

การลดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์

นางสาวอามีนีย์ บริบูรณ์สุข

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

REDUCING WASTEWATER FROM BIODIESEL PRODUCTION PROCESS USING  
SMECTITE CLAY ADSORPTION

Miss Amenee Boriboonsuk

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

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการ ดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์
โดย	นางสาวอามีนีย์ บริบูรณ์สุข
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา

---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.สุชาดา บุตรนาค)

อามีนีย์ บริบูรณ์สุข: การลดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยการดูดซับด้วยดินสเมคไทต์. (REDUCING WASTEWATER FROM BIODIESEL PRODUCTION PROCESS USING SMECTITE CLAY ADSORPTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.สมใจ เพ็งปรีชา, 110 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยใช้กระบวนการดูดซับกลีเซอรอลด้วยดินสเมคไทต์ธรรมชาติและดินสเมคไทต์ที่ถูกกระตุ้นซึ่งเป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูก โครงสร้างและพื้นผิวของตัวดูดซับถูกอธิบายด้วยการศึกษาจากวิธีต่างๆ เช่น ศึกษาลักษณะกายภาพผ่านกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาการเลี้ยวเบนผ่านการดูดกลืนของรังสีเอ็กซ์ และศึกษาการดูดคายก๊าซไนโตรเจน พบว่า พื้นผิวของสเมคไทต์ธรรมชาติและสเมคไทต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดจากการคำนวณด้วยสมการบีอีที่มีค่าเท่ากับ 7.58 และ 5.96 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ผลของอุณหภูมิ ระยะเวลาสัมผัส และปริมาณของสารดูดซับในการดูดซับกลีเซอรอลด้วยสเมคไทต์ได้ถูกศึกษาโดยอาศัยเทคนิคของการดูดซับ ผลการทดลองพบว่า สเมคไทต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในอัตราส่วนดินต่อสารละลายกรดเท่ากับ 1 ต่อ 5 ให้ประสิทธิภาพของการดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซลได้สูงสุด ในสภาวะที่มีเมทานอล พบว่า ปริมาณกลีเซอรอลจะถูกกำจัดออกไปด้วยการใช้ตัวดูดซับในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 10 นาที นอกจากนั้น การกำจัดกลีเซอรอลจะเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 78.30 เมื่อเมทานอลถูกกำจัดก่อนทำการดูดซับ และการใช้สเมคไทต์เป็นตัวดูดซับร่วมกับถ่านกัมมันต์จะช่วยให้สามารถกำจัดกลีเซอรอลอิสระออกไปได้ทั้งหมด ไอโซเทอมของการดูดซับได้ถูกวิเคราะห์และหาค่าคงที่จากการใช้สมการของแลงเมียร์และฟรุนดลิช จากการศึกษาพบว่า การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์จากกระบวนการดูดซับด้วยดินสเมคไทต์จะช่วยลดปริมาณกลีเซอรอลอิสระในไบโอดีเซลได้ และให้คุณสมบัติไบโอดีเซลที่เป็นไปตามมาตรฐานข้อดีของกระบวนการ คือ ช่วยลดการเกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลที่ใช้อยู่ทั่วไป

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
ปีการศึกษา...2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

# # 5287315720 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS : BIODIESEL / PURIFICATION / ADSORPTION / SMECTITE / GLYCEROL

AMENEE BORIBOONSUK : REDUCING WASTEWATER FROM BIODIESEL PRODUCTION PROCESS USING SMECTITE CLAY ADSORPTION. ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMCHAI PENGPRECHA, Ph.D., 110 pp.

The adsorption of glycerol onto natural and activated smectite, a low cost adsorbent, was investigated for its beneficial use in biodiesel purification. The smectites were characterized by scanning electron microscopy, X-ray diffraction and N<sub>2</sub> adsorption-desorption to obtain information about their structure and surface texture. The surface area of natural smectite and acid-activated smectite calculated using BET method were 7.58 and 5.96 m<sup>2</sup>/g, respectively. The effects of temperature, contact time and adsorbent dose on the adsorption of glycerol onto smectite were studied using adsorption technique. The result showed that the smectite activated with 0.5 M sulfuric acid using 1: 5 ratio of soil per acid solution gave the highest efficiency in removing glycerol from biodiesel. In the presence of methanol, glycerol could be eliminated by using 10% wt of adsorbent at 50°C for 10 minutes. In addition, the removal of glycerol was increasing up to 78.30% on the condition that methanol had been removed before treatment. Free glycerol could be completely removed by the combination of smectite and activated carbon. The experimental isotherm data were analyzed using Langmuir and Freundlich equations and the isotherm constants were determined. The purified biodiesel from adsorption process by smectite could be used to decrease free glycerol and its quality of biodiesel passed the specification of biodiesel standard. The advantage of this process is the decrease in wastewater from the conventional process in biodiesel production.

Field of Study : Environmental Science.....

Student's Signature .....

Academic Year : 2011.....

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ คอยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนดูแลใส่ใจทั้งในส่วนของการทำงานและการดำเนินชีวิตเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงการดูแลเอาใจใส่ และคำแนะนำที่ดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และ ดร.สุชาดา บุตรนาค ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณหลักสูตรสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนอุดหนุนในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ และความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ นางสาวจันทร์เลขา ภูทองคำ และนางสาวสุมิตรา นามประดิษฐ์กุล ในฐานะนิสิตที่ร่วมงานในโครงการวิจัยเดียวกัน ขอขอบคุณสำหรับความช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำที่ดี ความห่วงใยและกำลังใจที่มีให้กันมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณบุคลากรและเพื่อนนิสิตทุกคนจากสหสาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบพระคุณเพื่อนนักศึกษาจากมหาวิทยาลัยมหิดล ขอขอบพระคุณเพื่อนนักเรียนจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และทุกกำลังใจที่มีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ขอขอบคุณที่คอยช่วยเหลือ คอยส่งความปรารถนาดีและมีความห่วงใยให้อย่างสม่ำเสมอ

สุดท้ายนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงเกิดขึ้นไม่ได้ ถ้าขาดกำลังใจและแรงสนับสนุนสำคัญจากครอบครัว ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง สมาชิกทุกคนในครอบครัวบริบูรณ์สุขและครอบครัวอาแซ ขอขอบคุณที่คอยเสริมสร้างกำลังใจและอยู่เคียงข้างกันตลอดมา จนทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สามารถดำเนินและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไบโอดีเซล.....	4
2.1.1 ขั้นตอนและวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล.....	6
2.1.2 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน.....	11
2.1.3 การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์.....	13
2.1.3.1 การล้างแบบเปียก.....	15
2.1.3.5 การล้างแบบแห้ง.....	17
2.1.4 มาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล.....	18
2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการดูดซับ.....	20
2.2.1 ประเภทของการดูดซับ.....	20
2.2.2 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ.....	21
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	22
2.2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	25

บทที่	หน้า
2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับดิน.....	29
2.3.1 ความหมายและส่วนประกอบของดิน.....	29
2.3.2 แร่ธาตุในดิน.....	30
2.3.3 แร่ดินเหนียวในดิน.....	32
2.3.3.1 เคโอลิไนต์.....	33
2.3.3.2 สเม็คไทต์.....	34
2.3.3.3 อิลไลต์.....	37
2.3.4 คุณสมบัติของแร่ดินเหนียว.....	37
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	40
3 วิธีดำเนินการทดลอง.....	43
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง.....	45
3.3.1 การเตรียมดินดูดซับ.....	46
3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของดินสเม็คไทต์.....	48
3.3.3 การสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล.....	49
3.3.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์.....	50
3.3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล.....	53
3.3.6 การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับของดินสเม็คไทต์ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์.....	53
3.3.7 การศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับของดินสเม็คไทต์โดย ใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับร่วม.....	54
3.3.8 การวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับ.....	54
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	55
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินสเม็คไทต์.....	55
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ดินด้วยเทคนิค SEM.....	56
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ดินด้วยเทคนิค Surface area analysis (BET)....	58



บทที่	ณ
	หน้า
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ดินด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD).....	62
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ดินด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF).....	63
4.1.5 ผลการวิเคราะห์ดินด้วยเทคนิค Fourier-Transform Infrared spectrometer (FTIR).....	64
4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทต์.....	65
4.2.1 ผลการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม.....	65
4.2.2 ผลการหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	66
4.2.3 ผลการหาชนิดและปริมาณตัวดูดซับที่เหมาะสม.....	67
4.2.4 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้นดินดูดซับด้วยกรด.....	69
4.2.5 ผลการหาเวลาการตกตะกอนกลีเซอรอลภายหลังการดูดซับที่เหมาะสม.....	71
4.2.6 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล.....	72
4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล.....	73
4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของดินสเม็คไทต์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์โดยอาศัยเทคนิคการกรองร่วมด้วย.....	75
4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับร่วมกับดินสเม็คไทต์.....	76
4.6 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับกลีเซอรอลด้วยดินสเม็คไทต์.....	77
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	80
รายการอ้างอิง.....	82
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติและมาตรฐานคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล	87
ภาคผนวก ข ตารางบันทึกผลการทดลองและวิธีการคำนวณ.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	110

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางแสดงวิธีการผลิตไบโอดีเซล.....	5
2.2	ตารางแสดงข้อดีข้อเสียของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดในการผลิตไบโอดีเซล.....	9
2.3	ตารางแสดงผลกระทบจากสิ่งเจือปนที่มีต่อคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลและเครื่องยนต์.....	14
2.4	ตารางแสดงลักษณะของน้ำเสียที่เกิดจากการทำไบโอดีเซลด้วยวิธีใช้น้ำล้าง.....	16
2.5	ตารางแสดงความแตกต่างของการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีต่างๆ.....	18
2.6	ตารางแสดงมาตรฐานคุณภาพไบโอดีเซล.....	19
2.7	ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแรมดินเหนียวสำคัญ 3 ชนิด.....	36
2.8	ตารางแสดงการเปรียบเทียบความจุในการดูดซับด้วยดินดูดซับต่างชนิดกัน.....	40
4.1	ตารางแสดงการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของดินสเม็คไทต์.....	58
4.2	ตารางแสดงไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของดินสเม็คไทต์.....	59
4.3	ตารางแสดงไอโซเทอมการดูดและการคายก๊าซไนโตรเจนของดินสเม็คไทต์.....	61
4.4	ตารางแสดงค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลหลังการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์กระตุ้นด้วยกรดที่ความเข้มข้นต่างกัน.....	70
4.5	ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์....	73
4.6	ตารางแสดงค่าคงที่จากไอโซเทอมของการดูดซับ.....	78

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	6
2.2	กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	26
2.3	กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	27
2.4	กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที.....	28
2.5	โครงสร้างของแร่ดินเหนียว.....	33
2.6	โครงสร้างของแรมอนต์มอริลโลไนต์.....	35
3.1	แผนภาพการดำเนินการทดลองโดยสรุป.....	45
3.2	การเตรียมดินสเม็คไทต์เพื่อใช้ในการดูดซับ.....	47
3.3	การเตรียมไบโอดีเซลเพื่อใช้ในการดูดซับ.....	49
3.4	ภาพการดูดซับกลีเซอรอลด้วยดินสเม็คไทต์.....	52
4.1	ดินสเม็คไทต์ธรรมชาติและดินสเม็คไทต์เผา.....	55
4.2	ภาพขยายของดินสเม็คไทต์จาก SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	56
4.3	ภาพขยายของดินสเม็คไทต์จาก SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า.....	57
4.4	ภาพขยายของดินสเม็คไทต์จาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า.....	57
4.5	ภาพแสดงแรมัตถุหลักของดินสเม็คไทต์ จากเทคนิค XRD.....	62
4.6	ภาพแสดงแร่ธาตุองค์ประกอบของดินสเม็คไทต์ธรรมชาติและดินสเม็คไทต์หลัง กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก จากเทคนิค XRF.....	63
4.7	ภาพแสดงหมู่ฟังก์ชันของธาตุในดินสเม็คไทต์ธรรมชาติและดินสเม็คไทต์หลัง กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก จากเทคนิค FTIR.....	64
4.8	แผนภาพแสดงผลของการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	65
4.9	แผนภาพแสดงผลการหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	66
4.10	แผนภาพแสดงผลการหาชนิดและปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม.....	67
4.11	แผนภาพแสดงผลการหาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสม.....	69
4.12	แผนภาพแสดงผลการหาระยะเวลาตกตะกอนหลังการดูดซับที่เหมาะสม.....	71
4.13	แผนภาพแสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับภายใต้สภาวะที่มี เมทานอลและไม่มีเมทานอล.....	72

ภาพที่	ม หน้า	
4.14	แผนภาพแสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของดินสเม็คไทต์ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์โดยอาศัยเทคนิคการกรองร่วมด้วย.....	75
4.15	แผนภาพแสดงผลของการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับร่วมกับดินสเม็คไทต์.....	76
4.16	แผนภาพแสดงไอโซเทอมการดูดซับกลีเซอรอล แบบฟรุนดลิช.....	77
4.17	แผนภาพแสดงไอโซเทอมการดูดซับกลีเซอรอล แบบแลงเมียร์.....	78

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาสภาพะโลกร้อนที่เกิดขึ้น ทำให้คนทั่วโลกให้ความสำคัญกับประเด็นเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น จึงมีการแสวงหาวิธีและแนวทางในการปรับตัวกับสภาพะโลกร้อน ซึ่งคาดว่าน่าจะทวีความรุนแรงมากขึ้น ประเด็นเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมที่ได้รับความสนใจ เช่น การฟื้นฟูทรัพยากรธรรมชาติ การจัดการขยะมูลฝอย การจัดการน้ำ เป็นต้น ประเด็นในด้านพลังงานเป็นอีกประเด็นทางสิ่งแวดล้อมที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะในเรื่องของวิกฤติพลังงาน ซึ่งเกิดขึ้นสืบเนื่องจากแหล่งพลังงานปิโตรเลียมที่มีจำนวนจำกัด จึงมีการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพเข้ามาทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังจะหมดไป ตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวภาพมีหลายชนิด เช่น เอทานอล แก๊สโซฮอลล์ และไบโอดีเซล เป็นต้น ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานปิโตรเลียมมีข้อดีหลายประการ คือ เป็นการใช้พลังงานหมุนเวียน สามารถฟื้นฟูหรือสร้างขึ้นใหม่ และช่วยรักษาสภาพแวดล้อมได้อย่างมาก

ไบโอดีเซล (biodiesel) เป็นพลังงานเชื้อเพลิงที่สามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงปิโตรเลียม โดยผลิตจากแหล่งพลังงานชีวภาพ และเป็นพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่เป็นพิษ สามารถย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ และช่วยลดมลพิษในอากาศ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถผลิตได้เองในประเทศ ทำให้ช่วยลดการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจากต่างประเทศได้อีกด้วยการผลิตไบโอดีเซล (biodiesel production) เริ่มต้นจากการนำน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์มาทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแอลกอฮอล์ เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันจากไตรกลีเซอไรด์เป็นเมทิลเอสเทอร์ โดยอาศัยกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อผ่านการทำปฏิกิริยาทางเคมีดังกล่าว จะให้ผลผลิตเป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอล (glycerol) หลังจากการแยกไบโอดีเซลออกจากกลีเซอรอล ไบโอดีเซลจะถูกนำไปทำให้บริสุทธิ์เพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซล ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา สบู่ และกลีเซอรอลที่ตกค้าง เป็นต้น จากนั้นจะมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้กับเครื่องยนต์ และมีการตรวจสอบคุณภาพน้ำมันให้มีสมบัติตามมาตรฐาน ก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในลำดับต่อไป

ปัญหาสำคัญที่พบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในส่วนของขั้นตอนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ (biodiesel purification) เพื่อแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำมันไบโอดีเซล คือ ขั้นตอนหรือ

วิธีในการล้างไบโอดีเซล ซึ่งโดยทั่วไปมักจะใช้วิธีการล้างแบบเปียก โดยใช้ น้ำอุ่นล้างผ่านน้ำมันไบโอดีเซลจำนวนหลาย ๆ รอบ จนกว่าจะแยกสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันออกไปทั้งหมด ซึ่งจากการล้างด้วยน้ำทำให้เกิดอิมัลชันหรือคอลลอยด์ของสบู่จำนวนมาก ส่งผลให้การแยกกลีเซอรอลทำได้ยาก และสูญเสียผลผลิตของน้ำมันไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังทำให้เกิดน้ำเสียจำนวนมากภายหลัง ในปัจจุบันจึงมีการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้วิธีการล้างแบบแห้ง โดยอาศัยกระบวนการดูดซับ (adsorption) ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ เช่น แมกนีซอล ถ่านกัมมันต์ ดินเบา ดินกัมมันต์ เป็นต้น ซึ่งพบว่ากระบวนการดูดซับสามารถช่วยแยกสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซลได้ และยังช่วยลดปริมาณของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลได้เป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม วิธีการล้างไบโอดีเซลแบบแห้งยังจำเป็นต้องมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไป เช่น ความเหมาะสมของตัวดูดซับ คุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับ ระยะเวลาในการทำให้บริสุทธิ์ และความเหมาะสมในด้านการลงทุน เป็นต้น

จึงเป็นที่มาของการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยอาศัยการดูดซับของดิน โดยเลือกศึกษาความสามารถของดินสเม็คไทต์ (smectite) ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวในกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตและมักจะถูกใช้ประโยชน์ในด้านการดูดซับสิ่งปนเปื้อนจากของเสียอุตสาหกรรม โดยในงานวิจัยจะใช้ดินสเม็คไทต์เป็นตัวดูดซับสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซลและเน้นพิจารณาถึงการกำจัดปริมาณของกลีเซอรอล ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์และเป็นข้อมูลสำคัญในการศึกษาวิจัยเพื่อเลือกใช้ตัวดูดซับในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ และเป็นตัวอย่างของงานวิจัยที่เป็นแนวทางสำคัญในการลดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล อันจะเป็นการนำไปสู่การผลิตพลังงานทดแทนที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ด้วยวิธีการใช้ดินสเม็คไทต์ดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซล

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับจากดินสเม็คไทต์
2. ศึกษาการสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1 ต่อ 6 และใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
3. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลของดินสเม็คไทต์ ณ สภาวะการดูดซับที่ต่างกัน เช่น ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม อุณหภูมิที่เหมาะสม ชนิดและปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม เป็นต้น
4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรอลระหว่างดินสเม็คไทต์และถ่านกัมมันต์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถใช้ดินสเม็คไทต์เป็นตัวดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลและได้น้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด นอกจากนี้ยังสามารถลดปริมาณน้ำเสียจากกระบวนการผลิตได้อีกด้วย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับไบโอดีเซล

ในปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอดีเซลอย่างแพร่หลาย ทั้งในเรื่องของการเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสม วิธีการผลิตและวิธีการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ การแยกกลีเซอรอลออกจากผลผลิตไบโอดีเซล รวมไปถึงการทดสอบประสิทธิภาพของน้ำมันไบโอดีเซลกับเครื่องยนต์ เป็นต้น มีการศึกษาวิจัยเพื่อผลิตไบโอดีเซลไปใช้ทั้งในระดับครัวเรือนและในระดับอุตสาหกรรมซึ่งเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจศึกษาการใช้พลังงานทดแทนไบโอดีเซลเป็นอย่างดี การที่ประเทศไทยหันมาให้ความสนใจและให้การสนับสนุนการใช้น้ำมันไบโอดีเซล นอกจากจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมแล้วยังเป็นผลดีต่อการพัฒนาความยั่งยืนของระบบพลังงานและการเกษตรของประเทศ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ผลิตไบโอดีเซลซึ่งให้ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพ เช่น ปาล์มน้ำมัน สบู่ดำ เป็นต้น การเลือกใช้พลังงานไบโอดีเซลจึงเป็นการลดการสูญเสียเงินตราออกนอกประเทศ ช่วยสร้างงานและพัฒนาเศรษฐกิจที่ยั่งยืนสู่ท้องถิ่นอีกด้วย

ไบโอดีเซล คือ ทรัพยากรหมุนเวียนธรรมชาติ (renewable resource) เช่น น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ น้ำมันจากการปรุงอาหารที่ใช้แล้ว ที่ถูกนำมาแปรรูปเชิงเคมี โดยการทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ได้เป็นเมทิลเอสเทอร์หรือเอทิลเอสเทอร์ ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่กลั่นจากน้ำมันปิโตรเลียม สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลได้โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องยนต์ (ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2545; คณะกรรมาธิการพลังงานและผู้แทนราษฎร, 2545)

การใช้พลังงานไบโอดีเซลมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่มาจากน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์ ช่วยลดการนำเข้าเชื้อเพลิงปิโตรเลียมจากต่างประเทศ ไบโอดีเซลเป็นการหมุนเวียนพลังงานมาใช้ใหม่และช่วยลดปัญหาภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการปลดปล่อยก๊าซจากการวิจัยพบว่า การใช้น้ำมันไบโอดีเซลจะช่วยลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 78% เมื่อเทียบกับการใช้ดีเซลจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม ไบโอดีเซลจะช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สู่บรรยากาศ ไม่มีการเผาไหม้ของไฮโดรคาร์บอน และลดการเกิดฝุ่น



เมื่อเพิ่มเชื้อเพลิงดีเซลประมาณ 1-2% จะช่วยให้มีคุณสมบัติของการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ดีขึ้น และเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ลดลง (Garpen, 2005)

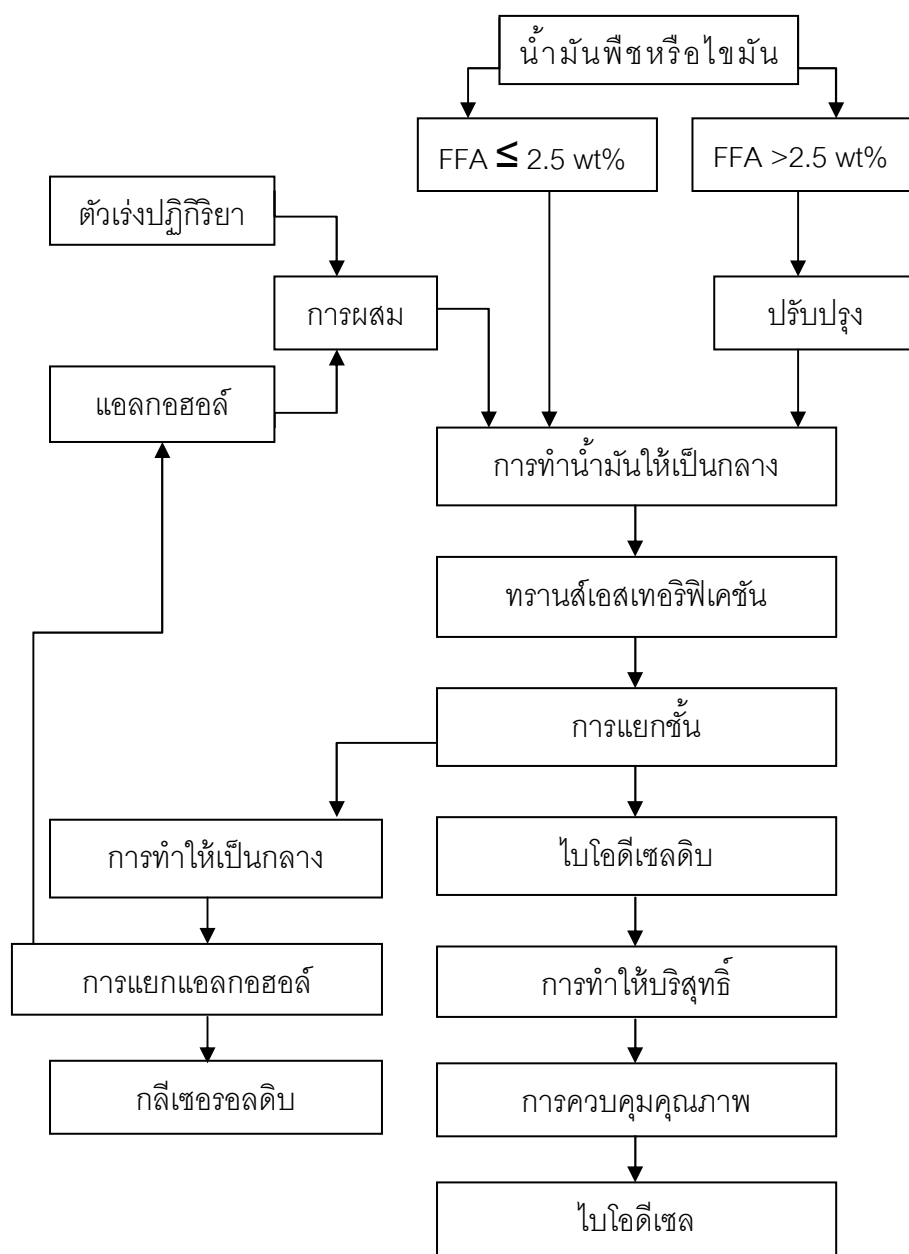
อย่างไรก็ตาม การใช้งานไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซล อาจจะมีข้อเสียที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่มีความหนืดสูงและการเผาไหม้ที่ยังไม่สมบูรณ์ ในการผลิตไบโอดีเซลจึงต้องมีการปรับปรุงและแก้ไขคุณภาพของน้ำมัน ก่อนการนำไปใช้กับเครื่องยนต์ด้วยวิธีการต่างๆ เพื่อให้มีความหนืดและมีคุณสมบัติในการเผาไหม้กับเครื่องยนต์ที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการผลิตไบโอดีเซลสามารถทำได้หลายวิธีและแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1** ตารางแสดงวิธีการผลิตไบโอดีเซล (Lueng และคณะ, 2010)

วิธีการผลิต	ข้อดี	ข้อเสีย
1. นำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง(Direct use)	- เป็นคุณสมบัติธรรมชาติของน้ำมันพืชที่นำไปใช้ได้ - ค่าความร้อนสูง (80% เทียบกับดีเซล)	- ค่าความหนืดสูง - เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ - ระบบหัวฉีดน้ำมันอุดตัน
2. นำน้ำมันมาทำกระบวนการไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)	- ค่าความหนืดลดลง - สมบัติการเผาไหม้ดีขึ้น	- มีปริมาณพลังงานที่ต่ำ - ค่าซีเทนต่ำ
3. นำน้ำมันมาทำกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)	- ค่าความหนืดลดลง - ค่าความร้อนลดลง - ค่าซีเทนใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล	- เรงรััดการใช้พลังงาน - มีค่าใช้จ่ายสูง
4. นำน้ำมันมาทำปฏิกิริยาเคมีทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (Transesterification)	- ค่าซีเทนสูง - การปล่อยก๊าซลดลง - เกิดการเผาไหม้ดีขึ้น	- ปัญหาการจัดการผลผลิต เช่น กลีเซอรอล และน้ำเสีย เป็นต้น

### 2.1.1 ขั้นตอนและวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล

ขั้นตอนสำคัญในการผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ การจัดเตรียมวัตถุดิบ การทำปฏิกิริยาเคมี ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน การแยกกลีเซอรอลจากผลผลิต การทำไบโอดีเซลบริสุทธิ์ การนำแอลกอฮอล์กลับไปใช้ใหม่ และการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซล เป็นต้น



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การผลิตไบโอดีเซลมีขั้นตอนที่สำคัญหลายขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 2.1 โดยเริ่มจากการคัดเลือกวัตถุดิบที่เป็นน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์ มีการปรับปรุงคุณภาพของวัตถุดิบให้มีค่ากรดไขมันอิสระ (free fatty acid, FFA) ที่น้อยกว่า ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก จากนั้นจะทำน้ำมันให้มีสมบัติเป็นกลาง (neutralized oil) ก่อนนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับแอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อน้ำมันผ่านการทำปฏิกิริยาจะให้ผลผลิตเป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอล จึงทำการแยกชั้นของผลผลิต นำไบโอดีเซลดิบ (crude biodiesel) ไปกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำมัน เช่น กลีเซอรอล ตัวเร่งปฏิกิริยาคงเหลือ น้ำ เป็นต้น ด้วยขั้นตอนของการทำไบโอดีเซลบริสุทธิ์ (biodiesel purification) และทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันก่อนนำไปใช้กับเครื่องยนต์ต่อไป สำหรับกลีเซอรอลในการผลิตจะถูกนำไปทำให้เป็นกลาง (re-neutralization) และนำไปใช้เป็นกลีเซอรอลดิบในอุตสาหกรรมอื่น นอกจากนี้ ยังมีขั้นตอนการนำแอลกอฮอล์บางส่วนไปใช้เป็นสารตั้งต้นใหม่อีกด้วย (Lueng และคณะ, 2010)

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ได้แก่ น้ำมัน แอลกอฮอล์ และตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

### 2.1.1.1 น้ำมันและไขมัน

วัตถุดิบประเภทน้ำมันที่นิยมนำมาใช้ในการผลิตไบโอดีเซลในปัจจุบันมี 3 ชนิด คือ น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ และน้ำมันที่ใช้แล้ว (ศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2553) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1) น้ำมันพืช

น้ำมันพืชที่นำมาผลิตไบโอดีเซลมีหลายชนิด ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันจากเมล็ดฝ้าย และน้ำมันจากเมล็ดองุ่น เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีพืชชนิดอื่นๆ ที่สามารถนำน้ำมันมาสกัดเพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ เช่น น้ำมันละหุ่ง น้ำมันรำข้าว น้ำมันงา น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันถั่วลิสง เป็นต้น วิธีการสกัดน้ำมันออกจากพืชสามารถทำได้โดยการนำพืชหรือวัตถุดิบไปบด จากนั้นนำไปสกัดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน ก่อนนำไปกรองเพื่อให้ได้น้ำมันพืชที่สามารถนำไปใช้ได้

## 2) ไขมันจากสัตว์

ไขมันจากสัตว์ที่นำมาผลิตไบโอดีเซล ได้แก่ ไขมันจากไก่ น้ำมันหมู และ ไขมันจากวัว เป็นต้น ส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างไบโอดีเซลจากน้ำมันถั่วเหลือง และไบโอดีเซลจากไขมันสัตว์ เนื่องจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆ เช่น กระบวนการออกซิเดชันและพอลิเมอไรเซชันที่มีส่วนสำคัญกับความเสถียรต่อความร้อนของไบโอดีเซล การใช้ไขมันสัตว์ในการผลิตไบโอดีเซลมีข้อดีคือ ราคาไม่แพง หาได้จากโรงงานอุตสาหกรรม แต่มีข้อเสียคือ ไบโอดีเซลที่ได้จะมีคุณสมบัติในการไหลเทต่ำ แต่สามารถแก้ไขได้ โดยการกลั่นแยกส่วนก่อนทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

## 3) น้ำมันที่ใช้แล้ว

น้ำมันที่ใช้แล้วมีปริมาณกรดไขมันอิสระที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นไบโอดีเซลสูงกว่าน้ำมันที่ยังไม่ได้ใช้ สามารถตรวจสอบได้โดยการหาค่าความเป็นกรดด้วยวิธีการไทเทรต พบว่า น้ำมันที่ใช้แล้วมีค่าความเป็นกรดและมีค่าความหนืดเชิงโคเนติกส์สูงกว่า จึงต้องมีการปรับปรุงน้ำมันก่อนนำมาผลิตไบโอดีเซล นอกจากนั้นอาจมีการกำจัดน้ำ การกลั่นด้วยไอน้ำ และการฟอกสี เป็นต้น ถึงแม้ว่าไขมันสัตว์และน้ำมันที่ใช้แล้วจะเป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีราคาไม่แพงสำหรับผลิตไบโอดีเซลก็ตาม ปริมาณของกรดไขมันอิสระที่สูงก็มีผลทำให้วัตถุดิบประเภทนี้ไม่เหมาะกับการผลิตไบโอดีเซลร่วมกับเบสโดยตรง เนื่องจากอาจเกิดสบู่ปะปนออกมาในปริมาณมาก

### 2.1.1.2 แอลกอฮอล์

แอลกอฮอล์ที่สามารถนำมาใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน มีอยู่หลายชนิด ได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล และเอทิลแอลกอฮอล์ โดยทั่วไปนิยมใช้เมทานอลและเอทานอลมากที่สุด สำหรับการใช้เอทานอลมีข้อดี คือ ผลิตได้จากพืช ทำให้สามารถหาทดแทนได้และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

### 2.1.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีหลายประเภท ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด และเอนไซม์ไลเปส เป็นต้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดต่างมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงข้อดีข้อเสียของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดในการผลิตไบโอดีเซล (Lueng และคณะ, 2010)

ชนิด	ตัวอย่าง	ข้อดี	ข้อเสีย
<u>เบส</u>			
Homogeneous (ตัวเร่งเอกพันธ์)	NaOH, KOH	- อัตราการเร่งสูง - ราคาถูก	- ใช้ได้เมื่อมี FFA ต่ำ - เกิดสบู่และอิมัลชัน - เกิดน้ำเสียจากการล้าง
Heterogeneous (ตัวเร่งวิวิธพันธ์)	CaO, CaTiO <sub>3</sub> , CaZrO <sub>3</sub> , CaO <sup>-</sup> CeO <sub>2</sub> , CaMnO <sub>3</sub> ,	- ไม่กัดกร่อน - เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม - ทำการแยกง่าย	- ใช้ได้เมื่อมี FFA ต่ำ - เกิดน้ำเสียจากการล้าง - เสียค่าใช้จ่ายสูง
<u>กรด</u>			
Homogeneous (ตัวเร่งเอกพันธ์)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (Conc.)	- ใช้เป็นตัวเร่งทั้งในส่วน ของเอสเทอร์ฟิเคชันและ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน - หลีกเลี่ยงการเกิดสบู่	- ทำให้เกิดการกัดกร่อน เครื่องมือ - เกิดน้ำเสียมากกว่า - ยากแก่การนำมาใช้ใหม่ - ใช้เวลานาน
Heterogeneous (ตัวเร่งวิวิธพันธ์)	ZnO/I <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , TiO <sub>2</sub> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	- ใช้เป็นตัวเร่งทั้งในส่วน ของเอสเทอร์ฟิเคชันและ ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน - เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	- ใช้กรดความเข้มข้นต่ำ - มีรพุนต่ำ - ค่าใช้จ่ายสูง
<u>เอนไซม์</u>	<i>Candida</i> <i>Antarctica</i> fraction B lipase, Rhizomucor mieher lipase	- หลีกเลี่ยงการเกิดสบู่ - ไม่เกิดมลพิษ - ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย	- ค่าใช้จ่ายสูงมาก

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันโดยการใช้เบสสามารถเกิดได้เร็วกว่าการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่เท่ากัน อีกทั้งเป็นที่นิยมกว่า แต่ก็มีราคาแพง จะเห็นได้จากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นิยมใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โซเดียมเมทอกไซด์ โพแทสเซียมเมทอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรมคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีราคาถูก การใช้เบสในการเร่งปฏิกิริยานั้นน้ำมันที่ใช้นั้นต้องมีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำไม่เกิน 0.5 % การใช้เบสในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันต้องเป็นภาวะที่ปราศจากน้ำ (Rashid และคณะ, 2008)

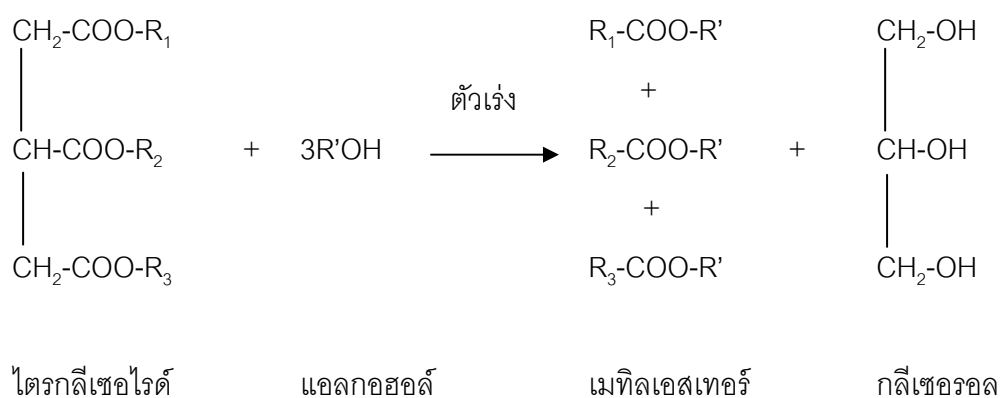
การใช้กรดในการเร่งปฏิกิริยามีข้อดี คือสามารถใช้กับวัตถุดิบที่มีความชื้นและมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง การใช้กรดสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ทั้งทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและเอสเทอร์ฟิเคชัน การใช้กรดจะมีความประหยัดกว่าการใช้เบส แต่ก็ทำให้ปฏิกิริยาเกิดช้ากว่าถึง 4,000 เท่า และต้องใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยา กรดที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยามีอยู่หลายชนิดด้วยกัน แต่ที่นิยมมากที่สุด คือ กรดซัลฟิวริก รองลงมาคือ กรดไฮโดรคลอริก กรดไตรฟลูออโรโบรอน กรดฟอสฟอริก และกรดซัลโฟนิก ตามลำดับ การใช้กรดในการเร่งปฏิกิริยาอาจจะเกิดน้ำขึ้นในปฏิกิริยา ซึ่งมีผลเสียต่อการผลิตไบโอดีเซลเนื่องจากน้ำจะไปไฮโดรไลซ์เอสเทอร์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ

สำหรับการใช้เอนไซม์ไลเปสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ในการเกิดปฏิกิริยา เอนไซม์ไลเปสจะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์เพื่อได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล การผลิตไบโอดีเซลด้วยเอนไซม์ไลเปสนับเป็นกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงที่ไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการใช้เอนไซม์มีความสะอาด ปลอดภัยต่อผู้บริโภค ระดับมลพิษที่เกิดจากกระบวนการนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับการผลิตด้วยสารเคมี การใช้เอนไซม์มีปัญหาที่เอนไซม์มีราคาแพง แต่ปัจจุบันมีการพัฒนาเอนไซม์ให้อยู่ในรูปตรึง ทำให้ราคาของเอนไซม์ลดลงเนื่องจากกระบวนการตรึงทำได้ง่ายและทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ต้องผ่านการทำให้บริสุทธิ์ ความเสถียรของเอนไซม์ค่อนข้างสูง ไลเปสสามารถนำมาเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในระบบที่มีน้ำและไม่มีน้ำ ผลิตภัณฑ์สามารถแยกออกได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถผลิตไบโอดีเซลได้สูงกว่าการใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (วรุณี จุฬาลักษณ์, 2548)

## 2.1.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

การผลิตไบโอดีเซลโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่า ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification reaction) เป็นวิธีการผลิตไบโอดีเซลที่นิยมนำมาใช้มากที่สุด ในการผลิตจะนำน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์มาทำปฏิกิริยาด้วยแอลกอฮอล์และอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ กรด เบส และเอนไซม์ เป็นต้น หลังการทำปฏิกิริยาภายในสภาวะที่เหมาะสม จะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้นได้จากสมการ ดังนี้



ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืชจากโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ของกรดไขมันสายยาวสามสายที่ถูกเชื่อมด้วยพันธะเอสเทอร์ซึ่งเกิดการแตกที่กับแอลกอฮอล์ ได้ผลผลิตเป็น เมทิลเอสเทอร์โมเลกุลเดี่ยว 3 โมเลกุล และกลีเซอรอล 1 โมเลกุล ซึ่งมีลักษณะปฏิกิริยาค้ำยกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มผลผลิตและอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มากขึ้น

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นปฏิกิริยาระหว่างแอลกอฮอล์กับกรดไขมัน ได้เมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล เป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดย้อนกลับได้ (reverse reaction) จึงจำเป็นต้องอาศัยตัวเร่งและแอลกอฮอล์จำนวนมากเพื่อให้ได้ผลผลิตไบโอดีเซลเป็นไปตามต้องการ (Marchetti และคณะ, 2007)

การสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลา ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ รวมไปถึงสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันโดยใช้น้ำ

ในการล้างไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ พบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอลเป็น 1:6 โดยมีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจะให้ผลผลิตเอสเทอร์สูงประมาณ 93-98% (Kumar และคณะ, 2003)

ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ได้แก่

#### 1) อัตราส่วนระหว่างน้ำมันและแอลกอฮอล์ (alcohol quantity)

ปัจจัยหลักของการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน คือ อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์และไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งจากทฤษฎีของการเกิดปฏิกิริยาจะต้องอาศัยแอลกอฮอล์ 3 โมลต่อไตรกลีเซอไรด์ 1 โมล เพื่อให้ได้เอสเทอร์ของกรดไขมัน 3 โมลและกลีเซอรอล 1 โมล อย่างไรก็ตามเพื่อให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลจะต้องใช้แอลกอฮอล์ที่มากเกินไปเพื่อผลักดันให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้าได้ดี จากการศึกษาพบว่า อัตราส่วนน้ำมันต่อแอลกอฮอล์ 1:6 จะทำให้ได้ค่าผลผลิตสูง โดยการที่ให้อัตราส่วนของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันสูงๆ จะทำให้แอลกอฮอล์สามารถเข้าไปแทรกและแยกกลีเซอรอลออกมาได้มากขึ้นเนื่องจากแอลกอฮอล์นั้นจะช่วยเพิ่มความสามารถในการถูกละลายได้ เพราะถ้ากลีเซอรอลยังคงเหลือในสารละลายจะส่งผลให้ปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ทำให้ได้ผลผลิตที่ลดลง แต่อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแอลกอฮอล์กับน้ำมันสูงๆ จะมีผลต่อการแยกชั้นเนื่องจากทำให้มีน้ำอยู่ในปฏิกิริยาจึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเกิดปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชันตามมา ทำให้ได้เกลือของกรดไขมันหรือสบู่ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เอสเทอร์ลดลงและเกิดการแยกชั้นยากขึ้นด้วย

#### 2) เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (reaction time)

เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันมีผลต่อปริมาณผลผลิต เช่น การศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ภายใต้สภาวะที่มีน้ำมันต่อเมทานอลเท่ากับ 1:6 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าภายใน 1 นาทีได้ผลผลิตประมาณร้อยละ 80 แต่หลังจากที่เพิ่มเวลาเป็น 1 ชั่วโมง พบว่า ผลผลิตเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 93-98 นอกจากนั้นแล้วปฏิกิริยายังเกิดการสูญเสียผลิตภัณฑ์เนื่องจากปฏิกิริยาย้อนกลับของทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันบางส่วน ผลการทดลองพบว่าเกิดการสูญเสียเอสเทอร์เกิดจากการสร้างตัวเป็นสบู่ของกรดไขมัน



### 3) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (reaction temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดไปข้างหน้าได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดขึ้นได้เร็วและได้ผลผลิตสูงนั้นจะต้องใช้ความร้อน จึงอาจจะทำให้ความหนืดของน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังอาจจะเกิดปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ พบว่าอุณหภูมิของการสังเคราะห์ไบโอดีเซลควรอยู่ในช่วงระหว่าง 50-60 องศาเซลเซียส (Lueng และ Guo, 2006)

### 4) ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst concentration)

ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถส่งผลต่อปริมาณผลผลิตไบโอดีเซล โดยทั่วไปการผลิตไบโอดีเซลมักจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างการผสมกันระหว่างเมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดน้ำปริมาณน้อย ส่งผลต่อปริมาณผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จึงต้องนำแอลกอฮอล์มาผสมและละลายเข้ากับตัวเร่งปฏิกิริยา ก่อนนำไปผสมเข้ากับน้ำมันพืช การใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดเร็วกว่าเมื่อใช้กรดเป็นตัวเร่ง อย่างไรก็ตาม การใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความเหมาะสมมากกว่า ในกรณีที่ใช้กลีเซอไรด์ที่มีกรดไขมันอิสระในปริมาณมากและมีน้ำผสมอยู่ด้วย นอกจากนี้การใช้น้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นที่ต่างกันมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอีกด้วย (Mohamad และคณะ, 2002)

## 2.1.3 การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์

เมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน จะไม่จัดว่าเป็นน้ำมันไบโอดีเซลหากมีคุณสมบัติไม่ตรงตามมาตรฐานของ EN 14214 ซึ่งการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์มีความสำคัญเนื่องจากไบโอดีเซลที่เกิดขึ้น ยังประกอบไปด้วยสิ่งเจือปน (impurities) เช่น กลีเซอรอลอิสระ สบู่ เมทานอล กรดไขมันอิสระ ตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำ และกลีเซอไรด์ เป็นต้น ซึ่งสิ่งเจือปนเหล่านี้ก่อให้เกิดผลต่อการทำงานของไบโอดีเซล ซึ่งแสดงสิ่งเจือปนและผลกระทบต่อเครื่องยนต์ ดังตารางที่ 2.3



วัตถุประสงค์หลักของการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ คือ การกำจัดกลีเซอรอล สบู่ แอลกอฮอล์ส่วนเกิน และตัวเร่งปฏิกิริยาคงเหลือ การทำอัลคิลเอสเทอร์ให้แห้งเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ผ่านข้อกำหนดเกี่ยวกับปริมาณน้ำตามมาตรฐานคุณภาพไบโอดีเซล นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงอื่นๆ เช่น การลดสีไบโอดีเซล การกำจัดกลีเซอรอล กำมะถันและฟอสฟอรัสจากน้ำมันเชื้อเพลิง น้ำมันคุณสมบัติในการทำให้ช่วยเพิ่มความเป็นกรดหรือทำให้น้ำมันมีคุณสมบัติเป็นกลาง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งชนิดเบสที่เป็นส่วนเกิน และกระบวนการกำจัดเมทานอลควรเกิดขึ้นก่อนกระบวนการล้างด้วยน้ำ เพื่อลดการปรากฏของแอลกอฮอล์ในน้ำทิ้ง (Atadashi และคณะ, 2011) การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์สามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

### 2.1.3.1 การล้างแบบเปียก (Wet washing)

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

การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำ เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด ทำได้โดยอาศัยน้ำอุ่นล้างผลผลิตของไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน การล้างน้ำอุ่นจะล้างไบโอดีเซลหลายๆ ครั้งจนกว่าจะสามารถแยกกลีเซอรอลออกไปได้หมด จะได้ผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่มีลักษณะใสมากขึ้นและสามารถกำจัดสิ่งเจือปน เช่น สบู่ ตัวเร่งปฏิกิริยา เมทานอลและสิ่งเจือปนอื่นๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการล้างไบโอดีเซล เช่น

Haq และคณะ (2008) ได้บันทึกการประยุกต์ใช้เตตระไฮโดรฟูแรน (tetrahydrofuran) เป็นตัวทำละลายร่วมเพื่อเพิ่มความเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำมันและเมทานอล และช่วยเพิ่มให้เกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทำให้บริสุทธิ์ การกำจัดของตัวทำละลายร่วมต้องการเครื่องมือในกระบวนการเป็นพิเศษ สำหรับกระบวนการล้างเพื่อทำให้สภาพเป็นกลางโดยการล้างน้ำ สามารถกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์และสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น ปริมาณเมทานอลส่วนเกิน ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ อย่างไรก็ตาม การแยกกลีเซอรอลและการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ในกระบวนการสุดท้ายของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันก็ยังเป็นเรื่องที่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายสูง

Chongkhong และคณะ (2009) ได้ใช้เทคนิคการทำให้เป็นกลางโดยอาศัยน้ำอุ่นล้างผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันให้บริสุทธิ์ จากกระบวนการพบว่าสามารถกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์จากน้ำ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 การกำจัดสบู่ทำได้ด้วยการใช้น้ำอุ่นที่มีอุณหภูมิ 60-80 องศาเซลเซียสล้างชั้นของเอสเทอร์หลังจากการตั้งทิ้งไว้และให้ความร้อนเพื่อกำจัดน้ำที่เหลืออยู่

Ferella และคณะ (2010) ได้ระบุว่า การสร้างตัวของสปูเกิดจากการทำกลีเซอรอลอิสระให้เป็นกลางของน้ำมันพืชหรือไตรกลีเซอไรด์โดยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งทำให้ลดคุณภาพของผลผลิต นอกจากนี้การแยกไบโอดีเซลและกลีเซอรอลด้วยการปั่นเหวี่ยงและการล้างผลิตภัณฑ์ ทำให้ต้องเพิ่มเวลาในการผลิตและใช้น้ำมากขึ้น

**ตารางที่ 2.4** ตารางแสดงลักษณะของน้ำเสียที่เกิดจากการทำไบโอดีเซลด้วยวิธีใช้น้ำล้าง (Berrios และ Skelton, 2008)

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

## 2) การล้างด้วยกรด (washing with acids)

การเติมกรดลงไปในผลผลิตจากทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อทำให้เป็นกลางจากตัวเร่งปฏิกิริยาและทำให้การสร้างสปูลดลง กระบวนการนี้เกิดขึ้นหลังการล้างด้วยน้ำเพื่อทำให้ไบโอดีเซลบริสุทธิ์ปราศจากสิ่งเจือปน เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา สปู เมทานอลและกลีเซอรอลอิสระ

Meher และคณะ (2006) ได้รายงานความยากของการแยกชั้นและการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์จากกลีเซอรอลและเอสเทอร์ เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันที่สูง การใช้ไตรกลีเซอไรด์ทำให้เกิดกลีเซอรอลอิสระที่ต่ำและเป็นการหลีกเลี่ยงการสร้างตัวของสปู ผลผลิตที่ได้จะถูกแยกชั้นจากการตั้งทิ้งให้ตกตะกอนและการแยกชั้นโดยอาศัยน้ำกลั่นอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเพื่อกำจัดเมทานอลส่วนเกิน ด้วยการล้างน้ำจำนวนหลายครั้ง และการปรับปรุงด้วยโซเดียมซัลเฟตและการกรอง

Sharma และ Singh (2009) ได้ล้างไบโอดีเซลด้วย กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) 10% โดยล้างฟองหลังจากการแยกชั้นของกลีเซอรอลและการทำให้บริสุทธิ์โดยผ่านหินน้ำเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง นำไปล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดสิ่งเจือปน เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาและแอลกอฮอล์ จากนั้นใช้ซิลิกาเจลเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนจากผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล

### 2.1.3.2 การล้างแบบแห้ง (Dry washing)

การล้างแบบแห้งหรือการล้างโดยไม่ใช้น้ำ ทำได้โดยอาศัยกระบวนการดูดซับของตัวดูดซับต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของตัวดูดซับ เช่น เรซิน แมกนีเซียมซิลิเกต ถ่านกัมมันต์ ดิน เป็นต้น การดูดซับด้วยตัวดูดซับสามารถช่วยกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำมันไบโอดีเซลได้ดี เช่น การใช้แมกนีซอล (Magnesol) ซึ่งความสามารถในการจับกับสารประกอบที่มีน้ำได้ดี เช่น กลีเซอรอล โมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์ การปรับปรุงทำได้โดยการอาศัยการกรองซึ่งพบว่า มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณของกลีเซอไรด์และกลีเซอรอลอิสระ และยังสามารถช่วยลดสีของจารบีสีเหลืองและสีน้ำตาลในน้ำมันพืชบางชนิดได้ นอกจากนี้ยังมีตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ที่เป็นวิธีการลดสีของไบโอดีเซลได้อย่างมีประสิทธิภาพดี

Levy และคณะ (2003) ได้ศึกษาวิธีการและสารประกอบของการกำจัดสิ่งเจือปนจากน้ำมันที่ใช้แล้ว พบว่า การลดการสะสมของสิ่งเจือปน เช่น วัตถุประสงค์ที่มีขี้ กรดไขมันอิสระ โลหะ สีและสบู่ ได้รับการกำจัดด้วยการใช้สารดูดซับ เช่น ซิลิกา อะลูมินาชนิดกรด ดินเหนียวละเอียด และกรดซัลฟิวริก การกำจัดสิ่งเจือปนจากน้ำมันที่พบทั้งในด้านกระบวนการและลดค่าใช้จ่ายทั้งในด้านสุขภาพและความปลอดภัย

Maskan และ Bagci (2003) ศึกษาการทำไบโอดีเซลที่สังเคราะห์จากเมล็ดทานตะวันให้บริสุทธิ์ โดยการใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมซิลิเกต ผงถ่าน และ permez earth พบว่า permez earth แมกนีเซียมซิลิเกต และเบนโทไนต์มีความสามารถในการลดความหนืดของน้ำมันลดกรดไขมันอิสระและสามารถดูดซับสีได้ตามลำดับ

Dube และคณะ (2007) ได้กล่าวถึงการใช้ตัวดูดซับ เช่น ดินกระตุ้น ถ่านกัมมันต์ ไฟเบอร์กระตุ้น และอื่นๆ เพื่อจะกำจัดสิ่งเจือปนในไบโอดีเซลและกลีเซอรอล พบว่า การล้างไบโอดีเซลด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นวิธีที่ดีที่สุดที่จะแยกสิ่งเจือปนในไบโอดีเซล แต่ทำให้เกิดน้ำเสียซึ่งเป็นปัญหาตามมา

**ตารางที่ 2.5** ตารางแสดงความแตกต่างของการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีต่างๆ (Lueng และคณะ, 2005)

วิธี	วัตถุดิบ	การทำงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
การล้างแบบเปียก	น้ำกลั่น (อุ่น)	ป้องกันการตกตะกอนของกรดไขมันอิ่มตัวและทำให้การสร้างตัวสบู่ช้าลง	- กำจัดสิ่งเจือปนได้ดีมาก	- เพิ่มค่าใช้จ่ายและเวลาในการผลิต - เกิดน้ำเสีย - ผลผลิตลดลง - เกิดอิมัลชัน
การล้างแบบแห้ง	เรซินแมกนีซอล	ลดปริมาณกลีเซอรอลอิสระและกำจัดสบู่	- ลดการใช้น้ำ	- คุณภาพไบโอดีเซลเกินข้อกำหนดมาตรฐาน

#### 2.1.4 มาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล

ผลผลิตไบโอดีเซลที่จะสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางการค้าได้นั้น จะต้องมีความสมบัติของน้ำมันเป็นไปตามมาตรฐานสากลหรือเป็นไปตามลักษณะทางอุตสาหกรรม เพื่อให้มั่นใจว่าเป็นไบโอดีเซลที่มีสมรรถนะที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้อย่างแท้จริง สำหรับการนำไปโอดีเซลไปใช้ในทางการค้า นั้นจะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ การใช้ไบโอดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ และการใช้ไบโอดีเซลแทนน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซลที่ใช้ในทางการค้ามีอยู่หลายชนิดโดยใช้สัญลักษณ์ B หมายถึง ไบโอดีเซล ส่วนตัวเลขที่ต่อท้ายคือ สัดส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลที่มีการผสมลงไป ในน้ำมันดีเซล ได้แก่ B5, B20 และ B100

สำหรับมาตรฐานของไบโอดีเซลสากลแบ่งเป็น 2 มาตรฐานคือ มาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา ASTM D6751 และมาตรฐานของยุโรป EN 14214 สำหรับประเทศไทย การกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลถูกกำหนดโดยกรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน ลักษณะที่ถูกกำหนดในมาตรฐานประกอบด้วยลักษณะ 23 ชนิด แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงมาตรฐานคุณภาพไบโอดีเซล

ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ	อัตรา
ร้อยละเอสเทอร์, %wt	EN 14103	> 96.5
ความหนาแน่นที่อุณหภูมิ 15°C, (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D 1298	860-900
ความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C, cSt	ASTM D445	3.5-5.0
จุดวาบไฟ, °C	ASTM D 93	> 120
เถ้าคาร์บอน, %wt	ASTM D 4530	< 0.30
จำนวนซีเทน	ASTM D 613	> 51
กำมะถัน, %wt	ASTM D 2622	< 0.0010
เถ้าซัลเฟต, %wt	ASTM D 874	< 0.02
น้ำ, %wt	ASTM D 2709	< 0.050
สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด, %wt	ASTM D 5452	< 0.0024
การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	ASTM D 130	< 96.5
ความเสถียรต่อออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 110°C, hours	EN 14112	> 10
ค่าความเป็นกรด, mg KOH/g	ASTM D 664	< 0.50
ค่าไอโอดีน, g Iodine/100 g	EN 14111	< 120
Linolenic acid methyl ester, %wt	EN 14103	< 12.0
เมทานอล, %wt	EN 14110	< 0.20
โมนอกลิเซอไรด์, %wt	EN 14105	< 0.80
ไดกลิเซอไรด์, %wt	EN 14105	< 0.20
ไตรกลิเซอไรด์, %wt	EN 14105	< 0.20
กลีเซอรินอิสระ, %wt	EN 14105	< 0.02
กลีเซอรินทั้งหมด, %wt	EN 14105	< 0.25
โลหะหมู่ 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม)	EN 14108 และ EN 14109	< 5.0
โลหะหมู่ 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)	EN 14538	< 5.0
ฟอสฟอรัส, %wt	ASTM D 4951	< 0.0010

## 2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการดูดซับ

การดูดซับ เป็นกระบวนการทางเคมีที่มีความสำคัญ และสามารถนำกระบวนการนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานทางอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การดูดซับสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียทางสิ่งแวดล้อม หรือ กระบวนการผลิตสินค้าอุตสาหกรรมบางประเภทที่ต้องอาศัยทฤษฎีของการดูดซับเป็นตัวตั้ง การดูดซับเป็นเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยให้สารละลายหรือก๊าซดังกล่าวสัมผัสกับตัวดูดซับ ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง โดยตัวดูดซับชนิดหนึ่งๆ จะมีความสามารถดูดซับองค์ประกอบต่างๆ ในสารละลายได้แตกต่างกัน จึงทำให้สามารถแยกองค์ประกอบต่างๆ ออกจากกันได้ การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ปฏิกิริยาการนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass Transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

การจะแยกองค์ประกอบใดออกจากสารละลายนั้นต้องเลือกชนิดตัวดูดซับให้เหมาะสม โดยเมื่อพิจารณาถึงสถานะของสารละลาย และสถานะของตัวดูดซับที่สัมผัส จะสามารถจำแนกการดูดซับได้เป็น การดูดซับโดยของเหลว (liquid-liquid adsorption) การดูดซับก๊าซโดยของเหลว (gas-liquid adsorption) การดูดซับของเหลวโดยของแข็ง (liquid-solid adsorption) เป็นต้น (เดชา ฉัตรศิริเวช, 2552)

### 2.2.1 ประเภทของการดูดซับ

ในการดูดซับจะมีประเภทของการดูดซับที่จำแนกโดยอาศัยลักษณะของการดูดซับเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

#### 1) การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption)

การดูดซับจะเกี่ยวข้องกับแรงภายในโมเลกุลโดยที่แรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและโมเลกุลที่ผิวหน้าของสารดูดซับจะเป็นแรงค่อนข้างอ่อน ซึ่งจะเป็นแรงชนิดเดียวกันกับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลหรือแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force) โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะยังคงมีคุณสมบัติทางเคมีเหมือนเดิม ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว และก๊าซ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer)



## 2) การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption)

การดูดซับจะเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมี โมเลกุลของสารถูกดูดซับ พื้นผิวของโมเลกุลที่เป็นสารดูดซับ และจะมีแรงที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และไม่สามารถที่จะผันกลับได้ (irreversible) การดูดซับทางเคมีบางครั้งจะต้องอาศัยพลังงานเข้าร่วมด้วย เรียกว่า activated adsorption ซึ่งทำให้เกิดการดูดซับที่แรงกว่าการดูดซับทางกายภาพ

### 2.2.2 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ

ในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายจะเกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ (physical force) และแรงทางเคมี (chemical force) แรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der 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)

#### 1) แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der Waal's force)

แรงวานเดอร์วาลส์ เกิดจากอะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้วสามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากันมีผลให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับ (desorption) จะกระทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

#### 2) แรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (electrostatic force)

แรงไฟฟ้าสถิตย์เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกัน หรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับของโมเลกุลชนิดต่างๆ เหล่านี้เกิดขึ้นจากผล 3 อย่างดังนี้

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (dispersion effect) ซึ่งเป็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมาก และเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามาก็จะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่จะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้ามซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

### 3) แรงทางเคมี (chemical force)

แรงทางเคมีเป็นการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนกับตัวดูดซับ อาจเกิดเนื่องจากปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การที่โลหะหนักสามารถถูกดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับต่างๆ เช่น คอลลอยด์ดิน เนื่องมาจากโลหะหนักเป็นธาตุทรานซิชันที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับได้ แรงทางเคมีมีลักษณะเป็นพันธะเคมีที่เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน มีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าแรงทางฟิสิกส์ และเป็นแรงที่ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

## 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

### 2.2.3.1 คุณสมบัติของสารดูดซับ

1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี นอกจากนั้นโครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้มีความสามารถในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดของสารที่ถูกดูดซับไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับได้ความสามารถในการดูดซับก็จะต่ำลง

2) ขนาดของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับ ในกรณีที่วัสดุที่เป็นตัวดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย แต่ถ้าวัสดุที่เป็น

ตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุนเพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของวัตถุ

3) เคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิววัสดุที่เป็นตัวดูดซับ จะมีคุณสมบัติที่มีผลกับกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรด ความสามารถในการดูดซับก็จะลดลง แต่ถ้ามีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นหมู่คาร์บอนิก ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้น

4) อายุการใช้งานและความจุของการดูดซับ อายุการใช้งานของตัวดูดซับ และค่าคงที่ของการดูดซับมีผลโดยตรงต่อกระบวนการดูดซับ ซึ่งสามารถศึกษาอายุการใช้งานได้ โดยการผ่านสารที่ต้องการจะดูดซับอย่างต่อเนื่องสู่ตัวดูดซับ เมื่อสารที่ต้องการจะดูดซับผ่านตัวดูดซับเป็นระยะเวลาหนึ่งจะเกิดการดูดซับที่ผิวอย่างต่อเนื่อง ทำให้ตัวดูดซับค่อยๆ หมดประสิทธิภาพตามปริมาตรสารดูดซับที่ผ่านตัวดูดซับ ดังนั้น ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงความเข้มข้นสูงสุดที่ตัวดูดซับจะสามารถเกิดการดูดซับได้ เรียกจุดนี้ว่า เบรคพอยน์ (breakpoint) ภายหลังจากไม่เกิดแรงในการดูดซับแล้วก็จะถึงจุดอิ่มตัว เรียกจุดนี้ว่า ความจุของการดูดซับ (capacity of adsorbent) ซึ่งเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเบื้องต้นแล้วจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ในรูปของกราฟเบรคทรู (breakthrough curve) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่ผ่านตัวดูดซับแล้วต่อความเข้มข้นเริ่มต้นเทียบกับปริมาตรที่ใช้

### 2.2.3.2 คุณสมบัติของสารถูกดูดซับ

1) ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ทำให้การแพร่ขยายการดูดซับลดลง เพราะก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับขึ้นจะต้องมีการทำลายพันธะของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย

2) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล เมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์ ถ้าจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้นการดูดซับก็จะมากขึ้น เพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง

3) ความมีขั้วของโมเลกุล ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

### 2.2.3.3 สภาพแวดล้อม

1) อุณหภูมิในการดูดซับ โดยทั่วไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง การเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้เร็วขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับอ่อนลง ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (exothermic)

2) ไฮโดรเจนไอออน หรือค่าความเป็นกรด-เบส โดยทั่วไปแล้วถ้าค่าความเป็นกรด – เบสลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถเกาะติดผิวสารดูดซับได้ดี ทำให้สารดูดซับมีสภาพเป็นกลางเสมอ เนื่องจากสารดูดซับทั่วไปมักจะไม่มีขั้วจนถึงมีขั้วลบเล็กน้อย ดังนั้นการที่สารดูดซับมีสภาพเป็นกลางจึงทำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วของสารในนำมาเกาะที่ผิวของสารดูดซับได้ดี

3) ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับติดผิวอาจขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์มและการแพร่เข้าสู่โพรง ในระบบที่ของเหลวมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของเหลวที่อยู่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ในกรณีนี้การแพร่ผ่านฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางกลับกันหากความปั่นป่วนของของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

## 2.2.4 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ในกระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารจะถูกดูดซับ (adsorption) และมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมๆ กัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการคายการดูดซับมีค่าเท่ากัน เมื่อเรานำความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับและความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ในน้ำ ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ ไปสร้างกราฟ จะเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า adsorption isotherm โดยทั่วไปจะให้ความเข้มข้นของสารที่เหลือในน้ำเป็นแกนนอน และอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารที่ถูกดูดซับต่อสารดูดซับเป็นแกนตั้งเส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด จึงเรียกได้ว่า ไอโซเทอมของการดูดซับมีประโยชน์มากในการหาความสามารถในการดูดซับของสิ่งสกปรกในน้ำ เพื่อเปรียบเทียบหาชนิดของสารดูดซับที่ดีที่สุด สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทอมมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้นำมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่สมการที่นิยมใช้งานมากที่สุดคือ สมการของ Langmuir สมการของ Freundlich และสมการของ BET

### 2.2.4.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ถูกอธิบายโดย Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1918 เพื่ออธิบายการดูดซับโมเลกุลของก๊าซบนพื้นผิว โดยสมการของแลงเมียร์จะใช้ได้ดีที่สุดเมื่ออธิบายการดูดซับที่ความเข้มข้นต่ำ สมมติฐานพื้นฐานพื้นฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ คือ โมเลกุลถูกดูดซับติดอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของตัวดูดซับ มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดซับ พื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนแน่นอนซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว และพลังงานการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ สมการแลงเมียร์ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$X = (X_m b C_e) / (1 + b C_e)$$

โดย  $X$  = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน  
(มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

$X_m$  = ปริมาณตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว  
(monolayer) (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล  
(มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/ลิตร)

$b$  = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ

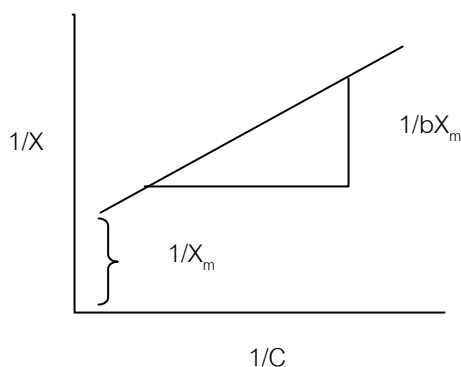
เมื่อ  $X$  เข้าสู่อัน  $X_m$  และ  $C_e$  เข้าสู่อัน  $\infty$  จะเขียนสมการได้เป็น

$$C_e / X = (1 / bX_m) + (C_e / X_m) \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e / X$  กับ  $C_e$  ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน  $1 / X_m$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1 / bX_m$  และเมื่อหารด้วย  $C_e$  จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$1 / X = (1 / X_m) + (1 / C_e)(1 / bX_m) \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1 / X$  กับ  $1 / C_e$  ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน  $1 / bX_m$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1 / X_m$  จากสมการ 2.1 และ 2.2 แสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

#### 2.2.4.2 ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)

ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช ถูกใช้ครั้งแรกเพื่ออธิบายการดูดซับก๊าซและตัวถูกละลายในสารละลาย เป็นสมการการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอธิบายถึงการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อการปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นในรูปของลอการิทึม (logarithmic) สมการฟรุนดลิชเป็นสมการการดูดซับที่ใช้งานได้แพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว มีสมการดังนี้

$$X / m = KC_e^{1/n} \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

โดย  $X$  = ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/ลิตร)

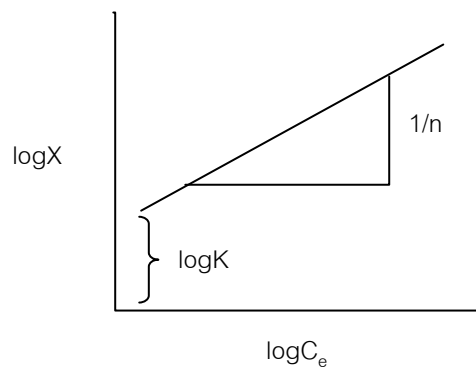
$K$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของคาร์บอน

$$\begin{aligned} 1/n &= \text{ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ} \\ m &= \text{น้ำหนักของสารดูดซับ (กรัม)} \end{aligned}$$

จากสมการ 2.3 สามารถเขียนสมการในรูป logarithmic ได้ดังนี้ คือ

$$\log(X/m) = \log K + 1/n \log C_e \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log(X/m)$  กับ  $\log C_e$  จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน  $1/n$  และ  $\log K$  จุดตัดแกน y ของ  $\log(X/m)$  ที่  $\log C_e = 0$  ( $C_e = 1$ ) จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 แสดงได้ดังภาพที่ 2.3 จากสมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดซับ โดยถ้า  $n < 1$  แสดงถึงการดูดซับที่ไม่ดี แต่ถ้าค่า  $n > 1$  แสดงถึงการดูดซับที่ดี



ภาพที่ 2.3 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

### 2.2.4.3 ไอโซเทอมแบบบีอีที (BET: Brunauer-Emmett-Teller Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีทีที่พัฒนามาจากไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยจากการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayers) ซึ่งแต่ละโมเลกุลในชั้นดูดซับชั้นแรก จะเป็นบริเวณที่ซึ่งมีโมเลกุลชั้นที่ 2 ดูดซับเช่นเดียวกันกับชั้นอื่นๆ ต่อไป โดยแสดงได้ดังสมการ

$$X = (X_m b C_e) / (C_s - C_e)(1 + (b - 1)C_e / C_s) \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

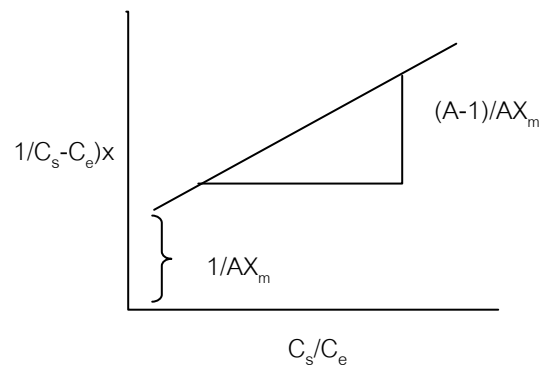
โดย  $X =$  ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

- $X_m$  = ปริมาณตัวถูกละลายมากที่สุดที่ถูกดูดติดเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว  
(มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)
- $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล  
(มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/ลิตร)
- $C_s$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล  
(มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/ลิตร)
- $b$  = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.5 สามารถเปลี่ยนได้เป็น

$$C_e / X (C_s - C_e) = (1 / X_m b) + ((b-1) / X_m b) (C_e / C_s) \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e / X (C_s - C_e)$  กับ  $C_e / C_s$  ซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชัน  $(b-1) / X_m b$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1 / X_m b$  จากสมการ 2.5 และ 2.6 แสดงได้ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 กราฟแสดงไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที



## 2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับดิน

มนุษย์มักจะให้ความสำคัญของดิน โดยเห็นว่าดินเป็นปัจจัยพื้นฐานในทางเกษตรกรรม จึงมักจะมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับดินเพื่อศึกษาว่าดินชนิดใดใช้ปลูกพืชได้ดี หรือดินแหล่งใดทำการเกษตรกรรมได้ดี ปัจจุบันมนุษย์ให้ความสนใจศึกษาเรื่องดินในหลายๆแง่มุม เพราะมีสิ่งอื่นที่เราต้องใช้ดินมาเป็นตัวกำหนดในการพัฒนาสิ่งต่างๆ เช่น การก่อสร้าง แร่เศรษฐกิจจากดิน การหาแหล่งน้ำพื้นผิว รวมไปถึงสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวกับดิน เช่น มลภาวะที่เกิดในดิน การสูญเสียหน้าดิน รวมไปถึงความหายนะอันเกิดจากดิน เช่น แผ่นดินถล่ม โคลนถล่ม แผ่นดินทรุด เป็นต้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2529)

### 2.3.1 ความหมายและส่วนประกอบของดิน

ในทางวิทยาศาสตร์ให้ความหมายเกี่ยวกับดินว่า ดินเป็นผลจากการผุพังโดยทั้งกระบวนการทางเคมี ทางกายภาพและทางชีวเคมีของวัสดุต้นกำเนิด เช่น หินหรือวัตถุที่พัดพามา โดยกระบวนการทางธรณี เช่น ตะกอนที่ถูกพามาด้วยน้ำมาทับถมทิ้งเอาไว้ เป็นต้น การกำเนิดดิน (soil genesis) อาศัยกระบวนการที่ซับซ้อนมากกว่าหนึ่งกระบวนการ เช่น การซึมซาบของน้ำลงไป การเปลี่ยนแปลงทางเคมี การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ การสะสมตัวของแร่หรือดินเหนียว เป็นต้น ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการสร้างดิน (soil forming factors) มีหลายประการ เช่น ภูมิอากาศ (climate) พืชพรรณและสิ่งมีชีวิต (vegetarian and organism) วัสดุต้นกำเนิด (parent materials) ลักษณะภูมิประเทศ (topography) และเวลา (time) เป็นต้น

ส่วนประกอบของดินโดยทั่วไปมี 4 ประการ คือ

1) แร่ธาตุ (mineral matter) ประกอบอยู่ในดินประมาณ 45% เป็นแร่ชนิดต่างๆที่เป็นส่วนประกอบทั่วไปของหิน อันเกิดจากการแตกหัก ผุพัง หรือสลายตัวของหินต้นกำเนิดตามกระบวนการทั้งทางเคมี ฟิสิกส์ และชีวเคมี แร่ธาตุเหล่านี้ยังเป็นต้นกำเนิดธาตุอาหารของพืช และเป็นตัวควบคุมลักษณะของเนื้อดิน แร่ในดินมี 2 ชนิด ทั้งแร่ธาตุและแร่ดินเหนียว

