

การดูดซับกลีเซอรินจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้ว  
บนเบนโทไนด์กัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเบส

นางสาวธนพร สายตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

ADSORPTION OF GLYCERINE FROM BIODIESEL PREPARED FROM  
USED COOKING OIL ON BASE ACTIVATED BENTONITE

Miss Thanaporn Saita

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

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การดูดซับกลีเซอรินจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมัน  
พืชใช้แล้วบนเบนโทไนด์กัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเบส

โดย

นางสาวธนพร สายตา

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพ็ชรสม)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โสมิตานนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.อนุรักษ์ วินิตสร)

ธนพร สายตา: การดูดซับกลีเซอรินจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้วบนเบนโทไนต์กัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยเบส. (ADSORPTION OF GLYCERINE FROM BIODIESEL PREPARED FROM USED COOKING OIL ON BASE ACTIVATED BENTONITE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. สมใจ เพ็งปรีชา, 126 หน้า.

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส เพื่อใช้ในการกำจัดกลีเซอรินออกจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ไบโอดีเซลที่ได้ผลิตจากกระบวนการทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยใช้อัตราส่วน 6:1 ของเมทานอลต่อน้ำมัน ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของสารละลายไฮเดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ตัวดูดซับที่ในการศึกษานี้เตรียมโดยดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายไฮเดรอกไซด์ 3 โมลาร์ ทำการรีฟรักซ์ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 40 นาที ทำการศึกษาคุณสมบัติของเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสโดยใช้ เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันและเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงของเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสมีค่า 46.01 ตารางเมตรต่อกรัมและ 7.35 นาโนเมตรตามลำดับ โดยตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนของเบสต่อน้ำหนักดินเบนโทไนต์ ความเข้มข้นของเบส เวลาในการตกตะกอน และขนาดอนุภาคดินก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยเบส ผลการศึกษาพบว่าสามารถกำจัดกลีเซอรินจากไบโอดีเซลได้ร้อยละ 60.14 ในอัตราส่วนดินต่อสารละลายเบสเท่ากับ 1:10 ใช้ตัวดูดซับในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ขนาดอนุภาค 120-200 mesh ในระยะเวลา 30 นาที กระบวนการดูดซับนี้สอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช นอกจากนี้ค่าความเป็นกรดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของไบโอดีเซลที่ได้กำหนดไว้

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....

ปีการศึกษา.....2555.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

# # 5387145420: MAJOR ENVIRONMENTALSCIENCE

KEYWORDS: BENTONITE / BIODIESEL / GLYCERIN

THANAPORN SAITA: ADSORTION OF GLYCERINE FROM BIODIESEL  
PREPARED FROM USED COOKING OIL ON BASE ACTIVATED BENTONITE.

ADVISOR: ASSOC. PROF. SOMCHAI PENGPRECHA, Ph.D., 126 pp.

This research aimed to study the efficiency of base-activated bentonite for removing glycerine from biodiesel prepared from used cooking oil. The biodiesel was produced by transesterification reaction using 6:1 ratio of methanol to oil, 1% wt of sodium hydroxide at 65 °C for 90 minutes. The adsorbents in this study were prepared by activating bentonite with sodium hydroxide solution. Bentonite was activated with 3 M NaOH in DI water at 85 °C for 40 minutes. The characteristics of activated bentonite were characterized by BET, XRD and XRF methods. The specific surface area and average pore diameter of activated bentonite were 46.01 m<sup>2</sup>/g and 7.35 nm, respectively. The other parameters such as weight ratio of bentonite to base solution, concentration of base, time and particles size were also studied. The results showed that 60.14% of glycerine could be removed from crude biodiesel by using 5% of adsorbent at 1:10 weight ratio of clay to base, 120-200 of mesh size, and 30 minutes of adsorption time. The adsorption isotherm of this process was fit to Freundlich equation. The value of acid number was lower than that of specification of biodiesel standard.

Field of study: Environmental Science Student's Signature .....

Academic Year: 2012 Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ ให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงตลอดจนดูแลและใส่ใจการทำงานและการดำเนินชีวิตเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ ไชยิตานนท์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงการดูแลเอาใจใส่ และคำแนะนำที่ดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และ ดร.อนุรักษ์ วินิตสร ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะในงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณหลักสูตรสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ และความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ นางสาวสโรชา เพ็งศรี และ นางสาวจันทร์เลขา ภูทองคำ ในฐานะนิสิตและนิสิตรุ่นพี่ที่ร่วมงานในโครงการวิจัยเดียวกัน ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำที่ดี ความห่วงใยและกำลังใจที่มีให้กันมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ นายสุพัฒน์ เพ็งพันธ์ นางสาวนันทิยา กาวิต และนางสาวจันทร์ทิพย์ ทรงฤทธิ์ ในฐานะเพื่อนนิสิตที่คอยความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำที่ดีให้กันมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณบุคลากรและเพื่อนนิสิตทุกคน จากสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณที่คอยช่วยเหลือ คอยส่งความปรารถนาดีและมีความห่วงใยให้อย่างสม่ำเสมอ สุดท้ายนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงเกิดขึ้นมิได้ ถ้าขาดกำลังใจและแรงสนับสนุนสำคัญจากครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ จนทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สามารถดำเนินและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับดิน.....	3
2.1.1 ความหมายของดิน.....	3
2.1.2 ความสำคัญและองค์ประกอบของดิน.....	3
2.1.3 ขนาดของอนุภาคดิน.....	4
2.1.4 ความหมายของแร่ดิน.....	5
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับดินเบนโทไนต์.....	15
2.2.1 ความหมายของดินเบนโทไนต์.....	15
2.2.2 ชนิดของดินเบนโทไนต์.....	16
2.2.3 องค์ประกอบของดินเบนโทไนต์.....	17
2.2.4 โครงสร้างของดินเบนโทไนต์.....	17
2.2.5 คุณสมบัติของดินเบนโทไนต์.....	18
2.2.6 ประโยชน์ของดินเบนโทไนต์.....	18

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไบโอดีเซล.....	19
2.3.1 ความหมายของไบโอดีเซล.....	19
2.3.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล.....	19
2.3.3 ประเภทของไบโอดีเซล.....	22
2.3.4 คุณสมบัติของไบโอดีเซล.....	23
2.3.5 ข้อดีและข้อเสียของไบโอดีเซล.....	25
2.4 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	28
2.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล.....	28
2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	30
2.5 การทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์.....	33
2.5.1 กระบวนการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์.....	33
2.6 ทฤษฎีการดูดซับ.....	36
2.6.1 ความหมายของการดูดซับ.....	36
2.6.2 ประเภทของการดูดซับ.....	37
2.6.3 แรงเกี่ยวกับการดูดซับ.....	39
2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	41
2.7 ไอโซเทอมการดูดซับ.....	42
2.7.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์.....	43
2.7.2 ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช.....	45
2.7.3 ไอโซเทอมแบบบรูนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์.....	46
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	47
2.8.1 กระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	47
2.8.2 กระบวนการดูดซับด้วยดินเบนโทไนต์.....	48
3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	53
3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	53
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	54



3.3	ขั้นตอนดำเนินการทดลอง.....	55
3.3.1	การเตรียมตัวดูดซับดินเบนโทไนต์.....	57
3.3.2	ศึกษาคุณสมบัติของดินเบนโทไนต์.....	58
3.3.3	ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	59
3.3.4	ศึกษาสภาวะในการดูดซับของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์.....	61
3.3.5	การวิเคราะห์คุณสมบัติของกลีเซอริน.....	66
3.3.6	การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับ.....	66
4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	68
4.1	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติดินเบนโทไนต์.....	69
4.1.1	ผลการวิเคราะห์ดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค SEM.....	69
4.1.2	ผลการวิเคราะห์ดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค Surface area analysis (BET).....	71
4.1.3	ผลการวิเคราะห์ดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD).....	71
4.1.4	ผลการวิเคราะห์ดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF).....	74
4.2	ผลการศึกษาสภาวะในการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวดูดซับดินเบนโทไนต์.....	76
4.2.1	ผลการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการกระตุ้นดินเบนโทไนต์.....	77
4.2.2	ผลการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสในการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับ.....	79
4.2.3	ผลการศึกษาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน.....	81
4.2.4	ผลการศึกษาขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน.....	82
4.2.5	ผลการศึกษาระยะเวลาการตกตะกอนกลีเซอรอลภายหลังการดูดซับ.....	85
4.2.6	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล.....	86
4.3	ผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ชนิดต่างๆ.....	87

บทที่	หน้า
4.3.1 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินของดิน เบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส.....	88
4.3.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินของดิน เบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดและดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส.....	90
4.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล.....	93
4.5 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับกลีเซอรินของดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการ กระตุ้นด้วยเบส.....	94
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	96
รายการอ้างอิง.....	98
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติและมาตรฐานคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล.....	104
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกผลและวิธีการคำนวณ.....	114
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Surface area analysis และ XRD.....	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	126

## สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	แสดงการจัดกลุ่มขนาดอนุภาคตามระบบ USAD และระบบสากล.....	5
ตารางที่ 2.2	แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆทางเคมีในดินเบนโทไนต์.....	17
ตารางที่ 2.3	แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซล.....	24
ตารางที่ 2.4	แสดงลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลในประเทศไทย.....	24
ตารางที่ 2.5	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างข้อดีและข้อเสียของไบโอดีเซล.....	27
ตารางที่ 2.6	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส กรด และเอนไซม์.....	32
ตารางที่ 2.7	แสดงผลกระทบจากสิ่งเจือปนที่มีผลต่อคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลและ เครื่องยนต์.....	33
ตารางที่ 2.8	แสดงลักษณะของน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ โดยอาศัยน้ำล้าง.....	35
ตารางที่ 2.9	แสดงสมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ.....	39
ตารางที่ 4.1	แสดงการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนของดิน เบนโทไนต์.....	71
ตารางที่ 4.2	แสดงชนิดและปริมาณของแร่ธาตุในดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโท ไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส.....	74
ตารางที่ 4.3	แสดงความเข้มข้นและปริมาณสารละลายไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้น ดินเบนโทไนต์ที่สามารถดูดซับกลีเซอรินได้.....	75
ตารางที่ 4.4	แสดงระยะเวลาการสัมผัสในการดูดซับกลีเซอริน.....	79
ตารางที่ 4.5	แสดงปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน.....	81
ตารางที่ 4.6	แสดงขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน.....	83
ตารางที่ 4.7	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและ ไม่มีเมทานอล.....	86
ตารางที่ 4.8	แสดงปริมาณร้อยละโดยหนักของตัวดูดซับกลีเซอรินของดินเบนโทไนต์ทั้ง ทั้ง 2 ชนิด.....	88

ตารางที่ 4.9	แสดงประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสและตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรด.....	90
ตารางที่ 4.10	แสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสและตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรด.....	91
ตารางที่ 4.11	แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับด้วยตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส.....	93
ตารางที่ 4.12	แสดงค่าคงที่ที่ได้จากไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์.....	95

## สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 2.1	แสดงส่วนประกอบของดินโดยปริมาตร.....	4
ภาพที่ 2.2	แสดงโครงสร้างพื้นฐานของหน่วยผลึกของซิลิกาซีท.....	7
ภาพที่ 2.3	แสดงโครงสร้างพื้นฐานของหน่วยผลึกของแผ่นอะลูมินา.....	8
ภาพที่ 2.4	แสดงแบบจำลองโครงสร้างของแร่ดินเหนียว kaolinite.....	10
ภาพที่ 2.5	แสดงแบบจำลองโครงสร้างของแร่ดินเหนียว montmorillonite.....	11
ภาพที่ 2.6	แสดงแบบจำลองโครงสร้างของแร่ดินเหนียว illite.....	12
ภาพที่ 2.7	แสดงลักษณะของดินเบนโทไนต์.....	15
ภาพที่ 2.8	แสดงกระบวนการทรานเอสเทอร์ิฟิเคชั่น.....	28
ภาพที่ 2.9	แสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.....	29
ภาพที่ 2.10	แสดงปฏิกิริยาการเกิดสบู่.....	30
ภาพที่ 2.11	แสดงปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชั่น.....	31
ภาพที่ 2.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $X/m$ และ $C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของ แลงเมียร์.....	44
ภาพที่ 2.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $C_e/(X/m)$ และ $C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับ ของแลงเมียร์.....	44
ภาพที่ 2.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e/(\log X/m)$ และ $\log C_e$ โดยอาศัยสมการ การดูดซับของฟรุนดลิช.....	45
ภาพที่ 2.15	แสดงไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆของ Brunauer-Emmett-Teller.....	47
ภาพที่ 3.1	แสดงแผนภาพขั้นตอนการทดลองโดยสรุป.....	56
ภาพที่ 3.2	แสดงดินเบนโทไนต์ธรรมชาติ.....	57
ภาพที่ 3.3	แสดงดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส.....	58
ภาพที่ 3.4	แสดงการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	61
ภาพที่ 3.5	แสดงการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินเบนโทไนต์.....	64
ภาพที่ 3.6	แสดงขนาดตะแกรงร่อนดินเบนโทไนต์.....	64
ภาพที่ 4.1	แสดงลักษณะและสีของดินเบนโทไนต์.....	68

	หน้า	
ภาพที่ 4.2	แสดงภาพขยายของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติจาก SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	70
ภาพที่ 4.3	แสดงภาพขยายของดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสจาก SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	70
ภาพที่ 4.4	แสดงกราฟโครงสร้างของแร่ธาตุหลักของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD.....	72
ภาพที่ 4.5	แสดงกราฟโครงสร้างของแร่ธาตุหลักของดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD.....	72
ภาพที่ 4.6	แสดงกราฟปริมาณของแร่ธาตุหลักของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF.....	75
ภาพที่ 4.7	แสดงกราฟความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้นดินเบนโทไนต์.....	77
ภาพที่ 4.8	แสดงกราฟค่าความเป็นกรดของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้นดินเบนโทไนต์.....	78
ภาพที่ 4.9	แสดงกราฟระยะเวลาการสัมผัสในการดูดซับของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส.....	79
ภาพที่ 4.10	แสดงกราฟค่าความเป็นกรดของระยะเวลาการสัมผัสในการดูดซับของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส.....	80
ภาพที่ 4.11	แสดงกราฟปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน... ..	81
ภาพที่ 4.12	แสดงกราฟค่าความเป็นกรดของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน.....	82
ภาพที่ 4.13	แสดงกราฟขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน.....	83
ภาพที่ 4.14	แสดงกราฟค่าความเป็นกรดของขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน.....	84
ภาพที่ 4.15	แสดงกราฟระยะเวลาการตกตะกอนของกลีเซอรินหลังการดูดซับ.....	85
ภาพที่ 4.16	แสดงกราฟประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล.....	87
ภาพที่ 4.17	แสดงกราฟปริมาณตัวดูดซับกลีเซอรินในการดูดซับดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิด.....	89

ภาพที่ 4.18	แสดงกราฟค่าความเป็นกรดของปริมาณร้อยละโดยหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอรินของดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิด.....	89
ภาพที่ 4.19	แสดงกราฟประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดกับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส.....	91
ภาพที่ 4.20	แสดงกราฟค่าความเป็นกรดของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสและดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรด.....	92
ภาพที่ 4.21	แสดงกราฟไอโซเทอมการดูดซับกลีเซอรินด้วยสมการฟรุนดลิช.....	94
ภาพที่ 4.22	แสดงกราฟไอโซเทอมการดูดซับกลีเซอรินด้วยสมการแลงเมียร์.....	95

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันราคาน้ำมันได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้มีความพยายามในการหาแหล่งพลังงานทดแทนแหล่งใหม่ ไบโอดีเซลเป็นหนึ่งในทางในแหล่งพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจในปัจจุบันนี้ เนื่องจากไบโอดีเซลผลิตมาจากไขมันสัตว์หรือน้ำมันพืช นอกจากนี้ไบโอดีเซลยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม น้ำมันไบโอดีเซลคือการนำน้ำมันจากพืชหรือไขมันสัตว์หรือแม้แต่ไขมันที่ใช้แล้วมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งอาจแบ่งไบโอดีเซลตามประเภทของน้ำมัน ที่นำมาใช้ได้ ออกเป็น 3 ประเภท คือ น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์บริสุทธิ์ น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการผสมกันระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ และน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ กับแอลกอฮอล์ ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลประเภทสุดท้ายนี้จะมีคุณสมบัติที่เหมือนกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด ทำให้ไม่มีผลกระทบต่อเครื่องยนต์ ซึ่งสามารถนำมาใช้กับรถยนต์ได้ แต่ปัญหาที่ตามนั้นคือต้นทุนการผลิตที่สูง เบนโทไนต์ (Bentonite) เป็นดินเหนียวชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยแร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ จากองค์ประกอบนี้ทำให้เบนโทไนต์มีสมบัติในการดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี นิยมนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมหลากหลาย เช่น ใช้เป็นสารหล่อเย็นในการขุดเจาะสำหรับงานโยธา ใช้เป็นสารฟอกสีหรือการดูดซึม เพื่อทำความสะอาดในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน ใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อสาร หรือใช้ในการปรับความหนืดสำหรับอุตสาหกรรมสีและหมึกพิมพ์ นอกจากนี้เบนโทไนต์ยังเป็นสารที่นิยมนำมาใช้เป็นสารดูดซับกลิ่นของเสียอีกด้วย (Shishir และคณะ, 2010)

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงศึกษาถึงวิธีการผลิตไบโอดีเซลจากวัตถุดิบซึ่งมีต้นทุนต่ำอย่างเช่น น้ำมันพืชที่ผ่านการใช้งานแล้ว และในการศึกษานี้มีความสนใจที่จะใช้วิธีการล้างไบโอดีเซลแบบแห้งโดยอาศัยกระบวนการดูดซับกอลลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส เพื่อเป็นการช่วยลดปริมาณน้ำเสียที่จะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม



## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการดูดซับ
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ดินเบนโทไนต์ดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซล

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎี และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากดินเบนโทไนต์
3. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับ โดยปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ชนิดของตัวดูดซับ ปริมาณของตัวดูดซับ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบปัจจัยและภาวะที่เหมาะสมในการทำไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ใช้แล้วให้มีความบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการดูดซับ
2. สามารถใช้ดินเบนโทไนต์เป็นตัวดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล และสามารถลดปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการล้างไบโอดีเซล

## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับดิน

##### 2.1.1 ความหมายของดิน

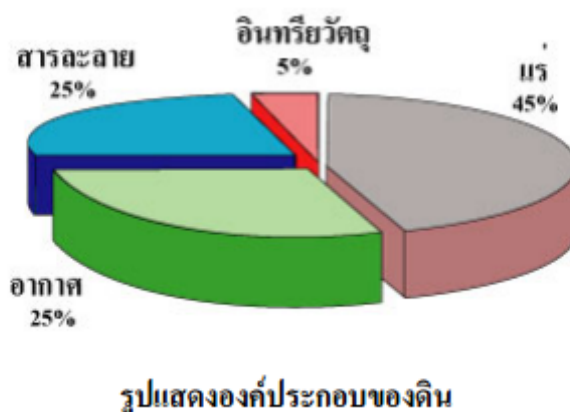
ดิน หมายถึง เทหวัตถุธรรมชาติ (Natural Body) ที่ปกคลุมผิวโลกอยู่บางๆ เกิดขึ้นจากผลของการแปรสภาพหรือผุพังของหินและแร่ และอินทรีย์วัตถุผสมคลุกเคล้ากัน (ศุภจิตา อ่ำทอง, 2551)

ดินเป็นเทหวัตถุธรรมชาติที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยได้รับอิทธิพลรวมของภูมิอากาศและกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตที่มีต่อวัตถุดินกำเนิด โดยมีสภาพภูมิประเทศเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาที่ผ่านมา (ปฐพีเคมีเบื้องต้น, 2551)

##### 2.1.2 ความสำคัญและองค์ประกอบของดิน

ดินสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้

- 1) อินทรีย์วัตถุหรือแร่ (mineral matter) เป็นส่วนที่เกิดจากชิ้นเล็กๆของแร่และหินต่างๆ ที่เกิดการสลายตัวทางเคมี ฟิสิกส์
- 2) อินทรีย์วัตถุ (organic matter) เป็นส่วนที่เกิดจากการเน่าเปื่อยผุพังหรือการสลายตัวของซากพืชและสัตว์ที่เกิดการทับถมกันอยู่บนดิน
- 3) น้ำ (water) น้ำที่มีอยู่บนดินนั้น จะพบอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดินหรืออนุภาคของดิน เรียกว่าช่องหรือที่ว่างนี้ว่า soil space
- 4) อากาศ (air) เป็นที่ว่างในดินระหว่างก้อนดินหรืออนุภาคของดินที่มีอากาศอยู่แก๊สที่พบโดยทั่วไปในอากาศในดินนั้นได้แก่ ไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์



ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบของดินโดยปริมาตร

ที่มา: ปฐพีเคมีเบื้องต้น, 2554

จากภาพที่ 2.1 แสดงให้เห็น 50% ของปริมาตรทั้งหมดนั้นเป็นอยู่ในรูปของของแข็ง ซึ่งรวมถึงส่วนของแร่หรืออนินทรีย์วัตถุและอินทรีย์วัตถุ ส่วนอีก 50% จะเป็นส่วนของช่องว่างในดิน ที่มีอากาศและน้ำ หรือสารละลายดิน โดยสัดส่วนระหว่างอากาศและน้ำในดินจะผันแปรโดยตรง นั่นหมายความว่าถ้าอากาศมีอยู่เต็มช่องว่างแสดงว่าดินนั้นมีความแห้ง แต่ถ้าช่องว่างมีน้ำอยู่เต็มดินก็จะอยู่ในสภาพที่ดินอิ่มตัวด้วยน้ำ

### 2.1.3. ขนาดของอนุภาคดิน

องค์ประกอบในส่วนที่เป็นอนินทรีย์สารในดินนั้น จะอยู่ในสภาวะของชิ้นส่วนที่เรียกว่าอนุภาคของดิน (Soil particle) ซึ่งอาจจะยึดเกาะกันเป็นเม็ดหรือก้อนดิน จะมีขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคของดินมีหลายรูปทรงและขนาดแตกต่างกันออกไป โดยจะกำหนดช่วงขนาดสำหรับแต่ละกลุ่มดังนี้ คือ

- 1) กลุ่มขนาดเม็ดทราย (sand)
- 2) กลุ่มขนาดเม็ดซิลท์ (silt)
- 3) กลุ่มขนาดเม็ดดินเหนียว (clay)

เกณฑ์ที่ใช้ในการจัดกลุ่มของขนาดอนุภาคดินมีเกณฑ์กำหนดอยู่หลายเกณฑ์ แต่ที่นิยมใช้กันจะมีอยู่ 2 เกณฑ์หรือ 2 ระบบคือ แสดงดังตารางที่ 2.1

- 1) ระบบของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา (USDA)
- 2) ระบบสากล

ตารางที่ 2.1 แสดงการจัดกลุ่มขนาดอนุภาคตามระบบ USAD และระบบสากล

กลุ่มขนาดของอนุภาคดิน	ขนาดของอนุภาคดิน (มม.)	
	ระบบ USAD	ระบบสากล
กลุ่มขนาดเม็ดทราย	0.05 - 2.0	0.02 - 2.0
กลุ่มขนาดเม็ดซิลท์	0.002 - 0.05	0.002 - 0.02
กลุ่มขนาดเม็ดดินเหนียว	< 0.002	< 0.002

ที่มา : ปรูฟี่เคมีเบื้องต้น, 2554

จากตารางที่ 2.1 สามารถพิจารณารูปทรงของอนุภาคดินขนาดต่าง ๆ ทั้ง 3 กลุ่มนี้ จะพบว่าอนุภาคเม็ดทรายกับอนุภาคเม็ดซิลท์มีรูปทรงคล้ายทรงกลม ส่วนอนุภาคเม็ดดินเหนียวมีรูปทรงแบนหรือเป็นแผ่น ความแตกต่างกันในเรื่องรูปทรงนี้เป็นปัจจัยที่เกื้อกูลให้อนุภาคเม็ดดินเหนียว ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะภายนอกที่มากกว่ากลุ่มอนุภาคเม็ดทรายและเม็ดซิลท์มากยิ่งขึ้น การที่อนุภาคเม็ดดินเหนียวมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุดนั้น เป็นเหตุผลทำให้กลุ่มเม็ดดินเหนียวนี้มีบทบาททางเคมีมากที่สุด

#### 2.1.4 ความหมายของแร่ดิน

แร่ดินเป็นแร่ที่พบในตะกอนและสลายตัวของเก้าภูเขาไฟ แร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์จัดอยู่ในกลุ่มแร่ซิลิเกตที่เป็นแผ่น (Phyllosilicate) อยู่ในสภาพของคอลลอยด์ ผลึกแร่ดินแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้ (ปิยะรัตน์ สารวงค์, 2545)

1) แร่ดินซิลิเกต (Silicate clays) ได้แก่ แร่ดินที่มีอะลูมิเนียมและซิลิเกตเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ มีโครงสร้างเป็นแผ่นซ้อนๆกัน แร่ดินซิลิเกตยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

ก. กลุ่มแร่ดินขาว (Kaolinite Group) เป็นดินเหนียวแบบ 1:1 คือ มีแผ่นอะลูมินาและแผ่นซิลิกาอย่างละแผ่นประกบเป็น 1 หน่วย

ข. กลุ่มแร่สเมคไทต์ (Smectite or Montmorillonite) เป็นดินเหนียวแบบ 2:1 คือแผ่นซิลิกา 2 แผ่น ประกบแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น เป็น 1 หน่วย

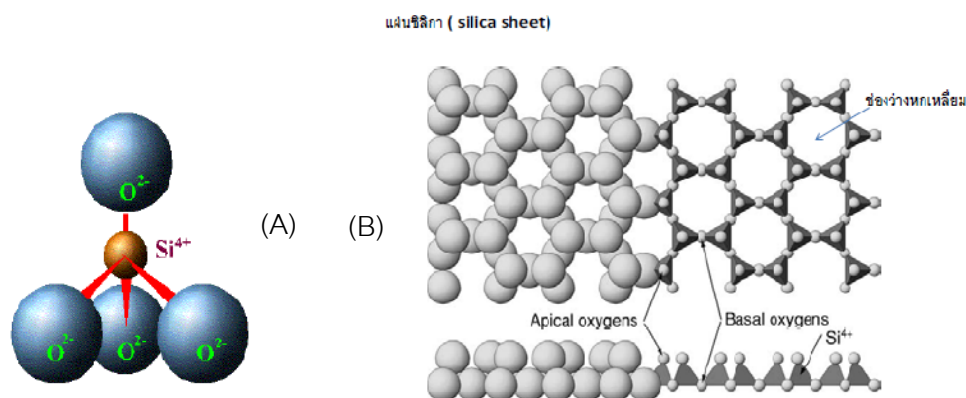
ค. กลุ่มแร่ไมกา (Illite or Hydrus Mica) มีการจัดตัวแบบ 2:1 เช่นเดียวกับกลุ่มสเมคไทต์ แต่ในโครงสร้างมีโปแตสเซียมอยู่ด้วย ทำให้เกิดการขยายตัวได้น้อย

2) แร่ดินที่มีส่วนผสมของเหล็กและอะลูมิเนียม (Iron and Aluminum Clays) ได้แก่ แร่ดินที่มีเหล็กและอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบ

#### 2.1.4.1 หน่วยพื้นฐานโครงสร้าง

หน่วยพื้นฐานของโครงสร้างมีอยู่ 2 ชนิดด้วยกันคือ

1) หน่วยซิลิกาเตตราฮีดรอน (silica tetrahedron) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยธาตุซิลิกอน (silicon) 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยธาตุนอกชั้น 4 อะตอม อัดตัวกันโดยมีอะตอมของ silicon อยู่ตรงกลางเกิดเป็นผลึก แสดงดังภาพที่ 2.2



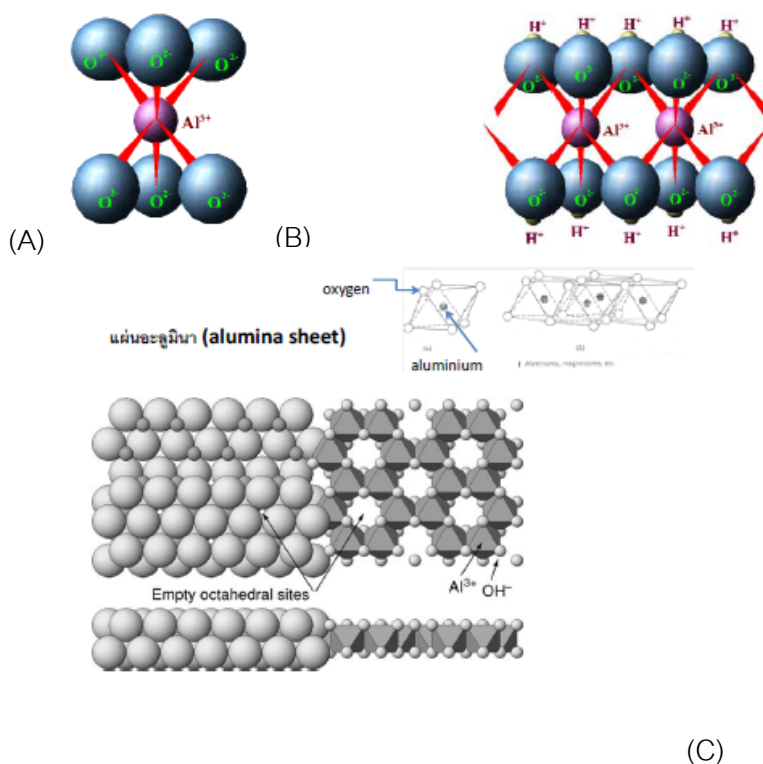
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างพื้นฐานของหน่วยผลึกของซิลิกาซีท

(A) Single silica tetrahedron

(B) Sheet structure ของ silica tetrahedrons

ที่มา : ปฐพีเคมีเบื้องต้น, 2554

2) หน่วยอะลูมินาออกทระฮีดรอน (alumina octahedran) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยอะลูมิเนียม (aluminum) 1 อะตอม ล้อมรอบด้วยออกซิเจน 6 อะตอม อัดตัวกัน โดยมีอะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางเกิดเป็นผลึกมีรูปทรงที่มีแปดด้านขึ้น จึงเรียกหน่วยโครงสร้างนี้ว่า หน่วยอะลูมินาออกทระฮีดรอน หรือ alumina octahedral แต่หน่วยนี้จะเกาะเชื่อมกันเป็นแผ่น โดยมีการเกาะหรือ share ออกซิเจนร่วมกันคล้ายๆกับหน่วยซิลิกาหรือที่เรียกสั้นๆว่าอะลูมินาซีท (alumina sheet) แสดงดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างพื้นฐานของหน่วยผลึกของแผ่นอะลูมินา

- (A) โครงสร้างพื้นฐานของหน่วยผลึก single octahedron  
 (B) โครงสร้างพื้นฐานของหน่วยผลึกของแผ่นอะลูมินา (alumina sheet)  
 (C) โครงสร้างพื้นฐานของหน่วยผลึก single octahedron

ที่มา: ปฐพีเคมีเบื้องต้น, 2554

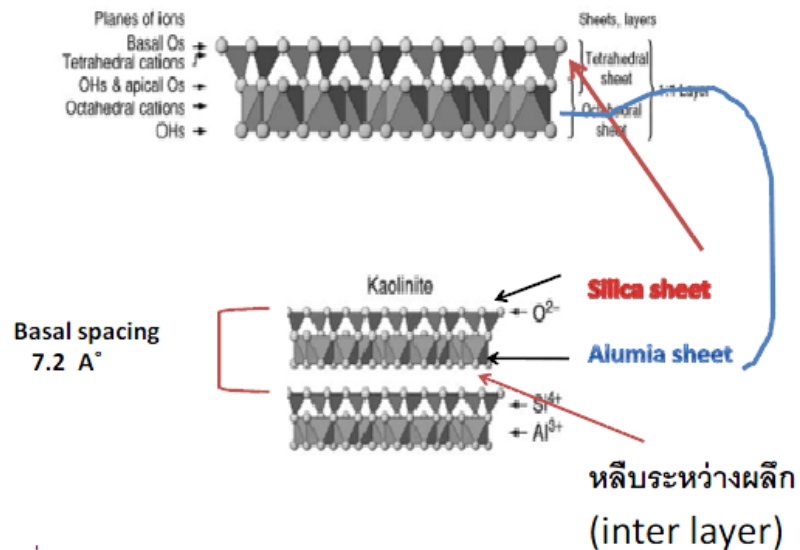
#### 2.1.4.2 ชนิดของแร่ซิลิเกตที่สำคัญ (silicate clay)

อนุภาคดินประกอบด้วยแร่ซิลิเกตหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะประกอบด้วยหน่วยของโครงสร้างพื้นฐานที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.1.4.1 แล้วนั้น ความแตกต่างกันระหว่างแร่ซิลิเกตชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับการเรียงตัวซ้อนกันของแผ่นซิลิกาและแผ่นอะลูมินากับการเปลี่ยนแปลงแทนที่ของ Si และ Al ในแผ่น ดังกล่าวกับธาตุอื่นๆ ซึ่งเรียกการแทนที่นี้ว่า isomorphous substitution ชนิดของแร่ซิลิเกตที่สำคัญได้แก่

1. กลุ่มเคโอลิไนท์ (Kaolinite) เป็นกลุ่มที่พบอยู่ในดินมากที่สุดจึงจัดได้ว่ามีความสำคัญมากกว่าแร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆ แร่ดินเหนียวในกลุ่มนี้ที่สำคัญได้แก่ Kaolinite และ Hallosite

นอกจากนี้ยังมีชนิดอื่นๆ อีก แต่ยังไม่แพร่หลายอยู่ในดิน ในกลุ่มนี้ kaolinite จะเป็นแร่ที่พบมากที่สุด โครงสร้างของแร่ในกลุ่มนี้จะเหมือนกันทุกประการ คือ มีสูตรทางเคมีดังนี้  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  จะแตกต่างกันที่การเรียงซ้อนกับหน่วยของผลึก (crystal unit) เช่น อาจจะซ้อนกันเป็นแนวตั้ง หรือเอียงไปทางซ้ายหรือเอียงไปหน้า ซึ่งในการเรียงตัวแต่ละแบบนี้จะทำให้มีชื่อเรียกต่างกันอย่างออกไป โครงสร้างของ kaolinite นี้จะประกอบด้วยแผ่นซิลิกาหนึ่งแผ่นประกบทับแผ่นอะลูมินาอีกหนึ่ง แผ่น โดยที่ Si และ Al จะร่วมเกาะออกซิเจนตัวเดียวกันในด้านที่ประกบเข้าหากัน ทำให้แผ่นทั้งสองเชื่อมติดกันแน่น รวมกันเข้าเป็นผลึกของแร่ kaolinite โครงสร้างแบบนี้จึงเรียกได้อีกอย่างว่าเป็นโครงสร้างผลึกประเภท 1:1 รูปของผลึก kaolinite เป็นรูปหกเหลี่ยมมีขอบชัดเจน ซึ่งในธรรมชาติผลึกนี้จะเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ คล้ายๆ แผ่นแร่ mica ชั้นต่างๆ นี้จะยึดแน่นไว้ด้วยแรงไฮโดรเจนบอนด์ (hydrogen bond) ดังนั้นช่องว่างระหว่างชั้นนี้อาจเรียกว่า “หลืบ” ระหว่างแผ่นผลึก (inter layer) และระยะทางที่วัดจากขอบบนของผลึกแผ่นบนจนถึงขอบบนของผลึกแผ่นล่างถัดลงมา ซึ่งรวมทั้งระยะกว้างของหลืบนั้น เรียกว่า basal spacing ซึ่งเป็คุณสมบัติเฉพาะผลึกของแร่แต่ละชนิด สำหรับแร่ kaolinite นั้น มีค่า basal spacing เท่ากับ  $7 \text{ \AA}$  หรือแองตรอม (angstrom) แสดงดังภาพที่ 2.4





