

การทำไปโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIODIESEL PURIFICATION WITH CALCIUM CHLORIDE TREATED BENTONITE

Mr. Thirapol Bunrit



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำไปโอติเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วย แคลเซียมคลอไรด์
โดย	นายธีรพล บุญฤทธิ
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ตระการพฤษ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.อนุรักษ์ วินิตสร)

ธีรพล บุญฤทธิ์ : การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ (BIODIESEL PURIFICATION WITH CALCIUM CHLORIDE TREATED BENTONITE) อ.ที่
ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.สมใจ เพ็งปรีชา, 121 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วย
แคลเซียมคลอไรด์ โดยผลิตไบโอดีเซลจากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน โดยใช้อัตราส่วนโดย
โมลของน้ำมันปาล์มต่อแอลกอฮอล์ เท่ากับ 1 ต่อ 6 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง เบนโทไนด์บำบัดด้วย
แคลเซียมคลอไรด์ เตรียมได้จากการบำบัดเบนโทไนด์ด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น
1, 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์ และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์) ใช้ความเร็วในการกวน 800 รอบ
ต่อนาที ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 2.5 ชั่วโมง เอกลักษณะของเบนโทไนด์บำบัดด้วย
แคลเซียมคลอไรด์ถูกพิสูจน์ทราบโดยใช้ เทคนิคการดูดซับไนโตรเจน (BET) เทคนิคการดูดกลืนรังสี
ในช่วงอินฟราเรด (FT-IR) เทคนิคการวิเคราะห์จุลภาคสัณฐานวิทยา (SEM) เทคนิคการเลี้ยวเบนของ
รังสีเอ็กซ์ (XRD) และเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) จากการศึกษาการดูดซับกลีเซอรินออก
จากไบโอดีเซลพบว่า สภาวะที่ดีที่สุดคือ การใช้ตัวดูดซับเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความ
เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล ที่มีขนาด 200 เมช ระยะเวลา 15
นาที ผลการศึกษาพบว่าสามารถกำจัดกลีเซอรินได้สูงสุดถึงร้อยละ 67 ตัวดูดซับเบนโทไนด์บำบัดด้วย
แคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ มีไอโซเทอร์มของการดูดซับกลีเซอรินสอดคล้องกับไอโซ
เทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอ
ไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการล้างด้วยน้ำได้ถึง 43
เปอร์เซ็นต์ และให้คุณภาพไบโอดีเซลที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานไบโอดีเซลของประเทศไทย

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5572404623 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: PURIFICATION/BIODIESEL/TREATED BENTONITE/ADSORPTION

THIRAPOL BUNRIT: BIODIESEL PURIFICATION WITH CALCIUM CHLORIDE TREATED BENTONITE. ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMCHAI PENGPRECHA, Ph.D., 121 pp.

This research aims to study the purification of biodiesel by using calcium chloride treated bentonite. The biodiesel was produced by transesterification of palm oil and methanol (1:6 by mole ratio of oil to alcohol), using 1%wt of sodium hydroxide as a catalyst, at 70 °C for 2 hours. The bentonite was modified by various concentrations of calcium chloride solution at 1, 5, 10, 20% and saturated solution (60%) with mechanical stirring at 800 rpm, at 90 °C for 2.5 hours. Their structures, components, and functional groups were characterized by BET, FT-IR, SEM, XRD and XRF techniques. The highest adsorption performance was obtained by treating bentonite with 5% of calcium chloride solution. Up to 67% of glycerin in crude biodiesel could be removed by using 10%wt of adsorbent with 200 mesh size for 15 minutes. The results showed that the adsorption isotherm of calcium chloride treated bentonite adsorbent is fit with Langmuir model. Up to 43% of waste water can be reduced by using the optimum condition. The quality of biodiesel obtained from this research is met with Thai standard specification for biodiesel.

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลในหลายภาคส่วน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าอย่างยิ่งในการให้ความรู้ แนวคิด คำแนะนำ ความเห็น และตรวจทานแก้ไขข้อผิดพลาด ตลอดจนให้ความช่วยเหลือต่างๆ ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลรัตน์ ตระการพฤกษ์ และ ดร.อนุรักษ์ วินิตสร กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความคิดเห็น รวมถึงคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกๆ ท่าน ภายในหลักสูตรสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ตลอดหลักสูตรการศึกษา

ขอขอบคุณบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้ทุนการศึกษา และขอบคุณบุคลากรในบริษัทฯ ที่ให้ความรู้ที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนคำแนะนำและความช่วยเหลือต่างๆ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท ไทยนิปปอนเคมีภัณฑ์อุตสาหกรรม จำกัด สำหรับการอนุเคราะห์ตัวอย่างแร่เบนโทไนต์ที่ใช้ในงานวิจัย

นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนร่วมหัวข้อมวิจัย ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และกำลังใจในการแก้ปัญหาต่างๆ และขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภายในสาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้องทุกคนที่ให้การสนับสนุนทุนทรัพย์ ให้คำปรึกษาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ รวมทั้งผู้อยู่เบื้องหลังที่เป็นกำลังใจในการทำวิจัยในครั้งนี้จนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ฅ
สารบัญตาราง.....	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ไบโอดีเซล (Biodiesel).....	4
2.1.1 ความหมายของไบโอดีเซล.....	4
2.1.2 คุณสมบัติของไบโอดีเซล.....	5
2.1.3 วัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล	8
2.1.3.1 การแบ่งกลุ่มวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล.....	10
2.1.3.2 วัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย	12
2.1.4 องค์ประกอบน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์	16
2.1.5 ประเภทของไบโอดีเซล.....	18
2.1.5.1 น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ (Straight Vegetable Oil or Fat oil).....	18
2.1.5.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม	18

2.1.5.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์.....	19
2.1.6 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	19
2.1.6.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification).....	20
2.1.6.2 กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันและทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification and Transesterification).....	23
2.1.6.3 กระบวนการไฮโดรไลซิสและเอสเทอร์ฟิเคชัน (Hydrolysis and esterification).....	25
2.1.7 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซล.....	26
2.2 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Biodiesel purification)	27
2.2.1 กระบวนการล้างแบบเปียก (Wet washing process).....	28
2.2.1.1 การล้างด้วยน้ำกลั่น (Washing with distilled water).....	28
2.2.1.2 การล้างด้วยกรด (Washing with acid).....	29
2.2.1.3 การล้างด้วยสารละลายอินทรีย์ (Washing with organic solution).....	29
2.2.2 กระบวนการล้างแบบแห้ง (Dry washing process).....	29
2.2.3 การสกัดด้วยเมมเบรน (Membrane extraction)	30
2.3 แร่ดิน (Clay mineral).....	31
2.3.1 ความหมายของดิน	32
2.3.2 ส่วนประกอบของดิน	32
2.3.3 แร่วัตถุในดิน (Mineral matter).....	33
2.3.4 แร่ดินเหนียวในดิน (Clay mineral).....	34
2.3.5 คุณสมบัติของแร่ดินเหนียว.....	38
2.4 เบนโทไนต์ (Bentonite).....	40
2.4.1 สมบัติของเบนโทไนต์.....	40
2.4.2 ชนิดของเบนโทไนต์.....	41

2.4.3 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)	43
2.5 กระบวนการดูดซับ	45
2.5.1 ประเภทของการดูดซับ	46
2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)	46
2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption).....	47
2.5.2 ความร้อนของการดูดซับ.....	47
2.5.3 กลไกของการดูดซับ.....	49
2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	50
2.5.5 สมดุลของการดูดซับ.....	51
2.5.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	53
2.5.6.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm).....	56
2.5.6.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm).....	57
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	58
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง	61
3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	61
3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	61
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	62
3.2 วิธีการทดลอง	62
3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์.....	62
3.2.2 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	63
3.2.3 ศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วย แคลเซียมคลอไรด์	63
3.2.4 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์	63

3.2.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	65
3.2.6 ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ใช้จากกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์	67
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	68
4.1 ศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์.....	68
4.1.1 การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยวิธี BET	68
4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอกด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	73
4.1.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier-Transform Infrared spectrophotometer (FT-IR)	74
4.1.4 การวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD).....	75
4.1.5 วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence spectrophotometer (XRF)	77
4.2 ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์เปรียบเทียบกับเบนโทไนด์ธรรมชาติ	78
4.2.1 ศึกษาผลของระยะเวลาต่อการตกตะกอนของกลีเซอรินในไบโอดีเซล	78
4.2.2 ศึกษาผลของปริมาณเบนโทไนด์ต่อร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล	79
4.2.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้บำบัดเบนโทไนด์ต่อร้อยละผลการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล.....	82
4.2.4 ศึกษาผลของระยะเวลาที่สัมผัสต่อผลร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล.....	83
4.2.5 ศึกษาผลของขนาดเบนโทไนด์ต่อผลร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล.....	86
4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	88
4.3.1 รูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนของเบนโทไนด์.....	88
4.3.2 รูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับของการดูดซับกลีเซอริน.....	90
4.4 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์.....	93

4.4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ทำให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วย แคลเซียมคลอไรด์	94
4.4.2 การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับการล้างด้วยน้ำอุ่น	95
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	97
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	97
5.1.1 ศึกษาคุณสมบัติของเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์.....	97
5.1.2 ศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอ ไรด์เปรียบเทียบกับเบนโทไนด์ธรรมชาติ.....	97
5.1.3 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	98
5.1.4 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์	98
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	98
รายการอ้างอิง	99
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์	105
ภาคผนวก ข ผลการทดลองและการคำนวณ.....	109
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนด์.....	115
ภาคผนวก ง ผลการวิเคราะห์กาลีเซอรินอิสระ โมโน ได และไตรกลีเซอไซด์ และกาลีเซอริน ทั้งหมด.....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	121

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ (ซ้าย) และ Trilauroylglycerol (ขวา).....	16
รูปที่ 2.2 กระบวนการสลายไตรกลีเซอไรด์ให้ได้กรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล.....	17
รูปที่ 2.3 โมเลกุล Cetane สูตรโมเลกุล $C_{16}H_{34}$	17
รูปที่ 2.4 โมเลกุลไตรกลีเซอไรด์.....	17
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล.....	21
รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch process).....	22
รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Plug flow.....	23
รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์.....	24
รูปที่ 2.9 กระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมัน.....	24
รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของวัตถุดิบน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง.....	25
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ Silica tetrahedral unit และ Alumina octrahedral unit.....	35
รูปที่ 2.12 โมเดลของ 1 : 1 Type clay mineral.....	36
รูปที่ 2.13 โมเดลของ 2 : 1 Type clay mineral.....	37
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของโครงสร้าง 2 : 1 phyllosilicates ของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite).....	43
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวระหว่างชั้นของซิลิเกตเลเยอร์.....	44
รูปที่ 2.16 กลไกการดูดซับ.....	49
รูปที่ 2.17 ภาพจำลองวัฏภาคดูดซับ (Adsorbed phase) ที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น เมื่อดูดซับสารดูดซับเป็นก๊าซหรือไอ.....	53
รูปที่ 2.18 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ.....	54
รูปที่ 2.19 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	57
รูปที่ 2.20 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	58

รูปที่ 4.1 กราฟ BET-Plot และ Langmuir-Plot ของเบนโทไนด์ธรรมชาติ.....	70
รูปที่ 4.2 กราฟ BET-Plot และ Langmuir-Plot ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	70
รูปที่ 4.3 BET-Plot และ Langmuir-Plot ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	71
รูปที่ 4.4 BET-Plot และ Langmuir-Plot ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์.....	71
รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียม คลอไรด์ กำลังขยาย 5,000 เท่า และ 10,000 เท่า	73
รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์	74
รูปที่ 4.7 รูปแบบโครงสร้างของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ด้วยเครื่อง XRD	75
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไบโอดีเซลเทียบกับระยะเวลา ที่ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน	78
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับออกจากไบโอดีเซล เทียบกับปริมาณร้อยละของตัวดูดซับที่ใช้.....	79
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับออกจากไบโอดีเซล เทียบกับปริมาณร้อยละของตัวดูดซับที่ใช้แยกตามชนิดของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน	80
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับออกจากไบโอดีเซล เทียบกับความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้บำบัดเบนโทไนด์.....	82
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียม คลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับใน ไบโอดีเซล.....	84
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลของระยะเวลาสัมผัสของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับร้อยละของการดูดซับกลีเซอรินใน ไบโอดีเซล.....	84
รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความ เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับในไบโอดีเซล	86

รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณกับร้อยละของการดูดซับกลีเซอรินในไปโอติเซล	87
รูปที่ 4.16 แสดงรูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับของแก๊สไนโตรเจน (N ₂)	89
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณ	91
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณ.....	91
รูปที่ ง.1 แสดงผลการวิเคราะห์กลีเซอรินอิสระ โมโน ได และไตรกลีเซอไซด์ และกลีเซอรินทั้งหมดของเบนโทไนด์ธรรมชาติ.....	119
รูปที่ ง.2 แสดงผลการวิเคราะห์กลีเซอรินอิสระ โมโน ได และไตรกลีเซอไซด์ และกลีเซอรินทั้งหมด ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาณ	119
รูปที่ ง.3 แสดงผลการวิเคราะห์กลีเซอรินอิสระ โมโน ได และไตรกลีเซอไซด์ และกลีเซอรินทั้งหมด ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาณ	120
รูปที่ ง.4 แสดงผลการวิเคราะห์กลีเซอรินอิสระ โมโน ได และไตรกลีเซอไซด์ และกลีเซอรินทั้งหมดของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณ).....	120

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D6751 และ EN 14214....	6
ตารางที่ 2.2 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2556 ...	7
ตารางที่ 2.3 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลชุมชนสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549	8
ตารางที่ 2.4 วัตถุประสงค์ที่ใช้สำหรับผลิตไบโอดีเซลและราคาต้นทุนในแต่ละประเทศ.....	9
ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ	10
ตารางที่ 2.6 แสดงผลกระทบจากสิ่งเจือปนที่มีต่อคุณภาพไบโอดีเซลและเครื่องยนต์	27
ตารางที่ 2.7 แสดงลักษณะของน้ำเสียที่เกิดจากการทำไบโอดีเซลด้วยวิธีใช้น้ำล้าง	29
ตารางที่ 2.8 แสดงความแตกต่างของการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการต่างๆ	30
ตารางที่ 2.9 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแร่ดินเหนียวสำคัญ 3 ชนิด	38
ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบความแตกต่างตามลักษณะของการดูดซับทั้ง 2 ชนิด.....	47
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยวิธี BET....	69
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า d-spacing ของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ด้วยเครื่อง XRD.....	76
ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ด้วยเทคนิค X-Ray fluorescence spectrophotometer (XRF)	77
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ของไอโซเทอร์มของการดูดซับกลีเซอริน.....	92
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการตรวจสอบคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร	94

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยแสดงค่าปริมาณกลีเซอริน ค่าโมโนกลีเซอไรด์ ค่าไดกลีเซอไรด์ และค่าไตรกลีเซอไรด์ ค่ากลีเซอรินอิสระและค่ากลีเซอริน ทั้งหมด และปริมาณน้ำที่ใช้ล้างจากการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์.....	96
ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองของระยะเวลาต่อการตกตะกอนของกลีเซอรินในไบโอดีเซล	109
ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองของปริมาณเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมัลชันต่อร้อยละ การดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล.....	110
ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองปริมาณเบนโทไนด์ธรรมชาติต่อร้อยละการดูดซับกลีเซอรินใน ไบโอดีเซล.....	111
ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้บำบัดเบนโทไนด์ ต่อผลการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล	112
ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองของระยะเวลาที่ใช้ต่อผลการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล.....	113
ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองขนาดเบนโทไนด์ต่อผลร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล.....	114
ตารางที่ ค.1 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนด์ ธรรมชาติ.....	115
ตารางที่ ค.2 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนด์ บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	116
ตารางที่ ค.3 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนด์ บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร.....	117
ตารางที่ ค.4 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนด์ บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมัลชัน (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)	118

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ไบโอดีเซลถือเป็นเชื้อเพลิงทางชีวภาพที่มีบทบาทสำคัญในการนำมาใช้ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงประเภทดีเซล ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก 25 ปี พ.ศ. 2564 ในระยะเวลา 10 ปี โดยกระทรวงพลังงานได้กำหนดให้ปี 2564 เป้าหมายให้มีการส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซล 7.2 ล้านลิตรต่อวัน และได้มีประกาศให้ใช้น้ำมันดีเซลที่มีสัดส่วนของการผสมไบโอดีเซลร้อยละ 6.5 – 7 โดยปริมาตร โดยอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมนี้จะเป็นอัตราส่วนที่สมาคมอุตสาหกรรมยานยนต์ไทยยอมรับให้ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ สำหรับในปัจจุบันพบว่าการผลิตไบโอดีเซล (B100) ในประเทศไทยจะใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นวัตถุดิบหลัก โดยมีรายงานการผลิตไบโอดีเซลในปี 2558 จำนวน 3.384 ล้านลิตรต่อวัน (กรมธุรกิจพลังงาน, กระทรวงพลังงาน) ดังนั้นการสนับสนุนให้มีการใช้เชื้อเพลิงทางชีวภาพจะสามารถสร้างความมั่นคง และเสถียรภาพทางด้านพลังงาน อีกทั้งสามารถลดการสูญเสียเงินตราออกนอกประเทศ และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร เพื่อให้มีการพัฒนาศักยภาพทางด้านพลังงานอย่างยั่งยืน

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญคือ ขั้นตอนแรกคือ กระบวนการสังเคราะห์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันจากพืช หรือไขมันสัตว์ โดยเติมแอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ให้เป็นสารประกอบหลักเอสเทอร์ของกรดไขมัน และผลพลอยได้เป็นกลีเซอรอล ขั้นตอนที่สองคือ กระบวนการทำไบโอดีเซลในบริสุทธิ์ โดยจะเป็นการแยกเอาสารประกอบเอสเทอร์ของกรดไขมันออกจากกลีเซอรอล เพื่อล้างแอลกอฮอล์ ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารปนเปื้อนอื่นๆ ที่สามารถละลายน้ำได้ออกจากผลิตภัณฑ์ โดยกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์มีหลายวิธี ได้แก่ การล้างด้วยน้ำ การใช้ตัวดูดซับ และการแยกด้วยเมมเบรน สำหรับประเทศไทยโดยส่วนใหญ่จะใช้กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการล้างด้วยน้ำ เนื่องจากต้นทุนมีราคาถูก แต่วิธีนี้จะมีข้อเสียคืออาจทำให้เกิดอิมัลชัน ซึ่งถ้าหากมีปริมาณสูงมากเกินไปก็จะก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการแยกกลีเซอรอลออกจากผลิตภัณฑ์ และทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ลดลง และข้อเสียที่สำคัญมากของวิธีนี้ก็คือจะเกิดน้ำเสียปริมาณมาก โดยพบว่าการผลิตไบโอดีเซล 1 ลิตรจะทำให้เกิดน้ำเสียจากกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ประมาณ 10 ลิตร ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้

ดังนั้นการใช้ตัวดูดซับจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการทำมาใช้สำหรับกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ในปัจจุบันตัวดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่ ดินเหนียวที่ผ่านการบำบัด (Activated clay)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เส้นใยที่ผ่านการบำบัด (Activated fiber) เป็นต้น สำหรับเบนโทไนต์ถือเป็นแร่ที่สามารถหาได้ง่ายภายในประเทศ โดยแหล่งผลิตเบนโทไนต์ที่สำคัญคือจังหวัดลพบุรีและจังหวัดกาญจนบุรี ดังนั้นจึงได้นำเบนโทไนต์มาพัฒนาเป็นตัวดูดซับเพื่อใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการดูดซับสำหรับการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยการปรับปรุงประสิทธิภาพของเบนโทไนต์ด้วยการบำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ เพื่อนำมาใช้เป็นตัวดูดซับสำหรับกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์จึงเป็นที่สนใจในการศึกษานี้

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาผลของการบำบัดเบนโทไนต์ด้วยแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน และผลของขนาดอนุภาคของเบนโทไนต์ ปริมาณของเบนโทไนต์ที่ใช้ในการดูดซับ สภาวะอุณหภูมิและระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยาดูดซับบนเบนโทไนต์ ให้มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D6751 โดยการกำหนดค่าความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลมาจากการทดสอบหาปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์, ไตรกลีเซอไรด์, กลีเซอรินอิสระ และกลีเซอรินทั้งหมดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ตามมาตรฐาน EN14105, วิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด ด้วยวิธีการไทเทรชันตามมาตรฐาน ASTM D664 และค่าความหนืดด้วยเครื่องหาค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. หาตัวอย่างเบนโทไนต์ แคลเซียมคลอไรด์ และน้ำมันปาล์ม พร้อมทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของเบนโทไนต์ ด้วยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy : XRF)
3. การเตรียมตัวดูดซับจากเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1, 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ความเร็วในการกวนผสม 800 รอบต่อนาที หลังจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น และอบเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ที่ผ่านการบำบัดให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส บดแร่ และคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐาน 60, 100 และ 200 ช่องต่อตารางเซนติเมตร

4. สังเคราะห์ไบโอดีเซลจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับ เมทานอล อัตราส่วนของน้ำมันต่อแอลกอฮอล์เป็น 6 : 1 และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 กรัม เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง [16]

5. ศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียม คลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพเบนโทไนด์จากตัวแปรการทดลอง คือ ปริมาณของตัวดูดซับ ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ ระยะเวลาที่ใช้ในสัมผัส

6. ศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยการล้างน้ำ และกระบวนการทำ ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยการผ่านตัวดูดซับเบนโทไนด์ธรรมชาติ พร้อมทั้งตรวจสอบคุณภาพไบโอดีเซล บริสุทธิ์ด้วยการหาค่าปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ กลีเซอรินอิสระ และ กลีเซอรินทั้งหมด วิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด

7. ตรวจสอบคุณภาพความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซลทั้งก่อนและหลังกระบวนการทำไบโอดีเซล ให้บริสุทธิ์ด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ตามมาตรฐาน ASTM D6751 โดยการทดสอบหาปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ กลีเซอริน อิสระ และกลีเซอรินทั้งหมด ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี วิธีการตามมาตรฐาน EN14105 วิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดด้วยวิธีการไทเทรชันตามมาตรฐาน ASTM D664 และค่าความหนืดด้วย เครื่องหาค่าความหนืดตามมาตรฐาน ASTM D445

8. เปรียบเทียบ วิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง สรุปผลการศึกษา และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ลดปริมาณน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์ บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไบโอดีเซล (Biodiesel) [1]

ด้วยสถานการณ์น้ำมันของโลกที่มีความผันผวนทั้งในด้านราคาและปริมาณการผลิต ปัญหาการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศโดยเฉพาะในส่วนของน้ำมันเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังมีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อเกิดภาวะโลกร้อน ทำให้มีการมองหาพลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้มาจากฟอสซิล ซึ่งไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงทางชีวภาพที่ถูกคิดค้นเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล เพราะไบโอดีเซลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่ใช้ทดแทนและหมุนเวียนจากทรัพยากรธรรมชาติ เช่น น้ำมันพืช และไขมันจากสัตว์ โดยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรงหรือผสมกับน้ำมันดีเซลที่สัดส่วนต่างๆ โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องยนต์ อีกทั้งยังช่วยรักษาสภาพเครื่องยนต์ให้ใช้งานได้มากกว่าอีกด้วย เนื่องจากออกซิเจนในไบโอดีเซลให้การสันดาปที่สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีควันดำและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์น้อย ช่วยลดมลพิษทางอากาศ รวมทั้งลดการอุดตันของระบบไอเสีย เนื่องจากองค์ประกอบของไบโอดีเซลไม่มีธาตุกำมะถัน และการมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงช่วยให้การเผาไหม้ได้ดีขึ้น และลดมลพิษซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนมอนอกไซด์ และฝุ่นละออง

ไบโอดีเซลถูกคิดค้นและนำมาทดลองใช้ในเครื่องยนต์เป็นผลสำเร็จครั้งแรก เมื่อวันที่ 10 สิงหาคม ค.ศ.1893 โดยวิศวกรเยอรมัน “รูดอล์ฟ ดีเซล” (Rudolf C. Diesel : 1858-1913) ผู้ประดิษฐ์เครื่องยนต์ “ดีเซล” และจดสิทธิบัตรในปีถัดมา โดยดีเซลได้นำเครื่องยนต์ลูกสูบเดี่ยวที่ทำจากเหล็กยาว 3 เมตร ซึ่งมีล้อเฟืองติดอยู่ที่ฐานมาทดลองใช้กับไบโอดีเซลที่ทำจากเมล็ดถั่วเหลืองได้เป็นผลสำเร็จเป็นครั้งแรกของโลก ณ เมืองอ็อกส์บวร์ก ประเทศเยอรมนี และเพื่อเป็นการระลึกถึงความสำเร็จในครั้งนั้น จึงทำให้วันนี้ ถูกกำหนดให้เป็นวันไบโอดีเซลระหว่างประเทศในเวลาต่อมา หลังจากดีเซลได้ทดลองโซวในประเทศเยอรมันในปี ค.ศ. 1893 และได้นำไบโอดีเซลที่ทำมาจากน้ำมันถั่วมาทดลองกับเครื่องยนต์อีกครั้งในงานเวิร์ลด์แฟร์ ณ กรุงปารีส ประเทศฝรั่งเศสในปี ค.ศ. 1898

2.1.1 ความหมายของไบโอดีเซล [1]

ไบโอดีเซล คือสารกลุ่มเอสเทอร์ที่ผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาแปรสภาพโดยกระบวนการทางเคมี โดยทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ (เมทานอลหรือเอทานอล) และใช้ต่าง

(โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซล สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้ ซึ่งไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์นี้เป็นที่ยอมรับและมีการใช้โดยทั่วไป เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา บราซิล เยอรมัน และมาเลเซีย เป็นต้น

ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ต้องผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) คือ การนำเอาน้ำมันจากพืชหรือไขมันสัตว์ไปทำปฏิกิริยาแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้เอสเทอร์ หรือเรียกกันโดยทั่วไปว่าไบโอดีเซล โดยผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยถ้าใช้เมทิลแอลกอฮอล์ จะเรียกว่าเมทิลเอสเทอร์ และถ้าใช้เอทิลแอลกอฮอล์ ก็เรียกว่าเอทิลเอสเทอร์ นอกจากนี้ยังได้ “กลีเซอรอล (Glycerol)” เป็นผลพลอยได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยาและอุตสาหกรรมเครื่องสำอางได้อีกด้วย

2.1.2 คุณสมบัติของไบโอดีเซล [2-5]

ไบโอดีเซลที่ผลิตได้ต้องมีสมบัติที่ได้รับการยอมรับจากทั้งจากภาคอุตสาหกรรมผู้ผลิตรถยนต์และผู้ค้าน้ำมัน จึงมีการกำหนดมาตรฐานสมบัติของไบโอดีเซล คือ ASTM D6751 (ASTM = American Society for Testing and Materials) สำหรับสหรัฐอเมริกา และ EN 14214 (EN = European Standard) สำหรับสหภาพยุโรป

สำหรับประเทศไทย กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้ออกประกาศเพื่อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลขึ้น 2 ฉบับ ได้แก่

1. ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2556 สำหรับไบโอดีเซลที่นำมาผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ซึ่งสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกประเภท (ไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์) โดยผู้ผลิตไบโอดีเซลประเภทนี้ต้องขออนุญาตผลิตและจำหน่าย จากกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน น้ำมันปาล์มดิบ ไซสเตียร์น และน้ำมันก๊าดบริสุทธิ์เป็นวัตถุดิบ คุณลักษณะของไบโอดีเซลจะต้องผ่านมาตรฐาน 24 รายการ เรียกว่า “ไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์” [5]

2. ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549 ประกาศขึ้น เพื่อการควบคุมคุณภาพของไบโอดีเซลที่ผลิตขึ้นในชุมชน และใช้กันเองภายในชุมชน ใช้กับเครื่องจักรกลการเกษตรประเภทรอบต่ำเท่านั้น ซึ่งหมายถึงเครื่องยนต์สูบลมเดียว สี่จังหวะ สูบนอน ระบายความร้อนด้วยน้ำ ส่วนใหญ่จะทำการผลิตใช้เองในชุมชน โดยใช้ไขมันพืชใช้แล้ว หรือไขมันสัตว์เป็นวัตถุดิบ คุณลักษณะของไบโอดีเซลจะต้องผ่านมาตรฐาน 13 รายการ เรียกว่า “ไบโอดีเซลชุมชน” [3]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันดีเซลและไบโอดีเซลตามมาตรฐาน ASTM D6751 และ EN 14214 [6]

คุณสมบัติ	น้ำมันดีเซล ASTM D975	ไบโอดีเซล		วิธีการทดสอบ	
		ASTM D6751	EN 14214	ASTM	EN
ความหนาแน่น ณ 15 องศาเซลเซียส (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	850	880	860 – 900	D 1298	EN ISO 3675 /12185
ความหนืด ณ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	2.6	1.9 – 6.0	3.5 – 5.0	D 445	EN ISO 3104
จำนวนซีเทน	40 – 50	Min. 47	Min. 51	D 613	EN ISO 5165
ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีน/100 กรัม)	38.3	-	Max. 120	-	EN 14111
ค่าความร้อน (มิลลิจูล/กิโลกรัม)	42 – 46	-	35	-	EN 14214
ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม)	0.062	Max. 0.50	Max. 0.5	D 664	EN 14104
จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	-35	(-15) – (-16)	-	D 97	-
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	60 – 80	Min. 100 – 170	>120	D 93	ISO DIS 3679
จุดหมอก (องศาเซลเซียส)	-20	(-3) – (-12)	-	D 2500	-
จุดจุดดับไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)	-25	19	Max. +5	D 6371	EN 14214
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	1	Max. 3	Min. 1	D 130	EN ISO 2160
คาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	84 – 87	77	-	-	-
ไฮโดรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	12 – 16	12	-	-	-
ออกซิเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0 – 0.31	1	-	-	-
ปริมาณเมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	-	Max. 0.20	-	EN 14110
ปริมาณน้ำและตะกอน (ร้อยละโดยปริมาตร)	0.05	Max. 0.05	Max. 500 ^b	D 2709	EN ISO 12937
ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.01	0.02	0.02		EN 14214
กำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.05	Max. 0.05	10 ^b	D 5453	EN ISO 20846
เถ้าซัลเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	Max. 0.02	Max. 0.02	D 874	EN ISO 3987
ฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	Max. 0.001	10 ^b	D 4951	EN 14107
กลีเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	Max. 0.02	Max. 0.02	D 6584	EN 14105/14106
กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	Max. 0.24	0.25	D 6584	EN 14105
โมนอกลิเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	0.52	0.8	-	EN 14105
ไดกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	-	0.2	-	EN 14105
ไตรกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	-	0.2	-	EN 14105
CCR 100เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.17 (0.1) ^d	Max. 0.05	Max. 0.03	D 4530	EN ISO 10370
อุณหภูมิของการกลั่น (เปอร์เซ็นต์)	-	Max. 360°C	-	D 1160	-
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง)	-	3 min	6 min	D 675	EN 14112
คุณสมบัติการหล่อลื่น (HFRR; μm)	685	314	-	-	-

ตารางที่ 2.2 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2556 [5]

รายการ	ข้อกำหนด	เกณฑ์มาตรฐาน		วิธีทดสอบ
1	เมทิลเอสเทอร์, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
3	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส, เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D 445
4	จุดวาบไฟ, องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5	กำมะถัน, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622
6	กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น), ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7	จำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8	เถ้าซิลิเกต, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9	น้ำ, มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	500	EN ISO 12937
10	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด, มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	24	EN 12662
11	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 1	ASTM D 130
12	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส, ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า	10	EN 14112
13	ค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14	ค่าไอโอดีน, กรัมไอโอดีน/100 กรัม	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15	กรดคลอรีนเลนิกเมทิลเอสเทอร์, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16	เมทานอล, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17	โมโนกลีเซอไรด์, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.70	EN 14105
18	ไดกลีเซอไรด์, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
19	ไตรกลีเซอไรด์, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20	กลีเซอรินอิสระ, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21	กลีเซอรินทั้งหมด, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22	โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม), มิลลิกรัม/กิโลกรัม โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม), มิลลิกรัม/กิโลกรัม	ไม่สูงกว่า	5.0	EN 14108 และ EN 14109 pr EN 14538
23	ฟอสฟอรัส, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24	จุดขุ่น (องศาเซลเซียส)	รายงานต่ออธิบดีเป็นรายไตรมาส		
25	จุดจุดตันไส้กรองที่อุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)	รายงานต่ออธิบดีเป็นรายไตรมาส		
26	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี		

ตารางที่ 2.3 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลชุมชนสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549 [3]

รายการ	ข้อกำหนด	เกณฑ์มาตรฐาน		วิธีทดสอบ
1	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส, กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
2	ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส, เซนติสโตกส์	ไม่ต่ำกว่าและ ไม่สูงกว่า	1.9 8.0	ASTM D 445
3	จุดวาบไฟ, องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
4	กำมะถัน, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.0015	ASTM D 2622
5	จำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	47	ASTM D 613
6	เถ้าซิลิเกต, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
7	น้ำและตะกอน, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.2	ASTM D 2079
8	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ไม่สูงกว่า	หมายเลข 3	ASTM D 130
9	ค่าความเป็นกรด, มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม	ไม่สูงกว่า	0.80	ASTM D 664
10	กลีเซอรินอิสระ, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 6584
11	กลีเซอรินทั้งหมด, ร้อยละโดยน้ำหนัก	ไม่สูงกว่า	1.5	ASTM D 6584
12	สี		ม่วง	ตรวจพินิจด้วยสายตา
13	สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดี		

2.1.3 วัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล [6-9]

วัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ น้ำมันพืชและน้ำมันจากไขสัตว์ ซึ่งมีประเภทและคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้การเลือกวัตถุดิบมาผลิตไบโอดีเซลขึ้นอยู่กับปัจจัยในเรื่องของราคา ปริมาณและองค์ประกอบในน้ำพืชหรือไขมันสัตว์ชนิดนั้นๆ รวมทั้งความเหมาะสมของปริมาณการปลูกพืชน้ำมันในพื้นที่นั้นๆ ด้วย เช่น ในสหรัฐอเมริกามีการปลูกถั่วเหลืองมาก จึงถูกนำไปใช้ทั้งเป็นน้ำมันสำหรับการบริโภคและเป็นพืชน้ำมันผลิตไบโอดีเซล ในขณะที่ประเทศในทวีปยุโรปจะใช้น้ำมันจากเมล็ดเรพและเมล็ดทานตะวันเพราะมีการเพาะปลูกกันมาก สำหรับประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย และไทย พืชน้ำมันที่มีศักยภาพสำหรับนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ปาล์มน้ำมันและมะพร้าว เพราะมีพื้นที่เพาะปลูกปริมาณมาก เป็นต้น สำหรับวัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตไบโอดีเซลในแต่ละประเทศแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 วัตถุดิบที่ใช้สำหรับผลิตไบโอดีเซลและราคาต้นทุนในแต่ละประเทศ [8]

ประเทศ	วัตถุดิบที่ใช้	ราคา (ดอลลาร์สหรัฐต่อลิตร)
มาเลเซีย	ปาล์มน้ำมัน, สบู่ดำ	0.53
อินโดนีเซีย	ปาล์มน้ำมันที่ใช้แล้ว, สบู่ดำ	0.49
อาร์เจนตินา	ถั่วเหลือง	0.62
สหรัฐอเมริกา	ถั่วเหลือง	0.70
บราซิล	ถั่วเหลือง, ปาล์มน้ำมัน, น้ำมันดอกทานตะวัน, น้ำมันละหุ่ง	0.62
เนเธอร์แลนด์	ถั่วเหลือง	0.75
เยอรมนี	เมล็ดเรพ, ไขมันสัตว์	0.79
ฟิลิปปินส์	มะพร้าว	0.53
เบลเยียม	เมล็ดเรพ, ไขมันสัตว์	0.78
สเปน	เมล็ดเรพ	1.71
อินเดีย	สบู่ดำ, หยีน้ำ	0.63 – 0.72
ลัตเวีย	เมล็ดเรพ, น้ำมันดอกทานตะวัน	0.56
ลิทัวเนีย	เมล็ดเรพ, น้ำมันดอกทานตะวัน	0.54
ฮังการี	เมล็ดเรพ, น้ำมันดอกทานตะวัน	0.86
โปแลนด์	เมล็ดเรพ, น้ำมันดอกทานตะวัน	0.99
สโลวาเกีย	เมล็ดเรพ, น้ำมันดอกทานตะวัน	0.93
ยุโรป	เมล็ดเรพ, น้ำมันดอกทานตะวัน	0.30 – 0.69, 0.54 – 0.62, 0.34 – 0.42
ไทย	ปาล์มน้ำมัน, มะพร้าว, น้ำมันพืชใช้แล้วและไขมันสัตว์	0.84
กรีซ	น้ำมันดอกทานตะวัน, เมล็ดเรพ	0.77 – 1.08, 1.38, 0.90 – 1.32
ไต้หวัน	น้ำมันพืชใช้แล้ว, น้ำมันดอกทานตะวัน, ถั่วเหลือง	0.90, 1.92, 1.59
สหราชอาณาจักร	น้ำมันพืชใช้แล้ว	0.46, 0.81, 0.88

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันพืชชนิดต่าง ๆ [10]

น้ำมัน	C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	อื่นๆ
น้ำมันข้าวโพด	6.0	-	2.0	44.0	48.0	-	-
เมล็ดฝ้าย	28.3	-	0.9	13.3	57.5	-	-
น้ำมันมะกอก	14.6	-	-	75.4	10	-	-
น้ำมันปาล์ม	42.6	0.3	4.4	40.5	10.1	0.2	1.1
น้ำมันถั่วลิสง	11.4	-	2.4	48.3	32.0	0.9	9.1
เมล็ดเรพ	3.5	0.1	0.9	54.1	22.3	-	0.2
ดอกคำฝอย	7.3	0.1	1.9	13.5	77	-	-
น้ำมันถั่วเหลือง	11.9	0.3	4.1	23.2	54.2	6.3	-
น้ำมันทานตะวัน	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	-

2.1.3.1 การแบ่งกลุ่มวัตถุดิบสำหรับการผลิตไบโอดีเซล [7, 8]

โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มของวัตถุดิบที่ใช้สำหรับการผลิตไบโอดีเซลได้เป็น 5 ประเภทหลักๆ คือ

1. พืชน้ำมันที่สามารถรับประทานได้ (Edible vegetable oil)

ปัจจุบันพืชน้ำมันที่สามารถรับประทานได้ถือเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตไบโอดีเซลคิดเป็นร้อยละ 95 ของการผลิตไบโอดีเซลทั้งหมด [11] เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันทานตะวัน และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ทำให้มีการคาดการณ์ว่าในระหว่างปี 2005 – 2017 การผลิตไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันที่สามารถรับประทานได้มีแนวโน้มมากกว่าหนึ่งสามของพืชน้ำมันที่กินได้ทั้งหมด (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009) ซึ่งเป็นผลมาจากประเทศอุตสาหกรรมที่มีเป้าหมายในการส่งเสริมการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพมากขึ้น ทำให้มีขยายพื้นที่เพาะปลูกพืชน้ำมันเพื่อผลิตไบโอดีเซลมากขึ้น อาจส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดแคลนอาหารของโลก เนื่องจากพื้นที่ในการเพาะปลูกลดลง ทำให้ปัจจุบันเริ่มมีการผลิตไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันที่ไม่สามารถรับประทานได้มากขึ้นและจากแหล่งอื่น

2. พืชน้ำมันที่ไม่สามารถรับประทานได้ (Non-edible vegetable oil)

จากปัญหาในการนำน้ำมันที่ใช้สำหรับการบริโภคมาใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลข้างต้น ทำให้ในปัจจุบันนิยมหาพืชน้ำมันที่ไม่สามารถรับประทานได้มาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลแทน เช่น สบู่ดำ ยาสูบ รำ น้ำมันสะเดา น้ำมันเมล็ดยางพารา และน้ำมันเมล็ดฝ้าย เป็นต้น

3. น้ำมันที่ใช้แล้ว (waste or recycled oil)

น้ำมันที่ใช้แล้วคือ น้ำมันที่ใช้แล้วจากการปรุงอาหาร ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับทดแทนในการใช้พืชน้ำมันสำหรับการผลิตไบโอดีเซล เพราะในปัจจุบันจะพบว่าราคาของพืชน้ำมันที่ใช้สำหรับรับประทานได้จะมีราคาที่สูงกว่า 2 – 3 เท่า [10] และยังเป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียที่ใช้แล้ว ดังนั้นน้ำมันพืชใช้แล้วจึงเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพเพียงพอในการนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ โดยการเปลี่ยนน้ำมันพืชใช้แล้วให้เป็นสารกลุ่มเมทิลเอสเทอร์ด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ซึ่งทำให้ลดน้ำหนักโมเลกุลประมาณหนึ่งในสาม ความหนืดลดลงประมาณหนึ่งในเจ็ด และจุดวาบไฟจะมีค่าลดลงเล็กน้อย สำหรับข้อควรระวังของการใช้น้ำมันที่ใช้แล้วในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล คือมีปริมาณกรดไขมันอิสระ และน้ำสูง จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการระเหยน้ำออกและการทำให้น้ำมันพืชใช้แล้วมีความเป็นกลาง (Drying and neutralization) จึงมีความจำเป็นก่อนที่จะนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาผลิตเป็นไบโอดีเซล

4. ไขมันจากสัตว์ (Animals fats)

ไขมันจากสัตว์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล เช่น น้ำมันหมู ไขมันไก่ Tallow และ Yellow grease เป็นต้น ไบโอดีเซลที่ผลิตจากไขมันจากสัตว์ยังมีปริมาณการผลิตที่น้อยมาก เนื่องจากไขมันที่ได้จากสัตว์ส่วนใหญ่จะมีความหนืดสูงและอยู่ในสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากไขมันสัตว์จะประกอบด้วยกรดไขมันที่มีความอิ่มตัวสูง ดังนั้นเมทิลเอสเทอร์ของไขมันจากสัตว์ก็จะมีค่าความหนาแน่น ความหนืดที่สูงด้วย ข้อดีของการใช้ไขมันสัตว์ในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ จำนวนซีเทนสูง ไม่กัดกร่อน เป็นเชื้อเพลิงสะอาดและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และมีปริมาณกรดไขมันอิสระและปริมาณน้ำต่ำ ข้อเสียคือมีจุดวาบไฟที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลและมีสมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำไม่ดี และไม่สามารถตอบสนองความต้องการเพื่อใช้ในการผลิตไบโอดีเซลได้ เพราะไขมันสัตว์มีปริมาณที่จำกัด