2) อินทรีย์วัตถุ (organic matter) ประกอบอยู่ในดินประมาณ 5% เกิดจากการเน่าเปื่อยของพืชหรือการสลายตัวของพืชและสัตว์ทับถมกัน กิจกรรมต่างๆของสิ่งมีชีวิตเป็นตัวการให้เกิดอินทรีย์วัตถุด้วยปริมาณของอินทรีย์วัตถุอาจจะแตกต่างกันไปในดินแต่ละชนิด อินทรีย์วัตถุเป็นแหล่งอาหารของพืช โดยเฉพาะ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ และยังเป็นตัวควบคุมโครงสร้างของดินอีกด้วย

3) น้ำ (water) ประกอบอยู่ในดินประมาณ 25% น้ำอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดดิน โดยการดึงดูดจากแรงตึงผิว นอกจากนั้นยังมีน้ำเยื่อ หรือน้ำที่ถูกเม็ดดินดึงดูดเอาไว้เป็นชั้นบางๆ รอบอนุภาค น้ำเป็นตัวละลายธาตุอาหารต่างๆ ในดิน รวมทั้งนำธาตุอาหารเข้าสู่พืช

4) อากาศ (air) ประกอบอยู่ในดินประมาณ 25% อากาศจะอยู่ในช่องว่างในดิน ซึ่งจะช่วยให้เป็นธาตุอาหารพืชโดยตรง และช่วยในกิจกรรมของจุลินทรีย์ต่างๆ เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น อากาศยังมีหน้าที่ช่วยในกิจกรรมของจุลินทรีย์ ช่วยเป็นตัวการของกระบวนการเคมีในดินที่สำคัญอีกด้วย

### 2.3.2 แร่วัตถุในดิน (Mineral matter)

ส่วนที่เป็นของแข็งในดินมีทั้งส่วนประกอบที่เป็นหินหรือชิ้นส่วนย่อยของหินเป็นเม็ดเล็กๆ และอาจจะเป็นเม็ดแร่ที่หลุดแตกออกมาจากหินต้นกำเนิด นอกจากนี้ส่วนที่เป็นของแข็งยังเป็นพวกอินทรีย์วัตถุอีกด้วย เม็ดแร่ที่เกิดแต่ดั้งเดิมและยังคงสภาพอยู่ได้ในดิน จะต้องมีคุณสมบัติสำคัญ คือ มีความคงทนต่อการกัดกร่อนหรือทำปฏิกิริยาทางเคมีกับบรรยากาศได้น้อยหรือมีความแข็งแรงพอสมควร ส่งผลให้ทนสภาพอยู่ได้ เม็ดแร่พวกนี้ได้แก่ เม็ดทรายแป้ง (silt) ขึ้นไปถึงเม็ดทราย (sand) ส่วนพวกที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากๆ เช่น เม็ดดินเหนียว (clay) มักจะเป็นแร่ที่เกิดขึ้นใหม่ตอนที่มีการสร้างดินนั่นเอง แร่ต่างๆที่พบมากในดินมีดังนี้

#### 1) กลุ่มแร่ซิลิกา (silica group) หรือกลุ่มแร่ควอตซ์ (quartz)

แร่ซิลิกามีสูตรทางเคมีว่าซิลิกอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ชาวบ้านเรียกว่า แร่เขียว หนุมาน หรือ แร่โป่งข่าม ควอตซ์เป็นองค์ประกอบหลักของอนุภาคดินขนาดทรายและขนาดทรายแป้ง ควอตซ์เป็นแร่ที่ทนต่อการสลายตัวมาก มีความแข็งเท่ากับ 7 ดินที่มีควอตซ์อยู่ในปริมาณมาก ดินนั้นจะเป็นดินทราย มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ไม่เหมาะสำหรับการปลูกพืช ควอตซ์มีเนื้อดินละเอียดมาก รวมทั้งมีสีต่างๆ เช่น ขาว น้ำตาล เทา เหลือง แดง ดำ เป็นต้น

#### 2) กลุ่มแร่เฟลด์สปาร์ (feldspar group)

แร่เฟลด์สปาร์ เป็นแร่ที่มีสารประกอบอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) หรือที่ชาวบ้านเรียกว่า แร่ฟันม้า เฟลด์สปาร์เป็นแร่ที่มีมากที่สุดในบรรดาแร่ประกอบหิน แต่มีความเสถียรน้อยกว่ากลุ่มแร่ซิลิกาหรือกลุ่มแร่ควอตซ์ ทำให้เกิดการผุพังได้ง่าย โดยทำปฏิกิริยากับน้ำหรือกรดคาร์บอนิกได้ดี มีความแข็งของแร่เท่ากับ 6 เมื่อสลายตัวแล้วจะเปลี่ยนไปเป็นแร่ดินเหนียว กลุ่มแร่ชนิดนี้มีลักษณะสีขาวขุ่น หรือสีเหลืองอ่อน หรือสีครีมขุ่น หรือสีเทาอ่อน มักมีหน้าผลึก

สะท้อนแสงพร้อมกันเป็นระนาบเวลาแตกให้แนวแตกเป็นระนาบเกือบตั้งฉากซึ่งกันและกัน  
แร่เฟลด์สปาร์เมื่อผุพังจะกลายเป็นดินขาวที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ คือ เป็นแร่ดินขาว (kaolinite)  
แร่ที่สำคัญในกลุ่มนี้ ได้แก่ โปแทสเฟลด์สปาร์ (potash feldspars) ซึ่งมีสูตรเคมีว่า  $KAlSi_3O_8$  และ  
แพลจิโอเคลสเฟลด์สปาร์ (plagioclase feldspars) มีสูตรทางเคมีว่า  $Na-Ca AlSi_3O_8$  ซึ่งมีธาตุ  
โซเดียมและแคลเซียมเป็นธาตุหลัก ซึ่งสลายตัวได้ค่อนข้างง่าย

### 3) กลุ่มแร่ไมกา (mica group)

แร่ไมกาที่มีสูตรทางเคมีว่า  $(AlSi_3O_{10}(OH)_4)$  มักจะถูกเรียกชื่อว่า แร่กัลเลียม  
องค์ประกอบเป็นพวกอลูมิเนียมซิลิเกต โดยมีธาตุโพแทสเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก  
เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกัน สีใส และสีจะออกขาวแดงหรือเขียว  
คล้ำก็ได้ มีสมบัตินุ่มเบาเกิดเป็นเกล็ดแบบแร่ปฐมภูมิ มีความมันวาวคล้ายๆ แร่กลุ่มไมกาที่สำคัญ  
และพบอยู่ทั่วไป ได้แก่ มัสโคไวต์ (muscovite) หรือไมกาขาว มีสูตรทางเคมีว่า  $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)$   
และ ไบโอไทต์ (biotite) หรือไมกาดำ มีสูตรทางเคมีว่า  $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$

### 4) กลุ่มแร่คาร์บอเนต (carbonate group)

แร่คาร์บอเนตที่พบมากในกลุ่มนี้ ได้แก่ แร่แคลไซต์ (calcite) และแร่โดโลไมต์  
(dolomite) มีสูตรทางเคมีว่า  $CaCO_3$  และ  $CaMg(CO_3)_2$  แร่ในกลุ่มนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ  
พวกคาร์บอเนต พบในหินปูนและหินอ่อน แร่ที่พบมากที่สุดคือ แคลไซต์ เป็นผลึกสีขาวหรือขาวใส  
ถ้ามีวัตถุอื่นเจือปนอยู่มากทำให้มีสีต่างๆ เช่น น้ำตาล เขียว และดำ แคลไซต์จะสลายตัวได้  
ง่ายมาก มีความแข็งเท่ากับ 3 ถ้าแคลเซียมในแคลไซต์ถูกแทนที่โดยแมกนีเซียม เราเรียกว่า  
โดโลไมต์ ซึ่งจะละลายได้ยากกว่าแคลไซต์

### 5) กลุ่มแร่เหล็กออกไซด์ (ferric oxide minerals group)

มีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ทำให้เกิดสีในดินได้อย่างชัดเจน เช่น สีแดง  
เหลือง น้ำตาล แร่ชนิดนี้มักเกิดจากสารละลายของพวกอนุภาคของดินมาเคลือบเอาไว้ ทำให้เกิด  
การเชื่อมประสานอนุภาคเอาไว้ เช่น คีลาแลง เป็นต้น หรือมักจะเกิดจากแร่อื่นๆที่มีธาตุเหล็กอยู่  
แล้ว แร่ที่สำคัญ ได้แก่ ไลโมนาइट (limonite) มีสูตรเคมีว่า  $(Fe_2O_3 \cdot 3H_2O)$  ฮีมาไทต์ (hematite)  
มีสูตรเคมีว่า  $Fe_2O_3$  และแมกนีไทต์ (magnetite) มีสูตรเคมีว่า  $Fe_3O_4$

### 2.3.3 แร่ดินเหนียวในดิน (clay minerals)

แร่ดินเหนียว หมายถึง กลุ่มแร่อะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate minerals) ซึ่งประกอบไปด้วยแผ่นซิลิกา (silica sheet) และแผ่นอะลูมินา (alumina sheet) ซ้อนกันแบบ 1:1 หรือ 2:1 มีทั้งชนิดที่ขยายตัวได้และขยายตัวไม่ได้ แร่ดินเหนียวที่พบทั่วไป คือ เคโอลิไนต์ (kaolinite) อิลไลต์ (illite) มอนมอริลโลไนต์ (monmorillonite) และเวอมิควิลด์ (vermiculite) ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดต่อไป (Klein and Hurlburt, 1993)

แร่ดินเหนียวส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพของผลึกแทบทั้งสิ้น ซึ่งจากลักษณะของโครงสร้างผลึกสามารถจำแนกแร่ดินเหนียว 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ kaolinite, smectite และ hydrous mica หรือ illite นอกจากนี้ยังมีแร่ดินเหนียวกลุ่มอื่นๆ เช่น vermiculite และ chlorite เป็นต้น แร่ดินเหนียวที่พบว่าไม่อยู่ในสภาพของผลึกก็มีเช่นกัน ซึ่งมักจะพบดินชนิดนี้ในบริเวณที่ใกล้กับแหล่งภูเขาไฟ เช่น allophone เป็นต้น

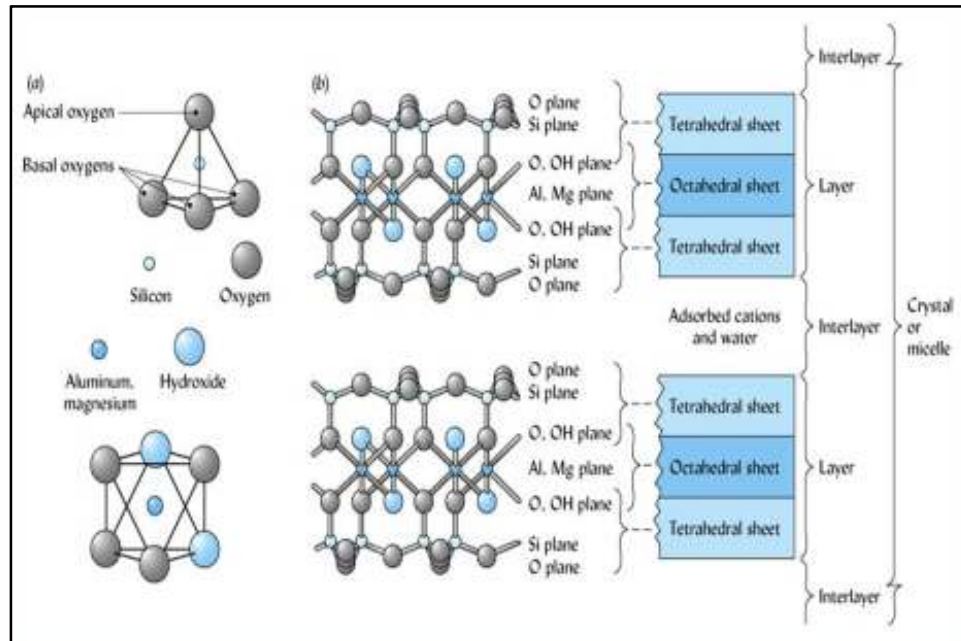
แร่ดินเหนียวมีหน่วยโครงสร้างหลัก ดังนี้

1) Silica tetrahedral unit เป็นหน่วยของโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยออกซิเจน (O) 3 อะตอม เป็นฐานทรงสามเหลี่ยม มีธาตุซิลิกา (Si) 1 อะตอม อยู่ตรงกลาง และมีออกซิเจน (O) อีก 1 อะตอม วางทับอยู่ข้างบน เกิดเป็นหน่วยทรงพีระมิด ดังนั้นจึงเรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า silica tetrahedral unit

หน่วยโครงสร้างของ Silica tetrahedral unit เมื่อมีการเชื่อมกัน โดยการไว้พันธะร่วมกันของออกซิเจน (O) ต่อเรียงกันเป็นแผ่นๆ มีรูปร่างกลางรูปหกเหลี่ยม จะถูกเรียกว่า แผ่นซิลิกา (silica tetrahedral sheet) หรือ T-sheet

2) Alumina octrahedral unit เป็นหน่วยของโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยออกซิเจน (O) 3 อะตอม เป็นฐาน มีธาตุอะลูมินา (Al) 1 อะตอม วางอยู่ตรงกลาง มีออกซิเจนอีก 3 อะตอม วางทับอยู่ข้างบน อัดตัวกันเป็นทรงแปดเหลี่ยม ดังนั้นจึงเรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า Alumina octrahedral unit

หน่วยโครงสร้างของ Alumina octrahedral unit เมื่อมีการเชื่อมกัน โดยการไว้พันธะร่วมกับ 2 หน่วยของ Octrahedral ต่อเรียงกันเป็นแผ่นทับ จะถูกเรียกว่า แผ่นซิลิกา (alumina octrahedral sheet) หรือ O-sheet



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างของแร่ดินเหนียว

- (a) แสดงโครงสร้างของ silica tetrahedral unit และ alumina octahedral unit  
 (b) แสดงโครงสร้างของ silica tetrahedral sheet และ alumina octahedral sheet

แร่ดินเหนียวทุกชนิดประกอบด้วยแร่ที่มีโครงสร้างของแร่ดังที่กล่าวและความแตกต่างระหว่างแร่ดินเหนียวชนิดต่างๆ ก็จะมีขึ้นอยู่กับการเรียงซ้อนกันของแผ่นซิลิกาและแผ่นอะลูมินา การเปลี่ยนแปลงและแทนที่ของซิลิกาและอะลูมินา ในแผ่นโครงสร้างดังกล่าวกับธาตุอื่นๆ ชนิดของแร่ดินเหนียวที่สำคัญ ได้แก่

### 2.3.3.1 เคโอลิไนต์ (Kaolinite)

โครงสร้างของเคโอลิไนต์ ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาหนึ่งแผ่นประกบทับแผ่นอะลูมินาอีกหนึ่งแผ่น โดยที่ซิลิกาและอะลูมินาจะร่วมเกาะออกซิเจนตัวเดียวกันในด้านที่ประกบเข้าหากัน จึงทำให้แผ่นทั้งสองประสานกันแน่นรวมกันเป็นผลึก แร่เคโอลิไนต์มีสูตรทางเคมี คือ  $\text{Si}_4\text{Al}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  ผลึกของแร่นี้จะขยายตัวออกไปในแนวระนาบได้โดยไม่จำกัด รูปของแผ่นผลึกของเคโอลิไนต์เป็นรูปหกเหลี่ยมมีขอบชัดเจน ผลึกของเคโอลิไนต์ในธรรมชาติจะเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นของแผ่นโครงสร้างที่เรียงซ้อนกันมีความหนา 7 อังสตรอม

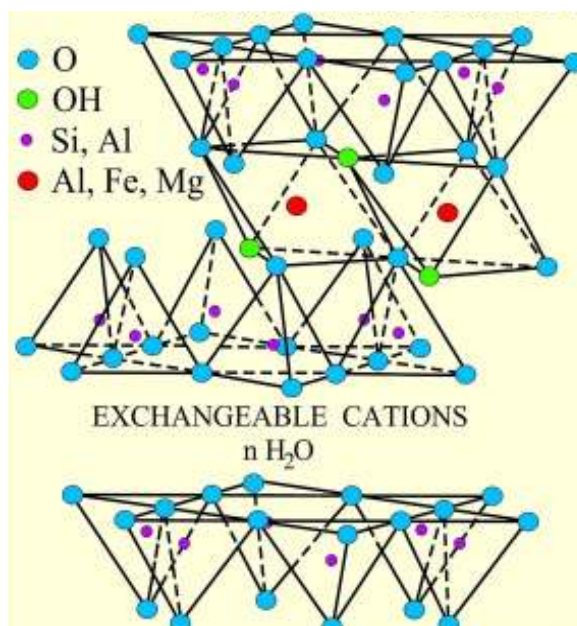
ช่องระหว่างแผ่นโครงสร้างไม่สามารถขยายให้กว้างขึ้นหรือแคบลงได้ เนื่องจากถูกยึดไว้ด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างอะตอมออกซิเจนของแผ่นซิลิกาและอะตอม

ไฮโดรเจนของแผ่นอะลูมินาระหว่างแผ่นโครงสร้างที่อยู่ติดกัน การที่แผ่นอะลูมินามีไฮโดรเจนอะตอมอยู่ด้วยนั้น อะตอมไฮโดรเจนนี้เป็นของกลุ่มไฮดรอกซิล (OH) ซึ่งเกิดขึ้นจาก ออกซิเจนอะตอมซึ่งอยู่ด้านนอกของแผ่นอะลูมินา ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วไฮโดรเจนและออกซิเจนจะมีสัมพรรคภาพ (affinity) ที่ยึดเกาะกันเป็นอย่างมาก ดังนั้น เมื่อต่างเข้ามาใกล้กันจึงทำให้เกิดมีแรงยึดระหว่างกันขึ้นมา ซึ่งมีลักษณะที่ค่อนข้างเหนียวแน่น เราเรียกว่า พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของแร่ดินเหนียวพวกนี้เกี่ยวกับการขยายตัวและการหดตัวเมื่อเปียกแห้งมีน้อยมาก การดูดซับแคตไอออนก็น้อยด้วย เพราะมีแต่พื้นผิวภายนอกเท่านั้น ผลึกของแร่ดินเหนียวพวกนี้มีลักษณะโครงสร้างที่แข็งแรงและเรียงตัวแน่น อนุภาคของดินเหนียวจึงแตกง่ายและหักพังยาก ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วอนุภาคของดินเหนียวพวกนี้ มักจะมีขนาดโตกว่าดินเหนียวพวกอื่นทั้งหมด และขอบผลึกบางส่วนก็ยังสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่ามีลักษณะหกเหลี่ยม ขนาดอนุภาคของดินเหนียวพวกนี้จะอยู่ระหว่าง 0.10 ถึง 5 มิลลิเมตร แต่ส่วนใหญ่จะมีขนาดอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 2 ไมโครเมตร นอกจากนั้นแล้วจากโครงสร้างของแร่เคโอลิไนต์ที่ประกอบด้วยแผ่นอะลูมินาหนึ่งแผ่นประกบทับกับแผ่นซิลิกาหนึ่งแผ่น แร่ชนิดนี้จึงมักจะถูกเรียกว่า กลุ่มแร่พวก 1 : 1 type clay

### 2.3.3.2 สเม็คไทต์ (Smectite)

แร่ดินเหนียวพวกนี้มีอยู่หลายชนิดที่สำคัญ ได้แก่ มอนต์มอริลโลไนต์ (Monmorillonite) เบเดลไลต์ (Beidellite) นอนโทรไนต์ (Nontronite) ซาโปไนต์ (Saponite) และอื่นๆ ในจำนวนแร่เหล่านี้มีมอนต์มอริลโลไนต์เป็นแร่ดินเหนียวสำคัญ เพราะพบได้มากที่สุด รองลงมาคือ เบเดลไลต์ และ นอนโทรไนต์ ตามลำดับ

โครงสร้างของแร่ดินเหนียวพวกสเม็คไทต์ ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นและแผ่นอะลูมินาหนึ่งแผ่นสอดอยู่ตรงกลาง ซิลิกาและอะลูมินาอะตอมของทั้งสองแผ่นต่างก็ยึดเกาะออกซิเจนร่วมกัน ประกอบกันเป็นผลึกของสเม็คไทต์ เนื่องจากแร่ดินเหนียวพวกนี้ประกอบด้วยแผ่นซิลิกาสองแผ่นและแผ่นอะลูมินาหนึ่งแผ่น แร่ชนิดนี้จึงมักถูกเรียกว่า กลุ่มแร่พวก 2 : 1



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างของแร่มอนต์มอริลโลไนต์

ผลึกของสเม็คไทต์จะเชื่อมต่อกันไปในแนวระดับ และจะซ้อนกันเป็นชั้น เช่นเดียวกับเคโอลิไนต์ แผ่นโครงสร้างและช่องระหว่างแผ่นที่ซ้อนกันมีความหนา 9-21 อังสตรอม ช่องว่างอาจจะขยายกว้างหรือแคบได้ เพราะไม่มีพันธะไฮโดรเจนที่ยึดระหว่างแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกัน เนื่องจากด้านบนและด้านล่างของช่องต่างก็มีออกซิเจนซึ่งเป็นของแผ่นซิลิกาทั้งหมด ดังนั้นพันธะไฮโดรเจนจึงไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิด oxygen - oxygen linkage ขึ้นแทน ซึ่งเป็นแรงที่ยึดเกาะกันที่เบาบางมากไม่สามารถจะยึดช่องว่างของแร่ดินเหนียวให้มีระยะที่คงที่ได้ โมเลกุลของน้ำและแคตไอออนต่างๆ ก็แทรกซึมเข้าไปดูดซับอยู่ที่ผิวภายในช่องว่าง (internal surface) ได้โดยง่าย แร่ดินเหนียวพวกนี้จะมีพื้นที่ผิวดูดซับโมเลกุลของน้ำและแคตไอออนได้มาก การพองตัวและการหดตัวก็จะเกิดขึ้นได้มาก เมื่อดินนั้นเปียกหรือแห้งตัวลง ความสามารถในการดูดซับน้ำและแคตไอออนต่างๆ ก็มีสูงมาก เมื่อแร่ดินเหนียวเปียกน้ำจะมีลักษณะเหนียวไม่ร่วนเหมือนแร่เคโอลิไนต์

เนื่องจากแร่ดินเหนียวพวกนี้ยึดหดได้ง่ายและมีการแทนที่ของไอออนมาก โครงสร้างของผลึกจึงไม่แข็งแรง การแตกสลายของผลึกและอนุภาคของดินเหนียวพวกนี้จึงเกิดขึ้นได้ง่ายมาก ในสภาพธรรมชาติทั่วไปจึงพบว่า แร่ดินเหนียวพวกสเม็คไทต์มีขนาดเล็กมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเคโอลิไนต์ คือ มีขนาดอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 1.0 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงยิ่งมีผลทำให้แร่ดินเหนียวพวกนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากขึ้นอีก ขอบของผลึกของแร่ดินเหนียวพวกนี้จะฉีกขาดจนไม่อาจที่จะเห็นขอบของผลึกที่แท้จริงได้

แร่ดินเหนียวในกลุ่มสเม็คไทต์จะมีโครงสร้างเหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันตั้งแต่ที่การถูกไล่จากธาตุซิลิกาและอะลูมินาในโครงสร้างของผลึกด้วยธาตุอื่นๆ ซึ่งเรียกว่า ionic substitution หรือ isomorphous substitution ยกตัวอย่างเช่น

- ไพโรฟิลไลต์ (Pyrophyllite) มีสูตรคือ  $\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  เกิดจากแร่ดินเหนียว 2:1 type clay ที่มีอะลูมิเนียม (Al) และซิลิกา (Si) ในโครงสร้างของผลึก

- มอนต์มอริลโลไนต์ (Monmorillonite) มีสูตรคือ  $\text{Si}_8(\text{Al}_{3.3}\text{Mg}_{0.66})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  เกิดจากแร่ดินเหนียว 2:1 type clay ที่มีธาตุแมกนีเซียม (Mg) เข้ามาแทนที่อะลูมิเนียม (Al) บางส่วนในแผ่นอะลูมินา (Al – sheet)

- เบเดลไลต์ (Beidellite) มีสูตรคือ  $(\text{Si}_{7.33}\text{Al}_{0.67})\text{Al}_4\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  เกิดจากแร่ดินเหนียว 2:1 type clay ที่มีธาตุอะลูมินา (Al) เข้ามาแทนที่ซิลิกา (Si) บางส่วนในแผ่นซิลิกา

- ซาไฟไนต์ (Saponite) มีสูตรคือ  $(\text{Si}_{7.34}\text{Al}_{0.66})\text{Mg}_6\text{O}_{20}(\text{OH})_4$  เกิดจากแร่ดินเหนียว 2:1 type clay ที่มีธาตุอะลูมินา (Al) เข้ามาแทนที่ซิลิกา (Si) บางส่วนในแผ่นซิลิกา (Si – sheet) และแผ่นอะลูมินาถูกแทนที่ทั้งหมดโดยแมกนีเซียม (Mg)

**ตารางที่ 2.7** ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างแร่ดินเหนียวสำคัญ 3 ชนิด

สมบัติ	ชนิดของแร่ดินเหนียว		
	เคโอลินไนต์ (Kaolinite)	สเม็คไทต์ (Smectite)	อิลไลต์ (Illite)
ขนาดของผลึก	0.1-5.0	0.01-1.0	0.1-2.0
รูปร่าง	แผ่นบางรูป หกเหลี่ยม	แผ่นบางมีขอบไม่ สม่ำเสมอ	แผ่นบางมีขอบไม่ สม่ำเสมอ
พื้นที่ผิวภายนอก	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
พื้นที่ผิวภายใน	ไม่มี	สูงมาก	ปานกลาง
ความเชื่อมแน่นและ สภาพพลาสติก	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
การขยายตัว	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
ความจุแลกเปลี่ยนไอออน	3-15	80-100	15-40



### 2.3.3.3 อิลไลต์ (Illite)

แร่อิลไลต์เป็นแร่ที่มีองค์ประกอบของผลึกคล้ายกับพวกสเม็คไทต์มาก และมีโครงสร้างทั่วไปเหมือนกัน ดังนั้นจึงเป็นพวก 2:1 type clay ด้วย แต่จะแตกต่างกันตรงที่ระยะระหว่างแผ่นผลึกโดยวัดจากขอบบนของแผ่นโครงสร้างแผ่นบนถึงขอบบนของแผ่นล่าง ถัดลงมาจะมีระยะคงที่เท่ากับ 10 อังสตรอม และไม่สามารถยืดหดได้เหมือนอย่างสเม็คไทต์ บางครั้งจึงเรียกพวกนี้ว่า พวกที่ไม่ยืดตัว (non expanding lattice) เพราะว่าซิลิกาอะตอมในแผ่นซิลิกาบางส่วนจะถูกแทนที่โดยอะลูมินาอะตอม และประจุที่เหลือค้างอยู่เนื่องจากการแทนที่กันนี้จะถูกดูดยึดชดเชย (satisfied) ทำให้เป็นกลางโดย  $K^+$

สูตรของอิลไลต์จึงเขียนได้ดังนี้  $K_{1.33} (Si_{6.66} Al_{1.33}) Al_4 O_{20} (OH)_4$  สำหรับ  $K^+$  ที่เข้ามาทำให้ประจุลบที่ค้างอยู่เป็นกลาง จะเข้ามาอยู่ในรูปของ  $K^+$  ที่ฝังตัวอยู่ในระหว่างช่องเล็กๆ ภายในช่องรูปหกเหลี่ยมของแผ่นซิลิกาที่ซ้อนอยู่ทั้งข้างบนและข้างล่าง เลยทำหน้าที่คล้ายๆ กับกระดุมที่ช่วยยึดแผ่นผลึกของอิลไลต์ที่เรียงซ้อนกันทำให้ยับเขยื้อนได้ยาก ซึ่งมีผลทำให้ช่องระหว่างแร่ดินเหนียวขยายและหดตัวไม่ได้เมื่อดินเหนียวนั้นเปียกหรือแห้ง แคตไอออนต่างๆ ก็แทรกซึมเข้าไปดูดยึดกับพื้นที่ผิวภายในช่องไม่ได้ด้วย ซึ่งหมายความว่า พื้นที่ผิวภายในจะมีน้อยมากแต่ก็ยังมีมากกว่าพวกเคโอลิไนต์ ทั้งนี้เพราะโมเลกุลของน้ำและแคตไอออนอาจแทรกซึมเข้าไปดูดยึดกับพื้นที่ผิวภายในบริเวณใกล้กับขอบของผลึกได้บ้าง ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า คุณสมบัติต่างๆ ของอิลไลต์จะอยู่ระหว่างๆ คุณสมบัติของสเม็คไทต์และเคโอลิไนต์ โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของอิลไลต์คล้ายกับแร่ไมกามา จึงมักเรียกอิลไลต์ว่า ไฮดรึสมิกา (hydrusmica)

### 2.3.4 คุณสมบัติสำคัญของแร่ดินเหนียว

1) รูปร่างและขนาด รูปร่างอนุภาคของแร่ดินเหนียวมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ (flake-like) ประกบซ้อนกันอยู่เป็นจำนวนมาก อนุภาคของแร่ดินเหนียวทุกชนิดส่วนใหญ่จะคงไว้ในลักษณะของผลึก บางชนิดจะมีรูปร่างเป็นหกเหลี่ยม (hexagonal) ซึ่งสามารถมองเห็นเหลี่ยมและมุมของแผ่นหกเหลี่ยมได้อย่างชัดเจนเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) บางชนิดเป็นแผ่นบาง ส่วนขอบของอนุภาคที่เป็นผลึกเหล่านี้ไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนเพราะมีรอยฉีกขาดอยู่ทั่วไปหมด ส่วนแร่ดินเหนียวบางชนิดก็มีรูปร่างของแผ่นบางที่ม้วนเป็นทรงกระบอกเป็นต้น

2) พื้นที่ผิว (surface area) เนื่องจากอนุภาคของแร่ดินเหนียวมีขนาดเล็กมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแผ่นแบนและบาง จึงทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (specific area) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิว

ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมีค่าสูงมาก อนุภาคของสารที่มีน้ำหนักเท่ากันแต่เมื่อมีรูปร่างลักษณะแตกต่างกันออกไป เช่น มีทรงกลม แบน หรือทรงลูกบาศก์ ก็จะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน อนุภาคที่มีน้ำหนักเท่ากันจะพบว่าอนุภาคเป็นรูปทรงกลมจะมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด ส่วนอนุภาคที่เป็นรูปแบนหรือแผ่นจะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด เห็นได้ว่า แร่ดินเหนียวมีรูปร่างที่ส่งเสริมพื้นที่ผิวมากที่สุด ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นพื้นที่ผิวภายนอก (external surface) แต่บางชนิดยังมีพื้นที่ผิวภายในอีกด้วย โดยเป็นพื้นที่ผิวที่อยู่ในช่องระหว่างแผ่นผลึกของแร่ดินเหนียวที่ซ้อนทับกันอยู่เป็นอนุภาคหรือไมเซลล์ (micelle) ของแร่ ดังนั้นแร่ดินเหนียวพวกนี้จึงมีพื้นที่ผิวทั้งหมดเป็นจำนวนมาก

3) ความเชื่อมแน่น (cohesion) และสภาพพลาสติก (plasticity) คุณสมบัติความเชื่อมแน่นและสภาพพลาสติกของแร่ดินเหนียวมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของดินเหนียว ความเชื่อมแน่นในที่นี้หมายถึงความสามารถเกาะยึดกันได้ระหว่างอนุภาคดินเหนียว การที่ดินเหนียวชนิดหนึ่งมีความเชื่อมแน่นสูงก็เนื่องจากอนุภาคของดินเหนียวมีพื้นที่ผิวให้น้ำยึดเกาะผิวได้มาก จึงทำให้อนุภาคของดินเหนียวนั้นเกาะยึดกันได้ดีด้วย ดังนั้นดินที่มีดินเหนียวซึ่งมีความเชื่อมแน่นสูงจะมีสภาพเหนียวและเกาะติดมือ การไถพรวนดินทำได้ลำบากเมื่อดินนั้นเปียก นอกจากนั้นเมื่อดินเหนียวมีความชื้นที่เหมาะสมจะมีความอ่อนนุ่ม สามารถบีบปั้นให้เป็นรูปต่างๆ และคงสภาพเช่นนั้นอยู่ได้ คุณสมบัตินี้ เราเรียกว่า สภาพพลาสติก ส่วนดินเหนียวบางชนิดมีความเชื่อมแน่นต่ำ คือมีพื้นที่ผิวน้อยจึงมีน้ำยึดเกาะที่ผิวน้อยที่จะช่วยยึดอนุภาคของดินเหนียวอื่นๆ ที่อยู่ถัดไป ดังนั้นจึงมีผลทำให้การเกาะกันระหว่างดินเหนียวไม่แน่นถึงแม้ว่าดินจะมีความชื้นอยู่มากก็ตาม ดังนั้นดินจึงมีสภาพร่วน ไม่เหนียวและคุณสมบัติเกี่ยวกับพลาสติกก็ต่ำด้วยเช่นกัน

4) การขยายตัว (swelling) และการหดตัว (shrinking) ดินเหนียวบางชนิดมีคุณสมบัติเกี่ยวกับการขยายตัวที่สูงมาก ซึ่งความสามารถขยายตัวเกิดจากโครงสร้างของดินเหนียวที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะในแร่ดินเหนียวบางชนิดที่มีลักษณะเป็นแผ่นผลึกที่ซ้อนทับกันนั้น จะมีช่องว่างระหว่างแผ่นผลึกที่ทับกันค่อนข้างกว้างและไม่เกาะยึดกันเหนียวแน่นนัก โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกเข้าไปได้ง่าย แล้วเข้าไปเกาะยึดอยู่กับพื้นที่ผิวภายในของดินเหนียวมากขึ้น เมื่อน้ำเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้น (inter layer) ได้มากขึ้นก็จะยิ่งทำให้ช่องว่างดินมีความห่างกันมากขึ้น ดังนั้นดินเหนียวพวกนี้เมื่อเปียกน้ำแล้วจะพองตัวหรือขยายตัวได้ แต่ถ้าทำให้ดินเหนียวแห้งลง เช่นนำเข้าเตาอบเพื่อไล่น้ำออก น้ำที่เกาะอยู่ในช่องว่างระหว่างดิน จะถูกระเหยออกมาทำให้ดินยุบตัวลงหรือหดตัวลง

5) ประจุลบและการดูดซับแคตไอออน (electronegative charge and adsorption of cations) อนุภาคของดินเหนียวจะมีประจุลบอยู่เป็นจำนวนมาก และเมื่ออยู่ตาม

ธรรมชาติก็จะมีการดูดซับแคตไอออนไว้เป็นจำนวนเท่ากับประจุลบที่มีอยู่ จึงทำให้เกิดสภาพที่เรียกว่า สภาพประจุสองชั้น (ionic double layer) เกิดขึ้น ชั้นในได้แก่ชั้นของประจุลบที่ผิวของดินเหนียว ชั้นนอกได้แก่ชั้นของประจุบวกของแคตไอออนที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียว ดังนั้นอนุภาคของดินเหนียวมีลักษณะคล้ายๆ กับแอนไอออนและสามารถที่จะเคลื่อนตัวไปยังขั้วบวกได้ เช่นเดียวกับ  $\text{Cl}^-$  และ  $\text{SO}_4^{2-}$  และเมื่ออยู่ในสภาพแขวนลอย อนุภาคของดินเหนียวก็จะมีน้ำและกลุ่มแคตไอออนห้อมล้อมอยู่เต็มไปหมด ดังนั้นอนุภาคของดินเหนียวที่อยู่ในสภาพเช่นนี้จึงเรียกว่า clay micelle หรือจะกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นอนุภาคของดินเหนียวที่อยู่ในสภาพของคอลลอยด์นั่นเอง สำหรับแคตไอออนที่ดูดซับอยู่ที่ผิวของดินเหนียวนั้นเป็นการดูดซับอย่างหลวมๆ หรือจะกล่าวได้ว่าแคตไอออนนั้นมีวงโคจรอยู่ใกล้กับพื้นผิวของ clay micelle และสามารถถูกไล่ที่โดยแคตไอออนชนิดอื่นได้ ดังนั้นแคตไอออนที่ดูดซับอยู่ที่ผิวดินเหนียวจึงมักเรียกว่าเป็นแคตไอออนแลกเปลี่ยนได้ และกระบวนการที่เกิดการแลกที่ของแคตไอออนที่พื้นผิว จะเรียกว่า การแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange) ดินโดยทั่วไปจะมีแคตไอออนพวก  $\text{H}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{K}^+$  และ  $\text{Na}^+$  เกาะยึดอยู่ที่ผิวของดินเหนียว เป็นส่วนใหญ่และเป็นสัดส่วนมากน้อยลดลงไปตามลำดับ