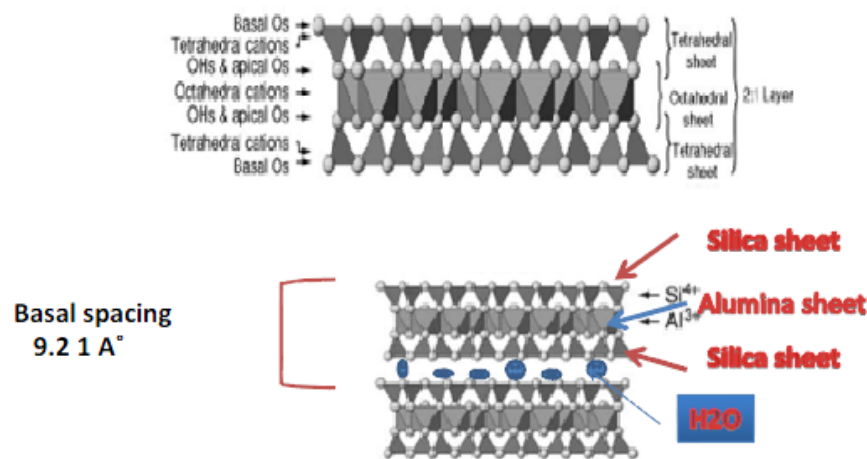
ภาพที่ 2.4 แบบจำลองโครงสร้างของแร่ดินเหนียว kaolinite

ที่มา : ปรจุพีเคมีเบื้องต้น, 2554

ไฮโดรเจนบอนด์ที่ยึดชั้นผลึกของแร่ kaolinite ไว้แน่น เกิดขึ้นระหว่างอะตอม O ของแผ่นซิลิกา กับอะตอม H ของแผ่นอะลูมินา โดยปกติแล้วนั้นแผ่นอะลูมินาจะไม่มี H จะมีเพียงแต่ O ซึ่ง O จะถูกแทนที่ด้วยกลุ่ม  $OH^-$  (ไฮดรอกซิล) แรงยึดไฮโดรเจนบอนด์ค่อนข้างยึดติดกันอย่างเหนียวแน่นมาก จึงทำให้หลิประหว่างแผ่นผลึกนั้นแคบและขยายตัวออกไม่ได้ และอาจทำให้โมกุลของน้ำและแคทไอออนต่างๆ ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปอยู่ในหลิบนั่นได้

คุณสมบัติโดยทั่วไปของดินที่มีแร่ kaolinite มาก คือ เมื่อดินเปียกน้ำจะมีความเหนียวน้อยแต่จะมีความร่วนมาก เนื่องจากผลึกของ kaolinite มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมีการจัดเรียงตัวกันอย่างแน่น อนุภาคของ clay จึงเกิดการแตกร้าวและหักพังยาก ขนาดอนุภาคของ kaolinite จะมีขนาดใหญ่กว่าแร่ดินเหนียวชนิดอื่นๆ นั่นหมายถึง ส่วนใหญ่จะมีขนาดอนุภาคระหว่าง 0.2-2 ไมครอน ( $\mu$ )

2. กลุ่มมอนมอริลโลไนท์ (montmorillonite) แร่ซิลิเกตที่จัดในกลุ่มนี้ที่สำคัญได้แก่ montmorillonite, beidellite, nontronite, mica และ saponite ซึ่งแร่ montmorillonite จัดว่าสำคัญที่สุดเพราะพบมากอยู่ในดินทั่วไป โครงสร้างของแร่กลุ่มนี้ประกอบด้วยซิลิกา 2 แผ่น และแผ่นอะลูมินา 1 แผ่น ซึ่งแทรกอยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นซิลิกาทั้งสอง อะตอม Si และ Al ในแผ่นเหล่านี้ต่างก็เกาะยึด (share) อะตอม O ร่วมกัน ประกอบกันเป็นผลึกของแร่ montmorillonite เนื่องจากโครงสร้างของแร่กลุ่มนี้ประกอบด้วยแผ่นซิลิกา 2 แผ่นและอะลูมินา 1 แผ่น จึงมักเรียกเป็นโครงสร้างประเภท 2:1 แสดงดังภาพที่ 2.5

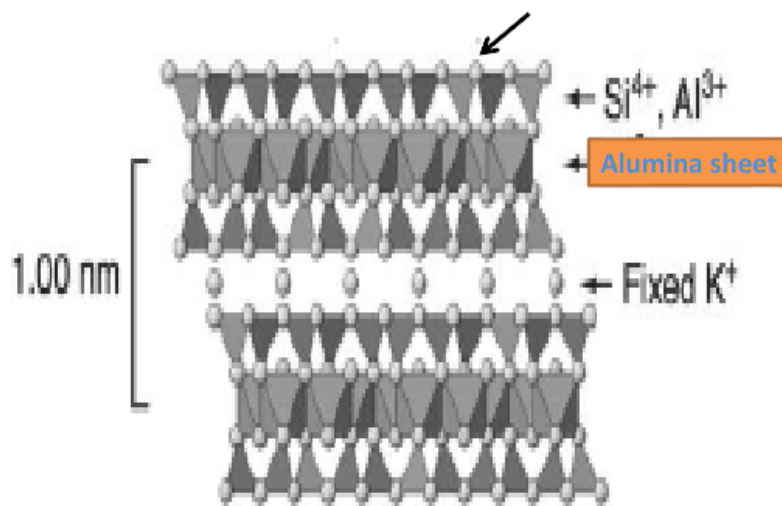


ภาพที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างของแร่ดินเหนียว montmorillonite

ที่มา: ปฐพีเคมีเบื้องต้น, 2554

ผลึกของแร่ montmorillonite นี้จะซ้อนกันเป็นชั้น ๆ เช่นเดียวกับแร่ kaolinite แต่ต่างกันตรงที่หีบระหว่างชั้นผลึกอาจขยายกว้างหรือแคบลงได้ จึงทำให้แร่นี้มี basal spacing ไม่คงที่แน่นอน ตั้งแต่ 9-21 Å แร่ซิลิเกตในกลุ่ม montmorillonite นี้จะมีสูตรโครงสร้างทางทฤษฎีเหมือนกันคือ  $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  แต่จะแตกต่างกันที่ปริมาณการถูกไล่ที่ของอะตอม Si หรือ Al ในโครงสร้างของผลึกด้วยธาตุอื่นๆ ซึ่งเรียกการแทนที่แบบนี้ว่า isomorphous substitution ยกตัวอย่าง เช่น แร่ montmorillonite มีอะตอมธาตุ Mg เข้ามาแทนที่ Al บางตัวในแผ่นอะลูมินา จึงมีสูตรคือ  $\text{Si}_8(\text{Al}_{3.34}\text{Mg}_{0.66})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$

3. กลุ่มอิลไลท์ (Illite) แร่กลุ่มนี้มีองค์ประกอบและโครงสร้างของผลึกคล้ายกับกลุ่ม montmorillonite โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะคล้ายแร่ mica มาก จึงมีชื่อเรียกบางครั้งว่า hydrous mica โครงสร้างของแร่ illite เป็นโครงสร้างประเภท 2:1 คล้ายกับโครงสร้างของ montmorillonite แต่จะต่างกันตรงที่แร่ illite นั้นมี basal spacing ที่มีระยะคงที่ 10 Å หมายถึงผลึกชั้นผลึกที่ซ้อนทับกันอยู่มีระยะคงที่ ไม่สามารถยืดเข้าออกได้อย่าง monmorillonite บางครั้งจึงเรียกแร่กลุ่มนี้ว่าเป็นประเภท non-expanding lattice ส่วนแร่กลุ่ม montmorillonite เป็นประเภท expanding lattice สาเหตุที่ illite ไม่สามารถขยายหรือหดตัวได้เนื่องมาจากการแทนที่ของอะตอมในแผ่นซิลิกาและอะลูมินาคล้ายๆ กับแร่ mica ที่กล่าวแล้ว นั่นคืออะตอม Al เข้าแทนที่ Si บางตัวในแผ่นซิลิกา และทำให้ประจุไม่สมดุลเกิดประจุลบค้างอยู่ ซึ่งเป็นผลให้มีอะตอม K มาชดเชยประจุลบโดยจะคูยึดอยู่ในหลืบตรงช่องหกเหลี่ยมของแผ่นซิลิกา อะตอม K นี้จึงทำหน้าที่เหมือนกลอนที่ยึดแผ่นเหล็กที่ซ้อนกันอยู่บนและข้างล่าง ทำให้ขยับเขยื้อนได้ยาก และมีผลทำให้ผลึกชั้นผลึกของ illite ขยายตัวและหดตัวไม่ได้เมื่อเปียกน้ำหรือแห้ง และไอออนต่างๆ ก็แทรกตัวเข้าไปคูยึดกับพื้นที่ภายในหลืบไม่ได้ด้วย ดังนั้นแร่ illite จึงมี internal surface น้อยมาก แต่ก็ยังมากกว่ากลุ่ม kaolinite แสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 แบบจำลองโครงสร้างของแร่ดินเหนียว illite

ที่มา: ปฐพีเคมีเบื้องต้น, 2554

โครงสร้างแร่ illite นั้นคล้ายแร่ mica มากจะแตกต่างกันตรงปริมาณการแทนที่ของ Si ด้วย Al ในแผ่นซิลิกาที่มีน้อยกว่าของแร่ mica คือ มีการแทนที่เพียง 15 % เมื่อเทียบกับ mica ซึ่งมี Si 25 % ที่ถูกแทนที่ดังนั้นจะมีผลทำให้ปริมาณประจุลบที่ตกค้างมีน้อยกว่า และมีปริมาณ K ที่เข้ามาทำให้ประจุสมมูลนั้นน้อยกว่าด้วยสูตรโครงสร้างของ illite คือ  $K_{1.33}(Si_{6.66}Al_{1.33})Al_4O_{20}(OH)_4$  คุณสมบัติทั่วไปของ illite จะอยู่ระหว่างคุณสมบัติของแร่กลุ่ม kaolinite และกลุ่ม montmorillonite

### 2.1.4.3 คุณสมบัติของแร่ดินซิลิเกต

แร่ดินซิลิเกตมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากแร่ที่มีเหล็กและอะลูมินาในด้านคุณสมบัติของการขยายตัว หดตัว การดูดซับไอออน โดยแร่ดินที่มีเหล็กและอะลูมินัมผสมอยู่จะมีการขยายตัว หดตัว รวมถึงความเหนียวน้อยกว่าแร่ดินซิลิเกต ในกลุ่มของแร่ดินซิลิเกตนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันในแต่ละกลุ่ม เนื่องจากการจัดเรียงตัวที่ต่างกัน โดยแร่ดินที่มีการจัดเรียงตัวประเภท 2:1 มีการขยายตัวและการดูดซับได้มากกว่าการจัดเรียงตัวประเภท 1:1

#### 1) รูปร่างและขนาดของแร่ดินซิลิเกต

ขนาดของอนุภาคแร่ดินซิลิเกตมีขนาดตั้งแต่ 0.01 ถึง 5.0 ไมครอน ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบทางแร่ รูปร่างของแร่ดินซิลิเกตมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (Flake-Like) ประกอบด้วยผลึกของแร่ที่มีโครงสร้างแบน เช่น แร่ไมกา และ อนุภาคของดินเหนียวบางชนิด จะอยู่ในรูปของผลึก 6 เหลี่ยมเป็นมุมอย่างชัดเจน

#### 2) พื้นที่ผิว (Surface Area)

อนุภาคของแร่ดินซิลิเกตมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่อหน่วยน้ำหนัก (Specific Surface Area) สูงมาก เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กและเป็นแผ่นแบนและบางพื้นที่แตกต่างกันไปตามลักษณะ ในอนุภาคที่มีน้ำหนักเท่ากัน อนุภาคที่เป็นรูปทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด ส่วนอนุภาคที่เป็นรูปแบนหรือแผ่นจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด นอกจากพื้นที่ผิวภายนอก (External Surface) อนุภาคดินของแร่ดินเหนียวซิลิเกตบางชนิดยังมีพื้นที่ผิวภายใน (Internal Surface) ซึ่ง

เป็นพื้นที่ผิวที่อยู่ข้างในระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดินเหนียวซิลิเกตที่ซ้อนทับกันเป็นอนุภาคหรือโมเลกุลของดินเหนียวรวมตัวกัน

### 3) ความเหนียว (Cohesion) และอ่อนตัว (Plasticity)

ความเหนียว หมายถึงความสามารถในการเกาะยึดกันระหว่างอนุภาคของดินและความอ่อนนุ่มสามารถปั้นให้เป็นรูปต่างๆ และคงสภาพอยู่ได้เมื่อน้ำมีความชื้นที่เหมาะสม คุณสมบัติด้านความเหนียวและความอ่อนตัวนี้จะส่งผลกับพื้นที่ผิวของดิน โดยดินที่มีความเหนียวและอ่อนตัวสูงจะเป็นดินที่มีพื้นที่ผิวมากจึงมีโอกาสดูดซับยึดอนุภาคของน้ำไว้ในผิวได้มาก ทำให้การยึดเกาะกันเพิ่มมากขึ้นด้วย

### 4) อนุภาคของแร่ดิน

อนุภาคแร่ดินที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกันเป็น Clay Micelles จะมีช่องหรือหลืบระหว่างแผ่นค่อนข้างกว้างและการยึดเกาะไม่เหนียวนักทำให้อนุภาคของแร่ดินที่เปียกน้ำมีการพองตัวและขยายตัวมากขึ้น และหดตัวเมื่อเผาไล่น้ำที่อยู่ภายในอนุภาคให้หมดไป

### 5) ประจุลบและการดูดยึดไอออนบวก

อนุภาคของแร่ดินในธรรมชาติจะมีประจุลบ และสามารถดึงดูดไอออนบวก ทำให้เกิดสภาพของประจุสองชั้น หรือ Ionic Double Layer โดยอนุภาคดินเหนียวเป็นประจุลบที่มีกลุ่มไอออนบวกล้อมรอบอยู่ไอออนบวกเหล่านี้จะถูกยึดติดอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและสามารถถูกแทนที่โดยไอออนบวกชนิดอื่น หรือที่เรียกว่า Exchangeable Cation กระบวนการแลกเปลี่ยน หรือไลที่กันของไอออนบวกนี้เรียกว่า กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange) ดินโดยทั่วไปจะมีปริมาณไอออนบวกชนิดต่างๆ มากน้อยลดลงตามลำดับดังนี้  $H^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$

## 2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับดินเบนโทไนต์

### 2.2.1 ความหมายของดินเบนโทไนต์

ดินเบนโทไนต์จัดเป็นหินแก้วภูเขาไฟที่แปรสภาพเบื้องต้นไปเป็นเนื้อดิน แสดงดังภาพที่ 2.7 ถูกแช่ในน้ำมาเป็นเวลานาน ดินเบนโทไนต์จัดอยู่ในกลุ่มแร่เสม็คไทท์ (Smectite) หรือ มอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) เป็นองค์ประกอบหลัก และส่วนประกอบที่รองลงมาคือ ซิลิกอนไดออกไซด์ เหล็กออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และธาตุอื่นๆอีกประมาณ 10 -20 กว่าชนิด เช่น เฟลสปาร์ส แคลไซต์ ซิลิกา ยิปซัม เป็นต้น

เบนโทไนต์มีการนำมาใช้ประโยชน์ในงานหลาย ๆ ด้าน เช่น การใช้เป็นสารหล่อเย็นในการขุดเจาะสำหรับงานโยธา การใช้เป็นสารฟอกสี หรือสารดูดซึมเพื่อทำความสะอาดในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน การใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อสารหรือใช้ในการปรับความหนืดสำหรับอุตสาหกรรมสีและหมึกพิมพ์ จากสมบัติของเบนโทไนต์ในการดูดซับที่ดี ทำให้มีการนำมาเป็นสารดูดซับกลิ่นของเสียที่เกิดจากการขั้บถ่ายของสัตว์เลี้ยงเบนโทไนต์ที่มีการนำไปใช้งาน



(A)



(B)

ภาพที่ 2.7 ลักษณะของดินเบนโทไนต์ (Bentonite Clay)

(A) เบนโทไนต์ลักษณะหินแก้วภูเขาไฟ

(B) เบนโทไนต์ลักษณะเนื้อดิน

ที่มา : Nalan และคณะ, 2012

ดินเบนโทไนต์เป็นผลึกดินที่มีโครงสร้างเป็นผลึกตาข่ายที่มีขนาดอนุภาคเล็กที่ละเอียดมาก มีพื้นที่ผิวจำเพาะปฐมภูมิ (Primary specific Surface) สูงมาก ระหว่าง 50 – 120 ตารางเมตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวจำเพาะทุติยภูมิ (Secondary specific Surface) สูงที่สุดได้ถึง 840 ตารางเมตรต่อกรัม

ดินเบนโทไนต์มีคุณสมบัติการในการดูดซับที่เป็นอย่างดี สามารถดูดน้ำไว้ได้มากซึ่งส่งผลให้ดินมีลักษณะการขยายตัวสูงตั้งแต่ 5 – 20 เท่าของปริมาตรดินแห้งหรือเกิดการพองตัวของเนื้อดิน คู้มน้ำไว้ได้ปริมาณมากๆ

## 2.2.2 ชนิดของดินเบนโทไนต์

ดินเบนโทไนต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

- 1) โซเดียมเบนโทไนต์ (Sodium bentonite )
- 2) แคลเซียมเบนโทไนต์ (Calcium bentonite)
- 3) แคลเซียมและแมกนีเซียมเบนโทไนต์ (Calcium – Magnesium bentonite)

ซึ่งดินทั้งสามกลุ่มนี้จะมีความสามารถในการพองตัวในน้ำที่แตกต่างกัน โดยดินโซเดียมเบนโทไนต์จะมีความสามารถในการพองตัวได้มากที่สุด ส่วนแคลเซียมเบนโทไนต์ และแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนต์ จะมีความสามารถในการพองตัวได้น้อย

### 2.2.3 องค์ประกอบดินเบนโทไนต์

องค์ประกอบของธาตุต่างๆทางเคมีในดินเบนโทไนต์ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆทางเคมีในดินเบนโทไนต์

SiO <sub>2</sub>	74.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.90
TiO <sub>2</sub>	0.87
K <sub>2</sub> O	0.53
CaO	0.38
MgO	0.33
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02
MnO	0.01
H <sub>2</sub> O	0.67
Cr	42 ppm
Zn	23 ppm
Ge	45 µg/g
ลักษณะการขยายตัว	5 – 20 เท่า
แร่ธาตุอื่นๆอีกกว่า 20 ชนิด	

ที่มา : Nalan และคณะ, 2012

### 2.2.4 โครงสร้างของดินเบนโทไนต์

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของแอมอนต์มอริลโลไนต์ คือมีลักษณะเป็นแผ่นหรือเกล็ด ขนาดเล็กๆซ้อนกัน 3 ชั้น มีแผ่นกลางเป็นแผ่นของกลุ่มโมเลกุล อลูมินัมไฮดรอกซิลโมเลกุล 8 ระนาบ Octahedral Aluminum Hydroxyl อยู่ตรงกลางระหว่าง แผ่นของกลุ่มโมเลกุลซิลิโคนออกไซด์ โมเลกุลสี่เหลี่ยมปิรามิด Siliconoxygen Tetrahedral โดยที่อะตอมของอลูมิเนียมบางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียม หรืออะตอมของธาตุเหล็ก ซึ่งจะช่วยสร้างประจุ



ลบบนระนาบด้านฐานของโมเลกุลซิลิกา และจะมีการสร้างสมดุลโดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแผ่นที่อยู่ติดกัน ในแร่มอนต์มอริลโลไนต์ตามธรรมชาติ ประจุบวกเหล่านี้มักจะเป็นแคลเซียม โซเดียม หรือแมกนีเซียม ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศและสภาวะแวดล้อมในช่วงเวลาที่เกิดการก่อตัวและลักษณะของการก่อตัวของแร่ในทางเคมี แร่มอนต์มอริลโลไนต์ สามารถเขียนเป็นสูตรโมเลกุลได้ดังนี้  $M^+ [Al_2y (Mg Fe)y] Si_4 O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$  โดยที่  $M^+$  หมายถึงประจุบวกที่มาทำการแลกเปลี่ยนประจุกัน อาจเป็นได้ทั้ง แคลเซียม หรือ โซเดียม

### 2.2.5 คุณสมบัติของดินเบนโทไนต์

คุณสมบัติของดินเบนโทไนต์มีความซับซ้อนและยังค่อนข้างมีความเฉพาะตัวแตกต่างกันไปตามแหล่งแร่ คุณสมบัติทางเคมี-กายวิภาค คือการมีขนาดของอนุภาคละเอียดมาก และการมีประจุบวก ที่ทำการแลกเปลี่ยนประจุได้ดี ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีในเรื่องการดูดซึมและการเคลื่อนตัว นอกจากนี้ คุณสมบัติเหล่านี้ยังก่อให้เกิด การนำไปใช้งานแบบใหม่ๆ ได้อย่างมากมาย หลังจากการถลุงและแปรรูป

เบนโทไนต์มีประสิทธิภาพทางด้านความหนืดสูง เป็นตัวประสานที่ดี เป็นสารให้ความหล่อลื่น และมีสมบัติในการดูดซับของเหลวที่ดี และสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้อย่างไรก็ตาม สมบัติของดินก็ยังคงแตกต่างกันไปในเรื่องของความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของมอนต์มอริลโลไนต์ เช่น มอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนโซเดียมแทนที่อยู่ในโครงสร้างเป็นปริมาณมาก จะมีสมบัติในการดูดซับน้ำและเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับสิ่งแวดล้อมได้ดีกว่ามอนต์มอริลโลไนต์ที่มีไอออนแคลเซียมหรือโพแทสเซียมแทนที่

### 2.2.6 ประโยชน์ของดินเบนโทไนต์

ดินเบนโทไนต์มีการนำมาใช้ประโยชน์ในงานหลาย ๆ ด้าน เช่น การใช้เป็นสารหล่อเย็นในการขุดเจาะสำหรับงานโยธา การใช้เป็นสารฟอกสี หรือสารดูดซึมเพื่อทำความสะอาดในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน การใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มปริมาณเนื้อสารหรือใช้ในการปรับความ

หนีดสำหรับอุตสาหกรรมสีและหมึกพิมพ์ จากสมบัติของเบนโทไนต์ในการดูดซับที่ดี ทำให้มีการนำมาเป็นสารดูดซับกลิ่นของเสียที่เกิดจากการขั้บถ่ายของสัตว์เลี้ยงเบนโทไนต์ที่มีการนำไปใช้งาน

ดินเบนโทไนต์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมต่างๆ ตัวอย่างเช่น การทำโคลนเจาะต่างๆ ใช้ผสมกับน้ำ เพื่อช่วยหล่อเลี้ยงหัวเจาะในการเจาะบ่อบาดาลหรือเจาะบ่อน้ำมัน การขจัดสีในน้ำมัน อุตสาหกรรมฟอกสี ใช้ในการผสมอาหารสัตว์เพื่อเพิ่มแร่ธาตุเสริมผลิตเครื่องสำอางค์ การขจัดคราบไขมันในบ่อบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมเซรามิก ทำบ่อเก็บกักน้ำในพื้นที่ที่กักเก็บน้ำไม่อยู่ การเลี้ยงกุ้ง ปลา ช่วยดูดซับสารพิษ ช่วยให้กุ้งลอกคราบง่ายขึ้น บำบัดน้ำเสีย รักษาคุณภาพน้ำ ขจัดแก๊สพิษ โลหะหนัก และกลิ่นไม่พึงประสงค์ ช่วยปรับปรุงคุณภาพดิน ปรับสภาพดินทำให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ดีขึ้น ใช้ในฟาร์มปศุสัตว์ ใช้ผสมกับมูลสัตว์เพื่อลดกลิ่นและลดปริมาณเชื้อโรคได้ดี ใช้ผสมดินหรือคอนกรีตในการก่อสร้างเขื่อนหรือคลองเพื่อป้องกันการรั่วซึม

## 2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับไบโอดีเซล

### 2.3.1 ความหมายของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ได้จากน้ำมันพืช ไขมันสัตว์หรือน้ำมันปรุงอาหารที่ใช้แล้วไปผ่านกระบวนการปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเฟเคชัน โดยทำการเติมแอลกอฮอล์ อาทิ เช่น เมทานอล เอทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ให้เป็นโมโนอัลคิลเอสเทอร์ (Mono alkyl ester) ของกรดไขมันได้แก่ เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Methyl Ester หรือ FAME) หรือเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Ethyl Ester) และไดกลีเซอริน (glycerin) เป็นผลพลอยได้ เนื่องจากเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ได้นี้มีลักษณะคล้ายน้ำมันดีเซล ดังนั้นจึงเรียกเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันว่า ไบโอดีเซล (ศิริวรรณ ศิลป์สกุลสุข, 2550)

### 2.3.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซล

วัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเฟเคชันมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน เช่น น้ำมัน แอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยา วัตถุดิบหลักหรือสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลได้แก่ น้ำมันพืช และไขมันสัตว์ ราคาของวัตถุดิบประเภทน้ำมันหรือไขมันคิดเป็น 0-5% ของราคาไบโอดีเซล

วัตถุดิบที่มีราคาถูกลงอย่างเช่นไขมันจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์บริสุทธิ์ การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการต่างๆสามารถทำให้ต้นทุนมีราคาถูกลง การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชปกติจะราคาแพงกว่าน้ำมันดีเซล 10-15% ราคาที่สูงของไบโอดีเซลจึงถือว่าเป็นอุปสรรคที่สำคัญทางด้านการค้า จึงมีรายงานว่าน้ำมันพืชใช้แล้วสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลได้เช่นกัน ข้อดีของการใช้น้ำมันพืชใช้แล้วเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลคือราคาถูกลง แต่ข้อเสียคือมีการปนเปื้อนมากกว่าน้ำมันพืชที่ยังไม่ได้

วัตถุดิบประเภทน้ำมันที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันมี 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ และน้ำมันพืชใช้แล้ว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 1) น้ำมันพืช

วัตถุดิบที่นำมาผลิตไบโอดีเซลมีหลายชนิดที่สำคัญคือ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันจากเมล็ดฝ้าย และเมล็ดองุ่น นอกจากนี้ยังมีพืชชนิดอื่นๆที่สามารถนำส่วนของน้ำมันมาสกัดเพื่อผลิตไบโอดีเซลได้ เช่น น้ำมันละหุ่ง น้ำมันรำข้าว น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันงา เป็นต้น วิธีการสกัดน้ำมันออกจากพืชโดยการนำพืชหรือวัตถุดิบเหล่านั้นไปบด จากนั้นนำไปสกัดวิธี soxhlet extraction ด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ส่วนอีกวิธีคือ การแช่ด้วยตัวทำละลาย จากนั้นนำไปกรอง น้ำมันพืชประกอบด้วยกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนมากซึ่งมีคาร์บอนตั้งแต่ 14-20 อะตอม ซึ่งมีจำนวนและตำแหน่งของพันธะเคมีที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมี sterol phospholipid กลิ่นและสิ่งเจือปนอื่นๆในน้ำมัน โดยพบว่าน้ำมันจากเมล็ดองุ่นมีชนิดและปริมาณของกรดไขมัน ดังนี้ กรดโอเลอิก > กรดลิโนเลอิก > กรดลิโนเลนิก > กรดปาล์มิติก โดยน้ำมันดอกคำฝอย (safflower oil) และน้ำมันลินซีด (linseed oil) มีกรดลิโนเลอิกและกรดลิโนเลนิกสูง แต่ในขณะที่น้ำมันปาล์มมีกรดไขมันชนิดอิ่มตัวสูงคือ กรดปาล์มิติก ประเทศที่นำน้ำมันจากพืชมาใช้ผลิตไบโอดีเซลบ้างแล้วนั้นได้แก่ ประเทศสหรัฐอเมริกาใช้น้ำมันถั่วเหลือง ประเทศในทวีปยุโรปใช้น้ำมันจากเมล็ดองุ่น ประเทศอินเดียใช้น้ำมันปาล์ม สำหรับประเทศไทยสามารถใช้วัตถุดิบได้หลายชนิด เช่น น้ำมันปาล์มจากผลปาล์ม (palm kernel oil) และน้ำมันมะพร้าว (coconut oil) โดยน้ำมันปาล์มได้นำมาผลิตไบโอดีเซลมากที่สุด รองลงมาคือน้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลืองและสบู่ดำ ตามลำดับ (Rashid และ Anwar, 2008)

## 2) ไขมันสัตว์

ไขมันจากสัตว์ที่นำมาผลิตไบโอดีเซลได้แก่ ไขมันจากไก่ น้ำมันหมู และไขมันจากวัว องค์ประกอบของไขมันพบว่ามีกรดโอเลอิก (C18:1) มากที่สุด ประมาณ 41-44% รองลงมาคือ กรดปาล์มิติก (C16:0) ประมาณ 23% และกรดสเตียริก (C18:0) ประมาณ 13% โดยองค์ประกอบของไขมันสัตว์กับน้ำมันถั่วเหลืองมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดคือ น้ำมันถั่วเหลืองมีกรดลิโนเลอิก (C18:2) มากที่สุด ประมาณ 52% รองลงมาคือกรดโอเลอิกประมาณ 21% และกรดปาล์มิติกประมาณ 11% ไขมันสัตว์จากไก่พบว่ามีปริมาณของกรดไขมันอิ่มตัวมากที่สุด เมื่อเทียบกับไขมันสัตว์ด้วยกัน ส่วนกรดไขมันอิ่มตัวมีปริมาณใกล้เคียงกับน้ำมันหมูและน้ำมันวัว ส่วนน้ำมันถั่วเหลืองมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวถึง 81% ซึ่งอาจเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลืองและไบโอดีเซลจากไขมันสัตว์ เนื่องจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆได้ เช่น กระบวนการออกซิเดชัน (auto-oxidation) และพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ที่มีส่วนสำคัญกับความเสถียรต่อความร้อนของไบโอดีเซล มีการวิจัยเกี่ยวกับปริมาณของกรดไขมันอิ่มตัวที่มีส่วนทำให้เครื่องยนต์เสื่อมสภาพลง ความหนืดของไบโอดีเซลที่มาจากไขมันสัตว์มีค่าสูงกว่าน้ำมันถั่วเหลืองเล็กน้อย แต่ยังไม่เกินเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM เนื่องจากจากน้ำมันพืชจากถั่วเหลืองมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่าไขมันสัตว์ การใช้ไขมันสัตว์ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมีข้อดีคือ ราคาไม่แพง หาได้วัตถุดิบได้จากโรงงานอุตสาหกรรม แต่ยังมีข้อเสียคือ ไบโอดีเซลที่ได้จะมีคุณสมบัติในการไหลเท (pour point) ต่ำ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการกลั่นแยกส่วนก่อนทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Wyatt และคณะ, 2005)

## 3) น้ำมันพืชใช้แล้ว

น้ำมันพืชใช้แล้วมีปริมาณกรดไขมันอิสระที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลได้สูงกว่าน้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ใช้ สามารถทำการตรวจสอบได้โดยการหาค่าความเป็นกรด (acid value) ด้วยวิธีการไทเตรตชัน (titration) พบว่าน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมีค่าความเป็นกรดและมีความหนืดเชิงโคเนติกสูงกว่าน้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ใช้แล้ว ต้องใช้ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ปริมาณเอสเทอร์มากกว่าน้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ใช้ประมาณ 10% ไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันพืชใช้แล้วมีสิ่งเจือปนมากกว่าน้ำมันพืชที่ยังไม่ได้ใช้ แต่มีข้อดีคือทำให้ราคาไบโอดีเซลถูกกว่าน้ำมันปิโตรเลียม การใช้วัตถุดิบที่เหลือทิ้ง เช่น น้ำมันจากร้านอาหารหรือโรงงานอุตสาหกรรมมาผลิตไบโอดีเซล จะ

ทำให้น้ำมันไบโอดีเซลมีราคาถูกลงและช่วยรัฐบาลแบ่งเบาภาระในการกำจัดวัตถุดิบที่ใช้แล้วเหลือทิ้งเหล่านั้น น้ำมันพืชที่ใช้แล้วและไขมันสัตว์ถือว่าเป็นคุณภาพต่ำกว่าน้ำมันพืชกลั่นบริสุทธิ์ ในด้านของปริมาณกรดไขมันอิสระจึงต้องมีการบำบัดก่อนนำมาสู่กระบวนการผลิตไบโอดีเซล เช่น ไขมันสัตว์อาจมีการปนเปื้อนของกระดาษและเศษเนื้อต้องนำมาผ่านกระบวนการกรองก่อน นอกจากนี้ อาจมีการนำเอาน้ำออกและกลั่นด้วยไอน้ำ การฟอกสี การเอาน้ำออกนั้นทำได้โดยการแยกตามความหนาแน่น โดยใช้ถังในแนวราบเพื่อลดความเข้มข้นของน้ำในไขมันที่เหลือทิ้งให้เหลือเพียง 0.5% การเอาน้ำออกมีความจำเป็นสำหรับน้ำมันปรุงอาหารที่อาจมีน้ำปนอยู่ถึง 3% นอกจากนี้ยังมีการกลั่นด้วยไอน้ำเพื่อทำลายโปรตีนที่เหลืออยู่ในไขมัน และการฟอกสีเพื่อเอาโปรตีนที่เนาเปื้อยออก แม้ว่าไขมันสัตว์และน้ำมันพืชใช้แล้วจะเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ราคาไม่แพงสำหรับการผลิตไบโอดีเซลก็ตาม แต่ปริมาณของกรดไขมันอิสระที่สูงทำให้วัตถุดิบประเภทนี้ไม่นิยมนำมาผลิตไบโอดีเซลร่วมกับตัวเร่งชนิดเบสโดยตรง เนื่องจากอาจก่อให้เกิดสบู่ออกมาด้วย

ชนิดของน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เช่น น้ำมันถั่วเหลืองที่ยังไม่ได้ใช้ น้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้แล้ว และน้ำมันถั่วเหลืองกลั่นบริสุทธิ์ เมื่อนำมาเปรียบเทียบผลที่ได้คือไบโอดีเซลที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลืองที่ยังไม่ได้ใช้จะมีความเสถียรมากกว่า รองลงมาคือ น้ำมันที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลืองกลั่นบริสุทธิ์ และน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้แล้ว เนื่องจากน้ำมันถั่วเหลืองที่ยังไม่ได้ใช้มีสารต้านอนุมูลอิสระตามธรรมชาติ เช่น สารโทโคเฟอรอล ซึ่งเป็นสารเพิ่มความเสถียรในน้ำมันและช่วยในการเกิดออกซิเดชันน้อยลง ส่วนในน้ำมันถั่วเหลืองกลั่นบริสุทธิ์พบว่ากระบวนการผลิตมีส่วนทำให้เกิดการสูญเสียสารต้านอนุมูลอิสระไปบางส่วน ในขั้นตอนการกำจัดกลิ่น จะเห็นได้จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้คือ วิตามินอี (D- $\alpha$  tocopherol) ส่วนน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้แล้วมีการเกิดออกซิเดชันและการสลายตัวของสารเนื่องจากอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ไม่พึงประสงค์และความเสถียรของเมทิลเอสเทอร์ลดลง ปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวสูงจะช่วยให้การเก็บรักษามีความเสถียรมากขึ้นเมื่อเทียบกับกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ เช่น auto-oxidation และ polymerization (Ferraric และคณะ, 2005)

### 2.3.3 ประเภทของไบโอดีเซล

ประเภทของไบโอดีเซลแบ่งออกเป็น 3 ประเภท (กรมวิชาการเกษตร, 2549)