5. น้ำมันอื่นๆ เช่น สาหร่าย (Algae)

สาหร่ายเป็นพืชอีกชนิดหนึ่งชนิดที่ได้รับความสนใจเพื่อนำมาใช้ในการผลิตเป็นไบโอดีเซล ซึ่งสามารถให้ผลผลิตต่อไร่ต่อปีมากกว่าน้ำมันปาล์ม 10–30 เท่า แต่อย่างไรก็ตามพบว่าต้นทุนในการสกัดน้ำมันจากสาหร่ายมีราคาสูง จึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีและการวิจัยเพื่อพัฒนาให้มีต้นทุนที่ต่ำลง นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงสาหร่ายยังเป็นการช่วยลดสารพิษในแหล่งน้ำและลดก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศได้อีกทางหนึ่งด้วย

2.1.3.2 วัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทย [1]

1. ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) เป็นพืชตระกูลปาล์มลักษณะลำต้นเดี่ยว ที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด และเป็นพืช น้ำมันที่มีการผลิตทั่วโลกเป็นอันดับสองรองจากน้ำมันถั่วเหลือง โดยมีประเทศอินโดนีเซียและ มาเลเซียเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของโลก ส่วนประเทศไทยเป็นผู้ผลิตใหญ่ลำดับที่สามของโลก มีการปลูก ปาล์มน้ำมันทั่วทุกภาค โดยภาคใต้มีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันมากที่สุดในแถบพื้นที่จังหวัดกระบี่ สุราษฎร์ธานี และชุมพร พันธุ์ปาล์มน้ำมันที่ส่งเสริมให้เกษตรกรปลูกเป็นปาล์มน้ำมันลูกผสมเทเนอร่า เนื่องจากเป็นพันธุ์ปาล์มที่ให้ปริมาณน้ำมันสูง ใช้ได้ทั้งการบริโภค อุตสาหกรรม หรือใช้เพื่อผลิตเป็น ไบโอดีเซล

น้ำมันที่ได้จากปาล์มมีอยู่ 2 ชนิด คือ น้ำมันจากเปลือกปาล์ม มีค่า ความร้อนประมาณ 39,550 kJ/kg และน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม มีค่าความร้อนประมาณ 39,720 kJ/kg ทะลายปาล์มสดมีน้ำมันปาล์มประมาณ 20 – 21 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักทะลายปาล์มสด แต่ สามารถสกัดน้ำมันออกมาได้ประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเมล็ดในมีน้ำมันอยู่ ประมาณร้อยละ 5 จาก ทะลายปาล์มสด หรือมีอยู่ในปริมาณร้อยละ 50 จากเมล็ดในปาล์มน้ำมัน

น้ำมันปาล์มจะประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัว (กรดลอริก กรดปาล์ม มิติก และกรดสเตียริก) รวมกันประมาณ 52 เปอร์เซ็นต์ และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (กรดโอเลอิก กรด ลิโนลิก และกรดลิโนลิโนอิก) รวมกันประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารประกอบคาร์บอน 12 – 16 อะตอม

น้ำมันปาล์มและน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่สกัดได้จากโรงงานสกัดน้ำมัน ปาล์มเป็นน้ำมันดิบที่ยังไม่สามารถบริโภคได้ ต้องนำไปผ่านการกลั่นให้เป็นน้ำมันบริสุทธิ์ด้วย กระบวนการแยกยางเหนียว ลดกรด ฟอกสี และดูดกลิ่น เพื่อให้ได้เป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ เรียกว่า ปาล์มโอเลอิน (โอเลอิน) 65-70 เปอร์เซ็นต์ และปาล์มสเตียรีน (ไฮสเตียรีน) 30-35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่ง ผลผลิตทั้งหมดนี้สามารถนำไปใช้เพื่อการอุปโภคบริโภคได้อย่างมากมาย เช่น ทำเป็นน้ำมันปรุงอาหาร น้ำมันทอด ผลิตภัณฑ์นมข้น ไอศกรีม เนยเทียม เนยขาว ไล้ขนมปังกรอบ เนย โกโก้ ครีมเทียม ไขมันทำ ขนมปัง สบู่ เทียนไข ผงซักฟอก ยาสีฟัน และใช้ในอุตสาหกรรมโพลิโอเคมีคัล โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยุค น้ำมันปิโตรเลียมแพงแล้ว น้ำมันปาล์มสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งนำไปใช้เป็น เชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล หรือที่เรานิยมเรียกว่า ไบโอดีเซล

การผลิตไบโอดีเซล สามารถใช้น้ำมันทุกส่วนที่ได้จากปาล์มน้ำมันมา เป็นวัตถุดิบ เช่น น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มโอเลอิน ไฮสเตียรีน กรดไขมันปาล์มกลั่น และน้ำมันเมล็ด ในปาล์ม แต่สำหรับการผลิตในเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องพิจารณาต้นทุนในการผลิต ดังนั้นจึงนิยมใช้ส่วน

ของน้ำมันปาล์มที่ยังไม่มีการใช้ประโยชน์มาก่อน เช่นไฮสเดียร์นหรือน้ำมันปาล์มดิบ เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบเมื่อต้องการรักษาสมดุลของตลาดไม่ให้เกิดภาวะล้นตลาด โดยไม่นำน้ำมันส่วนที่มีราคาสูง เช่น น้ำมันปาล์มโอสลินและน้ำมันเมล็ดในปาล์มมาเป็นวัตถุดิบ เนื่องจากมีการใช้น้ำมันปาล์มโอสลิน ในการบริโภค และใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคมี และเครื่องสำอางอยู่แล้ว

2. น้ำมันมะพร้าว

เป็นพืชยืนต้นในวงศ์เดียวกับปาล์มน้ำมัน มีการเพาะปลูกกันมากในแถบเขตร้อน เติบโตได้ดีในดินร่วนซุยหรือดินร่วนปนทรายที่ไม่เปรี้ยวหรือเค็มจัด มะพร้าวเป็นพืชที่ไม่มีรากแก้ว เป็นลำต้นเดี่ยวไม่แตกกิ่งก้าน และมักมีขนาดลำต้นอยู่ในช่วง 20 – 40 เซนติเมตร ไม่ขยายขนาดออกด้านข้างแต่จะขยายขนาดด้านสูงเพียงอย่างเดียว มะพร้าวมีหลายพันธุ์ มีความสูงประมาณ 12 – 30 เมตร เริ่มให้ผลเมื่ออายุ 3 – 4 ปี ผลผลิตถูกนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์อาหารเป็นหลัก ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ได้หลายอย่าง คือ เนื้อมะพร้าว น้ำมันมะพร้าว (กะทิ) น้ำมันมะพร้าว พืชที่มีการปลูกมะพร้าวมากในประเทศไทย ได้แก่ ภาคใต้ช่วงจังหวัดประจวบคีรีขันธ์และชุมพร และจังหวัดในภาคตะวันออก เช่น จังหวัดตราด และหมู่เกาะต่างๆ ในทะเลอ่าวไทย

น้ำมันมะพร้าวได้จากการคั้นเนื้อมะพร้าวที่ตากแห้ง หรือใช้การอบด้วยความร้อน น้ำมันมะพร้าวจะเริ่มจับเป็นไขเมื่ออุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส และจะเป็นก้อนไม่สามารถไหลได้เมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 14 องศาเซลเซียส การนำน้ำมันมะพร้าวมาผลิตเป็นไบโอดีเซลก็จะใช้การทำปฏิกิริยาแบบทรานเอสเทอร์ิฟิเคชัน เช่นเดียวกับน้ำมันจากพืชอื่นๆ ซึ่งจะให้ไบโอดีเซลที่มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและสารประกอบซัลเฟอร์ปลดปล่อยออกมา พร้อมกับไอเสียน้อยกว่า น้ำมันดีเซลน้ำมันมะพร้าวมีค่าความร้อนเท่ากับ 37,540 kJ/kg

น้ำมันมะพร้าวแบ่งได้เป็น 2 ชนิดหลัก ได้แก่ น้ำมันมะพร้าวทั่วไป (RBD Coconut Oil) และน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์ (Virgin Coconut Oil) ซึ่งน้ำมันมะพร้าวบริสุทธิ์นี้กำลังได้รับความสนใจในด้านการบริโภคอย่างสูงเนื่องจากเป็นที่นิยมและยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีคุณประโยชน์มากมายต่อสุขภาพ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตดีเซลปาล์มและดีเซลมะพร้าวด้วยเทคนิคและภูมิปัญญาของชาวบ้าน เพื่อสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้

น้ำมันพืชสามารถนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลและหรือน้ำมันก๊าดด้วยอัตราส่วนต่างๆ กัน แต่ในด้านคุณสมบัตินั้นพบว่ามีความแตกต่างจากน้ำมันดีเซล โดยเฉพาะค่าความถ่วงจำเพาะและค่าความหนืดที่สูงกว่ามาตรฐานน้ำมันดีเซลมาก อย่างไรก็ตามเมื่อใช้น้ำมันดีเซลมะพร้าวดิบเป็นเชื้อเพลิงในยานพาหนะ พบว่าปริมาณสารมลพิษบางชนิดลดลงและบางชนิดเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงนั้น เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซลมะพร้าวดิบจะมีอัตราการสิ้นเปลืองสูงกว่าเมื่อใช้น้ำมันดีเซลเนื่องจากค่าความร้อนที่ต่ำกว่า จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงความ

เหมาะสมทั้งในด้านประเภทของน้ำมันให้มีความเหมาะสมกับประเภทของเครื่องยนต์และมลพิษที่เกิดขึ้นด้วย

3. สบู่ดำ

สบู่ดำเป็นพืชที่จัดอยู่ในวงศ์ไม้ยางพารา มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาเขตร้อน เป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ ซึ่งชาวโปรตุเกสได้นำเข้ามาปลูกในประเทศไทยในช่วงปลายสมัยกรุงศรีอยุธยา

ในประเทศไทยสามารถพบสบู่ดำได้ทั่วไปในทุกภาคของประเทศ ซึ่งทนต่อสภาพภูมิอากาศแห้งแล้งได้ดี มีความหลากหลายค่อนข้างมากในลักษณะต้น ใบ ช่อดอก ผล และเมล็ด ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2 – 7 เมตร ลำต้นมีลักษณะเกลี้ยงเกลา ใบเรียบมี 4 แฉกคล้ายใบละหุ่ง แต่มีหยักตื้นกว่า ใบที่เจริญเติบโตเต็มที่มีขนาดเท่าฝ่ามือ ในลำต้น ใบ ผล และเมล็ดของต้นสบู่ดำจะมีกรดไฮโดรไซยานิก (Hydrocyanic Acid) สบู่ดำจัดเป็นพืชน้ำมันชนิดหนึ่ง เพราะน้ำมันที่ได้จากเมล็ดสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่เกษตรกรใช้อยู่ได้ โดยไม่ต้องใช้น้ำมันชนิดอื่นผสมแต่อย่างใด และยังสามารถนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ด้วย เมล็ดสบู่ดำมีส่วนประกอบของน้ำมันในเมล็ดประมาณ 33.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก มีค่าความร้อนประมาณ 39,000 kJ/kg แต่น้ำมันสบู่ดำ ไม่สามารถนำไปบริโภคได้เพราะมีสารพิษประเภท Curcine หรือ Curcasin

4. เมล็ดยางพารา

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจหลักอีกชนิดหนึ่งของประเทศ มีพื้นที่เพาะปลูกในทุกภาคของประเทศ มีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่ที่ทวีปอเมริกาใต้ ผลยางพารามีลักษณะเป็นพวง 3 พู มีเมล็ดอยู่ภายในผลอ่อนสีเขียว ผลแก่มีสีน้ำตาล เมล็ดยางพารามีสีน้ำตาลลายขาว คล้ายสีของเมล็ดละหุ่ง เนื้อในเมล็ดมีสีขาว

น้ำมันเมล็ดยางพารามีค่าความร้อนประมาณ 40,170 kJ/kg สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้ โดยเป็นการช่วยนำของเหลือทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เมล็ดยางพารามีกรดไฮโดรไซยานิกซึ่งเป็นสารพิษอยู่สูงถึง 300 – 400 ppm จึงมีกฎหมายห้ามมิให้นำเมล็ดยางพารา มาบริโภคหรือผสมลงในน้ำมันเพื่อการบริโภค แต่การลดปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกในเมล็ดยางพาราสามารถทำได้โดยนำเนื้อเมล็ดยางพารามาตากแดดประมาณ 6 วัน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้เมล็ดยางพาราที่บริสุทธิ์นำมาผสมเป็นอาหารสัตว์ได้

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดยางพารา วัตถุดิบหลักสำหรับการผลิตไบโอดีเซลได้แก่ เมล็ดยางพารา (RRIM600) ตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane) กรดซัลฟิวริก (Sulphuric acid) เมทานอล (Methanol) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) โดยใช้การทำ

ปฏิกิริยาแบบทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันเมล็ดยางพาราที่มีปริมาณของกรดไขมันอิสระสูงกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน เพื่อให้ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์สูงสุด เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกสำหรับทดแทนในน้ำมันดีเซล

5. น้ำมันจากไขมันสัตว์

น้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู น้ำมันไก่ น้ำมันวัว สามารถนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ โดยการนำมาให้ความร้อนจนน้ำมันที่มีส่วนประกอบของไตรกลีเซอไรด์ละลายออกมา ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากน้ำมันจากไขมันสัตว์มีคุณสมบัติทั่วไปคล้ายกับน้ำมันพืช แต่มักมีส่วนประกอบที่เป็นไขและกรดไขมันอิสระในสัดส่วนที่สูงกว่าน้ำมันพืช การนำน้ำมันจากไขมันสัตว์มาผลิตไบโอดีเซลต้องผ่านกระบวนการกำจัดไขและลดกรดไขมัน โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อเปลี่ยนกรดไขมันอิสระให้เป็นไตรกลีเซอไรด์ก่อน จากนั้นจึงนำไปผลิตไบโอดีเซลด้วยการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนต่อไป น้ำมันจากไขมันสัตว์จะมีความขุ่นมากกว่าเนื่องจากมีไขและน้ำปะปนอยู่มากกว่าน้ำมันพืช ดังนั้นการผลิตไบโอดีเซลจากไขมันสัตว์ นอกจากจะยากกว่าน้ำมันพืช ปริมาณของกรดไขมันอิสระที่มากกว่ายังเป็นอุปสรรคที่อาจทำให้การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดไม่สมบูรณ์ได้ จึงต้องมีขั้นตอนการต้มไล่ความชื้นก่อน น้ำมันจากไขมันสัตว์จะมีค่าความร้อนประมาณ 37,000 kJ/kg และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชแล้ว น้ำมันจากไขมันสัตว์จะมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันอิ่มตัวสูง เปลี่ยนเป็นไขได้ง่ายเมื่ออากาศเย็น และมีกลิ่นเหม็นหืนได้ง่ายเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิธรรมดา เมื่อนำมาบริโภคจะทำให้ระดับโคเลสเตอรอลในเลือดสูงขึ้น เสี่ยงต่อการเกิดโรคหัวใจขาดเลือด ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยง ส่วนน้ำมันพืช (ยกเว้นน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดปาล์ม) จะมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว มีประโยชน์ต่อร่างกายมากกว่าน้ำมันจากไขมันสัตว์ ไขมันไม่อิ่มตัวนี้จะไม่ค่อยเป็นไขแม้จะอยู่ในที่อากาศเย็น แต่จะทำปฏิกิริยากับความร้อนและเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นหืนได้เช่นกันหลังจากใช้ประกอบอาหาร

6. น้ำมันที่ใช้แล้ว

การนำน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ใช้แล้ว กลับมาประกอบอาหารซ้ำมีความเสี่ยงต่อการก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ เนื่องจากในน้ำมันพืชใช้แล้วที่นำกลับมาใช้ซ้ำมีสารพิษก่อมะเร็ง อยู่ 2 กลุ่ม คือ อนุมูลอิสระ และไดออกซิน จึงสมควรนำน้ำมันใช้แล้วเหล่านั้นมาแปรรูปให้เกิดประโยชน์เป็นพลังงานโดยนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซล แทนการนำกลับไปใช้บริโภค ทั้งนี้ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว เริ่มต้นจากการเก็บรวบรวมน้ำมันพืชใช้แล้ว นำมาพักให้ตกตะกอนและกรองตะกอนออก ให้ความร้อนเพื่อให้ไขมันแยกตัวออกจากน้ำมันเพื่อให้ไขมันที่นำไปผลิตมีน้ำและสิ่งสกปรกเจือปนให้น้อยที่สุด จากนั้นนำน้ำมันที่ได้มาผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยกรดและแอลกอฮอล์ เพื่อปรับสภาพน้ำมันให้มีคุณสมบัติคงที่แล้วพักไว้ 1 คืน จากนั้นนำมากระตุ้นด้วย

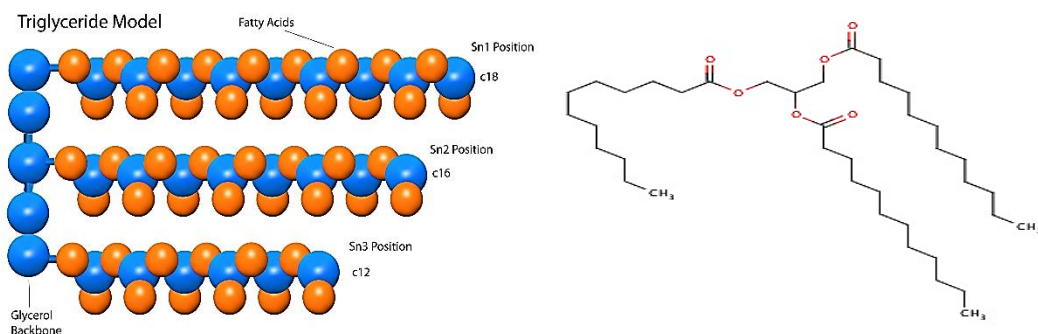
แอลกอฮอล์และต่าง ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส พักทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง จะเกิดการแยกตัวเป็นไบโอดีเซลและกลีเซอริน จึงแยกเอาไบโอดีเซลไปผ่านกระบวนการล้าง เพื่อปรับสภาพไบโอดีเซลที่ได้ให้มีความเป็นกลาง จากนั้นนำน้ำมันไปอุ่นเพื่อไล่น้ำออกจากน้ำมัน จะได้ไบโอดีเซลที่ใส เมื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์ต้องผ่านกระบวนการกรองอีกครั้ง

โดยไบโอดีเซล (B100) ที่ผลิตได้นี้ สามารถปรับใช้กับเครื่องยนต์ดีเซล หรือนำมาผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนที่ต้องการ โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนเครื่องยนต์ คุณสมบัติเด่นของไบโอดีเซลมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ ทำให้เครื่องยนต์มีกำลังแรงขึ้นเพราะช่วยเผาไหม้ มีสารหล่อลื่นในตัวเอง ทำให้เครื่องยนต์สึกหรอน้อยลง มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดเครื่องยนต์ ทำให้ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์สะอาด นอกจากนี้ใช้เป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์ดีเซลแล้ว สามารถใช้เป็นน้ำมันชักแท่ง น้ำมันล้างเครื่อง ตัวทำละลาย ใช้ทำความสะอาดคราบเปื้อนจากสีน้ำมันได้เป็นอย่างดี

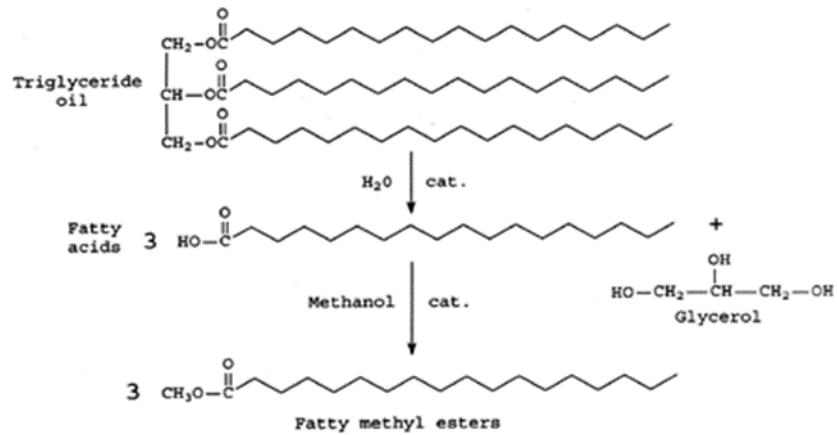
จากการสำรวจของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน พบว่าในปีๆ หนึ่ง ประเทศไทยมีน้ำมันพืชใช้แล้วประมาณ 74 ล้านลิตร โดยในปัจจุบันถูกนำมาผลิตไบโอดีเซลอยู่เพียง 25 ล้านลิตร ดังนั้นจึงน้ำมันพืชใช้แล้วจึงถือเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพที่สามารถนำมาผลิตไบโอดีเซลได้อย่างต่อเนื่อง

2.1.4 องค์ประกอบน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ [1]

น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ในแต่ละชนิด จะมีไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (C, H, O) โดยมีโครงสร้างทางเคมีและสัดส่วนที่แตกต่างกัน ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของไตรกลีเซอไรด์ชนิดหนึ่ง ชื่อว่า Tri-lauroylglycerol ดังรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าไตรกลีเซอไรด์ประกอบด้วยสายโซ่ของกรดไขมันจำนวน 3 สาย เช่น กรดลอริก จะมีการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอสเทอร์ (Ester Bond) บนโครงสร้างของกลีเซอรอล (Glycerol) ซึ่งกรดไขมันบนโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์มีหลายชนิด แตกต่างกันไปตามความยาวของสายโซ่ที่ต่างกัน จำนวนและตำแหน่งของพันธะคู่ และตำแหน่งการจัดวางบนสายโซ่

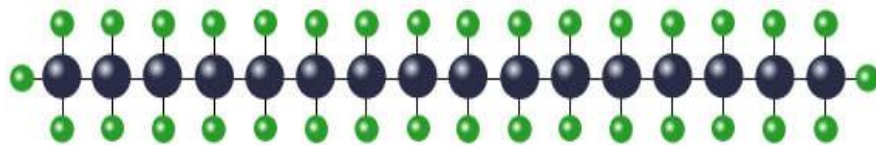


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ (ซ้าย) และ Tri-lauroylglycerol (ขวา)



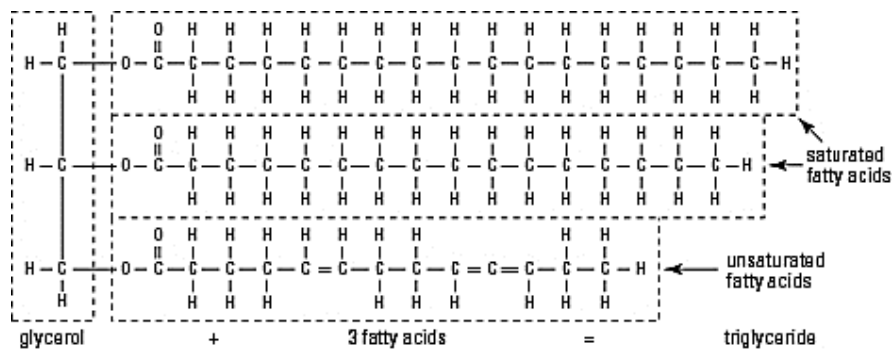
รูปที่ 2.2 กระบวนการสลายไตรกลีเซอไรด์ให้ได้กรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล

โมเลกุลน้ำมันดีเซลทั่วไป มีคาร์บอนอะตอมระหว่าง 10 – 20 ตัว ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โมเลกุล Cetane สูตรโมเลกุล C₁₆H₃₄

โมเลกุล น้ำมันพืช (ไตรกลีเซอไรด์) และไขมันสัตว์จะมี C (คาร์บอน) รวมมากกว่า 40 ตัว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โมเลกุลไตรกลีเซอไรด์

2.1.5 ประเภทของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลสามารถแบ่งตามประเภทของน้ำมันที่นำมาใช้งานออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ คือ

2.1.5.1 น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ (Straight Vegetable Oil or Fat oil)

ไบโอดีเซลประเภทนี้คือ น้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์แท้ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันถั่วเหลือง หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ เช่น น้ำมันหมู เป็นต้น ซึ่งโดยสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยตรงไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีอื่นๆ หรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของน้ำมัน โดยสิ่งสำคัญของการใช้น้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์โดยตรง คือ จะต้องมีการอุ่นน้ำมันในทุกจุดที่มีน้ำมันผ่านได้แก่ ถังน้ำมัน ท่อทางเดินน้ำมัน ชุดกรองน้ำมัน อุณหภูมิที่ใช้ในการอุ่นน้ำมันต้องอย่างน้อย 70 องศาเซลเซียส แนวทางในการนำน้ำมันประเภทนี้มาใช้โดยตรง เป็นวิธีการที่จะได้น้ำมันในราคาถูก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ซึ่งยังไม่ผ่านกระบวนการกลั่นมาใช้ แต่การที่จะนำมาใช้ได้จำเป็นต้องอาศัยความร้อนในการหลอมเหลวไขแข็ง และสามารถลดความหนืดของน้ำมัน เนื่องจากน้ำมันพืชมีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ประมาณ 11 – 17 เท่า ที่อุณหภูมิตัวน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์จะมีความหนืดสูงขึ้นไปจนถึงจุดเดือดเป็นไข การที่น้ำมันพืชที่มีความหนืดสูงกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้หัวฉีดน้ำมันฉีดน้ำมันให้เป็นฝอยได้ยาก เกิดเป็นอุปสรรคต่อการป้อนน้ำมันเชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ และเกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้แล้ว น้ำมันพืชมีคุณสมบัติที่ระเหยตัวกลายเป็นไอได้ช้าและน้อยมาก (Low volatility) ยิ่งทำให้เกิดการจุดระเบิดได้ยาก เครื่องยนต์ติดยาก และหลงเหลือคราบเขม่าเกาะที่หัวฉีด ผนังลูกสูบ แหวนและวาล์ว จากคุณสมบัติที่น้ำมันพืชมีความหนืดสูงและระเหยตัวได้ต่ำกว่าน้ำมันดีเซลนี้ ทำให้เกิดปัญหาได้เมื่อนำน้ำมันพืชไปใช้โดยตรงในเครื่องยนต์

2.1.5.2 ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

ไบโอดีเซลประเภทนี้จะเป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์กับน้ำมันก๊าด หรือน้ำมันดีเซล เพื่อลดความหนืดของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ทำให้ได้ไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลให้มากที่สุด เช่น ไบโอดีเซลที่ผสมกับน้ำมันมะพร้าว เรียกว่าโคโคดีเซล (Coco-diesel) หรือไบโอดีเซลที่ผสมระหว่างน้ำมันปาล์มกับน้ำมันดีเซล เรียกว่าปาล์มดีเซล (Palm-diesel) ไบโอดีเซลชนิดนี้จะสามารถลดปัญหาเรื่องความหนืดลงได้บ้าง แต่ยังมีปัญหาคือเมื่ออากาศเย็นจะส่งผลให้เกิดปัญหาการอุดตันของเครื่องยนต์ได้ โดยไส้กรองจะอุดตันเร็วกว่าปกติ คุณสมบัติส่วนใหญ่จะใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล เครื่องยนต์เดินเรียบไม่มีปัญหาเรื่องสะดุดเหมือนกับไบโอดีเซลประเภทแรก และเครื่องสตาร์ทติดได้ง่ายกว่า เหมาะสำหรับการใช้ในเครื่องยนต์รอบต่ำหรือเครื่องจักรกลทางการเกษตร

2.1.5.3 ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ไบโอดีเซลประเภทนี้คือไบโอดีเซลที่แท้จริง เป็นที่ยอมรับในกลุ่มสากลและนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) คือการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ที่มีกรดไขมันชนิดต่างๆ เป็นองค์ประกอบ ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้เป็นสารประกอบเอสเทอร์ โดยจะเรียกชนิดของไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ไบโอดีเซลชนิดเอสเทอร์นี้จะมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องยนต์ ได้น้ำมันที่มีความคงตัวมากขึ้น สามารถนำมาใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลได้ทุกชนิด ทั้งเดิมโดยตรงและผสมลงในน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ ข้อดีคือจำนวนซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซล คือความสามารถในการจุดติดไฟได้ง่ายกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้การจุดระเบิดทำได้ดี การสันดาปเกิดสมบูรณ์ เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ ไม่มีควันดำและก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อม ความหนืดคงที่ สำหรับข้อเสียคือต้นทุนการผลิตมีราคาแพงกว่าเมื่อเทียบกับไบโอดีเซลแบบอื่นๆ ปัจจุบันราคาของไบโอดีเซลยังสูงกว่าน้ำมันดีเซล 1 - 2 เท่าตัว เครื่องยนต์ให้กำลังต่ำกว่าน้ำมันดีเซล มีการสร้างแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) เพิ่มขึ้น และจะต้องมีการดัดแปลงส่วนประกอบภายในเครื่องยนต์ในส่วนที่เป็นยาง ซึ่งอาจถูกไบโอดีเซลทำลายได้ แต่สามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์รอบสูงอย่างรถยนต์ได้ปกติ

2.1.6 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล [12-15]

กระบวนการผลิตไบโอดีเซล วัตถุดิบที่สำคัญคือน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ และจะต้องใช้แอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา การผลิตไบโอดีเซลในทางการค้าจำเป็นต้องใช้ความรู้และเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อให้การผลิตไบโอดีเซลมีความคุ้มค่าและสามารถผลิตเพื่อจำหน่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาที่น้ำมันหรือไขมันทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ด่าง กรด และเอนไซม์ หรืออาจจะไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ได้ เพื่อให้ได้เป็นสารประกอบเอสเทอร์และกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้

ไบโอดีเซลที่เตรียมจากไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืช ไขมันสัตว์ และน้ำมันที่ใช้แล้วจะมีไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นไตรเอสเทอร์ของกลีเซอรอลระหว่างกรดไขมัน 3 ตัว กับกรดคาร์บอกซิลิกสายโซ่ยาวที่เป็นโมเลกุลโมโนและไดกลีเซอไรด์มาจากการแทนที่ของกรดไขมัน 2 ตัว และ 1 ตัว ตามลำดับ ที่ตำแหน่งของหมู่ไฮดรอกซิลของกรดคาร์บอกซิลิก ไขมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบประกอบด้วยกลีเซอไรด์และกรดไขมันหลากหลายชนิด สำหรับแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้คือเมทานอล เนื่องจากมีราคาถูกและมีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปกติจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิด

อย่างสมบูรณ์ สภาวะในการทำปฏิกิริยาและการแยกผลิตภัณฑ์ให้บริสุทธิ์ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

อุปสรรคอย่างหนึ่งสำหรับการผลิตไบโอดีเซลคือการเกิดสบู่ ซึ่งเกิดจากไฮดรอกไซด์ของโลหะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระ สบู่ที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและทำให้ขั้นตอนในการแยกไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์มีความยุ่งยากมากขึ้นและค่าใช้จ่ายสูงขึ้น นอกจากนี้การทำปฏิกิริยาต้องใช้แอลกอฮอล์ที่มีน้ำน้อย (Anhydrous alcohol) คือต้องมีปริมาณน้ำไม่เกิน 0.1 – 0.3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการมีน้ำจะทำให้เกิดการไฮโดรลิซิสของแอลคิลเอสเทอร์ไปเป็นกรดไขมันอิสระแล้วจะเกิดเป็นสบู่ขึ้น

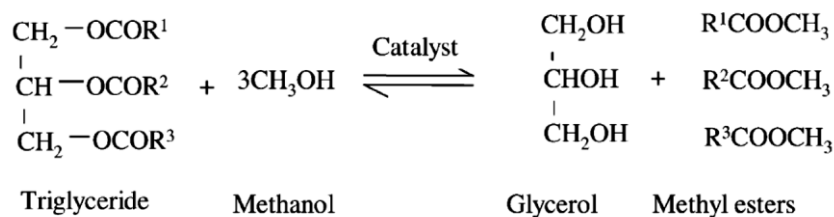
โดยปกติปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย 3 ขั้นตอน โดยเป็นปฏิกิริยาที่สามารถผันกลับได้ โดยเริ่มจากไตรกลีเซอไรด์ถูกเปลี่ยนเป็นไดกลีเซอไรด์และโมนอกลิเซอไรด์ สุดท้ายเปลี่ยนเป็นแอลคิลเอสเทอร์ 3 โมลและกลีเซอรอล 1 โมล ขั้นตอนที่กำหนดปฏิกิริยาจะแปรเปลี่ยนไปตามเวลาของ 3 ขั้นตอน เริ่มจากการถ่ายเทมวลระหว่างสารตั้งต้นกับตัวเร่งปฏิกิริยา คือ น้ำมันกับแอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นเกิดปฏิกิริยาเป็นเอสเทอร์ซึ่งเป็นอิมัลชัน ช่วงนี้เป็นช่วงที่กำหนดปฏิกิริยาช่วงที่ 2 โดยการควบคุมแบบโคเนตริกส์ในการเกิดผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นจุดสมดุลที่อยู่ใกล้กับจุดสิ้นสุดปฏิกิริยา

กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่นิยมใช้ในปัจจุบัน จึงเป็นการเปลี่ยนโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชเป็นโมเลกุลที่ขนาดเล็กลงและมีความซับซ้อนน้อยกว่า เพื่อลดความหนืดและความถ่วงจำเพาะ กระบวนการผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ที่นิยมใช้ แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการหลัก

2.1.6.1 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) [15]

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน หรือแอลกอฮอล์ลิซิส (Alcoholysis) เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์เป็นเอสเทอร์ตัวใหม่ หรือโมนอแอลคิลเอสเทอร์ (Mono-alkyl ester) และกลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้ โดยเป็นการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดไขมันหรือน้ำมัน (Triglyceride) กับแอลกอฮอล์โมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เมทานอล

โดยทฤษฎีปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometry) ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะประกอบด้วยอัตราส่วนโดยโมลของสารตั้งต้น 3 : 1 ระหว่างแอลกอฮอล์ต่อไตรกลีเซอไรด์ แต่ในทางปฏิบัติจะพบว่าปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถผันกลับได้ ดังนั้นหากต้องการเพิ่มผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAMES) หรือไบโอดีเซลให้มีปริมาณสูงขึ้น จำเป็นต้องมีการเพิ่มจำนวนโมลของแอลกอฮอล์ เพื่อผลักดันให้ปฏิกิริยาไปข้างหน้าให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ได้มากที่สุด



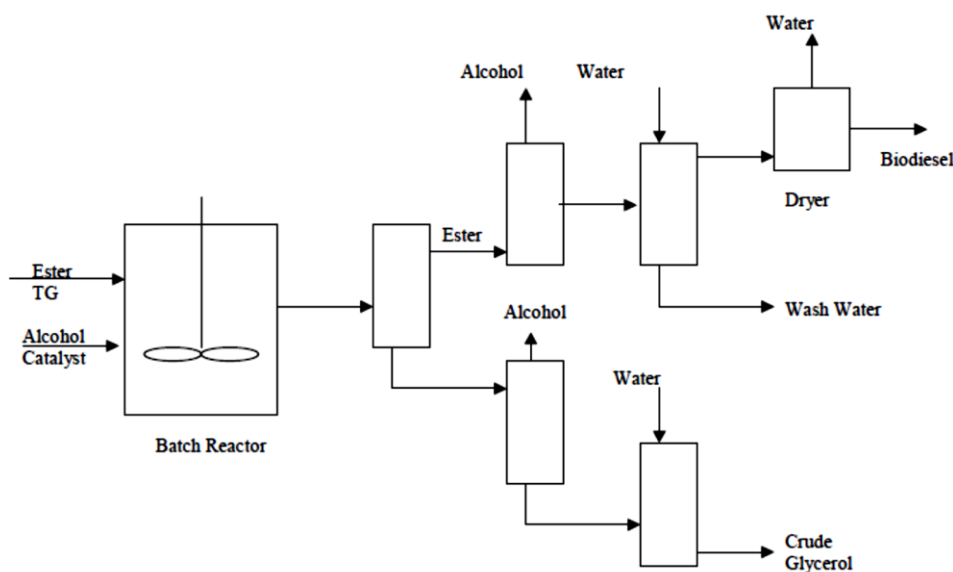
รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล [15]

โดยทั่วไปกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะมีสองกระบวนการหลักคือ กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้

ในสภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันสามารถเกิดได้ด้วยความดันบรรยากาศ ตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึงจุดเดือดของแอลกอฮอล์ คือประมาณ 65 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้โดยทั่วไปเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดกรดและชนิดเบส โดยโรงงานผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์เกือบทั้งหมดในปัจจุบันใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะเร่งปฏิกิริยาได้เร็วกว่า ใช้ปริมาณเมทานอลน้อยกว่า และใช้เวลาสั้นกว่า ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความเข้มข้น การกวนผสม และอัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์และน้ำมัน โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่นิยมมากกว่า โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีราคาถูกและของผสมกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นที่ต้องการของโรงกลั่นกลีเซอรอลมากกว่าด้วยการใช้โซเดียมเมทอกไซด์ (Sodium methoxide) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสอีกชนิดหนึ่งที่ใช้กัน มีความว่องไวมากกว่า โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายในเมทานอล ส่วนหนึ่งเนื่องจากการทำปฏิกิริยาของโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเมทานอลทำให้น้ำเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งจะปลดความว่องไวของเมทอกไซด์ไอออนในการเข้าทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

วัตถุดิบน้ำมันเริ่มต้นที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) และปริมาณน้ำต่ำ โดยต้องควบคุมให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระน้อยกว่าร้อยละ 1 ซึ่งอาจทำได้โดยการเปลี่ยนกรดไขมันอิสระเป็นเอสเทอร์ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันไม่เช่นนั้นแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจะทำปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชันกับกรดไขมันอิสระเกิดเป็นสบู่ขึ้น ปฏิกิริยาการเกิดสบู่จะเกิดขึ้นรวดเร็วมาก และอาจเกิดอย่างสมบูรณ์ก่อนปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจะเริ่มต้นขึ้น สบู่มีสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ทำให้ผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลแยกออกจากกันได้ยาก หรือใช้เวลานานในการแยกและทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์หรือไบโอดีเซลลดลง

กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch process) เป็นระบบการผลิตไบโอดีเซลที่ง่ายที่สุดโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันอยู่ในช่วง 4 : 1 จนถึง 20 : 1 โดยทั่วไปอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 6 : 1 เครื่องปฏิกรณ์อาจเป็นระบบปิด หรือต่อเข้ากับเครื่องควบแน่น (Reflux condenser) อุณหภูมิของปฏิกิริยาประมาณ 65 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้มากที่สุดคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ รองลงมาคือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีปริมาณที่ใช้อยู่ในช่วง 0.3 – 1.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของน้ำมันเริ่มต้น



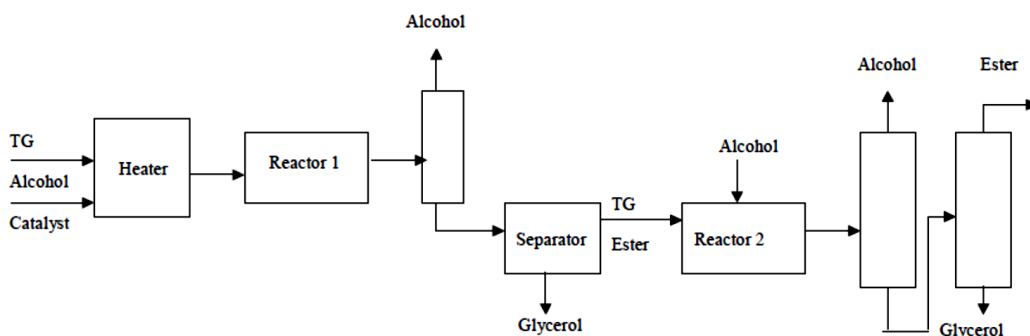
รูปที่ 2.6 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch process) [14]

รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่อง เริ่มแรกน้ำมันจะถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ตามด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ละลายในเมทานอล ภายใต้ภาวะการกวนอย่างต่อเนื่อง ในช่วงแรกต้องมีการกวนอย่างทั่วถึงเพื่อให้ไขมัน ตัวเร่งปฏิกิริยา และแอลกอฮอล์ผสมเข้ากัน และในขณะที่ช่วงท้ายของปฏิกิริยา ควรมีการกวนให้ช้าลง เพื่อให้กลีเซอรอลที่เกิดขึ้นแยกตัวออกจากผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ง่าย และลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์จะอยู่ที่ 85 – 94 เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจึงหยุดกวน ในบางกระบวนการผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกพักให้แยกชั้นเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลภายในเครื่องปฏิกรณ์ และบางกระบวนการใช้ป้มติงของผสมเข้าถังแยกต่างหาก (Settling vessel) หรือแยกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) แอลกอฮอล์ถูกแยกออกจากชั้นกลีเซอรอลและชั้นเมทิลเอสเทอร์โดยใช้เครื่องระเหย (Evaporator) หรือหน่วยแฟลช (Flash unit) จากนั้นทำเมทิลเอสเทอร์ให้เป็นกลางด้วยกรด ล้างด้วยน้ำอุ่น ตามด้วยสารละลายกรดเจือจางเพื่อกำจัดเมทานอลและเกลือที่เหลืออยู่ และทำให้แห้งถ่ายผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์สุดท้ายที่ได้เข้าสู่ถังเก็บ ส่วนกลีเซอรอลจะถูกทำให้เป็นกลางและล้าง

ด้วยน้ำ จากนั้นผ่านเข้าสู่หน่วยกลั่นต่อไป กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบไม่ต่อเนื่องจะมีต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่สม่ำเสมอ และมีกำลังในการผลิตต่ำ

ต่อมามีการประยุกต์ใช้ระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนและต่อเรียงกัน (Continuous stirred tank reactors : CSTR) ปริมาตรภายในเครื่องปฏิกรณ์แรกจะถูกออกแบบให้มีขนาดใหญ่เพื่อเพิ่มเวลาและให้เกิดปฏิกิริยาได้มาก เมื่อออกจากเครื่องปฏิกรณ์แรก กลีเซอรอลจะถูกแยกออก และน้ำมันจะผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่สอง โดยมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเมทานอลเข้าไปใหม่ ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็ว ให้อัตราของการเปลี่ยนแปลงมากกว่า 98 สิ่งที่สำคัญในการออกแบบระบบเครื่องปฏิกรณ์ CSTR คือการกวนผสมอย่างทั่วถึงเพื่อให้ของผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์มีองค์ประกอบเหมือนกัน แต่การกวนผสมนี้อาจทำให้กลีเซอรอลกระจายตัวเข้าไปในชั้นเมทิลเอสเทอร์ได้มากขึ้น ทำให้ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นในการแยกกลีเซอรอลออกจากผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

นอกจากการกวนผสมโดยใช้ใบพัดแล้ว บางกระบวนการใช้ปั๊มทำให้เกิดการไหลเวียนขณะทำปฏิกิริยา บางกระบวนการอาจใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหล (Plug flow reactor) แทน ซึ่งจะมีการผสมกันตามแนวแกนเพียงเล็กน้อย การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้ในระบบต่อเนื่อง จะมีช่วงระยะเวลาทำปฏิกิริยาสั้นประมาณ 6 – 10 นาที ดังนั้นโดยทั่วไปจะใช้ระบบแบบสองขั้นตอน โดยมีส่วนแยกเมทานอลและกลีเซอรอลขึ้นระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสอง ดังรูปที่ 2.7 และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันสูงขึ้น เพื่อเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยา

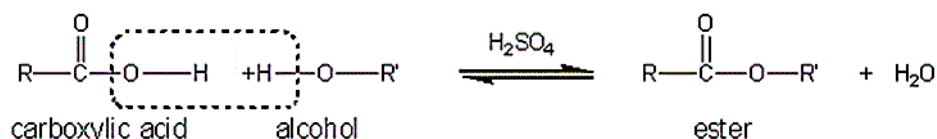


รูปที่ 2.7 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Plug flow [14]

2.1.6.2 กระบวนการเอสเทอริฟิเคชันและทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Esterification and Transesterification)

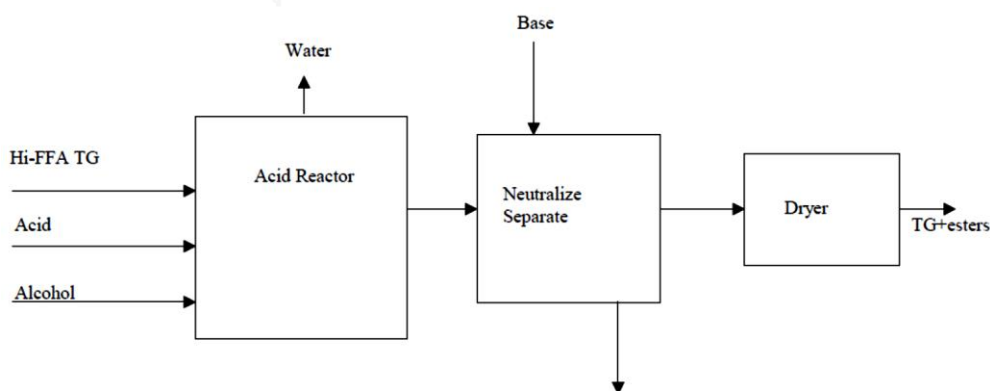
เนื่องจากกระบวนการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส จำเป็นต้องควบคุมปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบให้น้อยกว่าร้อยละ 2 โดยทั่วไปจะลดให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 1 ดังนั้นในกระบวนการที่ใช้วัตถุดิบราคาถูกและมีปริมาณ

กรดไขมันอิสระสูง เช่น ไขมันสัตว์ น้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งมีปริมาณกรดไขมันอิสระร้อยละ 2 – 30 จำเป็นต้องมีขั้นตอนการกำจัดกรดไขมันอิสระออก ในกระบวนการนี้ ขั้นตอนแรกเป็นกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชด้วยแอลกอฮอล์ โดยมีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยนิยมใช้กรดซัลฟิวริก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอสเทอร์และน้ำ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์

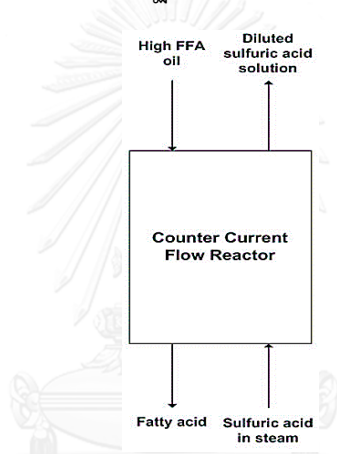
รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระด้วยปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยทั่วไปใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันสูง เช่นเดียวกับกรณีการทำทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด คือ ประมาณ 20 : 1 ถึง 40 : 1 และเวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 10 นาทีจนถึงประมาณ 2 ชั่วโมง โดยในบางกระบวนการจำเป็นต้องใช้กรดในปริมาณมาก เนื่องจากในปฏิกิริยานี้จะมีน้ำเกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ดังนั้นกรดจะรวมตัวกับน้ำอยู่ในปริมาณมาก เนื่องจากในปฏิกิริยานี้จะมีน้ำเกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ดังนั้นกรดจะรวมตัวกับน้ำอยู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้สูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาและส่งผลให้ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาลดลง จึงจำเป็นต้องแยกน้ำออกโดยการระเหย การปล่อยให้แยก หรือการปั่นเหวี่ยง น้ำที่ถูกแยกออกจะเป็นของผสมของน้ำและเมทานอล จากนั้นทำเมทิลเอสเทอร์ให้เป็นกลางด้วยเบส และทำให้แห้ง ไตรกลีเซอไรด์และเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จากขั้นตอนนี้ สามารถผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสได้เลย



รูปที่ 2.9 กระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมัน [14]

2.1.6.3 กระบวนการไฮโดรไลซิสและเอสเทอริฟิเคชัน (Hydrolysis and esterification)

กระบวนการนี้เป็นวิธีการหนึ่งสำหรับผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบที่มีราคาสูงซึ่งจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid) สูง ทำได้โดยการเปลี่ยนน้ำมันพืชตั้งต้นทั้งหมดเป็นกรดไขมันและกลีเซอรอลผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในสภาวะที่มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปกติขั้นตอนนี้ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลสวนทางต่อเนื่อง (Counter-current continuous flow reactor) โดยใช้กรดซัลฟิวริกและไอน้ำ ดังรูปที่ 2.10 ผลผลิตที่ได้จะเป็นกรดไขมันบริสุทธิ์และกลีเซอรอล สิ่งเจือปนอื่นๆ ที่ผสมอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันส่วนใหญ่จะปะปนในชั้นกรีเซอรอล และบางส่วนออกมาพร้อมกับไอน้ำและน้ำ กรดไขมันบริสุทธิ์จะถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลสวนทางอีกเครื่องหนึ่งเพื่อทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยากรดต่อไป



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของวัตถุดิบน้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง [14]

การผลิตไบโอดีเซลโดยการเร่งปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดไขมันบริสุทธิ์ด้วยกรด จะให้ร้อยละผลได้ของเมทิลเอสเทอร์มากกว่า 99 กระบวนการอาศัยหลักการไหลสวนทางกันของกรดไขมันและสารละลายกรดซัลฟิวริกในเมทานอล น้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะถูกแยกออกจากผลิตภัณฑ์ไปในตัวโดยการละลายในเมทานอล สำหรับในกระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch process) น้ำที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาจะรวมตัวกันและแยกเฟสออกจากของผสมจะทำให้ปฏิกิริยาชะงักได้ เนื่องจากกรดซัลฟิวริกในเมทานอลจะละลายรวมกับน้ำ ทำให้ไม่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ วิธีหนึ่งที่ช่วยลดปัญหาปริมาณน้ำในระบบได้คือ การแบ่งกระบวนการออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยภายหลังการทำปฏิกิริยาในขั้นตอนแรก สารละลายกรดในเมทานอลจะถูกแยกออกและมีการเติมกรดและเมทานอลเข้าไปใหม่ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณน้ำได้และทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เกือบสมบูรณ์ เนื่องจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลดังกล่าว จะใช้กรดหรือเบสที่ละลายเป็นวัฏภาคเดียวกันกับเมทานอลและน้ำมันตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลและกลีเซอรอลที่ได้ ทำให้ต้องใช้น้ำปริมาณมาก

ในการล้างเพื่อแยกตัวแรงปฏิกิริยาออก ผลลัพธ์ที่ได้จึงจะมีความบริสุทธิ์และมีสมบัติเหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก

2.1.7 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซล

2.1.7.1 ด้านเครื่องยนต์

การใช้น้ำมันพืชเพื่อทดแทนน้ำมันจากฟอสซิลในประเทศไทยได้รับความสนใจมาเป็นเวลานานแล้ว เช่น เรื่องการใช้น้ำมันปาล์มกลั่นบริสุทธิ์ทดแทนน้ำมันดีเซลตามแนวพระราชดำริในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว การใช้น้ำมันพืชเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลนั้นสามารถทำได้หลายแนวทาง แต่สิ่งที่ควรคำนึงถึง คือต้องลดความหนืดของน้ำมันพืชให้ต่ำลงมาอยู่ในระดับเดียวกันกับน้ำมันดีเซล โดยทั่วไปความหนืดควรต่ำกว่า 4.2 เซนติสโตกซ์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ผู้ใช้น้ำมันพืชก็ควรคำนึงถึงคุณสมบัติด้านอื่นๆ ของน้ำมันพืชด้วย เช่น ค่าซีเทนและค่าจุดไหลเท เป็นต้น

2.1.7.2 ด้านสมรรถนะเครื่องยนต์

การผสมไบโอดีเซลในระดับร้อยละ 1 – 2 สามารถช่วยเพิ่มดัชนีการหล่อลื่นให้กับน้ำมันดีเซลได้ และยังพบว่าการใช้ไบโอดีเซลยังช่วยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ให้ดีขึ้น เนื่องจากไบโอดีเซลมีออกซิเจนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 10 ทำให้การผสมระหว่างอากาศกับน้ำมันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราส่วนปริมาตรของอากาศต่อน้ำมันได้เป็นอย่างดีจึงทำให้การจุดระเบิดทำได้ดี เกิดการสันดาปสมบูรณ์ และไบโอดีเซลจะมีจุดวาบไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงมีความปลอดภัยในการเก็บรักษาดีกว่าน้ำมันดีเซล อีกทั้งยังมีค่าซีเทนสูงกว่าน้ำมันดีเซลจึงส่งผลให้ไบโอดีเซลมีสมบัติการจุดติดไฟสูงกว่าน้ำมันดีเซล จึงสามารถใช้ไบโอดีเซลผสมในน้ำมันดีเซลได้ถึงร้อยละ 5 ได้โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์

2.1.7.3 ด้านสิ่งแวดล้อม

การใช้ไบโอดีเซลสามารถช่วยลดมลพิษทางอากาศ เนื่องจากไบโอดีเซลไม่มีสารกำมะถันและสารประกอบอะโรมาติกจึงเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด ช่วยลดมลพิษทางอากาศได้มาก โดยสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์คาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนรวมถึงฝุ่นละอองและควันดำออกสู่สภาพแวดล้อมได้ ในทางตรงกันข้ามไบโอดีเซลสามารถเพิ่มไนโตรเจนได้มากกว่าน้ำมันดีเซล นอกจากนี้ยังลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก เพราะผลิตได้จากพืชและไม่มีปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้เองตามกระบวนการชีวภาพ

2.1.7.4 ด้านเศรษฐศาสตร์

การใช้ไบโอดีเซลมีส่วนช่วยสร้างงานในชนบทด้วยการสร้างตลาดพลังงานไว้เพื่อรองรับผลิตผลทางการเกษตรที่เหลือจากการบริโภค และยังสามารถช่วยเหลือเกษตรกร

ภายในประเทศได้ โดยเป็นการเพิ่มมูลค่าพืชผลทางการเกษตร การใช้ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบจากพืชผลทางการเกษตรภายในประเทศ จึงช่วยประหยัดเงินตราในการนำเข้าน้ำมันดิบจากต่างประเทศได้

2.1.7.5 ด้านความมั่นคงทางด้านพลังงาน

การใช้ไบโอดีเซลที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศถือเป็นการเสริมสร้างความมั่นคงและเสถียรภาพทางด้านพลังงานของประเทศ สามารถลดผลกระทบจากวิกฤตการณ์พลังงานซึ่งจะมีผลกระทบต่อเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างสูง

2.2 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (Biodiesel purification) [16, 17]

ไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน และการแยกชั้นกลีเซอรินออกแล้วยังคงมีสิ่งปนเปื้อน (Impurity) อยู่หลายชนิด เช่น กลีเซอรอลอิสระ สบู่ เมทานอล กรดไขมันอิสระ ตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำ และกลีเซอไรด์ เป็นต้น ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้ส่งผลต่อการนำไปใช้ไบโอดีเซลไปใช้งาน โดยสิ่งเจือปนต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อเครื่องยนต์ แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงผลกระทบจากสิ่งเจือปนที่มีต่อคุณภาพไบโอดีเซลและเครื่องยนต์ [18]

สิ่งเจือปน	ผลกระทบ
กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid)	- การกัดกร่อน - เสถียรภาพการเกิดออกซิเดชันต่ำ
น้ำ (Water)	- การเกิดไฮโดรไลซิส (การเกิด FFA) - การกัดกร่อน - การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย
เมทานอล (Methanol)	- ปริมาณความหนาแน่นและความหนืดต่ำ - จุดวาบไฟต่ำ - การกัดกร่อนของอะลูมิเนียมและสังกะสี
กลีเซอไรด์ (Glycerides)	- ความหนืดสูง - หัวฉีดอุดตัน - การตกผลึก
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst, Metal)	- หัวฉีดอุดตัน - การอุดตันตัวกรอง - การเสื่อมตัวของเครื่องยนต์
กลีเซอรอล (Glycerol)	- ปัญหาการตกตะกอน - เพิ่มการปล่อยอัลดีไฮด์และอะโครลีน

สำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะพบว่าการเกิดสบู่เป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งเกิดจากการไฮดรอกไซด์ของโลหะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระ สบู่ที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ทำให้ในขั้นตอนการแยกไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์มีความยุ่งยากมากขึ้นและจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงขึ้น [19]

วัตถุประสงค์หลักของการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์คือ การกำจัดกลีเซอรอล สบู่ แอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่คงเหลือจากการทำปฏิกิริยา การทำแอลคิลเอสเทอร์ให้แห้งจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์และผ่านมาตรฐานข้อกำหนดเกี่ยวกับปริมาณน้ำตามข้อกำหนดมาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล นอกจากนั้นยังต้องมีการปรับปรุงสมบัติอื่นๆ เช่น การลดสีของไบโอดีเซล การกำจัดกลีเซอรอล กำมะถัน และฟอสฟอรัส น้ำมีคุณสมบัติในการทำให้ช่วยเพิ่มความเป็นกรดหรือทำให้น้ำมันมีคุณสมบัติเป็นกลาง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่เป็นส่วนเกินและกระบวนการกำจัดเมทานอลควรเกิดก่อนกระบวนการล้างด้วยน้ำ เพื่อลดปรากฏการณ์ของแอลกอฮอล์ในน้ำทิ้ง [20] การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

2.2.1 กระบวนการล้างแบบเปียก (Wet washing process)

กระบวนการล้างแบบเปียกเป็นกระบวนการที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมการผลิตไบโอดีเซล โดยเฉพาะการล้างด้วยน้ำ เพราะกลีเซอรินและแอลกอฮอล์มีความสามารถในการละลายน้ำสูง ทำให้น้ำมีประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่คงเหลือในไบโอดีเซล และเป็นกระบวนการที่ทำได้ง่าย และสะดวก ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ การเกิดน้ำเสียในกระบวนการล้างเป็นปริมาณมาก ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุน เวลาในการผลิต และจะต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ลดลง เนื่องจากการเกิดอิมัลชันระหว่างชั้นน้ำกับไบโอดีเซล ปัจจุบันกระบวนการล้างแบบเปียกสามารถแบ่งออกเป็น

2.2.1.1 การล้างด้วยน้ำกลั่น (Washing with distilled water)

การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด โดยส่วนใหญ่จะล้างด้วยน้ำกลั่นอุ่นที่อุณหภูมิประมาณ 60 – 80 องศาเซลเซียส การล้างน้ำอุ่นจะล้างไบโอดีเซลหลายๆ ครั้ง จนกว่าจะสามารถแยกกลีเซอรอลออกไปได้หมด โดยปริมาณน้ำที่ใช้คิดเป็นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณไบโอดีเซล การเติมน้ำทำให้เกิดการจับตัวเป็นอิมัลชัน ส่งผลให้สูญเสียผลิตภัณฑ์ในระหว่างกระบวนการล้าง และในไบโอดีเซลก็ยังมีน้ำตกค้างอยู่ด้วย โดยสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่มีลักษณะใสมากขึ้นและสามารถกำจัดสิ่งเจือปน เช่น สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยา เมทานอลและสิ่งเจือปนอื่นๆ ได้

ตารางที่ 2.7 แสดงลักษณะของน้ำเสียที่เกิดจากการทำไบโอดีเซลด้วยวิธีใช้น้ำล้าง [18]

พารามิเตอร์	ปริมาณ
ปริมาณซีโอดีทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	18.362
พีเอช (pH)	6.7
ค่าการนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	1119
ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	8850
ปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	8750
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	100

2.2.1.2 การล้างด้วยกรด (Washing with acid)

การล้างด้วยกรดคือ การเติมกรดลงไปเพื่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อทำให้เป็นกลางจากตัวเร่งปฏิกิริยาและทำให้เกิดสบู่ลดลง ตัวอย่างกรดที่นิยมใช้คือ กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เพื่อช่วยให้ไบโอดีเซลเป็นกลาง โดยการทำให้ปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่เหลือจากกระบวนการและลดการจับตัวเป็นสบู่ของกรดไขมันอิสระและการเกิดอิมัลชันในกระบวนการ แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นตามจนชั้นไบโอดีเซลสะอาด กำจัดน้ำที่ตกค้างด้วยโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ของไบโอดีเซล แล้วทำการกรอง [20] กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการล้างด้วยน้ำเพื่อทำให้ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปน เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา สบู่ เมทานอล และกลีเซอรอลอิสระ

2.2.1.3 การล้างด้วยสารละลายอินทรีย์ (Washing with organic solution)

สารละลายอินทรีย์ที่นิยมใช้คือ ปิโตรเลียมอีเธอร์ (Petroleum ether) โดยทั่วไปกระบวนการนี้จะตามด้วยการล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสบู่และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือ หรือจนกระทั่งน้ำที่ใช้ล้างมีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นกลาง และกำจัดน้ำในไบโอดีเซลด้วยโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และกำจัดปิโตรเลียมอีเธอร์ด้วยการนำไประเหยหรือทำการกลั่น [20]

2.2.2 กระบวนการล้างแบบแห้ง (Dry washing process)

กระบวนการล้างแบบแห้งหรือการล้างโดยไม่ใช้น้ำ ถูกคิดค้นเพื่อใช้ทดแทนกระบวนการล้างแบบเปียก ทำได้โดยอาศัยกระบวนการดูดซับของตัวดูดซับต่างๆ ตัวอย่างตัวดูดซับ เช่น เรซิน แมกนีเซียมซิลิเกต ถ่านกัมมันต์ ดิน เป็นต้น การดูดซับด้วยตัวดูดซับสามารถช่วยกำจัดสิ่งเจือปนในไบโอดีเซลได้ดี เช่น การใช้แมกนีซอล (Magnesol) ซึ่งมีความสามารถในการจับกับสารประกอบที่มีน้ำได้ดี เช่น กลีเซอรอล โมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ การปรับปรุงสามารถทำได้โดยอาศัยการกรองซึ่งพบว่าจะมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณของกลีเซอไรด์และกลีเซอรอลอิสระ

และยังสามารถช่วยลดสีของจารบีสีเหลืองและสีน้ำตาลในน้ำมันพืชบางชนิดได้ นอกจากนี้ยังมีตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ที่เป็นวิธีการลดสีของไบโอดีเซลได้อย่างมีประสิทธิภาพดี ข้อดีของกระบวนการนี้คือ ผลลัพธ์ที่มีน้ำน้อยหรือไม่มี ไม่เกิดน้ำเสียในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นลดระยะเวลาและต้นทุนในการผลิต ตัวดูดซับที่ใช้ในกระบวนการนี้มีดังนี้

1. แมกนีซอล (Magnesol) ปริมาณที่ใช้สำหรับกระบวนการล้างจะอยู่ในช่วงร้อยละ 1.5 – 3 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล ซึ่งไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการนี้จะมีคุณภาพผ่านเกณฑ์มาตรฐาน สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลได้ โดยแมกนีซอลมีความสามารถในการดูดซับสารที่มีขี้ผึ้งจึงสามารถกำจัดกลีเซอรอล แอลกอฮอล์ สบู่ และกรดไขมันอิสระได้ [20]

2. การแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซิน (Ion exchange resins) โดยให้ไบโอดีเซลไหลผ่านคอลัมน์เรซิน ซึ่งมีการควบคุมอัตราการไหลของไบโอดีเซล สามารถกำจัดกลีเซอรอลและสบู่ได้ แต่ไม่สามารถลดปริมาณของเมทานอลได้ [18]

3. ตัวดูดซับชนิดอื่นๆ เช่น ถ่านกัมมันต์, activated clay และ acid clay เป็นต้น การใช้ตัวดูดซับชนิดนี้จะพบว่าขนาดของตัวดูดซับจะมีผลต่อการกำจัดสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล โดยตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีความสามารถดูดซับได้ดีกว่า แต่จะเกิดปัญหาในการรวมตัวของตะกอนหรือการตกตะกอนร่วม

ตารางที่ 2.8 แสดงความแตกต่างของการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการต่างๆ [16]

วิธี	การล้างแบบเปียก	การล้างแบบแห้ง
วัตถุดิบ	น้ำกลั่น (อุ่น)	เรซิน แมกนีซอล
การทำงาน	ป้องกันการตกตะกอนของกรดไขมัน อิมัลชันและทำให้การสร้างสบู่ช้าลง	ลดปริมาณกลีเซอรอลอิสระและ กำจัดสบู่
ข้อดี	กำจัดสิ่งเจือปนได้ดีมาก	ลดการใช้น้ำ
ข้อเสีย	เพิ่มค่าใช้จ่ายและเวลาใน กระบวนการผลิตเกิดน้ำเสีย ผลผลิตลดลงเกิดอิมัลชัน	คุณภาพของไบโอดีเซลเกิน ข้อกำหนดมาตรฐาน

2.2.3 การสกัดด้วยเมมเบรน (Membrane extraction) [21]

การแยกองค์ประกอบของสารโดยใช้เมมเบรนจะอาศัยหลักการของการส่งผ่านวัสดุที่ไม่ต้องการผ่านเข้าไปเยื่อเลือกผ่านบางส่วน (Semi-permeable barrier) การเคลื่อนที่โดยใช้เมมเบรนจะอาศัยหลักการของการแพร่กระจายตัวของโมเลกุล อุณหภูมิ หรือความแตกต่างของ

ความดัน แต่สำหรับในระบบอุตสาหกรรมวิธีการสกัดด้วยเมมเบรนยังมีข้อจำกัดในหลายๆ ด้านคือ การแยกความสัมพันธ์กับก๊าซเฉื่อย และสารละลาย การศึกษาเมมเบรนจะใช้ความดันสำหรับกระบวนการแยก เช่น กระบวนการ Reverse osmosis (RO), Ultrafiltration (UF) และ Microfiltration (MF) สำหรับกระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรนจะเป็นกระบวนการที่ใช้ความดันในการเคลื่อนที่ของตัวอย่างที่จะใช้ในการแยก ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบพื้นฐานของรูปทรง ขนาดหรือน้ำหนักของอนุภาค ในระหว่างขั้นตอนการทำงานของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนจะขึ้นอยู่กับการทำปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวของเมมเบรนกับองค์ประกอบของสารตัวอย่าง ความเร็วของการไหล อุณหภูมิ ความดัน และองค์ประกอบของ เมมเบรน (Membrane composition)

เมมเบรนสามารถแยกออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือเมมเบรนอินทรีย์ กับเมมเบรนอนินทรีย์ เมมเบรนอนินทรีย์ เช่น เซรามิกเมมเบรนซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีสำหรับกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ เมมเบรนอินทรีย์ เช่น Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 , SiC ซึ่งจะได้รับความสนใจมากกว่าเมมเบรนอินทรีย์ เนื่องจากมีความต้านทานในการแยกได้ดีกว่า เพิ่มอายุในการใช้งาน การกระจายตัวของขนาดรูพรุนแคบ มีความทนทานต่อความเสถียรเชิงกล ความร้อน และทางเคมีได้ดี มีความทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ พลังค์สูง และมีรูพรุนสูง เมมเบรนอินทรีย์ เช่น โพลีซัลโฟน โยสังเคราะห์ โพลีคาร์บอนेट และการพัฒนาสารในกลุ่มของพอลิเมอร์ เส้นใยสังเคราะห์อินทรีย์ในกลุ่มของพอลิเมอร์จะต้องได้รับการปรับปรุงสมบัติความต้านทานในการย่อยสลายของจุลินทรีย์และความทนทานต่อสารเคมี สำหรับเมมเบรนของโพลีอะครีโลไนไตรล์ (PAN) จะเป็นเมมเบรนที่ไม่มีมาตรฐานและมีรูพรุน มีอัตราการซึมผ่านและการเลือกผ่านสูง ดังนั้นการใช้เมมเบรนพอลิเมอร์ในตัวทำละลายจะทำให้อายุการใช้งานของเมมเบรนชนิดนั้นๆ มีค่าต่ำลง

เมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการนี้ คือ Hollow fiber membrane extraction เช่น Polysulfone โดยการนำไบโอดีเซลใส่ Hollow fiber membrane ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 0.5 ml/min กำจัดน้ำในไบโอดีเซลด้วย Na_2SO_4 และการกรอง กระบวนการนี้จะลดการสูญเสียผลิตภัณฑ์ และไบโอดีเซลที่ผ่านกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 90

2.3 แร่ดิน (Clay mineral) [16]

แร่ดินเป็นสารประกอบจำพวกไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (Hydrous aluminous silicate) มีสมบัติความเป็นพลาสติก (Plasticity) เมื่อผสมกับน้ำและนำไปอบแห้งจะมีความเปราะ โดยสมบัติความเป็นพลาสติกของแร่ดินจะขึ้นกับธรรมชาติและความละเอียดของแร่ดิน ถ้าแร่ดินมีความละเอียดมากจะมีสมบัติความเป็นพลาสติกสูง แร่ดินส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นแบบแผ่น (Sheet silicate) จัดอยู่ในพวก Phyllosilicates ซึ่งประกอบด้วยชั้นของอะลูมิเนียมออกตะฮีดรอน (Al-octahedral) และซิลิกอนเตตระฮีดรอน (Si-tetrahedral) และในระหว่างชั้นรอยต่อของชุด (Interlayer) โดยอาจมี

ไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม โพแทสเซียม หรือโมเลกุลของน้ำแทรก อยู่ส่งผลให้ดินแต่ละชนิดมีสมบัติที่แตกต่างกัน กลุ่มแร่ดินที่สำคัญได้แก่ อิลไลท์ (Illite), เคโอลิไนต์ (Kaolinite), สเมคไทต์ (Smectite), และเวอร์มิคูไลต์ (Vermiculite) ยกเว้นแอตตาปุลไกต์ (Attapulgite) หรือรู้จักในนามปาลีกอร์สไกต์ (Palygorskite) มีโครงสร้างต่อเนื่องกันเป็นลูกโซ่ (Chain silicate)

2.3.1 ความหมายของดิน

ในทางวิทยาศาสตร์ให้ความหมายเกี่ยวกับดินว่า ดินเป็นผลจากการผุพังโดยทั้งจาก กระบวนการทางเคมี ทางกายภาพ และทางชีวเคมีของวัสดุต้นกำเนิด เช่น หินหรือวัตถุที่พัดพามาโดย กระบวนการทางธรณี เช่น ตะกอนที่ถูกพามากับน้ำมาทับถมทิ้งเอาไว้ เป็นต้น การกำเนิดดิน (Soil genesis) จะอาศัยกระบวนการที่ซับซ้อนมากกว่าหนึ่งกระบวนการ เช่น การซึบซาบของน้ำลงไป การเปลี่ยนแปลงทางเคมี การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ การสะสมตัวของแร่หรือดินเหนียว เป็นต้น ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการสร้างดิน (Soil forming factors) มีหลายประการ เช่น ภูมิอากาศ (Climate) พืชพรรณและสิ่งมีชีวิต (Vegetarian and organism) วัสดุต้นกำเนิด (Parent materials) ลักษณะภูมิประเทศ (Topography) และเวลา (Time) เป็นต้น

2.3.2 ส่วนประกอบของดิน

ส่วนประกอบของดินโดยทั่วไปมี 4 ประการ คือ

1. แร่วัตถุ (Mineral matter) ประกอบอยู่ในดินประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ เป็นแร่ ชนิดต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบทั่วไปของหิน อันเกิดจากการแตกหัก ผุพัง หรือสลายตัวของหินต้น กำเนิดตามกระบวนการทางเคมี ฟิสิกส์ และชีวเคมี โดยแร่ธาตุเหล่านี้ยังเป็นต้นกำเนิดธาตุอาหารของ พืช และเป็นตัวควบคุมลักษณะของเนื้อดิน แร่ในดินมี 2 ชนิด ทั้งแร่วัตถุและแร่ดินเหนียว

2. อินทรีย์วัตถุ (Organic matter) ประกอบอยู่ในดินประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ เกิด จากเน่าเปื่อยของซากพืชหรือซากสัตว์ทับถมกัน กิจกรรมต่างๆ ของสิ่งมีชีวิตเป็นตัวการให้เกิด อินทรีย์วัตถุด้วยปริมาณของอินทรีย์วัตถุอาจจะแตกต่างกันไปในดินแต่ละชนิด อินทรีย์วัตถุเป็นแหล่ง อาหารของพืชโดยเฉพาะไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ และยังเป็นตัวกำหนดโครงสร้างของดิน อีกด้วย

3. น้ำ (Water) ประกอบอยู่ในดินประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ น้ำจะอยู่ในช่องว่าง ระหว่างเม็ดดิน โดยการดึงดูดจากแรงดึงดูด นอกจากนี้ยังมีน้ำเยื่อ หรือน้ำที่ถูกเม็ดดินดึงดูดเอาไว้ เป็นชั้นบางๆ รอบอนุภาค ซึ่งน้ำจะเป็นตัวละลายธาตุอาหารต่างๆ ในดิน รวมทั้งนำธาตุอาหารเข้าสู่ พืช

4. อากาศ (Air) ประกอบอยู่ในดินประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ อากาศจะอยู่ในช่องว่างในดินซึ่งจะช่วยเป็นธาตุอาหารพืชโดยตรง และช่วยในกิจกรรมของต่างๆ ของจุลินทรีย์ เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2.3.3 แร่ธาตุในดิน (Mineral matter)

ส่วนที่เป็นของแข็งในดินมีทั้งส่วนประกอบที่เป็นหินหรือชิ้นส่วนย่อยของหินเป็นเม็ดเล็กๆ และอาจจะเป็นเม็ดแร่ที่หลุดแตกออกมาหินต้นกำเนิด นอกจากนี้ส่วนที่เป็นของแข็งยังเป็นพวกอินทรีย์วัตถุอีกด้วย เม็ดแร่ที่เกิดแต่ดั้งเดิมและยังคงสภาพอยู่ได้ในดินต้องมีคุณสมบัติสำคัญคือมีความคงทนต่อการกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาทางเคมีกับบรรยากาศได้น้อย หรือมีความแข็งพอสมควร ส่งผลให้ทนสภาพอยู่ได้ เม็ดแร่พวกนี้ได้แก่ เม็ดทรายแป้ง (Silt) ขึ้นไปถึงเม็ดทราย (Sand) ส่วนพวกที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากๆ เช่น เม็ดดินเหนียว (Clay) มักจะเป็นแร่ที่เกิดขึ้นใหม่ตอนที่มีการสร้างดินนั่นเอง แร่ต่างๆ ที่พบมากในดินมีดังนี้

1. กลุ่มแร่ซิลิกา (Silica group) หรือกลุ่มแร่ควอตซ์ (Quartz)

แร่ซิลิกามีสูตรทางเคมีว่าซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ชาวบ้านเรียกว่า แร่เขี้ยว หนุมาน หรือแร่โป่งขาม ควอตซ์เป็นองค์ประกอบหลักของอนุภาคดินขนาดทรายและขนาดทรายแป้ง ควอตซ์เป็นแร่ที่ทนต่อการสลายตัวมาก มีค่าความแข็งเท่ากับ 7 ดินที่มีควอตซ์อยู่ในปริมาณมากดินนั้นจะเป็นดินทราย มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ไม่เหมาะสำหรับการปลูกพืช ควอตซ์มี เนื้อดินละเอียดมาก รวมทั้งมีสีต่างๆ เช่น ขาว น้ำตาล เทา เหลือง แดง ดำ เป็นต้น

2. กลุ่มแร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar group)

แร่เฟลด์สปาร์ เป็นแร่ที่มีสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (Alumino silicate) หรือที่ชาวบ้านเรียกว่า แร่ฟันม้า เฟลด์สปาร์เป็นแร่ที่มีมากที่สุดในบรรดาแร่ประกอบหิน แต่มีความเสถียรน้อยกว่ากลุ่มแร่ซิลิกาหรือกลุ่มแร่ควอตซ์ ทำให้เกิดการผุพังได้ง่าย โดยทำปฏิกิริยากับน้ำหรือกรดคาร์บอนิกได้ดี มีค่าความแข็งของแร่เท่ากับ 6 เมื่อสลายตัวแล้วจะเปลี่ยนไปเป็นแร่ดินเหนียว กลุ่มแร่ชนิดนี้จะมีสีขาวขุ่น สีเหลืองอ่อน สีครีมขุ่น หรือสีเทาอ่อน และมีหน้าผลึกสะท้อนแสงพร้อมกันเป็นระนาบเวลาแตกเป็นระนาบเกือบตั้งฉากซึ่งกันและกันแร่เฟลด์สปาร์เมื่อผุพังจะกลายเป็นดินขาวที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจคือ แร่ดินขาว (Kaolinite) แร่ที่สำคัญในกลุ่มนี้ ได้แก่ โพแทสเฟลด์สปาร์ (Potash feldspars) ซึ่งมีสูตรเคมีว่า KAlSi_3O_8 และแพลจีโอเคลสเฟลด์สปาร์ (Plagioclase feldspars) มีสูตรทางเคมีว่า $\text{Na-Ca AlSi}_3\text{O}_8$ ซึ่งมีธาตุโซเดียมและแคลเซียมเป็นธาตุหลัก ซึ่งสลายตัวได้ค่อนข้างง่าย

3. กลุ่มแร่ไมกา (Mica group)

แร่ไมกาที่มีสูตรทางเคมีว่า $(\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_4)$ มักจะถูกเรียกชื่อว่า แร่กลีบหินองค์ประกอบเป็นพวกอลูมิเนียมซิลิเกต โดยมีธาตุโพแทสเซียม แมกนีเซียม และเหล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกัน สีใส และสีออกขาวแดงหรือเขียวคล้ำก็ได้ มีสมบัตินุ่มเบา เกิดเป็นเกล็ดแบบแร่ปฐมภูมิ มีความมันวาวคล้ายๆ แร่กลุ่มไมกาที่สำคัญและพบอยู่ทั่วไป ได้แก่ มัสโคไวต์ (Muscovite) หรือไมกาขาว มีสูตรทางเคมีคือ $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})$ และไบโอไทต์ (Biotite) หรือไมกาดำ มีสูตรทางเคมีคือ $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$

4. กลุ่มแร่คาร์บอเนต (Carbonate group)

แร่คาร์บอเนตที่พบบ่อยในกลุ่มนี้ ได้แก่ แร่แคลไซต์ (Calcite) และแร่โดโลไมต์ (Dolomite) มีสูตรทางเคมีคือ CaCO_3 และ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ แร่ในกลุ่มนี้จะมีส่วนประกอบที่สำคัญคือพวกคาร์บอเนต พบในหินปูนและหินอ่อน โดยแร่ที่พบบ่อยที่สุดคือ แร่แคลไซต์ เป็นผลึกสีขาวหรือขาวใส ถ้ามีวัตถุอื่นเจือปนอยู่มากจะทำให้มีสีต่างๆ เช่น น้ำตาล เขียว และดำ แร่แคลไซต์จะสลายตัวได้ง่ายมาก และมีความแข็งเท่ากับ 3 ถ้าแคลเซียมในแร่แคลไซต์ถูกแทนที่โดยแมกนีเซียม เราเรียกว่าแร่โดโลไมต์ ซึ่งจะละลายได้ยากกว่าแร่แคลไซต์

5. กลุ่มแร่เหล็กออกไซด์ (Ferric oxide minerals group)

กลุ่มแร่เหล็กออกไซด์จะมีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ทำให้เกิดสีในดินได้อย่างชัดเจน เช่น สีแดง เหลือง น้ำตาล แร่ชนิดนี้มักเกิดจากสารละลายของพวกอนุภาคของดินมาเคลือบเอาไว้ ทำให้เกิดการเชื่อมประสานอนุภาคเอาไว้ เช่น ศิลาแลง เป็นต้น หรือมักจะเกิดจากแร่อื่นๆ ที่มีธาตุเหล็กอยู่แล้ว แร่ที่สำคัญได้แก่ แร่ไลมิไนต์ (Liminite) มีสูตรทางเคมีคือ $(\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ ฮีมาไทต์ (Hematite) มีสูตรทางเคมีคือ Fe_2O_3 และแมกนีไทต์ (Magnetite) มีสูตรทางเคมีคือ Fe_3O_4

2.3.4 แร่ดินเหนียวในดิน (Clay mineral)

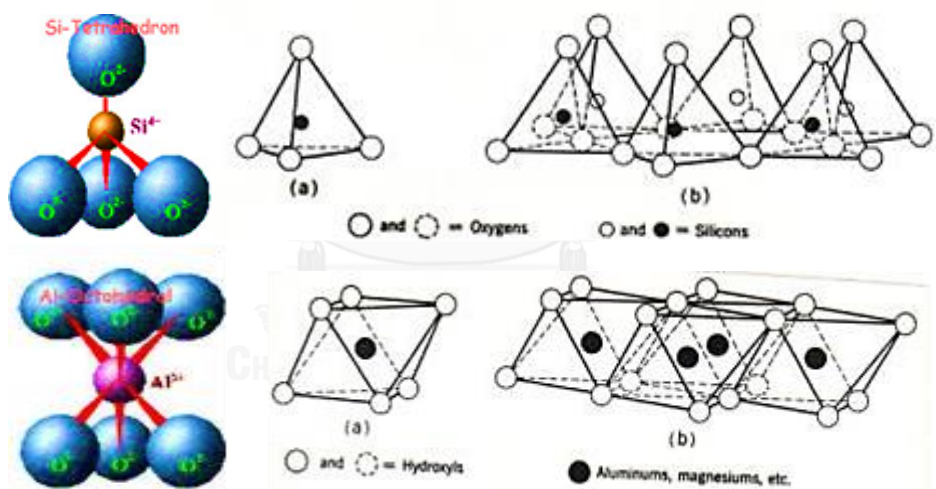
แร่ดินเหนียว หมายถึง กลุ่มแร่อะลูมิเนียมซิลิเกต (Alumino silicate mineral) ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นซิลิกา (Silica sheet) และแผ่นอะลูมินา (Alumina sheet) ซ้อนกับแบบ 1 : 1 หรือ 2 : 1 มีทั้งชนิดที่ขยายตัวได้และขยายตัวไม่ได้ แร่ดินเหนียวที่พบทั่วไปคือ เคโอลิไนต์ (Kaolinite) อิลไลต์ (Illite) มอนมอริลโลไนต์ (Montmorillonite) และเวอมิคิวไลต์ (Vermiculite)

แร่ดินเหนียวส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพของผลึกแทบทั้งสิ้น ซึ่งจากลักษณะของโครงสร้างผลึกสามารถจำแนกแร่ดินเหนียวออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ เคโอลิไนต์ (Kaolinite), สเมคไทต์ (Smectite) และ ไฮดรอสไมกา (Hydrous mica) หรืออิลไลต์ (Illite) นอกจากนั้นยังมีแร่ดินเหนียวกลุ่มอื่นๆ เช่น เวนิคูไลต์ (Vermiculite) และคลอไรต์ (Chlorite) เป็นต้น

แร่ดินเหนียวมีหน่วยโครงสร้างหลัก ดังนี้

1. Silica tetrahedral unit เป็นหน่วยของโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยออกซิเจน (O) 3 อะตอม เป็นฐานทรงสามเหลี่ยม มีธาตุซิลิกา (Si) 1 อะตอม อยู่ตรงกลาง และมีออกซิเจน (O) อีก 1 อะตอม วางทับอยู่ข้างบน เกิดเป็นหน่วยทรงพีระมิด ดังนั้นจึงเรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า Silica tetrahedral unit หน่วยโครงสร้างของ Silica tetrahedral unit เมื่อมีการเชื่อมกันโดยการใช้พันธะร่วมกันของออกซิเจน (O) ต่อเรียงกันเป็นแผ่นๆ มีรูตรงกลางรูปหกเหลี่ยม จะถูกเรียกว่าแผ่น ซิลิกา (Silica tetrahedral sheet) หรือ T-sheet

2. Alumina octrahedral unit เป็นหน่วยของโครงสร้างซึ่งประกอบด้วย ออกซิเจน (O) 3 อะตอมเป็นฐาน มีธาตุอะลูมินา (Al) 1 อะตอม วางอยู่ตรงกลาง มีออกซิเจนอีก 3 อะตอม วางทับอยู่ข้างบน อัตตัวเป็นทรงแปดเหลี่ยม ดังนั้นจึงเรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า Alumina octrahedral unit หน่วยโครงสร้างของ Alumina octrahedral unit เมื่อมีการเชื่อมกัน โดยการใช้พันธะร่วมกัน 2 หน่วยของ Octrahedral ต่อเรียงกันเป็นแผ่นทึบ จะถูกเรียกว่าแผ่นซิลิกา (Alumina octrahedral sheet) หรือ O-sheet



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ Silica tetrahedral unit และ Alumina octrahedral unit

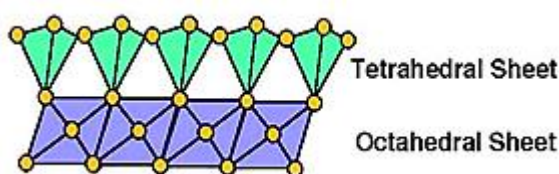
แร่ดินเหนียวทุกชนิดประกอบด้วยแร่ที่มีโครงสร้างของแร่ดังกล่าวและความแตกต่างระหว่างแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ จะขึ้นอยู่กับ การเรียงซ้อนกันของแผ่นซิลิกาและแผ่นอะลูมินา การเปลี่ยนแปลงและแทนที่ของซิลิกาและอะลูมินา ในแผ่นโครงสร้างดังกล่าวกับธาตุอื่นๆ ชนิดของแร่ดินเหนียวที่สำคัญ ได้แก่

2.3.4.1 เคโอลิไนต์ (Kaolinite)

โครงสร้างของเคโอลิไนต์ จะประกอบด้วยแผ่นซิลิกาหนึ่งแผ่นประกบกับแผ่นอะลูมินาหนึ่งแผ่น โดยที่ซิลิกาและอะลูมินาจะร่วมกันเกาะออกซิเจนตัวเดียวกันในด้านที่

ประกอบเข้าหากัน จึงทำให้แผ่นทั้งสองประสานกันแน่นรวมกันเป็นผลึก แร่เคโอลิไนต์มีสูตรทางเคมีคือ $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ผลึกของแร่ชนิดนี้จะขยายตัวออกไปในแนวระนาบได้โดยไม่จำกัด รูปของแผ่นผลึกของเคโอลิไนต์เป็นรูปหกเหลี่ยมมีขอบชัดเจน ผลึกของเคโอลิไนต์ในธรรมชาติจะเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นของแผ่นโครงสร้างที่เรียงซ้อนกันจะมีความหนาประมาณ 7 อังสตรอม

ช่องระหว่างแผ่นโครงสร้างไม่สามารถขยายให้กว้างขึ้นหรือแคบลงได้ เนื่องจากถูกยึดไว้ด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอะตอมออกซิเจนของแผ่นซิลิกาและอะตอมไฮโดรเจนของแผ่นอะลูมินา ระหว่างแผ่นโครงสร้างที่อยู่ติดกัน การที่แผ่นอะลูมินามีไฮโดรเจนอะตอมอยู่ด้วยนั้น อะตอมไฮโดรเจนนี้เป็นกลุ่มไฮดรอกซิลซึ่งเกิดขึ้นจากออกซิเจนอะตอมซึ่งอยู่ด้านนอกของแผ่นอะลูมินา ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วไฮโดรเจนและออกซิเจนจะมีสัมพรรคภาพ (Affinity) ที่ยึดเกาะกันเป็นอย่างมาก ดังนั้นเมื่อต่างเข้ามาใกล้กันจึงทำให้เกิดมีแรงยึดระหว่างกันขึ้นมา ซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างเหนียวแน่น เราเรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของแร่ดินเหนียวพวกนี้เกี่ยวกับการขยายตัวและการหดตัวเมื่อเปียกแห้งมีน้อยมาก การดูดซับแคตไอออนก็น้อยด้วย เพราะมีแต่พื้นผิวภายนอกเท่านั้น ผลึกของแร่ดินเหนียวพวกนี้มีลักษณะโครงสร้างที่แข็งแรงและเรียงตัวแน่น อนุภาคดินเหนียวจึงแตกร้าวและหักพังยาก ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วอนุภาคของดินเหนียวพวกนี้ มักจะมีขนาดโตกว่าดินเหนียวพวกอื่นทั้งหมด และขอบผลึกบางส่วนก็ยังสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีลักษณะหกเหลี่ยมขนาดอนุภาคของดินเหนียวพวกนี้จะอยู่ระหว่าง 0.10 – 5 มิลลิเมตร แต่ส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.2 – 2 ไมโครเมตร นอกจากนั้นแล้วจากโครงสร้างของแร่เคโอลิไนต์ที่ประกอบด้วยแผ่นอะลูมินาหนึ่งแผ่นประกบทับกับแผ่นซิลิกาหนึ่งแผ่น แร่ชนิดนี้จึงมักจะถูกเรียกว่ากลุ่มแร่พวก 1 : 1 Type clay mineral



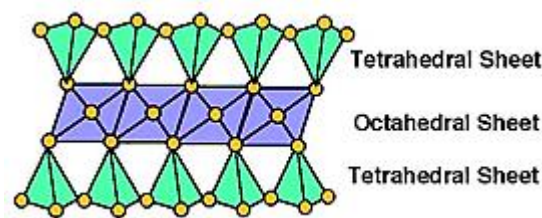
รูปที่ 2.12 โมเดลของ 1 : 1 Type clay mineral

2.3.4.2 สเม็คไทต์ (Smectite)

แร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้มีอยู่หลายชนิดที่สำคัญ ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เบเดลไลต์ (Beidellite) นอนโทรไนต์ (Nontronite) ซาโปไนต์ (Saponite) เป็นต้น ในจำนวนแร่เหล่านี้มีมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนียวสำคัญ เพราะพบมากที่สุด รองลงมาคือ เบเดลไลต์ และนอนโทรไนต์

โครงสร้างของแร่ดินเหนียวพวกสเม็คไทต์ จะประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นและแผ่นอะลูมินาหนึ่งแผ่นสอดอยู่ตรงกลาง ซิลิกาและอะลูมินาอะตอมของทั้งสองแผ่นต่างก็ยึด

เกาะออกซิเจนร่วมกัน ประกอบกันเป็นผลึกของสเม็คไทต์ เนื่องจากแร่ดินเหนียวพวกนี้ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นและแผ่นอะลูมินาหนึ่งแผ่น แร่ชนิดนี้จึงมักถูกเรียกว่า กลุ่มแร่พวก 2 : 1 Type clay mineral



รูปที่ 2.13 โมเดลของ 2 : 1 Type clay mineral

ผลึกของสเม็คไทต์จะเชื่อมต่อกันไปในแนวระดับ และจะซ้อนกันเป็นชั้น เช่นเดียวกับแร่เคลย์ไนต์ แผ่นโครงสร้างและช่องระหว่างแผ่นที่ซ้อนกันจะมีความหนา 9 – 21 อังสตรอม ช่องว่างอาจจะขยายกว้างหรือแคบได้ เพราะไม่มีพันธะไฮโดรเจนที่ยึดระหว่างแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกัน เนื่องจากด้านบนและด้านล่างของช่องต่างก็มีออกซิเจนซึ่งเป็นแผ่นซิลิกาทั้งหมด โดยจะเกิด oxygen-oxygen linkage ขึ้นแทน ซึ่งเป็นแรงที่ยึดเกาะที่เบาบางมากไม่สามารถจะยึดช่องว่างของแร่ดินเหนียวให้มีระยะที่คงที่ได้ โมเลกุลของน้ำและแคตไอออนต่างๆ จะสามารถแทรกซึมเข้าไปดูดซับอยู่ที่ผิวภายในของช่องว่าง (Internal surface) ได้โดยง่าย แร่ดินเหนียวชนิดนี้จะมีพื้นที่ผิวดูดซับโมเลกุลของน้ำและแคตไอออนได้มาก การพองตัวและการหดตัวก็จะเกิดขึ้นได้มากเช่นเดียวกัน เมื่อดินนั้นเปียกหรือแห้งตัวลง ความสามารถในการดูดซับน้ำและแคตไอออนต่างๆ ก็มีสูงมาก

เนื่องจากแร่ดินเหนียวชนิดนี้สามารถยึดหดได้ง่ายและมีการแทนที่ของไอออนได้มาก โครงสร้างของผลึกจึงไม่แข็งแรง การแตกสลายของผลึกและอนุภาคดินเหนียวชนิดนี้จึงเกิดขึ้นได้ง่ายมาก ในสภาพธรรมชาติโดยทั่วไปจึงพบว่าแร่ดินเหนียวพวกสเม็คไทต์มีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับเคลย์ไนต์คือ มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.01 – 1.0 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงยังมีผลทำให้แร่ดินเหนียวพวกนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากขึ้น ขอบของผลึกของแร่ดินเหนียวชนิดนี้จะฉีกขาดจนไม่อาจที่จะเห็นขอบของผลึกที่แท้จริงได้

2.3.4.3 อิลไลต์ (Illite)

แร่อิลไลต์เป็นแร่ที่มีองค์ประกอบของผลึกคล้ายกับพวกสเม็คไทต์มาก และมีโครงสร้างทั่วไปเหมือนกัน ดังนั้นจึงเป็นพวก 2 : 1 Type clay mineral ด้วย แต่จะแตกต่างกันตรงที่ระยะระหว่างแผ่นผลึกโดยวัดจากขอบบนขอบแผ่นโครงสร้างแผ่นบนถึงขอบบนของแผ่นล่าง ถัดลงมาจะมีระยะคงที่เท่ากับ 10 อังสตรอม และไม่สามารถยึดหดได้เหมือนอย่างสเม็คไทต์ บางครั้งจึงเรียกพวกนี้ว่าชนิดที่ไม่ยืดตัว (Non expanding lattice) เพราะวาซิลิกาอะตอมในแผ่นซิลิกาบางส่วนจะถูกแทนที่โดยอะลูมินาอะตอม และประจุที่เหลืออยู่เนื่องจากการแทนที่นี้จะถูกทำให้เป็นกลางโดย K^+

สูตรของอิลไลต์คือ $K_{1.33}(Si_{6.66}Al_{1.33})Al_4O_{20}(OH)_4$ สำหรับ K^+ ที่เข้ามาทำให้ประจุลบที่ค้างอยู่บนกลางจะเข้ามาอยู่ในรูปของ K^+ ที่ฝังตัวอยู่ในระหว่างช่องเล็กๆ ภายในช่องรูปหกเหลี่ยมของแผ่นซิลิกาที่ซ้อนอยู่ทั้งข้างบนและข้างล่าง ซึ่งทำหน้าที่คล้ายๆ กับกระดุมที่ช่วยยึดแผ่นผลึกของอิลไลต์ที่เรียงซ้อนกันทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ แคตไอออนต่างๆ ก็ไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปยึดติดกับพื้นที่ผิวภายในช่องได้ ซึ่งหมายความว่า พื้นที่ผิวภายในจะมีน้อยมากแต่ก็ยังมีมากกว่าแร่เคลโอไลน์ต ทั้งนี้เพราะโมเลกุลของน้ำและแคตไอออนอาจแทรกซึมเข้าไปดูดซับที่พื้นผิวภายในบริเวณใกล้ๆ กับขอบของผลึกได้บ้าง ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าคุณสมบัติต่างๆ ของอิลไลต์จะอยู่ระหว่างคุณสมบัติของสเม็คไทต์และเคลโอไลน์ต โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของอิลไลต์คล้ายกับแร่ไมกามาก จึงมักเรียกอิลไลต์ว่าไฮดรัสไมกา (Hydrous mica)

ตารางที่ 2.9 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแร่ดินเหนียวสำคัญ 3 ชนิด

สมบัติ	ชนิดของแร่ดินเหนียว		
	เคลโอไลน์ต (Kaolinite)	สเม็คไทต์ (Smectite)	อิลไลต์ (Illite)
ขนาดของผลึก	0.1 – 5.0	0.01 – 1.0	0.1 – 2.0
รูปร่าง	แผ่นบางรูปหกเหลี่ยม	แผ่นบางมีขอบไม่	แผ่นบางมีขอบไม่
พื้นที่ผิวภายนอก	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
พื้นที่ผิวภายใน	ไม่มี	สูงมาก	ปานกลาง
ความเชื่อมั่นแน่นและสภาพพลาสติก	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
การขยายตัว	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
ความจุแลกเปลี่ยนไอออน	3 – 15	80 – 100	15 – 40

2.3.5 คุณสมบัติของแร่ดินเหนียว

1. รูปร่างและขนาด

รูปร่างและอนุภาคของแร่ดินเหนียวจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (Flake-like) ประกบซ้อนกันอยู่เป็นจำนวนมาก อนุภาคของแร่ดินเหนียวทุกชนิดส่วนใหญ่จะคงไว้ในลักษณะของผลึก บางชนิดจะมีรูปร่างเป็นหกเหลี่ยม (Hexagonal) ซึ่งสามารถมองเห็นเหลี่ยมและมุมของแผ่นหกเหลี่ยมได้อย่างชัดเจนเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) บางชนิดเป็นแผ่นบาง ส่วนขอบ

ของอนุภาคที่เป็นผลึกเหล่านี้ไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนเพราะมีรอยฉีกขาดอยู่ทั่วไปหมด ส่วนแร่ดินเหนียวบางชนิดก็มีรูปร่างของแผ่นที่ม้วนเป็นทรงกระบอก เป็นต้น

2. พื้นที่ผิว (Surface area)

เนื่องจากอนุภาคของแร่ดินเหนียวมีขนาดเล็กมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแผ่นแบนและบาง จึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific area) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมีค่าสูงมาก อนุภาคของสารที่มีน้ำหนักเท่ากันแต่เมื่อมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันออกไป เช่น มีทรงกลมแบน หรือทรงลูกบาศก์ ก็จะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่แตกต่างกัน อนุภาคที่มีน้ำหนักเท่ากันจะพบว่าอนุภาคเป็นรูปทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด ส่วนอนุภาคที่เป็นรูปแบนหรือแผ่นจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด โดยจะเห็นได้ว่าแร่ดินเหนียวที่มีรูปร่างส่งเสริมพื้นที่ผิวมากที่สุดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นพื้นที่ผิวภายนอก (External surface) แต่แร่ดินเหนียวบางชนิดยังมีพื้นที่ผิวภายในอีกด้วย โดยเป็นพื้นที่ผิวที่อยู่ระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดินเหนียวที่ซ้อนทับกันอยู่เป็นอนุภาคหรือไมเซลล์ (Micelle) ของแร่ ดังนั้นแร่ดินเหนียวพวกนี้จึงมีพื้นที่ผิวทั้งหมดเป็นจำนวนมาก

3. ความเชื่อมแน่น (Cohesion) และสภาพพลาสติก (Plasticity)

คุณสมบัติความเชื่อมแน่นและสภาพพลาสติกของแร่ดินเหนียวมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของดินเหนียว ความเชื่อมแน่นหมายถึงความสามารถในการเกาะยึดกันได้ระหว่างอนุภาคดินเหนียว การที่ดินเหนียวชนิดหนึ่งมีความเชื่อมแน่นสูงก็เนื่องมาจากอนุภาคของดินเหนียวมีพื้นที่ผิวให้น้ำยึดเกาะผิวได้มาก จึงทำให้อนุภาคของดินเหนียวนั้นเกาะยึดกันได้ดีด้วย ดังนั้นดินเหนียวที่มีความเชื่อมแน่นสูงจะมีสภาพเหนียวและเกาะติดมือ สามารถบีบปั้นให้เป็นรูปต่างๆ ได้ และคงสภาพเช่นนั้นอยู่ได้ คุณสมบัตินี้เรียกว่าสภาพพลาสติก ส่วนดินเหนียวบางชนิดที่มีความเชื่อมแน่นต่ำคือ มีพื้นที่ผิวน้อยที่จะช่วยยึดอนุภาคของดินเหนียวอื่นๆ ที่อยู่ถัดไป ดังนั้นจึงมีผลทำให้การเกาะกันระหว่างดินเหนียวไม่แน่นถึงแม้ว่าดินจะมีความชื้นอยู่มากก็ตาม ดังนั้นดินจึงมีสภาพร่วน ไม่เหนียว และคุณสมบัติเกี่ยวกับพลาสติกก็จะต่ำด้วย

4. การขยายตัว (Swelling) และการหดตัว (Shrinking)

ดินเหนียวบางชนิดมีคุณสมบัติเกี่ยวกับการขยายตัวที่สูงมาก ซึ่งความสามารถในการขยายตัวเกิดจากโครงสร้างของดินเหนียวที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะในแร่ดินเหนียวบางชนิดที่มีลักษณะเป็นแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกันนั้นจะมีช่องระหว่างชั้น (Inter layer) ได้มากขึ้นก็จะยิ่งทำให้ช่องว่างระหว่างดินเหนียวมีความห่างมากขึ้น ดังนั้นดินเหนียวชนิดนี้เมื่อเปียกน้ำแล้วจะสามารถพองตัวหรือขยายตัวก็ได้ แต่ถ้าทำให้ดินเหนียวแห้งลง เช่น เมื่อนำเข้าเตาอบเพื่อไล่น้ำออก น้ำที่เกาะอยู่ในช่องว่างระหว่างดินจะถูกกระเหยออกมาทำให้ดินยุบตัวลงหรือลดตัวลง

5. ประจุลบและการดูดซับแคตไอออน (Electronegative charge and adsorption of cations)

อนุภาคของดินเหนียวจะมีประจุลบอยู่เป็นจำนวนมาก และเมื่ออยู่ตามธรรมชาติก็จะมีการดูดซับแคตไอออนไว้เป็นจำนวนเท่ากับประจุลบที่มีอยู่ จึงทำให้เกิดสภาพที่เรียกว่าสภาพประจุสองชั้น (Ionic double layer) เกิดขึ้น ชั้นในได้แก่ชั้นของประจุลบที่ผิวของดินเหนียว ดังนั้นอนุภาคของดินเหนียวมีลักษณะคล้ายๆ กับแอนไอออนและสามารถที่จะเคลื่อนตัวไปยังขั้วบวกได้เช่นเดียวกับ Cl^- และ SO_4^{2-} และเมื่ออยู่ในสภาพแขวนลอย อนุภาคของดินเหนียวก็จะมีน้ำและกลุ่มแคตไอออนห้อมล้อมอยู่เต็มไปหมด ดังนั้นอนุภาคของดินเหนียวที่อยู่ในสภาพเช่นนี้จึงเรียกว่า clay micelle ซึ่งก็คืออนุภาคของดินเหนียวที่อยู่ในสภาพคอลลอยด์ สำหรับแคตไอออนที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวนั้นจะเป็นการดูดซับอย่างหลวมๆ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าแคตไอออนนั้นมีวงโคจรอยู่ใกล้พื้นผิวของ clay micelle และสามารถถูกไล่ที่ด้วยแคตไอออนชนิดอื่นได้ ดังนั้นแคตไอออนที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวจึงเรียกว่าแคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ (Cation exchange) โดยทั่วไปจะมีแคตไอออนพวก H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ และ Na^+ เกาะยึดอยู่ที่ผิวของดินเหนียว เป็นส่วนใหญ่และเป็นสัดส่วนมากน้อยลงไป ตามลำดับ สามารถแสดงได้โดยค่า Cation exchange capacity (CEC) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนของแคตไอออนของอนุภาคดินเหนียว

2.4 เบนโทไนต์ (Bentonite) [22]

2.4.1 สมบัติของเบนโทไนต์

เบนโทไนต์เป็นแร่ดินเหนียวที่อยู่ในกลุ่มอยู่ในกลุ่มดินสเมคไตต์ (Smectite) โดยจะมีคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่เหมือนกันกับในกลุ่มแร่ดินเหนียวกลุ่มดิน สเมคไตต์ เบนโทไนต์จะประกอบด้วยแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาได้แก่ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ จากองค์ประกอบนี้ทำให้ดินเบนโทไนต์มีประจุลบและมีพื้นที่ผิวมาก ส่งผลให้มีสมบัติในการดูดซับที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ จึงสามารถนำมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับที่ดีและหาได้ง่าย สำหรับในเรื่องความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ ตัวอย่างเช่น มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนโซเดียมแทนที่อยู่ในโครงสร้างเป็นปริมาณมาก จะมีสมบัติในการดูดซับน้ำและเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนแคลเซียมหรือโพแทสเซียมแทนที่ โดยทั่วไปแล้วลักษณะและคุณสมบัติของเบนโทไนต์ยังมีความซับซ้อนและยังค่อนข้างมีความเฉพาะตัว แตกต่างกันไปตามแหล่งแร่ คุณสมบัติทางเคมีและสมบัติทาง

กายภาพ คือการมีขนาดของอนุภาคละเอียดมาก และการมีประจุลบที่ทำการแลกเปลี่ยนประจุได้ดี ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีในเรื่องการดูดซึมและการเคลื่อนตัว

แหล่งดินเบนโทไนต์ที่สำคัญของโลกอยู่ที่เมืองไวโอมิง (Wyoming) ประเทศสหรัฐอเมริกา รองลงมาได้แก่ กลุ่มประเทศอิสระที่แยกตัวจากรัสเซียเดิม (CIS) ประเทศกรีซ เยอรมัน ญี่ปุ่น และตุรกี สำหรับในประเทศไทยนั้นมีแหล่งเบนโทไนต์ที่สำคัญที่ ตำบลนารายณ์ อำเภอยะบะดี จังหวัดลพบุรี และอำเภอศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี

2.4.2 ชนิดของเบนโทไนต์

โดยทั่วไปเบนโทไนต์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทหลัก โดยแบ่งตามชนิดของไอออนบวกภายนอกที่ถูกดูดซับเข้าสู่พื้นผิวของอนุภาคเบนโทไนต์ทั้งโดยวิธีธรรมชาติหรือการใช้สารเคมี

เบนโทไนต์ที่ใช้งานมากในอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1. โซเดียมเบนโทไนต์ (Natural sodium bentonite) หรือ Sodium montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยน Na^+
2. แคลเซียมเบนโทไนต์ (Natural calcium bentonite) หรือ Calcium montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยน Ca^{2+}
3. โซเดียมเบนโทไนต์ที่ถูกกระตุ้น (Sodium activated bentonite) หรือ Sodium activated montmorillonite เป็นการแลกเปลี่ยนประจุจาก Ca^{2+} เป็น Na^+

เบนโทไนต์ที่มีการใช้งานมากที่สุดคือโซเดียมเบนโทไนต์ (Na-Bentonite) โดยจะเป็นแร่ที่มีความต้องการในอุตสาหกรรมมากกว่าแคลเซียมเบนโทไนต์ (Ca-Bentonite) เนื่องจากโซเดียมเบนโทไนต์มีความสามารถในการดูดซับได้มากกว่าแคลเซียมเบนโทไนต์ โซเดียมเบนโทไนต์เมื่อดูดซับน้ำแล้วสามารถในการพองตัวได้มาก 15 – 20 เท่าจากปริมาตรเดิม มีสมบัติเป็นตัวหล่อลื่น และกั้นการแพร่ผ่าน โดยนิยมใช้เป็นหัวเจาะโคลน และใช้อุดหรือยาแนวขอบเขื่อนทำนบ สำหรับแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนต์ มีความสามารถในการพองตัวได้น้อยกว่าโซเดียมเบนโทไนต์ ดังนั้นจึงนิยมใช้เป็นสารฟอกสี หรือเป็นสารดีเทอร์เจนต์ในการดูดซับน้ำมันจากพืชและสัตว์ นอกจากนี้ยังมีการนำไปดัดแปรโดยทำปฏิกิริยากับกรดได้เป็นดินเหนียวที่ถูกกระตุ้น (Activated clays) สำหรับใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือทำปฏิกิริยากับไฮดาไฟเปลี่ยนจากแคลเซียมเป็นโซเดียมเบนโทไนต์

จากความสามารถในการดูดซับที่ต่างกัน ส่งผลให้การละลายน้ำและประจุไฟฟ้าลบสุทธิต่างกัน ทฤษฎีของความแตกต่างในความสามารถระหว่างโซเดียมเบนโทไนต์และแคลเซียมเบนโทไนต์สามารถอธิบายได้โดยใช้คำ Diffuse double layer (DDL)

ทฤษฎี Diffuse double layer (DDL) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Gouy และ Chapman จึงเรียกว่า Gouy-Chapman Theory โดยมีแนวคิดที่ว่า Exchangeable cation มีอยู่เป็น Point charges ส่วน Colloid surface เป็น Planar ที่ไม่มีวันจบ (Infinite) Surface charge จะอยู่ในรูปเดียวกันหมด (Uniform) และกระจายอยู่ที่วบนผิวของ Colloid surface การดูดซับของมวลสารที่อยู่ในรูปอออนที่มีประจุลบบนผิวดินเกิดจากผลรวมของแรงยึดทางเคมีและสนามไฟฟ้าที่เชื่อมต่อ ซึ่งควบคุมโดยการดูดซับ ดินมีประจุรวม (Net charge) หากผิวเป็นประจุลบ หมายถึงอออนที่มีประจุบวกก็จะมีแรงยึดทางไฟฟ้ากับประจุที่ผิวดิน ในขณะที่เดียวกันอันเนื่องมาจากการแพร่กระจายทำให้อออนบวกถูกดึงกลับมาสู่สารละลาย เมื่อเกิดการกระจายของอออนบวกที่ชั้นการแพร่กระจายทำให้ความเข้มข้นของอออนบวกที่ผิวเพิ่มขึ้นจากค่าที่เท่ากับที่มีอยู่ในสารละลาย จนมีค่าที่มากกว่าโดยสังเกตจากค่าสูงสุดของประจุที่ผิว ในทางกลับกันอออนที่มีประจุเหมือนกัน (ประจุลบ) จะถูกผลักโดยผิวทำให้มีอออนลบ ปริมาณน้อยที่ใกล้กับผิว ทฤษฎี Diffuse double layer (DDL) คือ การวัดปริมาณทางวิทยาศาสตร์ที่เรียกว่า Debye length (λ)

$$\lambda = \sqrt{\frac{\epsilon_r \epsilon_o RT}{2F^2 I}} = \sqrt{\frac{(3.924 \times 10^{-6} \frac{\text{mol} \cdot \text{mm}^2}{\text{L} \cdot \text{K}}) \epsilon_r T}{I}}$$

(สมการที่ 2.1)

เมื่อ	ϵ_o	= vacuum permittivity
	R	= ideal gas constant
	F	= Faraday's constant
	T	= absolute temperature
	I	= ionic strength of the soil water
	ϵ_r	= relative permittivity of the DDL

ในทำนองเดียวกันความแรงของไอออนิก (Ionic strength) จะเป็นไปตามสมการ

$$I = \frac{1}{2} \sum z_i^2 C_i$$

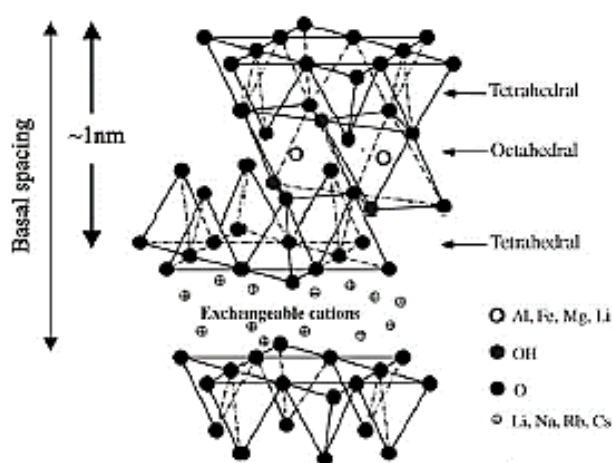
(สมการที่ 2.2)

เมื่อ	Z_i	= valence
	C_i	= molar concentration of ionic species i .
	Z_i	= Valence

โซเดียมไอออนในโซเดียมเบนโทไนต์ที่มีประจุเท่ากับ +1 ในขณะที่แคลเซียมไอออนของแคลเซียมเบนโทไนต์ที่มีประจุเท่ากับ +2 ซึ่งหมายความว่าความแรงไอออนของโซเดียมเบนโทไนต์จะมีค่าต่ำกว่าของแคลเซียมเบนโทไนต์ นอกจากนี้ยังหมายถึงค่า Debye length (λ) ของโซเดียมเบนโทไนต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังนั้นโซเดียมเบนโทไนต์ก็จะสามารถพองตัวได้มากขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยจะพบว่าโซเดียมเบนโทไนต์จะสามารถดูดซับน้ำได้ถึง 5 เท่าของน้ำหนักเบนโทไนต์ และมีความสามารถพองตัวได้ถึง 13 เท่าของน้ำหนักแห้ง (Dry volumn)

2.4.3 มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

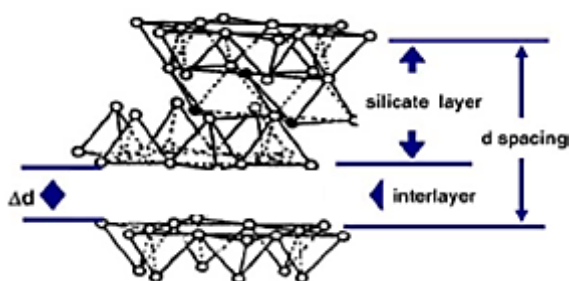
ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) จะประกอบด้วย 2 : 1 (tetrahedral sheet : octahedral sheet) Phyllosilicate และโครงสร้างภายในชั้นประกอบด้วย การจัดตัวตรงกลางแบบ Octahedral sheet ของ alumina และถูกประกบด้วย Silica tetrahedron sheet 2 ชั้น ช่องว่างระหว่างชั้นซิลิเกต เรียกว่า “gallery” หรือ “Interlayer” ไอออนต่างๆ สามารถที่จะแทรกตัวเข้าไปภายใน gallery ได้ ถ้ามีการกระจายตัวของอนุภาคดินเหนียวที่ดีก็จะทำให้ โครงสร้างภายในแข็งแรงเพิ่มขึ้น จะทำให้สมบัติเปลี่ยนแปลงไป ภายในช่องว่าง gallery จะมี Exchangeable cations เช่น Li^+ , Na^+ , Rh^+ , Ca^{2+} เป็นต้น ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนที่เข้ามาแทรกตัวอยู่ใน gallery หรือปลายหางของหมู่ Surfactance เกิดการเกี่ยวพันกันกับไอออนต่างๆ เกิดเป็นแรงกระทำแบบภายนอก (inter-molecular interaction)



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของโครงสร้าง 2 : 1 phyllosilicates ของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite)

จะเห็นได้ว่าการจัดเรียงตัวของอนุภาคดินเหนียวจะมีการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกันตามโครงสร้างของดินเหนียวชนิดนั้นๆ ซึ่งระหว่างอนุภาคของดินเหนียวจะเรียกว่า interlayer หรือ

gallery โดยระหว่างอนุภาคนี้จะเกิดแรงแวนเดอร์วาลส์เกิดขึ้น ซึ่งเป็นพันธะอ่อนๆ ที่เกิดระหว่างกัน และจะมีประจุลบเกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของอนุภาค ประจุลบเกิดเนื่องจากอะตอมกลางของ โครงสร้างอนุภาคดินเหนียวเป็นประจุบวก เช่น Al^{3+} , Mg^{2+} เป็นต้น และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยน ไอออนหรือเกิดการแทนที่ของไอออนได้ เช่น Al^{3+} ถูกแทนที่ด้วย Mg^{2+} หรือ Fe^{2+} หรือ Mg^{2+} แทนที่ โดย Li^{1+} และชนิดของเลเยอร์ซิลิเกตสามารถที่จะจำแนกชนิดกันได้โดยใช้ค่า Cation exchange capacity (CEC) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกปริมาณของประจุลบที่อยู่บนผิวหน้าของอนุภาคดินเหนียว หรือ บ่งบอกถึงความสามารถที่แคตไอออนจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้กับอนุภาคดินเหนียว โดยจะ เทียบเป็น mequiv/100 gm โดยที่ประจุจะไม่คงที่จะขึ้นอยู่กับชนิดของเลเยอร์



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวระหว่างชั้นของซิลิเกตเลเยอร์

จากโครงสร้างของการจัดเรียงตัวของเลเยอร์ซิลิเกตดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าความหนาของชั้นอนุภาค 2 : 1 phyllosilicates จะเรียกว่า silicate layer ส่วนช่องว่างระหว่าง ชั้นซิลิเกตเลเยอร์ 2 อัน เรียกว่า interlayer ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนหรือ เกิดพันธะทางเคมีแบบ inter-molecular interaction เกิดขึ้น และระยะห่างระหว่างดินเหนียว 1 อนุภาคถึงผิวหน้าของอนุภาคถัดไป เรียกว่า d-spacing

ค่า Cation exchange capacity (CEC) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนของแคตไอออนของอนุภาคดินเหนียว

ความสำคัญของดินเหนียวแบบ 2 : 1 Type clay mineral

1. ดินเหนียวเป็นสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์
2. มีขนาดอนุภาคเล็กมากและมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูง ตั้งแต่ช่วง 10 – 800 m^2/g สามารถสัมผัสได้ทั้งผิวภายนอกและผิวภายใน
3. จะมีประจุลบและประจุบวกภายในพื้นผิวทั้งผิวภายในและภายนอก โดยประจุจะมีผลต่อความสามารถในการดึงดูด หรือการแลกเปลี่ยนไอออนที่ผิวหน้าของดินเหนียว
4. ที่พื้นผิวสัมผัสสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้กับไอออนของสารอื่นๆ

ข้อดีของแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) เมื่อเปรียบเทียบกับดินเหนียวชนิดอื่นๆ คือ

1. มีพื้นผิวสัมผัสสูง ประมาณ 750 m²/g
2. มีความสามารถที่จะแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนสูง (Cation Exchange Capacity, CEC)
3. สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี
4. Very high liquid limit (100+)
5. ดัชนีความอ่อนตัว (Plasticity index) และความว่องไวอยู่ในช่วง (1 – 7)
6. ประสิทธิภาพของการซึมผ่านต่ำ

2.5 กระบวนการดูดซับ [23]

กระบวนการดูดซับ (Adsorption) คือ ปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งหรือสารประกอบหลายชนิดไว้บนพื้นผิวของของแข็ง โดยไม่เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของของแข็งนั้น ส่วนระบบของแข็งที่เก็บสะสมสารประกอบอื่นๆ ไว้บนพื้นผิวเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนสารประกอบต่างๆ ที่สะสมบนพื้นผิวของตัวดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ดังนั้นตัวดูดซับจึงมักเป็นของแข็งที่มีโพรงจำนวนมาก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีผลให้สามารถดูดซับได้มากขึ้นตามสัดส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มปริมาณโพรงขนาดเล็กในตัวดูดซับมีผลให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น แต่โพรงขนาดเล็กอาจเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของสารถูกดูดซับภายในโพรงของตัวดูดซับไปยังพื้นผิวในโพรงขนาดเล็กได้ เมื่อพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพของโพรงภายในตัวดูดซับ โพรงส่วนใหญ่ของตัวดูดซับจึงควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับในสถานะก๊าซหรือไอ เพื่อให้สารถูกดูดซับนั้นสามารถแพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับและสามารถแพร่ต่อไปยังพื้นผิวในโพรงได้อย่างสะดวก

ส่วนการดูดซับสารถูกดูดซับชนิดต่างๆ ที่อยู่ในสถานะของเหลว นั้น เช่น การดูดซับไอออนชนิดต่างๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ละลายน้ำ โพรงส่วนใหญ่ของตัวดูดซับควรมีขนาดใหญ่เพียงพอ เพื่อให้ของเหลวที่มีสารถูกดูดซับเหล่านี้นั้นสามารถไหลเข้าโพรงของตัวดูดซับได้อย่างสะดวก โดยที่สารถูกดูดซับยังคงอยู่ในลักษณะเดิมคือ เมื่อดูดซับไอออนชนิดต่างๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ละลายน้ำแล้ว ไอออนหรือสารประกอบอินทรีย์เหล่านี้นั้นยังคงสภาพเป็นสารละลายของไอออนหรือสารละลายของสารประกอบอินทรีย์เช่นเดิม การดูดซับสารถูกดูดซับในระบบของเหลว มักมีผลให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่อยู่ในโพรงของตัวดูดซับมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับชนิดเดียวกันที่อยู่ภายนอกตัวดูดซับ ดังนั้นสารประกอบทุกชนิดที่อยู่ในโพรงของตัวดูดซับจัดเป็น “สารถูกดูดซับ” ของระบบดูดซับของเหลวโดยไม่ต้องเกาะติดผิวในโพรงของตัวดูดซับ

2.5.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือแรงทางกายภาพและแรงทางเคมี การดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวของตัวดูดซับดังนี้

2.5.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) คือการดูดหรือดึงสารดูดซับไว้บนพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดร่วมกัน แรงทางกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ได้แก่

1) แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวดูดซับ เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกดูดความชื้น ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วลบบนพื้นผิวผลึกดูดความชื้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วลบของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วบวกบนพื้นผิวผลึกดูดความชื้น เป็นต้น

2) แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนพื้นผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และไอออนแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ในน้ำกระด้างด้วยการเปลี่ยนไอออนบนพื้นผิวตัวดูดซับชนิดพอลิเมอร์ เป็นต้น

3) แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เช่น การดูดซับกลิ่นซึ่งมักเป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ด้วยถ่านดูดซับ หรือการดูดซับไอสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยถ่านดูดซับ เป็นต้น

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้คือ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิต่ำ หรือ ณ อุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และเกิดได้ตึ่มากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ การดูดซับจะสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนพื้นผิวของตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงมักเรียกรูปการดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับหลายชั้น (Multilayer adsorption)”

ความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าประมาณ 2 – 3 เท่าของความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารถูกดูดซับชนิดนั้นๆ ณ อุณหภูมิเดียวกัน โดยความร้อนของการดูดซับจะแปรผันโดยตรงกับแรงของการดูดซับคือ แรงของการดูดซับมีค่ามากจะมีผลให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง เช่น แรงดึงดูดระหว่างขั้วมีค่าสูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ความร้อนของการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างขั้วจึงมีค่าสูงกว่าความร้อนของการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เป็นต้น

2.5.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) คือ การเกิดพันธะทางเคมีหรือการใช้ไอเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จะต้องการพลังงานการกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีโดยทั่วไป ดังนั้นการดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูงๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้นคือ การดูดซับทางเคมีจะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมีนี้จะเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น และมักเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า “การดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption)” ความร้อนของการดูดซับประเภทนี้จึงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพ หรือมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารถูกดูดซับทางกายภาพ หรือมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารถูกดูดซับชนิดนั้นๆ ไม่น้อยกว่า 3 เท่า

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบความแตกต่างตามลักษณะของการดูดซับทั้ง 2 ชนิด

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
รูปแบบชั้นของการดูดซับ	ดูดซับชั้นเดียวและหลายชั้น	ดูดซับชั้นเดียว
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงดึงดูดทางกายภาพ	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนมากผันกลับไม่ได้
ค่าความร้อนของการดูดซับ	2 – 3 เท่าของความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารถูกดูดซับ	มากกว่า 3 เท่าของความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารถูกดูดซับ

2.5.2 ความร้อนของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับตามหลักของอุณหพลศาสตร์ การดูดซับเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงแบบผันกลับได้คือ โดยสารถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ไปเกาะติดและสะสมบนพื้นผิวของตัวดูดซับ แล้วสารดูดซับนั้นจะสามารถเคลื่อนที่กลับออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับได้ เมื่อระบบดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลการดูดซับแล้ว สารถูกดูดซับยังคงเคลื่อนที่ไปเกาะติดบนผิวตัวดูดซับและเคลื่อนที่ออกจากผิวตัวดูดซับอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการเคลื่อนที่ไปเกาะติดผิวตัวดูดซับเช่นเดียวกับอัตราการเคลื่อนที่ออกจากผิวตัวดูดซับนั้น ดังนั้นระบบดูดซับที่สมดุลแล้วจึงมีพลังงานกิบส์ของการดูดซับ (Gibbs' energy, G_{ads}) น้อยที่สุด ในลักษณะเดียวกันระบบสมดุลไอกับของเหลว ระบบสมดุลของเหลวกับของเหลว และระบบสมดุลเคมี คือ การรวมระบบสารถูกดูดซับและระบบตัวดูดซับเข้า

เป็นระบบเดียวกัน ณ อุณหภูมิ (T) ที่กำหนดไว้ สารถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ไปเกาะติดและสะสมบนผิวตัวดูดซับ จนกระทั่งปริมาณสารถูกดูดซับที่สะสมบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (หรือในวัฏภาคดูดซับ) สมดุลกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เหลือ เพื่อปรับลดพลังงานกิบบส์ของการดูดซับ (G_{ads}) ให้เหลือน้อยที่สุด พลังงานกิบบส์ของระบบที่เกิดการดูดซับแล้ว จึงมีค่าต่ำกว่าผลรวมของพลังงานกิบบส์ของสารถูกดูดซับกับพลังงานกิบบส์ของตัวดูดซับก่อนเกิดการดูดซับ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานกิบบส์ของการดูดซับสุทธิของระบบจึงลดลง ($\Delta G_{ads} < 0$)

สารถูกดูดซับในระบบสารถูกดูดซับก่อนรวมกับระบบตัวดูดซับสามารถเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ และสามารถหมุนรอบตัวเองได้อย่างอิสระ การเคลื่อนที่และการหมุนของสารถูกดูดซับทำให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับชนกันบ่อยมากขึ้น จึงมีผลให้พลังงานเอนโทรปี (Entropy, S) ของระบบสารถูกดูดซับ ณ อุณหภูมินั้นๆ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อรวมระบบของสารถูกดูดซับและระบบตัวดูดซับเป็นระบบเดียวกันแล้ว สารถูกดูดซับปริมาณหนึ่งเกาะติดและสะสมบนผิวตัวดูดซับ ดังนั้นสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับจะสามารถเคลื่อนที่หรือหมุนไปตามผิวของตัวดูดซับเท่านั้น สารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับจึงอยู่ร่วมกันอย่างเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น พลังงานเอนโทรปีของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ (S_{ads}) จึงลดน้อยลง ส่วนสารถูกดูดซับที่เหลือ สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระดังเดิม แต่ปริมาณสารถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับไว้ลดน้อยลงจากเดิม การเคลื่อนที่ชนกันจึงลดลง พลังงานเอนโทรปีของสารถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับไว้ ณ อุณหภูมินั้นจึงลดน้อยลงจากเดิม เมื่อสารถูกดูดซับยิ่งสะสมบนผิวของตัวดูดซับมากยิ่งขึ้น สารถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับไว้จึงยิ่งลดน้อยลง พลังงานเอนโทรปีรวมของระบบดูดซับ ณ อุณหภูมินั้นๆ จึงยิ่งลดต่ำลง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปีสุทธิของระบบสมดุลการดูดซับจึงลดลง ($T\Delta S_{ads} < 0$)

พลังงานรวมทั้งหมดของระบบหรือพลังงานเอนทัลปี (Enthalpy, H) ของระบบคือผลรวมของพลังงานกิบบส์ (G) ของระบบ และพลังงานเอนโทรปี (TS) ของระบบเดียวกัน ณ อุณหภูมิ (T) ที่กำหนดไว้ ดังนี้

$$H = G + TS \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

เมื่อนำระบบสารถูกดูดซับและระบบตัวดูดซับ (ก่อนการดูดซับเกิดขึ้น) มารวมกันเป็นระบบดูดซับ (การดูดซับเกิดขึ้นแล้ว) การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปีของระบบดูดซับ (ΔH_{ads}) ภายหลังจากการดูดซับแล้วจึงคำนวณจากผลรวมของการเปลี่ยนแปลงพลังงานกิบบส์ของระบบดูดซับ (ΔG_{ads}) กับการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปีของระบบดูดซับ เดียวกันนั้น ณ อุณหภูมิ (T) ที่กำหนดไว้คงที่ดังนี้

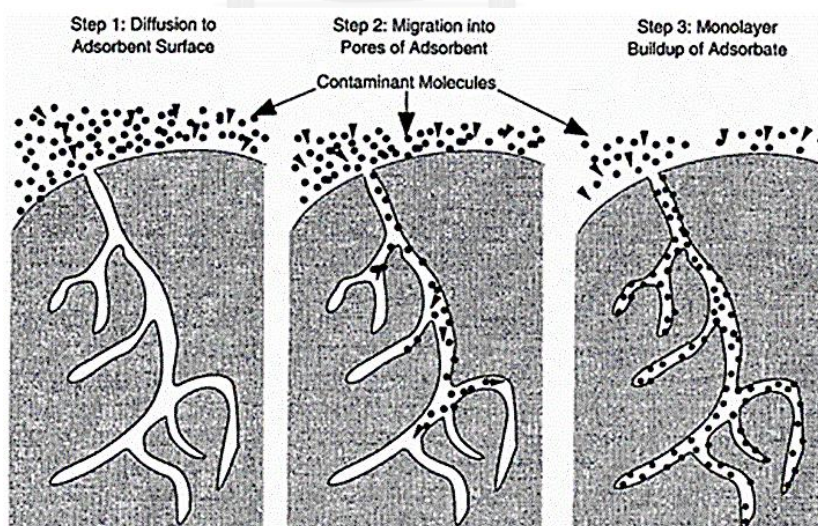
$$\Delta H_{ads} = \Delta G_{ads} + T\Delta S_{ads} \quad (\text{สมการที่ 2.4})$$

เมื่อการเปลี่ยนแปลงพลังงานกิบบส์ของระบบดูดซับ (ΔG_{ads}) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนโทรปีของระบบดูดซับ ($T\Delta S_{ads}$) ดังกล่าวมีค่าลดลง ณ อุณหภูมิ (T) ที่กำหนดไว้คงที่นั้น การเปลี่ยนแปลงพลังงานเอนทัลปีของระบบดูดซับ ($\Delta H_{ads} < 0$) ดังกล่าว ภายหลังจากการดูดซับจึงลดลงตามสมการที่ 2 ดังนั้นการดูดซับจึงเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน (Exothermic) และจะมีผลให้อุณหภูมิของระบบดูดซับ โดยเฉพาะระบบดูดซับก๊าซหรือไอเพิ่มขึ้นได้

นอกจากนี้ความร้อนของการดูดซับแปรผันตามปริมาณดูดซับจำเพาะที่เพิ่มขึ้นคือ เมื่อเกิดการดูดซับน้อย ความร้อนของการดูดซับเกิดขึ้นน้อยตามปริมาณของการดูดซับ และมีผลให้อุณหภูมิของระบบดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ถ้าไม่ระบายความร้อนของการดูดซับออกจากกระบวนการดูดซับเลย ส่วนระบบดูดซับของเหลวผสม อุณหภูมิของระบบดูดซับนั้นมักจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เนื่องจากของเหลวมีค่าความจุจำเพาะ (Specific heat capacity) สูงกว่าก๊าซหลายเท่า และการเคลื่อนที่ของของเหลวสามารถช่วยพาความร้อนของการดูดซับออกจากกระบวนการดูดซับของของเหลวได้เช่นเดียวกับระบบดูดซับก๊าซหรือดูดซับไอดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.5.3 กลไกของการดูดซับ [24]

การดูดซับเป็นกระบวนการที่ตัวดูดซับเคลื่อนที่จากวัฏภาคของไหลเข้าสู่ภายในตัวดูดซับโดยใช้หลักการของการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) ถ้าต้องการให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมาก ภายในตัวดูดซับจะต้องประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงขึ้นกับอัตราการแพร่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับ ซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ดังนี้



รูปที่ 2.16 กลไกการดูดซับ

- ระยะที่ 1 โม่เลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่ไปบนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอาจจะเป็นพื้นผิวภายนอก ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่า “การแพร่ภายนอก (External diffusion)”
- ระยะที่ 2 เป็นขั้นตอนการแพร่ผ่านรูพรุนของตัวดูดซับ เป็นขั้นตอนที่สารดูดซับเคลื่อนที่จากพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับผ่านเข้าไปในรูพรุนหรือทางผิว (Surface migration) หรือโดยแรงแคปิลลารี (Capillary force) ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกว่า “การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion)”
- ระยะที่ 3 เป็นขั้นตอนการเกาะติดผิว อาจเกิดการเรียงตัวเป็นชั้นๆ โดยขั้นตอนนี้จะเป็ขั้นตอนของการดูดซับที่แท้จริง
- สำหรับการดูดซับของเหลวนั้นมีเพียงขั้นตอนการแพร่ไปยังผิวภายนอกตัวดูดซับและการเคลื่อนที่เข้ารูพรุนตัวดูดซับโดยแรงแคปิลลารี โดยจะไม่เกิดขั้นตอนของการเกาะติดพื้นผิว

2.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

1. ความปั่นป่วน (Turbulence)

อัตราเร็วการดูดซับนั้นจะขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของของไหลรอบตัวดูดซับ เมื่อความปั่นป่วนต่ำ ชั้นฟิล์มบางๆ ของของไหลที่ห่อหุ้มอนุภาคของตัวดูดซับจะหนา เป็นเหตุให้การแทรกตัวของโมเลกุลผ่านชั้นฟิล์มของของไหลเกิดขึ้นได้ช้า ดังนั้นในกรณีนี้ขั้นตอนการแพร่ภายนอกจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา ในทางตรงกันข้ามถ้าของไหลมีความปั่นป่วนสูง ฟิล์มของของไหลที่ห่อหุ้มสารตัวกลางจะบาง การแทรกตัวของโมเลกุลผ่านชั้นฟิล์มของของไหลจะเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในช่องว่างของตัวดูดซับ ในกรณีเช่นนี้ขั้นตอนการแพร่ภายในจะเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา

2. ขนาดและพื้นที่ของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นตัวดูดซับแบบผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับแบบเกล็ด โดยความสามารถในการดูดซับนั้นจะแปรผันตรงกับพื้นที่ผิว เพราะฉะนั้นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูงจะดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวต่ำ แต่เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในช่องว่างของตัวดูดซับ ดังนั้นขนาดของตัวดูดซับจึงมีอิทธิพลน้อยในการกำหนดพื้นที่ผิว ตัวดูดซับแบบผงและแบบเกล็ดจึงมีพื้นที่ต่อหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกัน ความสามารถในการดูดซับจึงใกล้เคียงกันด้วย

3. ความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดซับ

สารที่ละลายน้ำได้น้อยมักถูกดูดซับที่ผิวได้ดีกว่าสารที่ละลายได้ดี เนื่องจากเมื่อมีการดูดซับเกิดขึ้นโมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกดึงออกจากน้ำไปดูดซับที่ผิว ถ้าตัวถูกละลายเป็น

สารที่ละลายได้ดี แรงยึดเหนี่ยวระหว่างสารดังกล่าวกับน้ำก็จะมีมากทำให้ตัวทำละลายถูกดูดซับได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างต้นก็ไม่เป็นจริงเสมอไปในบางสถานการณ์ และอาจเป็นไปได้ในทางตรงกันข้าม

4. ขนาดของสารถูกดูดซับ

ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ต้องการกำจัดมีความสำคัญต่อกระบวนการดูดซับ เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในช่องว่างภายใน ในหลายๆ งานวิจัยพบว่ากระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีโมเลกุลขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย เพราะแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและตัวดูดซับจะมีค่ามากที่สุด

5. ความเป็นกรด-เบส ของสารละลาย

เนื่องจากความเป็นกรด-เบสของสารละลายมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นความเป็นกรด-เบสของสารละลายจึงมีผลต่อตัวดูดซับด้วย เช่น กรดอินทรีย์จะถูกดูดซับได้ดีที่ความเป็นกรด-เบสต่ำ เนื่องจากกรดอินทรีย์จะแตกตัวได้น้อยที่ความเป็นกรด-เบสดังกล่าว และความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสมต่อการดูดซับนั้นหาได้จากการทดลองเท่านั้น

6. อุณหภูมิของสารละลาย

อุณหภูมิของสารละลายมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ คือเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับก็จะลดลง เพราะปฏิกิริยาของการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

7. เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสจะเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับและอายุการใช้งาน โดยถ้าเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของตัวดูดซับลดลงแล้ว อายุการใช้งานจะนานขึ้น แต่อย่างไรก็ดีเวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากช่วงเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนเลยช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแล้ว ก็จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ

2.5.5 สมดุลของการดูดซับ [23]

เมื่อการดูดซับเกิดขึ้น วัฏภาคดูดซับ (Adsorbed phase) จะเกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับ สารถูกดูดซับที่อยู่ในวัฏภาคของไหล (Fluid phase) ซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซหรือของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และจะถ่ายโอนไปยังวัฏภาคดูดซับ ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ เมื่ออัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังวัฏภาคดูดซับเท่ากับอัตราการถ่ายโอนสารถูก

ดูดซับจากวัฏภาคดูดซับไปยังวัฏภาคของไหลคือ อัตราการดูดซับสุทธิเท่ากับศูนย์ แม้ว่าสารถูกดูดซับยังคงถ่ายโอนระหว่างวัฏภาคของไหลกับวัฏภาคดูดซับ แต่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลและปริมาณดูดซับจำเพาะในวัฏภาคดูดซับไม่เปลี่ยนแปลงอีก ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ ดังนั้น การดูดซับสารถูกดูดซับดังกล่าวจึงเข้าสู่สมดุล (Equilibrium) ของการถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคทั้งสองแล้ว สมดุลดูดซับ (Adsorption equilibrium) เป็นปัจจัยสำคัญต่อการแยกของผสมเนื้อเดียว (Homogeneous mixture) สมดุลดูดซับไม่เพียงแยกสารถูกดูดซับออกจากของผสมเนื้อเดียว สมดุลดูดซับยังมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับอีกด้วย

สมดุลดูดซับแปรตามชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของสารถูกดูดซับ ความเข้มข้นหรือความดันของสารถูกดูดซับ และอุณหภูมิของระบบดูดซับ สมดุลดูดซับจำเพาะของสารถูกดูดซับชนิดใดๆ ด้วยตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่กำหนดไว้ จึงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ (q_i) ของตัวดูดซับที่เลือกไว้ ความเข้มข้นสมดุล (C_i) ของสารถูกดูดซับชนิดนั้น หรือความดันสมดุล (P_i) ของสารถูกดูดซับชนิดนั้น และอุณหภูมิสมดุล (T) ของระบบดูดซับนั้น แบบสมดุลของการดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ตามชนิดของตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่ ดังนี้

1. แบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิกคงที่ (Adsorption isotherm)

แบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิกคงที่ (Adsorption isotherm) เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ (q_i) ของตัวดูดซับที่กำหนดกับความดันสมดุล (P_i) ของก๊าซหรือไอของสารถูกดูดซับนั้น หรือ ความเข้มข้นสมดุล (C_i) ของสารถูกดูดซับในของเหลวผสม ณ อุณหภูมิของระบบดูดซับ (T) ที่กำหนดไว้

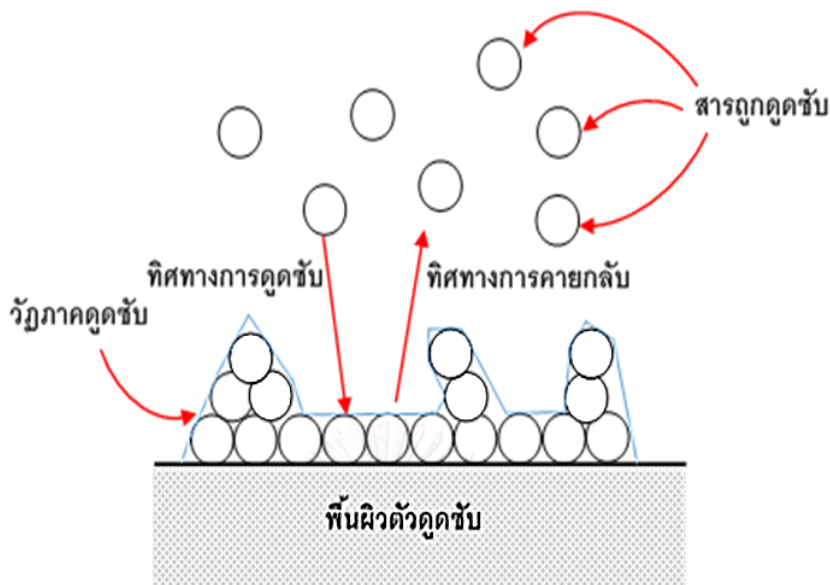
2. แบบจำลองสมดุลดูดซับความดันคงที่ (Adsorption isobar)

แบบจำลองสมดุลดูดซับความดันคงที่ (Adsorption isobar) หรือประเภทความเข้มข้นคงที่ เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ (q_i) ของตัวดูดซับที่กำหนดไว้ กับอุณหภูมิสมดุล (T) ของระบบดูดซับ ณ ความดันสมดุล (P_i) ของก๊าซหรือไอของสารดูดซับที่กำหนด หรือความเข้มข้นสมดุล (C_i) ของสารถูกดูดซับในของเหลวผสมที่กำหนดไว้

3. แบบจำลองสมดุลดูดซับปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะคงที่ (Adsorption isostere)

แบบจำลองสมดุลดูดซับปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะคงที่ (Adsorption isostere) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสมดุล (P_i) ของก๊าซ

หรือไอของสารดูดซับ หรือความเข้มข้นสมดุล (C) ของสารถูกดูดซับในของเหลวผสมกับอุณหภูมิสมดุล (T) ของระบบดูดซับ ณ ปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ (q_i) ของตัวดูดซับที่กำหนดไว้



รูปที่ 2.17 ภาพจำลองวัฏภาคดูดซับ (Adsorbed phase) ที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น เมื่อดูดซับสารดูดซับเป็นก๊าซหรือไอ [23]

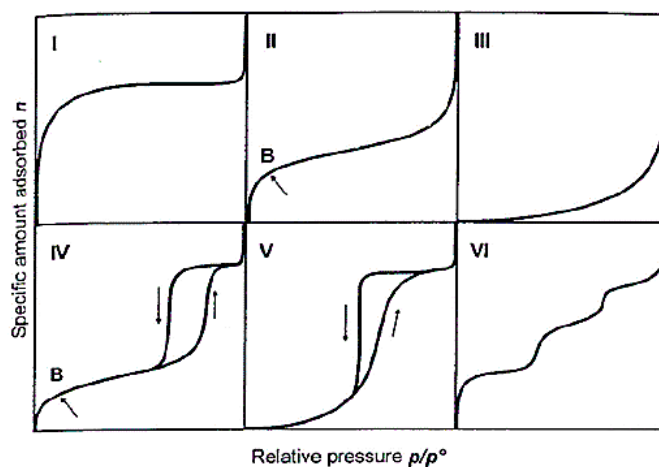
การดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน ความร้อนของการดูดซับโดยทั่วไปจะมีค่าน้อยกว่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมีมาก และสามารถระบายออกจากระบบดูดซับได้โดยง่าย อุณหภูมิของระบบดูดซับจึงเปลี่ยนแปลงน้อย จึงนิยมวัดสมดุลดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ที่กำหนดไว้คือ สมดุลดูดซับสารถูกดูดซับชนิดใดชนิดหนึ่งของตัวดูดซับที่เลือกไว้ควรวัด ณ อุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิดำเนินการปกติของหน่วยดูดซับนั้นๆ นอกจากนี้สมดุลดูดซับของระบบดูดซับก๊าซหรือไอยังมีลักษณะแตกต่างจากสมดุลดูดซับของระบบดูดซับของเหลว

2.5.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ [17]

กระบวนการดูดซับของเหลวด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย (Liquid-solid adsorption) สัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ ตัวถูกดูดซับถูกดูดซับ และมีการคายการดูดซับ (Desorption) ไปพร้อมกัน ในที่สุดจำนวนถูกดูดซับที่ถูกดูดซับกับที่คายการดูดซับจะออกมาเท่ากัน อัตราการดูดซับและอัตราการคายการดูดซับจะเท่ากันหรือระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล เรียกว่าสมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่ภาวะสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับจะไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดสมดุลการดูดซับหนึ่งๆ จะเป็นสมบัติเฉพาะของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรด-เบสของระบบ ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อ

ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปจะใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

ไอโซเทอร์มของการดูดซับคือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายและความเข้มข้นของตัวดูดซับที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ แล้วนำไปเขียนกราฟลอการิทึม โดยให้ความเข้มข้นที่เป็นแกนนอน และปริมาณของตัวถูกละลายต่อน้ำหนักสารดูดซับเป็นแกนตั้ง เส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่าไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถดูดซับ เพื่อเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับที่ดีที่สุด ซึ่งรูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอร์มของการดูดซับในสารละลายมีทั้งหมด 6 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยตอนแรกการแบ่งกลุ่มได้ถูกเรียกว่า Brunaur, Deming, and Teller (BDDT) แต่ในปัจจุบันการแบ่งกลุ่มได้ถูกเรียกว่า Brunauer, Emmett and Teller (BET) classification ไอโซเทอร์มแบบที่ 1 เป็นไอโซเทอร์มที่การดูดซับเกิดขึ้นแบบขั้นเดียว (ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์) ส่วนแบบอื่นๆ เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบหลายขั้น ในทุกกรณีเมื่อค่าความดันย่อยมีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยจนการดูดซับเป็นแบบขั้นเดียว หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นเป็นแบบหลายขั้น



รูปที่ 2.18 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มแบบที่ 1

ไอโซเทอร์มแบบที่ 1 เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับขั้นเดียว หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ เป็นการดูดซับของตัวดูดซับที่มีลักษณะรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือซีโอไลต์ สามารถเป็นได้ทั้งการดูดซับทางกายภาพและเคมี ที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ ($<0.1 p/p^0$) จะสามารถดูดซับได้มาก และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะสามารถดูดซับได้เพียงเล็กน้อย

ไอโซเทอร์มแบบที่ 2

ไอโซเทอร์มแบบที่ 2 บางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอร์มที่มีรูปแบบซิกมอยด์ หรือแบบเอส (sigmoid or S – shaped) เป็นรูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือ ตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) จากไอโซเทอร์มตรงบริเวณจุดเปลี่ยนกราฟ (Inflection point or knee of isotherm, B) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เสร็จสมบูรณ์ จากนั้นความดันสูงที่ขึ้นทำให้เกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ

ไอโซเทอร์มแบบที่ 3

ไอโซเทอร์มแบบที่ 3 เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้ทำให้เกิดการดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

ไอโซเทอร์มแบบที่ 4

ไอโซเทอร์มแบบที่ 4 พบในสารที่มีรูพรุนขนาดกลาง ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าสารเริ่มเข้าไปในรูพรุน และการเปลี่ยนระดับของกราฟ เมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary condensation in pores) โดยลักษณะกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับแบบที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B แสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์

ไอโซเทอร์มแบบที่ 5

ไอโซเทอร์มแบบที่ 5 จะพบในสารที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับผิวของของแข็งน้อย มีลักษณะคล้ายไอโซเทอร์มแบบที่ 3 แต่ไอโซเทอร์มแบบที่ 5 สามารถเกิดการควบแน่นในรูพรุนได้สำหรับรูพรุนที่มีขนาดในช่วงเดียวกับชนิดที่ 4 ตัวอย่าง สำหรับไอโซเทอร์มแบบที่ 3 และแบบที่ 5 นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกเสร็จสมบูรณ์

ไอโซเทอร์มแบบที่ 6

ไอโซเทอร์มแบบที่ 6 เป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่พบบ่อย โดยมากพบในระบบที่เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิวที่คล้ายกัน

ไอโซเทอร์มของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีอธิบายสมดุลการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ทฤษฎีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ทฤษฎีแลงเมียร์ (Langmuir) และฟรุนดลิช (Freundlich)

2.5.6.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมการของแลงเมียร์ขึ้นกับความสมดุลระหว่างการกลั่นตัว และการระเหยของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เป็นไอโซเทอร์มที่ง่ายที่สุด ซึ่งใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียวและเป็นการดูดซับทางเคมี ใช้อธิบายการดูดซับที่มีสมมุติฐาน ดังนี้

- โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับบนพื้นที่ที่จำกัดของพื้นผิวตัวดูดซับ
- บริเวณพื้นที่ของตัวดูดซับจะเกิดได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer)
- พื้นผิวของตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิวนั้นๆ
- พลังงานของการดูดซับในแต่ละบริเวณจะมีค่าเท่ากันในทุกๆ พื้นที่ของการดูดซับ

และไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

- โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

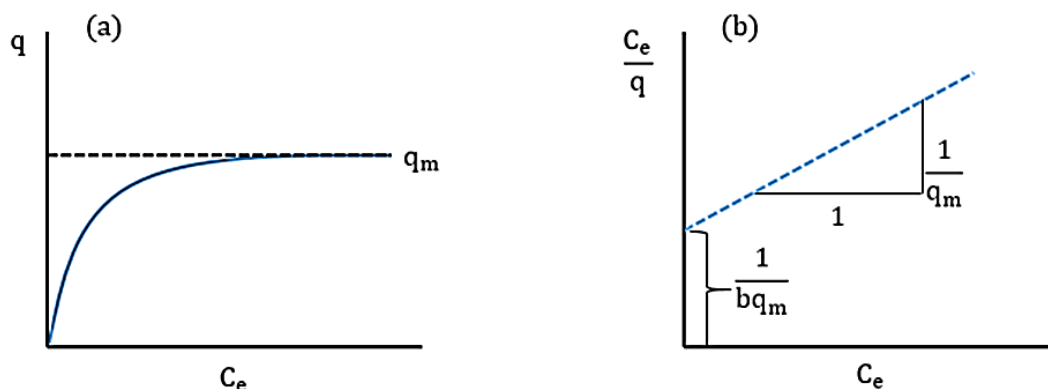
จากสมมุติฐานต่างๆ สามารถเขียนเป็นสมการแลงเมียร์ ได้ดังนี้

$$Q = \frac{Q_m b C_e}{(1 + b C_e)} \quad (\text{สมการที่ 2.5})$$

$$\frac{C_e}{Q} = \frac{1}{Q_m b} + \frac{C_e}{Q_m} \quad (\text{สมการที่ 2.6})$$

เมื่อ	C_{eq}	คือ ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/l)
	Q	คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
	Q_m	คือ ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ
	b	คือ ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว

นำสมการที่ 2.4 ไปเขียนกราฟ ซึ่ง b และ Q_m สามารถหาได้จาก slope และ intercept ดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

2.5.6.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

สมการของฟรอนด์ลิชสามารถอธิบายทั้งการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ โดยส่วนใหญ่ใช้อธิบายการดูดซับของสารประเภทอินทรีย์และสารอนินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เช่น ถ่านกัมมันต์และเรซินสังเคราะห์ ไอโซเทอร์มฟรอนด์ลิช เป็นไอโซเทอร์มที่พัฒนามาจากไอโซเทอร์มแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว โดยการดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)

สมการที่ได้จากการสังเคราะห์และทดลองโดยอาศัยสมมติฐานของทฤษฎีนี้เป็นแนวความคิดของแบบจำลองแบบ Multilayer แสดงดังสมการ 2.5 และ 2.6

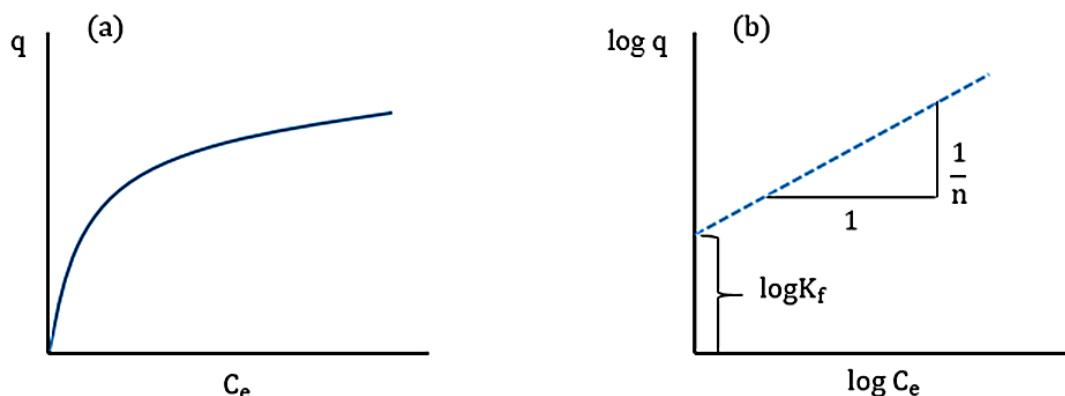
$$q = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (\text{สมการที่ 2.7})$$

$$\log q = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (\text{สมการที่ 2.8})$$

เมื่อ K_f คือ ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับหลายชั้น (mg/g)

N คือ ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความสัมพันธ์ของสารละลาย

จากสมการที่ 2.6 นำไปเขียนกราฟ ซึ่ง กราฟ ซึ่ง n และ K_f สามารถหาได้จาก slope และ intercept ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J.R. Munson และคณะ (1997) [25] ได้ทำการทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้วให้มีความบริสุทธิ์โดยใช้ magnesium silicate ร่วมกับโลหะแอลคาไล เช่น แคลเซียม ไฮดรอกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวดูดซับ จากการศึกษาพบว่าการใช้ตัวดูดซับดังกล่าวสามารถลดปริมาณของกรดไขมันอิสระและสบู่ที่เจือปนอยู่ในน้ำมันให้ลดลงได้

B. Bertram และคณะ (2005) [26] ได้ทำการศึกษาการทำไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง และ yellow grease ให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นโดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ ตัวดูดซับที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ magnesium silicate, silica gel, alumina และ clay จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ตัวดูดซับเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตจะทำให้ปริมาณของกลีเซอรอล น้ำ สบู่ ผงคาร์บอน ซัลเฟอร์ รวมไปถึงโลหะชนิดต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในไบโอดีเซลให้ลดลง นอกจากนี้การใช้ตัวดูดซับยังส่งผลให้สมบัติต่างๆ ของไบโอดีเซลดีขึ้น เช่น ค่าความหนืด, จุดวาบไฟ และค่าความเป็นกรด เป็นต้น

J. Temmuujin และคณะ (2004) [27] ได้ทำการศึกษาลักษณะและสมบัติการดูดซับของแรมมอนต์มอริลโลไนท์ที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2 โมลาร์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ณ เวลาต่างกันด้วยเทคนิค XRD, DTA-TG, FTIR และการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2 adsorption) จากผลการศึกษาพบว่าแรมมอนต์มอริลโลไนท์ที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดไฮโดรคลอริก 12 ชั่วโมง สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสแร่เป็น 94 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.22 มิลลิลิตรต่อกรัม

M. Berrios และคณะ (2011) [28] ได้ทำการศึกษาการทำไบโอดีเซลจากน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการการใช้ตัวดูดซับแมกนีเซียมซิลิเกตและเบนโทไนต์ วิธีการสกัดด้วยของเหลวหรือการล้างด้วยน้ำ และวิธีการกรองผ่านเรซินที่มีประจุไฟฟ้าพบว่าการใช้ตัวดูดซับ

เบนโทไนต์สามารถกำจัดปริมาณสบู่ง 24–40 เปอร์เซ็นต์ กำจัดเมทานอลลดลง 98 เปอร์เซ็นต์ และลดปริมาณของกลีเซอรอลลง 15–20 เปอร์เซ็นต์

M. Berriosa และคณะ (2008) [18] ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยเปรียบเทียบวิธีการต่างๆ คือ การล้างด้วยน้ำ การใช้เรซินในการแลกเปลี่ยนไอออนและวิธีการใช้ ตัวดูดซับของแข็ง คือแมกนีเซียมซิลิเกตมาทำการทดสอบภายใต้ภาวะต่างๆ (อุณหภูมิ ความเข้มข้น และอัตราการกวน) จากการศึกษาพบว่า การล้างด้วยน้ำเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ได้ และสามารถแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอลได้โดยตรง แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ค่าใช้จ่ายต้นทุนเรื่องน้ำ และเกิดน้ำเสียจำนวนมาก สำหรับวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถกำจัด ปริมาณกลีเซอรอลให้อยู่ในมาตรฐาน EN14214 ได้ โดยความสามารถในการกำจัดเมทานอลของเรซิน ทั้งสองชนิดอยู่ในระดับต่ำ (ไบโอดีเซล 20 ลิตรต่อน้ำหนักเรซินกิโลกรัม) สำหรับการใช้ magnesol จะเป็นวิธีการในการกำจัดเมทานอลให้ได้ผลดีที่สุด และจากผลการศึกษา ยังพบอีกว่าทุกกระบวนการ ในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ไม่มีผลต่อค่าความเป็นกรด กลีเซอรอล หรือปริมาณน้ำ

Z.P. Tomic และคณะ (2011) [29] ศึกษาโครงสร้าง ลักษณะและคุณสมบัติทางความร้อน ของเบนโทไนต์ธรรมชาติ และเบนโทไนต์ที่บำบัดด้วยกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน กรด ซัลฟิวริกสามารถละลายโครงสร้างระหว่างชั้นของเบนโทไนต์ ผลของการใช้กรดซัลฟิวริกบำบัด เบนโทไนต์ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน Al^{3+} , Fe^{3+} และ Mg^{2+} ด้วย H^+ ไอออนที่เกิดการ แลกเปลี่ยนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกสเมกไทต์ การแทนที่ของ Mg และ Fe ในชั้น ของโครงสร้างแผ่นออกตะฮีดรอลของแร่ ให้ผลที่สอดคล้องกันกับการเกิดซิลิกอนอสัมฐาน หลังจากทำ การบำบัดเบนโทไนต์ด้วยกรดซัลฟิวริกแสดงให้เห็นความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ และมีการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะจาก 6 ไปเป็น 387 ตารางเมตรต่อกรัม (เบนโทไนต์จากแหล่งแร่ ประเทศซีเบีย) ดังนั้นการใช้กรดในการบำบัดเบนโทไนต์จะทำการเกิดการแยกชั้นภายในโครงสร้าง ผลึก ซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวเฉพาะ และทำให้ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) ลดลง

W. Zhansheng และคณะ (2006) [30] ศึกษาลักษณะของเบนโทไนต์บำบัดด้วยกรด ซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน คือ 15, 20, 25, 30, 40 และ 45 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักสำหรับใช้ กับน้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยทำการศึกษาความเป็นผลึกโดยใช้เทคนิค XRD การวิเคราะห์ทางความร้อน โดยใช้เทคนิค DTA และ TGA และวิเคราะห์หาความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) จากการศึกษาพบว่าเบนโทไนต์ประกอบด้วยมอนต์มอริลโลไนท์ ซึ่งประกอบด้วยไดออกตะฮีดรอล เป็น ส่วนใหญ่ เบนโทไนต์บริสุทธิ์จะมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) เท่ากับ 0.6497 มิลลิอีควิวเลนซ์ต่อกรัม สำหรับภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกรดของเบนโทไนต์ใช้อุณหภูมิ ที่ 96–98 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ 4 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว เท่ากับ 1 : 2

นอกจากนี้การใช้กรดในการบำบัดเบนโทไนต์จะสามารถช่วยในการกำจัดสีของไบโอดีเซลที่ผลิตจากเมล็ดฝ้ายได้ โดยการเอาส่วนของแคโรทีนและคลอโรฟิลล์ออก จากผลการศึกษายังพบอีกว่าการใช้กรดบำบัดเบนโทไนต์ช่วยให้ไบโอดีเซลที่ได้มีค่าเปอร์ออกไซด์และค่าความเป็นกรดลดลง

J. Ma และคณะ (2012) [31] ศึกษาผลของตัวดูดซับชนิดใหม่สำหรับการกำจัดสารปนเปื้อนที่มีประจุลบในน้ำ โดยทำการเตรียมเบนโทไนต์ด้วยกรดและ CaO สำหรับผลิตเป็นตัวดูดซับชนิดใหม่คือ Hydroxyl Ca-bentonite (HO-CaBen) จากผลการศึกษาจะพบว่า HO-CaBen จะเป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารปนเปื้อนที่มีประจุลบในน้ำได้ ทำการวิเคราะห์ตัวดูดซับ HO-CaBen โดยใช้เทคนิค XRD และ FTIR โดยศึกษาผลของเวลา ค่า pH และอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการดูดซับสารปนเปื้อนที่มีประจุลบ จากการศึกษาพบว่าความสามารถในการดูดซับ fluoride, phosphate, orange II และ SDBS มีค่าเท่ากับ 50.07, 29.10, 239.50 และ 298.50 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ กลไกในการดูดซับของ HO-CaBen คือจะเป็นการแลกเปลี่ยนประจุลบกับ OH^-



บทที่ 3

สารเคมี อุปกรณ์ เครื่องมือ และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย : Model BEL-SORP MIN, BEL, Japan
2. เครื่อง Scanning Electron Microscope with Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS) : Model JSM-6400, JEOL, Japan
3. เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) : Model D8 Advance, Bruker
4. เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrophotometer(XRF) : Model S8 TIGER 1KW K410, Bruker
5. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR), Model Impact 410, Nicolet
6. เครื่อง Gas-liquid Chromatograph : Model 3800, Varian
7. เครื่อง Rotary Evaporator : Model R200, Buchi
8. ตู้อบความร้อน : Model UE/ BE 200-800, Memmert, Germany
9. ชุดกรองสารแบบดูดสูญญากาศ : Model A-350, Eyela, Japan
10. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบทศนิยมละเอียด 4 ตำแหน่ง : Model BP 1211D, Sartorius, Germany
11. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบทศนิยมละเอียด 2 ตำแหน่ง : Model ML1502E, Mettler Toledo, Switzerland
12. เครื่องเขย่าขวดทดลอง : Model D-30938 type 3015, Gesellschaft for Laboratechlink (GFL) mbH
13. Nylon and PP Syringe Prefilter ขนาด 0.45 ไมครอน, Model P/N TNL 1345, Tianjin Fuji Science and Technology
14. ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
15. เครื่องกวนสารเคมี Model RW20.N, IKA Lobortechnik, Malaysia

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เบนโทไนด์
2. น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์
3. แคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride)
4. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (2-Propanol)
5. เมทานอล (methanol)
6. อินดิเคเตอร์ฟีนอลเรด (Phenol red indicator)
7. อินดิเคเตอร์โบรมอฟีนอลบลู (Bromophenol blue indicator)
8. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)
9. สารละลาย EN 14105 standard and internal standard solution

3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้เพื่อศึกษาการกำจัดกลีเซอรินในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ด้วย เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ โดยมีวิธีการดังนี้

3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

1. นำเบนโทไนด์ธรรมชาติมากรองด้วยตะแกรงขนาดมาตรฐาน 60 เมช เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออก และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
2. ขั้นตอนการบำบัดเบนโทไนด์ธรรมชาติ ชั่งเบนโทไนด์ธรรมชาติจำนวน 300 กรัม นำมาทำปฏิกิริยากับสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จำนวน 2,000 มิลลิลิตร และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส กวนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนความเร็ว 800 รอบต่อนาที เป็นเวลานาน 2.5 ชั่วโมง กรองแยกเอาเบนโทไนด์ที่ผ่านการบำบัดออกจากสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 10 ลิตร อบเบนโทไนด์ที่เตรียมได้ให้แห้งในเตาอบอุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง
3. ขั้นตอนการบดและคัดแยกขนาดตัวดูดซับ นำเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ที่อบแห้งแล้วมาบดให้ละเอียดด้วยครกบดสารเคมี ร่อนคัดขนาดด้วยตะแกรงร่อนมาตรฐานขนาด 60 เมช (0.250 มิลลิเมตร), ขนาด 100 เมช (0.149 มิลลิเมตร) และขนาด 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร)

3.2.2 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

1. ชั่งน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จำนวน 300 กรัม ใส่ขวดก้นกลมที่ต่อกับชุดคอนเดนเซอร์ (Condenser) แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
2. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จำนวน 3 กรัม ในเมทานอล 104.7 มิลลิลิตร (โดยใช้อัตราส่วนน้ำมันต่อเมทานอล เท่ากับ 1 ต่อ 6 โดยโมล) อย่างช้าๆ เพื่อให้สารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ทำการกวนให้เข้ากันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที
3. เมื่อครบระยะเวลา นำไบโอดีเซลที่ทำการสังเคราะห์ได้ เทใส่กรวยแยก แล้วตั้งทิ้งไว้ประมาณ 30 นาที เพื่อทำการแยกชั้นไบโอดีเซลออกจากชั้นกลีเซอรินออก โดยกลีเซอรินจะอยู่ชั้นล่าง แล้วทำการไขชั้นกลีเซอรินออกจากไบโอดีเซล
4. นำไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้มาเข้าสู่กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนต์ในขั้นตอนต่อไป

3.2.3 ศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

การศึกษาโครงสร้าง คุณสมบัติ และลักษณะองค์ประกอบเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ดังนี้

1. วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ด้วยวิธี BET
2. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอก ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)
3. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier-Transform Infrared spectrophotometer (FT-IR)
4. วิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างทางเคมี ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)
5. วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrophotometer (XRF)

3.2.4 กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ คือ การนำไบโอดีเซลที่ผ่านขั้นตอนการแยกชั้นกลีเซอรินออกแล้วมาศึกษาเปรียบเทียบสถานะต่างๆ ที่เหมาะสม การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ใช้เบนโทไนต์ 2 ชนิด คือ เบนโทไนต์ธรรมชาติ และเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) โดยในการศึกษานี้จะแบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ

1. ศึกษาผลของเวลาจากการตั้งทิ้งไว้ต่อการตกตะกอนของกลีเซอรินในไบโอดีเซล โดยการชั่งตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการแยกชั้นกลีเซอริน (Crude biodiesel) ปริมาณ 500 กรัมใส่

ขวดทดลอง ตั้งไปโอติเซลทิ้งไว้ และเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 15, 30 นาที และ 24, 72, 120, 168 ชั่วโมง จำนวน 5 กรัมในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร นำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไปโอติเซลด้วยวิธีการไทเทรชัน ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 N ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และบันทึกผลการทดลอง จากนั้นกำหนดให้วิธีการทดลองหาผลการตกตะกอนของกลีเซอรินในไปโอติเซลตามระยะเวลาที่ผ่านไปเป็นตัวแปรควบคุมสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ทุกการทดลองขึ้นถัดให้วิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรินที่ตกตะกอนไปตามระยะเวลาที่ใช้ทำการทดลองในข้อ 2, 3, 4 และ 5 เพื่อนำมาคำนวณลบออกจากค่าปริมาณกลีเซอรินคงเหลือของแต่ละการทดลองขึ้นถัดไป

2. ศึกษาผลของปริมาณเบนโทไนด์ต่อร้อยละของการดูดซับกลีเซอรินในไปโอติเซล ซึ่งไปโอติเซลจำนวน 100 กรัมในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร ดูดซับกลีเซอรินจากไปโอติเซลด้วยเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักไปโอติเซล เขย่าให้เบนโทไนด์กระจายตัวที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที กรองแยกเอาไปโอติเซลออกจากเบนโทไนด์ด้วยตัวกรองไนลอน ซึ่งไปโอติเซลที่ผ่านการกรองจำนวน 5 กรัมในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาค่าปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไปโอติเซลด้วยวิธีการไทเทรชันด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 N ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และบันทึกผลการทดลอง

3. ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้บำบัดเบนโทไนด์ต่อร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไปโอติเซล ซึ่งไปโอติเซลจำนวน 100 กรัมในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร ดูดซับกลีเซอรินในไปโอติเซลด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักไปโอติเซล เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที กรองแยกเอาไปโอติเซลออกจากเบนโทไนด์ด้วยตัวกรองไนลอน ซึ่งไปโอติเซลที่ผ่านการกรองจำนวน 5 กรัม ในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาค่าปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไปโอติเซลด้วยวิธีการไทเทรชัน ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 N ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และบันทึกผลการทดลอง

4. ศึกษาผลของระยะเวลาที่ใช้สัมผัสต่อร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไปโอติเซล ซึ่งไปโอติเซลจำนวน 100 กรัมในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร ดูดซับกลีเซอรินในไปโอติเซลด้วย

เบนโทไนต์ ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักไปโอติเซล เขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อ นาที ระยะเวลา 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 และ 180 นาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส กรอง แยกเอาไปโอติเซลออกจากเบนโทไนต์ด้วยตัวกรองไนลอน ซึ่งไปโอติเซลที่ผ่านการกรองจำนวน 5 กรัมในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาค่าปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไปโอติเซลด้วย วิธีการไทเทรชันด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 N ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และบันทึกผลการทดลอง

5. ศึกษาผลของขนาดเบนโทไนต์ต่อผลร้อยละของการดูดซับกลีเซอรินในไปโอติเซล ซึ่งไปโอติเซลจำนวน 100 กรัมในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร ดูดซับกลีเซอรินในไปโอติเซลด้วย เบนโทไนต์ขนาดเท่ากับ 60 เมช (0.250 มิลลิเมตร), 100 เมช (0.149 มิลลิเมตร) และ 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร) ใช้รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส เป็น ระยะเวลา 15 นาที โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักไปโอติเซล กรองแยกเอา ไปโอติเซลออกจากเบนโทไนต์ด้วยตัวกรองไนลอน ซึ่งไปโอติเซลที่ผ่านการกรองจำนวน 5 กรัมในขวด ทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร วิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไปโอติเซลด้วยวิธีการไทเทรชัน ด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 N ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และบันทึกผลการทดลอง

3.2.5 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับในงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งได้ดังนี้

ไอโซเทอร์มของการดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2) ด้วยวิธี BET

การหารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับจากเบนโทไนต์ โดยใช้ไอโซเทอร์มการ ดูดซับแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิ 77 องศาเคลวิน เป็นการวิเคราะห์ทางเครื่องมือ โดยวิธีการ วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ด้วยวิธี BET

ไอโซเทอร์มของการดูดซับกลีเซอริน

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับ กลีเซอรินด้วยเบนโทไนต์ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. ชั่งน้ำหนักไปโอติเซลจำนวน 150 กรัมในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ชั่งน้ำหนักเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนักต่อปริมาตร ขนาด 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร) ใช้ปริมาณตัวดูดซับอัตราส่วน 10 ความ เข้มข้นเริ่มจากร้อยละ 1 ถึง 10 โดยน้ำหนักของไปโอติเซล 150 กรัม ในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร

3. ทำการดูดซับกลีเซอรินจากไบโอดีเซล ระยะเวลา 15 นาที อุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ใช้รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที

4. นำไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับ กรองแยกเบนโทไนต์ออกด้วยตัวกรองไนลอน นำชั้นไบโอดีเซลที่ผ่านการกรองมาวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไบโอดีเซลด้วยวิธีการไทเทรชันด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 N ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และบันทึกผลการทดลอง เพื่อคำนวณไอโซเทอร์มการดูดซับของเบนโทไนต์โดยการนำปริมาณกลีเซอรินที่ได้ เข้าสมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรุนดลิช ดังสมการที่ 3.1 และ 3.2

สมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์

$$\frac{1}{(qe)} = \frac{1}{abC_e} + \frac{1}{a} \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

- เมื่อ
- qe = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 - C_e = ความเข้มข้นกลีเซอรินที่สถานะสมดุล (mg/l)
 - a = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/g)
 - b = ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์ (l/mg)

ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอร์มแลงเมียร์ a และ b สามารถหาได้จากค่าความชัน (Slope) และจุดตัดแกน y ที่แกน x เท่ากับศูนย์ (Intercept)

สมการไอโซเทอร์มฟรุนดลิช

$$\log (qe) = \log C_e \frac{1}{n} + \log K_F \quad (\text{สมการที่ 3.2})$$

- เมื่อ
- C_e = ความเข้มข้นที่สถานะสมดุล (mg/l)
 - qe = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 - K_F = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับหลายชั้น (mg/g)
 - n = ค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

ค่าคงที่ของสมการไอโซเทอร์มฟรุนดลิช $1/n$ และ K_F สามารถหาได้จากค่าความชัน (Slope) และจุดตัดแกน y ที่แกน x เท่ากับศูนย์ (Intercept)

3.2.6 ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณน้ำที่ใช้จากกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการล้างด้วยน้ำอุ่น เป็นวิธีที่ง่ายและนิยม แต่จะมีค่าใช้จ่ายของการดูแลการกำจัดน้ำเสียเพิ่มเติมขึ้นมา ดังนั้นวิธีการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์ก่อนแล้วจึงนำมาล้างด้วยน้ำ จึงเป็นวิธีการที่ช่วยลดน้ำเสียและประหยัดค่าใช้จ่ายได้ โดยการทดลองมีวิธีการดังนี้ หลังจากการสังเคราะห์ไบโอดีเซลและตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ในกรวยแยก เพื่อให้ไบโอดีเซลและกลีเซอรินแยกชั้นกัน ทำการไขชั้นกลีเซอรินออก และชั่งไบโอดีเซลจำนวน 100 กรัม ในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร นำไบโอดีเซลมาดูดซับกลีเซอรินด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ใช้ขนาดตัวดูดซับเท่ากับ 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร) ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล ใช้รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที และใช้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 15 นาที กรองแยกไบโอดีเซลออกจากเบนโทไนด์ด้วยตัวกรองไนลอน นำไบโอดีเซลที่ได้มาล้างด้วยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสครั้งละประมาณ 200 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ไบโอดีเซลและน้ำแยกชั้นกัน ไขเอาชั้นน้ำออก เติมน้ำกลั่นอุ่นล้างอีกครั้ง ตั้งทิ้งไว้และแยกชั้นน้ำออก ทำซ้ำจนกว่าชั้นน้ำใส จากนั้นกำจัดน้ำในไบโอดีเซลบริสุทธิ์ โดยการระเหยน้ำภายใต้ความดัน นำไบโอดีเซลบริสุทธิ์ที่ได้ วิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไบโอดีเซลด้วยวิธีการไทเทรชันด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 N ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และบันทึกผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมด และกลีเซอรินอิสระ ตามวิธีมาตรฐาน EN 14105 คำนวณปริมาณน้ำทั้งหมดที่ใช้ล้างไบโอดีเซลเปรียบเทียบกับการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการล้างด้วยน้ำอุ่น อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ พร้อมทั้งศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซลระหว่างเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ โดยทำการทดลองตามวิธีการในบทที่ 3 ผลการทดลองสามารถแสดงออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 ศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

ส่วนที่ 2 ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์ธรรมชาติเปรียบเทียบกับเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

ส่วนที่ 3 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับจากเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

ส่วนที่ 4 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยตัวดูดซับและการล้างด้วยน้ำ

4.1 ศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

ตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดคือ เบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

4.1.1 การวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยวิธี BET

ผลการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดเฉลี่ยของรูพรุน โดยวิธี BET ของเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) แสดงดังตารางที่

4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยด้วยวิธี BET

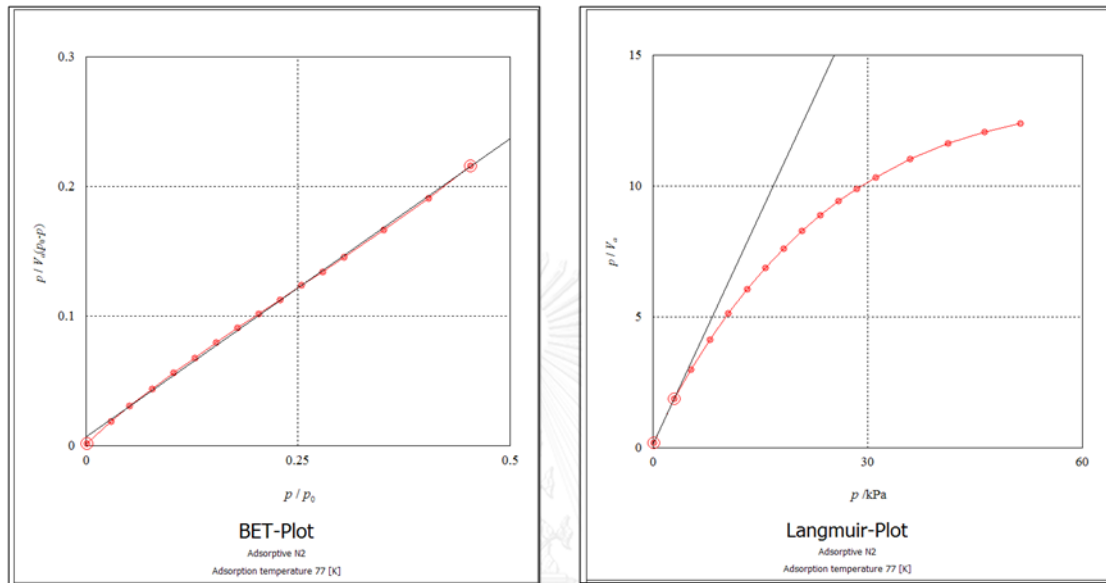
ชนิดตัวดูดซับ	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
เบนโทไนด์ธรรมชาติ	9.3336	2.1444	28.322
CaCl ₂ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์	11.2290	2.5799	19.986
CaCl ₂ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์	6.0460	1.3891	36.856
CaCl ₂ ความเข้มข้นอิ่มตัว	1.9319	0.4439	55.013

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเบนโทไนด์ธรรมชาติมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 9.3336 m²/g เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 11.2290 m²/g การเพิ่มขึ้นคิดเป็น 20.31 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าพื้นที่ผิวลดลงเป็น 6.0460 m²/g การลดลงคิดเป็น 35.22 เปอร์เซ็นต์ และเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) มีค่าพื้นที่ผิวลดลงเป็น 1.9319 m²/g การลดลงคิดเป็น 79.30 เปอร์เซ็นต์ ผลของการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์จะเป็นการเพิ่มของปริมาณแคลเซียมไอออน (Ca²⁺) เพื่อใช้ปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีและคุณสมบัติเบนโทไนด์ซึ่งมีผลต่อพื้นที่ผิวของเบนโทไนด์ โดยที่เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและความเข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) มีผลค่าพื้นที่ผิวลดลงเนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมไอออน (Ca²⁺) เข้าไปในพื้นที่โครงสร้างช่องว่างระหว่างชั้น (Interlayer) ของเบนโทไนด์ ส่วนเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นอาจจะเป็นจากความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ไม่มากพอและผลของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระบวนการบำบัดในขั้นตอนการกวน การให้ความร้อนและการร่อนบด

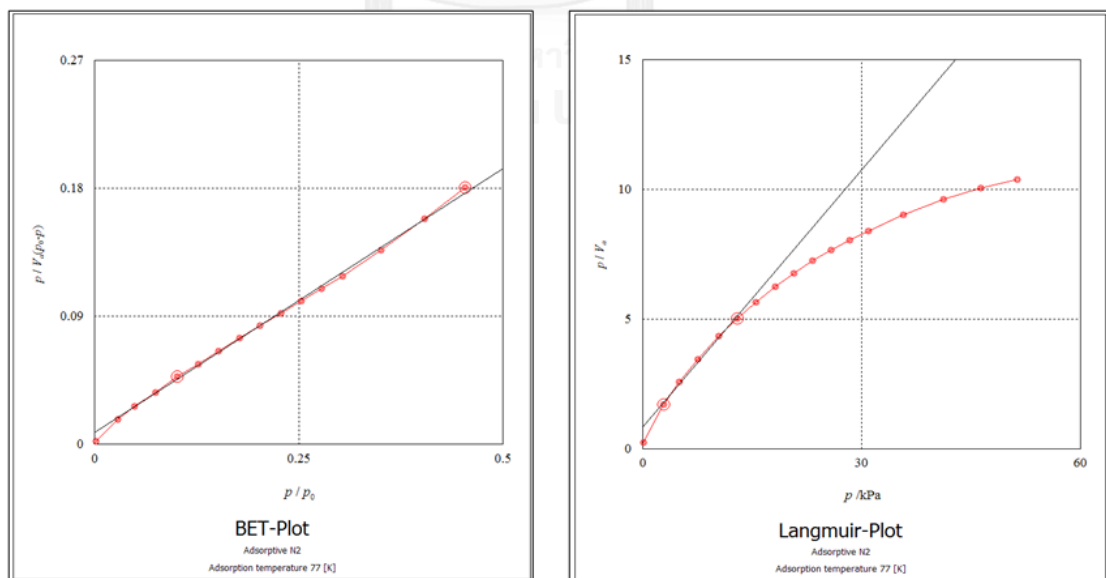
เบนโทไนด์ธรรมชาติมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 28.322 นาโนเมตร เมื่อนำมาผ่านการบำบัดด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 19.986 และ 36.856 นาโนเมตร ตามลำดับ และเมื่อเทียบตามมาตรฐาน IUPAC เบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จัดเป็นกลุ่มตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2 – 50 นาโนเมตรเป็นกลุ่มตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง) ส่วนเบนโทไนด์ที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อ

ปริมาตร) มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้นเท่ากับ 55.013 นาโนเมตร จัดเป็นกลุ่มตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ มาตรฐาน IUPAC กำหนดให้ขนาดรูพรุนเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร ขึ้นไปจัดเป็นกลุ่มตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

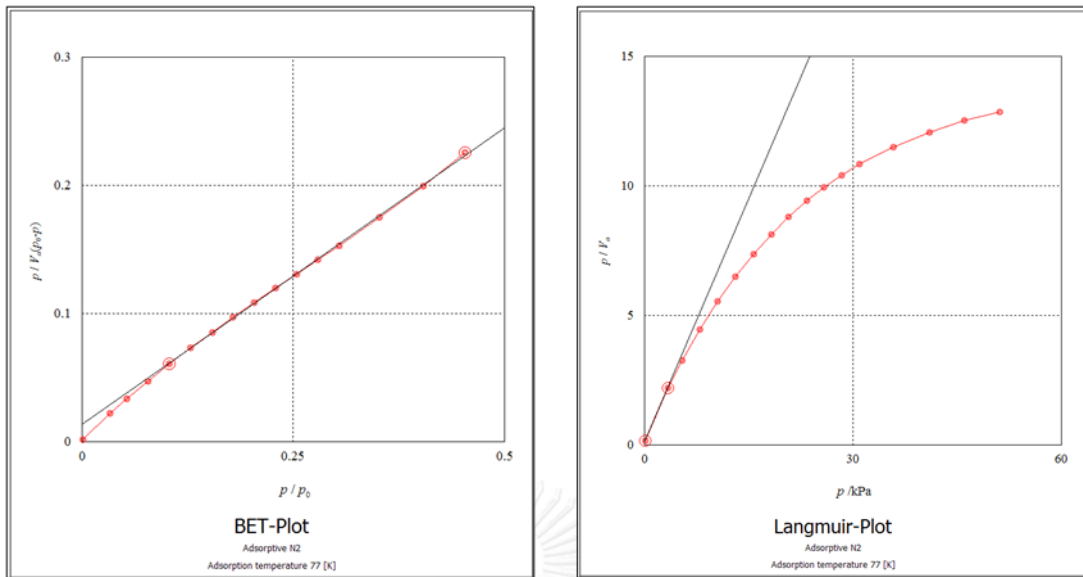
กราฟ BET-Plot และ Langmuir-Plot เบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) แสดงดังรูปที่ 4.1 – 4.4



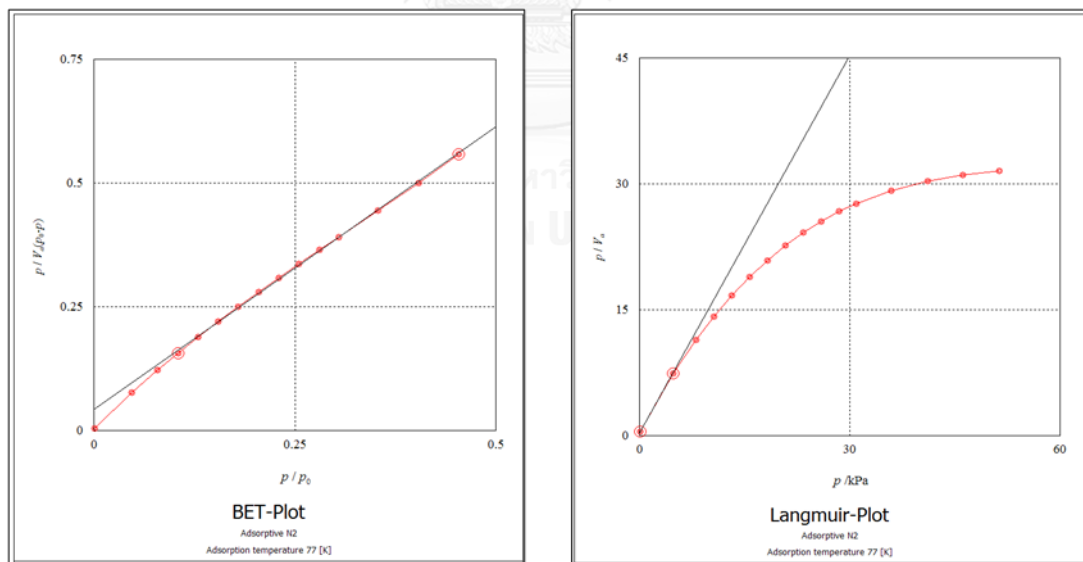
รูปที่ 4.1 กราฟ BET-Plot และ Langmuir-Plot ของเบนโทไนต์ธรรมชาติ



รูปที่ 4.2 กราฟ BET-Plot และ Langmuir-Plot ของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



รูปที่ 4.3 BET-Plot และ Langmuir-Plot ของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์
ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



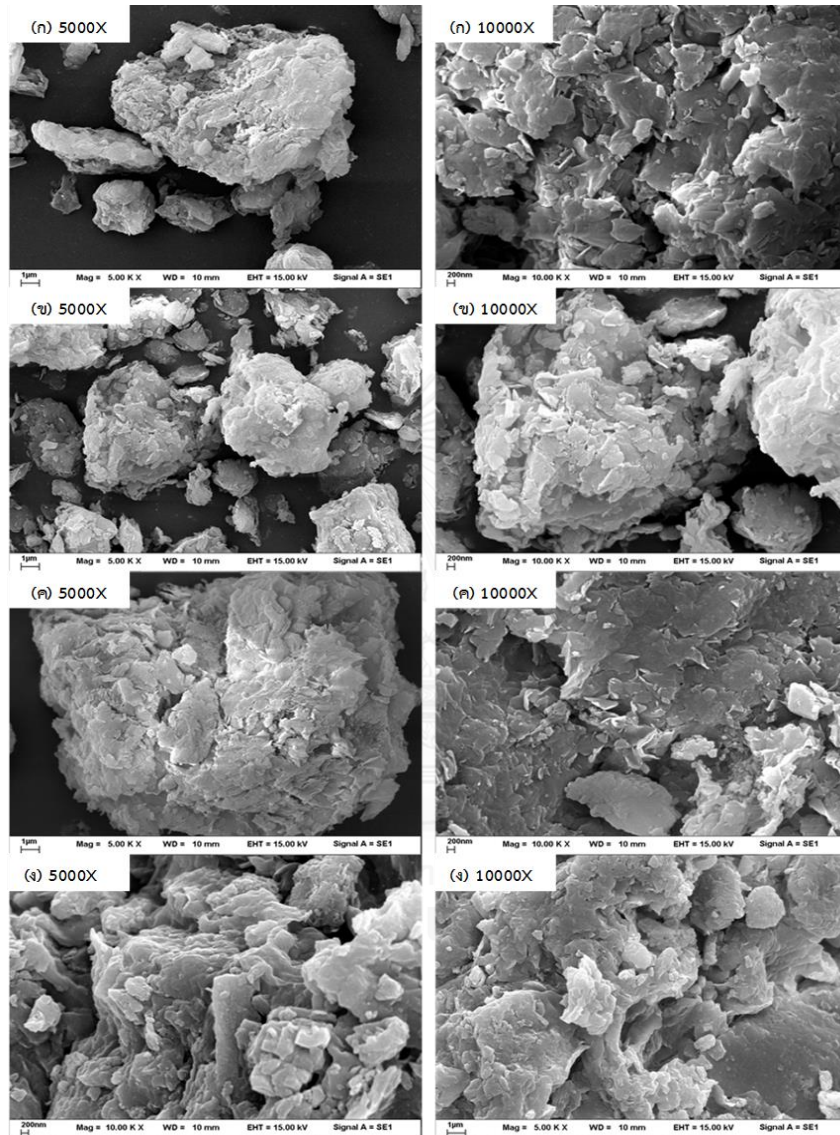
รูปที่ 4.4 BET-Plot และ Langmuir-Plot ของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์
ความเข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

จากรูปที่ 4.1 – 4.4 แสดงกราฟ BET-Plot และ Langmuir-Plot เบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) พบว่าเมื่อวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวด้วยสมการ BET และ Langmuir จะมีค่าพื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ได้ค่อนข้างน้อย กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าพื้นที่ผิวในงานวิจัยอื่นๆ เช่น งานวิจัยของ N. Yildiz และคณะ (1999) [32] พบว่าเบนโทไนด์ธรรมชาติจากแหล่ง Kutahya ประเทศตุรกี มีค่าพื้นที่ผิวของ โซเดียมเบนโทไนด์ (Na-Bentonite) เท่ากับ $49.34 \text{ m}^2/\text{g}$ และแคลเซียมเบนโทไนด์ (Ca-Bentonite) เท่ากับ $29.92 \text{ m}^2/\text{g}$ งานวิจัยของ H. Faghihian และ M.H. Mohammadi (2013) [33] พบว่าเบนโทไนด์ธรรมชาติจากบริษัท Sigma-Aldrich มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ $34 \text{ m}^2/\text{g}$ และงานวิจัยของ Sh. Salem และคณะ (2015) [34] พบว่าเบนโทไนด์จากประเทศอิหร่านมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ $31.8 \text{ m}^2/\text{g}$ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้เบนโทไนด์ของประเทศไทยจากแหล่งการผลิตบ้านหนองจอกและบ้านเขาโป่งหัวแหวน ตำบลลำน้ำรายณ์ อำเภอย้ายบด จัหวัดลพบุรี ซึ่งมีคุณสมบัติของเบนโทไนด์โดยเฉพาะค่าพื้นที่ผิวค่อนข้างน้อยกว่างานวิจัยอื่น คุณสมบัติเบื้องต้นของเบนโทไนด์ที่แตกต่างกันในแต่ละแหล่งผลิตอาจจะขึ้นอยู่กับลักษณะของธรรมชาติของการกำเนิดเบนโทไนด์ที่มีสภาพแตกต่างกันตามภูมิภาค [32-34]

เมื่อพิจารณาผลของคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ พื้นที่ผิว จำนวนรูพรุน และขนาดรูพรุนเฉลี่ยภายในของเบนโทไนด์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอริน สามารถอธิบายได้จากการดูดซับเป็นกระบวนการที่โมเลกุลกลีเซอรินเคลื่อนที่จากวัฏภาคของไหลเข้าสู่เบนโทไนด์โดยใช้หลักการของการเคลื่อนย้ายสสาร (Mass transfer) ถ้าทำให้เบนโทไนด์มีพื้นที่ผิวและประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมากเพียงพอแล้ว ประสิทธิภาพของการดูดซับจะขึ้นกับความสามารถในการแพร่ของโมเลกุลกลีเซอรินเข้าสู่เบนโทไนด์ ดังนั้นโพรงส่วนใหญ่ของเบนโทไนด์ควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของกลีเซอริน เพื่อให้โมเลกุลกลีเซอรินสามารถแพร่เข้าสู่โพรงของเบนโทไนด์ และสามารถแพร่ต่อไปยังพื้นที่ผิวในโพรงได้อย่างสะดวก [23, 35]

4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอกด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ศึกษาลักษณะพื้นผิวภายนอกของเบนโทไนต์โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

กำลังขยาย 5,000 เท่า และ 10,000 เท่า

(ก) เบนโทไนต์ธรรมชาติ

(ข) เบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

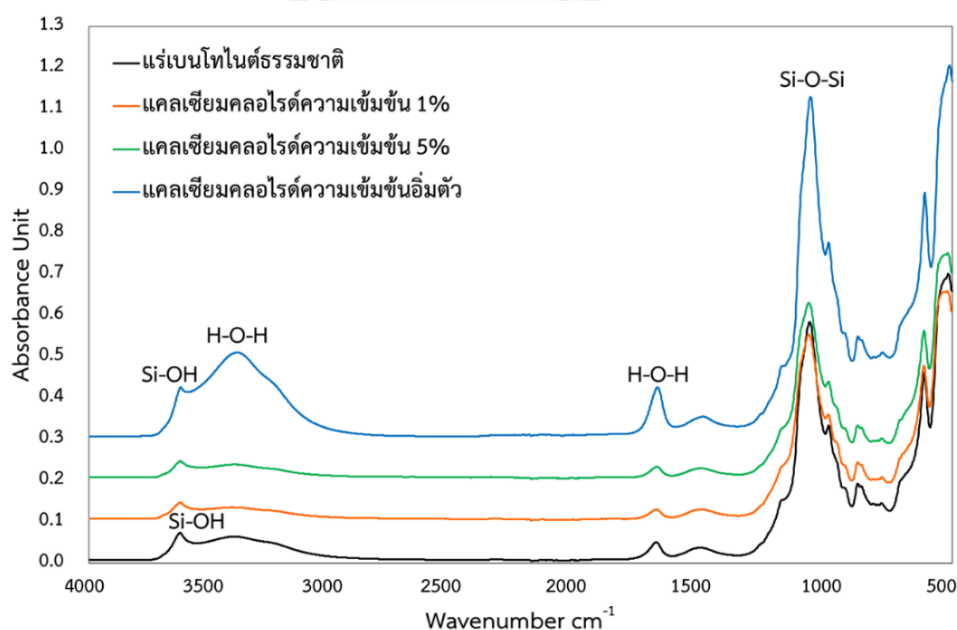
(ค) เบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

(ง) เบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

จากรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะพื้นผิวภายนอกของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เบนโทไนต์ธรรมชาติจะมีโครงสร้างที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และมีลักษณะรูปร่างคล้ายฟองน้ำ (Vimonses และคณะ, 2009) [36] และยังพบว่าเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) จะมีลักษณะพื้นผิวภายนอกเป็นเกล็ดขนาดแตกต่างกัน วางซ้อนทับกันเป็นชั้นๆ ในบางตำแหน่งจะมีลักษณะเป็นช่องว่างหรือร่องลึกลงไป ซึ่งเกิดจากขนาดของเกล็ดที่มีขนาดไม่เท่ากันวางซ้อนทับกันขึ้นมาในแนวตั้ง นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าลักษณะพื้นผิวโครงสร้างภายนอกระหว่างเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ยังคงมีภาพที่คล้ายคลึงกัน โดยเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างและพื้นผิวภายนอกค่อนข้างน้อยมาก แต่จะมีบางข้อสังเกตให้เห็นได้ว่าภาพพื้นผิวภายนอกบางส่วนจะมีการหลุดลอกออกเป็นภาพพื้นผิวเรียบชัดเจนมากขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ในการบำบัด (Chu และคณะ, 2016) [37]

4.1.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier-Transform Infrared spectrophotometer (FT-IR)

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ด้วยเครื่อง FT-IR แสดงดังรูปที่ 4.6

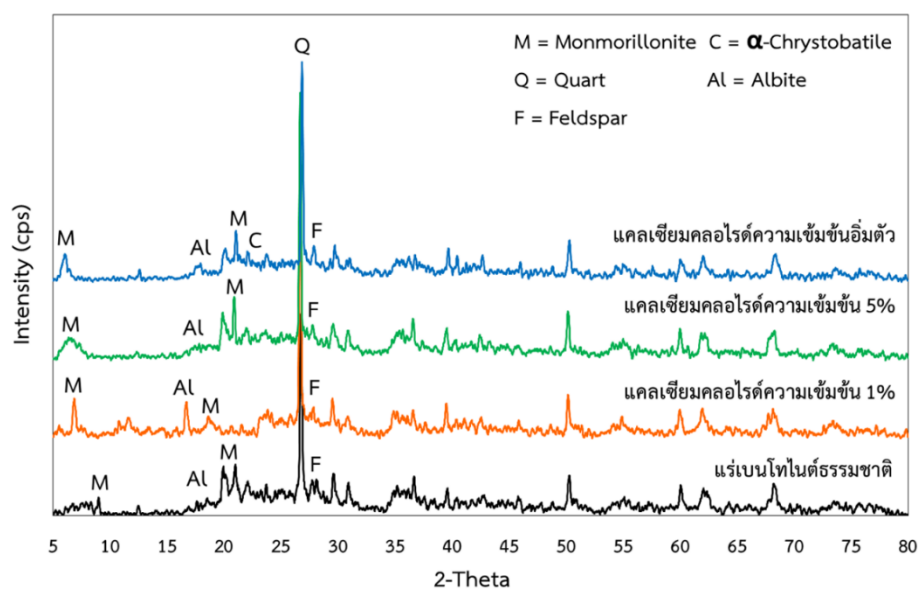


รูปที่ 4.6 FT-IR สเปกตรัมของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

จากรูปที่ 4.6 เบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ จะพบความถี่ของการดูดแสงรังสีอินฟราเรดปรากฏความถี่เด่นชัดที่ 3619 , 997 และ 915 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันได้แก่ หมู่ฟังก์ชันซิลานอล (Si-OH) ที่ตำแหน่ง 3619 cm^{-1} (Sh. Salem และคณะ, 2015) [34] หมู่ฟังก์ชันซิลิเซน (Si-O-Si) ที่ตำแหน่ง 997 cm^{-1} และ หมู่ฟังก์ชัน Si-O และ Al-OH ที่ตำแหน่ง 915 cm^{-1} (Vejayakumaran และคณะ, 2008) [38] จากโครงสร้างที่มีปรากฏหมู่ฟังก์ชันหลักของเบนโทไนต์คือซิลานอลและซิลิเซน (Lee และ Deventer, 2002) [39] ส่วนที่ตำแหน่ง 3393 และ 1659 cm^{-1} จะแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซี (-OH) ซึ่งเป็นโครงสร้างของน้ำ (Porolo และคณะ, 2014) [40] และมีความเข้มของสัญญาณสูงมากขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้บำบัดเบนโทไนต์ [30, 31, 34, 40] เบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะมีโครงสร้างหลักของซิลานอลและซิลิเซนเป็นองค์ประกอบอยู่และหลังจากมีการบำบัดด้วยสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ก็ไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม สำหรับเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะมีสัญญาณของพีคที่ 1659 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงความเข้มข้นมากกว่าเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร [34, 38, 39]

4.1.4 การวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

ผลการวิเคราะห์รูปแบบโครงสร้างทางเคมีของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)



รูปที่ 4.7 รูปแบบโครงสร้างของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ด้วยเครื่อง XRD

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า d-spacing ของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ด้วยเครื่อง XRD

ความเข้มข้นของ CaCl ₂ (w/w)	เบนโทไนต์ ธรรมชาติ	1 เปอร์เซ็นต์	5 เปอร์เซ็นต์	ความเข้มข้น อิมิตัว
d-spacing, d ₀₀₁	11.4446	12.8663	13.8426	14.5941

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์โครงสร้างเบนโทไนต์ด้วย เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) พบว่าโครงสร้างของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์มีโครงสร้างหลักที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยเบนโทไนต์จะประกอบด้วยโครงสร้างผลึกมอนมอริลโลไนต์ (Montmorillonite) และผลึกควอตซ์ (Quartz) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งความเป็นผลึกมอนมอริลโลไนต์ (Montmorillonite) ของเบนโทไนต์ธรรมชาติจะแสดงตำแหน่ง d-spacing (d₀₀₁) ที่ 2θ เท่ากับ 8.5 องศา ส่วนเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะแสดงตำแหน่ง d-spacing (d₀₀₁) ที่ 2θ ลดลงเท่ากับ 7.0, 6.5, และ 6.0 องศาตามลำดับ [30, 34]

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าเบนโทไนต์ธรรมชาติจะมีค่าช่องว่างระหว่างชั้น (d-spacing, d₀₀₁) เท่ากับ 11.4446 อังสโตม สำหรับเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) มีค่าช่องว่างระหว่างชั้น (d-spacing, d₀₀₁) เพิ่มขึ้นตามลำดับ คือ 12.8663, 13.8426 และ 14.5941 อังสโตม ตามลำดับ การที่ค่าช่องว่างระหว่างชั้น (d-spacing, d₀₀₁) ขยับเพิ่มมากขึ้นจะแสดงให้เห็นได้ว่าแคลเซียมไอออน (Ca²⁺) เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนและเข้าไปอยู่ที่ผิวภายในของช่องว่าง (Internal surface) ของโครงสร้างเบนโทไนต์ (Maria และคณะ, 2014) [34, 40] และจากผลการทดลองบำบัดเบนโทไนต์ด้วยแคลเซียมคลอไรด์ จะทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (Ca²⁺) มากขึ้นและเป็นแนวโน้มที่เพิ่มปริมาณแคลเซียมไอออน (Ca²⁺) เพื่อจะสามารถปรับปรุงให้เบนโทไนต์ธรรมชาติเปลี่ยนแปลงเป็นแคลเซียมเบนโทไนต์ (Yildiz และคณะ, 1999) [41]

4.1.5 วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence spectrophotometer (XRF)

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ด้วยเทคนิค X-Ray fluorescence spectrophotometer (XRF)

Components (เปอร์เซ็นต์)	เบนโทไนต์ ธรรมชาติ	เบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น		
		1 % w/v	5 % w/v	เข้มข้นอิมิตัว (60 % w/v)
Si	53.49	52.81	51.05	41.32
Al	14.61	13.76	13.29	11.06
Ca	7.86	10.92	12.00	16.53
Fe	3.56	3.59	3.58	3.20
K	3.33	3.18	3.23	2.87
Mg	3.31	2.91	2.63	2.19
Cl	0.04	0.39	1.87	10.78
Na	1.77	0.49	0.41	0.35
Ti	0.43	0.49	0.49	0.41
Other	0.60	0.35	0.45	0.28

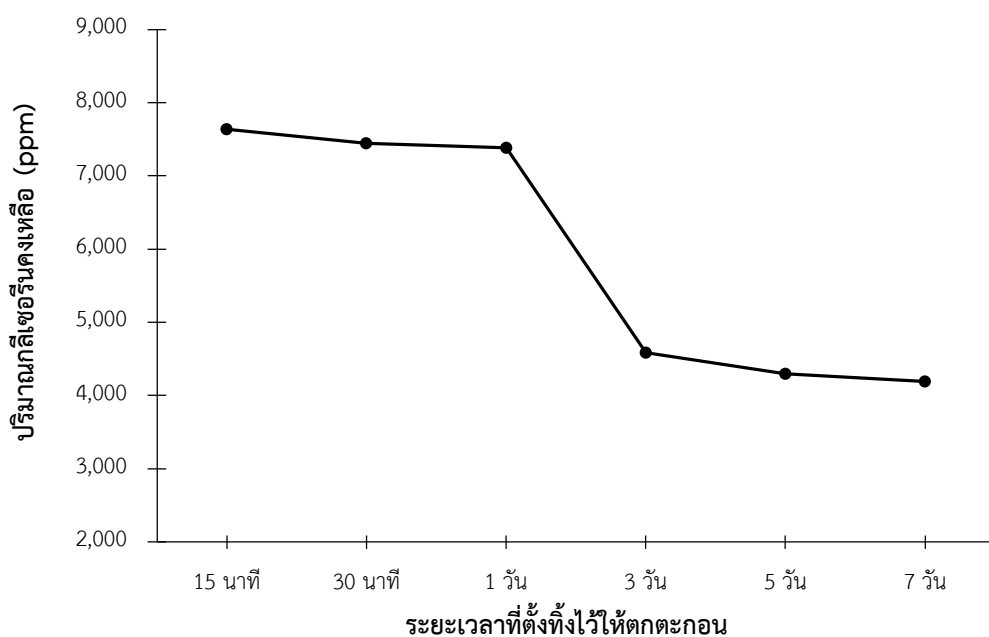
จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ด้วยเทคนิค XRF พบว่าเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์มีปริมาณธาตุ Si และ Al เป็นองค์ประกอบหลัก และมีปริมาณของแร่ธาตุอื่นๆ เช่น Ca, Fe และ K ในปริมาณเล็กน้อย เมื่อนำเบนโทไนต์ธรรมชาติมาทำการบำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ธาตุ Si มีปริมาณลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ในการบำบัดเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากมีการแยกและกำจัดซิลิกาออกไซด์ (SiO₂) ออกไป [41] จากการบำบัดเบนโทไนต์ด้วยแคลเซียมคลอไรด์ จากเริ่มต้นเบนโทไนต์ธรรมชาติมีปริมาณธาตุ Ca เท่ากับ 7.86 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำเบนโทไนต์มาบำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์จะมีปริมาณธาตุ Ca เพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ในการบำบัด โดยที่ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อ

ปริมาตร) จะมีปริมาณธาตุ Ca เพิ่มขึ้นเป็น 10.92, 12.00 และ 16.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลของการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เพื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) เข้าไปในโครงสร้างชั้นช่องว่าง (Interlayer) ของเบนโทไนต์ โดยไม่ได้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างหลักของเบนโทไนต์ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ [32, 42]

4.2 ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์เปรียบเทียบกับเบนโทไนต์ธรรมชาติ

4.2.1 ศึกษาผลของระยะเวลาต่อการตกตะกอนของกลีเซอรินในไบโอดีเซล

จากแรงโน้มถ่วงของโลกและความหนาแน่นของกลีเซอรินที่มีค่ามากกว่าน้ำมันไบโอดีเซล เมื่อตั้งไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ทิ้งไว้ กลีเซอรินจะตกตะกอนแยกชั้นออกจากไบโอดีเซล โดยปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไบโอดีเซลขึ้นกับระยะเวลาของการตกตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 4.8



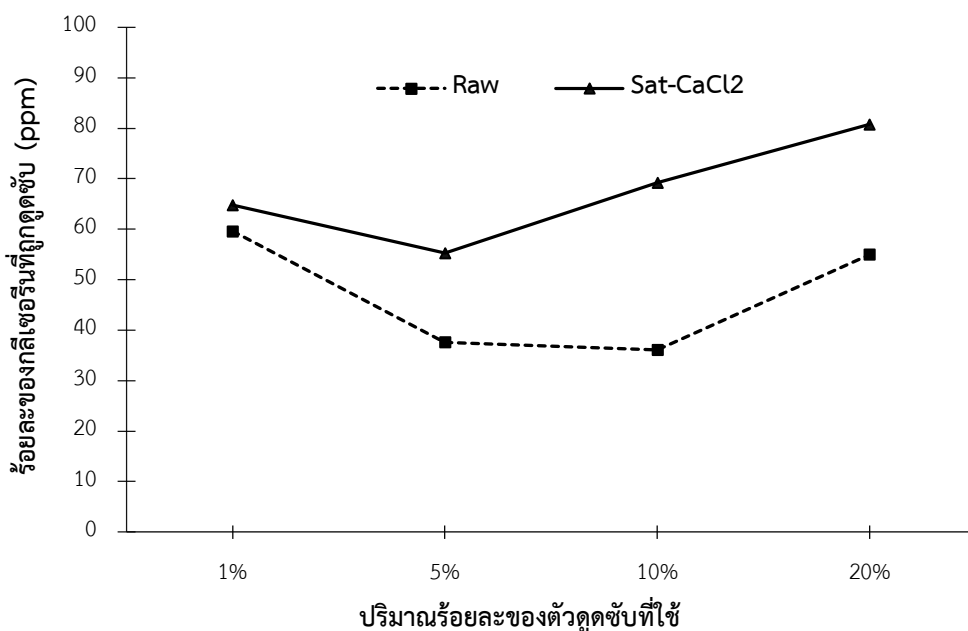
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไบโอดีเซลเทียบกับระยะเวลาที่ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการตั้งไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ไว้นานขึ้น ทำให้การตกตะกอนของกลีเซอรินเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเห็นได้จากการตั้งทิ้งไว้ 1 วัน สามารถลดปริมาณกลีเซอรินจาก 7,635.69 ppm เหลือ 7,382.95 ppm เท่ากับมีการตกตะกอนกลีเซอรินลง 252.74 ppm และมีปริมาณกลีเซอรินลดลงเป็นร้อยละ 3.31 เมื่อตั้งทิ้งไว้ 3 วันมีปริมาณกลีเซอรินคง

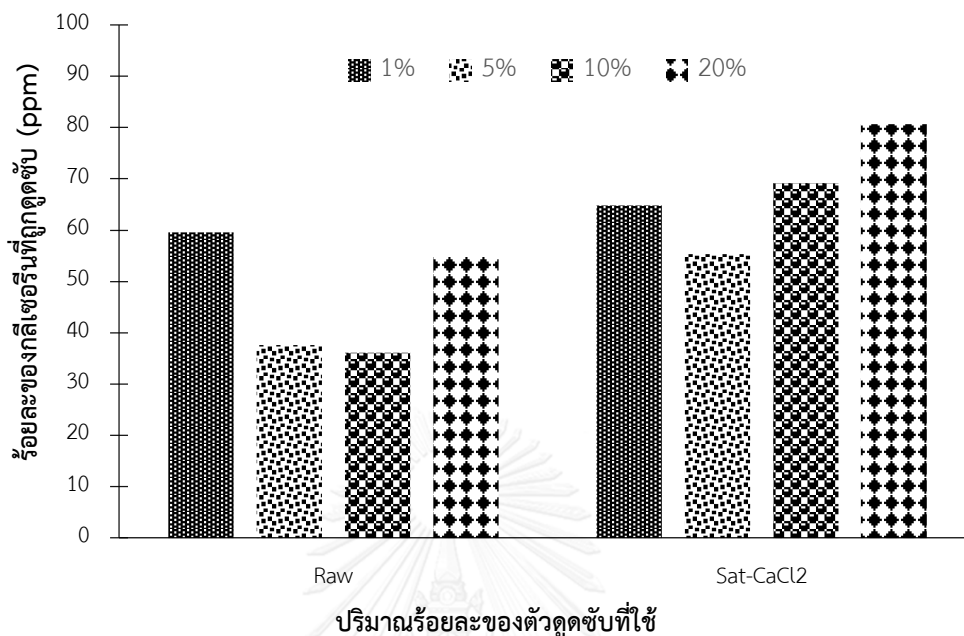
เหลือเท่ากับ 4,589.03 ppm และมีปริมาณกลีเซอรินลดลงเป็นร้อยละ 39.90 แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ 7 วัน มีปริมาณกลีเซอรินคงเหลือเท่ากับ 4,189.08 ppm ซึ่งปริมาณกลีเซอรินลดลงคิดเป็นร้อยละ 45.13 จากผลการทดลองข้างต้นทำให้ทราบว่า ปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซลสามารถตกตะกอนด้วย แรงโน้มถ่วงของโลกตามระยะเวลาที่ตัวทิ้งไว้ จากปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซลที่ลดลงและ ระยะเวลาที่ใช้แสดงให้เห็นว่าการตั้งไบโอดีเซลทิ้งไว้สามารถกำจัดกลีเซอรินในไบโอดีเซลได้แต่ต้องใช้ ระยะเวลาที่นาน ปริมาณกลีเซอรินที่กำจัดได้ก็เป็นแค่เพียงบางส่วนไม่สามารถกำจัดได้ออกทั้งหมด โดย จะเห็นได้ว่าอัตราการลดลงของกลีเซอรินก็จะน้อยลงด้วยเมื่อตั้งทิ้งไว้ในระยะเวลาที่นานมากขึ้นก็ตาม

4.2.2 ศึกษาผลของปริมาณเบนโทไนต์ต่อร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ปริมาณของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะมีผลต่อร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล ทำการศึกษาใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล ใช้รอบการเขย่า เท่ากับ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 15 นาที ผลการทดลองปริมาณ ร้อยละของกลีเซอรินที่ถูกดูดซับต่อปริมาณร้อยละตัวดูดซับเบนโทไนต์ แสดงดังรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับออกจากไบโอดีเซลเทียบกับปริมาณร้อยละของตัวดูดซับที่ใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับออกจากไบโอดีเซลเทียบกับปริมาณร้อยละของตัวดูดซับที่ใช้แยกตามชนิดของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมิตัว (Sat-CaCl₂) ที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 มีผลของการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซลดีกว่าการใช้เบนโทไนด์ธรรมชาติ (Raw) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อใช้เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมิตัว (Sat-CaCl₂) ปริมาณมากขึ้น ค่าร้อยละของกลีเซอรินที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย ที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 20 สามารถดูดซับกลีเซอรินได้มากที่สุดเท่ากับ 5,497 ppm และมีการดูดซับกลีเซอรินเท่ากับร้อยละ 80.72 ส่วนที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1 และ 10 มีการดูดซับกลีเซอรินที่ใกล้เคียงกันคือเท่ากับร้อยละ 64.83 และ 69.17 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองร้อยละของกลีเซอรินที่ถูกดูดซับ ที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 ของเบนโทไนด์ธรรมชาติ (Raw) และเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมิตัว (Sat-CaCl₂) จะพบว่าเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมิตัว (Sat-CaCl₂) สามารถดูดซับกลีเซอรินได้มากกว่าเบนโทไนด์ธรรมชาติ (Raw) เท่ากับ 2,258 ppm คิดเป็นจำนวนร้อยละการดูดซับที่มากกว่าเท่ากับร้อยละ 33.09 ดังนั้นเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมิตัว (Sat-CaCl₂) ที่ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล ให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีกว่าการใช้เบนโทไนด์ธรรมชาติ (Raw)

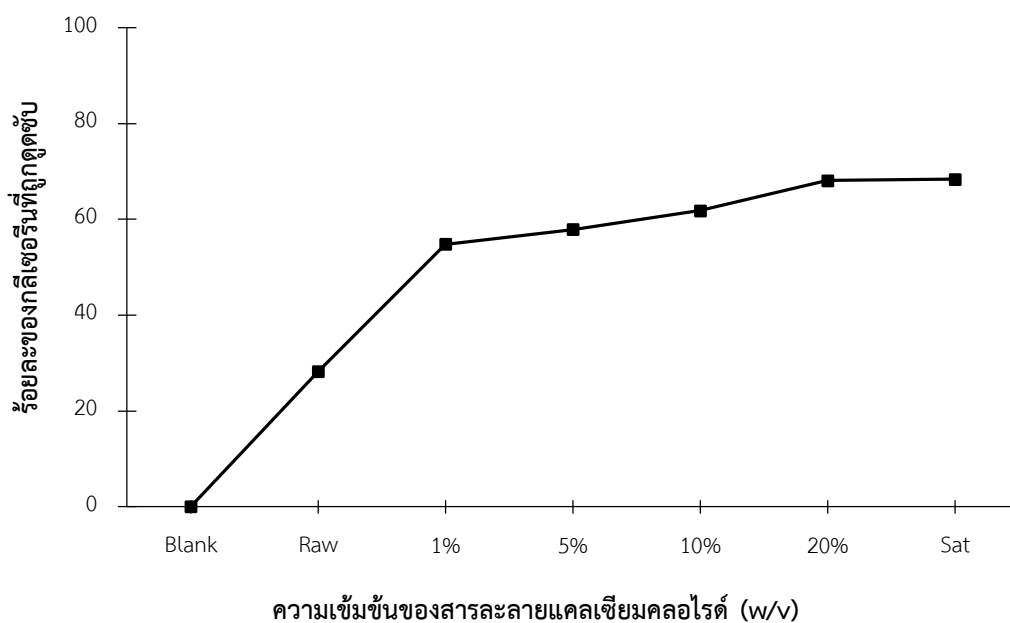
ส่วนเมื่อพิจารณาผลการทดลองร้อยละของกลีเซอรินที่ถูกดูดซับ พบว่าประสิทธิภาพของเบนโทไนด์ธรรมชาติ (Raw) และเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมิตัว (Sat-CaCl₂) ที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1 จะพบว่ามี การดูดซับที่ค่อนข้างดีและจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 แต่การดูดซับจะกลับมาให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีกที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณของตัวดูดซับมีผลต่อการดูดซับกลีเซอริน ซึ่งประสิทธิภาพการดูดซับนี้สามารถอธิบายได้เพิ่มเติมว่า ตัวดูดซับจะมีจำนวนตำแหน่งหรือบริเวณของการเกิดการดูดซับด้วยค่าคงที่ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สำหรับตัวดูดซับแต่ละชนิดต่างกันไป ถึงแม้ว่าการเพิ่มอัตราปริมาณตัวดูดซับให้มากขึ้นจะเป็นการเพิ่มจำนวนตำแหน่งของการดูดซับก็ตาม แต่ในทางกลับกันก็จะเป็นการลดปริมาณพื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับต่อกลีเซอรินลงด้วยในเวลาเดียวกัน ดังนั้นจากการทดลองการดูดซับกลีเซอรินด้วยเบนโทไนด์ธรรมชาติ (Raw) และเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมิตัว (Sat-CaCl₂) ที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1, 5, 10 และ 20 มีสมมุติฐานอธิบายลักษณะกราฟของผลการทดลองได้ 2 ลักษณะคือ 1) เกิดจากคุณลักษณะและคุณสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับเองมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ 2) เป็นตัวแปรการทดลองที่ควบคุมไม่ได้ที่เกิดขึ้นมาจากการทดลองเองมีผลต่อค่าการทดลอง

จากกราฟผลการทดลองสามารถอธิบายเพิ่มเติมจากการพิจารณาผลของการกระจายตัวของตัวดูดซับและการมีผลส่งเสริมและขัดขวางการดูดซับกันเองระหว่างอนุภาคตัวดูดซับด้วยกัน (particle-particle interactions) โดยเฉพาะในระบบที่ตัวดูดซับเป็นสถานะของแข็ง บางครั้งอนุภาคของตัวดูดซับจะขัดขวางตำแหน่งของการเกิดการดูดซับ ซึ่งเป็นสาเหตุให้มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพการดูดซับลดลง หรืออนุภาคของตัวดูดซับจะทำให้เกิดประจุของไฟฟ้าสถิตย์บนพื้นผิวตัวดูดซับ ส่งผลต่ออนุภาคตัวดูดซับเกิดการรวมตัวกัน ซึ่งพื้นที่ผิวของการเกิดการดูดซับต่อหนึ่งหน่วยตัวดูดซับก็ลดลงตามการรวมตัวกันของอนุภาคตัวดูดซับ [43] เมื่อพิจารณาผลของการเพิ่มขึ้นร้อยละของปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ จะเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของจำนวนตัวดูดซับต่อปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซล ทำให้การลดลงของปริมาณกลีเซอรินก็มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นนี้คาดว่าจะเป็ นผลของการมีอนุภาคตัวดูดซับที่ล้อมรอบโมเลกุลกลีเซอรินเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีโอกาสที่โมเลกุลกลีเซอรินปริมาณมากขึ้นได้เข้าสัมผัสกับอนุภาคตัวดูดซับ นอกจากนี้การที่เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์แสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีกว่าเบนโทไนด์ธรรมชาตินั้น จะต้องพิจารณาประกอบกับแนวโน้มของพื้นผิวของเบนโทไนด์ที่เพิ่ม และแนวโน้มของระยะห่างของช่องว่างระหว่างชั้น (interlayer) ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาจากค่า d-spacing (d₀₀₁) การเพิ่มขึ้นของระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้น (interlayer) แสดงให้เห็นว่ามีพื้นผิวของตัวดูดซับที่สามารถให้เข้าถึงได้ดีขึ้น ดังนั้นโมเลกุลกลีเซอรินจึงมีแนวโน้มที่จะแพร่กระจายสู่ช่องว่างระหว่างชั้น (interlayer) ระหว่างแผ่น

ซิลิเกตของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ได้มากกว่าเบนโทไนด์ธรรมชาติ (Sameer และคณะ, 2003) [43, 44]

4.2.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้บำบัดเบนโทไนด์ต่อร้อยละผลการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นต่างๆ ที่ความเข้มข้น 1, 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซลที่แตกต่างกัน จากการทดลองเมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล รอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที ได้ผลการทดลองร้อยละของปริมาณกลีเซอรินถูกดูดซับเทียบกับความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้บำบัดเบนโทไนด์ ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของร้อยละปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับออกจากไบโอดีเซล เทียบกับความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้บำบัดเบนโทไนด์

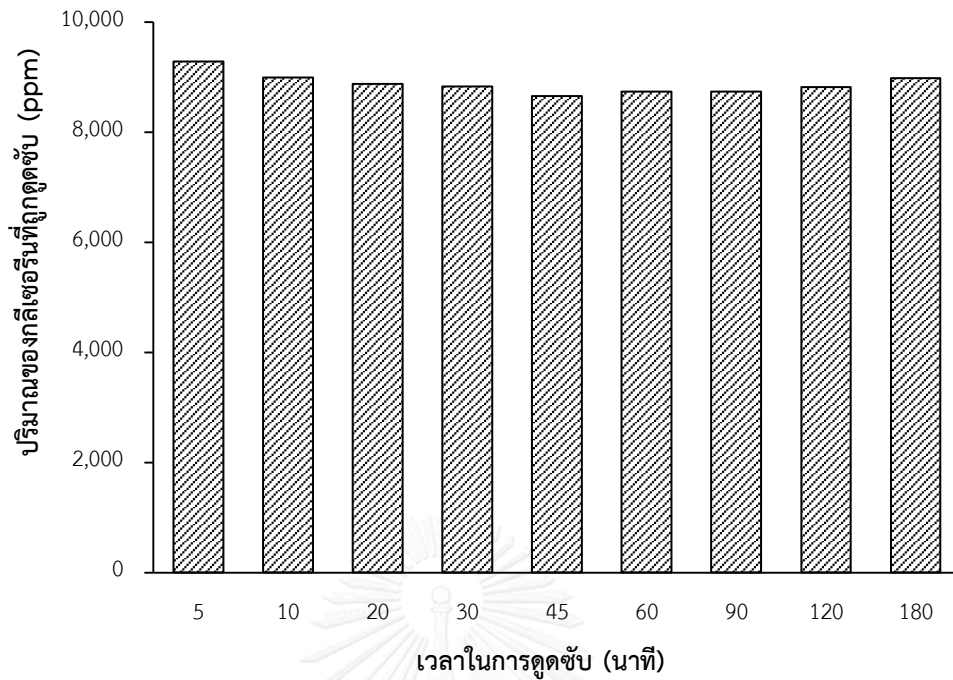
จากรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5, 10, 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) มีแนวโน้มในการดูดซับกลีเซอรินและร้อยละของการดูดซับที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้ในการบำบัดเบนโทไนด์ธรรมชาติ จากการศึกษาจะพบว่าเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีการ

ดูดซับกลีเซอรินเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 54.77, 57.85 และ 61.79 ตามลำดับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ในการบำบัดเบนโทไนด์เป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรและความเข้มข้นอิมัตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) พบว่ามีค่าร้อยละการดูดซับกลีเซอรินที่ใกล้เคียงกันมากคือ 68.07 และ 68.37 ตามลำดับ จากผลการทดลองอธิบายได้ว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์เพิ่มมากขึ้นจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณธาตุ Ca ซึ่งการปรับปรุงเบนโทไนด์ให้มีปริมาณธาตุ Ca จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินเนื่องจากธาตุ Ca หรือแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) จะสามารถเกิดพันธะเคมีกับโมเลกุลกลีเซอรินได้เป็นสบู่อของแคลเซียม ซึ่งสามารถแยกออกจากไบโอดีเซลได้ดี จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นอิมัตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ให้ค่าร้อยละการดูดซับกลีเซอรินที่สูงขึ้นมากกว่า 2 เท่าเมื่อเทียบกับค่าร้อยละการดูดซับจากเบนโทไนด์ธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเบนโทไนด์ด้วยเครื่อง XRF พบว่าปริมาณธาตุ Ca ในเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมัตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 2.1 เท่าจากปริมาณธาตุ Ca ของเบนโทไนด์ธรรมชาติ [32, 42]

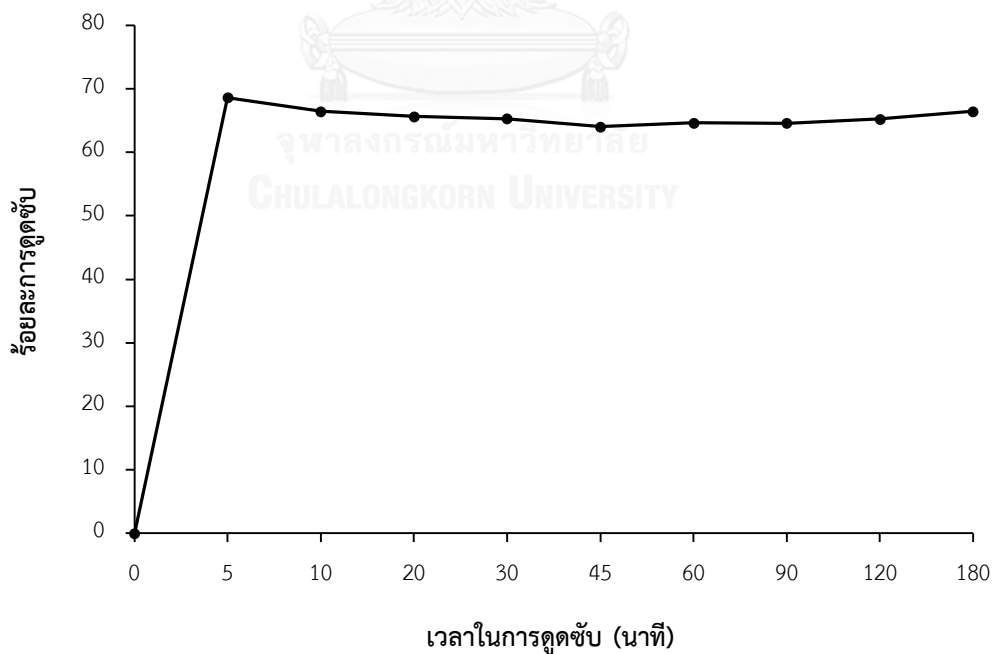
ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลการดูดซับกลีเซอรินด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้สารเคมีในการเตรียมปริมาณน้อยสุดและให้ประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินในระดับที่ดีมากถึงร้อยละ 57.85 ถ้าพิจารณาถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายการผลิตและความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อได้จริงในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ศึกษาทดลองขั้นถัดไป

4.2.4 ศึกษาผลของระยะเวลาที่สัมผัสต่อผลร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและไบโอดีเซล จะมีผลโดยตรงต่อปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับและร้อยละของการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล ทำการศึกษาโดยใช้เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก รอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลาทดลอง 0 ถึง 180 นาที โดยทำการศึกษาผลของเวลาต่อการดูดซับที่ 5, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ ผลของปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับและร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับในไบโอดีเซล



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลของระยะเวลาสัมผัสของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับร้อยละของการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงระยะเวลาสัมผัสของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับไบโอดีเซล มีผลต่อปริมาณของกลีเซอรินที่ถูกดูดซับและร้อยละการดูดซับของกลีเซอรินในไบโอดีเซล โดยที่ระยะเวลาในการดูดซับนานเท่ากับ 10 นาที มีค่าปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับเท่ากับ 8,989 ppm และมีค่าร้อยละการดูดซับกลีเซอรินเท่ากับ 66.46 เมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการดูดซับ 20 นาที มีค่าปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับเท่ากับ 8,879 ppm และมีค่าร้อยละการดูดซับกลีเซอรินเท่ากับ 65.65 และที่ระยะเวลาในการดูดซับ 30 นาที มีค่าปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับเท่ากับ 8,830 ppm และมีค่าร้อยละการดูดซับกลีเซอรินเท่ากับ 65.29 ที่ช่วงระยะเวลาในการดูดซับ 10, 20 และ 30 นาที ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีผลการดูดซับกลีเซอรินที่ใกล้เคียงกันมาก

จากผลการทดลองของปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับพบว่าระยะเวลาสัมผัสเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่อกำหนดให้ผลของระยะเวลาต่อการตกตะกอนกลีเซอรินเป็นตัวแปรควบคุมที่นำมาใช้คำนวณทุกช่วงเวลาและหักลบออกไปแล้ว พบว่าถ้าใช้เวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณกลีเซอรินในไบโอดีเซลลดลงด้วย แต่อย่างไรก็ดีระยะเวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดซับเพียงช่วงเวลานึงเท่านั้น ถ้าหากระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนเลยช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมหรือสมดุลของการดูดซับแล้ว ระยะเวลาสัมผัสที่นานเกินไปก็จะมีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล [23, 24]

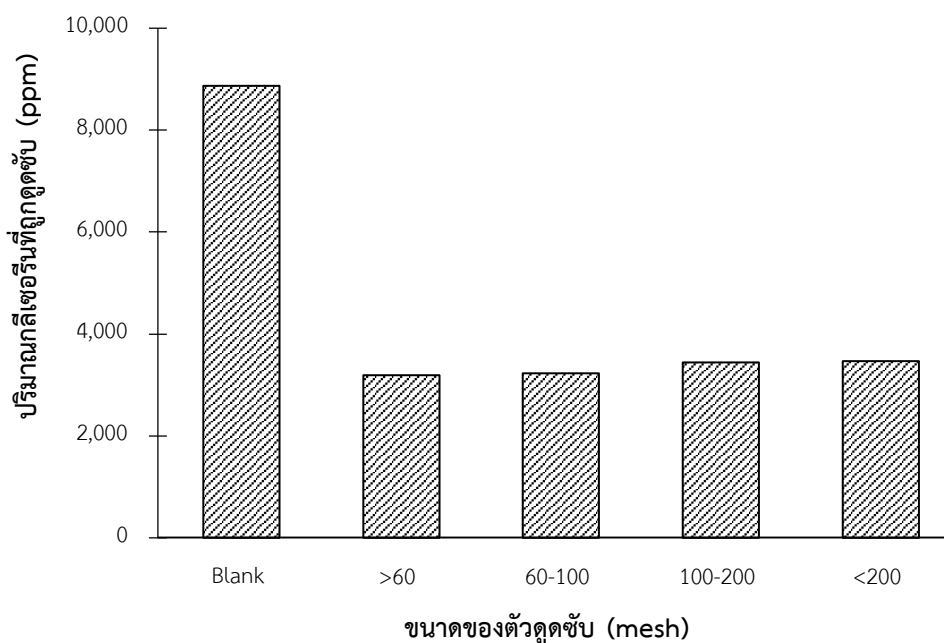
ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที มีแนวโน้มที่ใช้เป็นเวลาสมดุลของความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาสัมผัสกับประสิทธิภาพของการดูดซับที่ดีของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ใช้ดูดซับกลีเซอรินจากไบโอดีเซล จากรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นโมเลกุลของกลีเซอรินจะสามารถเข้าไปสัมผัสในพื้นที่ผิวของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นพื้นที่ผิวตัวดูดซับของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ก็จะมีปริมาณลดลง เมื่อการปกคลุมของโมเลกุลกลีเซอรินบนพื้นที่ผิวเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เกิดได้เต็มพื้นที่ การดูดซับก็จะเข้าสู่ภาวะสมดุล ดังนั้นช่วงเวลาของกระบวนการดูดซับสามารถพิจารณาออกเป็น 3 ระยะคือ 1) ระยะเวลาแรกเป็นลักษณะของการเข้าสัมผัสอย่างรวดเร็วระหว่างโมเลกุลกลีเซอรินกับชั้นพื้นผิวเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 2) ระยะที่สองซึ่งจะช้ากว่าช่วงแรกเนื่องจากมีการแพร่กระจายของโมเลกุลกลีเซอรินสู่โพรงหรือช่องว่างของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 3) ช่วงระยะเวลาสุดท้ายกระบวนการดูดซับจะหยุดลงแสดงให้เห็นระยะเวลาของสมดุล ดังนั้นปัจจัยที่จะช่วย

ส่งเสริมให้โมเลกุลกลีเซอรินเข้าไปสัมผัสที่พื้นผิวของอนุภาคเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรได้จำนวนมากขึ้น ได้แก่ การปรับปรุงประจุ แคตไอออนในโครงสร้างช่องว่างระหว่างชั้นเบนโทไนด์ การเพิ่มจำนวนรูพรุนและขนาดรูพรุนเฉลี่ยของ เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร [44-46]

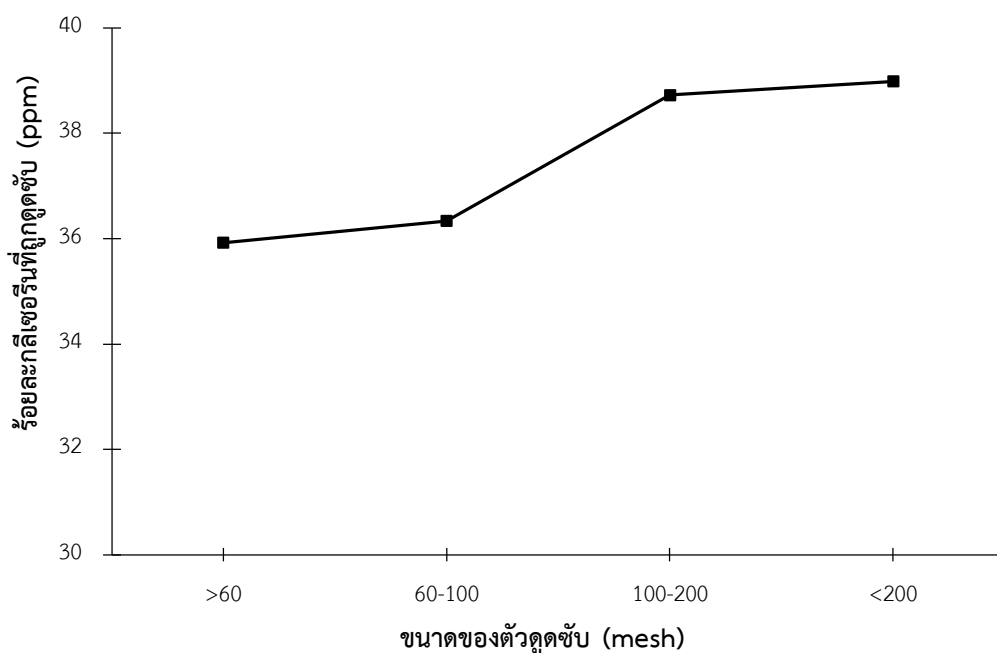
จากผลการทดลองระยะเวลาสัมผัสระหว่างเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซลที่ช่วง ระยะเวลาเฉลี่ย 15 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมและน้อยที่สุดสำหรับการดูดซับกลีเซอรินใน ไบโอดีเซล

4.2.5 ศึกษาผลของขนาดเบนโทไนด์ต่อผลร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ขนาดของเบนโทไนด์มีผลต่อปริมาณกลีเซอรินคงเหลือในไบโอดีเซลและร้อยละของ การดูดซับกลีเซอริน ทำการศึกษาโดยใช้เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล รอบ การเขย่า 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 นาที ขนาดของตัวดูดซับ ที่ใช้มีขนาด mesh size เท่ากับ > 60 เมช (0.250 มิลลิเมตร), 60-100 เมช (0.149-0.250 มิลลิเมตร), 100-200 เมช (0.074-0.250 มิลลิเมตร), และ < 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร) ผลของ ขนาดเบนโทไนด์ต่อผลร้อยละการดูดซับกลีเซอรินไบโอดีเซล แสดงดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กับปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับในไบโอดีเซล



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกับร้อยละของการดูลดคลอโรฟิลล์ในใบโอดิเซล

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 พบว่าขนาดของตัวดูลดที่มีขนาดเล็กจะให้น้ำมันค่าร้อยละการดูลดคลอโรฟิลล์ในใบโอดิเซลเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีขนาดเท่ากับ > 60 เมช (0.250 มิลลิเมตร) และ 60-100 เมช (0.149-0.250 มิลลิเมตร) ให้ผลร้อยละการดูลดคลอโรฟิลล์ในใบโอดิเซลที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยคือร้อยละ 35.92 และ 36.33 ตามลำดับ แต่สำหรับขนาดของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีขนาดเท่ากับ 100-200 เมช (0.074-0.149 มิลลิเมตร) และ < 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร) ให้ผลร้อยละการดูลดคลอโรฟิลล์ในใบโอดิเซลใกล้เคียงกันมากคือร้อยละ 38.73 และ 38.98 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาว่าตัวดูลดที่มีขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพและอัตราการดูลดสูงกว่าตัวดูลดที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นเมื่อตัวดูลดขนาด < 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร) จึงให้ประสิทธิภาพและอัตราการดูลดสูงกว่าตัวดูลดขนาด > 60 เมช (0.250 มิลลิเมตร) โดยความสามารถในการดูลดนั้นจะแปรผันตรงกับพื้นที่ผิว เพราะฉะนั้นตัวดูลดที่มีพื้นที่ผิวสูงจะดูลดโมเลกุลคลอโรฟิลล์ได้มากกว่าตัวดูลดที่มีพื้นที่ผิวดำ แต่เนื่องจากการดูลดส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในช่องว่างของตัวดูลด ดังนั้นขนาดของตัวดูลดจึงมีอิทธิพลด้วยเช่นกัน [23, 24] จากผลการทดลองพบว่าเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จัดเป็นกลุ่มตัวดูลดที่

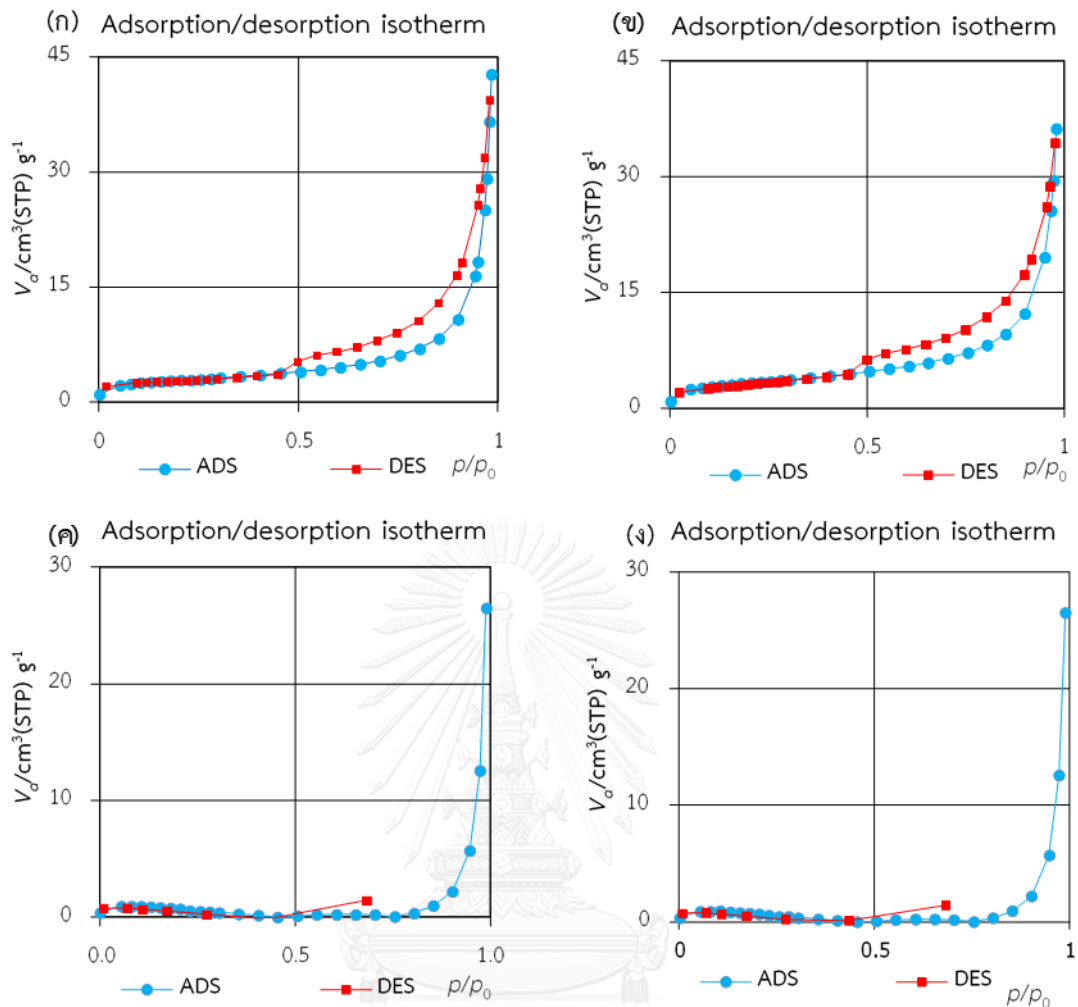
มีรูพรุนขนาดกลาง ซึ่งมีขนาดรูพรุนที่เพิ่มขึ้นจากการบำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ และผลของการดูดซับกลีเซอรินก็มีประสิทธิภาพสูงถึงร้อยละ 38 เมื่อใช้เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ขนาดเท่ากับ 100-200 เมช (0.074-0.149 มิลลิเมตร) และขนาด < 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร)

ดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานจริงสำหรับการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จึงพิจารณาเลือกที่ขนาด 100-200 เมช (0.074-0.149 มิลลิเมตร) และ < 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร) มาใช้ทำการศึกษาในขั้นถัดไป

4.3 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

4.3.1 รูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนของเบนโทไนด์

รูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับของแก๊สไนโตรเจน (N_2) ของเบนโทไนด์ธรรมชาติ และเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1, 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 77 K แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงรูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับของแก๊สไนโตรเจน (N_2)

- (ก) เบนโทไนด์ธรรมชาติ
- (ข) เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปริมาตร
- (ค) เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
- (ง) เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นอิ่มตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

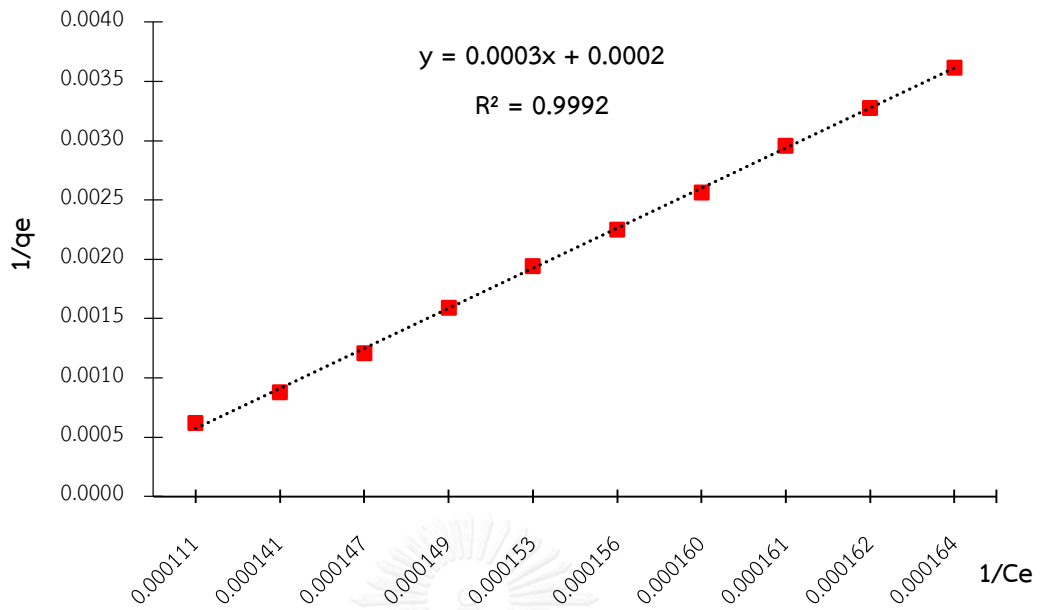
จากรูปที่ 4.16 พบว่ารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับของแก๊สไนโตรเจน (N_2) และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนด์ธรรมชาติมีขนาดรูพรุนเท่ากับ 2.579 นาโนเมตร และเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักปริมาตร มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 19.986 นาโนเมตร มีลักษณะของการดูดซับเป็นไอโซเทอร์มแบบที่ 5 ตาม Brunauer, Emmett and Teller (BET) classification ซึ่งเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง คือขนาดรูพรุนระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร การดูดซับช่วงแรกเริ่มจากพื้นผิวของเบนโทไนด์

ตอนแรกว่างเปล่าปราศจาก N_2 เมื่อเพิ่มความดันที่มีค่าความดัน P/P_0 ต่ำๆ จำนวนโมเลกุล N_2 จะถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเสร็จสมบูรณ์ จะเริ่มดูดซับชั้นต่อไป เมื่อเพิ่มความดันที่ P/P_0 มากขึ้น จะเกิดการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) และอาจจะเกิดการควบแน่นและเกิดช่องว่างเล็กน้อยในรูพรุน การเริ่มการคายการดูดซับ (Desorption) เนื่องจากการลดความดัน ทำให้โมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน จะค่อยๆ หลุดออกจากผิวเบนโทไนต์ การดูดและการคายก็จะเกิดจากการเอาชนะแรงของการดึงดูดตัวถูกดูดซับออกมา ค่อนข้างยากกว่าจึงทำให้เส้นกราฟของการคายไม่ทับกับเส้นกราฟของการดูด ดังนั้นเมื่อ ความดันมีค่าถึงระดับหนึ่ง เส้นกราฟของการดูดซับ (Adsorption) ซ้อนทับเส้นกราฟ (Desorption) ดังเดิม

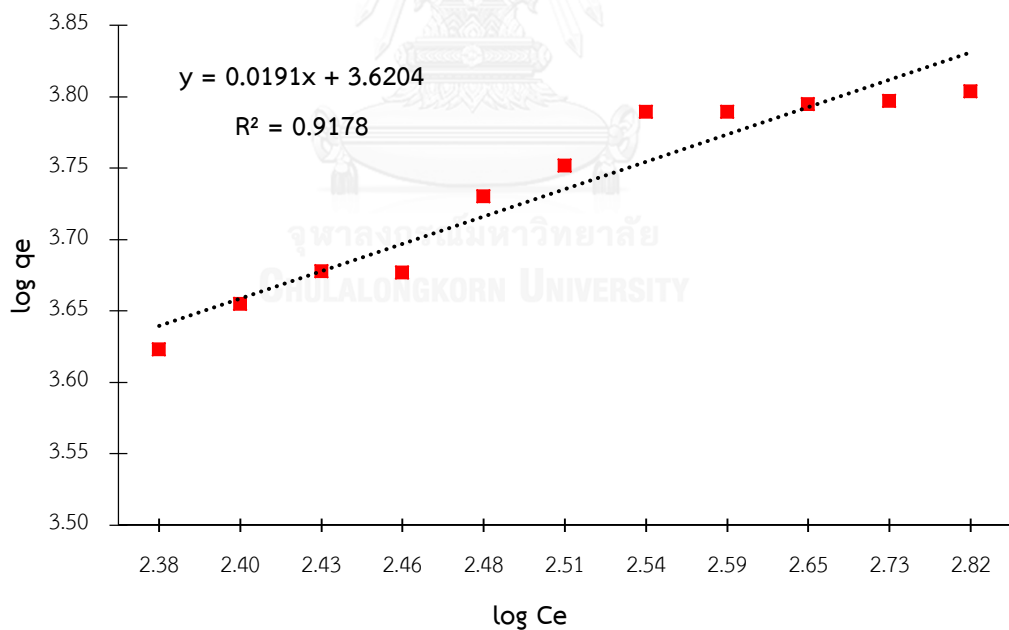
ส่วนรูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับของแก๊สไนโตรเจน (N_2) ของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และความเข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) จะมีลักษณะการดูดซับแก๊สไนโตรเจนเป็นไอโซเทอร์มแบบที่ 3 ตาม Brunauer, Emmett and Tellet (BET) classification มีรูปร่างเหมือนกระจกเงาและไม่มีตำแหน่งของการเกิดฮิสเทอรีซิส ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีการดูดซับด้วยแรงกระทำแบบอ่อน หลังจากพื้นที่ผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมหมดแล้ว การดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเพราะตัวถูกดูดซับมีแรงดูดซับกันเองสูง

4.3.2 รูปแบบไอโซเทอร์มการดูดซับของการดูดซับกลีเซอริน

ศึกษารูปแบบไอโซเทอร์มของการดูดซับจากเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ดูดซับกลีเซอรินจากไบโอดีเซล ใช้ปริมาณตัวดูดซับ เบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ด้วยอัตรา ร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยน้ำหนักไบโอดีเซล ใช้ขนาดของตัวดูดซับเท่ากับ 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร) รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 15 นาที นำไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ปริมาณอัตราร้อยละต่างๆ วิเคราะห์หาปริมาณ กลีเซอรินคงเหลือโดยวิธีการไทเทรชันด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.01 N และสามารถนำ ข้อมูลเขียนกราฟไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรุนดลิช ดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิชของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าคงที่ของไอโซเทอร์มของการดูดซับกลีเซอริน

LANGMUIR ISOTHERM				FREUNDLICH IOSTHERM			
$(1/q_e) = (1/q_0) + (1/q_0 K_L C_e)$				$\log q_e = \log K_f + (1/n) \log C_e$			
$Y = 0.0002 + 0.0003X$				$Y = 3.6204 + 0.019X$			
q_0 (mg/g)	K_L (L/mg)	R_L	R^2	$1/n$	n	K_f (mg/g)	R^2
5,000	0.667	1.305×10^{-4}	0.9992	0.019	52.632	4.173×10^3	0.9178

หมายเหตุ : $R_L = 1 / [1 + (K_L C_0)]$

จากรูปที่ 4.17 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบแลงเมียร์ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/q_e$ และ $1/C_e$ จะได้สมการ คือ $Y = 0.0002 + 0.0003X$ โดยความชันของกราฟเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $1/q_0 K_L C_e$ และที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 0 จุดตัดแกน Y มีค่าเท่ากับ $1/q_0$ ซึ่งค่าคงที่ของสมการไอโซเทอร์มของการดูดซับกลีเซอรินแบบแลงเมียร์ แสดงดังตารางที่ 4.4

จากรูปที่ 4.18 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบฟรอนดลิชของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log(q_e)$ และ $\log(C_e)$ จะได้สมการ คือ $Y = 0.019 + 3.6204X$ ความชันของกราฟเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $1/n$ และที่ตำแหน่งแกน X เท่ากับ 0 จุดตัดแกน Y มีค่าเท่ากับ $\log K_f$ ซึ่งค่าคงที่ของสมการไอโซเทอร์มของการดูดซับกลีเซอรินแบบฟรอนดลิช ดังตารางที่ 4.4

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อพิจารณารูปแบบกลไกการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซลของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สอดคล้องกับ Liu และคณะ (2009) ที่ทำการศึกษาการดูดซับกลีเซอรินจากน้ำล้างไบโอดีเซล และของซิลิกา สอดคล้องกับ Mazziere และคณะ (2008) ที่ทำการศึกษาคุณสมบัติการดูดซับของซิลิกาเจลในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดนี้มีสมการการดูดซับเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบแลงเมียร์ จากผลการทดลองเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรมีความสัมพันธ์การตัดสินใจความสัมพันธ์เชิงเส้น (R^2) ของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบแลงเมียร์ เท่ากับ 0.9992 สูงกว่าสมการไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบฟรอนดลิชที่เท่ากับ 0.9178 ดังนั้นจึงสามารถอธิบายลักษณะการดูดซับได้ว่าการดูดซับกลีเซอรินของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นการดูดซับกลีเซอรินแบบแลงเมียร์ ซึ่งมีลักษณะการดูดซับ

แบบชั้นเดียว และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งสามารถอธิบายกลไกการดูดซับกลีเซอรินเพิ่มเติมออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ระยะเริ่มต้นจะเกิดการแพร่ภายนอก (External diffusion) ของโมเลกุลกลีเซอรินในไบโอดีเซล เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ผิวภายนอกของตัวดูดซับ
2. ระยะของการแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion หรือ Pore diffusion) โมเลกุลกลีเซอรินเคลื่อนที่จากพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับผ่านเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับทางผิว (Surface migration) หรือโดยแรงแคปิลลารี (Capillary force)
3. ระยะของการดูดซับที่แท้จริง เกิดจากโมเลกุลของกลีเซอรินเข้าปกคลุมอยู่ในภายในโพรง และพื้นที่ผิวของรูพรุนตัวดูดซับ

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ต่างๆของสมการไอโซเทอร์มการดูดซับกลีเซอรินแบบแลงเมียร์พบว่าค่าคงที่การแยกตัว (R_L) ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ซึ่งเป็นค่าบ่งบอกถึงความสอดคล้องของรูปแบบไอโซเทอร์มและการดูดซับเท่ากับ 1.0342×10^{-4} ซึ่งถ้าอยู่ในช่วง $0 < R_L < 1$ จะแสดงว่ารูปแบบและลักษณะการดูดซับเป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะของการดูดซับที่ดี [31, 44, 47] ตามสมการดูดซับแบบแลงเมียร์ สามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับกลีเซอรินจะขึ้นอยู่กับความสมดุลระหว่างการก่อก้อนตัว และการระเหยของโมเลกุลกลีเซอริน เป็นไอโซเทอร์มสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียวและเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งการดูดซับมีสมมุติฐาน ดังนี้ 1) โมเลกุลของกลีเซอรินจะถูกดูดซับบนพื้นที่จำกัดของพื้นที่ผิวของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 2) บริเวณพื้นที่ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะเกิดการดูดซับได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) 3) พื้นที่ผิวเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีจำนวนจำกัดเป็นลักษณะเฉพาะของพื้นที่ผิว 4) พลังงานของการดูดซับในแต่ละบริเวณจะมีค่าเท่ากันในทุกๆ พื้นที่ของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร 5) โมเลกุลกลีเซอรินที่ถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

4.4 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

ในการศึกษานี้จะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ด้วยวิธีการใช้เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ร่วมกับวิธีการล้างด้วยน้ำอุ่น โดยจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล และปริมาณน้ำที่ใช้ล้างไบโอดีเซล

4.4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ทำให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

จากการศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 ของน้ำหนักไบโอดีเซล ขนาดตัวดูดซับเท่ากับ 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร) ระยะเวลาดูดซับ 15 นาที รอบการเขย่า 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ได้ไบโอดีเซลที่บริสุทธิ์มาตรวจสอบคุณสมบัติตามเกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซล คือ ASTM D6751 และ EN 14214

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการตรวจสอบคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ผ่านการทำให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

ข้อกำหนด	วิธีการทดสอบ	ค่ามาตรฐาน	เบนโทไนด์ธรรมชาติ	เบนโทไนด์CaCl ₂ 5%
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15 °C (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	EN 14103	860 – 900	875.70	875.74
ความหนืด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส(เซนติสโตกส์)	ASTM D1298	3.5 – 5.0	4.158	4.154
น้ำ(มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ISO12937	< 500	235	216
สิ่งปนเปื้อน(มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	EN 12662	< 24	16.85	16.50
ค่าความเป็นกรด(มิลลิกรัมKOH/g)	ASTM D664	< 0.50	0.1337	0.1325
โมนอกลิเซอไรด์(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.70	0.763	0.547
ไดกลีเซอไรด์(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.20	0.121	0.129
ไตรกลีเซอไรด์(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.20	0.03	0.04
กลีเซอรินอิสระ(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.02	0.017	0.007
กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.25	0.232	0.169

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการตรวจสอบคุณสมบัติไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร พบว่าเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดย

น้ำหนักต่อปริมาตร ให้ผลทดสอบไปโอดีเซลที่มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของการทดสอบทั้งหมด แต่เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบน้ำมันจากการดูดซับด้วยเบนโทไนด์ธรรมชาติจะพบว่า มีบางรายการของข้อกำหนดที่มีค่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คือค่าโมโนกลีเซอไรด์ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานกำหนดให้ไม่เกินร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก

ผลค่าโมโนกลีเซอไรด์ของการดูดซับจากเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้ค่าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานเท่ากับร้อยละ 0.547 โดยน้ำหนัก แต่ผลค่าโมโนกลีเซอไรด์ของการดูดซับจากเบนโทไนด์ธรรมชาติจะให้ค่าที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้เท่ากับร้อยละ 0.763 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังพบว่าผลของการดูดซับจากเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะมีค่าไตรกลีเซอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.129 โดยน้ำหนัก ค่าไตรกลีเซอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.037 โดยน้ำหนัก ค่ากลีเซอรินอิสระเท่ากับร้อยละ 0.007 โดยน้ำหนัก และค่ากลีเซอรินทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 0.169 โดยน้ำหนักซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมดเช่นเดียวกับ การใช้ตัวดูดซับจากเบนโทไนด์ธรรมชาติที่จะมีค่าของไตรกลีเซอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.121 โดยน้ำหนัก ค่าไตรกลีเซอไรด์เท่ากับร้อยละ 0.028 โดยน้ำหนัก ค่ากลีเซอรินอิสระเท่ากับร้อยละ 0.017 โดยน้ำหนัก และค่ากลีเซอรินทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 0.232 โดยน้ำหนักซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมดเช่นเดียวกัน

โดยค่าโมโนกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์จะเป็นค่าที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ที่หลงเหลือจากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ เช่นเดียวกับค่ากลีเซอรินอิสระและค่ากลีเซอรินทั้งหมด ที่แสดงถึงการแยกกลีเซอรินออกจากไบโอดีเซลที่ไม่สมบูรณ์ และเจือปนอยู่ในไบโอดีเซลที่ผลิตได้ โดยจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมดทั้งที่ใช้เบนโทไนด์ธรรมชาติและเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ยกเว้นค่าของโมโนกลีเซอไรด์จากการใช้เบนโทไนด์ธรรมชาติที่ยังไม่สามารถกำจัดออกได้หมด

สำหรับการทดลองถัดไปเพื่อเป็นแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับกลีเซอรินด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร สามารถทำการทดลองโดยการทำให้ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยตัวดูดซับร่วมกับวิธีการล้างด้วยน้ำอุ่น

4.4.2 การทำให้ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนด์ร่วมกับการล้างด้วยน้ำอุ่น

กระบวนการทำให้ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการล้างด้วยน้ำเป็นวิธีการเดิมที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ร่วมกับกระบวนการดูดซับด้วยเบนโทไนด์ โดยในการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของไบโอดีเซลและปริมาณน้ำที่ใช้จาก

กระบวนการล้างด้วยน้ำของการผลิตไบโอดีเซลเพียงอย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้การดูดซับด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับการล้างด้วยน้ำอุ่น ผลการศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ แสดงดัง ตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยแสดงค่าปริมาณกลีเซอริน ค่าโมโนกลีเซอไรต์ ค่าไดกลีเซอไรต์ และค่าไตรกลีเซอไรต์ ค่ากลีเซอรินอิสระและค่ากลีเซอรินทั้งหมด และปริมาณน้ำที่ใช้ล้างจากการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

ผลการทดลอง	ล้างด้วยน้ำ	ดูดซับด้วยเบนโทไนด์ และล้างด้วยน้ำ	เกณฑ์ มาตรฐาน
ปริมาณกลีเซอริน (ppm)	18,364 ± 156	8,753 ± 87	-
โมโนกลีเซอไรต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.679	0.703	< 0.70
ไดกลีเซอไรต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.123	0.139	< 0.20
ไตรกลีเซอไรต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.014	0.014	< 0.20
กลีเซอรินอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.012	0.012	< 0.02
กลีเซอรินทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.205	0.213	< 0.25
ปริมาณน้ำที่ใช้ล้าง (มิลลิลิตร)	1,429	817	-

จากตารางที่ 4.6 พบว่าไบโอดีเซลที่ผ่านการล้างด้วยน้ำอุ่นและไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับการล้างด้วยน้ำอุ่นมีคุณภาพไบโอดีเซลที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด ปริมาณน้ำจากการล้างไบโอดีเซลด้วยการล้างด้วยน้ำอุ่นเท่ากับ 1,429 มิลลิลิตร เปรียบเทียบกับปริมาณน้ำจากการล้างไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มาก่อนจะใช้ปริมาณน้ำเท่ากับ 817 มิลลิลิตร ดังนั้นการใช้เบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับการล้างด้วยน้ำอุ่น ช่วยลดปริมาณการใช้น้ำลงเท่ากับ 43 เปอร์เซ็นต์

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองและวิเคราะห์ผลสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้ คือ

5.1.1 ศึกษาคุณสมบัติของเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์

เบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 200 เมช (0.074 มิลลิเมตร) ได้ผลการศึกษา ดังนี้

- มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ $6.046 \text{ m}^2/\text{g}$ มีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ $1.3891 \text{ cm}^3/\text{g}$ และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 36.856 nm ซึ่งจัดอยู่ในประเภทรูพรุนขนาดกลาง
- ลักษณะพื้นผิวที่เป็นเกล็ดเรียงชั้นกัน และมีโครงสร้างที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ หลังจากผ่านการบำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ไม่ได้มีการทำลายโครงสร้างหลักเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม
- มีค่าช่องว่างระหว่างชั้น (d-spacing, d_{001}) เพิ่มขึ้นเป็น 13.8426 อังสตรอม คิดเป็นร้อยละ 20.95 และมีปริมาณองค์ประกอบธาตุแคลเซียมเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 12.00
- มีคุณภาพของไบโอดีเซลหลังจากผ่านการดูดซับกลีเซอรินผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ASTM D6751 และ EN 14214 เมื่อเปรียบเทียบการล้างด้วยน้ำ มีคุณภาพของไบโอดีเซลใกล้เคียงกัน

5.1.2 ศึกษากระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์เปรียบเทียบกับเบนโทไนต์ธรรมชาติ

สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับกลีเซอรินเพื่อทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร คือ รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที โดย

- ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ตั้งทิ้งไว้ระยะเวลา 30 นาที ปริมาณกลีเซอรินจะลดลง 2.28 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลา 1 วัน ปริมาณกลีเซอรินจะลดลง 3.31 เปอร์เซ็นต์ และถ้าตั้งทิ้งไว้ระยะเวลา 7 วัน ปริมาณกลีเซอรินจะลดลง 45.13 เปอร์เซ็นต์
- เบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของไบโอดีเซล จะให้ผลการดูดซับดีที่สุด มีผลการดูดซับที่มากกว่าการใช้เบนโทไนต์ธรรมชาติ 33.09 เปอร์เซ็นต์
- ความเข้มข้นสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่ใช้บำบัดเบนโทไนต์ธรรมชาติ และให้ผลการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

เท่ากับ 57.85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าร้อยละของการดูดซับที่มากกว่า 2 เท่าเมื่อเทียบกับการใช้แร่เบนโทไนต์ธรรมชาติ

- ระยะเวลาในการดูดซับ 10 และ 20 นาที ให้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 66.46 และ 65.65 ตามลำดับ เป็นช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับน้อยสุดและให้ประสิทธิภาพสูงสุด
- ขนาดตัวดูดซับเท่ากับ 100-200 mesh (0.074-0.149 มิลลิเมตร) และขนาดตัวดูดซับ 200 mesh (0.074 มิลลิเมตร) มีการดูดซับกลีเซอรินเท่ากับร้อยละ 38.73 ซึ่งเป็นขนาดของตัวดูดซับที่เล็กที่สุด และให้ผลร้อยละของการดูดซับที่ดีที่สุด

5.1.3 การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ไอโซเทอร์มการดูดซับของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นตามไอโซเทอร์มแบบที่ 3 ตามสมการดูดซับของ Brunauer, Emmett and Telle (BET) classification แสดงว่าสามารถเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และมีแนวโน้มของไอโซเทอร์มการดูดซับของกลีเซอรินเป็นแบบแลงเมียร์

5.1.4 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยการดูดซับจากเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับการล้างด้วยน้ำอุ่น สามารถให้คุณภาพไบโอดีเซลที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทย (กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน) และสามารถลดปริมาณน้ำเสียลงได้เท่ากับ 43 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับ การล้างด้วยน้ำเพียงอย่างเดียว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาเพื่อหาวัสดุอื่นที่จะนำมาใช้เป็นตัวดูดซับที่สามารถแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ได้มากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ และสามารถเกิดกลไกของการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ได้ดี เช่น การใช้ดินเบา (Diatomite)

รายการอ้างอิง

1. สำนักพัฒนาเชื้อเพลิงชีวภาพ, ไบโอดีเซลชุมชน, กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, : กรุงเทพมหานคร. 1-48.
2. Knothe, G., *Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters*. Fuel Processing Technology, 2005. **86**(10): p. 1059-1070.
3. กรมธุรกิจพลังงาน, ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลสำหรับเครื่องยนต์การเกษตร (ไบโอดีเซลชุมชน) พ.ศ. 2549. กรมธุรกิจพลังงาน, 2006. **123**: 5-8.
4. Demirbas, M.F., *Biorefineries for biofuel upgrading : A critical review*. Applied Energy, 2009. 86: p. 151-161.
5. กรมธุรกิจพลังงาน, ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ.2556, กรมธุรกิจพลังงาน, 2013. **130**. 15-17.
6. Atabani, A.E., et al., *A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(4): p. 2070-2093.
7. Singh, S.P. and D. Singh, *Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel : A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**: p. 200-216.
8. Kumar, N., Varun., and S.R. Chauhan, *Performance and emission characteristics of biodiesel from different origins : A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **21**: p. 633-658.
9. Silitonga, A.S., et al., *Overview properties of biodiesel diesel blends from edible and non-edible feedstock*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **22**: p. 346-360.
10. Balat, M. and H. Balat, *Progress in biodiesel processing*. Applied Energy, 2010. **87**(6): p. 1815-1835.
11. Gui, M.M., K.T. Lee, and S. Bhatia, *Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock*. Energy, 2008. **33**(11): p. 1646-1653.
12. Ma, F. and M.A. Hanna, *Biodiesel production : a review*. Bioresour. Technology, 1999. **70**: p. 1-15.

13. Dantas, T., A.C. Silva, and A.A.D. Neto, *New microemulsion systems using diesel and vegetable oils*. Fuel, 2001. **80**: p. 75-81.
14. Gerpen, J.V., et al., *Biodiesel production technology*. National Renewable Energy Laboratory, 2004. **NREL/SR-510-36244**: p. 1-105.
15. Meher, L., D. Vidyasagar, and S. Naik, *Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006. **10**(3): p. 248-268.
16. อามานีย์ บริบูรณ์สุข., การลดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา). 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร. p. 1-110.
17. จันทร์เลขา ภูทองคำ., การกำจัดกลีเซอรินในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยตัวดูดซับจากแกลบ, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา). 2554, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร. p. 1-119.
18. Berrios, M. and R.L. Skelton, *Comparison of purification methods for biodiesel*. Chemical Engineering Journal, 2008. **144**(3): p. 459-465.
19. Leung, D.Y.C., X. Wu, and M.K.H. Leung, *A review on biodiesel production using catalyzed transesterification*. Applied Energy, 2010. **87**(4): p. 1083-1095.
20. Atadashi, I.M., M.K. Aroua, and A.A. Aziz, *Biodiesel separation and purification : A review*. Renewable Energy, 2011. **36**(2): p. 437-443.
21. Atadashi, I.M., et al., *Membrane biodiesel production and refining technology : A critical review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(9): p. 5051-5062.
22. Lim, S.C., C. Gomes, and M.Z.A.A. Kadir, *Characterizing of bentonite with chemical, physical and electrical perspectives for improvement of electrical grounding systems*. International Journal of electrochemical science, 2013. **8**: p. 11429-11447.
23. เดชา ฉัตรศิริเวช, กระบวนการดูดซับ. 2552, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 1-226.
24. พิพัฒน์ อารีสงเคราะห์กุล และโฆสิต แผงนุเคราะห์., การเพิ่มความบริสุทธิ์ของกลีเซอรอลด้วยกระบวนการดูดซับ, เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์. 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพมหานคร. p. 1-56.

25. Munson, J.R., B.L. Bertram, and J.D. Caldwell, *Treatment of cooking oils and fats with magnesium silicate alkali material*, in **U.S. Patent. 1997.**
26. Bertram, B., C. Abrams, and B.S. Cooke, *Purification of biodiesel with adsorbent materials*, in **U.S. Patent. 2005.**
27. Temuujin, J., et al., *Characterisation of acid activated montmorillonite clay from Tuulant (Mongolia)*. *Ceramics International*, 2004. **30(2)**: p. 251-255.
28. Berrios, M., et al., *Purification of biodiesel from used cooking oils*. *Applied Energy*, 2011. **88(11)**: p. 3625-3631.
29. Tomic, Z.P., et al., *Comparison of structural, textural and thermal characteristics of pure and acid treated bentonites from Aleksinac and Petrovac (Serbia)*. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, 2011. **82(1)**: p. 389-395.
30. Zhansheng, W., et al., *Characterization, Acid Activation and Bleaching Performance of Bentonite from Xinjiang*. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2006. **14(2)**: p. 253-258.
31. Ma, J., et al., *A novel bentonite-based adsorbent for anionic pollutant removal from water*. *Chemical Engineering Journal*, 2012. **200-202**: p. 97-103.
32. Yildiz, N., Y. Sarikaya, and a. Calimli, *The effect of the electrolyte concentration and pH on the rheological properties of the original and the Na₂CO₃-activated Kutahya bentonite*. *Applied Clay Science* 1999. **14**: p. 319-327.
33. Faghihian, H. and M.H. Mohammadi, *Surface properties of pillared acid-activated bentonite as catalyst for selective production of linear alkylbenzene*. *Applied Surface Science*, 2013. **264**: p. 492-499.
34. Salem, S., A. Salem, and A.A. Babaei, *Application of Iranian nano-porous Ca-bentonite for recovery of waste lubricant oil by distillation and adsorption techniques*. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2015. **23**: p. 154-162.
35. Moraes, D.S., et al., *Bentonite functionalized with propyl sulfonic acid groups used as catalyst in esterification reactions*. *Applied Clay Science*, 2011. **51(3)**: p. 209-213.

36. Vimonses, V., et al., *Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo Red adsorption by clay materials*. Chemical Engineering Journal, 2009. **148**(2-3): p. 354-364.
37. Chu, H., Z. Wang, and Y. Liu, *Application of modified bentonite granulated electrodes for advanced treatment of pulp and paper mill wastewater in three-dimensional electrode system*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2016. **4**(2): p. 1810-1817.
38. Vejayakumaran, P., et al., *Structural and thermal characterizations of silica nanoparticles grafted with pendant maleimide and epoxide groups*. Journal of Colloid Interface Science, 2008. **328**(1): p. 81-91.
39. Lee, W.K.W. and J.S.J. Deventer van, *Structural reorganisation of class F fly ash in alkaline silicate solutions*. Colloids and Surfaces A : Physicochem. Eng. Aspects 2002. **211**: p. 49-66.
40. Parolo, M.E., et al., *Characterization of organo-modified bentonite sorbents : The effect of modification conditions on adsorption performance*. Applied Surface Science, 2014. **320**: p. 356-363.
41. Yildiz, N., A. Calimli, and Y. Sarikaya, *The characterization of Na₂CO₃ activated Kutahya bentonite*. Turkish Journal of Chemistry, 1999. **23**: p. 309-317.
42. Pawar, R.R., et al., *Activated bentonite as a low-cost adsorbent for the removal of Cu(II) and Pb(II) from aqueous solutions : Batch and column studies*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2016. **34**: p. 213-223.
43. Sen, T.K. and D. Gomez, *Adsorption of zinc (Zn²⁺) from aqueous solution on natural bentonite*. Desalination, 2011. **267**(2-3): p. 286-294.
44. Al-Asheh, S., F. Banat, and L. Abu-Aitah, *Adsorption of phenol using different types of activated bentonites*. Separation and Purification Technology, 2003. **33**(1): p. 1-10.
45. Saengprachum, N. and S. Pengprecha, *Effect of mesh size variations on glycerin adsorption by silica from rice husk ash in biodiesel purification*. International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering, 2012. **45**: p. 17-21.

46. Yadla, S.V., V. Sridevi, and M.V.V. Chandana Lakshmi, *Adsorption performance of fly ash for the removal of lead*. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2012. **1**(7): p. 1-7.
47. Saengprachum, N., J. Poothongkam, and S. Pengprecha, *Glycerin removal in biodiesel purification process by adsorbent from rice husk*. International Journal of Scientific Engineering and Technology, 2013. **2**(6): p. 474-478.
48. Leeruang, U. and S. Pengprecha, *Purification of biodiesel by adsorption with activated low silica bentonite*. International Conference on Chemical Processes and Environmental Issues, 2012: p. 170-173.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์กลีเซอรินคงเหลือ

1.1 วิธีการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.0100 N
เตรียมโดยปิเปต Conc. HCl จำนวน 0.83 mL ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 ml ปรับปริมาตรให้ได้ 1000 mL ด้วยน้ำกลั่น
2. อินดิเคเตอร์ ฟีนอลเรด (Phenol Red Indicator) 1เปอร์เซ็นต์
เตรียมโดย ชั่งน้ำหนักฟีนอลเรดจำนวน 0.25 กรัม ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 mL เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) 50 mL เขย่าให้ละลาย และปรับปริมาตรให้เป็น 250 mL ด้วยน้ำกลั่น
3. อินดิเคเตอร์โบรโมฟีนอลบลู 1 เปอร์เซ็นต์
ชั่งน้ำหนักโบรโมฟีนอลบลู 0.1 กรัม ใส่ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 250 mL และปรับปริมาตรให้เป็น 250 mL ด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน

1.2 วิธีหาปริมาณกลีเซอรินที่คงเหลือ

1. ชั่งน้ำหนักไบโอดีเซล (ไบโอดีเซลยังไม่ผ่านการดูดซับ เท่ากับ 5 กรัม และไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับ เท่ากับ 10 กรัม) ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL
2. เติมสารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) จำนวน 100 mL เขย่าให้เข้ากัน
3. เติมอินดิเคเตอร์ ฟีนอลเรด (Phenol red) 1 mL ไทเทรตทันทีด้วย HCl ความเข้มข้น 0.0100 N จนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีส้มเป็นสีเหลือง จดปริมาตรกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ (A)
4. เติมอินดิเคเตอร์ โบรโมฟีนอลบลู (Bromophenol blue) ไทเทรตทันทีด้วย HCl ความเข้มข้น 0.0100 N จนสารละลายเปลี่ยนสีจากสีฟ้าเป็นสีเหลือง จดปริมาตรกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ (B)

1.3 วิธีการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรินคงเหลือ [48]

ปริมาณกลีเซอรินคงเหลือ โดยใช้สูตรในการคำนวณ ดังนี้

$$\text{ปริมาณกลีเซอริน} = \frac{B(\text{ml}) \times \text{Normality HCl} \times 304,400}{M(\text{g})}$$

เมื่อ

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ (มิลลิลิตร)

M = น้ำหนักไปโอติเซล (กรัม)

304,400 = molecular weight of the soap for sodium (mg/mole)

Normality HCl = ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่เตรียม

ตัวอย่างการคำนวณ

จากศึกษาผลของระยะเวลาทิ้งไว้ต่อตกตะกอนกลีเซอริน ที่เวลา 1 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณกลีเซอริน} &= \frac{(8.8)(0.011688)(304,400)}{(5.00)} \\ &= 6,261.776 \text{ ppm} \end{aligned}$$

เมื่อ

B = 8.8 mL

M = 5.00 g

304,400 = molecular weight of the soap for sodium (mg/mole)

0.01 N HCl = 0.011688 N

2. การวิเคราะห์หาปริมาณความเป็นกรด (Acid value) [48]

2.1 วิธีการเตรียมสารเคมี

1. สารละลายอินดิเคเตอร์ p – naphtholbenzein 1 เปอร์เซ็นต์
เตรียมโดย ชั่งน้ำหนัก p – naphtholbenzein ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรให้ได้ 100 mL โดยเติมสารละลายสำหรับการไทเทรต (titration solvent) เขย่าให้เข้ากัน
2. สารละลาย Alcoholic KOH ความเข้มข้น 0.1 M
เตรียมโดย ชั่งน้ำหนัก โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จำนวน 0.6 กรัม ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร โดยเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เขย่าให้เข้ากัน
3. สารละลายสำหรับการไทเทรต (Titration solvent)
เตรียมโดยผสมทูลอีน (toluene) จำนวน 250 มิลลิลิตร กับไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จำนวน 247.5 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรให้ 1000 มิลลิลิตร โดยน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

2.2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย Alcoholic KOH ความเข้มข้น 0.1 M

1. ชั่งน้ำหนัก โปแตสเซียมไฮโดรเจนฟธาเลต (KHP) จำนวน 0.2 กรัม (จดน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร โดยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน (สารละลายมาตรฐาน)
2. ปิเปตสารละลายโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟธาเลต (KHP) จำนวน 25 มิลลิลิตร เติมสารละลายอินดิเคเตอร์ ฟีนอล์ฟธาเลอิน (Phenolphthalein) จำนวน 6 หยด ไทเทรตทันทีด้วยสารละลาย Alcoholic KOH จนสารละลายเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีชมพู จดปริมาตรสารละลาย Alcoholic KOH ที่ใช้
3. การคำนวณความเข้มข้นของสารละลาย Alcoholic KOH จากสมการ

$$C_1 = \frac{g}{M} \times \frac{1000}{V}$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของสารละลาย KHP (M)

g = น้ำหนักของ KHP (กรัม)

M = โมเลกุลของ KHP เท่ากับ 204.23

V = ปริมาตรของสารละลาย KHP ที่เตรียม (100 มิลลิลิตร)

$$C_2 = \frac{C_1 V_1}{V_2}$$

- เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นของสารละลาย KHP (M)
 V_1 = ปริมาตรของสารละลาย KHP (25 มิลลิลิตร)
 C_2 = ความเข้มข้นของสารละลาย alcoholic KOH (M)
 V_2 = ปริมาตรของสารละลาย alcoholic KOH (มิลลิลิตร)

2.3 วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณความเป็นกรด (Acid value)

1. ชั่งน้ำหนักไปโอติเซล 1 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายไทเทรตจำนวน 25 มิลลิลิตร
2. เติมอินดิเคเตอร์ p - naphtholbenzein 1 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 0.125 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ไทเทรตทันทีด้วยสารละลาย alcoholic KOH จนสารละลายเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียว จดปริมาตรของสารละลาย alcoholic KOH ที่ใช้ (A)
3. ทำแบลนค์ (Blank) โดยเติมสารละลายไทเทรตจำนวน 25 มิลลิลิตร เติมอินดิเคเตอร์ p-naphtholbenzein 1 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 0.125 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ไทเทรตทันทีด้วยสารละลาย alcoholic KOH จนสารละลายเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียว จดปริมาตรของสารละลาย alcoholic KOH ที่ใช้ (B)
4. คำนวณปริมาณความเป็นกรด (Acid value) จากสมการ

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

- เมื่อ A = ปริมาตรของสารละลาย Alcoholic KOH ที่ใช้กับตัวอย่าง (มิลลิลิตร)
 B = ปริมาตรของสารละลาย Alcoholic KOH ที่ใช้กับ blank (มิลลิลิตร)
 M = ความเข้มข้นของสารละลาย Alcoholic KOH (M)
 W = น้ำหนักไปโอติเซล (กรัม)

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองและการคำนวณ

ภาคผนวก ข.1 : ผลการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองของระยะเวลาต่อการตกตะกอนของกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ระยะเวลาตั้ง ทิ้งไว้	น้ำหนัก ไบโอดีเซล (กรัม)	ปริมาณ HCl (ml)	ปริมาณกลีเซอริน (ppm)	ค่าเฉลี่ย (ppm)	SD (ppm)
15 นาที	10.3	25.9	7,641.286	7,635.693	7.910
15 นาที	10.63	26.6	7,630.100		
30 นาที	10.43	25.6	7,471.371	7,446.235	35.547
30 นาที	11.28	27.5	7,421.099		
1 วัน	10.12	24.5	7,369.368	7,382.949	19.207
1 วัน	11.30	27.5	7,396.531		
3 วัน	10.12	16.2	4,872.806	4,589.033	401.317
3 วัน	10.04	14.2	4,305.259		
5 วัน	10.44	15.1	4,402.720	4,295.585	151.512
5 วัน	10.32	14.2	4,188.450		
7 วัน	10.01	13.7	4,178.981	4,189.080	14.282
7 วัน	10.31	14.2	4,199.179		

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองของปริมาณเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมิตัวต่อร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ปริมาณร้อยละของตัวดูดซับ	น้ำหนักไบโอดีเซล (กรัม)	ปริมาณ HCl (ml)	ปริมาณกลีเซอริน (ppm)	ค่าเฉลี่ย (ppm)	SD (ppm)
Crude	10.23	23.3	6,933.060	6,809.930	154.455
Crude	10.32	22.5	6,636.628		
Crude	10.96	24.7	6,860.109		
1 %	5.11	4.1	2,423.540	2,395.069	39.029
1 %	5.05	4.0	2,411.089		
1 %	5.18	4.0	2,350.579		
5 %	5.05	5.0	3,038.820	3,044.243	10.178
5 %	5.01	5.0	3,037.924		
5 %	5.08	5.1	3,055.984		
10 %	5.09	3.5	2,089.560	2,099.416	11.103
10 %	5.19	3.6	2,111.445		
10 %	5.08	3.5	2,097.244		
20 %	5.06	2.2	1,341.420	1,313.042	47.379
20 %	5.00	2.2	1,339.360		
20 %	5.08	2.1	1,258.346		

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองปริมาณเบนโทไนด์ธรรมชาติต่อร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ปริมาณร้อยละ ตัวดูดซับ	น้ำหนักไบโอดีเซล (กรัม)	ปริมาณ HCl (ml)	ปริมาณกลีเซอริน (ppm)	ค่าเฉลี่ย (ppm)	SD (ppm)
Crude	10.23	23.3	6,933.060	6,809.930	154.455
Crude	10.32	22.5	6,636.628		
Crude	10.96	24.7	6,860.109		
1 %	5.08	4.8	2,876.460	2,749.678	127.707
1 %	5.07	4.4	2,621.065		
1 %	5.04	4.6	2,751.508		
5 %	5.07	7.2	4,300.130	4,247.689	88.487
5 %	5.10	7.2	4,297.412		
5 %	5.14	7.0	4,145.525		
10 %	5.17	7.5	4,395.680	4,353.017	55.847
10 %	5.22	7.5	4,373.563		
10 %	5.18	7.3	4,289.807		
20 %	5.16	5.2	3,085.760	3,063.759	48.733
20 %	5.11	5.2	3,097.613		
20 %	5.06	5.0	3,007.905		

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ที่ใช้บำบัดเบนโทไนต์ต่อผล การดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ปริมาณร้อยละ ความเข้มข้นของ สารละลาย CaCl ₂	น้ำหนัก ไบโอดีเซล (กรัม)	ปริมาณ HCl (ml)	ปริมาณ กลีเซอริน (ppm)	ค่าเฉลี่ย (ppm)	SD (ppm)
Crude	10.07	33.7	10,186.971	10264.523	71.891
Crude	10.02	34.0	10,328.942		
Crude	10.07	34.0	10,277.656		
Raw	5.02	12.0	7,276.494	7370.709	88.686
Raw	5.03	12.2	7,383.062		
Raw	5.03	12.3	7,452.570		
CaCl ₂ 1 %	5.08	7.8	4,673.858	4642.945	30.146
CaCl ₂ 1 %	5.05	7.7	4,641.347		
CaCl ₂ 1 %	5.02	7.6	4,613.630		
CaCl ₂ 5 %	5.10	7.2	4,316.471	4326.619	9.857
CaCl ₂ 5 %	5.10	7.3	4,336.157		
CaCl ₂ 5 %	5.05	7.2	4,327.230		
CaCl ₂ 10 %	5.05	6.4	3,857.743	3921.990	63.310
CaCl ₂ 10 %	5.12	6.6	3,923.906		
CaCl ₂ 10 %	5.06	6.6	3,984.320		
CaCl ₂ 20 %	5.05	5.4	3,254.970	3277.407	26.971
CaCl ₂ 20 %	5.12	5.5	3,269.922		
CaCl ₂ 20 %	5.11	5.6	3,307.330		
CaCl ₂ sat	5.04	5.4	3,261.429	3247.123	19.455
CaCl ₂ sat	5.05	5.4	3,254.970		
CaCl ₂ sat	5.05	5.4	3,224.970		

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองของระยะเวลาที่ใช้ต่อผลการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาที)	น้ำหนักไบโอดีเซล (กรัม)	ปริมาณ HCl (ml)	ปริมาณกลีเซอริน (ppm)	ค่าเฉลี่ย (ppm)	SD (ppm)
Blank1	5.08	19.5	11,684.646	13,525.835	4,471.723
Blank2	5.12	20.4	12,128.438		
Blank3	5.10	24.8	14,802.196		
Blank4	5.11	26.0	15,488.063		
5	5.04	7.0	4,227.778	4,349.845	172.646
5	5.06	7.1	4,271.225		
5	5.06	7.0	4,230.502		
10	5.02	7.5	4,547.809	4,573.645	75.123
10	5.04	7.5	4,529.762		
10	5.03	7.5	4,530.785		
20	5.16	7.9	4,660.388	4,660.796	37.834
20	5.25	8.0	4,638.476		
20	5.03	7.7	4,639.432		
30	5.09	7.9	4,704.479	4,755.454	112.415
30	5.09	7.9	4,701.283		
30	5.03	7.7	4,680.381		
45	5.11	8.2	4,884.697	4,836.680	51.813
45	5.16	8.3	4,896.357		
45	5.03	7.9	4,810.527		
60	5.07	8.0	4,803.156	4,774.301	4.174
60	5.04	7.9	4,771.349		
60	5.04	7.9	4,777.253		
90	5.07	8.0	4,803.156	4,778.558	16.689
90	5.02	7.9	4,790.359		
90	5.03	7.9	4,766.757		
120	5.06	7.8	4,692.332	4,703.148	3.213
120	5.24	8.1	4,705.420		
120	5.06	7.8	4,700.876		
180	5.02	7.6	4,608.446	4,505.135	50.587
180	5.04	7.4	4,469.365		
180	5.03	7.5	4,540.906		

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองขนาดเบนโทไนต์ต่อผลร้อยละการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล

ขนาดของ ตัวดูดซับ (mesh)	น้ำหนัก ไบโอดีเซล (กรัม)	ปริมาณ HCl (ml)	ปริมาณ กลีเซอริน (ppm)	ค่าเฉลี่ย (ppm)	SD (ppm)
Blank1	5.03	14.8	10,186.971	10,264.523	71.891
Blank2	5.08	15.0	10,328.942		
Blank3	5.12	14.6	10,277.656		
> 60	5.05	9.4	7,276.494	7,370.709	88.686
> 60	5.08	9.6	7,383.062		
> 60	5.02	9.3	7,452.570		
60-100	5.01	9.3	4,673.858	4,642.945	30.146
60-100	5.08	9.5	4,641.347		
60-100	5.05	9.3	4,613.630		
100-200	5.03	9.0	4,316.471	4,326.619	9.857
100-200	5.25	9.3	4,336.157		
100-200	5.12	9.2	4,327.230		
< 200	5.05	8.6	3,857.743	3,921.990	63.310
< 200	5.10	9.2	3,923.906		
< 200	5.09	9.3	3,984.320		

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนต์

ตารางที่ ค.1 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนต์ธรรมชาติ

Slope(Linear)	0.4695	
Intercept(Linear)	-0.0032148	
Correlation coefficient	0.999	
Vm	2.1444	[cm ³ (STP) g ⁻¹]
a _{s,BET}	9.3336	[m ² g ⁻¹]
C	-145.06	
Total pore volume(p/p ₀ =0.984)	0.066086	[cm ³ g ⁻¹]
Mean pore diameter	28.322	[nm]

No	p/p ₀	p/V _a (p ₀ -p)
0	0	0
1	0.0017042	0.0016984
2	0.052918	0.02492
3	0.080183	0.036546
4	0.1052	0.046595
5	0.1303	0.057786
6	0.1553	0.068736
7	0.1802	0.079817
8	0.2053	0.090873
9	0.2305	0.1036
10	0.2555	0.1148
11	0.2802	0.1272
12	0.3049	0.1376
13	0.355	0.1644
14	0.4051	0.1921
15	0.455	0.2213

ตารางที่ ค.2 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

Slope(Linear)	0.3878
Intercept(Linear)	-0.00020241
Correlation coefficient	0.9993
Vm	2.5799 [cm ³ (STP) g ⁻¹]
a _{s,BET}	11.229 [m ² g ⁻¹]
C	-1915
Total pore volume(p/p ₀ =0.980)	0.056103 [cm ³ g ⁻¹]
Mean pore diameter	19.986 [nm]

No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$
0	0	0
1	0.0010286	0.0010758
2	0.052006	0.02196
3	0.080101	0.03232
4	0.1051	0.041002
5	0.1302	0.049936
6	0.1554	0.059231
7	0.1801	0.068223
8	0.2055	0.077997
9	0.2302	0.087451
10	0.2554	0.097174
11	0.2805	0.1073
12	0.3054	0.1173
13	0.3553	0.1384
14	0.4051	0.1609
15	0.4554	0.1863

ตารางที่ ค.3 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

Slope(Linear)	0.7249
Intercept(Linear)	-0.0049782
Correlation coefficient	0.9977
Vm	1.3891 [cm ³ (STP) g ⁻¹]
a _{s,BET}	6.046 [m ² g ⁻¹]
C	-144.61
Total pore volume(p/p ₀ =0.983)	0.055707 [cm ³ g ⁻¹]
Mean pore diameter	36.856 [nm]

No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$
0	0	0
1	0.00086449	0.0017292
2	0.053037	0.03524
3	0.080109	0.051917
4	0.1052	0.067642
5	0.1302	0.084423
6	0.1552	0.1034
7	0.1801	0.1227
8	0.2052	0.1442
9	0.2302	0.1647
10	0.255	0.1855
11	0.2802	0.2099
12	0.3053	0.2355
13	0.3549	0.295
14	0.405	0.3572
15	0.4549	0.4352

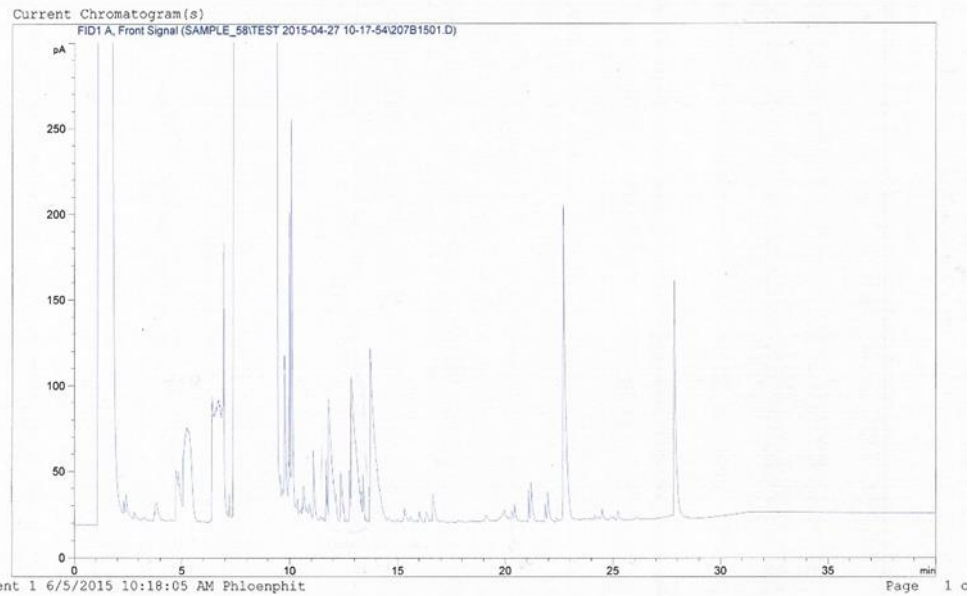
ตารางที่ ค.4 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์อิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

Slope(Linear)	2.2968
Intercept(Linear)	-0.043924
Correlation coefficient	0.975
Vm	0.4439 [cm ³ (STP) g ⁻¹]
a _{s,BET}	1.9319 [m ² g ⁻¹]
C	-51.291
Total pore volume(p/p ₀ =0.987)	0.026571 [cm ³ g ⁻¹]
Mean pore diameter	55.013 [nm]

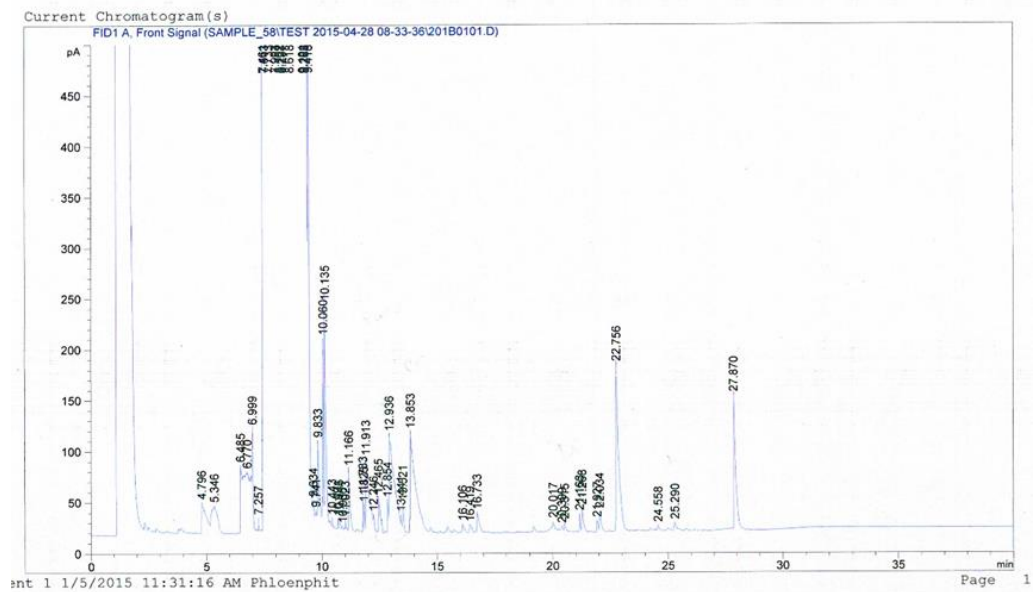
No	p/p_0	$p/V_a(p_0-p)$
0	0	0
1	0.0010634	0.0030657
2	0.054477	0.078768
3	0.080213	0.1229
4	0.1053	0.1688
5	0.1303	0.2238
6	0.1552	0.2894
7	0.18	0.3643
8	0.2052	0.4915
9	0.2301	0.6705
10	0.2553	0.9249
11	0.2801	1.3482
12	0.3052	1.9809
13	0.3549	7.3942
14	0.4051	-8.6838
15	0.4548	-5.9072

ภาคผนวก ง

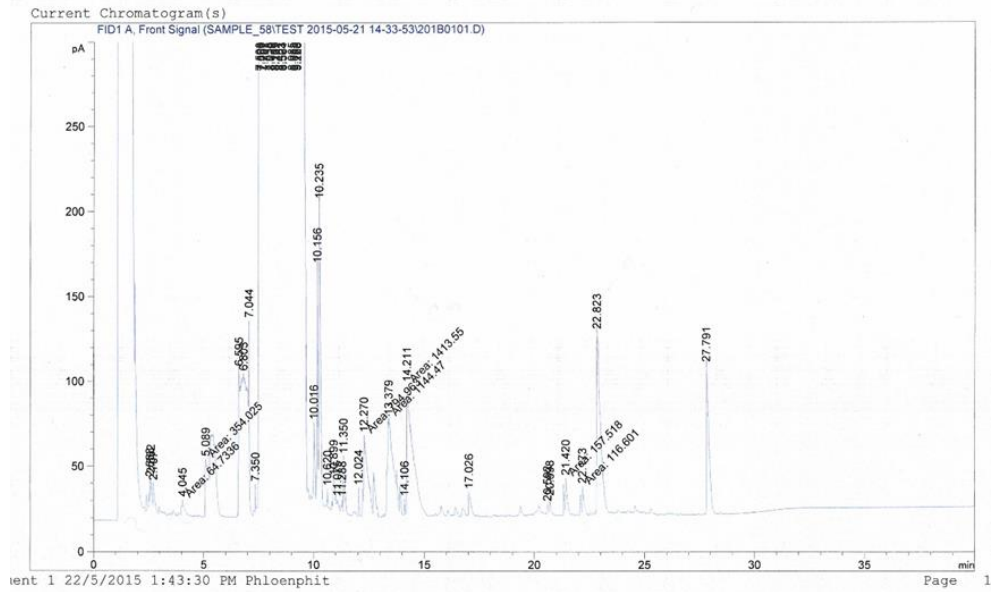
ผลการวิเคราะห์กาลีเซอรินอิสระ โมโน ได และไตรกลีเซอไซด์ และกาลีเซอรินทั้งหมด



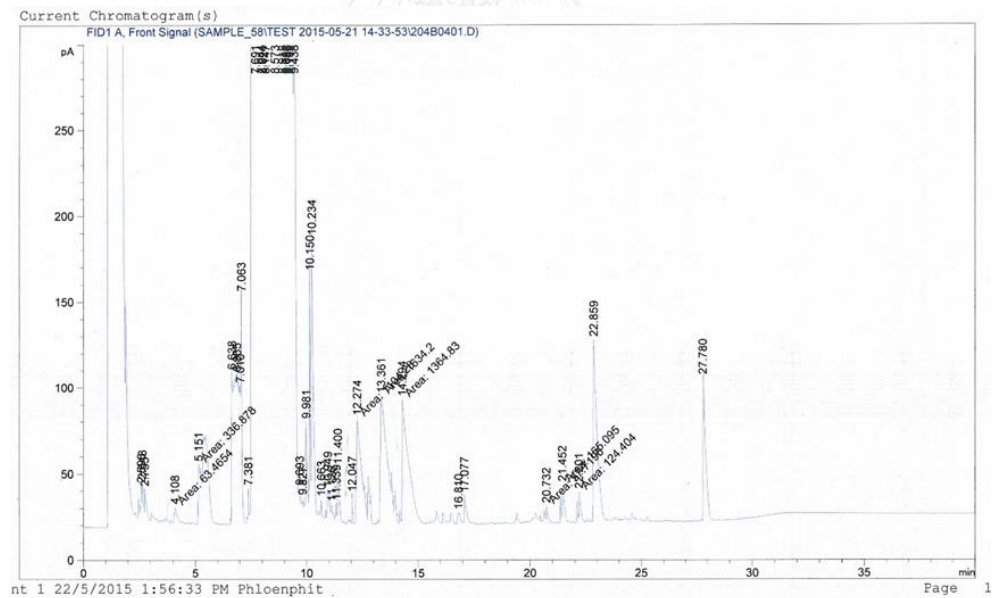
รูปที่ ง.1 แสดงผลการวิเคราะห์กาลีเซอรินอิสระ โมโน ได และไตรกลีเซอไซด์ และกาลีเซอรินทั้งหมดของเบนโทไนต์ธรรมชาติ



รูปที่ ง.2 แสดงผลการวิเคราะห์กาลีเซอรินอิสระ โมโน ได และไตรกลีเซอไซด์ และกาลีเซอรินทั้งหมดของเบนโทไนต์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



รูปที่ ง.3 แสดงผลการวิเคราะห์กลีเซอรินอิสระ โมโน ได และไตรกลีเซอไซด์ และกลีเซอรินทั้งหมดของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร



รูปที่ ง.4 แสดงผลการวิเคราะห์กลีเซอรินอิสระ โมโน ได และไตรกลีเซอไซด์ และกลีเซอรินทั้งหมดของเบนโทไนด์บำบัดด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้นอิมิตัว (60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรพล บุญฤทธิ เกิดวันที่ 14 ตุลาคม 2523 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2545 ปัจจุบันทำงานบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ในตำแหน่งเจ้าหน้าที่การตลาดธุรกิจปิโตรเคมี และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

การประชุมทางวิชาการ

21 April 2015 “Biodiesel Purification with Calcium Chloride Treated Bentonite” Poster presentation at The 6th research symposium on petrochemical and materials technology and The 21th PPC symposium on petroleum, petrochemicals and polymers 2015 Chaloe Rajakumari 60 Building, Chulalongkorn University Bangkok, Thailand.