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.4.1 การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยการดูดซับ

Bertram และคณะ (2005) ใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ ในการทำไบโอดีเซลให้มีความบริสุทธิ์ โดยการใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ ได้แก่ แมกนีเซียมซิลิเกต ซิลิกาเจล อะลูมินา และแร็ดดินเหนียว พบว่าเมื่อใช้ตัวดูดซับที่เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตทำให้ปริมาณของกลีเซอรอล น้ำ สบู่ ค่าคาร์บอน ซัลเฟอร์ รวมไปถึงโลหะชนิดต่างๆที่เจือปนอยู่ในไบโอดีเซลลดลง นอกจากนี้ยังทำให้คุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นค่าความหนืดซึ่งลดลงจาก 4.207 เป็น 4.127 เซนติสโตรก ค่าจุดวาบไฟ เพิ่มขึ้นจาก 163 เป็น 190 องศาเซลเซียสและค่าความเป็นกรด ลดลงจาก 0.31 เป็น 0.27 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เป็นต้น

Berrios และ Skelton (2008) ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยเปรียบเทียบ การใช้ น้ำล้างไบโอดีเซล การดูดซับด้วยแมกนีซอล และการใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าทั้ง สามกระบวนการสามารถแยกกลีเซอรอลและสบู่ได้ดี การใช้ น้ำล้างไบโอดีเซลเป็นวิธีที่สามารถ ลดปริมาณกลีเซอรอลให้มีค่าเป็นไปตามมาตรฐานที่ EN 14214 กำหนดไว้ ส่วนการใช้แมกนีซอล เป็นตัวดูดซับสามารถดูดซับเอาเมทานอลออกไปได้บางส่วนซึ่งได้มากกว่าการใช้เทคนิคการ แลกเปลี่ยนไอออน

จิรพรรณ เจริญสินวรกุล (2549) ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้สารดูดซับ โดยใช้ไบโอดีเซลได้จากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลที่ใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นทำให้บริสุทธิ์โดยสารดูดซับ ได้แก่ แมกนีซอล ถ่านกัมมันต์ อะลูมินาชนิดเบส ดินเบนโทไนต์และดินเบนโทไนต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโซเดียม ไฮดรอกไซด์ จากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์และแมกนีซอลสามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระ เหลือเพียงร้อยละ 0.014 และ 0.016 ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่ดีที่สุด

แพรวสุข วังศิลา (2552) ศึกษาการดูดซับของดินเบาด้วยความร้อนสำหรับใช้ในการทำ ไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ โดยดินเบาที่ถูกเผาทั้งหมดนำมาดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลที่ สังเคราะห์จากน้ำมันปาล์มโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา การดูดซับที่เหมาะสมที่สุดจะได้รับการ แปรผันอัตราส่วนของตัวดูดซับต่อไบโอดีเซล เวลาสัมผัส และอุณหภูมิ โดยใช้ปริมาณดินเบาและ ดินเบาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที กลีเซอรอลในไบโอดีเซลจะถูกกำจัดออกอย่างมาก นอกจากนี้การกำจัดกลีเซอรอล

ถูกปรับปรุงได้โดยใช้ปริมาณดินเบาและดินเบาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในภาวะที่มีเมทานอลถูกกำจัดออกก่อนทำการดูดซับ

บุษยา ศรีวิจารณ์ (2552) ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ ดินเบนโทไนท์ ดินเบา และดินกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ ไบโอดีเซลที่ได้จากทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ในภาวะที่มีเมทานอล กลีเซอรินในไบโอดีเซลจะถูกกำจัดออกได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที นอกจากนี้กลีเซอรินจะถูกกำจัดออกได้สูงถึงร้อยละ 90 โดยใช้เวลา 10 นาที โดยใช้น้ำหนัก เป็นเวลา 1 นาที ในภาวะที่มีเมทานอลถูกกำจัดออกก่อนทำการดูดซับ จากการทดลองพบว่า ดินกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

นิสากรณ์ แสงประชุม (2552) ศึกษาการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ดินเบาและดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์เป็นตัวดูดซับ พบว่า ประสิทธิภาพเหมาะสมที่สุดในการกำจัดกลีเซอรินสามารถได้จากการใช้ดินเบาร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก เวลาในการสัมผัส 20 นาที ที่ 50 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ การกำจัดเมทานอลออกจากไบโอดีเซลก่อนทำการดูดซับสามารถกำจัดกลีเซอรินได้ร้อยละ 98 โดยใช้ดินเบาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่สภาวะเดียวกัน และสามารถกำจัดโมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 28.92 โดยการใช้ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์ร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เวลาในการสัมผัส 10 นาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

#### 2.4.2 การใช้ดินสเม็คไทต์ในการดูดซับ

Yaung และ Shen (2005) ได้ศึกษาการดูดซับของสายเอทีลินออกไซด์บนพื้นที่ผิวของดินสเม็คไทต์ พบว่า สายโพลีเอทีลินออกไซด์ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลมากที่ถูกดูดซับบนพื้นที่ผิวของสเม็คไทต์สามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวของสเม็คไทต์ได้ โดยพบว่า พื้นที่ผิวของสเม็คไทต์ในน้ำสามารถคำนวณจากความจุของชั้นประจุในการดูดซับโพลีเอทีลินออกไซด์ และสเม็คไทต์ที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 335.5 ตารางเมตรต่อกรัม ให้ค่าการดูดซับโพลีเอทีลินออกไซด์ถึง 305 มิลลิกรัมต่อกรัม

Bhattacharyya และ Gupta (2006) ได้ศึกษาการดูดซับตะกั่ว (Pb) ด้วยแร่เคโอลิไนต์และแร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรด โดยศึกษาความเข้มข้น ปริมาณ และอุณหภูมิที่ต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่า ค่าพีเอชมีผลต่อการดูดซับเป็นอย่างมาก และการดูดซับตะกั่วของแร่เคโอลิไนต์และแร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่พีเอชเท่ากับ 1 ถึง 6 ในเวลา 180 นาที พบว่าให้ค่าคงที่ของการดูดซับอยู่ในช่วง  $3.5 \times 10^{-2}$  ถึง  $11.2 \times 10^{-2}$  กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที ตามลำดับ ค่าความจุจากไอโซเทอมแลงเมียร์เท่ากับ 11.5 และ 31.4 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

Su และ Shen (2009) ได้ทำการดูดซับโพลีเมอร์ด้วยดินสเม็คไทต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นชั้นประจุในการดูดซับโพลีเอทิลีนออกไซด์ด้วยดินสเม็คไทต์ ผลการศึกษาพบว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วทั้งสอง และพันธะไฮโดรเจนระหว่างออกซิเจนของโพลีเอทิลีนออกไซด์และโครงสร้างไฮดรอกไซด์ของสเม็คไทต์ ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับบนบริเวณประจุต่ำของพื้นที่ผิวสเม็คไทต์ นอกจากนี้ยังพบการขยายตัวของชั้นประจุที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับให้มากขึ้น และดินสเม็คไทต์ที่ได้รับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ให้ความสามารถในการดูดซับโพลีเอทิลีนได้ดีที่สุด โดยมีค่าการดูดซับเท่ากับ 450 มิลลิกรัมต่อกรัม

Guerra และคณะ (2010) ได้ศึกษาการดูดซับโครเมียมไอออน(Cr) ด้วยดินสเม็คไทต์ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ ค่าพีเอช ความเข้มข้น และการให้ความร้อน โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณธาตุประกอบ ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา ศึกษากระบวนการดูดซับในโตรเจน เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า การดูดซับโครเมียมด้วยดินสเม็คไทต์ ณ อุณหภูมิห้องและมีค่าพีเอชเท่ากับ 4 เมื่อนำค่าการดูดซับมาสร้างไอโซเทอม พบว่า สเม็คไทต์ธรรมชาติและสเม็คไทต์ที่นำไปปรับปรุงสามารถดูดซับโครเมียมโดยให้ค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 1.16 และ 1.86 มิลลิโมลต่อกรัม ตามลำดับ และให้ค่าความจุในการดูดซับเท่ากับ 60.03 และ 90.72 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการทดลอง

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (experimental research) ซึ่งทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการศึกษา ณ ห้องปฏิบัติการทดลองชั้น 17 สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการทดลองชั้น 15 ภาควิชาเคมี อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (Crude palm oil): บริษัท มรกต อินดัสตรีส์ จำกัด
2. ดินสเม็คไทต์ (Smectite): ชมรมเกษตรปลอดสารพิษ (สำนักงานใหญ่บางเขน)
3. ถ่านกัมมันต์แบบผง (Activated carbon): บริษัท บางกอกชาयน์ เซ็นเตอร์ จำกัด, CCO-AC-CA011, commercial grade
4. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid): Merck, analytical grade
5. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid): Carlo Erba, analytical grade
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide): Carlo Erba, analytical grade
7. โทลูอีน (Toluene): Merck, analytical grade
8. โบรโมฟีนอลบลู (Bromophenol blue): Carlo Erba, analytical grade
9. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide): Lab-Scan, analytical grade
10. โพแทสเซียมไฮโดรเจนแทลเลต (Potassium hydrogen phthalate): Merck, analytical grade
11. โพรพานอล (2-Propanol): Carlo Erba, analytical grade
12. ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein): Merck, analytical grade
13. ฟีนอลเรด (Phenol Red): Carlo Erba, analytical grade
14. เมทานอล (Methanol): Fisher, analytical grade
15. สารละลายมาตรฐาน 14105 (EN 14105 standard and internal standard solution): Supelco

16. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol): บริษัท ไทยออยล์ จำกัด, commercial grade
17. เฮปเทน (Heptane): Merck ,analytical grade

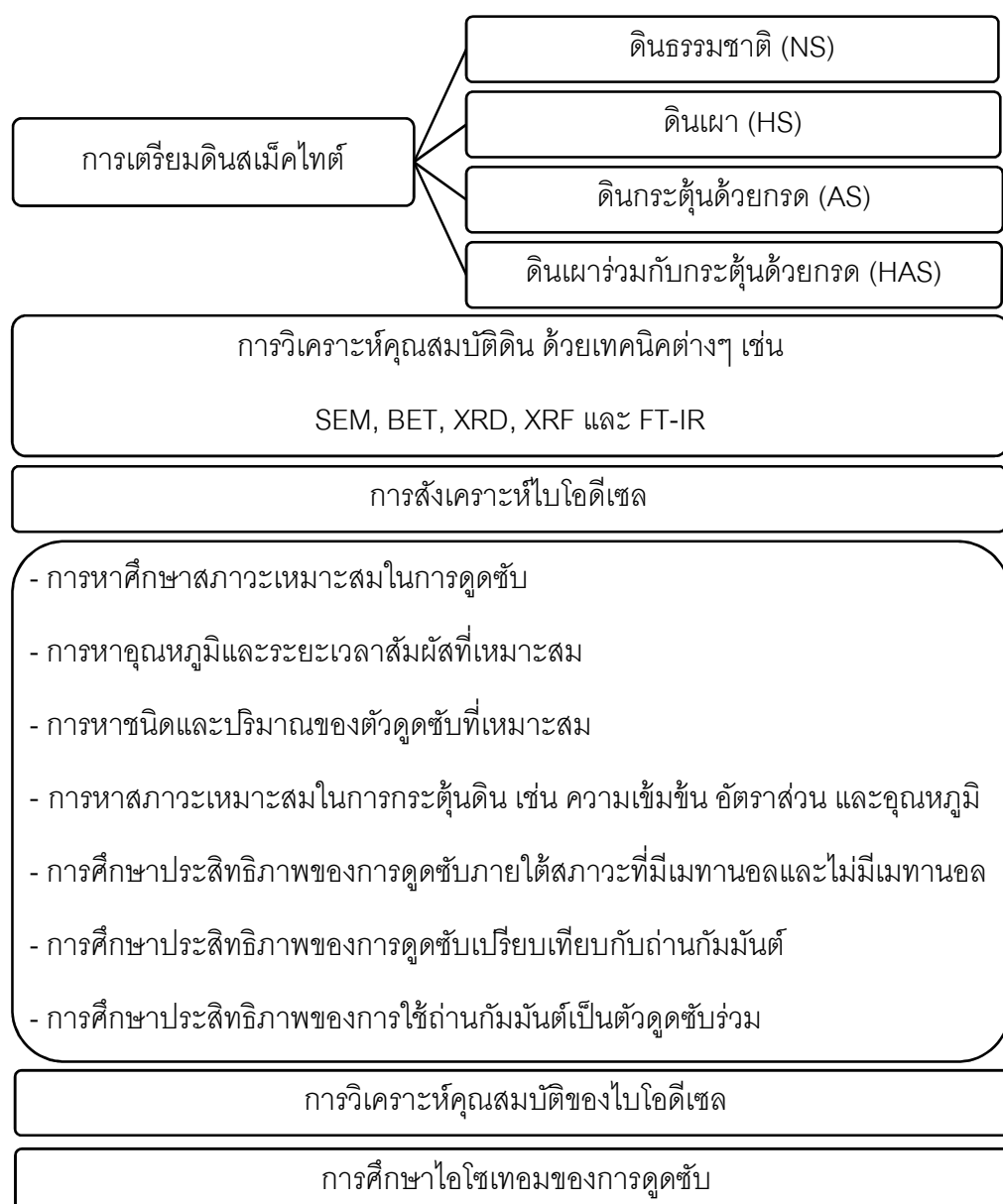
### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope): JEOL, JSM-6480LV
2. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer and heater): IKA, C-MAG HS7
3. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography): Varian, CP-3800
4. เครื่องชั่งไฟฟ้า 2 ตำแหน่ง: Precisa, BJ1000C
5. เครื่องชั่งไฟฟ้า 4 ตำแหน่ง: Mettler Toledo, AB 204 S
6. เครื่องดูดสุญญากาศแบบหมุน (Rotary Vacuum Evaporator): Eyela, N-N serie
7. เครื่องทำความเย็น (Cool Ace): Eyela, CA-1111
8. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Refrigerated bench top centrifuge): Sigma, 4-15
9. เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET Surface Area Analyzer): Coulter, SA 3100
10. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer): Perkin Elmer
11. เครื่องวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy): Nicolet
12. เตาเผา: Nabertherm controller, Model L9/12/P320
13. ตู้ดูดความชื้น (Silica gel desiccator cabinet): Model AD48
14. ตู้อบความร้อน: Memmert, Model UE/BE 200-800
15. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath and shaker): Memmert
16. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Digital Water Bath): Eyela, SB-651



### 3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองในครั้งนี้สามารถแบ่งออกเป็นหลายขั้นตอน โดยประกอบไปด้วยขั้นตอนสำคัญหลักๆ คือ ขั้นตอนของการเตรียมดินดูดซับ ขั้นตอนของการศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซล ขั้นตอนของการศึกษาสภาวะของการดูดซับ ขั้นตอนของการวิเคราะห์คุณสมบัติของดิน และตรวจสอบคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งสามารถอธิบายขั้นตอนโดยสรุปจากภาพที่ 3.1 ดังนี้



ภาพที่ 3.1 แผนภาพการดำเนินการทดลองโดยสรุป

### 3.3.1 การเตรียมดินดูดซับ

ดินสเม็คไทต์ที่ใช้ในการดูดซับที่ใช้ในการวิจัยชิ้นนี้ เป็นดินสเม็คไทต์ที่มีจำหน่ายในประเทศไทย โดยมักจะถูกใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตร เพื่อดูดซับแอมโมเนียในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ และกำจัดกลิ่นในคอกสัตว์ มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน (C.E.C) เท่ากับ 110 meq ต่อดิน 100 กรัม สำหรับในงานวิจัยชิ้นนี้จะใช้ดินสเม็คไทต์ที่เป็นดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ และดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยวิธีต่างๆ ในการดูดซับ ซึ่งจะจำแนกชนิดของดินสเม็คไทต์ออกเป็น 4 ชนิด ดังนี้

#### 3.3.1.1 ดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (Natural smectite, NS)

ดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ จะถูกเตรียมจากการนำดินสเม็คไทต์มาร่อนผ่านตะแกรงละเอียดเพื่อให้ได้ขนาดเม็ดดินที่มีขนาดระหว่าง 120-200 mesh (หมายถึง ร่อนดินผ่านตะแกรงขนาด 120 mesh จากนั้นนำดินที่ร่อนผ่านตะแกรง มาร่อนซ้ำด้วยตะแกรงขนาด 200 mesh และเลือกดินที่ค้างอยู่บนตะแกรงมาใช้ในการดูดซับ) จากนั้นนำดินไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเก็บไว้ในตู้เก็บความชื้น ก่อนนำมาใช้ในการดูดซับให้นำดินไปอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

#### 3.3.1.2 ดินสเม็คไทต์เผา (Heat-treated smectite, HS)

ดินสเม็คไทต์ที่ปรับปรุงด้วยการเผา จะถูกเตรียมจากการนำดินสเม็คไทต์มาเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ดินที่ผ่านการเผาจะนำมาร่อนผ่านตะแกรงละเอียดเพื่อให้ได้ขนาดเม็ดดินที่มีขนาดระหว่าง 120-200 mesh จากนั้นนำดินไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเก็บไว้ในตู้เก็บความชื้น ก่อนนำมาใช้ในการดูดซับให้นำดินไปอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

#### 3.3.1.3 ดินสเม็คไทต์กระตุ้นด้วยกรด (Acid activated smectite, AS)

ดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด จะถูกเตรียมจากการนำดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ มาอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำในดินออก จากนั้นทำการปรับปรุงด้วยการกระตุ้นโดยใช้กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid,  $H_2SO_4$ ) ที่มีความเข้มข้นต่างๆ โดยในการวิจัยนี้ จะเตรียมกรดซัลฟิวริกทั้งหมด 3 ความเข้มข้น คือ 0.1, 0.3 และ 0.5 M จากนั้นทำการกระตุ้นดินโดยใช้อัตราส่วนระหว่างดินต่อสารละลายกรดซัลฟิวริก เท่ากับ 1:5 นั่นคือใช้ดินสเม็คไทต์ที่ผ่านการอบแห้ง 100 กรัม กระตุ้นด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 500 มิลลิลิตร ทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส กวนผสมเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำดินที่ผ่านการ

กระตุ้นไปล้างด้วยน้ำกลั่นจำนวนหลายครั้ง จนกว่าค่าพีเอชของดินจะมีค่าเป็นกลาง นำดินไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบดและร่อนดินผ่านตะแกรงละเอียดเพื่อให้ได้ขนาดเม็ดดินที่มีขนาดระหว่าง 120-200 mesh แล้วนำดินไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงอีกครั้ง ก่อนนำไปเก็บไว้ในตู้เก็บความชื้น ก่อนนำมาใช้ในการดูดซับให้น้ำดินไปอบแห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

### 3.3.1.4 ดินสเม็คไทต์เผาพร้อมกับกระตุ้นด้วยกรด (Heat-treated and acid activated smectite, HAS)

ดินสเม็คไทต์ที่ปรับปรุงด้วยการเผาพร้อมกับกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก จะถูกเตรียมจากการนำดินสเม็คไทต์มาเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำดินเผามากระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 0.5 M ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างดินและกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 1:5 จากนั้นนำดินที่ผ่านการกระตุ้นมาล้างด้วยน้ำกลั่นจำนวนหลายครั้ง จนกว่าจะมีค่าพีเอชเป็นกลาง จากนั้นนำดินไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นบดและร่อนดินผ่านตะแกรงละเอียดเพื่อให้ได้ขนาดเม็ดดินที่มีขนาดระหว่าง 120-200 mesh แล้วนำดินไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงอีกครั้ง ก่อนนำไปเก็บไว้ในตู้เก็บความชื้น



ภาพที่ 3.2 การเตรียมดินสเม็คไทต์เพื่อใช้ในการดูดซับ

### 3.3.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของดินสเม็คไทต์

หลังจากเตรียมดินสเม็คไทต์เรียบร้อยแล้ว นำดินดูดซับที่เตรียมไว้ไปทดสอบความสามารถของการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมัน เพื่อเลือกตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพดี นำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติอย่างละเอียด โดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้

**3.3.2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติดิน ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)** นำดินดูดซับทั้ง 4 ชนิด จากการเตรียมในข้อ 3.3.1 มาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของเม็ดดินผ่านภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า, 2000 เท่า และ 5000 เท่า

**3.3.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติดิน ด้วยเทคนิค Surface area analysis (BET)** นำดินดูดซับทั้ง 4 ชนิด จากการเตรียมในข้อ 3.3.1 มาทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของดินด้วยวิธีการของ Brunauer Emmett Teller (BET method) โดยอาศัยการวัดจากปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนผิวของดิน แล้วนำมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะของดิน

**3.3.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติดิน ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)** นำดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (NS) และดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด (AS) มาทำการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบของดินโดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ตรวจสอบโดยใช้ความต่างศักย์ 30 กิโลวัตต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์ ในช่วงมุมสองกวาด  $2\theta$  เท่ากับ  $4-60^\circ$  ด้วยอัตราเร็วในการส่องกวาดเท่ากับ 5.00 องศาต่ออนาที

**3.3.2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติดิน ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)** นำดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (NS) และดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด (AS) มาทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างความเป็นผลึกของดินโดยอาศัยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

**3.3.2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติดิน ด้วยเทคนิค Fourier-Transform Infrared spectrometer (FT-IR)** ดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (NS) และดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด (AS) มาทำการวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางเคมีด้วยเครื่องมือฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (FT-IR) เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของแร่ธาตุที่มีอยู่ในดิน

### 3.3.3 การสังเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซล

ในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ไบโอดีเซลโดยอาศัยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน โดยทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชและแอลกอฮอล์ คือ น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และเมทานอล (MeOH) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งใช้อัตราส่วนโมลระหว่างน้ำมันและเมทานอล เท่ากับ 1:6 และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 (อ่านวิธีการคำนวณจากภาคผนวก ก) ขั้นตอนการสังเคราะห์ไบโอดีเซลทำได้ดังนี้

1. ชั่งน้ำมันพืช และนำน้ำหนักที่ได้คำนวณหาปริมาณเมทานอลและโซเดียมไฮดรอกไซด์
2. ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำไปละลายในเมทานอล เขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน
3. รีฟลักซ์น้ำมันพืชในขวดก้นกลมขนาด 1000 มิลลิลิตร บนเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส กวนผสมเป็นเวลา 5 นาที
4. เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลลงไป กวนผสมต่อไปเป็นเวลา 85 นาที
5. เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด นำผลผลิตไบโอดีเซลที่ได้ไปแยกชั้นน้ำมันและกลีเซอรอล ด้วยกรวยแยกขนาด 1000 มิลลิลิตร จะเห็นได้ว่า กลีเซอรอลจะค่อยๆ แยกชั้นจากน้ำมันไบโอดีเซลอย่างชัดเจน โดยชั้นบนของกรวยแยกจะเป็นชั้นของไบโอดีเซลซึ่งลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองขุ่น ส่วนชั้นล่างจะเป็นชั้นของกลีเซอรอลลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลใส
6. ทำการไขชั้นกลีเซอรอลออกไป ในขั้นตอนนี้จะใช้เวลาแยกชั้นประมาณ 30 นาทีเพื่อให้กลีเซอรอลแยกชั้นตกลงมาให้มากที่สุด ก่อนที่จะนำน้ำมันไบโอดีเซลดิบ (Crude biodiesel) จากขั้นตอนนี้ไปทำให้บริสุทธิ์เป็นลำดับต่อไป



ภาพที่ 3.3 การเตรียมไบโอดีเซลเพื่อใช้ในการดูดซับ

### 3.3.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์

ในการทดลองแต่ละครั้งจะเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลดิบ (Crude biodiesel) หมายถึง การเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลหลังจากการสังเคราะห์และผ่านการแยกชั้นจากกลีเซอรอลด้วย กรวยแยกเป็นเวลา 30 นาที โดยเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลดิบปริมาตร 5 กรัม นำไปวิเคราะห์ ค่ากลีเซอรอลโดยวิธีไทเทรต เพื่อหาค่ากลีเซอรอลตั้งต้นในการทดลอง (อ่านรายละเอียดของ ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอลด้วยวิธีไทเทรตจากภาคผนวก ก)

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ จะทำการศึกษาโดยใช้น้ำมันไบโอดีเซล ที่เตรียมจากข้อ 3.3.3 มาแยกใส่ขวดทดลองที่มีฝาปิด โดยบรรจุน้ำมันไบโอดีเซลขวดละ 50 กรัม จากนั้นนำน้ำมันไปทดสอบการดูดซับที่สภาวะต่างๆ เช่น การหาอุณหภูมิที่เหมาะสม การหา ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม การหาชนิดของตัวดูดซับที่เหมาะสม การหาปริมาณของตัวดูดซับ ที่เหมาะสม เป็นต้น หลังจากขั้นตอนการดูดซับที่สภาวะต่างกัน จะเก็บตัวอย่างน้ำมันที่ผ่านการดูด ซึมไปไทเทรตหาค่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหลือและปริมาณกลีเซอรอลที่คงเหลือในน้ำมัน เพื่อวิเคราะห์ ประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

ตัวควบคุม (Control) ของการทดลอง หมายถึง น้ำมันไบโอดีเซลดิบที่ได้มาจากการ สังเคราะห์ และไม่มีการเติมตัวดูดซับใดๆ ลงไปในน้ำมัน นำไปเขย่าโดยใช้อุณหภูมิและระยะเวลา เดียวกันกับสภาวะของการดูดซับในแต่ละการทดลอง จากนั้นนำไปไทเทรตเพื่อหาค่ากลีเซอรอล

#### 3.3.4.1 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

นำไบโอดีเซลมาทำการตรวจหาปริมาณกลีเซอรอลที่อุณหภูมิต่างกัน โดยทำการ ทดสอบจากการตกตะกอนของกลีเซอรอลของน้ำมันไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ที่เวลา 30 60 120 และ 180 นาที ใช้อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมาไทเทรตเพื่อวิเคราะห์หาค่ากลีเซอรอล

#### 3.3.4.2 การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

นำไบโอดีเซลมาทำการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ธรรมชาติปริมาณสารดูดซับ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่ระยะเวลา 5, 10, 20 และ 30 นาที ณ อุณหภูมิ 50 องศา เซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้น เก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมาไทเทรตเพื่อวิเคราะห์หาค่ากลีเซอรอล

### 3.3.4.3 การหาชนิดและปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม

นำไปโอดีเซลมาทำการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ต่างชนิดกัน คือ ดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (NS) ดินสเม็คไทต์เผา (HS) ดินสเม็คไทต์กระตุ้นด้วยกรด (AS) และดินสเม็คไทต์เผา ร่วมกับการกระตุ้นด้วยกรด (HAS) ใช้ปริมาณของตัวดูดซับร้อยละ 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมันโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับ มาไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอล

### 3.3.4.4 การหาสภาวะเหมาะสมในการกระตุ้นดินดูดซับด้วยกรด

#### 1) การหาอัตราส่วนและอุณหภูมิในการกระตุ้นที่เหมาะสม

นำไปโอดีเซลมาทำการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก 0.5 M โดยใช้ อัตราส่วนของการเตรียมต่างกัน คือ เตรียมดินดูดซับที่อัตราส่วนดินต่อสารละลายกรด เท่ากับ 1 ต่อ 5 ที่อุณหภูมิ 60 และ 100 องศาเซลเซียส และ เตรียมดินดูดซับที่อัตราส่วนดินต่อสารละลาย กรด เท่ากับ 1 ต่อ 10 ที่อุณหภูมิ 60 และ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นนำดินดูดซับทุกชนิดมาทำ การดูดซับน้ำมัน โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมันโอดีเซล ที่ผ่านการดูดซับมาไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอล เพื่อเปรียบเทียบหาสภาวะของการกระตุ้น ดินที่เหมาะสมที่สุด

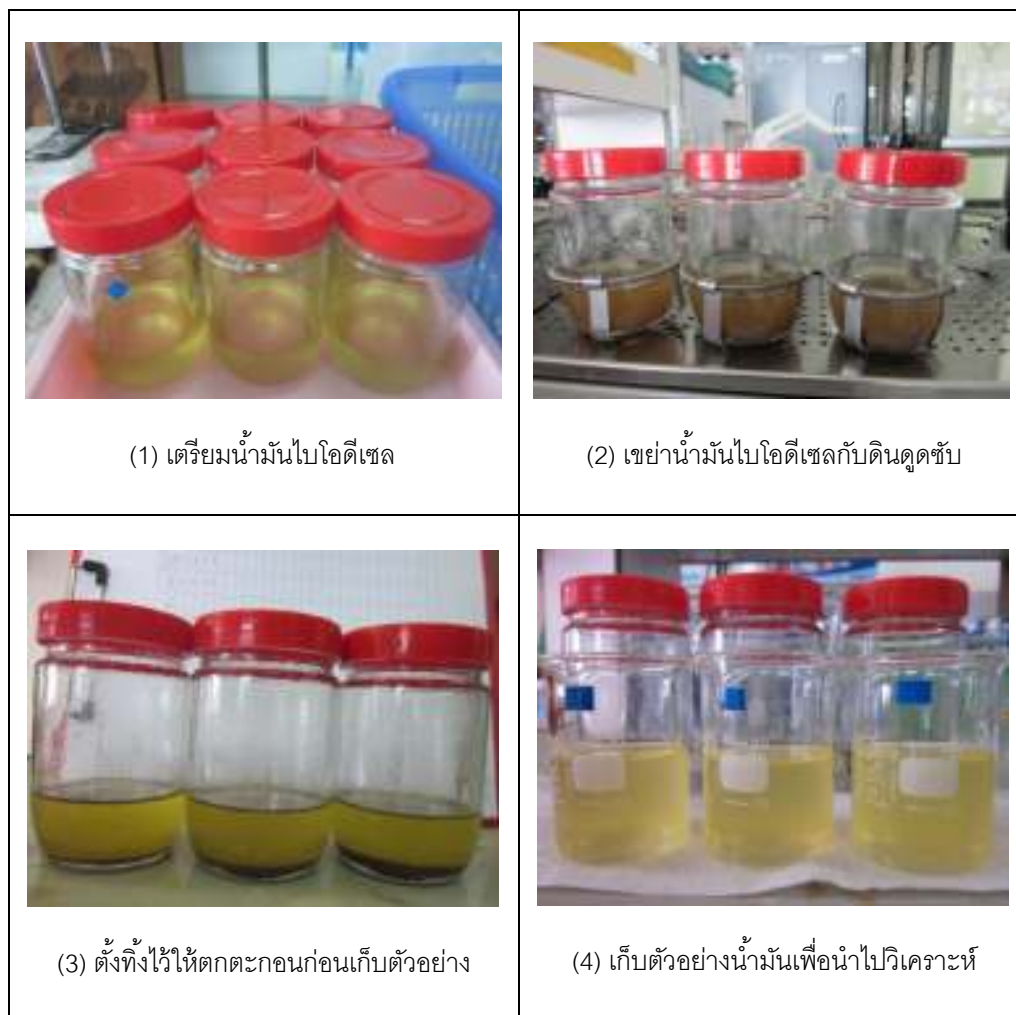
#### 2) การหาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสม

นำไปโอดีเซลมาทำการ ดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ที่มีความเข้มข้นของสารละลายกรดต่างกัน คือ 0.1, 0.3 และ 0.5 M ใช้ปริมาณของตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมันโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมาไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ ค่ากลีเซอรอลและนำไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

### 3.3.4.5 การหาเวลาการตกตะกอนกลีเซอรอลหลังการดูดซับที่เหมาะสม

นำไปโอดีเซลมาทำการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดจากการ ทดลองมาดูดซับกลีเซอรอล ใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปโอดีเซล

ที่ผ่านการเขย่ามาตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอนที่เวลา 15 นาที และ 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมาไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอล



ภาพที่ 3.4 การดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทต์

### 3.3.4.6 การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล

การกำจัดเมทานอลในน้ำมันไบโอดีเซลทำได้โดยการใช้เครื่องระเหยสุญญากาศ (rotary evaporator) โดยทำการระเหยเมทานอลในน้ำมันไบโอดีเซล ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 30 นาที ก่อนนำไบโอดีเซลไปทำการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ธรรมชาติและดินสเม็คไทต์ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 M โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที



เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซล ที่ผ่านการดูดซับมาไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอล

### 3.3.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไบโอดีเซล

#### 3.3.5.1 การหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและกลีเซอรอลด้วยวิธีไทเทรต

การหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่คงเหลือและหาค่ากลีเซอรอลที่คงเหลือใน น้ำมันไบโอดีเซลด้วยวิธีการไทเทรตด้วยกรดไฮโดรคลอริก (อ่านวิธีการวิเคราะห์และการคำนวณ จากภาคผนวก ก)

#### 3.3.5.2 การหาค่าความเป็นกรดด้วยวิธีไทเทรต

การหาค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซล เพื่อตรวจสอบว่าน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตได้ มีค่าความเป็นกรดเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D974 ซึ่งได้กำหนดค่าความเป็นกรดของ ไบโอดีเซล ต้องมีค่าไม่เกิน 0.05 (อ่านวิธีการวิเคราะห์และการคำนวณจากภาคผนวก ก)

#### 3.3.5.3. การหาปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมดและกลีเซอไรด์ในไบโอดีเซล โดยอาศัยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

การวิเคราะห์ตัวอย่างไบโอดีเซล โดยอาศัยการตรวจวัดด้วยเทคนิค แก๊สโครมาโทกราฟีจะสามารถวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอลทั้งหมด ค่ากลีเซอรอลอิสระ ค่าไดกลีเซอไรด์ ค่าโมโนกลีเซอไรด์ที่มีในน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลตาม มาตรฐาน EN 14105 (อ่านวิธีการวิเคราะห์และการคำนวณจากภาคผนวก ก)

### 3.3.6 การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับของดินสเม็คไทต์เปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์

นำไบโอดีเซลมาทำการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดจากการทดลองมา เปรียบเทียบกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองน้ำมันผ่านกระดาษกรอง ก่อนเก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลมาไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอล

### 3.3.7 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับของดินสเม็คไทต์โดยใช้ ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับร่วม

นำไบโอดีเซลมาทำการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดจากการทดลอง ร่วมกับการใช้ถ่านกัมมันต์ โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับที่เป็นดินสเม็คไทต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จากนั้นทำการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์อีกร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้ ตกตะกอนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองน้ำมันผ่านกระดาษกรอง ก่อนเก็บตัวอย่างน้ำมัน ไบโอดีเซลมาไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอล

### 3.3.8 การวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับ

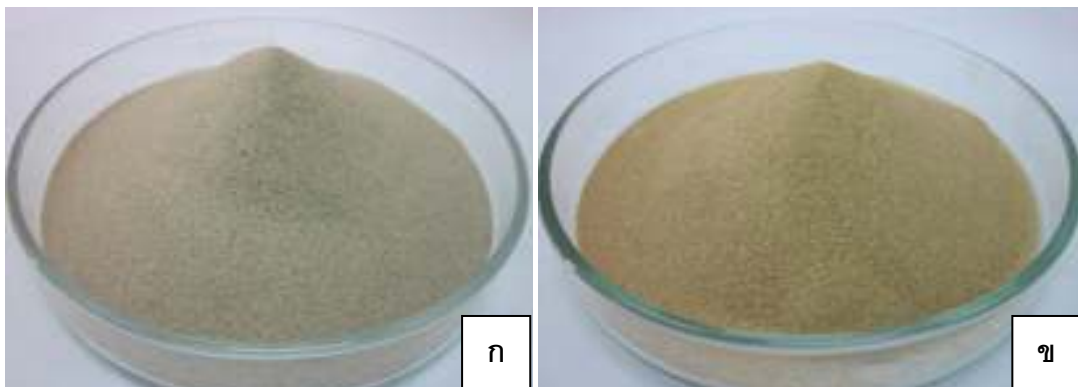
การวิเคราะห์หาไอโซเทอมของการดูดซับ เริ่มจากการนำน้ำมันไบโอดีเซลที่เตรียมจาก ข้อ 3.3.3 มาแยกใส่ขวดทดลองที่มีฝาปิด โดยบรรจุน้ำมันไบโอดีเซลขวดละ 30 กรัม ทำการดูดซับ ด้วยดินสเม็คไทต์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดจากการขั้นตอนที่ 3.3.4 โดยใช้ปริมาณของตัวดูดซับ ตั้งแต่ร้อยละ 1 ถึง ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ใช้สภาวะการดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บ ตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับมาไทเทรตเพื่อวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอล ก่อนนำค่า วิเคราะห์ที่ได้ไปคำนวณค่าของการดูดซับ รวมทั้งสร้างกราฟแสดงไอโซเทอมของแลงเมียร์ และ ไอโซเทอมของฟรุนดลิช

