

การกำจัดกลีเซอรินในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยตัวดูดซับจากแกลบ

นางสาวจันทร์เลขา ภูทองคำ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

GLYCERIN REMOVAL IN BIODIESEL PURIFICATION PROCESS
BY ADSORBENT FROM RICE HUSK

Miss Janleka Poothongkam

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การกำจัดกลิ่นเซอรินในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ |
| | โดยตัวดูดซับจากแกลบ |
| โดย | นางสาวจันทร์เลขา ภูทองคำ |
| สาขาวิชา | วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร. สมใจ เพ็งปรีชา |

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. อนุรักษ์ วินิตสร)

จันทร์เลขา ภูทองคำ : การกำจัดกลีเซอรินในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดย
ตัวดูดซับจากแกลบ. (GLYCERIN REMOVAL IN BIODIESEL PURIFICATION
PROCESS BY ADSORBENT FROM RICE HUSK) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รศ.ดร.สมใจ เพ็งปรีชา, 119 หน้า.

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการลดน้ำเสียในกระบวนการทำ
ไบโอดีเซลโดยตัวดูดซับจากแกลบ ซึ่งประกอบด้วย ถ่านกัมมันต์และซิลิกา

ถ่านกัมมันต์ถูกเตรียมจากการนำแกลบมากระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วน แกลบต่อ
 $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:0.25, 1:1 และ 1:2 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาเผาที่อุณหภูมิ $700^\circ C$ และซิลิกาถูก
เตรียมจากการนำแกลบมาเผาที่อุณหภูมิ $700^\circ C$ และนำเถ้าแกลบมาต้มกับ 2.5 N NaOH นำตัว
ดูดซับจากแกลบทำการกำจัดกลีเซอรินในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยมีสภาวะที่
เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ คือ ตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก รอบการเขย่าเท่ากับ
150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ เป็นเวลา 10 นาที และภายใต้สภาวะที่ไม่มีเมทานอล ใช้ตัวดูด
ซับร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ $50^\circ C$ เป็นเวลา 10
นาที ผลการศึกษาพบว่า ซิลิกาเป็นตัวดูดซับที่ดี เนื่องจากซิลิกาสามารถกำจัดกลีเซอรินได้สูงถึง
ร้อยละ 84.43 และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้สูงถึง 5 ครั้ง โดยการล้างด้วยเมทานอล ซึ่งมี
ประสิทธิภาพการกำจัดกลีเซอรินร้อยละ 75-80 ไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินของการศึกษานี้
สอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ กระบวนการดูดซับนี้ให้คุณภาพไบโอดีเซล
ใกล้เคียงการล้างด้วยน้ำ โดยเฉพาะค่าความเป็นกรด กลีเซอรอลอิสระ และกลีเซอรอลทั้งหมด
ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพไบโอดีเซล

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมลายมือชื่อ.....

ปีการศึกษา2554.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5287116120 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: ADSORPTION/ ACTIVATED CARBON/ BIODIESEL/ PURIFICATION/
SILICA.

JANLEKA POOTHONGKAM : GLYCERIN REMOVAL IN BIODIESEL PURIFICATION
PROCESS BY ADSORBENT FROM RICE HUSK

ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMCHAI PENGPRECHA, Ph.D., 119 pp

This study aims to investigate the possibility of reducing wastewater in biodiesel purification process by using adsorbents from rice husk, which was an activated carbon and an extracted silica.

Activated carbon was produced by treating rice husk with $ZnCl_2$ in the weight ratios of 1:0.25, 1:1 or 1:2, followed by the carbonization at 700 °C. Extracted silica was produced by heating rice husk at 700 °C, followed by the treatment of 2.5 N NaOH. The biodiesel was directly purified using an activated carbon and an extracted silica to remove glycerin. The optimum conditions for purifying biodiesel were 5% wt of adsorbents, 150 rpm of shaking rate, at 50 °C for 10 minutes. In the absence of methanol, the optimum conditions were 1.5% wt of adsorbents, 150 rpm of shaking rate, at 50 °C for 10 minutes. The result showed that silica is seem to be a good adsorbent, due to it could be removed glycerin up to 84.8% and it could be reused up to 5 times by washing with methanol with 75–80% of efficiency. The adsorption isotherm of this process was fit to Langmuir model. This adsorption process gave the quality of biodiesel similar to water washing process, particularly the values of acid number, free glycerol and total glycerol were met the specification of biodiesel standard.

Field of Study : Environmental Scienc..... Student's Signature

Academic Year : 2011..... Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้โดยดีด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้สละเวลาอันมีค่ายิ่งในการให้ความรู้ แนวคิด คำแนะนำ ความเอาใจใส่ และตรวจแก้ไขข้อผิดพลาด ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ มาโดยตลอด จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้โดยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ และ ดร.อนุรักษ์ วินิตสร ที่ได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ในห้องปฏิบัติการตลอดระยะเวลาทำการวิจัย

ขอขอบคุณทบวงมหาวิทยาลัย บัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนทุนเสนาผลงานวิจัย และทุนอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัย

นอกจากนี้ขอขอบคุณ นางสาวจิตตรี พละกุล และนางสาวนิสากรรณ์ ประชุมแสง ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาในระหว่างการทำวิจัย ขอขอบคุณนางสาวสุมิตรา นามประดิษฐกุล และนางสาวอามีนีย์ บริบูรณ์สุข เพื่อนร่วมหัวข้อวิจัย ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจในการแก้ปัญหาต่างๆ และขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และ ชั้น 15 ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้องทุกคนที่ให้การสนับสนุนทุนทรัพย์ให้คำปรึกษาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ รวมทั้งเป็นกำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| | |
| บทที่ | 1 |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2.1 ไบโอดีเซล (biodiesel)..... | 3 |
| 2.1.1 คุณสมบัติของไบโอดีเซล..... | 3 |
| 2.1.2 วัตถุดิบ..... | 6 |
| 2.1.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล..... | 8 |
| 2.1.4 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์..... | 12 |
| 2.2 การดูดซับ (adsorption)..... | 14 |
| 2.2.1 กระบวนการดูดซับ..... | 15 |
| 2.2.2 กลไกการดูดซับ..... | 16 |
| 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ..... | 17 |
| 2.2.4 สมดุลของการดูดซับ..... | 19 |
| 2.2.5 ตัวดูดซับ (adsorbent)..... | 23 |
| 2.3 แกลบ..... | 24 |

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.4 ถ่านกัมมันต์..... | 25 |
| 2.4.1. กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์..... | 25 |
| 2.4.2. สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์..... | 29 |
| 2.4.3. สมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์..... | 30 |
| 2.5 ซิลิกา..... | 31 |
| 2.5.1 โครงสร้างของซิลิกา..... | 31 |
| 2.5.2 คุณสมบัติของซิลิกา..... | 32 |
| 2.5.3 รูปแบบของซิลิกา..... | 35 |
| 2.5.4 กระบวนการผลิตซิลิกา..... | 35 |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 37 |
| 2.6.1 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์..... | 37 |
| 2.6.2 การผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ..... | 38 |
| 2.6.3 การผลิตซิลิกาจากแกลบ..... | 39 |
| 3 สารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง..... | 41 |
| 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 41 |
| 3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง..... | 41 |
| 3.1.2 สารเคมี..... | 41 |
| 3.2 วิธีการทดลอง..... | 42 |
| 3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับจากแกลบ..... | 42 |
| 3.2.2 การคัดขนาดตัวดูดซับจากแกลบ..... | 43 |
| 3.2.3 ตรวจสอบลักษณะของตัวดูดซับจากแกลบ..... | 43 |
| 3.2.4 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์..... | 44 |
| 3.2.5 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์..... | 44 |
| 3.2.6 การคืนสภาพตัวดูดซับ..... | 46 |
| 3.2.7 ไอโซเทอมของการดูดซับ..... | 46 |
| 4 ผลการทดลองและวิจารณ์..... | 48 |
| 4.1 ศึกษากระบวนการผลิตและคุณสมบัติของตัวดูดซับจากแกลบ..... | 48 |
| 4.1.1 ศึกษากระบวนการผลิตของตัวดูดซับจากแกลบ..... | 48 |

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.1.2 ศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับจากแกลบ..... | 50 |
| 4.2 ศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์..... | 55 |
| 4.2.1 ภายใต้สภาวะที่มีเมทานอล..... | 56 |
| 4.2.2 ภายใต้สภาวะที่ไม่มีเมทานอล..... | 60 |
| 4.2.3 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการล้างด้วยน้ำ..... | 62 |
| 4.3 ศึกษากระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับ..... | 63 |
| 4.4 ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ..... | 66 |
| 4.4.1 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับของ N ₂ ของตัวดูดซับจากแกลบ..... | 66 |
| 4.4.2 รูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของการดูดซับกลีเซอริน..... | 68 |
| 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 71 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 71 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 72 |
| รายการอ้างอิง..... | 73 |
| ภาคผนวก..... | 80 |
| ภาคผนวก ก..... | 81 |
| ภาคผนวก ข..... | 93 |
| ภาคผนวก ค..... | 102 |
| ภาคผนวก ง..... | 109 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 119 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D6751 และ EN 14214..... | 3 |
| 2.2 แสดงร้อยละของกรดไขมันของน้ำมันแต่ละชนิด..... | 6 |
| 2.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแต่ละชนิด..... | 10 |
| 2.4 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี..... | 16 |
| 2.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแกลบ..... | 24 |
| 2.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ..... | 25 |
| 2.7 แสดงทางกายภาพของซีลิกาบางประการ..... | 33 |
| 2.8 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของซีลิกา..... | 34 |
| 2.9 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์..... | 37 |
| 2.10 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ..... | 38 |
| 2.11 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตซีลิกาจากแกลบ..... | 39 |
| 4.1 แสดงค่าการดูดซับไอโอดีนนัมเบอร์และเมทธิลีนบลูของตัวดูดซับจากแกลบ..... | 51 |
| 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยวิธี BET..... | 52 |
| 4.3 แสดงค่าความเป็นกรด (acid value) และปริมาณกลีเซอรอลอิสระและกลีเซอรอลทั้งหมด..... | 60 |
| 4.4 แสดงปริมาณกลีเซอรอลอิสระและกลีเซอรอลทั้งหมด..... | 61 |
| 4.5 แสดงปริมาณกลีเซอริน กลีเซอรอลอิสระและกลีเซอรอลทั้งหมด..... | 62 |
| 4.6 แสดงลักษณะของตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว ในการคืนสภาพวิธีต่างๆ..... | 64 |
| 4.7 แสดงปริมาณกลีเซอรอลอิสระ และกลีเซอรอลทั้งหมดของการคืนสภาพของถ่านกัมมันต์และซีลิกาแต่ละครั้ง..... | 65 |
| 4.8 แสดงค่าคงที่ของไอโซเทอมของการดูดซับกลีเซอริน..... | 69 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างสารประกอบกลุ่มไตรกลีเซอไรด์ กับแอลกอฮอล์..... | 8 |
| 2.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ..... | 20 |
| 2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์..... | 22 |
| 2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช..... | 23 |
| 2.5 โครงสร้างของเมทิลีนบลู..... | 30 |
| 2.6 โครงสร้างซิลิกาแบบผลึกและอสัณฐาน..... | 32 |
| 4.1 ลักษณะของแกลบก่อน และหลังต้มด้วย 1 N NaOH..... | 48 |
| 4.2 ลักษณะแกลบที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และถ่านกัมมันต์ที่ได้..... | 49 |
| 4.3 ลักษณะก่อน และแกลบหลังเผา..... | 49 |
| 4.4 ลักษณะซิลิกาที่ได้จากกระบวนการผลิต..... | 50 |
| 4.5 ลักษณะผิวภายนอกของ (ก) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบ ต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 4: 1 (ข) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบ ต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 1 (ค) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบ ต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2..... | 53 |
| 4.6 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่อง FT-IR..... | 54 |
| 4.7 รูปแบบโครงสร้างของซิลิกา ด้วยเครื่อง XRD..... | 55 |
| 4.8 TLC ของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ เมื่อ PO คือน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ และ BD คือบิโอดีเซล โดยมี mobile phase คีอสารผสมระหว่าง hexane : ethyl acetate : acetic acid เท่ากับ 90 : 10 : 1 โดยปริมาตร..... | 55 |
| 4.9 การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอริน..... | 56 |
| 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาตั้งทิ้งไว้กับปริมาณกลีเซอริน ที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซล..... | 57 |
| 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิต่อปริมาณกลีเซอริน ในไบโอดีเซล..... | 58 |
| 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับ..... | 58 |
| 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับ..... | 59 |

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับกลีเซอริน ในสถานะไม่มีเมทานอล..... | 61 |
| 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการใช้ซ้ำกับร้อยละการดูดซับ..... | 65 |
| 4.16 ไอโซเทอมการดูดซับ N_2 ที่อุณหภูมิ 77 K ของ(ก) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 4: 1 (ข) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 1 (ค) ถ่านกัมมันต์ที่ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2 และ(ง) ซิลิกา..... | 66 |
| 4.17 รูปแบบของ(ก) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน โดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2 (ข) ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช ของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2 (ค) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ของซิลิกาและ (ง) ไอโซเทอมแบบฟรุนดิช ของซิลิกา..... | 68 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ราคาน้ำมันปิโตรเลียมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลกระทบต่อประเทศไทยโดยตรง เพราะประเทศไทยมีสัดส่วนการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมในปริมาณค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำมันปิโตรเลียมที่ประเทศผลิตได้ เพื่อตอบสนองความต้องการภายในประเทศ เช่นการใช้ในภาคครัวเรือน และภาคอุตสาหกรรม นอกจากการใช้น้ำมันปิโตรเลียมยังก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีแนวคิดพัฒนาพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม เช่น ไบโอดีเซล เป็นพลังงานทางเลือกที่ถูกใช้ทดแทนน้ำดีเซล และแก๊สโซฮอล์ เป็นพลังงานทางเลือกที่ถูกใช้ทดแทนน้ำเบนซิน เพื่อลดปริมาณการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมและมลพิษทางสิ่งแวดล้อม

ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกชนิดหนึ่งที่ถูกคิดค้นขึ้น เพื่อใช้ทดแทนน้ำดีเซล เพราะไบโอดีเซลมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล เช่น ความหนาแน่น (density) ดัชนีซีเทน (cetane index) ความจุความร้อนในการกลายเป็นไอ และ ค่าอากาศต่อน้ำมัน เป็นต้น (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2551) สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง หรือผสมกับกับน้ำมันดีเซล การใช้พลังงานทางเลือก (ไบโอดีเซล)สามารถลดการนำเข้า และการใช้งานพลังงานจากแหล่งฟอสซิล เพราะไบโอดีเซลสามารถผลิตจากแหล่งทรัพยากรธรรมชาติในประเทศ เช่นพืช น้ำมัน ไขมันสัตว์ และน้ำมันใช้แล้ว ไบโอดีเซลเกิดจากการเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบกลุ่มไตรกลีเซอไรด์ (น้ำมัน) เป็นสารกลุ่มเอสเตอร์ (ไบโอดีเซล) อาศัยกระบวนการทางเคมี ซึ่งวิธีการผลิตไบโอดีเซลสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีการที่นิยมใช้ คือ กระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน ไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการผลิต และแยกชั้นกลีเซอรินนั้นยังมีสิ่งปนเปื้อน เช่น กรดไขมันอิสระ กลีเซอรอล ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือ แอลกอฮอล์ที่ใช้ สบู่ กลีเซอไรด์ และน้ำ เป็นต้น ซึ่งสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ได้โดยกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ซึ่งวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือ การล้างด้วยน้ำอุ่น เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก แต่วิธีการนี้ก่อให้เกิดน้ำเสียเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิต เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง จากปัญหาดังกล่าวนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยตัวดูดซับแทนกระบวนการเดิม เพื่อลดการเกิดน้ำเสีย ซึ่งตัวดูดซับที่สามารถใช้ในกระบวนการนี้มี

หลายชนิด โดยในการศึกษาครั้งนี้สนใจในส่วนของถ่านกัมมันต์ และซิลิกา เพราะสามารถผลิตจากแกลบซึ่งเป็นของเสียเหลือใช้ทางการเกษตร

แกลบเป็นของเสียเหลือใช้ทางการเกษตรที่เกิดจากแปรรูปข้าวเปลือกเป็นข้าวสาร ซึ่งในแต่ละปีประเทศไทยส่งออกข้าวเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดแกลบในกระบวนการเป็นจำนวนมาก เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแกลบ และเถ้าแกลบ พบว่ามีองค์ประกอบที่สามารถนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ และซิลิกา

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดกลิ่นในไบโอดีเซลโดยตัวดูดซับจากแกลบ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษากระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบที่ถูกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$

1.3.2 ศึกษากระบวนการผลิตซิลิกาจากเถ้าแกลบด้วยวิธีการทำปฏิกิริยากับ $NaOH$

1.3.3 ศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้ตัวดูดซับจากแกลบที่รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที

1.3.4 ศึกษาวิธีการคืนสภาพตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ประโยชน์ โดยการแปรรูปเป็นตัวดูดซับ

1.4.2 สามารถทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ได้โดยใช้ตัวดูดซับจากแกลบ และลดปริมาณการเกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการล้าง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล (biodiesel)

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกที่ถูกคิดค้นเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล เพราะไบโอดีเซลมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับน้ำมันดีเซล สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรงหรือผสมกับน้ำมันดีเซลที่สัดส่วนต่างๆ และไบโอดีเซลสามารถผลิตจากทรัพยากรธรรมชาติ จึงไม่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม

2.1.1 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลได้รับความนิยมทางด้านการค้าในหลายประเทศทั่วโลก เพราะมีการพัฒนามาตรฐานคุณภาพไบโอดีเซลให้อยู่ในระดับสูง เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือ โดยมีมาตรฐานคุณภาพไบโอดีเซลที่นิยม คือ ASTM D6751 (ASTM = American Society for Testing and Materials) และ EN 14214 (EN = European Standard) (Knothe และคณะ, 2005 และ Demirbas และคณะ, 2009) ซึ่งคุณสมบัติของไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D6751 และ EN 14214 แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D6751 และ EN 14214 (Demirbas และคณะ, 2009, Atadashi และคณะ, 2010 และ Ong และคณะ, 2011)

| | คุณสมบัติ | ข้อกำหนด | |
|---|---|----------------|------------------|
| | | ASTM D6751 | EN 14214 |
| 1 | เมทิลเอสเทอร์ (methyl ester), ร้อยละโดยน้ำหนัก | - | ไม่ต่ำกว่า 96.5 |
| 2 | ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C (density at 15 °C), Kg/dm ³ | - | 860 - 900 |
| 3 | ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (viscosity at 40 °C), เซนติสโตกส์ (mm/s) | 1.9 – 6.0 | 3.5 -5.0 |
| 4 | จุดวาบไฟ (flash point), °C | ไม่ต่ำกว่า 130 | ไม่ต่ำกว่า 101 |
| 5 | กำมะถัน (sulphur), ร้อยละโดยน้ำหนัก | - | ไม่สูงกว่า 0.001 |

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D6751 และ EN 14214 (ต่อ)

| | คุณสมบัติ | ข้อกำหนด | |
|----|--|--------------------------|-------------------------|
| | | ASTM D6751 | EN 14214 |
| 6 | กากถ่าน (ร้อยละ 100 ของตัวอย่าง) (carbon residue, on 100% sample), ร้อยละโดยน้ำหนัก กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (carbon residue, on 10% distillation residue), ร้อยละโดยน้ำหนัก | ไม่สูงกว่า 0.05 - | - ไม่สูงกว่า 0.3 |
| | กากถ่าน (ร้อยละ 100 ของตัวอย่าง) (carbon residue, on 100% sample), ร้อยละโดยน้ำหนัก กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น) (carbon residue, on 10% distillation residue), ร้อยละโดยน้ำหนัก | ไม่สูงกว่า 0.05 - | - ไม่สูงกว่า 0.3 |
| 7 | จำนวนซีเทน (cetane number) | ไม่ต่ำกว่า 47 | ไม่ต่ำกว่า 51 |
| 8 | เถ้าซัลเฟต (sulfated ash), ร้อยละโดยน้ำหนัก | ไม่สูงกว่า 0.02 | - |
| 9 | น้ำและตะกอน (water and sediment), ร้อยละโดยน้ำหนัก น้ำ (water content), mg/kg | ไม่สูงกว่า 0.05 - | - ไม่สูงกว่า 500 |
| 10 | สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (total contaminant), mg/kg | - | ไม่สูงกว่า 24 |
| 11 | การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (copper strip corrosion) | ไม่สูงกว่า No 3 | Class 1 |
| 12 | เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C (oxidation stability at 110 °C), ชั่วโมง | - | ไม่สูงกว่า 6 |
| 13 | ค่าความเป็นกรด (acid value), mg KOH/g | ไม่สูงกว่า 0.08 | ไม่สูงกว่า 0.5 |
| 14 | ค่าไอโอดีน (iodine value), g I/ 100g | - | ไม่สูงกว่า 120 |
| 15 | กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (linolenic acid methyl ester), ร้อยละโดยน้ำหนัก | - | ไม่สูงกว่า 12 |
| 16 | เมทานอล (methanol), ร้อยละโดยน้ำหนัก | - | ไม่สูงกว่า 0.2 |
| 17 | โมโนกลีเซอไรด์ (monoglyceride), ร้อยละโดยน้ำหนัก | - | ไม่สูงกว่า 0.8 |

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D6751 และ EN 14214 (ต่อ)

| | คุณสมบัติ | ข้อกำหนด | |
|----|---|------------------|-----------------|
| | | ASTM D6751 | EN 14214 |
| 18 | ไดกลีเซอไรด์ (diglyceride), รั้อยละโดยน้ำหนัก | - | ไม่สูงกว่า 0.2 |
| 19 | ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride), รั้อยละโดยน้ำหนัก | - | ไม่สูงกว่า 0.2 |
| 20 | กลีเซอรินอิสระ (free glycerine), รั้อยละโดยน้ำหนัก | ไม่สูงกว่า 0.02 | - |
| 21 | กลีเซอรินทั้งหมด (total glycerine), รั้อยละโดยน้ำหนัก | ไม่สูงกว่า 0.24 | ไม่สูงกว่า 0.25 |
| 22 | โลหะกลุ่มที่ 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม), mg/kg | - | ไม่สูงกว่า 5 |
| | โลหะกลุ่มที่ 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม), mg/kg | - | ไม่สูงกว่า 5 |
| 23 | ฟอสฟอรัส (phosphorus), รั้อยละโดยน้ำหนัก | ไม่สูงกว่า 0.001 | ไม่สูงกว่า 0.01 |

เมื่อพิจารณาข้อกำหนดและมาตรฐานวิธีการทดสอบการตรวจสอบไบโอดีเซลแบ่งได้เป็น 2 ส่วน (รติกร อลงกรณ์โชติกุล, 2549) คือ

2.1.1.1. การตรวจสอบคุณสมบัติทั่วไปที่เป็นข้อกำหนดคุณภาพที่ดีของน้ำมัน ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ความหนืด จุดวาบไฟ ปริมาณกำมะถัน ปริมาณกากถ่าน จำนวนซีเทน ปริมาณเถ้าซัลเฟต ปริมาณน้ำ สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด การกัดกร่อนแผ่นทองแดง ค่าความเป็นกรด และปริมาณโลหะอัลคาไล และอัลคาไลน์เอิร์ทที่ปนเปื้อน

2.1.1.2. การตรวจสอบสมบัติเฉพาะของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ ได้แก่

- ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ และกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (สัดส่วนของปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ในเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันทั้งหมด) แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้

- ปริมาณเมทานอล โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ กลีเซอรอลอิสระ และกลีเซอรอลทั้งหมด ซึ่งกำหนดเกณฑ์ให้มีสารเหล่านี้อยู่ในปริมาณน้อย เพราะเป็นการบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างสารประกอบกลุ่มไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชและไขมันสัตว์กับเมทานอล และมีกระบวนการแยกกลีเซอรินที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกไปได้เป็นอย่างดี

- ทดสอบการมีเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110°C และค่าไอโอดีน

2.1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์เป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการผลิต เพราะการผลิตไบโอดีเซลเป็นกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของน้ำมัน (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2551) วัตถุประสงค์ในการผลิตไบโอดีเซลสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ พืชน้ำมัน (ทั้งกินได้และกินไม่ได้) ไขมันสัตว์ และน้ำมันที่ใช้แล้ว ซึ่งทั้ง 3 กลุ่มนั้นมีองค์ประกอบหลักเป็น สารประกอบกลุ่มไตรกลีเซอไรด์ โดยน้ำมันแต่ละชนิดมีกรดไขมันที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงร้อยละของกรดไขมันของน้ำมันแต่ละชนิด (ดัดแปลงจาก Balat และ Balat, 2010)

| น้ำมัน | Palmitic (C16:0) | Palmitoleic (C16:1) | Stearic (C18:0) | Oleic (C18:1) | Linoleic (C18:2) | Linolenic (C18:3) | Other acid |
|------------------|------------------|---------------------|-----------------|---------------|------------------|-------------------|------------|
| ข้าวโพด | 6.0 | - | 2.0 | 44.0 | 48.0 | - | - |
| เมล็ดฝ้าย | 28.3 | - | 0.9 | 13.3 | 57.5 | - | - |
| มะกอก | 14.6 | - | - | 75.4 | 10 | - | - |
| ปาล์ม | 42.6 | 0.3 | 4.4 | 40.5 | 10.1 | 0.2 | 1.1 |
| ถั่วลิสง | 11.4 | - | 2.4 | 48.3 | 32.0 | 0.9 | 9.1 |
| Rapeseed | 3.5 | 0.1 | 0.9 | 54.1 | 22.3 | - | 0.2 |
| ดอกคำฝอย | 7.3 | 0.1 | 1.9 | 13.5 | 77 | - | - |
| ถั่วเหลือง | 11.9 | 0.3 | 4.1 | 23.2 | 54.2 | 6.3 | - |
| ทานตะวัน | 6.4 | 0.1 | 2.9 | 17.7 | 72.9 | - | - |
| ไขมันสัตว์ | 29.0 | - | 24.5 | 44.5 | - | - | - |
| <i>J.curcas</i> | 14.2 | 0.7 | 7.0 | 44.7 | 32.8 | 0.2 | - |
| <i>P.pinnata</i> | 10.2 | - | 7.0 | 51.8 | 17.7 | 3.6 | - |
| <i>M.indica</i> | 24.5 | - | 22.7 | 37.0 | 14.3 | - | - |
| น้ำมันใช้แล้ว | 20.4 | 4.6 | 4.8 | 52.9 | 13.5 | 0.8 | - |

2.1.2.1 พืชน้ำมัน (vegetable oil) สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มพืชน้ำมันที่กินได้ และกลุ่มพืชน้ำมันที่กินไม่ได้

- กลุ่มพืชน้ำมันที่กินได้ (edible vegetable oil) ปัจจุบันเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลคิดเป็นร้อยละ 95 ของการผลิตไบโอดีเซลทั้งหมด (Gui, Lee และ Bhatia, 2008) เช่น มะพร้าว ถั่วเหลือง ทานตะวัน และปาล์ม เป็นต้น ทำให้มีการคาดการณ์ว่าในระหว่างปี 2005 – 2017 การผลิตไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันที่กินได้มีแนวโน้มมากกว่าหนึ่งสามของพืชน้ำมันที่กินได้ทั้งหมด (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009) เป็นผลมาจากประเทศอุตสาหกรรมมีเป้าหมายการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพมากขึ้น ทำให้มีขยายพื้นที่เพาะปลูกพืชน้ำมันเพื่อผลิตไบโอดีเซลมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดแคลนอาหารของโลก เนื่องจากพื้นที่ในการเพาะปลูกลดลง ทำให้ปัจจุบันเริ่มมีการผลิตไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันที่กินไม่ได้ (Pimentel และคณะ, 2008) และจากแหล่งอื่น

- กลุ่มพืชน้ำมันที่กินไม่ได้ (non-edible vegetable oil) จากปัญหาข้างต้น ทำให้ปัจจุบันนิยมผลิตไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันที่บริโภคไม่ได้ เช่น สบู่ดำ ยาสูบ รำ สะเดา เมล็ดยางพารา และสาหร่าย เป็นต้น

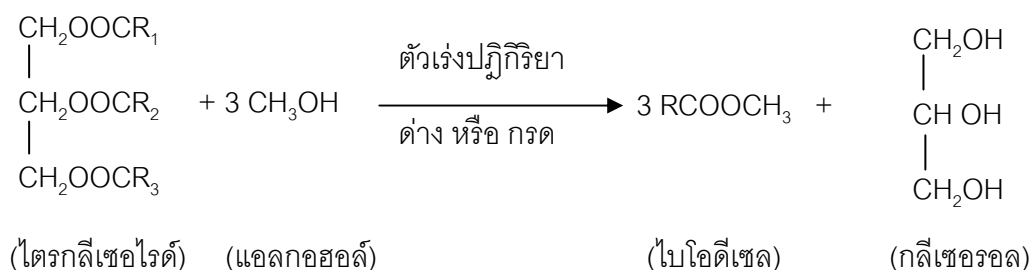
2.1.2.2 ไขมันสัตว์ (animal fat) ไขมันสัตว์ที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล เช่น น้ำมันหมู ไขมันไก่ tallow และ yellow grease เป็นต้น ข้อดีของไขมันสัตว์ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ จำนวนซีเทนสูง ไม่กัดกร่อน เป็นเชื้อเพลิงสะอาดและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และมีปริมาณกรดไขมันอิสระ ((Free Fatty Acid), FFA) และน้ำต่ำ แต่ไม่สามารถตอบสนองความต้องการเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซล เพราะไขมันสัตว์มีปริมาณจำกัด (Sheedlo, 2008)

2.1.2.3 น้ำมันที่ใช้แล้ว (waste cooking oil, (WCO)) น้ำมันที่ใช้แล้วเป็นทางเลือกทดแทนในการใช้พืชน้ำมันผลิตไบโอดีเซล เพราะพืชน้ำมันที่กินได้มีราคาสูงกว่าประมาณ 2-3 เท่า (Balat และ Balat, 2010) และเป็นการใช้ประโยชน์ของเสียเหลือใช้ เพราะการบริโภคน้ำมันใช้แล้วหลายครั้งจะเกิดการกลายพันธุ์ จึงมีหลายประเทศห้ามใช้น้ำมันที่ใช้แล้วซ้ำ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2551) โดยการเปลี่ยนน้ำมันที่ใช้แล้วเป็นสารกลุ่ม methyl ester ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน ทำให้น้ำมันหนักโมเลกุลประมาณหนึ่งในสาม ลดความหนืดลงประมาณหนึ่งในเจ็ด ลดจุดวาบไฟลงเล็กน้อย ข้อควรระวังของการใช้น้ำมันที่ใช้แล้วผลิตไบโอดีเซล คือมีปริมาณกรดไขมันอิสระ และน้ำสูง ซึ่งส่งผลต่อผลผลิตไบโอดีเซล

2.1.3 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้หลายวิธี คือการใช้โดยตรงและการผสม ไมโครอิมัลชัน (micro-emulsion) กระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน (pyrolysis) และกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (transesterification) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำมัน (สารประกอบกลุ่มไตรกลีเซอไรด์) และแอลกอฮอล์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบกลุ่มเอสเตอร์ (ไบโอดีเซล) และกลีเซอรอล (glycerol) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ได้ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ในเร่งปฏิกิริยาการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างสารประกอบกลุ่มไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2551)

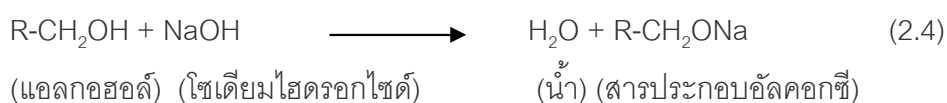
จากภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาจะเกิดได้ต้องอัตราส่วนระหว่างน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ เท่ากับ 1:3 แต่ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างสมบูรณ์ต้องอาศัยปริมาณแอลกอฮอล์ที่มากเกินพอ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน แต่ละขั้นตอนเกิดต่อเนื่องกันดังสมการที่ 2.1 ถึง 2.3 (Marchetti, Miguel และErrazu, 2007)



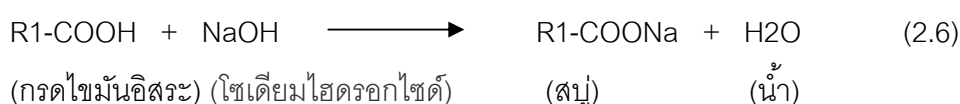
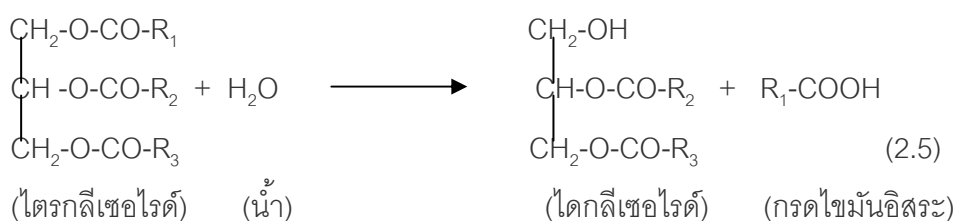
2.1.3.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันประกอบด้วย

(1) ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันช่วยทำให้การเกิดปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ได้ดีและเร็วขึ้น โดยชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งได้ดังนี้

- ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (alkali catalyst) นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม การผลิตไบโอดีเซล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่ใช้โดยทั่วไป คือ NaOH และ KOH ซึ่ง NaOH นิยมใช้อุตสาหกรรมผลิตไบโอดีเซลมากกว่า KOH เพราะมีราคาถูกกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ใช้ระยะเวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด และให้ไบโอดีเซลใน ปริมาณสูง แต่ก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันควรเปลี่ยนจากรูปเบสให้อยู่ในรูปของ สารประกอบอัลคอกซี (alcoxy) ดังสมการที่ 2.4 (Marchetti และคณะ, 2007)



ข้อควรระวังของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส คือ ปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระใน วัตถุดิบ ถ้ามีปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระมาก เมื่อทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ก่อให้เกิดสบู่ ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6 (Leung, Wu และ Leung, 2010) ซึ่งสบู่ที่เกิดขึ้นนั้นจะ ขัดขวางการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซล และกลีเซอรอล ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ลดลง



- ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด (acid catalyst) ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลนิยม ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดเป็นอันดับสองรองตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส โดยทั่วไปนิยมใช้ H_2SO_4 เหมาะกับวัตถุดิบที่มีปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระสูง เช่น น้ำมันที่ใช้แล้ว ปฏิกิริยาที่ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดให้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณสูงแต่ใช้เวลานาน (3- 48 ชั่วโมง) (Balat และ Balat, 2010)

- ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอนไซม์ (enzyme catalyst) ที่นิยมใช้ คือ เอนไซม์ไลเปส (lipases) เอนไซม์ไลเปสถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบางปฏิกิริยา เช่น ไฮโดรไลซิสของกลีเซอรอล แอลกอฮอล์ไลซิส (alcoholysis) และ แอซิโดไลซิส (acidolysis) ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอ็นไซม์สามารถแก้ปัญหาที่เกิดกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส (Karam และคณะ, 2009) เช่น การมีน้ำ และกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบ และการแยกชั้นกลีเซอริน เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอ็นไซม์ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และได้ผลิตภัณฑ์สูง แต่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานประมาณ 4- 40 ชั่วโมง หรือมากกว่า (Balat และBalat, 2010)

- ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (non-catalyst) เป็นวิธีการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ใช้แอลกอฮอล์ยิ่งยวด (Supercritical alcohol) เช่น เมทานอล เอทานอล บิวทานอล และโพรทานอล ในการเปลี่ยนน้ำมันเป็นไบโอดีเซลด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน สามารถแบ่งวิธีการเป็น 2 ขั้นตอนคือ การไฮโดรไลซิสไขมันด้วยน้ำแล้วใช้แอลกอฮอล์ยิ่งยวด ทำให้ได้กรดไขมัน (fatty acid) ขั้นตอนต่อไป คือการแยกชั้นน้ำมันออกจากชั้นน้ำ นำชั้นน้ำมันผสมกับแอลกอฮอล์ (Balat and Balat, 2010) เพื่อทำปฏิกิริยาเมทิลเอสเทอร์ฟิเคชันในสภาวะอุณหภูมิ และความดันปานกลาง คือ น้อยกว่า 300 °C และ 7-20 MPa ตามลำดับ ทำให้ได้ไบโอดีเซล ซึ่งสภาวะที่ใช้ นั้นทำได้ยากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เพราะการทนต่อความร้อนของไบโอดีเซลเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดไขมันไม่อิ่มตัวในน้ำมันพืชจะเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย เนื่องจากทนต่อความร้อนได้น้อย (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553) จากการศึกษากของ Imahara และคณะ (2003) พบว่า น้ำมันเรพซีด และน้ำมันดอกทานตะวันที่ 350 °C /43 MPa ผลิตภัณฑ์จะลดลงถึง 50% ซึ่งเป็นผลจากผลิตภัณฑ์เปลี่ยนสภาพไปเป็นโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น โดยเกิดจากการ polymerization และการเปลี่ยนสภาพของผลิตภัณฑ์ไปเป็นแก๊ส

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันแต่ละชนิดมีข้อดี และข้อเสียแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแต่ละชนิด (Sharma, Singh และUpadhyay, 2008)

| | ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส | ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเอ็นไซม์ | ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด | Supercritical alcohol |
|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| อุณหภูมิ °C | 60 - 65 | 30 - 40 | 55-80 | 239-385 |
| กรดไขมันอิสระในวัตถุดิบ | ทำให้สบู่ (saponified products) | ทำให้เมทิลเอสเทอร์ (methyl ester) | เอสเทอร์ (esters) | เอสเทอร์ (esters) |

ตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแต่ละชนิด (ต่อ)

| | ตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดเบส | ตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดเอ็นไซม์ | ตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดกรด | Supercritical alcohol |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| น้ำในวัตถุดิบ | มีผลต่อการ เกิดปฏิกิริยา | ไม่มีผลต่อการ เกิดปฏิกิริยา | มีผลต่อการ เกิดปฏิกิริยา | - |
| ผลิตภัณฑ์ | ปกติ | สูง | ปกติ | ดี |
| การแยกชั้น กลีเซอรอล | ยาก | ง่าย | ยาก | - |
| ราคาตัวเร่ง ปฏิกิริยา | ถูก | ค่อนข้างแพง | ถูก | ปานกลาง |

(2) อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน แอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมีหลายชนิด เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และ บิวทานอล แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล คือ เมทานอล และเอทานอล เพราะเมทานอลมีราคาถูก และมีข้อดีในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพและด้านเคมี คือ เป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีขั้ว ซึ่งสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้รวดเร็ว เอทานอลเป็นผลผลิตที่ได้ทางการเกษตร สามารถผลิตขึ้นใหม่ได้และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน เป็นปัจจัยสำคัญตัวหนึ่งที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553) เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับ ทำให้ต้องใช้แอลกอฮอล์ปริมาณที่มากเกินพอ เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวามากขึ้นซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้นเช่นกัน ในภาพที่ 2.1 โดยปกติอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่ใช้ในปฏิกิริยาคือ 3 โมลของแอลกอฮอล์ต่อ 1 โมลของสารประกอบกลุ่มไตรกลีเซอไรด์ (น้ำมัน) (Gerpen, 2005) ซึ่งการแยกชั้นระหว่างชั้นไบโอดีเซลและกลีเซอรินยาก ใช้เวลานานและเสียค่าใช้จ่ายในการแยกมากขึ้น ทำให้ในทางปฏิบัติต้องใช้อัตราส่วนที่มากกว่าขึ้น เพื่อให้เกิดสารประกอบกลุ่มเอสเทอร์ (ไบโอดีเซล) มากขึ้น และภายในระยะเวลาที่สั้นลง ซึ่งอัตราส่วนที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซลคือ 6:1 สำหรับเมทานอล (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553)

(3) ปริมาณน้ำและกรดไขมันอิสระ วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล (น้ำมัน และแอลกอฮอล์) ต้องไม่มีน้ำ เพราะน้ำส่งผลต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซล คือ น้ำทำให้เกิดสบู่ในกระบวนการผลิต โดยสบู่ทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เพิ่มความหนืดให้ไบโอดีเซล และทำให้การแยกของไบโอดีเซลกับกลีเซอรินยากขึ้น

กรดไขมันอิสระมีผลต่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสโดยตรง เพราะเมื่อกรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสเกิดผลิตภัณฑ์ คือสบู่ ดังสมการที่ 2.6 ซึ่งปริมาณกรดไขมันอิสระของวัตถุดิบ ถ้ามีปริมาณมากกว่า ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก จะมีผลต่อปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น (Sharma และคณะ, 2008) ดังนั้นวัตถุดิบต้องผ่านกระบวนการลดปริมาณกรดไขมันอิสระ โดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (esterification) ซึ่งมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

(4) อุณหภูมิและเวลาการทำปฏิกิริยา ชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต มีผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ เพราะถ้าอุณหภูมิที่ใช้สูงกว่าจุดเดือดของแอลกอฮอล์ ทำให้แอลกอฮอล์ระเหยเร็วขึ้นส่งผลให้ปริมาณไบโอดีเซลที่เกิดลดลง (Sharma และคณะ, 2008) แต่การใช้อุณหภูมิสูงสามารถลดความหนืดของน้ำที่ใช้แล้ว และเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาแต่ขึ้นกับชนิดของแอลกอฮอล์ และวัตถุดิบที่ใช้ (Leung และคณะ, 2010)

เวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีผลต่อไบโอดีเซลในกระบวนการ คือถ้าระยะเวลาเพิ่มขึ้น ไบโอดีเซลที่ได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน (Meher และคณะ, 2004) โดยทั่วไประยะเวลาที่ทำให้ไบโอดีเซลมีปริมาณสูงสุด คือ 90 นาที แต่เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นจะทำปริมาณไบโอดีเซลลดลง เนื่องจากเกิดการผันกลับของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Leung และคณะ, 2010)

(5) อัตราการกวนผสม อัตราการกวนผสมมีความสำคัญต่อกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพราะการกวนผสมทำให้น้ำมัน แอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยา สัมผัสหรือชนกัน เนื่องจากน้ำมันและแอลกอฮอล์ไม่สามารถรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันตามธรรมชาติ เพราะมีความสามารถในการละลายที่แตกต่างกัน ถ้าไม่มีการกวนผสมปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณที่ชั้นน้ำมันและแอลกอฮอล์สัมผัสกันเท่านั้น (Rashid และAnwar, 2008)

2.1.4 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และการแยกชั้นกลีเซอรินออก ยังมีสิ่งปนเปื้อนหลายอย่าง เช่น แอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือ น้ำ กลีเซอรอลอิสระ กรดไขมันอิสระ กลีเซอรไรด์ และสบู่ ซึ่งสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้มีผลต่อคุณภาพไบโอดีเซล และสามารถกำจัดกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ เพื่อให้ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติผ่านมาตรฐาน สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี ดังนี้

2.1.4.1 กระบวนการล้างแบบเปียก (wet washing process)

กระบวนการล้างแบบเปียกเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล โดยเฉพาะการใช้น้ำล้าง เพราะกลีเซอริน และแอลกอฮอล์มีความสามารถในการละลายน้ำสูง ทำให้น้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน และเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย และสะดวก ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ การเกิดน้ำเสียในกระบวนการ ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนและเวลาในการผลิต เพื่อน้ำเสียบำบัดก่อนปล่อยลงแหล่งน้ำ และลดปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากการเกิดอิมัลชันระหว่างชั้นน้ำกับไบโอดีเซล ปัจจุบันกระบวนการล้างแบบเปียกสามารถแบ่งออกเป็น

(1) ล้างด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิประมาณ 60 – 80°C เป็นวิธีที่นิยมดังที่กล่าวข้างต้น Demirbas (2009) กล่าวว่า น้ำจะถูกเติมและเขย่ารวมกับไบโอดีเซล และตั้งทิ้งไว้เพื่อแยกชั้นไบโอดีเซลและน้ำออกจากกัน ซึ่งจะเกิดต่อเนื่องจนชั้นไบโอดีเซลสะอาด โดยปริมาณน้ำที่ใช้คิดเป็น 20% ของปริมาณไบโอดีเซล การเติมน้ำทำให้เกิดการจับตัวเป็นอิมัลชัน ส่งผลให้สูญเสียผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการ และในไบโอดีเซลยังมีน้ำตกค้างอยู่ด้วย

(2) ล้างด้วยกรดแล้วตามด้วยน้ำกลั่น กรดที่นิยมใช้ คือ H_3PO_4 , H_2SO_4 และ HCl เพื่อช่วยให้ไบโอดีเซลเป็นกลาง (ทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่เหลือในกระบวนการ) และลดการจับตัวเป็นสบู่ของกรดไขมันอิสระและการเกิดอิมัลชันในกระบวนการ แล้วล้างตามด้วยน้ำกลั่นจนชั้นไบโอดีเซลสะอาด กำจัดน้ำที่ตกค้างด้วย Na_2SO_4 (10% ของไบโอดีเซล) และกรอง (Atadashi และคณะ, 2011)

(3) ล้างด้วยสารละลายอินทรีย์ โดยสารละลายอินทรีย์ที่ใช้ คือ petroleum ether โดยทั่วไปกระบวนการนี้จะตามด้วยการล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสบู่และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือ หรือจนน้ำล้างมี pH เป็นกลาง แล้วนำไบโอดีเซลกำจัดน้ำด้วย Na_2SO_4 และกำจัด petroleum ether โดยการนำไประเหยหรือกลั่น (Atadashi, Aroua และ Aziz, 2011)

2.1.4.2 กระบวนการล้างแบบแห้ง (dry washing process)

กระบวนการล้างแบบแห้งถูกคิดค้นเพื่อใช้ทดแทนกระบวนการแบบเปียกโดยการใช้ น้ำ ด้วยตัวดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ Activated clay และแมกนีซอล เป็นต้น ซึ่งสามารถดูดซับสารประกอบที่มีขี้ เช่น กลีเซอรอล เมทานอล กลีเซอไรด์ โลหะ และสบู่ ในระหว่างกระบวนการ สามารถลดปริมาณกลีเซอไรด์ และกลีเซอรอลทั้งหมด (total glycerol) ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ ผลิตภัณฑ์มีน้ำน้อยหรือไม่มี ทำให้ไม่เกิดน้ำเสียในกระบวนการ ซึ่งเป็นลดระยะเวลา และต้นทุนการผลิต (Dugan, 2007) ตัวดูดซับที่ใช้ในกระบวนการนี้มีดังนี้

(1) แมกนีซอล (magnesol) ปริมาณที่ใช้ในกระบวนการอยู่ในช่วงร้อยละ 1.5 – 3 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล ซึ่งไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการนี้มีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ผ่านกำจัดสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้ แมกนีซอลมีความสามารถในการดูดซับสารมีขั้วจึงสามารถกำจัดกลีเซอรอล แอลกอฮอล์ สบู่ และกรดไขมันอิสระได้ (Atadashi และคณะ, 2011)

(2) การแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซิน (ion exchange resins) โดยให้ไบโอดีเซลไหลผ่านคอลัมน์เรซิน ซึ่งมีการควบคุมอัตราการไหลของไบโอดีเซล เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง สามารถกำจัดกลีเซอรอล และสบู่ แต่ไม่สามารถลดหรือลดน้อยเมทานอลได้ (Berrios และ Skelton, 2008)

(3) ตัวดูดซับชนิดอื่น เช่น ถ่านกัมมันต์, activated clay และ acid clay เป็นต้น โดยขนาดของตัวดูดซับมีผลต่อการกำจัดสารปนเปื้อนข้างต้นในไบโอดีเซล กล่าวตัวดูดซับขนาดเล็กดูดซับได้ดี แต่เกิดการรวมตะกอนหรือการตกตะกอนร่วมด้วย (Hayafuji และคณะ, 1999)

2.1.4.3 การสกัดด้วยเมมเบรน (membrane extraction)

เมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการนี้ คือ hollow fiber membrane extraction เช่น polysulfone โดยทำการดูดไบโอดีเซลใส่ hollow fiber membrane ด้วยอัตราการเท่ากับ 0.5 ml/min หลังขั้นตอนนี้นำไบโอดีเซลไปกำจัดน้ำด้วย Na_2SO_4 และการกรอง กระบวนการนี้ลดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 90 (Atadashi และคณะ, 2011)

2.2 การดูดซับ (adsorption)

การดูดซับ เป็นความสามารถของสารดูดซับ (adsorbent) ในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (adsorbate) ที่อยู่ในสถานะแก๊ส หรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว 2 วัฏจักร เช่น แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง ของเหลวกับของเหลว หรือ ของเหลวกับของแข็ง

2.2.1 กระบวนการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพและแรงเคมี ซึ่งโดยกระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) ตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ ดังนี้

2.2.1.1. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

การดูดซับแบบนี้สามารถเกิดทั้งแบบชั้นเดียว (monolayers) และแบบหลายชั้น (multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อนและไม่พันธะเคมีเกิดขึ้น ดึงดูดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) มักจะเกิดในสภาวะอุณหภูมิต่ำๆ และมีพลังงานการดูดซับต่ำ นอกจากนี้การย้อนกลับของการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ การดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพใดชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดร่วมกัน แรงทางกายภาพของดูดซับประเภทนี้ได้แก่

(1) แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วของตัวดูดซับ เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกดูดความชื้น ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วลบบนผิวผลึกดูดความชื้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วลบของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วบวกบนผิวผลึกดูดความชื้น เป็นต้น

(2) แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ เช่นการดูดซับไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และไอออนแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ในน้ำกระด้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนบนผิวตัวดูดซับชนิดพอลิเมอร์ เป็นต้น

(3) แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวตัวดูดซับ เช่นการดูดซับกลิ่นซึ่งมักเป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ด้วยถ่านดูดซับหรือการดูดซับไฮดรคาร์บอนด้วยถ่านดูดซับ เป็นต้น

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิปกติ หรือ ณ อุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ

เช่น การดูดซับกลิ่นอับต่างๆ ในตู้เย็น และในห้องโดยสารปรับอากาศ เป็นต้น สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรงและเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้วโดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน

2.2.1.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่ไม่ทำให้การเรียงตัวของโครงสร้างของตัวดูดซับเปลี่ยนไป โดยการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่แข็งแรง เกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ และเป็นแบบเฉพาะเจาะจง คือ ขึ้นกับชนิดของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ หลังการดูดซับชั้นของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับบนผิวหน้ามีเพียงชั้นเดียว (monolayer) ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้การดูดซับประเภทนี้ต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ซึ่งการดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูงๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น การดูดซับทางเคมีจะไม่เกิดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับทางกายภาพ ความร้อนของการดูดซับประเภทนี้จึงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพ

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี สามารถสรุปบางประการ ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี (Ma และHanna, 1999)

| ปัจจัย | การดูดซับทางกายภาพ | การดูดซับทางเคมี |
|--|-------------------------------|-------------------|
| ค่าความร้อนของการดูดซับ | ประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า | 100 – 500 kJ/mol |
| อุณหภูมิ | ต่ำ | สูง |
| ลักษณะปฏิกิริยา | ส่วนใหญ่สามารถผันกลับได้ | ไม่เกิดการผันกลับ |
| ลักษณะการดูดซับ | หลายชั้น | ชั้นเดียว |
| แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ | แรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ | แรงดึงดูดอย่างแรง |

2.2.2 กลไกการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายังของแข็งหรือของเหลว การเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน (อุไรวรรณ มณีโชติ, 2547) ดังนี้

ขั้นที่ 1 การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ขั้นที่ 2 การแพร่ภายใน (intraparticle diffusion หรือ pore diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะพุ่งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ขั้นที่ 3 การดูดซับ (adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในขั้นที่ 3 อาจเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางกายภาพหรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ สามารถแบ่งได้ 2 ประการ คือ ลักษณะของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ

2.2.3.1. ลักษณะของตัวดูดซับ เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ลักษณะของตัวดูดซับ ได้แก่

(1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนมีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น

(2) ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ การลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับเช่นกัน คือ ถ้าขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับจะต่ำลงด้วย

(3) เคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับ มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับจะลดลงด้วย แต่หากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิล ความสามารถดูดซับจะเพิ่มขึ้น

2.2.3.2. ลักษณะตัวถูกดูดซับ มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังนี้

(1) ความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับ ถ้ามีค่าสูงเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายของการดูดซับลดลง เพราะก่อนเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน

(2) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ตัวถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนอะตอมคาร์บอนมากขึ้น การดูดซับจะเกิดมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง เช่น การดูดซับ PCP และ TCP ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว พบว่า ความสามารถในการดูดซับ PCP สูงกว่า TCP เนื่องจาก PCP มีน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลสูงกว่า TCP จึงทำให้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว มีความสามารถดูดซับ PCP มากกว่า TCP (Radhika และ Palanivelu, 2006)

(3) ความมีขั้ว (polarity) ของตัวถูกดูดซับ นอกจากลักษณะของตัวถูกดูดซับแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับด้วย โดยความสามารถในการดูดซับจะลดลง เมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะความมีขั้วที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการละลายมากขึ้น

(4) ผลของ $[H^+]$ หรือ pH ถ้า $[H^+]$ ลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะเมื่อ $[H^+]$ เพิ่มขึ้น ทำให้สามารถเกาะติดผิวคาร์บอนได้ดี การทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ค่อนข้างจะมีประจุเล็กน้อย จึงทำให้สารที่ไม่มีขั้ว (non polarity) ในน้ำเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดี ซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถดูดซับ

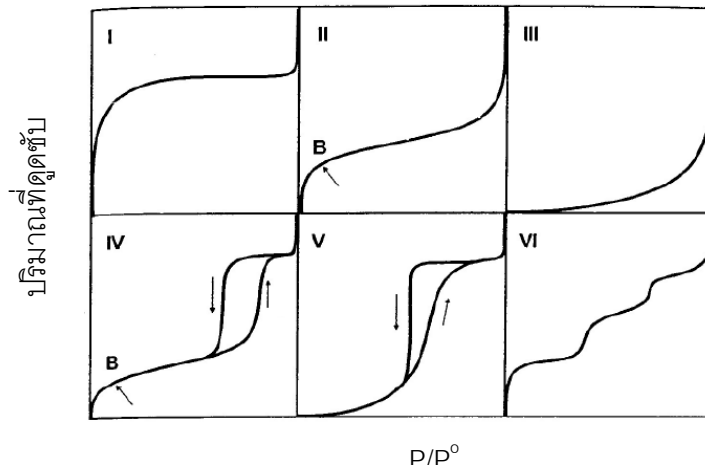
(5) ผลของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นแต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

(6) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับชั้น film diffusion และ pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำชั้นฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับมีความหนามาก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้ชั้น film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ชั้น pore diffusion บางลงเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราเร็วการดูดซับเร็วขึ้น (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

2.2.4 สมดุลของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยตัวถูกดูดซับถูกดูดซับ และมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน การเกิดสมดุลเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน จุดนี้ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสภาวะต่างๆ เช่น ในน้ำเท่ากับความเข้มข้นในตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งใช้ไอโซเทอรั่มของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

ไอโซเทอรั่มของการดูดซับ คือ การดูดซับเป็นการคายความร้อน การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับและความเข้มข้นของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วนำไปเขียนกราฟลอการิทึม โดยให้ความเข้มข้นที่เป็นแกนนอน และปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อน้ำหนักสารดูดซับเป็นแกนตั้ง เส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า Adsorption isotherm ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถดูดซับของสิ่งสกปรกในสารละลาย เพื่อเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับที่ดีที่สุด ซึ่งรูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอรั่มของการดูดซับในสารละลายมี 6 แบบ โดยไอโซเทอรั่มแบบที่ 6 เพิ่งถูกค้นพบใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยตอนแรกการแบ่งกลุ่มได้ถูกเรียกว่า Brunaur, Deming, and Teller (BDDT) แต่ในปัจจุบันการแบ่งกลุ่มได้ถูกเรียกว่า Brunauer, Emmett and Teller (BET) classification ไอโซเทอรั่มแบบที่ 1 เป็นไอโซเทอรั่มที่การดูดซับเกิดขึ้นแบบขั้นเดียว (ไอโซเทอรั่มแบบแลงเมียร์) ส่วนแบบอื่นๆ เป็นไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบหลายขั้น ในทุกกรณีเมื่อค่าความดันย่อยมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจนการดูดซับเป็นแบบขั้นเดียว หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบหลายขั้น



ภาพที่ 2.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (จตุพร และนุรักษ์, 2547)

- ไอโซเทอร์มแบบที่ 1

ไอโซเทอร์มแบบที่ 1 เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับชั้นเดียว หรือที่เรียกว่าแบบแลงเมียร์ เป็นการดูดซับของตัวดูดซับที่มีลักษณะรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือ ซีโอไลต์ สามารถเป็นได้ทั้งการดูดซับทางกายภาพและเคมี ที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ ($<0.1 p/p^0$) จะสามารถดูดซับได้มาก และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะสามารถดูดซับได้เพียงเล็กน้อย

- ไอโซเทอร์มแบบที่ 2

ไอโซเทอร์มแบบที่ 2 บางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอร์มที่มีรูปแบบซิกมอยด์ หรือแบบเอส (sigmoid or S - shaped) เป็นรูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) จากไอโซเทอร์มตรงบริเวณจุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point or knee of isotherm (B)) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เสร็จสมบูรณ์ จากนั้นความดันสูงที่ขึ้นทำให้เกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ

- ไอโซเทอร์มแบบที่ 3

ไอโซเทอร์มแบบที่ 3 เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้ทำให้เกิดการดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ เช่น การดูดซับของไอน้ำบนผิวถ่านที่ไม่มีรูพรุน

- ไอโซเทอร์มแบบที่ 4

ไอโซเทอร์มแบบที่ 4 พบในสารที่มีรูพรุนขนาดกลาง ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าสารเริ่มเข้าไปในรูพรุน และการเปลี่ยนระดับของกราฟ เมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (capillary condensation in pores) โดยลักษณะกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับแบบที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B แสดงถึงการดูดซับขั้นแรกอย่างสมบูรณ์ เช่น การดูดซับเบนซีน (benzene) บนไอรอนออกไซด์ (iron (III) oxide gel) ที่อุณหภูมิ 320K

- ไอโซเทอร์มแบบที่ 5

ไอโซเทอร์มแบบที่ 5 จะพบในสารที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับผิวของของแข็งน้อย มีลักษณะคล้ายไอโซเทอร์มแบบที่ 3 แต่ไอโซเทอร์มแบบที่ 5 สามารถเกิดการควบแน่นในรูพรุนได้สำหรับรูพรุนที่มีขนาดในช่วงเดียวกับชนิดที่ 4 ตัวอย่าง เช่น การดูดซับไอน้ำ (water vapor) บนถ่านหิน ที่อุณหภูมิ 373K สำหรับไอโซเทอร์มแบบที่ 3 และ 5 นี้คำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากขั้นการดูดซับขั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ขั้นแรกเสร็จสมบูรณ์

- ไอโซเทอร์มแบบที่ 6

ไอโซเทอร์มแบบที่ 6 เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (stepped isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่พบบ่อย โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่คล้ายกัน

ไอโซเทอร์มของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีอธิบายสมดุลการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ทฤษฎีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ทฤษฎีแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดิช (Freundlich)

(1). Langmuir Adsorption Isotherm

สมการของแลงเมียร์ขึ้นกับความสมดุลระหว่างการกลั่นตัว และการระเหยของโมเลกุลที่ถูกซับ เป็นไอโซเทอร์มที่ง่ายที่สุดซึ่งใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบขั้นเดียว และเป็น การดูดซับทางเคมี ซึ่งการเกิดการดูดซับมาจากสมมุติฐาน ดังต่อไปนี้

- โมเลกุลจะถูกดูดซับบนพื้นที่จำกัดของผิวตัวดูดซับ
- แต่ละพื้นที่ของตัวดูดซับเหมาะกับโมเลกุลที่เป็นแบบชั้นเดียว (monolayer)
- พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะถูกดูดซับ
- พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกับทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

- โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

จากสมมุติฐานต่างๆ สามารถเขียนเป็นสมการแลงเมียร์ ได้ดังนี้

$$Q = \frac{Q_m b C_{eq}}{(1 + b C_{eq})} \quad (2.6)$$

$$\frac{C_{eq}}{Q} = \frac{1}{Q_m b} + \frac{C_{eq}}{Q_m} \quad (2.7)$$

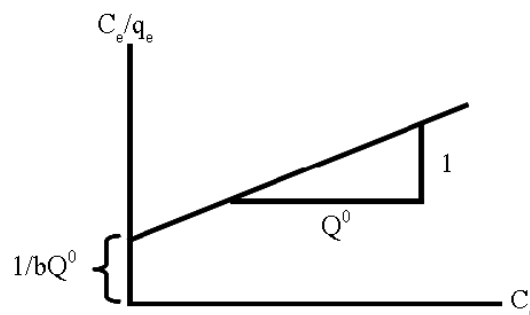
เมื่อ C_{eq} = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/l)

Q = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

Q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ

b = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว

นำสมการที่ (2.7) ไปเขียนกราฟ ซึ่ง b และ Q_m สามารถหาได้จาก slope และ intercept ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Ruiying and Jianlong, 2007)

(2). Freundlich Adsorption isotherm

สมการของฟรอนด์ลิชใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ มักอธิบายการดูดซับของสารประเภทอินทรีย์และสารอนินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เช่น ถ่านกัมมันต์ และเรซินสังเคราะห์ ไอโซเทอร์มฟรอนด์ลิช เป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนาจากไอโซเทอร์มแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าวิวิธพันธุ์ (heterogeneous) ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer)

สมการที่ได้จากการสังเคราะห์และทดลองโดยอาศัยสมมุติฐานของทฤษฎีนี้เป็นแนวความคิดของแบบจำลองแบบ multilayer แสดงดังสมการ (2.8) และ (2.9)

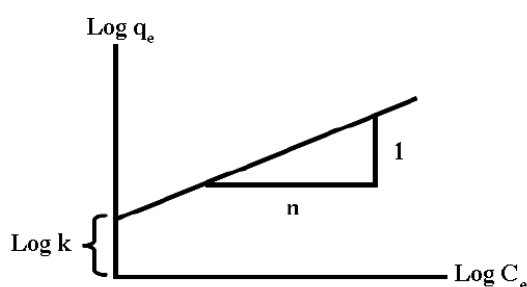
$$Q = K_F C^{1/n} \quad (2.8)$$

$$\log Q = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_{eq} \quad (2.9)$$

เมื่อ K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับหลายชั้น (mg/g)

N = ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

จากสมการ (2.9) นำไปเขียนกราฟ ซึ่ง กราฟ ซึ่ง n และ K_F สามารถหาได้จาก slope และ intercept ได้ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดิช (Ruiying และ Jianlong, 2007)

2.2.5 ตัวดูดซับ (adsorbent)

ตัวดูดซับ คือ สารที่มีความสามารถในการดึงโมเลกุลต่างๆหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

2.2.5.1 สารอนินทรีย์ (inorganic matter) เช่น ดินเหนียวต่างๆ (เบนโทไนต์ และ diatomite) ถ่านกระดูก (bone char) และ activated clay เป็นต้น สารจากธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 – 200 m²/g แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก ข้อเสีย สามารถจับโมเลกุลได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับสารอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

2.2.5.2 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ตัวดูดซับชนิดนี้จัดเป็น สารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์ชนิดอื่นๆเนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 -1000 m²/g

2.2.5.3 สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ชนิดพิเศษสังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ

300– 500 m²/g (มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าถ่านกัมมันต์) แต่เรซินสามารถคืนสภาพ (regenerate) ง่ายกว่า

2.3 แกลบ

แกลบเป็นของเสียทางการเกษตรจากโรงงานสีข้าวเปลือกที่มีปริมาณมาก (ประมาณร้อยละ 20- 24 ของข้าวเปลือก) ทำให้มีความพยายามนำแกลบไปใช้ประโยชน์ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนหม้อต้มไอน้ำในโรงงานต่างๆ เช่น โรงงานสกัดน้ำมันและผลิตไฟฟ้า เป็นวัสดุปรับปรุงดินเพื่อทำให้ดินร่วนซุย และเป็นวัสดุเพาะปลูกต้นไม้ แต่มีแกลบจำนวนมากที่ถูกกำจัด โดยการเผาและฝังกลบ ซึ่งทำให้เกิดปัญหามลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อม ทั้งทางน้ำและอากาศ

แกลบมีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ 68) ลิกนิน (ร้อยละ 19.2– 24.5) และเถ้า (ร้อยละ 13.2– 24.5) ซึ่งแกลบมีองค์ประกอบทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.4 แกลบเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ (ต่ำกว่า 150 kg/m³) และมีน้ำและความชื้นต่ำ (ร้อยละ 7.6– 10.2) เมื่อแกลบไปเผาโดยมีการควบคุมอุณหภูมิการเผา จะได้แกลบเผาที่มีโครงสร้างเป็นรพูน และมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูง ซึ่งจากคุณสมบัตินี้สามารถไปเป็นวัสดุในการผลิตถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของแกลบ (IPSIT, 2011)

| ธาตุ | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|------------|------------------|
| คาร์บอน | 41.44 |
| ไฮโดรเจน | 4.94 |
| ออกซิเจน | 37.32 |
| ไนโตรเจน | 0.57 |
| ซิลิกอน | 14.66 |
| โพแทสเซียม | 0.59 |
| โซเดียม | 0.035 |
| ซัลเฟอร์ | 0.3 |
| ฟอสฟอรัส | 0.07 |
| แคลเซียม | 0.06 |
| เหล็ก | 0.006 |
| แมกนีเซียม | 0.003 |

เมื่อเผาแกลบทำให้ได้เถ้าแกลบประมาณร้อยละ 15 ของแกลบโดยน้ำหนัก โดยเถ้าแกลบที่เกิดจากกระบวนการดังกล่าวมีองค์ประกอบแสดงดังตารางที่ 2.5 ซึ่งมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูงถึงประมาณร้อยละ 80- 90 ซึ่งจากคุณสมบัตินี้สามารถนำเถ้าแกลบเป็นวัตถุดิบในการผลิตซิลิกา

ตารางที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ (IPSIT, 2011)

| ธาตุ | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|----------------------------|------------------|
| ซิลิกา (SiO ₂) | 80 - 90 |
| อลูมินา | 1 - 2.5 |
| เฟอริกไดออกไซด์ | 0.5 |
| แคลเซียมออกไซด์ | 1 - 2 |
| แมกนีเซียมออกไซด์ | 0.5 - 2.0 |
| โซเดียมออกไซด์ | 0.2 - 0.5 |
| Potash | 0.2 |
| สูญเสียไปกับการเผาไหม้ | 10 -20 |

2.4 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัสดุธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีจนได้ผลิตภัณฑ์สีดำที่มีพื้นที่ผิวภายในและมีความพรุนสูง ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับสารเคมีจากแก๊สและของเหลวได้ในปริมาณสูง ซึ่งถ่านกัมมันต์นั้นสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น ในกระบวนการทำสารเคมีให้บริสุทธิ์ หรือในกระบวนการนำสารเคมีกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์ยังสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย จากคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีราคาไม่แพง ทำให้ถ่านกัมมันต์ถูกใช้เป็นตัวดูดซับกันมาก

2.4.1. กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนดังนี้

2.4.1.1 การเตรียมวัตถุดิบ เป็นขั้นตอนสำคัญ เพื่อกำหนดลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้ มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

(1) ความชื้นของวัตถุดิบ ควรควบคุมให้มีค่าต่ำที่สุด เพื่อลดเวลา และมลภาวะในรูปของควัน และสามารถลดพลังงานในกระบวนการ การลดความชื้นกระทำโดยการอบด้วยเตาอบโดยตรง หรือการตากแดด เป็นวิธีที่นิยม เพราะสะดวกและราคาถูก แต่ในโรงงานผลิตมักใช้ทั้งสองแบบขึ้นกับลักษณะภูมิอากาศ

(2) การลดขนาดวัตถุดิบบางประเภทมีความจำเป็น เพื่อให้ความร้อนกระจายตัวเข้าไปในวัตถุดิบอย่างทั่วถึง เช่น การลดขนาดของถ่านหิน ซึ่งส่วนใหญ่มีขนาดใหญ่ หรือ กะลามะพร้าวที่ลักษณะขนาดไม่สม่ำเสมอ การลดขนาดทำโดยนำวัตถุดิบผ่านเครื่องลดขนาด

(3) การเก็บวัตถุดิบ เมื่อวัตถุดิบที่พร้อมจะเข้ากระบวนการผลิตจะถูกนำไปเก็บในที่มิดชิดป้องกันความชื้นเพิ่มขึ้นอีกจากฝนหรือที่ที่มีอากาศถ่ายเทได้ เพื่อป้องกันการติดไฟด้วยตัวเองในกรณีเก็บไว้นานในภาวะอากาศร้อน

2.4.1.2 กระบวนการคาร์บอนไนซ์ เป็นกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเกิดขึ้นในที่อัดอากาศ เพื่อเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนของสารอินทรีย์ ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สออกมากด้วย โดยโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือนกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่ขนาดเล็กกว่าจะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย และแก๊สต่างๆ โดยใช้ความร้อนไล่ความชื้น และสารระเหยได้ต่างๆ ออกจากวัตถุดิบ ทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ (char) ส่วนที่หลุดออกมา คือ แก๊สและน้ำมันชาร์ กระบวนการคาร์บอนไนซ์เป็นการเพิ่มร้อยละของคาร์บอนให้สูงขึ้น

จุดมุ่งหมายหลักของกระบวนการการคาร์บอนไนซ์ คือทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนและการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมให้เป็นระเบียบมากกว่าวัตถุดิบจากการเปรียบเทียบการคาร์บอนไนซ์วัตถุดิบต่างชนิดกันได้ผลที่แตกต่างกัน และกระบวนการการคาร์บอนไนซ์เหมาะกับวัตถุดิบเนื้อแข็ง

2.4.1.2 การกระตุ้นเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพสำหรับคาร์บอน ด้วยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้นโดยการทำให้มีรูพรุนมากขึ้น หรือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารอื่นๆของถ่านกัมมันต์ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการกระตุ้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องจากจากวิธีการกระตุ้นนั้นมีมากมายหลายวิธี และประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นอยู่กับลักษณะและชนิดของวัตถุดิบรวมถึงวิธีการอื่น ๆ ก่อนการกระตุ้นด้วย โดยทั่วไปแล้วการกระตุ้นมี 2 วิธี คือ

(1) การกระตุ้นทางเคมี เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ $ZnCl_2$, KOH และ H_3PO_4 เป็นต้น ข้อดีของวิธีการนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (400- 600 °C) แต่มีข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถทนการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน

ในกระบวนการการกระตุ้นทางเคมีประกอบด้วย 2 ขั้นตอนพร้อมกัน คือ ขั้นตอนการผสมวัสดุกับสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้น และขั้นตอนการถูกออกซิไดซ์เพื่อลดความชื้นและก่อให้เกิดรูพรุนที่อุณหภูมิสูง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะรวมขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์และการกระตุ้นเป็นขั้นตอนเดียวกันโดยเริ่มต้นจากวัสดุที่ไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ กระบวนการนี้มีข้อดีคือ สามารถกระทำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติ และให้เกิดรูพรุนที่ดีกว่า ถึงแม้ว่าสารเคมีมีผลต่อสิ่งแวดล้อม แต่การเติมสารเคมีที่เป็นตัวกระตุ้นประเภท $ZnCl_2$ และ H_3PO_4 สามารถนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดผลกระทบ สารเคมีที่นิยมใช้ในการกระตุ้น $ZnCl_2$ และ H_3PO_4 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- การกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง โดยละลาย $ZnCl_2$ ผสมกับวัสดุดิบ หลังจากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 600– 850 °C ซึ่งกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรมจะคำนึงถึงประสิทธิภาพในการนำเอา $ZnCl_2$ กลับมาใช้ใหม่เป็นอย่างมาก ด้วยประสิทธิภาพการนำ $ZnCl_2$ กลับมาใช้ใหม่ที่ค่อนข้างจำกัด ประกอบกับปัญหาการกัดกร่อนต่อเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้การใช้ $ZnCl_2$ เป็นสารกระตุ้นในระยะหลังจึงลดลงบ้าง

- การกระตุ้นด้วย H_3PO_4 ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่ค่อนข้างต่ำคือ 400-500 °C ซึ่งการใช้ H_3PO_4 นั้นสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยความเข้มข้นของ H_3PO_4 ยังสูง พบว่าวัสดุดิบที่เป็นไม้สามารถผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพโดยวิธีนี้

ปัจจัยที่มีผลการเพิ่มขึ้นของความพรุนของถ่านกัมมันต์ คือ

- อัตราส่วนของลิกนินต่อเซลลูโลสในวัสดุดิบ
- อัตราส่วนของสารกระตุ้นต่อวัสดุดิบ
- อุณหภูมิใช้ในการกระตุ้น
- อัตราการให้ความร้อน

การใช้วัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการกระตุ้นทางเคมีเป็นไม้ ให้คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่มีปริมาตรรูพรุนสูง และความหนาแน่นปรากฏต่ำ (ประมาณ $0.27 \text{ g/dm}^3\text{-m}$) และส่วนใหญ่อยู่ในรูปชนิดผง ซึ่งสามารถนำมาใช้งานในการดูดซับสถานะที่เป็นของเหลว เช่น ระบบการบำบัดน้ำให้บริสุทธิ์ คุณสมบัติที่ดีของวัตถุดิบที่เป็นไม้และสารชีวมวลคือ มีปริมาณเถ้าต่ำ (ร้อยละ 0.3 - 1.1 โดยน้ำหนัก) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าในถ่านหินและลิกไนต์จะมีปริมาณสูงกว่า (ร้อยละ 2 - 15 โดยน้ำหนัก) และมีปริมาณกำมะถันต่ำด้วย

(2) การกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) เป็นวิธีการเพิ่มปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวโดยอาศัยปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน (gasification) ด้วยแก๊สออกซิไดซ์ที่ช่วงอุณหภูมิ $700\text{-}1000^\circ\text{C}$ โดยแก๊สที่ใช้ทั่วไป คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และอากาศ อาจใช้ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือรวมแก๊สดังกล่าวก็ได้

โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ (เป็นตัวดูดซับที่ไม่ดี) มาทำการกระตุ้นเพื่อให้ถ่านที่มีการดูดซับสูงขึ้น โดยใช้การกระตุ้นให้ทำปฏิกิริยากับแก๊สตัวออกซิไดซ์

พื้นที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ โดยมีการจัดเรียงตัวใหม่ในโครงสร้าง ซึ่งเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่าน ปฏิกิริยากระตุ้นที่ใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้ความร้อนสูงมากถึง 1200°C พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไอน้ำร่วมกับความร้อน ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสีย คือใช้อุณหภูมิสูงกว่าวิธีการกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นทางกายภาพมี 2 ขั้นตอน ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนคาร์บอนไนซ์ และการกระตุ้นถ่านชาร์ที่อุณหภูมิสูงภายใต้แก๊สออกซิไดซ์ที่เหมาะสม เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ หรือ ของผสมของแก๊สทั้งสามชนิด การกระตุ้นทางกายภาพปกติใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะสะดวก และง่ายในการใช้และควบคุมขณะที่เกิดการกระตุ้น เนื่องจากอัตราการกระตุ้นเกิดอย่างช้าๆ การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้วิธีกระตุ้นทางกายภาพบางครั้งให้คุณภาพที่ไม่น่าพอใจ เพื่อนำไปใช้เป็นตัวดูดซับหรือเป็นตัวกรอง

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะรูพรุนในขั้นตอนการกระตุ้น คือ

- โครงสร้างของคาร์บอนหรือถ่านชาร์ที่นำมากระตุ้น
- สารอินทรีย์ปนเปื้อนที่อยู่ในเนื้อคาร์บอน
- ชนิดของแก๊สออกซิไดซ์
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ความดันของแก๊ส
- เวลาในการเกิดปฏิกิริยา
- ขนาดอนุภาคของถ่านชาร์

ในกระบวนการกระตุ้น คาร์บอนในวัสดุดิบทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิไดซ์เป็นแก๊สคาร์บอนออกไซด์แพร่ออกจากผิวของคาร์บอน เกิดแก๊สซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่าน เป็นรูพรุนขึ้นในโครงสร้างของถ่าน ถ่านจากขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ประกอบด้วยรูพรุนเล็กๆจำนวนมากเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอม รูพรุนนี้มักถูกบรรจุไว้ด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขวางด้วยคาร์บอนสัญญาณ การกระตุ้นจึงจัดเป็นทั้งการเปิดที่รูที่ถูกปิด และการสร้างรูใหม่ขึ้นด้วย

2.4.2 สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

2.4.2.1 พื้นที่ผิว (surface area) ในการวัดพื้นที่ผิวจะต้องใช้ไอโซเทอรั่มของการดูดซับ ซึ่งไอโซเทอรั่มนี้จะมีรูปแบบตามธรรมชาติของตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง ซึ่งจะทำให้การทดลองที่อุณหภูมิคงที่ ที่ความดันย่อยต่างๆ เพื่อสร้างไอโซเทอรั่มของการดูดซับ จากไอโซเทอรั่มของการดูดซับข้อมูลที่ได้คือ

- ค่าของพื้นที่ผิว
- ค่าของปริมาตรรูพรุน
- ทราบลักษณะเคมีพื้นที่ผิว (surface chemistry) ของตัวดูดซับ
- ทราบข้อมูลพื้นฐานของการดูดซับ
- ทราบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในระบบการแยกหรือการทำให้บริสุทธิ์

2.4.2.2 ความหนาแน่น (apparent density) ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูงกว่าสามารถบอกได้ว่าเป็นถ่านที่มีคุณภาพดีกว่า เนื่องจากสามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมากกว่า

2.4.2.3 ค่าความแข็งหรือค่าการขัดถู (hardness/ abrasion number) บอกถึงความต้านทานการสึกกร่อนของถ่านกัมมันต์ ค่านี้จะบอกถึงความสามารถในการทนต่อแรงเสียดสี และความสามารถในการคงสภาพของถ่านกัมมันต์ที่มีต่อกระบวนการการล้างวัสดุกรอง ซึ่งค่านี้จะแตกต่างกันอย่างชัดเจนตามชนิดวัสดุดิบและระดับที่ถ่านถูกกระตุ้น

2.4.2.4 ค่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคถ่าน (particle size distribution) เกี่ยวข้องกับความละเอียดของผงถ่าน ยิ่งถ่านมีขนาดอนุภาคละเอียดมากเท่าใดก็ยิ่งเพิ่มพื้นที่ของถ่านให้มากขึ้น ซึ่งมีผลให้โมเลกุลแก๊สถูกดูดซับเข้าไปในโครงสร้างถ่านได้เร็วขึ้น และทำให้ความดันแก๊สของระบบไม่ลดลงมากด้วย

2.4.3. สมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์

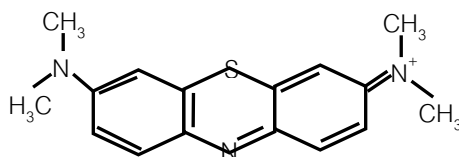
สมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์หาได้จากไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์ เมื่อนำไปดูดซับของเหลว เช่น

2.4.3.1. การดูดซับไอโอดีนนมเบอร์

การศึกษาการดูดซับไอโอดีนเป็นวิธีที่ง่ายในการหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ และเป็นค่าบอกรูพรุนขนาดเล็ก โดยเป็นการบอกจำนวนมิลลิกรัมของสารละลายไอโอดีนที่ถูกดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ 1 กรัมที่จุดซึ่งความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่เหลือเท่ากับ 0.02 N ซึ่งอาจมีค่าแตกต่างจาก 0.02 N ได้โดยให้อยู่ในช่วง 0.007–0.03 N ในบางครั้งถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว รูพรุนขนาดเล็กสูงค่าไอโอดีนอาจต่ำ เนื่องจากโมเลกุลของไอโอดีนไม่สามารถเข้าไปสู่อุพรุนที่ขนาดเล็กกว่า 1 nm ได้

2.4.3.2. การดูดซับเมทิลีนบลู (Methylene Blue)

ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูสามารถบอกค่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ได้สำหรับโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลของเมทิลีนบลู ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดกลางคือมีขนาดใหญ่กว่า 1.5 nm โดยโครงสร้างของโมเลกุลเมทิลีนบลูแสดงดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของเมทิลีนบลู (Kind, 2009)

2.4.3.3. โมลาสนัมเบอร์ (molass number)

เป็นค่าที่บอกปริมาณของรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) รูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 20 \AA (หรือมากกว่า 2 nm) ที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์ โดยถ่านกัมมันต์ที่รูขนาดใหญ่จำนวนมาก (ค่าโมลาสเบอร์สูง) จะดูดซับสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่อย่างโมเลกุลสีได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่รูพรุนเล็ก (ค่าโมลาสนัมเบอร์ต่ำ)

2.4.3.4. แทนนิน (tannin)

แทนนินเป็นสารผสมประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดใหญ่และสารโมเลกุลขนาดกลาง เช่นเดียวกับผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีทั้งรูพรุนขนาดใหญ่และกลาง ดังนั้นค่าแทนนินจึงใช้บอกความสามารถในการดูดซับสารแทนนินหรือสารโมเลกุลขนาดใหญ่และกลางของถ่าน และระบุในหน่วย ppm (part per million เท่ากับล้านในล้านส่วน) ซึ่งถ่านกัมมันต์ควรมีค่านี้อยู่ในช่วง 200–362 ppm

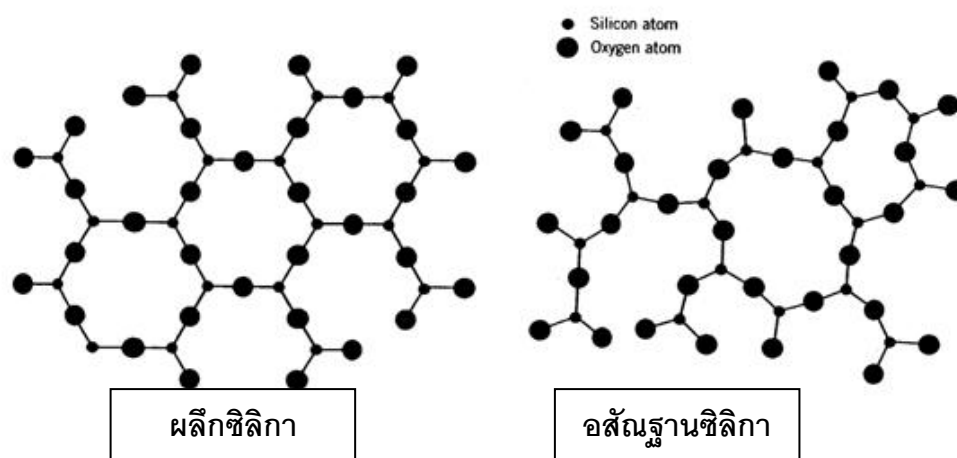
2.5 ซิลิกา

ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นองค์ประกอบหลักของเปลือกโลก (ร้อยละ 6) ทำให้ทรายเป็นวัสดุหลักในการผลิตซิลิกาของโลก นอกจากสามารถใช้แลกเปลี่ยนเป็นวัสดุในการผลิตซิลิกา เพราะแลกเปลี่ยนองค์ประกอบของซิลิกาในปริมาณมาก การใช้ประโยชน์ของซิลิกาสามารถใช้โดยตรงและทางอ้อม เช่น สารดูดความชื้น (desiccant) ตัวดูดซับ (adsorbent) องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst component) ในบางกระบวนการ เป็นวัสดุพื้นฐานในอุตสาหกรรมแก้ว เซรามิกส์ อิฐทนไฟ พลาสติก ยาง และ photoelectric และเป็นแหล่งผลิตซิลิเกต ซิลิกอนซิลิกอนคาร์ไบด์ และซิลิโคน (Zhang, 1997)

2.5.1 โครงสร้างของซิลิกา

โครงสร้างพื้นฐานของซิลิกา มีการจัดเรียงตัวแบบทรงเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) ของออกซิเจน 4 อะตอม ล้อมรอบซิลิกอน โดยซิลิกามีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติแบบไม่รู้จักจบ

(infinite three dimensional network) แสดงดังภาพที่ 2.6 ซึ่งเกิดจากอะตอมของซิลิกอนจับอะตอมออกซิเจนกับกลุ่มข้างเคียงด้วยพันธะ (siloxane bonds, Si-O-Si) (Tarateerpap, 2004) ซิลิกาสามารถเกิดปฏิกิริยา polymerization โดยการจับของอนุภาค เชื่อมต่อกันเป็นโซ่และตาข่าย การเกิดปฏิกิริยาสามารถเป็นออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การจับตัวของโมโนเมอร์ในรูปอนุภาค (polymerization of monomers to form particles) การเกิดอนุภาค (growth of particles) และการเชื่อมต่อระหว่างอนุภาค (linking partical) เพื่อให้เกิดโซ่และตาข่าย (โสภณ เรืองสำราญ, 2540)



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างซิลิกาแบบผลึกและอสัณฐาน (Zallen, 2004)

2.5.2 คุณสมบัติของซิลิกา

ซิลิกามีคุณสมบัติเฉพาะหลายประการ สามารถแบ่งออกดังนี้

2.5.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ซิลิกามีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1700°C เนื่องจากโครงสร้างทรงเหลี่ยมสี่หน้าทำให้พันธะโคเวเลนต์ระหว่างซิลิกอนกับออกซิเจนแข็งแรง ซิลิกาเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ไม่ดี จึงสามารถทำหน้าที่เป็นฉนวน สามารถสรุปคุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาบางประการ แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงทางกายภาพของซิลิกาบางประการ (Mukherjee, 2012)

| คุณสมบัติทางกายภาพ | Crystalline Silica | Amorphous Silica |
|--|-----------------------|----------------------|
| จุดหลอมเหลว, (°C) | ประมาณ 1700 | ประมาณ 1700 |
| ความหนาแน่น, (g/cm ³) | 2.6 | 2.6 |
| ดรรชนีหักเห | 1.46 | 1.46 |
| ความต้านทาน (ohm-cm) | $10^{12} - 10^{16}$ | มากกว่า 10^{18} |
| การนำไฟฟ้า (W/mK) | 1.3 | 1.4 |
| อัตราส่วน บัวซอง | 0.17 | 0.0165 |
| สัมประสิทธิ์ การขยายตัว ทางความร้อน (1/K) | 7.64×10^{-7} | 5.4×10^{-7} |

2.5.2.2 คุณสมบัติทางเคมี (chemical properties) ซิลิกาเป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับสารน้อยชนิด และทนต่อสารเคมีหลายชนิด แต่ที่สภาวะที่เหมาะสมซิลิกาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี คือซิลิกาละลายในสารละลายต่างแต่ไม่ละลายในสารละลายกรด ยกเว้น HF (MSDS, 2010) โดยซิลิกาอสัณฐานมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าซิลิกาผลึก ซึ่งคุณสมบัติทางเคมีของซิลิกาแสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของซิลิกา (Mukherjee, 2012)

| สารตั้งต้น | รายละเอียด |
|--|--|
| ด่างแก่ เช่น NaOH และKOH | <p>ซิลิกาผลึก จะละลายอย่างช้าๆในสารละลายด่างร้อน</p> <p>ซิลิกาอสัณฐาน จะปฏิกิริยากับด่างที่อุณหภูมิห้อง</p> <p>ผลิตภัณฑ์หลัก:</p> <p>ซิลิเกตของโพแทสเซียมหรือโซเดียม</p> <p>สมการ:</p> $\text{SiO}_2 + 2\text{KOH} \longrightarrow \text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{SiO}_2 + 2\text{NaOH} \longrightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ |
| กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) | <p>ซิลิกาไม่ทำปฏิกิริยากับกรดชนิดอื่นแต่ละลายใน HF และปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง</p> <p>ผลิตภัณฑ์หลัก:</p> <p>กรดไฮโดรฟลูออริกซิลิ (H₂SiF₆)</p> <p>สมการ:</p> $\text{SiO}_2 + 6\text{HF} \longrightarrow \text{H}_2\text{SiF}_6 + \text{H}_2\text{O}$ |
| โซเดียมคาร์บอเนต (Na ₂ CO ₃) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K ₂ CO ₃) | <p>ซิลิกาทำปฏิกิริยากับ Na₂CO₃ และ K₂CO₃ หลอมเหลว</p> <p>ผลิตภัณฑ์หลัก:</p> <p>ซิลิเกตของโพแทสเซียมหรือโซเดียม</p> <p>สมการ:</p> $\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{CO}_3 \longrightarrow \text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{CO}_2$ $\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{CO}_3 \longrightarrow \text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{CO}_2$ |
| แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO ₃) | <p>ที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 600°C ซิลิกาจะทำปฏิกิริยากับเกลือต่าง เช่น limestoneหรือแคลเซียมคาร์บอเนต</p> <p>ผลิตภัณฑ์หลัก:</p> <p>แคลเซียมซิลิเกต (Ca₃Si₃O₉) หรือ wollastonite</p> <p>สมการ:</p> $3\text{SiO}_2 + 3\text{Ca}_2\text{CO}_3 \longrightarrow \text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9 + 3\text{CO}_2$ |

ตารางที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของซิลิกา (ต่อ)

| สารตั้งต้น | รายละเอียด |
|------------|---|
| คาร์บอน | <p>ซิลิกาทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่อุณหภูมิ 2000°C จะได้สินแร่ซิลิกอน</p> <p>ผลิตภัณฑ์หลัก:</p> <p>ซิลิกอน (Si)</p> <p>สมการ:</p> $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \longrightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$ |
| น้ำ | <p>ภายใต้อุณหภูมิสูงและความดัน ซิลิกาถูกไฮโดรไลซ์ด้วยน้ำ จะได้ไฮดรอกไซด์ของซิลิกอนซึ่งไม่เสถียร</p> <p>ผลิตภัณฑ์หลัก:</p> <p>ซิลิกอนไฮดรอกไซด์ (Si(OH)₄)</p> <p>สมการ:</p> $\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Si(OH)}_4$ |

2.5.3 รูปแบบของซิลิกา

ลักษณะของซิลิกาสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ผลึก และอสัณฐาน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.3.1 ซิลิกาผลึก (crystalline silica) ซิลิกาผลึกมีหลายรูปแบบ โดยส่วนใหญ่ที่ความดันบรรยากาศสามารถแบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ ควอตซ์ เสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 870°C tridymite เสถียรที่อุณหภูมิ 867- 1470°C และ cristobalite เสถียรที่อุณหภูมิ 1470°C ถึงจุดหลอมเหลว 1723°C ทั้ง 3 รูปมีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกัน (SiO₄) แต่แต่ละรูปแบบก็มีความแตกต่างของรายละเอียด

2.5.3.2 ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ซิลิกาอสัณฐานประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กที่เกิดจากการรวมตัวกัน ซึ่งมีหลายรูปแบบโดยส่วนจะพบ คอลลอยด์ซิลิกา ซิลิกาเจล และซิลิกาฟุ้ง (fumed silica) พื้นผิวของซิลิกาอสัณฐานอาจปราศน้ำหรือมีกลุ่มซิลานอล (Si-OH) ทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยา polymerization กับกรดซิลิซิก และมีพื้นที่ผิวสูงกว่า 3 m²/g

2.5.4 กระบวนการผลิตซิลิกา

ทรายเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตซิลิกาของโลก ในขณะที่เดียววัสดุทางการเกษตรมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เช่น แกลบ และชานอ้อย เป็นต้น ซึ่งในการศึกษานี้จะกล่าวเฉพาะในส่วนของผลิตซิลิกาจากแกลบ สามารถแบ่งออกเป็น 5 วิธี ดังนี้

2.5.4.1 การเผาโดยตรง (direct combustion) ซิลิกาสามารถเตรียมจากการเผาโดยตรงและไม่ต้องผ่านการเตรียมตัวอย่างด้วยสารเคมี (Luan, 1990) องค์ประกอบของซิลิกาในเถ้าและพื้นที่ผิวของซิลิกาจะขึ้นกับอุณหภูมิการเผาและวิธีการเผา อุณหภูมิที่นิยมใช้ คือ 400 -1500°C เมื่อเผาแกลบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800°C ได้ซิลิกาในรูปแบบซิลิกาอสัณฐาน มีขนาดประมาณ 20 μm และเมื่อเผาแกลบที่อุณหภูมิสูงกว่า 900°C ได้ซิลิการูปแบบ cristobalite และมี tridymite เล็กน้อย มีขนาดประมาณ 40– 60 μm (Sun และGong, 2001)

2.5.4.2 การเผาหลังผ่านการเตรียมตัวอย่างด้วยสารเคมี (combustion after pretreatment) สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่าง คือ กรด เช่น HCl H₂SO₄ HNO₃ และHF เป็นต้น แต่นิยมใช้ คือ HCl การเตรียมตัวอย่างด้วยกรดก่อนเผาไม่มีผลต่อโครงสร้างของซิลิกา เมื่อนำมาเผาที่ 500°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จะได้ซิลิกาสีขาวและมีความบริสุทธิ์สูง

ต่างที่นิยมใช้ในการเตรียมตัวอย่าง เช่น NaOH และNH₄OH ผลของการเตรียมตัวอย่างด้วยต่างไม่ชัดเจนเช่นการเตรียมตัวอย่างด้วยกรด (Yalcüin, 2001)

2.6.4.3 วิธีไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal method) แกลบองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์และโลหะ การกำจัดสารเหล่านี้ต้องใช้อุณหภูมิสูง ความดันสูง และตัวออกซิไซค์อย่างแรง ซึ่งในวิธีนี้ ในอุณหภูมิต่ำกว่า และได้ซิลิกาบริสุทธิ์สูง

2.6.4.4 การทำปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต (reaction with sodium carbonate (Na₂CO₃)) นำเถ้าแกลบที่ได้จากการเผาแกลบทำปฏิกิริยากับสารละลาย Na₂CO₃ ที่อัตราส่วนที่เหมาะสม เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้ต่ำเกินไปมีผลต่อความบริสุทธิ์ซิลิกา ขณะเดียวกันอุณหภูมิที่ใช้สูงเกินไปมีผลต่อปริมาณผลผลิตและคุณภาพซิลิกา และความเข้มข้นของสารละลาย Na₂CO₃ มีผลต่อซิลิกาเช่นกัน (Yu และคณะ, 1996) ซิลิกาที่ได้จากวิธีนี้มีคุณสมบัติเหมาะกับการเพิ่มแข็งแรงให้กับยาง

2.6.4.5 การทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (reaction with sodium hydroxide (NaOH)) นำเข้าเกลบที่ได้จากการเผาเกลบทำปฏิกิริยากับ NaOH จะได้โซเดียมซิลิเกต แล้วนำไปทำปฏิกิริยากับ NH_4HCO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ หรือ H_2SO_4 จะได้ซิลิกา (SiO_2) ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 4 -5 ชั่วโมง จะได้ซิลิกาขนาดประมาณ 100 mesh ปัจจัยที่ผลต่อปฏิกิริยา คือ ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH และความเร็วของรอบการกวน (Sun และ Gong, 2001)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

| ปี | ผู้วิจัย | วิธีการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ |
|------|--------------------|---|
| 2552 | นิสากรณ์ แสงประชุม | ใช้ดินเบา และดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ เป็นตัวดูดซับ ในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ พบว่าดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักสามารถทำให้ไบโอดีเซลผ่านเกณฑ์มาตรฐานเทียบเท่าการล้างด้วยน้ำ |
| 2005 | Bertram และคณะ | ใช้แมกนีเซียมซิลิเกต ซิลิกาเจล อะลูมินา และเคลย์ เป็นตัวดูดซับในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ พบว่า 1% แมกนีเซียมซิลิเกต สามารถทำให้ไบโอดีเซลผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM |
| 2008 | Berrios และ Sketon | ใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเรซิน และแมกนีเซียมซิลิเกตเป็นตัวดูดซับ เปรียบเทียบการใช้น้ำล้าง พบว่าทั้งสามวิธีสามารถลดปริมาณกลีเซอรอลและสบู่ตามเกณฑ์มาตรฐาน EN 14214 |

ตารางที่ 2.9 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (ต่อ)

| ปี | ผู้วิจัย | วิธีการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ |
|------|----------------|---|
| 2009 | Wang และคณะ | ใช้เมมเบรนเซรามิกเป็นตัวกรองในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ พบว่า เมมเบรนเซรามิกขนาดรูพรุน 1 μm สามารถทำให้ไบโอดีเซลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน |
| 2011 | Manique และคณะ | ใช้เถ้าแกลบเป็นตัวดูดซับในกระบวนการทำไบโอดีเซลจากน้ำมันที่ใช้แล้ว พบว่า เถ้าแกลบร้อยละ 4 โดยน้ำหนักสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้ |
| 2012 | Fadhi และคณะ | ใช้ถ่านกัมมันต์จากกากชา เป็นตัวดูดซับในกระบวนการทำไบโอดีเซล (บรรจุเป็นคอลัมน์) พบว่าสามารถทำให้ไบโอดีเซลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และเปรียบเทียบกับ การล้างด้วยน้ำให้ผลที่ดีกว่า |

2.6.2 การผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ แสดงดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านกัมมันต์จากแกลบ

| ปี | ผู้วิจัย | กระบวนการ | พื้นที่ผิว (m^2/g) |
|------|-----------------|---|--------------------------------------|
| 2552 | จิตตรี พละกุล | สารกระตุ้น: ZnCl_2 , NaOH และ H_3PO_4 | |
| | | อัตราส่วนระหว่าง แกลบ: ZnCl_2 คือ 1:2 | 648 |
| | | แกลบ: NaOH คือ 1:2 | 502 |
| | | แกลบ: H_3PO_4 คือ 1:2 | 233 |
| | | อุณหภูมิและเวลาในการเผากระตุ้น คือ 700°C , 60 นาที | |
| 2008 | Kalderis และคณะ | สารกระตุ้น: ZnCl_2 อัตราส่วนระหว่าง แกลบ: ZnCl_2 คือ 1:1 อุณหภูมิและเวลาในการเผากระตุ้น คือ 700°C , 30 นาที | 811 |

ตารางที่ 2.11 แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตซิลิกาจากแกลบ (ต่อ)

| ปี | ผู้วิจัย | รายละเอียด |
|------|---------------------------------------|---|
| 2551 | นิตยา ทวดอาจ และ อภิรินทร์ นันทิยา | ศึกษาการเตรียมซิลิกานาโนจากแกลบโดยวิธีตกตะกอน พบว่า การเผาแกลบที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำแกลบที่ได้ต้มด้วย 2.5N NaOH เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ซิลิการ้อยละ 90.3 จากนั้นต้มด้วย 6N HCl เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และต้มด้วย 2.5 N NaOH เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ได้ซิลิกานาโนมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ 5-10 nm และพื้นที่ผิว เท่ากับ 656 m ² /g |
| 2000 | Kalapathy และคณะ | ศึกษาวิธีการผลิตซิลิกาบริสุทธิ์จากแกลบ พบว่าการนำแกลบละลายน้ำปรับ pH เป็น 7 ด้วย 1N และ 6N HCl กวนผสม เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ต้มด้วย 1N NaOH เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ซิลิการ้อยละ 91 |
| 2010 | Shelke และคณะ | ศึกษาการเตรียมรูพรุนซิลิกาขนาดกลางจากแกลบ พบว่าการต้มแกลบด้วย NaOH ที่อุณหภูมิ 90 - 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ซิลิการ้อยละ 98 มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย เท่ากับ 19.9 nm และพื้นที่ผิว เท่ากับ 120 m ² /g |

บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- เครื่องวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเฉลี่ยรูพรุน: Model BET-SOTP MIN, BEL, Japan
- เครื่อง Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS): Model JSM-6400, JEOL, Japan
- เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD): Perkin Elmer
- เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), Nicolet
- เครื่อง Gas-liquid Chromatography; Model 3800, Varian
- เครื่อง Rotary Evaporator; Model Buchi
- ตู้อบความร้อน: Model UE/ BE 200-800, Memmert, Germany
- เตาเผา (multiple fumace): Model L9/ 12/ P320, Nabertherm, Germany
- ชุดกรองสูญญากาศ; Model A-350, Eyela, Japan
- เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง: Model BP 1211D, Sartorius, Germany
- เครื่องชั่งแบบละเอียด 2 ตำแหน่ง: Model BJ 10006, Switzerland
- เครื่อง pH meter: Model Seven Easy pH Meter-Toledo, Mettler Toledo
- อุปกรณ์ล้างถ่านกัมมันต์
- โถดูดความชื้น (desiccator)
- พาราฟิล์ม: Whatman
- ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
- อ่างควบคุมอุณหภูมิ: Digital Water bath SB-651, Eyela, Japan
- นาฬิกาจับเวลา
- เทอร์โมมิเตอร์

3.1.2 สารเคมี

- แกลบ
- ถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์

- น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
- แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide)
- ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (2-Propanol)
- กรดอะซิติก (acetic acid)
- อินดิเคเตอร์โบรโมเฟีนอลบลู (bromophenol blue indicator)
- EN 14105 standard and internal standard solution
- เฮปเทน (heptanes)
- เมทานอล (methanol)
- N-methyl-N- (trimethylsilyl)
- Trifluoroacetamide
- อินดิเคเตอร์ฟีนอล์ฟทาเร็น (phenolphthalein indicator)
- อินดิเคเตอร์ฟีนอลเรด (phenol red indicator)
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide)
- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide)
- โซเดียมไทโอซัลเฟต (sodium thiosulfate)
- กรดซัลฟูริก (sulfuric acid)
- โทลูอีน (toluene)
- Wijs solution

3.2 วิธีการทดลอง

ในการศึกษานี้ เพื่อกำจัดกลีเซอรินในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยตัวดูดซับจาก แกลบ โดยมีวิธีการดังนี้

3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับจากแกลบ

นำแกลบมาล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆครั้ง เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนออก ตามด้วยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.1.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

- ขั้นตอนการล้างเบส นำแกลบแห้งต้มกับ 1N NaOH ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำอุ่นหลายๆ ครั้ง จนน้ำล้างมี pH เป็นกลาง และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ

110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

- ขั้นตอนการกระตุ้น นำเกลือที่ผ่านขั้นตอนการล้างด้วยเบส แช่ด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ เกลือ ต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:0.25, 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ โดยเติมน้ำให้ท่วมเกลือ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเกลือที่ผ่านการแช่ด้วย $ZnCl_2$ แห้ง นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะปิด

- ขั้นตอนการล้างด้วยกรด นำถ่านที่ผ่านการเผามาแช่ด้วยร้อยละ 5 HCl ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างด้วยน้ำอุ่นหลายๆ ครั้ง จนน้ำล้างมี pH เป็นกลาง และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.1.2 การเตรียมซิลิกาจากเกลือ

- ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง นำเกลือที่แห้งมาเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะเปิด

- ขั้นตอนการสกัด นำถ่านเกลือ (10 g) ต้มด้วย 2.5N NaOH (80 ml) เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง กรองแยกสารละลาย และล้างตะกอนด้วยน้ำอุ่นประมาณ 20 ml

- ขั้นตอนการตกตะกอน นำสารละลายที่ผ่านการกรองไปปรับ pH ด้วย 5N H_2SO_4 จนสารละลายมี pH 2 และ pH ด้วย NH_4OH จนสารละลายมี pH 8.5 ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3.5 ชั่วโมง กรองแยกตะกอนซิลิกา ล้างตะกอนด้วยน้ำอุ่นจนน้ำที่ล้างตะกอนซิลิกามี pH เป็นกลาง อบตะกอนซิลิกาให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.2.2 การคัดขนาดตัวดูดซับจากเกลือ

นำตัวดูดซับจากเกลือทั้งถ่านกัมมันต์และซิลิกาอบให้ละเอียด ร่อนด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาด 120 – 200 mesh

3.2.3 ตรวจสอบลักษณะของตัวดูดซับจากเกลือ

ลักษณะของตัวดูดซับจากเกลือสามารถตรวจวัดได้โดย

- วิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนนัมเบอร์ และเมทิลีนบลู
- วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเฉลี่ยรูพรุน ด้วยวิธี BET
- วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอก ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)
- วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ ด้วยเครื่อง Fourier-Transform Infrared spectrometer (FT-IR spectrometer)
- วิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างของซิลิกา ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

3.2.4 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

ชั่งน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (50 g) ใส่ขวดก้นกลมที่ต่อกับชุดคอนเดนเซอร์ (condenser) แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 5 นาที เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH จำนวน 5 g) ในเมทานอล (144.82 ml) โดยใช้อัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน เท่ากับ 6: 1 โมล อย่างช้าๆ เพื่อให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำการคนให้เข้ากันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 90 นาที เมื่อครบระยะเวลา นำไบโอดีเซลที่ได้เทใส่กรวยแยก เพื่อทำการแยกชั้นไบโอดีเซลออกจากชั้นกลีเซอริน ซึ่งกลีเซอรินอยู่ชั้นล่าง เป็นเวลา 30 นาที แล้วไขชั้นกลีเซอริน ออก จากนั้นนำไบโอดีเซลเข้ากระบวนการทำให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับในขั้นต่อไป

3.2.5 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

การศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยใช้ตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่าง แกลบ ต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:0.25, 1:1 และ 1:2 และซิลิกาจากแกลบ ขนาดของตัวดูดซับอยู่ระหว่าง 120- 200 mesh ใน การศึกษานี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ภายใต้สภาวะ ที่มีเมทานอล และภายใต้สภาวะที่ไม่มีเมทานอล โดยมีวิธีการดังนี้

3.2.5.1 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ภายใต้สภาวะมีเมทานอล

กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ภายใต้สภาวะที่มีเมทานอล คือ การนำไบโอดีเซล ที่ผ่านการแยกชั้นกลีเซอรินออก ศึกษาสภาวะต่างๆที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วย ตัวตัวดูดซับ ดังนี้

- ศึกษาผลของเวลาการตั้งทิ้งไว้ต่อการตะกอนของกลีเซอรินในไบโอดีเซล นำ ไบโอดีเซลที่ผ่านการแยกชั้นกลีเซอริน (crude biodiesel) ตั้งทิ้งไว้ โดยเก็บตัวอย่างที่เวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 24 ชั่วโมง

- ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซล นำไบโอดีเซลที่ผ่านการแยกชั้นกลีเซอริน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50 และ 60 °C

- ศึกษาผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดซับกลีเซอริน ทำการดูดซับไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับจากแกลบ (50 กรัม) ใช้รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที และอุณหภูมิเท่ากับ 50 °C เป็นเวลา 5, 10 และ 15 นาที โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที และดูดไบโอดีเซลชั้นบน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไบโอดีเซลด้วยวิธีการไทเทรต

- ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับกลีเซอริน ทำการดูดซับไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับจากแกลบ ใช้รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที และอุณหภูมิเท่ากับ 50 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1, 3, 5, 8 และ 10 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที และดูดไบโอดีเซลชั้นบน เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไบโอดีเซลด้วยวิธีการไทเทรต

3.2.5.2 ศึกษาการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซลภายใต้สภาวะไม่มีเมทานอล

กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ภายในสภาวะไม่มีเมทานอล คือ การนำไบโอดีเซลที่ผ่านการแยกชั้นกลีเซอรินออก ไประเหยเมทานอลด้วยเครื่อง Rotary Evaporator และศึกษาการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับ ดังนี้

- ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับกลีเซอริน ทำการดูดซับไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับจากแกลบ ใช้รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที และอุณหภูมิเท่ากับ 50 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที และการกรองตัวดูดซับออก เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไบโอดีเซลด้วยวิธีการไทเทรต

3.2.5.3 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการล้างด้วยน้ำ

ปัจจุบันในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ระดับอุตสาหกรรมนิยมใช้การล้างด้วยน้ำอุ่น เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก โดยมีวิธีการดังนี้

หลังจากการสังเคราะห์ไบโอดีเซลและตั้งทิ้งไว้ (30 นาที) ในกรวยแยก เพื่อให้ไบโอดีเซลและกลีเซอรินแยกชั้นกัน และไขชั้นกลีเซอรินออก นำไบโอดีเซลที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่นอุ่น (ประมาณ 50°C) ตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ไบโอดีเซลและน้ำแยกชั้นกัน และไขชั้นน้ำออก แล้วเติมน้ำกลั่นอุ่นอีกครั้ง ตั้งทิ้งไว้และแยกชั้นน้ำออก ทำจนชั้นน้ำใส จากนั้นกำจัดน้ำที่ตกค้างในไบโอดีเซลบริสุทธิ์ โดยการระเหยน้ำภายใต้ความดัน นำไบโอดีเซลบริสุทธิ์ที่ได้ไปเทรตเพื่อหาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือ และวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมดและอิสระตามวิธีมาตรฐาน EN 14105

3.2.6 การคืนสภาพตัวดูดซับ

กระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับ เป็นการนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว กลับมาใช้งานใหม่ ในการทดลองนี้สามารถแบ่งวิธีการคืนสภาพตัวดูดซับออกเป็น 3 วิธี คือ การเผา การล้างด้วยน้ำกลั่น และการล้างด้วยเมทานอล มีรายละเอียดดังนี้

3.2.5.1 การคืนสภาพตัวดูดซับโดยการเผา นำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว พึ่งให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เพื่อป้องกันกลิ่นและการเดือดในตู้อบ และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง หรือ จนกว่าตัวดูดซับมีสีเหมือนเดิม

3.2.5.2 การคืนสภาพตัวดูดซับโดยล้างด้วยน้ำกลั่น นำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว เติมน้ำสะอาดให้เข้ากัน และนำไปสั่นโดยเครื่อง sonicated เป็นเวลา 10 นาที เปลี่ยนน้ำกลั่น ทำซ้ำจนน้ำกลั่นที่การล้างตัวดูดซับใส จดปริมาตรการใช้ น้ำ

3.2.5.3 การคืนสภาพตัวดูดซับโดยล้างด้วยเมทานอล นำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว เติมนเมทานอลสะอาดให้เข้ากัน และนำไปสั่นโดยเครื่อง sonicated เป็นเวลา 10 นาที เปลี่ยนเมทานอล ทำซ้ำจนเมทานอลที่การล้างตัวดูดซับใส จดปริมาตรการใช้เมทานอล

3.2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การหาไอโซเทอร์มของการดูดซับในการศึกษานี้สามารถแบ่งได้ดังนี้

3.2.6.1 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ N₂ ด้วยวิธี BET

หารูปแบบไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์และซิลิกาโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับ N₂ ที่อุณหภูมิ 77K โดยวิธีการวิเคราะห์เหมือนกับข้อ 3.2.4.3

3.2.6.2 ไอโซเทอร์มของการดูดซับกลีเซอริน

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับจากแก๊ส ซึ่งมีวิธีการดังนี้

- ชั่งน้ำหนักตัวดูดซับจากแก๊ส 10 ความเข้มข้น คือร้อยละ 1- 10 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล (50 กรัม)

- ทำการดูดซับกลีเซอริน ใช้รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 50 °C (อ่างน้ำร้อน) เป็นเวลา 10 นาที

- นำไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับออกจากตัวดูดซับโดยการดูดซับไบโอดีเซล เพื่อหาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือด้วยวิธีการไทเทรต

การคำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับของตัวดูดซับจากแก๊ส โดยการนำปริมาณกลีเซอรินที่ได้ เข้าสมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์ และฟรุนดิช ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\text{สมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์} \quad \frac{1}{(X/M)} = \frac{1}{abC_e} + \frac{1}{a} \quad (3.1)$$

เมื่อ X/M = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

C_e = ความเข้มข้นกลีเซอรินที่สภาวะสมดุล (mg/l)

a = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)

b = ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (l/mg)

ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์ a และ b สามารถหาได้จาก slope และ intercept

$$\text{สมการไอโซเทอร์มฟรุนดิช} \quad \log(X/M) = \log C_e \frac{1}{n} + \log K_F \quad (3.2)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/l)

X/M = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)

K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับหลายชั้น (mg/g)

n = ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอร์มฟรุนดิช $1/n$ และ K_F สามารถหาได้จาก slope และ intercept

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

การศึกษานี้ได้ทำการทดลองตามวิธีการในบทที่ 3 ซึ่งแบ่งผลการทดลองออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษากระบวนการผลิตและคุณสมบัติของตัวดูดซับจากแกลบ

ส่วนที่ 2 ศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

ส่วนที่ 3 ศึกษากระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับ

ส่วนที่ 4 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

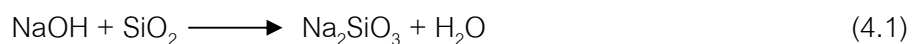
4.1 ศึกษากระบวนการผลิตและคุณสมบัติของตัวดูดซับจากแกลบ

ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองนี้ อยู่ในรูปของถ่านกัมมันต์ และซิลิกา ซึ่งตัวดูดซับจากกระบวนการผลิตมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 ศึกษากระบวนการผลิตของตัวดูดซับจากแกลบ

4.1.1.1 ถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยการนำแกลบมาต้มด้วย 1N NaOH ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จะได้แกลบสีเหลืองเข้มดังภาพที่ 4.1 เพื่อกำจัดซิลิกาในแกลบ จึงส่งผลให้ลดการเกิดเถ้าในกระบวนการกระตุ้น ซึ่งในเถ้าแกลบมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 2.5 NaOH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาในแกลบ ให้อยู่ในรูป โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ดังสมการที่ 4.1 (Tang และ Wang, 2005) ซึ่ง Na_2SiO_3 สามารถกำจัดได้โดยการล้างด้วยน้ำ เพราะ Na_2SiO_2 มีความสามารถในการละลายน้ำ จากนั้นนำแกลบที่ได้ไปทำการกระตุ้น (activation) โดยการแช่แกลบในสารละลาย ZnCl_2 ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักแกลบต่อ ZnCl_2 เท่ากับ 1:0.25, 1:1 และ 1:2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้แกลบอิ่มตัวด้วยสารละลาย ZnCl_2 แล้ว



แกลบก่อนต้มด้วย
1N NaOH



แกลบหลังต้ม
ด้วย 1N NaOH

ภาพที่ 4.1 ลักษณะของแกลบก่อน และหลังต้มด้วย 1 N NaOH

นำไปเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปล้างด้วยร้อยละ 5 ของ HCl และน้ำอุ่นจนน้ำล้างมี pH เป็นกลาง (ประมาณ 6.5 - 7) เพื่อกำจัด $ZnCl_2$ ที่ตกค้างอยู่บนผิวของถ่านกัมมันต์ (เมื่อ $ZnCl_2$ ถูกเผาที่อุณหภูมิ 700°C จะเปลี่ยนรูปเป็นไอออน Zn^+ เกาะตามพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งการล้างถ่านกัมมันต์ด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวไม่สามารถกำจัด ไอออน Zn^+ ได้อย่างสมบูรณ์ ต้องอาศัยการล้างด้วยสารละลายกรดอ่อน เพื่อเป็นการช่วยการชะล้าง ไอออน Zn^+ ที่ตกค้างได้ดี) และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110- 120°C ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีลักษณะเป็นผง ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ลักษณะแกลบที่ผ่านการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และ ถ่านกัมมันต์ที่ได้

4.1.1.2 ซิลิกา

นำแกลบมาเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ในสภาวะมีอากาศ เพื่อเปลี่ยนรูปแกลบให้เป็นเถ้า เมื่อเผาแกลบจะได้เถ้าแกลบดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ลักษณะแกลบก่อนเผา และแกลบหลังเผา

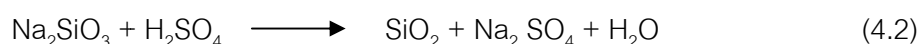
การเตรียมซิลิกาจากเถ้าแกลบในการทดลองนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ (Mittal, 1997)

1) ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ โดยการนำเถ้าแกลบไปต้มด้วย 2.5N NaOH ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้สารละลายใสสีน้ำตาลเหลือง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนนี้สามารถแสดงด้วยสมการที่ (4.1)



2) ขั้นตอนการตกตะกอน โดยการนำสารละลายที่ผ่านการกรองจากขั้นตอนที่ 1 เติม 5N H_2SO_4 เพื่อเปลี่ยนรูปจาก Na_2SiO_3 เป็น SiO_2 โดยวิธีการตกตะกอน จะได้ก้อนวุ้นสีขาวในสารละลาย และปรับ pH ให้อยู่ประมาณ 8.5 เพื่อให้เกิดการตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ และเป็นช่วงที่ทำให้ซิลิกาได้นั้นมีความบริสุทธิ์มากที่สุด ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงด้วยสมการที่ (4.2)



ซิลิกาที่ได้จากกระบวนการผลิตหลังการอบให้แห้งที่ $110-120^\circ\text{C}$ มีลักษณะเป็นก้อนสีขาว ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ลักษณะซิลิกาที่ได้จากกระบวนการผลิต

4.1.2 ศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับจากแกลบ

(1) การวิเคราะห์หาค่าการดูดซับไอโอดีนัมเบอร์ และการดูดซับเมทธิลีนบลู

ค่าการดูดซับไอโอดีนัมเบอร์ เป็นดัชนีชี้วัดค่าความสามารถในการดูดติดผิวสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำของถ่านกัมมันต์ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ คือ ถ้าค่าการดูดซับไอโอดีนัมเบอร์สูง ถ่านกัมมันต์จะมีค่าพื้นที่ผิวสูง และความสามารถในการดูดติดผิวของสารสูงเช่นกัน แต่ถ้าค่าการดูดซับไอโอดีนัมเบอร์ต่ำ ถ่านกัมมันต์จะมีค่าพื้นที่ผิวต่ำ และความสามารถในการดูดติดผิวสารต่ำเช่นกัน

ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู สามารถบอกค่าการดูดซับของตัวดูดซับสำหรับโมเลกุลที่มีขนาดใกล้เคียงกับโมเลกุลของเมทธิลีนบลู โดยขนาดโมเลกุลของเมทธิลีนบลูจัดอยู่ในประเภทขนาดกลาง

ซึ่งการวิเคราะห์ค่าการดูดซับไอโอดีนนมเบอร์ ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM D4607-94 และค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู ตามวิธีมาตรฐานของ JIS 1470-1975 ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการดูดซับไอโอดีนนมเบอร์ และเมทธิลีนบลูของตัวดูดซับจากแกลบ

| อัตราส่วนระหว่าง แกลบต่อ ZnCl ₂ | ค่าการดูดซับไอโอดีนนมเบอร์ (mg/g) | ค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู (mg/g) |
|---|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 1:0.25 (แกลบ: ZnCl ₂) | 468.78 | 40.90 |
| 1:1 (แกลบ: ZnCl ₂) | 579.60 | 44.98 |
| 1:2 (แกลบ: ZnCl ₂) | 600.10 | 45.46 |
| ซีลีกา | 76.49 | 37.32 |

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ตัวดูดซับจากแกลบที่ประกอบด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ ZnCl₂ เท่ากับ 1:0.25, 1:1 และ 1:2 และซีลีกา มีค่าการดูดซับไอโอดีนนมเบอร์ เท่ากับ 468.78, 579.60, 600.10 และ 76.49 mg/g ตามลำดับ และค่าการดูดซับเมทธิลีนบลู เท่ากับ 40.90, 44.98, 45.46 และ 37.32 mg/g ตามลำดับ เห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ โดยน้ำหนักของแกลบต่อ ZnCl₂ เท่ากับ 1:2 มีค่าการดูดซับไอโอดีนนมเบอร์ และเมทธิลีนบลูสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่เหลือ ทำให้ทราบว่า การลดลงของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ ZnCl₂ มีผลทำให้ค่าการดูดซับไอโอดีนนมเบอร์และเมทธิลีนบลูเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณ ZnCl₂ ที่เพิ่มขึ้นสามารถเข้าไปแทรกและทดแทนสารอินทรีย์ในเนื้อแกลบได้มากขึ้น (จิตตรี พละกุล, 2552) ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้นในการดูดซับไอโอดีนและเมทธิลีนบลู แต่สำหรับซีลีกา มีค่าการดูดซับไอโอดีนนมเบอร์และเมทธิลีนบลู น้อยที่สุด เพราะซีลีกา มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยใหญ่กว่าขนาดของโมเลกุลไอโอดีน และเมทธิลีนบลู ทำให้โมเลกุลของไอโอดีนและเมทธิลีนบลูสามารถเข้าไปภายในรูพรุน แต่ไม่สามารถกักเก็บสารทั้ง 2 ชนิดไว้ภายในโพรงรูพรุนได้ ส่งผลทำให้การดูดซับเกิดได้น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์จากแกลบ

(2) การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย

ผลการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดเฉลี่ยของรูพรุน โดยวิธี BET ของตัวดูดซับจากแกลบ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยวิธี BET

| ตัวดูดซับ | พื้นที่ผิว (m^2/g) | ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g) | ขนาดเฉลี่ยรูพรุน (nm) |
|--|--------------------------------------|--|-----------------------|
| ถ่านแกลบที่ไม่ผ่านการกระตุ้น | 31.44 | 0.0380 | 4.831 |
| 4:1 (แกลบ: ZnCl_2) | 593.24 | 0.2637 | 1.7783 |
| 1:1 (แกลบ: ZnCl_2) | 670.35 | 0.3351 | 1.9997 |
| 1:2 (แกลบ: ZnCl_2) | 890.80 | 0.4210 | 1.8905 |
| ถ่านแกลบ (เผาที่ 700°C) | 2.205 | 0.0034 | 6.2244 |
| ซิลิกา | 126.72 | 0.2007 | 6.34 |

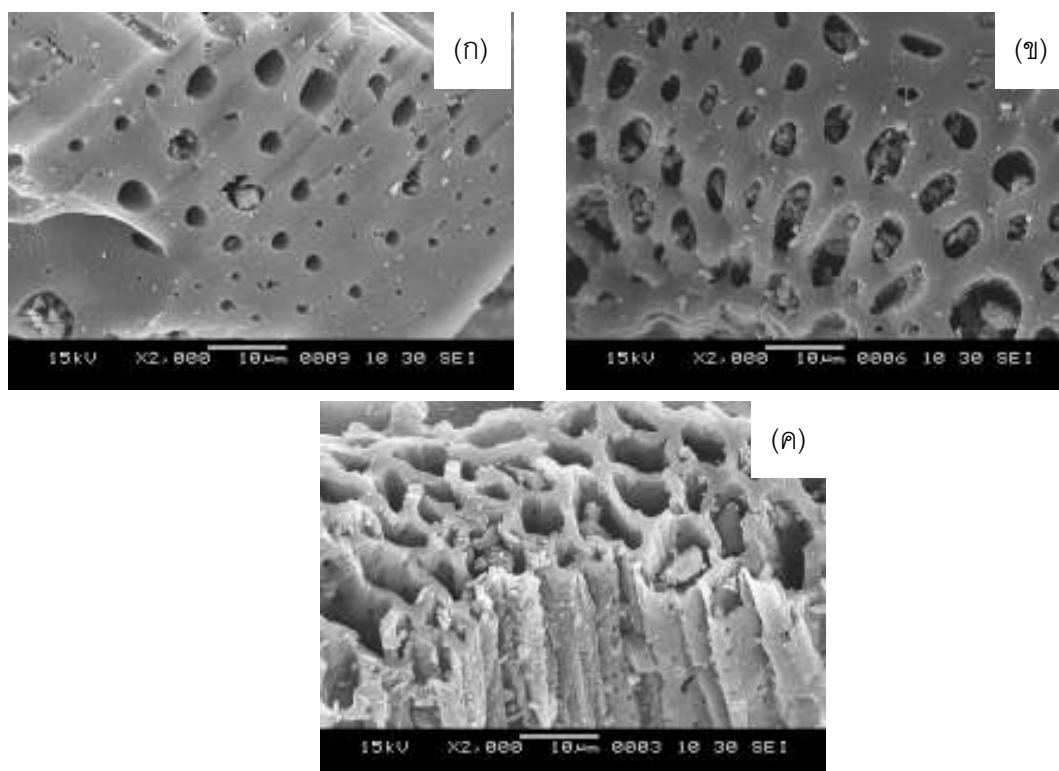
จากตารางที่ 4.2 พบว่า พื้นที่ผิวของถ่านแกลบที่เผาโดยไม่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl_2 เท่ากับ $31.44 \text{ m}^2/\text{g}$ แต่เมื่อทำการกระตุ้นด้วย ZnCl_2 ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ ZnCl_2 เท่ากับ 1:0.25, 1:1 และ 1:2 ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 593.24, 670.35, และ $890.80 \text{ m}^2/\text{g}$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 19, 21 และ 28 เท่า ทำให้ทราบว่าการลดลงของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ ZnCl_2 ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารละลาย ZnCl_2 มีฤทธิ์เป็นกรดอย่างแรง ทำให้ ZnCl_2 สามารถกัดกร่อนและแทรกซึมเข้าเนื้อแกลบได้ดี และเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ภายใน เพื่อเปิดรูพรุนที่มีอยู่เดิม และสร้างรูพรุนใหม่ สำหรับซิลิกาจากแกลบ จะเห็นว่า พื้นที่ผิวของซิลิกาที่ได้จากถ่านแกลบด้วย NaOH ($126.72 \text{ m}^2/\text{g}$) มากกว่าถ่านแกลบ ($2.205 \text{ m}^2/\text{g}$) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น 57 เท่า เนื่องจากพื้นที่ผิวของถ่านแกลบมีสิ่งปนเปื้อนปกคลุมรูพรุน ดังนั้นการต้มถ่านแกลบด้วย NaOH สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากรูพรุนได้

ปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับจากแกลบที่ประกอบด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl_2 ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ ZnCl_2 เท่ากับ 1:0.25, 1:1 และ 1:2 และซิลิกา มีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.2637, 0.3351, 0.4210 และ $0.2007 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ สำหรับถ่านกัมมันต์พบว่า ปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl_2 มีค่าเพิ่มขึ้น 7, 9 และ 11 เท่า ของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl_2 เนื่องการลดลงของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ ZnCl_2 มีผลต่อการพัฒนาและความพรุนของถ่านกัมมันต์ (Gomez และคณะ, 2006) และปริมาตรรูพรุนของซิลิกามีค่าเพิ่มขึ้น 59 เท่าของถ่านแกลบ

ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับจากเกลบที่ประกอบด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:0.25, 1:1 และ 1:2 และ ซิลิกา มีค่าเท่ากับ 1.7783, 1.9997, 1.8905 และ 6.34 nm ตามลำดับ ซึ่งตามมาตรฐานของ IUPAC พบขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ จัดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (<2 nm) ซึ่งขนาดเล็กกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ เนื่องจากการกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ และการลดลงของอัตราส่วนอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลบต่อ $ZnCl_2$ มีผลทำให้ขนาดรูพรุนเล็กลง (Khalili และคณะ, 2000) และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของซิลิกาตามมาตรฐานของ IUPAC จัดเป็นรูพรุนขนาดกลาง (2–50 nm)

(3) ศึกษาลักษณะผิวภายนอกของตัวดูดซับจากเกลบโดยใช้เครื่อง scanning electron microscopy (SEM)

ลักษณะผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:0.25, 1:1 และ 1:2 แสดงดังภาพที่ 4.5

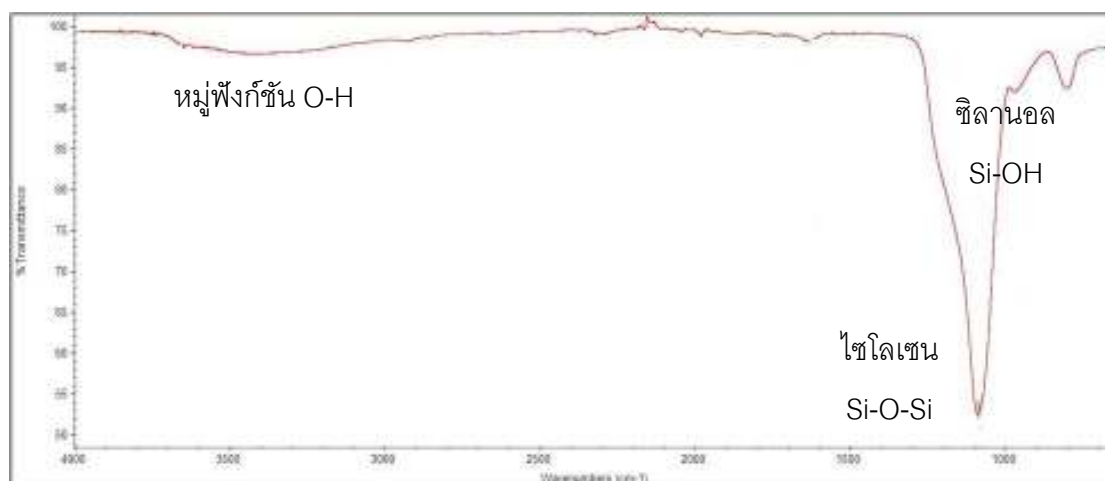


ภาพที่ 4.5 ลักษณะผิวภายนอกของ (ก) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 4: 1 (ข) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 1 (ค) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2

จากภาพที่ 4.5 พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:2 มีนั้ระหว่างรูพรุนบางที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:0.25 และ 1:1 ซึ่งการลดลงของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ ส่งผลทำให้นั้ระหว่างรูพรุนเบาลง เนื่องปริมาณ $ZnCl_2$ ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ในขั้นตอนการกระตุ้น $ZnCl_2$ มีโอกาสกัดกร่อนแกลบได้มากขึ้น

(4) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่อง Fourier-Transform Infrared spectrometer (FT-IR)

ซิลิกาเป็นสารที่มีหมู่ฟังก์ชันเฉพาะ ซึ่งผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่อง FTIR สามารถแสดงหมู่ฟังก์ชัน ดังภาพที่ 4.6

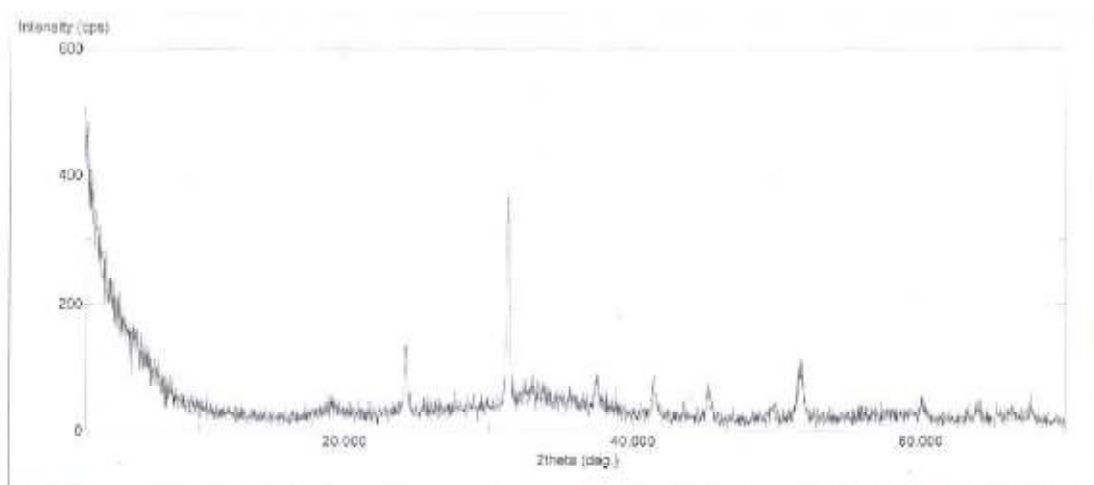


ภาพที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ด้วยเครื่อง FTIR

จากภาพที่ 4.6 พบว่าการดูดแสงอินฟราเรด ปรากฏความถี่ 3 ตำแหน่งเด่นชัด คือ 965.17, 1091.88 และ 3457.30 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันซิลานอล (Si-OH) ไซโลเซน (Si-O-Si) และ O-H (พันธะไฮโดรเจน) (Vejayakumaran และคณะ, 2008) ซิลิกามีหมู่ฟังก์ชันหลัก คือ ซิลานอล และไซโลเซน (Lee และ Deventer, 2002) ซึ่งการปรากฏหมู่ฟังก์ชันทั้ง 2 สามารถพิสูจน์ได้ว่าสารที่สกัดได้นั้น คือ ซิลิกา

(5) การวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างของซิลิกา ด้วยเครื่อง X-Ray diffraction (XRD)

รูปแบบของโครงสร้างซิลิกาในธรรมชาติสามารถแบ่งออกเป็น ผลึกซิลิกา และอสัณฐานซิลิกา ซึ่งผลการวิเคราะห์รูปแบบของโครงสร้างซิลิกา แสดงดังภาพที่ 4.7

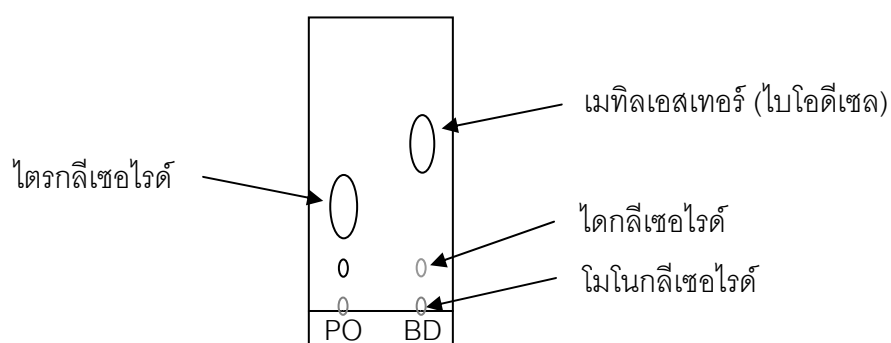


ภาพที่ 4.7 รูปแบบโครงสร้างของซิลิกา ด้วยเครื่อง XRD

จากภาพที่ 4.7. พบว่า กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย เครื่อง XRD พิกของกราฟมีลักษณะ broad ไม่เป็นพีคที่ sharp (Liou, 2004) ซึ่งลักษณะที่ปรากฏแสดงว่าซิลิกาที่ผลิตได้มีโครงสร้างเป็น อสัณฐาน (amorphous silica)

4.2 ศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

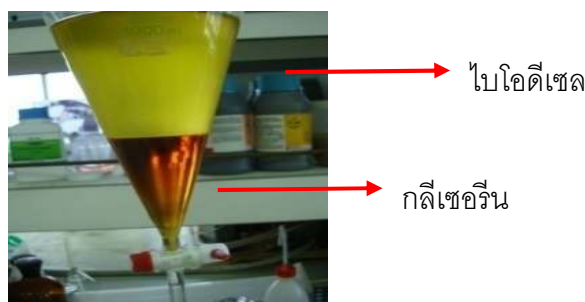
จากการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ พบว่าได้ร้อยละผลิตภัณฑ์ ประมาณร้อยละ 95-98 และเมื่อทำ Thin Layer Chromatography (TLC) พบว่าเป็นไบโอดีเซล แสดงดังภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 TLC ของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ เมื่อ PO คือน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ และ BD คือไบโอดีเซล โดยมี mobile phase คือ สารผสมระหว่าง hexane : ethyl acetate : acetic acid เท่ากับ 90 : 10 : 1 โดยปริมาตร

จากภาพที่ 4.8 พบว่า น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ปรากฏตำแหน่งของไตรกลีเซอไรด์ และไบโอดีเซล ปรากฏตำแหน่งของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และเมทิลเอสเทอร์ แต่ไม่มีไตรกลีเซอไรด์ เพราะ ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลทำให้ไตรกลีเซอไรด์เปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน แสดงดังสมการที่ 2.1-2.3 โดยเริ่มจากการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันปาล์มไปเป็น ไดกลีเซอไรด์ จากนั้นไดกลีเซอไรด์เปลี่ยนไปเป็นโมโนกลีเซอไรด์ และสุดท้ายโมโนกลีเซอไรด์ เปลี่ยนไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ และกลีเซอรอล

กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ที่ใช้ในการศึกษานี้ อาศัยการดูดซับโดยตัวดูดซับจาก แกลบเปรียบเทียบการล้างด้วยน้ำอุ่น โดยเมื่อกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการ ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเสร็จสมบูรณ์ ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที เพื่อให้เกิดการแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลกับ กลีเซอรอล ดังภาพที่ 4.9 ไบโอดีเซลที่ได้นั้น ยังมีการปนเปื้อนของกลีเซอริน (ประกอบด้วย กรด ไขมันอิสระ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือ กลีเซอรอล แอกอฮอล์ กลีเซอไรด์ และ สบู่) (Schumacher, 2007) ซึ่งการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดกลีเซอรินในไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับจากแกลบ มีผลการศึกษาดังนี้

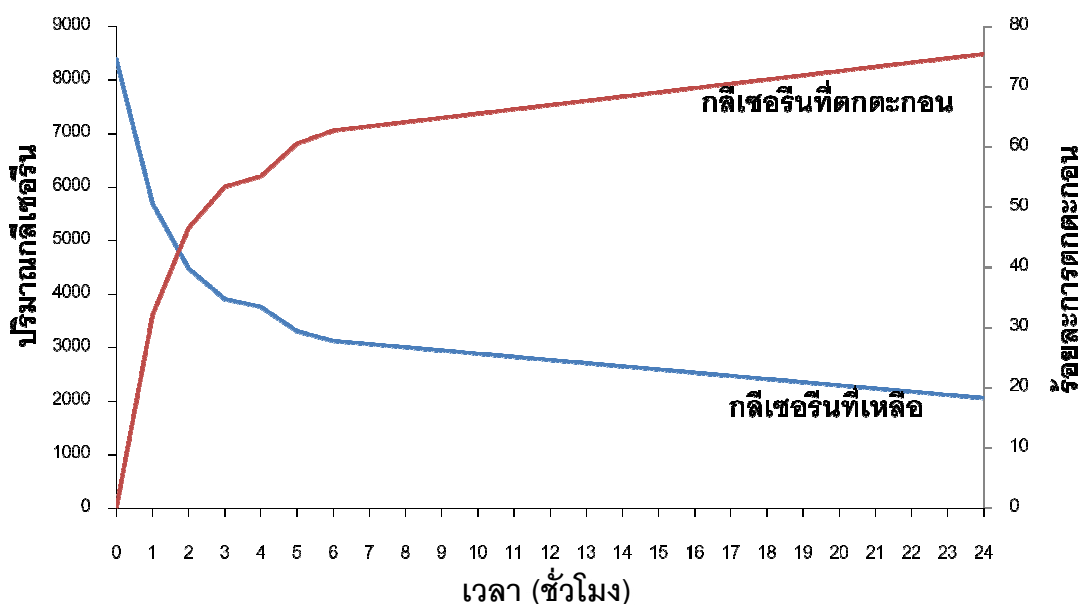


ภาพที่ 4.9 การแยกชั้นระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอริน

4.2.1 ภายใต้สภาวะมีเมทานอล

(1) ศึกษาผลของระยะเวลาการตั้งทิ้งไว้ต่อการตกตะกอนของกลีเซอริน

โดยทั่วไปปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซล สามารถลดลงได้เองเมื่อระยะเวลาผ่านไป เนื่องจากกลีเซอรินเกิดการตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วงของโลก ดังภาพที่ 4.10

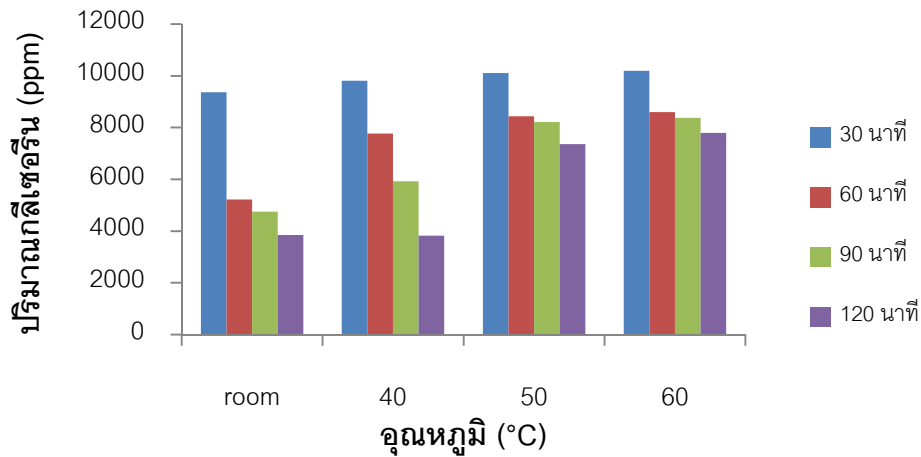


ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาดังตั้งไว้กับปริมาณกลีเซอรินที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซล

จากภาพที่ 4.10 พบว่า ระยะเวลาการตั้งทิ้งไว้เพิ่มขึ้น ทำให้ร้อยละการตกตะกอนของกลีเซอรินเพิ่มขึ้นเช่นกัน เห็นได้จากการตั้งทิ้งไว้ 6 ชั่วโมง สามารถลดปริมาณกลีเซอรินจาก 8388 ppm เหลือ 3127 ppm ซึ่งมีร้อยละการตกตะกอน เท่ากับ 62.7 และเมื่อตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ปริมาณกลีเซอรินเหลือ 2061 ppm ซึ่งร้อยละการตกตะกอนเพิ่มเป็น 75.4 จากผลข้างต้นทำให้ทราบว่ากลีเซอรินในไบโอดีเซลสามารถตกตะกอนตามแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งมีผลต่อปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซลที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าการตั้งทิ้งไว้สามารถกำจัดกลีเซอรินในไบโอดีเซลได้ แต่ต้องใช้เวลาในการกำจัด

(2) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซล

อุณหภูมิของไบโอดีเซลมีผลต่อปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซล โดยศึกษาที่อุณหภูมิห้อง 40, 50 และ 60°C ดังภาพที่ 4.11