### 1) น้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์

ไบโอดีเซลประเภทนี้คือ น้ำมันพืชแท้ๆ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วลิสง หรือน้ำมันถั่วเหลือง หรือน้ำมันจากไขมันสัตว์ อาทิเช่น น้ำมันไบโอดีเซลจากไขมันสัตว์ซึ่งสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมีชนิดอื่นๆ ไม่ต้องนำมาแปลงสมบัติของน้ำมันอีกครั้ง

### 2) ไบโอดีเซลแบบลูกผสม

ไบโอดีเซลประเภทนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมันจากไขมันสัตว์กับน้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล หรืออะไรก็ได้เพื่อให้ไบโอดีเซลที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมากที่สุด

### 3) ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ไบโอดีเซลประเภทนี้มีกระบวนการที่ซับซ้อน ต้องผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คือ การนำน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ไปทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยใช้กรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

## 2.3.4 คุณสมบัติของไบโอดีเซล

จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจะพบว่า การเกิดปฏิกิริยานั้นน้ำมันไบโอดีเซล (FAME) ที่เกิดขึ้นอาจจะมี Monoglyceride, Diglyceride และ Triglyceride ที่เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นและปะปนอยู่ในปฏิกิริยาด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพทางเคมีของน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ก่อนนำไปใช้ โดยทำการตรวจสอบวิเคราะห์ปริมาณ FAME, Monoglyceride, Diglyceride, Triglyceride รวมถึง Methanol ที่เหลือในปฏิกิริยา เนื่องจากไขมันจากพืชและสัตว์นั้นประกอบไปด้วยกรดไขมันที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อนำน้ำมันพืชและสัตว์มาผลิตไบโอดีเซลจึงมีส่วนผสมของ FAME หลายชนิดที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันพืชหรือสัตว์ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้ ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพที่ดีควรได้จาก monounsaturated fatty acid ได้แก่ น้ำมันปาล์ม ไขมันสัตว์ peanut canola เป็นต้น นอกจากนี้

ยังต้องนำไบโอดีเซลที่ผลิตได้ไปทำการตรวจสอบคุณสมบัติอื่นๆในเครื่องยนต์ที่ใช้ เช่น ค่า cold flow properties, cloud point เป็นต้น (ชาคริต ทองอุไร และโชคดี มณีรัตน์, 2552)

### ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของไบโอดีเซล

คุณสมบัติของไบโอดีเซล	
ค่าความถ่วงจำเพาะ	0.88
ค่าความหนืดที่อุณหภูมิที่ 20 °C	7.5
เลขซีเทน	4.9
จุดวาบไฟ (°C)	100
ค่าความร้อนปริมาตร	33,300

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน, 2548

### ตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลในประเทศไทย

ข้อกำหนด	อัตรา	วิธีทดสอบ
ร้อยละเอสเทอร์, %wt	>96.5	EN 14103
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15°C, kg/m <sup>3</sup>	860 – 900	ASTM D 1298
ความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C, cSt	3.5 – 5.0	ASTM D 445
จุดวาบไฟ, °C	>120	ASTM D 93
เถ้าคาร์บอน, %wt	<0.30	ASTM D 4530
จำนวนซีเทน	>51	ASTM D 613
กำมะถัน, %wt	<0.0010	ASTM D 2622
เถ้าซิลิเกต, %wt	<0.02	ASTM D 874
น้ำ, %wt	<0.050	ASTM D 2709
สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด, %wt	<0.0024	ASTM D 5452
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	<96.5	ASTM D 130
ความเสถียรต่อออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 110°C, hour	>10	EN 14112
ค่าความเป็นกรด, mg KOH/g	>0.50	ASTM D 664

ข้อกำหนด	อัตรา	วิธีทดสอบ
ค่าไอโอดีน, g Iodine/100g	<120	EN 14111
ข้อกำหนด	อัตรา	วิธีทดสอบ
Linolenic acid methyl ester	<12.0	EN 14103
เมทานอล, %wt	<0.20	EN 14110
โมนอกลิเซอไรด์, %wt	<0.80	EN 14105
ไดกลีเซอไรด์, %wt	<0.20	EN 14105
ไตรกลีเซอไรด์, %wt	<0.20	EN 14105
กลีเซอรินอิสระ, %wt	<0.20	EN 14105
กลีเซอรินทั้งหมด, %wt	<0.25	EN 14105
โลหะหมู่ 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม)	<5.0	EN 14108 และ EN 14109
โลหะหมู่ 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)	<5.0	EN 14538
ฟอสฟอรัส, %wt	<0.0010	ASTM D 4951

ที่มา: กรมธุรกิจพลังงาน, 2548

### 2.3.5 ข้อดีและข้อเสียของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลที่มาจากพืชหรือสัตว์สามารถผลิตทดแทนได้ ย่อยสลายได้เอง ไม่มีพิษ ขณะที่น้ำมันดีเซลที่ผลิตได้จากปิโตรเลียมและอาจจะมีวันที่จะใช้หมดไปได้และไม่สามารถทดแทนใหม่ได้ นอกจากนี้วัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลอาจเป็นสิ่งที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น น้ำมันที่ใช้แล้วหรือเศษไขมันสัตว์ แต่เมื่อพิจารณาจะพบว่าการใช้พืชที่สามารถสกัดน้ำมัน เช่น ถั่วเหลืองและปาล์มในการผลิตไบโอดีเซลมีข้อดีคือ ทำให้ราคาของพืชชนิดนั้นมีมูลค่าสูงขึ้นและเกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้น ลดการนำเข้าจากต่างประเทศ และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการเกษตรที่นิยมหันมาปลูกพืชที่ให้พลังงานมากขึ้น เมื่อมีการปลูกพืชพลังงานเกินไป อาจจะทำให้พื้นที่ในการปลูกพืชที่ใช้เป็นอาหารลดลงด้วยเช่นกัน ตัวอย่างเช่น ข้าว จะทำให้สถานการณ์ของพืชที่ใช้เป็นอาหารเกิดความวิกฤต ดังนั้นในการกำหนดพื้นที่เพาะปลูกจำเป็นต้องให้มีความสมดุลกันระหว่างพืชพลังงานและพืชที่ใช้เป็นอาหาร เพื่อให้โลกมีความสมดุลทั้งสองด้านและสร้างความมั่นคงทางพลังงานให้กับประเทศที่ไม่สามารถผลิตเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ (อนุชา พรหมวงษ์วา และชัยชาญ ฤทธิเกริกไกร, 2550)



## 1) ข้อดีของไบโอดีเซล

ไบโอดีเซลช่วยลดการปลดปล่อยของเสียที่ปลายท่อไอเสีย เช่น ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ คาร์บอนและกลีน รวมทั้งกำมะถันและสารอะโรมาติกส์มีไฮโดรคาร์บอนสายสั้นและออกซิเจนสูง ทำให้ไม่มีเขม่าหรือควันดำออกมา เนื่องจากการมีเขม่าจะทำให้เครื่องยนต์เสื่อมสภาพและชำรุดได้ง่าย ที่สำคัญคือไม่มีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ออกสู่บรรยากาศและไม่ไปทำลายสภาพแวดล้อมของโลก เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศถูกดูดเข้ามาในพืชเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสง จะเห็นได้ว่าไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและเมื่อนำไปใช้กับเครื่องยนต์พบว่า สามารถใช้ร่วมกับเครื่องยนต์ดีเซลแบบเดิมได้ นอกจากนี้การใช้ไบโอดีเซลยังมีข้อดีกว่าการใช้น้ำมันดีเซลคือไบโอดีเซลมีค่าจุดวาบไฟมากกว่าน้ำมันดีเซล ทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งานรวมทั้งไบโอดีเซลมีค่าการหล่อลื่นสูงซึ่ง จะทำให้เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานที่ยืนยาวขึ้นและลดความถี่ในการเปลี่ยนอะไหล่เครื่องยนต์ (Agarwal และคณะ, 2006)

## 2) ข้อเสียของไบโอดีเซล

การใช้ไบโอดีเซลจะเพิ่มการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ออกสู่บรรยากาศโลก ตัวอย่างเช่น น้ำมันไบโอดีเซลจากถั่วเหลืองจะปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น 12% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ส่วนไบโอดีเซล B20 (ไบโอดีเซล 20% น้ำมันดีเซล 80%) จะปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์เพิ่มขึ้น 2-4% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล ดังนั้นการสร้างกฎเกณฑ์หรือข้อบังคับที่เข้มงวดในการใช้ไบโอดีเซลจึงมีความจำเป็น แม้ว่าการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จะมีปริมาณเล็กน้อยก็ตาม การใช้ไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ไม่ต้องติดตั้งอุปกรณ์อะไรเพิ่มเติม แต่เพื่อเป็นการลดการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จึงมีการใช้ระบบหมุนเวียนก๊าซเสีย (Exhaust Gas Recirculation: EGR) EGR เป็นเทคนิคในการลดการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์จากเครื่องยนต์ดีเซล โดยนำ CO<sub>2</sub> และไอน้ำมาใช้แทนที่ออกซิเจนและไนโตรเจนจากอากาศในการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้การหมุนเวียนเอาก๊าซเสียเข้าเครื่องยนต์ เพื่อเพิ่มค่าทางความร้อนจำเพาะและไอน้ำแทนที่ออกซิเจนและไนโตรเจนจากอากาศในการเผาไหม้ที่ห้องเผาไหม้ การหมุนเวียนเอาก๊าซเสียเข้าเครื่องยนต์เพื่อเพิ่มค่าทางความร้อนจำเพาะของสารผสมและลดปริมาณออกซิเจนในของผสม ปัจจัยทั้งสองนี้ช่วยลดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์แต่จะไปช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ไฮโดรคาร์บอน ฟูละออง และการใช้เชื้อเพลิงจำเพาะ นอกจากนี้ยังส่งผล

ต่อการเพิ่มปริมาณควันและความคงทนของเครื่องยนต์ไบโอดีเซล และยังมีโอกาสที่จะเกิดการออกซิเดชันมากกว่าน้ำมันปิโตรเลียม ทำให้น้ำมันเป็นกรดและเกิดการตกตะกอน อัตราการเกิดออกซิเดชันขึ้นกับโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอน ความเข้มข้นของ heteroatom ชนิดของ heteroatom ความเข้มข้นของออกซิเจนและเวลา (Agarwal และคณะ, 2006)

สำหรับข้อเสียที่ต้องมีการพิจารณาอีกประการหนึ่งคือ การผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริเคชันอาจทำให้เกิดสารพิษที่สามารถปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้ หากในกระบวนการผลิตไม่มีขั้นตอนการกำจัดที่มีประสิทธิภาพ เช่น สารเคมีจำพวกกรดหรือเบสที่ใช้ (ตัวเร่งปฏิกิริยา) รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการแยกไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (อนุชา พรหมวังขวา และชัยชาญ ฤทธิเกริกไกร, 2550)

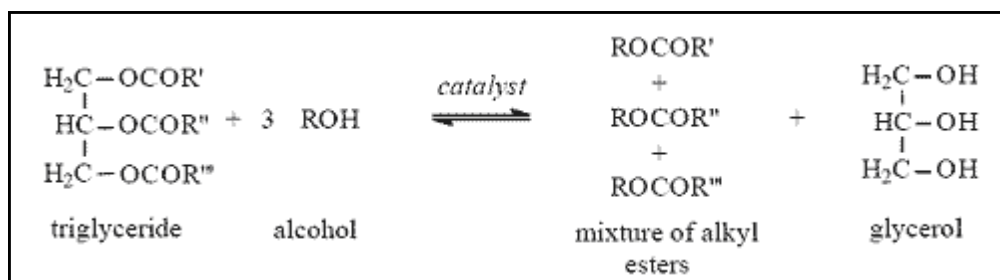
#### ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบระหว่างข้อดีและข้อเสียของไบโอดีเซล

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ไบโอดีเซลสามารถสร้างทดแทนได้ตลอดเวลา โดยมาจากพืช ไขมันสัตว์ รวมทั้งน้ำมันที่ใช้แล้ว	1. เพิ่มการปลดปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO <sub>x</sub> ) แต่สามารถแก้ไขได้โดยใช้ระบบหมุนเวียนก๊าซเสีย (EGR)
2. มีการปลดปล่อยก๊าซเสียออกมาน้อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ กำมะถัน และเขม่า	2. สารเคมีตกค้างที่เหลือจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริเคชัน อาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและจำเป็นต้องได้รับการกำจัดที่มีประสิทธิภาพ
3. ลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ และยังทำให้เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้น	
4. ไบโอดีเซลมีความปลอดภัยในการใช้งานและช่วยยืดอายุการใช้งานเครื่องยนต์ให้ยาวนานขึ้น	

ที่มา: อนุชา พรหมวังขวา และชัยชาญ ฤทธิเกริกไกร, 2550

## 2.4 การสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในน้ำมันพืชให้เปลี่ยนเป็นน้ำมันไบโอดีเซลนั้นสามารถทำได้หลายวิธีดังต่อไปนี้ แสดงดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

ที่มา: ไพจิตร จันทรวงศ์และคณะ, 2529

### 2.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

#### 1) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด

การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เช่น Sulfuric, phosphoric, hydrochloric organic, sulfonic acid แต่กระบวนการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่าการใช้เบสเป็นตัวเร่ง เหมาะสำหรับกลีเซอไรด์ที่มีปริมาณ free fatty acid สูงและมีน้ำมาก

#### 2) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส

การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเช่น Sodium hydroxide, Potassium hydroxide, Carbonates เป็นต้น โดยจะมีการเร่งปฏิกิริยาที่เร็วกว่าการใช้กรดถึง 4,000 เท่า จึงมักนิยมใช้วิธีการนี้มากในการผลิตไบโอดีเซล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ Sodium hydroxide และ Potassium hydroxide

กระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยมีกรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีระดับการเปลี่ยนแปลงไขมันเป็นเมทิลเอสเทอร์ที่สูงในระยะเวลาอันสั้น แต่ก็พบว่า มีข้อเสียหลายประการ เช่น การแยกกลีเซอรอลทำได้ยาก มีการรบกวนของ Free fatty acid และน้ำในปฏิกิริยา

การกำจัดกรดหรือเบสที่ปะปนอยู่กับเมทิลเอสเทอร์ที่ได้และจำเป็นต้องทำการบำบัดน้ำเสียในภายหลัง

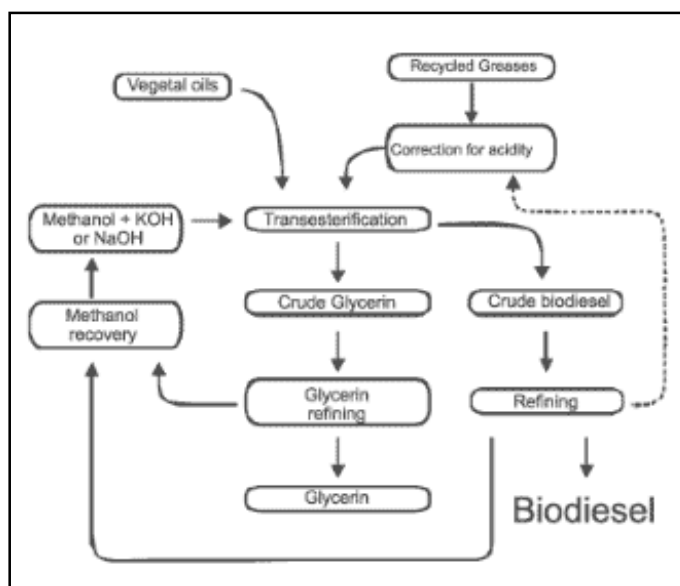
### 3) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์

การใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน สามารถแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้กรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและสามารถแยกกลีเซอรอลออกมาได้ง่าย และมีการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ แต่ในทางตรงกันข้ามนั้นค่าใช้จ่ายในการใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ก็มีความสำคัญอย่างมากเมื่อทำการเปรียบเทียบกับการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทของเหลวเหนือจุดวิกฤต

การใช้ Supercritical fluids (สภาพของเหลวเหนือจุดวิกฤต) โดยทำการให้ความร้อนเริ่มต้นที่ 350 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำปฏิกิริยากับ supercritical methanol เป็นเวลา 240 นาที

ในปัจจุบันการผลิตไบโอดีเซลเป็นอุตสาหกรรมที่นิยมใช้เปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีกระบวนการผลิต แสดงดังภาพที่ 2.9



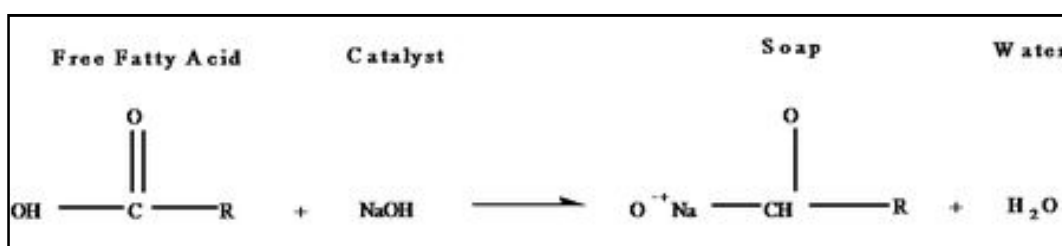
ภาพที่ 2.9 กระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ที่มา: Márcia และคณะ, 2012

## 2.4.2 ปัจจัยที่ผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

### 1) ผลของความชื้นและกรดไขมันอิสระ

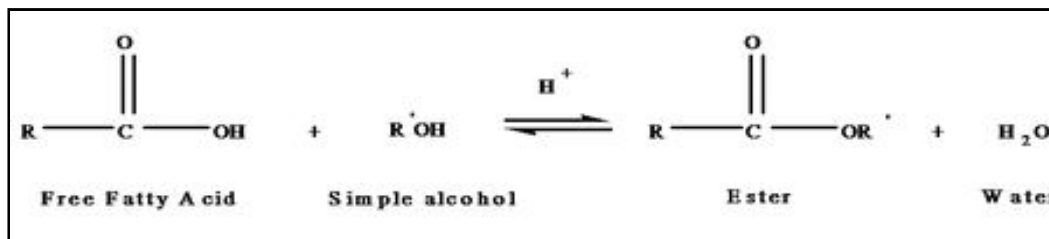
ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และคาร์บอเนต เป็นต้น กลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์ที่จะต้องมีน้ำเป็นองค์ประกอบ เพราะน้ำนั้นเป็นสาเหตุที่ก่อให้เกิดสบู่ในระหว่างการทำปฏิกิริยา แสดงดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ปฏิกิริยาการเกิดสบู่ (Saponification)

ที่มา: Márcia และคณะ, 2012

โดยสบู่ที่เกิดขึ้นจะไปทำการลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนั้นยังส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซลคือ ก่อให้เกิดค่าความหนืดสูงขึ้น ทำให้น้ำมันมีลักษณะเป็นเจลและยากต่อการแยกชั้นของไบโอดีเซลออกจากชั้นกลีเซอรอล ดังนั้นจากภาพที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าปัจจัยที่ทำให้ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดสบู่ขึ้น นอกจากน้ำแล้วยังมีกรดไขมันอิสระ (Free Fatty Acid) ที่มีอยู่ในน้ำมันที่ใช้แล้ว ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันที่ใช้แล้วควรมีค่าความเป็นกรด (Acid value) ไม่เกิน 4 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน เนื่องจากการที่มีกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ใช้แล้วที่มากเกินไปอาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่น้อยลง (Márcia และคณะ, 2012) ส่วนน้ำมันที่ใช้แล้วที่มีค่าความเป็นกรดสูงมากกว่า 4 มิลลิกรัม ต้องทำการลดค่าความเป็นกรดลง โดยใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Acid esterification) แสดงดังภาพที่ 2.11 จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 2.11 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification)

ที่มา: Márcia และคณะ, 2012

### 2) ผลของอัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน

อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันนับว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับได้ ดังนั้น แอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะต้องใช้ในปริมาณที่มากเกินไป เพื่อที่จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปทางขวามากขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มากขึ้นตามลำดับ โดยสัดส่วนที่ใช้ในปฏิกิริยา คือ 3 โมลของแอลกอฮอล์ต่อ 1 โมลของไตรกลีเซอไรด์ ดังนั้นเมื่อใช้อัตราส่วนที่มากเท่าไรก็จะทำให้ได้เอสเทอร์มากขึ้น ในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 จะได้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลมากกว่าร้อยละ 98 (Meher และคณะ, 2006)

### 3) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส กรด หรือเอนไซม์ ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันที่ใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าใช้กรดเป็นตัวเร่ง (Rashid และ Anwar, 2008) โดยตารางที่ 2.6 จะแสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส กรดและเอนไซม์

ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส กรด และเอนไซม์

ตัวแปร	ตัวเร่งชนิดเบส	ตัวเร่งชนิดกรด	เอนไซม์ไลเปส
อุณหภูมิ (°C)	60 - 70	55 - 80	30 - 40
กรดไขมันอิสระในน้ำมัน	เกิดสบู่	เกิดเอสเทอร์	เกิดเอสเทอร์
น้ำในน้ำมัน	มีผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา	มีผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา	ไม่มีผลกระทบต่อ การเกิดปฏิกิริยา
ปริมาณเมทิลเอสเทอร์	ปกติ	ปกติ	สูง
การ recovery กลีเซอรอล	ยาก	ยาก	ง่าย
การทำให้เมทิลเอสเทอร์บริสุทธิ์	ทำการล้างซ้ำ	ทำการล้างซ้ำ	ไม่ต้องล้าง
ราคา	ถูก	ถูก	ค่อนข้างแพง

ที่มา: Hideki และคณะ, 2001

#### 4) ผลของเวลาและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา

อัตราการเกิดไบโอดีเซลจะแปรผันโดยตรงกับเวลา กล่าวคือเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นก็จะทำให้ได้ปริมาณเอสเทอร์มากขึ้นเช่นกัน (Meher และคณะ, 2004) ส่วนอุณหภูมิก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นอย่างมาก ถ้าทำการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้เพียงพอ ปฏิกิริยาที่ได้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง แต่ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับจุดเดือดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ ถ้าเป็นเมทานอลอุณหภูมิที่ใช้คือ 60-70 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Attanatho และคณะ, 2004)

#### 5) ผลของอัตราการกวนผสม

การกวนผสมเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากสำหรับปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เพราะน้ำมันหรือไขมันที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลนั้นไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับแอลกอฮอล์และตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องมีการกวนผสมให้เนื้อสารสัมผัสกัน

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจึงจะเกิดและได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบโอดีเซล (Rashid และ Anwar, 2008)

## 2.5 การทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์

เมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน จัดว่าไม่เป็นน้ำมันไบโอดีเซลหากมีคุณสมบัติไม่ตรงตามมาตรฐานของ EN 14214 ในการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์นั้นมีความสำคัญเนื่องจากไบโอดีเซลที่เกิดขึ้นในประเทศไทยยังมีสิ่งเจือปน (impurities) เช่น กลีเซอรอลอิสระ สบู่ เมทานอล กรดไขมันอิสระ ตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำ และกลีเซอไรด์ สิ่งเจือปนที่กล่าวมานี้ ส่งผลก่อให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของไบโอดีเซลในเครื่องยนต์ แสดงดังตารางที่ 2.7

**ตารางที่ 2.7** แสดงผลกระทบจากสิ่งเจือปนที่มีผลต่อคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลและเครื่องยนต์

สิ่งเจือปน	ผลกระทบ
กรดไขมันอิสระ (Free fatty acid)	การกัดกร่อน, เสถียรภาพการเกิดค่าออกซิเดชันต่ำ
น้ำ (Water)	ไฮโดรไลซิส (การเกิด FFA), การกัดกร่อน, การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย
เมทานอล (Methanol)	ปริมาณค่าความหนาแน่นและความหนืดต่ำ, จุดวาบไฟต่ำ, การกัดกร่อนของอะลูมิเนียมและสังกะสี
กลีเซอไรด์ (Glycerides)	ความหนืดสูง, หัวฉีดอุดตัน, การตกผลึก
ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst, metal)	หัวฉีดอุดตัน, การอุดตันตัวกรอง, การเสื่อมของตัวเครื่องยนต์
กลีเซอรอล (Glycerol)	ปัญหาการตกตะกอน, เพิ่มปลดปล่อยอัลดีไฮด์และอะโครลีน

ที่มา: Berrios และ Skelton, 2008

### 2.5.1 กระบวนการทำให้ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

กระบวนการทำให้ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์นั้นมีหลายกระบวนการ แต่ที่นิยมกันส่วนใหญ่คือ การล้างไบโอดีเซล กล่าวคือ กระบวนการกำจัดสิ่งเจือปนออกจากระบบน้ำมันไบโอดีเซล เช่น กลีเซอรอล เมทานอล และตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากเอสเทอร์หลังจากกระบวนการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เป็นตัวละลายสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออกไป



สำหรับกระบวนการล้างไบโอดีเซลใช้น้ำนั้น เกิดปัญหาที่ตามมาอย่างหนึ่งคือ การเกิดสบูและในสภาวะที่เหมาะสมการเกิดการรวมเฟสของน้ำกับน้ำมัน (Emulsion) สำหรับการเกิดสบูสามารถทำการแก้ไขได้ในขั้นตอนของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน แต่สำหรับการเกิดการรวมเฟสของน้ำกับน้ำมันอาจจะต้องใช้ระยะเวลาานาน หรืออาจเกิดการรวมตัวอย่างถาวร (Permanent Emulsion) ซึ่งไม่แยกออกจากกัน แต่ก็สามารถแก้ไขได้เช่นด้วยวิธีการเติมแคลเซียมคลอไรด์ (Calcium chloride) หรือ เกลือ (Salt) ลงไปผสมเรียกว่าการสะเทิน (Neutralization) โดยแคลเซียมจะรวมตัวกับสบูเป็นยางเหนียวออกมาจากสารเอสเทอร์ จากนั้นจึงทำการล้างด้วยน้ำกลั่น แต่ในกระบวนการล้างไบโอดีเซลนั้นก็ยังสามารถทำได้อีกหลายวิธี ดังนี้

#### 2.5.1.1 การล้างแบบเปียก (Wet washing)

##### 1) การล้างด้วยน้ำกลั่น (Washing with distilled water)

การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยการใช้น้ำอุ่นล้างผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริเคชัน การล้างน้ำอุ่นจะสามารถล้างไบโอดีเซลได้จำนวนหลายครั้ง จนกระทั่งสามารถแยกกลีเซอรอลออกได้หมด ผลสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะใสขึ้นและสามารถกำจัดสิ่งเจือปนออกอื่นๆออกได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Fazal และคณะ (2011) ได้ใช้เทคนิคการทำให้เป็นกลางโดยอาศัยน้ำอุ่นในการล้างผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ จากการทดลองพบว่าสามารถกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ 3 M จากน้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 ในการกำจัดสบูด้วยวิธีนี้ต้องใช้น้ำอุ่นที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส ในการล้างชั้นของเอสเทอร์หลักจากการตั้งทิ้งไว้และให้ความร้อนเพื่อกำจัดเมทานอลที่เหลืออยู่

ตารางที่ 2.8 แสดงลักษณะของน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ โดยอาศัยน้ำล้าง

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

ที่มา: Berrios และ Skelton, 2008

## 2) การล้างด้วยกรด (Washing with acids)

การเติมกรดลงในผลิตภัณฑ์ไบโอเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริเคชัน เพื่อให้เป็นกลางจากตัวเร่งปฏิกิริยาและทำให้เกิดสบู่ลดลง กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นหลังจากการล้างด้วยน้ำเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ไบโอเซลนั้นบริสุทธิ์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Maria และคณะ (2010) ทำการล้างไบโอดีเซลด้วยกรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) 10% โดยล้างฟองที่เกิดขึ้นหลังจากการแยกชั้นของกลีเซอรอลและการทำให้บริสุทธิ์ โดยผ่านหินน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปล้างด้วยน้ำและใช้ซิลิกาเจลเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออกจากผลิตภัณฑ์

### 2.5.1.2 การล้างแบบแห้ง (Dry washing)

กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ด้วยการล้างแบบแห้งหรือการล้างโดยไม่อาศัยน้ำเป็นตัวกลางโดยอาศัยกระบวนการดูดซับของตัวดูดซับ ตัวอย่างของตัวดูดซับ อาทิเช่น แมกนีเซียม ซิลิเกต ถ่านกัมมันต์ ดิน เป็นต้น การดูดซับด้วยตัวดูดซับนั้นยังช่วยกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำมันไบโอดีเซลได้ดี ตัวอย่างเช่น กลีเซอรอล โมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ ทำได้โดย

กระบวนการกรอง ผลจากดูดซับที่ได้คือ มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณกลีเซอไรด์และกลีเซอรอลอิสระและยังมีผลพลอยได้ที่ตามมาคือ ช่วยลดสีจางปี้สีเหลืองและสีได้นำตาลในน้ำมันพืช

## 2.6 ทฤษฎีการดูดซับ

### 2.6.1 ความหมายของการดูดซับ (adsorption)

การดูดซับ หมายถึง การที่โมเลกุลของสารถูกดึงเข้ามาติดผิวของสารดูดซับหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ พลังงานอิสระที่ผิวของสารดูดซับจะมีความสัมพันธ์กับแรงตึงผิวและพื้นที่ผิว ดังสมการ (1) เมื่อความตึงผิว (surface tension) หรือพื้นที่ผิว (surface area) เปลี่ยนไปจะเป็นผลทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพลังงานอิสระที่ผิว ( $\Delta G_{\text{surface}}$ )

$$\Delta G_{\text{surface}} = \gamma A \text{ ----- (1)}$$

เมื่อ  $\Delta G_{\text{surface}}$  = พลังงานอิสระที่ผิว

$\gamma$  = ความตึงผิว

A = พื้นที่ผิว

ปริมาณสารถูกดูดซับขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ความดันและพลังงานศักย์ของอันตรกิริยา (interaction potential energy) ระหว่างสารถูกดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ กับสารดูดซับซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้นและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง (เกรียงศักดิ์, 2539)

## 2.6.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการแยกสารที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือแก๊ส โดยให้สารละลายหรือแก๊สผสมไหลสัมผัสกับตัวดูดซับสารแต่ละชนิดในสารละลาย มีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกันปรากฏการณ์ดูดซับขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับสมบัติทางเคมีที่ผิวของตัวดูดซับ และสารที่เป็นตัวถูกดูดซับโดยกลไกการดูดซับ มี 2 ประเภท (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

### 1) การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นผลที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่สูงมากเมื่อเทียบกับการจัดเรียงตัวของสารประกอบทางเคมี การดูดซับแบบนี้ จะอาศัยการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ โดยมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของทั้งสองฝ่าย มีความร้อนเกิดขึ้นสูง จากการศึกษาดูด้วยอาศัยเทคนิคอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (electron spin resonance) และวัดค่าแมกเนติกซัสเซปทิบิลิตี (magnetic susceptibility) สามารถยืนยันได้ว่าการดูดซับทางเคมี โดยเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) ของตัวดูดซับ ความร้อนของการดูดซับมีค่าประมาณ 60 - 70 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่สารสามารถถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น (monomolecular layer) และเกิดขึ้นอย่างจำเพาะเจาะจงกล่าวคือ จะเกิดได้ก็ต่อเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยากันได้เท่านั้น และการดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดผ่นกลับได้ (irreversible) หรือผ่นกลับได้แต่น้อยมากใช้เวลาการดูดซับนานนั่นคือ เมื่อเกิดการดูดซับแล้ว จะไม่มีการหลุดออกมา หรือ ถ้าหลุดออกมาก็อาจทำได้โดยวิธีที่ยุ่งยาก และ มักมีการเปลี่ยนรูปไป จากการศึกษาก็จะทำให้เกิดการผ่นกลับทำได้โดยการให้ความร้อนกับตัวดูดซับเพื่อขจัดตัวถูกดูดซับให้หลุดออกไปได้

### 4) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption)

การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่มีแรงกระทำอย่างอ่อนๆ ระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะอยู่ที่ผิวของ ตัวดูดซับ โดยอาศัยแรงแวนเดอร์วาลส์

(Van der Waals force) ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยกว่า 50 กิโลจูลต่อโมล การดูดซับทางกายภาพนี้ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดูดซับไว้เป็นแบบชั้นเดียวที่ความดันต่ำ และเป็นแบบหลายชั้น (multi molecular layer) ที่ความดันสูง หรือ ตัวถูกดูดซับอาจเกิดการดูดซับในลักษณะของการดูดซับ แบบหลายชั้นซ้อนกัน (superimpose layers) บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างถาวร จะเกิดการผันกลับได้ง่าย(reversible) การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าการดูดซับทางเคมี หรือ ถึงสภาวะสมดุลได้เร็วกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้น (activation energy) เหมือนการดูดซับทางเคมี

ยกเว้นในกรณีที่รูพรุนของตัวดูดซับ มีขนาดเล็กมากจะทำให้เกิดการดูดซับข้างการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นอย่างไม่จำเพาะเจาะจง กล่าวคือ สารต่างๆสามารถถูกดูดซับบนผิวได้ และการแยกสารที่ถูกดูดซับ ออกจากตัวดูดซับทำได้โดยง่าย เช่น อาจทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิ หรือ ลดความดัน ซึ่งจะเกิดการปล่อย หรือคายสารที่ดูดซับออกมา (desorption) การปลดปล่อยดังกล่าวจะไม่มีผลทำให้ตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับเปลี่ยนแปลงแต่ประการใด การดูดซับ จะไม่ทำให้ตำแหน่งเฉพาะที่ทำหน้าที่ดูดซับหมดไป ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดประเภทแรงแวนเดอร์วาลส์และแรงดึงดูดระหว่างขั้ว มากกว่า การเกิดพันธะ

การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน ตัวอย่างเช่น การดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งภายในโครงสร้างของพื้นที่ผิวมีรูพรุนมากทำให้มีการดูดซับบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับสูงขึ้น ดังนั้นรูพรุนของสารดูดซับจึงมีความสำคัญส่วนการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ โดยมีค่าพลังงานสูงมากในการเกิดพันธะและการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับอย่างแท้จริง สมบัติการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 100-500 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างแข็งแรง	แรงดึงดูดของสารดูดซับสารถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ

ที่มา: เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552

### 2.6.3 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

ในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายจะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (Physical force) และแรงทางเคมี (Chemical force) แรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงวานเดอร์วาลส์ (Vander Waal's force) เช่น partitioning รวมทั้งแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น Ion exchange ส่วนแรงทางเคมีจะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยา (Interaction) ในช่วงสั้นๆ รวมถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนบริเวณผิวด้านใน ซึ่งจะเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (Ligand exchange) พันธะโควาเลนต์ (Covalent bonding) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding)

#### 2.6.3.1 แรงวานเดอร์วาลส์ (Vander Waal's force)

แรงวานเดอร์วาลส์เป็นแรงที่เกิดจากอะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้วสามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้นและสามารถถูกดูดซับด้วยตัว

ดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับ (Desorption) จะกระทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

### 2.6.3.2 แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force)

แรงทางไฟฟ้าสถิตย์เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆ ขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆ เหล่านี้เกิดขึ้นจากผล 3 อย่างดังนี้

- 1) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม
- 2) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (Dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้ว สามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกัน เข้ามา ก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว
- 3) แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วเป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วจะเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดประจุตรงกันข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างกันและกัน

### 2.6.3.3 แรงทางเคมี (Chemical force)

แรงทางเคมีเป็นการยึดเหนี่ยวระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ เนื่องจากปฏิกิริยาของสารประกอบเชิงซ้อน การที่โลหะหนักถูกดูดซับไว้ที่บริเวณผิวของตัวดูดซับต่างๆ ได้ เนื่องจากโลหะหนักเป็นธาตุทรานซิชันที่สามารถทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้กับหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) ที่บริเวณผิวของตัวดูดซับ ลักษณะของแรงทางเคมีนี้เป็นลักษณะที่เป็น

พันธะเคมีที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการให้อิเล็กตรอนหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน ก่อให้เกิดผลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแรงซึ่งกันละกันทางฟิสิกส์ และแรงทางเคมียังเป็นแรงที่ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ (Irreversible) เพราะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากเกินไปและเกิดการจับตัวเป็นสารประกอบทางเคมี