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลโดยอาศัยดินเป็นตัวดูดซับ เป็นวิธีการที่จะทำให้ น้ำมันไบโอดีเซลดิบมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ดินสเม็คไทต์ (Smectite) ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวกลุ่มอะลูมิโนซิลิเกตมาเป็นตัวดูดซับกลีเซอรอลซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำมันไบโอดีเซล โดยในงานวิจัยจำแนกชนิดของดินสเม็คไทต์ออกเป็น 4 ประเภท ตามวิธีการเตรียมดินก่อนทำการดูดซับ ดังนี้

- 1) ดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (Natural smectite, NS)
- 2) ดินสเม็คไทต์เผา (Heat-treated smectite, HS)
- 3) ดินสเม็คไทต์กระตุ้นด้วยกรด (Acid activated smectite, AS)
- 4) ดินสเม็คไทต์เผาพร้อมกับกระตุ้นด้วยกรด (Heat-treated and acid activated smectite, HAS)



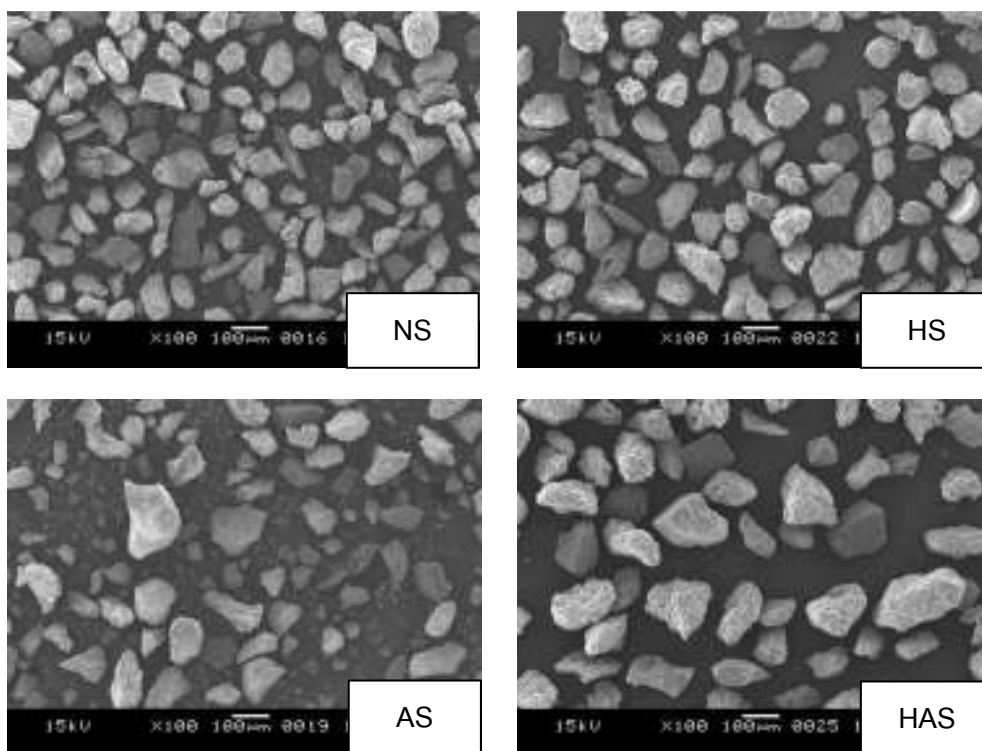
ภาพที่ 4.1 ภาพแสดงดินสเม็คไทต์ (ก) ดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ และ(ข) ดินสเม็คไทต์เผา

ภาพที่ 4.1 แสดงลักษณะของดินสเม็คไทต์ในธรรมชาติ ซึ่งจะมีเนื้อดินที่ค่อนข้างหยาบ มีเนื้อแร่สีเทาหรือขาวเทา เมื่อนำดินมากระตุ้นด้วยกรด จะมีสีของดินที่อ่อนลงจากเดิมเล็กน้อยหรือค่อนข้างใกล้เคียงกับสีดินเดิม เมื่อนำดินมาปรับปรุงด้วยวิธีเผา จะมีสีของดินที่เปลี่ยนไป คือเปลี่ยนจากสีเทาอ่อนเป็นสีส้ม ซึ่งน่าจะเกิดจากผลของสารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ในดิน โดยในงานวิจัยจะเลือกทดสอบความสามารถของดินสเม็คไทต์ที่มีขนาดเม็ดดินระหว่าง 120-200 mesh

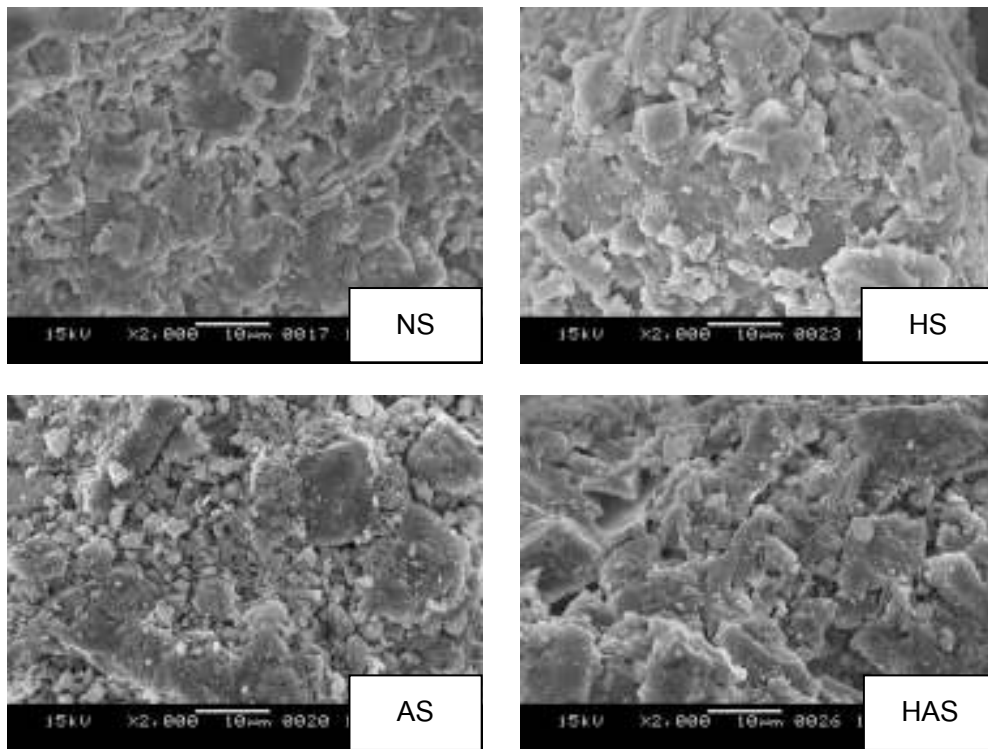
#### 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของดินสเม็คไทต์

##### 4.1.1 ผลการวิเคราะห์ดินด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

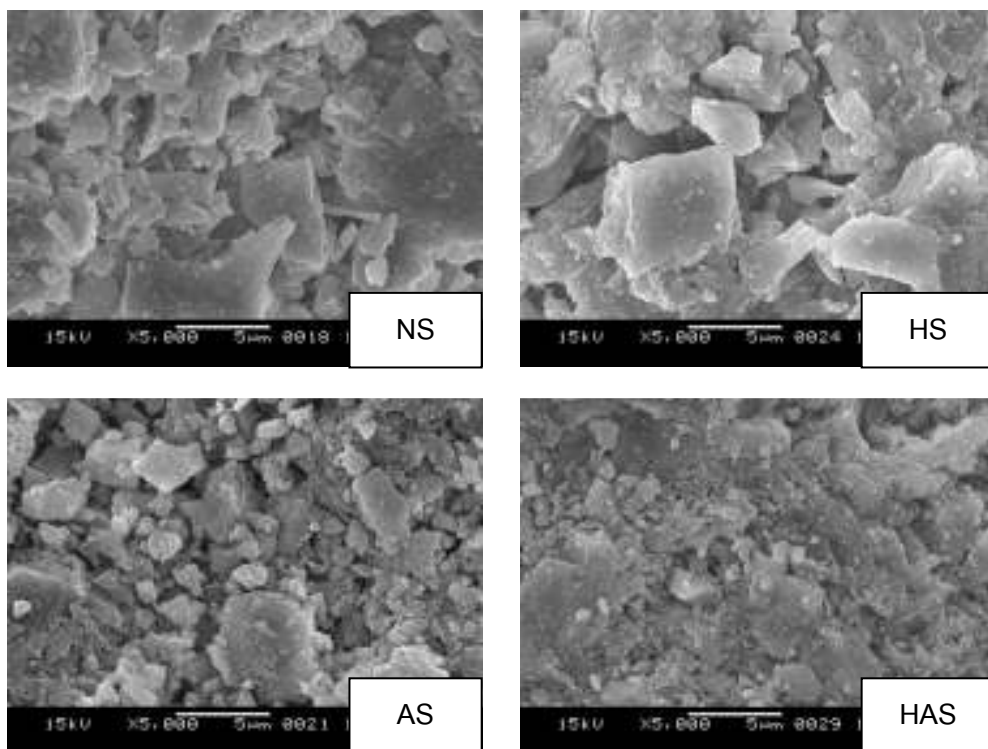
จากการวิเคราะห์ลักษณะภายนอกของดินสเม็คไทต์ จากภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าดินทั้ง 4 ชนิด มีลักษณะแตกต่างกันดังนี้ จากภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะของดินที่กำลังขยาย 100 เท่า ลักษณะของดินที่สังเกตได้ คือ มีรูปทรงหลายเหลี่ยมหรือค่อนข้างมน มีพื้นผิวภายนอกไม่เรียบ จากภาพที่ 4.3 แสดงลักษณะของดินที่กำลังขยาย 2000 เท่า จะเริ่มสังเกตเห็นลักษณะของรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ (irregular shape) และความไม่เรียบ (roughness) ของพื้นผิวดินชัดเจนมากขึ้น พบการจับตัวเป็นก้อน (aggregation) ของเม็ดดินที่มีขนาดต่างๆกัน จากภาพที่ 4.4 แสดงลักษณะของดินที่กำลังขยาย 5000 เท่า จะเห็นลักษณะของดินจากรูปจากดินธรรมชาติและดินเผาเป็นรูปทรงคริสตัลแบบไม่สม่ำเสมอ (irregular crystals) นอกจากนั้น พบว่าดินสเม็คไทต์หลังการกระตุ้นด้วยกรดมีลักษณะของดินมีขนาดเล็กลงและมีพื้นผิวที่หยาบมากขึ้นเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการมีรู (porous) ที่เพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายของดินสเม็คไทต์จาก SEM ที่กำลังขยาย 100 เท่า



ภาพที่ 4.3 ภาพขยายของดินสเม็คไทด์จาก SEM ที่กำลังขยาย 2000 เท่า



ภาพที่ 4.4 ภาพขยายของดินสเม็คไทด์จาก SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

#### 4.1.2 ผลการวิเคราะห์ดินด้วยเทคนิค Surface area analysis โดยอาศัยหลักการของ BET

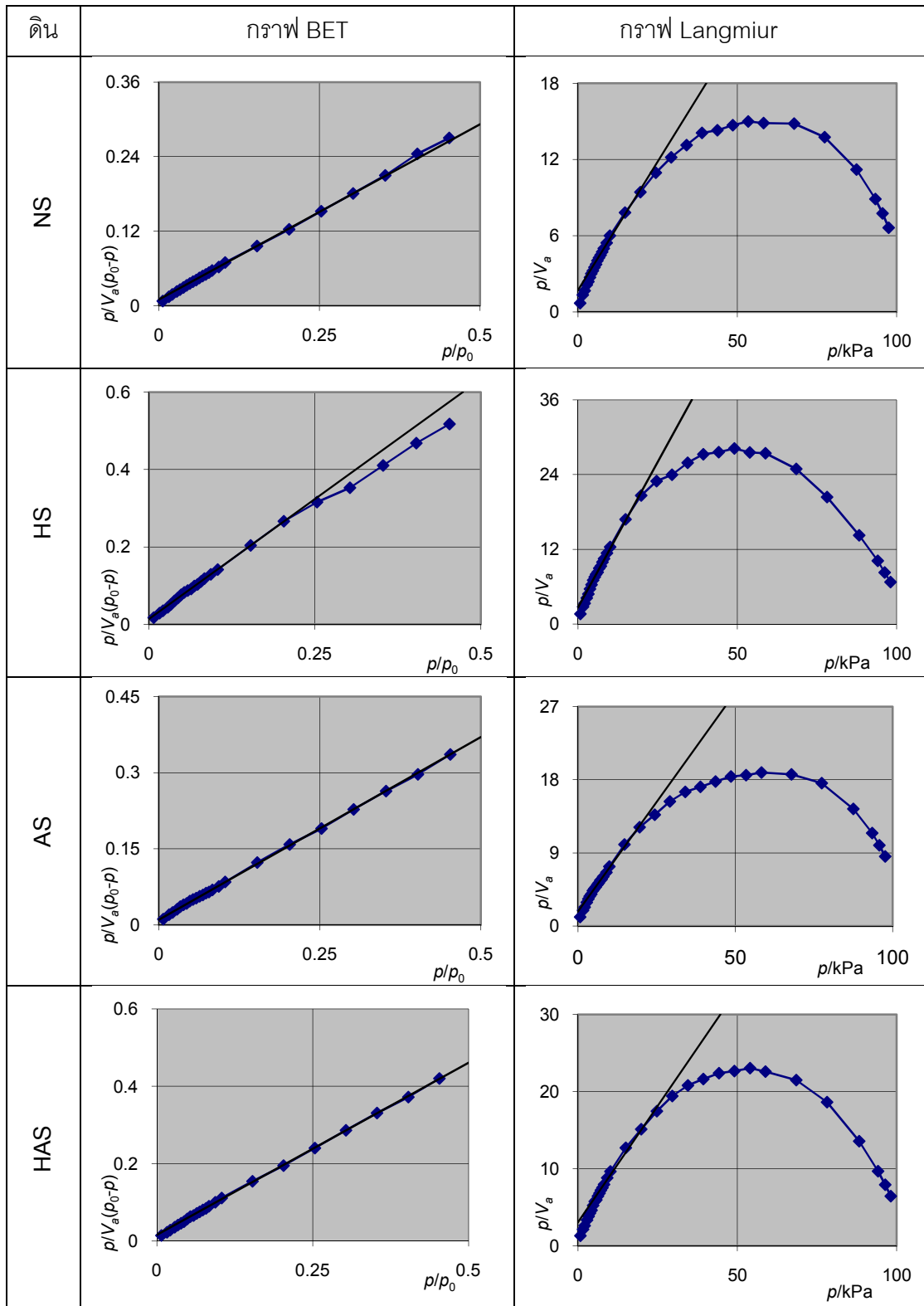
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของดินสเม็คไทต์

ดินสเม็คไทต์ (Smectite)	สมการ BET			สมการ Langmuir
	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรของรูพรุน (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดของรูพรุนเฉลี่ย (nm)	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)
NS	7.5764	0.019913	10.513	10.750
HS	3.4730	0.019376	22.316	4.6605
AS	5.9589	0.015244	10.233	8.0743
HAS	4.8008	0.019859	16.546	7.2222

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรของรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยได้แสดงในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อวิเคราะห์ด้วยสมการ BET พื้นที่ผิวของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดมีค่าพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน ดังนี้ โดยพื้นที่ผิวของดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (NS) มีค่าพื้นที่ผิวมากที่สุด เท่ากับ 7.5764 m<sup>2</sup>/g และรองลงมาคือ พื้นที่ผิวของดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด (AS) เท่ากับ 5.9589 m<sup>2</sup>/g พื้นที่ผิวของดินสเม็คไทต์เผาร่วมกับกระตุ้นกรด (HAS) เท่ากับ 4.8008 m<sup>2</sup>/g และพื้นที่ผิวที่มีค่าน้อยที่สุดเป็นพื้นที่ผิวของดินสเม็คไทต์เผา (HS) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.4730 m<sup>2</sup>/g สำหรับค่าปริมาตรของรูพรุน (pore volume) ของดินทั้ง 4 ชนิดมีค่าที่ใกล้เคียงกัน คือ มีค่าประมาณ 0.019 cm<sup>3</sup>/g

เมื่อพิจารณาถึงขนาดของรูพรุนเฉลี่ย (average pore diameter) ด้วยสมการ BET พบว่าขนาดของรูพรุนเฉลี่ยของดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (NS) และดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด (AS) มีค่าที่ใกล้เคียงกัน เท่ากับ 10.513 nm และ 10.233 nm รองลงมา คือ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของดินสเม็คไทต์เผาร่วมกับกระตุ้นกรด (HAS) เท่ากับ 16.546 nm และขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่มากที่สุด คือ ดินสเม็คไทต์เผา ซึ่งมีค่าเท่ากับ 22.316 nm ซึ่งขนาดของรูพรุนอาจเกิดจากความร้อนจากการเผาทำให้เกิดเป็นรูที่กว้างมากขึ้นกว่าปกติ ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าพื้นที่ผิวของดินเผาตกลงไปอีก

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนของดินสเม็คไทดต์

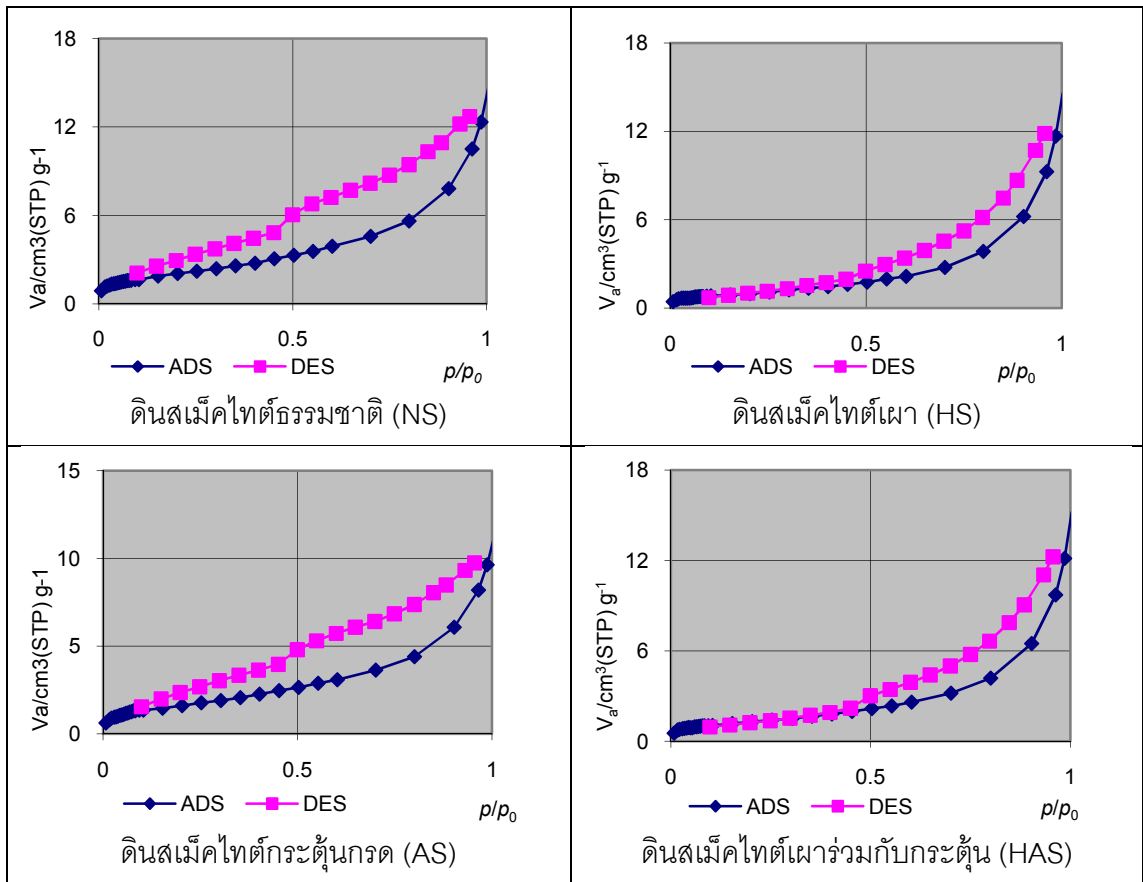


เมื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยสมการ Langmuir พบว่าค่าพื้นที่ผิวของดินสเม็คไทด์มีค่าของพื้นที่ผิวเป็นในแนวทางเดียวกัน คือ ค่าพื้นที่ผิวของดินสเม็คไทด์ธรรมชาติมีค่าสูงสุด เท่ากับ  $10.750 \text{ m}^2/\text{g}$  และในดินสเม็คไทด์ที่กระตุ้นด้วยกรดมีค่าพื้นที่ผิวเป็นลำดับรองลงมา มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ  $8.0743 \text{ m}^2/\text{g}$  จะเห็นได้ว่า ค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากดินสเม็คไทด์ทั้ง 4 ชนิดในงานวิจัย มีค่าที่ค่อนข้างน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าพื้นที่ผิวในงานวิจัยอื่นๆ เช่น ในงานวิจัยของ Guerra และคณะ (2010) พบว่าค่าพื้นที่ผิวของดินสเม็คไทด์ธรรมชาติจากประเทศบราซิล มีค่าเท่ากับ  $51.2 \text{ m}^2/\text{g}$  และในงานวิจัยของ Temuujin และคณะ (2004) พบว่าค่าพื้นที่ผิวของดินสเม็คไทด์ธรรมชาติจากประเทศมองโกเลีย มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ  $31.3 \text{ m}^2/\text{g}$  เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพื้นที่ผิวที่มาจากแหล่งที่มาต่างกันอาจจะมีค่าที่แตกต่างกันซึ่งน่าจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการกำเนิดดินที่มีสภาพต่างกัน และนอกจากนั้นการเลือกใช้ดินที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันไปยังส่งผลต่อพื้นที่ผิวอีกด้วย โดยช่วงขนาดของอนุภาคบางช่วง อาจจะเป็นช่วงอนุภาคที่เนื้อดินค่อนข้างแข็งและมีรูพรุนต่ำ

จากตารางที่ 4.2 แสดงกราฟไอโซเทอมของการดูดซับไนโตรเจนของดินสเม็คไทด์ทั้งสี่ชนิด โดยการคำนวณจากสมการของบีอีที (BET) และสมการของแลงเมียร์ (Langmuir) จากกราฟแสดงไอโซเทอมบีอีที พบว่า ค่าความชัน (slope) จากไอโซเทอมบีอีทีของดิน NS, HS, AS และ HAS เท่ากับ 0.5653, 1.2397, 0.7206 และ 0.8912 ตามลำดับ และมีค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (ค่า C) ของดิน NS, HS, AS และ HAS เท่ากับ 62.509, 92.315, 74.131 และ 58.963 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ จากกราฟแสดงไอโซเทอมแลงเมียร์ พบว่า ค่าความชัน (slope) จากไอโซเทอมแลงเมียร์ของดิน NS, HS, AS และ HAS เท่ากับ 0.4049, 0.9339, 0.5391 และ 0.6027 ตามลำดับ และมีค่าคงที่พลังงานของการดูดซับ (ค่า b) ของดิน NS, HS, AS และ HAS เท่ากับ 0.2382, 0.3553, 0.2996 และ 0.1955 ตามลำดับ

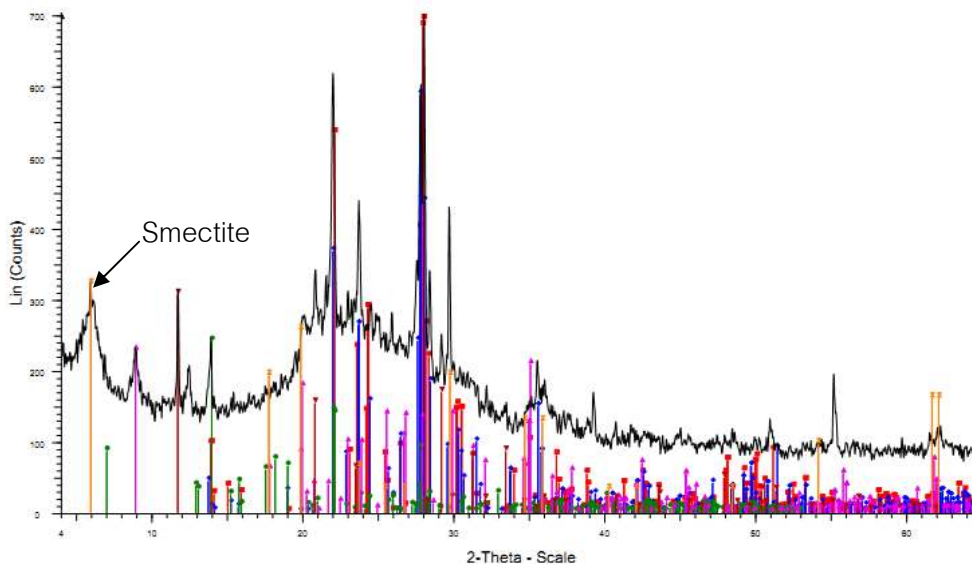


ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงไอโซเทอมการดูดและการคายก๊าซไนโตรเจนของดินสเม็คไทต์



จากการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนบนดินสเม็คไทต์ทั้ง 4 ชนิด ด้วยเครื่อง Surface area analysis แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า ไอโซเทอมของการดูด-คายก๊าซไนโตรเจนของดินสเม็คไทต์ทั้ง 4 ชนิด เป็นไอโซเทอมแบบที่ 4 ตามข้อเสนอของ Brunauer, Deming, Deming and Teller (BDDT) กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความดัน จำนวนโมเลกุลของก๊าซจะถูกดูดซับเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนคงที่ แสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และยังเกิดช่องว่างแบบฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) ขึ้น ซึ่งเกิดจากในขณะทำการคาย (desorption) โดยการลดความดันนั้น จำนวนโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนค่อยๆ หลุดออกจากดินสเม็คไทต์ ทำให้มีโมเลกุลของก๊าซไนโตรเจนอยู่ในรูพรุนเป็นจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อถึงค่าความดันหนึ่ง ก๊าซไนโตรเจนก็จะสามารถออกมาได้ปกติ และรูปแบบของไอโซเทอมยังสามารถอธิบายได้ว่ารูพรุนของดินสเม็คไทต์เป็นรูพรุนที่มีขนาดกลาง (mesopore)

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



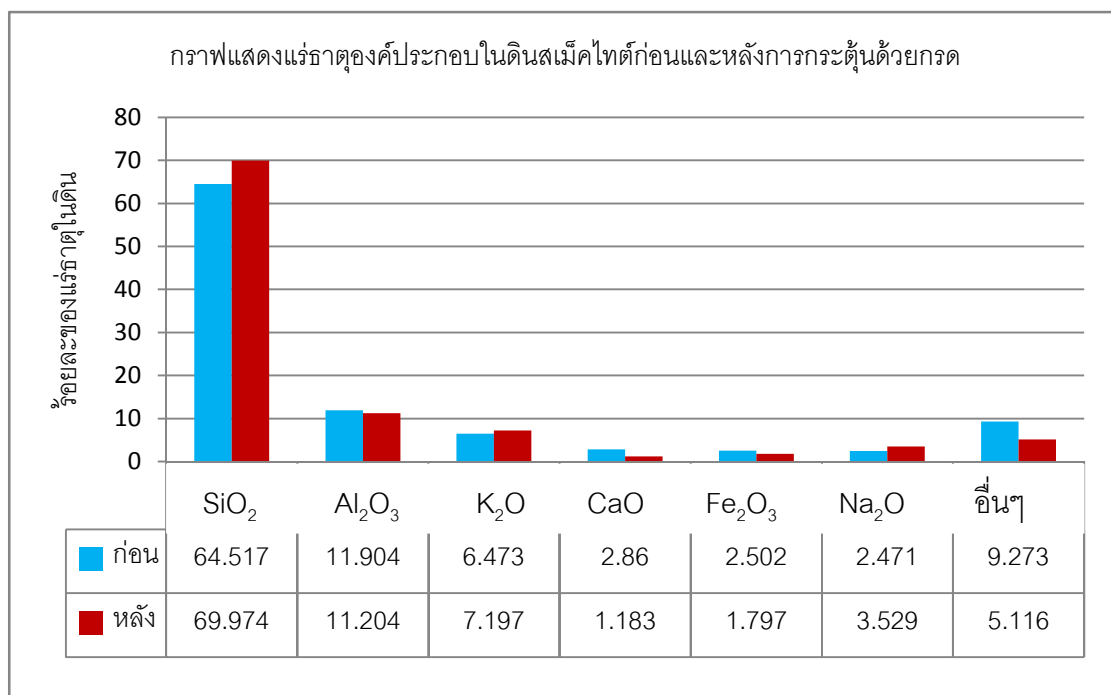
ภาพที่ 4.5 ภาพแสดงแฉ่วัตถุหลักของดินสเม็คไทต์จากเทคนิค XRD

จากภาพที่ 4.5 พบว่า แฉ่วัตถุหลักในดินสเม็คไทต์ประกอบด้วยแฉ่วัตถุหลักหลายชนิด ได้แก่

1. แร่เฟลด์สปาร์ (Feldspar;  $\text{NaCa Al}_2\text{Si}_3\text{O}_8$ ) ซึ่งอยู่ในรูปของ
  - อัลไบท์ (Albite;  $\text{Na (Si}_3\text{O}_8)$ )
  - แอนดิซีน (Andesine;  $\text{Na}_{499}\text{Ca}_{491}(\text{Al}_{1.488}\text{Si}_{2.33}\text{O}_8)$ )
  - อานโทไตโซเดียน (Anorthite sodian;  $\text{Na}_{0.33}\text{Ca}_{0.67}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_{2.33}\text{O}_8$ )
2. แร่ไมกาขาว (Muscovite;  $(\text{K}_{0.82}\text{Na}_{0.18})(\text{Fe}_{0.03}\text{Al}_{1.97})\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ )
3. แร่ยิปซัม (Gypsum;  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
4. แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite;  $\text{Ca}_{0.2}(\text{Al, Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )

ซึ่งพบว่า แฉ่วัตถุหลักที่พบในดินนอกจากจะประกอบด้วยแร่ธาตุที่เป็นแร่ดินเหนียว (mineral clay) หรือดินสเม็คไทต์ซึ่งมักจะพบในรูปของแร่มอนต์มอริลโลไนต์แล้ว ยังพบแฉ่วัตถุต้นกำเนิด (mineral matter) ประกอบด้วย เช่น แร่เฟลด์สปาร์ แร่ไมกาขาว และแร่ยิปซัม เป็นต้น ซึ่งแร่เหล่านี้เมื่อมีการผุพังหรือสลายตัวก็จะกลายเป็นแร่ดินเหนียวต่อไป เมื่อเปรียบเทียบกราฟจากเทคนิค XRD ของดินกับงานวิจัยของ Guerra และคณะ 2010 พบว่า โครงสร้างของแฉ่วัตถุใกล้เคียงกัน และมีการปรากฏแฉ่วัตถุในกลุ่มควอตซ์ค่อนข้างชัดเจน

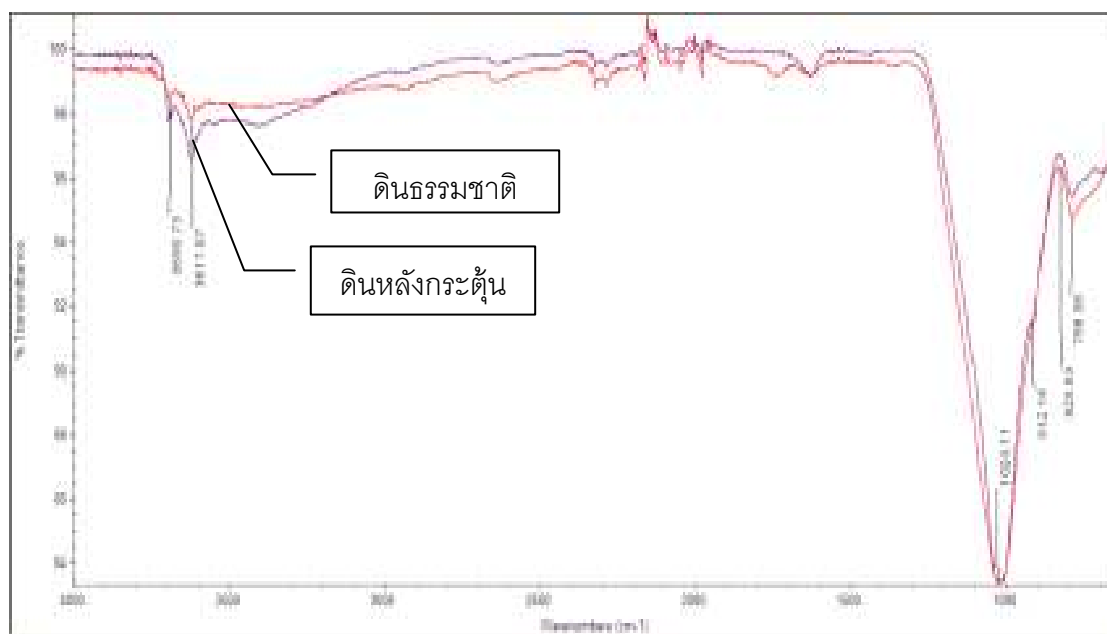
#### 4.1.4 ผลการวิเคราะห์ดินด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF)



ภาพที่ 4.6 ภาพแสดงแร่ธาตุองค์ประกอบของดินสเม็คไทต์ธรรมชาติและดินสเม็คไทต์หลังกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก จากเทคนิค XRF

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF สามารถแสดงสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบในดิน ดังภาพที่ 4.6 จากรูปพบว่า ในดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (ก่อนกระตุ้น) มีปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก ที่อยู่ในรูปของออกไซด์หลายชนิด ได้แก่ ซิลิกาไดออกไซด์ SiO<sub>2</sub> 64.517%, อะลูมินาออกไซด์ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 11.204%, โพแทสเซียมไดออกไซด์ K<sub>2</sub>O 6.473%, แคลเซียมออกไซด์ CaO 2.860%, เหล็กออกไซด์ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2.502%, โซเดียมออกไซด์ Na<sub>2</sub>O 2.471% และธาตุอื่นๆ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ ฟอสฟอรัสออกไซด์ ไททานเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น ภายหลังการกระตุ้นด้วยกรด พบว่า มีปริมาณของ SiO<sub>2</sub> ที่เพิ่มขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงของธาตุอื่นๆ เพียงเล็กน้อย โดยทั่วไปแล้วดินสเม็คไทต์หรือดินในกลุ่มแร่ดินเหนียวทั่วไป จะมีสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบหลักที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของดิน ดินสเม็คไทต์เป็นแร่ดินเหนียวที่อยู่ในรูปของอะลูมิโนซิลิเกต ดังนั้น องค์ประกอบหลักของดินจึงอยู่ในรูป ออกไซด์ของซิลิกาและออกไซด์ของอะลูมิเนียมเป็นหลัก ในส่วนใหญ่มักจะพบดินสเม็คไทต์ ที่มีสัดส่วนของ SiO<sub>2</sub> ประมาณ 55-65% และสัดส่วนของ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ประมาณ 11-18% นอกจากนั้น แล้วจะเป็นออกไซด์ของแร่ธาตุอื่นรวมอยู่ด้วยเล็กน้อย

#### 4.1.5 ผลการวิเคราะห์ดินด้วยเทคนิค Fourier-Transform Infrared spectrometer (FTIR)

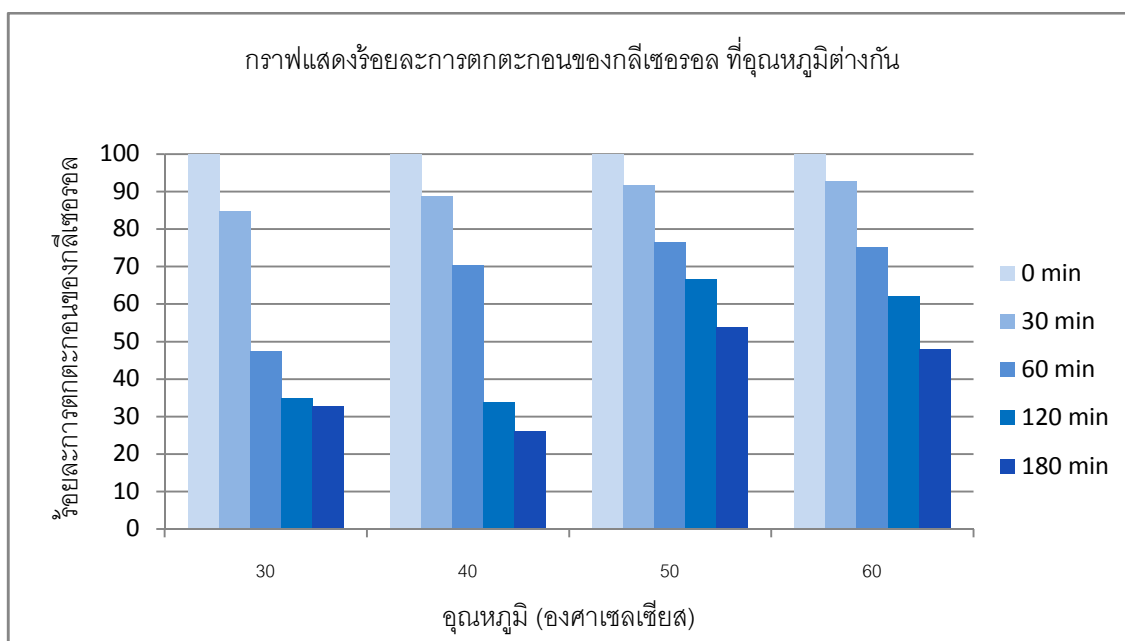


ภาพที่ 4.7 ภาพแสดงหมู่ฟังก์ชันของธาตุในดินสเม็คไทต์ธรรมชาติและดินสเม็คไทต์หลังกระตุ้น ด้วยกรดซัลฟิวริก จากเทคนิค FTIR

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของธาตุในดินสเม็คไทต์ด้วยเทคนิค FTIR มีค่าของหมู่ฟังก์ชันดังภาพที่ 4.7 โดยเทียบหมู่ฟังก์ชันตามงานวิจัยของ Steudel และคณะ (2009) จากกราฟพบว่าที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเท่ากับ 1024.11 นาโนเมตร แสดงหมู่ฟังก์ชันของซิลิกาออกไซด์ (Si-O stretching vibration) ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเท่ากับ 912.14 นาโนเมตร แสดงหมู่ฟังก์ชันของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (AlAlOH bonding) ที่ตำแหน่งความยาวคลื่นเท่ากับ 829.63 นาโนเมตร แสดงหมู่ฟังก์ชันของแมกนีเซียมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (MgAlOH bonding) ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 3690.73 นาโนเมตร แสดงหมู่ฟังก์ชันของแมกนีเซียม (Mg group) ที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 3617.07 นาโนเมตร แสดงหมู่ฟังก์ชันของอะลูมิเนียม (Al group) และที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 788.38 นาโนเมตร แสดงหมู่ฟังก์ชันของคริสโตบาไลต์ (Crystobalite) โดยพบว่าค่า Intensity ของหมู่แมกนีเซียมและอะลูมิเนียมในดินสเม็คไทต์หลังจากกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกมีค่าที่ลดลงจากดินธรรมชาติ ซึ่งน่าจะเกิดจากการมีอะตอมไฮโดรเจนเข้ามาสร้างพันธะกับหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้เกิดซิลิกาออกไซด์เพิ่มมากขึ้นด้วย

## 4.2 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทต์

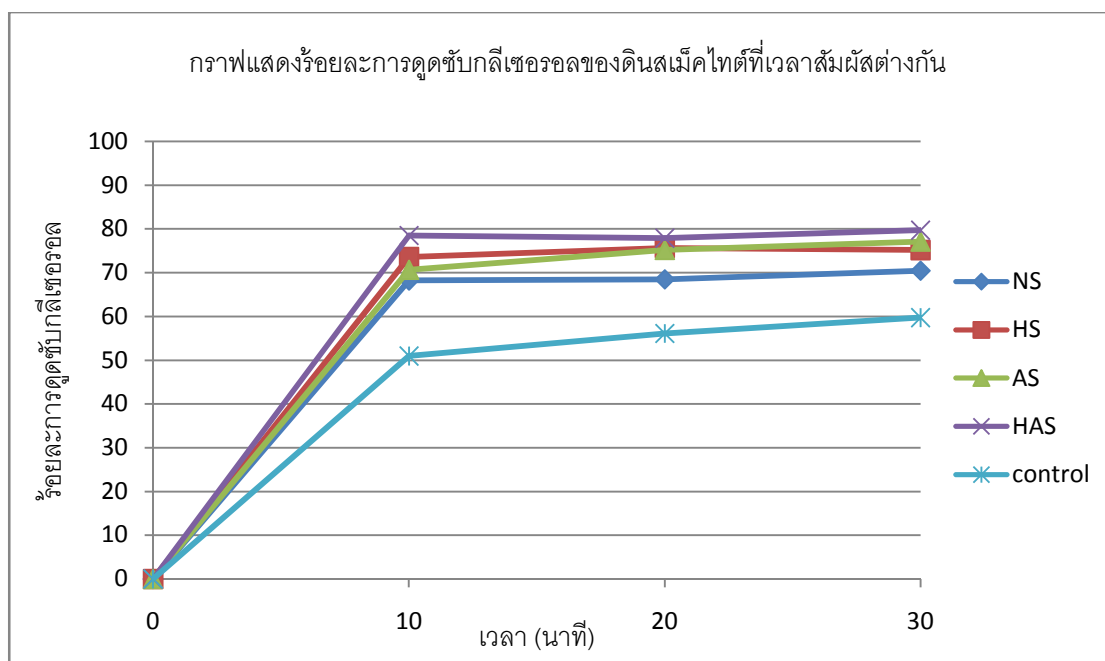
### 4.2.1 ผลการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม



ภาพที่ 4.8 แผนภาพแสดงผลของการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ

จากการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยการทดสอบหาปริมาณกลีเซอรอลที่ตกตะกอนในอุณหภูมิต่างกัน คือ 30 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบในระบบปิดที่เวลา 30 60 120 และ 180 นาที ผลการวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอล สามารถแสดงดังภาพที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 30 และ 40 องศาเซลเซียส ปริมาณของกลีเซอรอลเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วและเหลือปริมาณกลีเซอรอลที่เวลา 180 นาที เพียงประมาณร้อยละ 32.78 และ ร้อยละ 26.04 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณาการตกตะกอนของกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะพบว่าปริมาณของกลีเซอรอลจะค่อยๆ ลดลงไปตามเวลาที่เพิ่มมากขึ้นและเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที จะมีปริมาณกลีเซอรอลที่ตกตะกอนลงมาเท่ากับ ร้อยละ 53.62 สำหรับการตกตะกอนกลีเซอรอลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะการลดลงของกลีเซอรอลค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้นอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จึงเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่กลีเซอรอลสามารถแขวนลอยอยู่ในไบโอดีเซลได้และมีการตกตะกอนที่ค่อนข้างคงที่ในช่วงเวลาของการดูดซับ ซึ่งจากกราฟแสดงให้เห็นว่า กลีเซอรอลสามารถตกตะกอนด้วยตัวเองได้เมื่อเวลาผ่านไปนานมากขึ้นปริมาณของกลีเซอรอลที่แขวนลอยในไบโอดีเซลจะมีค่าลดลง

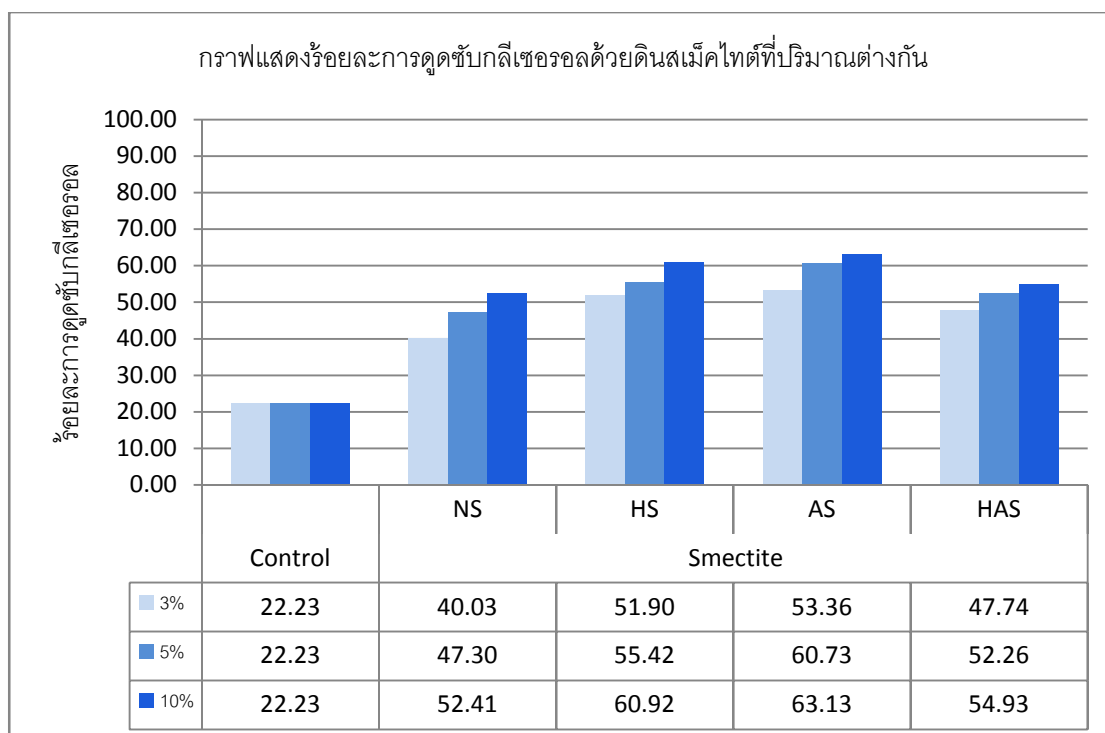
#### 4.2.2 ผลการหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม



ภาพที่ 4.9 แผนภาพแสดงผลการหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

การหาระยะเวลาสัมผัสหรือระยะเวลาเขย่าที่เหมาะสม ทำได้โดยการดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทด์ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลา 5, 10, 20 และ 30 นาที ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที ซึ่งผลการวิเคราะห์หาค่ากลีเซอรอลด้วยวิธีไทเทรชัน เป็นดังภาพที่ 4.9 จากภาพจะเห็นว่า การดูดซับกลีเซอรอลของตัวควบคุมจะมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนไป คือ มีปริมาณของร้อยละการดูดซับที่เวลา 10 20 และ 30 นาที เท่ากับ ร้อยละ 50.96, 53.10 และ 59.72 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันเมื่อดูดซับโดยดินสเม็คไทด์ธรรมชาติ (NS) จะพบว่า มีปริมาณร้อยละของการดูดซับกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 68.21 และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่เวลา 20 และ 30 นาที เช่นเดียวกับดินสเม็คไทด์ชนิดอื่นๆ ที่พบว่า ค่าร้อยละการดูดซับกลีเซอรอลมีค่าที่ใกล้เคียงกันเมื่อใช้เวลาในการสัมผัสเพิ่มมากขึ้น จึงสรุปได้ว่า ระยะเวลาสัมผัสโดยการเขย่าเท่ากับ 10 นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับกลีเซอรอลด้วยดินสเม็คไทด์ เนื่องจากการเพิ่มเวลาการสัมผัสมีผลให้ค่าร้อยละของการดูดซับกลีเซอรอลเปลี่ยนแปลงไปเพียงเล็กน้อย

#### 4.2.3 ผลการหาชนิดและปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม



ภาพที่ 4.10 แผนภาพแสดงผลการหาชนิดและปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม

จากการหาชนิดและปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม โดยการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทต์ต่างชนิดกัน คือ ดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (NS) ดินสเม็คไทต์เผา (HS) ดินสเม็คไทต์กระตุ้นด้วยกรด (AS) และดินสเม็คไทต์เผาพร้อมกับการกระตุ้นด้วยกรด (HAS) โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ ร้อยละ 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วรอบในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 10 นาที ผลการวิเคราะห์หาค่ากลีเซอรอลด้วยวิธีไทเทรต เป็นดังภาพที่ 4.10

เมื่อพิจารณาชนิดและปริมาณของตัวดูดซับต่างๆ พบว่า ร้อยละการดูดซับของกลีเซอรอลของดินสเม็คไทต์มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับร้อยละการดูดซับของตัวควบคุม (ไม่ใช้ตัวดูดซับ) แสดงให้เห็นว่า การใช้ดินสเม็คไทต์ดูดซับมีผลทำให้ช่วยเพิ่มการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลจากปริมาณร้อยละกลีเซอรอลที่มีอยู่ในช่วงเริ่มต้น เท่ากับ ร้อยละ 22.23 เมื่อใช้ตัวดูดซับที่เป็นดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (NS) ในปริมาณเพียง ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่า ทำให้ค่าการดูดซับกลีเซอรอลมีค่าเท่ากับร้อยละ 40.03 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากตัวควบคุมประมาณ ร้อยละ 20

เมื่อพิจารณาการดูดซับกลีเซอรอลของดินสเม็คไทต์ทั้ง 4 ชนิด พบว่า ที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละของการดูดซับกลีเซอรอลด้วยดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด (AS) มีค่าของร้อยละการดูดซับสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 63.13 รองลงมา คือ ดินสเม็คไทต์เผา (HS) เท่ากับ ร้อยละ 60.92 และดินสเม็คไทต์เผาพร้อมกับกระตุ้น (HAS) เท่ากับ 54.93 และดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ (NS) ซึ่งค่าดูดซับที่น้อยที่สุด เท่ากับ 52.41 จากค่าการดูดซับพบว่า การปรับปรุงดินสเม็คไทต์มีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น และการปรับปรุงดินด้วยวิธีกระตุ้นกรด (AS) เป็นวิธีการปรับปรุงที่มีผลให้ดินสเม็คไทต์สามารถดูดซับกลีเซอรอลได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับดินดูดซับที่ชนิดอื่นที่ถูกปรับปรุงด้วยวิธีต่างกัน

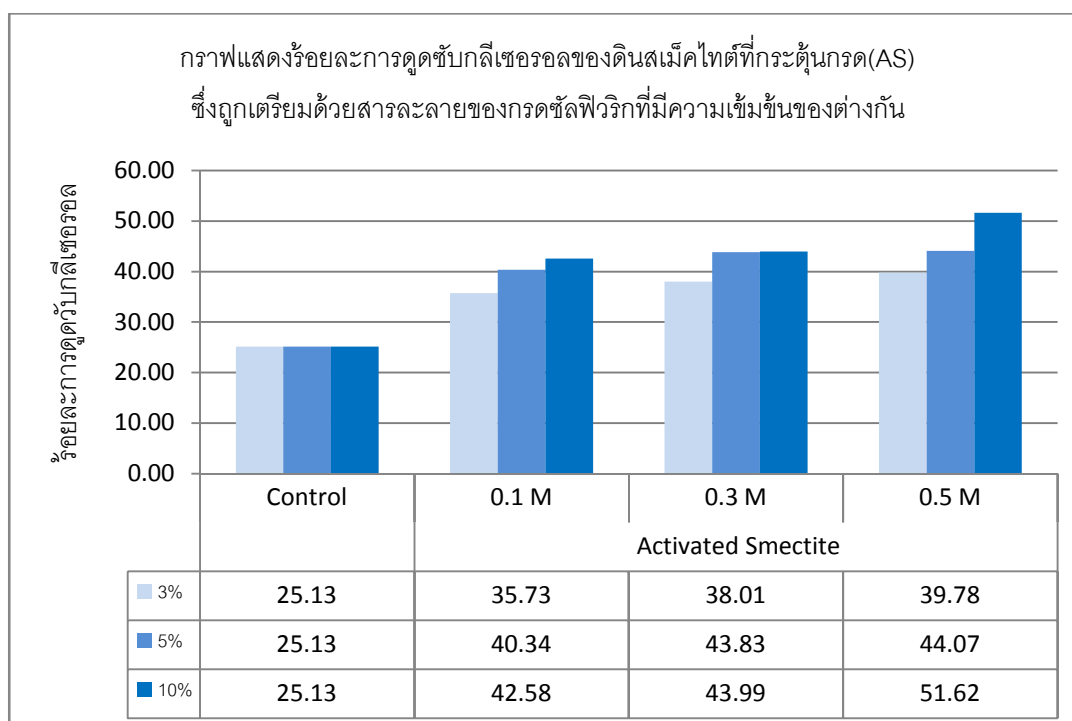
เมื่อพิจารณาปริมาณของสารดูดซับที่ใช้ในการดูดซับ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการดูดซับที่มากขึ้นพบว่า ค่าร้อยละของการดูดซับมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น กล่าวคือ เมื่อใช้ปริมาณการดูดซับของดินสเม็คไทต์เท่ากับร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการดูดซับของกลีเซอรอลในดินสเม็คไทต์ NS, HS, AS และ HAS เท่ากับร้อยละ 40.03, 51.90, 53.36 และ 41.74 ตามลำดับ เมื่อใช้ปริมาณการดูดซับของดินสเม็คไทต์เท่ากับร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าการดูดซับของกลีเซอรอลในดินสเม็คไทต์ NS, HS, AS และ HAS เท่ากับร้อยละ 47.30, 55.42, 60.73 และ 52.26 ตามลำดับ และค่าการดูดซับกลีเซอรอลจะเพิ่มมากขึ้นอีก เมื่อเพิ่มปริมาณการดูดซับเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า การดูดซับของกลีเซอรอลในดินสเม็คไทต์ NS, HS, AS และ HAS เท่ากับร้อยละ 52.51, 60.92, 63.13 และ 54.93 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม จะพบว่า ความสามารถในการดูดซับกลีเซอรอลของดินสเม็คไทต์ก็ยังคงถือว่า มีประสิทธิภาพที่ค่อนข้างน้อย เพราะการใช้ปริมาณตัวดูดซับถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ยังไม่สามารถดูดซับกลีเซอรอลออกไปได้หมด เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆที่นำดินมาดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซล โดยใช้ตัวดูดซับที่เป็นประเภท ดินเบา ถ่านกัมมันต์ หรือ ดินเบนโทไนต์ในปริมาณเพียงร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ก็สามารถดูดซับกลีเซอรอลออกไปได้ถึงร้อยละ 98 (บุษยา ศรีวิจารณ์, 2552)



#### 4.2.4 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมของการกระตุ้นดินดูดซับด้วยกรด

การเลือกใช้ดินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดมีข้อควรคำนึงที่สำคัญ คือ จะต้องมีการควบคุมคุณสมบัติของไบโอดีเซลให้มีค่าความเป็นกรดอยู่ในมาตรฐาน EN 14214 ซึ่งในข้อกำหนดดังกล่าวได้กำหนดอัตราของค่าความเป็นกรด (Acid value) ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมไบโอดีเซล ซึ่งการกระตุ้นดินดูดซับในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้กรดซัลฟิวริกในการกระตุ้น โดยทำการศึกษาสภาวะต่างๆ ของการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้น และการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการกระตุ้นที่จะทำให้ได้ดินดูดซับจากการกระตุ้นที่ดีที่สุด ซึ่งพบว่าอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการกระตุ้นดินสเม็คไทต์ และอัตราส่วนของกรดระหว่างดินสเม็คไทต์ต่อสารละลายกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 1 ต่อ 5 ส่วน เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการกระตุ้น (ดูกราฟการเลือกใช้อุณหภูมิและอัตราส่วนในการกระตุ้นได้จากภาคผนวก ข) นอกจากนั้นสิ่งที่สำคัญที่สุดของการกระตุ้น คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดที่ใช้ในการกระตุ้น ซึ่งในการวิจัย ได้เตรียมดินดูดซับโดยเลือกใช้ สารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.1, 0.3 และ 0.5 M จากนั้นนำดินดูดซับมาทดสอบการดูดซับกลีเซอรอล ได้ผลการทดลองดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 แผนภาพแสดงผลการหาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสม

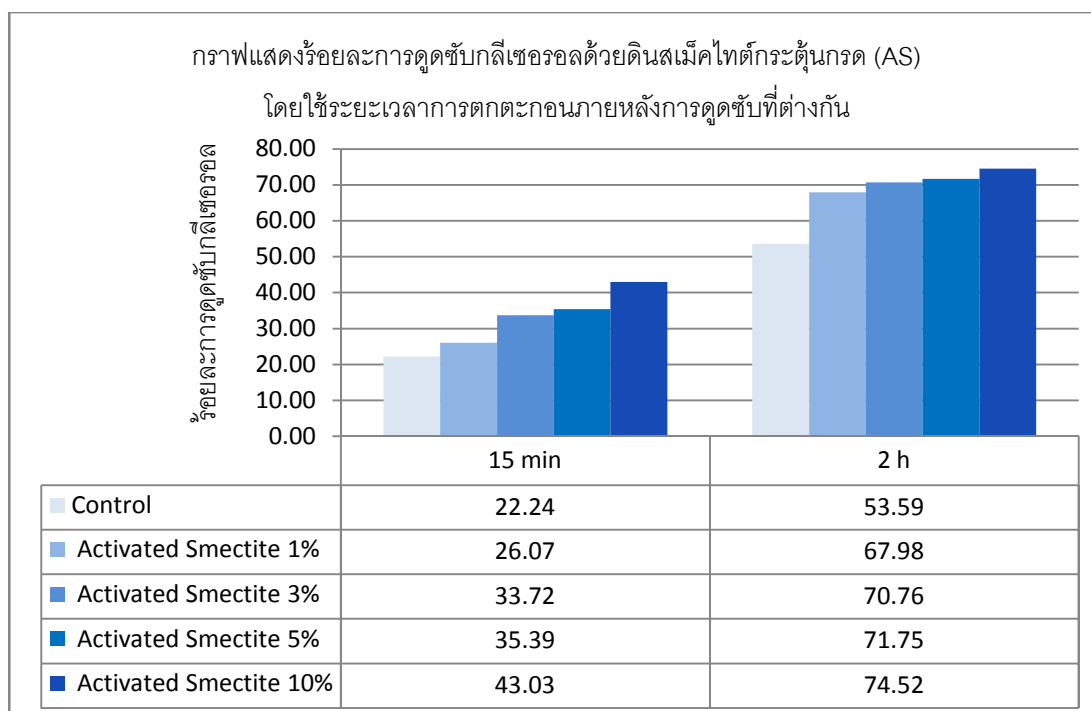
จากภาพที่ 4.11 แสดงการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทต์ที่ถูกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ที่มีความเข้มข้นของสารละลายกรดต่างกัน คือ 0.1, 0.3, 0.5 M โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 3, 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที พบว่าดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 M มีประสิทธิภาพในการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลได้ดีกว่าดินสเม็คไทต์ที่ถูกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.1 M และ 0.3 M เมื่อใช้ปริมาณดูดซับร้อยละ 10 พบว่า ร้อยละการดูดซับกลีเซอรอลของดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1, 0.3 และ 0.5 M มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 42.58, 43.99 และ 51.62 ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันหลังการดูดซับพบว่า ค่าของความเป็นกรดมีค่าที่ค่อนข้างสูงมาก ดังแสดงในตาราง 4.4 ซึ่งพบว่า การใช้กรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.5 M ในปริมาณดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จะทำให้น้ำมันไบโอดีเซลมีค่าความเป็นกรด เท่ากับ 0.41 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัม แต่อย่างไรก็ตามก็ถือว่าน้ำมันที่ผ่านการดูดซับด้วยดินกระตุ้นกรดในช่วงความเข้มข้นของกรดที่ใช้ในงานวิจัยยังอยู่ภายใต้อัตรามาตรฐานของไบโอดีเซล

**ตารางที่ 4.4** ตารางแสดงค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซลหลังการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์กระตุ้นด้วยกรดที่ความเข้มข้นต่างกัน

ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล หลังจากดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์		
	ดินกระตุ้นด้วยกรด ซัลฟิวริก 0.1 M	ดินกระตุ้นด้วยกรด ซัลฟิวริก 0.3 M	ดินกระตุ้นด้วยกรด ซัลฟิวริก 0.5 M
3	0.36	0.36	0.31
5	0.36	0.33	0.44
10	0.36	0.34	0.41

#### 4.2.5 ผลการหาเวลาการตกตะกอนกลีเซอรอลภายหลังการดูดซับที่เหมาะสม



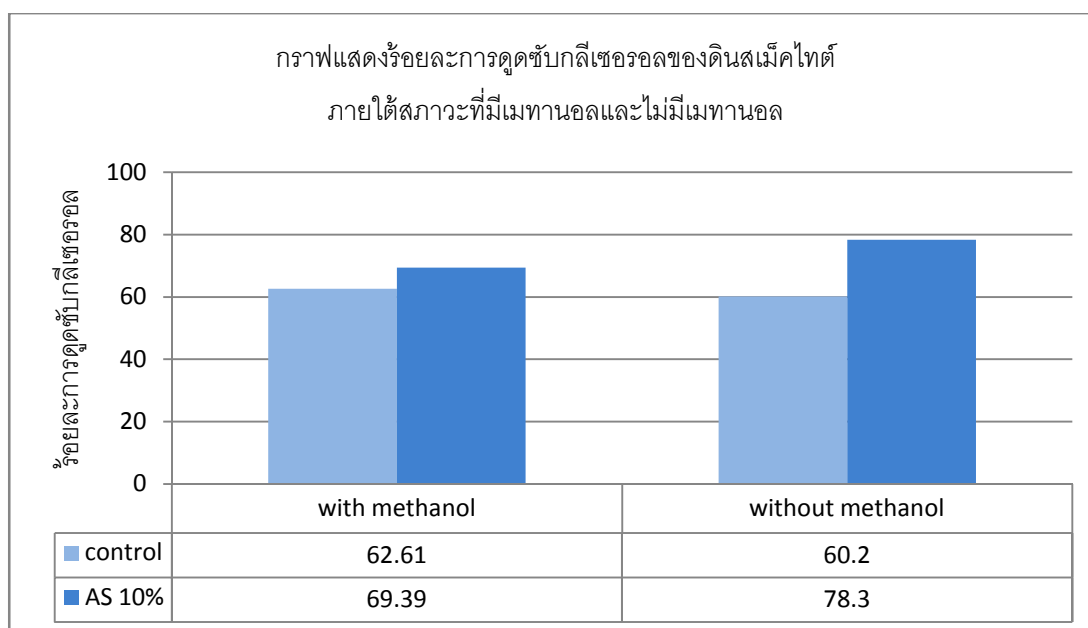
ภาพที่ 4.12 แผนภาพแสดงผลการหาระยะเวลาตกตะกอนหลังการดูดซับที่เหมาะสม

ในขั้นตอนการดูดซับของงานวิจัย จะมีการกำหนดช่วงเวลาของการตกตะกอนภายหลังการเขย่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายถึง การนำขวดทดลองที่ผ่านการเขย่าแล้ววางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องโดยไม่มีการเขย่า เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของคอลลอยด์ดินที่แขวนลอยในน้ำมัน ก่อนที่จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำมันไปวัดค่ากลีเซอรอลด้วยวิธีไทเทรชัน ดังนั้น การดูดซับที่เกิดขึ้นในงานวิจัย จึงเป็นการดูดซับที่อาศัยกระบวนการตกตะกอนร่วมด้วย ซึ่งพบว่าระยะเวลาการตกตะกอนมีผลทำให้ปริมาณร้อยละการดูดซับของกลีเซอรอลมีค่าที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามค่าที่ได้จากการดูดซับทุกครั้งก็ต้องเปรียบเทียบกับค่ากลีเซอรอลที่ได้จากตัวควบคุมทุกครั้ง ซึ่งร้อยละกลีเซอรอลที่มาจากตัวควบคุมจะสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงของการดูดซับดังกล่าว การทดลองนั้นๆ เกิดการตกตะกอนของกลีเซอรอลที่ไม่เกี่ยวข้องกับการดูดซับในปริมาณเท่าไร

จากภาพที่ 4.12 แสดงค่าร้อยละการดูดซับของกลีเซอรอลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำมันภายหลังระยะเวลาการตกตะกอนที่ต่างกัน พบว่า ที่เวลาตกตะกอน 15 นาที ร้อยละการดูดซับกลีเซอรอลของตัวควบคุมเท่ากับ ร้อยละ 22.42 และเมื่อดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ ค่าร้อยละการดูดซับสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 43.03 ในขณะที่เดียวกันเมื่อพิจารณาที่เวลาการตกตะกอน 2 ชั่วโมง พบว่าปริมาณร้อยละการดูดซับกลีเซอรอลของตัวควบคุมเท่ากับ ร้อยละ 53.59 และเมื่อทำการ

ดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ ค่าร้อยละการดูดซับสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 74.52 ซึ่งพบว่าค่าต่างของ ร้อยละการดูดซับจากการใช้เวลาการตกตะกอนค่อนข้างใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาการตั้งทิ้งไว้ที่นานขึ้น จะส่งผลให้กลีเซอรอลมีการตกตะกอนลงมาได้มากขึ้น จึงเลือกใช้ระยะเวลา 2 ชั่วโมงในการตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน

#### 4.2.6 ผลการการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล



ภาพที่ 4.13 แผนภาพแสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล

จากการหาประสิทธิภาพของการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทต์ ภายใต้สภาวะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล โดยในส่วนของน้ำมันไบโอดีเซลที่ไม่มีเมทานอลจะทำการกำจัดเมทานอลออกไปจากน้ำมันก่อนทำการดูดซับด้วยเครื่อง Rotary evaporator ให้ค่าการดูดซับดังแสดงในภาพที่ 4.13 ซึ่งพบว่า การใช้ดินสเม็คไทต์กระตุ้นกรด (AS) เป็นตัวดูดซับ ที่ปริมาณดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที

จากการทดลอง พบว่า ภายใต้สภาวะที่มีเมทานอล ร้อยละการดูดซับกลีเซอรอลมีค่าเท่ากับ 69.39 ซึ่งเพิ่มขึ้นจากตัวควบคุมเพียงเล็กน้อย เมื่อทำการดูดซับภายใต้สภาวะที่ไม่มีเมทานอล พบว่า ร้อยละการดูดซับกลีเซอรอลมีค่าที่เพิ่มขึ้นถึง ร้อยละ 78.30 ซึ่งมีค่าร้อยละ

การดูดซับเพิ่มจากตัวควบคุมมากกว่า จึงสรุปได้ว่า การดูดซับภายใต้สภาวะที่ไม่มีเมทานอลจะทำให้ค่าร้อยละการดูดซับกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งยืนยันได้ว่าการมีเมทานอลในน้ำมันไบโอดีเซลมีผลต่อการขัดขวางการดูดซับที่เกิดขึ้น

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำมันไบโอดีเซล

จากการวิเคราะห์น้ำมันไบโอดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจะทำให้ทราบปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำมันต่างๆ โดยจากกราฟโครมาโทแกรมที่ได้จะแสดงปริมาณของสารที่มีอยู่ ได้แก่ ปริมาณกลีเซอรอลอิสระ ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งเราสามารถคำนวณหาปริมาณของสารประกอบเหล่านี้จากการนำพื้นที่ใต้กราฟมาคำนวณได้

#### ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของไบโอดีเซลหลังจากการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์

ข้อกำหนด	วิธีทดสอบ	อัตรา กำหนด	การดูดซับไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทต์ (AS)	
			ภาวะมีเมทานอล	ภาวะไม่มีเมทานอล
กลีเซอรอลอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.02	0.11	0.03
โมโนกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.80	1.05	0.63
ไดกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.20	0.04	0.03
ไตรกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.20	0.00	0.00
กลีเซอรอลทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	EN 14105	< 0.25	1.20	0.69
ค่าของกรด (มิลลิกรัมKOH/กรัม)	ASTM D974	< 0.5	0.42	0.42

จากการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซล พบว่า ดินสเม็คไทต์ชนิดที่กระตุ้นด้วยกรด (Activated smectite, AS) สามารถดูดซับกลีเซอรอล และมีค่าร้อยละการดูดซับดีที่สุด เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเก็บตัวอย่างน้ำมันมาตรวจสอบคุณภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี แสดงผลดังตารางที่ 4.5 จากตารางพบว่า ในสภาวะที่ไม่มีเมทานอล ปริมาณ

กลีเซอรอลอิสระ มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.11 และมีปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมด เท่ากับ ร้อยละ 1.20 สำหรับในสถานะที่มีเมทานอล พบว่า ปริมาณกลีเซอรอลอิสระ มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 0.03 และ ปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมด เท่ากับ ร้อยละ 0.69 ซึ่งพบว่า ค่ากลีเซอรอลในทั้งสองสถานะต่างมีค่า กลีเซอรอลที่เกินข้อกำหนดของมาตรฐาน EN 14214 จึงสรุปได้ว่า การใช้ดินสเม็คไทต์ดูดซับ กลีเซอรอลในไบโอดีเซลไม่สามารถลดปริมาณกลีเซอรอลให้คุณภาพน้ำมันเป็นไปตามมาตรฐาน กำหนด

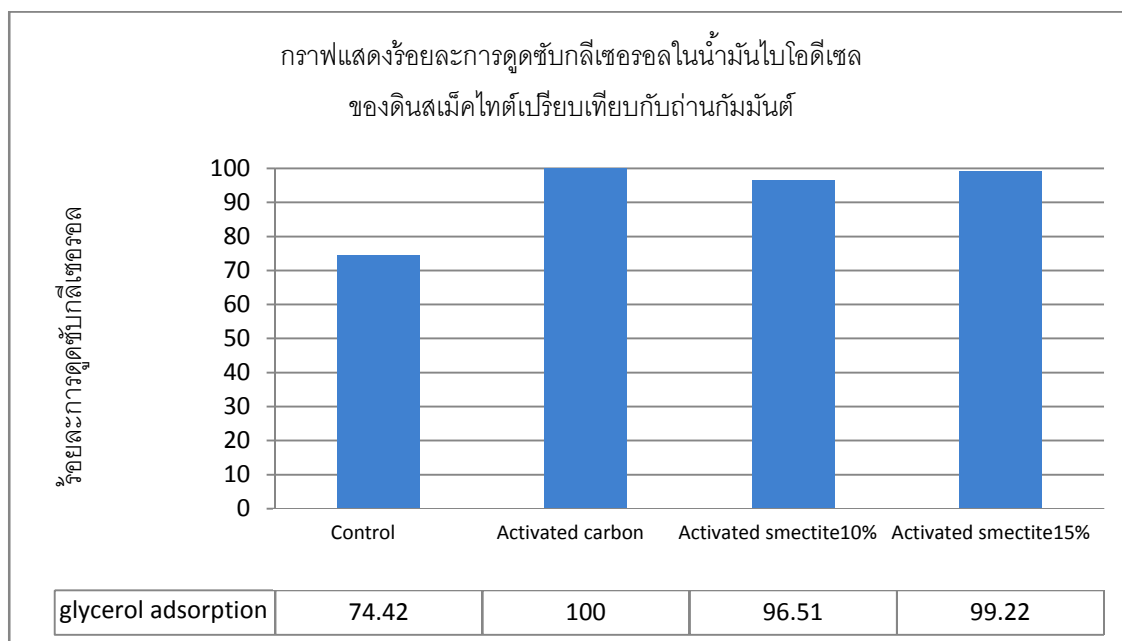
เมื่อพิจารณาค่าโมโนกลีเซอไรด์ซึ่งมีค่ากำหนดตามมาตรฐาน คือ ร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก พบว่า ในสถานะที่มีเมทานอลมีปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 1.05 ซึ่งมีค่าเกินมาตรฐาน ในขณะที่ เมื่อทำการดูดซับภายใต้สถานะไม่มีเมทานอลจะมีปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ร้อยละ 0.63 ซึ่งยังอยู่ใน เกณฑ์มาตรฐาน

เมื่อพิจารณาค่าไดกลีเซอไรด์ซึ่งมีค่ากำหนดตามมาตรฐาน คือ ร้อยละ 0.02 พบว่า การ ดูดซับกลีเซอรอลทั้งในสถานะที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอลให้ปริมาณของไดกลีเซอไรด์เท่ากับ ร้อยละ 0.04 และ 0.03 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเกินจากมาตรฐานในทั้งสองสถานะ

เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดค่าความเป็น กรดไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัม พบว่า ค่าความเป็นกรดของน้ำมันไบโอดีเซลจากการ ดูดซับทั้งสองสถานะมีค่าไม่เกินมาตรฐาน คือ มีค่าความเป็นกรดของน้ำมันทั้งในสถานะการดูดซับ ที่มีเมทานอลและไม่มีเมทานอล เท่ากับร้อยละ 0.42 มิลลิกรัมโพแทสเซียมต่อกรัม

ในการทดลองจึงมีการหาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับกลีเซอรอลด้วย ดินสเม็คไทต์ในการทดลองต่อไปด้วย 2 วิธี คือ การอาศัยการกรองร่วมด้วย และการใช้ ถ่านกัมมันต์ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ดีเป็นตัวดูดซับร่วม ซึ่งผลการทดลองจะถูกอธิบายในข้อ 4.4 และ 4.5 เป็นลำดับถัดไป

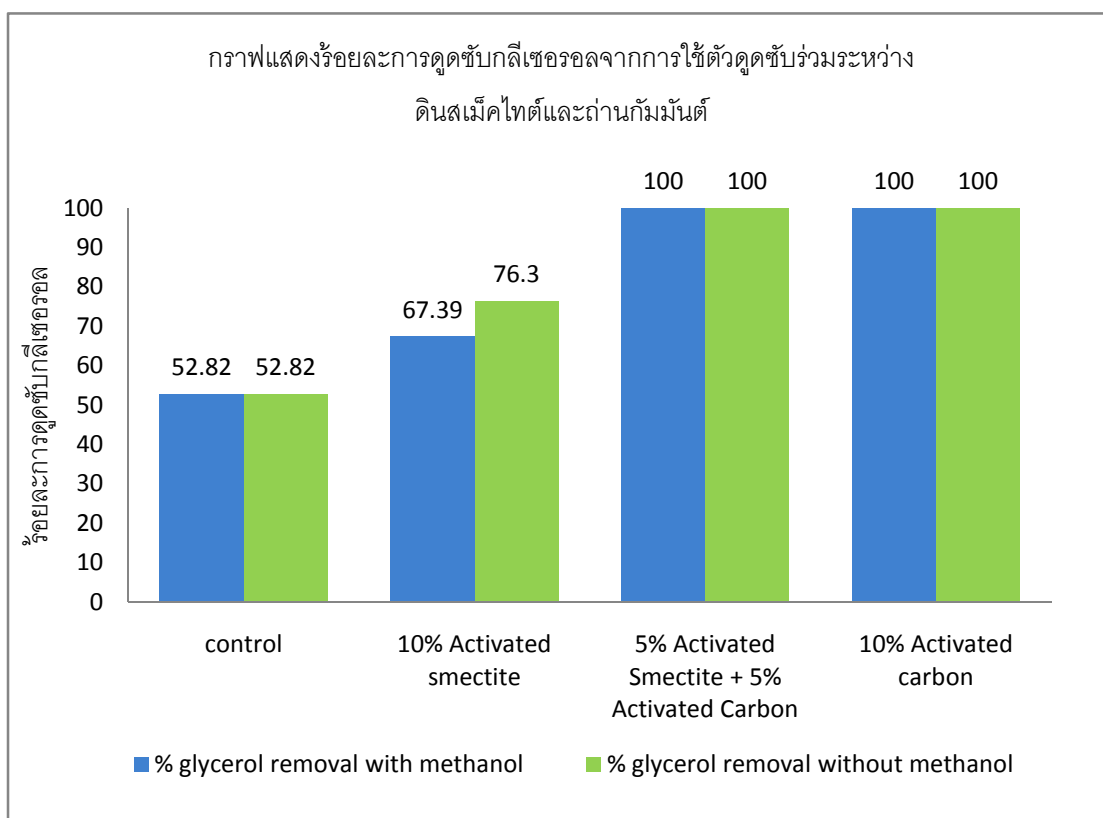
#### 4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของดินสเม็คไทต์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ โดยอาศัยเทคนิคการกรองร่วมด้วย



ภาพที่ 4.14 แผนภาพแสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของดินสเม็คไทต์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์โดยอาศัยเทคนิคการกรองร่วมด้วย

การหาประสิทธิภาพของการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทต์เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นทิ้งให้ตกตะกอนเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนทำการกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 และเก็บตัวอย่างมาไทเทรตหาค่ากลีเซอรอล ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4.14 พบว่า การดูดซับกลีเซอรอลของตัวควบคุมมีค่า เท่ากับ ร้อยละ 74.42 ผลของการดูดซับจากถ่านกัมมันต์ให้ผลการดูดซับกลีเซอรอลได้ดีที่สุด กล่าวคือ ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซลได้ทั้งหมด โดยให้ค่าการดูดซับเท่ากับ ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก ในขณะที่การใช้ดินสเม็คไทต์ดูดซับที่ปริมาณสารดูดซับ ร้อยละ 10 และร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ให้ค่าร้อยละการดูดซับกลีเซอรอลเท่ากับ ร้อยละ 96.51 และ ร้อยละ 99.22 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายังมีกลีเซอรอลคงเหลือในน้ำมันไบโอดีเซลอีกเพียงเล็กน้อย จะเห็นได้ว่า การใช้เทคนิคการกรองร่วมด้วยจะทำให้ค่าร้อยละของกลีเซอรอลมีค่าที่สูงมากขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลและสิ่งเจือปนบางส่วนติดอยู่กับกระดาษกรอง ทำให้น้ำมันไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์เพิ่มมากขึ้นอย่างมาก

#### 4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการใช้อ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับร่วมกับดินสเม็คไทต์



ภาพที่ 4.15 แผนภาพแสดงผลของการใช้อ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับร่วมกับดินสเม็คไทต์

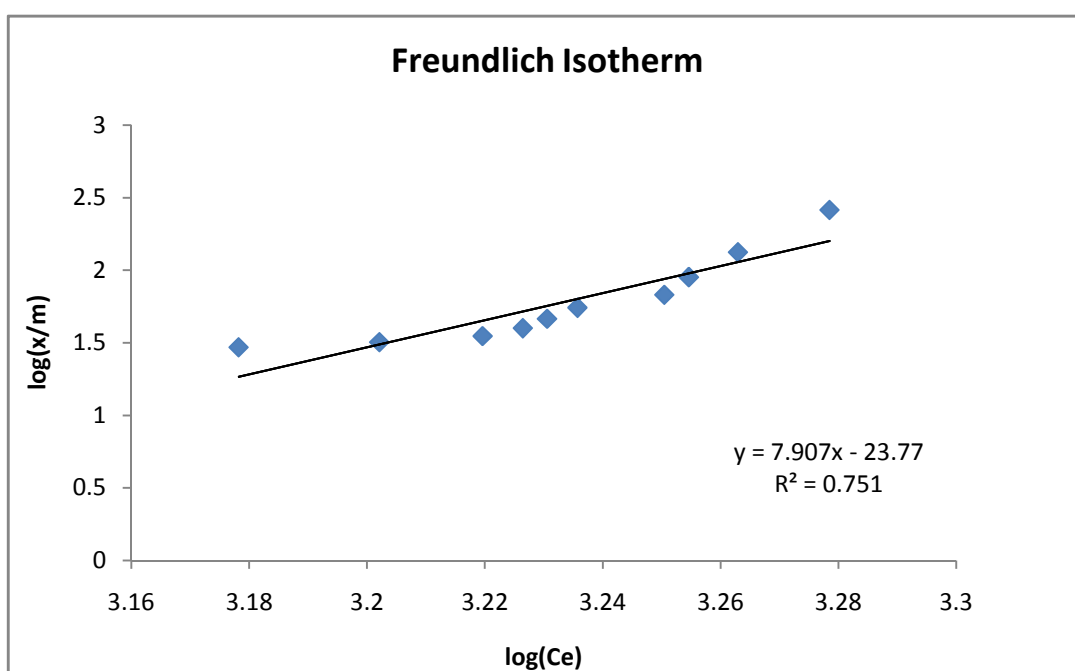
จากการศึกษาเทคนิคการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับกลีเซอรอลของดินสเม็คไทต์ ด้วยวิธีการใช้อ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับร่วม ผลการศึกษากลับไปดังภาพที่ 4.15 โดยจากการศึกษาพบว่า ค่าร้อยละของการดูดซับกลีเซอรอล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 10 นาที ในตัวควบคุม เท่ากับ ร้อยละ 52.82 จากการดูดซับของกลีเซอรอลในไบโอดีเซลโดยอาศัยตัวดูดซับต่างๆ พบว่า เมื่อใช้ดินสเม็คไทต์เป็นตัวดูดซับในสภาวะที่มีเมทานอลให้ค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 67.39 และในสภาวะที่ไม่มีเมทานอลให้ค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 76.30 เมื่อใช้อ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับในสภาวะที่มีเมทานอลให้ค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 100 และในสภาวะที่ไม่มีเมทานอลให้ค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 100 ซึ่งสามารถกำจัดกลีเซอรอลออกไปได้ทั้งหมดผลจากการศึกษาประสิทธิภาพของการใช้อ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับร่วมกับดินสเม็คไทต์ในอัตราส่วนเท่ากัน พบว่า จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับได้เป็นอย่างดี ซึ่งจากการศึกษาพบว่า การใช้ตัวดูดซับร่วม ทำให้สามารถกำจัดปริมาณกลีเซอรอลในไบโอดีเซลได้ทั้งหมด คือ ร้อยละของการดูดซับกลีเซอรอลเท่ากับ 100 ทั้งในสภาวะที่มีเมทานอลและสภาวะที่ไม่มีเมทานอล ดังนั้น วิธีการใช้



ตัวดูดซับร่วมจึงเป็นอีกแนวทางที่จะทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับราคาถูกลงอย่างดินสเม็คไทต์ได้เป็นอย่างดี

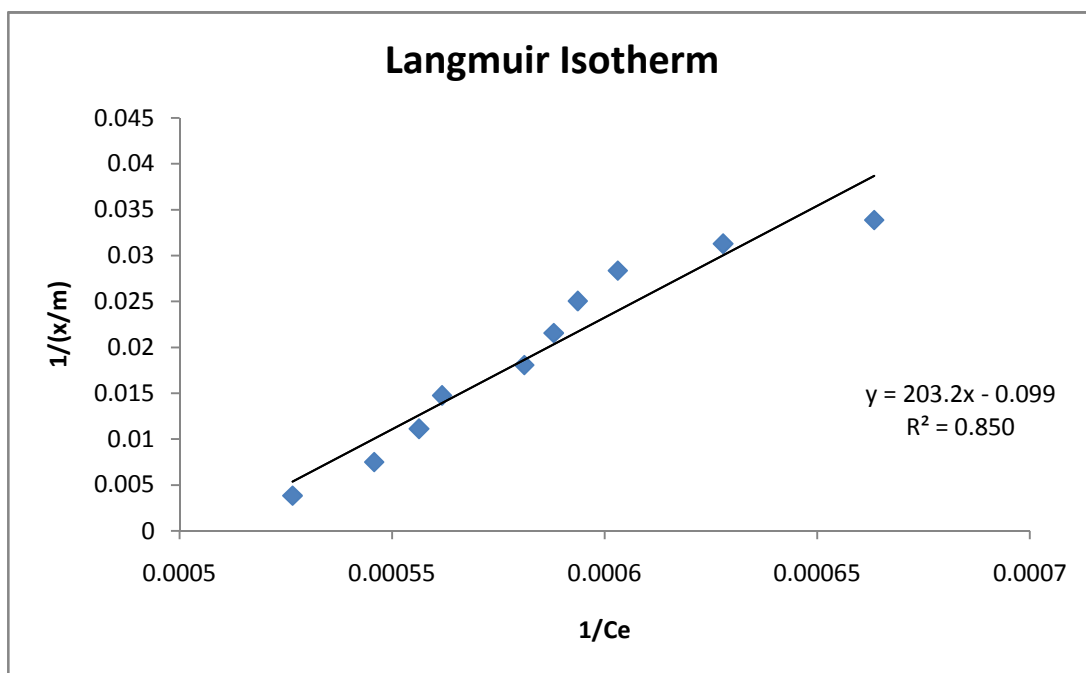
#### 4.6 ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอมของการดูดซับกลีเซอรอลด้วยดินสเม็คไทต์

จากการหาไอโซเทอมของการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลของดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด (AS) โดยการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด (AS) โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน คือ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10% (w/w) ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ผลการวิเคราะห์หาค่ากลีเซอรอลด้วยวิธีไทเทรชัน และนำมาคำนวณเพื่อสร้างกราฟตามสมการของฟรุนดลิช และสมการของแลงเมียร์ แสดงดังภาพที่ 4.17 และภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.16 แผนภาพแสดงไอโซเทอมการดูดซับกลีเซอรอล แบบฟรุนดลิช

จากไอโซเทอมการดูดซับกลีเซอรอลของดินสเม็คไทต์ เมื่อคำนวณด้วยสมการของฟรุนดลิช โดยสร้างกราฟไอโซเทอมระหว่างค่า  $\log(Ce)$  และค่า  $\log(x/m)$  พบว่า มีสมการเส้นตรงเท่ากับ  $y = 7.907x - 23.77$  โดยมีค่าความชันเท่ากับ 7.907 และมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.751 และเมื่อคำนวณด้วยสมการของแลงเมียร์ โดยสร้างกราฟไอโซเทอมระหว่างค่า  $1/(Ce)$  และค่า  $1/(x/m)$  พบว่า มีสมการเส้นตรงเท่ากับ  $y = 203.2x - 0.099$  โดยมีค่าความชันเท่ากับ 203.2 และมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.850



ภาพที่ 4.17 แผนภาพแสดงไอโซเทอมการดูดซับกลีเซอรอล แบบแลงเมียร์

เมื่อพิจารณาลักษณะของการดูดซับด้วยไอโซเทอมทั้งสองแบบ พบว่าการดูดซับของดินสเม็คไทต์มีไอโซเทอมที่สอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ โดยพิจารณาจากค่า  $R^2$  ของไอโซเทอมที่มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งหมายความว่า ลักษณะการดูดซับที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นการดูดซับชั้นเดียว (monolayer) ซึ่งเกิดจากการดูดซับทางเคมีระหว่างตัวดูดซับและสารถูกดูดซับ

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าคงที่จากไอโซเทอมของการดูดซับกลีเซอรอล

ไอโซเทอมฟรุนดลิช				ไอโซเทอมแลงเมียร์			
Intercept	$K_F$	$1/n$	$R^2$	a	b	$R_L$	$R^2$
-23.77	$1.69 \times 10^{-24}$	7.907	0.751	10.101	$4.97 \times 10^{-2}$	$4.12 \times 10^{-3}$	0.850

เมื่อพิจารณาค่าคงที่จากไอโซเทอมของการดูดซับกลีเซอรอลของดินสเม็คไทต์ พบว่ามีค่าดังตารางที่ 4.6 จากตารางพบว่า จากไอโซเทอมของฟรุนดลิช มีค่าคงที่ของการดูดซับจากสมการของฟรุนดลิช ( $K_F$ ) มีค่าเท่ากับ  $1.69 \times 10^{-24}$  สำหรับไอโซเทอมของแลงเมียร์ พบว่ามีค่าคงที่ของพลังงานของการดูดซับจากสมการของแลงเมียร์ (b) มีค่าเท่ากับ  $4.97 \times 10^{-2}$  และค่า  $R_L$  มีค่าเท่ากับ  $4.12 \times 10^{-3}$  ซึ่งค่า  $R_L$  ที่มีค่าน้อยกว่า 1 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นอยู่ในสภาวะของการดูดซับที่ดี

จากการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้น้ำระหว่างวิธีการทำไบโอดีเซล ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการใช้น้ำล้างและวิธีการดูดซับด้วยดิน พบว่า เมื่อใช้วิธีการทำไบโอดีเซล ให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีใช้น้ำล้าง จะต้องใช้น้ำอุ่นล้างน้ำมันไบโอดีเซลจำนวน 8 รอบ โดยใช้น้ำล้าง 50 มิลลิลิตร ต่อการล้าง 1 รอบ รวมปริมาณน้ำที่ใช้ล้างทั้งหมด เท่ากับ 400 มิลลิลิตร ต่อการผลิต น้ำมันไบโอดีเซล 100 กรัม และเมื่อใช้วิธีการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีดูดซับด้วยดิน พบว่า ไม่ก่อให้เกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลเลย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการดูดซับด้วยดินในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์จะช่วยลดน้ำเสียที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตได้ถึง 400 มิลลิลิตร ต่อการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล 100 กรัม

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยชิ้นนี้ ได้ทำการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลโดยใช้ดินสเม็คไทต์เป็นตัวดูดซับ และได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของดินสเม็คไทต์ด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งในการเตรียมดินจะต้องอาศัยน้ำล้างดินหลายๆ รอบ เพื่อปรับค่าพีเอชของดินให้เป็นกลางทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณน้ำจากขั้นตอนการเตรียมดิน โดยใช้ปริมาณน้ำล้างประมาณ 1500 มิลลิลิตร ต่อการเตรียมดินดูดซับ 100 กรัม (หรือใช้ปริมาณน้ำล้าง 150 มิลลิลิตร ต่อดิน 10 กรัม) จากการศึกษพบว่า จะต้องใช้ดินสเม็คไทต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อลดปริมาณกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลในปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ดังนั้น จะต้องใช้ดินดูดซับ 10 กรัม ต่อน้ำมันไบโอดีเซล 100 กรัม จึงสรุปได้ว่า การใช้ดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรดเป็นตัวดูดซับไบโอดีเซล 100 กรัม จะต้องใช้ปริมาณน้ำล้างในกระบวนการทั้งหมด 150 มิลลิลิตร ซึ่งมีปริมาณการใช้น้ำที่น้อยกว่าวิธีการใช้น้ำล้างประมาณ 2.6 เท่า จึงสรุปว่า กระบวนการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์จากการใช้วิธีการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด มีปริมาณการใช้น้ำคิดเป็นร้อยละ 37.5 ของปริมาณการใช้น้ำที่มาจากวิธีการใช้น้ำล้าง

การใช้น้ำในกระบวนการผลิตที่มีปริมาณที่ลดลง ทำให้น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต น้ำมันไบโอดีเซลมีปริมาณที่ลดลงตามไปด้วย นอกจากนั้นแล้ว ดินดูดซับในการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ ยังสามารถนำมาคืนสภาพและกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการเผา และให้เชื้อเพลิงเป็นผลพลอยได้อีกด้วย วิธีการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยกระบวนการดูดซับจึงเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ หากสามารถปรับปรุงพัฒนาตัวดูดซับที่เหมาะสมและนำมาใช้ในการผลิต น้ำมันไบโอดีเซล ก็จะช่วยลดปริมาณน้ำเสียที่จะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซล โดยใช้ดินสเม็คไทต์ซึ่งเป็นสารดูดซับที่มาจากธรรมชาติและมีราคาถูก ซึ่งกระบวนการดูดซับเป็นวิธีการที่ช่วยกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำมันไบโอดีเซลแทนกระบวนการล้างน้ำซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้อยู่ทั่วไป จากงานวิจัยพบว่า ดินสเม็คไทต์สามารถช่วยลดปริมาณกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลได้ โดยในงานวิจัยได้เลือกใช้ดินสเม็คไทต์ธรรมชาติและดินสเม็คไทต์ที่ถูกรับปรุงด้วยวิธีต่างกัน คือ การเผา การกระตุ้นกรด และการเผาพร้อมกับการกระตุ้นกรด เป็นต้น โดยนำดินเหล่านี้มาดูดซับกลีเซอรอลและสิ่งเจือปนอื่นๆ ในน้ำมันไบโอดีเซลที่ถูกรวบรวมจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และเมทานอล โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

จากการผลการศึกษาพบว่า ในสภาวะที่มีเมทานอล เมื่อใช้ดินดูดซับในปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าร้อยละการดูดซับกลีเซอรอลของดินสเม็คไทต์ธรรมชาติ ดินสเม็คไทต์เผา ดินสเม็คไทต์กระตุ้นกรด และดินสเม็คไทต์ที่เผาพร้อมกับการกระตุ้นกรด เท่ากับร้อยละ 40.03, 51.90, 53.36 และ 47.74 ตามลำดับ การกระตุ้นดินดูดซับสเม็คไทต์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในอัตราส่วนดินต่อสารละลายกรด เท่ากับ 1:5 และทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพกำจัดกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลได้ดีที่สุด

ในสภาวะที่ไม่มีเมทานอล พบว่า การดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซลด้วยดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราเร็วในการเขย่า 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที และใช้ระยะเวลาตกตะกอน 2 ชั่วโมง สามารถกำจัดกลีเซอรอลได้ร้อยละ 69.39 สำหรับในสภาวะที่ไม่มีเมทานอล พบว่า การดูดซับกลีเซอรอลในไบโอดีเซลโดยใช้ดินสเม็คไทต์ที่กระตุ้นด้วยกรด ที่ปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก สามารถกำจัดกลีเซอรอลได้ร้อยละ 78.30 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของดินสเม็คไทต์เทียบกับถ่านกัมมันต์ พบว่า ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับที่ดีกว่าดินสเม็คไทต์และใช้ปริมาณของตัวดูดซับในปริมาณในการกำจัดกลีเซอรอลที่น้อยกว่า ดังนั้นเมื่อนำถ่านกัมมันต์มาใช้เป็นตัวดูดซับร่วมกับดินสเม็คไทต์ พบว่า ให้ประสิทธิภาพการกำจัดกลีเซอรอลที่ดีมากขึ้น กล่าวคือ สามารถกำจัดกลีเซอรอลอิสระจากน้ำมันไบโอดีเซลได้ทั้งหมด

จากงานวิจัยสรุปได้ว่า การใช้สเม็คไทต์ดูดซับกลีเซอรอลในน้ำมันไบโอดีเซลสามารถลดปริมาณของสิ่งเจือปนในน้ำมันไบโอดีเซลได้ ซึ่งทำให้น้ำมันไบโอดีเซลมีความบริสุทธิ์มากขึ้น มีค่ากลีเซอรอลอิสระที่ลดลง และช่วยลดการเกิดน้ำเสียที่จะเกิดจากระบวนการผลิตเมื่อเทียบกับเกิดน้ำเสียที่มาจากกระบวนการล้างน้ำได้ถึงร้อยละ 62.5 นอกจากนี้แล้วการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับร่วมจะช่วยส่งผลให้มีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดีขึ้นและให้ค่ากลีเซอรอลที่ผ่านตามาตรฐานกำหนด

### ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

จากงานวิจัยพบว่า การใช้ดินสเม็คไทต์ในการดูดซับกลีเซอรอล สามารถช่วยลดปริมาณกลีเซอรอลที่แขวนลอยอยู่ในไบโอดีเซลได้ แต่อย่างไรก็ตามค่าการดูดซับที่ได้ก็ยังคงถือว่าค่อนข้างน้อย ซึ่งน่าจะมีสาเหตุหลักมาจาก คุณภาพของดินสเม็คไทต์ซึ่งดินที่ใช้ในงานวิจัยเป็นดินดูดซับทางเภสัชจึงมีปริมาณของเนื้อแร่มอนต์มอริลโลไนต์ที่ค่อนข้างต่ำ และมีแร่ควอตซ์เจือปนเข้ามาในปริมาณมาก จึงทำให้โอกาสของการแลกเปลี่ยนประจุเกิดขึ้นน้อย และส่งผลให้เกิดการดูดซับที่น้อยไปด้วย นอกจากนี้ควรเลือกขนาดของดูดซับที่ก่อให้เกิดคอลลอยด์ของดินในน้ำมันน้อยที่สุด เพื่อจะทำให้การเก็บตัวอย่างน้ำมันเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกลีเซอรอลทำได้ง่ายขึ้น รวมทั้งควรจะใช้เวลาการทิ้งตกตะกอนให้นานขึ้น เพื่อให้เกิดการแยกชั้นได้สมบูรณ์มากขึ้น

การเลือกใช้กรดที่มีความเข้มข้นสูงๆ ในการกระตุ้นดิน อาจจะทำให้ดินมีความเป็นกรดสูง และส่งผลให้คุณภาพของน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าความเป็นกรดสูงขึ้นไปด้วย จึงต้องมีการระวังเรื่องค่าความเป็นกรดของดินที่ใช้กรดกระตุ้น โดยเลือกใช้ความเข้มข้นกรดที่ก่อให้เกิดการดูดซับมากที่สุด และเมื่อนำดินนั้นมาใช้ในการดูดซับก่อให้เกิดมีค่าความเป็นกรดตามเกินมาตรฐานกำหนด

การใช้เทคนิคการทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์ด้วยวิธีการล้างแบบแห้งโดยอาศัยกระบวนการดูดซับเป็นวิธีที่น่าสนใจ และยังคงต้องมีการศึกษาในรายละเอียดต่อไป เนื่องจากจะสามารถลดกลีเซอรอลอิสระและกลีเซอรอลทั้งหมดจากน้ำมันไบโอดีเซลได้ แต่อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ตัวดูดซับที่เหมาะสม ยังเป็นสิ่งที่ควรได้รับความสนใจ เนื่องจากตัวดูดซับแต่ละชนิดย่อมมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไป ตัวดูดซับบางชนิดอาจจะให้ค่าการกำจัดกลีเซอรอลที่สูง แต่ก็อาจจะทำให้ผลผลิตของน้ำมันลดลง ตัวดูดซับบางชนิดอาจจะมีประสิทธิภาพการดูดซับได้ดีเฉพาะสภาวะที่ไม่มีเมทานอล ซึ่งอาจจะทำให้น้ำมันมีความหนืดสูงมากขึ้นและมีค่าไดกลีเซอไรด์ที่สูงขึ้น เป็นต้น

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- คณะกรรมการธิการพลังงาน. สภาผู้แทนราษฎร. 2545. พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล. กรุงเทพมหานคร: แพลน พรินท์ติ้ง.
- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์คุรุสภา.
- จิรพรรณ เจริญสินวรกุล. 2549. การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยสารใช้ดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์โพลีเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชาคริต ทองอุไร, สันหทัย กลิ่นพิกุล, จริญญา บุญกาญจน์ และพิมพ์พรรณ เกียรติชิมสกุล. 2001. การผลิตไบโอดีเซลจากผลผลิตปาล์มน้ำมัน. วารสารวิจัยสงขลานครินทร์ 23: 831-841.
- เดชา ฉัตรศิริเวช. 2552. กระบวนการดูดซับ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ส.เอเชียเพรส.
- นิสากรณ์ แสงประชุม. 2552. การทำไบโอดีเซลให้บริสุทธิ์โดยใช้ดินเบาและผิวดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์โพลีเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุษยา ศรีวิจารณ์. 2552. การทำไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มให้บริสุทธิ์โดยการดูดซับด้วยดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์โพลีเมอร์. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- แพรสุข วังศิลา. 2552. ผลของอุณหภูมิที่ใช้เตรียมดินเบาต่อประสิทธิภาพการดูดซับกลีเซอรินในน้ำมันไบโอดีเซล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. บัณฑิตวิทยาลัย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรวิภา จุฬาลักษณ์. 2548. การผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการกระตุ้นด้วยเอนไซม์ไลเปส. Energy Plus 6: 26-27.

ศูนย์สารสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2553. เทคโนโลยีและกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.  
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

### ภาษาอังกฤษ

Atadashi, I.M., Aroua, M.K. and Abdul, A.A., 2011. Review biodiesel separation and purification. Renewable Energy 36: 437-443.

Bhattacharyya, K.B. and Gupta, S.S. 2006. Pb (II) uptake by kaolinite and monmorillonite in aqueous medium: Influence of acid activation of the clays. Colloids and surface 227: 191-200.

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

Bertram, B., Abrams, C. and Cooke, B.S. 2005. Purification of biodiesel with adsorbent materials. U.S. Patent Application No. 20050081436.

Chongkhong, S., Tongurai, C. and Chetpattananondh, P. 2009. Continuous esterification for biodiesel production from palm fatty acid distillate using economical process. Renewable Energy 34: 1059-63.

Dennis, Y.C., Leung, X.W. and Lueng, M.K.H. 2009. A review on biodiesel using catalyzed transesterification. Applied Energy 87: 1083-1095.

Dube, M.A., Tremblay, A.Y. and Liu, J. 2007. Biodiesel production using a membrane reactor. Bioresource Technology 98: 639-647.

Ferella, F., Mazziotti, G., Michelis, D.I., Staisci, V. and Veglio, F. 2010. Optimization of the transesterification reaction in biodiesel production in biodiesel. Fuel 89: 36-42.

Garpen, J.V. 2005. Biodiesel processing and production. Fuel Processing Technology 86: 1097-1107.

- Guerra, D.L., Olivera, H.C.P., Costa, P.C.C., Viana, R.R. and Airoldi, C. 2010. Adsorption of chromium (VI) ions on brazilian smectite: Effect of contact time, pH, concentration, and calorimetric investigation. Catena 82: 35-44.
- Haq, N.B., Mohammad, A.S. and Ata, U.R. 2008. Biodiesel production from waste tallow. Fuel 87: 2961-2966.
- Klein and Hurlburt. 1993. Manual of mineralogy: John Wiley and Sons.
- Kumar, S., Gupta A. K. and Naik, S. 2003. Conversion of non-edible oil into biodiesel. Journal of Science and Industrial Research 62: 124-132.
- Lueng, D.Y.C. and Guo, Y. 2006. Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production. Fuel Processing Technology 87: 883-890.
- Lueng, D.Y.C., Wu, X. and Lueng, M.K.H. 2010. A review on biodiesel production using catalyst transesterification. Applied Energy 87: 1083-1095.
- Marchetti, J.M., Miguel, V.U. and Errazu, A.F. 2007. Possible methods for biodiesel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11: 1300-1301.
- Meher, L.C., Dharmagadda, V.S.S. and Naik, S.N. 2006. Optimization of alkali-catalysed transesterification of *Pongamia pinnata* oil for production of biodiesel. Bioresource Technology 97: 1392-1397.
- Mohamad, I.A. and Alshyoukh, A.O. 2002. Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel. Bioresource Technology 85: 253-256.
- Rashid, U. and Anwar, F. 2008. Production of biodiesel through optimized alkali-catalyzed transesterification of rapeseed. Fuel 87: 265-273.
- Sharma, Y.C. and Singh, B. 2009. Development of biodiesel: current scenario. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13: 1646-1651.



- Steudel, A., Batenburg, L.F., Fischer, H.R., Weidler, P.G. and Emmerich, K. 2009. Alteration of swelling clay mineral by acid activation. Applied Clay Science 44:105-115.
- Su, C.C. and Shen, Y.H. 2009. Adsorption of poly(ethylene) on smectite: Effect of layer charge. Journal of Colloid and Interface Science 332: 11-15.
- Temuujin, J., Jadambaa, T., Burmaa, G., Erdenechimeg, S., Amarsana, J. and Mackenzie, K.J.D. 2004. Characterization of acid activated montmorillonite clay from Tuulant (Mongolia). Ceramics International 30: 251-255.
- Weng, C.H. and Pan, Y.F. 2007. Adsorption of cationic dye (methylene blue) onto spent activated clay. Journal of Hazardous Materials 144: 355-362.
- Weng, C.H., Sharma, Y.C. and Chu, S.H. 2008. Adsorption of Cr(VI) from aqueous solutions by spent activated clay. Journal of Hazardous Materials 155: 65-75.
- Weng, C.H., Tsai, C.Z., Chu, S.H. and Sharma, Y.C. 2007. Adsorption characteristics of copper (II) onto spent activated clay. Separation Purification Technology 54: 187-197.
- Yuang, P.C. and Shen Y.H. 2005. Determination of the area of smectite in water by ethylene oxide chain adsorption. Journal of Colloid and Interface Science 285: 443-447.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

## ภาคผนวก ก

### วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติและมาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล

#### 1. การหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและสบู่ในไบโอดีเซลด้วยวิธีไทเทรต

การหาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ที่คงเหลือและหาค่าสบู่ที่คงเหลือด้วยวิธีการไทเทรต สามารถทำได้ดังนี้

1) เก็บตัวอย่างน้ำมันไบโอดีเซลบริสุทธิ์หรือน้ำมันไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับปริมาณ 10 กรัมใส่ในขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 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 กำหนดให้ปริมาณของสารละลายไฮโดรคลอริกที่ใช้ในไปจากขั้นตอนนี้ เท่ากับ ค่า A

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

5) ไทเทรตตัวอย่างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric) ความเข้มข้น 0.01 โมลาร์ จนกว่าสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีเหลืองใส กำหนดให้ปริมาณของสารละลายไฮโดรคลอริกที่ใช้ในไปจากขั้นตอนนี้ เท่ากับ ค่า B

6) นำค่า A ที่ได้จากข้อ 3 ไปคำนวณหาค่าปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่คงเหลือจากสูตร

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

เมื่อ C = ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่คงเหลือในน้ำมันไบโอดีเซล (กรัมของเบสต่อกรัมไบโอดีเซล)

A = ปริมาณของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักของไบโอดีเซล (กรัม)

7) นำค่า B ที่ได้จากข้อ 3 ไปคำนวณหาค่าปริมาณสารเร่งปฏิกิริยาที่คงเหลือ  
จากสูตร

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

เมื่อ S = ปริมาณสบู่ที่คงเหลือในน้ำมันไบโอดีเซล (กรัมของเบสต่อกรัมไบโอดีเซล)

B = ปริมาณของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักของไบโอดีเซล (กรัม)

## 2. การหาค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซล

การหาค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซลเป็นขั้นตอนสำคัญของการทดสอบคุณภาพไบโอดีเซล เพื่อตรวจสอบว่าน้ำมันไบโอดีเซลมีค่าความเป็นกรด เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D974 ซึ่งได้กำหนดค่าความเป็นกรดของไบโอดีเซล ต้องมีค่าไม่เกิน 0.05 ซึ่งขั้นตอนการตรวจวิเคราะห์มีวิธีการ ดังนี้

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

2) จากนั้นทำการหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยการปิเปตสารละลายโพแทสเซียมไฮโดรเจนแทลเลต 25 มิลลิลิตรไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ ฟีนอล์ฟทาลีน (phenolphthalein) เป็นอินดิเคเตอร์ จำนวน 6 หยด และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาความเข้มข้น

จากสูตร  $C_1V_1 = C_2V_2$

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) ชั่งตัวอย่างไบโอดีเซลที่ผ่านการดูดซับแล้ว 2 กรัมปิเปตสารละลายไทเทรชัน 25 มิลลิลิตรและสารละลายอินดิเคเตอร์พาราแนพทอลเบนซีน 0.125 มิลลิลิตรนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ลิคของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนสารละลายเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียว กำหนดให้ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ลิคของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นในขั้นตอนนี้เท่ากับ ค่า A

6) ทำตัวควบคุม (blank) โดยปิเปตสารละลายไทเทรชัน 25 มิลลิลิตรและสารละลายอินดิเคเตอร์พาราแนพทอลเบนซีน 0.125 มิลลิลิตรนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ลิคของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จนสารละลายเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียว กำหนดให้ปริมาตรสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ลิคของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในขั้นตอนนี้เท่ากับ ค่า B

7) นำค่าที่ได้จากการไทเทรต มาคำนวณเพื่อหาค่าความเป็นกรดในไบโอดีเซล จากสูตร

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

เมื่อ A = ปริมาตรสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ลิคของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างไบโอดีเซล (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ลิคของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตตัวควบคุม (มิลลิลิตร)

M = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ลิคของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

W = น้ำหนักตัวอย่างไบโอดีเซล (กรัม)

### 3. การหาปริมาณกลีเซอรินทั้งหมดและกลีเซอไรต์ในไบโอดีเซล โดยอาศัยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

การวิเคราะห์ตัวอย่างไบโอดีเซลโดยอาศัยการตรวจวัดเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีจะสามารถวิเคราะห์ค่ากลีเซอรอลทั้งหมด ค่ากลีเซอรอลอิสระ ค่าไดกลีเซอไรต์ ค่าโมโนกลีเซอไรต์ที่มีในน้ำมันไบโอดีเซล 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 ลงในสารละลายเขย่าให้เข้ากัน และนำตัวอย่างที่เตรียมไปฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ปริมาณ 1 ไมโครลิตร

- สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ มีดังนี้

Instrument: CP-3800 Varian gas chromatograph

Injector: Cold on-column, 1  $\mu$ L, reversed liner

Column: Glycerides Ultimetel (Varian) 10m x 0.32 mm (ID) x 0.1  $\mu$ m (film thickness) 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

#### 4. ข้อกำหนดเกี่ยวกับมาตรฐานคุณภาพของไบโอดีเซล

##### 1. ปริมาณเมทิลเอสเทอร์

ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ แสดงถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาการผลิไบโอดีเซลที่สมบูรณ์ มาตรฐานกำหนดให้มีปริมาณมากกว่าร้อยละ 96.5 โดยน้ำหนัก เมื่อปริมาณเอสเทอร์น้อยกว่าที่กำหนด ซึ่งบอกถึงยังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ หรือไตรกลีเซอไรด์ อยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณสูงกว่าที่กำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง และเกี่ยวเนื่องกับการอุดตันในหัวฉีด หรือการบวมของเครื่องยนต์

##### 2. ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซล ค่าความหนาแน่นเป็นตัวบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง เมื่อค่าความหนาแน่นมีค่ามากก็ จะให้พลังงานความร้อนมากขึ้นตามไปด้วยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณ เดียวกัน ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากวัตถุดิบน้ำมันพืชแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน นอกจากนี้ปริมาณเมทานอลที่ตกค้างในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำอีกด้วย

##### 3. ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ความหนืดเกี่ยวข้องกับการไหล การฉีดเป็นฝอยของหัวฉีดในห้องเผาไหม้ การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กจะทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมัน พืชที่เป็นวัตถุดิบความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยา ออกซิเดชันอีกทางหนึ่ง

##### 4. จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมัน แล้วทำให้น้ำมันติดไฟ มาตรฐานกำหนดให้มีค่าจุดวาบไฟมากกว่า 120 องศาเซลเซียส ปริมาณเมทานอลที่หลงเหลือ ในไบโอดีเซลทำให้จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานได้ จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย และการจัดเก็บ ปริมาณเมทานอลที่ยังคงเหลืออยู่ในไบโอดีเซลในปริมาณมากกว่า 0.2 % ส่งผลให้ จุดวาบไฟมีค่าต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส



## 5. กำมะถัน

ไบโอดีเซล เป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากน้ำมันพืชดิบที่ใช้ในการผลิตมักมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน องค์ประกอบกำมะถันในน้ำมันเมื่อถูกเผาไหม้ จะเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถูกปล่อยออกมาพร้อมไอเสียจากเครื่องยนต์ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

## 7. เถ้าซัลเฟต

เถ้าซัลเฟตเกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการตกค้างของสบู่ และตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณเถ้าซัลเฟตมีผลต่อการอุดตันในเครื่องยนต์

## 8. น้ำ

ปริมาณน้ำในน้ำมันทำให้การเผาไหม้ไม่ดี นอกจากนั้นน้ำในไบโอดีเซลยังเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกระหว่างน้ำกับเอสเทอร์ เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ และเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมัน ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หัวฉีดอุดตัน

## 9. สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด

สารปนเปื้อนในน้ำมันไบโอดีเซลส่วนใหญ่เป็นผลมาจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน และปฏิกิริยาข้างเคียง เช่นปฏิกิริยาการเกิดสบู่ของกรดไขมันอิสระและตัวเร่งปฏิกิริยาเบส ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารที่ไม่สaponifiyable ได้แก่ ไขมันที่ไม่อยู่ในรูปของกลีเซอไรด์, กรดไขมันอิสระ, fatty alcohol, สารประกอบไฮโดรคาร์บอน, แอลกอฮอล์อย่างแข็ง, triterpene alcohol, สารประกอบแคโรทีน วิตามิน และอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบน้ำมันพืชเริ่มต้น โดยทั่วไปสิ่งปนเปื้อนทั้งหมดจะถูกกำจัดออกจากไบโอดีเซลในขั้นตอนการล้างน้ำ สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลมีผลเสียต่อเครื่องยนต์หลายด้าน เช่น คุณสมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซลระหว่างการเก็บรักษา เนื่องสารประกอบของสารที่ไม่สaponifiyable เปลี่ยนสภาพกลายเป็นสารที่มีผลในการลดคุณสมบัติด้านความเสถียรของไบโอดีเซล

## 10. การกักกรองแผ่นทองแดง

การกักกรองแผ่นทองแดง แสดงการกักกรองของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซล เนื่องจากปริมาณกรดเช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ในน้ำมัน ซึ่งค่าการกักกรองนี้มีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์

## 11. ค่าของกรด

แสดงความเป็นกรดในน้ำมันไบโอดีเซล เป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันอิสระในวัตถุดิบ น้ำมันพืชและปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งมีผลต่อการกักกรองในเครื่องยนต์ ทำให้อายุการใช้งานของปั๊ม และไส้กรองน้ำมันลดลง นอกจากนี้ยังแสดงถึงการเสื่อมสภาพของน้ำมัน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกจากปริมาณน้ำที่ปนอยู่ในน้ำมันและผลของสภาวะในการจัดเก็บ

## 12. กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์

แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซล ซึ่งมีแนวโน้มทำให้เกิดพอลิเมอร์ในเครื่องยนต์ ทำให้เกิดการอุดตัน และการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง ปริมาณกรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันพืชที่เลือกมาใช้เป็นวัตถุดิบ

## 13. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเนื่องจากการเกิดสารประเภทเพอร์ออกไซด์(peroxide linkage) ขึ้นระหว่างพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ที่อยู่ในโครงสร้างของไบโอดีเซล ปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดเมื่อน้ำมันสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ โดยที่ความร้อนและแสงแดดมีผลช่วยเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่โลหะเช่นทองแดง และตะกั่ว ก็เป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น ผลของปฏิกิริยาทำให้เกิดสารพอลิเมอร์(oxidation polymerization) และเกิดของแข็งที่ไม่ละลายในไบโอดีเซลเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากนี้จะขึ้นกับประเภทและคุณสมบัติของน้ำมันพืชที่เป็นวัตถุดิบแล้ว ยังขึ้นกับกระบวนการผลิตไบโอดีเซลอีกด้วย โดยกระบวนการผลิตที่มีการให้ความร้อนสูงแก่ไบโอดีเซลเป็นระยะเวลาอันยาวนาน อาจส่งผลให้เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดให้มีค่าสูงกว่า 6 ชั่วโมง ที่ 110 องศาเซลเซียส

#### 14. ค่าไอโอดีน

ค่าไอโอดีนแสดงพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของน้ำมันพืชที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล ค่าไอโอดีนต่ำแสดงถึงการมีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างไบโอดีเซลสูง ทำให้ไม่มีแนวโน้มในการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ค่าไอโอดีนยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่น ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไข หรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีจุดขุ่นสูง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานสภาพอากาศเย็น ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไอโอดีน 50-55 ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กำหนดให้ ค่าไอโอดีนไม่สูงกว่า 120 กรัมไอโอดีน/100 กรัม

#### 15. เมทานอล

เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไบโอดีเซลออกจำหน่าย จึงต้องมีปริมาณต่ำในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล จุดวาบไฟขั้นต่ำของไบโอดีเซลคือ 130 องศาเซลเซียส เมทานอลมีค่าจุดวาบไฟต่ำ ถ้ายังมีเมทานอลปะปนอยู่ในไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลมีจุดวาบไฟต่ำลงด้วย ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่งและการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ เมทานอล มีค่าความเข้มข้นมากกว่า 5% จะมีผลกระทบต่อค่าซีเทน และความหล่อลื่นของน้ำมัน

#### 16. โมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์

ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์แสดงถึงความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดการอุดตันบริเวณหัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์

#### 17. กลีเซอรินอิสระ

ปริมาณกลีเซอรินที่ยังเหลืออยู่ในไบโอดีเซล เนื่องมาจากการแยกกลีเซอรินไม่สมบูรณ์ ทำให้มีปัญหาการแยกชั้นของกลีเซอรินในการจัดเก็บไบโอดีเซล รวมถึงการสะสมที่บริเวณด้านล่างของถังน้ำมัน กลีเซอรินมีผลต่อการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน

## 18. ก๊าซเขอรันทั้งหมด

ก๊าซเขอรันทั้งหมดคือปริมาณของก๊าซเขอรันอิสระ และปริมาณก๊าซเขอรันในโมเลกุลโมโน ก๊าซเขอไรด์ ไดออกไซด์ และไตรออกไซด์ ที่เจือปนในองค์ประกอบไบโอดีเซล ซึ่งเป็นผลจากการ เกิดปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันไม่สมบูรณ์ มีผลก่อให้เกิดการอุดตันที่บริเวณหัวฉีดและไส้กรอง และปัญหาการใช้งานในสภาพอากาศอากาศเย็น

## 19. โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม), โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียม และแมกนีเซียม)

เป็นการวัดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่ และโลหะหนักจากน้ำที่ใช้ในขั้นตอนการล้าง ไบโอดีเซลที่หลงเหลือในผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซล แคลเซียมยังมีคุณสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี สำหรับกระบวนการพอลิเมอไรด์ของเอสเทอร์อีกด้วย ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของ ไบโอดีเซล ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน กำหนดให้ ปริมาณโลหะกลุ่ม 1 และโลหะกลุ่ม 2 ไม่สูงกว่าอย่างละ 5.0 มิลลิกรัม/กิโลกรัม

## 20. ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นสารที่ปนเปื้อนอยู่ในวัตถุดิบน้ำมันพืชตั้งแต่เริ่มต้น หากไม่ทำการกำจัดออก จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล จะทำให้ไบโอดีเซลที่ผลิตได้มีฟอสฟอรัสปะปนอยู่ด้วย ซึ่งจะท ามความเสียหายให้กับอุปกรณ์คะตะไลติกส์ คอนเวอร์เตอร์ (Catalytic converter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ ในการควบคุมการแพร่มลพิษจากการที่มาตรฐานของการแพร่มลพิษเป็นกฎข้อบังคับมากขึ้น อุปกรณ์ catalytic converter จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล

ภาคผนวก ข

## ภาคผนวก ข

## ตารางบันทึกผลการทดลองและวิธีการคำนวณ

## 1. ผลการหาอุณหภูมิที่เหมาะสม

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	น้ำหนักของ น้ำมัน (กรัม)	ไฮโดรคลอริก B ที่ใช้ไตเตรท (มิลลิลิตร)	ปริมาณ กลีเซอรอล (ppm)	ร้อยละของ กลีเซอรอล
Crude	0	3.09	13.4	11071.743	00.00
30	30	3.05	11.2	9375.358	84.68
	60	3.06	6.3	5256.405	47.48
	120	3.04	4.6	3863.260	34.89
	180	3.01	3.1	3629.450	32.78
40	30	3.12	12.0	9819.658	88.69
	60	3.05	9.3	7784.896	70.31
	120	3.02	4.4	3719.764	33.59
	180	3.01	3.4	2883.919	26.04
50	30	3.05	12.1	10128.735	91.48
	60	3.02	10.0	8454.010	76.35
	120	3.02	8.7	7354.989	66.42
	180	3.01	7.0	5937.467	53.62
60	30	3.00	12.0	10212.444	92.62
	60	3.07	10.0	8316.323	75.11
	120	3.05	8.2	6864.1017	61.99
	180	3.04	6.3	5290.987	47.78

## 2. ผลการหาระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม

เวลา (นาที)	สารดูด ซับ	ครั้งทดลอง	น้ำหนัก น้ำมัน (g)	HCl "B" ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)	ร้อยละ การดูดซับ กลีเซอรอล	
0	crude	1	5.24	11.3	6863.383	6822.055	00.00	
		2	5.21	11.1	6780.728			
10	Control	1	10.16	10.9	3414.474	3345.374	50.96	
		2	10.2	10.5	3276.274			
	NS	1	10.11	6.8	2140.666	2151.061	68.47	
		2	10.16	6.9	2161.456			
	HS	1	10.2	5.7	1778.549	1802.205	73.58	
		2	10.11	5.8	1825.862			
	AS	1	10.17	6.5	2034.152	2001.889	70.66	
		2	10.18	6.3	1969.626			
	HAS	1	10.26	4.7	1457.946	1466.573	78.502	
		2	10.14	4.7	1475.200			
	20	Control	1	10.16	9.6	3007.243	2994.516	56.11
			2	10.14	9.5	2981.788		
NS		1	10.18	6.6	2063.418	2044.801	68.47	
		2	10.21	6.5	2026.183			
HS		1	10.12	5.1	1603.913	1660.418	75.66	
		2	10.01	5.4	1716.923			
AS		1	10.2	5.8	1809.751	1691.290	75.21	
		2	10.32	5.1	1572.829			
HAS		1	10.21	4.7	1465.086	1509.561	77.87	
		2	10.24	5	1554.036			
30	Control	1	10.15	8.8	2759.356	277.721	59.72	
		2	10.12	8.7	2736.086			
	NS	1	10.24	6.3	1958.086	2016.869	70.44	
		2	10.12	6.6	2075.652			
	HS	1	10.09	5.3	1671.767	1693.955	75.17	
		2	10.2	5.5	1716.143			
	AS	1	10.47	5.2	1580.694	1562.380	77.10	
		2	10.1	4.9	1544.066			
	HAS	1	10.13	4.3	1350.984	1383.800	79.72	
		2	10.11	4.5	1416.617			

### 3. ผลการหาชนิดและปริมาณของตัวดูดซับที่เหมาะสม

ชนิดสารดูดซับ	ปริมาณสารดูดซับ	ครั้งที่ทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (g)	HCl "B" ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)	ร้อยละการดูดซับกลีเซอรอล
Crude	-	1	5.10	11.7	6637.3926	6209.2009	00.00
		2	5.06	10.1	5775.0091		
Control	-	1	10.05	16.8	4836.4315	4826.8306	22.23
		2	10.03	16.7	4817.2297		
NS	3	1	10.14	13.1	3737.7923	3722.0525	40.03
		2	10.07	12.9	3706.3127		
	5	1	10.10	11.4	3265.6174	3270.4817	47.30
		2	10.07	11.4	3275.3461		
	10	1	10.10	9.4	2692.7020	2953.6968	52.41
		2	10.08	11.2	3214.6916		
HS	3	1	10.10	10.5	3007.8055	2985.0255	51.90
		2	10.06	10.3	2962.2456		
	5	1	10.00	10	2893.2224	2766.9309	55.42
		2	10.08	9.2	2640.6395		
	10	1	10.08	8.5	2439.7213	2425.3700	60.92
		2	10.08	8.4	2411.0187		
AS	3	1	10.18	10.2	2898.9065	2894.6193	53.36
		2	10.01	10.0	2890.3321		
	5	1	10.15	8.7	2479.9049	2437.1479	60.73
		2	10.15	8.4	2394.3910		
	10	1	10.03	8.7	2509.5748	2288.0811	63.13
		2	10.08	7.2	2066.5874		
HAS	3	1	10.11	10.8	3245.2170	3243.6130	47.74
		2	10.12	10.8	3242.0100		
	5	1	10.04	9.9	2995.5230	2944.3720	52.26
		2	10.08	9.6	2893.2220		
	10	1	10.11	9.3	2794.4920	2797.262	54.93
		2	10.09	9.3	2800.0310		

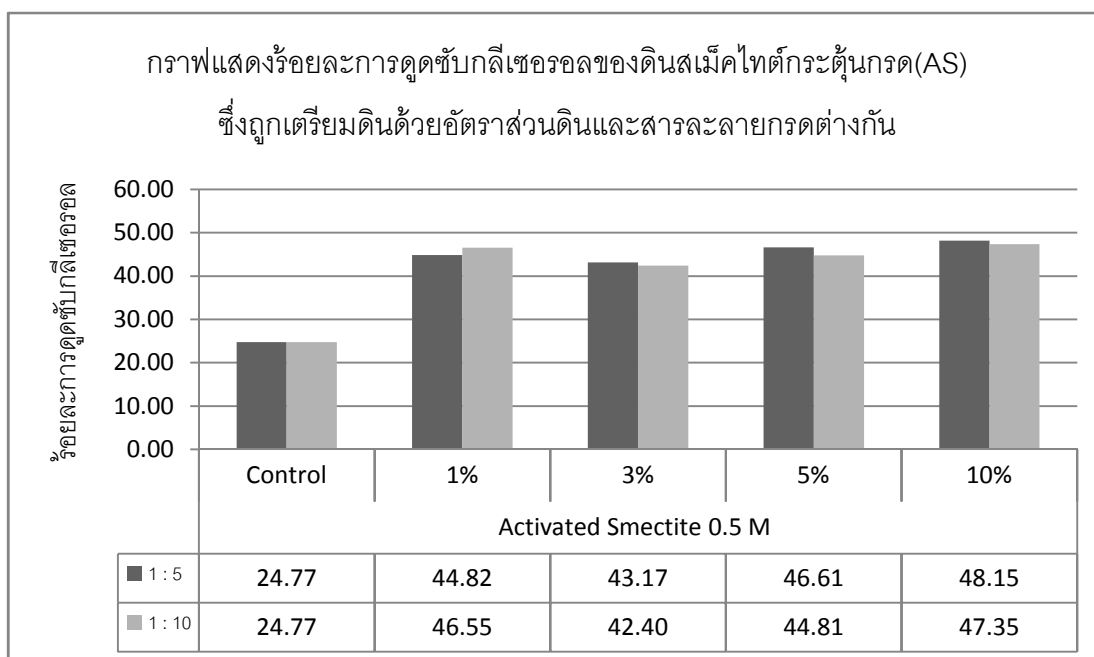


#### 4. การหาสภาวะเหมาะสมในการกระตุ้นดินดูดซับด้วยกรด

##### 4.1 การหาความเข้มข้นของกรดที่เหมาะสม

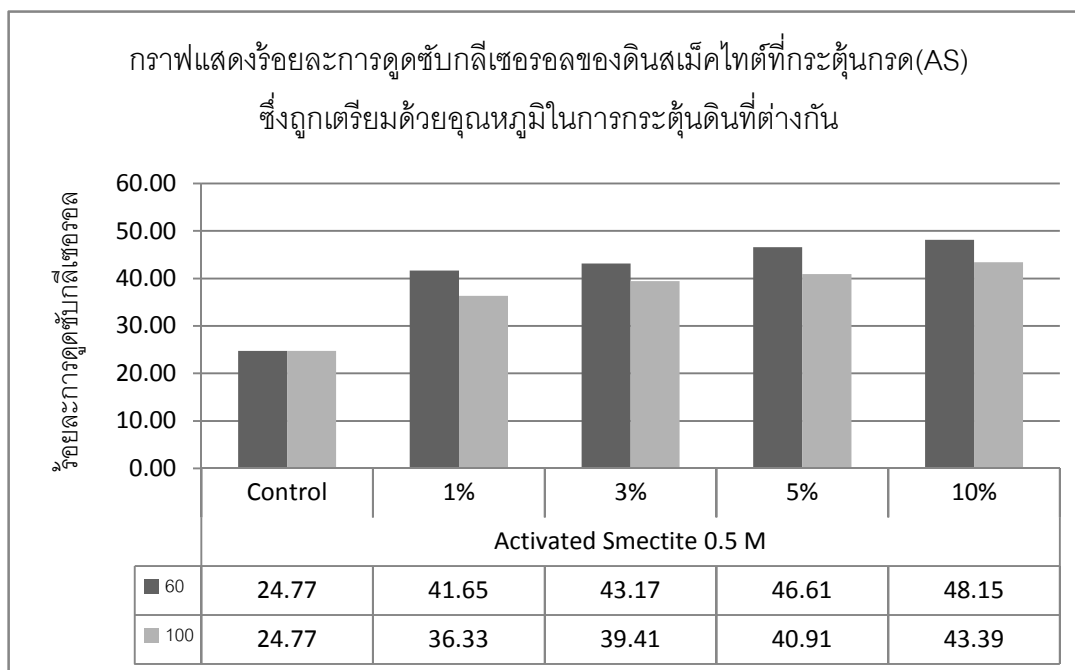
ชนิดสารดูดซับ	ปริมาณสารดูดซับ	ครั้งที่ทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (g)	HCl "B" ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)	ร้อยละการดูดซับกลีเซอรอล
Crude	-	1	5.09	9.3	5021.9293	5286.4726	00.00
		2	5.10	10.3	5551.0159		
Control	-	1	10.09	14.1	3840.9033	3957.9423	25.13
		2	10.05	14.9	4074.9814		
AS 0.1 M	3	1	10.18	13.0	3509.9506	3397.5418	35.73
		2	10.04	12.0	3285.1330		
	5	1	10.24	11.5	3086.7632	3153.8667	40.34
		2	10.24	12.0	3220.9703		
	10	1	10.13	11.6	3147.4147	3035.4174	42.58
		2	10.06	10.7	2923.4200		
AS 0.3 M	3	1	10.13	11.9	3228.8133	3277.2862	38.01
		2	10.00	112.1	3325.7591		
	5	1	10.11	10.4	2827.4023	2969.4906	43.83
		2	10.07	11.4	3111.5788		
	10	1	10.07	11.1	3029.6952	2960.7476	43.99
		2	10.17	10.7	2891.8000		
AS 0.5 M	3	1	10.12	12.2	3313.4830	3183.7200	39.78
		2	10.26	11.4	3053.9570		
	5	1	10.21	10.6	2853.5504	2956.7894	44.07
		2	10.06	11.2	3060.0285		
	10	1	10.14	9.8	2656.4004	2557.3380	51.62
		2	10.51	9.4	2458.2756		

#### 4.2 ผลการหาอัตราส่วนระหว่างดินและกรดที่เหมาะสม



ภาพที่ ข1 แผนภาพแสดงผลการหาอัตราส่วนระหว่างดินและกรดที่เหมาะสมในการกระตุ้นดิน

#### 4.3 ผลการหาอุณหภูมิในการกระตุ้นที่เหมาะสม



ภาพที่ ข2 แผนภาพแสดงผลการหาอุณหภูมิในการกระตุ้นที่เหมาะสม

### 5. การหาระยะเวลาการตกตะกอนภายหลังการดูดซับที่เหมาะสม

เวลา ตกตะกอน	สารดูด ซับ	ครั้งทดลอง	น้ำหนัก น้ำมัน (g)	HCl "B" ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)	ร้อยละ การดูดซับ กลีเซอรอล	
15 นาที	Crude	1	5.03	6.8	4019.1054	4011.1468	00.00	
		2	5.05	6.8	4003.1882			
	Control	1	10.04	10.1	2990.7226	3119.1207	22.24	
		2	10.07	11.0	3247.5189			
	1	1	10.02	9.8	2907.6814	2965.2645	26.07	
		2	10.13	10.3	322.8476			
	3	1	10.11	9.0	2646.5483	2658.6097	33.72	
		2	10.13	9.1	2670.6712			
	5	1	10.21	9.3	2707.9814	2591.4946	35.39	
		2	10.09	8.4	2475.0079			
	10	1	10.05	7.1	2100.2972	2285.2045	43.03	
		2	10.11	8.4	2470.1117			
	2 ชม.	Crude	1	5.16	11.8	6798.6201	6630.7839	00.00
			2	5.06	11.0	6462.9477		
Control		1	10.07	10.6	3129.4273	3077.6309	53.59	
		2	10.12	10.3	3025.8346			
1		1	10.16	7.8	2282.3874	2123.3833	67.98	
		2	10.14	6.7	1964.3792			
3		1	10.06	6.8	2009.5527	1985.0325	70.06	
		2	10.16	6.7	1960.5123			
5		1	10.10	6.2	1824.9828	1872.9394	71.75	
		2	10.06	6.5	1920.8960			
10		1	10.05	6.1	1804.4807	1689.2866	74.52	
		2	10.01	5.3	1574.0925			

## 6. การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ภายใต้สภาวะที่มีเมทานอล และไม่มีเมทานอล

สภาวะ	สารดูดซับ	ครั้งทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (g)	HCl "B" ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)	ร้อยละการดูดซับกลีเซอรอล
Crude	-	1	5.08	8.8	5150.0024	5014.6406	00.00
		2	5.24	8.6	4879.2788		
มีเมทานอล	Control	1	10.05	6.7	1981.9706	1874.9167	62.61
		2	10.09	6.0	1767.8628		
	10% AS	1	10.10	5.3	1560.0660	1535.1164	69.39
		2	10.04	5.1	1510.1669		
ไม่มีเมทานอล	Control	1	10.10	5.3	1560.0660	1665.5765	60.20
		2	10.15	8.3	2431.0871		
	10% As	1	10.09	3.1	913.3958	1088.3041	78.30
		2	10.12	4.3	1263.2125		

## 7. การศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์

สารดูดซับ	ปริมาณสารดูดซับ	ครั้งทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (g)	HCl "B" ที่ใช้ (ml)	กลีเซอรอล (ppm)	กลีเซอรอลเฉลี่ย (ppm)	ร้อยละการดูดซับกลีเซอรอล
Crude	-	1	5.09	6.8	3971.7289	3822.1019	00.00
		2	5.10	6.3	3672.4750		
Control	0	1	10.04	3.5	1036.3890	977.6244	74.42
		2	10.03	3.1	918.8598		
Activated smectite	10%	1	10.04	0.4	118.4445	133.4719	96.51
		2	10.01	0.5	148.4995		
Activated smectite	15%	1	10.01	0.1	29.6999	29.6408	99.22
		2	10.05	0.1	29.5817		
Activated carbon	10%	1	10.01	0	0	00.00	100.00
		2	10.04	0	0		

## 8. การวิเคราะห์ไอโซโทมของการดูดซับ

ชนิดสารดูดซับ	ปริมาณสารดูดซับ	ครั้งที่ทดลอง	น้ำหนักน้ำมัน (g)	HCl "B" ที่ใช้ (ml)	กัมมันตภาพรังสี (ppm)
Crude		1	5.00	8.6	4861.8173
		2	5.03	7.8	
Control		1	5.09	5.9	3309.3893
		2	5.06	5.4	
AS	1%	1	5.01	3.2	1898.8940
		2	5.02	3.1	
	2%	1	5.03	3.1	1832.2392
		2	5.03	3.1	
	3%	1	5.04	3.1	1797.3581
		2	5.05	3.0	
	4%	1	5.03	3.0	1780.2131
		2	5.01	3.0	
	5%	1	5.02	3.0	1720.8727
		2	5.01	2.9	
	6%	1	5.02	3.0	1700.5308
		2	5.00	2.9	
	7%	1	5.03	2.9	1684.4780
		2	5.03	2.8	
	8%	1	5.02	2.8	1658.2224
		2	5.01	2.8	
	9%	1	5.04	2.7	1592.6550
		2	5.00	2.7	
	10%	1	5.02	2.8	1507.4749
		2	5.02	2.7	

### 9. การคำนวณค่าคงที่จากไอโซเทอมของการดูดซับ

Weigh of adsorbent (g)	ce (mg/l)	co-ce (mg/l)	x/m (mg/g)	log(x/m)	log(Ce)	1/Ce	1/(X/m)
0	4861.817	0	0	0	0	0	0
0.3	1898.894	2962.923	260.7372	2.416203	3.278501	0.000527	0.003835
0.6	1832.239	3029.578	133.3014	2.124835	3.262982	0.000546	0.007502
0.9	1797.358	3064.459	89.89079	1.953715	3.254635	0.000556	0.011125
1.2	1780.213	3081.604	67.79529	1.831199	3.250472	0.000562	0.01475
1.5	1720.873	3140.944	55.28062	1.742573	3.235749	0.000581	0.01809
1.8	1700.531	3161.286	46.36553	1.666195	3.230585	0.000588	0.021568
2.1	1684.478	3177.339	39.94369	1.601448	3.226465	0.000594	0.025035
2.4	1658.222	3203.595	35.23954	1.54703	3.219643	0.000603	0.028377
2.7	1592.655	3269.162	31.96514	1.504677	3.202122	0.000628	0.031284
3	1507.475	3354.342	29.51821	1.47009	3.17825	0.000663	0.033877

หมายเหตุ : เมื่อค่า Vs เท่ากับ 0.0264

### 10. การคำนวณปริมาณกลีเซอรอลอิสระและกลีเซอรอลจากเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

#### 10.1 สูตรการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรอลอิสระ

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

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

## 9.2 สูตรการคำนวณหาปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์

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

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

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

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

## 9.3 สูตรการคำนวณหาปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมด

$$GT = G + 0.255 M + 0.146 D + 0.103 T$$

เมื่อ :  $GT$  = ร้อยละของปริมาณกลีเซอรอลทั้งหมด

$G$  = ร้อยละของกลีเซอรอลอิสระในตัวอย่าง

$M$  = ร้อยละของโมโนกลีเซอไรด์ในตัวอย่าง

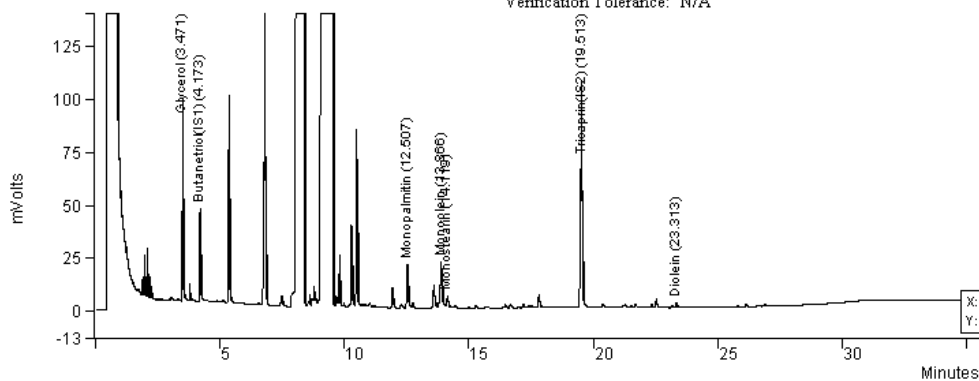
$D$  = ร้อยละของไดกลีเซอไรด์ในตัวอย่าง

$T$  = ร้อยละของไตรกลีเซอไรด์ในตัวอย่าง

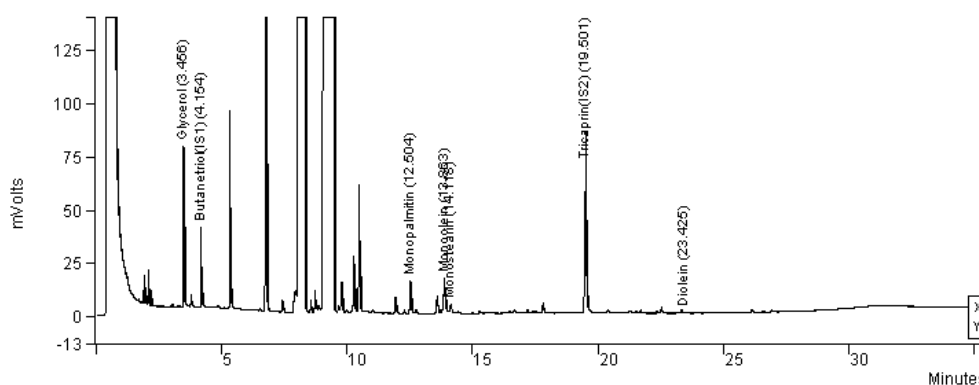
# Environmental Science, Chulalongkorn U.

Data File: c:\star\joe\ppt\_glycerin\g4 10%as.2  
 Channel: Front = FID RESULTS  
 Sample ID: g4 10%as.2  
 Operator (In): ton  
 Injection Date: 28/03/2012 11:06:05  
 Injection Method: c:\star\ven14105.mth  
 Run Time (min): 35.775  
 Workstation:  
 Instrument (In): gc

Operator (Calc): ton  
 Calc Date: 28/03/2012 12:06:15  
 Times Calculated: 10  
 Calculation Method: g4 10%as.2 11:06:05 am-front.mth  
 Instrument (Calc): gc  
 Run Mode: Analysis  
 Peak Measurement: Peak Area  
 Calculation Type: Percent  
 Calibration Level: N/A  
 Verification Tolerance: N/A



Peak No	Peak Name	Result (%)	Ret Time (min)	Time Offset (min)	Peak Area (counts)	Rel Ret Time	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes	Group
1	Glycerol	17.5352	3.471	-0.029	174263	0.00	PB	1.5		0
2	Butanetriol(IS1)	9.7167	4.173	-0.027	96564	0.00	BB	1.8		0
3	Monopalmitin	0.6519	12.507	0.007	6478	0.00	BB	0.5		0
4	Monolein	12.1166	13.866	-0.034	120413	0.00	VV	4.4		0
5	Monostearin	2.7230	14.119	-0.081	27061	0.00	VB	4.2		0
6	Tricaprin(IS2)	46.1629	19.513	-0.289	458762	0.00	BB	3.8		0
7	Diolein	0.6243	23.313	-0.188	6204	0.00	PB	3.7		0
<b>Totals</b>		<b>89.5306</b>		<b>-0.641</b>	<b>889745</b>					



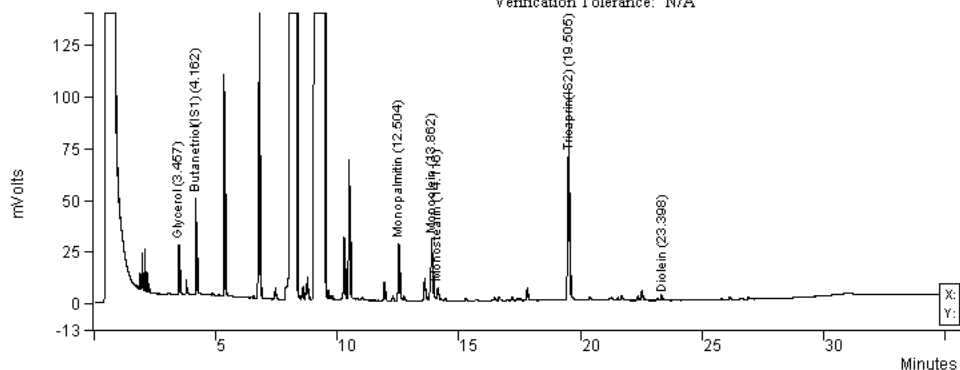
Peak No	Peak Name	Result (%)	Ret Time (min)	Time Offset (min)	Peak Area (counts)	Rel Ret Time	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes	Group
1	Glycerol	17.4303	3.456	-0.044	129242	0.00	BB	1.4		0
2	Butanetriol(IS1)	9.6898	4.154	-0.046	71848	0.00	BB	1.5		0
3	Monopalmitin	0.3358	12.504	-0.096	2490	0.00	BB	0.3		0
4	Monolein	12.1238	13.863	-0.037	89896	0.00	VV	4.3		0
5	Monostearin	2.7824	14.118	-0.082	20631	0.00	VB	4.1		0
6	Tricaprin(IS2)	46.4817	19.501	-0.301	344652	0.00	BB	3.6		0
7	Diolein	0.0567	23.425	-0.175	420	0.00	VB	0.0		0
<b>Totals</b>		<b>88.9005</b>		<b>-0.781</b>	<b>659179</b>					

ภาพที่ ๓3 ผลการวิเคราะห์การดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ภายใต้สภาวะมีเมทานอล

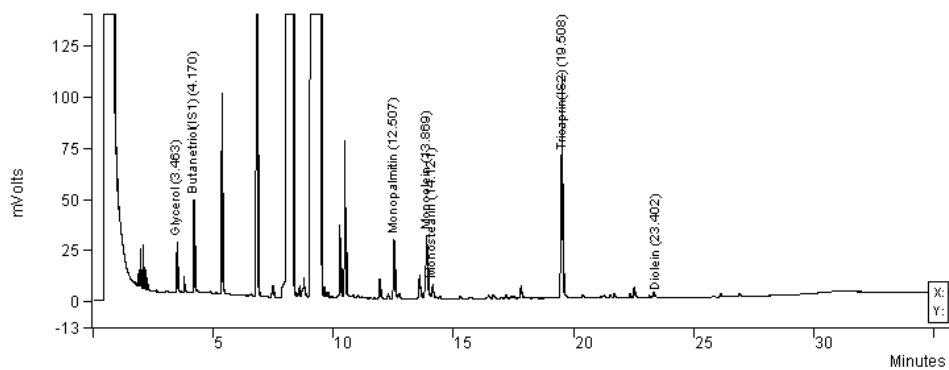


# Environmental Science, Chulalongkorn U.

Data File: c:\star\joe\ptt glycerin\g5 10%as.3 Operator (Calc): ton  
 Channel: Front = FID RESULTS Calc Date: 28/03/2012 16:43:36  
 Sample ID: g5 10%as.3 Times Calculated: 12  
 Operator (Inj): ton Calculation Method: g5 10%as.3 3,46;28 pm-front.mth  
 Injection Date: 28/03/2012 15:46:28 Instrument (Calc): gc  
 Injection Method: c:\star\en14105.mth Run Mode: Analysis  
 Run Time (min): 35.773 Peak Measurement: Peak Area  
 Workstation: Calculation Type: Percent  
 Instrument (Inj): gc Calibration Level: N/A  
 Verification Tolerance: N/A



Peak No	Peak Name	Result (%)	Ret Time (min)	Time Offset (min)	Peak Area (counts)	Rel Ret Time	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes	Group
1	Glycerol	5.0133	3.457	-0.043	44710	0.00	BB	1.5		0
2	Butanetriol (IS1)	10.8682	4.162	-0.038	96925	0.00	BB	1.6		0
3	Monopalmitin	0.6079	12.504	-0.096	5422	0.00	BB	0.2		0
4	Monoolein	18.2253	13.862	-0.038	162537	0.00	VV	4.4		0
5	Monostearin	3.3715	14.116	-0.084	30067	0.00	VB	4.1		0
6	Tricaprin (IS2)	48.8597	19.505	-0.297	435741	0.00	BB	3.8		0
7	Diolein	0.1830	23.398	-0.202	1632	0.00	VB	5.4		0
<b>Totals</b>		<b>87.1289</b>		<b>-0.798</b>	<b>777034</b>					



Peak No	Peak Name	Result (%)	Ret Time (min)	Time Offset (min)	Peak Area (counts)	Rel Ret Time	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes	Group
1	Glycerol	5.0960	3.463	-0.037	47133	0.00	BB	1.5		0
2	Butanetriol (IS1)	10.4247	4.170	-0.030	96418	0.00	BB	1.8		0
3	Monopalmitin	0.8001	12.507	-0.093	7400	0.00	BB	0.4		0
4	Monoolein	18.2885	13.869	-0.031	169149	0.00	VV	4.4		0
5	Monostearin	3.3823	14.121	-0.079	31283	0.00	VB	4.0		0
6	Tricaprin (IS2)	48.9661	19.508	-0.294	452886	0.00	BB	3.7		0
7	Diolein	0.3073	23.402	-0.098	2842	0.00	VB	0.0		0
<b>Totals</b>		<b>87.2650</b>		<b>-0.662</b>	<b>807111</b>					

ภาพที่ ๗4 ผลการวิเคราะห์การดูดซับด้วยดินสเม็คไทต์ภายใต้สภาวะไม่มีเมทานอล

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอามีนีย์ บริบูรณ์สุข เกิดเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดนราธิวาส สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดปัตตานี ในปีการศึกษา 2547 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี จากหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2551 จากนั้นเข้าศึกษาต่อ ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ผลงานในงานประชุมวิชาการเคมีและเคมีประยุกต์นานาชาติ (Pure and Applied Chemistry International Conference: PACCON 2012) ซึ่งจัดขึ้น ณ จังหวัดเชียงใหม่