นตอนจะใช้เมทานอล 1 โมล และได้ เมทิลเอสเทอร์ 1 โมล ทำให้ปฏิกิริยารวมได้เมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ 3 โมล และ กลีเซอรอล 1 โมล แสดงดังภาพประกอบที่ 1.1 โดย R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> คือโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอนหรือ อาจเรียกว่าเป็นสายของกรดไขมัน (Mittelbach and Remschmidt, 2004)



ภาพประกอบที่ 1.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ (Ma and Hanna, 1999)

### 1.2.2 กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน

ชาคริตและคณะ (2544) ทำการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากผลิตผลปาล์มน้ำมันหลาย ชนิดคือ น้ำมันทอดใช้แล้ว น้ำมันปาล์มรีไฟน์ น้ำมันปาล์มแยกกัมและลดกรดชนิดที่บรวม (เกรดบี) ไขปาล์มสเตียรีนและ superhard stearin การผลิตใช้กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแบบแบทช์ โดยใช้เมทิลแอลกอฮอล์เข้าทำปฏิกิริยาและใช้โซดาไฟเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการผลิต เมทิลเอสเทอร์แสดงดังภาพประกอบที่ 1.2 กรรมวิธีการผลิตแบ่งได้เป็น 6 ขั้นตอนดังนี้

#### 1) การเตรียมน้ำมันก่อนทำปฏิกิริยา

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจะถูกนำมาเตรียมให้เหมาะสมก่อนเข้าทำปฏิกิริยา โดย หากเป็นน้ำมันปาล์มดิบจะต้องผ่านกระบวนการแยกยางเหนียวและลดกรด ให้มีปริมาณกรดไขมัน อิสระต่ำกว่า 1 % ก่อน หากเป็นไขสเตียรีนจะถูกวัดปริมาณกรดไขมันอิสระก่อน หากมีค่าสูงกว่า 1 % จะต้องผ่านกระบวนการลดกรดเช่นเดียวกัน น้ำมันทอดใช้แล้วจะถูกนำมาขจัดโปรตีนโดยการ ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกและล้างด้วยน้ำ วัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่า 1% แล้ว จะถูก นำไปขจัดน้ำออกโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120°C ประมาณ 20 นาที โดยมีการกวนเพื่อให้อ การระเหยของน้ำเป็นไปได้ทั่วถึงยิ่งขึ้น สำหรับไขปาล์มสเตียรีนชนิด superhard ได้ถูกขจัดน้ำออก ที่อุณหภูมิ 80°C ภายใต้ภาวะสุญญากาศ 600-700 mm Hg

## 2) การเตรียมสารละลายแอลกอฮอล์

เมทิลแอลกอฮอล์หรือเมทานอลถูกเลือกใช้เป็นแอลกอฮอล์ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเพื่อให้เกิดเป็นเมทิลเอสเทอร์โดยเมทานอลต้องไม่มีน้ำเจือปนมากกว่า 1 % และโซดาไฟ (NaOH) ถูกเลือกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การเตรียมสารละลายกระทำโดยการนำโซดาไฟ 2.5-5 ส่วนมาละลายในเมทานอล 100 ส่วนโดยน้ำหนัก ซึ่งปริมาณโซดาไฟที่ใช้แปรตามปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในวัตถุดิบ หากกรดไขมันอิสระมีปริมาณสูงก็ต้องใช้โซดาไฟในสัดส่วนที่สูงตามไปด้วย

## 3) การทำปฏิกิริยา

น้ำมันที่ถูกขจัดแล้วถูกทำให้เย็นลงจนมีอุณหภูมิประมาณ  $80^{\circ}\text{C}$  จากนั้นจึงเติมสารละลายแอลกอฮอล์ลงไปอย่างช้าๆ (เติมให้หมดภายใน 10 นาที) สัดส่วนน้ำมันต่อสารละลายแอลกอฮอล์โดยน้ำหนักเท่ากับ 5 ต่อ 1 ทำการกวนเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึงเป็นเวลาประมาณ 15 นาที ด้วยอัตราการกวนปานกลาง (500 รอบ/นาที) อุณหภูมิในขณะนี้จะลดลงเหลือประมาณ  $65^{\circ}\text{C}$  การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ได้เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล แต่ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหยุดการกวนเพื่อแยกผลผลิตตัวใดตัวหนึ่งออก เมื่อหยุดการกวนกลีเซอรอลซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า (ประมาณ 1.26 กรัม/มล.) จะแยกชั้นออกจากชั้นเมทิลเอสเทอร์ โดยแยกตัวตกลงมาที่ก้นถัง ดังนั้นในชั้นเมทิลเอสเทอร์จะเหลือกลีเซอรอลอยู่น้อย ปฏิกิริยาการเกิดเมทิลเอสเทอร์ก็จะสามารถดำเนินต่อไปได้อย่างช้าๆ เมื่อทิ้งให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง น้ำมันจะทำปฏิกิริยาไปมากกว่า 95 %

## 4) การแยกกลีเซอรอล

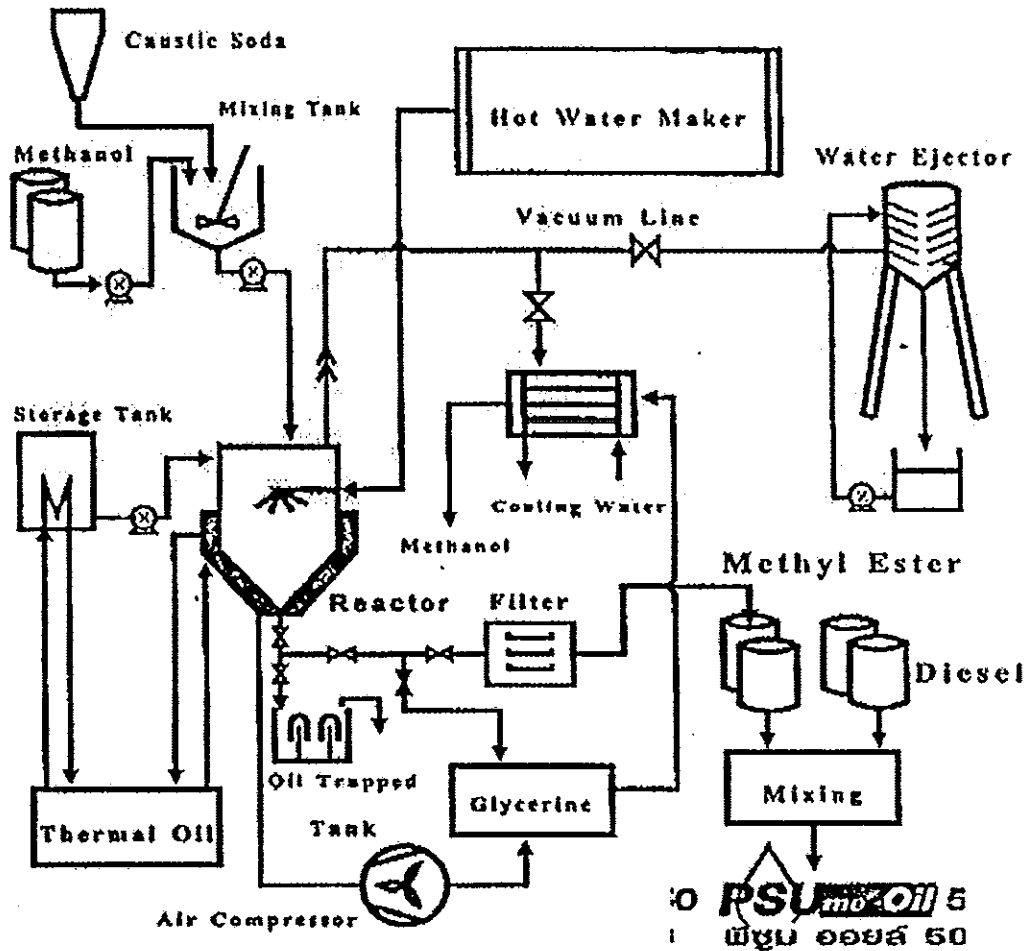
กลีเซอรอลจะถูกถ่ายออกใส่ถังภาชนะ โดยการถ่ายออกทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ในขณะที่ยังร้อนอยู่เพราะหากทิ้งไว้ให้เย็น ชั้นกลีเซอรอลจะกลายเป็นของแข็ง

## 5) การล้างสิ่งปนเปื้อนออก

เมทิลเอสเทอร์ที่ได้ยังถูกปนเปื้อนด้วยสารอื่นๆ เช่น สบู่ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซดาไฟและกรดไขมันอิสระหรือน้ำมัน กลีเซอรอลที่ละลายอยู่ในชั้นเมทิลเอสเทอร์ โซดาไฟ เมทานอลที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาและน้ำมันที่ทำปฏิกิริยาไม่หมด ดังนั้นจึงต้องทำการขจัดออกด้วยการล้างด้วยน้ำอุ่นหลายครั้ง ปริมาณน้ำที่ใช้ในแต่ละครั้งประมาณ 1/4 ของปริมาณเมทิลเอสเทอร์ เมื่อเติมน้ำเพียงพอแล้วและรอให้น้ำแยกชั้นจากเมทิลเอสเทอร์เป็นเวลาพอสมควร (ประมาณ 5-10 นาที) ก็ถ่ายน้ำล้างออกด้านล่าง เติมน้ำอุ่นเพื่อล้างใหม่ การล้างจะกระทำ 4-5 ครั้ง และเพิ่มการกวนในการล้างครั้งหลังๆ

### 6) การขจัดน้ำออกขั้นสุดท้าย

การขจัดน้ำค้างที่หลงเหลือในชั้นเมทิลเอสเทอร์ออก กระทำได้โดยการให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลาอย่างน้อย 20 นาที เมื่อทิ้งไว้ให้เย็นก็สามารถนำไปเก็บเพื่อการใช้งานต่อไป



ภาพประกอบที่ 1.2 กระบวนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (ชาคริต และคณะ, 2544)

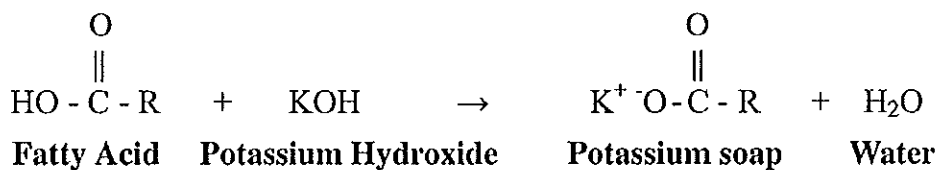
### 1.3 ปัญหาเรื่องสิ่งปนเปื้อนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซล

วัตถุประสงค์หลักของการล้างไบโอดีเซลคือต้องการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเนื่องจากในการผลิตไบโอดีเซลยังมีการเกิดปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันจากการทำปฏิกิริยาของด่างที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กับไขมันหรือกรดไขมันอิสระ

ได้เป็นสบู่ (Gerpen and Menges, 2004) หากนำไบโอดีเซลที่มีการปนเปื้อนของสบู่มาใช้งาน เมื่อเกิดการเผาไหม้จะทำให้ได้เป็นเถ้าสะสมอยู่ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการกัดกร่อนและสร้างความเสียหายให้กับห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์ได้ จึงจำเป็นต้องกำจัดออกจากไบโอดีเซลก่อนนำไปใช้งาน และแม้ว่าในมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) จะไม่ได้กำหนดค่ามาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาไว้โดยตรง แต่ก็ได้กำหนดไว้ในรูปของเถ้าซัลเฟตซึ่งจะมีปริมาณของเถ้าซัลเฟตได้ไม่เกิน 0.02 % โดยน้ำหนัก (Gerpen et al., 2004)

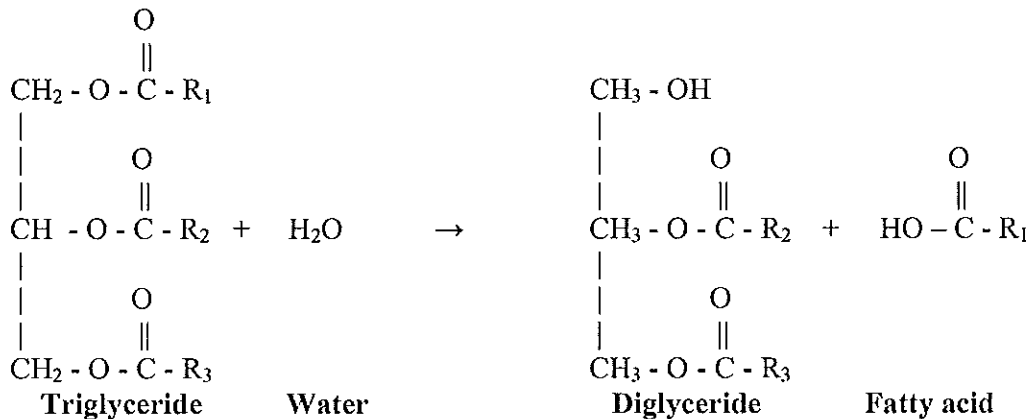
#### ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน (Saponification)

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งใช้ไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้น และมีปริมาณกรดไขมันอิสระรวมอยู่ด้วย กรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยากับด่างที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเกิดเป็นสบู่ แสดงดังภาพประกอบที่ 1.3 ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการให้เกิดในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล



ภาพประกอบที่ 1.3 ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันของกรดไขมันอิสระกับโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (Gerpen, 2005)

ปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นระหว่างการผลิตไบโอดีเซล เพราะนอกจากจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนรูปไปจนไม่สามารถทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาทำให้ต้องเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นแล้ว สบู่ที่มีปริมาณมากในผลิตภัณฑ์อาจไปสร้างปัญหาในกระบวนการหลังการผลิตไบโอดีเซลได้ เช่น การแยกกลีเซอรอล และการล้างน้ำไบโอดีเซล นอกจากนี้ น้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาสะปอนนิฟิเคชันยังสามารถสร้างปัญหาในการผลิตไบโอดีเซลได้ กล่าวคือ เมื่อมีน้ำปรากฏอยู่น้ำสามารถไฮโดรไลซ์ไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นไดกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระแสดงดังรูปที่ 1.4



ภาพประกอบที่ 1.4 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันอิสระ

จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสบู่มากขึ้น และสบู่ของกรดไขมันอิ่มตัวมีแนวโน้มที่จะแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นสารผสมจากการทำปฏิกิริยาเพื่อผลิตไบโอดีเซลและปริมาณสบู่ที่มีมากอาจทำให้เกิดเจลและมีการฟอร์มเป็นสารกึ่งของแข็งซึ่งยากต่อการคืนสภาพ

#### 1.4 วิธีการกำจัดสบู่ในไบโอดีเซล

วิธีการกำจัดสบู่ในไบโอดีเซล ได้แก่

##### 1.4.1 การล้างด้วยน้ำ (Water Washing)

วิธีทำความสะอาดไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างโดยทั่วไปมักใช้น้ำ หลักการของการล้างด้วยน้ำคือ เมื่อน้ำผ่านไบโอดีเซลน้ำจะละลายเอาสบู่ เมทานอล ผลิตภัณฑ์เกลือ และกลีเซอรอลที่เหลืออยู่ในกระบวนการรวมถึงตะกอนออกมาพร้อมกับน้ำจมนลงสู่ก้นถัง (Gerpen et al., 2004) แต่ในกรณีที่ปริมาณสบู่มากในไบโอดีเซล การล้างด้วยน้ำจะมีปัญหาในการเกิดอิมัลชัน ทำให้ไม่สามารถแยกสบู่ออกจากไบโอดีเซล ทำให้เกิดการตกค้างของสบู่ในไบโอดีเซลหรืออาจจำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้นในการล้าง และทำให้ไบโอดีเซลไม่สามารถแยกออกจากน้ำได้ ทำให้ผลได้ผลิตภัณฑ์ต่ำลง นอกจากนี้ยังต้องบำบัดน้ำเสียซึ่งยากต่อการบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพ เนื่องจากมีองค์ประกอบที่ไม่เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเพื่อบำบัดน้ำเสีย

##### 1.4.2 การล้างด้วยอากาศ (Air-bubble Washing)

การล้างด้วยอากาศเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการทำความสะอาดไบโอดีเซล ซึ่งมหาวิทยาลัยไอคาโฮได้พัฒนากระบวนการนี้ขึ้น เป็นกระบวนการที่ต้องใช้เวลาแต่ก็สามารถลด

ปริมาณน้ำที่ใช้ล้างได้เมื่อเทียบกับการล้างด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว (Pelly, 2005) หลักการทำงานคือ ต่อท่อออกซิเจนจากปั๊มออกซิเจนให้ปลายท่อวางอยู่ก้นถัง เติมน้ำไปประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของ ไบโอดีเซล เมื่อเดินเครื่องอากาศที่ออกมาจะผ่านไบโอดีเซล ในขณะนั้นเองฟองอากาศซึ่งมีน้ำเคลือบอยู่ที่ผิวจะจับสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ไปพร้อมกัน เมื่อฟองอากาศขึ้นสู่ผิวหน้าและแตกตัวออก น้ำและสิ่งปนเปื้อนต่างๆจะตกกลับสู่ก้นถังอย่างช้าๆ ผ่าน ไบโอดีเซลและละลายเอาสารที่อยู่ในไบโอดีเซลซึ่งหมายถึง แอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ยังคงเหลืออยู่มาด้วย (Hill, 2008)

#### 1.4.3 การใช้วัสดุดูดซับ

การใช้วัสดุดูดซับเป็นระบบการล้างที่เรียกว่า Dry washing ปัจจุบันระบบนี้เริ่มนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมกันมากขึ้น เนื่องจากปัญหาที่อาจเกิดจากระบบการล้างด้วยน้ำ เช่น น้ำที่ใช้ล้างอาจต้องผ่านกระบวนการลดความกระด้างก่อนใช้ ปัญหาการเกิดอิมัลชัน การสูญเสียผลผลิตระหว่างกระบวนการ ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น วัสดุดูดซับที่ใช้ในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่ใช้ในโรงงานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ ได้แก่

1) แมกนีซอล (Magnesol) หรือแมกนีเซียมซิลิเกตสังเคราะห์ เป็นวัสดุดูดซับที่มีลักษณะเป็นอนุภาคละเอียดสีขาว ขนาดอนุภาคประมาณ 60 ไมโครเมตร สามารถดูดซับได้ทั้งสารประกอบที่เป็นกรดและเบส มีความจำเพาะสูงกับสารประกอบมีขี้ผึ้ง สามารถดูดซับได้ทั้งเมทานอล กลีเซอรอล โลหะ และสบู่

2) แอมเบอร์ไลท์ (Amberlite) เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาจากบริษัท Rohm-Haas Corporation ลักษณะเป็นเรซินซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกลางและปราศจากความเป็นพิษ จึงทำให้กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อนเบื้องต้นดังกล่าว ไม่ต้องใช้การล้างน้ำและไบโอดีเซลที่ได้ปราศจากน้ำเจือปนด้วย เป็นระบบการดูดซับสารแบบแลกเปลี่ยนไอออน

#### 1.5 สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย

กำลังการผลิตของโรงงานในประเทศไทยสามารถแบ่งได้ 3 ระดับ คือ

- (1) ระดับวิสาหกิจชุมชน (0.5 -1 ตันต่อวัน)
- (2) ระดับกลาง (SMEs) (มากกว่า 1 ตันต่อวัน - 50 ตันต่อวัน)
- (3) ระดับการผลิตเพื่อการพาณิชย์ (ขนาด 100 -200 ตันต่อวัน)

การพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นเองในประเทศสำหรับการผลิต 2 ระดับแรกนั้นมีความเหมาะสมมากกว่า เนื่องจากลงทุนต่ำกว่าการนำเข้าเทคโนโลยี ส่วนในระดับอุตสาหกรรมการนำเข้าเทคโนโลยีเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ อันเนื่องมาจากคุณภาพ และกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงทำให้ได้เมทิลเอสเทอร์ที่มีปริมาณ และคุณภาพสูง ปัญหาอุปสรรคที่สำคัญในเบื้องต้น คือ การยอมรับของผู้ใช้ในด้านราคาและการควบคุมคุณภาพของเมทิลเอสเทอร์ ให้สม่ำเสมอเป็นไปตามข้อกำหนด

มาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงานปี 2548 รวมไปถึงการลดต้นทุนการผลิตในหน่วยสนับสนุน ตัวอย่างเช่น กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันก่อนเข้ากระบวนการผลิตในกรณีที่วัตถุดิบที่ใช้เป็นน้ำมันปาล์มดิบซึ่งมีกรดไขมันอิสระ 3-5% โดยจำเป็นต้องมีการวิจัยเพื่อลดการสูญเสีย นอกจากนี้ยังมีกระบวนการแยกคีนเมทานอล กระบวนการทำบริสุทธิ์กลีเซอรอล กระบวนการนำไฮสบูซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการลดกรดและสารอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการทำบริสุทธิ์กลีเซอรอลมาเปลี่ยนให้เป็นเมทิลเอสเทอร์อีกครั้ง และรวมไปถึงระบบบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการผลิตไบโอดีเซล

โครงการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากระบวนการ ที่มีความสามารถในการกำจัดสบู่เพื่อลดปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ และเพื่อเป็นการลดต้นทุนของเทคโนโลยีที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ การที่ต้นทุนของเทคโนโลยีไทยค่อนข้างต่ำนั้นเพราะสามารถออกแบบและสร้างอุปกรณ์บางส่วนได้เอง (ไม่มีการคิดค่าใช้จ่ายในส่วน Engineering design and commissioning สำหรับโรงงานขนาดเล็กและขนาดกลาง) ในที่นี้จะทำการศึกษากระบวนการที่อาศัยความสามารถในการตกจมของสบู่ และความสามารถของการนำดินฟอก (Bleaching earth) มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการล้างไบโอดีเซลร่วมกับการล้างด้วยน้ำ

## 1.6 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการตกจมของสบู่ในไบโอดีเซล
2. เพื่อศึกษาความสามารถของดินฟอกที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการขจัดสบู่

ในไบโอดีเซล

3. เพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการนำดินฟอกมาประยุกต์ใช้ใน

ขั้นตอนการล้างไบโอดีเซล

## 1.7 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการใช้ดินฟอกที่ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมาประยุกต์ใช้ในการขจัด

สบู่

2. ทำการทดลองแบบกะ (batch system) และแบบ packed column ในระดับ

ห้องปฏิบัติการ

3. ประสิทธิภาพในการขจัดสบู่คิดจากเปอร์เซ็นต์สบู่ที่ถูกขจัดออกจากไบโอดีเซล และปริมาณการดูดซับสบู่ของดินฟอกคิดเป็นปริมาณสบู่ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักดินฟอก

4. ศึกษาการขจัดสบู่โดยอาศัยความสามารถในการตกจมสบู่ การใช้ดินฟอกร่วมกับการใช้น้ำเพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่มีมาตรฐาน

5. ศึกษาต้นทุนในกระบวนการล้างไบโอดีเซล โดยเปรียบเทียบการล้างแบบเดิมกับวิธีใหม่

1.8 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลพื้นฐานและความสามารถของคินฟอกที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับสำหรับการขจัดสบู่ในไบโอดีเซล

2. ได้แนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

3. สามารถลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

4. ช่วยลดต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซล



## บทที่ 2

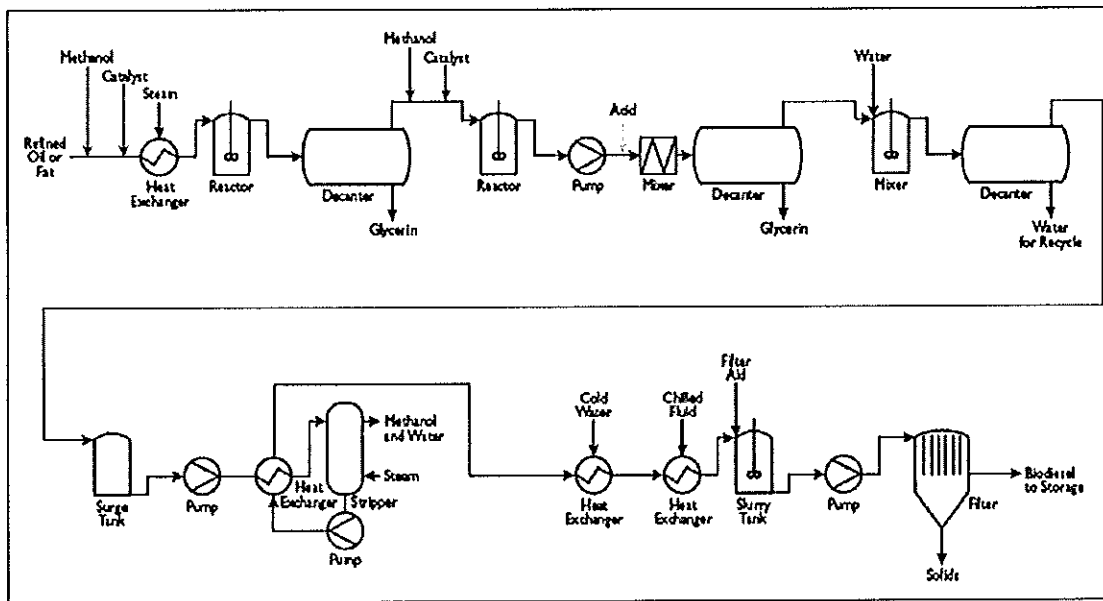
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

#### 2.1 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซล

##### 2.1.1 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลในสหรัฐอเมริกา

การผลิตไบโอดีเซลเชิงอุตสาหกรรมในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นการผลิตด้วยเทคโนโลยีแบบดั้งเดิม (Conventional process) หรือที่รู้จักกันคือ กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน มีการพัฒนาด้านวิศวกรรมกระบวนการเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพของการผลิตสูงสุดตามความเหมาะสมของวัตถุดิบและศักยภาพในการลงทุนของผู้ผลิตไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้ (พนิดา และคณะ, 2551)

Crown Iron Work Company บริษัทนี้เป็นบริษัทผู้ออกแบบโรงงานและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลในสหรัฐอเมริกา ซึ่งยังคงใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบดั้งเดิม นั่นคือการใช้กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเป็นหลัก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส และเน้นการใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพดี หรือมีขั้นตอนการปรับปรุงคุณสมบัติของวัตถุดิบ เช่น การลดกรดไขมันอิสระของน้ำมันดิบให้ได้ตามที่กำหนด (ไม่เกินร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก) หรือการลดปริมาณสารประกอบฟอสฟอรัส (Phosphatide compounds) ที่ปนอยู่ในน้ำมันดิบให้เหลือไม่เกิน 5 ส่วนในล้านส่วน เป็นต้น ก่อนที่จะส่งเข้ากระบวนการผลิต ซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้ง่าย ซึ่งเป็นระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง โดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแบบสองขั้นตอน เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างสมบูรณ์ และมีการหยุดปฏิกิริยาด้วยกรด ก่อนจะเข้าสู่ขั้นตอนการล้างด้วยน้ำและการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ต่อไป มีกระบวนการแยกกลับคืนของเมทานอลด้วยการกลั่นเพื่อนำเมทานอลกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป เน้นสำหรับ โรงงานที่มีกำลังการผลิตอย่างน้อย 100 ตัน/วัน



ภาพประกอบที่ 2.1 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลของ Crown Iron Work (พินิตา และคณะ, 2551)

รายละเอียดของระบบการผลิตไบโอดีเซล มีดังนี้

1) น้ำมันพืชหรือสัตว์ที่ผ่านการกำจัดขางเหนียวและกรดไขมันอิสระออกแล้ว (Degummed and FFA pretreated oil) จะถูกส่งผ่านชุดกรองน้ำมัน (Oil feed filter) เข้าระบบผลิต ในขณะที่เดียวกันเมทานอลจะถูกส่งผ่านชุดกรอง (Methanol feed filter) พร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โซเดียมเมทิลเลต (Sodium methylate) จะถูกส่งผ่านชุดกรอง (Catalyst feed filter) เช่นกัน โดยอัตราส่วนผสมระหว่างเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกควบคุมให้เหมาะสมกับปริมาณวัตถุดิบ และจะผ่านการให้ความร้อนเพื่อปรับอุณหภูมิก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชุดที่หนึ่ง

2) น้ำมันและเมทานอล รวมทั้งตัวเร่งปฏิกิริยา จะถูกปล่อยให้ทำปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์ชุดที่หนึ่งเป็นชนิดใบกวน ก็จะได้สารผสมของไบโอดีเซลและกลีเซอรอล ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังถังแยกกลีเซอรินแนวนอนขนาดใหญ่ด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravitational decanter) โดยการไหลจากระดับสูงไปต่ำเพื่อประหยัดพลังงาน และให้เกิดการแยกชั้นด้วยความแตกต่างของความหนาแน่น ซึ่งจะมีการถ่ายกลีเซอรินออกจากถังแยกตลอดเวลา เพื่อรักษาระดับของการแยกระหว่างสารชั้นบนกับชั้นล่างให้คงที่ ส่วนไบโอดีเซลจากชั้นบนจะถูกส่งไปทำปฏิกิริยาซ้ำอีกครั้งในถังปฏิกรณ์ชุดที่สองอย่างต่อเนื่อง โดยเมทานอลและโซเดียมเมทิลเลตจะถูกเพิ่มเข้าไปเพื่อให้อปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นจะมีการเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกโดยผ่านเครื่องผสมแบบสถิตย์ (Static mixer) เข้าไปผสมเพื่อหยุดปฏิกิริยา และกำจัดเบสที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา

3) ไบโอดีเซลที่ได้จากขั้นตอนนี้ จะผ่านการตกตะกอนแยกกลีเซอรอลอีกครั้ง ก่อนจะส่งไปยังขั้นตอนการล้างโดยใช้น้ำในการล้างประมาณ 20% ของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ และแยกน้ำเสียออกด้วยถังแยกน้ำ (Waste water decanter) โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงเช่นกัน สำหรับไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างสารปนเปื้อนออกแล้ว จะเข้าสู่หอกลิ้นเพื่อระเหยเมทานอลและน้ำที่ยังเจือปนอยู่ออกจากไบโอดีเซล สำหรับไบโอดีเซลที่ออกจากหอกลิ้นจะถูกลดอุณหภูมิลง และผ่านชุดกรองสารตะกอนที่ปนเปื้อนออกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน

4) สำหรับกลีเซอรอลที่แยกชั้น ออกจากกระบวนการผลิต จะมีความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอล, เกลือ, น้ำและสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่กลีเซอรอล (Matter Organic Non-Glycerol; MONG) ประมาณ 80-85%, 5-8%, 7-15% และ 2.5% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียจากการล้างไบโอดีเซลจะถูกนำไปผ่านการทำให้บริสุทธิ์ และนำกลับมาใช้ในระบบล้างอีกครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบผลิตดังกล่าว เป็นระบบที่ไม่มีของเสียออกจากกระบวนการผลิตเลย

**TechnoChem International, Inc.** บริษัท TechnoChem จากประเทศอินเดีย มีความเชี่ยวชาญด้านการทำน้ำมันพืชบริสุทธิ์มาก่อน และทำการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลขนาดเล็กและขนาดกลาง ซึ่งมีกำลังการผลิตในระหว่าง 0.05-30 ล้านแกลลอนต่อปี หรือ 500-300,000 ลิตรต่อวัน โดยแบบของเครื่องปฏิกรณ์เป็นรูปทรงสูงเพื่อการถอดประกอบที่ง่าย และใช้พื้นที่น้อย มีทั้งระบบผลิตเป็นกะและต่อเนื่อง ชนิดควบคุมเองและควบคุมโดยอัตโนมัติ โดยมี ต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลด้วยระบบนี้ประมาณ 1.3-1.5 เหรียญสหรัฐฯ ต่อแกลลอน และค่าใช้จ่ายในการทำกลีเซอรินบริสุทธิ์ ไม่เกิน 1 เหรียญสหรัฐฯ ต่อแกลลอน มีการปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreated oil) ก่อน โดยใช้ระบบการล้างแบบเหวี่ยงแยก (Centrifugal washing) ส่วนการใช้น้ำในการล้างไบโอดีเซลที่ได้มีอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร และใช้เบส (Caustic sodium) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

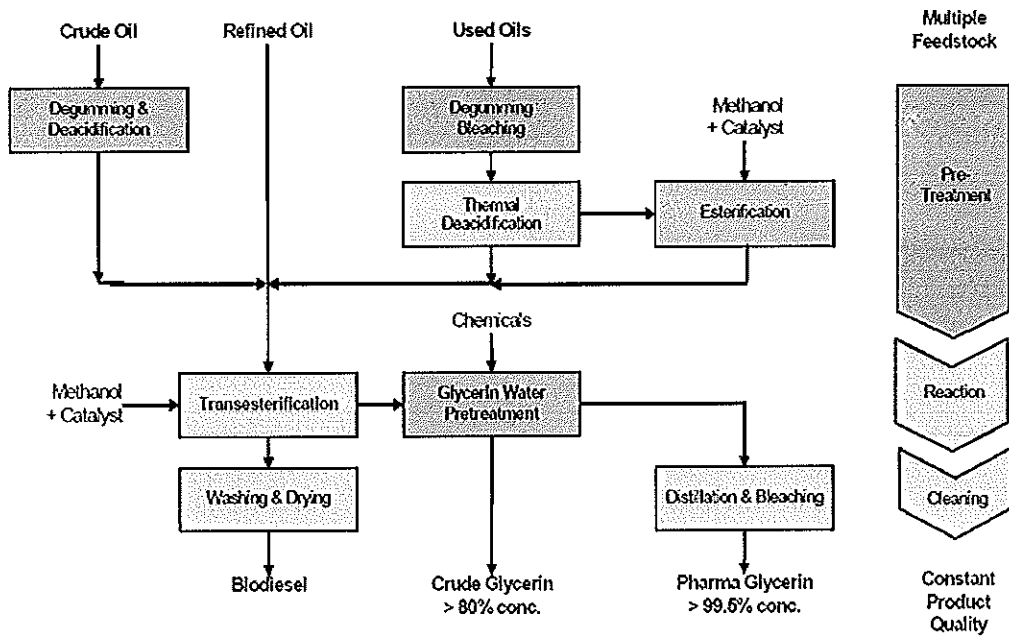
**Green Star Products, Inc.** หรือ GSPI ประสบความสำเร็จในการพัฒนากระบวนการผลิตไบโอดีเซลขนาดกำลังการผลิต 10 ล้านแกลลอนต่อปี และเน้นพัฒนากระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันให้เกิดอย่างสมบูรณ์ในเวลาสั้น โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 2 นาที ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการทั่วไปที่มักใช้เวลามากกว่า 1 ชั่วโมงขึ้นไป ระบบผลิตไบโอดีเซลที่ใช้เป็นแบบกระบวนการต่อเนื่องและไม่ใช้น้ำในการล้างไบโอดีเซล โดยได้รับการออกแบบให้มีลักษณะเป็นโมดูลทำให้ใช้ระยะเวลาในการติดตั้งระบบผลิตไบโอดีเซลเพียง 14 - 16 สัปดาห์ ซึ่งน้อยกว่าโรงงานทั่วไปที่มีขนาดเดียวกัน ซึ่งใช้เวลาประมาณ 14 - 18 เดือน และยังสามารถขยายกำลังการผลิตได้โดยง่าย โดยมีบริษัท American Biofuels, LLC. ซึ่งตั้งอยู่ที่เมือง Bakersfield มลรัฐแคลิฟอร์เนีย เป็นโรงงานที่ใช้ระบบการผลิตไบโอดีเซลของ GSPI ในการผลิตใช้

น้ำมันถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบ โดยดำเนินการผลิตเริ่มต้น 5 ล้านแกลลอนต่อปีเมื่อปี 2003 ได้เพิ่มกำลังการผลิตเป็น 10 ล้านแกลลอนต่อปีในเดือนมีนาคม 2006 และเป็น 20 ล้านแกลลอนต่อปีในปลายปี 2006 ทั้งนี้ได้ดำเนินการจดสิทธิบัตรของบริษัทหมายเลข #20050188607 ในการผลิตใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 145°F ซึ่งสูงกว่าระบบผลิตทั่วไปที่ควบคุมอุณหภูมิตั้งที่ 110°F

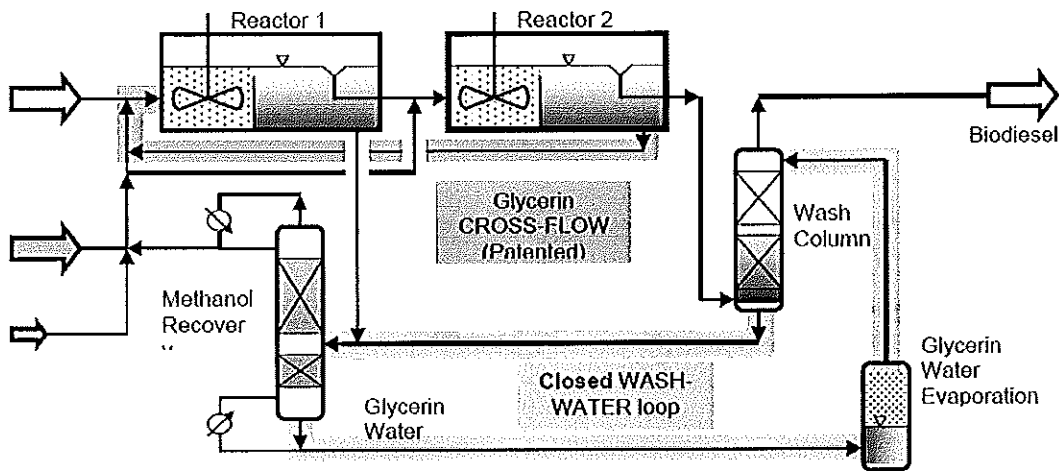
Nova Biosource Fuels, Inc. ได้พัฒนาระบบผลิตไบโอดีเซลซึ่งได้รับการจดสิทธิบัตรแล้ว โดยต้องการแก้ปัญหาการผลิตจากการใช้วัตถุดิบชนิดต่างๆ คือ น้ำมันจากพืชหรือไขมันจากสัตว์ ซึ่งมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปโดยเฉพาะวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระสูงๆ สำหรับเทคโนโลยีการผลิตนี้เป็นแบบต่อเนื่อง สามารถใช้กับวัตถุดิบชนิดต่างๆ ถึง 25 ชนิด และที่มีค่ากรดไขมันอิสระได้สูงถึง 60% โดยไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต และเป็นระบบที่ไม่ต้องใช้น้ำในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน โดยใช้การกลั่นไบโอดีเซลบริสุทธิ์ ซึ่งทำให้กลีเซอรินที่ได้จากกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์สูงด้วย ระบบผลิตดังกล่าวยังคำนึงถึงความปลอดภัยและการใช้พลังงานอย่างมีคุณค่า โดยออกแบบให้เป็นระบบปิดเพื่อป้องกันไอระเหยหรือกลิ่นของสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลไม่ให้ออกจากกระบวนการผลิต และควบคุมการสูญเสียพลังงานอย่างสิ้นเปลืองในระหว่างขั้นตอนการผลิตด้วย โดยมีการดึงกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตได้ซึ่งทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำ

Lurgi Biodiesel Technology เป็นบริษัทขนาดใหญ่ที่มีเทคโนโลยีด้านการผลิตไบโอดีเซลจากประเทศเยอรมนี และมีสำนักงานสาขาอยู่ที่เมือง Memphis มลรัฐเทนเนสซี โดยได้ลงนามความร่วมมือกับ TexCom Inc. รับเป็นผู้ออกแบบและก่อสร้างโรงงานไบโอดีเซล Houston Biodiesel LLC. ซึ่งตั้งอยู่ที่เมือง Seabrook มลรัฐเท็กซัส มีกำลังการผลิต 35 ล้านแกลลอนต่อปี โดยคาดว่าจะการก่อสร้างจะแล้วเสร็จในช่วงต้นปี 2008 ระบบการผลิตของ Lurgi มีลักษณะเป็นกระบวนการปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน 2 ขั้นตอน แบบต่อเนื่อง โดยใช้โซเดียมเมทิลเลทเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้ภาวะบรรยากาศและอุณหภูมิควบคุม 60°C โดยสามารถใช้กับวัตถุดิบหลายชนิด อุปกรณ์ต่างๆ ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์และถังแยกกลีเซอริน 2 ชุด พร้อมระบบการหมุนเวียนเมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เจือปนอยู่ในชั้นกลีเซอรินจากถังแยกชุดที่สอง กลับมาเข้าทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์ชุดแรกได้ ทั้งนี้เพื่อประหยัดเมทานอลและสารเคมีที่ต้องใช้เพิ่มเติมสำหรับกลีเซอรินจากถังแยกชุดแรกจะเข้าสู่หอกลั่นระเหย เพื่อดึงเมทานอลส่วนเกินที่ยังเหลือจากปฏิกิริยา กลับมาใช้ได้อีกเช่นกัน และไบโอดีเซลที่ออกจากถังแยกชุดที่สอง จะผ่านการล้างน้ำเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ให้ได้ไบโอดีเซลที่บริสุทธิ์ ส่วนน้ำเสียที่ได้จากล้าง ซึ่งจะมีทั้งกลีเซอรินและเมทานอลปะปนอยู่ด้วย จะถูกส่งเข้าสู่หอกลั่นเมทานอลเดียวกันนี้ เพื่อระเหยเมทานอลกลับคืนอย่างสมบูรณ์ ส่วนกลีเซอรินที่เจือปนกับน้ำจากด้านล่างของหอกลั่น จะถูกส่งไปแยกน้ำออก

ด้วยระบบหอกลิ้นระเหยน้ำ เพื่อนำน้ำกลับมาใช้ในการล้างไบโอดีเซลได้ต่อไป ทำให้ระบบผลิตดังกล่าวมีน้ำเสียเกิดขึ้นน้อยมาก และกลีเซอรินที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ประมาณ 80-85% ตามมาตรฐาน BS 2621 ภาพประกอบที่ 2.2 และ 2.3 แสดงกระบวนการผลิตและระบบผลิตไบโอดีเซลที่ Lurgi พัฒนาขึ้นตามลำดับ โดยมีการจดสิทธิบัตรกระบวนการผลิตบางส่วนไว้ด้วย

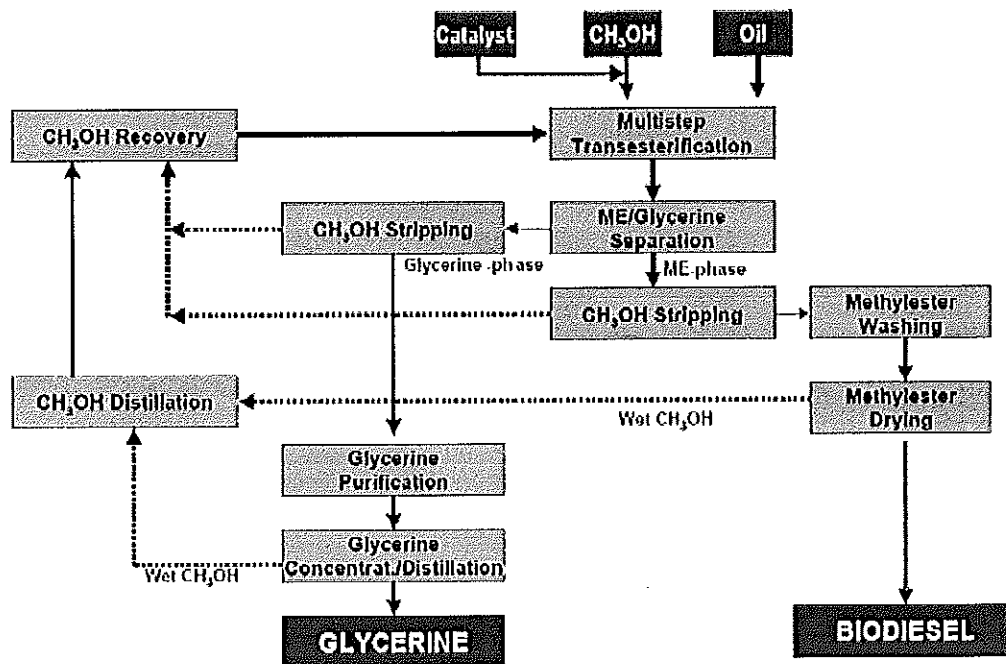


ภาพประกอบที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของ Lurgi  
(พนิตา และคณะ, 2551)



ภาพประกอบที่ 2.3 แผนผังระบบผลิตไบโอดีเซลที่ Lurgi พัฒนาขึ้นและจดสิทธิบัตร  
(พนิดา และคณะ, 2551)

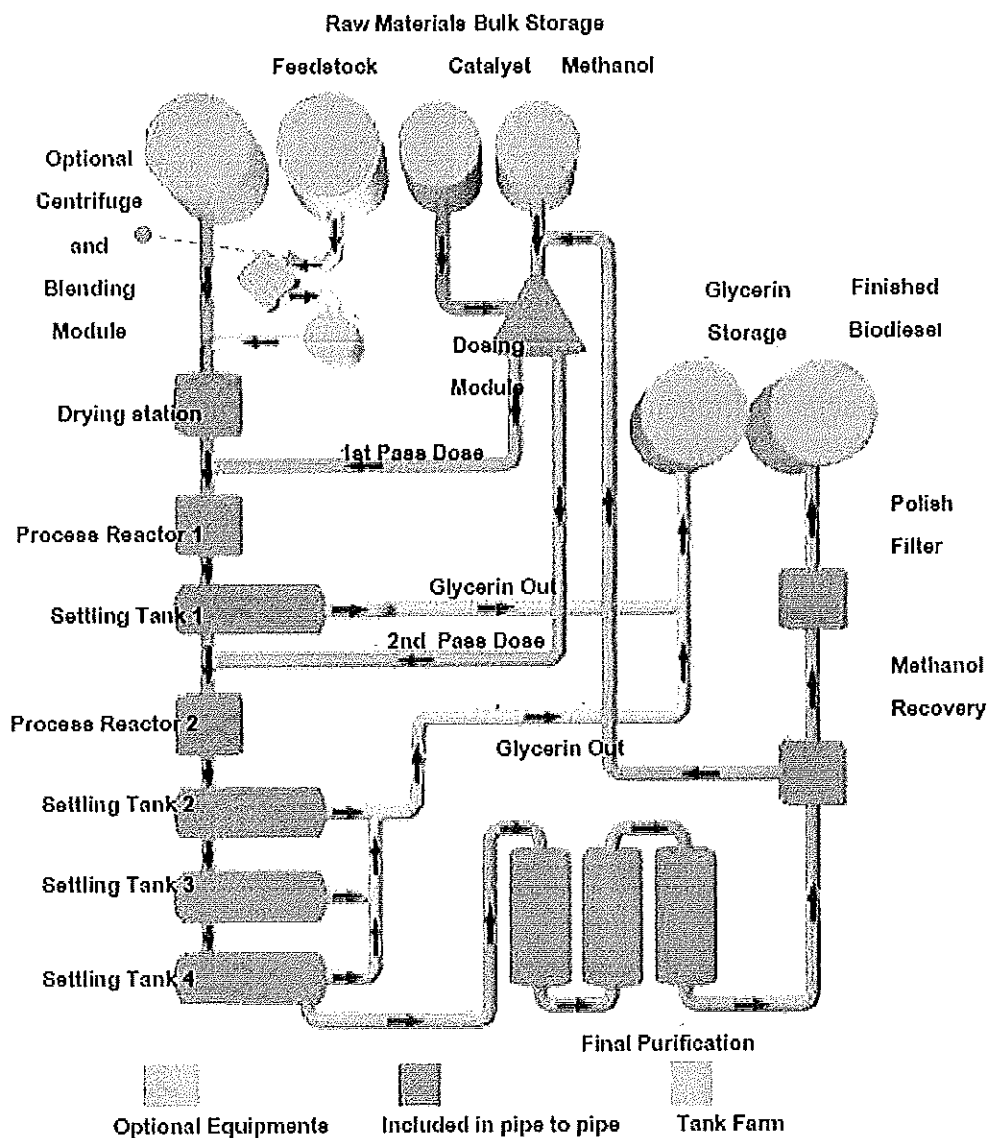
Desmet Ballestra Biodiesel Technology เป็นบริษัทที่มีความเชี่ยวชาญและเทคโนโลยี ด้านการผลิตน้ำมันพืชบริสุทธิ์ และไบโอดีเซลจากประเทศอิตาลี โดยมีแนวทางการผลิตไบโอดีเซลเป็นกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ริฟิเคชันแบบหลายขั้นตอนและต่อเนื่อง ภายใต้ภาวะบรรยากาศและอุณหภูมิควบคุมไม่สูง โดยมีการแยกกลีเซอรินออกหลังปฏิกิริยาในทุกขั้นตอน ดังแผนผังกระบวนการผลิตแสดงในภาพประกอบที่ 2.4 ซึ่งอุปกรณ์ได้ออกแบบให้มีขนาดที่เหมาะสม และมีระบบควบคุมการผลิตไม่ซับซ้อน



ภาพประกอบที่ 2.4 แผนผังกระบวนการผลิตของ Desmet Ballestra  
(พนิดา และคณะ, 2551)

Greenline Industries พัฒนาระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องของปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน 2 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.5 โดยใช้โซเดียมเมทิลเลตหรือโพแทสเซียมเมทิลเลตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้เป็นน้ำมันพืชหรือสัตว์ที่มีค่ากรดไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนักระบบผลิตประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ 2 ชุด เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาขั้นที่หนึ่งแล้ว ทำการแยกกลีเซอรินออกแล้วจึงเข้าทำปฏิกิริยาขั้นที่สอง หลังจากนั้นจึงส่งเข้าระบบถังแยกกลีเซอรินแบบ 3 ถังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกชั้นกลีเซอรินออกได้ดียิ่งขึ้น ไบโอดีเซลที่ได้จะถูกนำไปผ่านการทำให้บริสุทธิ์ขึ้น ด้วยระบบถังดูดซับสารแบบแลกเปลี่ยนไอออน (Active Ion Exchange Towers) ซึ่งได้ทำความร่วมมือกับ Rohm-Haas Corporation ในการพัฒนาระบบถังเรซินนี้ขึ้น โดยเรซินที่ใช้เป็นชนิด Amberlite ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกลางและปราศจากความเป็นพิษ จึงทำให้กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อนดังกล่าว ไม่ต้องใช้การล้างน้ำและไบโอดีเซลที่ได้ปราศจากน้ำเจือปนด้วย สำหรับสาร Amberlite นี้มีอายุการใช้งานได้ในอัตรา 250,000 แกลลอนของไบโอดีเซลต่อน้ำหนักเรซิน 1 ตัน และเนื่องจากไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อมจึงอาจใช้ในการกลบฝังหรือถมที่ดินได้เมื่อหมดอายุใช้งาน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าไม่มีของเสียจากระบบผลิตดังกล่าวเลย และให้ผลได้ของ

ผลิตภัณฑ์สูงถึง 98.5% นอกจากนี้ยังมีระบบแยกกลับเมทานอลส่วนเกินที่หลงเหลือในไบโอดีเซล หลังจากผ่านการดูซับสารจากถังไอออนแล้ว และกลั่นระเหยแยกเมทานอลด้วยสูญญากาศจากดีเซลอรีนด้วย โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบผลิตนี้ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะเป็นโมดูลเพื่อความสะดวกในการติดตั้งและขยายขนาดกำลังการผลิตได้ง่ายในอนาคต ซึ่งรองรับกำลังการผลิตในระหว่าง 3-100 ล้านแกลลอนต่อปี ตามมาตรฐาน ASTM D6751 นอกจากนี้ยังมีระบบเก็บรักษาไบโอดีเซลที่อุณหภูมิสูงกว่า 38 °F หรือใช้ก๊าซไนโตรเจนปกคลุมด้วย



ภาพประกอบที่ 2.5 แผนผังกระบวนการผลิตไบโอดีเซลของ Greenline Industries (พนิดา และคณะ, 2551)



**Benefuel Inc.** พัฒนาระบบผลิตไบโอดีเซลที่เป็นกระบวนการผลิตแบบปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous reaction) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดของแข็งที่มีสถานะเป็นกรด ทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์แบบ Fixed Bed Reactor ซึ่งทำให้กระบวนการผลิตนี้ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำล้างในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลหลังจากการแยกกลีเซอรินออกแล้ว สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแข็งที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้ ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย National Chemical Laboratory ที่เมือง Pune ในประเทศอินเดีย และสามารถใช้ได้กับวัตถุดิบน้ำมันที่มีค่ากรดไขมันอิสระสูงมากๆ หรือวัตถุดิบที่เป็นกรดไขมันได้ โดยไม่จำเป็นต้องผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติของวัตถุดิบน้ำมัน (Pretreated oil) ก่อนเข้ากระบวนการผลิต ซึ่งทำให้สามารถใช้กับวัตถุดิบที่หลากหลายชนิดได้มากกว่าระบบผลิตทั่วไปที่ต้องเน้นการควบคุมคุณสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันก่อนเข้ากระบวนการผลิตและระบบดังกล่าวยังสามารถพัฒนาเป็นกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องได้ง่าย โดยไม่ใช้ถังปฏิกรณ์แบบใบกวนที่ใช้กันอยู่ นอกจากนี้ กลีเซอรินที่เป็นผลพลอยได้ยังมีความบริสุทธิ์สูงถึง 98% ขึ้นไป และช่วยลดปัญหาการเกิดสบู่ในระหว่างทำปฏิกิริยาคั่ว โดยบริษัท Seymour BioFuels LLC. ซึ่งตั้งอยู่ที่เมือง Seymour มลรัฐอินเดียนา เป็นโรงงานตัวอย่างของระบบการผลิตไบโอดีเซลนี้ โดยยังอยู่ในระหว่างการก่อสร้าง มีกำลังการผลิตขนาด 10 ล้านแกลลอนต่อปี ซึ่งจะแล้วเสร็จประมาณปลายปี 2008

### 2.1.2 เทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยในปัจจุบัน เป็นกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม (Conventional process) โดยใช้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน และจากข้อกำหนดด้านมาตรฐานผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่ประกาศโดยกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ ปี พ.ศ. 2550 และไบโอดีเซลชุมชน ปี พ.ศ. 2549 นั้น จึงอาจพิจารณาให้การผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยแบ่งเป็น 2 ระดับด้วยเช่นกัน โดยโรงงานที่มีกำลังการผลิตขนาดใหญ่และมีการลงทุนสูง เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ผลิตขึ้น มีคุณสมบัติตามมาตรฐานประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน ใช้น้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลรอบสูง และจำหน่ายในสถานีบริการเชื้อเพลิง ในขณะที่ไบโอดีเซลชุมชนถูกจำกัดให้ใช้ได้กับเครื่องจักรกลทางการเกษตรเท่านั้น และไม่จำหน่ายในสถานีบริการเชื้อเพลิง

โรงงานไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ในประเทศไทย เป็นโรงงานที่มีกำลังการผลิตระหว่าง 10,000 ถึง 600,000 ลิตรต่อวันขึ้นไป เป็นกระบวนการผลิตด้วยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแบบสองครั้ง วัตถุดิบน้ำมันที่ใช้มักเป็นน้ำมันพืชใช้แล้ว หรือปาล์มสเตียร์น เนื่องจากน้ำมันทั้งสองประเภท มีค่ากรดไขมันอิสระต่ำ ทำให้ผลิตได้ง่ายกว่าการใช้ไขมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบ อย่างไรก็ตาม ยังมีบางโรงงานที่ใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบ การใช้น้ำมันปาล์มดิบ

เป็นวัตถุดิบจะมีปัญหาที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูงและเปลี่ยนแปลงเร็ว ในการผลิตไบโอดีเซล ต้องใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้น และมีปัญหาที่ต้องใช้เวลานานในการแยกกลีเซอรินออกจากไบโอดีเซล นอกเหนือจากที่ต้องเพิ่มขึ้นตอนการลดปริมาณกรดไขมันอิสระด้วยกระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน ก่อนเข้าสู่กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ในการผลิตนิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มากกว่าใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีราคาถูกกว่า การผลิตในเชิงพาณิชย์มีทั้งกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง เมื่อผ่านขั้นตอนการทำปฏิกิริยา แล้วจึงเข้าสู่การแยกกลีเซอรินที่ใช้การปล่อยให้แยกชั้น โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก ในระบบชุดล้างแยกหลายถังต่อเนื่องกัน ในบางโรงงานอาจมีระบบแยกระเหยกลับเพื่อนำเมทานอลจากส่วน กลีเซอรอลที่แยกออกไปแล้วกลับมาใช้ใหม่ด้วย จากนั้นจึงส่งไบโอดีเซลไปทำให้บริสุทธิ์ซึ่งมีทั้งแบบล้าง ด้วยน้ำ และแบบไม่ใช้น้ำล้างดังนี้

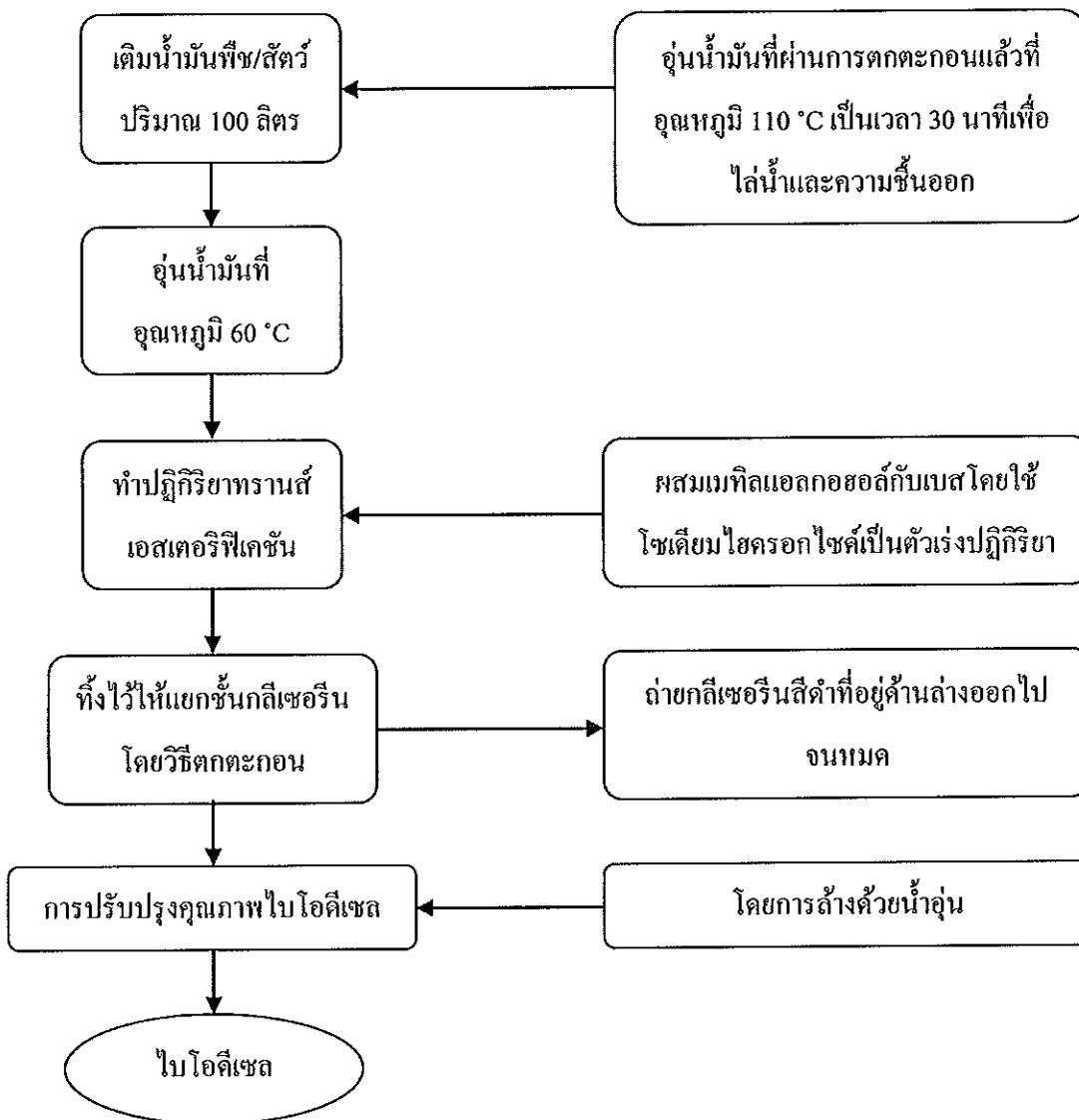
- ระบบล้างด้วยน้ำ ใช้น้ำอุณหภูมิประมาณ 50-60°C แล้วแยกน้ำล้างออก ซึ่งเป็นวิธีการทั่วไป โดยมักทำการล้างเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำที่ใช้ล้างต่อไบโอดีเซลอยู่ระหว่าง 1:1 จนถึง 3:1 จนกว่าสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลจะหมด หรือจนกว่าไบโอดีเซลจะมีสภาพเป็นกลาง หลังจากนั้นจึงนำไบโอดีเซลที่ล้างแล้วไปกำจัดน้ำที่ยังเจือปนอยู่ โดยให้ความร้อนเพื่อต้มให้น้ำระเหยออก หรือใช้ระบบการระเหยแบบสุญญากาศ จนกว่าไบโอดีเซลจะมีสภาพใส และปราศจากสิ่งเจือปน จึงผ่านเข้าระบบกรองหรือตกตะกอนก่อนเก็บเข้าถังเก็บผลิตภัณฑ์ และเก็บตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์

- ระบบไม่ใช้น้ำ ในปัจจุบันมีเพียง 2 แห่งเท่านั้น ที่ใช้ระบบนี้ คือ บริษัท กรีนเพาเวอร์ คอร์ปอเรชัน จำกัด ซึ่งหลังจากแยกกลีเซอรินออกด้วยถังตกตะกอนแล้วไบโอดีเซลชั้นบนจะถูกป้อนเข้าหอกลั่นระเหยเพื่อดึงเมทานอลส่วนเกินที่เจือปนอยู่กลับมาใช้ใหม่ หลังจากนั้นจึงกำจัดด่างและสารเคมีอื่นๆ โดยผ่านเข้าหอบรรจุสารดูดซับจำพวกแมกนีเซียมซิลิเกต แล้วจึงได้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลตามต้องการ อีกแห่งหนึ่งคือ บริษัท วีระสุวรรณ จำกัด ใช้เทคโนโลยีการกลั่นลำดับส่วนของโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมมาใช้ โดยหลังจากผ่านกระบวนการแยกกลีเซอรินแล้ว ไบโอดีเซลจะถูกเก็บเข้าถังเก็บเพื่อทำการระเหยเมทานอลออกหมดก่อน แล้วจึงส่งไบโอดีเซลเข้าหอกลั่นสุญญากาศ เพื่อกลั่น ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์และควมแน่นทางยอดหอ ซึ่งไบโอดีเซลที่ได้นี้จะมีความบริสุทธิ์สูงมาก โดยทั้งสองกระบวนการนี้ ปราศจากน้ำเสียจากระบบผลิต

ปัจจุบันมีโรงงานไบโอดีเซลขนาดใหญ่ที่ใช้เทคโนโลยีต่างประเทศ เกิดขึ้นในประเทศ อีก 2 โรงงาน กล่าวคือ บริษัท ไทยโอลีโอเคมี จำกัด เป็นบริษัทในเครือ บริษัท ปตท.เคมีคอล จำกัด (มหาชน) มีกำลังผลิตไบโอดีเซล 200,000 ตันต่อปี หรือ 600,000 ลิตรต่อวัน ทำการผลิตโดยใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบ นอกจากนั้นแล้วยังผลิต Fatty alcohols กำลังผลิต 100,000 ตัน

ต่อปี หรือ 300,000 ลิตรต่อวัน จากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม และได้ติดตั้งระบบกลั่นกลีเซอรินบริสุทธิ์ กำลังการผลิต 31,000 ตันต่อปี อีกโรงงานหนึ่งคือ บริษัทเพียวไบโอดีเซล เป็นบริษัทในเครือระของ เพียวรีฟายเออร์ จำกัด (มหาชน) กำลังผลิตไบโอดีเซล 100,000 ตันต่อปี จากน้ำมันปาล์มดิบ

โรงงานไบโอดีเซลชุมชน ระบบผลิตในระดับนี้ ไม่มีความซับซ้อนมากนัก โดยมากเป็นเครื่องผลิตขนาดเล็กที่มีกำลังผลิตประมาณ 100 – 1,000 ลิตรต่อวัน และเป็นกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแบบไม่ต่อเนื่องขั้นตอนเดียว โดยมากใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว เป็นวัตถุดิบ ได้จากการรวบรวมเองหรือรับซื้อตามชุมชนซึ่งมักจะมีตะกอนเศษอาหารและน้ำเจือปนอยู่มาก จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการตกตะกอนออก เพื่อไม่ให้สิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ไปขัดขวางปฏิกิริยา และเนื่องจากไบโอดีเซลชุมชนมีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมและช่วยเหลือภาคการเกษตร ดังนั้นมาตรฐานต่างๆ ของผลิตภัณฑ์จึงมีการวัดคุณสมบัติที่น้อยกว่า และผ่อนปรนมากกว่า เพื่อให้สามารถผลิตไบโอดีเซลใช้ได้เองในราคาถูก และอุปกรณ์เครื่องผลิตไม่ซับซ้อนมากนัก โดยเทคโนโลยีของเครื่องผลิต ส่วนใหญ่ได้รับการส่งเสริมจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน ตามโครงการไบโอดีเซลชุมชน 72 แห่ง และโครงการพึ่งพาตนเองด้านพลังงานด้วยไบโอดีเซลชุมชนของพพ. ซึ่งส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นเครื่องชุดสำเร็จ มีราคาไม่สูง มีศักยภาพเพียงพอสำหรับการผลิตไบโอดีเซลเพื่อใช้กับเครื่องจักรกลทางการเกษตรได้ กระบวนการผลิตดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.6 แผนผังกระบวนการผลิตของเครื่องไบโอดีเซลชุมชน

(พนิดา และคณะ, 2551)

## 2.2 คุณสมบัติไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลจะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่คล้ายกับน้ำมันดีเซลปกติ แต่ให้การเผาไหม้ที่สะอาดกว่าน้ำมันดีเซล ไอเสีย มีคุณภาพดีกว่า ทั้งนี้เพราะมีออกซิเจนอยู่ในไบโอดีเซล ใ้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซลปกติ จึงมีคาร์บอนมอนนอกไซด์น้อยกว่า และเนื่องจากไม่มีกำมะถันในไบโอดีเซล จึงไม่มีปัญหาเรื่องสารซัลเฟต นอกจากนี้ยังมีเขม่าคาร์บอนน้อยจึงไม่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสียได้ และคุณสมบัติที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ เป็นสารหล่อลื่นช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ได้ (ทรงธรรม, 2551)

ข้อกำหนดมาตรฐานทางคุณภาพของไบโอดีเซลถูกกำหนดโดยสถาบันทางมาตรฐานวิทยาศาสตร์ชั้นนำของโลก ตัวอย่างเช่น ปัจจุบันประเทศเยอรมนีได้กำหนดมาตรฐาน DIN V 51606 มักใช้อ้างอิงถึงไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของน้ำมัน rapeseed ในประเทศเยอรมัน และยังถูกนำมาเทียบเคียงกับมาตรฐานไบโอดีเซลในกลุ่มสหภาพยุโรป โดยเฉพาะในประเทศ ออสเตรีย อิตาลี ประเทศสหรัฐอเมริกาใช้มาตรฐาน ASTM D 6751 ซึ่งระบุรายละเอียดขอบเขตทางคุณภาพของไบโอดีเซล ที่ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C หรือที่ความถ่วงจำเพาะ ณ อุณหภูมิ 60 °C ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic viscosity) ณ อุณหภูมิ 40 °C เป็นต้น รวมถึงคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ส่วนประกอบทางเคมีอินทรีย์ นอกจากนี้ยังใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงในการศึกษาและผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันในกลุ่มประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และในเอกสารรายงานเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล เดือนสิงหาคม 2002 – มกราคม 2004 โดย National Renewable Energy Laboratory ประเทศแคนาดา ได้แสดงคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลโดยแสดงมาตรฐาน ASTM D 6751 ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดข้อกำหนดทางคุณภาพไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D 6751

| Property                                    | Method           | Limits                                       | Units              |
|---|------------------|--|--------------------|
| Flash point, closed cup                     | D 93             | 130 min                                      | $^{\circ}\text{C}$ |
| Water and sediment                          | D 2709           | 0.050 max                                    | %volume            |
| Kinematics viscosity, 40 $^{\circ}\text{C}$ | D 445            | 1.9-0.6                                      | mm <sup>2</sup> /s |
| Sulfated ash                                | D 874            | 0.020 max                                    | wt.%               |
| Total sulfur                                | D 5453           | 0.05 max                                     | wt.%               |
| Copper strip corrosion                      | D 130            | No.3 max                                     |                    |
| Cetane number                               | D 613            | 47 min                                       |                    |
| Cloud point                                 | D 2500           | Report to customer                           | $^{\circ}\text{C}$ |
| Carbon residue                              | D 4530           | 0.050 max                                    | wt.%               |
| Acid number                                 | D 664            | 0.8 max                                      | Mg KOH/g           |
| Free glycerin                               | D 6584           | 0.020  | wt.%               |
| Total glycerin                              | D 6584           | 0.240  | wt.%               |
| Phosphorus                                  | D 4951           | 0.0010                                       | wt.%               |
| wt.% vacuum distillation end point          | D 1160           | 360 $^{\circ}\text{C}$ max, at 90% distilled | $^{\circ}\text{C}$ |
| Storage stability                           | To be determined | To be determined                             | To be determined   |

นอกจากมาตรการทางด้านคุณภาพของต่างประเทศแล้วนั้น สำหรับประเทศไทยโดยประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน ได้กำหนดลักษณะและคุณสมบัติของไบโอดีเซลของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ณ วันที่ 11 กรกฎาคม 2548 โดยรายละเอียดด้านคุณสมบัติแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรด  
ไขมัน พ.ศ. 2548

| รายการ | ข้อกำหนด  | อัตราสูงต่ำ                           | วิธีทดสอบ <sup>1/</sup> |
|--------|---|---------------------------------------|-------------------------|
| 1      | เมทิลเอสเตอร์ ร้อยละโดยน้ำหนัก<br>(Methyl Ester, % Wt.)   | ไม่ต่ำกว่า 96.5                       | EN 14103                |
| 2      | ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C กิโลกรัม/<br>ลูกบาศก์เมตร (Density at 15 °C, kg/m <sup>3</sup> )                               | ไม่ต่ำกว่า 860 และ ไม่<br>สูงกว่า 900 | ASTM D1298              |
| 3      | ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C เซนติสโตกส์<br>(Viscosity at 40 °C, cSt)  | ไม่ต่ำกว่า 3.5 และ ไม่<br>สูงกว่า 5.0 | ASTM D445               |
| 4      | จุดวาบไฟ องศาเซลเซียส<br>(Flash Point, °C)  | ไม่ต่ำกว่า 120                        | ASTM D93                |
| 5      | กำมะถัน ร้อยละโดยน้ำหนัก<br>(Sulphur, % Wt.)  | ไม่สูงกว่า 0.0010                     | ASTM D2622              |
| 6      | กากถ่าน ร้อยละโดยน้ำหนัก<br>(ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น)<br>(Carbon Residue, on 10% distillation residue,<br>%Wt.) | ไม่สูงกว่า 0.3                        | ASTM D4530              |
| 7      | จำนวนซีเทน<br>(Cetane Number)   | ไม่ต่ำกว่า 51                         | ASTM D613               |
| 8      | เถ้าซัลเฟต ร้อยละโดยน้ำหนัก<br>(Sulfated Ash, %Wt.)   | ไม่สูงกว่า 0.02                       | ASTM D874               |
| 9      | น้ำ ร้อยละโดยน้ำหนัก<br>(Water, %Wt.)   | ไม่สูงกว่า 0.050                      | ASTM D2709              |
| 10     | สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด ร้อยละโดยน้ำหนัก<br>(Total Contaminate, %Wt.)   | ไม่สูงกว่า 0.0024                     | ASTM D5452              |
| 11     | การกัดกร่อนแผ่นทองแดง<br>(Copper Strip Corrosion)   | ไม่สูงกว่า หมายเลข 1                  | ASTM D130               |

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดใน  
รายละเอียดแนบท้ายนี้

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548 (ต่อ)

| รายการ | ข้อกำหนด   | อัตราสูงต่ำ     | วิธีทดสอบ <sup>1/</sup> |
|--------|--|-----------------|-------------------------|
| 12     | เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C ชั่วโมง<br>(Oxidation Stability at 110 °C, hours) | ไม่ต่ำกว่า 6    | EN 14112                |
| 13     | ค่าความเป็นกรด มิลลิกรัม โพแตสเซียม ไฮดรอกไซด์/กรัม (Acid Value, mg KOH/g)                                 | ไม่สูงกว่า 0.50 | ASTM D664               |
| 14     | ค่าไอโอดีน กรัม ไอโอดีน/100 กรัม<br>(Iodine Value, g Iodine/100 g)   | ไม่สูงกว่า 120  | EN 14111                |
| 15     | กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ร้อยละ โดยน้ำหนัก (Linolenic Acid Methyl Ester, %Wt.)                            | ไม่สูงกว่า 12.0 | EN 14103                |
| 16     | เมทานอล ร้อยละ โดยน้ำหนัก<br>(Methanol, %Wt.)  | ไม่สูงกว่า 0.20 | EN 14110                |
| 17     | โมนอกลิเซอไรด์ ร้อยละ โดยน้ำหนัก<br>(Monoglyceride, %Wt.)  | ไม่สูงกว่า 0.80 | EN14105                 |
| 18     | ไดกลีเซอไรด์ ร้อยละ โดยน้ำหนัก<br>(Diglyceride, %Wt.)  | ไม่สูงกว่า 0.20 | EN 14105                |
| 19     | ไตรกลีเซอไรด์ ร้อยละ โดยน้ำหนัก<br>(Triglyceride, %Wt.)  | ไม่สูงกว่า 0.20 | EN 14105                |
| 20     | กลีเซอรินอิสระ ร้อยละ โดยน้ำหนัก<br>(Free glycerin, %Wt.)  | ไม่สูงกว่า 0.02 | EN 14105                |
| 21     | กลีเซอรินทั้งหมด ร้อยละ โดยน้ำหนัก<br>(Total glycerin, %Wt.)   | ไม่สูงกว่า 0.25 | EN 14105                |

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้



ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2548 (ต่อ)

| รายการ | ข้อกำหนด  | อัตราสูงต่ำ   | วิธีทดสอบ <sup>1/</sup>  |
|--------|---|---|--------------------------|
| 22     | โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม)<br>มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group I metals (Na+K),<br>mg/kg)    | ไม่สูงกว่า 5.0  | EN 14108 และ<br>EN 14109 |
|        | โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)<br>มิลลิกรัม/กิโลกรัม (Group II metals (Ca+Mg),<br>mg/kg) | ไม่สูงกว่า 5.0  | prEN 14538               |
| 23     | ฟอสฟอรัส ร้อยละโดยน้ำหนัก<br>(Phosphorus, %Wt.)   | ไม่สูงกว่า 0.0010   | ASTM D4951               |
| 24     | สารเติมแต่ง (ถ้ามี)<br>(Additive)   | ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบ<br>จากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน |                          |

หมายเหตุ 1/ วิธีทดสอบอาจใช้วิธีอื่นที่เทียบเท่าก็ได้ แต่ในกรณีที่มีข้อโต้แย้งให้ใช้วิธีที่กำหนดในรายละเอียดแนบท้ายนี้

### 2.3 ผลไบโอดีเซลต่อเครื่องยนต์

การใช้ไบโอดีเซลเป็นผลดีต่อเครื่องยนต์ดีเซลและช่วยในการยืดอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ได้ เพราะ ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติในการหล่อลื่นดีกว่าเชื้อเพลิงดีเซลสามารถใช้แทนเชื้อเพลิงดีเซลได้ 100% โดยไม่มีความเปลี่ยนแปลงในด้านกำลังของเครื่องยนต์ ความสามารถในการติดเครื่องยนต์และกำลังการหมุนของเครื่องไบโอดีเซลให้พลังงานจากค่าซีเทนที่สูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซล (ซีเทน 53 หรือมากกว่าเทียบกับซีเทน 47 สำหรับดีเซลเครื่องยนต์หมุนเร็ว) มีความหนืดใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงดีเซล มีความคงตัวที่ดี มีค่าจุดวาบไฟสูงกว่าเชื้อเพลิงดีเซลมาก (167 เทียบกับ >52 องศาเซลเซียส) จึงมีความปลอดภัยในการขนส่งและเก็บรักษา โดยไบโอดีเซลมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นเป็นเยี่ยม ผนอมรักษาเครื่องยนต์ ลดการเสียดสีของโลหะในเครื่องยนต์ได้ดีกว่าการใช้เชื้อเพลิงดีเซล โดยพบรายงานจากประเทศมาเลเซียกล่าวว่าการใช้ไบโอดีเซลแม้เพียง 5% ก็ลดการเสียดสีระหว่างโลหะในระบบได้อย่างมีนัยสำคัญเทียบกับการใช้แต่เพียงเชื้อเพลิงดีเซล การใช้ไบโอดีเซลหล่อลื่นเครื่องยนต์สามารถแทนที่หัวเชื้อผสมเชื้อเพลิงดีเซลได้ โดย

สามารถผลิตได้เองในประเทศไทย ไบโอดีเซลใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกชนิดทั้งรอบหมุนเร็ว และรอบหมุนช้าได้ทันทีทันใด เมื่อใช้งานในประเทศไทย (อุณหภูมิกลางวัน 15-40°C) จะใช้ในอัตราส่วนเท่าใดก็ได้ โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงชิ้นส่วนเครื่องยนต์ การใช้ไบโอดีเซล 100% ในเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วจะสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงมากกว่าเชื้อเพลิงดีเซลประมาณ 3% (ทรงธรรม, 2551)

## 2.4 การตกจม

การตกจมหรือการตกตะกอน (Sedimentation) คือการแยกของเหลวที่ไม่ผสมกันออกจากกัน หรืออาจเป็นการแยกของแข็งออกจากของเหลวโดยการปล่อยให้เข้าสู่สภาพสมดุลภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก ดังนั้นวัสดุที่หนักกว่าก็จะตกตะกอนออกมาก่อน โดยการกักของเหลวไว้ระยะเวลาหนึ่งในถังตกจมจนกระทั่งตะกอนต่างๆ สามารถจมตัวด้วยแรงดึงดูดของโลกลงสู่ก้นถังที่ซึ่งตะกอนที่เข้มข้นนี้จะถูกแยกออกพร้อมด้วยของเหลวบางส่วนในคอนล่าง

การตกตะกอนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ความหนาแน่นของของเหลว ความหนืดของของเหลว แรงดึงดูดระหว่างอนุภาค และความเข้มข้นของอนุภาคในของเหลว

### 2.4.1 ประเภทของการตกจม

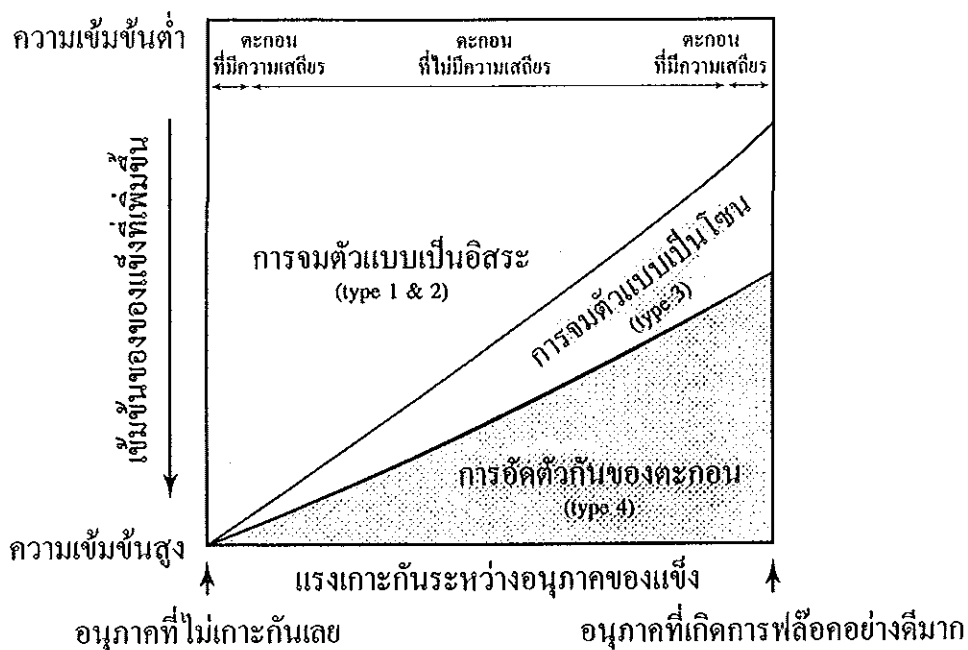
การจมตัวของตะกอนในของเหลวแบ่งเป็น 4 ประเภท ตามความเข้มข้นและความโน้มเอียงของตะกอนที่จะจับตัวกัน (หรือที่เรียกว่าการเกาะกันของอนุภาค, Particle coherence) ดังภาพประกอบที่ 2.7

การจมตัวประเภทที่ 1 และ 2 นั้นจะเน้นการที่ทำให้ของเหลวมีความใส เรียกว่า ‘การทำใส’ เพราะเป็นการจมตัวของตะกอนที่เกิดขึ้นในของเหลวที่มีความเข้มข้นไม่สูงนัก หรือตะกอนแต่ละตัวจะสามารถจมตัวลงได้อิสระ ดังนั้นการจมตัวประเภทนี้จึงถูกจัดอยู่ในย่าน ‘การจมตัวอย่างเป็นอิสระ’ ไปตามเวลาได้ เช่น ถ้าแรงเกาะกันมีค่าปานกลาง ตะกอนก็อาจเกิดได้ทั้งการรวมกลุ่ม (Flocculation) และการแตกกลุ่ม (Deflocculation) ตามผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยอื่นที่อยู่รอบข้าง จึงเรียกว่าเป็น ‘ตะกอนที่ไม่มีความเสถียร’ แต่ถ้าแรงเกาะกันมีค่าเป็นศูนย์ หรือมีค่าค่อนข้างสูง ตะกอนจะมีคุณลักษณะที่ค่อนข้างคงที่ จึงเรียกว่าเป็น ‘ตะกอนที่มีความเสถียร’

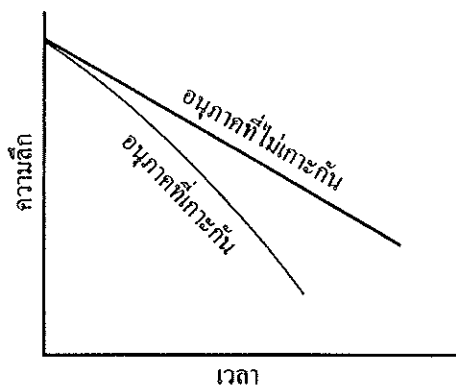
ภาพประกอบที่ 2.8 (ก) แสดงความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity) ในการตกตะกอนของอนุภาคที่ไม่เกาะกลุ่มและอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันเป็นฟล็อก (Flocs) โดยอนุภาคที่เกาะกลุ่มเป็นฟล็อก จะตกตะกอนได้ช้ากว่าและความเร็วไม่ค่อยจะคงที่

เมื่อความเข้มข้นของตะกอนมีค่าสูงขึ้น อนุภาคแต่ละตัวจะไม่สามารถจมตัวได้อย่างอิสระ เนื่องจากผลกระทบของตะกอนที่อยู่ข้างเคียง ทำให้มันเกิดอุปสรรคในการจมตัว

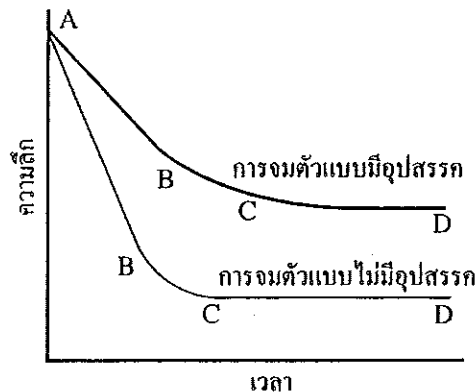
ภาพประกอบที่ 2.8 (ข) แสดงความเร็วในการจมตัวอย่างอิสระ และการจมตัวอย่างมีอุปสรรค (hindered settling) ช่วง AB คือความเร็วในการจมตัว โดยตะกอนที่จมตัวอย่างมีอุปสรรคจะมีความเร็วช้ากว่าความเร็วสุดท้ายของตัวเอง, BC เป็นช่วงที่ตะกอนเข้าสู่สภาวะไซโนและมีความเร่งลดลง, CD เป็นช่วงที่ตะกอนเกิดการอัดตัวเพราะตะกอนมีความเข้มข้นสูงมาก การจมตัวของตะกอนอาจจะมีมากกว่า 1 ประเภท ภาพประกอบที่ 2.7 แสดงการแบ่งชนิดของการจมตัวและประเภทของการจมตัว ตามความเข้มข้นและแรงเกาะกันระหว่างอนุภาค



ภาพประกอบที่ 2.7 แสดงการแบ่งชนิดของการจมตัวของตะกอนตามความเข้มข้นของสารละลายและแรงเกาะกันระหว่างอนุภาค (สาวิตรี, 2546)



(ก) ความเร็วในการจมตัวของอนุภาคที่ไม่มีอุปสรรค



(ข) ความเร็วในการจมตัว 2 แบบ

ภาพประกอบที่ 2.8 แสดงพฤติกรรมของการจมตัวของอนุภาค (ก) ความเร็วในการจมตัวแบบไม่มีอุปสรรค (ข) ความเร็วในการจมตัว 2 แบบ (สาวิตรี, 2546)

- โดย
- AB - อนุภาคจมตัวลงด้วยความเร็วสุดท้าย ถ้าเป็นการจมตัวแบบไม่มีอุปสรรค, หรือ อนุภาคจมตัวลงด้วยความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วสุดท้าย ถ้าเป็นการจมตัวแบบมีอุปสรรค
  - BC - อนุภาคเข้าสู่สภาวะนิ่งและมีความเร่งลดลง
  - CD - การอัดตัวกันของอนุภาคที่ตกตะกอนแล้ว

#### การจมตัวประเภทที่ 1 (การทำไอเซนิกที่หนึ่ง)

การจมตัวประเภทนี้จะพบได้ในของเหลวที่มีความเข้มข้นของตะกอนไม่สูง, ในตะกอนที่มีความเสถียร, หรือในกรณีที่ไม่มีความเกาะระหว่างกันและกันของสารแขวนลอย ตะกอนที่สามารถจมตัวลงตามลำพังได้เองอย่างอิสระ (Free settling) โดยไม่ได้รับผลกระทบจากตะกอนอื่นๆ ที่อยู่ข้างเคียง จะสามารถจมตัวลงด้วยความเร็วที่สูงได้ ตัวอย่างเช่น การจมตัวของเม็ดทราย เป็นต้น และถ้าอนุภาคของแข็งนั้นเป็นชนิดที่ไม่มีเกาะกันทั้งหมด กล่าวคือ อนุภาคนั้นเป็นอิสระในตัวเองโดยไม่มีแรงเกาะระหว่างกันและกันเลย (Totally discrete) ทำให้มันมีการแยกตัวอย่างสมบูรณ์ออกจากอนุภาคที่อยู่รอบข้าง มันจึงเป็นตะกอนที่มีความเสถียรสูงมาก เช่น อนุภาคของแร่ที่มีขนาดใหญ่กว่า 20 mm, และผลึกของเกลือ เป็นต้น

#### การจมตัวประเภทที่ 2 (การทำไอเซนิกที่สอง)

การจมตัวประเภทนี้จะพบในของเหลวที่มีความเข้มข้นของตะกอนไม่สูงมากนัก และตะกอนมีลักษณะเบา จึงต้องจับตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ (อาจมีการเติมสารเร่งการเกิด

ตะกอน เช่น Flocculating agent) เพื่อให้มีน้ำหนักรวมเพิ่มขึ้นจนตะกอนสามารถจมตัวลงได้อย่างอิสระ แต่ตะกอนที่ได้นี้จะมีความเสถียรหรือไม่นั้น จะขึ้นอยู่กับขนาดของแรงเกาะกันของอนุภาคด้วย ถ้าเป็นตะกอนที่มีความเสถียรมากแสดงว่าอนุภาคจะมีการเกาะกลุ่มกันอย่างดีมากจนเป็น Flocculent particle ตัวอย่างเช่น อนุภาคของแร่ที่มีขนาดเล็กกว่า 20 mm, ไฮดรอกไซด์ของโลหะ, ตะกอนทางเคมี (Chemical precipitate) และตะกอนทางชีวภาพ (Biological precipitate)

#### การจมตัวประเภทที่ 3 (การจมตัวแบบเป็น โซน)

เกิดเมื่อความเข้มข้นของตะกอนค่อนข้างสูง ตะกอนจึงอยู่ชิดกัน และถ้าอนุภาคแต่ละตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน มันจะรวมตัวกันกลายเป็นฟล็อก และส่งผลกระทบต่ออัตราการตกตะกอนของอนุภาคที่อยู่ข้างเคียง อนุภาคทั้งหลายจึงเกิดการจับตัวและพากันจมตัวลงมาพร้อมกันจนเกิดเป็นรอยแบ่งแยกที่เห็นได้ชัดเจนระหว่างชั้นของเหลวใสตอนบนและชั้นตะกอนตอนล่างซึ่งจะยุบตัวลงไปเรื่อย ๆ จึงเรียกการจมตัวแบบนี้ว่า ‘การจมตัวแบบเป็น โซน (Zone settling)’ โดยจะสังเกตเห็นพฤติกรรมของมันที่แตกต่างจากการจมตัวของสองประเภทแรกได้อย่างเด่นชัดในหลอดทดลองเพราะรอยแยก (ระหว่างชั้นของเหลวใสและตะกอน) จะเคลื่อนที่จากข้างบนลงมาข้างล่าง แทนที่จะเคลื่อนที่จากข้างล่างขึ้นไปข้างบน

#### การจมตัวประเภทที่ 4 (โซนของการอัดตัว)

การจมตัวประเภทนี้จะเกิดเมื่อความเข้มข้นตะกอนสูงมากจนตะกอนเกิดการอัดตัวกัน แต่อย่างไรก็ตาม ตะกอนก็ยังคงสามารถจมตัวลงมาได้เมื่อเปรียบเทียบกับของเหลว และการสะสมตัวของตะกอนที่ก้นถังจะเกิดเป็นแรงกดเนื่องจากน้ำหนักของตัวตะกอนเอง ทำให้ชั้นของตะกอนมีการอัดตัวกันแน่นมากขึ้นจนมีปริมาตรน้อยลง การตกตะกอนชนิดนี้มีความสำคัญในกระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของตะกอน (Thickening) เพื่อลดปริมาตรของตะกอน

สปูเป็นสารผสมจากเกลือ โซเดียมหรือเกลือ โปแตสเซียมและกรดไขมันจึงทำให้สปูมีคุณสมบัติของความมีขี้และไม่ขี้ จากคุณสมบัติความมีขี้ของสปูจึงเป็นไปได้ว่าสปูจะสามารถตกจมลงมาพร้อมกับกลีเซอรอลซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติของความมีขี้และมีความหนาแน่นมากกว่าไบโอดีเซล ดังนั้นกระบวนการแยกกลีเซอรอลจึงเป็นกระบวนการที่มีแนวโน้มที่จะสามารถแยกสปูได้

#### **2.4.2 การแยกกลีเซอรอล**

การแยกกลีเซอรอลใช้หลักการของความแตกต่างของความมีขี้ของของเหลวและความหนาแน่นที่แตกต่างกันของวัสดุ กลีเซอรอลและไบโอดีเซล ซึ่งมีความหนาแน่นประมาณ 1.05 กรัม/มล. และ 0.88 กรัม/มล. ตามลำดับ โดยความหนาแน่นของวัสดุกลีเซอรอลขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำ เมทานอลและตัวเร่งปฏิกิริยาที่มี อัตราการแยกขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น การกวนผสม

หากมีการกวนผสมในขณะที่ทำปฏิกิริยาในถังปฏิกรณ์เร็วจะทำให้กลีเซอรอลกระจายตัวอยู่ในไบโอดีเซลได้มากทำให้ต้องใช้เวลาในการรวมตัวเพื่อตกกวมนานขึ้น ดังนั้นควรมีการกวนอย่างช้าๆ ในถังปฏิกรณ์ และ ค่า pH ที่เป็นเข้าใกล้ความเป็นกลางจะทำให้กลีเซอรอลรวมตัวกันได้เร็วขึ้น สำหรับวิธีการที่ใช้ในการแยกกลีเซอรอลมีดังนี้

1) ใช้การตกจมใน Decanter วิธีนี้ใช้เพียงแรงโน้มถ่วงของโลกช่วยให้เกิดการแยกชั้นของของเหลวทั้งสองวัฏภาค มีข้อดีตรงที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการน้อย แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินการมาก Decanter ที่ดีควรมีทรงสูงและแคบโดยควรมีสัดส่วนของความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ในช่วง 5 ถึง 10 อุณหภูมิใน Decanter มีผลต่อการแยก เนื่องจากอุณหภูมิจะส่งผลต่อความสามารถในการละลายของแอลกอฮอล์ในทั้งสองวัฏภาคและความหนืดของของเหลว ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้จึงไม่ควรสูงเกินไปเนื่องจากจะทำให้แอลกอฮอล์ระเหยเป็นไอซึ่งจะไปจำกัดการไหลของเอสเทอร์ทางด้านบน แต่ก็ไม่ควรใช้อุณหภูมิต่ำเกินไปเนื่องจากจะทำให้ความหนืดของของเหลวต่ำลงจึงทำให้การแยกเกิดได้ช้าลง

2) การเหวี่ยงแยก (Centrifuge) เป็นการสร้างแรงโน้มถ่วงเทียมด้วยการหมุนที่ความเร็วรอบสูงทำให้เกิดการแยกวัฏภาค การแยกด้วยวิธีนี้ใช้เวลาน้อยและมีประสิทธิภาพดี แต่มีข้อเสียคือมีค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์สูง และต้องการการบำรุงรักษาที่ดี

3) ไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclone) เป็นอุปกรณ์ใหม่ที่น่าสนใจสำหรับการผลิตไบโอดีเซล มีลักษณะเป็นทรงกรวยคว่ำให้หลักการคล้ายกับการเหวี่ยงแยกของเหลวที่มีน้ำหนักมากจะถูกเหวี่ยงไปยังผนังลงมาทางด้านล่าง ส่วนของเหลวที่มีน้ำหนักเบากว่าจะหมุนเหวี่ยงอยู่ตรงกลางขึ้นไปทางด้านบน อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังอยู่ในขั้นทดลองยังไม่ได้นำมาใช้ดำเนินการจริง (Gerpen, 2004)

## 2.5 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับคือกระบวนการที่ก๊าซหรือของเหลวเกิดการยึดเกาะหรือรวมตัวกัน ลงบนพื้นผิวตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งเป็นของแข็งพรุนที่มีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิวมาก โมเลกุลที่เข้ายึดเกาะเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ โดยทั่วไปแรงที่ทำให้เกิดการดูดซับจะอ่อนกว่าพันธะทางเคมี และจากการเพิ่มอุณหภูมิ ลดความดัน หรือการลดความเข้มข้นในของเหลวทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถหลุดออกมาจากตัวดูดซับได้ เรียกว่ากระบวนการคายซับ (Desorption) หรือขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่ง การดูดซับเป็นเทคโนโลยีการแยกสารอีกแบบหนึ่งถูกนำมาใช้เพื่อแยกสารป้อนที่เป็นสารผสมให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ซึ่งเป็นการแยกแบบทำให้บริสุทธิ์ (Purification) หรือสามารถแยกแบบบัลค์ (Bulk separation) ก็ได้

### 2.5.1 ตัวดูดซับและกระบวนการดูดซับ

ตัวดูดซับเป็นของแข็งพรุนที่มีขนาดเล็ก อาจมีลักษณะทรงกลมคล้ายลูกบิด หรือเป็นเม็ดเล็กที่มีรูปร่างไม่แน่นอนก็ได้ ลักษณะเด่นของตัวดูดซับต้องมีความพรุนสูง เพื่อให้ทั้งพื้นผิวและปริมาตรภายในรูพรุนมีค่าสูง การดูดซับจะเกิดขึ้นบริเวณผนังของรูพรุน โดยการดูดซับจะเกิดในตำแหน่งเฉพาะเจาะจงหรือไม่เจาะจงก็ได้ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของการดูดซับ การดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากหลายปัจจัยเช่น ความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุล รูปร่างโมเลกุล และความมีขี้วน นอกจากนี้ระบบดูดซับยังขึ้นกับปัจจัยอื่น เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความปั่นป่วนของระบบซึ่งจะส่งผลต่อการแพร่ของสารผ่านฟิล์มของไหลเพื่อเข้าสู่รูพรุนภายใน

### 2.5.2 หลักการดูดซับ

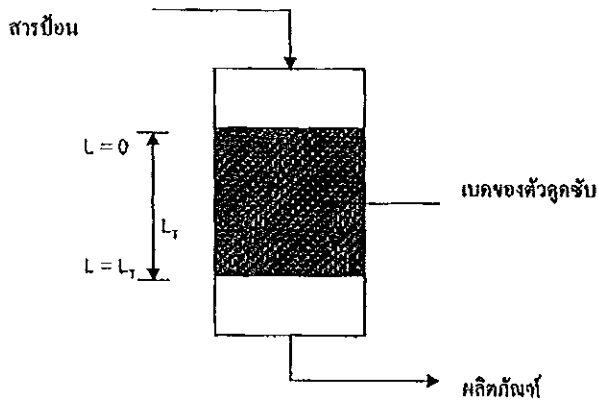
การดูดซับเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างผิวของแข็งพรุนกับ โมเลกุลตัวถูกดูดซับที่มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลของของไหลเอง ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลจากเฟสของไหลไปยังเฟสของแข็ง ในที่นี้จะพิจารณาการดูดซับแบบง่ายที่เกิดกับเบดนิ่ง (Fixed bed) ของตัวดูดซับเป็นหลัก และอัตราการไหลของของไหลเข้าหอดูดซับมีค่าคงที่และต่อเนื่องภาพประกอบที่ 2.9 และเมื่อตัวดูดซับเข้าใกล้สภาวะอิ่มตัวแล้วจะหยุดการทำงานของระบบ จากนั้นตัวดูดซับจะถูกนำไปฟื้นฟูสภาพ ซึ่งหลักการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการดูดซับแบบอื่นได้ จากภาพประกอบที่ 2.9 จะเห็นว่า ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของไหลและความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของแข็ง จะเปลี่ยนแปลงตามเวลาและระยะทางที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านเบด ถ้าตัวดูดซับในหอดูดซับเป็นวัสดุใหม่และพิจารณาเวลาเริ่มต้นแล้ว การถ่ายโอนมวลส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นทันทีที่ตำแหน่งบนสุดของเบดเมื่อมีการสัมผัสระหว่างของไหลกับตัวดูดซับ ทำให้ความเข้มข้นของไหลลดลงทันทีและจะลดลงเป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลเมื่อเทียบกับระยะทางที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านเบด โดยอาจลดลงจนเป็นศูนย์ก่อนถึงทางออกเบดก็ได้ โปรไฟล์ความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้นสามารถแสดงดังเส้นกราฟ  $t_1$  ในภาพประกอบที่ 2.10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นในของไหลต่อความเข้มข้นเริ่มต้นในสารป้อน ( $c/c_0$ ) เทียบกับระยะทางที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านเบด ( $L$ ) โดยที่  $L_T$  คือความสูงทั้งหมดของเบด และเป็นตำแหน่งที่ทางออกด้านล่างสุดของเบด ซึ่งที่เวลา  $t_1$  นั้นยังไม่มีส่วนใดๆ ในเบดเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวเลย เมื่อเวลาผ่านไปและของไหลยังคงไหลเข้าหอดูดซับอย่างต่อเนื่องแล้ว ตัวดูดซับที่บริเวณทางเข้าของไหลจะเริ่มมีการอิ่มตัว ทำให้การถ่ายโอนมวลจะเริ่มเคลื่อนที่ถดถอยมาตามตำแหน่งด้านล่างตามลำดับ รวมทั้งตัวดูดซับที่บริเวณด้านล่างได้มีการดูดซับบ้างแล้ว ดังนั้นเกรเดียนต์ความเข้มข้นจะมีลักษณะเปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับเวลาเริ่มต้น โดยเกรเดียนต์ความเข้มข้นจะมีรูปร่างเป็นตัวเอส (s-shape) ดังเส้นกราฟ  $t_2$  จะเห็นว่าของแข็งในส่วนบนของเบดที่สูง  $L'_{s,12}$  เข้าสู่สภาวะเกือบอิ่มตัว ในขณะที่ของแข็งในส่วนบนของเบดถัดจากระยะ  $L'_{s,12}$  ไป

จนกระทั่งถึงทางออกเป็นของแข็งที่ยังคงสะอาดอยู่หรือเป็นส่วนที่ยังไม่ได้ใช้ เมื่อกำหนดให้ช่วงการถ่ายโอนมวลเป็นช่วงที่เกิดการดูดซับ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของไหลอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงเกิดการถ่ายโอนมวลเป็นส่วนใหญ่ในบริเวณนี้ ซึ่งการระบุช่วงการถ่ายโอนมวลว่าจะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใด และสิ้นสุดที่ใดนั้นค่อนข้างยาก ดังนั้นในที่นี้จะกำหนดให้ช่วงระหว่าง  $0.05 \leq c/c_0 \leq 0.95$  เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นจะเห็นว่า การถ่ายโอนมวลจะขยับต่ำลงเรื่อยๆ ตามระยะทางในเบดตามลำดับ ดังเช่นเส้นกราฟ  $t_c$  และ  $t_3$  และ  $t_4$  โดยที่เส้นกราฟ  $t_c$  เป็นเวลาสุดท้ายของระบบที่การถ่ายโอนมวลได้เคลื่อนตัวมายังที่ทางออกของเบดพอดี และหากระบบยังคงดำเนินต่อไป ความเข้มข้นของของไหลที่ทางออกเบดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังเส้นกราฟ  $t_4$  ที่แสดงความเข้มข้นของของไหลที่ทางออกเบดที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเวลาที่ผ่านไป สำหรับเส้นกราฟ  $t_2$  จะแสดงเส้นกราฟสองเส้นคือ เส้นกราฟเส้นประแสดงความเข้มข้นในเฟสของของไหลที่สภาวะสมดุลกับตัวดูดซับและเส้นกราฟเส้นทึบแสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นจริงของของไหล ซึ่งความเข้มข้นจริงของของไหลจะสูงกว่าความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล และความแตกต่างของความเข้มข้นนี้คือแรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวล

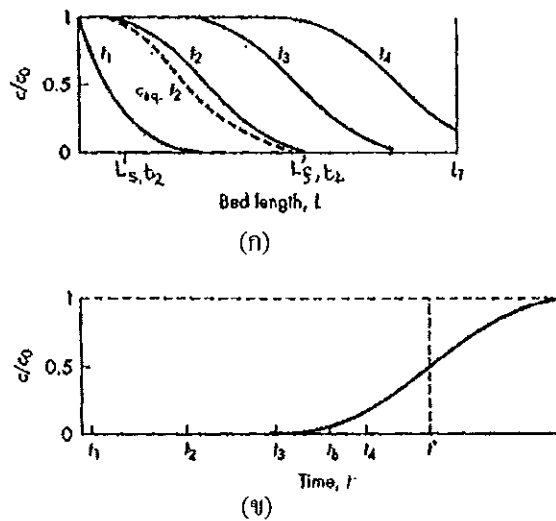
เมื่อนำข้อมูลจากภาพประกอบที่ 2.10 (ก) มาแสดงในไดอะแกรมระหว่าง  $c/c_0$  กับเวลา  $t$  ตำแหน่งที่ออกจากเบดจะได้เส้นกราฟเบรคทูร (breakthrough curve) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.10 (ข) จะเห็นว่าที่เวลา  $t_1$  และ  $t_2$  นั้น  $c/c_0 = 0$  ในขณะที่เวลา  $t_4$  ค่า  $c/c_0$  สูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของไหลที่ทางออกจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อ  $0 < c/c_0 < 0.5$  จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนในที่สุดเบดของแข็งมีความอิ่มตัวทั่วทั้งเบด ( $c/c_0 = 1.0$ ) ทำให้หอดูดซับนี้ไม่สามารถทำการดูดซับได้อีกต่อไป ซึ่งเส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปตัวเอสเช่นกันและมีลักษณะสมมาตรหรือเกือบสมมาตร โดยที่พื้นที่เหนือเส้นกราฟไปจนกระทั่งถึงเส้น  $c/c_0 = 1.0$  จะสัมพันธ์กับปริมาณของตัวถูกละลายบนของแข็งตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว สำหรับพื้นที่สี่เหลี่ยมเส้นประที่เวลา  $t^*$  จะมีค่าเท่ากับพื้นที่ที่อยู่เหนือเส้นกราฟจนถึงเส้น  $c/c_0 = 1.0$  เช่นกัน โดยเวลา  $t^*$  คือเวลาดูดซับอุดมคติหรือเวลาอุดมคติ (ideal adsorption time หรือ ideal time) เนื่องจากการดูดซับทางอุดมคติควรมีช่วงการถ่ายโอนมวลแคบที่สุด นั่นคือจะได้เส้นเบรคทูรแนวตั้ง ในกรณีที่เส้นกราฟที่ได้สมมาตรแล้ว  $t^*$  จะเป็นเวลาที่หาได้จากค่า  $c/c_0 = 0.5$  อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติหอดูดซับควรต้องหยุดการทำงานก่อนที่ทั้งเบดจะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว จึงมีการกำหนดเกณฑ์หยุดการทำงานของหอดูดซับที่เรียกว่า จุดหยุด (break point) โดยถ้าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของไหลที่ทางออกสูงถึงจุดหยุดแล้ว หอดูดซับต้องทำการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับก่อน โดยทั่วไปมักกำหนดให้จุดหยุดมีค่า  $c/c_0$  อยู่ในช่วง 0.01-0.05



และเวลาที่ตำแหน่งจุดหยุดเรียกว่าเวลาหยุด  $t_b$  (break-point time) ก็ได้ ซึ่งจะน้อยกว่าเวลาอุดมคติเสมอ



ภาพประกอบที่ 2.9 แสดงแผนภาพการดูดซับของเบดนิ่ง โดยมีของไหลเข้าสู่หอดูดซับอย่างต่อเนื่อง (จูไรวัลย์, 2546)



ภาพประกอบที่ 2.10 แสดงกระบวนการดูดซับในเบดนิ่ง (ก) โพรไฟล์ความเข้มข้น (ข) เส้นเบรคทู (จูไรวัลย์, 2546)

การหาปริมาณของตัวถูกดูดซับในสารป้อนต่อพื้นที่หน้าตัด  $F_A$  หาได้จากความเร็วผ่านผิวกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารป้อนดังนี้

$$F_A = u_0 c_0 \tag{2.2}$$

สำหรับการดูดซับอูมคติ โดยไม่มีความต้านทานของการถ่ายโอนมวลแล้ว จะได้ว่าที่เวลา  $t^*$  นั้นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายในของไหลที่ทางออกจะเกิดขึ้นทันทีทันใด โดยความเข้มข้นของไหลจะเปลี่ยนจากศูนย์มาถึงความเข้มข้นเริ่มต้นทันที จึงได้เส้นกราฟเบรคทรูเป็นเส้นแนวตั้ง การดูดซับอูมคติเป็นสภาวะที่ตัวดูดซับได้ดูดซับอย่างเต็มความสามารถจนถึงสภาวะอิ่มตัวหรือสภาวะสมดุลซึ่งแสดงถึงภาระดูดซับของของแข็งที่เพิ่มขึ้นทันทีจาก  $W_0 \rightarrow W_{sat}$  นั่นเอง ดังนั้นปริมาณทั้งหมดของตัวถูกละลายในสารป้อนที่ถูกดูดซับภายในเบดในช่วงเวลา  $t^*$  ต่อพื้นที่หน้าตัดเบดสามารถหาได้จากการคูณมวลตัวถูกละลายดูดซับดังนี้

$$u_0 c_0 t^* = L \rho_b (W_{sat} - W_0) \quad (2.3)$$

โดยที่  $u_0$  คือ ความเร็วผ่านผิว (superficial velocity)

$c_0$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารป้อนที่สภาวะเริ่มต้น

$L$  คือ ความสูงของเบด

$\rho_b$  คือ ความหนาแน่นบัลค์ของเบด

$W_0$  คือ ภาระดูดซับที่สภาวะเริ่มต้น (Initial adsorbate loading)

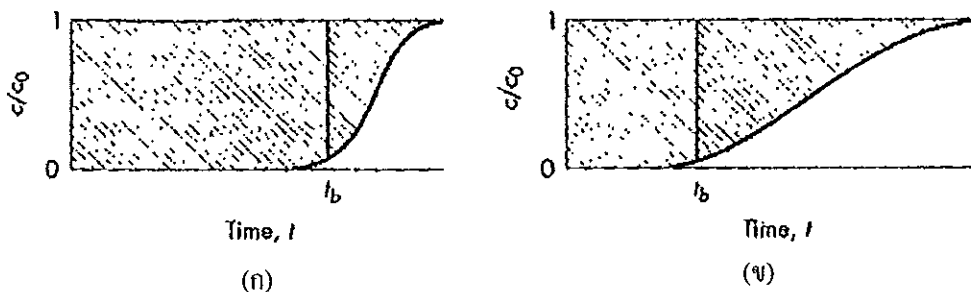
$W_{sat}$  คือ ภาระดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว (Saturation adsorbate loading) หรือค่าภาระดูดซับที่สภาวะสมดุล (Equilibrium adsorbate loading)

สำหรับสมการ (2.3) สามารถจัดให้อยู่ในเทอมของเวลาดูดซับอูมคติได้ดังนี้

$$t^* = \frac{L \rho_b (W_{sat} - W_0)}{u_0 c_0} \quad (2.4)$$

สำหรับการดูดซับที่ใช้ของแข็งใหม่ที่ไม่มีการปนเปื้อนของตัวถูกละลาย หรือเป็นของแข็งที่สามารถทำการฟื้นฟูสภาพได้อย่างสมบูรณ์จะมีค่า  $W_0 = 0$  อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ นั้น การฟื้นฟูสภาพของแข็งมักจะมีตัวถูกละลายคงค้างไว้ส่วนหนึ่งเสมอ ทั้งนี้เพราะการฟื้นฟูให้ของแข็งมีความสะอาดเหมือนใหม่นั้นทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูงมาก เนื่องจากในทางปฏิบัติหอดูดซับจะต้องหยุดการทำงานที่เวลาหยุด  $t_d$  ซึ่งน้อยกว่าเวลาอูมคติ ดังนั้นปริมาณจริงที่ตัวถูกละลายจะถูกดูดซับได้จะมีค่าน้อยกว่าปริมาณที่ตัวถูกละลายจะถูกดูดซับได้ที่สภาวะอิ่มตัวเสมอ การหาปริมาณจริงของตัวถูกละลายบนของแข็งสามารถหาได้จากการอินทิเกรตเส้นกราฟเบรคทรูจากเวลาเริ่มต้นจนกระทั่งถึงเวลาหยุด  $t_d$  หรือคำนวณจากพื้นที่เหนือเส้นกราฟจนกระทั่งถึงเวลาหยุด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.11 จะเห็นว่าช่วงการถ่ายโอนมวลของการดูดซับเทียบกับความสูงของเบดแสดงถึงประสิทธิภาพของหอดูดซับซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่น อัตราการถ่ายโอนมวล อัตราการไหลผ่านเบดและลักษณะของไอโซเทิร์ม เป็นต้น หากช่วงการถ่ายโอนมวลแคบดังภาพประกอบที่ 2.11 (ก) แล้ว จะได้เส้นกราฟเบรคทรูที่ค่อนข้างชัน ซึ่งแสดงถึงความจุหรือความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับอย่างเกือบเต็มที่ ดังนั้นความจุในการดูดซับของตัวดูดซับ

ภายในเบดได้จึงมีค่าใกล้เคียงกับความจุในการดูดซับที่สภาวะอิ่มตัว ทำให้พื้นที่เหนือเส้นกราฟจนถึงจุดหยุดจะมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่เหนือเส้นกราฟเมื่อเป็นการดูดซับอุดมคติ ดังนั้นการดูดซับจึงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามหากช่วงการถ่ายโอนมวลกว้างมากดังภาพประกอบที่ 2.11 (ข) พื้นที่เหนือเส้นกราฟจนถึงจุดหยุดจะมีค่าความแตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับพื้นที่เหนือเส้นกราฟของการดูดซับอุดมคติ นั่นคือความจุของเบดที่ใช้ได้จริงมีค่าน้อยกว่าความจุ่มั้มตัวมาก ดังนั้นการออกแบบกระบวนการให้มีประสิทธิภาพจึงควรมีช่วงการถ่ายโอนมวลที่แคบหรือสั้นเพื่อให้เส้นกราฟเบรคทรูมีค่าใกล้เคียงกับการดูดซับแบบอุดมคติมากที่สุด



ภาพประกอบที่ 2.11 แสดงเส้นกราฟเบรคทรูเมื่อช่วงเวลากการถ่ายโอนมวล (ก) สั้น (ข) ยาว (จุไรวัลย์, 2546)

### 2.5.3 เวลาการดูดซับและความสูงของเบด

การเพิ่มความสูงของเบดจะไม่ส่งผลต่อความสูงของเบดที่ไม่ได้ใช้ ซึ่งจากความสูงที่ไม่ได้ใช้นี้สามารถคำนวณหาได้จากเส้นกราฟเบรคทรูดังนี้ เนื่องจากความจุการดูดซับของเบดหรือการดูดซับของเบดที่ได้ใช้จะขึ้นกับเวลาของการดูดซับ ดังนั้นเมื่อกำหนดให้หอดูดซับหยุดการทำงานที่จุดหยุดแล้วนั้น ตัวดูดซับในระยะตั้งแต่บริเวณทางเข้าจนกระทั่งถึงจุดเริ่มต้นของช่วงการถ่ายโอนมวล จะอยู่ในสภาวะอิ่มตัวหรือเกือบอิ่มตัว ระยะความสูงของเบดในช่วงนี้เรียกว่าความสูงเบดที่ใช้  $L_b$  (Length of bed used up to the break point) ซึ่งการดูดซับของเบดถึงจุดหยุดนี้สามารถหาได้จากการอินทิเกรตพื้นที่เหนือเส้นกราฟเบรคทรูจากเวลาเริ่มต้นจนกระทั่งถึงเวลาที่จุดหยุด ในทำนองเดียวกันการดูดซับของเบดจากสภาวะเริ่มต้นจนระบบเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวหรือสภาวะสมดุลสามารถหาได้จากการอินทิเกรตพื้นที่เหนือเส้นกราฟทั้งหมดและอัตราส่วนระหว่างค่าทั้งสองจะเป็นแฟรคชันของเบดที่ได้ใช้ไปในการดูดซับจนถึงเวลาที่จุดหยุด โดยอัตราส่วนดังกล่าวจนถึงหนึ่งจะเป็นแฟรคชันของเบดที่ไม่ได้ใช้ในการดูดซับ ซึ่งสามารถแปลงเข้าสู่ความสูงของเบดที่ไม่ได้ใช้

เมื่อพิจารณากระบวนการดูดซับจากสภาวะเริ่มต้นจนกระทั่งทุกส่วนเข้าสู่สภาวะสมดุลของแข็งทุกส่วนในเบดจะมีความอึดด้วยสารป้อน โดยความจุของการดูดซับในหอนจนกระทั่งเบดเข้าสู่สมดุลกับสารป้อน จะสัมพันธ์กับพื้นที่เหนือเส้นกราฟเบรคทรูจนกระทั่งถึงเส้นที่  $c/c_0 = 1$  ซึ่งเป็นพื้นที่แรเงาทั้งหมดในภาพประกอบที่ 2.12 และหาได้จากการอินทิเกรตเส้นกราฟเบรคทรูทั้งหมด ดังนั้นเวลาสมดุลกับความจุทั้งหมดของการดูดซับแสดงได้ดังนี้

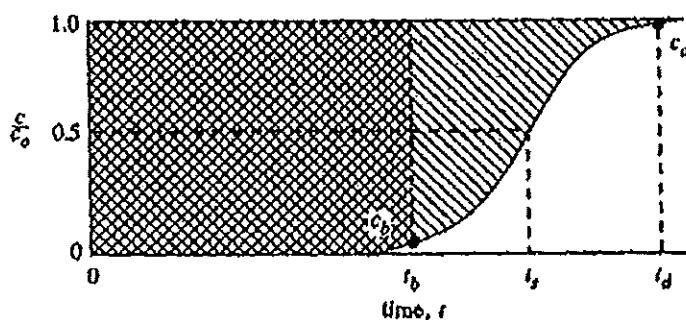
$$t_T = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt \quad (2.5)$$

โดยที่  $t_T$  เป็นเวลาที่สมดุลกับความจุของการดูดซับรวมของเบด (Equivalent total time) ในทำนองเดียวกันความจุที่ของแข็งที่ได้ใช้จากสภาวะเริ่มต้นจนถึงจุดหยุดจะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่เหนือเส้นกราฟเบรคทรูจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดหยุดเช่นกัน และเป็นพื้นที่แรเงาตายตัด ซึ่งหาได้จากการอินทิเกรต ดังนั้นเวลาที่สมดุลกับความจุในการดูดซับถึงจุดหยุดของเบด  $t_u$  (equivalent break time) แสดงได้เป็น

$$t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{c}{c_0}\right) dt \quad (2.6)$$

โดยที่  $t_u \sim t_b$  และอัตราส่วน  $t_u/t_T$  แสดงถึงแฟรคชันความจุในการดูดซับของเบดที่ได้ใช้จากสภาวะเริ่มต้นถึงจุดหยุดเทียบกับความจุรวมของเบด ซึ่งอัตราส่วน  $t_u/t_T$  เทียบเท่ากับแฟรคชันของความสูงเบดที่ได้ใช้เทียบกับความสูงรวมของเบด ดังนั้นความสูงที่ได้ใช้ไปจึงหาได้ดังนี้

$$L_B = \frac{t_u}{t_T} L_T \quad (2.7)$$



ภาพประกอบที่ 2.12 แสดงการหาความจุการดูดซับของเบด โดยใช้วิธีพื้นที่เหนือเส้นกราฟเบรคทรู (จูไรวัลย์, 2546)

เนื่องจากผลรวมของแฟรคชันความจุของเบคที่ได้ใช้และที่ไม่ได้ใช้จะต้องเป็น 1.0 ดังนั้นจึงสามารถหาแฟรคชันความจุของเบคที่ไม่ได้ใช้ และสามารถเทียบเท่าได้กับแฟรคชันความสูงเบคที่ไม่ได้ใช้เหมือนดังสมการ (2.6) ซึ่งจะนำไปสู่ค่าความสูงที่ไม่ได้ใช้  $L_{UNB}$  ดังต่อไปนี้

$$L_{UNB} = \left(1 - \frac{t_u}{t_T}\right) L_T \quad (2.8)$$

$L_{UNB}$  แสดงถึงช่วงการถ่ายโอนมวล ซึ่งไม่ขึ้นกับความสูงของเบค แต่ขึ้นกับความเร็วของของไหล สำหรับความสูงของเบคคือผลรวมของความสูงที่ได้ใช้และไม่ได้ใช้ ดังสมการ (2.8)

$$L_T = L_{UNB} + L_B \quad (2.9)$$

สำหรับการหาเวลาที่จุดหยุดของการดูดซับแบบอุดมคติ สามารถประมาณได้จากสมการ (2.7) ได้ โดยใช้เวลาอุดมคติแทนเวลาสมมูลกับความจุรวม ในขณะที่เวลาจุดหยุดมีค่าใกล้เคียงกับเวลาสมมูลที่จุดหยุด ดังนั้น

$$t_b = t * \left(1 - \frac{L_{UNB}}{L_T}\right) \quad (2.10)$$

การออกแบบระบบดูดซับจำเป็นต้องพิจารณาหลายตัวแปร เช่น ชนิดและขนาดของตัวดูดซับ ความเร็วของสารป้อนที่ไหลผ่านเบค ความสูงของเบคหรือเวลาจุดหยุดที่เหมาะสม เป็นต้น ความสูงเบคภายในหอดูดซับมีผลต่อความดันตกในหอ หากออกแบบให้เบคมีความสูงสั้นๆ ปริมาตรตัวดูดซับในหอจะน้อย ทำให้สามารถละลายผลของความดันตกได้ แต่ต้องใช้กระบวนการฟื้นฟูสภาพบ่อยครั้งขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับสูงขึ้นด้วย แต่หากใช้เบคที่มีความสูงมาก เพื่อให้การดูดซับยาวนานขึ้น ค่าความดันตกของเบคจะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

#### 2.5.4 ดินฟอก (Bleaching earth)

ดินฟอกเป็นวัสดุดูดซับที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีลักษณะเป็นของแข็งอนุภาคละเอียดที่มีรูพรุน มีสีเทาจนถึงขาว มีกลิ่นน้อยมาก ใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อทำบริสุทธิ์ในอุตสาหกรรมน้ำมันหรือไขมัน โดยใช้สำหรับการฟอกสีและการกรองสิ่งปนเปื้อนออก นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับความสามารถของดินฟอกในการนำไปกำจัดสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ กันอย่างแพร่หลาย

Du D. et al. (2006) ได้ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลโดยการทำปฏิกิริยา enzymatic hydrolysis ซึ่งเป็นวิธีที่ดีเมื่อเทียบกับวิธีการทางเคมี แต่ก็มีปัญหาที่สำคัญคือค่าใช้จ่ายที่สูงสำหรับการใช้เอนไซม์ไลเปสและเอนไซม์อาจจะไม่ทำงานเมื่อมีปริมาณเมทานอลสูง และการทำปฏิกิริยาจะต้องเป็นแบบ heterogeneous reaction เนื่องจากเมทานอลและไตรกลีเซอไรด์ไม่สามารถผสมเข้ากันได้ จึงได้ใช้ดินฟอก ซึ่งได้จากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันมาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ดินฟอกจะช่วยดูดซับเมทานอลซึ่งเป็นสาเหตุให้เอนไซม์ไลเปส

ไม่ทำงาน และอัตราการเกิดปฏิกิริยายังคงสูงอยู่เหมือนเดิม หลังทำปฏิกิริยาดินฟอกที่ประกอบไปด้วยเอนไซม์ไลเปสยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

Choksi P. M. and Joshi V. Y. (2006) ได้ศึกษาการกำจัดนิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) และอลูมิเนียม ( $Al^{3+}$ ) จากน้ำเสียโดยใช้วัสดุดูดซับธรรมชาติชนิดต่างๆ เช่น starch, activated charcoal, wood charcoal, bleaching earth โดยศึกษาผลของพีเอชและความเข้มข้นของวัสดุดูดซับ และการใช้ดินฟอกก็แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการกำจัดโลหะหนักอย่างนิกเกิลและอลูมิเนียมได้เป็นอย่างดี

Park E.Y. et al. (2008) ศึกษาการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ Waste activated bleaching earth (wABE) กับเมทานอลเป็นวัตถุดิบและใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีน้ำมันดีเซลเป็นตัวทำละลาย งานวิจัยนี้ได้กล่าวไว้ว่า activated bleaching earth (ABE) เป็นวัสดุดูดซับที่ใช้กันโดยทั่วไปเนื่องจากมีความสามารถในการดูดซับสูงและในอุตสาหกรรมน้ำมันก็ได้มีการใช้ ABE ในการกำจัดสีพวก carotene, chlorophyll และสารประกอบอื่นๆ เช่น phosphatides และสบู่ นอกจากนี้ในส่วนการผลิตไบโอดีเซลมีรายงานว่าดินฟอกมีการดูดซับกลีเซอรอล น้ำมันดีเซล และไบโอดีเซลบางส่วนด้วย

กลไกการขจัดสิ่งปนเปื้อนของดินฟอกมี 3 วิธี (Bornor and Schneider, 2551) ได้แก่

- เริงกายภาพ คือ การดูดซับ ซึ่งดินฟอกมีความสามารถในการดูดซับสารพวกสีย้อม ฟอสโฟไลพิด สบู่ ยาฆ่าแมลง โลหะ PAH ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และกลูโคไลพิด
- เริงเคมี คือ การแลกเปลี่ยนไอออน สารที่ดินฟอกสามารถขจัดได้ด้วยวิธีนี้ได้แก่ ฟอสโฟไลพิด สบู่ โลหะ ยาฆ่าแมลง และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน
- เริงกล คือ การกรอง โดยดินฟอกสามารถขจัดฟอสโฟไลพิด และสบู่ได้ด้วยวิธีนี้

## 2.6 การคำนวณต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์

2.6.1 การคำนวณต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ สามารถคำนวณดังสมการ 2.11 และ 2.12 โดยต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์

$$\text{ต้นทุนการผลิตรวม} = \text{ราคาวัตถุดิบที่ใช้} + \text{พลังงานไฟฟ้า} + \text{ระบบบำบัดน้ำเสีย} \quad (2.11)$$

$$\text{ต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ต่อหน่วย} = \frac{\text{ต้นทุนการผลิตรวม}}{\text{ปริมาณไบโอดีเซลที่ผลิตได้}} \quad (2.12)$$

2.6.2 การคำนวณราคาต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ (B100) ของกระทรวงพลังงานแสดง  
 ดังสมการ 2.13

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ (บาท/ลิตร)} &= 0.97 * \text{ราคาน้ำมันปาล์มดิบ, CPO} \\ &(\text{บาท/กิโลกรัม}) + 0.15 * \text{ราคาเมทานอล (บาท/ลิตร)} + 2.97 \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.97 คือ ค่าพลังงาน แรงงาน โสหุ่ย ค่าเสื่อมสภาพ กำไร และค่าการจัดการ

โดยราคาข้าวตดุกดิบ ค่าไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากระบบที่ใช้ใน  
 การคำนวณต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ราคาข้าวตดุกดิบและค่าไฟฟ้าในการผลิตไบโอดีเซล

| ต้นทุนการผลิต        | ราคา                   |
|----------------------|------------------------|
| น้ำมันพืชใช้แล้ว     | 8 บาท/กิโลกรัม         |
| เมทานอล              | 15.38 บาท/กิโลกรัม     |
| โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ | 80.28 บาท/กิโลกรัม     |
| ดินฟอก               | 16 บาท/กิโลกรัม        |
| น้ำ                  | 10 บาท/ลูกบาศก์เมตร    |
| ค่าไฟฟ้า             | 3 บาท/กิโลวัตต์ชั่วโมง |
| ค่าบำบัดน้ำเสีย      | 0.15 บาท/ลิตร          |

อ้างอิง ข้อมูล: สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืช

### บทที่ 3

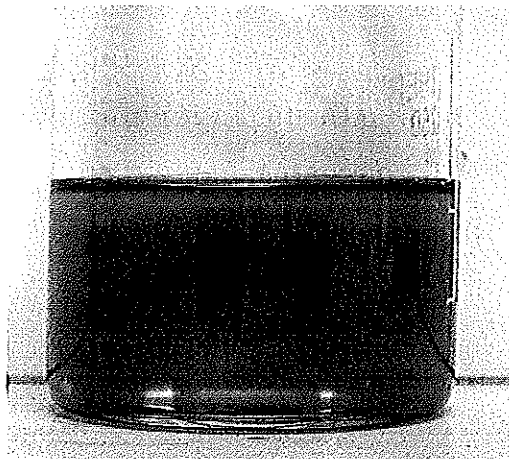
#### วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการที่สามารถจัดสรรไนโบโอติเซลเพื่อนำไปสู่การลดปริมาณน้ำเสียจากการล้างไนโบโอติเซลโดยใช้น้ำ โดยได้ศึกษา 2 กระบวนการ คือ กระบวนการตกจมและกระบวนการดูดซับ โดยได้วางแผนงานวิจัยไว้เป็นขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาความสามารถในการตกจมสบูไนโบโอติเซล
2. ศึกษาความสามารถในการดูดซับสบูของดินฟอก
  - ศึกษาคุณสมบัติของดินฟอก
  - ศึกษาการดูดซับในระบบแบบกะ (Batch system)
  - ศึกษาการดูดซับในระบบแบบ Packed column
3. ศึกษาการประยุกต์ใช้การตกจมและการดูดซับสบูของดินฟอกในกระบวนการผลิตไนโบโอติเซล

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุดิบ: เมทิลเอสเทอร์ที่ยังไม่ผ่านกระบวนการล้างจากการผลิตไนโบโอติเซลของสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันพืชใช้แล้ว



ภาพประกอบที่ 3.1 เมทิลเอสเทอร์จากกระบวนการผลิตไนโบโอติเซล



### 3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 ดินฟอก (Bleaching earth) จาก Actochem (Thai) industries co., Ltd. ลักษณะเป็นผงละเอียด มีสีเทาจนถึงขาว มีกลิ่นน้อยมาก องค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 3.1 และคุณสมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 3.2



ภาพประกอบที่ 3.2 วัสดุดูดซับ (ดินฟอก)

ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของดินฟอก

| Composition     |                                | Specification |
|-----------------|--------------------------------|---------------|
| Silica Oxide    | SiO <sub>2</sub>               | ≤ 80.0 %      |
| Aluminium Oxide | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ≤ 12.0 %      |
| Iron Oxide      | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ≤ 5.0 %       |
| Magnesium Oxide | MgO                            | ≤ 2.0 %       |
| Calcium Oxide   | CaO                            | ≤ 2.5 %       |
| Sodium Oxide    | Na <sub>2</sub> O              | ≤ 1.0 %       |
| Potassium Oxide | K <sub>2</sub> O               | ≤ 0.75 %      |

ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของดินฟอก

| Composition                                    | Specification |
|--|---------------|
| Moisture content on drying at 110 °C, 3 hours. | max. 15.00 %  |
| Free Acid (as H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | max. 0.40 %   |
| Granularity (pass through sieve 100 mesh)      | max. 99.00 %  |
| pH (10 % suspension)                           | min. 2.50     |
| Loss on Ignition (LOI)                         | ≤ 10.0 %      |
| Strength for absorption by Wonder NK 309       | Good          |

3.1.2.2 Hydrochloric, analytical grade (37%)

3.1.2.3 Acetone, commercial grade (%)

3.1.2.4 Indicator (Bromophenol blue, Phenolphthalein, Methyl red)

3.1.2.5 Isopropyl alcohol, analytical grade (%)

3.1.2.6 Sodiumtetraborate, analytical grade (%)

3.1.2.7 น้ำกลั่น

### 3.1.3 อุปกรณ์

3.1.3.1 คอลัมน์ตักจมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร สูง 24 เซนติเมตร

3.1.3.2 คอลัมน์ตักจมนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร

3.1.3.3 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath, Oil bath)

3.1.3.4 กระบอกตวงขนาด 500 มิลลิลิตร (cylinder)

3.1.3.5 ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร (Flask)

3.1.3.6 เตาไฟฟ้า (Stirring hotplate)

3.1.3.7 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)

3.1.3.8 เครื่องกรองลดความดัน (Suction)

3.1.3.9 คอลัมน์ดูดซับ

3.1.3.10 ปิ๊ม

3.1.3.11 เตาเผาความร้อนสูง (Furnace)

## 3.2 วิธีการวิจัย

### 3.2.1 ความสามารถในการตกจมของสปู โดยแบ่งออกเป็นกิจกรรมต่างๆ ดังนี้

#### 3.2.1.1 ศึกษาความสามารถการตกจมของสปูในไบโอดีเซล

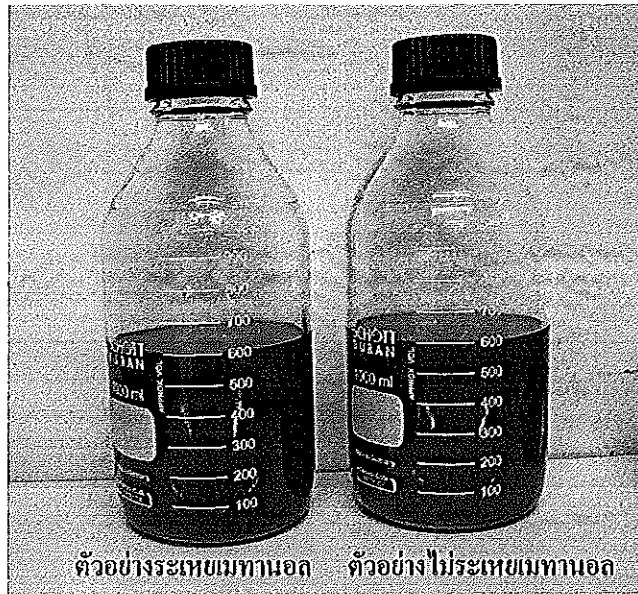
วัตถุประสงค์ย่อยของกิจกรรมคือ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นในการจัดสปูในไบโอดีเซลด้วยการตกจม ก่อนที่จะศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ทำให้เกิดการตกจมได้ดีขึ้น โดยดำเนินการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ ใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันและการแยกกลีเซอริน 3 ตัวอย่าง ซึ่งมีปริมาณสปูแขวนลอยต่างๆ กันคือ 14,537 7,413 และ 3,936 ppm ทำการตกจมในถังขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ความสูงไบโอดีเซล 21 เซนติเมตร เก็บผลการทดลองโดยวัดปริมาณสปูที่แขวนลอยในไบโอดีเซลที่ระดับความลึก 80 เซนติเมตร ทุกๆ 24 ชั่วโมง เป็นเวลา 10 วัน และนำตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการตกจมสปูไปทดสอบการล้างน้ำเพื่อดูลักษณะน้ำล้างและความยากง่ายในการล้าง

#### 3.2.1.2 ศึกษาผลอัตราส่วนระหว่างส่วนสูงของไบโอดีเซลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจม (Settling tank) ต่อเวลาในการตกจมสปูในไบโอดีเซล

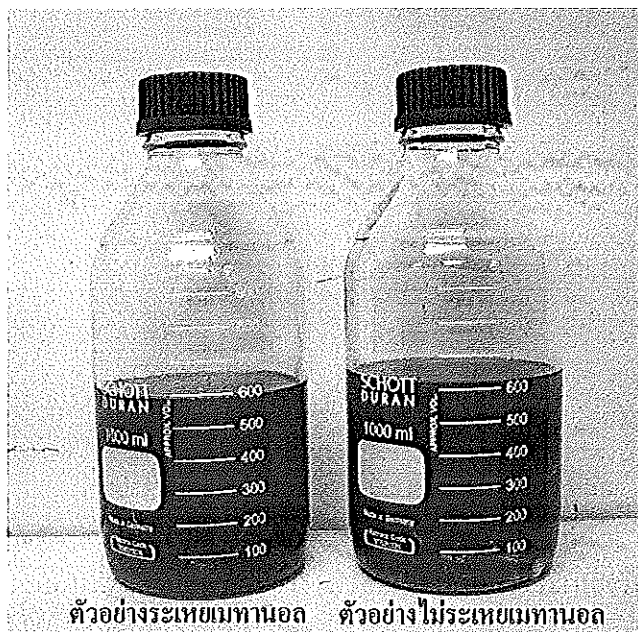
การศึกษาดำเนินการโดยใช้ถังตกจมที่มีอัตราส่วนระหว่างส่วนสูงของไบโอดีเซลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจม (H/D) ที่ 1.5 (21 cm/14 cm) และ 5.6 (50.8 cm/9 cm) โดยใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีสปูแขวนลอยเข้มข้นประมาณ 8,000 ppm

#### 3.2.1.3 ศึกษาผลของเมทานอลต่อการตกจมสปูในไบโอดีเซล

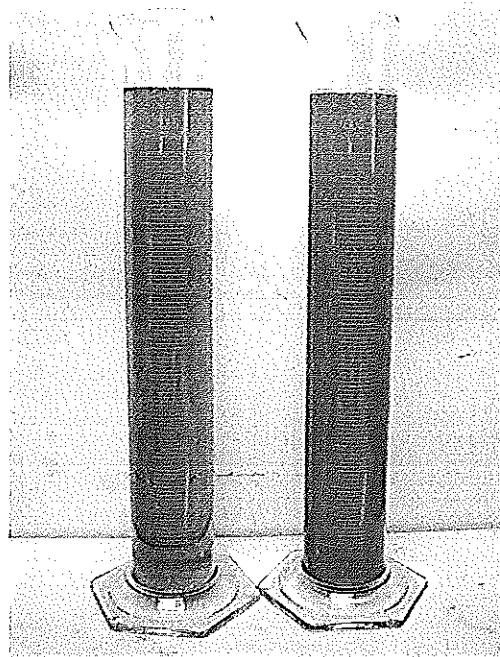
ศึกษาผลของเมทานอลต่อการตกจมสปูในไบโอดีเซลโดยเปรียบเทียบการตกจมสปูในไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลกับไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลจากการนำตัวอย่างไบโอดีเซลมาระเหยเมทานอลใน Water bath อุณหภูมิ 80°C โดยนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อดูน้ำหนักที่หายไปทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วนำมาทดสอบการตกจมในกระบอกตวงขนาด 500 ml



ภาพประกอบที่ 3.3 แสดงตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนการระเหยเมทานอล



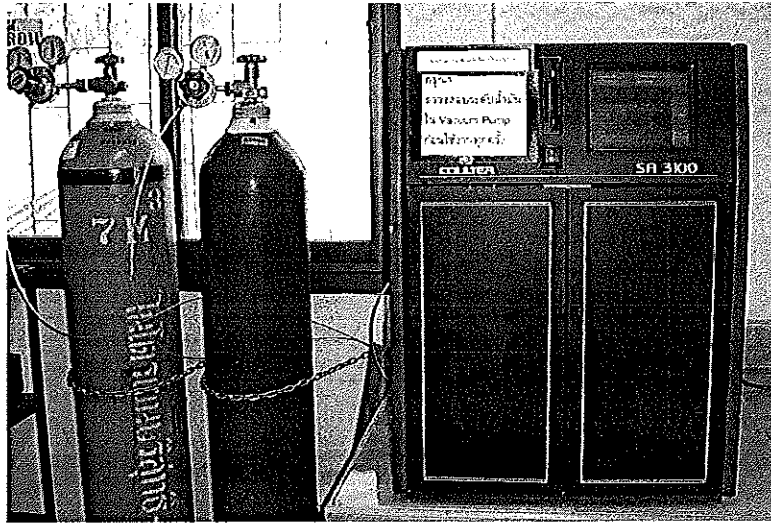
ภาพประกอบที่ 3.4 แสดงตัวอย่างไบโอดีเซลหลังการระเหยเมทานอล



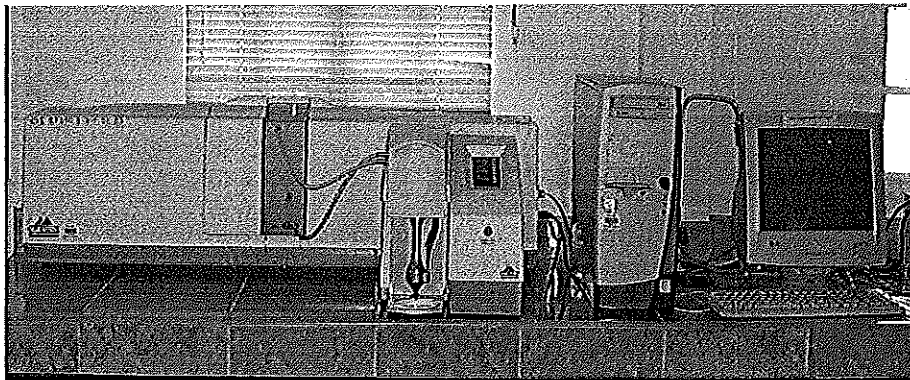
ภาพประกอบที่ 3.5 ตัวอย่างการทดสอบการตกจมในกระบอกตวงขนาด 500 ml

### 3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของดินฟอก

ดินฟอกที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับจากบริษัท Actochem (Thai) Industries co.,LTD ถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ พื้นที่ผิว BET, Pore Size Distribution โดยใช้เครื่อง BET Surface area แสดงดังภาพประกอบที่ 3.6 วิเคราะห์ Particle Size Distribution โดยใช้เครื่อง Mastersizer แสดงดังภาพประกอบที่ 3.7 ความหนาแน่นรวม (Bulk density) Void fraction



ภาพประกอบที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ BET Surface area



ภาพประกอบที่ 3.7 เครื่อง Mastersizer สำหรับวิเคราะห์ Particle Size Distribution

### 3.2.3 การดูดซับของดินฟอก โดยแบ่งออกเป็นกิจกรรมต่างๆ ดังนี้

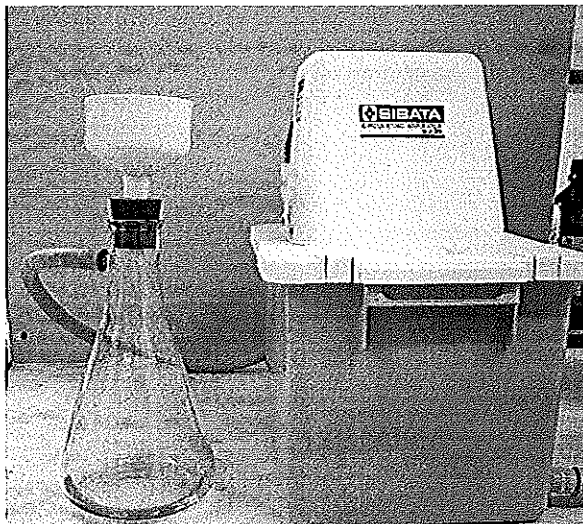
#### 3.2.3.1 การดูดซับในระบบแบบกะ (Batch)

วัตถุประสงค์ย่อยของกิจกรรมคือ เพื่อศึกษาความสามารถหรือความเป็นไปได้ในการนำดินฟอกมาใช้เป็นวัสดุดูดซับในการขจัดสบู่นาโอดีเซลและเพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับซึ่งได้แก่ เวลาในการดูดซับ 10-60 นาที ความเร็วรอบในการกวนผสม 200-400 rpm ความเข้มข้นเริ่มต้นของสบู่ 1,000-8,000 ppm สัดส่วนดินฟอกที่ใช้ 0.25-3.00 % อุณหภูมิในการดูดซับที่อุณหภูมิห้องถึง 120°C ดำเนินการศึกษาโดยทำการทดลองการดูดซับในขวดรูปชมพู่

ขนาด 500 มิลลิลิตร แสดงดังภาพประกอบที่ 3.8 และกรองเอาดินฟอกออกด้วยเครื่องกรองลดความดันแสดงดังภาพประกอบที่ 3.9 โดยใช้กระดาษกรองที่มีรูพรุน 2.5 ไมโครเมตร



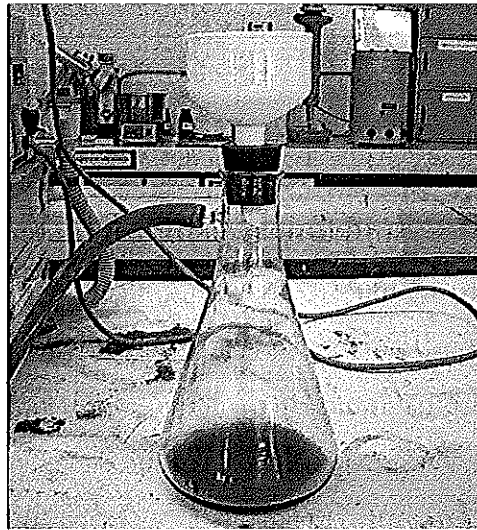
ภาพประกอบที่ 3.8 แสดงการดูดซับสบูด้วยดินฟอกในขวดรูปชมพู่



ภาพประกอบที่ 3.9 เครื่องกรองลดความดันที่ใช้สำหรับกรองดินฟอก

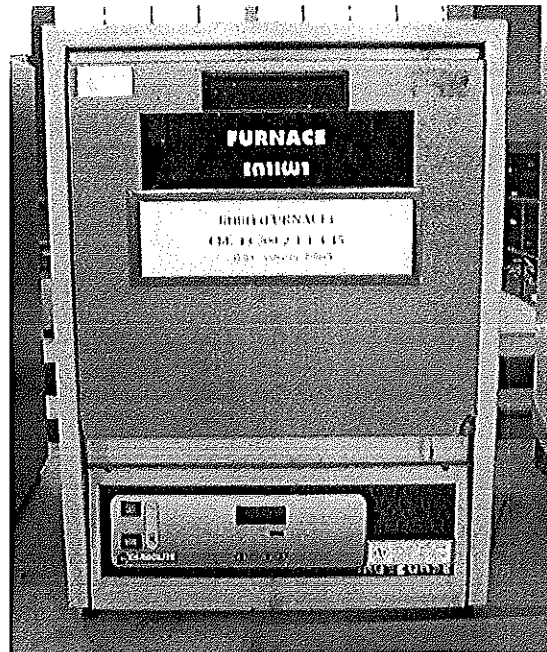
### 3.2.3.2 การนำวัสดุดูดซับ (ดินฟอก) กลับมาใช้ใหม่

ในการศึกษาการใช้ซ้ำของวัสดุดูดซับ กระทำโดยนำดินฟอกที่ผ่านการใช้งานแล้ว มาสกัดสิ่งปนเปื้อนออกด้วยอะซิโตน โดยใช้ดินฟอก 1 กรัมต่ออะซิโตน 5 มิลลิลิตร กวนผสมเป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปกรองแยกดินฟอกออกด้วยเครื่องกรองลดความดันแสดงดังภาพประกอบที่ 3.10 จะสังเกตเห็นสีของตัวทำละลายอะซิโตนเข้มข้นเป็นสีน้ำตาล หลังจากนั้นดินฟอกจะถูกนำไปเผาที่ความร้อน  $500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที โดยใช้เตาเผาความร้อนสูงแสดงดังภาพประกอบที่ 3.11 จากนั้นนำดินฟอกวางไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและนำดินฟอกที่ได้ไปทดสอบความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบกับดินฟอกที่ไม่ผ่านการใช้งาน



ภาพประกอบที่ 3.10 แสดงตัวทำละลายอะซิโตนหลังการสกัดสิ่งปนเปื้อนในดินฟอก





ภาพประกอบที่ 3.11 เตาเผาความร้อนสูง (Furnace)

### 3.2.3.3 การดูดซับสเปกโตรสโกปีของดินฟอกแบบเบดนิ่ง

ระบบแบบเบดนิ่งดำเนินการในคอลัมน์ 2 ขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร

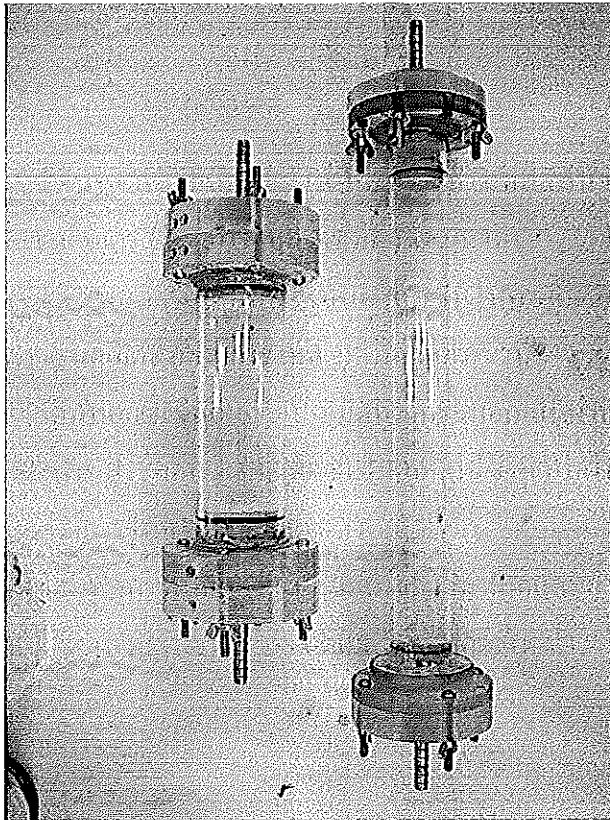
เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ยาว 17.3 เซนติเมตร

แสดงดังภาพประกอบที่ 3.12

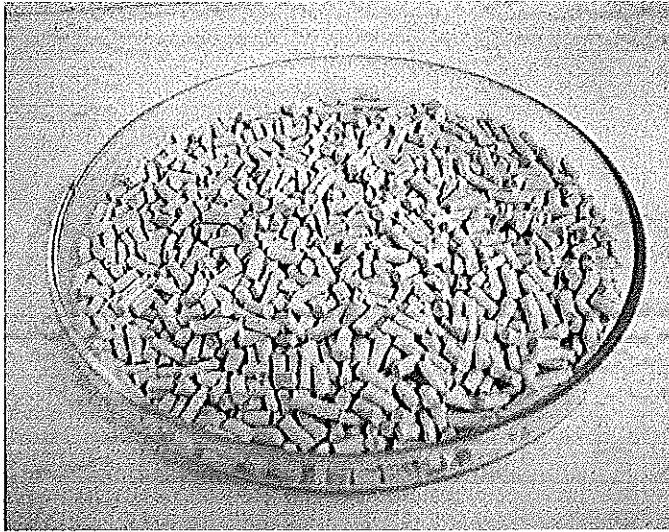
ปลายด้านหนึ่งของคอลัมน์รองด้วยแผ่นกระจายและผ้ากรอง จากนั้นนำดินฟอก ป้อนเข้าไปในคอลัมน์ ปลายอีกด้านหนึ่งปิดด้วยแผ่นกรอง 2 ชั้น ชั้นแรกเป็นผ้ากรองธรรมดา ส่วนอีกชั้นเป็นผ้ากรองละเอียดขนาด 0.5 ไมโครเมตร เพื่อป้องกันการสูญเสียดินฟอก ไบโอดีเซลซึ่งมีสเปกตรัมของแสงจะถูกป้อนเข้าคอลัมน์ทางด้านล่างด้วยอัตราการไหลที่ต้องการ เก็บตัวอย่างครั้งละ 100 มิลลิลิตร จนกระทั่งดินฟอกไม่มีการดูดซับสเปกโตรสโกปี ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ออกมาจากคอลัมน์จะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณสเปกโตรสโกปีด้วยการไทเทรต ภาพประกอบที่ 3.14 แสดงกระบวนการดูดซับสเปกโตรสโกปีของดินฟอกในระบบแบบเบดนิ่ง

การดูดซับสเปกโตรสโกปีโดยใช้ดินฟอกในระบบแบบ Packed Column ดำเนินการทดลองที่สภาวะบรรยากาศ ไบโอดีเซลที่ใช้ทดสอบเป็นไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านการระเหยเมทานอล มีสเปกตรัมของแสงอยู่ในช่วง 11,000-12,000 ppm โดยเปรียบเทียบลักษณะการดูดซับ 4 วิธีการคือ

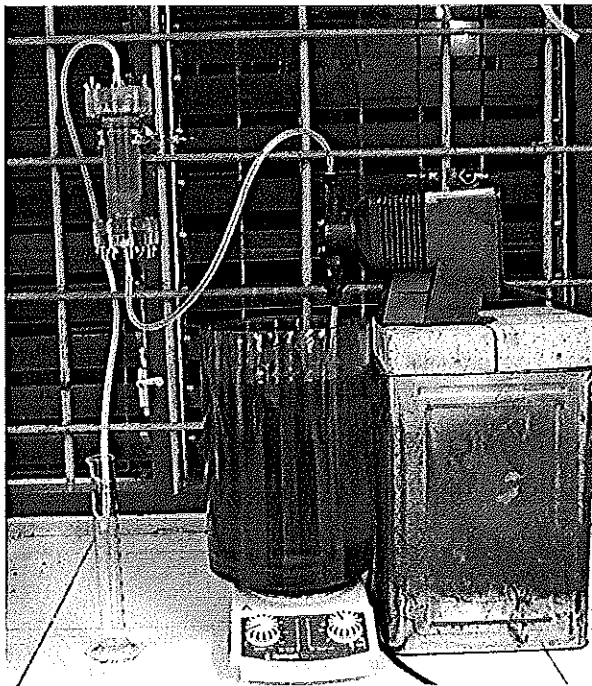
- ใช้ดินฟอกซึ่งมีลักษณะเป็นผงดูดซับในคอลัมน์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร อัตราการไหล 3.7 มิลลิลิตร/นาที
- ใช้ดินฟอกซึ่งมีลักษณะเป็นผงดูดซับในคอลัมน์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ยาว 17.3 เซนติเมตร อัตราการไหล 3.7 มิลลิลิตร/นาที
- ใช้ดินฟอกซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 4 มิลลิเมตร แสดงดังภาพประกอบที่ 3.13 ดูดซับในคอลัมน์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร อัตราการไหล 2.0 มิลลิลิตร/นาที
- ใช้ดินฟอกเป็นสเลอรี (ส่วนผสมของดินฟอกและน้ำมัน) ดูดซับในคอลัมน์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร อัตราการไหล 3.7 มิลลิลิตร/นาที



ภาพประกอบที่ 3.12 แสดงคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ



ภาพประกอบที่ 3.13 แสดงลักษณะของดินฟอกอัดเม็ด



ภาพประกอบที่ 3.14 แสดงตัวอย่างกระบวนการดูดซับสปูด้วยดินฟอกในระบบ แบบ  
เบดนิ่ง โดยใช้ดินฟอกซึ่งมีลักษณะเป็นผงดูดซับในคอลัมน์ซึ่งมี  
เส้นผ่านศูนย์กลางกลาง 4 เซนติเมตร ยาว 17.3 เซนติเมตร

ศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการใช้ดินฟอกในระบบแบบ Packed Column เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยพิจารณาปริมาณสบู่ที่ถูกดูดซับ (Adsorbed soap, g) กำหนดโดย

$$\text{Adsorbed soap} = \left( \frac{C_0 - C_f}{10^6} \right) \times (V \times D)$$

โดย *Adsorbed soap* คือ ปริมาณสบู่ที่ถูกดูดซับ (g)  
 $C_0$  คือ ความเข้มข้นสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลเริ่มต้น (ppm)  
 $C_f$  คือ ความเข้มข้นสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลหลังผ่านการดูดซับ (ppm)  
 $V$  คือ ปริมาตรไบโอดีเซลหลังผ่านการดูดซับ 100 มิลลิลิตร  
 $D$  คือ ความหนาแน่นของไบโอดีเซล 0.86 กรัมต่อมิลลิลิตร

### 3.2.4 ศึกษาการประยุกต์ใช้การตกจมและการดูดซับสบู่ของดินฟอกในการกำจัดสบู่

เป็นการประยุกต์ใช้ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดมาทดสอบการกำจัดสบู่ ใช้ตัวอย่างไบโอดีเซล 4 ลิตร โดยเริ่มจากระบวนการตกจมซึ่งมีการระเหยเมทานอลก่อนที่ 80°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไบโอดีเซลที่ได้มาตกจมสบู่หรืออาจกรองด้วยผ้าขาวเพื่อเป็นการลดเวลาในการตกจมหลังจากนั้นนำไบโอดีเซลมาผ่านการดูดซับด้วยดินฟอกแบบ ต่อเนื่องด้วยระบบ Packed column ปริมาณดินฟอก 15 กรัม ใช้แบบสเลอรี อัตราการไหล 1.58 มิลลิลิตร/นาที สูดทำย่นำตัวอย่างไบโอดีเซลไปกำจัดสบู่ด้วยการล้างน้ำ ศึกษาปริมาณสบู่ในแต่ละขั้นตอน

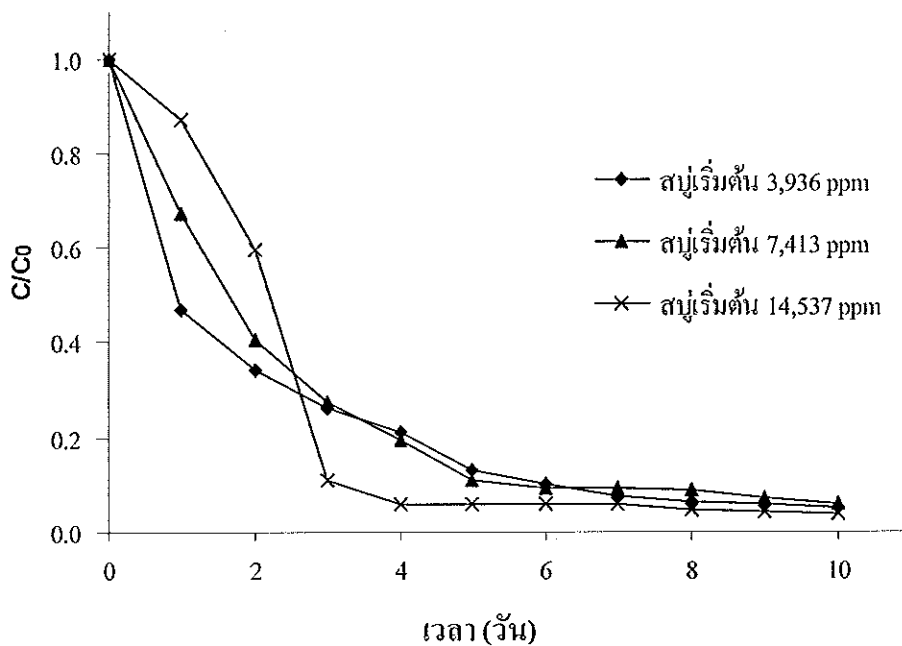
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 4.1 การตกจมของสปูไนไบโอดีเซล

##### 4.1.1 ความสามารถการตกจมของสปูไนไบโอดีเซล

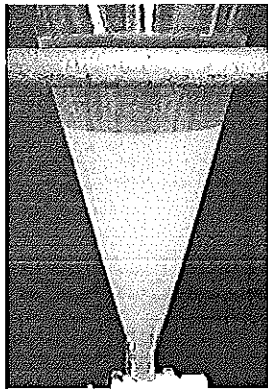
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยเพื่อศึกษาความสามารถในการตกจมของสปูโดยทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เมื่อใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันและการแยกกลีเซอรอล ถึงตกจมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ความสูงไบโอดีเซล 21 เซนติเมตร วัดปริมาณสปูที่ระดับความลึก 80% ได้ผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4.1



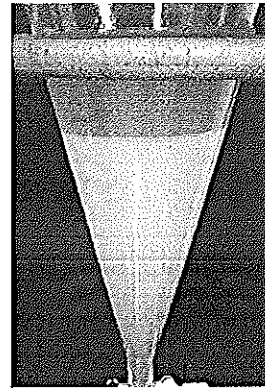
ภาพประกอบที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นสปูที่แขวนลอยในไบโอดีเซลต่อความเข้มข้นสปูเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลเทียบกับเวลาที่ใช้ในการตกจม

จากภาพประกอบที่ 4.1 แสดงให้เห็นความสามารถในการตกจมสปูไนไบโอดีเซล โดยพบว่าช่วงแรกปริมาณสปูจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นช่วงของการจับกลุ่มของสปูและ

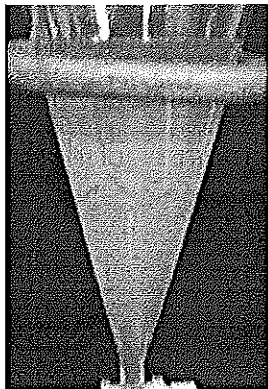
กลีเซอรอล จากนั้นรวมตัวกันตกตามแรงโน้มถ่วงของโลก จนกระทั่งสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลตกลงจนถึงระดับหนึ่งแล้วสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลที่เหลือจะจมตัวลงอย่างช้าๆ โดยในวันแรกตัวอย่างไบโอดีเซลสบู่เริ่มต้น 3,936 ppm ซึ่งมีความเข้มข้นของสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลน้อยที่สุดจะเกิดการจับกลุ่มและตกลงมาได้ดีกว่าตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีสบู่แขวนลอยเข้มข้น 7,413 และ 14,537 ppm ตามลำดับ (อัตราส่วนความเข้มข้นสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลต่อความเข้มข้นสบู่เริ่มต้น ( $C/C_0$ ) ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลเท่ากับ 0.47 0.67 และ 0.87 ตามลำดับ) แต่ในวันที่ 2 และ 3 ตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีสบู่แขวนลอยเข้มข้น 14,537 ppm ก็จะตกลงมาอย่างรวดเร็ว



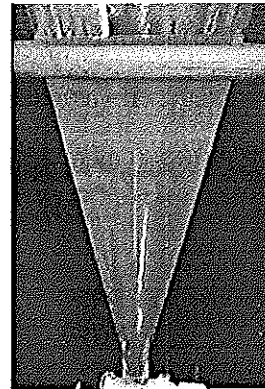
(ก)



(ข)



(ค)



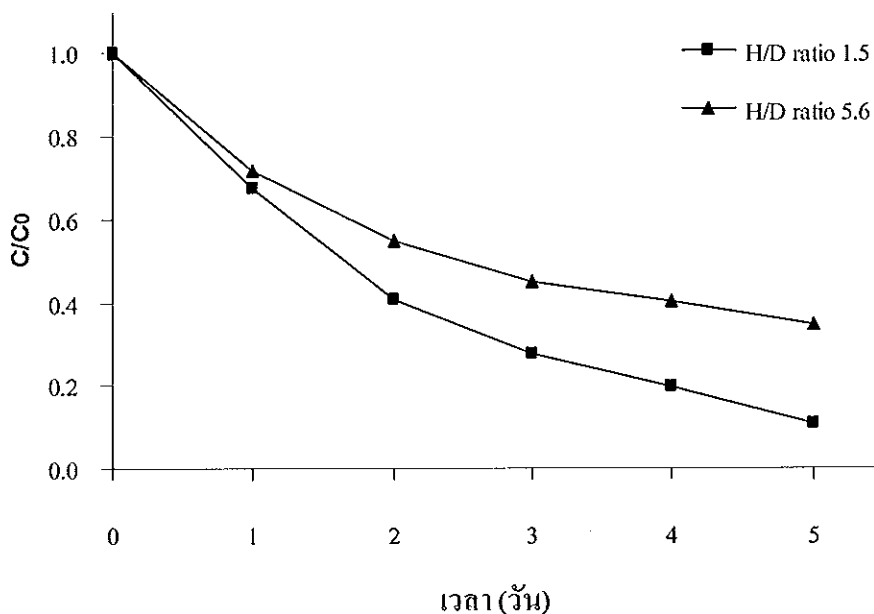
(ง)

ภาพประกอบที่ 4.2 ลักษณะน้ำล้างของไบโอดีเซลที่ผ่านการตกจมเทียบกับไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านการตกจม (ไบโอดีเซลความเข้มข้นสบู่เริ่มต้น 7,413 ppm)  
 (ก) ลักษณะน้ำล้างไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านการตกจม (ข) ลักษณะน้ำล้างไบโอดีเซลที่ผ่านการตกจมวันที่ 2 (ค) ลักษณะน้ำล้างไบโอดีเซลที่ผ่านการตกจมวันที่ 7 (ง) ลักษณะน้ำล้างไบโอดีเซลที่ผ่านการตกจมวันที่ 10

จากการนำไปโอติเซลเฟสบนที่ผ่านการตกจมมาล้างด้วยน้ำในสัดส่วนไบโอติเซล ต่อน้ำเท่ากับ 1:1 แสดงผลดังภาพประกอบที่ 4.2 เมื่อพิจารณาลักษณะน้ำล้างของไบโอติเซล สามารถยืนยันถึงการลดลงของสปูจากการตกจมได้ กล่าวคือ ลักษณะน้ำล้างไบโอติเซลที่ไม่ผ่านการตกจมจะเห็นน้ำล้างเป็นสีขาวขุ่นของสปูอย่างชัดเจน เมื่อผ่านการตกจมวันที่ 2, 7 และ 10 ปริมาณสปูในเฟสบน (เฟสไบโอติเซล) ก็จะมีปริมาณสปูที่แขวนลอยน้อยลง ลักษณะน้ำล้างจึงมีลักษณะใสมากขึ้นตามลำดับ เมื่อนำเฟสล้าง (เฟสสปู) ซึ่งผ่านการตกจมเป็นเวลา 10 วัน ไปหาปริมาณสปูพบว่าปริมาณสปู 23% และกลีเซอรอล 17%

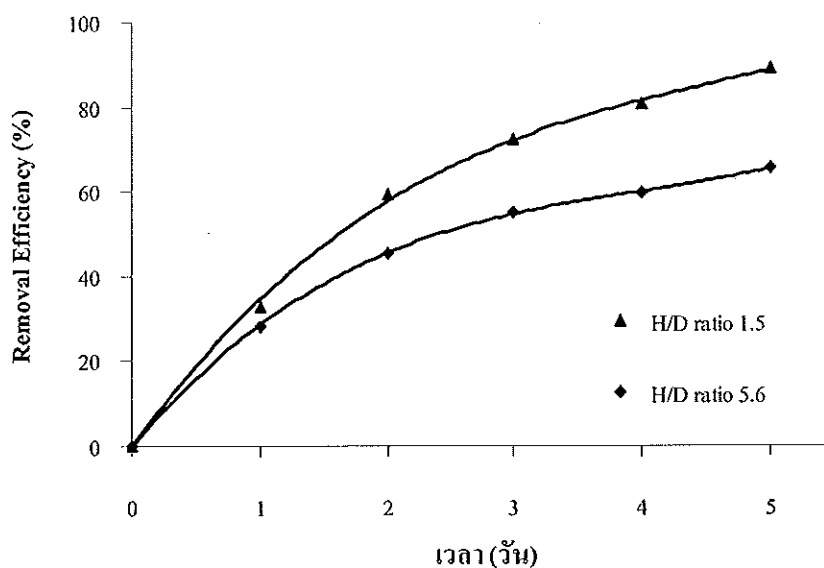
#### 4.1.2 ผลอัตราส่วนระหว่างส่วนสูงของไบโอติเซลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจม (Settling tank) ต่อเวลาในการตกจมสปูในไบโอติเซล

เปรียบเทียบผลอัตราส่วนระหว่างส่วนสูงของไบโอติเซลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจม (H/D) ที่ 1.5 (21/14) และ 5.6 (50.8/9) โดยใช้ตัวอย่างไบโอติเซลที่มีสปูแขวนลอยเข้มข้นประมาณ 8,000 ppm แสดงผลดังภาพประกอบที่ 4.3



ภาพประกอบที่ 4.3 แสดงผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่างความสูงของไบโอติเซลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจม (H/D) ที่มีต่ออัตราส่วนความเข้มข้นสปูที่แขวนลอยในไบโอติเซลต่อความเข้มข้นสปูเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) ที่แขวนลอยในไบโอติเซล

จากภาพประกอบที่ 4.3 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการตกจมมากขึ้นจะทำให้สปู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลลดลงโดยถึงตกจมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ความสูงไบโอดีเซล 21 เซนติเมตร (H/D ratio 1.5) สามารถตกจมสปู่ได้ดีเร็วกว่าถึงตกจมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 เซนติเมตร ความสูงไบโอดีเซล 50.8 เซนติเมตร (H/D ratio 5.6) เนื่องจากถึงตกจมขนาด H/D ratio เท่ากับ 1.5 มีบริเวณที่สารผสมสัมผัสกับผิวของถึงตกจมน้อยกว่าถึงตกจมขนาด H/D ratio เท่ากับ 5.6 (ถึงตกจมขนาด H/D ratio เท่ากับ 1.5 และ 5.6 มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารผสมเท่ากับ 924 และ 1,437 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ) ทำให้เกิดแรงเสียดทานบริเวณผิวสัมผัสของถึงตกจมน้อย ส่งผลให้การตกจมของสปู่ในไบโอดีเซลเกิดได้เร็ว (ประสิทธิภาพการกำจัดสปู่ที่ 60% ถึงตกจมขนาด H/D ratio เท่ากับ 1.5 และ 5.6 ใช้เวลา 2.14 และ 4.00 วัน ตามลำดับ) และที่เวลา 5 วัน ถึงตกจมขนาด H/D ratio เท่ากับ 1.5 สามารถกำจัดสปู่ได้สูงสุด 89% และถึงตกจมขนาด H/D ratio เท่ากับ 5.6 สามารถกำจัดสปู่ได้สูงสุด 65% ดังภาพประกอบที่ 4.4

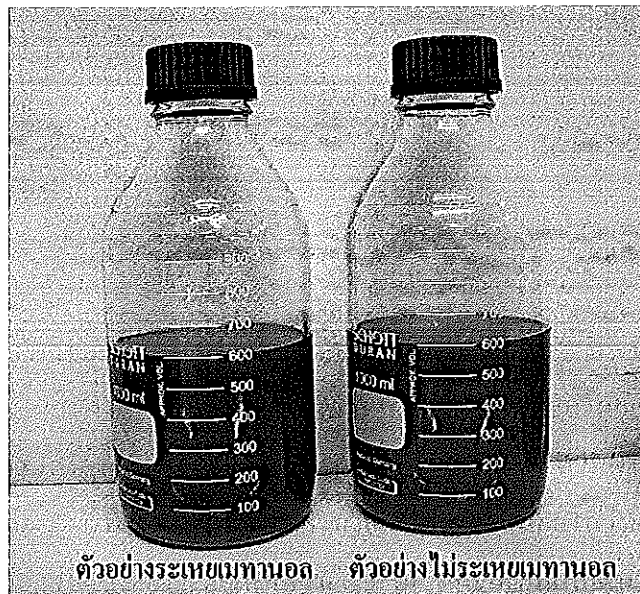


ภาพประกอบที่ 4.4 แสดงผลของเวลาและอัตราส่วนระหว่างความสูงของไบโอดีเซลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถึงตกจม (H/D) ที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดสปู่ในไบโอดีเซล

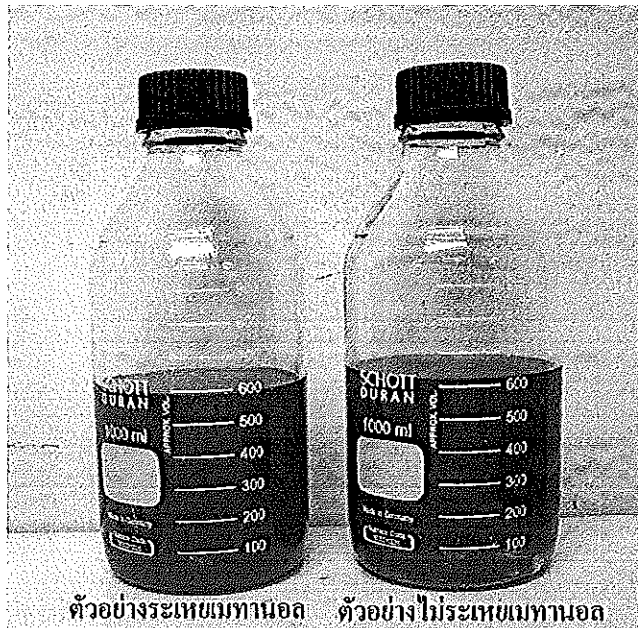


#### 4.1.3 ผลของเมทานอลต่อการตกจมสปูโนไบโอดีเซล

ศึกษาผลของเมทานอลต่อการตกจมสปูโนไบโอดีเซล โดยเปรียบเทียบการตกจมสปูโนไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลกับไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล โดยนำตัวอย่างไบโอดีเซลทั้งสอง (ปริมาณสปูที่แขวนลอยในไบโอดีเซลเท่ากับ 5,012 ppm) มาให้ความร้อนด้วย Water bath อุณหภูมิ 80°C นำมาชั่งน้ำหนักเพื่อดูน้ำหนักที่หายไปทุกๆ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ แล้วนำมาทดสอบการตกจมในกระบอกตวงขนาด 500 ml

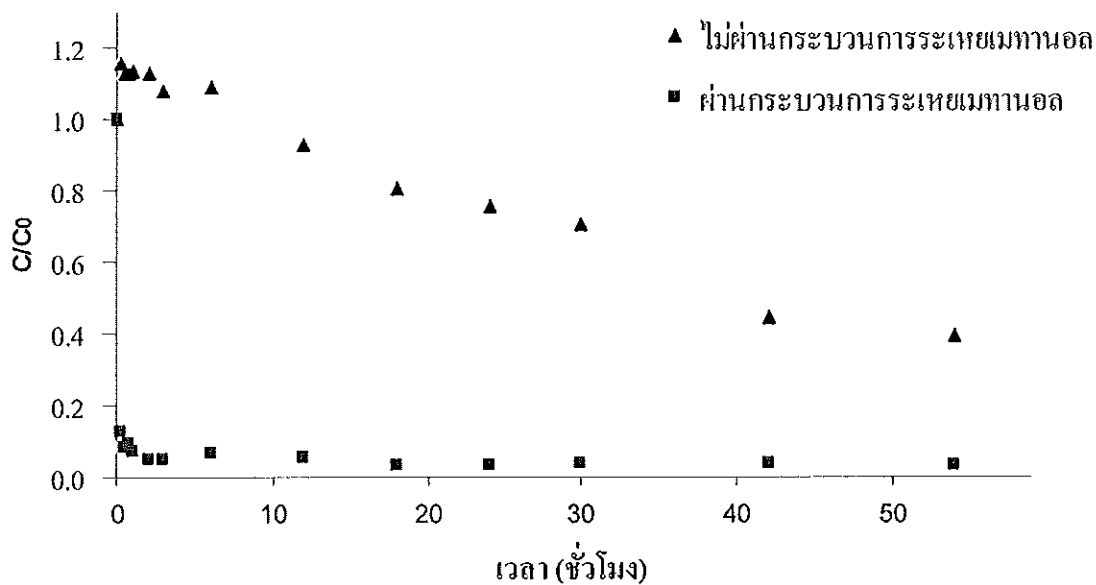


ภาพประกอบที่ 4.5 ตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล



ภาพประกอบที่ 4.6 ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลและไม่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล

เปรียบเทียบภาพประกอบที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลมีลักษณะที่ขุ่นขึ้นเนื่องจากการจับกลุ่มกันของสารพวกสบู่และกลีเซอรอลจนเกิดเป็นตะกอน และตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลพบว่า มีลักษณะที่ใสขึ้นเนื่องจากความร้อนที่ได้รับจะทำให้เกิดการละลายได้ดีของสารผสม



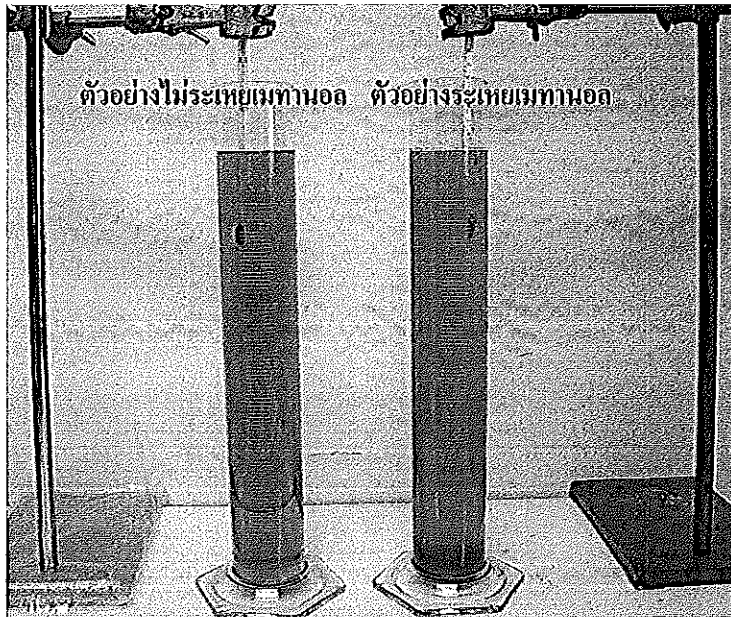
ภาพประกอบที่ 4.7 แสดงผลของเวลาและกระบวนการระเหยเมทานอลที่มีต่ออัตราส่วนความเข้มข้นสปูที่แขวนลอยในไบโอดีเซลต่อความเข้มข้นสปูเริ่มต้น ( $C/C_0$ ) ที่แขวนลอยในไบโอดีเซล

จากภาพประกอบที่ 4.7 พบว่าตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล เมื่อนำมาตกจมและทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 15 นาที ซึ่งเป็นจุดแรกที่เริ่มทำการเก็บตัวอย่างปรากฏว่าปริมาณสปูที่แขวนลอยในไบโอดีเซลลดลงมาก คือค่า  $C/C_0$  เท่ากับ 0.13 เนื่องจากปริมาณสปูในไบโอดีเซลเกิดการจับกลุ่มกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล สปูจึงสามารถตกจมลงมาได้เร็ว หลังจากนั้นปริมาณสปูที่แขวนลอยอยู่ในไบโอดีเซลจะค่อยๆ ตกจมลงภายใน 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นปริมาณสปูจะเริ่มคงที่ที่ค่า  $C/C_0$  เท่ากับ 0.05 หรือมีสปูแขวนลอย 250 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล การตกจมที่เวลา 15 นาที ค่า  $C/C_0$  เท่ากับ 1.15 ซึ่งค่ามากกว่า 1 นั่นคือที่ระดับความลึก 80% ขณะนั้นมีปริมาณสปูแขวนลอยในไบโอดีเซลมากกว่าปริมาณสปูแขวนลอยเริ่มต้นเนื่องจากกลุ่มสปู-กลีเซอรอลซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่าไบโอดีเซลจะตกลงมาแขวนลอยอยู่ที่ระดับล่างก่อนจะตกจมสู่ก้นกระบอกดวง และปริมาณสปูเริ่มลดลงจนค่า  $C/C_0$  น้อยกว่า 1.00 (วัดที่ระดับความลึก 80%) ที่เวลา 12 ชั่วโมง (จุดแรกที่ตรวจพบว่าค่า  $C/C_0$  น้อยกว่า 1.00) ซึ่งใช้เวลาในการตกจมนานกว่าตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล หลังจากนั้นปริมาณสปูก็จะลดลงเรื่อยๆ โดยที่เวลา 54 ชั่วโมง ค่า  $C/C_0$  เท่ากับ 0.39 หรือมีสปูแขวนลอยอยู่ 1,972 ppm

ตารางที่ 4.1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดสปู อุณหภูมิ สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการตกจม

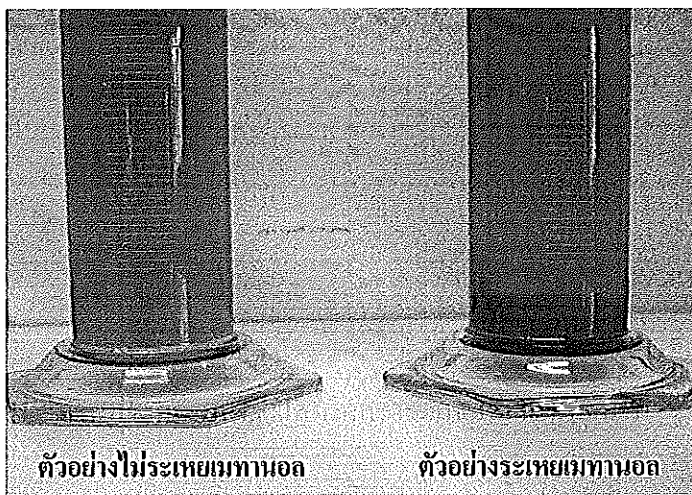
| เวลา<br>(ชั่วโมง) | ก่อนระเหยเมทานอล |                        | หลังระเหยเมทานอล |                        |
|-------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|
|                   | อุณหภูมิ         | Removal efficiency (%) | อุณหภูมิ         | Removal efficiency (%) |
| 0                 | 82               | 0                      | 82               | 0                      |
| 0.25              | 55.5             | -15                    | 56.5             | 87                     |
| 0.5               | 46               | -13                    | 47               | 91                     |
| 0.75              | 39.5             | -13                    | 40               | 91                     |
| 1                 | 36               | -13                    | 36               | 93                     |
| 2                 | 32               | -13                    | 32               | 95                     |
| 3                 | 31               | -8                     | 31               | 95                     |
| 6                 | 30               | -9                     | 30               | 93                     |
| 12                | 28.5             | 7                      | 28.5             | 94                     |
| 18                | 29               | 19                     | 29               | 96                     |
| 24                | 33               | 24                     | 33               | 97                     |
| 30                | 31               | 29                     | 31               | 96                     |
| 42                | 28               | 44                     | 28               | 96                     |
| 54                | 28               | 56                     | 28               | 97                     |

เมื่อนำข้อมูลการทดลองการตกจมสปูในไบโอดีเซลมาคำนวณหาประสิทธิภาพการกำจัดสปู แสดงค่าดังตารางที่ 4.1 พบว่าเวลาที่ใช้ตกจม 0.25 ชั่วโมง (15 นาที) ตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลสามารถกำจัดสปูได้ 87% และที่เวลา 54 ชั่วโมง สามารถกำจัดสปูได้มากถึง 97% ในขณะที่ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลสามารถกำจัดสปูได้เพียง 56% จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่ากระบวนการระเหยเมทานอลสามารถช่วยให้เกิดการตกจมของสปูได้เร็วและดีขึ้น



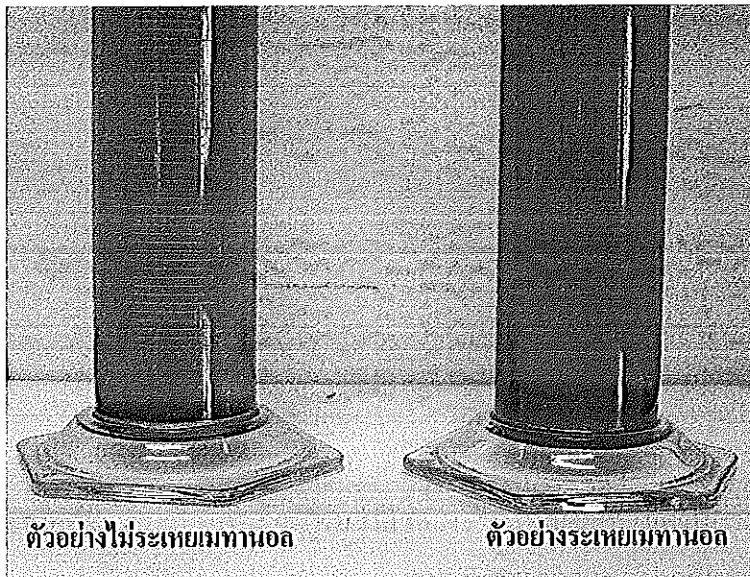
ภาพประกอบที่ 4.8 แสดงผลการตกจมที่เวลา 15 นาที

จากภาพประกอบที่ 4.8 จะเห็นว่าตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลที่เวลา 15 นาที เกิดกลุ่มตะกอนที่ตกลงสู่ก้นกระบอกตวง ลักษณะตะกอนสีเข้มออกน้ำตาล เนื่องจากเป็นกลุ่มสนุ่ร่วมกับกลีเซอรอล



ภาพประกอบที่ 4.9 แสดงผลการตกจมที่เวลา 1 ชั่วโมง

จากภาพประกอบที่ 4.9 พบว่าตัวอย่างไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล มีลักษณะพุ่งขึ้นเมื่อเทียบกับที่เวลา 15 นาที เนื่องจากกลุ่มสบู่-กลีเซอรอลเริ่มมีการจับกลุ่มกันจนเห็นเป็นตะกอน



ภาพประกอบที่ 4.10 แสดงผลการตกจมที่เวลา 18 ชั่วโมง

จากภาพประกอบที่ 4.10 จะสังเกตเห็นชั้นตะกอนสบู่-กลีเซอรอลของตัวอย่างไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลชัดเจนขึ้น มีลักษณะสีเข้มออกน้ำตาลเช่นเดียวกับตะกอนของตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล

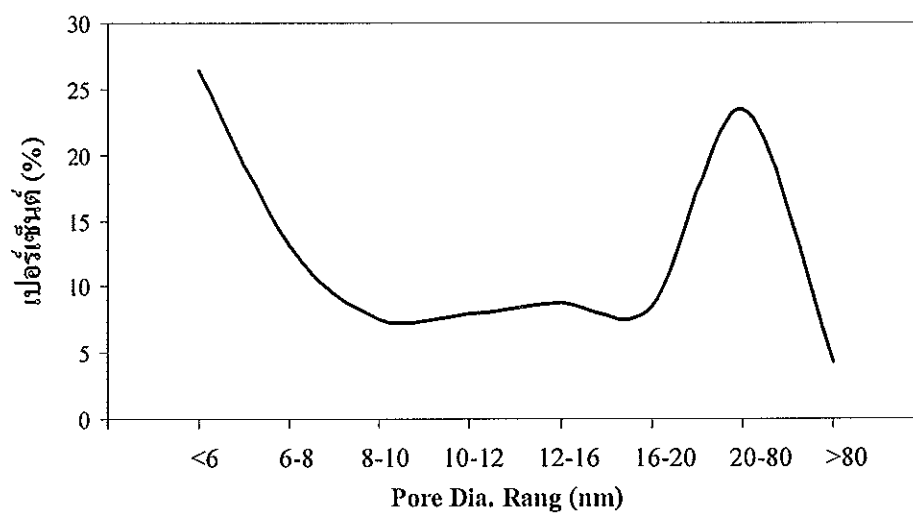
## 4.2 ความสามารถของดินฟอกที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ

### 4.2.1 คุณสมบัติของดินฟอกที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ

ในการทดลองนี้ได้ใช้ดินฟอกเป็นวัสดุดูดซับจากบริษัท Actochem (Thai) Industries co.,LTD นำไปวิเคราะห์คุณสมบัติได้แก่ พื้นที่ผิว BET ความหนาแน่นรวม (Bulk density) Void fraction แสดงดังตารางที่ 4.2 Pore Size Distribution แสดงดังภาพประกอบที่ 4.11 และ Particle Size Distribution แสดงดังภาพประกอบที่ 4.12

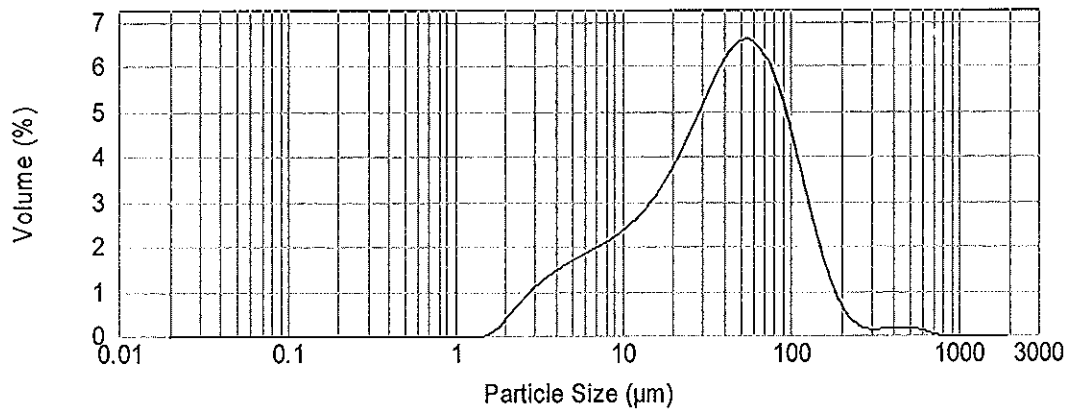
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของดินฟอก

| คุณสมบัติ | พื้นที่ผิว BET<br>m <sup>2</sup> /g | Pore Volume<br>(ml/g) | ความหนาแน่นรวม<br>(g/ml) | Void Fraction |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------|
| ดินฟอก    | 338.22                              | 0.3659                | 0.66                     | 0.69          |



ภาพประกอบที่ 4.11 Pore Size Distribution ของดินฟอก

ขนาดของรูพรุนของดินฟอกส่วนมากจะอยู่ในช่วงต่ำกว่า 6 นาโนเมตร คิดเป็น 26.4% และขนาดอนุภาคดินฟอกส่วนมากอยู่ที่ประมาณ 50-60 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12

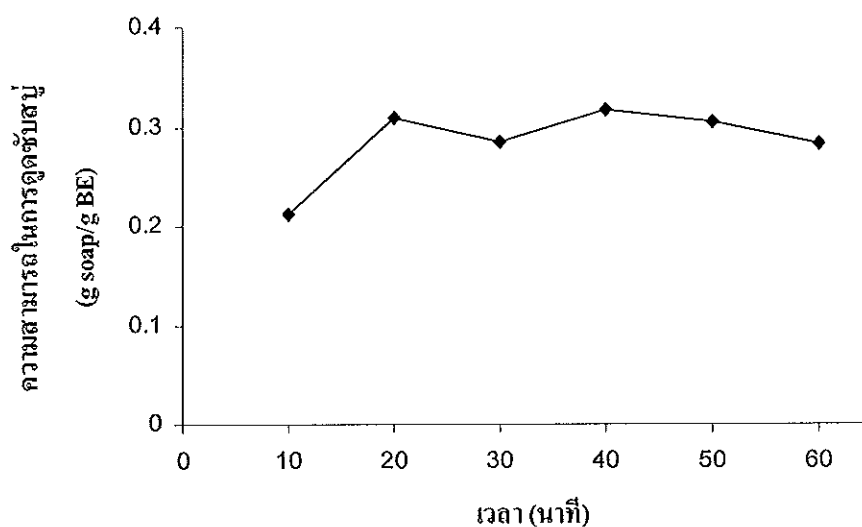


ภาพประกอบที่ 4.12 Particle Size Distribution ของดินฟอก

#### 4.2.2 การดูดซับสบู่ในระบบแบบกะ (Batch)

##### 4.2.2.1 สภาวะเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง

ศึกษาสภาวะเริ่มต้นคือเวลาและความเร็วรอบของการกวนเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป สำหรับการศึกษาค่าผลของเวลาได้ทำการทดลองในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร โดยใช้ดินฟอก 1.0 % โดยน้ำหนักในการดูดซับสบู่ที่สภาวะบรรยากาศ ความเร็วรอบในการกวน 400 rpm ตัวอย่าง ไบโอดีเซลก่อนล้างซึ่งมีปริมาณสบู่แขวนลอย 3,255 ppm ทดสอบที่เวลา 10 ถึง 60 นาที ผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4.13

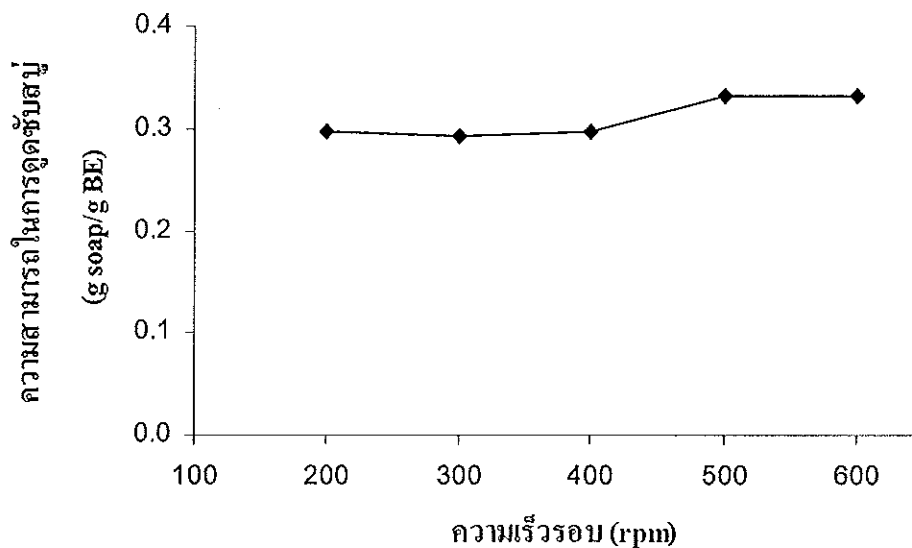


ภาพประกอบที่ 4.13 แสดงผลของเวลาต่อความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอก



จากภาพประกอบที่ 4.13 พบว่าที่เวลา 10 20 30 40 50 และ 60 นาที ดินฟอกมีความสามารถในการดูดซับสบู่เท่ากับ 0.2119 0.3097 0.2851 0.3170 0.3059 และ 0.2825 g soap/g BE ตามลำดับ ดังนั้นเวลาที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดลองต่อไปคือ 20 นาที แม้ว่าที่เวลา 40 นาที จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดสบู่สูงสุด แต่เนื่องจากความสามารถในการดูดซับสบู่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งเพื่อประหยัดพลังงาน จึงเลือกใช้เวลาที่ 20 นาทีในการทดลองต่อไป

ศึกษาผลความเร็วรอบในการกวน ทำการทดลองโดยใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนล้างซึ่งมีปริมาณสบู่แขวนลอย 4,872 ppm ดินฟอก 1.0 % โดยน้ำหนัก เวลา 20 นาที ที่สภาวะบรรยากาศ ความเร็วรอบในการกวน 200 ถึง 600 rpm ผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4.14

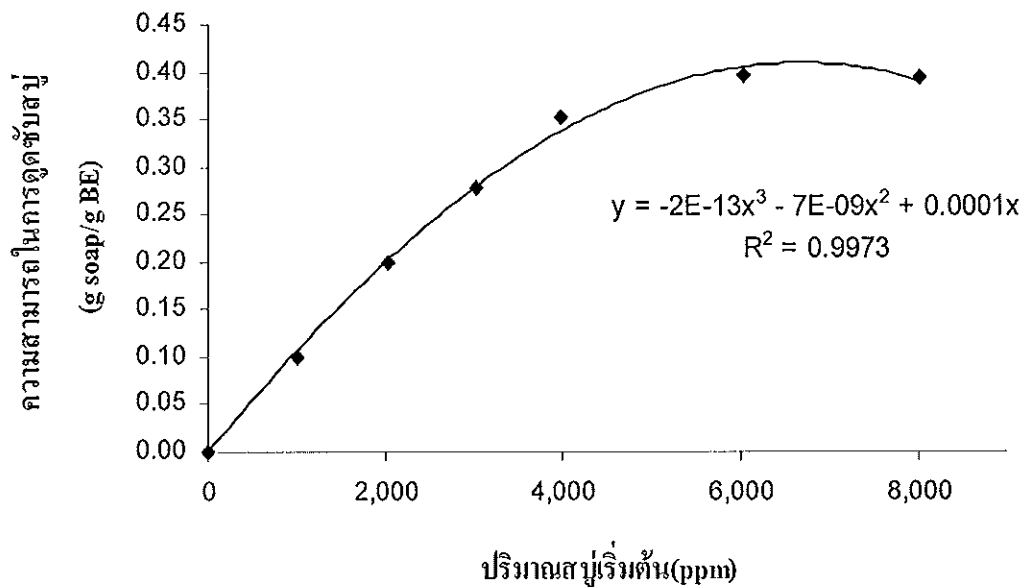


ภาพประกอบที่ 4.14 แสดงผลของความเร็วรอบต่อความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอก

จากภาพประกอบที่ 4.14 พบว่าความเร็วรอบในการกวนที่ 200 300 400 500 และ 600 rpm ดินฟอกมีประสิทธิภาพในการกำจัดสบู่เท่ากับ 0.2963 0.2928 0.2964 0.3312 และ 0.3321 g soap/g BE ตามลำดับ เนื่องจากความสามารถในการดูดซับสบู่ที่ความเร็วรอบ 500 และ 600 rpm ไม่แตกต่างกันมากดังนั้นจึงเลือกใช้ความเร็วรอบในการกวน 500 rpm ในการทดลองต่อไป

#### 4.2.2.2 ศึกษาผลของปริมาณสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอก

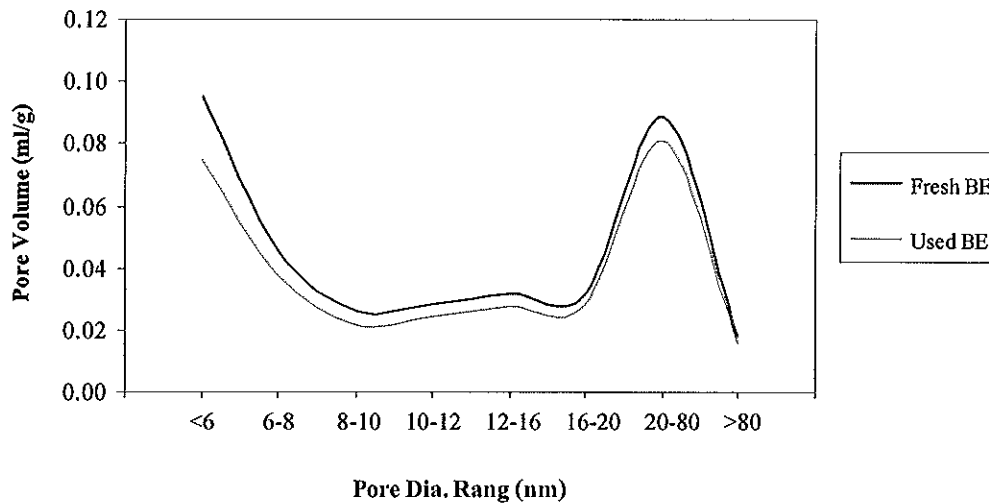
ทดลองโดยใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนล้างที่มีปริมาณสบู่แขวนลอยประมาณ 1,000 ถึง 8,000 ppm ดินฟอก 1% โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่สภาวะบรรยากาศ ความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 20 นาที ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 4.15



ภาพประกอบที่ 4.15 แสดงผลของปริมาณสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลเริ่มต้นต่อความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอก

จากภาพประกอบที่ 4.15 พบว่าความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 1,000 ถึง 6,000 ppm ค่าความสามารถในการดูดซับสบู่เพิ่มจาก 0.0997 เป็น 0.3956 g soap/g BE ซึ่งเป็นค่าความสามารถในการดูดซับสบู่สูงสุด เนื่องจากความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (The equilibrium adsorption capacity) จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณตัวถูกดูดซับเริ่มต้น (Tsai et al, 2005) จนกระทั่งถึงขีดจำกัดของการถ่ายโอนมวลซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อเฟสทั้งสองเข้าสู่สภาวะสมดุลและขึ้นกับความจุในการดูดซับสบู่ของดินฟอก จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซลเริ่มต้นมากกว่า 6,000 ppm ค่าความสามารถในการดูดซับจะค่อนข้างคงที่หรือมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีปริมาณสบู่สูงมักจะมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ สูงขึ้นด้วย เช่น กลีเซอรอล จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอกมี

แนวโน้มน้ำที่จะลดลงด้วย (ค่าความสามารถในการดูดซับสบู่ที่ปริมาณสบู่เริ่มต้น 8,000 ppm เท่ากับ 0.3933 g soap/g BE)

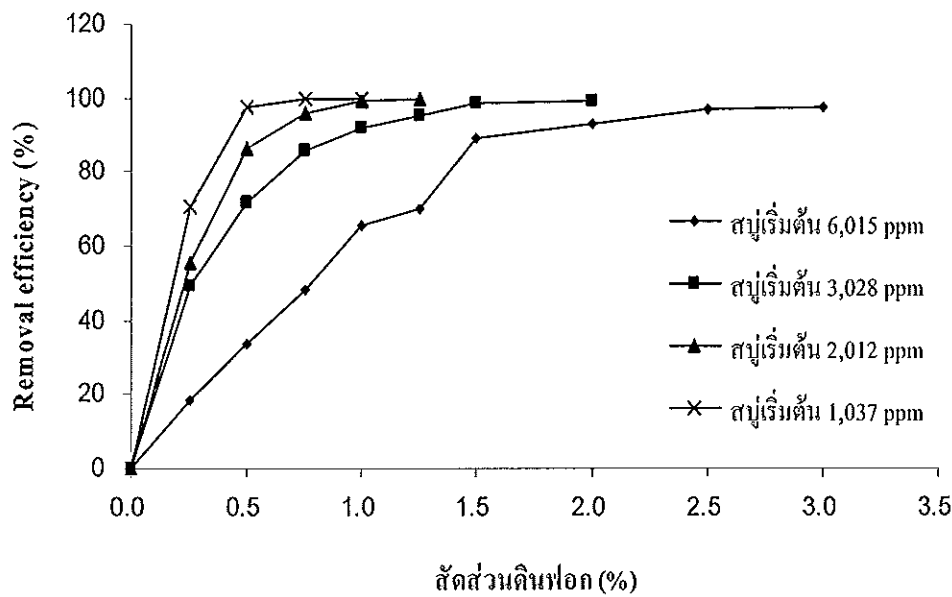


ภาพประกอบที่ 4.16 Pore Size Distribution ของดินฟอกที่ผ่านและไม่ผ่านการใช้งาน

จากภาพประกอบที่ 4.16 จะเห็นว่าดินฟอกที่ผ่านการใช้งานจะมีปริมาณของรูพรุนลดลงเมื่อเทียบกับดินฟอกที่ไม่ผ่านการใช้งาน ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ช่วยยืนยันสมมติฐานที่ว่าดินฟอกมีความสามารถในการดูดซับสบู่

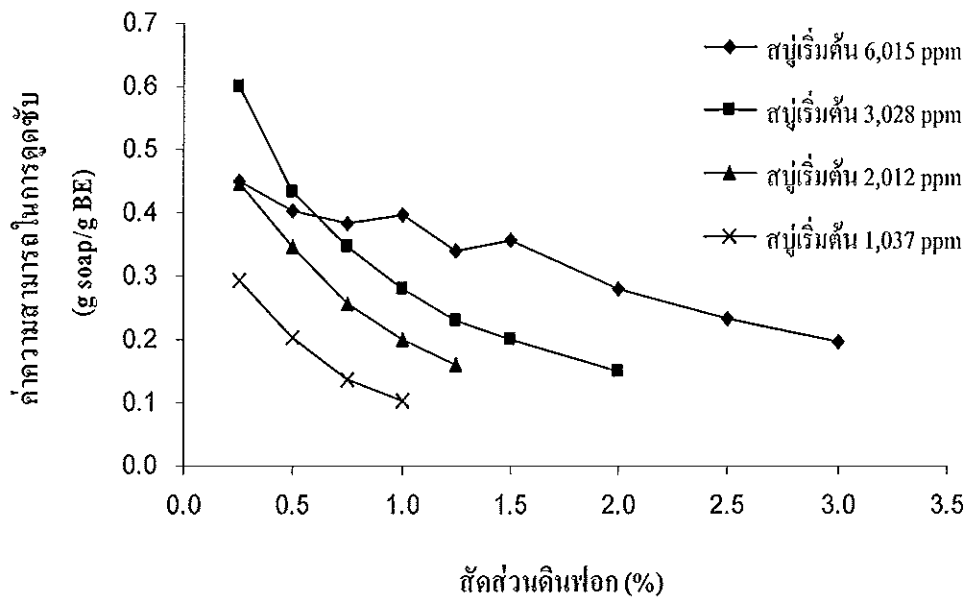
#### 4.2.2.3 ศึกษาผลของสัดส่วนดินฟอกที่ใช้ในการดูดซับสบู่

ทำการทดลองโดยใช้ดินฟอก 0.25-3.00 % โดยน้ำหนัก ดูดซับสบู่ซึ่งแขวนลอยในไบโอดีเซลเป็นปริมาณ 6,015 3,028 2,012 และ 1,037 ppm ได้ผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4.17 และภาพประกอบที่ 4.18



ภาพประกอบที่ 4.17 แสดงผลสัดส่วนดินฟอกต่อประสิทธิภาพการกำจัดสนับที่แขวนลอย  
ในไบโอดีเซล

จากภาพประกอบที่ 4.17 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสนับจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของดินฟอก โดยในช่วงแรกประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและค่อยๆ ช้าลงจนคงที่ที่ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดของแต่ละตัวอย่างไบโอดีเซลซึ่งมีปริมาณสนับเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ กัน ตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีปริมาณสนับแขวนลอยน้อยก็จะถึงจุดสูงสุดของประสิทธิภาพการกำจัดสนับได้ที่สัดส่วนดินฟอกต่ำกว่า แต่เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับสนับที่สัดส่วนดินฟอกสูง ค่าความสามารถในการดูดซับสนับของดินฟอกจะต่ำลง แสดงดังภาพประกอบที่ 4.18 ซึ่งอาจทำให้เกิดการใช้ดินฟอกอย่างไม่คุ้มค่า ดังนั้นหากพิจารณาสัดส่วนของดินฟอกที่เหมาะสมในการกำจัดสนับจึงควรคำนึงถึงต้นทุนและความสามารถในการดูดซับสนับด้วย

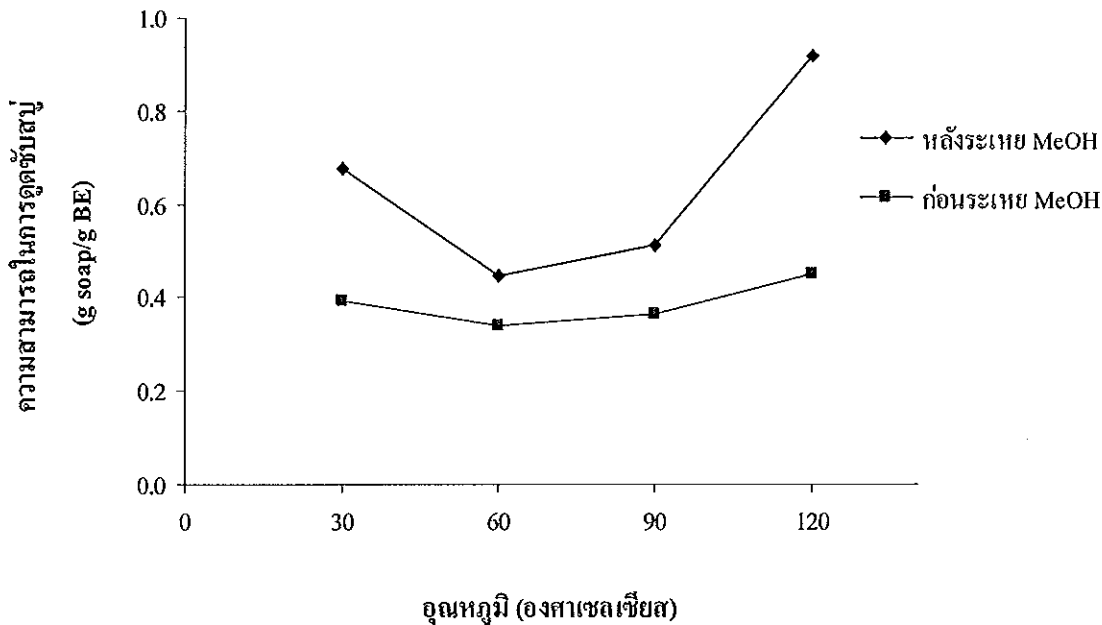


ภาพประกอบที่ 4.18 แสดงผลสัดส่วนดินฟอกต่อความสามารถในการดูดซับสบู่ที่แขวนลอยในไบโอดีเซล

จากภาพประกอบที่ 4.18 จะเห็นว่าการดูดซับสบู่ที่สัดส่วนดินฟอกต่ำค่าความสามารถในการดูดซับสบู่จะมีค่ามากกว่าที่สัดส่วนดินฟอกสูง โดยที่สัดส่วนดินฟอกเดียวกัน ค่าความสามารถในการดูดซับสบู่ของตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีสบู่แขวนลอย 6,015 ppm จะมีค่ามากกว่าตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีสบู่แขวนลอย 3,028 2,012 1,037 ppm ตามลำดับ ยกเว้นที่สัดส่วนดินฟอกในช่วง 0.25-0.75% ค่าความสามารถในการดูดซับสบู่ของตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีสบู่แขวนลอย 6,015 ppm จะต่ำกว่าแนวโน้มที่ควรจะเป็นเนื่องจากตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีปริมาณสบู่แขวนลอยมากมักจะมีสารปนเปื้อนอื่นๆ มากด้วยจึงทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสบู่ต่ำลง

#### 4.2.2.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับสบู่

ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิที่สภาวะบรรยากาศถึง 120 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนระเหยเมทานอลซึ่งมีปริมาณสบู่แขวนลอย 8,016 ppm ที่สัดส่วนดินฟอก 1 % และตัวอย่างไบโอดีเซลหลังระเหยเมทานอลซึ่งมีปริมาณสบู่แขวนลอย 1,450 ppm ที่สัดส่วนดินฟอก 0.1 % ผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4.19



ภาพประกอบที่ 4.19 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับสบู่ที่  
แขวนลอยในไบโอดีเซล

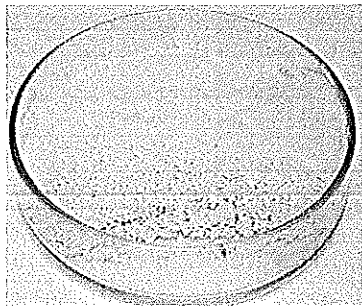
จากภาพประกอบที่ 4.19 พบว่าที่อุณหภูมิ 120 °C ดินฟอกมีความสามารถในการดูดซับสบู่ได้ดีที่สุด ทั้งในตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนระเหยเมทานอลและหลังระเหยเมทานอล โดยตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนระเหยเมทานอลที่อุณหภูมิสถานะบรรยากาศ 60 90 และ 120°C ดินฟอกมีความสามารถในการดูดซับสบู่เท่ากับ 0.3949 0.3390 0.3653 และ 0.4516 ตามลำดับ และตัวอย่างไบโอดีเซลหลังระเหยเมทานอลที่อุณหภูมิสถานะบรรยากาศ 60 90 และ 120°C ดินฟอกมีความสามารถในการดูดซับสบู่เท่ากับ 0.6774 0.4452 0.5106 และ 0.9181 ตามลำดับ จะเห็นว่าอุณหภูมิที่สถานะบรรยากาศซึ่งมีค่าประมาณ 30°C ค่าความสามารถในการดูดซับสูงกว่าที่อุณหภูมิ 60°C และ 90°C ทั้งนี้เนื่องจากที่สถานะบรรยากาศ สบู่จะมีแนวโน้มในการรวมตัวกันเป็นกลุ่มตะกอนมากกว่าที่อุณหภูมิสูง ทำให้กลไกการขจัดสบู่ของดินฟอกโดยการกรองจะเพิ่มสูงขึ้นและที่อุณหภูมิ 120°C ความปั่นป่วนจากการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยให้เกิดการแพร่กระจายของสบู่เข้าไปในโครงสร้างดินฟอก ทำให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอกในตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนระเหยเมทานอลและหลังระเหยเมทานอลที่อุณหภูมิ 120°C พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอกในตัวอย่างไบโอดีเซลหลังระเหยเมทานอลมีค่ามากกว่าค่าความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอกในตัวอย่างไบโอดีเซลก่อนระเหยเมทานอลประมาณ 2 เท่า เนื่องจาก

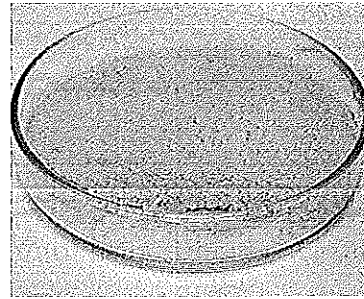
กระบวนการระเหยเมทานอลจะช่วยลดปริมาณสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้ ทั้งเมทานอลและช่วยให้กลีเซอรอลแยกชั้นจากไบโอดีเซลได้ดีขึ้น มีผลทำให้สิ่งปนเปื้อนที่จะไปกีดขวางการดูดซับสูญของดินฟอกลดลง

#### 4.2.2.5 ศึกษาความสามารถในการนำดินฟอกกลับมาใช้ใหม่

นำดินฟอกที่ผ่านการใช้งานแล้วมาสกัดสิ่งปนเปื้อนออกด้วยอะซิโตน โดยใช้ดินฟอก 1 กรัมต่ออะซิโตน 5 มิลลิลิตร และเพิ่มประสิทธิภาพของดินฟอกด้วยการนำไปเผาที่ความร้อน  $500^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที นำดินฟอกที่ได้ไปศึกษาคุณสมบัติโดยใช้เครื่อง BET surface area



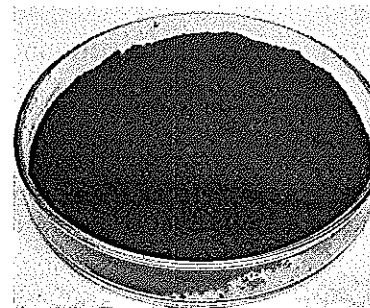
(ก)



(ข)



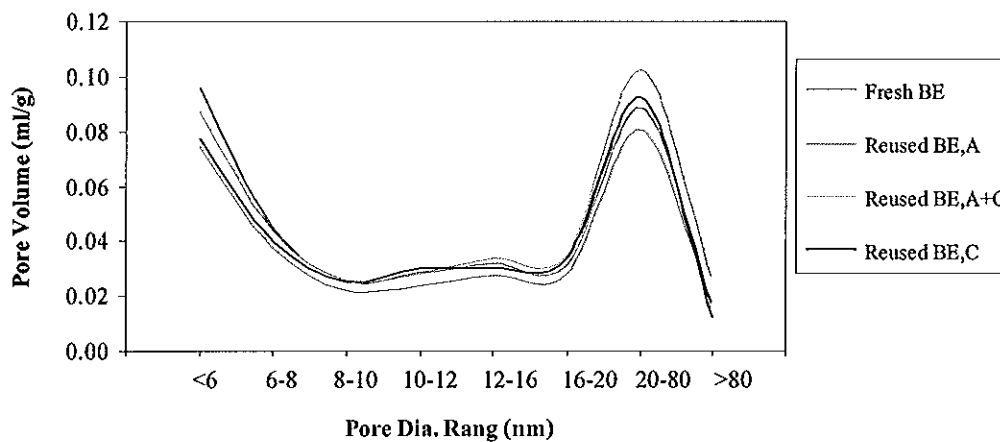
(ค)



(ง)

ภาพประกอบที่ 4.20 แสดงลักษณะของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูเปรียบเทียบกับดินฟอกที่ไม่ผ่านการใช้งาน (ก) ดินฟอกที่ไม่ผ่านการใช้งาน (ข) ดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการสกัดด้วยอะซิโตน (ค) ดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการสกัดด้วยอะซิโตนและการเผา (ง) ดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการเผา

จากภาพประกอบที่ 4.20 เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูกับดินฟอกที่ไม่ผ่านการใช้งานจะเห็นว่าลักษณะของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูจะมีสีที่เข้มขึ้น โดยดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการสกัดโดยใช้อะซิโตน (Reused BE,A) แสดงดังภาพประกอบที่ 4.20 (ข) จะมีสีน้ำตาลอ่อนจากการดูดซับสีในน้ำมัน ภาพประกอบที่ 4.20 (ค) แสดงดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการสกัดโดยใช้อะซิโตนและการเผา (Reused BE, A+C) ลักษณะดินฟอกจะมีสีเทาเข้ม เนื่องจากผ่านการสกัดด้วยอะซิโตนก่อนทำให้กลุ่มไฮโดรคาร์บอนของน้ำมันมีปริมาณลดลงสีดินฟอกที่ได้จึงไม่เข้มจนดำเท่ากับภาพประกอบที่ 4.20 (ง) ซึ่งแสดงลักษณะดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูโดยการเผาเพียงอย่างเดียว (Reused BE, C)



ภาพประกอบที่ 4.21 Pore Size Distribution ของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการสกัดและการเผา

จากภาพประกอบที่ 4.21 พิจารณารูปร่างของรูพรุนในช่วงน้อยกว่า 6 นาโนเมตร ถึง 8 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่าดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูมีปริมาณของรูพรุนลดลง แต่เมื่อพิจารณารูปร่างรูพรุนในช่วง 20-80 นาโนเมตร พบว่าการฟื้นฟูด้วยการเผาสามารถเพิ่มปริมาณของรูพรุนได้ โดยเฉพาะดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูโดยการสกัดด้วยอะซิโตนแล้วนำมาเผา

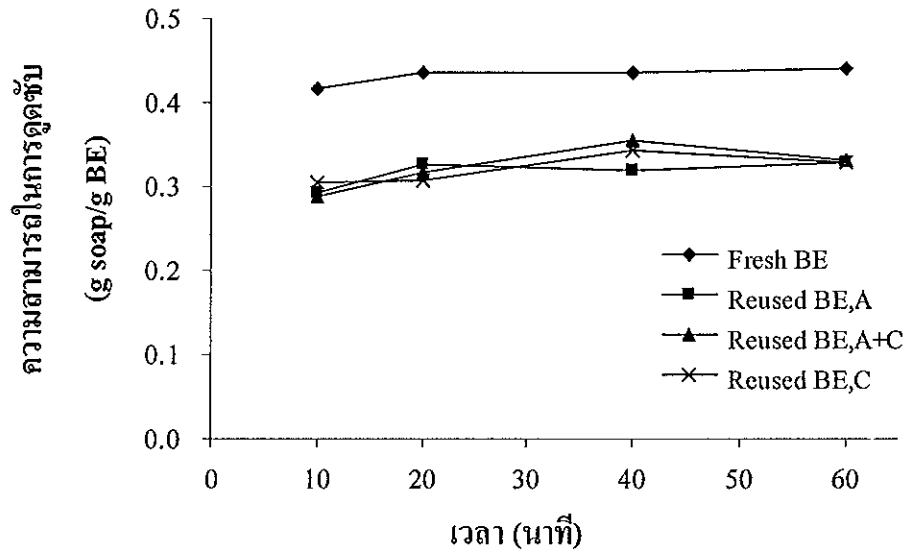


ตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการสกัดและการเผาไหม้

| คุณสมบัติ                      | Fresh BE | Reused BE,A | Reused BE,A+C | Reused BE,C |
|--------------------------------|----------|-------------|---------------|-------------|
| Pore Volume (ml/g)             | 0.3659   | 0.3118      | 0.3838        | 0.3416      |
| Micropore Volume (ml/g)        | 0.0111   | 0           | 0.0056        | 0           |
| BET Surface area (sq.m/g)      | 338.22   | 238.29      | 304.49        | 290.2       |
| Micropore surface area(sq.m/g) | 30.29    | 0           | 17.11         | 3.899       |

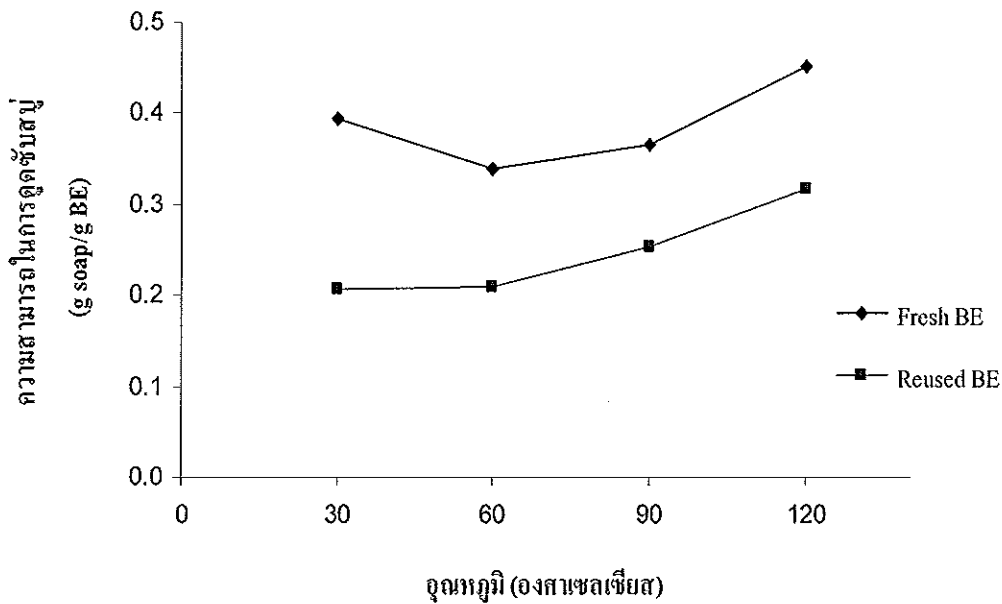
พิจารณา Pore Volume และ BET Surface area จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าการเผาสามารถเพิ่มปริมาตรของรูพรุนได้โดยปริมาตรรูพรุนของดินฟอกที่ไม่ผ่านการใช้งาน (Fresh BE) ดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการสกัดด้วยอะซิโตน (Reused BE, A) ดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูโดยการสกัดและการเผา (Reused BE, A+C) และดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยการเผา (Reused BE, C) มีค่าเท่ากับ 0.3659 0.3118 0.3838 และ 0.3416 ml/g ตามลำดับ และพื้นที่ผิวของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูจะลดลงโดยดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูโดยการสกัดด้วยอะซิโตนและการเผามีพื้นที่ผิวมากที่สุดคือ 304.49 sq.m/g รองลงมาคือดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูโดยการเผามีพื้นที่ผิว 290.2 sq.m/g สุดท้ายคือดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูโดยการสกัดด้วยอะซิโตนมีพื้นที่ผิว 238.29 sq.m/g

ดินฟอกที่ได้นำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบกับดินฟอกที่ไม่ผ่านการใช้งาน โดยใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลที่มีปริมาณสบู่แวนลอย 4,589 ppm และสัดส่วนดินฟอกเท่ากับ 0.5 %



ภาพประกอบที่ 4.22 แสดงผลความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูต่อเวลาในการดูดซับ

จากการฟื้นฟูดินฟอกโดยการสกัดด้วยอะซิโตนและการเผาที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  พบว่าดินฟอกที่สกัดด้วยอะซิโตนเพียงอย่างเดียว (Reused BE,A) ดินฟอกที่ฟื้นฟูโดยการเผา (Reused BE,C) และดินฟอกที่ผ่านการสกัดด้วยอะซิโตนแล้วนำไปเผา (Reused BE,A+C) ค่าความสามารถในการดูดซับสบู่ไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนักและเมื่อเปรียบเทียบกับดินฟอกที่ยังไม่ผ่านการใช้งานพบว่าที่เวลา 20 นาที ค่าความสามารถในการดูดซับของ Fresh BE, Reused BE,A, Reused BE,A+C และ Reused BE,C เท่ากับ 0.4368 0.3251 0.3158 และ 0.3051 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.22 นั่นคือประสิทธิภาพในการฟื้นฟูดินฟอกด้วยวิธีดังกล่าวมีค่าประมาณ 72%



ภาพประกอบที่ 4.23 แสดงผลความสามารถในการดูดซับสบู่ของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูต่ออุณหภูมิในการดูดซับ

จากภาพประกอบที่ 4.23 พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับสบู่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสบู่ของดินฟอกที่ผ่านการฟื้นฟูได้ โดยดินฟอกที่ผ่านสกัดด้วยอะซิโตน (Reused BE) มีค่าความสามารถในการดูดซับที่อุณหภูมิที่สภาวะบรรยากาศ 60 90 120°C เท่ากับ 0.2070 0.2084 0.2539 และ 0.3166 ตามลำดับ แต่ในการปฏิบัติงานจริงการใช้อุณหภูมิในการดูดซับ อาจจะไม่เป็นผลดีเนื่องจากต้องเสียค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเพิ่มขึ้น

## 4.2.3 การจัดส่งปุ๋ยโดยใช้ดินฟอกในระบบแบบ Packed Column

### 4.2.3.1 การออกแบบการใช้ดินฟอกในระบบแบบ Packed Column

เนื่องจากดินฟอกมีลักษณะเป็นอนุภาคละเอียดซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเกิดการกีดขวางและเกิดการเกิดพื้นที่เบดที่ไม่ได้ใช้งาน การทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการที่เหมาะสมในการใช้ดินฟอกในระบบแบบ Packed Column เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

การดูดซับปุ๋ยโดยใช้ดินฟอกในระบบแบบ Packed Column ดำเนินการทดลองที่สภาวะบรรยากาศ ไบโอดีเซลที่ใช้ทดสอบเป็น ไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านการระเหยเมทานอล มีสารแขวนลอยอยู่ในช่วง 11,000-12,000 ppm ดินฟอก 15 กรัม โดยเปรียบเทียบลักษณะการดูดซับ 4 วิธีการคือ

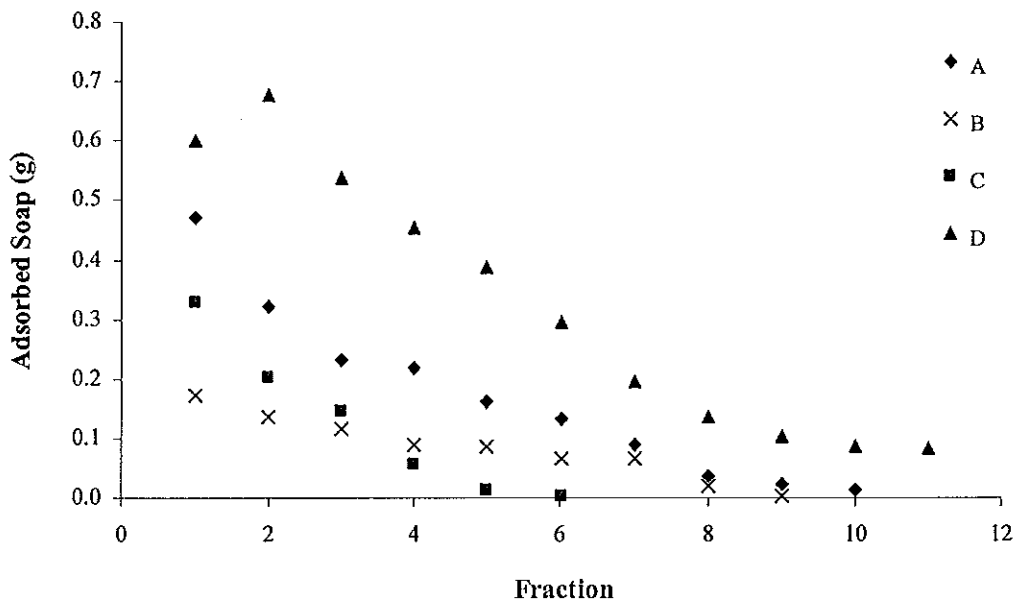
- ใช้ดินฟอกซึ่งมีลักษณะเป็นผงดูดซับในคอลัมน์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร อัตราการไหล 3.7 มิลลิลิตร/นาที (A)

- ใช้ดินฟอกซึ่งมีลักษณะเป็นผงดูดซับในคอลัมน์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ยาว 17.3 เซนติเมตร อัตราการไหล 3.7 มิลลิลิตร/นาที (B)

- ใช้ดินฟอกซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ยาว 4 มิลลิเมตร ดูดซับในคอลัมน์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร อัตราการไหล 2.0 มิลลิลิตร/นาที (C)

- ใช้ดินฟอกเป็นสเลอรี (ส่วนผสมของดินฟอกและน้ำมัน) ดูดซับในคอลัมน์ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร อัตราการไหล 3.7 มิลลิลิตร/นาที (D)

แสดงผลการทดลองดังภาพประกอบที่ 4.24



ภาพประกอบที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสบู่ที่ถูกดูดซับในแต่ละแฟรกชัน ด้วยวิธีการกำจัดสบู่แบบต่างๆ

จากการทดสอบระบบดูดซับแบบ Packed Column พบว่าระบบเกิดพื้นที่เบดที่ไม่ได้ใช้งานในปริมาณมาก ทำให้ดินฟอกดูดซับสบู่ได้ในปริมาณน้อยจึงมีการศึกษาการดูดซับโดยใช้คอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ศึกษาการดูดซับโดยใช้ดินฟอกอัดเม็ดและใช้ดินฟอกเป็นแบบสเลอรี ผลปรากฏว่าการดูดซับโดยใช้ดินฟอกเป็นแบบสเลอรี (D) สามารถดูดซับสบู่ได้ปริมาณมากที่สุด 3.56 กรัมในปริมาตรไบโอดีเซล 1,100 มิลลิลิตร รองลงมาคือการศึกษาการดูดซับโดยใช้ดินฟอกแบบผงในคอลัมน์ทรงสูง (A) สามารถดูดซับสบู่ได้ 1.70 กรัมในปริมาตรไบโอดีเซล 1,000 มิลลิลิตร ดินฟอกแบบผงในคอลัมน์ทรงเตี้ย (B) สามารถดูดซับสบู่ได้ 0.76 กรัมในปริมาตรไบโอดีเซล 900 มิลลิลิตร และดินฟอกแบบอัดเม็ด (C) ดูดซับสบู่ได้น้อยที่สุด 0.75 กรัมในปริมาตรไบโอดีเซล 600 มิลลิลิตร แสดงดังภาพประกอบที่ 4.24 เนื่องจากการทดลอง A B และ C เกิดพื้นที่เบดที่ไม่ได้ใช้งานเยอะ ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับสารน้อยจึงเกิดการดูดซับสบู่ได้น้อย โดยการทดลอง A สามารถดูดซับสบู่ได้มากกว่าการทดลอง B ทั้งที่ใช้ดินฟอกแบบผงเหมือนกันและอัตราการไหลเท่ากัน เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ในการทดลอง A น้อยกว่าการทดลอง B ความเร็วพื้นผิว (Superficial velocity) ของการทดลอง A จึงมากกว่าการทดลอง B (ความเร็วพื้นผิวของการทดลอง A และ B เท่ากับ  $1 \times 10^{-4}$  และ  $5 \times 10^{-5}$  m/s ตามลำดับ) ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของดินฟอกได้ดีกว่า เกิดการสัมผัสกันระหว่างดินฟอกกับสบู่ดีกว่า จึงสามารถดูดซับสบู่ได้มากกว่า ส่วนการ

ทดลอง C เป็นการทำดินฟอกอัดเม็ดทำให้สูญเสียพื้นที่ผิวสัมผัสของดินฟอกอีกทั้งทำให้การแพร่กระจายของสารเข้าสู่รูพรุนภายในโครงสร้างดินฟอกเป็นไปได้ยากขึ้นด้วย การทำดินฟอกให้เป็นสเลอรี่ก่อนจะช่วยลดการเกิดพื้นที่เบดที่ไม่ได้ใช้งาน ทำให้สารสัมผัสกับพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับมากขึ้นเกิดการดูดซับสูงมากขึ้น

#### 4.2.4 ทดสอบการกำจัดสบู่น้ำด้วยกระบวนการตกจมและการดูดซับ

เป็นการประยุกต์ใช้ผลที่ได้จากการศึกษาทั้งหมดมาทดสอบการกำจัดสบู่ ใช้ตัวอย่างไบโอดีเซล 4 ลิตร โดยเริ่มจากกระบวนการตกจมซึ่งมีการระเหยเมทานอลก่อนที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไบโอดีเซลที่ได้มาตกจมสบู่หรืออาจกรองด้วยผ้าขาว เพื่อเป็นการลดเวลาในการตกจมหลังจากนั้นนำไบโอดีเซลมาผ่านการดูดซับด้วยดินฟอกแบบต่อเนื่องด้วยระบบ Packed column ปริมาณดินฟอก 15 กรัม ใช้แบบสเลอรี่ อัตราการไหล 1.58 มิลลิลิตร/นาที สุดท้ายนำตัวอย่างไบโอดีเซลไปกำจัดสบู่ด้วยการล้างน้ำ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 และภาพประกอบที่ 4.25

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณสบู่ในไบโอดีเซลในแต่ละขั้นตอน

| ขั้นตอน                                  | ปริมาณสบู่ (ppm) |
|--|------------------|
| ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันครั้งที่ 2 | 11,188           |
| การตกจม                                  | 2,022            |
| การดูดซับด้วยดินฟอก                      | 0                |
| การล้างน้ำ                               | -                |

จากตารางที่ 4.4 ปริมาณสบู่หลังทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันเท่ากับ 11,188 ppm เมื่อผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลและตกจมสบู่ทำให้ปริมาณสบู่ลดลงเหลือ 2,022 ppm จากนั้นนำไปดูดซับด้วยดินฟอก ได้ปริมาณไบโอดีเซล 2.76 ลิตร เนื่องจากระบบ Packed column เกิดการอุดตันจึงได้ทำการหยุดการทดลองแต่เพียงเท่านี้ ปริมาณสบู่หลังการดูดซับด้วยดินฟอกลดลงเป็น 0 ppm หมายความว่าไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับสบู่ด้วยระบบ Packed column มีสามารถในการกำจัดสบู่ได้ 100 % เนื่องจากในกระบวนการระเหยเมทานอลจะทำให้กลีเซอรอลและสบู่จับตัวกันเป็นกลุ่มตะกอนมากขึ้น ทำให้กลไกในการกำจัดสบู่ของดินฟอกด้วยวิธีการกรอง

เพิ่มมากขึ้น สามารถกำจัดสปูได้ดีขึ้น นอกจากนี้การใช้ดินฟอกแบบสเลอรี่จะทำให้ปริมาณเบค  
เพิ่มขึ้นจึงเป็นการเพิ่มเวลาในการดูดซับสปูมากขึ้น



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพประกอบที่ 4.25 แสดงตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการกำจัดสปู (ก) ตัวอย่างไบโอดีเซลหลังกระบวนการตกจม (ข) ตัวอย่างไบโอดีเซลหลังผ่านกระบวนการดูดซับด้วยดินฟอกแฟรกชันแรก (ค) ตัวอย่างไบโอดีเซลหลังผ่านกระบวนการดูดซับด้วยดินฟอกแฟรกชันสุดท้าย

จากภาพประกอบที่ 4.25 พบว่าตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยดินฟอกในแฟรกชันแรกจะมีสีที่อ่อนลงกว่าเดิมเมื่อเทียบกับภาพประกอบที่ 4.25 (ก) ซึ่งเป็นตัวอย่างก่อนการดูดซับด้วยดินฟอกเนื่องจากดินฟอกมีคุณสมบัติในการดูดซับสีดังที่ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับดินฟอกของ Mana M. et al. (2007) ที่ได้ศึกษาการนำดินฟอกที่ใช้แล้วในอุตสาหกรรมน้ำมันซึ่งเป็นของเสียที่มีปริมาณมากกลับมาใช้ใหม่เพื่อนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสีเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุดูดซับอื่นๆ การใช้ดินฟอกจะใช้ต้นทุนน้อยกว่าและมีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดี

#### 4.3 วิเคราะห์ต้นทุนการผลิตเมทิลเอสเทอร์

กรณีที่ 1 แยกคีนเมทานอล + ล้างสบู่ด้วยน้ำ

กรณีที่ 2 แยกคีนเมทานอล + ตกจม + ดูดซับสบู่ด้วยดินฟอก

##### ข้อมูลพื้นฐาน

- กระบวนการล้างไบโอดีเซลใช้น้ำต่อไบโอดีเซลเท่ากับ 1:1
- ปริมาณดินฟอกที่ใช้คำนวณจากความสามารถในการดูดซับของดินฟอกที่สภาวะบรรยากาศจากการใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลหลังระเหยเมทานอล ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.6774 g soap/g BE และให้ไบโอดีเซลมีสบู่แขวนลอย 2,022 ppm
- กำหนดให้มีการผลิตไบโอดีเซล 1,000 ลิตรต่อวัน ในแต่ละปีระบบทำงานได้ 246 วัน

ตารางที่ 4.5 แสดงต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลจากการใช้ดินฟอกในการกำจัดสบู่เปรียบเทียบกับการล้างด้วยน้ำ

| รายการ           | ราคา/หน่วย | ปริมาณที่ใช้/ลิตร | ต้นทุน/ลิตร |           | ต้นทุน/ปี |           |
|------------------|------------|-------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|                  |            |                   | กรณีที่ 1   | กรณีที่ 2 | กรณีที่ 1 | กรณีที่ 2 |
| น้ำมันพืชใช้แล้ว | 8          | 1                 | 8           | 8         | 1,968,000 | 1,968,000 |
| เมทานอล          | 15.38      | 0.2               | 3.08        | 3.08      | 757,680   | 757,680   |
| KOH              | 80.28      | 0.0145            | 1.16        | 1.16      | 285,360   | 285,360   |
| ดินฟอก           | 16         | 0.003             | -           | 0.05      | -         | 12,300    |
| น้ำล้าง          | 0.01       | 1                 | 0.01        | -         | 2,460     | -         |
| บำบัดน้ำเสีย     | 0.15       | 1                 | 0.15        | -         | 36,900    | -         |
| ไฟฟ้า (kw-hr)    | 3          | 0.4               | 1.2         | 1.2       | 295,200   | 295,200   |
|                  |            | รวม               | 13.6        | 13.49     | 3,345,600 | 3,318,540 |

จากตารางที่ 4.5 แสดงต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลต่อหน่วยโดยเปรียบเทียบการกำจัดสบู่ด้วยการใช้ดินฟอกเป็นวัสดุดูดซับกับวิธีการกำจัดสบู่แบบดั้งเดิมคือการล้างด้วยน้ำซึ่งต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลคำนวณจากสมการ 2.11 และสมการ 2.12 พบว่าต้นทุนการผลิตไบโอ



ดีเซลจากการใช้กระบวนการล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสบู่มีต้นทุนสูงกว่าการผลิตไบโอดีเซลจากการใช้กระบวนการดูดซับด้วยดินฟอกเพื่อกำจัดสบู่กล่าวคือ มีต้นทุนการผลิตเท่ากับ 12.40 บาท/ลิตร และ 12.29 บาท/ลิตร ตามลำดับ จากตารางจะเห็นว่ากระบวนการล้างสบู่ด้วยน้ำจะเสียค่าใช้จ่ายอย่างมากที่กระบวนการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นการลดปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการนอกจากจะส่งผลดีด้านสิ่งแวดล้อมแล้วยังช่วยลดต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่าในแต่ละปี การใช้ดินฟอกแทนการใช้น้ำล้างสามารถลดต้นทุนได้ 27,060 บาท/ปี

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 การตกจมของสปูในไบโอดีเซล

การศึกษาการตกจมของสปูในไบโอดีเซลหลังปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน พบว่าสปูมีความสามารถในการตกจมได้เอง โดยเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน สามารถแยกสปูออกได้มากกว่า 70% และปัจจัยที่มีผลต่อการตกจมสปูที่ได้ทำการศึกษา คือ ผลอัตราส่วนระหว่างส่วนสูงของไบโอดีเซลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของถังตกจม (H/D) ที่ 1.5 (21/14) และ 5.6 (50.8/9) พบว่าถังตกจมที่ H/D ratio 1.5 (ทรงเตี้ย) สามารถตกจมสปูได้ดีเร็วกว่าถังตกจมที่ H/D ratio 5.6 ประสิทธิภาพการขจัดสปูที่ 60% ถังตกจมขนาด H/D ratio เท่ากับ 1.5 และ 5.6 ใช้เวลา 2.14 และ 4.00 วัน ตามลำดับ และผลของเมทานอลต่อการตกจมสปูในไบโอดีเซล พบว่าไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล สปูมีความสามารถในการตกจมได้เร็วกว่าไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล เนื่องจากกระบวนการระเหยเมทานอลเป็นการเร่งให้กลีเซอรอลและสปูที่แขวนลอยในไบโอดีเซลเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มตะกอนและตกลงสู่ก้นถังเร็วขึ้น โดยเมื่อปล่อยให้ตกจมเป็นเวลา 15 นาที สามารถแยกสปูออกได้ 87% ในขณะที่ไบโอดีเซลที่ไม่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลสามารถแยกสปูได้ 24% จากการตกจม 24 ชั่วโมง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า กระบวนการตกจมสปูสามารถเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะนำมาใช้ในการขจัดสปูเพื่อลดปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ โดยวิธีการที่เหมาะสมคือ นำไบโอดีเซลหลังปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันมาผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลก่อนนำไปตกจมในถังตกจม

#### 5.2 ความสามารถของดินฟอกที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับ

จากการศึกษากระบวนการขจัดสปูโดยใช้ดินฟอกเป็นวัสดุดูดซับในระบบแบบกะเพื่อศึกษาปัจจัยและความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับดินฟอกต่อกระบวนการดูดซับสปูในไบโอดีเซล สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- พื้นที่ผิว BET ของดินฟอกที่ใช้ เท่ากับ 338.22  $m^2/g$  ขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วงต่ำกว่า 6 นาโนเมตร คิดเป็น 26.4% และขนาดอนุภาคดินฟอกส่วนมากอยู่ที่ประมาณ 50-60 ไมโครเมตร

- สภาวะเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองที่เหมาะสมคือ เวลา 20 นาที และ ความเร็วรอบ 500 rpm หรือมีค่า Reynolds number เท่ากับ 7,500
- ที่สภาวะบรรยากาศ จากการใช้สัดส่วนดินฟอก 1% ของไบโอดีเซล พบว่าดินฟอกมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสบู่จาก 1,000-6,000 ppm ซึ่งให้ค่าความสามารถดูดซับสูงสุดที่ 0.39 g soap/g BE เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสบู่มากกว่า 6,000 ppm ความสามารถในการดูดซับสบู่ค่อนข้างคงที่หรือมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นสบู่สูง มักพบสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ สูงตาม เช่น กลีเซอรอล
- ความสามารถในการดูดซับสบู่ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนดินฟอกจาก 0.25 เป็น 3% กล่าวคือ เมื่อเพิ่มปริมาณดินฟอก แม้ว่าจะสามารถขจัดสบู่ออกจากไบโอดีเซลได้ดีแต่ปริมาณสบู่ที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักดินฟอก จะมีค่าลดลง หมายความว่าดินฟอกมีพื้นที่ในการดูดซับสบู่ได้อีก การใช้ดินฟอกในสัดส่วนที่สูง จึงเป็นการใช้ดินฟอกที่ไม่ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นสภาวะที่ดีที่สุดคือ สัดส่วนดินฟอก 0.25% หากไบโอดีเซลมีปริมาณสบู่มาก สามารถทำการดูดซับเพิ่มอีก แต่ไม่ควรใช้ดินฟอกดูดซับในครั้งเดียวหมด
- ผลของอุณหภูมิในการดูดซับ จากอุณหภูมิที่สภาวะบรรยากาศถึง 120°C พบว่าที่อุณหภูมิ 120°C ดินฟอกมีความสามารถในการดูดซับสบู่สูงสุด 0.92 g soap/g BE จากการใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอลรองลงมาคืออุณหภูมิที่สภาวะบรรยากาศ ค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 0.68 g soap/g BE หากนำไปใช้งานจริง อุณหภูมิที่เหมาะสมควรเป็นอุณหภูมิที่สภาวะบรรยากาศ เพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน
- ดินฟอกสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เมื่อผ่านการฟื้นฟูโดยการสกัดสิ่งปนเปื้อนด้วยอะซิโตน หรือการเผาที่ 500°C ซึ่งยังรักษาความสามารถในการดูดซับสบู่ได้ 72% เมื่อเทียบกับดินฟอกใหม่สด แต่เนื่องจากดินฟอกมีราคาถูก การฟื้นฟูดินฟอกอาจไม่จำเป็น เนื่องจากการฟื้นฟูนั้นมีค่าใช้จ่ายสูง การทดลองนี้จึงเป็นการศึกษาเพื่อตอบสนองความต้องการด้านสิ่งแวดล้อม หากเกิดปัญหามลพิษจากดินฟอกที่ผ่านการใช้งานแล้ว

กระบวนการขจัดสบู่โดยใช้ดินฟอกเป็นวัสดุดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบคอลัมน์บรรจุ (Packed Column) โดยศึกษาการใช้ดินฟอกดูดซับแบบผง ดินฟอกอัดเม็ดและดินฟอกแบบสเลอรี พบว่าการใช้ดินฟอกแบบสเลอรีสามารถดูดซับสบู่ได้ดีที่สุดซึ่งระบบมีลักษณะ

เป็นแบบฟลูอิด ไคซ์ และการใช้ดินฟอกแบบผงซึ่งมีลักษณะเป็นระบบแบบเบดนิ่งนั้น ไม่เหมาะสำหรับกระบวนการดูดซับสบูโดยใช้ดินฟอก เนื่องจากทำให้สูญเสียพื้นที่เบดที่ใช้งานจากการเกิด

Dead zone

จากการทดสอบการขจัดสบู่โดยใช้กระบวนการตกจมร่วมกับการดูดซับด้วยดินฟอกในระบบแบบคอลัมน์บรรจุ ปริมาณดินฟอก 15 กรัม พบว่าสามารถขจัดสบู่ในไบโอดีเซล 2.76 ลิตร ได้ 100% ดังนั้นจากกระบวนการดังกล่าวทำให้สามารถลดปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำได้ 100%

จากการคำนวณต้นทุนการผลิตไบโอดีเซลพบว่าการใช้ดินฟอกเป็นวัสดุดูดซับสบู่นอกจากจะช่วยลดปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการแล้วยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้ 0.11 บาท/ลิตร เนื่องจากดินฟอกที่ใช้ในการขจัดสบู่มีราคาถูก และในกระบวนการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำนั้นจะมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสูง ในแต่ละปีการใช้ดินฟอกเป็นวัสดุดูดซับสบู่นอกจากนี้ยังสามารถลดต้นทุนได้ 27,060 บาท/ปี (ระบบทำงาน 246 วัน/ปี กำลังการผลิต 1,000 ลิตร/วัน)

### ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาความสามารถในการตกจมสบู่ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาขั้นพื้นฐานว่าสบู่มีความสามารถในการตกจมได้จริงหรือไม่ ซึ่งสามารถขยายขอบเขตการทดลองเพิ่มเติมเพื่อการเลือกประเภทของถังและการคำนวณขนาดถังตกจม ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของการจมตัว หากเป็นการจมตัวอย่างอิสระของอนุภาคที่ไม่เกาะกันและการจมตัวแบบอิสระของตะกอนที่เกาะกลุ่มกัน การทดลองในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องได้แก่ ทดลองการตกตะกอนในคอลัมน์ และสร้างกราฟความเร็วในการตกตะกอน แต่หากเป็นการจมตัวแบบเป็นโชนและการอัดตัวของตะกอน การทดลองในห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องได้แก่ การทดลองตกตะกอนแบบแบทช์ (Batch settling test) และการสร้างกราฟของฟลักซ์ของแข็ง (Solid flux curve) (สาวิตรี, 2546)

2. ตัวอย่างไบโอดีเซลที่นำมาทดสอบการดูดซับสบู่ในระบบแบบเบดนิ่ง ต้องควบคุมคุณภาพให้ดี หรือควรทดลองให้เสร็จเร็วที่สุด เพราะตัวอย่างไบโอดีเซลที่นำมาใช้หากทิ้งไว้นานจะทำให้สบู่เปลี่ยนสถานะ ทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนได้ง่าย ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ใช้ในแต่ละการทดลองจึงควรทดลองให้เสร็จภายใน 12 ชั่วโมงหรือน้อยกว่า

3. การประยุกต์ใช้ดินฟอกในอุตสาหกรรมไบโอดีเซล สิ่งที่พึงระวังคือ การใช้ดินฟอกจะทำให้ค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น เนื่องจากกลไกในการขจัดสบู่ของดินฟอกส่วนหนึ่งจะเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งจะเพิ่มค่าความเป็นกรดให้กับไบโอดีเซลได้ สัดส่วนดินฟอกที่ใช้จึงไม่ควรเกิน 1% และความเข้มข้นสบู่เริ่มต้นไม่ควรเกิน 4,000 ppm นอกจากนี้ยังมีวิธีการที่เหมาะสม

เพื่อลดปัญหาค่าความเป็นกรดคือ การใช้ตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการระเหยเมทานอล และการตกจม เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวจะช่วยลดปริมาณสบู่ในไบโอดีเซล สามารถลดสัดส่วนของดินฟอกได้ และสบู่จะเปลี่ยนสภาพให้เป็นกลุ่มตะกอนมากขึ้น ดังนั้นกลไกการจัดสบู่ของดินฟอกจึงเปลี่ยนมาเป็นการกรองมากขึ้น แทนที่การจัดสบู่โดยการแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้ค่าความเป็นกรดไม่เพิ่มขึ้นมากนัก

4. ในการทดลองการจัดสบู่โดยใช้กระบวนการระเหยเมทานอล ตกจมและการดูดซับด้วยดินฟอกระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าสามารถจัดสบู่ได้ 100% และปริมาณเมทานอลกลีเซอรอลในไบโอดีเซลผ่านมาตรฐาน ซึ่งเป็นผลมาจากดินฟอกมีความสามารถในการดูดซับเมทานอล (Du D. et al., 2006) และกลีเซอรอลด้วย (Park E.Y. et al., 2008) จึงสามารถลดปริมาณน้ำที่ใช้ล้างได้ 100% แต่เมื่อทดสอบในระดับที่สูงขึ้น (40 ลิตร) พบว่าปริมาณเมทานอลยังไม่ผ่านมาตรฐาน ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาในระดับนำร่องต่อไปเพื่อหาสถานะและวิธีการที่จะใช้เพื่อให้ได้ไบโอดีเซลที่ผ่านมาตรฐาน ซึ่งอาจต้องใช้น้ำร่วมในกระบวนการด้วยหากสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ยังไม่ผ่านมาตรฐาน

5. การจัดสบู่โดยใช้ดินฟอกสามารถใช้ได้ทั้งกระบวนการแบบกะ และแบบต่อเนื่องในระบบฟลูอิดไดซ์ เนื่องจากพบว่าการใช้คอลัมน์บรรจุแบบเบดนิ่งนั้นไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการนี้ จึงควรมีการศึกษากระบวนการดูดซับแบบต่อเนื่องในระบบฟลูอิดไดซ์ต่อไปเพื่อใช้ในการออกแบบและคำนวณคอลัมน์ที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม หรือหากใช้กระบวนการดูดซับแบบกะก็ได้ ซึ่งจะสะดวกในการดำเนินงาน

## บรรณานุกรม

- จุไรวัลย์ รัตนะพิไลฐ. 2546. การถ่ายโอนมวลและหลักปฏิบัติการเฉพาะหน่วยพื้นฐาน. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ชาคริต ทองอุไร, สันชัย กลิ่นพิกุล, จรัญ บุญกาญจน์, พิมพรรณ เกียรติชิมกุล. 2544. การผลิตไบโอดีเซลจากผลิตผลปาล์มน้ำมัน. วารสารสงขลานครินทร์. 23 (ฉบับพิเศษ): 831-841.
- ทรงธรรม บุรณะ. 2551. การผลิตไบโอดีเซลจากไขสบู่ที่ได้จากกระบวนการทำให้เป็นกลางของน้ำมันปาล์มดิบ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ปารีสสา กาญจนกุล. 2551. เรื่องไบโอดีเซล. Available from:  
[http://www.fm100cmu.com/programs\\_detail.php?id\\_group=58&id=1122](http://www.fm100cmu.com/programs_detail.php?id_group=58&id=1122). Accessed April 9, 2008.
- พนิดา เทพขุน, พิศมัย เจนวนิชปัญจกุล, ยุทธนา ฐานมงคล และพงษ์ศักดิ์ พรหมกร. 2551. การศึกษาเปรียบเทียบเทคโนโลยีการผลิตไบโอดีเซลของสหรัฐอเมริกาและไทย. สมุทรปราการ: พิมพ์นิการพิมพ์
- สาวิตรี จันทรานูรักษ์. 2546. กระบวนการแยกเชิงกลในอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- เสาวลักษณ์ จิตรบรรเจิดกุล. 2542. บทปฏิบัติการเคมีชีววัสดุ. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- Bertram, Bryan, Abrams, Christopher, Cooke and Brian, S. 2005. Purification of biodiesel with adsorbent materials. United States Patent Application.
- Borner, G. and Schneider, M. 2008. Potentials in Bleaching Earth Reduction Theoretical Background Industrial Results. Available from: <http://www.oehmi-engineering.de>. Accessed January 9, 2009.

- Canakci, M. 2007. The potential of restaurant waste lipid as biodiesel feedstocks. *Bioresource Technology* 98:183-190.
- Choksi, P.M. and Joshi, V.Y. 2007. Adsorption kinetic study for the removal of nickel (II) and aluminum (III) from an aqueous solution by natural adsorbents. *Desalination* 208:216-231.
- Du, D., Sato, M., Mori, M. and Park, E.Y. 2006. Repeated production of fatty acid methyl ester with activated bleaching earth in solvent-free system. *Process Biochemistry* 41:1849-1853.
- Felizardo, P., Correia, M.J.N., Raposo, I., Mendes, J.F., Berkemeier, R., Bordado, J.M. 2006. Production of biodiesel from waste frying oils. *Waste Management*. 26: 487-494.
- Gerpen, J. V., Shanks, B., Pruszko, R., Clements, D. and Knothe, G. 2004. *Biodiesel Production Technology*. National Renewable Energy Laboratory(NREL).
- Gerpen, J. V., Shanks, B., Pruszko, R., Clements, D. and Knothe, G. 2004. *Biodiesel Analytical Methods*. National Renewable Energy Laboratory(NREL).
- Gerpen, J.V. and Menges, K. 2004. Evaluation of magnesol R60 as an alternative to water washing during biodiesel production department of mechanical engineering, Iowa State University.
- Gerpen, J.V. 2005. Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*. 86: 1097-1107.
- Ma, F., Hanna M.A. 1999. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*. 70:1-15.
- Mana, M., Ouali, M. and Menorval, L.C. 2007. Removal of basic dyes from aqueous solutions with a treated spent bleaching earth. *Journal of Colloid and Interface Science* 307:9-16.
- Mittelbach, M. and Remschmidt, C. 2004. *Biodiesel The comprehensive handbook*. Martin Mittelbach. Austria.

Suehara, K., Kawamoto, Y., Fujii, E., Kohda, J., Nakano, Y. and Yano, T. 2005. Biological treatment of wastewater discharged from biodiesel fuel production plant with alkali-catalyzed transesterification. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 100:437-442.

Tsai, W.T., Chang, Y.M., Lai, C.W. and Lo, C.C. 2005. Adsorption of ethyl violet dye in aqueous solution by regenerated spent bleaching earth. *Journal of Colloid and Interface Science*. 289: 333-338.

Hill, P. 2008. Bubble washing biodiesel. Available from:

<http://www.biodiesलगear.com/documentation/BubbleWashingBiodiesel.pdf>. Accessed May 25, 2008.

Pelly, M. 2005. Mike Pelly's biodiesel method. Available from:

[http://www.journeytoforever.org/biodiesel\\_mike.html](http://www.journeytoforever.org/biodiesel_mike.html). Accessed May 25, 2008.



**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

## วิธีการวิเคราะห์ปริมาณสบู่

### 1. วิธีการเตรียมสารละลายไฮโดรคลอริก

การเตรียมและหาความเข้มข้นมาตรฐานของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 และ 0.01 นอร์มอล

#### วิธีเตรียม

ตวงกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นปริมาณ 9 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร ซึ่งมีน้ำกลั่นบรรจุอยู่บ้าง แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนถึงขีดปรับปริมาตร เขย่าให้เข้ากัน จะได้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จากนั้นเจือจางด้วยน้ำกลั่น 10 เท่าจะได้สารละลายกรดเกลือที่มีความเข้มข้น 0.01 นอร์มอล

#### วิธีหาความเข้มข้นมาตรฐาน

ชั่งโซเดียมเตตระโบเรต (Borax:  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ) ให้ได้น้ำหนักแน่นอน 0.4 กรัม (สำหรับความเข้มข้น 0.1 นอร์มอล) ใส่ลงในขวด Erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ละลายด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ทำซ้ำสามขวด แต่ละขวดเติม 2-3 หยดของเมทิลเรด (indicator) แล้วไตเตรทกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียมไว้ข้างต้น สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีชมพูที่จุดยุติ สามารถคำนวณความเข้มข้นของกรดเกลือได้จาก

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายกรด} = \frac{\text{น้ำหนักของ โซเดียมเตตระโบเรต (กรัม)}}{\text{ปริมาตรสารละลายกรดที่ใช้ไตเตรท (มิลลิลิตร) \times 0.1907}}$$

กรัมสมมูลของ โซเดียมเตตระโบเรต = 190.72, Molecular weight = 381.37 (เสาวลักษณ์, 2542)

### 2. ขั้นตอนการวิเคราะห์

2.1 ละลายสารตัวอย่างใน Acetone ซึ่งประกอบด้วยน้ำ 2 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารตัวอย่างขึ้นอยู่กับปริมาณสบู่ในสารตัวอย่างเช่น เมทิลเอสเทอร์ที่ยังไม่ล้างใช้ 5 กรัม และเมทิลเอสเทอร์ที่ล้างแล้วใช้ 100 กรัม

2.2 เติม Phenolphthalein (1% ใน Isopropyl alcohol) จำนวน 2 มิลลิลิตร

2.3 ไทเตรทกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมล/ลิตร จนกระทั่งฟีนอล์ฟทาเลินเปลี่ยนจากสีแดงเป็นไม่มีสีแสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลืออยู่ในสารละลายเป็นกลางแล้วบันทึกปริมาตรกรดเป็น "A"

2.4 เติม Bromophenol blue (0.4% ในน้ำ) 1 มิลลิลิตร

2.5 ไทเทรตต่อจนกระทั่งโบรโมฟีนอลบลูเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเป็นสีเหลือง บันทึกปริมาตรของสารละลายกรดที่ใช้เป็น “B”

### 3. การคำนวณ

#### 3.1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในสารตัวอย่าง

$$C = \frac{A \times 0.01 \times Mw}{1000 \times W}$$

$C$  = ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาในสารตัวอย่าง (grams of catalyst/gram of sample)

$A$  = ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

$Mw$  = มวลโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยา ขึ้นอยู่กับชนิดที่ใช้

เช่น  $\text{KOH} = 56.1$  กรัม/โมล

$\text{NaOH} = 40.0$  กรัม/โมล

$\text{NaOCH}_3 = 54$  กรัม/โมล

$W$  = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)

#### 3.2 ปริมาณสบู่ในสารตัวอย่าง

$$S = \frac{B \times 0.01 \times Mw}{1000 \times W}$$

$S$  = ปริมาณของสบู่ในสารตัวอย่าง (grams of soap/gram of sample)

$B$  = ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

$Mw$  = มวลโมเลกุลของสบู่ ขึ้นอยู่กับชนิดที่ใช้

เช่น  $\text{Potassium oleate} = 320.56$  กรัม/โมล

$\text{Sodium oleate} = 304.4$  กรัม/โมล

$W$  = น้ำหนักของสารตัวอย่าง (กรัม)

## การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระ

### 1. สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์

- แอลกอฮอล์ 95%
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.100 นอร์มอล เตรียมโดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณ 4.00 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร ในขวดวัดปริมาตร และเก็บสารละลายต่างในขวดแก้ว

- ฟีนอล์ฟทาลีนเข้มข้นร้อยละ 1 (ละลายในแอลกอฮอล์)
- สารละลายแอลกอฮอล์ ที่ปรับสภาพให้เป็นกลาง โดยเติมฟีนอล์ฟทาลีน 5 หยด ลงในแอลกอฮอล์ 95% จำนวน 200 มิลลิลิตร แล้วหยดสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.100 นอร์มอล ที่ละหยดพร้อมทั้งเขย่าจนได้สีชมพูถาวร

### 2. วิธีวิเคราะห์

2.1 ชั่งตัวอย่างน้ำมันให้ได้น้ำหนักแน่นอน 1-10 กรัม ทศนิยมอย่างน้อย 2 ตำแหน่ง ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

2.2 เติมสารละลายแอลกอฮอล์ที่มีสภาพเป็นกลาง จำนวน 50 มิลลิลิตร ลงในตัวอย่าง เขย่าอย่างแรงให้ตัวอย่างน้ำมันละลายในสารละลายแอลกอฮอล์

2.3 เติมฟีนอล์ฟทาลีนประมาณ 5 หยด แล้วไทเทรตสารละลายตัวอย่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.100 นอร์มอล จนกระทั่งได้สีชมพูถาวร

2.4 คำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระจากสูตร

$$\%FFA = \frac{\text{ปริมาณค่าที่ใช้ (ml) X ความเข้มข้นค่า (นอร์มอล) X 25.6}}{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (g)}}$$

## วิธีการหาปริมาณกลีเซอรอล

### 1. สารเคมีที่ใช้

1.1 สารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต นำสารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต 60 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร 60 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดตโดยไม่ต้องใช้ความร้อน ถ่ายใส่ขวดสีน้ำตาลพร้อมจุกแก้วปิดสนิทแล้วเก็บในที่มืด ห้ามโดนแสงแดด

1.2 สารละลายอีเทนไดออกไซด์ ผสมอีเทนไดออกไซด์เป็นกลางและปราศจากกลีเซอรอล 1 ส่วนกับน้ำกลั่น 1 ส่วน (โดยปริมาตร)

1.3 สารละลายมาตรฐาน โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปราศจากการบอเนต ความเข้มข้น 0.125 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

1.4 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

1.5 สารละลายกรดซัลฟูริก ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

1.6 โบรอมโทมอลบลูอินดิเคเตอร์ เตรียมโดยนำโบรโมโทมอลบลู 0.1 กรัม ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.01 โมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 16 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ่ายใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมน้ำจนได้ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

### 2. วิธีวิเคราะห์

2.1 ชั่งตัวอย่าง 0.1000 กรัม ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

2.2 ถ่ายตัวอย่างลงขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นประมาณ 50 มิลลิลิตร หยดโบรโมโทมอลบลูอินดิเคเตอร์ 5-7 หยด แล้วทำให้เป็นกรดด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก 0.1 โมลต่อลิตร โดยสีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง บันทึกปริมาณสารละลายกรดที่ใช้

2.3 ทำสารละลายให้เป็นกลางด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลต่อลิตร อย่างระมัดระวังจนได้สารละลายสีฟ้าซึ่งไม่มีสีเขียวปนอยู่เลย บันทึกปริมาณสารละลายต่างที่ใช้

2.4 ทำแบลนด์โดยใช้น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร แทนตัวอย่างแล้วปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 2.2 และข้อ 2.3 โดยใช้อินดิเคเตอร์ปรับความเป็นกรด-ด่าง ก่อนที่จะเติมสารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดต

2.5 ใช้ปิเปตดูดสารละลายโซเดียมเปอร์ไอโอเดตมาครั้งละ 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในสารละลายตัวอย่างและแบลนด์แก้วขวดรูปชมพู่เบาๆ แล้วปิดด้วยกระดาษฟิคาหรือใช้แผ่นอลูมิเนียมปิดให้สนิท ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง (ไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 30 นาที

หลังจากนั้นเติมสารละลายอีเทนไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตร แกว่งเบาๆ แล้วตั้งทิ้งไว้ที่มีคที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 20 นาที

2.6 เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวม 300 มิลลิลิตร (น้ำกลั่นที่เติม เท่ากับ 300 - (ปริมาณน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร + ปริมาณโซเดียมเปอร์ซัลเฟต + สารละลายซัลฟูริก 0.1 โมลต่อลิตร + สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.05 โมลต่อลิตร)) หยดโบรโมไทมอลบลูอินดิเคเตอร์ 5-7 หยด นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.125 โมลต่อลิตร ถ้าสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้าเมื่อถึงจุดยุติแล้วบันทึกปริมาตรสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้จากบิวเรตให้ละเอียดถึง 0.01 มิลลิลิตร

หมายเหตุ หากตัวอย่างเป็นของแข็งอาจมีความจำเป็นต้องให้ความร้อนเล็กน้อยในขั้นตอนที่ 2.2 เพื่อให้เกิดการละลายดีขึ้น

### 3. วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณกลีเซอรอล ร้อยละของน้ำหนัก} = \frac{9.209 \times N(T_1 - T_2)}{W}$$

เมื่อ N คือความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเท่ากับ 0.125 โมลต่อลิตร

$T_1$  คือปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง เป็น มิลลิลิตร

$T_2$  คือปริมาตรของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ไทเทรตกับแบลนก์ เป็น มิลลิลิตร

W คือน้ำหนักของตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์เป็นกรัม

ภาคผนวก ข  
(ตัวอย่างการคำนวณ)



## 1. การหาค่าความเข้มข้นของไฮโดรคลอริกในการทำ Standardization of 0.01 N HCl

|  |   |   |            |
|--|---|---|------------|
| [HCl] (Normal)                           | = | $\frac{\text{Weight of Sodiumtetraborate (g)}}{0.1907 \times (\text{ml of HCl})}$ |            |
| (กรัมสมมูลของโซเดียมเตตราโบเรต = 190.72) |   |   |            |
| ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1              |   |   |            |
| น้ำหนักโซเดียมเตตราโบเรต                 | = | 0.0243 g  |            |
| ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ไตเตรท              | = | 11.92 ml  |            |
| [HCl] ที่ได้                             | = | $\frac{0.0243 \text{ g}}{0.1907 \times 11.92 \text{ ml of HCl}}$                  | = 0.0107 N |
| ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2              |   |   |            |
| น้ำหนักโซเดียมเตตราโบเรต                 | = | 0.0250 g  |            |
| ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ไตเตรท              | = | 12.70 ml  |            |
| [HCl] ที่ได้                             | = | $\frac{0.0250 \text{ g}}{0.1907 \times 12.70 \text{ ml of HCl}}$                  | = 0.0103 N |
| ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3              |   |   |            |
| น้ำหนักโซเดียมเตตราโบเรต                 | = | 0.0231 g  |            |
| ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ไตเตรท              | = | 11.40 ml  |            |
| [HCl] ที่ได้                             | = | $\frac{0.0231 \text{ g}}{0.1907 \times 11.40 \text{ ml of HCl}}$                  | = 0.0106 N |
| ค่าเฉลี่ยของ [HCl]                       | = | $\frac{0.0107 + 0.0103 + 0.0106}{3}$  | = 0.0105 N |

ข้อมูลดิบแสดงผลดังตารางที่ ข1

ตารางที่ ข1 ผลการทำ Standardization of 0.01 N HCl

| ครั้งที่ตรวจสอบ | ครั้งที่ | [HCl] (Normal) |        |        | เฉลี่ย |
|-----------------|----------|----------------|--------|--------|--------|
|                 |          | 1              | 2      | 3      |        |
| 1               |          | 0.0107         | 0.0103 | 0.0106 | 0.0105 |
| 2               |          | 0.0105         | 0.0106 | 0.0109 | 0.0107 |
| 3               |          | 0.0105         | 0.0104 | 0.0105 | 0.0105 |

## 2. การหาค่าปริมาณสบู่

$$S = \frac{B \times 0.01 \times M_{sp}}{1000 \times W} \times 10^6$$

หน่วยเป็น ppm (พีพีเอ็ม) หมายถึง ส่วนในล้านส่วน (part per million)

ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 1

|                             |   |   |             |
|-----------------------------|---|---|-------------|
| น้ำหนักไบโอดีเซล            | = | 5.01 g  |             |
| ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ไตเตรท | = | 4.42 ml   |             |
| [soap] ที่ได้               | = | $\frac{4.42 \times 0.01 \times 320.56}{1000 \times 5.01} \times 10^6$ | = 2,828 ppm |

ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 2

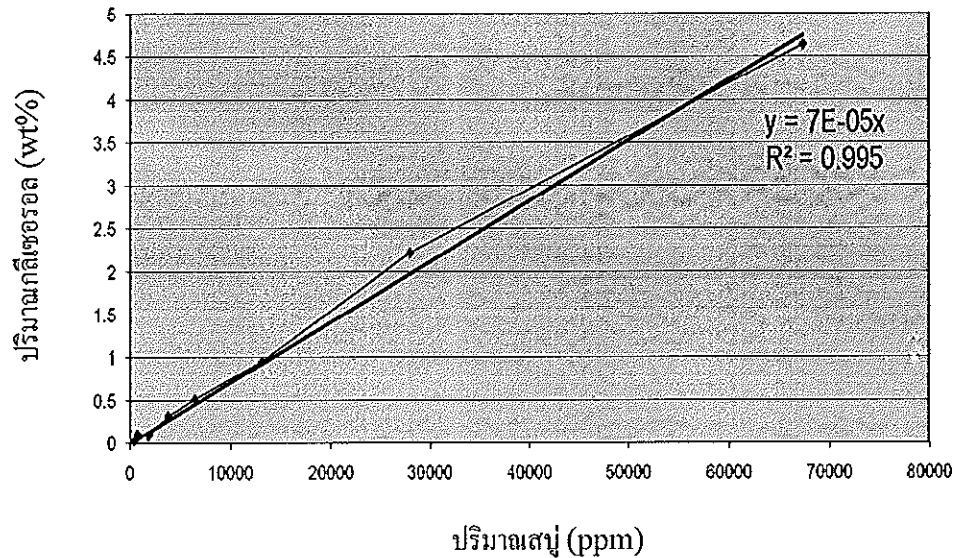
|                             |   |   |             |
|-----------------------------|---|---|-------------|
| น้ำหนักไบโอดีเซล            | = | 5.03 g  |             |
| ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ไตเตรท | = | 4.42 ml   |             |
| [soap] ที่ได้               | = | $\frac{4.42 \times 0.01 \times 320.56}{1000 \times 5.02} \times 10^6$ | = 2,817 ppm |

|                             |   |   |             |
|-----------------------------|---|---|-------------|
| ข้อมูลจากการทดลองครั้งที่ 3 |   |   |             |
| น้ำหนัก โบ โอ ดี เซล        | = | 5.01 g  |             |
| ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ไตเตรท | = | 4.63 ml   |             |
| [soap] ที่ได้               | = | $\frac{4.63 \times 0.01 \times 320.56}{1000 \times 5.01} \times 10^6$ | = 2,962 ppm |
| ค่าเฉลี่ยของ [soap]         | = | $\frac{2,828 + 2,817 + 2,962}{3}$                                     | = 2,869 ppm |

### ภาคผนวก ก

(กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณฮีเซอร์อลและเก้าซ์ลเฟต)

1. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสเปกกับปริมาณกลีเซอรอล



ภาพประกอบที่ ค1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสเปกและกลีเซอรอล

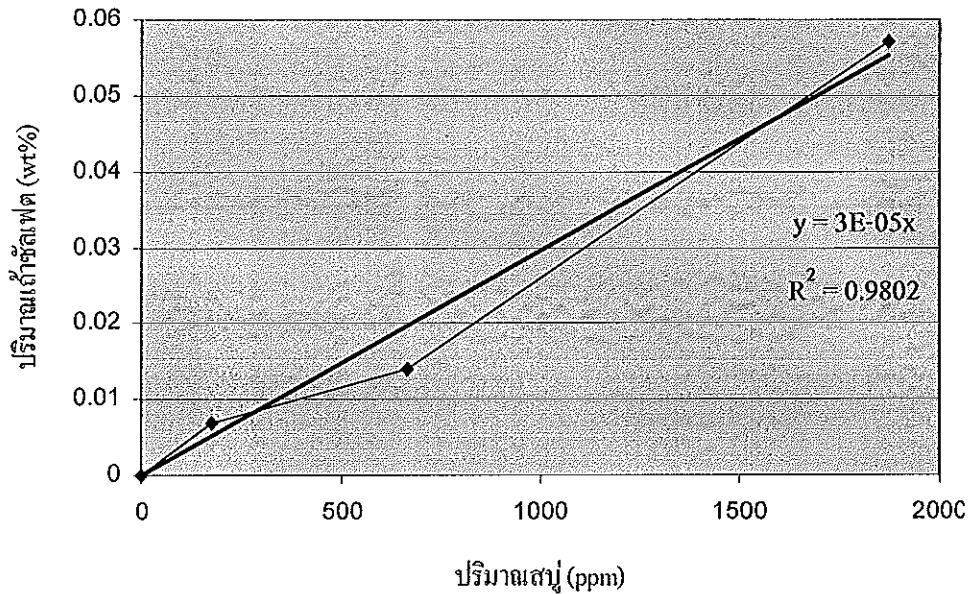
จากภาพประกอบที่ ค1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสเปกและกลีเซอรอล พบว่าปริมาณสเปกแปรผันตรงกับปริมาณกลีเซอรอล ได้สมการเส้นตรง คือ

$$y = 7E-05x \quad \text{โดย } y \text{ คือปริมาณกลีเซอรอล(wt \%)$$

$$x \text{ คือ ปริมาณสเปก (ppm)}$$

ตามมาตรฐานไบโอดีเซลซึ่งกำหนดโดยกรมธุรกิจพลังงาน กำหนดปริมาณกลีเซอรอลอิสระไม่สูงกว่า 0.02 wt % เมื่อเทียบเป็นปริมาณสเปกได้ค่าเท่ากับ 315 ppm นั้นหมายความว่าหากต้องการให้ปริมาณกลีเซอรอลผ่านมาตรฐาน จะต้องขจัดสเปกให้เหลือต่ำกว่า 315 ppm

## 2. กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนุ่กับเจ้าซัลเฟต



ภาพประกอบที่ ค2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสนุ่และเจ้าซัลเฟต

จากภาพประกอบที่ ค2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสนุ่และเจ้าซัลเฟต พบว่าปริมาณสนุ่แปรผันตรงกับปริมาณเจ้าซัลเฟต ได้สมการเส้นตรง คือ

$$y = 3E-05x \quad \text{โดย} \quad y \text{ คือปริมาณเจ้าซัลเฟต (wt \%)} \\ x \text{ คือ ปริมาณสนุ่ (ppm)}$$

ตามมาตรฐานไบโอดีเซลซึ่งกำหนดโดยกรมธุรกิจพลังงาน กำหนดปริมาณเจ้าซัลเฟตไม่สูงกว่า 0.02 wt % เมื่อเทียบเป็นปริมาณสนุ่ได้ค่าเท่ากับ 667 ppm นั้นหมายความว่า หากต้องการให้ปริมาณเจ้าซัลเฟตผ่านมาตรฐาน จะต้องขจัดสนุ่ให้เหลือต่ำกว่า 667 ppm

## ประวัติผู้เขียน

|                                       |                          |                     |
|---------------------------------------|--------------------------|---------------------|
| ชื่อ สกุล                             | นางสาวโชคดี มณีรัตน์     |                     |
| รหัสประจำตัวนักศึกษา                  | 5010120126               |                     |
| วุฒิการศึกษา                          |                          |                     |
| วุฒิ                                  | ชื่อสถาบัน               | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
| วิทยาศาสตรบัณฑิต<br>(เทคโนโลยีชีวภาพ) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2549                |

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนผู้ช่วยวิจัย จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์