## 2.6.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

### 1) ธรรมชาติของสารดูดซับ

1.1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนพื้นที่ผิว เป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

1.2) ขนาดของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับในกรณีที่วัสดุที่เป็นตัวดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าวัสดุที่เป็นตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุนเพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของวัสดุเคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิววัสดุที่เป็นตัวดูดซับ จะมีคุณสมบัติที่มีผลกับกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์ และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดความสามารถในการดูดซับก็จะลดลง แต่ถ้ามีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นหมู่คาร์บอนิก ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น

### 2) ธรรมชาติของสารถูกดูดซับ

2.1) ความสามารถในการละลายความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลายก่อน



2.2) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

2.3) ความมีขั้วของโมเลกุลความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

### 3) สภาพแวดล้อม

3.1) ผลค่าความเป็นกรด-ด่างโดยทั่วไปแล้วถ้าค่าความเป็นกรด - ด่างลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเกาะติดผิวสารดูดซับได้ดี ทำให้สารดูดซับมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากสารดูดซับทั่วไปมักจะไม่มีความขั้วจนถึงมีความขั้วเล็กน้อย ดังนั้นการที่สารดูดซับมีสภาพเป็นกลางจึงทำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวของสารดูดซับได้ดี

3.2) ผลของอุณหภูมิถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

## 2.7 ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm)

ไอโซเทอมของการดูดซับ เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของก๊าซหรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอมการดูดซับแบ่งออกได้เป็น ดังนี้

### 2.7.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่าย โดยมีสมมติฐานคือ

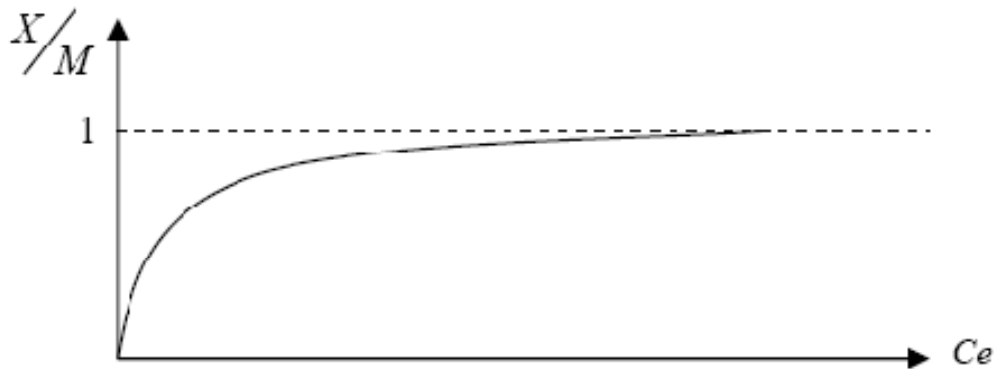
- 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
- 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุล เท่านั้น

ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกันจากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ (2)

$$q_e = X/m = \frac{Q^\circ b C_e}{1 + b C_e} \text{ -----(2)}$$

- เมื่อ
- $q_e$  = ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม
  - $X$  = ปริมาณของตัวดูดซับ
  - $m$  = ปริมาณตัวดูดซับ
  - $C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
  - $Q^\circ$  = ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว
  - $b$  = ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

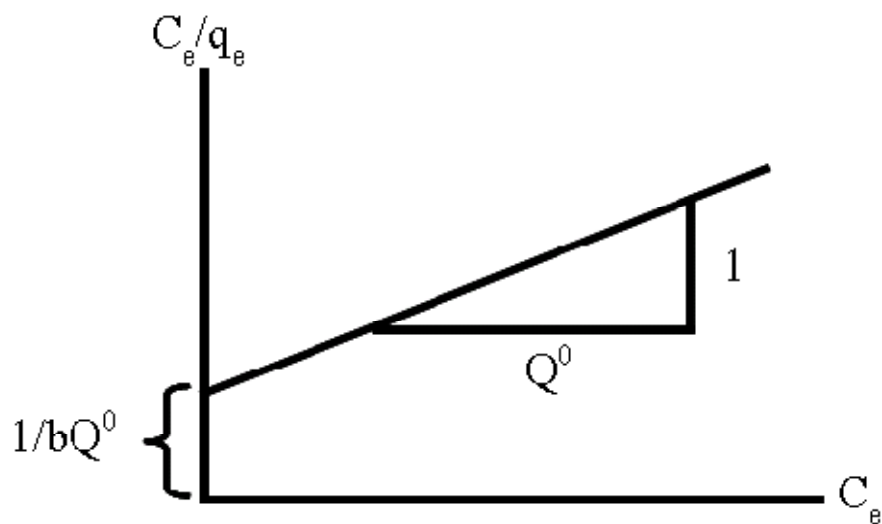
เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $X/m$  กับ  $C_e$  จะได้แสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $X/m$  และ  $C_e$  โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์  
ที่มา: Cynthia และ Raymond, 2006

หรือ 
$$C_e/q_e = 1/bQ^0 + C_e/Q^0 \quad \text{----- (3)}$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกนเป็น  $1/bQ^0$  และมีความชันเท่ากับ  $1/Q^0$  จะได้แสดงดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/(X/m)$  และ  $C_e$  โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์  
ที่มา: Cynthia และ Raymond, 2006

2.7.2 ไอโซเทอมแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

ในปี ค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมี ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการ (4)

$$q_e = X/m = kC_e^{1/n} \text{ ----- (4)}$$

เมื่อ  $C_e$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล

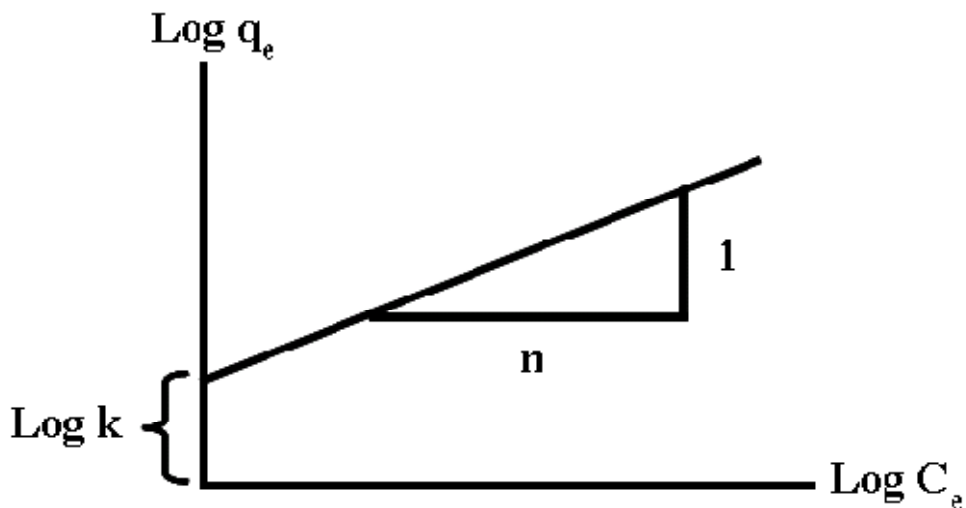
$X/m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

$k_f$  และ  $n$  = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากสมการฟรอนด์ลิช เมื่อนำสมการ (4) ใส่อลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log X/m = \log k_f + (1/n) \log C_e \text{ -----(5)}$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง  $\log X/m$  กับ  $\log C_e$  ที่อุณหภูมิต่างๆ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกนสามารถนำมาหาค่า  $k_f$  ได้ และความชันของกราฟเป็น  $1/n$  จะได้แสดงดังภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e/(\log X/m)$  และ  $\log C_e$  โดยอาศัยสมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช

ที่มา: Abdullah และคณะ, 2009

บางกรณีที่พล็อตกราฟระหว่าง  $\log X/m$  กับ  $\log C_e$  แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟรุนดลิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้สารถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

### 2.7.3 ไอโซเทอมแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer - Emmett - Tellerisotherm)

ในปี ค.ศ. 1903-1986 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน Stephen Brunauer และ ในปี ค.ศ. 1900-1985 Paul Emmett และ Edward Teller ได้ศึกษาการดูดซับหลายชั้นและเสนอสมการ (6)

$$P \cdot P_0 / (P_0 - P) = 1/V_0 k + P/P_0 \quad \text{----- (6)}$$

เมื่อ

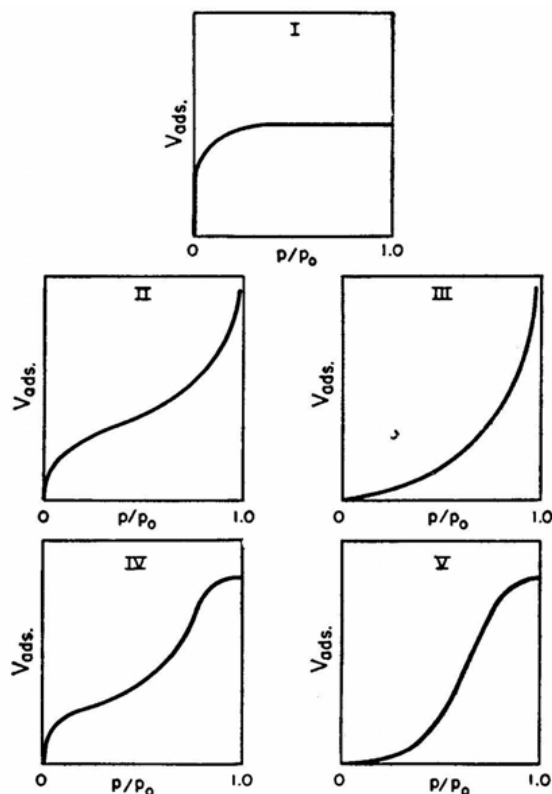
$P$  = ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ

$V$  = ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน

$V_0$  = ปริมาตรที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียว

$P_0$  = ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ

$k$  = ค่าคงที่



ภาพที่ 2.15 ไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ  
ที่มา: Grigoriy และ Marc, 1988

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.8.1 กระบวนการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยน้ำมันพืชใช้แล้ว

วรวิจ บรเวทิงไพบูลย์และคณะ (2553) ศึกษาจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันโดยใช้น้ำมันพืชใช้แล้ว (มีปริมาณกรดไขมันอิสระค่อนข้างต่ำ) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน ASTM D6751-03 ถ้าหากน้ำมันพืชใช้แล้วที่นำมาเป็นวัตถุดิบมีปริมาณกรดไขมันอิสระค่อนข้างสูง ผลที่ได้คือจะเกิดสบู่เป็นจำนวนมากและไบโอดีเซลที่ได้มีคุณภาพแตกต่างจากมาตรฐานมาก ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดสบู่ การเลือกใช้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันในการทำปฏิกิริยาในขั้นแรก ซึ่งสามารถดำเนินปฏิกิริยาได้แม้ น้ำมันพืชใช้แล้วที่เป็นวัตถุดิบจะมีปริมาณกรดไขมันอิสระค่อนข้างสูง จากนั้นจึงทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน ผลการทดลองพบว่าน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับ

ค่ามาตรฐาน ASTM D6751-03 ส่วนการทดลองในขนาดสาริตโดยใช้เครื่องผลิตไบโอดีเซลตามปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน-ทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้น้ำมันที่มีปริมาณกรดไขมันอิสระค่อนข้างสูง ให้ผลที่น่าสนใจ และมีผลได้ที่ ร้อยละ 84.7

Shishir และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาการทดลองปรับปรุงคุณภาพน้ำมันปรุงอาหารให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นโดยใช้ magnesium silicate ร่วมกับอัลคาไลชนิดต่างๆ เช่น calcium hydroxide, calcium oxide, magnesium oxide เป็นตัวดูดซับ พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระและสบู่ที่เจือปนในน้ำมันลดลง

Atadashi และคณะ (2012) จากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและรวบรวมการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เพื่อแสดงถึงข้อดีข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด แต่พบปัญหาการเกิดทำให้ล้างผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก นอกจากนี้ยังมีการใช้  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  หรือ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ต่ำลงเล็กน้อย แต่ช่วยลดการเกิดสบู่ได้มากเนื่องจากการเกิดไฮโดรเจนคาร์บอเนตแทนการเกิดน้ำในขั้นตอนการละลายตัวเร่งปฏิกิริยาในแอลกอฮอล์ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์ไลเพสจะให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ลดขั้นตอนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบสอินทรีย์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าเบสอินทรีย์เล็กน้อยและลดการเกิดสบู่ได้ดังกล่าว พบว่ามีการทดลองใช้พอลิสไตรีน เช่น โครงสร้างหลักสามารถทำได้ แต่มีวิธีการยุ่งยากมากและทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง นอกจากนี้ยังมีการสลายตัวได้ง่ายในขั้นตอนการทำปฏิกิริยา

## 2.8.2 กระบวนการดูดซับด้วยดินเบนโทไนต์

รุจิรา ไทยเอียด (2548) ศึกษาและออกแบบระบบบำบัดฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดินจากโรงเรียนบ้านไผ่คอกวัว อำเภอบางเลน จังหวัดนครปฐม ซึ่งมีฟลูออไรด์ 3.2-3.7 mg/L โดยวิธีการดูดซับแบบที่ละเทด้วยดินเบนโทไนต์ ซึ่งดินเบนโทไนต์ที่ใช้ประกอบด้วยแร่ธาตุต่าง ๆ ตามลำดับดังนี้คือ เหล็ก > ซิลิกอน > อลูมิเนียม > แคลเซียม > โททานเนียม > แมกนีเซียม > โพแทสเซียม ขนาดอนุภาคเท่ากับ 1.65 ไมครอน เผาดินที่ 3 อุณหภูมิคือ 250 °C 550 °C และ 850 °C พบว่าดินเผา 550 °C ให้ประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ดีที่สุด และมีพื้นที่ผิวในการดูดซับ 49.71  $\text{m}^2/\text{g}$  จากการศึกษาผลของไอออนบวกและไอออนลบต่อประสิทธิภาพในการดูดซับฟลูออไรด์ของ

ดินเบนโทไนต์ พบว่าโซเดียมและแคลเซียมไอออนไม่มีผลต่อการดูดซับ ส่วนไอออนลบมีผลต่อการดูดซับตามลำดับคือ คาร์บอเนต > ไฮโดรเจนคาร์บอเนต > ซัลเฟต ส่วนไนเตรตและคลอไรด์ ไม่มีผลต่อการดูดซับ ทำการแอกติเวตดินเบนโทไนต์เผา 550 °C ด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและกรดไฮโดรคลอริกพบว่าดินที่แอกติเวตด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนให้เป็นกลาง อบที่ 105°C จนแห้ง สามารถดูดซับฟลูออไรด์ได้ดีที่สุดคือ 94.30%และพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มเป็น 55.1828 m<sup>2</sup>/g ไอโซเทอมในการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ ได้ค่าความจุในการดูดซับ (Q<sup>0</sup>) และค่าคงที่ในการดูดซับ (b) เท่ากับ 0.2170 mg/g และ 1.0000 L/mg ตามลำดับ

จิรดา รอดเสียงลั้ง และ สุรินทร์ เหล่าสุขสถิตย์ (2551) การวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนน้ำมันปาล์มให้เป็นเมทิลเอสเทอร์โดยกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้เคลย์ 2 ชนิด คือ Refined Kaolinite TK25 และ Trufeed Bentonite จากนั้นกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก โดยใช้น้ำมันปาล์มกับเมทานอล ในอัตราส่วน 1:35.5, 1:67 และ 1:100 โดยโมล การทดลองที่ได้ทำการปรับเปลี่ยนทั้งเวลา และวิเคราะห์หาปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วย HPLC พบว่าเมื่อใช้ Trufeed Bentonite 10 กรัม กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก 2.5 โมลาร์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เวลาในการทำปฏิกิริยา 8 ชั่วโมง ที่อัตราส่วน 1:35.5 โดยโมลของน้ำมันปาล์มต่อเมทานอล ให้เมทิลเอสเทอร์ร้อยละ 74.8 ส่วนเคลย์ ทั้งสองชนิดเมื่อผ่านการกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ กรดไฮโดรคลอริก และกรดไนตริก พบว่าไม่เหมาะใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในขอบเขตที่ทำการศึกษา

โสภีนาฏ เกตุวิชิต และคณะ (2551) ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนต์ พบว่า น้ำมันที่ได้มีค่า L\*, a\* และ b\* เท่ากับ 93.96, -5.06 และ 26.57 ตามลำดับ มีความหนืดลดลงจาก 162.87 cP เหลือ 130.44 cP มีระยะเวลาในการทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นจาก 7.88 ชั่วโมงเป็น 9.66 ชั่วโมง น้ำมันสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนต์ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัว ได้แก่ กรดปาล์มิติก 13.94 % กรดสเตียริก 6.81% และกรดอะราซิดิก 0.22% กรดไขมันไม่อิ่มตัว ได้แก่ กรดโอเลอิก 45.78% กรดลิโนเลอิก 32.28% กรดปาล์มิโตเลอิก 0.77% และกรดลิโนเลอิกชนิดแอลฟา 0.20% โดยมีวิตามินอีเป็นองค์ประกอบอยู่ 54.61 mg/100g น้ำมันสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนต์ที่ระดับความเข้มข้น 1, 5, 10, 15 และ 20 mg/ml มีค่า % antioxidant activity เท่ากับ 37.067, 63.175, 72.320, 72.898 และ 77.592 % ตามลำดับ และมีค่า Inhibitory concentration (IC50) เท่ากับ 2.2905 mg/ml สรุปได้ว่าการดูดซับ



น้ำมันสบู่ดำด้วยเบนโทไนต์มีผลทำให้น้ำมันสบู่ดำมีค่าความหนืดลดลง มีความสว่างมากขึ้นและมีสีเหลืองที่อ่อนลง มีระยะเวลาในการทนต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันเพิ่มขึ้นและมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าน้ำมันสบู่ดำที่ไม่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนต์

กิตติศักดิ์ เสพศิริสุข และคณะ (2552) การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสารพิษฟอโรโบลเอสเทอร์จากน้ำมันสบู่ดำด้วยตัวดูดซับเบนโทไนต์ทางการค้า 7 ชนิด คือ A, B, C, D, E, PTT1 และ PTT2 โดยทำการทดลองดูดซับแบบเป็นครั้ง และใช้ปริมาณเบนโทไนต์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.8, 1, 1.2, 1.5 และ 2 กรัม ในสภาวะการดูดซับที่เหมือนกันคือ ระยะเวลาในการดูดซับ 60 นาที อัตราเร็วในการกวน 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง และระยะเวลาในการสัมผัส 24 ชั่วโมง การทดลองพบว่าเบนโทไนต์ชนิด C และ PTT1 มีความสามารถในการดูดซับสารพิษฟอโรโบลเอสเทอร์ได้ดีที่สุดใกล้เคียงกันคือที่น้ำหนักเบนโทไนต์ 1.5 กรัม สามารถทำให้ปริมาณสารฟอโรโบลเอสเทอร์ลดลง 93.06 และ 92.15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับนอกจากนี้ยังได้ศึกษาเปรียบเทียบไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดริช และแบบแลงก์เมียร์ของเบนโทไนต์ทุกชนิด ซึ่งผลการทดลองสรุปได้ว่าเบนโทไนต์ชนิด C และ PTT1 มีกลไกการดูดซับที่สอดคล้องกับสมการไอโซเทอมของแลงก์เมียร์โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9815 และ 0.9887 และเป็นารดูดซับแบบชั้นเดียว

บุษยา ศรีวิจารณ์ (2552) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยดิน โดยใช้ถ่านกัมมันต์ ดินเบนโทไนต์ ดินเบาและดินกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ ไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะนำไปทำให้บริสุทธิ์โดยใช้ตัวดูดซับ 4 ชนิดเปรียบเทียบกับกระบวนการล้างด้วยน้ำ พบว่าในภาวะที่มีเมทานอลกลีเซอรินในไบโอดีเซลจะถูกกำจัดออกได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นอกจากนั้นกลีเซอรินจะถูกกำจัดออกได้สูงถึงร้อยละ 90 โดยใช้เวลา 1 นาทีในภาวะที่เมทานอลถูกกำจัดออกก่อนทำการดูดซับ จากการทดลองพบว่าดินกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ กระบวนการดูดซับของดินกัมมันต์เกิดขึ้นได้ทั้งแบบชั้นเดียวและหลายชั้น คุณภาพของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ที่ได้พบว่าตรงตามมาตรฐานของไบโอดีเซลที่กำหนดไว้ ดังนั้นกระบวนการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับสามารถใช้ทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์แทนกระบวนการใช้น้ำล้างด้วยข้อดีที่ไม่ก่อให้เกิดน้ำเสีย

ทรงธรรม โพธิ์ถาวร และคณะ (2553) ศึกษาการประยุกต์ใช้ดินฟอกในการดูดซับสบู่ว่วมกับการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ พบว่าเมื่อระเหยเมทานอลออกจากไบโอดีเซลก่อนนำไปขจัดสบู่วด้วยดินฟอก จะทำให้ดินฟอกมีประสิทธิภาพในการทำงานที่ดี ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคือ ใช้ปริมาณดินฟอก 1.0% โดยน้ำหนักของไบโอดีเซลและใช้ระยะเวลาในการกวนผสม 40 นาที และเมื่อนำไปล้างต่อด้วยน้ำพบว่าจะใช้จำนวนน้ำล้างน้อยลง 40% และจำนวนการล้างลดลงเหลือเพียง 3 ครั้ง จากปกติ 5 ครั้ง ทำให้มีน้ำเสียเข้าสู่ระบบน้ำเสียน้อยลง

สุพัตรา บุตรเสรีชัย และ ยุวัฒน์ เงินเย็น (2554) ศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ตะกั่ว ทองแดง และแคดเมียม โดยใช้แร่ดินเบนโทไนต์ นำตัวอย่างของแร่ดินเบนโทไนต์มาวิเคราะห์สมบัติรูพรุนด้วยการดูดซับก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ  $-196^{\circ}\text{C}$  พบว่าแร่ดินเบนโทไนต์มีพื้นที่ผิว BET  $46.92\text{ m}^2/\text{g}$  และมีปริมาตรรูพรุนรวม  $0.13\text{ cm}^3/\text{g}$  หลังจากนั้นทำการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนักบนแร่ดินเบนโทไนต์ พบว่า ปริมาณการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว แคดเมียมและทองแดง คือ 83.02, 48.20 และ 30.99 mg/g ตามลำดับ ที่เวลาสมดุล 36 ชั่วโมง นอกจากนี้ ปริมาณการดูดซับของโลหะหนักทั้งสามชนิดบนแร่ดินเบนโทไนต์ยังไม่ขึ้นกับค่าพีเอชเริ่มต้น และสมการของแลงเมียร์ยังใช้อธิบายการดูดซับได้เป็นอย่างดี

เอกสิทธิ์ เทพวิระกุล (2555) ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้เบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรดเป็นตัวดูดซับ ไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะนำไปทำให้บริสุทธิ์โดยใช้เบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรดเปรียบเทียบกับกระบวนการล้างด้วยน้ำ ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการกระตุ้นเบนโทไนต์ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น และ เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการกำจัดสบู่ได้แก่ ปริมาณเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรด เวลาที่ใช้ในการกำจัดสบู่ และขนาดของอนุภาคเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรด ทำการศึกษาคุณสมบัติของเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรดโดยใช้ เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวและรูพรุน เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และ เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรดมีค่า 55.15 ตารางเมตรต่อกรัม มีค่าเฉลี่ยเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงอยู่ที่ 8.3406 นาโนเมตร เบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรดสามารถกำจัดสบู่ได้ 72.30 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่าเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงมีความเหมาะสมสำหรับทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ คุณภาพของไบโอดีเซลบริสุทธิ์ที่ได้พบว่าตรงตามมาตรฐานของไบโอดีเซลที่กำหนดไว้ ดังนั้นกระบวนการดูดซับโดยใช้เบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรดสามารถใช้ทำ

ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์แทนกระบวนการใช้น้ำล้างด้วยข้อดีที่ไม่ก่อให้เกิดน้ำเสีย

อุไรลักษณ์ ลีเรือง (2555) ศึกษาการใช้เบนโทไนด์กัมมันต์ที่มีซิลิกาต่ำเป็นดูดซับในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยทำการศึกษาค่าผลของความเข้มข้นของกรดซัลฟูริก เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น ขนาดอนุภาค และปริมาณตัวดูดซับของเบนโทไนด์กัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยกรด จากการทดลองพบว่าเบนโทไนด์กัมมันต์ที่มีซิลิกาต่ำจะมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์เมื่อกระตุ้นด้วยกรดซัลฟูริกที่เข้มข้น 0.25 โมลาร์ในน้ำที่ปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใช้ปริมาณเบนโทไนด์กัมมันต์ที่มีซิลิกาต่ำร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างไบโอดีเซลขนาดอนุภาค 60-80 เมช ซึ่งให้ร้อยละการดูดซับสูงเป็น 57.22 และสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว องค์ประกอบทางเคมี และโครงสร้างโดยใช้เทคนิค BET XRF และ FTIR ตามลำดับ พื้นที่ผิวสามารถเพิ่มขึ้นจาก 25.398 เป็น 48.928 ตารางเมตรต่อกรัมโดยการกระตุ้นด้วยกรด การแลกเปลี่ยนไอออนของอลูมิเนียม เหล็ก และแมกนีเซียม ( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  และ  $Mg^{2+}$ ) กับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบในชั้นของออกไซด์วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRF นอกจากนี้ค่าความเข้มของพีค IR ของ Al-OH แบนด์ที่  $915\text{ cm}^{-1}$  จะลดลงหลังจากกระตุ้นด้วยกรด ดังนั้นเบนโทไนด์กัมมันต์ที่มีซิลิกาต่ำซึ่งกระตุ้นด้วยกรดสามารถเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพเพื่อใช้ในกระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental research) เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการทดลอง โดยได้ทำการศึกษาและทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการทดลองชั้น 17 สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการทดลองชั้น 15 ภาควิชาเคมี อคตมามหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 วัสดุุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำมันพืชใช้แล้ว (Used cooking oil): ได้รับความอนุเคราะห์จาก รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตตานต์
2. ดินเบนโทไนต์ (Bentonite): บริษัทไทยนิปอน จำกัดมหาชน
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide): Carlo Erba, analytical grade
4. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid): Merck, analytical grade
5. โทลูอีน (Toluene): Merck, analytical grade
6. โบรโมฟีนอลบลู (Bromophenol blue): Carlo Erba, analytical grade
7. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide): Lab-Scan, analytical grade
8. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพาทาลเลต (Potassium hydrogen phthalate): Merck, analytical grade
9. โพรพานอล (2-Propanol): Carlo Erba, analytical grade
10. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein): Merck, analytical grade
11. ฟีนอลเรด (Phenol Red): Carlo Erba, analytical grade
12. เมทานอล (Methanol): Fisher, analytical grade

13. สารละลายมาตรฐาน 14105 (EN 14105 standard and internal standard solution):  
Supelco
14. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol): บริษัท ไทยออยล์ จำกัด, commercial grade
15. เฮปเทน (Heptane): Merck, analytical grade
16. ไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) : Merck, analytical grade
17. เอทานอล (Ethanol): Merck, analytical grade
18. N-methyl-N-(trimethylsilyl)-trifluoroacetamide: derivatization grade;  
  
Sigma-Aldrich
19. โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate): Lab-Scan, analytical grade
20. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide): Lab-Scan, analytical grade
21. โพแทสเซียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate): Lab-Scan, analytical grade

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope): JEOL, JSM-6480LV
2. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer and heater): IKA, C-MAG HS7
3. เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง: Precisa, BJ 1000C
4. เครื่องชั่งไฟฟ้า 4 ตำแหน่ง: Mettler Toledo, AB S
5. เครื่องดูดสุญญากาศแบบหมุน (Rotary Vacuum Evaporator): Eyela, N-N serie
6. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Refrigerated bench top centrifuge): Sigma, 4-15
7. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET Surface Area Analyzer): Coulter, SA 3100

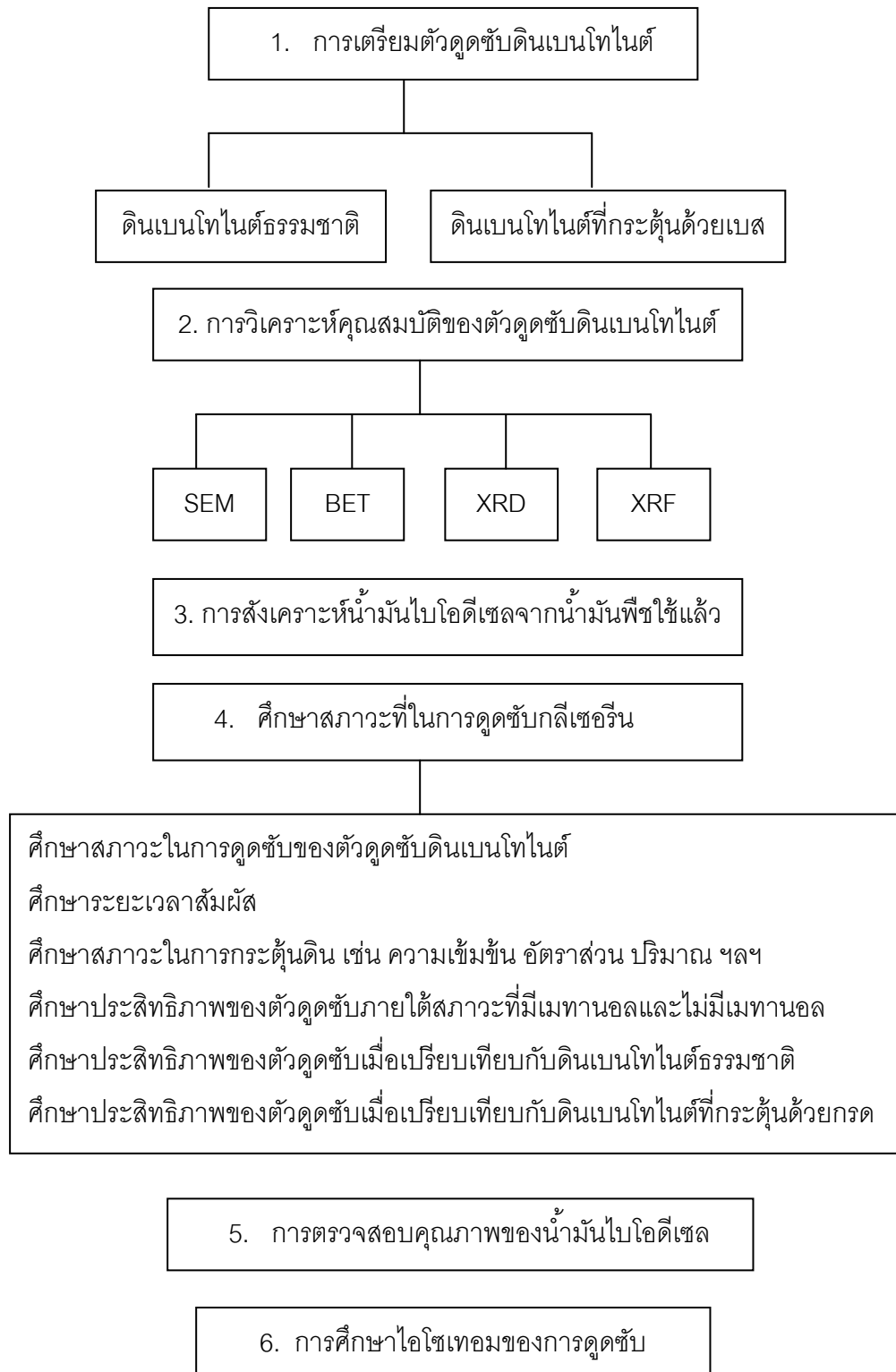
8. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer): Perkin Elmer
9. เครื่องวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค (X-ray fluorescence): Phillip
10. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography): Varian, CP-3800
11. ตู้อบความร้อน (Hot air oven): Memmert, Model UE/BE 200-800
12. โถดูดความชื้น (Desiccator): Model AD48
13. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ Water bath and shaker ; Mammert W350, Germany

### 3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

ในขั้นตอนการดำเนินการทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นหลายขั้นตอน โดยในแต่ละขั้นต่อนั้นประกอบไปด้วย

1. ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับดินเบนโทไนด์
2. ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับดินเบนโทไนด์
3. ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว
4. ขั้นตอนการศึกษาสภาวะในการดูดซับ
5. ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล

ในแต่ละขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น สามารถอธิบายเป็นแผนภาพการทดลองดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลองโดยสรุป

### 3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับดินเบนโทไนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ดินเบนโทไนต์ 2 ชนิดคือ ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส โดยจะทำการเตรียมดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิดดังนี้

#### 3.3.1.1 ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติ (Natural bentonite)

ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติดังภาพที่ 3.2 เตรียมได้จากการเทดินเบนโทไนต์ทั้งหมดลงบนภาชนะ และทำการเก็บตัวอย่างแบบสุ่ม นำตัวอย่างดินเบนโทไนต์ที่ได้ไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการร่อนผ่านตะแกรงละเอียดที่ขนาดต่างๆคือ 80-100, 100-120 และ 120-200 mesh และนำไปเก็บไว้ที่โถดูดความชื้น เมื่อนำมาใช้ในการทดลองต้องนำดินเบนโทไนต์ไปทำการอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.2 ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติ (Natural bentonite)

#### 3.3.1.2 ดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส (Base activated bentonite)

ดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสดังภาพที่ 3.3 เตรียมได้จากการเทดินเบนโทไนต์ธรรมชาติทั้งหมดลงบนภาชนะ และทำการเก็บตัวอย่างแบบสุ่ม นำตัวอย่างดินเบนโทไนต์ที่ได้ไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการกระตุ้นดินโดย



ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน โดยจะทำการเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1.0, 2.0 และ 3.0 M ทำการกระตุ้นดินโดยใช้อัตราส่วนระหว่างดินเบนโทไนต์ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1:10 กล่าวคือ ดินเบนโทไนต์ที่ผ่านกระบวนการอบแห้งปริมาณ 60 กรัม ใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกซ์ในการกระตุ้น 600 มิลลิลิตร ทำการรฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที (Karimi และ Salem, 2011) หลังจากทำการกระตุ้นดินแล้ว นำดินที่ได้ไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำที่ล้างมีค่าพีเอช 7-8 หรือมีค่าเป็นกลาง นำดินที่ผ่านการล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วไปทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดให้ละเอียดและทำการร่อนผ่านตะแกรงละเอียดที่ขนาดต่างๆ คือ 80-100, 100-120 และ 120-200 mesh และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงอีกครั้ง ก่อนนำไปเก็บไว้ในที่โถงดูความชื้น เมื่อนำมาใช้ในการทดลองต้องนำดินเบนโทไนต์ไปทำการอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพที่ 3.3 ดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส (Bentonite activated)

### 3.3.2 ศึกษาคุณสมบัติของดินเบนโทไนต์

เมื่อทำการเตรียมดินเบนโทไนต์แล้ว นำตัวดูดซับที่เตรียมไว้ข้างต้นไปทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับกลีเซอริน โดยทำการศึกษาคุณสมบัติของดินเบนโทไนต์ โดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้

3.3.2.1 วิเคราะห์คุณสมบัติของดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ศึกษาคุณสมบัติของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของดินผ่านภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 100 เท่า และ 2000 เท่า

3.3.2.2 วิเคราะห์คุณสมบัติของดินเบนโทไนต์ด้วย Surface area analysis โดยอาศัยสมการของ BET

ศึกษาคุณสมบัติของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส โดยทำการวิเคราะห์จากการวัดปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับไว้บนผิวดิน เพื่อนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุนและปริมาตรของรูพรุน

3.3.2.3 วิเคราะห์คุณสมบัติของดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

ศึกษาคุณสมบัติของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส โดยทำการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบของดินจาก โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก โดยใช้ความต่างศักย์ 30 กิโลวัตต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์ ในช่วงมุมสองกวาด  $2\theta$  เท่ากับ  $4-60^\circ$  อัตราเร็วในการสองกวาดเท่ากับ 5.00 องศาต่อนาที

3.3.2.4 วิเคราะห์คุณสมบัติของดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)

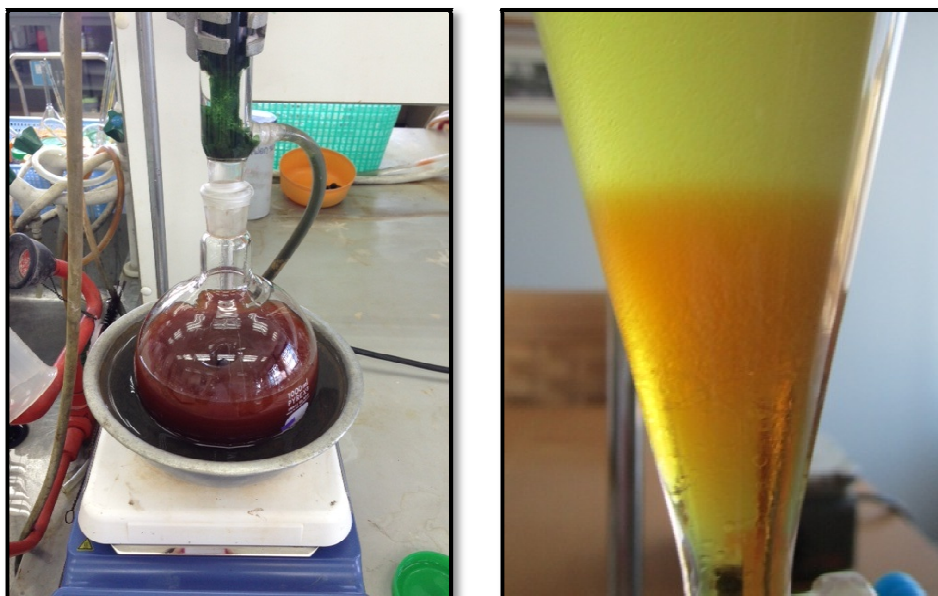
ศึกษาคุณสมบัติของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส โดยทำการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุในดินและศึกษารายละเอียดโครงสร้างผลึกของดิน

### 3.3.3 ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำพีซีใช้แล้ว

ในการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพีซีใช้แล้ว ทำการสังเคราะห์โดยอาศัยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์กล่าวคือ น้ำมัน

พืชใช้แล้วและเมทานอล (Methanol) โดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ใช้อัตราส่วนโมลระหว่างน้ำมันและเมทานอลเท่ากับ 1:6 และโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 (วิธีการคำนวณจากภาคผนวก ก) วิธีการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วมีขั้นตอนดังนี้

1. วัดปริมาณกรดไขมันอิสระที่มีอยู่ในน้ำมันใช้แล้ว (ค่ามาตรฐานควรมีค่าไม่เกิน 0.5%)
2. ชั่งน้ำมันพืชใช้แล้วและน้ำหนักที่คำนวณหาปริมาณเมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ (วิธีการคำนวณจากภาคผนวก ก)
3. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์และทำละลายด้วยเมทานอล ให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
4. ทำการรีฟลักซ์น้ำมันพืชใช้แล้วในขวดก้นกลมปริมาตร 1000 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที
5. เติมสารละลายในข้อที่ 3 ลงไปกวนผสมต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที
6. เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาแล้ว นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปแยกชั้นระหว่างกลีเซอรินและน้ำมันไบโอดีเซลออกด้วยกรวยแยก เป็นเวลา 30 นาที การแยกชั้นนั้นด้านบนจะเป็นชั้นของไบโอดีเซลและชั้นล่างจะเป็นชั้นของกลีเซอริน โดยจะแยกชั้นอย่างชัดเจน จากนั้นทำการไขชั้นของกลีเซอรินออก ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะได้เป็นน้ำมันไบโอดีเซลดิบ (Crude biodiesel) ออกมา จากนั้นจะนำน้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ได้ไปทำให้บริสุทธิ์ต่อไป



ภาพที่ 3.4 การสังเคราะห์บีตาแคโรทีนจากน้ำมันพืชใช้แล้ว

### 3.3.4 ศึกษาสภาวะในการดูดซับของตัวดูดซับดินเบนโทไนด์

การศึกษาสภาวะในการดูดซับนั้น ทำการศึกษาโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซลที่เตรียมจากหัวข้อที่ 3.3.3 โดยบรรจุน้ำมันไบโอดีเซลปริมาณ 50 กรัมลงในขวดทดลองที่มีฝาปิด จากนั้นไปทำการดูดซับที่สภาวะต่างๆ เช่น ระยะเวลาสัมผัส ปริมาณร้อยละของตัวดูดซับ เป็นต้น หลังจากผ่านขั้นตอนการดูดซับที่สภาวะต่างๆ จะทำการเก็บตัวอย่างของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับแล้ว ในปริมาณ 10 กรัม เพื่อทำการไตเตรตหาค่าตัวเร่งของปฏิกิริยาที่เหลือและปริมาณกลีเซอรินที่เหลืออยู่ในน้ำมันไบโอดีเซล

#### 3.3.4.1 การหาระยะเวลาสัมผัส

นำน้ำมันไบโอดีเซลมาผ่านกระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ธรรมชาติที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่ระยะเวลาต่างกันคือ 10, 20 และ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที และทำการตั้งทิ้งไว้ให้ตัวดูดซับตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับแล้ว มาทำการไตเตรตเพื่อหาปริมาณกลีเซอริน

### 3.3.4.2 การหาปริมาณร้อยละของตัวดูดซับ

นำน้ำมันไบโอดีเซลมาผ่านกระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ธรรมชาติโดยใช้ปริมาณร้อยละของตัวดูดซับที่แตกต่างกันคือ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และทำการตั้งทิ้งไว้ให้ตัวดูดซับตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับแล้ว มาทำการไตเตรตเพื่อหาปริมาณกลีเซอริน

### 3.3.4.3 การหาสถานะในการกระตุ้นตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ด้วยเบส

#### 1. การหาอัตราส่วนในการกระตุ้นตัวดูดซับ

นำน้ำมันไบโอดีเซลมาทำการดูดซับด้วยดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 M โดยใช้อัตราส่วนที่ต่างกัน กล่าวคือ อัตราส่วนดินต่อสารละลายเบสเท่ากับ 1:5, 1:10 และ 1:15 ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นนำดินที่ผ่านการกระตุ้นมาดูดซับน้ำมันไบโอดีเซล โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งไว้ให้ตัวดูดซับตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับแล้ว มาทำการไตเตรตเพื่อหาปริมาณกลีเซอริน เพื่อทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการทดลองนี้

#### 2. การหาความเข้มข้นในการกระตุ้นตัวดูดซับ

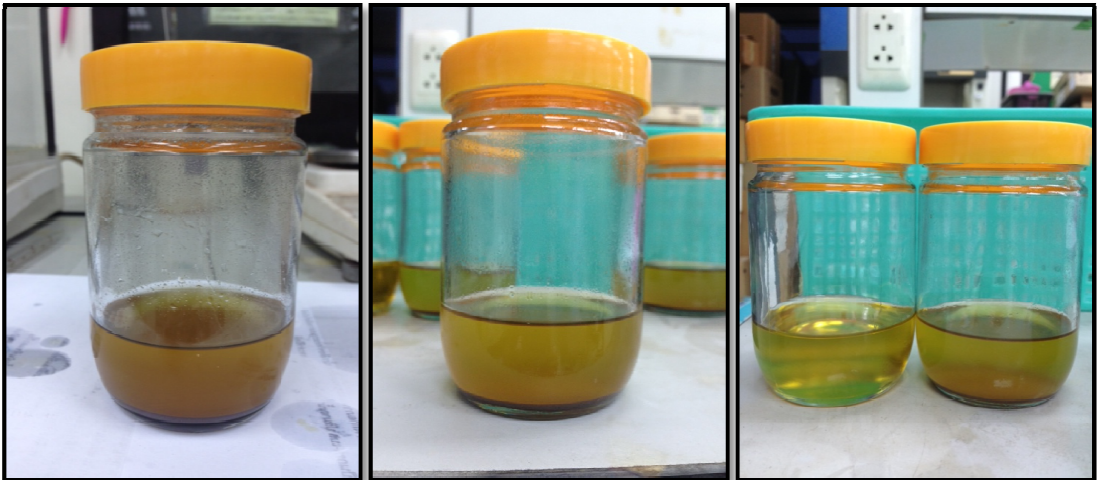
นำน้ำมันไบโอดีเซลมาทำการดูดซับด้วยดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นของสารละลายที่ต่างกัน คือ 1, 2 และ 3 M ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที จากนั้นนำดินที่ผ่านการกระตุ้นมาดูดซับน้ำมันไบโอดีเซลที่อุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ทิ้งไว้ให้ตัวดูดซับตกตะกอนเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับแล้ว มาทำการไตเตรตเพื่อหาปริมาณกลีเซอริน และวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด เพื่อทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นที่ดีที่สุดในการทดลองนี้

### 3. การหาเวลาการตกตะกอนของกลีเซอรินหลังการดูดซับ

นำน้ำมันไบโอดีเซลมาทำการดูดซับด้วยดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 M ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นที่สภาวะความเข้มข้นและปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม) จากนั้นนำดินที่ผ่านการกระตุ้นมาดูดซับน้ำมันไบโอดีเซลที่อุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำมาตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอนที่เวลาแตกต่างกันคือ 10 และ 30 นาที จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับแล้ว มาทำการไตเตรตเพื่อหาปริมาณกลีเซอริน เพื่อทำการหาเวลาการตกตะกอนที่ดีที่สุดในการทดลองนี้

### 4. การหาขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ

นำน้ำมันไบโอดีเซลมาทำการดูดซับด้วยดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 3 M ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นที่สภาวะความเข้มข้นและปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม) ด้วยขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันคือ 80-100, 100-120 และ 120-200 mesh จากนั้นนำดินที่ผ่านการกระตุ้นมาดูดซับน้ำมันไบโอดีเซลที่อุณหภูมิห้อง ด้วยอัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำมาตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน 30 นาที จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับแล้ว มาทำการไตเตรตเพื่อหาปริมาณกลีเซอริน เพื่อทำการหาขนาดอนุภาคของตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการทดลองนี้



ภาพที่ 3.5 การดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินเบนโทไนด์



ภาพที่ 3.6 ขนาดตะแกรงร่อนดินเบนโทไนด์ที่ขนาด mesh แตกต่างกันคือ 80-100, 100-120, 120-200 mesh ตามลำดับ

3.3.4.4 การศึกษาหาประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยดินเบนโทไนต์ภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล

การดูดซับกลีเซอรินในสภาวะที่น้ำมันไบโอดีเซลมีเมทานอลสามารถกำจัดเมทานอลได้โดยการใช้เครื่องระเหยสูญญากาศ (Rotary evaporator) ก่อนนำน้ำมันไบโอดีเซลไปเข้าสู่กระบวนการดูดซับ ทำการระเหยเมทานอลที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ในการศึกษาหาประสิทธิภาพของการดูดซับนั้นจะใช้ตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด คือ ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติ และดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสที่มีความเข้มข้น 3 M ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และทำการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมาทำการวิเคราะห์หาค่ากลีเซอริน โดยวิธีการไตเตรตต่อไป

3.3.4.5 การศึกษาหาประสิทธิภาพการดูดซับ เปรียบเทียบตัวดูดซับระหว่างดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส

ทำการเปรียบเทียบการดูดซับระหว่างตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ทำการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และทำการตั้งทิ้งไว้ในตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมาทำการวิเคราะห์หาค่ากลีเซอริน โดยวิธีการไตเตรตต่อไป

3.3.4.6 การศึกษาหาประสิทธิภาพการดูดซับ เปรียบเทียบตัวดูดซับระหว่างดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรดและดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส

ทำการเปรียบเทียบการดูดซับระหว่างตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดและดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรดที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ทำการดูดซับที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และทำการตั้งทิ้งไว้ในตกตะกอนเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมาทำการวิเคราะห์หาค่ากลีเซอริน โดยวิธีการไตเตรตต่อไป



### 3.3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของกลีเซอรอล

#### 3.3.5.1 การวิเคราะห์หาปริมาณตัวเร่งและกลีเซอรอลด้วยวิธีไตเตรตชัน

ในการหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือและหาปริมาณกลีเซอรอลที่เหลืออยู่ในน้ำมันไบโอดีเซลหลังผ่านกระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับ ทำการหาปริมาณตัวเร่งและกลีเซอรอลด้วยวิธีการไตเตรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) โดยวิธีการวิเคราะห์และคำนวณจากภาคผนวก ก

#### 3.3.5.2 การวิเคราะห์หาค่าความเป็นกรดด้วยวิธีไตเตรตชัน

ในการหาค่าความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ เพื่อให้ได้ค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D974 โดยได้กำหนดมาตรฐานค่าความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซลต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 โดยวิธีการวิเคราะห์และคำนวณจากภาคผนวก ก

#### 3.3.5.3. การวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมด, กลีเซอไรด์ทั้งหมด และกลีเซอไรด์ในไบโอดีเซล

ในการหาปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมด, กลีเซอไรด์ทั้งหมด และกลีเซอไรด์ในไบโอดีเซลที่ผลิตได้ โดยอาศัยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) โดยการตรวจวัดด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีนั้นจะสามารถวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอลทั้งหมด ค่ากลีเซอรอลอิสระ ค่าไดกลีเซอไรด์ ค่าโมโนกลีเซอไรด์ที่ในน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลตามมาตรฐาน EN 14105 (อ่านวิธีการวิเคราะห์และการคำนวณจากภาคผนวก ก)

### 3.3.6 การวิเคราะห์ไอโซเทอมการดูดซับ

ในการวิเคราะห์เพื่อทำการหาไอโซเทอมการดูดซับ ทำด้วยวิธีการดังนี้

1. เตรียมน้ำมันไบโอดีเซลที่ทำการสังเคราะห์แล้วในหัวข้อที่ 3.3.3 มาทำการแบ่งใส่ขวด

2. ทดลองที่มีฝาปิด บรรจุน้ำมันไบโอดีเซลปริมาณ 50 กรัม
3. เตรียมตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในหัวข้อที่ 3.3.4 โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน โดยเริ่มตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง 10 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับในสภาวะที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมาทำการวิเคราะห์หาค่ากลีเซอริน โดยวิธีการไตเตรตต่อไป หลังจากนั้นคำนวณค่าการดูดซับที่ได้และนำไปสร้างกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแบบแลงเมียร์ จะพิจารณาจากค่า  $R^2$  ที่มากกว่า 0.95 หรือมีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับ เป็นวิธีการที่สามารถกำจัดกลีเซอรินออกจากน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้ว เพื่อให้ น้ำมันไบโอดีเซลที่ได้มีความบริสุทธิ์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกใช้ตัวดูดซับที่เป็นดินเบนโทไนต์ (Bentonite) เป็นกลุ่มแร่เซมิคไทท์ (Smectite) หรือมอนต์มอริลโลไนท์ (Montmorillonite) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับที่ดี

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำแนกดินเบนโทไนต์ออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

- 1) ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติ (Natural Bentonite)
- 2) ดินเบนโทไนต์กระตุ้นด้วยเบส (Activated Bentonite)



(A)



(B)

ภาพที่ 4.1 ลักษณะและสีของดินเบนโทไนต์

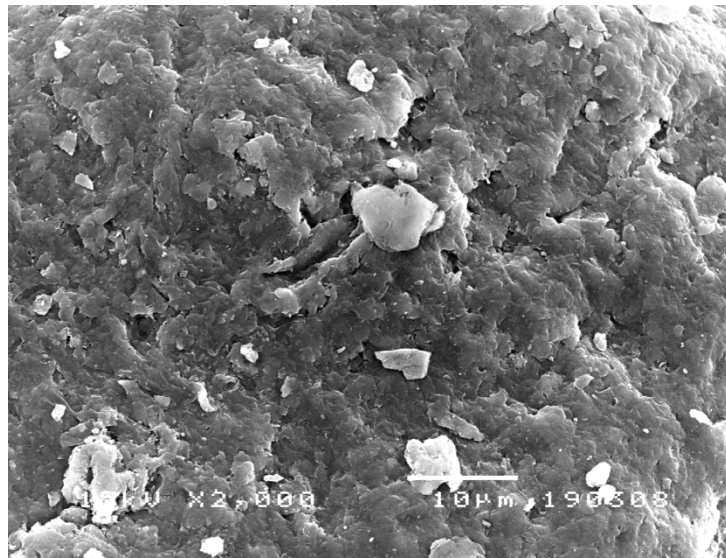
(A) ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติ

(B) ดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส

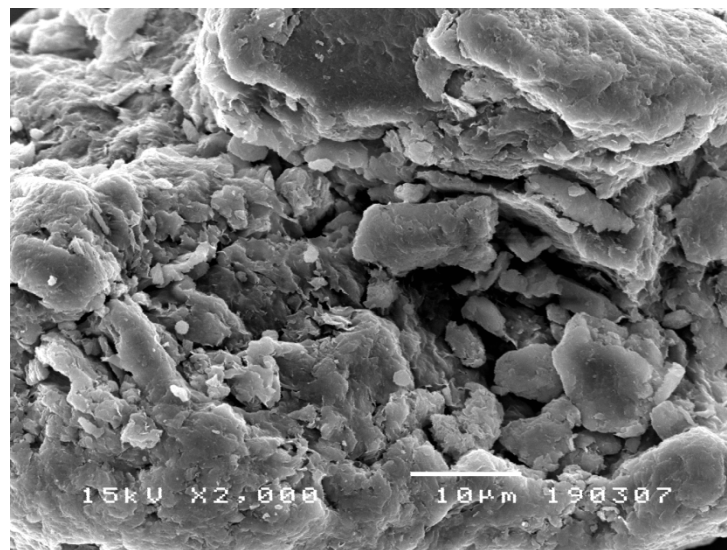
จากภาพที่ 4.1 จะแสดงให้เห็นว่าลักษณะของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติจะมีลักษณะเนื้อดินจะค่อนข้างหยาบและมีสีน้ำตาลอ่อนๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสแล้ว ลักษณะสีของดินเข้มกว่าสีเดิมเล็กน้อย โดยงานวิจัยนี้จะเลือกทดสอบความสามารถของดินเบนโทไนต์ที่ขนาดอนุภาคเม็ดดินระหว่าง 120-200 mesh

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินเบนโทไนต์

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) จากการวิเคราะห์ลักษณะของดินเบนโทไนต์ จากภาพขยายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะที่แตกต่างกันดังภาพที่ 4.2 และ 4.3 แสดงลักษณะของดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิดที่กำลังขยาย 2000 เท่า ลักษณะของดินจากการสังเกตเห็นคือ ดินเบนโทไนต์ธรรมชาตินั้นจะมีพื้นผิวที่ค่อนข้างเรียบและไม่ปรากฏลักษณะและขนาดของรูพรุนที่ชัดเจน ส่วนดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสจะมีพื้นผิวที่ค่อนข้างขรุขระมีความไม่เรียบ (Roughness) ของพื้นผิวดินชัดเจนมากขึ้น ซึ่งแตกต่างไปจากเดิมหลังทำการกระตุ้นดินด้วยเบส พบการจับตัวเป็นก้อน (Aggregation) ของเม็ดดิน ในส่วนของขนาดของรูพรุนนั้นจะสังเกตเห็นได้บ้าง แต่ไม่ค่อยชัดเจนเท่าที่ควร เนื่องมาจากสารละลายเบสที่ทำการกระตุ้นนั้นอาจไม่ได้มีคุณสมบัติในการทำลายโครงสร้างชั้นดินที่ชัดเจน แต่จะเป็นการสร้าง layer ที่บริเวณผิวดินหรือพื้นผิวของชั้นผิวดินมากกว่า



ภาพที่ 4.2 ภาพขยายของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติจาก SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



ภาพที่ 4.3 ภาพขยายของดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสจาก SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค Surface area analysis โดยอาศัยหลักการของ BET

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนของดินเบนโทไนต์

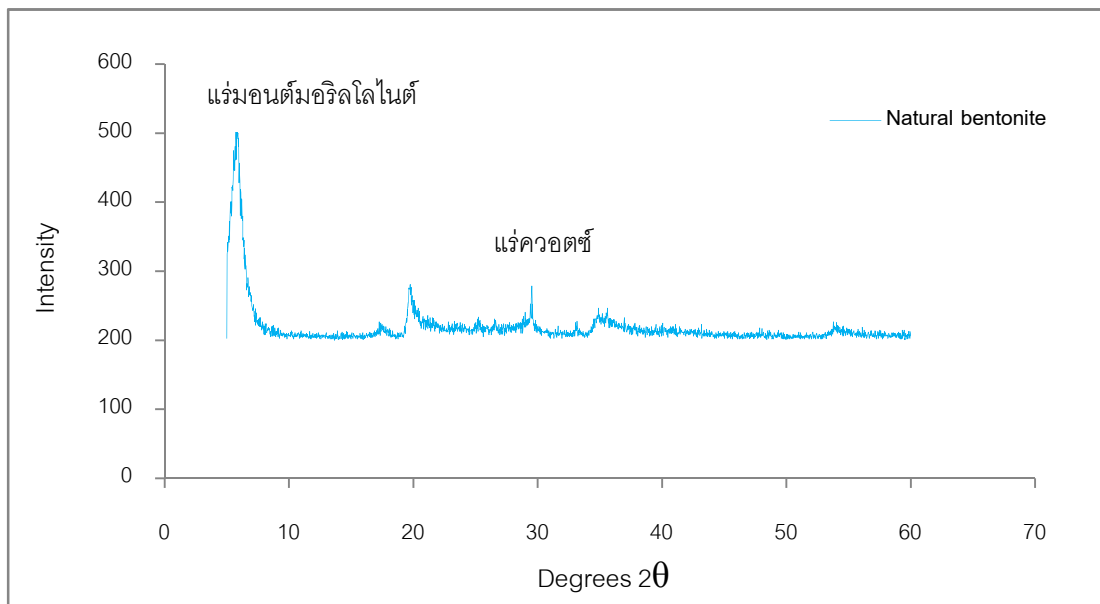
ตัวอย่าง ดินเบนโทไนต์	สมการ BET		
	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรของรูพรุน (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดของรูพรุน (nm)
ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติ	48.12	11.06	7.79
ดินเบนโทไนต์กระตุ้นด้วยเบส	46.01	10.57	7.35

จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนที่แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยสมการ BET พื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวดูดซับทั้งสองชนิดมีค่าพื้นที่ผิวแตกต่างกัน โดยพื้นที่ผิวของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 48.12 m<sup>2</sup>/g และดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสมีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 46.01 m<sup>2</sup>/g ส่วนค่าปริมาตรของรูพรุน (pore volume) ของดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิดมีค่า 11.06 cm<sup>3</sup>/g และ 10.57 cm<sup>3</sup>/g ตามลำดับ

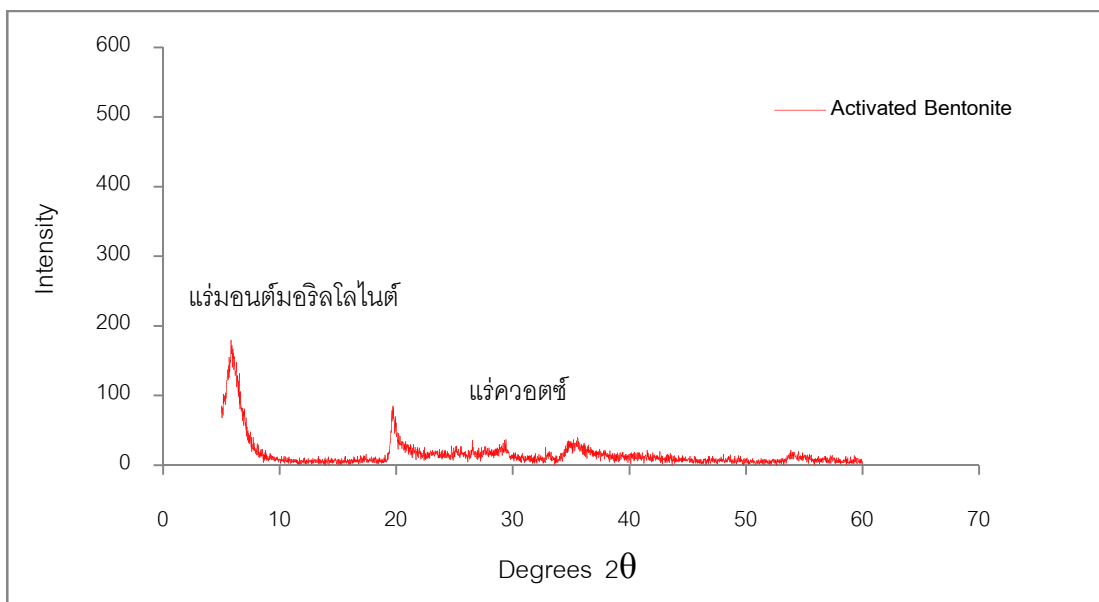
เมื่อทำการพิจารณาจากขนาดของรูพรุนเฉลี่ย (average diameter) จากสมการ BET พบว่าขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.79 nm และ 7.35 nm ตามลำดับ ซึ่งขนาดของรูพรุนที่ได้นั้นบ่งบอกได้ว่าขนาดของรูพรุนที่ขนาดลดลงกว่าปกตินั้นมาจากการสัมผัสสารละลายเบสที่เข้าไปทำการเคลือบเนื้อดินและยังส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวของดินเบนโทไนต์มีค่าลดลงตามลำดับ

#### 4.1.3 ผลการวิเคราะห์ดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)

ดินเบนโทไนต์ที่ใช้ในการทดลองได้ทำการร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดอนุภาค 120 - 200 mesh จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการร่อนแล้วไปทำการอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปวิเคราะห์หาโครงสร้างธาตุองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค XRD



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงโครงสร้างของแร่ธาตุหลักของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงโครงสร้างของแร่ธาตุหลักของดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD

จากภาพที่ 4.4 และ 4.5 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแร่ธาตุหลักในดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส จะมีโครงสร้างของแร่ธาตุหลักหลายชนิด ได้แก่

- 1) แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar;  $\text{NaCa Al}_2\text{Si}_3\text{O}_8$ )
- 2) แร่ไมกาขาว (Muscovite;  $(\text{K}_{0.82} \text{Na}_{0.18})(\text{Fe}_{0.03} \text{Al}_{1.97}) \text{AlSi}_{30}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ )
- 3) แร่ยิปซัม (Gypsum;  $\text{CaSO}_{4.2}\text{H}_2\text{O}$ )
- 4) แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Monmorillonite;  $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al}, \text{Mg})_2 \text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2.4}\text{H}_2\text{O}$ )

พบว่าแร่ธาตุส่วนใหญ่ที่พบในดินจะประกอบด้วยแร่ธาตุที่เป็นแร่ดินเหนียว (mineral clay) โดยดินเบนโทไนต์จะพบในรูปของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ นอกจากนี้ยังพบแร่ต้นกำเนิด (mineral matter) ประกอบด้วย แร่เฟลด์สปาร์ แร่ไมกาขาว และแร่ยิปซัม เป็นต้น แร่ที่กล่าวมานี้ เมื่อเกิดการผุพังหรือสลายตัวก็จะกลายเป็นดินเหนียวต่อไป

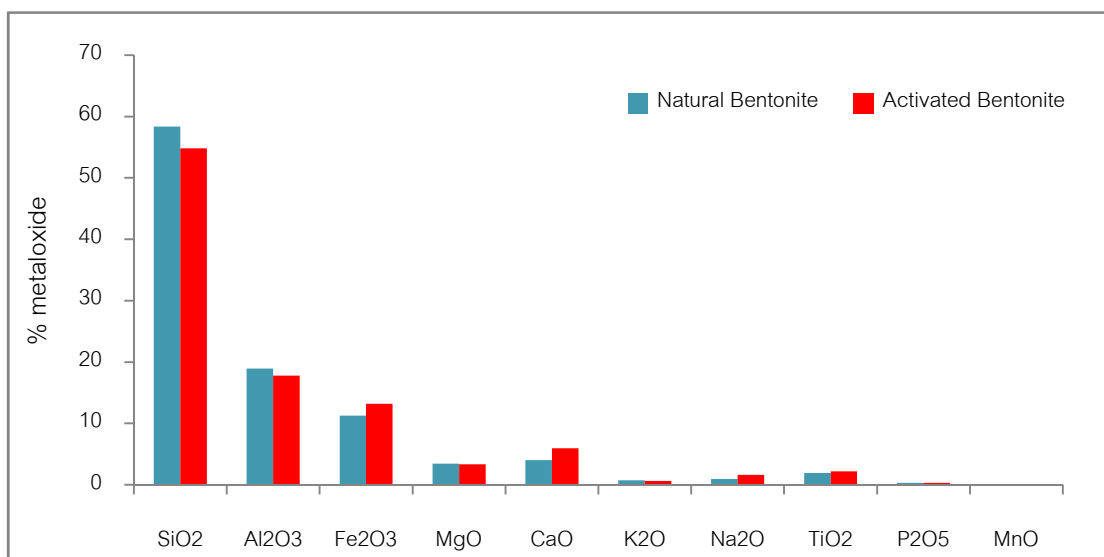
ผลจากการวิเคราะห์พบว่าดินเบนโทไนต์ที่นำมาศึกษาในครั้งนี้มีแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ดินดังกล่าวยังมีการปนเปื้อนของแร่อื่น ๆ รวมอยู่ด้วย เช่น แคลไซต์ ควอตซ์ เป็นต้น เนื่องจากดินเบนโทไนต์นั้นประกอบด้วยแร่ดินเหนียวมอนต์มอริลโลไนต์เป็นองค์ประกอบหลัก จึงทำให้ดินเบนโทไนต์มีสมบัติในการดูดซับและความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี เนื่องจากโครงสร้างของแร่มอนต์มอริลโลไนต์นั้นเป็นแบบ 2:1 และภายในโครงสร้างมีประจุพื้นผิวรวมเป็นลบ จึงทำให้ภายในช่องว่างระหว่างชั้นของโครงสร้างมีอะตอมของโลหะที่มีประจุบวก เช่น โซเดียม แคลเซียม เหล็ก เข้ามาแทรกหรือถูกดูดซับอยู่เพื่อให้เกิดสมดุลทางไฟฟ้า และอะตอมโลหะที่ถูกดูดซับอยู่ภายในระหว่างชั้นของโครงสร้างนี้มีความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลของน้ำมาล้อมรอบอะตอมได้ เป็นผลทำให้ชั้นโครงสร้างเกิดการขยายตัวเมื่อเปียกน้ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดอะตอมโลหะนั้นๆ



#### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์ดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF)

ตารางที่ 4.2 ชนิดและปริมาณของแร่ธาตุในดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส

ออกไซด์	ร้อยละขององค์ประกอบ (ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติ)	ร้อยละขององค์ประกอบ (ดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส)
SiO <sub>2</sub>	58.35	54.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.94	17.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.26	13.20
MgO	3.46	3.36
CaO	4.00	5.96
K <sub>2</sub> O	0.74	0.64
Na <sub>2</sub> O	0.91	1.64
TiO <sub>2</sub>	1.94	2.20
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	0.29
MnO	0.07	0.10



**ภาพที่ 4.6** กราฟแสดงปริมาณของแร่ธาตุหลักของดินเบนโทไนต์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

จากการวิเคราะห์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค XRF แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของธาตุในดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิด พบว่ามีปริมาณธาตุที่อยู่ในรูปของออกไซด์หลายชนิดทั้งดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส โดยในดินเบนโทไนต์ธรรมชาติ ออกไซด์ที่พบโดยส่วนใหญ่ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) 58.35%, อะลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 18.94%, เฟอริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 17.80%, แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 4.00%, แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) 3.46%, โซเดียมไดออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) 0.91%, โพแทสเซียมไดออกไซด์ 0.74% และธาตุอื่นๆ ตามลำดับ

เมื่อดินเบนโทไนต์ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส จะพบว่าแนวโน้มปริมาณของธาตุลดลงเล็กน้อยในบางธาตุ โดยเฉพาะธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) 54.81% , อะลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 17.80%, ส่วนธาตุที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นได้แก่ เฟอริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 13.20%, แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 5.96%, โซเดียมไดออกไซด์ (Na<sub>2</sub>O) 1.64%, และธาตุอื่นๆ ตามลำดับ อาจจะเปรียบเทียบได้ว่าธาตุองค์ประกอบหลักของดินเบนโทไนต์หรือดินในกลุ่มแอมอนต์มอริลโลไนต์ ที่มีสัดส่วนที่แตกต่างกันออกไปนั้น มีสาเหตุมาจากแหล่งกำเนิดหรือแหล่งที่มาของดินประเภทนั้นๆ โดยทั่วไปแล้วดินเบนโทไนต์เป็นแร่ดินเหนียวที่อยู่ในรูปของอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปออกไซด์ของซิลิกาและออกไซด์ของอะลูมิเนียม ดังนั้นจาก

ตารางที่ 4.2 จะพบว่ามีส่วนองค์ประกอบของธาตุซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์เป็นหลัก ส่วนองค์ประกอบของธาตุอื่นๆจะมีสัดส่วนที่รวมอยู่ด้วยเพียงเล็กน้อยตามลำดับ

เนื่องจากดินเบนโทไนต์มีอยู่ด้วยกัน 3 กลุ่ม คือ โซเดียมเบนโทไนต์ แคลเซียมเบนโทไนต์ และแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนต์ ดินทั้งสามกลุ่มนี้จะมีความสามารถในการพองตัวในน้ำที่แตกต่างกัน โดยดินโซเดียมเบนโทไนต์จะมีความสามารถในการพองตัวได้มากที่สุดส่วนแคลเซียมเบนโทไนต์ และแคลเซียม-แมกนีเซียมเบนโทไนต์ จะมีความสามารถในการพองตัวได้น้อยและผลจากการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีของดินด้วยเทคนิค XRF พบว่าดินเบนโทไนต์ที่นำมาทำการศึกษาในครั้งนี้เป็นดินเบนโทไนต์ชนิดแคลเซียมเบนโทไนต์ เนื่องจากมีสารประกอบของ CaO ในปริมาณที่สูงกว่า Na<sub>2</sub>O คือ อยู่ที่ 5.96 และ 1.64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับทำให้ดินชนิดนี้มีความสามารถในการพองตัวในน้ำได้ค่อนข้างน้อย

#### 4.2 ผลการศึกษาสภาวะในการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ด้วยตัวดูดซับดินเบนโทไนต์

ในการวิจัยนี้ได้ทำการเลือกใช้ดินเบนโทไนต์เป็นตัวดูดซับ ควรคำนึงถึงสิ่งสำคัญ ได้แก่ คุณสมบัติของไบโอดีเซลควรมีค่าความเป็นกรด (Acid value) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน EN 14214 ที่กำหนดไว้ ซึ่งกำหนดไว้ว่าอัตราของค่าความเป็นกรดไม่ควรเกิน 0.5 มิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมันไบโอดีเซล ในการกระตุ้นดินเบนโทไนต์ที่เป็นตัวดูดซับของงานวิจัยนี้จะใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารในการกระตุ้น