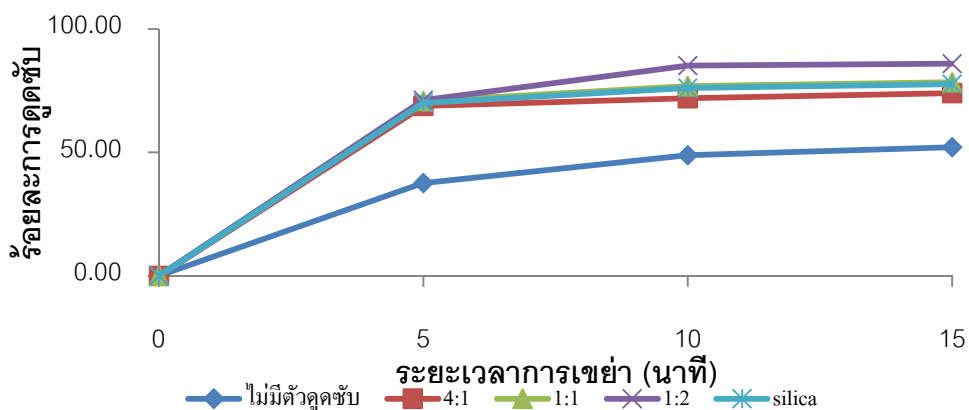


ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิต่อปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซล

จากภาพที่ 4.11 พบว่าปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซลที่อุณหภูมิ 50 และ 60°C มีค่าใกล้เคียง และมีปริมาณกลีเซอรินที่เหมาะสมในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ และเมื่อตั้งทิ้งไว้ 30 นาที เพื่อให้เกิดการขึ้นระหว่างไบโอดีเซลกับกลีเซอริน ทำให้อุณหภูมิของไบโอดีเซลลดจาก 65 °C เหลือประมาณ 50°C ดังนั้นจึงเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาต่อไป คือ 50°C ซึ่งเป็นภาระประหยัดเวลา

(3) ศึกษาผลของระยะเวลาการสัมผัสต่อการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ระยะเวลาการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและไบโอดีเซลมีผลต่อร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล ศึกษาโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล (50 กรัม) รอบการเขย่า เท่ากับ 150 รอบต่อนาที ที่ อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 0- 15 นาที ดังภาพที่ 4.12

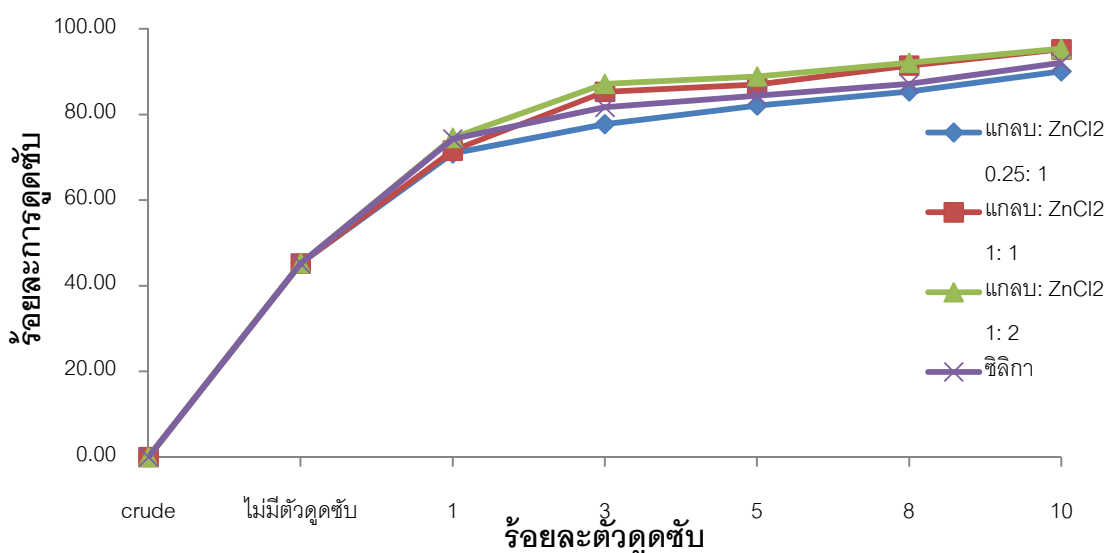


ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการดูดซับ

จากภาพที่ 4.12 พบว่าระยะเวลาสัมผัสไบโอดีเซลของตัวดูดซับมีผลต่อร้อยละการดูดซับของกลีเซอรินในไบโอดีเซล โดยระยะเวลาสัมผัสที่ 10 และ 15 นาที มีค่าร้อยละการดูดซับกลีเซอรินใกล้เคียงกัน จึงเลือกระยะเวลาสัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับไบโอดีเซล เท่ากับ 10 นาที เพื่อนำไปทำการทดลองขั้นต่อไป

(4) ศึกษาผลของปริมาณของตัวดูดซับต่อการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ปริมาณของตัวดูดซับมีผลต่อร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล ศึกษาโดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับร้อยละ 1, 3, 5, 8, 10 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล (50 กรัม) รอบการเขย่า เท่ากับ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 10 นาที ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับ

จากภาพที่ 4.13 พบว่าปริมาณของตัวดูดซับมีผลต่อปริมาณกลีเซอรินที่เหลืออยู่ โดยปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ ร้อยละ 5, 8 และ 10 มีร้อยละการดูดซับกลีเซอรินที่ใกล้เคียงกัน จึงนำไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย ZnCl₂ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ ZnCl₂ เท่ากับ 1: 2 และซิลิกา ที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 และ 10 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (acid value) จากการวิธีการไทเทรต และปริมาณกลีเซอรอลอิสระ และ กลีเซอรอลทั้งหมดด้วยเทคนิค gas chromatography ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความเป็นกรด (acid value) และปริมาณกลีเซอรอลอิสระ และกลีเซอรอลทั้งหมด

| คุณสมบัติ | ถ่านกัมมันต์ | | ซิลิกา | |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | ร้อยละ 5 | ร้อยละ 10 | ร้อยละ 5 | ร้อยละ 10 |
| ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g) (< 0.5 mgKOH/g) | 0.126 | 0.134 | 0.146 | 0.158 |
| กลีเซอรอลอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (< 0.02) | 8.43×10^{-4} | 1.48×10^{-3} | 1.54×10^{-3} | 6.58×10^{-4} |
| โมโนกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (< 0.80) | 0.44 | 0.41 | 0.39 | 0.39 |
| ไดกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (< 0.20) | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| ไตรกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (< 0.20) | - | - | - | - |
| กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (< 0.25) | 0.12 | 0.11 | 0.11 | 0.10 |

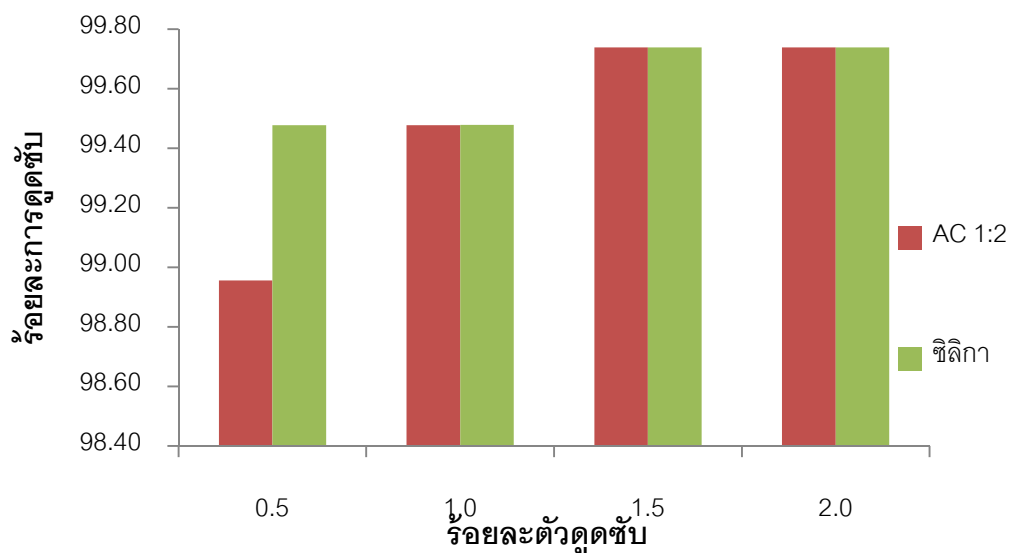
จากตารางที่ 4.3 พบว่าปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 และ 10 สามารถทำให้ไบโอดีเซลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน จึงเลือกใช้ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ ร้อยละ 5 และตัวดูดซับที่ให้ร้อยละการดูดซับกลีเซอรินสูงสุด คือถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 88.88 แต่ไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับจะมีสีดำของถ่านกัมมันต์ปะปนด้วย แต่การใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับ ไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับไม่มีสีปนเปื้อน ซึ่งมีร้อยละการดูดซับกลีเซอริน เท่ากับ 84.43 และไบโอดีเซลผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เช่นเดียวกับการใช้ถ่านกัมมันต์จากแกลบ

4.2.2 ภายใต้อุณหภูมิไม่มีเมทานอล

ศึกษาการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซลภายใต้อุณหภูมิที่ไม่มีเมทานอล

นำไบโอดีเซลที่ผ่านการแยกชั้นกลีเซอรินไปกำจัดเมทานอลออก และทำการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับจากแกลบ ศึกษาโดยปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5

และ 2.0 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล (50 กรัม) ใช้รอบการเขย่า เท่ากับ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 10 นาที ผลดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวดูดซับกับร้อยละการดูดซับกลีเซอริน ในสถานะไม่มีเมทานอล

จากภาพที่ 4.14 พบว่าหลังจากการระเหยเมทานอลออก ไบโอดีเซลมีความหนืดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการกำจัดเมทานอล ทำให้การละลายกลีเซอรินในไบโอดีเซลลดลง และจับตัวเป็นก้อน ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ ทำให้ต้องกรองด้วยกระดาษเพื่อแยกไบโอดีเซลออกจากตัวดูดซับ ซึ่งจากภาพที่ 4.12 พบว่าปริมาณของตัวดูดซับเท่ากับ ร้อยละ 1.5 และ 2.0 มีร้อยละการดูดซับกลีเซอรินที่ใกล้เคียงกัน จึงนำไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับ ไปวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอลอิสระ และ กลีเซอรอลทั้งหมดด้วยเทคนิค gas chromatography ผลแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าปริมาณกลีเซอรอลอิสระและกลีเซอรอลทั้งหมด

| คุณสมบัติ | ถ่านกัมมันต์ | | ซิลิกา | |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | ร้อยละ 1.5 | ร้อยละ 2.0 | ร้อยละ 1.5 | ร้อยละ 2.0 |
| กลีเซอรอลอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (< 0.02) | 5.92×10^{-3} | 3.62×10^{-3} | 8.22×10^{-3} | 5.39×10^{-4} |
| โมโนกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (< 0.80) | 0.29 | 0.48 | 0.50 | 0.43 |

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าปริมาณกลีเซอรอลอิสระและกลีเซอรอลทั้งหมด (ต่อ)

| คุณสมบัติ | ถ่านกัมมันต์ | | ซิลิกา | |
|--|--------------|------------|------------|------------|
| | ร้อยละ 1.5 | ร้อยละ 2.0 | ร้อยละ 1.5 | ร้อยละ 2.0 |
| ไดกลีเซอไรต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (< 0.20) | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| ไตรกลีเซอไรต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) (< 0.20) | - | - | - | - |
| กลีเซอรอลทั้งหมด(ร้อยละโดยน้ำหนัก) (< 0.25) | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.12 |

จากตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1.5 และ 2.0 สามารถทำให้ไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (ปริมาณกลีเซอรอลอิสระ และกลีเซอรอลทั้งหมด) จึงเลือกใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ ร้อยละ 1.5 และตัวดูดซับที่ให้ร้อยละการดูดซับกลีเซอรินสูงสุด คือ ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2 มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 99.5

4.2.3 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการล้างด้วยน้ำอุ่น

กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการล้างด้วยน้ำเป็นวิธีการ ที่นิยมใช้กันมากในการผลิตไบโอดีเซล ผลการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำอุ่นเปรียบเทียบกับ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ จากแกลบ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณกลีเซอรอล กลีเซอรินอิสระและกลีเซอรอลทั้งหมด

| วิธีการ | ปริมาณ กลีเซอรอล (ppm) | กลีเซอรอล อิสระ (%wt) (< 0.02) | โมโน กลีเซอไรต์ (%wt) (< 0.80) | ได กลีเซอไรต์ (%wt) (< 0.20) | ไตร กลีเซอไรต์ (%wt) (< 0.20) | กลีเซอรอล ทั้งหมด (%wt) (< 0.25) |
|--------------------------------|------------------------------|--|---|---|--|---|
| ล้างด้วย น้ำ | 0 | 7.31×10^{-4} | 0.29 | 0.03 | - | 0.08 |
| ดูดซับ ด้วยถ่าน กัมมันต์ | 856 | 8.43×10^{-4} | 0.44 | 0.03 | - | 0.12 |

จากตารางที่ 4.5 พบว่าไบโอดีเซลที่ล้างด้วยน้ำอุ่นมีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐาน โดยในการทดลองไบโอดีเซล 50 กรัม ต้องใช้น้ำอุ่นในการล้างประมาณ 550 mL แต่ปัจจุบันการล้างไบโอดีเซลในกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ของการผลิตจริงทำให้น้ำเสีย ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิต โดยไบโอดีเซล 100 ลิตร เกิดน้ำเสีย 20 ลิตร ทำให้มีการเปลี่ยนกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์เป็นการใช้ตัวดูดซับ (ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2) โดยใช้ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล (50 กรัม) ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐานเช่นกัน

จากการศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยตัวดูดซับจากแกลบ พบว่าการใช้ซิลิกาเป็นตัวดูดซับในกระบวนการให้ร้อยละการดูดซับกลีเซอรินใกล้เคียงกับการใช้ถ่านกัมมันต์จากแกลบ เพราะการดูดซับกลีเซอรินของถ่านกัมมันต์จากแกลบเกิดเฉพาะบริเวณผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ แต่การดูดซับกลีเซอรินของซิลิกาสามารถเกิดได้ทั้งบริเวณผิวภายนอกและภายในของซิลิกาได้ เนื่องจากขนาดกลีเซอรินเฉลี่ยมีค่าประมาณ 3 nm (Liu และคณะ, 2009) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์จากแกลบ ทำให้กลีเซอรินไม่สามารถเข้ารูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ แต่สามารถเข้ารูพรุนของซิลิกา เพราะขนาดรูพรุนเฉลี่ยของซิลิกาใหญ่ขนาดของกลีเซอริน และบริเวณพื้นผิวของซิลิกามีปริมาณออกซิเจนเป็นจำนวนมาก ซึ่งมาจากหมู่ฟังก์ชัน ซิลานอล และ ไฮโดรเจน และมีความเป็นขั้วสูงซึ่งสามารถดูดซับสารที่มีขั้วได้ (Filho และCarmo, 2004 และ Fadhil และคณะ, 2012) โดยกลีเซอรินเป็นสารที่มีขั้ว จึงทำให้ซิลิกามีความสามารถในการดูดซับกลีเซอรินได้ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์จากแกลบ

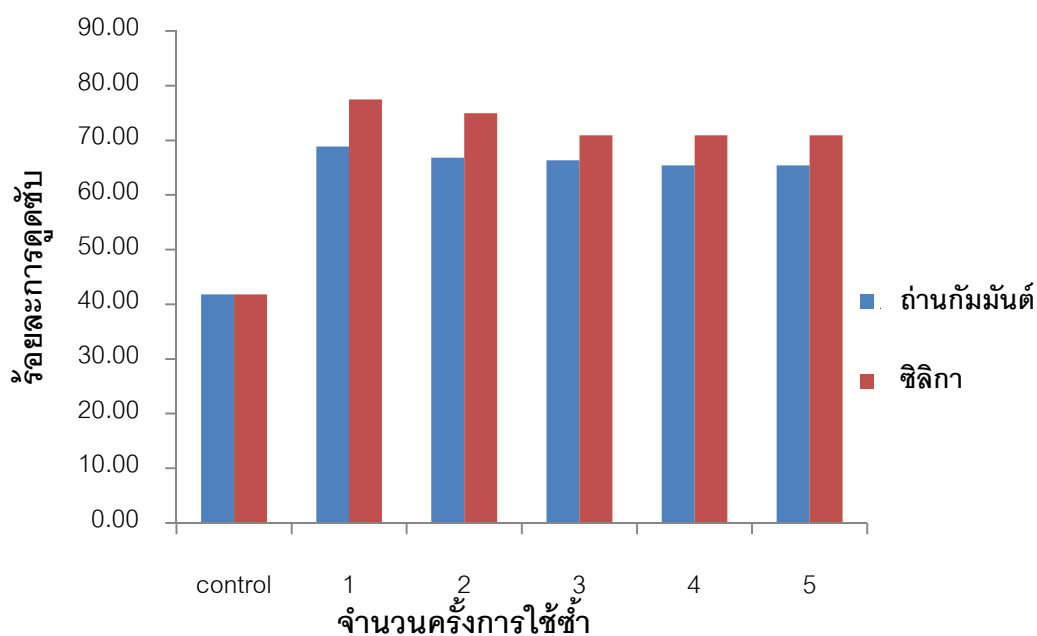
4.3 ศึกษากระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับ

กระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับ เป็นการนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว กลับมาใช้งานใหม่ ในการศึกษาครั้งนี้ นำถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2 และซิลิกา ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ดีจากขั้นตอนที่ 4.2 สามารถแบ่งวิธีการคืนสภาพออกเป็น 3 วิธี คือ เผล ล้างด้วยน้ำ และล้างด้วยเมทานอล ผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงลักษณะของตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วในการคืนสภาพวิธีต่างๆ

| วิธีการ | ถ่านกัมมันต์ | ซิลิกา |
|-----------------|---|--|
| เผา | ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการเผาเปลี่ยนสีจากสีดำเป็นสีส้ม ทำให้สูญเสียคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ซึ่งไม่สามารถนำไปดูดซับซ้ำได้ | ซิลิกาที่ผ่านการเผามีสีขาวปนสีดำ เนื่องจากเถ้าของกลีเซอรินที่ตกค้าง แต่ต้องใช้เวลานาน 12 ชั่วโมง |
| ล้างด้วยน้ำ | ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำเกิดการจับตัวเป็นก้อน เพราะกลีเซอรินไม่ละลายในน้ำ จึงเกิดการจับตัวเป็นก้อน ทำให้ไม่สามารถกำจัดกลีเซอรินออกจากถ่านกัมมันต์ได้ ซึ่งไม่สามารถนำไปดูดซับซ้ำได้ | ซิลิกาที่ผ่านการล้างด้วยน้ำไม่เกิดการจับตัวเป็นก้อน เหมือนถ่านกัมมันต์ เพราะการสั่นโดยเครื่อง sonicated อาจช่วยให้โมเลกุลของกลีเซอรินหลุดออกจากซิลิกาใช้เมทานอลปริมาณ 500 ml ต่อซิลิกา 50 กรัม |
| ล้างด้วยเมทานอล | ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการล้างด้วยเมทานอล สามารถกำจัดกลีเซอรินออกได้ เพราะสีของเมทานอลสุดท้ายใสไม่มีสี และลักษณะถ่านกัมมันต์เหมือนก่อนผ่านการดูดซับ ใช้เมทานอลปริมาณ 250 ml ต่อซิลิกา 50 กรัม | ซิลิกาที่ผ่านการล้างด้วยเมทานอลสามารถกำจัดกลีเซอรินออกได้ เพราะสีของเมทานอลสุดท้ายใสไม่มีสี และลักษณะซิลิกาเหมือนก่อนผ่านการดูดซับ ใช้เมทานอลปริมาณ 250 ml ต่อซิลิกา 50 กรัม |

จากตารางที่ 4.6 พบว่าวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการคืนสภาพของตัวดูดซับจากแกลบ คือ การล้างด้วยเมทานอล เพราะกลีเซอรินสามารถละลายในเมทานอลได้ดี (Kiss, 2009) ซึ่งสามารถกำจัดกลีเซอรินออกจากตัวดูดซับจากแกลบ จากนั้นนำไปดูดซับกลีเซอรินซ้ำในไปโอดีเซล ผลของการดูดซับกลีเซอรินแสดงดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งการให้ซ้ำกับร้อยละการดูดซับ

จากภาพที่ 4.13 พบว่าการคืนสภาพของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2 และซิลิกา โดยวิธีการล้างด้วยเมทานอลมีร้อยละการดูดซับกลีเซอรินสูง จึงนำไปโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับ วิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรอลอิสระ และ กลีเซอรอลทั้งหมดด้วยเทคนิค gas chromatography ผลแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณกลีเซอรอลอิสระ และกลีเซอรอลทั้งหมดของการคืนสภาพของถ่านกัมมันต์และซิลิกาแต่ละครั้ง

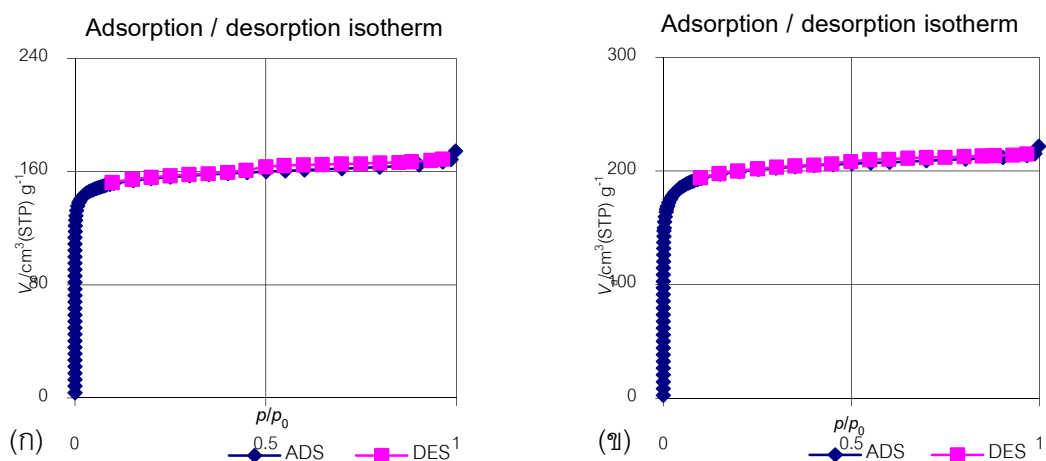
| วิธีการ | กลีเซอรอลอิสระ (%wt) (< 0.02) | โมโนกลีเซอไรด์ (%wt) (< 0.80) | ไดกลีเซอไรด์ (%wt) (< 0.20) | ไตรกลีเซอไรด์ (%wt) (< 0.20) | กลีเซอรอลทั้งหมด (%wt) (< 0.25) |
|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| ถ่านกัมมันต์ ครั้งที่ 1 | 0.028 | 0.48 | 0.03 | - | 0.16 |
| ซิลิกา ครั้งที่ 1 | 6.30×10^{-4} | 0.4 | 0.03 | - | 0.11 |
| ครั้งที่ 3 | 0.012 | 0.35 | 0.03 | - | 0.14 |
| ครั้งที่ 5 | 6.30×10^{-4} | 0.46 | 0.03 | - | 0.09 |

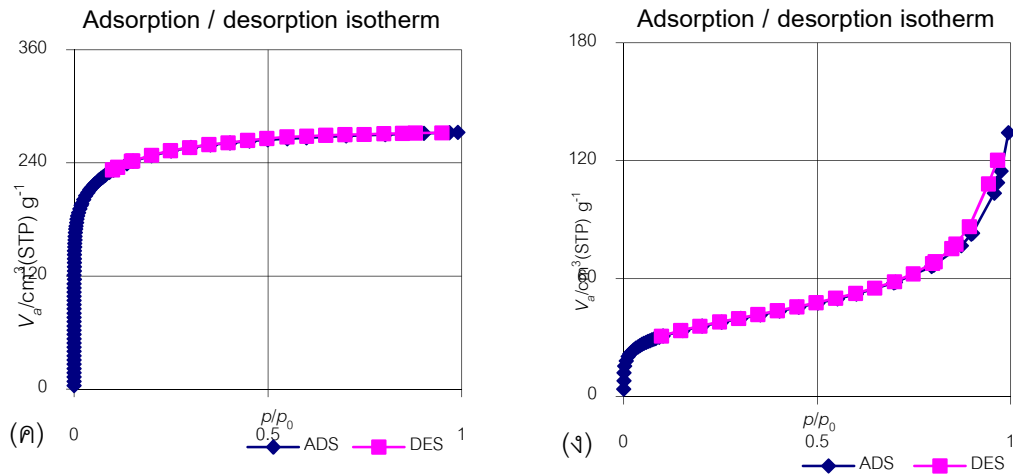
จากตารางที่ 4.7 พบว่าซีลีกาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์จากแกลบ ซึ่งสอดคล้องกับ Fadhil และคณะ (2012) ทำการศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยถ่านกัมมันต์จากกากชา เพราะการคืนสภาพของถ่านกัมมันต์ โดยการล้างด้วยเมทานอล ไม่สามารถลดปริมาณกรีเซอรอลอิสระให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ในการคืนสภาพครั้งที่ 1 จึงไม่ตรวจวัดครั้งต่อไป แต่สามารถลดปริมาณ โมโน-,ได- และไตรกลีเซอไรด์ และกลีเซอรอลทั้งหมด ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่การคืนสภาพของซีลีกาโดยการล้างด้วยเมทานอล สามารถทำได้เกิน 5 ครั้ง ซึ่งแต่ละครั้งสามารถลดปริมาณกรีเซอรินอิสระ โมโน-,ได- และไตรกลีเซอไรด์ และกลีเซอรอลทั้งหมด ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (การที่ครั้งที่ 2 มีค่าสูงกว่าครั้งที่ 1 และ 5 อาจเป็นเพราะการล้างในครั้งที่ 3 ล้างกลีเซอรินออกไม่หมด) ดังนั้นซีลีกาเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอริน เพราะสามารถคืนสภาพได้หลายครั้ง

4.4 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

4.4.1 รูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับของ N_2 ของตัวดูดซับจากแกลบ

รูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับของ N_2 ของถ่านกัมมันต์ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 0.25, 1:1 และ 1: 2 และซีลีกา กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับ N_2 ที่อุณหภูมิ 77 K แสดงดังภาพที่ 4.14





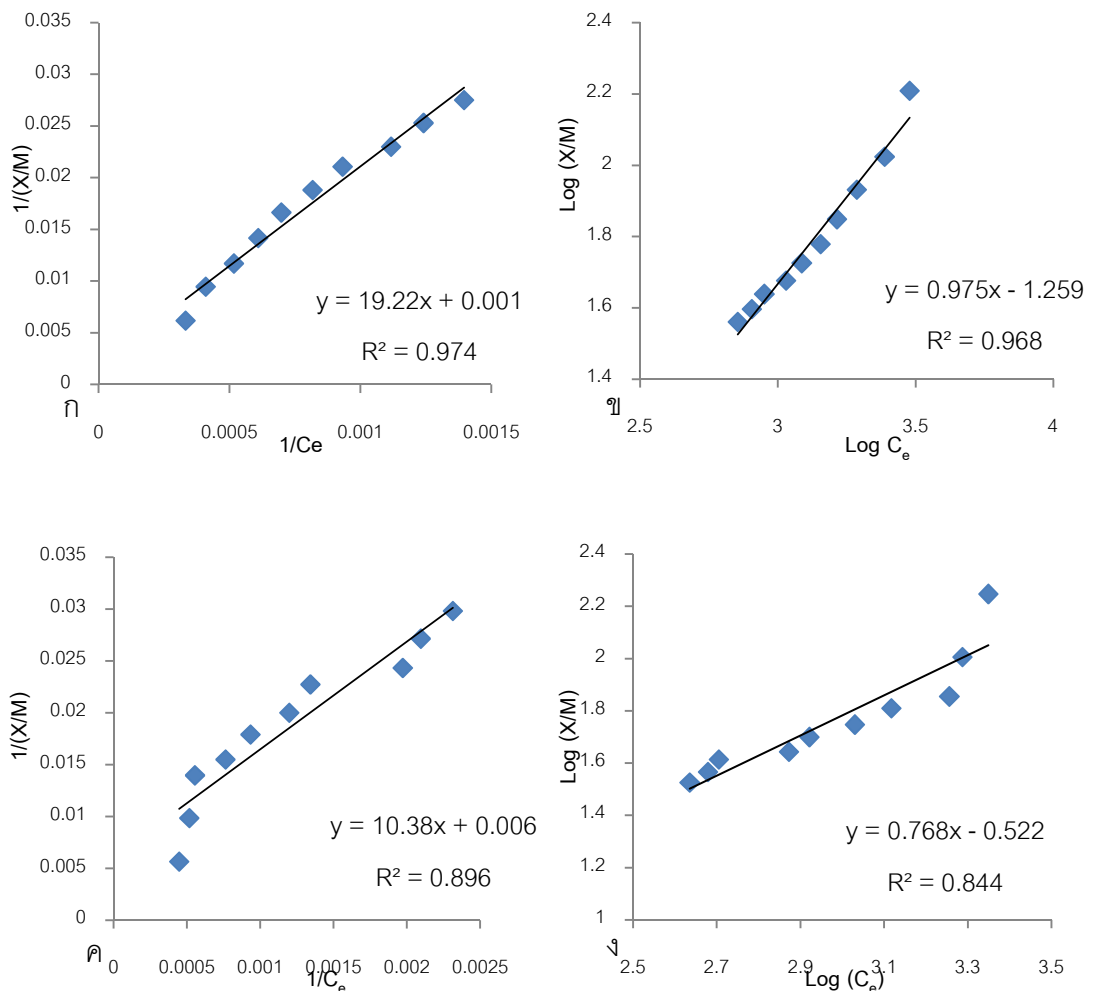
ภาพที่ 4.16 ไอโซเทอรัมการดูดซับ N_2 ที่อุณหภูมิ 77 K ของ (ก) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 4: 1 (ข) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 1 (ค) ถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2 และ (ง) ซิลิกา

จากภาพที่ 4.14 พบว่ารูปแบบไอโซเทอรัมของการดูดซับของ N_2 ของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ ทั้ง 3 อัตราส่วน คือ 1: 0.25, 1: 1 และ 1: 2 เป็นรูปแบบเดียวกัน คือ ไอโซเทอรัมแบบที่ 1 ตาม Brunauer, Emmett and Teller (BET) classification ซึ่งเป็นไอโซเทอรัมสำหรับการดูดซับชั้นเดียว ที่ประกอบ รูปุณขนาดเล็ (Rouquerol, Rouquerol และ Sing, 1999) พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ในตอนแรกว่างเปล่าปราศจาก N_2 โดยเมื่อเพิ่มความดันจำนวนโมเลกุล N_2 จะดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณ N_2 ถูกดูดซับอย่างรวดเร็วและความเร็วของการดูดซับ N_2 ค่อยๆ ลดลง เพราะพื้นที่ของถ่านกัมมันต์ลดลง จนปริมาณ N_2 เริ่มคงที่ (เกศศิริ เหล่าชีระสุวรรณ, 2554) เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือ ซีโอไลต์

รูปแบบไอโซเทอรัมของการดูดซับของ N_2 ของซิลิกา เป็นไอโซเทอรัมแบบที่ 4 ตาม Brunauer, Emmett and Teller (BET) classification ซึ่งเป็นไอโซเทอรัมการดูดซับ N_2 ของตัวดูดซับที่มีรูปุณขนาดกลาง พื้นผิวของซิลิกาในตอนแรกว่างเปล่าปราศจาก N_2 เมื่อเพิ่มความดันจำนวนโมเลกุล N_2 จะถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเสร็จสมบูรณ์ จะเริ่มดูดซับชั้นต่อไปเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (multilayer) และเกิดช่องว่างเล็กน้อย บริเวณการเริ่ม desorption เนื่องจากการลดความดัน ทำให้โมเลกุลของ N_2 จะค่อยๆ หลุดออกจากผิวซิลิกา เมื่อความดันถึงระดับหนึ่ง เส้นกราฟของ adsorption ขึ้นทับเส้นกราฟ desorption ดังเดิม

4.4.2 รูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับของการดูดซับกลีเซอริน

ในการศึกษานี้ใช้ตัวดูดซับจากแกลบ (ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2 และซิลิกา) ร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล (50 กรัม) รอบการเขย่า เท่ากับ 150 รอบต่อนาที ที่ อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที นำไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากแกลบที่ปริมาณต่างๆ วิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือโดยวิธีการไทเทรต และสามารถนำข้อมูลเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดิช ดังภาพที่ 4.15 และตารางที่ 4.8



ภาพที่ 4.17 รูปแบบของ (ก) ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:2 (ข) ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิชของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:2 (ค) ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ของซิลิกา และ (ง) ไอโซเทอร์มแบบฟรุนดิชของซิลิกา

จากภาพที่ 4.15 พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์จากแกลบ และชิลิกา เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/(X/M)$ และ $1/C_e$ จะได้สมการ คือ $y = 19.22x + 0.001$ และ $y = 10.38x + 0.006$ ตามลำดับ โดยความชันของกราฟเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $1/abC_e$ และจุดตัดมีค่าเท่ากับ $1/a$ และไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบฟรุนดิชของถ่านกัมมันต์จากแกลบ และชิลิกา เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(X/M)$ และ $\log(C_e)$ จะได้สมการ คือ $y = 0.975x - 1.259$ และ $y = 0.768x - 0.522$ ตามลำดับ ความชันของกราฟเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดมีค่าเท่ากับ K_f ซึ่งค่าคงที่ของสมการไอโซเทอร์มของการดูดซับกลีเซอริน ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าคงที่ของไอโซเทอร์มของการดูดซับกลีเซอริน

| | แลงเมียร์ | | | | ฟรุนดิช | | |
|--------------|---|-----------------------|----------------|----------------|---|-------|----------------|
| | $\frac{1}{(X/M)} = \frac{1}{abC_e} + \frac{1}{a}$ | | | | $\log(X/M) = \log C_e \frac{1}{n} + \log K_f$ | | |
| | a (mg/g) | b (l/mg) | R ² | R _L | K _f (l/g) | 1/n | R ² |
| ถ่านกัมมันต์ | 1000 | 5.20×10^{-5} | 0.975 | 0.798 | 0.055 | 0.975 | 0.968 |
| ชิลิกา | 166.67 | 5.78×10^{-4} | 0.896 | 0.289 | 0.300 | 0.768 | 0.844 |

จากตารางที่ 4.8 พบว่า เมื่อพิจารณารูปแบบกลไกการดูดซับกลีเซอรินของถ่านกัมมันต์จากแกลบ สอดคล้องกับ Liu และคณะ (2009) ที่ทำการศึกษาการดูดซับกลีเซอรอลจากน้ำล้างใบโอดีเซล และของชิลิกา สอดคล้องกับ Mazzieri และคณะ. (2008) ที่ทำการศึกษาคุณสมบัติการดูดซับของชิลิกาเจลในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดนี้มีสมการการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ เพราะถ่านกัมมันต์จากแกลบ และชิลิกามีความสัมพันธ์เชิงเส้น (R²) ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบแลงเมียร์ (0.975, 0.896) สูงกว่าสมการไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบฟรุนดิช (0.968, 0.844) ซึ่งแสดงว่าการดูดซับกลีเซอรินของถ่านกัมมันต์จากแกลบ และชิลิกาเป็นการดูดซับชั้นเดียว และพื้นผิวของตัวดูดซับจากแกลบเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการดูดซับกลีเซอริน ดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของกลีเซอรินจากไบโอดีเซลผ่านชั้นไบโอดีเซลสู่ผิวภายนอกตัวดูดซับจากแกลบ
2. กลีเซอรินแพร่เข้าไปภายในโพรงของรูพรุนของตัวดูดซับจากแกลบ
3. เกิดการดูดซับของกลีเซอรินภายในโพรงและผิวของรูพรุนของตัวดูดซับจากแกลบ

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ต่างๆของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบแลงเมียร์ พบว่า ค่าคงที่การแยกตัว (R_L) ของถ่านกัมมันต์จากแกลบ และชิลิกา ซึ่งเป็นตัวบอกความสอดคล้องของรูปแบบไอโซเทอร์ม (โกวิทย์ ปิยะมังคลา และคณะ, 2551) และการดูดซับ เท่ากับ 0.798 และ 0.289 ซึ่งอยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ แสดงรูปแบบการลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับที่ดี (วีรานุช หลาง และคณะ, 2552) ถ่านกัมมันต์จากแกลบ และชิลิกา สามารถดูดซับกลีเซอรินได้ เท่ากับ 1,000 และ 166.67 mg/g

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและวิเคราะห์ผลสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ คือ

5.1.1 ศึกษาคุณสมบัติของตัวดูดซับจากแกลบ

ถ่านกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นด้วย $ZnCl_2$ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1: 2 มีค่าการดูดซับไอโอดีนนมเบอร์ และเมทิลีนบลู และพื้นที่ผิวสูงสุด คือ 600.10, 45.46 mg/g และ 890.80 m^2/g และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยจัดอยู่ในประเภทขนาดเล็ก

ซีลีกาที่ได้จากเถ้าแกลบเป็นซีลีกาแบบอสัณฐาน มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 126.72 m^2/g และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยจัดอยู่ในประเภทขนาดกลาง

5.1.2 ศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดกลีเซอริน คือ รอบการเขย่า เท่ากับ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 10 นาที โดย

สภาวะที่มีเมทานอล ใช้ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล

สภาวะที่ไม่มีเมทานอล ใช้ปริมาณตัวดูดซับ เท่ากับ ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล

จากผลการศึกษาพบว่า ตัวดูดซับจากแกลบที่เหมาะสมกับการกำจัดกลีเซอริน คือ ซีลีกา เนื่องจาก

- ซีลีกามีความสามารถในการดูดซับกลีเซอริน (ร้อยละ 84.43) ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์จากแกลบ (ร้อยละ 88.88) แต่ไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยซีลีกาไม่มีสีปนเปื้อนเหมือนถ่านกัมมันต์จากแกลบ

- ซีลีกาสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์จากแกลบ ซึ่งได้ถึง 5 ครั้งวิธีที่เหมาะสมกับการคืนสภาพ คือการล้างด้วยเมทานอล

- เถ้าแกลบที่ใช้ในการผลิตซีลีกา สามารถนำมาจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็น การนำของเสียเหลือใช้มาใช้ประโยชน์

คุณภาพของไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับจากแกลบ และการล้างด้วยน้ำ มีค่าใกล้เคียงกัน และผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

5.1.3 ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 อัตราส่วน คือ 1:0.25, 1:1 และ 1:2 ของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เป็นตามไอโซเทอร์มแบบที่ 1 ตาม Brunauer, Emmett and Tellet (BET) classification แสดงว่าถ่านกัมมันต์จากแกลบมีรูพรุนขนาดเล็ก และสามารถเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว แต่ไอโซเทอร์มการดูดซับของซีลิกา เป็นตามไอโซเทอร์มแบบที่ 4 ตาม Brunauer, Emmett and Tellet (BET) classification แสดงว่าซีลิกามีรูพรุนขนาดกลาง และสามารถเกิดการดูดซับได้หลายชั้น

ไอโซเทอร์มการดูดซับของกลีเซอรินของถ่านกัมมันต์จากแกลบ และซีลิกา มีแนวโน้มเป็นแบบแลงเมียร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาการผลิตตัวดูดซับจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ เช่น ฟางข้าว กากอ้อย และเปลือกข้าวโพด เป็นต้น เพื่อเป็นการเพิ่มคุณค่าของวัสดุเหลือใช้ และลดการเกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

5.2.2 ควรศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ เช่น การเคลือบด้วยโลหะ การขึ้นรูป และการเพิ่มขนาดของซีลิกาในการดูดซับ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกศศิริ เหล่าวิชวะสุวรรณ. การเตรียมและศึกษาถ่านกัมมันต์จากเปลือกและเมล็ดลิ้นจี่โดยวิธีการกระตุ้นทางเคมี. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย 31, 3 (กรกฎาคม-กันยายน 2554) : 83-102.
- โกวิทย์ ปิยะมั่งคณา, จารุวรรณ ตาพัฒน์, ปิยะวัฒน์ โพธิมงคลกุล และฉัฐรส คงสมภักดิ์. จลนศาสตร์การดูดซับโครเมียม (VI) จากโรงงานชุบโลหะโดยใช้ไคโตซานเรณ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 18, 1 (2551).
- จักรพงษ์ ศศิธร. การใช้ประโยชน์ถ่านลอยจากโรงไฟฟ้าในการดูดซับสารไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรธรณี ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐาน และการประยุกต์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, กรุงเทพมหานคร, 2547
- จิตตรี พละกุล. การดูดซับไอระเหยฟอร์มัลดีไฮด์บนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- จุวัลณีย์ แสงระวี. ศึกษาความเป็นไปได้ของซังข้าวโพดในการดูดซับสารประกอบกลุ่มฟีนอลิกในน้ำทิ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2545.
- นภารัตน์ จิวาลักษณ์. การเตรียมและวัดสมบัติถ่านกัมมันต์จากถ่านหินลิกไนต์ โดยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2545.
- นิตยา ทวดอาจ และอภิสิทธิ์ นันทิยา. Preparation of nanosilica powder from rice husk ash by precipitation method. Chiang Mai J. Sci.; 35, 1 (2552) : 206-211.
- นิตากรณ์ แสงประทุม. การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้ดินเบาและผิวดินเบาเคลือบแมงกานีสไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

- ปรัชญา วาทะสิทธิ์. การเตรียมตัวดูดซับซิลิกาจากเถ้าแกลบ.วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- ปรินทร เต็มญารศิลป์. การเตรียมและการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์จากไม้ตอง และไม้พม่าจู้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2551.
- มานพ ตีระรัตนสมโภช. การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เฝ้าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- รติกร อลงกรณ์โชติกุล. ไบโอดีเซล (Biodiesel). [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: http://www.dss.go.th/dss.go.th/deeweb/st-articles/files/cp_3_2549_biodiesel.pdf [23 กุมภาพันธ์ 2553].
- รวินทร์ สุทธะนันท์ และโกวิทย์ ปิยะมังคลา. จลนศาสตร์การดูดซับเมทิลีนบลูโดยใช้เปลือกถั่วลิสง. ใน งานประชุมวิชาการเทคโนโลยี และนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน, 28- 29 มกราคม 2551 ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2551.
- วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. กรมวิทยาศาสตร์บริการ. ประมวลสารสนเทศพร้อมใช้เทคโนโลยีและกระบวนการผลิตไบโอดีเซล [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR13.pdf> [15 ธันวาคม 2553]
- วีรานุช หลาง, ชมวรรณ เดชมา, วันวิสาข์ นูรณ์บริรักษ์ และสาโรจน์ ศิริคันสนียกุล.แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและการคายสารอนิลีนฟีนอลด้วยเส้นใยราไรโซวิตที่เจริญและถูกตรึงในเม็ดไคโตซาน. Environment and Natural Resources Journal. 7, 2 (2551) : 82-97.
- สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. ระบบบำบัดน้ำเสีย (Wastewater treatment system).กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป, 2549
- สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. การผลิตและการตรวจสอบมาตรฐานไบโอดีเซลเบื้องต้น [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.tistr.or.th/tistre/soure/tistrecho/bio200712.pdf> [25 ธันวาคม 2553]
- ควบคุมมลพิษ, กรม. สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. แกลบ...วัสดุเหลือใช้ที่ไม่ไร้ประโยชน์ [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://wqm.pcd.go.th/km/images/stories/agriculture/chaff.pdf> [17 มีนาคม 2554]

ศรีไฉล ชุนทน, สุพิณ ต่างวิวัฒน์ และ โสภณ เริงสำราญ. ประโยชน์ของซีเถ้าแก่ลบต่อการผลิต ซิลิกาเจลดูดความชื้น. Journal of Metals, Material and Minerals 7, 1 (1997) : 21–30.

อุไรวรรณ มณีโชติ. การใช้ส่าห่วยฝักกาดเป็นตัวดูดซับสารประกอบฟีนอลในน้ำเสียจากโรงงานไม้ ยางพารา. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2551.

ภาษาอังกฤษ

Atadashi, I.M., Aroua, M K., and Aziz, A.A. High quality biodiesel and its diesel engine application: A review. Renewable & Sustainable Energy Reviews 14, 7 (2010) : 1999–2008.

Atadashi, I.M., Aroua, M.K., and Aziz, A.A. Biodiesel separation and purification: A review. Renewable Energy 36 (2011) : 437–443.

Atadashi, I.M., Aroua, M.K., Aziz, A.A., and Sulaiman, N.M.N. Refining technologies for the purification of crude biodiesel. Applied Energy 88 (2011) : 4239–4251.

Balat, M. Potential alternatives to edible oils for biodiesel production– A review of current work. Energy Conversion and Management 52 (2011) : 1479–1492.

Balat, M., and Balat, H. Progress in biodiesel processing Applied Energy 87 (2010) : 1815–1835.

Berrios, M., and Skelton, R.L. Comparison of purification methods for biodiesel. Chemical Engineering Journal 144 (2008) : 459-465.

Berrios, M., Martn, M.A., Chica, AF., and Martn, A. Purification of biodiesel from used cooking oils. Applied Energy 88 (2011) : 3625–3631.

Buekens, A., and Zyaykina, N.N. Adsorbents and adsorption processes for pollution control. Pollution control Technologies Vol II (2006)

Chatterji, S. Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates. Cement & Concrete Concrete Composites 27 (2005) : 788–795.

Demirbas, A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. Energy Conversion and Management 50, 1 (2009) : 14-34.

Demirbas, M.F., Balat, M., and Balat, H. Potential contribution of biomass to the sustainable energy development. Energy Conversion and Management 50 (2009) : 1746–1760.

- Dugan, J. A dry wash approach to biodiesel purification [online]. 2007. Available from: <http://www.biodieselmagazine.com/articles/1918/a-dry-wash-approach-to-biodiesel-purification/> [2011, November 01]
- Ferella, F., Celso, G.M.D, Michelis, I.D., Stanisci, V., and Veglio, F. Optimization of the transesterification reaction in biodiesel production. Fuel 89 (2010) : 36–42.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The market and food security implications of the development of biodiesel production. FAO committee on commodity problems sixth – seventh session, Rome.(2009, April 20 – 22).
- Gomez, J.G., Garcia, A.M., Diez, M.A.D., Garcia, C.G. and Rey, E.S. Preparation and characterization of activated carbons from impregnation pitch by ZnCl₂. Applied Surface Science 252 (2006) : 5976–5979.
- Gomes, M.C.S., Arroyo, P.A., and Pereira, N.C. Biodiesel production from degummed soybean oil and glycerol removal using ceramic membrane. Journal of Membrane Science 378 (2011) : 453–461.
- Gui, M.M., Lee, K.T., and Bhatia, S. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. Energy 33 (2008) : 1646–1653.
- Guo, Y., Qi, J., Yang, S., Yu, K., Wang, Z., and Xu, H. Adsorption of Cr (VI) on micro-and mesoporous rice husk-based activated carbon. Materials Chemistry and physics. 78 (2002) : 96–101.
- Hajek, M., and Skopal, F. Treatment of glycerol phase formed by biodiesel production. Bioresource Technology 101 (2010) : 3242–3245.
- Hayafuji, S., Shimidzu, T., Oh, S., and Zaima, H. Method and apparatus for producing diesel fuel oil from waste edible oil. US patent on 5972,057; 1999.
- Hsu, S.T., and Pan T.C. Adsorption of paraquat using methacrylic acid – modified rice husk. Bioresource Technology 98 (2007) : 3617–3621.
- Indian Institute of Science Precipitated Silica Technology (IPSIT). Precipitated Silica from Rice Husk Ash [online]. 2011. Available from: <http://cgpl.iisc.emet.in/Site/Portals/0/Technologies/PrecipitatedSilica.pdf> [2011, August 26]

- Johar, N., Ahmad, I., and Dufresne, A. Extraction, preparation and characterization of cellulose fibres and nanocrystals from rice husk. Industrial Crops and Products 37 (2012) : 93–99.
- Karam, R., Karboune, S., St-Louis, R., and Kermasha, S. Lipase-catalyzed acidolysis of fish liver oil with dihydroxyphenylacetic acid in organic solvent media. Process Biochem 44 (2009) : 1193–1199.
- Keera, S.T., El Sabagh, S.M., and Taman, A.R. Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using alkaline catalyst. Fuel 90 (2011) : 42–47.
- Kim, M., Yoon, S.H., Choi, E., and Gil, B. Comparison of the adsorbent performance between rice hull ash and rice hull silica gel according to their structural differences. LWT 41 (2008) : 701–706.
- Kind, T. InChIkey–The InChI hash code released. [online]. 2009. Available from: fiehnlab.ucdavis.edu/staff/kind/InChIKey [2010, August 25]
- Knothe, G. Biodiesel and renewable diesel: A comparison. Progress in Energy and Combustion Science 36 (2010) : 364–373.
- Knothe, G. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. Fuel Process Technol 86 (2005) : 1059–1070.
- Leung, D.Y.C., Wu, X., and Leung M.K.H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. Applied Energy 87 (2010) : 1083–1095.
- Liou, T.H. Preparation and characterization of nano-structured silica from rice husk. Materials Science and Engineering A364 (2004) : 313–323.
- Liou, T.H., and Wu, S.J. Characteristics of microporous/ mesoporous prepared from rice husk under base- and acid- treated conditions. Journal of Hazardous Materials 171 (2009) : 693–703.
- Liu, S., Musuku, S.R., Adhikari, S. and Fernando, S. Adsorption of glycerol from biodiesel washwaters. Environmental Technology 30, 5 (April 2009) : 505–510.
- Liu, Y. et al. A sustainable route for the preparation of activated carbon and silica from rice husk ash. Journal of Hazardous Materials 186 (2011) : 1314–1319.

- Marchetti, J.M., Miguel, V.U., and Errazu, A.F. Possible methods for biodiesel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) : 1300–1311.
- Mazzieri, V.A., Vera, C.R. and Yori, J.C. Adsorption of silica gel for biodiesel refining. Energy & Fuels 22 (2008) : 4281-4284.
- Ndazi, B.S., Karlsson, S., Tesha, J.V., and Nyahumwa, C.W. Chemical and physical modifications of rice husks for use as composite panels. Composites; Part A 38 (2006) : 925–935.
- Pimentel, D. et al. Biofuel impacts on world food supply: use of fossil fuel, land and water resources. Energies 1 (2008) : 41-78.
- Predojevic, ZJ. The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps. Fuel 87 (2008) : 3522-3528.
- Puziy, A.M., Poddubnaya, O.I., Martinez-Alonso, A., Suarez-Garcia, F., and Tascon J.M.D. Synthetic carbons activated with phosphoric acid II. Porous structure. Carbon 40 (2002) : 1507-1519.
- Valchev, I., Lasheva, V., Tzolov, Tz., And Josifov, N. Silica products from rice hulls. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy 44, 3 (2009) : 257-261.
- Vejayakumaran, P., Rahman, I.A., Sipaut, C.S., Ismail, J. and Chee, C.K. Structural and thermal characterizations of silica nanoparticles grafted with pendant maleimide and epoxide groups. Journal of Colloid and Interface Science 328 (2008) : 81-91.
- Sharma, Y.C., Singh, B., and Upadhyay, S.N. Advancements in development and characterization of biodiesel: A review. Fuel 87 (2008) : 2355-2373.
- Sheedlo, M. A review of the processes of biodiesel production. MMG 445 Basic Biotechnol 4 (2008) : 61–65.
- Shelke, V.R., Bhagade, S.S., and Mandavgane, S.A. Mesoporous silica from rice husk ash. Bulletion of Chemical Reaction Engineering & Catalysis 5, 2 (2010)
- Sun, L., and Gong, K. Reviews silicon-based materials from rice husks and their applications. Ind. Eng. Chem. Res. 40 (2001) : 5861–5877.

Walter, J. and Weber, Jr. ADSORPTION PROCESSES [online]. 1998. Available from :
<http://readpdf.net /adsorption-processes.html> [2010, April 15]

Yusuf, N.N.A.N., Kamarudin, S.K., and Yaakub, Z. Overview on the current trends in
biodiesel production. Energy Conversion and Management 52 (2011) : 2741–2751.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์

ก.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

การวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับไอโอดีน โดยสมมติว่าไอโอดีนเป็นสารพิษในน้ำ ตามวิธี มีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังนี้

1. เครื่องมือ

- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- เตาอบอุณหภูมิ 110 - 150 °C
- โถดูดความชื้น
- ขวดสีชา
- บิวเรตขนาด 50 mL
- ขวดปริมาตรรูปชมพู่ ขนาด 250 mL พร้อมจุกปิด
- บีเกอร์ขนาด 50 และ 250 mL
- กระจกตวงปริมาตร ขนาด 100 และ 500 mL
- กรวยกรอง
- ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 mL
- ปิเปตขนาด 5, 10, 25, 50 และ 100 mL
- กระดาษกรองเบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 150 mm

2. สารเคมี

2.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

เตรียมโดย ผสม Conc. HCl จำนวน 70 mL ในน้ำกลั่น 550 mL เขย่าผสมให้เข้ากัน

2.2 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไอโอเดต (KIO₃) ความเข้มข้น 0.1000N

เตรียมโดยอบ KIO₃ ที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนัก 3.5667 ± 0.1 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาณ 100 mL ถ่ายสารละลายลงขวดปริมาตรขนาด 1000 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 mL

2.3 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ความเข้มข้น 0.100N

เตรียมโดย ชั่งน้ำหนัก $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 24.820 กรัม ละลายน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด 75 ± 25 mL เติมโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) จำนวน 0.10 ± 0.01 กรัม ถ่ายสารละลายลงขวดปริมาตรขนาด 1000 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 mL เก็บสารละลายในขวดสีชา ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน ก่อนทำการทดลองควรตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

2.4 สารละลายมาตรฐานไอโอดีน ความเข้มข้น 0.100N

เตรียมโดย ชั่งน้ำหนักไอโอดีน 12.7 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดด์ (KI) 19.1 กรัม ผสมให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่น 50 mL ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง คนเป็นระยะเพื่อให้สารทั้ง 2 ชนิดละลาย ถ่ายสารละลายลงขวดปริมาตรขนาด 1000 mL เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1000 mL เก็บสารละลายในขวดสีชา และตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนด้วยสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ความเข้มข้น 0.100N

2.5 สารละลายแป้ง

เตรียมโดยชั่งน้ำหนักแป้งมันจำนวน 1.0 กรัม ในน้ำเย็น 5 – 10 mL คนให้ละลายและเติมน้ำกลั่นเพิ่มอีก 25 ± 5 mL เทลงน้ำเดือด 1 L ต้มต่อให้เดือดอีก 4 – 5 นาที น้ำแป้งที่เตรียมได้ควรใช้ให้หมดภายใน 1 วัน

3. การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย

3.1 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

ปิเปตสารละลาย KIO_3 25 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ ชั่งน้ำหนัก KI จำนวน 2.0 กรัม เติมในสารละลาย เขย่าจะละลาย เติม Conc. HCl 5 mL ไทเทรตทันทีด้วยสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.100N จนสีของสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้จุดยุติ) หยดน้ำแป้ง 2-3 หยด สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนสารละลายเปลี่ยนสีเป็นใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ ทำการตรวจสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จากสมการที่ ก.1

$$N_1 = \frac{(P \times R)}{S} \quad (\text{ก.1})$$

- เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)
 P = ปริมาตรของสารละลาย KIO_3 (mL)
 R = ความเข้มข้นของสารละลาย KIO_3 (N)
 S = ปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)

3.2 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ปิเปตสารละลายไอโอดีน 25 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ไทเทรตทันทีด้วยสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.100N จนสีของสารละลายไอโอดีนเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้จุดยุติ) หยดน้ำแป้ง 2-3 หยด สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ไทเทรตต่อจนสารละลายเปลี่ยนสีเป็นใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ ทำการตรวจสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ จากสมการที่ ก.2

$$N_2 = \frac{(S \times N_1)}{L} \quad (\text{ก.2})$$

- เมื่อ N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน (N)
 S = ปริมาตรของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ (mL)
 N_1 = ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (N)
 L = ปริมาตรสารละลายไอโอดีน (mL)

4. วิธีการหาค่าไอโอดีนนมเบอร์

4.1 บดถ่านกัมมันต์ที่ต้องการทดสอบค่าไอโอดีนนมเบอร์ จนได้ขนาดที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 100 mesh ได้ 95% และสามารถผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ 325 mesh ได้ 60%

4.2 นำถ่านกัมมันต์ที่ได้บดไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 – 120°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น

4.3 ชั่ง และบันทึกน้ำหนักถ่านกัมมันต์ (ด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง) ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL

หมายเหตุ ต้องชั่งน้ำหนัก 3 ค่า เพื่อให้ได้ค่า C มีค่าน้อยกว่า เท่ากับ และมากกว่า 0.02

4.4 ปิเปตสารละลาย 5% HCl จำนวน 10 mL ใส่ขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ปิดจุกเขย่าเบาๆ เพื่อสารละลายสัมผัสตัวอย่างอย่างทั่วถึง เปิดจุกตั้งบน hot plant ในตู้ดูดควัน จนสารละลายเดือด

ประมาณ 30 ± 2 วินาที เพื่อกำจัดเถ้าหรือซัสเฟอรออกจากผิวถ่านกัมมันต์ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

4.5 ปิเปตสารละลายมาตรฐานไอโอดีน 0.001N จำนวน 100 mL ใส่ขวดรูปชมพูปิดจุกขวดทันที เขย่าอย่างแรงเป็นเวลา 30 ± 1 วินาที เปิดจุกกรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 โดยทิ้งสารละลาย 5 mL แรก เพื่อป้องกันการปนเปื้อน

4.6 ปิเปตสารละลายที่ผ่านการกรอง 50 mL ใส่ขวดรูปชมพู่ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.100N จนสารละลายเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองอ่อน เติมน้ำแบ่ง 2 mL ไทเทรตต่อจนสารละลายสีจากสีน้ำเงินเป็นใสไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้

4.7 คำนวณความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนหลังการดูดซับโดยตัวดูดซับ (C) จากสมการ ก.3

$$C = \frac{(N_2 \times S)}{F} \quad (\text{ก.3})$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนหลังการดูดซับ (mL)

N_2 = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (mL)

S = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ (mL)

F = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานไอโอดีนที่ใช้ (mL)

ค่า C ที่คำนวณต้องมีค่าอยู่ในช่วง 0.008–0.0334 N ถ้าไม่อยู่ในช่วงดังกล่าวต้องทำการทดลองซ้ำ โดยการเปลี่ยนน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง โดยถ้าค่า C น้อยกว่าที่กำหนดต้องลดปริมาณถ่านกัมมันต์ตัวอย่างลง แต่ถ้าค่า C มากกว่าที่กำหนดต้องเพิ่มปริมาณถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง จนได้ค่า C อยู่ในช่วงดังกล่าว

4.8 คำนวณหาค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) จากสมการ ก.4

$$\frac{X}{M} = A - \frac{(2.2B \times S)}{M} \quad (\text{ก.4})$$

เมื่อ X/M = ค่าการดูดซับจำเพาะ (mg/g)

A = $N_1 \times 12693.0$

B = $N_2 \times 126.93$

S = ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ใช้ (mL)

M = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ตัวอย่าง (g)

นำค่า X/M ที่ได้ทั้ง 3 ค่า สร้างกราฟระหว่างแกน X คือ log C แกน y คือ log [X/M] ได้เส้นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ตำแหน่งที่ C = 0.02 หรือ log C = 1.699 ทำให้ทราบค่าบนแกน y โดยสมมติให้เท่ากับ Y นำค่าที่ได้คำนวณหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (I₂ No.) ดังสมการ ก.5

$$I_2 \text{ No.} = 10^Y \quad (\text{ก.5})$$

ตารางที่ ก.1 นำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (ASTM)

| M (g) | | | | M (g) | | | |
|-------|----------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|
| E | C = 0.01 | C = 0.02 | C = 0.03 | E | C = 0.01 | C = 0.02 | C = 0.03 |
| 300 | 3.766 | 3.300 | 2.835 | 1550 | 0.729 | 0.639 | 0.549 |
| 350 | 3.228 | 2.829 | 2.430 | 1600 | 0.706 | 0.619 | 0.531 |
| 400 | 2.824 | 2.475 | 2.126 | 1650 | 0.684 | 0.600 | 0.515 |
| 450 | 2.510 | 2.200 | 1.890 | 1700 | 0.664 | 0.582 | 0.500 |
| 500 | 2.259 | 1.980 | 1.701 | 1750 | 0.645 | 0.566 | 0.486 |
| 550 | 2.054 | 1.800 | 1.546 | 1800 | 0.625 | 0.550 | 0.472 |
| 600 | 1.883 | 1.650 | 1.417 | 1850 | 0.610 | 0.535 | 0.460 |
| 650 | 1.738 | 1.523 | 1.308 | 1900 | 0.594 | 0.521 | 0.447 |
| 700 | 1.614 | 1.414 | 1.215 | 1950 | 0.579 | 0.508 | 0.460 |
| 750 | 1.506 | 1.320 | 1.134 | 2000 | 0.565 | 0.495 | 0.425 |
| 800 | 1.412 | 1.237 | 1.063 | 2050 | 0.551 | 0.483 | 0.415 |
| 850 | 1.329 | 1.164 | 1.000 | 2100 | 0.538 | 0.471 | 0.405 |
| 900 | 1.255 | 1.100 | 0.945 | 2150 | 0.525 | 0.460 | 0.396 |
| 950 | 1.189 | 1.0442 | 0.895 | 2200 | 0.513 | 0.450 | 0.386 |
| 1000 | 1.130 | 0.990 | 0.850 | 2250 | 0.502 | 0.440 | 0.378 |
| 1050 | 1.076 | 0.943 | 0.810 | 2300 | 0.491 | 0.430 | 0.370 |
| 1100 | 1.027 | 0.943 | 0.810 | 2350 | 0.481 | 0.421 | 0.362 |
| 1150 | 0.982 | 0.861 | 0.739 | 2400 | 0.471 | 0.412 | 0.354 |

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ (ASTM)

| M (g) | | | | M (g) | | | |
|-------|----------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|
| E | C = 0.01 | C = 0.02 | C = 0.03 | E | C = 0.01 | C = 0.02 | C = 0.03 |
| 1200 | 0.941 | 0.825 | 0.709 | 2450 | 0.461 | 0.404 | 0.347 |
| 1250 | 0.904 | 0.792 | 0.680 | 2500 | 0.452 | 0.396 | 0.340 |
| 1300 | 0.869 | 0.761 | 0.654 | 2550 | 0.443 | 0.386 | 0.333 |
| 1350 | 0.837 | 0.733 | 0.630 | 2600 | 0.434 | 0.381 | 0.327 |
| 1400 | 0.807 | 0.707 | 0.607 | 2650 | 0.426 | 0.374 | 0.321 |
| 1450 | 0.779 | 0.683 | 0.586 | 2700 | 0.418 | 0.367 | 0.315 |
| 1500 | 0.753 | 0.660 | 0.567 | 2750 | 0.411 | 0.360 | 0.309 |

ก.2 วิธีวิเคราะห์ค่าการดูดซับเมทิลีนบลูของถ่านกัมมันต์

วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับสีน้ำเงินในน้ำ ตามวิธี JIS 1470-1975 มีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. เครื่องมือที่ใช้

- เครื่องเขย่าตามแนวราบ
- เครื่องวัดการดูดกลืนแสง
- เครื่องเซนติฟิวจ์

2. วิธีเตรียมสารละลาย

2.1 การเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution)

- อบโปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที

- ชั่งมา 9.0 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 mL ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้ คือ A

- อบโซเดียมโมโนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) ให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที

- ชั่งมา 23.88 กรัม แล้วละลายด้วยน้ำกลั่นให้มีปริมาตรรวมเป็น 1,000 mL ด้วยขวดวัดปริมาตร สารละลายที่ได้นี้คือ B

- นำสารละลาย A จำนวน 400 มิลลิลิตรผสมกับสารละลาย B จำนวน 600 mL กวนให้เข้ากัน จะได้สารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7

3. สารละลายเมทิลีนบลู

3.1 การเตรียม

อบสารเมทิลีนบลูให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที ชั่งมา 1.2060 กรัม (สมมุติว่ามีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5) ละลายด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ในข้อ 1. จนมีปริมาตรเป็น 4,000 mL สารละลายที่ได้นี้มีความเข้มข้น 0.3000 mg/g กวนสารละลายอย่างน้อย 3 วัน ก่อนนำไปใช้

3.2 วิธีสร้างกราฟมาตรฐาน

ดูดสารละลายเมทิลีนบลูที่เตรียมได้ มา 5.0 mL เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 50 mL ให้สารละลายนี้คือ M ซึ่งมีความเข้มข้น 0.3000 มิลลิกรัมต่อกรัม เจือจางสารละลาย M ให้มีความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้

ดูดมา 1.0 mL เจือจางเป็น 100 mL ความเข้มข้น = 0.00030 mg/mL

ดูดมา 1.5 mL เจือจางเป็น 100 mL ความเข้มข้น = 0.00045 mg/mL

ดูดมา 2.0 mL เจือจางเป็น 100 mL ความเข้มข้น = 0.00060 mg/mL

ดูดมา 2.5 mL เจือจางเป็น 100 mL ความเข้มข้น = 0.00075 mg/mL

ดูดมา 3.0 mL เจือจางเป็น 100 mL ความเข้มข้น = 0.00090 mg/mL

วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 nm บันทึกค่าการดูดกลืนแสง แล้วนำไปสร้างกราฟระหว่างแกนราบคือ ความเข้มข้นในหน่วย 100 mg/mL แกนตั้งฉากคือ ค่าการดูดกลืน จะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $\tan \theta$

หมายเหตุ ค่า $\tan \theta$ เป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของสารละลายที่เตรียมได้ ในการทดลองนี้กำหนดว่าค่าดังกล่าวต้องอยู่ในช่วง 2.0 ถึง 2.2 เท่านั้น ถ้าไม่ได้ค่าตามนี้ให้ถือว่าสารละลายที่เตรียมมาใช้ไม่ได้

3.3 วิธีวิเคราะห์

- บดและคัดขนาดตัวอย่างให้ละเอียดน้อยกว่า 250 μm (No. 60)
- อบตัวอย่างให้แห้งที่อุณหภูมิ 110-120 °C นาน 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้นนาน 20 นาที
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักเท่ากับ D ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4 (คือ มีความละเอียด 0.1 mg) ในขวดชมพูขนาด 300 mL ซึ่งมีจุกปิด
- ใส่สารละลายเมทธิลีนบลู 50 mL ปิดจุกแล้วเขย่าแรงๆ 10 วินาที สังเกตดูว่าสีของสารละลายเจือจางหรือไม่ ถ้าเจือจางให้ใส่สารละลายเมทธิลีนบลูลงไปอีก ครึ่งละ 50 mL
- เมื่อสีของสารละลายไม่เจือจาง ให้ใส่สารละลายเพิ่มอีก 50 mL เพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายที่จุดสมดุลของการดูดซับเท่ากับ 0.3 mg/g แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 2,500 รอบต่อนาที นาน 30 นาที
- เทสารละลายส่วนบนลงในหลอดเซนติฟิวจ์ แล้วนำไปเซนติฟิวจ์ด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที
- ดูดสารละลายส่วนบนมา 0.5 mL เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 100 mL (ค่าคงที่ของการเจือจาง, $C = 100/0.5 = 200$) ถ้าวัดการดูดกลืนแสง แล้วอยู่นอกช่วงของกราฟมาตรฐาน ให้เพิ่มปริมาตรหลังการเจือจาง เช่น เจือจางเป็น 200 mL ($C = 400$) เป็นต้น
- วัดค่าการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 663 nm

ค่าการดูดกลืนแสง (Methylene blue adsorption, MB) (มิลลิกรัมต่อกรัม) คำนวณได้จาก

$$\text{MB (mg/g)} = [0.3000A/D] - [ABC/100D \tan \theta]$$

โดย A = ปริมาตรของสารละลายเมทธิลีนบลูที่ใช้ตอนเริ่มต้น, mL

B = ค่าการดูดกลืนแสง

C = ค่าคงที่ของการเจือจาง = 200 (หรือ 400)

ก.3 การวิเคราะห์หาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (alkaline catalyst) และกลีเซอรินคงเหลือ

1. สารเคมี

1.1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1000 N

เตรียมโดย ปิเปต Conc. HCl จำนวน 0.83 mL ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 ml ปรับปริมาตรให้ได้ 1000 mL ด้วยน้ำกลั่น

1.2 อินดิเคเตอร์ ฟีนอลเรด (phenolphthalein) 1%

เตรียมโดย ชั่งน้ำหนักฟีนอลเรดจำนวน 0.25 กรัม ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 mL เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) 50 mL เขย่าให้ละลาย และปรับปริมาตรให้เป็น 250 mL ด้วยน้ำกลั่น

1.3 อินดิเคเตอร์โบรโมฟีนอลบลู 1%

ชั่งน้ำหนักโบรโมฟีนอลบลู 0.1 กรัม ใส่ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 mL และปรับปริมาตรให้เป็น 250 mL ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

2. วิธีการหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (alkaline catalyst) และกลีเซอรินที่คงเหลือ

2.1. ชั่งน้ำหนักไบโอดีเซล (ไบโอดีเซลยังไม่ผ่านการดูดซับ เท่ากับ 5 กรัม และไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับ เท่ากับ 10 กรัม) ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL

2.2. เติมน้ำละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) จำนวน 100 mL เขย่าให้เข้ากัน

2.3. เติมอินดิเคเตอร์ ฟีนอลเรด (phenol red) 1 mL ไทเทรตชันที่ด้วย 0.1000 N HCl จนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีส้มเป็นสีเหลือง จดปริมาตรกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ (A)

2.4. เติมอินดิเคเตอร์ โบรโมฟีนอลบลู (bromophenol blue) ไทเทรตชันที่ด้วย 0.1000 N HCl จนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีฟ้าเป็นสีเหลือง จดปริมาตรกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ (B)

3. วิธีการคำนวณหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (alkaline catalyst) และกลีเซอรินคงเหลือ

3.1 วิธีการคำนวณหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (alkaline catalyst) คงเหลือ จากสมการ ก.6

$$\text{ปริมาณ alkaline catalyst} = \frac{(A \times 0.01 \text{ N HCl} \times 40.0)}{M \times 1000} \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ (mL)

M = น้ำหนักไบโอดีเซล (กรัม)

3.2 วิธีการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือ จากสมการ ก.7

$$\text{ปริมาณกลีเซอริน} = \frac{(B \times 0.01 \text{ N HCl} \times 303.4)}{M \times 1000} \quad (\text{ก.7})$$

เมื่อ B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ (mL)

M = น้ำหนักโบไดเซิล (กรัม)

ก.4 การวิเคราะห์หาปริมาณความเป็นกรด (acid value)

1. สารเคมี

1.1 สารละลายอินดิเคเตอร์ p – naphtholbenzein 1%

เตรียมโดย ชั่งน้ำหนัก p – naphtholbenzein ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรให้ได้ 100 mL โดยเติมสารละลายสำหรับการไทเทรต (titration solvent) เขย่าให้เข้ากัน

1.2 สารละลาย alcoholic KOH ความเข้มข้น 0.1 M

เตรียมโดย ชั่งน้ำหนัก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จำนวน 0.6 กรัม ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรให้ได้ 100 mL โดยเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เขย่าให้เข้ากัน

ตรวจสอบความเข้มข้นโดย

- ชั่งน้ำหนัก KHP จำนวน 0.2 กรัม (จดน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรให้ได้ 100 mL โดยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน (สารละลายมาตรฐาน)

- ปิเปตสารละลาย KHP จำนวน 25 mL เติมอินดิเคเตอร์ ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) จำนวน 6 หยด ไทเทรตทันทีด้วยสารละลาย alcoholic KOH จนสารละลายเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีชมพู จดปริมาตรสารละลาย alcoholic KOH ที่ใช้

การคำนวณความเข้มข้นของสารละลาย alcoholic KOH จากสมการ ก.8 และ ก.9

$$C_1 = \frac{g}{M} \times \frac{1000}{V} \quad (\text{ก.8})$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของสารละลาย KHP (M)

g = น้ำหนักของ KHP (g)

M = โมเลกุลของ KHP เท่ากับ 204.23

V = ปริมาตรของสารละลาย KHP ที่เตรียม (100 mL)

$$C_2 = \frac{C_1 V_1}{V_2} \quad (\text{ก.9})$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของสารละลาย KHP (M)

V_1 = ปริมาตรของสารละลาย KHP (25 mL)

C_2 = ความเข้มข้นของสารละลาย alcoholic KOH (M)

V_2 = ปริมาตรของสารละลาย alcoholic KOH (mL)

1.3 สารละลายสำหรับการไทเทรต (titration solvent)

เตรียมโดยผสมทูลูอีน (toluene) จำนวน 250 mL กับไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จำนวน 247.5 mL และปรับปริมาตรให้ 1000 mL โดยน้ำกลั่น 25 mL เขย่าให้เข้ากัน

2. วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณความเป็นกรด (acid value)

2.1 ชั่งน้ำหนักไบโอดีเซล 1 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL เติมสารละลายไทเทรต จำนวน 25 mL

2.2 เติมอินดิเคเตอร์ p - naphtholbenzein 1% จำนวน 0.125 mL เขย่าให้เข้ากัน ไทเทรตทันทีด้วยสารละลาย alcoholic KOH จนสารละลายเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียว จดปริมาตรของสารละลาย alcoholic KOH ที่ใช้ (A)

2.3 ทำ blank โดยเติมสารละลายไทเทรตจำนวน 25 mL เติมอินดิเคเตอร์ p-naphtholbenzein 1% จำนวน 0.125 mL เขย่าให้เข้ากัน ไทเทรตทันทีด้วยสารละลาย alcoholic KOH จนสารละลายเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียว จดปริมาตรของสารละลาย alcoholic KOH ที่ใช้ (B)

2.4 คำนวณปริมาณความเป็นกรด (acid value) จากสมการ ก.10

$$\text{Acid value} = \frac{[(A - B) \times M \times 56.1]}{W} \quad (\text{ก.10})$$

เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลาย alcoholic KOH ที่ใช้กับตัวอย่าง (mL)

B = ปริมาตรของสารละลาย alcoholic KOH ที่ใช้กับ blank (mL)

M = ความเข้มข้นของสารละลาย alcoholic KOH (M)

W = น้ำหนักไบโอดีเซล (กรัม)

ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์ และคำนวณ

ข.1 ผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองหาค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

| ตัวอย่าง | ความเข้มข้น ของ Na ₂ S ₂ O ₃ | ความ เข้มข้นของ I ₂ | A | B | น้ำหนัก ถ่านกัมมันต์ | ปริมาตร ของ Na ₂ S ₂ O ₃ | C | X/M (mg/g) | Log (C) | Log (X/M) | I ₂ No. (mg/g) |
|----------|---|--------------------------------------|----------|----------|-------------------------|---|---------|---------------|---------|-----------|------------------------------|
| 4:1 | 0.100806 | 0.09637 | 1223.224 | 12.79530 | 1.8836 | 11.3 | 0.02278 | 480.6867 | -1.6424 | 2.6819 | 468.78 |
| | | | | | 1.6310 | 14.6 | 0.02943 | 491.9680 | -1.5311 | 2.6919 | |
| | | | | | 1.4170 | 17.3 | 0.03487 | 519.5731 | -1.4574 | 2.7156 | |
| 1:1 | 0.100806 | 0.09637 | 1223.224 | 12.79530 | 1.6450 | 6.9 | 0.01391 | 546.2319 | -1.8566 | 2.7374 | 579.60 |
| | | | | | 1.467 | 9.9 | 0.01995 | 572.3114 | -1.6998 | 2.7576 | |
| | | | | | 1.235 | 12.5 | 0.02520 | 614.8850 | -1.5986 | 2.7888 | |
| 1:2 | 0.100806 | 0.09637 | 1223.224 | 12.79530 | 1.487 | 7.0 | 0.01411 | 544.8244 | -1.8504 | 2.7363 | 600.10 |
| | | | | | 1.203 | 9.0 | 0.01814 | 587.6620 | -1.7412 | 2.7691 | |
| | | | | | 1.086 | 11.7 | 0.02358 | 630.7319 | -1.6273 | 2.7998 | |

ตาราง ข.2 ผลการทดลองของระยะเวลาการตั้งทิ้งไว้ต่อการตกตะกอนของกลีเซอริน

| เวลาตั้ง ทิ้งไว้ | ซ้ำ | น้ำหนัก ตัวอย่าง ไบโอดีเซล | ปริมาณ โทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|---------------------|-----|----------------------------------|------------------|--------------------|----------|------|
| 0 | 1 | 5.00 | 11.8 | 8396.472 | 8388.092 | 9.17 |
| | 2 | 5.01 | 11.8 | 8379.713 | | |
| 0.5 | 1 | 5.00 | 9.5 | 6759.872 | 6759.872 | 0 |
| | 2 | 5.00 | 9.5 | 6759.872 | | |
| 1 | 1 | 5.00 | 8 | 5692.524 | 5692.524 | 0 |
| | 2 | 5.00 | 8 | 5692.524 | | |
| 2 | 1 | 5.00 | 6.3 | 4482.862 | 4482.862 | 0 |
| | 2 | 5.00 | 6.3 | 4482.862 | | |
| 3 | 1 | 5.01 | 5.5 | 3905.798 | 3909.704 | 5.52 |
| | 2 | 5.00 | 5.5 | 3913.61 | | |
| 4 | 1 | 5.01 | 5.3 | 3763.769 | 3763.769 | 0 |
| | 2 | 5.01 | 5.3 | 3763.769 | | |
| 5 | 1 | 5.00 | 4.6 | 3273.201 | 3273.201 | 0 |
| | 2 | 5.00 | 4.7 | 3273.201 | | |
| 6 | 1 | 5.01 | 4.4 | 3124.639 | 3127.763 | 4.42 |
| | 2 | 5.00 | 4.4 | 3130.888 | | |
| 24 | 1 | 5.01 | 2.9 | 2059.421 | 2061.48 | 2.91 |
| | 2 | 5.00 | 2.9 | 2063.54 | | |

ตาราง ข.3 ผลการทดลองระยะเวลาการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและไบโอดีเซลมีผลต่อปริมาณกลีเซอรอลที่เหลือในไบโอดีเซล

| ชนิดตัวดูดซับ | เวลา | ซ้ำ | น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล | ปริมาณไทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|---------------|------|-----|--------------------------|--------------|-----------------|-----------|---------|
| crude | - | 1 | 5.02 | 10.2 | 6494.27 | 6500.7522 | 9.1660 |
| | | 2 | 5.01 | 10.2 | 6507.23 | | |
| conrol | 5 | 1 | 5.01 | 9.0 | 5741.68 | 5773.5749 | 45.1109 |
| | | 2 | 5.01 | 9.1 | 5805.47 | | |
| | 10 | 1 | 5.01 | 8.1 | 5167.51 | 5140.7145 | 37.8931 |
| | | 2 | 5.00 | 8.0 | 5113.92 | | |
| | 15 | 1 | 5.01 | 7.9 | 5039.92 | 5044.9561 | 7.1275 |
| | | 2 | 5.00 | 7.9 | 5050.00 | | |
| 4:1 | 5 | 1 | 10.02 | 7.3 | 2328.57 | 2328.5689 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.02 | 7.3 | 2328.57 | | |
| | 10 | 1 | 10.01 | 6.8 | 2171.24 | 2155.2797 | 22.5780 |
| | | 2 | 10.01 | 6.7 | 2139.31 | | |
| | 15 | 1 | 10.00 | 6.3 | 2013.61 | 2012.6002 | 1.4224 |
| | | 2 | 10.01 | 6.3 | 2011.59 | | |
| 1:1 | 5 | 1 | 10.00 | 4.0 | 1278.48 | 1278.4800 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.00 | 4.0 | 1278.48 | | |
| | 10 | 1 | 10.00 | 3.5 | 1118.67 | 1118.1112 | 0.7902 |
| | | 2 | 10.01 | 3.5 | 1117.55 | | |
| | 15 | 1 | 10.00 | 3.4 | 1086.71 | 1086.7080 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.00 | 3.4 | 1086.71 | | |
| 1:2 | 5 | 1 | 10.01 | 3.9 | 1245.27 | 1245.2727 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.01 | 3.9 | 1245.27 | | |
| | 10 | 1 | 10.00 | 3.4 | 1086.71 | 1086.1652 | 0.7677 |
| | | 2 | 10.01 | 3.4 | 1085.62 | | |

ตาราง ข.2 ผลการทดลองระยะเวลาการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและไบโอดีเซลมีผลต่อปริมาณกลีเซอรอลที่เหลือในไบโอดีเซล (ต่อ)

| ชนิดตัวดูดซับ | เวลา | ซ้ำ | น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล | ปริมาณไทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|---------------|------|-----|--------------------------|--------------|-----------------|-----------|--------|
| 1:2 | 15 | 1 | 10.01 | 3.2 | 1021.76 | 1021.7622 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.01 | 3.2 | 1021.76 | | |
| ซีลีกา | 5 | 1 | 10.00 | 4.0 | 1278.48 | 1278.4800 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.00 | 4.0 | 1278.48 | | |
| | 10 | 1 | 10.01 | 3.5 | 1117.55 | 1118.1112 | 0.7902 |
| | | 2 | 10.00 | 3.5 | 1118.67 | | |
| | 15 | 1 | 10.00 | 3.3 | 1054.75 | 1054.7460 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.00 | 3.3 | 1054.75 | | |

ตาราง ข.3 ผลการทดลองปริมาณของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซล

| ชนิดตัวดูดซับ | ร้อยละตัวดูดซับ | ซ้ำ | น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล | ปริมาณไทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|---------------|-----------------|-----|--------------------------|--------------|-----------------|---------|--------|
| crude | - | 1 | 5.00 | 14.6 | 8476.05 | 8476.05 | 0.0000 |
| | | 2 | 5.00 | 14.6 | 8476.05 | | |
| conrol | - | 1 | 5.00 | 8.0 | 4644.41 | 4644.41 | 0.0000 |
| | | 2 | 5.00 | 8.0 | 4644.41 | | |
| 4:1 | 1 | 1 | 10.01 | 8.5 | 2464.88 | 2466.11 | 1.7429 |
| | | 2 | 10.00 | 8.5 | 2467.34 | | |
| | 3 | 1 | 10.00 | 6.5 | 1886.79 | 1885.85 | 1.3328 |
| | | 2 | 10.01 | 6.5 | 1884.91 | | |
| | 5 | 1 | 10.00 | 5.0 | 1451.38 | 1450.65 | 1.0252 |
| | | 2 | 10.01 | 5.0 | 1449.93 | | |
| | 8 | 1 | 10.00 | 3.6 | 1044.99 | 1044.99 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.00 | 3.6 | 1044.99 | | |

ตาราง ข.3 ผลการทดลองปริมาณของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซล (ต่อ)

| ชนิดตัวดูดซับ | ร้อยละตัวดูดซับ | ซ้ำ | น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล | ปริมาณไทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|---------------|-----------------|-----|--------------------------|--------------|-----------------|---------|---------|
| | 10 | 1 | 10.00 | 2.6 | 754.72 | 754.34 | 0.5331 |
| | | 2 | 10.01 | 2.6 | 753.96 | | |
| 1:1 | 1 | 1 | 10.01 | 8.3 | 2406.88 | 2408.09 | 1.7019 |
| | | 2 | 10.00 | 8.3 | 2409.29 | | |
| | 3 | 1 | 10.01 | 4.3 | 1246.94 | 1247.56 | 0.8817 |
| | | 2 | 10.00 | 4.3 | 1248.19 | | |
| | 5 | 1 | 10.01 | 3.8 | 1101.95 | 1101.95 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.01 | 3.8 | 1101.95 | | |
| | 8 | 1 | 10.00 | 2.5 | 725.69 | 725.69 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.00 | 2.5 | 725.69 | | |
| | 10 | 1 | 10.00 | 1.4 | 406.39 | 406.18 | 0.2870 |
| | | 2 | 10.01 | 1.4 | 405.98 | | |
| 1:2 | 1 | 1 | 10.01 | 7.4 | 2145.90 | 2161.48 | 22.0429 |
| | | 2 | 10.00 | 7.5 | 2177.07 | | |
| | 3 | 1 | 10.00 | 3.7 | 1074.02 | 1087.98 | 19.7464 |
| | | 2 | 10.01 | 3.8 | 1101.95 | | |
| | 5 | 1 | 10.01 | 3.3 | 956.95 | 942.92 | 19.8489 |
| | | 2 | 10.00 | 3.2 | 928.88 | | |
| | 8 | 1 | 10.00 | 2.3 | 667.63 | 667.63 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.00 | 2.3 | 667.63 | | |
| | 10 | 1 | 10.01 | 1.4 | 405.98 | 391.48 | 20.5050 |
| | | 2 | 10.01 | 1.3 | 376.98 | | |
| ซีลีกา | 1 | 1 | 10.00 | 7.5 | 2177.07 | 2177.07 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.00 | 7.5 | 2177.07 | | |

ตาราง ข.3 ผลการทดลองปริมาณของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซล (ต่อ)

| ชนิดตัวดูดซับ | ร้อยละตัวดูดซับ | ซ้ำ | น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล | ปริมาณไทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|---------------|-----------------|-----|--------------------------|--------------|-----------------|---------|---------|
| ซิลิกา | 3 | 1 | 10.01 | 5.4 | 1565.92 | 1552.19 | 19.4183 |
| | | 2 | 10.00 | 5.3 | 1538.46 | | |
| | 5 | 1 | 10.01 | 4.8 | 1391.93 | 1392.63 | 0.9842 |
| | | 2 | 10.00 | 4.8 | 1393.32 | | |
| | 8 | 1 | 10.00 | 4.4 | 1277.21 | 1291.73 | 20.5256 |
| | | 2 | 10.00 | 4.5 | 1306.24 | | |
| | 10 | 1 | 10.01 | 3.6 | 1043.95 | 1043.95 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.01 | 3.6 | 1043.95 | | |

ตาราง ข.4 ผลการทดลองของปริมาณของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซลในสถานะไม่มีเมทานอล

| ชนิดตัวดูดซับ | ร้อยละตัวดูดซับ | ซ้ำ | น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล | ปริมาณไทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|---------------|-----------------|-----|--------------------------|--------------|-----------------|---------|--------|
| crude | - | 1 | 5.02 | 9.60 | 5704.07 | 5709.77 | 8.0506 |
| | | 2 | 5.01 | 9.60 | 5715.46 | | |
| control | - | 1 | 5.00 | 8.5 | 4785.7 | 4785.7 | 0 |
| | | 2 | 5.00 | 8.5 | 4785.7 | | |
| 1:2 | 0.5 | 1 | 10.01 | 0.20 | 59.60 | 59.63 | 0.0421 |
| | | 2 | 10.00 | 0.20 | 59.66 | | |
| | 1.0 | 1 | 10.00 | 0.10 | 29.83 | 29.83 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.00 | 0.10 | 29.83 | | |
| | 1.5 | 1 | 10.01 | 0.05 | 14.90 | 14.91 | 0.0105 |
| | | 2 | 10.00 | 0.05 | 14.91 | | |

ตาราง ข.4 ผลการทดลองของปริมาณของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซลในสถานะไม่มีเมทานอล (ต่อ)

| ชนิดตัวดูดซับ | ร้อยละตัวดูดซับ | ซ้ำ | น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล | ปริมาณไทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|---------------|-----------------|-----|--------------------------|--------------|-----------------|--------|--------|
| ซีลีกา | 0.5 | 1 | 10.01 | 0.10 | 29.80 | 29.81 | 0.0210 |
| | | 2 | 10.00 | 0.10 | 29.83 | | |
| | 1.0 | 1 | 10.01 | 0.10 | 29.80 | 29.80 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.01 | 0.10 | 29.80 | | |
| | 1.5 | 1 | 10.01 | 0.05 | 14.90 | 14.90 | 0.0000 |
| | | 2 | 10.01 | 0.05 | 14.90 | | |

ตาราง ข.5 ผลการทดลองของวิธีการคืนสภาพของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซล

| ชนิด | วิธีการคืนสภาพ | ครั้งที่ | ซ้ำ | น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล | ปริมาณไทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|--------------|-----------------|----------|-----|--------------------------|--------------|-----------------|---------|---------|
| crude | - | | 1 | 5.00 | 11.0 | 6562.06 | 6555.51 | 9.2616 |
| | | | 2 | 5.01 | 11.0 | 6548.96 | | |
| control | - | | 1 | 5.00 | 6.4 | 3817.93 | 3814.12 | 5.3885 |
| | | | 2 | 5.01 | 6.4 | 3810.31 | | |
| ถ่านกัมมันต์ | ล้างด้วยเมทานอล | 1 | 1 | 5.01 | 6.4 | 3810.31 | 2043.19 | 21.0912 |
| | | | 2 | 10.00 | 6.8 | 2028.27 | | |
| | | 2 | 1 | 10.00 | 6.9 | 2058.10 | 2177.41 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.3 | 2177.41 | | |
| | | 3 | 1 | 10.00 | 7.3 | 2177.41 | 2205.03 | 0 |
| | | | 2 | 10.01 | 7.4 | 2205.03 | | |
| | | 4 | 1 | 10.00 | 7.6 | 2266.89 | 2266.89 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.6 | 2266.89 | | |

ตาราง ข.5 ผลการทดลองของวิธีการคืนสภาพของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซล (ต่อ)

| ชนิด | วิธีการคืนสภาพ | ครั้งที่ | ซ้ำ | น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล | ปริมาณไทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|--------------|-----------------|----------|-----|--------------------------|--------------|-----------------|---------|----------|
| ถ่านกัมมันต์ | ล้างด้วยเมทานอล | 5 | 1 | 10.00 | 7.6 | 2266.89 | 2266.89 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.6 | 2266.89 | | |
| ซีลิกา | เผาที่ 700°C | 1 | 1 | 10.00 | 8.0 | 2386.204 | 2386.20 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 8.0 | 2386.204 | | |
| | | 2 | 1 | 10.00 | 7.5 | 2237.066 | 2237.07 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.5 | 2237.066 | | |
| | | 3 | 1 | 10.00 | 7.5 | 2237.066 | 2237.07 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.5 | 2237.066 | | |
| | | 4 | 1 | 10.00 | 7.4 | 2207.238 | 2222.15 | 21.09126 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.5 | 2237.066 | | |
| | | 5 | 1 | 10.00 | 7.6 | 2266.894 | 2266.89 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.6 | 2266.894 | | |
| | ล้างด้วยน้ำ | 1 | 1 | 10.00 | 7.7 | 2296.721 | 2296.72 | 0 |
| | | | | 10.00 | 7.7 | 2296.721 | | |
| | | 2 | 1 | 10.00 | 7.8 | 2326.549 | 2326.55 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.8 | 2326.549 | | |
| | | 3 | 1 | 10.00 | 7.8 | 2326.549 | 2326.55 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.8 | 2326.549 | | |
| | | 4 | 1 | 10.00 | 7.9 | 2356.376 | 2356.38 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.9 | 2356.376 | | |
| | | 5 | 1 | 10.00 | 7.9 | 2356.376 | 2356.38 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 7.9 | 2356.376 | | |

ตาราง ข.5 ผลการทดลองของวิธีการคืนสภาพของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซล (ต่อ)

| ชนิด | วิธีการคืนสภาพ | ครั้งที่ | ซ้ำ | น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล | ปริมาณไทเทรต | กลีเซอริน (ppm) | เฉลี่ย | SD |
|--------|-----------------|----------|-----|--------------------------|--------------|-----------------|---------|----------|
| ซีลีกา | ล้างด้วยเมทานอล | 1 | 1 | 10.00 | 5 | 1491.377 | 1476.46 | 21.09126 |
| | | | 2 | 10.00 | 4.9 | 1461.55 | | |
| | | 2 | 1 | 10.00 | 5.5 | 1640.515 | 1640.52 | 0 |
| | | | 2 | 10.00 | 5.5 | 1640.515 | | |
| | | 3 | 1 | 10.01 | 6.4 | 1907.056 | 1908.01 | 1.348492 |
| | | | 2 | 10.00 | 6.4 | 1908.963 | | |
| | | 4 | 1 | 10.00 | 6.4 | 1908.963 | 1908.01 | 1.348492 |
| | | | 2 | 10.01 | 6.4 | 1907.056 | | |
| | | 5 | 1 | 10.01 | 6.4 | 1907.056 | 1908.01 | 1.348492 |
| | | | 2 | 10.00 | 6.4 | 1908.963 | | |

ข.2 วิธีการคำนวณ

1. วิธีการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือ

$$\text{ปริมาณกลีเซอริน} = \frac{(B \times 0.01 \text{ N HCl} \times 303.4)}{M \times 1000}$$

เมื่อ B = ปริมาตรของ HCl ที่ใช้ (mL)

M = น้ำหนักไบโอดีเซล (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณ จากศึกษาผลของระยะเวลาทิ้งไว้ต่อตกตะกอนกลีเซอริน ที่เวลา 1 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณกลีเซอริน} &= \frac{(8.8 \times 0.011688 \times 303.4)}{5.00 \times 1000} \\ &= 5692.524 \text{ ppm} \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค

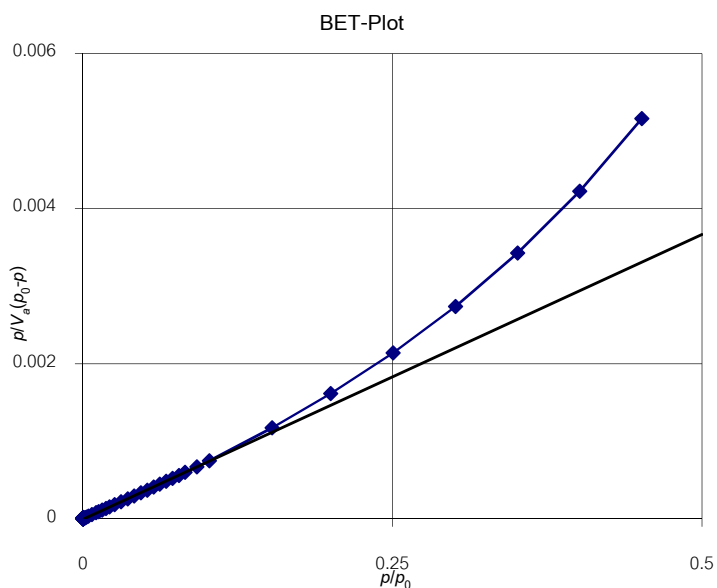
ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับจากแกลบ

ตารางที่ ค. 1 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการกระตุ้น

| | |
|---|---|
| Slope | 0.033126 |
| Intercept | 0.000095053 |
| Correlation coefficient | 0.9997 |
| V _m | 30.275 [cm ³ (STP) g ⁻¹] |
| C | 131.77 |
| Total pore volume (p/p ₀ =0.990) | 0.091324 [cm ³ g ⁻¹] |
| Average pore diameter | 2.7722 [nm] |

| No | p/p ₀ | p/V _a (p ₀ -p) | No | p/p ₀ | p/V _a (p ₀ -p) |
|----|------------------|--------------------------------------|----|------------------|--------------------------------------|
| 1 | 0.00015872 | 0.000013103 | 10 | 0.1311 | 0.0042174 |
| 2 | 0.0021048 | 0.00010738 | 11 | 0.1468 | 0.00475 |
| 3 | 0.010603 | 0.00041953 | 12 | 0.1617 | 0.0052522 |
| 4 | 0.02102 | 0.00074755 | 13 | 0.1818 | 0.0059734 |
| 5 | 0.041281 | 0.0013842 | 14 | 0.2213 | 0.0075185 |
| 6 | 0.056361 | 0.0018353 | 15 | 0.2515 | 0.0087814 |
| 7 | 0.070687 | 0.0022807 | 16 | 0.3011 | 0.011079 |
| 8 | 0.086141 | 0.0027729 | 17 | 0.3517 | 0.013789 |
| 9 | 0.1072 | 0.0034173 | 18 | 0.4016 | 0.016887 |
| | | | 19 | 0.4517 | 0.020488 |

| No | p/p_0 | $p/V_a(p_0-p)$ | No | p/p_0 | $p/V_a(p_0-p)$ |
|----|------------|----------------|----|----------|----------------|
| 8 | 0.00020516 | 5.7358E-06 | 37 | 0.025707 | 0.00018362 |
| 9 | 0.00020508 | 5.0879E-06 | 38 | 0.030826 | 0.00021971 |
| 10 | 0.000205 | 4.5647E-06 | 39 | 0.036222 | 0.00025793 |
| 11 | 0.00024594 | 4.9711E-06 | 40 | 0.041414 | 0.00029484 |
| 12 | 0.00020489 | 3.7925E-06 | 41 | 0.046814 | 0.00033365 |
| 13 | 0.00016387 | 2.7939E-06 | 42 | 0.051919 | 0.00037054 |
| 14 | 0.00012286 | 1.9415E-06 | 43 | 0.057154 | 0.00040868 |
| 15 | 0.00020471 | 3.0184E-06 | 44 | 0.062179 | 0.00044558 |
| 16 | 0.00016372 | 2.2612E-06 | 45 | 0.06733 | 0.00048369 |
| 17 | 0.00020454 | 2.6568E-06 | 46 | 0.072506 | 0.00052242 |
| 18 | 0.00016359 | 2.0052E-06 | 47 | 0.077533 | 0.00056022 |
| 19 | 0.00020441 | 2.3726E-06 | 48 | 0.082493 | 0.00059777 |
| 20 | 0.00028609 | 3.1541E-06 | 49 | 0.092059 | 0.00067162 |
| 21 | 0.00020432 | 2.1445E-06 | 50 | 0.1021 | 0.00075 |
| 22 | 0.0002451 | 2.4553E-06 | 51 | 0.1528 | 0.0011742 |
| 23 | 0.0002451 | 2.3476E-06 | 52 | 0.2001 | 0.0016145 |
| 24 | 0.00040838 | 3.7519E-06 | 53 | 0.2505 | 0.0021411 |
| 25 | 0.0004491 | 3.9642E-06 | 54 | 0.3008 | 0.002738 |
| 26 | 0.00069387 | 5.9019E-06 | 55 | 0.3511 | 0.0034263 |
| 27 | 0.0011831 | 9.7299E-06 | 56 | 0.4013 | 0.0042248 |
| 28 | 0.0017537 | 0.000013992 | 57 | 0.4513 | 0.0051622 |
| 29 | 0.0028542 | 0.000022211 | | | |

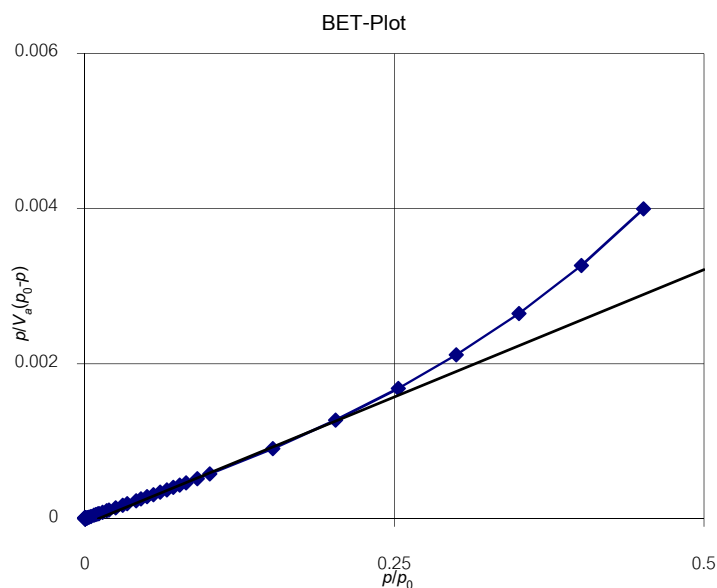


ตารางที่ ค. 3 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:1

| | |
|-------------------------------------|--|
| Slope | 0.0065637 |
| Intercept | 0.000070852 |
| Correlation coefficient | 0.9994 |
| V_m | $154.02 \text{ [cm}^3(\text{STP}) \text{ g}^{-1}]$ |
| a_{sBET} | $670.35 \text{ m}^2/\text{g}$ |
| C | 91.639 |
| Total pore volume ($p/p_0=0.990$) | $0.3351 \text{ [cm}^3 \text{ g}^{-1}]$ |
| Average pore diameter | 1.9997 [nm] |

| No | p/p_0 | $p/V_a(p_0-p)$ | No | p/p_0 | $p/V_a(p_0-p)$ |
|----|-------------|----------------|----|-----------|----------------|
| 1 | 0.000041117 | 0.000017286 | 30 | 0.0072717 | 0.00004464 |
| 2 | 0.00012328 | 0.000014648 | 31 | 0.0088532 | 0.000053709 |
| 3 | 0.00016427 | 0.000011429 | 32 | 0.010474 | 0.000062878 |
| 4 | 0.00016417 | 8.0522E-06 | 33 | 0.011488 | 0.000068583 |
| 5 | 0.00020508 | 7.7884E-06 | 34 | 0.014364 | 0.000084693 |
| 6 | 0.00020499 | 6.3505E-06 | 35 | 0.017686 | 0.00010316 |
| 7 | 0.00028687 | 7.5166E-06 | 36 | 0.019545 | 0.00011346 |

| No | p/p_0 | $p/V_a(p_0-p)$ | No | p/p_0 | $p/V_a(p_0-p)$ |
|----|------------|----------------|----|----------|----------------|
| 8 | 0.00020478 | 4.6473E-06 | 37 | 0.024734 | 0.00014215 |
| 9 | 0.0002047 | 4.0964E-06 | 38 | 0.030439 | 0.00017363 |
| 10 | 0.00024549 | 4.3969E-06 | 39 | 0.034162 | 0.00019417 |
| 11 | 0.00024548 | 3.9775E-06 | 40 | 0.041354 | 0.00023415 |
| 12 | 0.00024531 | 3.6296E-06 | 41 | 0.045356 | 0.00025647 |
| 13 | 0.00020431 | 2.7808E-06 | 42 | 0.05029 | 0.00028415 |
| 14 | 0.00020423 | 0.000002573 | 43 | 0.055341 | 0.00031259 |
| 15 | 0.00020414 | 2.3934E-06 | 44 | 0.060713 | 0.00034318 |
| 16 | 0.00024483 | 0.000002686 | 45 | 0.066077 | 0.00037389 |
| 17 | 0.00024482 | 2.5235E-06 | 46 | 0.071329 | 0.00040419 |
| 18 | 0.00024473 | 2.3787E-06 | 47 | 0.076574 | 0.0004348 |
| 19 | 0.00024462 | 2.2496E-06 | 48 | 0.081735 | 0.000465 |
| 20 | 0.00036685 | 3.2034E-06 | 49 | 0.090696 | 0.00051836 |
| 21 | 0.00040746 | 3.3856E-06 | 50 | 0.1008 | 0.00057977 |
| 22 | 0.00040735 | 3.2317E-06 | 51 | 0.1517 | 0.00090712 |
| 23 | 0.00065146 | 4.9494E-06 | 52 | 0.2024 | 0.0012722 |
| 24 | 0.00085481 | 6.2384E-06 | 53 | 0.2531 | 0.0016831 |
| 25 | 0.0012615 | 8.8687E-06 | 54 | 0.2999 | 0.0021141 |
| 26 | 0.0018305 | 0.00001244 | 55 | 0.3504 | 0.0026468 |
| 27 | 0.002196 | 0.000014692 | 56 | 0.4008 | 0.003266 |
| 28 | 0.0034149 | 0.00002209 | 57 | 0.451 | 0.0039948 |
| 29 | 0.0050386 | 0.000031724 | | | |

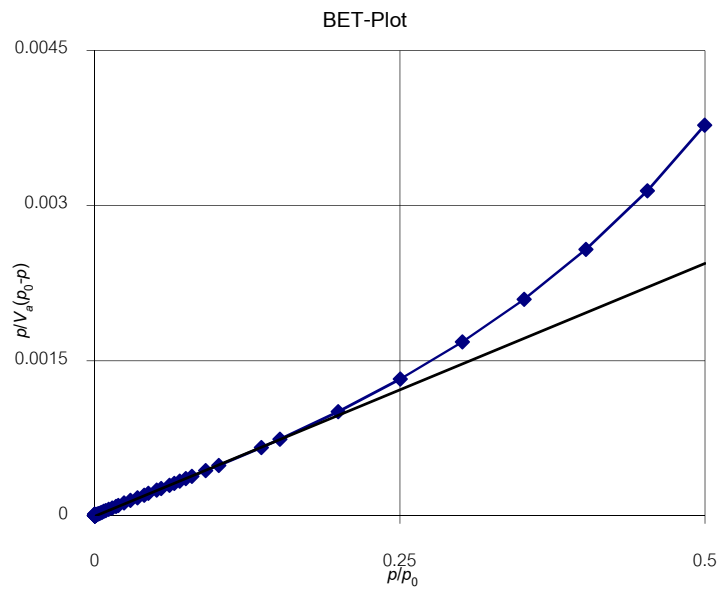


ตารางที่ ค. 3 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:2

| | |
|-------------------------------------|---|
| Slope | 0.004892 |
| Intercept | 0.000005924 |
| Correlation coefficient | 0.9998 |
| V_m | 204.66 [cm ³ (STP) g ⁻¹] |
| a_{sBET} | 890.8 m ² /g |
| C | 824.79 |
| Total pore volume ($p/p_0=0.990$) | 0.421 [cm ³ g ⁻¹] |
| Average pore diameter | 1.8905 [nm] |

| No | p/p_0 | $p/V_a(p_0-p)$ | No | p/p_0 | $p/V_a(p_0-p)$ |
|----|-------------|----------------|----|-----------|----------------|
| 1 | 0.000045057 | 0.000012172 | 36 | 0.0019739 | 0.000012497 |
| 2 | 0.00013516 | 0.000016365 | 37 | 0.0024669 | 0.000015284 |
| 3 | 0.00018016 | 0.000014087 | 38 | 0.0031389 | 0.000018982 |
| 4 | 0.00018015 | 0.000010413 | 39 | 0.0039453 | 0.000023355 |
| 5 | 0.00013511 | 6.1972E-06 | 40 | 0.0048845 | 0.000028382 |
| 6 | 0.00018012 | 6.8424E-06 | 41 | 0.0061829 | 0.000035242 |
| 7 | 0.00022516 | 0.000007299 | 42 | 0.00766 | 0.000042801 |

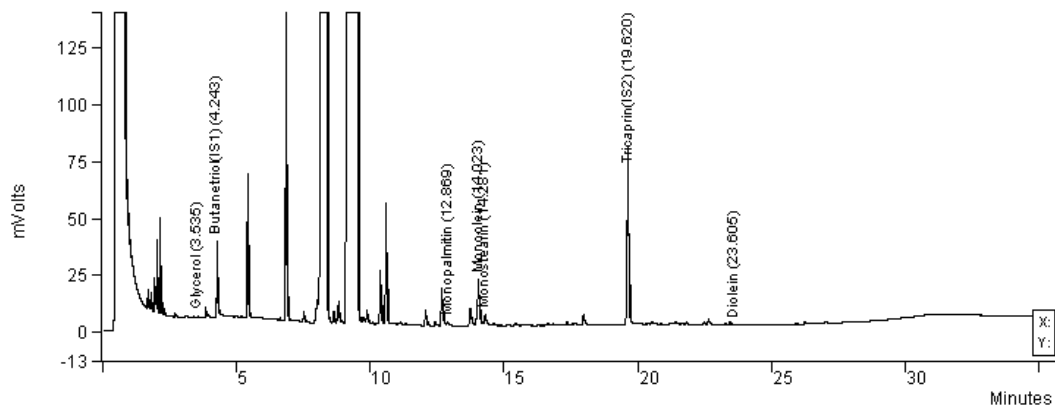
| No | p/p_0 | $p/V_a(p_0-p)$ | No | p/p_0 | $p/V_a(p_0-p)$ |
|----|------------|----------------|----|-----------|----------------|
| 8 | 0.00018009 | 5.0952E-06 | 43 | 0.0093138 | 0.000051236 |
| 9 | 0.00013508 | 3.3876E-06 | 44 | 0.011502 | 0.000062166 |
| 10 | 0.00018008 | 4.0581E-06 | 45 | 0.014364 | 0.000076252 |
| 11 | 0.00013505 | 2.7645E-06 | 46 | 0.017627 | 0.000092063 |
| 12 | 0.00013504 | 2.5288E-06 | 47 | 0.019412 | 0.0001007 |
| 13 | 0.00022504 | 3.8872E-06 | 48 | 0.024228 | 0.00012355 |
| 14 | 0.00013503 | 2.1648E-06 | 49 | 0.029498 | 0.00014827 |
| 15 | 0.00018001 | 2.6922E-06 | 50 | 0.03516 | 0.00017479 |
| 16 | 0.00013499 | 1.8897E-06 | 51 | 0.040685 | 0.00020041 |
| 17 | 0.00017999 | 2.3696E-06 | 52 | 0.044148 | 0.00021642 |
| 18 | 0.00013497 | 1.6777E-06 | 53 | 0.050791 | 0.00024721 |
| 19 | 0.00013495 | 1.5874E-06 | 54 | 0.054465 | 0.00026416 |
| 20 | 0.0001799 | 2.0106E-06 | 55 | 0.061409 | 0.00029647 |
| 21 | 0.00017988 | 1.9141E-06 | 56 | 0.065183 | 0.00031403 |
| 22 | 0.00022485 | 0.000002284 | 57 | 0.069706 | 0.00033516 |
| 23 | 0.00022484 | 2.1851E-06 | 58 | 0.074671 | 0.00035845 |
| 24 | 0.0002248 | 2.0948E-06 | 59 | 0.079788 | 0.0003825 |
| 25 | 0.00022477 | 2.0104E-06 | 60 | 0.09107 | 0.00043622 |
| 26 | 0.00026969 | 2.3201E-06 | 61 | 0.1017 | 0.00048712 |
| 27 | 0.00022471 | 1.8617E-06 | 62 | 0.1365 | 0.00066137 |
| 28 | 0.00035946 | 2.8726E-06 | 63 | 0.1519 | 0.00074134 |
| 29 | 0.00044926 | 3.4697E-06 | 64 | 0.1994 | 0.0010062 |
| 30 | 0.00049388 | 3.6894E-06 | 65 | 0.2504 | 0.001323 |
| 31 | 0.00058382 | 4.2257E-06 | 66 | 0.3013 | 0.0016832 |
| 32 | 0.00062869 | 4.4146E-06 | 67 | 0.3517 | 0.0020949 |
| 33 | 0.00098766 | 6.7419E-06 | 68 | 0.4023 | 0.0025769 |
| 34 | 0.001257 | 8.3529E-06 | 69 | 0.4526 | 0.0031436 |
| 35 | 0.0015708 | 0.000010179 | 70 | 0.4996 | 0.0037765 |



ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์กิลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไซด์ และกิลีเซอรอลทั้งหมด

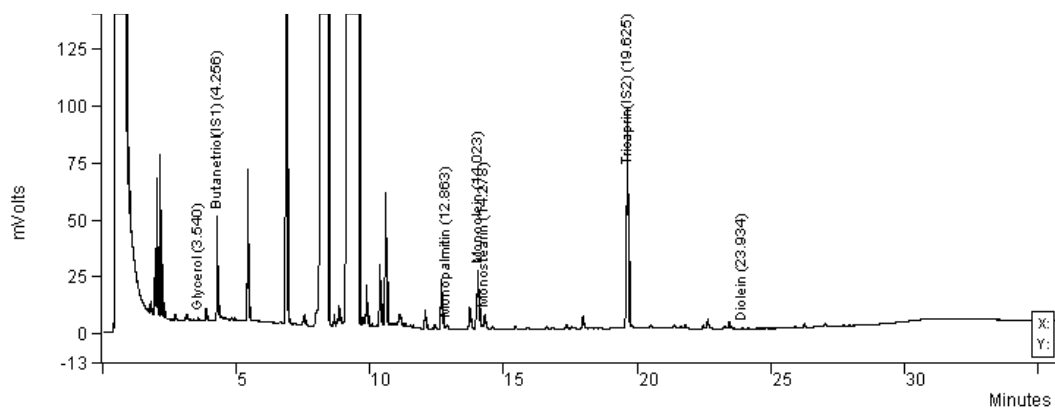
ตารางที่ ง. 1 แสดงผลการวิเคราะห์กิลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไซด์ และกิลีเซอรอลทั้งหมด ของร้อยละ 5 ของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:2



| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 0.1162 | 3.535 | -0.135 | 722 | 0.00 | BB | 1.5 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(IS1) | 13.0624 | 4.243 | -0.057 | 81102 | 0.00 | BB | 1.8 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.7160 | 12.869 | -0.018 | 4446 | 0.00 | BB | 2.8 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 17.6776 | 14.023 | 0.023 | 109757 | 0.00 | VV | 4.3 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 3.9064 | 14.281 | -0.019 | 24254 | 0.00 | VB | 4.3 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(IS2) | 51.8623 | 19.620 | -0.182 | 322004 | 0.00 | BB | 3.7 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.1734 | 23.605 | -0.155 | 1076 | 0.00 | VB | 0.0 | | 0 |
| Totals | | 87.5143 | | -0.543 | 543361 | | | | | |

| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 0.2011 | 3.537 | -0.149 | 1510 | 0.00 | BB | 2.6 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(IS1) | 12.7579 | 4.254 | 0.054 | 95834 | 0.00 | BB | 1.9 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.6853 | 12.868 | -0.019 | 5148 | 0.00 | BB | 3.0 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 17.4352 | 14.023 | 0.023 | 130969 | 0.00 | VV | 4.5 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 3.7960 | 14.281 | -0.019 | 28515 | 0.00 | VB | 4.1 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(IS2) | 49.0695 | 19.624 | -0.178 | 368598 | 0.00 | BB | 3.6 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.0287 | 23.759 | -0.001 | 215 | 0.00 | VV | 0.6 | | 0 |
| Totals | | 83.9737 | | -0.289 | 630789 | | | | | |

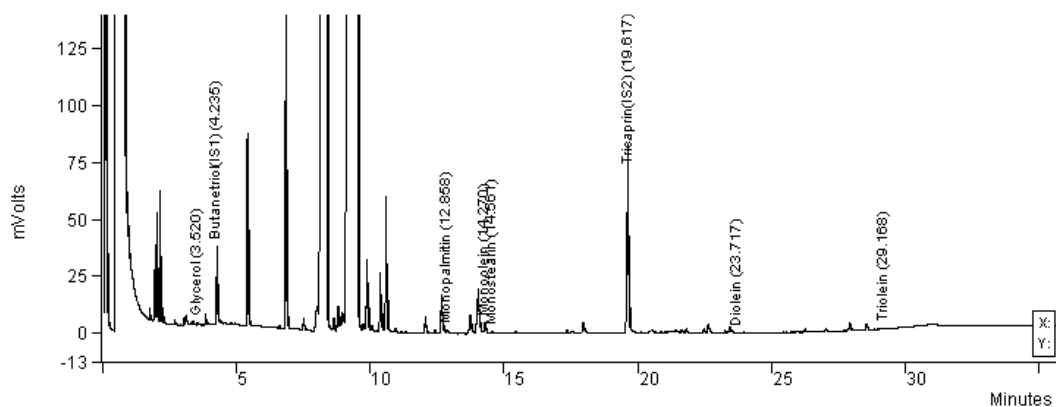
ตารางที่ ง. 2 แสดงผลการวิเคราะห์ที่กลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไซด์ และ กลีเซอรอลทั้งหมด ของร้อยละ 5 ของขี้ดึกา



| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 0.2704 | 3.540 | -0.146 | 2191 | 0.00 | PB | 2.3 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(S1) | 13.3748 | 4.256 | -0.134 | 108376 | 0.00 | BB | 1.9 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.6828 | 12.863 | -0.024 | 5533 | 0.00 | BB | 3.0 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 17.8412 | 14.023 | 0.023 | 144567 | 0.00 | VV | 4.4 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 3.7551 | 14.278 | -0.022 | 30427 | 0.00 | VB | 4.4 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(S2) | 30.3275 | 19.625 | -0.177 | 407804 | 0.00 | BB | 3.7 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.1207 | 23.934 | 0.174 | 978 | 0.00 | BB | 2.5 | | 0 |
| Totals | | 86.3725 | | -0.306 | 699876 | | | | | |

| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 0.2879 | 3.497 | -0.003 | 2916 | 0.00 | BB | 1.7 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(S1) | 11.5855 | 4.207 | -0.182 | 117331 | 0.00 | BB | 1.8 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.7843 | 12.804 | -0.083 | 7943 | 0.00 | BB | 2.8 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 15.8737 | 13.951 | -0.049 | 160759 | 0.00 | VV | 4.1 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 3.6102 | 14.203 | -0.097 | 36562 | 0.00 | VB | 3.8 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(S2) | 54.7438 | 19.582 | -0.220 | 554412 | 0.00 | BB | 4.0 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.1654 | 23.876 | 0.116 | 1675 | 0.00 | BB | 3.2 | | 0 |
| Totals | | 87.0508 | | -0.518 | 881598 | | | | | |

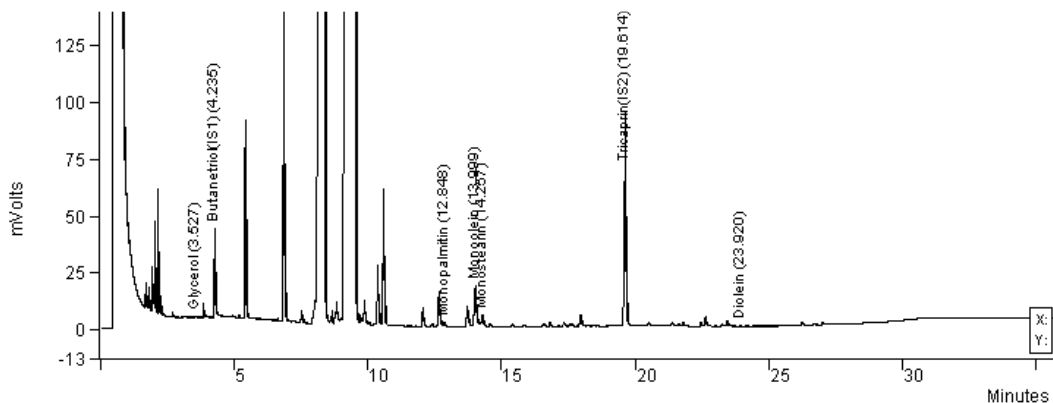
ตารางที่ ง. 3 แสดงผลการวิเคราะห์ที่กลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไซด์ และ กลีเซอรอลทั้งหมด ของร้อยละ 10 ของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:2



| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 0.2881 | 3.520 | -0.080 | 2066 | 0.00 | BB | 1.9 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(IS1) | 11.7013 | 4.235 | 0.035 | 83919 | 0.00 | BB | 1.8 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.6726 | 12.858 | -0.029 | 4824 | 0.00 | BB | 3.0 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 3.7318 | 14.270 | -0.003 | 26764 | 0.00 | VV | 4.2 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 0.7135 | 14.561 | 0.026 | 5117 | 0.00 | VB | 4.2 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(IS2) | 46.2948 | 19.617 | -0.185 | 332015 | 0.00 | BB | 3.5 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.0149 | 23.717 | -0.043 | 107 | 0.00 | PB | 0.6 | | 0 |
| 8 | Triolein | 0.4471 | 29.168 | -0.084 | 3206 | 0.00 | BB | 0.0 | | 0 |
| Totals | | 63.8641 | | -0.363 | 458018 | | | | | |

| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 0.2808 | 3.533 | 0.083 | 2454 | 0.00 | BB | 2.0 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(IS1) | 12.5553 | 4.250 | 0.050 | 109698 | 0.00 | BB | 2.1 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.6788 | 12.851 | -0.036 | 5931 | 0.00 | BB | 3.1 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 16.3649 | 14.006 | 0.006 | 142983 | 0.00 | VV | 4.6 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 3.4047 | 14.256 | -0.044 | 29747 | 0.00 | VB | 4.3 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(IS2) | 52.2698 | 19.619 | -0.183 | 456692 | 0.00 | BB | 3.8 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.1494 | 23.924 | 0.163 | 1305 | 0.00 | BB | 2.8 | | 0 |
| Totals | | 85.7037 | | 0.039 | 748810 | | | | | |

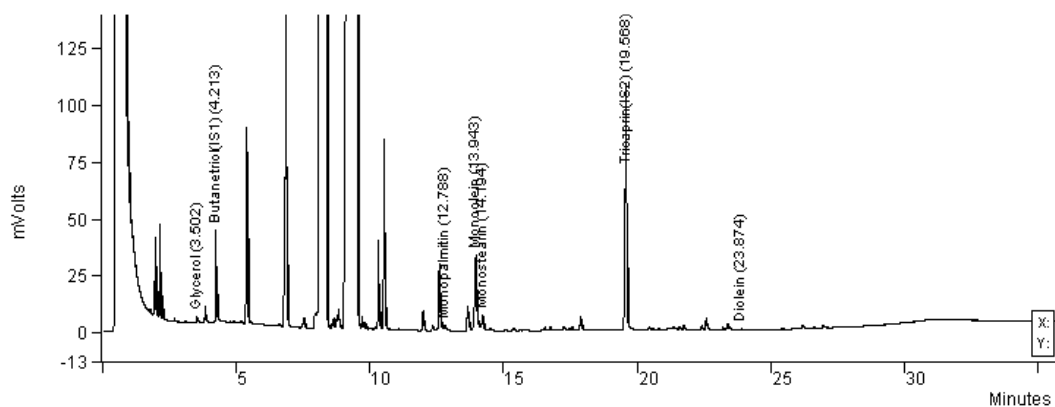
ตารางที่ ง. 4 แสดงผลการวิเคราะห์ที่กลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไซด์ และ กลีเซอรอลทั้งหมด ของร้อยละ 10 ของขี้ดึกา



| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 0.1174 | 3.527 | 0.027 | 838 | 0.00 | BB | 2.4 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(S1) | 12.4419 | 4.235 | 0.035 | 88829 | 0.00 | BB | 1.8 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.7398 | 12.848 | -0.039 | 5282 | 0.00 | BB | 3.2 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 14.7187 | 13.999 | -0.001 | 105085 | 0.00 | VV | 4.4 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 4.2007 | 14.257 | -0.043 | 29991 | 0.00 | VV | 4.3 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(S2) | 54.5130 | 19.614 | -0.188 | 389198 | 0.00 | BB | 3.7 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.1331 | 23.920 | 0.160 | 950 | 0.00 | BB | 2.9 | | 0 |
| Totals | | 86.8646 | | -0.049 | 620173 | | | | | |

| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 0.2615 | 3.526 | 0.026 | 1038 | 0.00 | PB | 0.0 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(S1) | 13.6904 | 4.233 | 0.033 | 54364 | 0.00 | BB | 1.7 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.7394 | 12.861 | -0.026 | 2936 | 0.00 | BB | 2.9 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 13.5881 | 14.012 | 0.012 | 53957 | 0.00 | BV | 4.5 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 3.5084 | 14.275 | -0.025 | 13932 | 0.00 | VB | 4.0 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(S2) | 55.7968 | 19.609 | -0.193 | 221565 | 0.00 | BB | 3.4 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.1157 | 23.934 | 0.174 | 459 | 0.00 | BV | 1.4 | | 0 |
| Totals | | 87.7003 | | 0.001 | 348251 | | | | | |

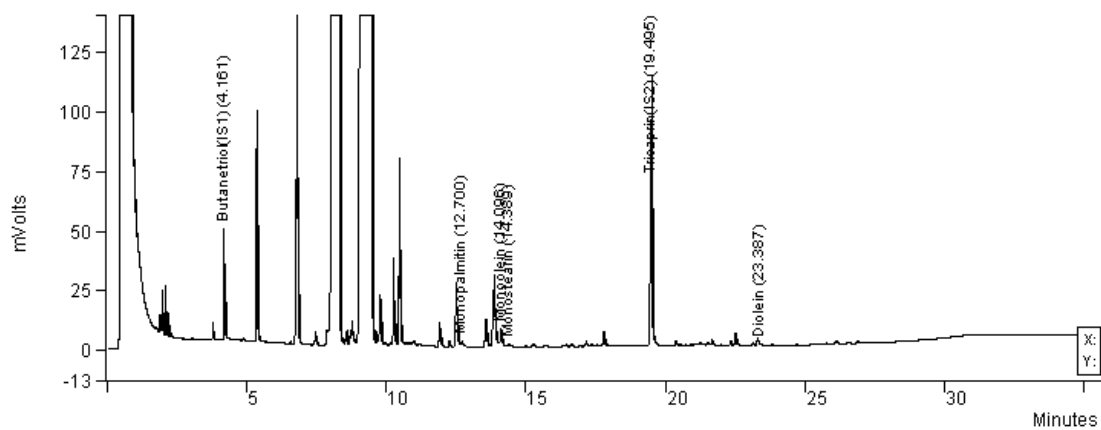
ตารางที่ ง. 5 แสดงผลการวิเคราะห์หกลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไซด์ และกลีเซอรอลทั้งหมด ของร้อยละ 1.5 ของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:2



| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 0.6346 | 3.502 | 0.002 | 5548 | 0.00 | BB | 1.7 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(S1) | 10.9781 | 4.213 | -0.177 | 95975 | 0.00 | BB | 2.0 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.6442 | 12.788 | -0.099 | 5632 | 0.00 | BB | 2.8 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 20.7450 | 13.943 | -0.057 | 181361 | 0.00 | VV | 4.3 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 3.7694 | 14.194 | -0.106 | 32954 | 0.00 | VB | 4.1 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(S2) | 51.4132 | 19.568 | -0.234 | 449474 | 0.00 | BB | 3.7 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.1194 | 23.874 | 0.114 | 1044 | 0.00 | BB | 0.0 | | 0 |
| Totals | | 88.3039 | | -0.557 | 771988 | | | | | |

| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 0.5989 | 3.488 | -0.012 | 4271 | 0.00 | BB | 1.6 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(S1) | 10.9906 | 4.195 | -0.005 | 78373 | 0.00 | BB | 1.7 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.6448 | 12.785 | -0.102 | 4598 | 0.00 | BB | 2.8 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 20.8327 | 13.938 | -0.062 | 148555 | 0.00 | VV | 4.3 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 3.7135 | 14.191 | -0.109 | 26480 | 0.00 | VB | 4.0 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(S2) | 51.2092 | 19.559 | -0.243 | 365166 | 0.00 | BB | 3.6 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.1632 | 23.872 | 0.112 | 1164 | 0.00 | BB | 3.4 | | 0 |
| Totals | | 88.1529 | | -0.421 | 628607 | | | | | |

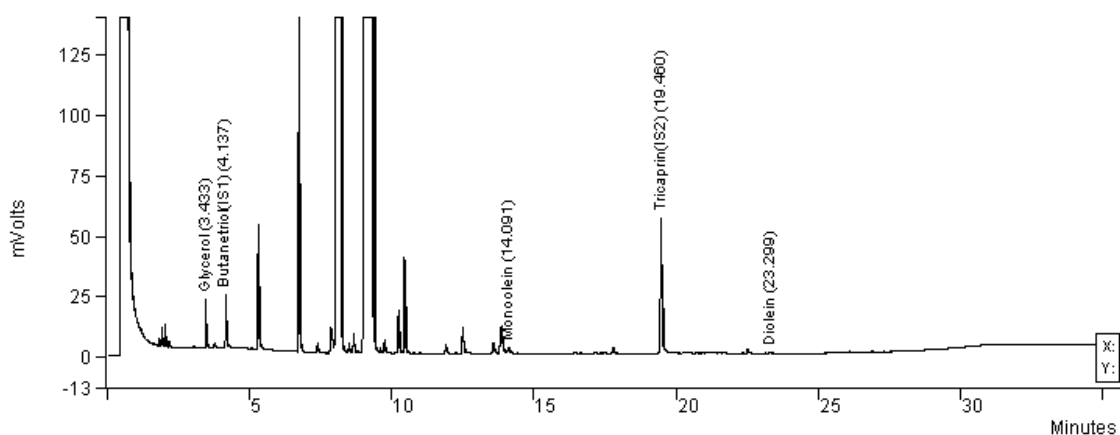
ตารางที่ ง. 6 แสดงผลการวิเคราะห์ที่กลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไรด์ และ กลีเซอรอลทั้งหมด ของร้อยละ 1.5 ของซีลีกา



| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Butanetriol(IS1) | 10.1105 | 4.161 | -0.039 | 103694 | 0.00 | BB | 1.8 | | 0 |
| 2 | Monopalmitin | 0.6022 | 12.700 | 0.100 | 6176 | 0.00 | TS | 0.0 | | 0 |
| 3 | Monoolein | 3.8420 | 14.096 | 0.096 | 39404 | 0.00 | VV | 4.1 | | 0 |
| 4 | Monostearin | 0.6495 | 14.389 | 0.089 | 6661 | 0.00 | VB | 4.4 | | 0 |
| 5 | Tricaprin(IS2) | 46.4959 | 19.495 | 0.095 | 476866 | 0.00 | BB | 3.8 | | 0 |
| 6 | Diolein | 0.2077 | 23.387 | -0.173 | 2130 | 0.00 | VB | 0.0 | | 0 |
| Totals | | 61.9078 | | 0.168 | 634931 | | | | | |

| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 1.6947 | 3.448 | -0.052 | 13036 | 0.00 | BB | 1.5 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(IS1) | 9.9388 | 4.157 | -0.043 | 76449 | 0.00 | BB | 1.6 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.6298 | 12.708 | 0.108 | 4844 | 0.00 | TS | 0.0 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 15.6647 | 13.849 | -0.151 | 120491 | 0.00 | VV | 4.3 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 3.7759 | 14.103 | -0.097 | 29044 | 0.00 | VV | 4.2 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(IS2) | 46.9540 | 19.489 | -0.313 | 361165 | 0.00 | BB | 3.5 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.1562 | 23.382 | -0.378 | 1202 | 0.00 | VB | 0.0 | | 0 |
| Totals | | 78.8141 | | -0.926 | 606231 | | | | | |

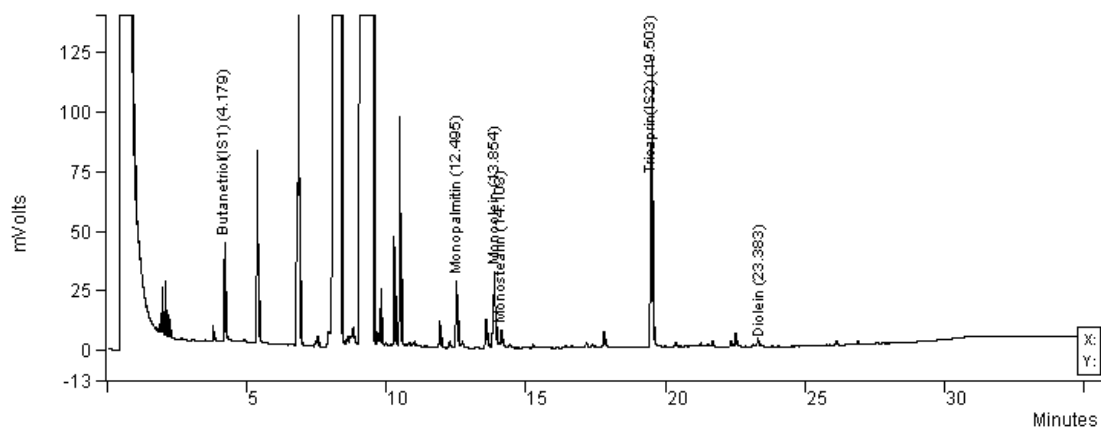
ตารางที่ ง. 7 แสดงผลการวิเคราะห์ที่กลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไซด์ และ กลีเซอรอลทั้งหมด ของร้อยละ 5 ของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแกลบต่อ $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:2 ที่ผ่านการคืนสภาพด้วยเมทานอล ครั้งที่ 1



| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 9.6288 | 3.433 | -0.067 | 38279 | 0.00 | BB | 1.5 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(IS1) | 11.5366 | 4.137 | -0.063 | 45863 | 0.00 | BB | 1.6 | | 0 |
| 3 | Monoolein | 2.2330 | 14.091 | -0.182 | 8877 | 0.00 | BB | 3.7 | | 0 |
| 4 | Tricaprin(IS2) | 53.9869 | 19.460 | -0.342 | 214624 | 0.00 | BB | 3.3 | | 0 |
| 5 | Diolein | 0.6072 | 23.299 | -0.461 | 2414 | 0.00 | BB | 3.8 | | 0 |
| Totals | | 77.9925 | | -1.115 | 310057 | | | | | |

| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 9.6288 | 3.433 | -0.067 | 38279 | 0.00 | BB | 1.5 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(IS1) | 11.5366 | 4.137 | -0.063 | 45863 | 0.00 | BB | 1.6 | | 0 |
| 3 | Monoolein | 2.2330 | 14.091 | -0.182 | 8877 | 0.00 | BB | 3.7 | | 0 |
| 4 | Tricaprin(IS2) | 53.9869 | 19.460 | -0.342 | 214624 | 0.00 | BB | 3.3 | | 0 |
| 5 | Diolein | 0.6072 | 23.299 | -0.461 | 2414 | 0.00 | BB | 3.8 | | 0 |
| Totals | | 77.9925 | | -1.115 | 310057 | | | | | |

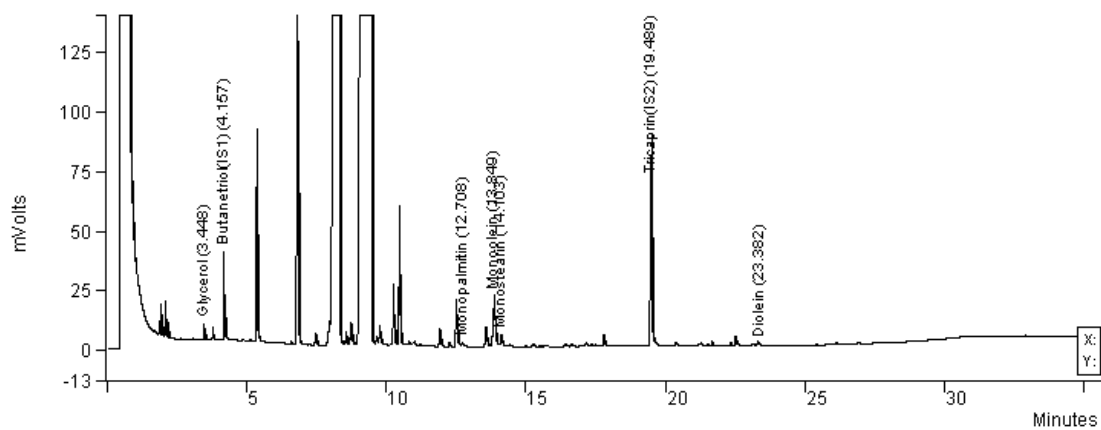
ตารางที่ ๖.8 แสดงผลการวิเคราะห์หากลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไรด์ และ กลีเซอรอลทั้งหมด ของร้อยละ 5 ของซีลีกา ที่ผ่านการคืนสภาพด้วยเมทานอล ครั้งที่ 1



| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Butanetriol(1S1) | 10.0513 | 4.179 | -0.021 | 109126 | 0.00 | BB | 2.2 | | 0 |
| 2 | Monopalmitin | 11.1818 | 12.495 | -0.106 | 121399 | 0.00 | BB | 3.5 | | 0 |
| 3 | Monoolein | 16.2332 | 13.854 | -0.146 | 176242 | 0.00 | VV | 4.2 | | 0 |
| 4 | Monostearin | 3.8037 | 14.103 | -0.097 | 41296 | 0.00 | VV | 4.1 | | 0 |
| 5 | Tricaprin(1S2) | 46.4816 | 19.503 | 0.103 | 504645 | 0.00 | BB | 3.8 | | 0 |
| 6 | Diolein | 0.1854 | 23.383 | -0.117 | 2013 | 0.00 | VB | 4.2 | | 0 |
| Totals | | 87.9370 | | -0.384 | 954721 | | | | | |

| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Butanetriol(1S1) | 10.1105 | 4.161 | -0.039 | 103694 | 0.00 | BB | 1.8 | | 0 |
| 2 | Monopalmitin | 0.6022 | 12.700 | 0.100 | 6176 | 0.00 | TS | 0.0 | | 0 |
| 3 | Monoolein | 3.8420 | 14.096 | 0.096 | 39404 | 0.00 | VV | 4.1 | | 0 |
| 4 | Monostearin | 0.6495 | 14.389 | 0.089 | 6661 | 0.00 | VB | 4.4 | | 0 |
| 5 | Tricaprin(1S2) | 46.4959 | 19.495 | 0.095 | 476866 | 0.00 | BB | 3.8 | | 0 |
| 6 | Diolein | 0.2077 | 23.387 | -0.173 | 2130 | 0.00 | VB | 0.0 | | 0 |
| Totals | | 61.9078 | | 0.168 | 634931 | | | | | |

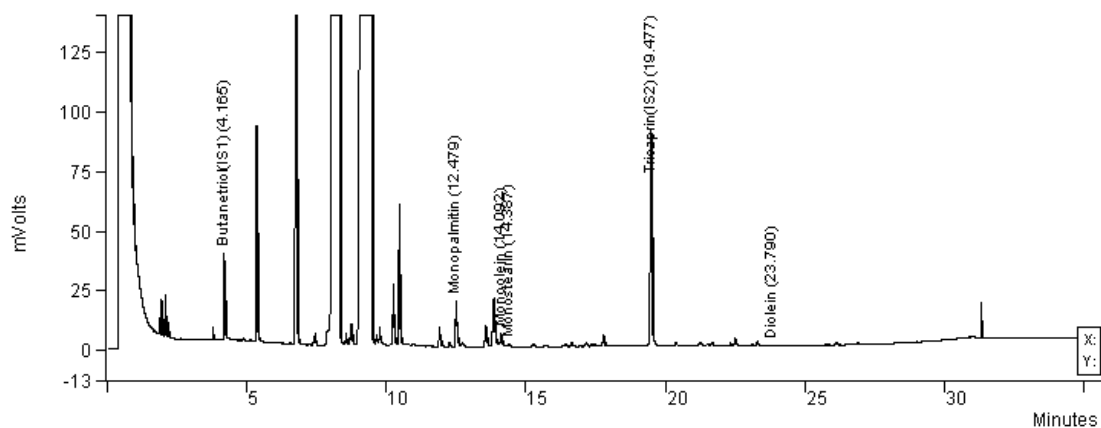
ตารางที่ ง.9 แสดงผลการวิเคราะห์หากลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกลีเซอไซด์ และ กลีเซอรอลทั้งหมด ของร้อยละ 5 ของซิลิกา ที่ผ่านการคืนสภาพด้วยเมทานอล ครั้งที่ 3



| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 1.6947 | 3.448 | -0.052 | 13036 | 0.00 | BB | 1.5 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(IS1) | 9.9388 | 4.157 | -0.043 | 76449 | 0.00 | BB | 1.6 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 0.6298 | 12.708 | 0.108 | 4844 | 0.00 | TS | 0.0 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 15.6647 | 13.849 | -0.151 | 120491 | 0.00 | VV | 4.3 | | 0 |
| 5 | Monostearin | 3.7759 | 14.103 | -0.097 | 29044 | 0.00 | VV | 4.2 | | 0 |
| 6 | Tricaprin(IS2) | 46.9540 | 19.489 | -0.313 | 361165 | 0.00 | BB | 3.5 | | 0 |
| 7 | Diolein | 0.1562 | 23.382 | -0.378 | 1202 | 0.00 | VB | 0.0 | | 0 |
| Totals | | 78.8141 | | -0.926 | 606231 | | | | | |

| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Glycerol | 2.0771 | 3.450 | -0.050 | 16248 | 0.00 | BB | 1.6 | | 0 |
| 2 | Butanetriol(IS1) | 10.7949 | 4.163 | -0.037 | 84441 | 0.00 | BB | 1.7 | | 0 |
| 3 | Monopalmitin | 10.2056 | 12.486 | -0.114 | 79832 | 0.00 | BB | 3.5 | | 0 |
| 4 | Monoolein | 15.8093 | 13.843 | -0.157 | 123666 | 0.00 | PB | 4.6 | | 0 |
| 5 | Tricaprin(IS2) | 53.5926 | 19.488 | -0.314 | 419220 | 0.00 | BB | 3.9 | | 0 |
| Totals | | 92.4795 | | -0.672 | 723407 | | | | | |

ตารางที่ ง.10 แสดงผลการวิเคราะห์กิลีเซอรอลอิสระ โมโน-, ได- และไตรกิลีเซอไซด์ และกิลีเซอรอลทั้งหมด ของร้อยละ 5 ของซิลิกา ที่ผ่านการคืนสภาพด้วยเมทานอล ครั้งที่ 5



| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Butanetriol(IS1) | 10.1742 | 4.165 | -0.035 | 77966 | 0.00 | BB | 1.8 | | 0 |
| 2 | Monopalmitin | 10.5837 | 12.479 | -0.021 | 81119 | 0.00 | BB | 3.4 | | 0 |
| 3 | Monoolein | 3.9381 | 14.092 | 0.092 | 30178 | 0.00 | VV | 4.2 | | 0 |
| 4 | Monostearin | 0.7026 | 14.387 | 0.187 | 5384 | 0.00 | VB | 4.6 | | 0 |
| 5 | Tricaprin(IS2) | 48.1561 | 19.477 | -0.325 | 369027 | 0.00 | BB | 3.5 | | 0 |
| 6 | Diolein | 0.1688 | 23.790 | 0.230 | 1293 | 0.00 | BB | 3.6 | | 0 |
| Totals | | 73.7255 | | 0.128 | 564967 | | | | | |

| Peak No | Peak Name | Result () | Ret Time (min) | Time Offset (min) | Peak Area (counts) | Rel Ret Time | Sep. Code | Width 1/2 (sec) | Status Codes | Group |
|---------------|------------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------|-----------------|--------------|-------|
| 1 | Butanetriol(IS1) | 10.2280 | 4.149 | -0.051 | 70647 | 0.00 | BB | 1.7 | | 0 |
| 2 | Monopalmitin | 10.5221 | 12.472 | -0.028 | 72678 | 0.00 | BB | 3.4 | | 0 |
| 3 | Monoolein | 3.9345 | 14.083 | 0.083 | 27176 | 0.00 | VV | 4.3 | | 0 |
| 4 | Monostearin | 0.6647 | 14.380 | 0.180 | 4391 | 0.00 | VB | 4.7 | | 0 |
| 5 | Tricaprin(IS2) | 48.4781 | 19.469 | -0.031 | 334849 | 0.00 | BB | 3.4 | | 0 |
| 6 | Diolein | 0.1442 | 23.788 | 0.228 | 996 | 0.00 | BB | 3.3 | | 0 |
| Totals | | 73.9716 | | 0.381 | 510937 | | | | | |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวจันทร์เลขา ภู่ทองคำ เกิดวันที่ 21 กันยายน 2529 ที่จังหวัดสุราษฎร์ธานี จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่ โรงเรียนสุราษฎร์พิทยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี ในปี 2548 จากนั้นเข้าศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากร และจบในปีการศึกษา 2551 หลังจากนั้นในปี 2552 เข้าศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และในปี 2555 ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานวิจัยในงาน Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2012) วันที่ 11– 13 มกราคม 2555 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่