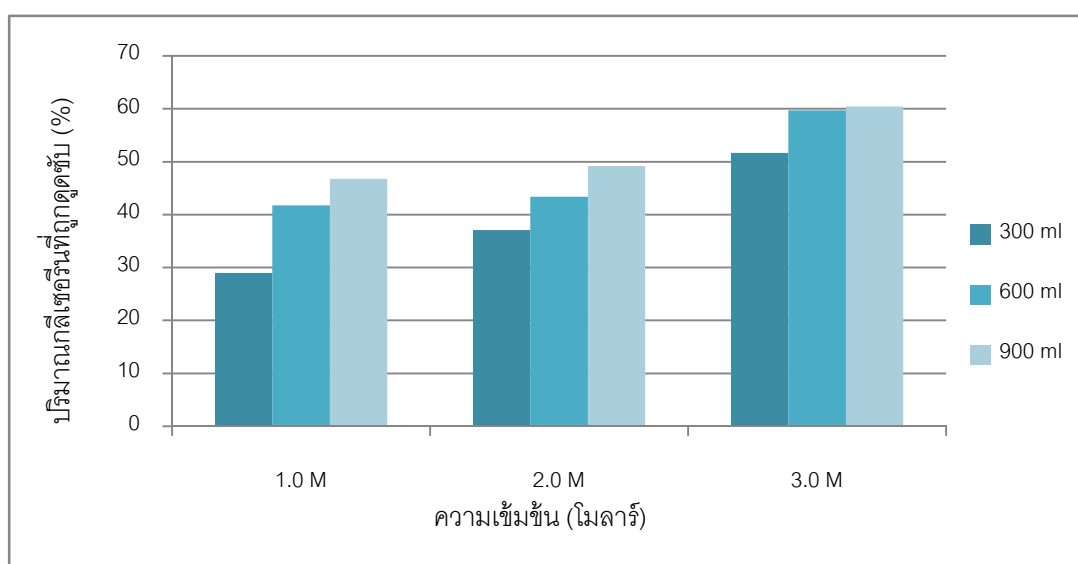
การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการศึกษาสภาวะต่างๆ อาทิเช่น ความเข้มข้นและอัตราส่วนของดินต่อสารละลายที่ใช้ในการกระตุ้นดิน เวลาที่ใช้ในการสัมผัส ร้อยละของตัวดูดซับ ขนาดของอนุภาคดินที่สามารถดูดซับกลีเซอรินได้สูงสุด และยังรวมถึงค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลหลังการดูดซับด้วยเช่นกัน

#### 4.2.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นและปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการกระตุ้นดินเบนโทไนต์

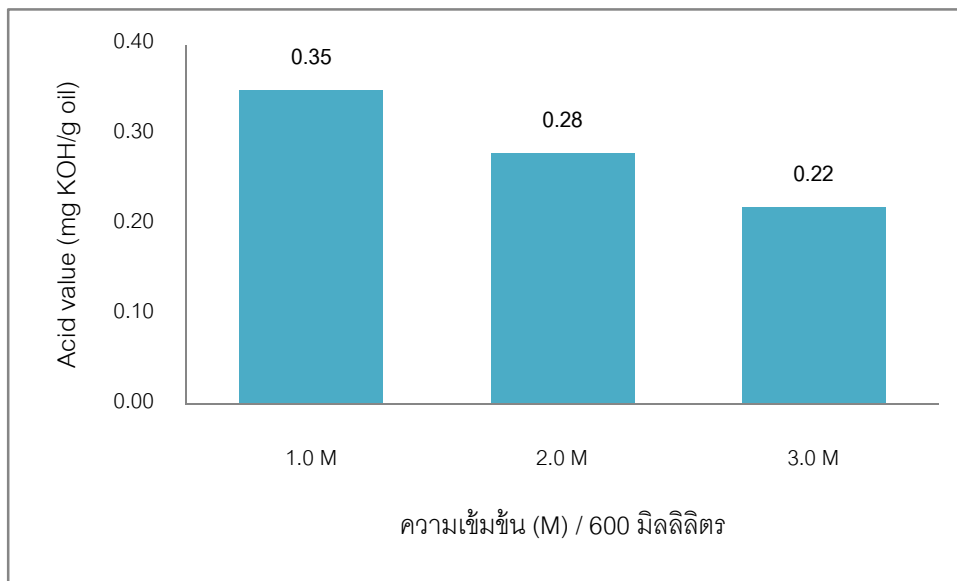
ในการวิจัยนี้ได้ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นสารในการกระตุ้นตัวดูดซับ โดยได้เลือกใช้ความเข้มข้นที่ 1.0, 2.0 และ 3.0 โมลาร์ หลังจากนั้นได้นำมาหาค่าการดูดซับกลีเซอริน ดังผลการทดลองตามตารางที่ 4.3 และดูแนวโน้มการดูดซับกลีเซอรินดังภาพที่ 4.7 และหลังจากการดูดซับกลีเซอรินแล้ว ได้ทำการหาค่าความเป็นกรดได้ผลการทดลองตามภาพที่ 4.8

**ตารางที่ 4.3** ความเข้มข้นและปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการกระตุ้นดินเบนโทไนต์ที่สามารถดูดซับกลีเซอรินได้

ปริมาณของสารละลาย (ml)	ปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับ (%)		
	1.0 M	2.0 M	3.0 M
300 ml	28.98	37.06	51.64
600 ml	41.77	43.36	59.72
900 ml	46.74	49.21	60.45



**ภาพที่ 4.7** กราฟแสดงความเข้มข้นและปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้นดินเบนโทไนต์



**ภาพที่ 4.8** กราฟแสดงค่าความเป็นกรด (Acid value) ของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการกระตุ้นดินเบนโทไนด์

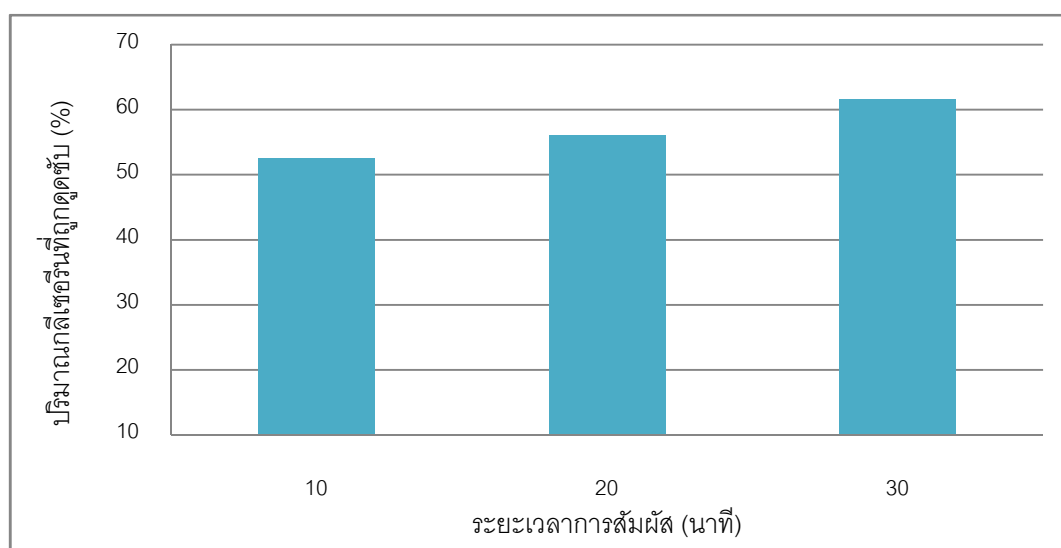
จากตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นและปริมาณในการดูดซับปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับ คือ ความเข้มข้นที่ 3.0 โมลาร์ ในปริมาณ 600 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที สามารถดูดซับปริมาณกลีเซอรินได้ถึง 59.72% และมีค่าความเป็นกรด 0.22 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน ซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วได้ดีกว่าดินเบนโทไนด์ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 โมลาร์ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเบสส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินได้มากขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน หลังจากการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชแล้วนั้น ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด ดังแสดงตามภาพที่ 4.8 ซึ่งค่าความเป็นกรดที่ความเข้มข้น 3.0 โมลาร์ ในปริมาณ 600 มิลลิลิตร ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 3 โดยน้ำหนักนั้นมีค่าเท่ากับ 0.22 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัมน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

#### 4.2.2 ผลการศึกษาระยะเวลาการสัมผัสในการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับ

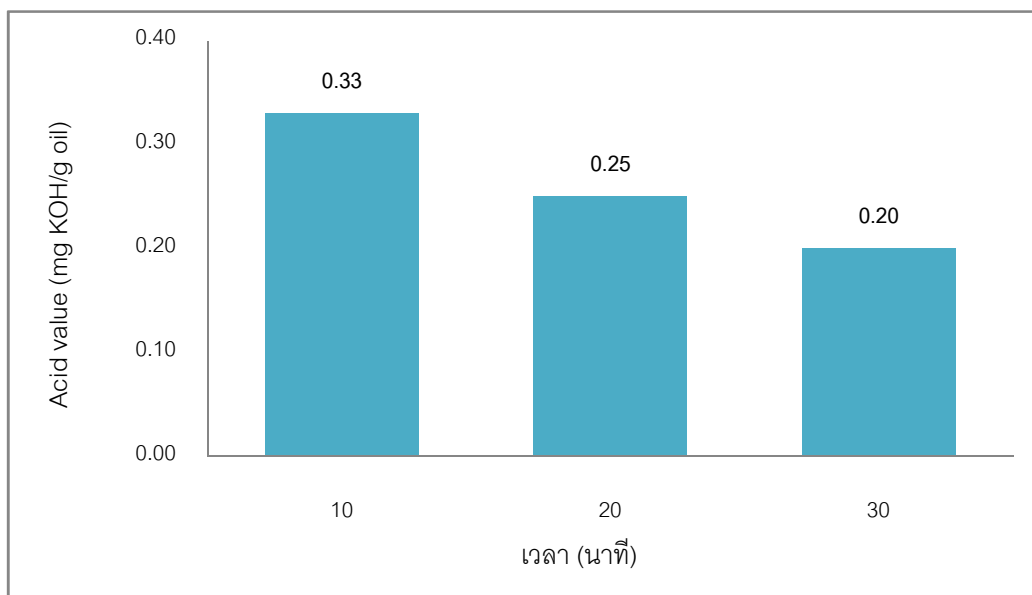
ในการวิจัยนี้ได้ระยะเวลาการสัมผัสในการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส โดยได้เลือกใช้เวลาการสัมผัสที่ 10, 20 และ 30 นาที (ปริมาณตัวดูดซับ ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก) หลังจากนั้นได้นำมาหาค่าการดูดซับกลีเซอริน ดังผลการทดลองตามตาราง ที่ 4.4 และดูแนวโน้มการดูดซับกลีเซอรินดังภาพที่ 4.9 และหลังจากการดูดซับกลีเซอรินแล้ว ได้ทำการหาค่าความเป็นกรดได้ผลการทดลองตามภาพที่ 4.10

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาการสัมผัสในการดูดซับกลีเซอริน

เวลาในการสัมผัส (นาที)	ปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับ (%)
10	52.47
20	56.11
30	61.58



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงระยะเวลาการสัมผัสในการดูดซับของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส



**ภาพที่ 4.10** กราฟแสดงค่าความเป็นกรด (Acid value) ของระยะเวลาการสัมผัสในการดูดซับของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส

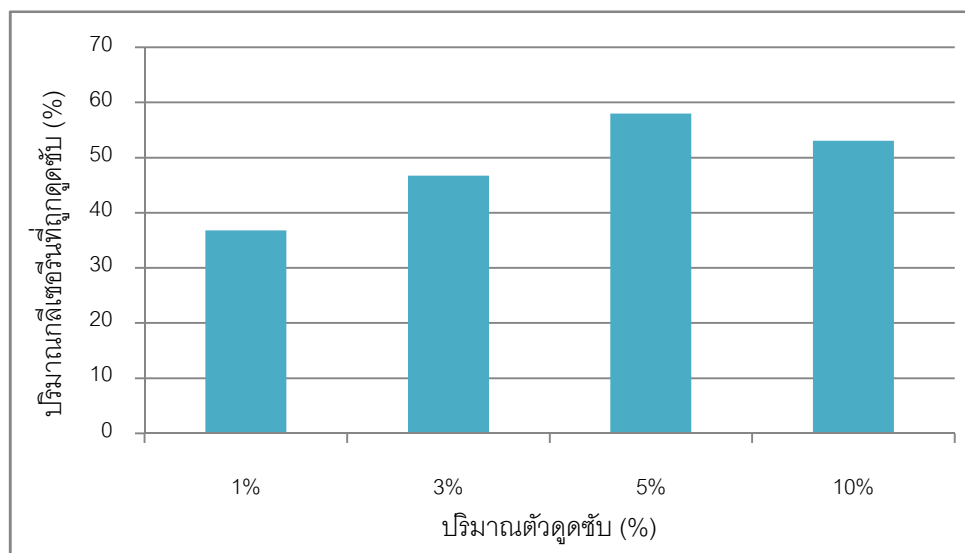
จากตารางที่ 4.4 และภาพที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์หาระยะเวลาในการสัมผัสในการดูดซับของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส (ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก) โดยระยะเวลาการสัมผัสที่ทำการทดลองคือ 10, 20 และ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที ผลการวิเคราะห์ที่ได้คือที่เวลา 30 นาที สามารถดูดซับปริมาณกลีเซอรินได้ถึง 61.58% ซึ่งแนวโน้มค่าการดูดซับที่เวลา 10 และ 20 นาที ซึ่งมีค่าเท่ากับ 52.47% และ 56.11% ตามลำดับ สามารถดูดซับกลีเซอรินได้น้อยกว่าที่เวลา 30 นาที จึงได้ทำการเลือกเวลาการสัมผัสที่ 30 นาที เป็นเวลาการสัมผัสในการดูดซับกลีเซอรินในการทดลองนี้ เนื่องจากระยะเวลาการสัมผัสที่เพิ่มขึ้นนั้น สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน หลังจากการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วนั้น ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (ภายใต้สภาวะความเข้มข้นที่ 3.0 โมลาร์ ในปริมาณ 600 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก) ดังแสดงตามภาพที่ 4.10 พบว่ามีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.20 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัมน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

#### 4.2.3 ผลการศึกษาปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน

ในการวิจัยนี้ได้ทำการหาสภาวะของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักในการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ โดยได้เลือกใช้ปริมาณของตัวดูดซับที่ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นได้นำมาหาค่าการดูดซับกลีเซอริน ดังผลการทดลองตามตารางที่ 4.5 และดูแนวโน้มการดูดซับกลีเซอรินดังภาพที่ 4.11 และหลังจากการดูดซับกลีเซอรินแล้ว ได้ทำการหาความเป็นกรดได้ผลการทดลองตามภาพที่ 4.12

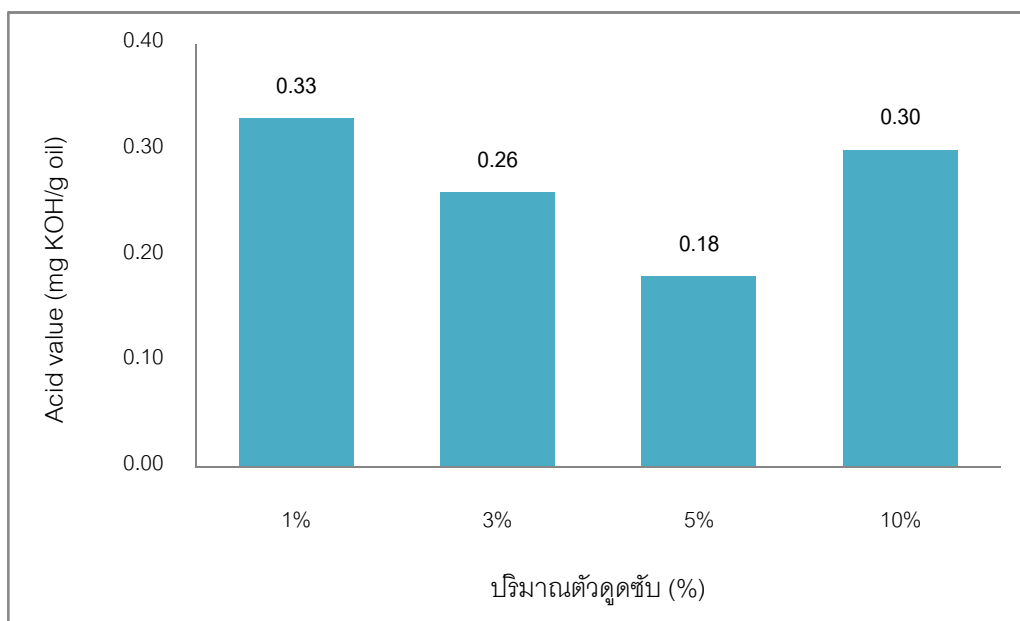
ตารางที่ 4.5 ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน

ปริมาณของตัวดูดซับ (%) โดยน้ำหนัก	ปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับ (%)
1	36.81
3	46.74
5	57.98
10	53.08



ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน





ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงค่าความเป็นกรด (Acid value) ของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน

จากตารางที่ 4.5 และภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับ โดยปริมาณตัวดูดซับที่ทำการทดลองคือ ร้อยละ 1, 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที ผลการวิเคราะห์ที่ได้คือที่ร้อยละ 5 สามารถดูดซับปริมาณกลีเซอรินได้ถึง 57.98% มีค่าการดูดซับปริมาณกลีเซอรินได้มากกว่าร้อยละ 1, 3 และ 10 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 36.81%, 46.74% และ 53.08% ตามลำดับ จึงได้เลือกปริมาณตัวดูดซับที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการทดลองนี้ หลังจากการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วนั้น ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด ดังแสดงตามภาพที่ 4.12 พบว่ามีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.30 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัมน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

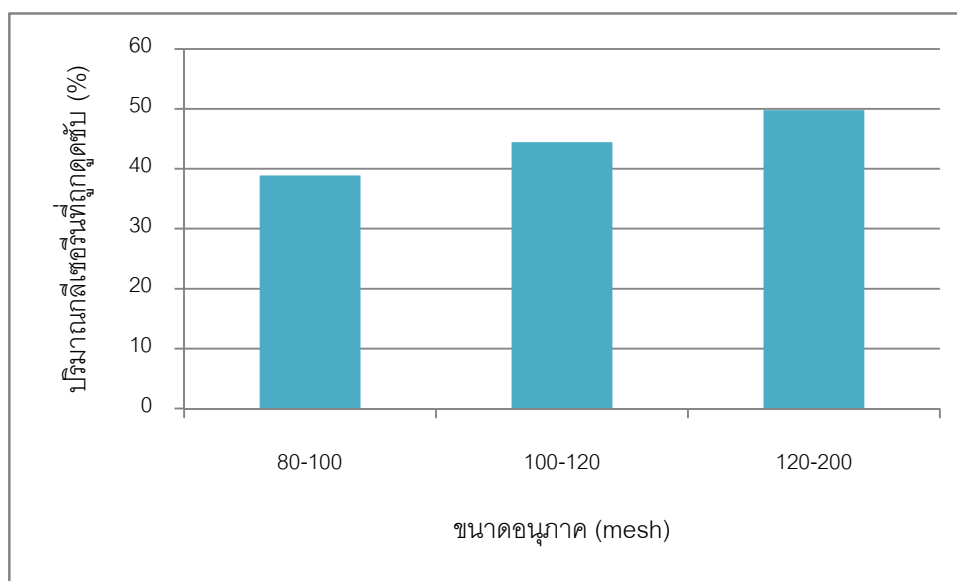
#### 4.2.4 ผลการศึกษาขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน

ในการวิจัยนี้ได้ทำการหาสภาวะที่ขนาดอนุภาคในการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับ โดยได้เลือกใช้ขนาดอนุภาคเท่ากับ 80-100, 100-120 และ 120-200 mesh โดยดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสที่สภาวะจากการทดลองข้างต้น คือ ภายใต้สภาวะความเข้มข้นที่ 3.0 โมลาร์ ใน

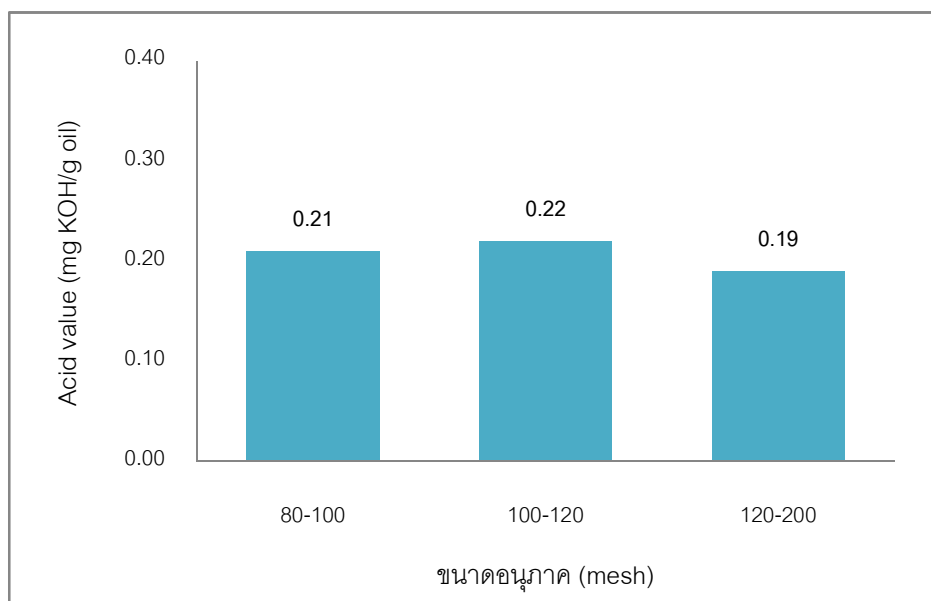
ปริมาณ 600 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่ระยะเวลาการสัมผัส 30 นาที หลังจากนั้นได้นำมาหาค่าการดูดซับกลีเซอริน ดังผลการทดลองตามตารางที่ 4.6 และดูแนวโน้มการดูดซับกลีเซอรินดังภาพที่ 4.13 และหลังจากการดูดซับกลีเซอรินแล้ว ได้ทำการหาค่าความเป็นกรดได้ผลการทดลองตามภาพที่ 4.14

**ตารางที่ 4.6** ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน (ภายใต้สภาวะความเข้มข้นที่ 3.0 โมลาร์ ในปริมาณ 600 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 ที่ระยะเวลาการสัมผัส 30 นาที)

ขนาดอนุภาค (mesh)	ปริมาณกลีเซอรินที่ถูกดูดซับ (%)
80-100	38.90
100-120	44.43
120-200	49.78



ภาพที่ 4.13 กราฟแสดงขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน

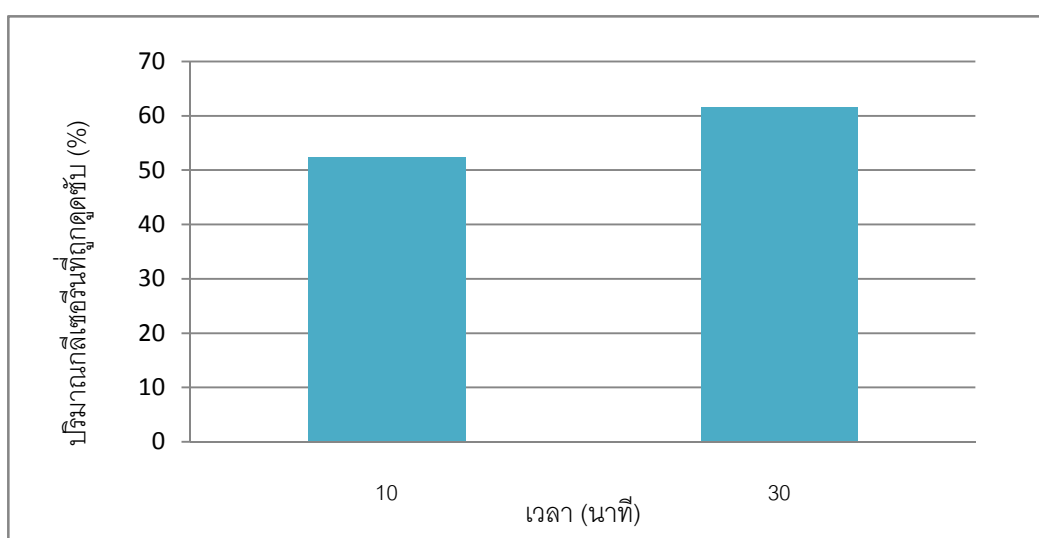


**ภาพที่ 4.14** กราฟแสดงค่าความเป็นกรด (Acid value) ของขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอริน

จากตารางที่ 4.6 และภาพที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอรินได้ในปริมาณที่สูงที่สุด ภายใต้สภาวะความเข้มข้นที่ 3.0 โมลาร์ ในปริมาณ 600 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการสัมผัส 30 นาที โดยได้เลือกใช้ขนาดอนุภาคในการทดลองนี้คือ 80-100, 100-120 และ 120-200 mesh อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที ผลการวิเคราะห์ที่ได้คือขนาดอนุภาคที่ 120-200 mesh ของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสสามารถดูดซับปริมาณกลีเซอรินได้ถึง 49.78% มากกว่าดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสที่ขนาดอนุภาคอื่นๆ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กนั้นส่งผลให้พื้นที่ผิวมีขนาดเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินได้ดีขึ้น จึงทำการเลือกขนาดอนุภาคที่ 120-200 mesh เป็นขนาดอนุภาคที่ดีที่สุดในการทดลองนี้ หลังจากการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วนั้น ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (ภายใต้สภาวะความเข้มข้นที่ 3.0 โมลาร์ ในปริมาณ 600 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ระยะเวลาการสัมผัส 30 นาที) ดังแสดงตามภาพที่ 4.14 พบว่ามีค่าความเป็นกรดมีค่าเท่ากับ 0.19 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัมน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยค่าความเป็นกรดที่ได้นั้นมีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

ดังนั้นขนาดอนุภาคของดินเบนโทไนต์นับว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดลดลงได้ต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ปัจจัยอื่นๆที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น รวมถึงขนาดอนุภาคที่เล็กลงไปเรื่อยๆ ยังส่งผลในเรื่องของการเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับกลีเซอรอลได้อย่างเพิ่มขึ้นอีกด้วย

#### 4.2.5 ผลการศึกษาระยะเวลาการตกตะกอนของกลีเซอรอลภายหลังการดูดซับ



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงระยะเวลาการตกตะกอนของกลีเซอรอลหลังการดูดซับ

ขั้นตอนของกระบวนการดูดซับในงานวิจัยจะมีการกำหนดระยะเวลาของการตกตะกอนภายหลังจากที่ผ่านการเขย่าแล้ว เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของคอลลอยด์ดินที่แขวนลอยในน้ำมันก่อนที่จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันที่ได้ไปวัดค่าปริมาณกลีเซอรอลด้วยวิธีการไทเทรชัน ดังนั้นการดูดซับ ดังนั้นการดูดซับที่เกิดขึ้นจึงเป็นการดูดซับที่อาศัยกระบวนการตกตะกอนร่วมด้วย ซึ่งพบว่าระยะเวลาการตกตะกอนมีผลทำให้ค่าปริมาณสบู่ที่ถูกดูดซับได้มีค่าที่แตกต่างกัน

จากภาพที่ 4.15 แสดงร้อยละปริมาณการดูดซับของกลีเซอรอลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลหลังเวลาการตกตะกอนที่แตกต่างกัน พบว่าที่เวลาการตกตะกอนที่ 10 นาที สามารถดูดซับปริมาณกลีเซอรอลได้ 52.47% และเมื่อเวลาผ่านไปที่เวลาการตกตะกอนที่ 30 นาที

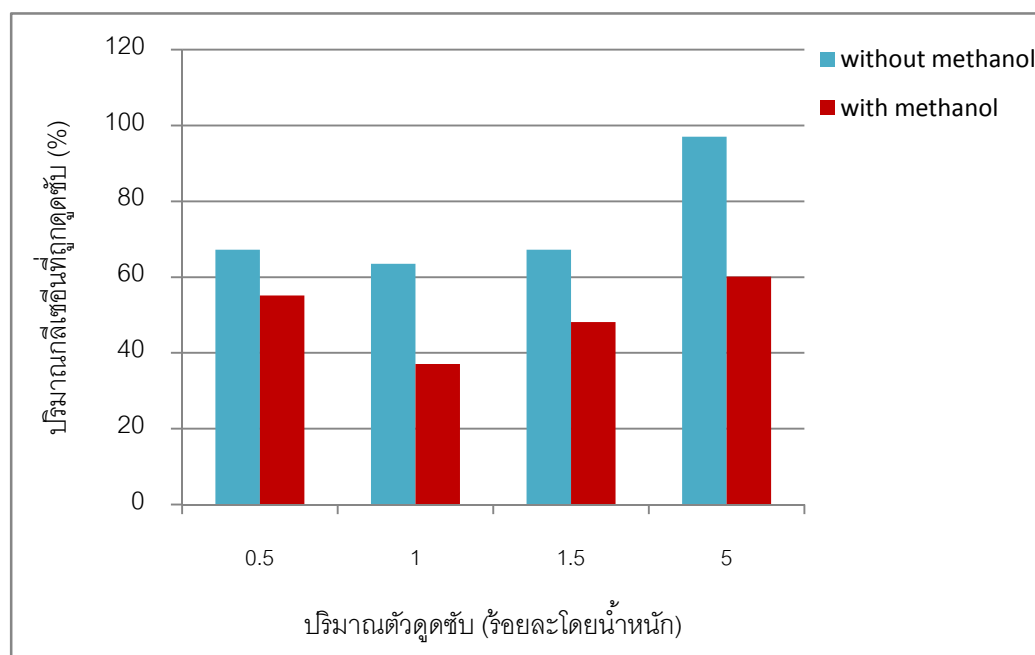
สามารถดูดซับปริมาณกลีเซอรินได้เพิ่มมากขึ้นถึง 61.58% โดย ซึ่งพบว่าค่าที่ได้จากปริมาณการดูดซับกลีเซอรินในปริมาณที่ความแตกต่างกันพอสมควร จึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาที่การตั้งทิ้งไว้ให้นานขึ้น เป็นปัจจัยส่งผลให้กลีเซอรินนั้นตกตะกอนลงมาเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกระยะเวลาการตกตะกอนที่ 30 นาทีเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมในการตั้งทิ้งไว้ เพื่อให้กลีเซอรินตกตะกอนหลังการดูดซับ

#### 4.2.6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล

ปริมาณตัวดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณสบูที่ถูกดูดซับ (%)	
	สภาวะมีไรเมทานอล	สภาวะมีเมทานอล
0.5	67.23	55.14
1.0	63.48	37.07
1.5	67.23	48.15
5.0	97.03	60.14

หมายเหตุ; ปริมาณของตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เป็นปริมาณร้อยละของตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการทดลองนี้ จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นในหัวข้อที่ 4.2.3



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล

จากตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.16 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล โดยในสภาวะที่ไม่มีเมทานอลจะทำได้ด้วยวิธีการ นำน้ำมันไบโอดีเซลที่ได้ก่อนการดูดซับส่วนหนึ่งไปทำการกำจัดเมทานอลด้วยเครื่อง Rotary evaporator จะพบว่าดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที นั้นสามารถดูดซับกลีเซอรินได้ถึง 97.03% มากกว่าสภาวะที่มีเมทานอลที่สามารถดูดซับกลีเซอรินได้เพียง 60.14% และเมื่อเปรียบเทียบในอัตราส่วนในการใช้ปริมาณของตัวดูดซับยังพบว่า ในสภาวะที่ไร้เมทานอลจะใช้ปริมาณตัวดูดซับในปริมาณที่น้อยลงกว่าเดิมและสามารถดูดซับกลีเซอรินได้มากพอควร

สามารถสรุปได้ว่าการดูดซับกลีเซอรินภายใต้สภาวะที่ไม่มีเมทานอลค่าร้อยละของการดูดซับกลีเซอรินที่ได้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าและสามารถดูดซับได้มากกว่า ซึ่งส่งผลให้สามารถยืนยันได้อีกว่าเมทานอลในน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชที่ได้เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินได้น้อยลง

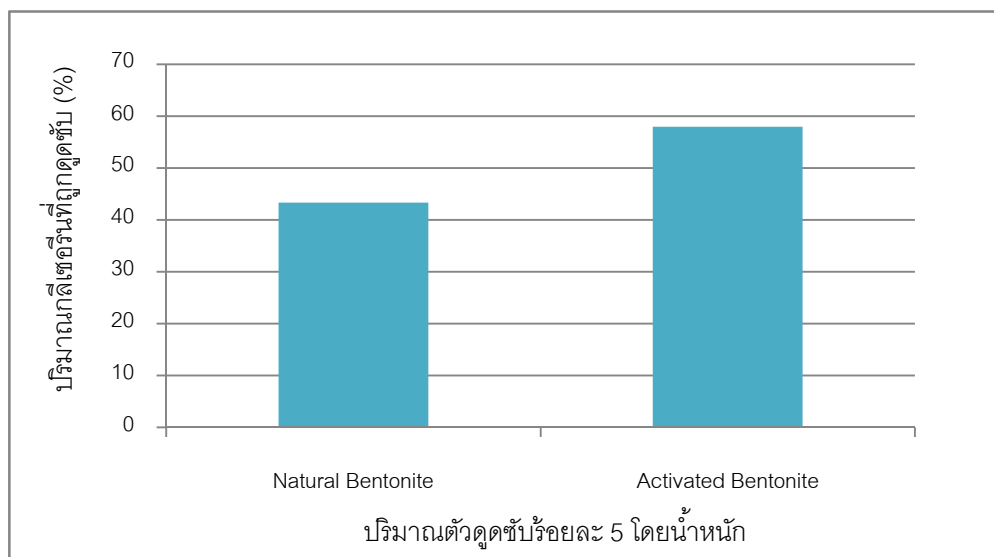
#### 4.3 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ชนิดต่างๆ

##### 4.3.1 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินของดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส

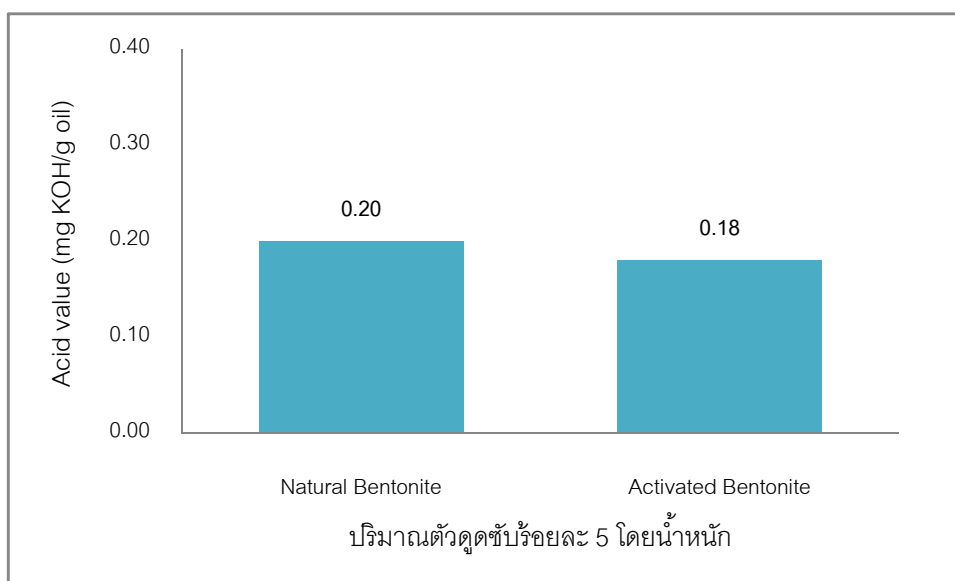
ในการวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสมในการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดคือ ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก (ปริมาณตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการทดลองนี้) ภายใต้สภาวะที่จากการทดลองข้างต้น คือ ภายใต้สภาวะความเข้มข้นที่ 3.0 โมลาร์ ในปริมาณ 600 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ระยะเวลาการสัมผัส 30 นาที หลังจากนั้นได้นำมาหาค่าการดูดซับกลีเซอริน ดังผลการทดลองตามตารางที่ 4.8 และดูแนวโน้มการดูดซับกลีเซอรินดังภาพที่ 4.17 และหลังจากการดูดซับกลีเซอรินแล้ว ได้ทำการหาค่าความเป็นกรดได้ผลการทดลองตามภาพที่ 4.18

**ตารางที่ 4.8** ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกลีเซอรินของดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิด

ปริมาณตัวดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ปริมาณสบูที่ถูกดูดซับ (%)	
	ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติ	ดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส
5	43.36	57.98



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกอลลีเซอรินของดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิด



ภาพที่ 4.18 กราฟแสดงค่าความเป็นกรด (Acid value) ของปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักของตัวดูดซับในการดูดซับกอลลีเซอรินของดินเบนโทไนต์ทั้ง 2 ชนิด

จากตารางที่ 4.8 และภาพที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงปริมาณของตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ ดินเบนโทไนต์ธรรมชาติและเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส ภายใต้สภาวะความเข้มข้นที่ 3.0 โมลาร์ ใน



ปริมาณ 600 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ที่ระยะเวลาการสัมผัส 30 นาที โดยได้เลือกใช้ปริมาณของตัวดูดซับในการทดลองนี้คือ ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที ผลการวิเคราะห์ที่ได้คือ ดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส สามารถดูดซับปริมาณกลีเซอรินได้ถึง 57.98% มีค่าการดูดซับปริมาณกลีเซอรินได้มากกว่าดินเบนโทไนต์ธรรมชาติที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับในร้อยละโดยน้ำหนักที่เท่ากัน หลังจากการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วนั้น ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (ภายใต้สภาวะความเข้มข้นที่ 3.0 โมลาร์ ในปริมาณ 600 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที ที่ระยะเวลาการสัมผัส 30 นาที) ดังแสดงตามภาพที่ 4.18 พบว่ามีค่าความเป็นกรดของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสมีค่าเท่ากับ 0.18 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัมน้ำมันไบโอดีเซล เมื่อเปรียบเทียบกับดินเบนโทไนต์ธรรมชาติมีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0.20 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัมน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยค่าความเป็นกรดที่ได้นั้นมีค่าที่แตกต่างกันพอสมควร

ดังนั้นจากการปรับปรุงดินเบนโทไนต์มีผลต่อกระบวนการดูดซับกลีเซอรินในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่นำดินมาทำการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซล โดยใช้ตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ได้แก่ ดินเบา ถ่านกัมมันต์ หรือดินเบนโทไนต์ในปริมาณร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นสามารถดูดซับกลีเซอรินออกไปได้ (บุษยา ศรีวิจารณ์, 2552)

#### 4.3.2 ผลการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรดเปรียบเทียบกับดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสและตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรด

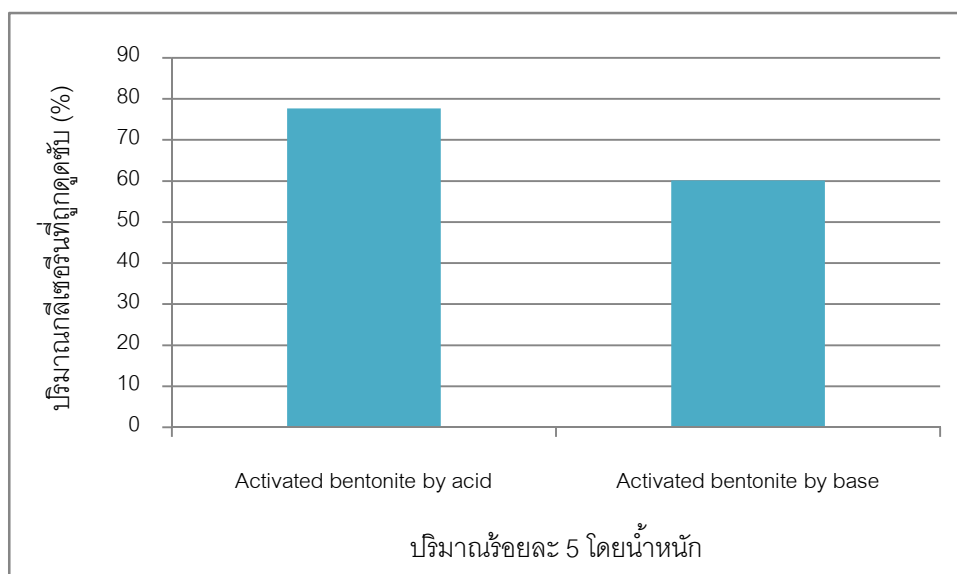
ตัวดูดซับและปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	ปริมาณสบูที่ถูดูดซับ (%)
ดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรด	77.65
ดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส	60.14

ที่มา: เอกสิทธิ์ เทพวีระกุล, 2555

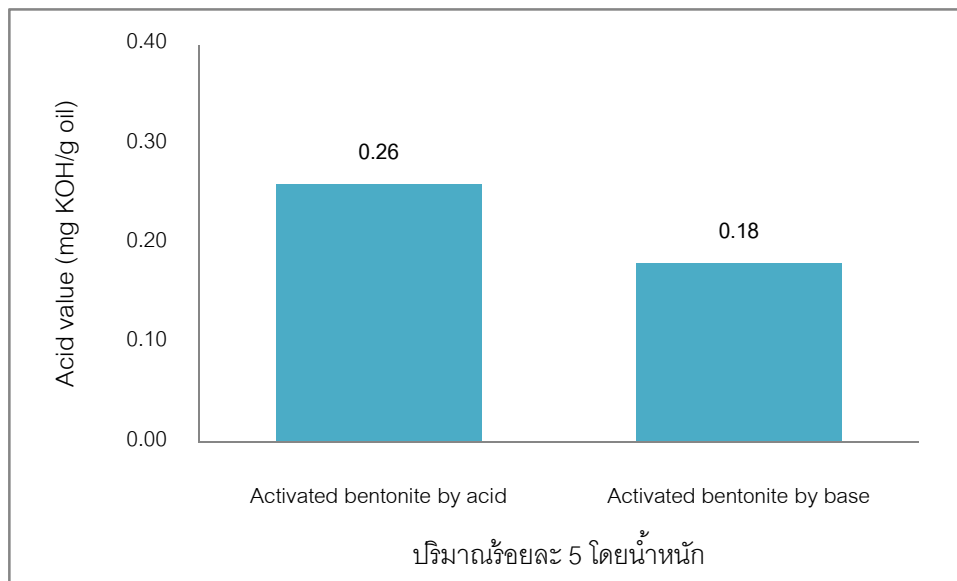
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสและตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรด

ตัวอย่าง ดินเบนโทไนต์	สมการ BET		
	พื้นที่ผิว ( $m^2/g$ )	ปริมาตรของรูพรุน ( $cm^3/g$ )	ขนาดของรูพรุน (nm)
ดินเบนโทไนต์ผ่านการ กระตุ้นด้วยเบส	46.01	10.57	7.35
ดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการ กระตุ้นด้วยกรด	55.15	0.12	8.34

ที่มา: เอกสิทธิ์ เทพวีระกุล, 2555



ภาพที่ 4.19 กราฟแสดงประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินของตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดเปรียบเทียบกับตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส



**ภาพที่ 4.20** กราฟแสดงค่าความเป็นกรด (Acid value) ของตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่ผ่านกระตุ้นด้วยเบสและตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรด

จากตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.19 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรด (เอกสิทธิ์ เทพวีระกุล, 2555) และดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส พบว่าดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส (NaOH) 3.0 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถดูดซับกลีเซอรินนั้นตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดสามารถดูดซับได้ถึง 77.65% มากกว่าดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสที่สามารถดูดซับกลีเซอรินได้เพียง 60.14% และเมื่อเปรียบเทียบในอัตราส่วนในการใช้ปริมาณของตัวดูดซับแล้วยังพบว่า ดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดจะใช้ปริมาณตัวดูดซับในปริมาณที่มากกว่าและสามารถดูดซับกลีเซอรินได้มากพอสมควร สามารถสรุปได้ว่าสาเหตุที่ดินเบนโทไนด์ที่กระตุ้นด้วยกรดนั้นสามารถดูดซับได้ดีกว่า อาจเป็นเพราะโครงสร้าง พื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนที่เปลี่ยนแปลงไปของดินหลังจากที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดนั้นจากตารางที่ 4.10 เป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับปริมาณกลีเซอรินได้เพิ่มมากกว่าดินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้าง พื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน

จากภาพที่ 4.20 พบว่าค่าความเป็นกรดของดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสมีค่าเท่ากับ 0.18 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัมน้ำมันไบโอดีเซล เมื่อเทียบกับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดมีค่าเท่ากับ 0.31 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัมน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ โดยค่าความเป็นกรดที่ได้นั้นมีค่าที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล

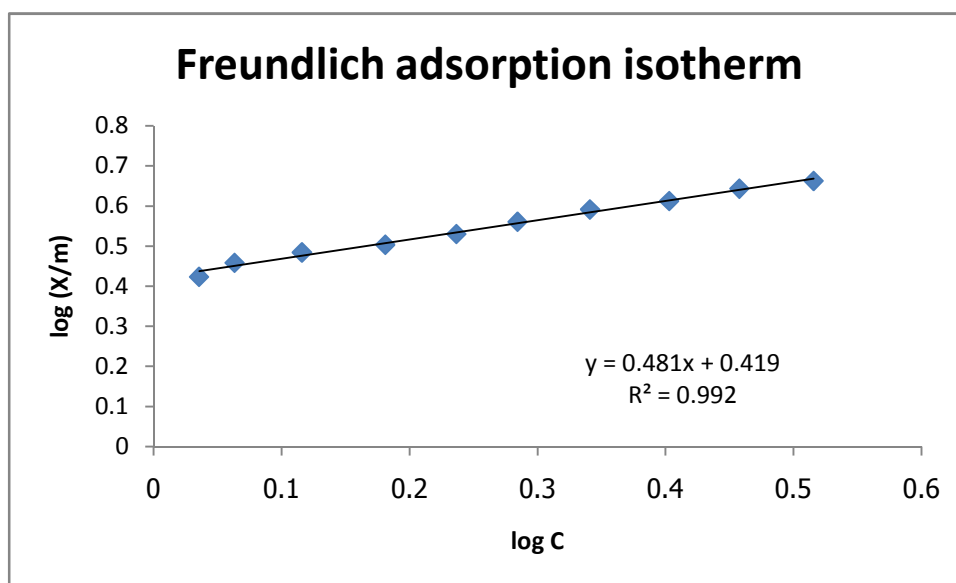
จากการวิเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี จะทำให้ทราบถึงสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำมันต่างๆ โดยจากกราฟโครมาโทแกรมที่ได้จะแสดงปริมาณสารที่มีอยู่ได้แก่ ปริมาณกลีเซอรอลอิสระ ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณของสารประกอบเหล่านี้จากการนำพื้นที่ใต้กราฟมาคำนวณได้

**ตารางที่ 4.11** ค่าคุณสมบัติของไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับด้วยตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส

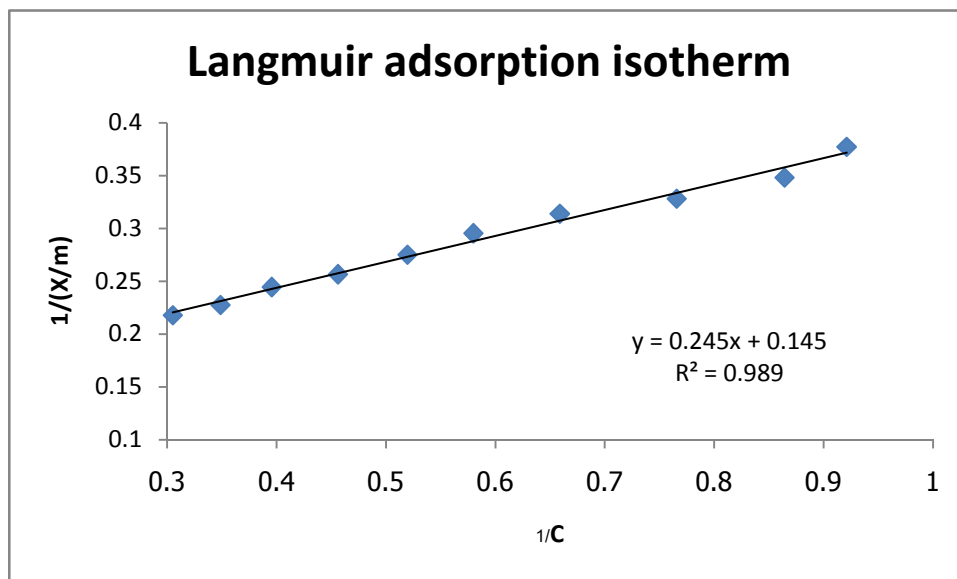
ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ	อัตรากำหนด	การดูดซับไบโอดีเซลด้วยตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส
กลีเซอรอลอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.02	0.0017
โมโนกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.80	0.3077
ไดกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.20	-
ไตรกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.20	-
กลีเซอรอลทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.25	0.0802
ค่าของกรด (มิลลิกรัม KOH/กรัม)	ASTM D974	< 0.5	0.18

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับกลีเซอรินของดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส

การหาไอโซเทอมของการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ปริมาณร้อยละที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการวิธีไตเตรชันเพื่อทำการหาค่ากลีเซอรินหลักจากนั้นนำมาคำนวณเพื่อทำการสร้างกราฟไอโซเทอมด้วยสมการของฟรุนดลิชและสมการของแลงเมียร์ ดังภาพที่ 4.21 และภาพที่ 4.22



ภาพที่ 4.21 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับกลีเซอรินด้วยสมการฟรุนดลิช



ภาพที่ 4.22 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับกลีเซอรินด้วยสมการแลงเมียร์

จากกราฟไอโซเทอมการดูดซับกลีเซอรินด้วยตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส แสดงให้เห็นว่าการดูดซับนั้นมีความสอดคล้องตามแบบไอโซเทอมของฟรุนดลิช เมื่อพิจารณาจากค่า  $R^2$  ของสมการไอโซเทอมของฟรุนดลิชและสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ ดังตารางที่ 4.10 พบว่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 0.9921 และ 0.9891 ซึ่งค่าที่ได้เข้าใกล้ 1 แต่เมื่อสังเกตแล้วค่า  $R^2$  ของสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่า  $R^2$  ของสมการไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ จึงสามารถสรุปได้ว่าการดูดซับกลีเซอรินด้วยตัวดูดซับดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบสเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าคงที่ที่ได้จากไอโซเทอมของการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแบบแลงเมียร์

ตัวดูดซับ	ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช			ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์	
	$K_F$	$n$	$r^2$	$K_L$	$r^2$
ดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส	2.63	2.08	0.9921	0.59	0.9891

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผลของการศึกษาการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่กระตุ้นด้วยเบส พบว่าดินเบนโทไนด์สามารถช่วยลดปริมาณกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในระดับหนึ่ง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกใช้ดินเบนโทไนด์ธรรมชาติและดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการเปรียบเทียบปริมาณการดูดซับกลีเซอรินและสิ่งเจือปนอื่นๆในน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืช ที่ได้เตรียมจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริเคชันระหว่างน้ำมันพืชใช้แล้วและเมทานอล โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

ในขั้นตอนการกระตุ้นตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 3 โมลาร์ ในอัตราส่วนดินต่อสารละลายเบสเท่ากับ 1:10 และได้ทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที สามารถให้ประสิทธิภาพของการกำจัดกลีเซอรินออกจากไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชได้ดีที่สุด

จากผลการศึกษานี้พบว่าไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในสภาวะที่มีเมทานอล โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดคือ ดินเบนโทไนด์ธรรมชาติและดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบส ที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วในการเขย่า 200 ต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที สามารถดูดซับกลีเซอรินออกจากน้ำมันไบโอดีเซลได้ 43.36% และ 57.98% ตามลำดับ

จากผลการศึกษาไบโอดีเซลที่ผลิตได้ในสภาวะที่ไร้เมทานอล พบว่าการดูดซับกลีเซอรินในไบโอดีเซล โดยใช้ตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่กระตุ้นด้วยเบสในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิห้อง อัตราเร็วในการเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที และระยะเวลาการตกตะกอน 30 นาที สามารถดูดซับกลีเซอรินออกจากน้ำมันไบโอดีเซลได้ 97.63 % และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการดูดซับกลีเซอรินในสภาวะที่มีเมทานอล สามารถดูดซับกลีเซอรินออกจากน้ำมันไบโอดีเซลได้ 60.14 %

ผลการศึกษาไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยนำตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเบสและดินเบนโทไนด์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรด ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชใช้แล้ว ในสภาวะที่มีเมทานอล โดยตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่กระตุ้นด้วยกรดใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก 0.1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เหมาะสมสำหรับทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (เอกสิทธิ์ เทพวีระกุล, 2555) และตัวดูดซับดินเบนโทไนด์ที่กระตุ้นด้วยเบส ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลายไฮเดรอกไซด์ 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 40 นาที สามารถดูดซับกลีเซอรินออกจากน้ำมันไบโอดีเซลได้ 77.65% และ 60.14% ตามลำดับ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซลหลังการดูดซับพบว่า น้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับด้วยดินเบนโทไนด์ที่กระตุ้นด้วยเบสให้ค่าความเป็นกรดที่ต่ำกว่า ซึ่งค่าความเป็นกรดที่ได้นั้นผ่านมาตรฐานคุณภาพไบโอดีเซลที่กำหนดไว้

### ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

จากงานวิจัยพบว่าการเลือกใช้ดินเบนโทไนด์ในการดูดซับกลีเซอริน สามารถช่วยลดปริมาณกลีเซอรินที่แขวนลอยออกจากไบโอดีเซลได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซับกลีเซอรินที่ได้แล้วยังมีแนวโน้มที่น้อยอยู่พอสมควร สาเหตุนี้้นอาจมาจากคุณภาพของดินเบนโทไนด์และแหล่งที่มาของดินเบนโทไนด์

การเลือกใช้ขนาดอนุภาคของดินควรหาขนาดที่เล็ก เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสสารละลายที่ใช้ในการกระตุ้นและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินได้มากขึ้น

ควรเลือกใช้ดินเบนโทไนด์ที่มีองค์ประกอบของแร่ธาตุซิลิกาออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น เนื่องจากปริมาณของแร่ธาตุสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินได้มากขึ้น

การใช้เทคนิคการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการล้างแบบแห้ง โดยอาศัยกระบวนการดูดซับเป็นวิธีที่น่าสนใจ และควรมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไป เนื่องจากจะสามารถดกกลีเซอรอลอิสระและกลีเซอรอลทั้งหมดจากน้ำมันไบโอดีเซลได้ และควรทำการเลือกใช้ตัวดูดซับที่เหมาะสม เพื่อประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรินที่ดีและค่าความเป็นกรดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กิตติศักดิ์ เสพศิริสุข, วิทยา ปั่นสุวรรณ และนิพนธ์ ตังคนานุรักษ์. ใน การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ครั้งที่ 47, หน้า 327-334. 17-20 มีนาคม 2552 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร, 2552.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม = Environmental Engineering. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์, 2539.

ชาคริต ทองอุไร, โชคดี มณีรัตน์. การประยุกต์ใช้ดินฟอกในกระบวนการล้างไบโอดีเซล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552.

เดชา ฉัตรศิริ. กระบวนการดูดซับ. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

ทองธรรม โพธิ์ถาวร, ชาคริต ทองอุไร, รวมพร นิคม และสมหมาย โอชาพันธุ์. การประยุกต์ใช้ดินฟอกในการดูดซับสบู่รวมกับการล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ. ใน สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน, หน้า 5-10. คณะวิศวกรรมศาสตร์ : ฝ่ายวิชาการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2553.

ฉิรดา รอดเสียงลั้ง และสุรินทร์ เหล่าสุขสถิตย์. บทบาทของเคลย์กัมมันต์ในการเปลี่ยนน้ำมันปาล์มเป็นเมทิลเอสเทอร์. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 18 (กันยายน – ธันวาคม 2551) : 70-79.

ธุรกิจพลังงาน, กรม. สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: [http://www.doeb.go.th/knowledge/data/test\\_biodiesel.pdf](http://www.doeb.go.th/knowledge/data/test_biodiesel.pdf) [11 มกราคม 2556]

บุษยา ศรีวิจารณ์. การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

ปิยะรัตน์ สารวงค์. การกำจัดกรดฮิวมิกในน้ำดิบเพื่อการผลิตน้ำประปาโดยกระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยโคโคแซนและเบนโทไนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2545.

ไพจิตร จันทร์วงศ์, ลดาวัลย์ พัดสีบสกุล, ณรงค์ จุงสกุลนิรันดร์, วีระศักดิ์ อนามัยบุตร, อิศรา สุขสถาน และวิไลศรี ลิ้มพยอม. การศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์-เคมี และองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันจากเมล็ดเรพ เมล็ดแคโรต และเมล็ดลินสีดเพื่อประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม. ใน รายงานประชุมทางวิชาการครั้งที่ 24, หน้า 654-655. 27-29 มกราคม 2529 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร, 2529.

รุจิรา ไทยเอียด. ศึกษาและออกแบบระบบบำบัดฟลูออไรด์ในน้ำใต้ดินแบบทีละเท โดยวิธีการดูดซับด้วยดินเบนโทไนด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2548.

วรกิจ บรรเทิงไพบูลย์, สุภกร บุญยืน, สมลักษณ์ เรืองสุทธินฤภาพ, จิรดา สิงขรรัตน์ และนภัทร ทวีกาญจน. ปฏิกริยาทรานเอสเทอร์รีฟิเคชันโดยใช้ไขมันพืชใช้แล้วจากร้านทอดมันเป็นวัตถุดิบ (มีปริมาณกรดไขมันอิสระค่อนข้างต่ำ). วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 18 (เมษายน-มิถุนายน 2553) : 14-18.

วิชาการเกษตร, กรม. สบู่ดำกับน้ำมันดีเซล. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา <http://www.doa.go.th/th/showArticles.aspx?id=186,25> [ 18 มกราคม 2556]

ศิริวรรณ ศิลปสกุลสุข. การควบคุมคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล. กรมวิทยาศาสตร์บริการ 55 (พฤษภาคม 2550) : 45-49.

ศุภธิดา อ่ำทอง. ปฐพีเคมีเบื้องต้น. กรุงเทพมหานคร : คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2554.

ไศภินาฏ เกตุวิชิต, หทัยรัตน์ ริมศิริ, วิชัย หฤทัยธนาสันต์ และสุพนิดา วินิจฉัย. คุณสมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติด้านอนุมูลอิสระของน้ำมันสบู่ดำที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนด์. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46, หน้า 310-319. 29 มกราคม – 1 กุมภาพันธ์ 2551 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร, 2551.

สุพัตรา บุตรเสรีชัย และยุวรัตน์ เงินเย็น. การศึกษาการกำจัด ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดงโดยใช้ แร่ดินเบนโทไนต์. ใน การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาครั้งที่ 12, หน้า 315-320. 28 มกราคม 2554 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น 2554.

อนุชา พรหมวังขวา และ ชัยชาญ ฤทธิเกริกไกร. ไชประตุสู่ความรู้เรื่องไบโอดีเซล. วารสารโลก พลังงาน 10, (เมษายน.-มิถุนายน 2550): หน้า 49-56.

อุไรลักษณ์ ลิเรือง. การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยเบนโทไนต์กัมมันต์ที่มีซิลิกาต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

เอกสิทธิ์ เทพวีระกุล. การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรด. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

## ภาษาอังกฤษ

Abdullah M.A., Chiang L. and Nadeem M. Comparative evaluation of adsorption kinetics and isotherms of a natural. Chemical Engineering Journal. 146 (2009) : 370-376.

Agarwal, D., Sinha., S., and Agarwal, AK. Experimental investigation of control NO<sub>x</sub> emissions in biodiesel-fueled compression ignition engine. Renewable Energy 31, (2006) : 2356-2369.

Atadashi I.M., Aroua M.K., Abdul A. A.R. and Sulaiman N.M.N. Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (2012): 3275-3285.

Attanatho, L., Magmee, S., and Jenvanitpanjakul, P. Factors affect the synthesis of biodiesel from crude palm kernel oil, The Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment", 359-361 2004. Dec.1-3 Hua Hin Thailand, 2004.

- Berrios M. and Skelton R.L. Comparison of purification methods for biodiesel. Chemical Engineering Journal. 144 (2008) : 459–465.
- Cynthia A. C. and Raymond N. Y. Use of equilibrium and initial metal concentrations in determining Freundlich isotherms for soils and sediments. Engineering Geology 85 (2006) : 19– 25.
- Fazal M.A., Haseeb A.S.M.A.and Masjuki H.H. Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 15 (2011) : 1314–1324.
- Ferrari, R., Oliveira. VS., and Scabio, A. Oxidative stability of biodiesel from soybean oil fatty acid ethyl esters. Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.) 62, (2005): 291-295.
- Grigoriy A. and Marc D. Analysis of Adsorption Isotherms: Lattice Theory Predictions, Classification of Isotherms for Gas–Solid Equilibria, and Similarities in Gas and Liquid Adsorption Behavior. Journal of Colloid and Interface Science. 200 (1998) : 273–290.
- Hideki F., Akihiko K. AND Hideo N. Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. Journal of Bioscience and Bioengineering. 92 (2001) : 405-416.
- Karimi L. and Salem A. Analysis of bentonite specific surface area by kinetic model during activation process in presence of sodium carbonate. Microporous and Mesoporous Materials. 141 (2011) : 81-87.
- Márcia C. M., Candice S. F., Bruna O., Edilson V. B. and Elina B. C. Rice husk ash as an adsorbent for purifying biodiesel from waste frying oil. Fuel. 92 (2012) : 56-61.
- Maria C. S. G., Nehemias C. P. and Sueli T. D. B. Separation of biodiesel and glycerol using ceramic membranes. Journal of Membrane Science. 352 (2010) : 271-276.

- Meher, LC., Dharmagadda, VSS., and Naik, SN. Optimization of alkali-catalyzed transesterification of *Pongamia pinnata* oil for production of biodiesel. Bioresource Technology 97, (2006): 1392-1397.
- Nalan T. and Yurdanur A. Adsorption of poly(vinylimidazole) from aqueous solutions onto Na-bentonite. International Journal of Mineral Processing. 112–113 (2012) : 49-54.
- Rashid, U., and Anwar, F. Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil. Fuel 87. (2008) : 265-273
- Shishir M., Hingu, Parag R. and Gogate, Virendra K. Rathod. Synthesis of biodiesel from waste cooking oil using sonochemical reactors. Ultrasonics Sonochemistry 17 (2010) : 827-832.
- Wyatt, VT., et al. Fuel properties and nitrogen oxide emission levels of biodiesel produced from animal fats. Journal of the American Oil Chemist's Society 82. (2005) : 585-591.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติและมาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล

#### 1. การหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและสบู่ในไบโอดีเซลด้วยวิธีไทเทรต

การหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ที่คงเหลือและหาค่าสบู่ที่คงเหลือด้วยวิธีการไทเทรต สามารถทำได้ดังนี้

1) เก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลบริสุทธิ์หรือน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับปริมาณ 10 กรัม ใส่ในขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร จากนั้นละลายตัวอย่างในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) ปริมาตร 50 มิลลิลิตร

2) เติมสารละลายฟีนอลเรด (phenol red) ความเข้มข้น 1% ลงไปในขวดตัวอย่างจำนวน 1 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน สังเกตสีของสารละลายจะมีสีแดงหรือสีส้ม

3) ไทเทรตตัวอย่างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ จนกว่าสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีส้มเป็นสีเหลืองใส กำหนดให้ปริมาณของสารละลายไฮโดรคลอริกที่ใช้ในไปจากขั้นตอนนี้เท่ากับ ค่า A

4) เติมสารละลายโบรมอฟีนอลบลู (bromophenolblue) ความเข้มข้น 0.4% ลงไปในขวดตัวอย่างจำนวน 1 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน สังเกตสีของสารละลายจะมีสีเขียว

5) ไทเทรตตัวอย่างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ จนกว่าสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีเหลืองใส กำหนดให้ปริมาณของสารละลายไฮโดรคลอริกที่ใช้ในไปจากขั้นตอนนี้เท่ากับ ค่า B

6) นำค่า A ที่ได้จากข้อ 3 ไปคำนวณหาค่าปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่ คงเหลือจากสูตร

$$C = \frac{A \times 0.01 \times 40}{W \times 1000}$$

เมื่อ  $C$  = ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่คงเหลือในน้ำมันไบโอดีเซล (กรัมของเบสต่อกรัมไบโอดีเซล)

$A$  = ปริมาณของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

$W$  = น้ำหนักของไบโอดีเซล (กรัม)

7) นำค่า  $B$  ที่ได้จากข้อ 3 ไปคำนวณหาค่าปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่ คงเหลือจากสูตร

$$S = \frac{B \times 0.01 \times 0.4}{W \times 1000}$$

เมื่อ  $S$  = ปริมาณสบู่ที่คงเหลือในน้ำมันไบโอดีเซล (กรัมของเบสต่อกรัมไบโอดีเซล)

$B$  = ปริมาณของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

$W$  = น้ำหนักของไบโอดีเซล (กรัม)

## 2. การหาปริมาณกลีเซอรินทั้งหมดและกลีเซอไรด์ในไบโอดีเซล โดยอาศัยเทคนิค แก๊ส โครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

การวิเคราะห์ตัวอย่างไบโอดีเซลโดยอาศัยการตรวจวัดเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีจะสามารถวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอลทั้งหมด ค่ากลีเซอรอลอิสระ ค่าไดกลีเซอไรด์ ค่าโมโนกลีเซอไรด์ที่มีในน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมาก เพราะจะสามารถวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล ตามมาตรฐาน EN 14105 โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างก่อนการตรวจวัดด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี มีดังนี้

- 1) ชั่งตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล 100.00 มิลลิกรัม ใส่ลงในขวดขนาด 20 มิลลิลิตร
- 2) เติมสารละลายมาตรฐาน 1 (1,2,4-butanetriol) ปริมาณ 80.00 ไมโครลิตร



- 3) เติมสารละลายมาตรฐาน 2 (tricaprin) ปริมาณ 100.00 ไมโครลิตร
- 4) เติม MSTFA ปริมาณ 100.00 ไมโครลิตร ปิดฝาให้สนิท เขย่าให้เข้ากัน แล้วทิ้งไว้ประมาณ 20 นาที
- 5) เติมเฮปเทน (heptanes) ปริมาณ 8 มิลลิลิตร ลงในสารละลายเขย่าให้เข้ากันและนำตัวอย่างที่เตรียมไปฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ปริมาณ 1 ไมโครลิตร

สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ มีดังนี้

- Instrument: CP-3800 Varian gas chromatograph
- Injector: Cold on-column, 1  $\mu\text{L}$ , reversed liner
- Column: Glycerides Ultimetel (Varian) 10m x 0.32 mm (ID) x 0.1  $\mu\text{m}$  (filmthickness) with guard column 2m x 0.53 mm(ID)
- Temperature : 100 °C (1 min) – 15 °C / min to 370 °C
- Detector: FID, 380 °C
- Carrier gas: Helium, Constant flow 4 mL / min
- Oven: 50 °C (1 min), to 180 °C at 15 °C / min, to 230 °C at 7 °C / min to 370 °C (5min) at 10 °C / min

### 3. การหาค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซล

การหาค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลเป็นขั้นตอนสำคัญของการทดสอบคุณภาพไบโอดีเซล เพื่อตรวจสอบว่าน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าความเป็นกรดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D974 ซึ่งได้กำหนดค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลต้องมีค่าไม่เกิน 0.5 ซึ่งขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์มีวิธีการ ดังนี้

1) การเตรียมสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1 M (standard alcoholic potassium hydroxide solvent) เริ่มจากการชั่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.6 กรัม ละลายในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) 100 มิลลิลิตร จากนั้นชั่งสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนแทลเลต (potassium hydrogen phthalate) 0.2 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2) จากนั้นทำการหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยการปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนแทลเลต 25 มิลลิลิตร ไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) เป็นอินดิเคเตอร์ จำนวน 6 หยด และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้นจากสูตร

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

เมื่อ  $C_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนแทลเลต

$C_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

3) การเตรียมสารละลายไทเทรชัน (titration solvent) โดยเตรียมจากโทลูอีน (toluene) 250 มิลลิลิตรลงในไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) 247.5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

4) การเตรียมสารละลายอินดิเคเตอร์พาราแนพทอลเบนซีน โดยละลายพาราแนพทอลเบนซีน (p-Naphtholbenzein) จำนวน 0.5 กรัมในสารละลายไทเทรชัน 100 มิลลิลิตร

5) ชั่งตัวอย่างไบโอดีเซลที่ ผ่านการดูดซับแล้ว 2 กรัมปิเปตสารละลายไทเทรชัน 25 มิลลิลิตรและสารละลายอินดิเคเตอร์พาราแนพทอลเบนซีน 0.125 มิลลิลิตร นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนสารละลายเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียว กำหนดให้ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นในขั้นตอนนี้เท่ากับ ค่า A

6) ทำตัวควบคุม (blank) โดยปิเปตสารละลายไทเทรชัน 25 มิลลิลิตรและสารละลายอินดิเคเตอร์ฟาราแนพทอลเบนซีน 0.125 มิลลิลิตร นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนสารละลายเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียวกำหนดให้ปริมาตรสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในขั้นตอนนี้เท่ากับ ค่า B

7) นำค่าที่ได้จากการไทเทรต มาคำนวณเพื่อหาค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลจากสูตร

$$\text{Acid Number, mg KOH/g} = \left\{ \frac{(A-B) \times M \times 56.1}{W} \right\}$$

เมื่อ A = ปริมาตรสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างไบโอดีเซล (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตตัวควบคุม (มิลลิลิตร)

M = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

W = น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล (กรัม)

#### 4. ข้อกำหนดเกี่ยวกับมาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล

##### 1) ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาการผลิตไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเอสเทอร์น้อยกว่าที่กำหนด ซึ่งบ่งถึงยังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณสูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูงและเกี่ยวเนื่องกับการอุดตันในหัวฉีดหรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์

## 2) ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามากก็จะให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณเดียวกัน ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันนอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำอีกด้วย

## 3) ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ความหนืดเกี่ยวข้องกับกรไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในท้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซล เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง

## 4) จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุด เมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมันแล้วทำให้น้ำมันติดไฟมาตรฐานกำหนดให้มีค่าจุดวาบไฟมากกว่า 120 องศาเซลเซียส ปริมาณเมทานอลที่หลงเหลือในไบโอดีเซลทำให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่งเคลื่อนย้ายและการจัดเก็บ ปริมาณเมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่า 0.2 % ส่งผลให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส

## 5) กำมะถัน

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชดิบที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วนขององค์ประกอบกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้ จะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

#### 6) แก๊สซัลเฟต

แก๊สซัลเฟตเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณแก๊สซัลเฟตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์

#### 7) น้ำ

ปริมาณน้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนั้นน้ำในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกระหว่างน้ำกับเอสเทอร์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

#### 8) สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด

สารปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการทรานส์เอสเตอร์ฟิเคชัน และปฏิกิริยาข้างเคียง เช่นปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารที่ไม่สaponิฟายด์ ได้แก่ ไกมันที่ไม่อยู่ในรูปของกลีเซอไรด์, กรดไขมันอิสระ, fatty alcohol, สารประกอบไฮโดรคาร์บอน, แอลกอฮอล์อย่างแข็ง, triterpene alcohol, สารประกอบแคโรทีน วิตามิน และอื่นๆ ซึ่งขึ้น อยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันพืชเริ่มต้น โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลมีผลเสียต่อเครื่องยนต์หลายด้าน เช่น คุณสมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา เนื่องสารประกอบของสารที่ไม่สaponิฟายด์ เปลี่ยนสภาพกลายเป็นสารที่มีผลในการลดคุณสมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซล

#### 9) การกัดกร่อนแผ่นทองแดง

การกัดกร่อนแผ่นทองแดง แสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากปริมาณกรดเช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอริ์ในน้ำมัน ซึ่งค่าการกัดกร่อนนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

## 10) ค่าของกรด

แสดงความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซล เป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบน้ำมันพืชและปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ทำให้อายุการใช้งานของปั๊มและไส้กรองน้ำมันลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมัน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกจากปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันและผลของสภาวะในการจัดเก็บ

## 11) กรดลิโนเลนิก

เมทิลเอสเทอร์แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตันและการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

## 12) เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการเกิดสารประเภทเพอร์ออกไซด์(Peroxide linkage) ขึ้นระหว่างพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่อยู่ในโครงสร้างของไบโอดีเซล ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดเมื่อน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โดยที่ความร้อนและแสงแดดมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่โลหะเช่นทองแดง และตะกั่วก็เป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดสารพอลิเมอร์ (oxidation polymerization) และเกิดของแข็งที่ไม่ละลายในไบโอดีเซลเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้จะขึ้นกับประเภทและคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบแล้วยังขึ้นกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วยโดยกระบวนการผลิตที่มีการให้ความร้อนสูงแก่ไบโอดีเซลเป็นระยะเวลาสั้น อาจส่งผลให้เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้มีค่าสูงกว่า 6 ชั่วโมงที่ 110 องศาเซลเซียส

## 13) ค่าไอโอดีน

ค่าไอโอดีนแสดงพันธะคู่ในน้ำมันซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูงทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่น ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไขหรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดขุ่นสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไอโอดีน 50-55 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กำหนดให้ค่าไอโอดีนไม่สูงกว่า 120 กรัมไอโอดีน/100 กรัม

## 14) เมทานอล

เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไบโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณต่ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล จุดวาบไฟขั้นต่ำของไบโอดีเซลคือ 130 องศาเซลเซียส เมทานอลมีค่าจุดวาบไฟต่ำ ถ้ายังมีเมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษาการขนส่งและการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอลมีค่าความเข้มข้นมากกว่า 5% จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทน และความหล่อลื่นของน้ำมัน

## 15) โมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์

ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์แสดงถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์

## 16) กลีเซอรินอิสระ

ปริมาณกลีเซอรินที่ยังเหลืออยู่ในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ ทำให้มีปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมันกลีเซอรินมีผลต่อการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

## 17) กลีเซอรินทั้งหมด

กลีเซอรินทั้งหมดคือปริมาณของกลีเซอรินอิสระ และปริมาณกลีเซอรินในโมเลกุลโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันไม่สมบูรณ์ มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรองและปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศอากาศเย็น

## 18) โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม), โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียม และแมกนีเซียม)

เป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่ และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล แคลเซียมยังมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีสำหรับกระบวนการพอลิเมอไรด์ของเอสเทอร์อีกด้วย ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กำหนดให้ ปริมาณโลหะกลุ่ม 1 และโลหะกลุ่ม 2 ไม่สูงกว่าอย่างละ 5.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

## 19) ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืชตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่ทำการกำจัดออกจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วย ซึ่งจะทำความเสียหายให้กับอุปกรณ์คะตะไลติกส์ คอนเวอร์เตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการแพร่มลพิษจากการที่มาตรฐานของการแพร่มลพิษเป็นกฎข้อบังคับมากขึ้นอุปกรณ์ catalytic converter จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล



## ภาคผนวก ข

## ตารางบันทึกผลการทดลองและวิธีการคำนวณ

## 1. ผลการหาระยะเวลาสัมผัสน้ำมัน

เวลาที่สัมผัสน้ำมัน (นาที)	ครั้งที่ ทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (กรัม)	HCl ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)
Control	1	10.06	12	9814.33	9815.38
	2	10.08	12.1	9816.42	
10	1	10.02	2.65	2184.60	2173.83
	2	10.07	2.65	2163.06	
20	1	10.01	2.15	1775.95	1755.30
	2	10.01	2.1	1734.65	
30	1	10.00	2	1655.35	1629.85
	2	10.03	1.95	1604.34	

## 2. ผลการหาปริมาณของตัวดูดซับ

ปริมาณตัวดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ครั้งที่ ทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (กรัม)	HCl ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)
Control	1	10.05	9.75	8095.37	8064.92
	2	10.01	9.6	8034.47	
1 %	1	10.02	3.45	2798.11	2755.61
	2	10.01	3.55	2713.11	
3 %	1	10.08	2.50	2641.25	2628.34
	2	10.05	2.40	2615.43	
5 %	1	10.06	1.90	1284.41	1264.93
	2	10.05	1.80	1760.73	

ปริมาณตัวดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ครั้งที่ ทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (กรัม)	HCl ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)
10 %	1	10.12	2.20	1760.73	1802.82
	2	10.00	2.30	1844.91	

### 3. ผลการหาขนาดอนุภาคตัวดูดซับ

ขนาดอนุภาค (Mesh)	ครั้งที่ ทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (กรัม)	HCl ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)
Control	1	10.03	7.15	5882.58	5894.32
	2	10.01	7.15	5906.07	
80-100	1	10.03	1.4	1151.83	1173.59
	2	10.02	1.45	1195.35	
100-120	1	10.08	1.8	1466.35	1431.12
	2	10.04	1.7	1395.88	
120-200	1	10.09	0.85	691.08	715.77
	2	10.03	0.9	740.46	

### 4. การหาความเข้มข้นของเบส

ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (M)	ครั้งที่ ทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (กรัม)	HCl ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)
Control	1	10.02	6.35	5303.88	5330.10
	2	10.01	6.40	5356.31	
1.0 M	1	10.17	3.15	2554.72	2565.03
	2	10.21	3.2	2575.35	
2.0 M	1	10.14	2.65	2161.75	2175.76
	2	10.17	2.7	2189.76	

ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (M)	ครั้งที่ ทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (กรัม)	HCl ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)
3.0 M	1	10.38	2.3	1792.54	1798.20
	2	10.23	2.25	1803.87	

### สูตรการคำนวณปริมาณกลีเซอรอลอิสระ และกลีเซอรอลทั้งหมด

- สูตรการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรอลอิสระ

$$G = [a_g (A_g / A_{ei1}) + b_g] \times (M_{ei1} / m) \times 100$$

เมื่อ	$G$	=	ร้อยละของกลีเซอรอลอิสระ (m/m)
	$A_g$	=	พื้นที่ใต้กราฟของกลีเซอรอล
	$A_{ei1}$	=	พื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐาน 1
	$M_{ei1}$	=	ปริมาณของสารมาตรฐาน 1 (มิลลิกรัม)
	$m$	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (มิลลิกรัม)
	$a_g$ and $b_g$	=	ค่าคงที่จากสมการถดถอยของกลีเซอรอล

- สูตรการคำนวณหาปริมาณโมโน/ได/ไตรกลีเซอไรด์

$$M = [a_m (\sum A_{mi} / A_{ei2}) + b_m] \times (M_{ei2} / m) \times 100$$

$$D = [a_d (\sum A_{di} / A_{ei2}) + b_d] \times (M_{ei2} / m) \times 100$$

$$T = [a_t (\sum A_{ti} / A_{ei2}) + b_t] \times (M_{ei2} / m) \times 100$$

เมื่อ	$M, D, T$	=	ร้อยละของไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ (m/m)
	$\sum A_{mi}, \sum A_{di}, \sum A_{ti}$	=	ผลรวมของพื้นที่ใต้กราฟของโมโน/ได/ไตรกลีเซอไรด์
	$A_{ei2}$	=	พื้นที่ใต้กราฟของสารมาตรฐาน 2

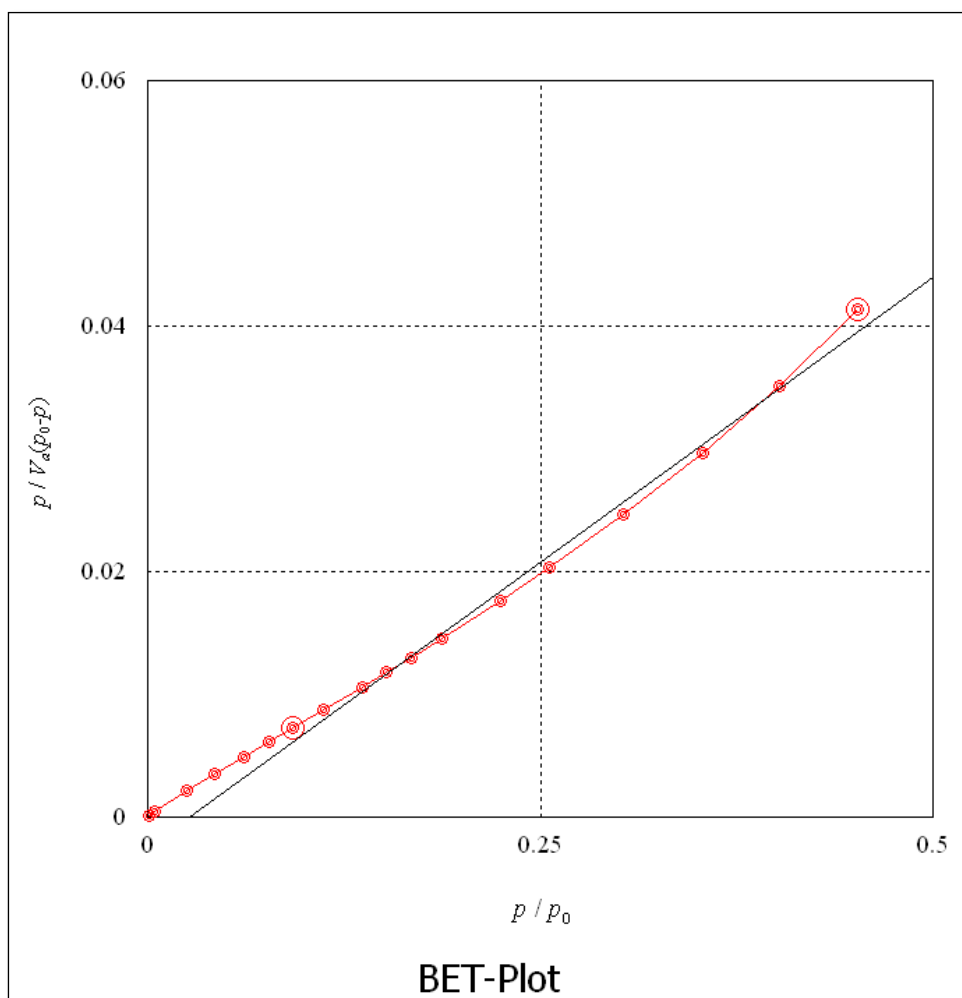
$M_{ei2}$	=	ปริมาณของสารมาตรฐาน 2 (มิลลิกรัม)
$m$	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (มิลลิกรัม)
$a_m$ and $b_m$	=	ค่าคงที่จากสมการถดถอยของโมโนกลีเซอไรด์
$a_d$ and $b_d$	=	ค่าคงที่จากสมการถดถอยของไดกลีเซอไรด์
$a_t$ and $b_t$	=	ค่าคงที่จากสมการถดถอยของไตรกลีเซอไรด์

- สูตรการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมด

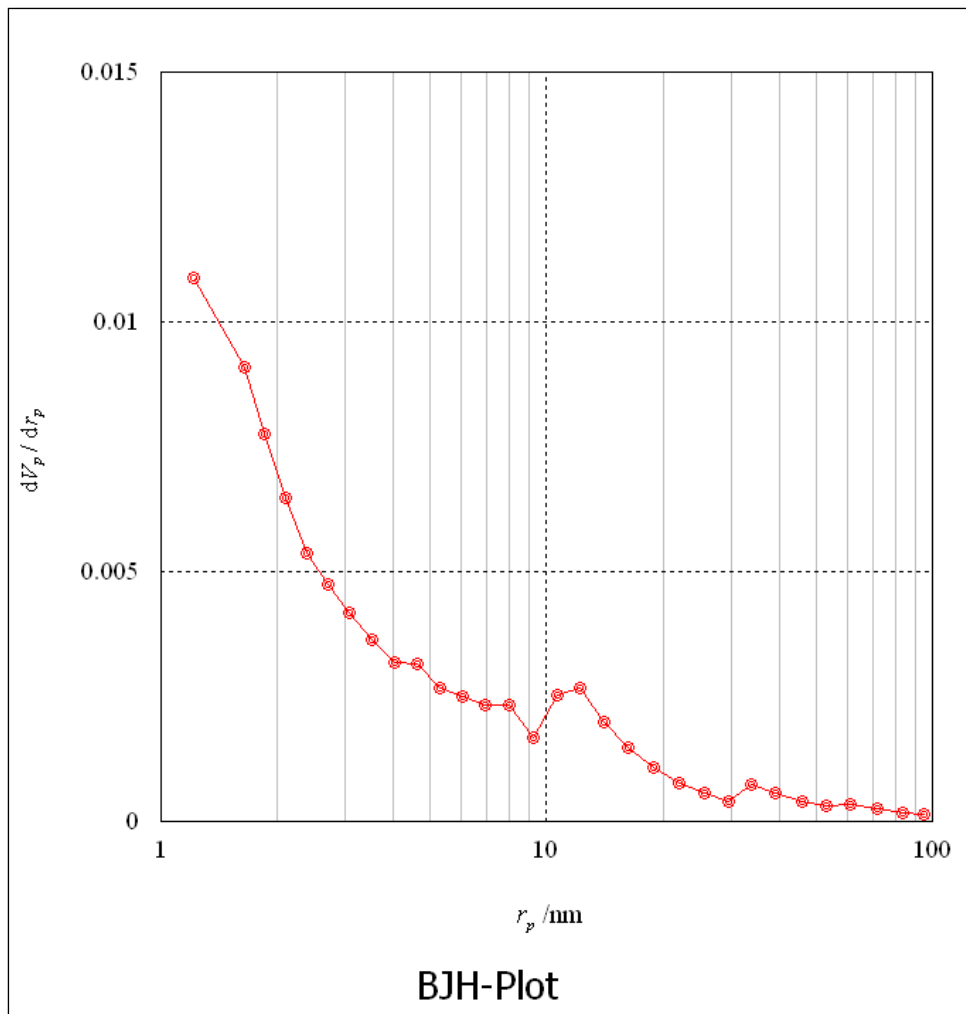
	$GT$	=	$G + 0.255 M + 0.146 D + 0.103 T$
เมื่อ	$GT$	=	ร้อยละของปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมด
	$G$	=	ร้อยละของกลีเซอรอลอิสระในตัวอย่าง
	$M$	=	ร้อยละของโมโนกลีเซอไรด์ในตัวอย่าง
	$D$	=	ร้อยละของไดกลีเซอไรด์ในตัวอย่าง
	$T$	=	ร้อยละของไตรกลีเซอไรด์ในตัวอย่าง

## ภาคผนวก ค

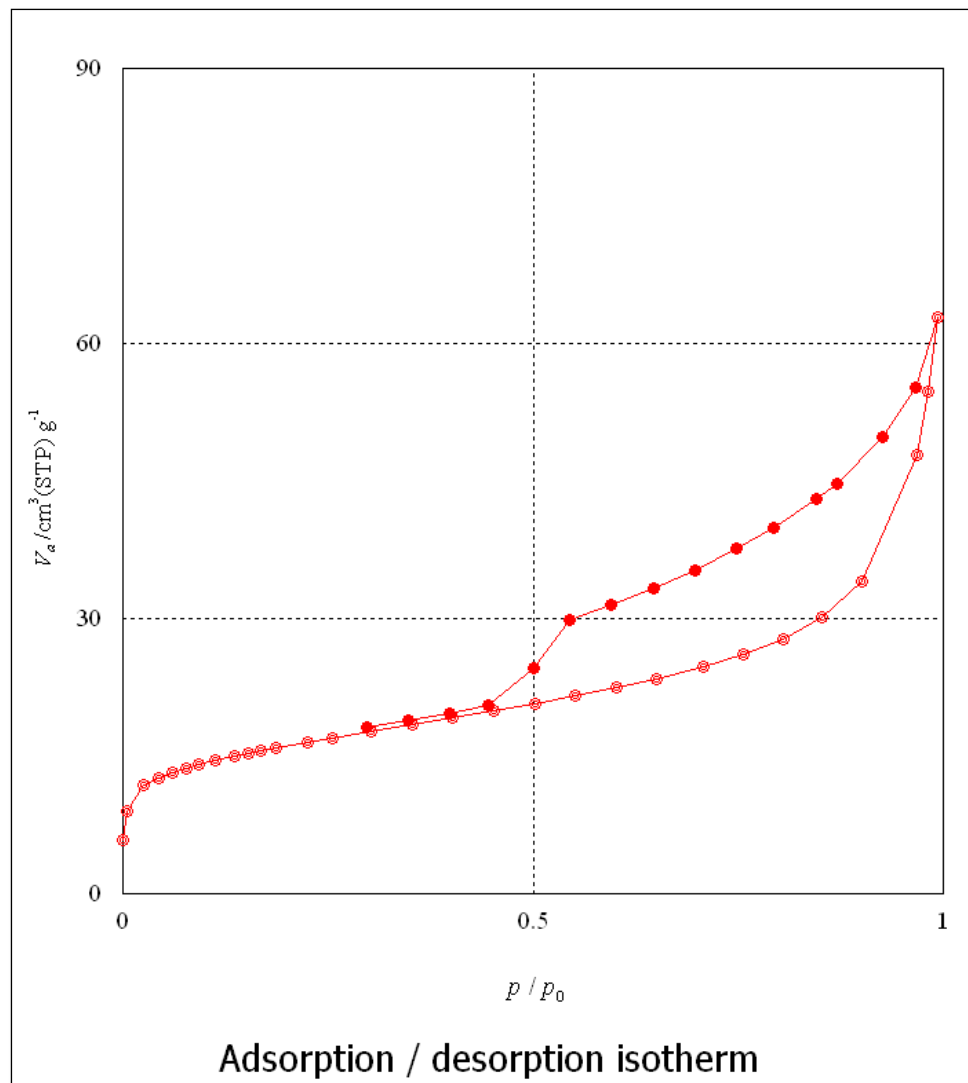
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Surface area analysis โดยอาศัยหลักการของ BET  
และผลการวิเคราะห์ดินเบนโทไนต์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)



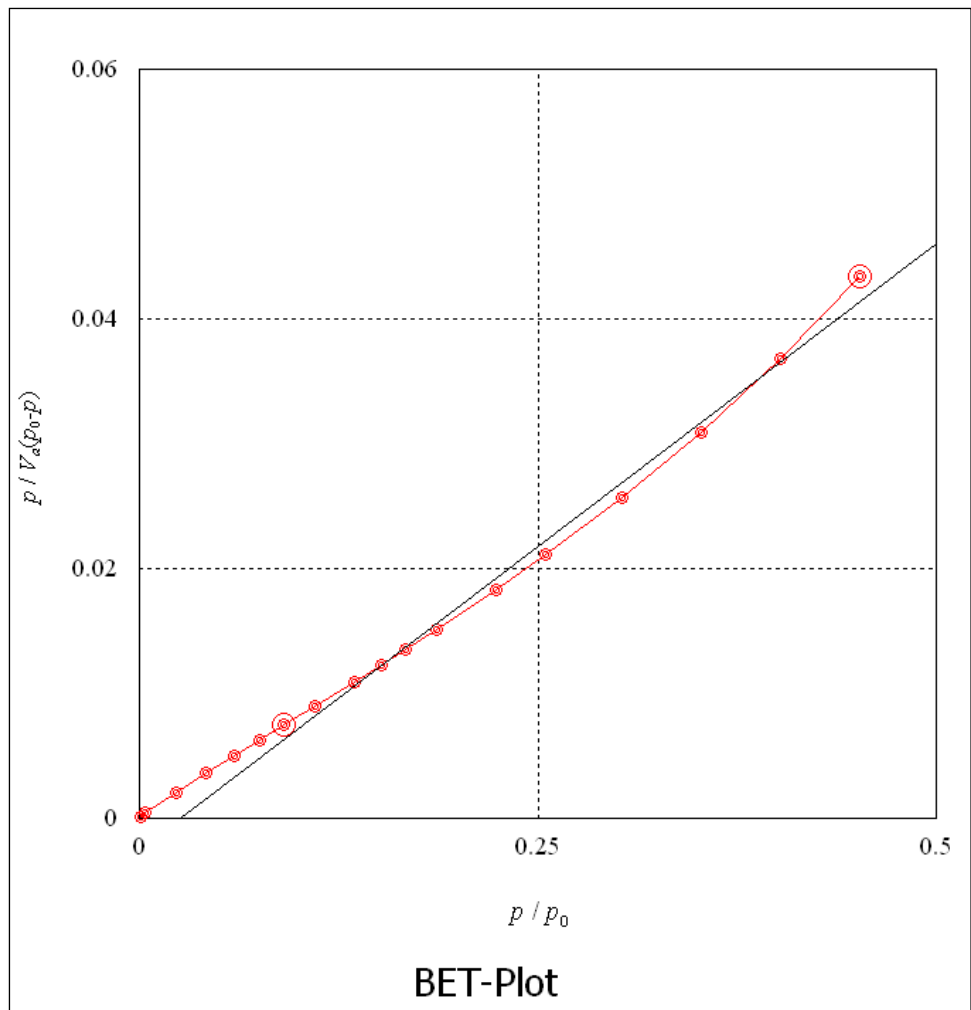
ภาพที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ BET-Plot ของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นธรรมชาติ



ภาพที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ BET- BJH ของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นธรรมชาติ

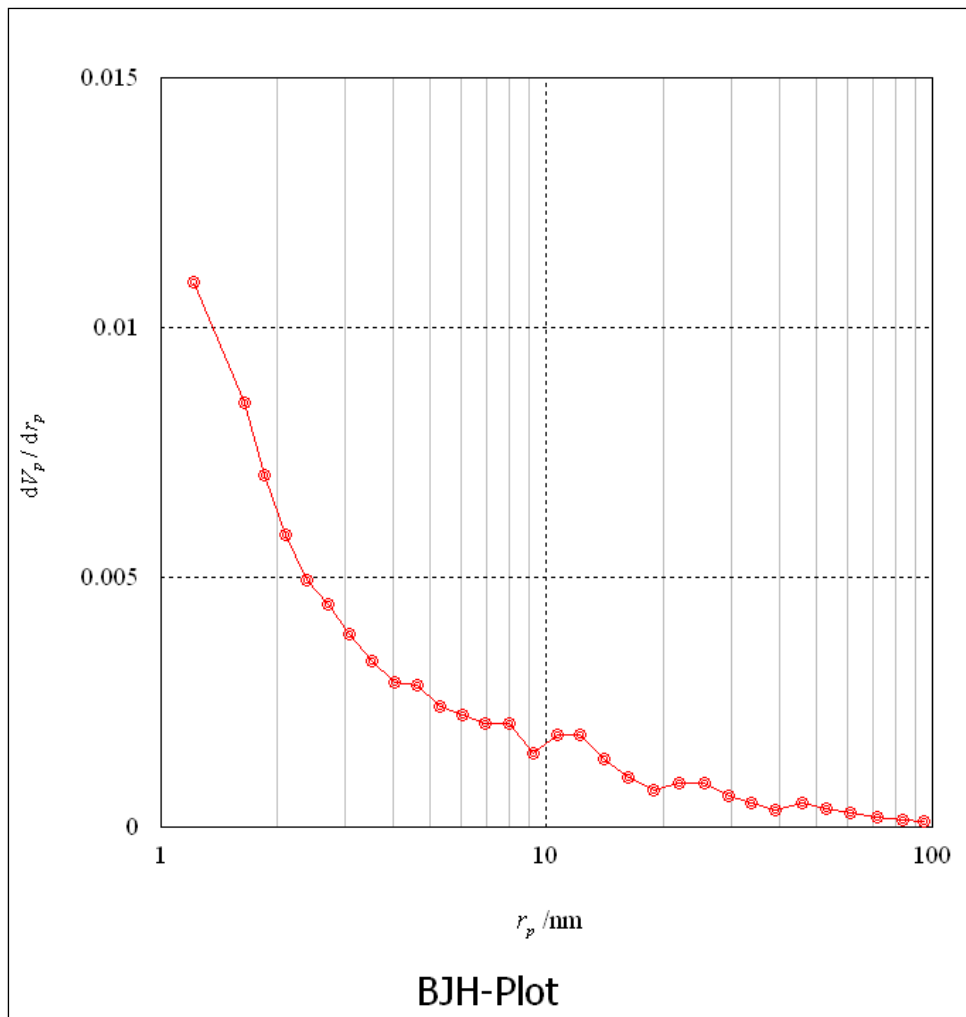


ภาพที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ BET-Isotherm ของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นธรรมชาติ

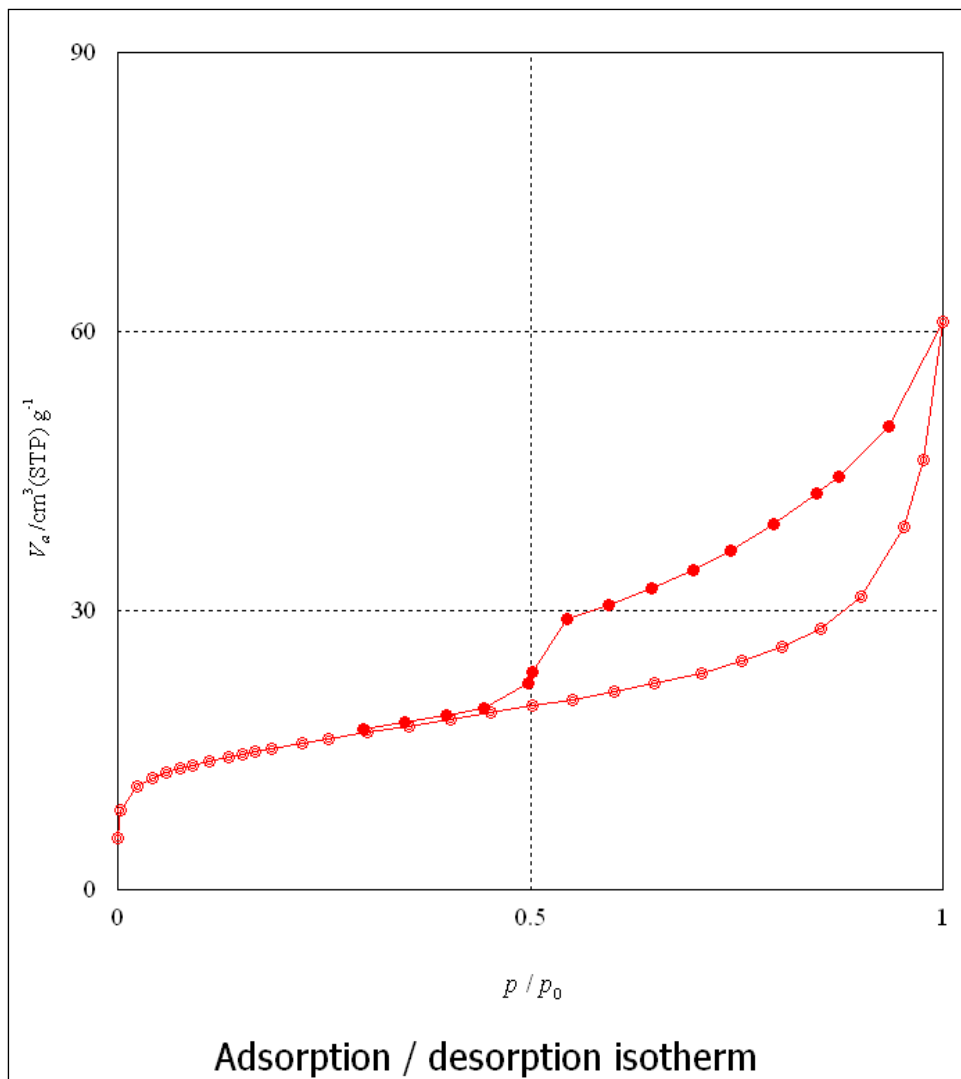


ภาพที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์ BET-Plot ของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส

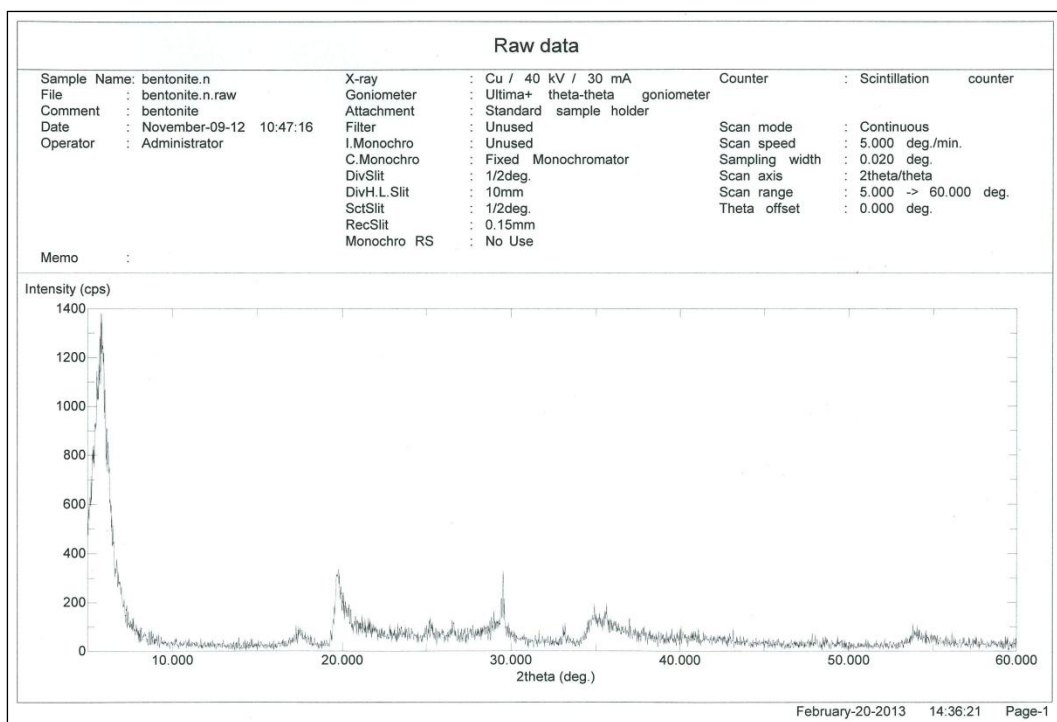




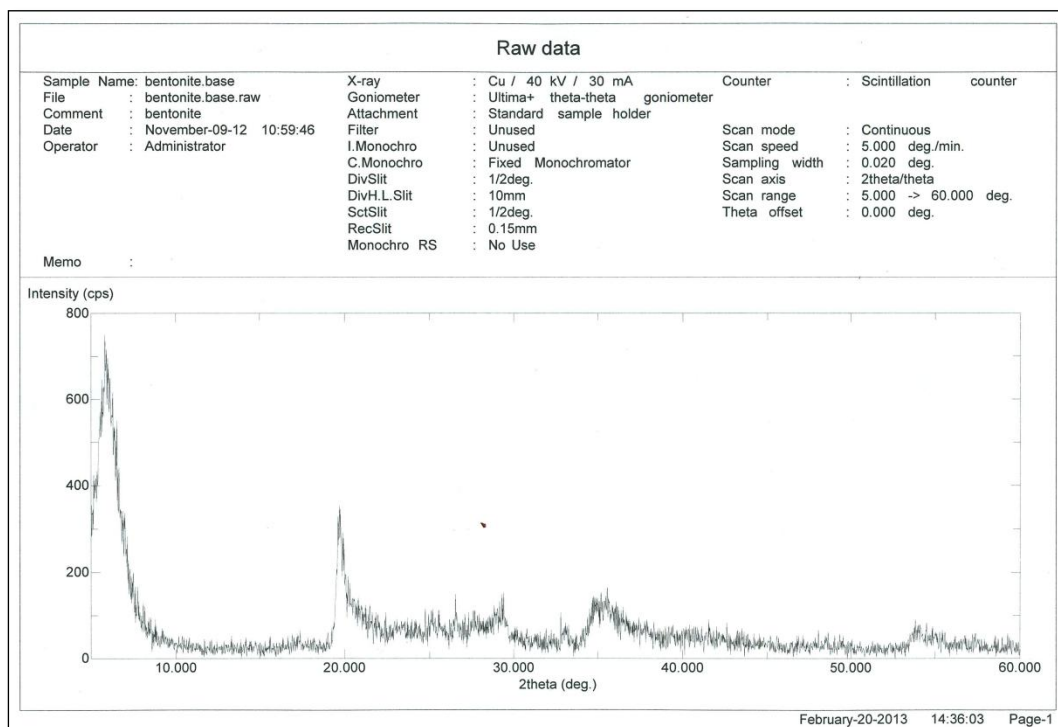
ภาพที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์ BET-BJH ของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส



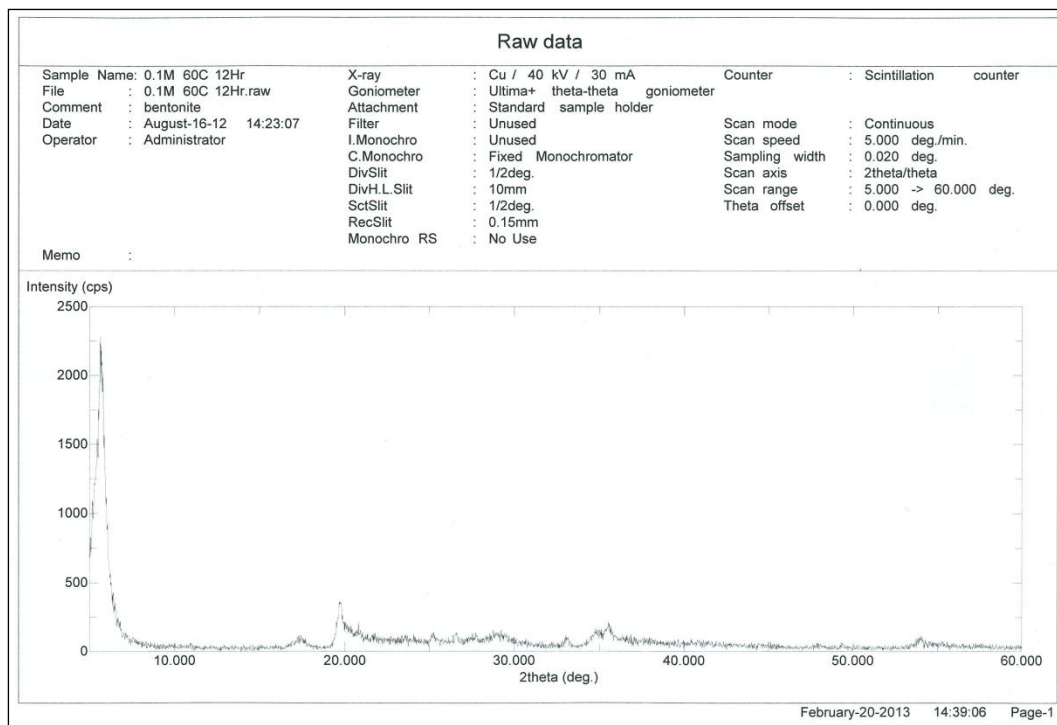
ภาพที่ ค.6 ผลการวิเคราะห์ BET-Isotherm ของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส



ภาพที่ ค.7 ผลการวิเคราะห์ XRD ของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นธรรมชาติ



ภาพที่ ค.8 ผลการวิเคราะห์ XRD ของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยเบส



ภาพที่ ค.9 ผลการวิเคราะห์ XRD ของดินเบนโทไนต์ที่กระตุ้นด้วยกรด

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธนพร สายตา เกิดเมื่อวันที่ 25 เมษายน พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย นครปฐม ในปีการศึกษา 2548 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ในปีการศึกษา 2552 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2553

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ผลงานในงานประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9 ซึ่งจัดขึ้นระหว่างวันที่ 6-7 ธันวาคม พ.ศ. 2555 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม