

การกำจัดโมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัวในไบโอดีเซลด้วยการดูดซับและผลต่อสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ  
ของน้ำมันไบโอดีเซลผสม



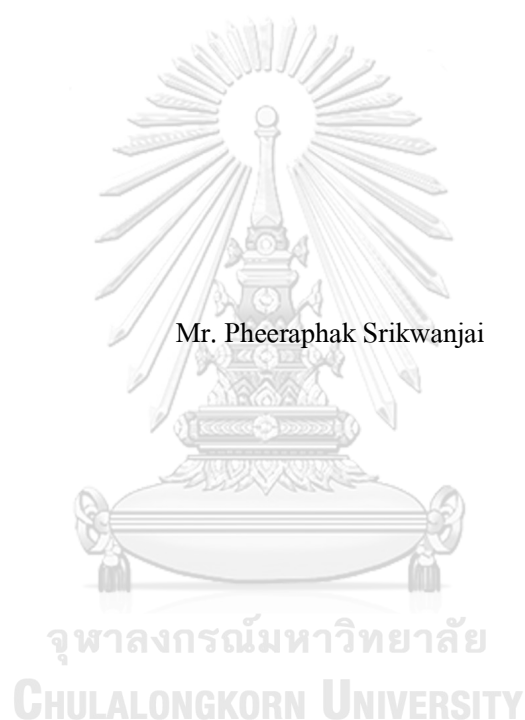
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF SATURATED MONOGLYCERIDE IN BIODIESEL USING ADSORPTION  
AND ITS EFFECT ON LOW-TEMPERATURE PROPERTIES OF BIODIESEL BLENDS



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

Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University





# # 5972408523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Saturated monoglyceride, Natural zeolite, Biodiesel

Pheeraphak Srikwanjai : REMOVAL OF SATURATED MONOGLYCERIDE IN BIODIESEL USING ADSORPTION AND ITS EFFECT ON LOW-TEMPERATURE PROPERTIES OF BIODIESEL BLENDS. Advisor: Assoc. Prof. Chawalit Ngamcharussrivichai, Ph.D.

Saturated monoglyceride (SMG) is a main cause of precipitate formed above cloud point of biodiesel (B100), which leads to filter plugging in diesel engine. In this work, we studied the effect of SMG content (0.0–0.7 wt%) of B100 on the cloud point (CP) of diesel fuels blended with B100 at different concentrations (B7, B10 and B20). Euro 4 and Euro 5 diesels with a high and low aromatic content were used, respectively. The effect of SMG concentration on CP of biodiesel blends was more pronounced in case of a low aromatic Euro 5 diesel. An extent of CP change was also affected by low concentration of SMG in biodiesel blends. An adsorptive removal of SMG in B100 was investigated by using natural zeolite as much cheaper adsorbents than commercial magnesium silicate (MS) and silica gel. Both MS and silica gel exhibited higher performance than natural zeolite in the SMG removal at 45 °C. To improve the SMG adsorption capacity, the natural zeolite, NZ-325m, was treated with 1 M nitric acid solution at 60 °C for 6 hours. Due to dealumination effect, the surface area of modified zeolite has increased to 141.85 m<sup>2</sup>/g and SiO<sub>2</sub> content has also increased as measured by X-ray fluorescence spectroscopy. Moreover, the result showed that the capacity of SMG adsorption was 38.0 mg<sub>SMG</sub>/g<sub>ads</sub>, corresponding to a decrease of SMG content of B100 from 0.7 wt% to 0.5 wt%, when using 5 wt% adsorbent loading at 45 °C for 50 min. As a result, an increase in the cloud point of B7 was significantly retarded.

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science      Student's Signature .....

Academic Year: 2019      Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการให้ความช่วยเหลือแนะนำของ รศ. ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาที่ให้คำแนะนำข้อคิดเห็นตรวจสอบ และแก้ไขร่างวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน อีกด้วย จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ สถาบันนวัตกรรม ปตท. ที่เอื้อเฟื้อตัวอย่างน้ำมัน เครื่องมือวิเคราะห์และสถานที่ ในการค้นคว้าและดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะจากพี่ๆพนักงานที่มีต่อ งานวิจัยนี้ ตลอดจนการช่วยเหลือและกำลังใจจากพี่ๆผู้ช่วยนักวิจัยทุกคน

คุณค่าและประโยชน์จากการค้นคว้าอันพึงมีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอให้เป็นที่กตเวทิตาแต่ บิดา มารดา ครอบครัวของผู้วิจัย ตลอดจนผู้เขียนหนังสือ และบทความต่าง ๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยจน สามารถให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

พระภักดิ์ ศรีขวัญใจ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

	หน้า
.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ .....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	17
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	17
1.2 วัตถุประสงค์.....	18
1.3 ขอบเขตในการศึกษา.....	18
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย .....	18
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	18
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	20
2.1 ไบโอดีเซล .....	20
2.1.1 ไบโอดีเซลคืออะไร .....	20
2.1.2 บทบาทของการใช้งานไบโอดีเซลในประเทศไทย .....	20
2.1.3 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลในประเทศไทย .....	22
2.1.3.1 เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Esters).....	24
2.1.3.2 ความหนาแน่น (Density) .....	25
2.1.3.3 ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (Viscosity at 40 °C).....	25
2.1.3.4 จุดวาบไฟ (Flash Point).....	25

2.1.3.5 กำมะถัน (Sulphur).....	25
2.1.3.6 คากถ่าน (Carbon residue on 10% distillation residue) .....	26
2.1.3.7 จำนวนซีเทน (Cetane number).....	26
2.1.3.8 เถ้าซัลเฟต (Sulphated ash) .....	26
2.1.3.9 น้ำ (Water).....	26
2.1.3.10 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contamination) .....	26
2.1.3.11 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion) .....	27
2.1.3.12 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C (Oxidation stability at 110 °C).....	27
2.1.3.13 ค่าความเป็นกรด (Acid value) .....	27
2.1.3.14 ค่าไอโอดีน (Iodine value).....	27
2.1.3.15 กรดลินolenic เมทิลเอสเทอร์ (Linolenic acid methyl ester).....	27
2.1.3.16 เมทานอล (Methanol).....	27
2.1.3.17 โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ (Monoglyceride, Diglyceride, Triglyceride) .....	28
2.1.3.18 กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin).....	28
2.1.3.19 กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin) .....	28
2.1.3.20 โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโปแตสเซียม) (Group I metals; Na + K) และ โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (Group II metals; Ca + Mg).....	28
2.1.3.21 ฟอสฟอรัส (Phosphorus) .....	28
2.1.3.22 จุดขุ่น (Cloud point, CP) .....	29
2.1.3.23 จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold flow plugging point, CFPP) .....	29
2.1.3.24 สารเติมแต่ง (Additives) .....	29
2.2 การใช้งานไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำ.....	29

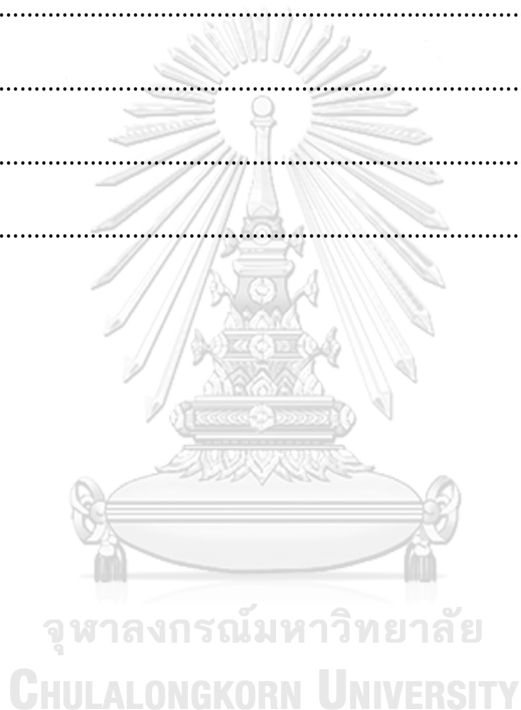


2.2.1 สมบัติของไบโอดีเซลที่มีผลต่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ.....	29
2.2.2 กลไกการเกิดตะกอนในไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำ .....	29
2.2.3 สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่มีผลต่อการเกิดตะกอนในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ .....	32
2.3 ซีโอไลต์.....	33
2.3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของซีโอไลต์ .....	33
2.3.2 โครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์ .....	34
2.3.2.1 ระบบ 1 มิติ (One-dimensional system).....	34
2.3.2.2 ระบบ 2 มิติ (Two-dimensional System).....	34
2.3.2.3 ระบบ 3 มิติ (Tree-dimensional System).....	34
2.3.3 หน่วยโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์.....	34
2.3.4 ความมีขั้วของซีโอไลต์.....	37
2.3.5 แหล่งที่มาของซีโอไลต์.....	37
2.3.5.1 ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural zeolite).....	37
2.3.5.2 ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Synthetic Zeolite).....	37
2.3.6 โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ธรรมชาติ .....	37
2.4 ทฤษฎีการดูดซับ.....	40
2.4.1 ประเภทของการดูดซับ .....	40
2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption).....	40
2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) .....	41
2.4.2 ชนิดของไอโซเทิร์มในการดูดซับ.....	42
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	43
บทที่ 3 วิธีการวิจัย .....	47
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์.....	47
3.1.1 น้ำมันเชื้อเพลิง.....	47

3.1.2	ตัวดูดซับ.....	47
3.1.2.1	ตัวดูดซับเกรดการค้า .....	47
3.1.2.2	ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural Zeolite).....	47
3.1.3	สารเคมี .....	48
3.1.4	อุปกรณ์.....	48
3.1.5	เครื่องมือวิเคราะห์.....	49
3.2	สถานที่ทำการวิจัย.....	50
3.3	วิธีดำเนินการวิจัย .....	50
3.3.1	การศึกษาผลกระทบของ SMG ที่มีผลต่อจุดขุ่นในน้ำมันไบโอดีเซลผสม.....	51
3.3.1.1	การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน B100 และ B0 (มาตรฐานยูโร4 และ ยูโร5) เริ่มต้น .....	51
3.3.1.2	การเตรียมสารละลาย SMG ใน B100 ที่มีความเข้มข้นต่างๆ.....	52
3.3.1.3	การเตรียมไบโอดีเซลผสม B7, B10 และ B20.....	54
3.3.1.3.1	การเตรียม B7 มาตรฐานยูโร4 และ ยูโร5 .....	54
3.3.1.3.2	การเตรียม B10 มาตรฐานยูโร4 และ ยูโร5 .....	54
3.3.1.3.3	การเตรียม B20 มาตรฐานยูโร4 และ ยูโร5 .....	55
3.3.1.4	การวิเคราะห์จุดขุ่น (Cloud point).....	57
3.3.2	การพัฒนาตัวดูดซับจากซีโอไลต์ธรรมชาติ .....	58
3.3.2.1	การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ .....	58
3.3.2.2	เปรียบเทียบการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติเทียบกับตัวดูดซับเกรดการค้า.....	59
3.3.2.3	การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการตัดแปรตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	60
3.3.2.4	การหาเวลาที่เหมาะสมในการตัดแปรตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ .....	62
3.3.2.5	การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ .....	63

3.3.2.6 การประเมินประสิทธิภาพของการดูดซับ .....	65
3.3.2.6.1 ความจุการดูดซับ (Adsorption capacity).....	65
3.3.2.6.2 การเลือกจำเพาะ (Selectivity) ในการดูดซับ SMG ใน B100 .....	65
3.3.2.7 การศึกษาสมบัติของไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสมหลังการดูดซับ.....	66
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	67
4.1 ผลการศึกษาผลกระทบของ SMG ที่มีผลต่อจุดขุ่นในน้ำมัน ไบโอดีเซลผสม .....	67
4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติน้ำมัน B100 และ B0 มาตรฐานยูโร4 และยูโร5.....	67
4.1.2 ผลการเตรียมสารละลาย SMG ใน B100 ที่มีความเข้มข้นต่างๆ.....	69
4.1.3 ลักษณะทางกายภาพของน้ำมัน ไบโอดีเซลผสม B7, B10 และ B20 .....	70
4.1.3 ผลกระทบของ SMG ที่มีต่อจุดขุ่นในน้ำมันไบโอดีเซลผสม .....	73
4.2 ผลการศึกษาการกำจัด SMG ใน B100 โดยใช้ตัวดูดซับเกรดการค้าเทียบกับซีโอไลต์ธรรมชาติ .....	75
4.2.1 สมบัติของตัวดูดซับเริ่มต้น .....	75
4.2.2 ความสามารถในการดูดซับ SMG ของตัวดูดซับเกรดการค้าเทียบกับซีโอไลต์ธรรมชาติ.....	78
4.3 ผลการศึกษาการใช้กระบวนการบำบัดด้วยกรดในการตัดแปรตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ 79	
4.3.1 สมบัติของตัวดูดซับซีโอไลต์หลังการตัดแปรด้วยกระบวนการบำบัดด้วยกรดในตริก .....	79
4.3.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์หลังการตัดแปรด้วยกระบวนการบำบัดด้วยกรดในตริก.....	82
4.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	83
4.5 ผลการศึกษาการเลือกจำเพาะในการดูดซับ SMG ใน B100 ของตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ .....	86
4.6 สมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำของไบโอดีเซลผสมหลังใช้ B100 ที่ผ่านการดูดซับ SMG โดย NZ-325m_60C6hr.....	87

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	89
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.1.1 ผลกระทบของ SMG ที่มีต่อจุดชุนในน้ำมันไบโอดีเซลผสม.....	89
5.1.2 การกำจัด SMG ใน B100 โดยใช้ตัวดูดซับเกรดการค้าเทียบกับซีโอไลต์ธรรมชาติ....	89
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	90
บรรณานุกรม.....	92
ภาคผนวก ก.....	95
ภาคผนวก ข.....	100
ภาคผนวก ค.....	108
ประวัติผู้เขียน .....	117



## สารบัญตาราง

### หน้า

ตารางที่ 2-1 สถานภาพและเป้าหมายการผลิตเชื้อเพลิงในภาคขนส่งจากพลังงานทดแทน [2].....	22
ตารางที่ 2-2 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน [3] .....	23
ตารางที่ 2-3 สมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ [7].....	31
ตารางที่ 2-4 สมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่างๆของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ [6].....	31
ตารางที่ 2-5 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดต่างๆ [8] .....	38
ตารางที่ 3-1 หัวข้อการทดสอบสมบัติของ B100 เริ่มต้น .....	51
ตารางที่ 3-2 หัวข้อการทดสอบสมบัติของ B0 มาตรฐานยูโร 4 และ ยูโร 5 เริ่มต้น .....	52
ตารางที่ 3-3 น้ำหนัก SMG powder ที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย SMG ใน B100 ที่มีความเข้มข้น 0.1-0.7 wt%.....	52
ตารางที่ 3-4 ชื่อตัวอย่างไบโอดีเซลผสมที่ถูกเตรียมสำหรับวิเคราะห์จุดขุ่น .....	57
ตารางที่ 3-5 จำนวนการดูดซับเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ .....	64
ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของ B100 ที่ใช้ในงานวิจัย .....	68
ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของดีเซล (B0) ยูโร 4 และ ยูโร 5 .....	69
ตารางที่ 4-3 ความเข้มข้นที่แน่นอนของ SMG ใน B100 ช่วงความเข้มข้น 0.0-0.7 wt%.....	69
ตารางที่ 4-4 องค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัย .....	78
ตารางที่ 4-5 ประสิทธิภาพในการดูดซับ SMG ใน B100 ที่มีความเข้มข้น SMG เริ่มต้นเท่ากับ 0.71 wt% โดยใช้ตัวดูดซับ 5 wt% และใช้เวลาในการดูดซับ 50 นาที เทียบกับลักษณะรูพรุนของ ตัวดูดซับ.....	79
ตารางที่ 4-6 ความจุการดูดซับของการดูดซับ SMG โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติเทียบกับ ตัวดูดซับทางการค้า .....	86
ตารางที่ 4-7 ความจุการดูดซับสารปนเปื้อนใน B100 และการเลือกจำเพาะในการดูดซับ SMG ของ ตัวดูดซับ.....	87

ตารางที่ 4-8 องค์ประกอบของ B100 ก่อนและหลังดูดซับด้วย NZ-325m\_6hr ที่ 5wt% และใช้เวลาในการดูดซับ 50 นาที รวมถึงสมบัตการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำของ B7 ยูโร 5 ที่ใช้ B100 เหล่านี้ .....88



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์.....	20
รูปที่ 2-2 แผนการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 [2] .....	22
รูปที่ 2-3 กระบวนการเกิดผลึกน้ำมันในไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำ [5].....	30
รูปที่ 2-4 ผลกระทบของชนิดกรดไขมันในไบโอดีเซลที่มีต่อสมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำและ .....	30
รูปที่ 2-5 โครงสร้างของ Monopalmitin ซึ่งเป็น โมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัว (Saturated monoglyceride ; SMG).....	32
รูปที่ 2-6 โครงสร้างของ Monoolein ซึ่งเป็น โมโนกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated monoglyceride ; UMG).....	32
รูปที่ 2-7 หน่วยโครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์ [8] .....	33
รูปที่ 2-8 รูพรุนแบบ 1 มิติ ของ Analcime [9] .....	34
รูปที่ 2-9 รูพรุนแบบ 2 มิติ (a) ใน Mordenite (b) ใน Natrolite .....	34
รูปที่ 2-10 โครงสร้างแบบทุดิยุมิในซีโอไลต์ [8].....	35
รูปที่ 2-11 การรวมกันของหน่วยปฐมภูมิ ( $\text{SiO}_4$ ) <sup>4-</sup> เป็นโครงสร้างแบบทุดิยุมิที่มีลักษณะเป็นกรง [10].....	36
รูปที่ 2-12 การพัฒนาโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ (a) หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (PBUs) ของ ( $\text{SiO}_4$ ) <sup>4-</sup> หรือ ( $\text{AlO}_4$ ) <sup>5+</sup> ผ่าน (b) หน่วยโครงสร้างทุดิยุมิ (SBUs) และ (c) หน่วยโครงสร้างตุดิยุมิ (TBUs) ไปยัง (d) โครงสร้างของซีโอไลต์ [10].....	36
รูปที่ 2-13 รูพรุนของ Clinoptilolite ชนิด A, B และ C (เรียงจากซ้ายไปขวา) [8].....	39
รูปที่ 2-14 การจัดเรียงตัวของรูพรุนชนิด A, B และ C ในโครงสร้างผลึก Clinoptilolite [12].....	39
รูปที่ 2-15 โครงสร้างผลึกและรูพรุนของซีโอไลต์ธรรมชาติที่สำคัญ [8] .....	39
รูปที่ 2-16 แผนภาพแสดงพลังงานของการดูดซับที่ขึ้นกับระยะทางของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจากพื้นผิว เส้นทึบแสดงถึงการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานต่ำ ( $\Delta H_p$ )	

และเส้นประแสดงถึงการดูดซับแบบทางเคมี เมื่อพลังงานที่ต้องการสูงกว่า ( $\Delta H_c$ ) รูปทางด้านซ้าย แสดงในกรณีที่มีการกระตุ้นพลังงานในการดูดซับทางเคมี (Ea,c) [13] .....	41
รูปที่ 2-17 ไอโซเทิร์ม 6 ชนิดที่จำแนกตาม IUPAC (I) Microporous; (II และ III) Macroporous; (IV และ V) Mesoporous; และ (VI) Non-porous material [14] .....	42
รูปที่ 3-1 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง .....	48
รูปที่ 3-2 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย.....	50
รูปที่ 3-3 ตัวอย่างโครมาโตแกรมของสารละลาย SMG ใน B100 พีคของ SMG ปรากฏที่เวลา 10-18 นาที .....	54
รูปที่ 3-4 ภาพรวมในการเตรียมน้ำมันไบโอดีเซลผสม B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร 4 และ ยูโร 5 เพื่อทดสอบหาจุดขุ่น .....	56
รูปที่ 3-5 ขั้นตอนการวิเคราะห์จุดขุ่นตามมาตรฐาน ASTM D2500 .....	58
รูปที่ 3-6 การดูดซับ SMG ใน B100 โดยใช้ตัวดูดซับ 5 ชนิด .....	60
รูปที่ 3-7 ขั้นตอนการคัดแปรตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ .....	62
รูปที่ 3-8 ภาพรวมการศึกษาสมบัติของไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสมหลังการดูดซับ .....	66
รูปที่ 4-1 ตะกอนที่พบใน B100 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.1-0.7 wt% หลังตั้งทิ้งไว้ที่ อุณหภูมิห้องมากกว่า 24 ชั่วโมง.....	70
รูปที่ 4-2 B7 ที่ผสมจาก B0 ยูโร4 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.007-0.049 wt%.....	71
รูปที่ 4-3 B7 ที่ผสมจาก B0 ยูโร5 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.007-0.049 wt%.....	71
รูปที่ 4-4 B10 ที่ผสมจาก B0 ยูโร4 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.010-0.070 wt%.....	71
รูปที่ 4-5 B10 ที่ผสมจาก B0 ยูโร5 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.010-0.070 wt%.....	72
รูปที่ 4-6 B20 ที่ผสมจาก B0 ยูโร4 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.020-0.140 wt%.....	72
รูปที่ 4-7 B20 ที่ผสมจาก B0 ยูโร5 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.020-0.140 wt%.....	72
รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ SMG กับจุดขุ่น ใน B7, B10 และ B20 ที่ใช้ (a) B0 ยูโร4 และ (b) B0 ยูโร5 .....	74



รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ของจุดศูนย์กลางกับความเข้มข้น SMG ในไบโอดีเซลผสมที่ใช้ B0 ยูโร4 และ B0 ยูโร5 ในการผสม a.) B7 b.) B10 และ c.) B20.....	75
รูปที่ 4-10 ภาพขยายจากเครื่อง EPMA ของ a) MS b) Silica gel c) NZ-200m และ d) NZ-325m....	76
รูปที่ 4-11 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับ MS, Silicagel, NZ-325m และ NZ-200m.....	77
รูปที่ 4-12 ลักษณะรูพรุนของโครงสร้างผลึก Clinoptilolite .....	77
รูปที่ 4-13 แสดงการกำจัด AI ออกจากโครงสร้างซีโอไลต์ธรรมชาติโดยใช้กระบวนการบำบัดด้วยกรดไนตริก [24] .....	80
รูปที่ 4-14 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับ MS, NZ-325m, NZ-325m_60C1hr และ NZ-325m_60C6hr .....	80
รูปที่ 4-15 ลักษณะไอโซเทิร์มของการดูดซับของตัวดูดซับ MS, NZ-325m, NZ-325m_60C1hr และ NZ-325m_60C6hr.....	81
รูปที่ 4-16 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนเทียบกับปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ NZ-325m, NZ-325m_60C1hr และ NZ-325m_60C6hr.....	82
รูปที่ 4-17 การดูดซับปริมาณ SMG ของ MS ใน B100 ที่ SMG เริ่มต้น 0.71 wt%.....	83
รูปที่ 4-18 การดูดซับปริมาณ SMG ของ Silica gel ใน B100 ที่ SMG เริ่มต้น 0.71 wt%.....	83
รูปที่ 4-19 การดูดซับปริมาณ SMG ของ NZ-325m ใน PO-B100 ที่ SMG เริ่มต้น 0.71 wt%.....	84
รูปที่ 4-20 การดูดซับปริมาณ SMG ของ NZ-325m และ NZ-325m_60C6hr ใน B100 ที่ SMG เริ่มต้น 0.71 wt% ที่ปริมาณตัวดูดซับ 1 wt% และ 5 wt%.....	85

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพใช้ทดแทนน้ำมันดีเซล ไบโอดีเซลผลิตได้จากน้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์ ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมีในรูปของไตรกลีเซอไรด์ ที่นำมาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่า ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Transesterification) ร่วมกับเมทานอล โดยมีกรดหรือเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจนได้เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid methyl esters) หรือ B100 ซึ่งกรมธุรกิจพลังงานได้กำหนดคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันไว้ โดยให้มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักจากกระบวนการผลิตไม่น้อยกว่า 96.5 wt.% และควบคุมปริมาณของสิ่งเจือปนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์หรือเกิดปฏิกิริยาเพียงบางส่วนในโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ ได้แก่ สารประเภทโมโนกลีเซอไรด์ (Monoglycerides, MG) ต่ำกว่า 0.7 wt.% และไดกลีเซอไรด์ (Diglycerides, DG) ต่ำกว่า 0.2 wt.% โดย MG พบได้ทั้งชนิดไม่อิ่มตัวเรียกว่า Unsaturated Monoglycerides (UMG) และชนิดอิ่มตัวเรียกว่า Saturated Monoglycerides (SMG) ซึ่ง SMG จะเกิดการตกตะกอนได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ปี 2559 อุณหภูมิต่ำสุดโดยเฉลี่ยต่ำกว่า  $10^{\circ}\text{C}$  ในหลายจังหวัดในภาคเหนือและบนยอดดอย พบเจอปัญหาเครื่องยนต์สตาร์ทไม่ติด เนื่องจากตะกอนของ SMG ในน้ำมันไบโอดีเซลผสมเข้าไปอุดตันในไส้กรองเครื่องยนต์ดีเซล แมื่อน้ำมันเหล่านี้จะใส่ไบโอดีเซลที่มีปริมาณ MG ตามข้อกำหนดคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันของกรมธุรกิจพลังงานก็ตาม นอกจากนี้รัฐบาลมีแนวโน้มที่จะเพิ่มอัตราส่วนของไบโอดีเซลในน้ำมันไบโอดีเซลผสมมากขึ้นในอนาคต ดังนั้นการศึกษารายละเอียดของ SMG ในไบโอดีเซลปาล์ม (PO-B100) ที่ส่งผลต่อค่าจุดขุ่น (Cloud point, CP) และสมบัติที่อุณหภูมิต่ำอื่นๆ ของน้ำมันไบโอดีเซลปาล์มผสม B7, B10 และ B20 จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อควบคุมปริมาณ SMG ใน PO-B100 ก่อนนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการลดปริมาณ SMG ในไบโอดีเซลด้วยเทคนิคการดูดซับ ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วและปราศจากการผลิตน้ำเสีย โดยตัวดูดซับที่ประกอบด้วยอะลูมินาและซิลิกาสามารถดูดซับ SMG ได้ดีกว่าตัวดูดซับชนิดซิลิกาบริสุทธิ์ นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการดูดซับยังถูกกำหนดด้วยพื้นที่ผิวจำเพาะและโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับด้วย ซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นวัสดุที่มีอะลูมินาและซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ความพรุนสูงและราคาถูก จึงมีความน่าสนใจในการพัฒนาเป็นตัวดูดซับเพื่อลดปริมาณ SMG ในไบโอดีเซล

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1. ทราบปริมาณ โมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัวในไบโอดีเซลที่ส่งผลต่อสมบัติที่อุณหภูมิต่ำของน้ำมันไบโอดีเซลผสม
- 1.2.2. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด โมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัวในไบโอดีเซล โดยการดูดซับด้วยซีโอไลด์ธรรมชาติ
- 1.2.3. ได้ซีโอไลด์ธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับ โมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัว

## 1.3 ขอบเขตในการศึกษา

- 1.3.1. งานวิจัยนี้เลือกใช้ไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันปาล์มเท่านั้นมาศึกษา
- 1.3.2. งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้น้ำมันดีเซลมาตรฐานยูโร 4 และยูโร 5 จากแหล่งเดียวในการศึกษาหาผลกระทบของ โมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัวต่อค่าจุดขุ่นของน้ำมันไบโอดีเซลผสม

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1 คั้นคว่ำและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดปริมาณ SMG ในไบโอดีเซลโดยการดูดซับ
- 1.4.2 จัดหาไบโอดีเซลปาล์ม (B100) น้ำมันดีเซล (B0) สารเคมีที่เกี่ยวข้องและวิเคราะห์สมบัติที่สำคัญของ B100 และ B0
- 1.4.3 ผสม SMG C16 ใน PO-B100 ช่วงความเข้มข้น 0.1–0.7 wt.% จากนั้นนำไปผสมกับ B0 เพื่อให้ได้น้ำมันไบโอดีเซลผสม B7, B10 และ B20 แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าจุดเกิดหมอก
- 1.4.4 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ
- 1.4.5 ศึกษาจลนพลศาสตร์ (Kinetics) ของการดูดซับ SMG
- 1.4.6 ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ ในการดูดซับ SMG
- 1.4.7 รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์ผล และเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทราบปริมาณ SMG ที่ต่ำที่สุดใน B100 ที่ส่งผลต่อสมบัติที่อุณหภูมิต่ำของน้ำมันไบโอดีเซลผสม B7 B10 และ B20

1.5.2 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณ SMG ใน B100 โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่มีราคาถูก



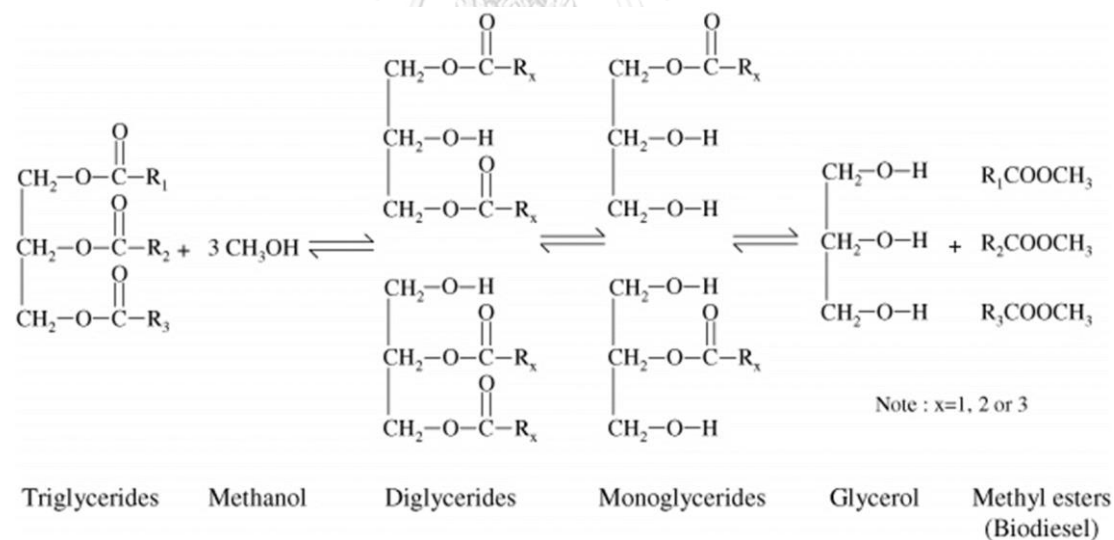
## บทที่ 2

### วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไบโอดีเซล

##### 2.1.1 ไบโอดีเซลคืออะไร

ไบโอดีเซล คือ น้ำมันที่ใช้ผสมกับน้ำมันดีเซลเพื่อใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล เป็นสารประกอบเอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty acid methyl esters) หรือ B100 ที่ได้จากการนำน้ำมันพืช หรือน้ำมันสัตว์ มาทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันกับแอลกอฮอล์ (ส่วนใหญ่ใช้เมทานอล) ดังรูปที่ 2-1 ไบโอดีเซลเป็นสารประกอบเอสเทอร์ ที่มีออกซิเจนผสมอยู่ 10% โดยน้ำหนัก มีค่าซีเทน 56-58 มีปริมาณกำมะถันต่ำ สามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์ เพราะสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ฝุ่นอนุภาคขนาดเล็ก ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) สารประกอบซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO<sub>x</sub>) และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย รวมถึงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ จึงเป็นเชื้อเพลิงที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ไบโอดีเซลยังมีสมบัติในการหล่อลื่นสูงเมื่อนำไปผสมกับน้ำมันดีเซล [1]



รูปที่ 2-1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์

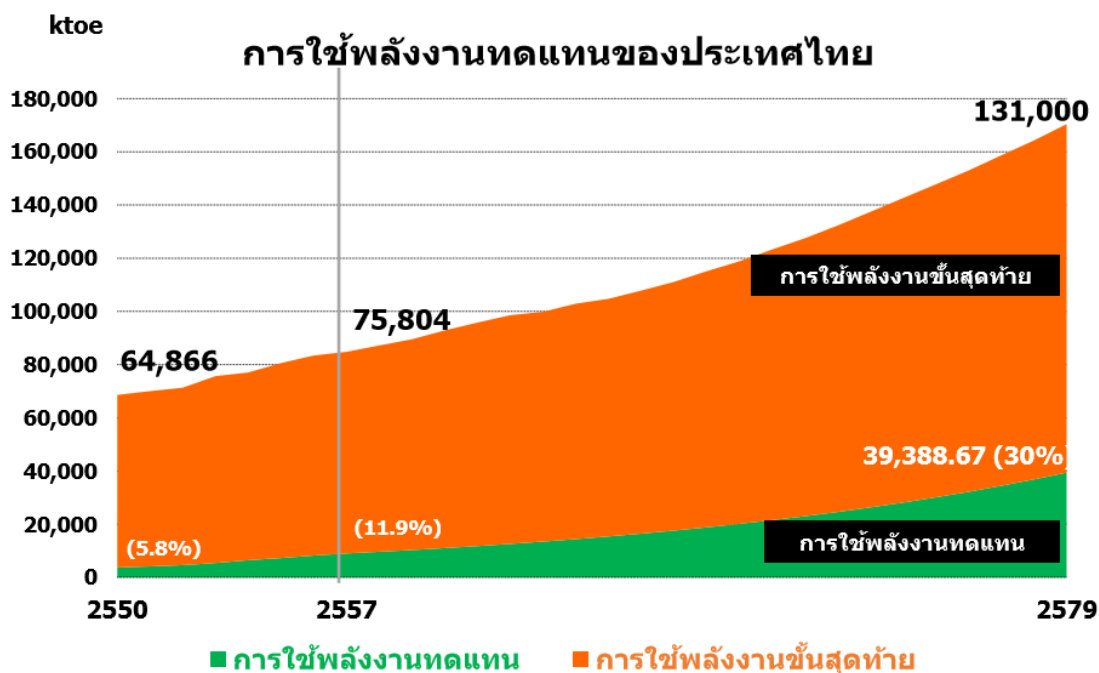
##### 2.1.2 บทบาทของการใช้งานไบโอดีเซลในประเทศไทย

การใช้ไบโอดีเซลเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญในปี 2554 เมื่อกระทรวงพลังงานได้เพิ่มสัดส่วนผสมไบโอดีเซลในน้ำมันดีเซล 3-5 vol% และ ในปี 2557 ได้เพิ่มสัดส่วนผสมไบโอดีเซล 7

vol% อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปริมาณน้ำมันปาล์มดิบซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลมีความผันผวนทางฤดูกาลมากทำให้ในบางช่วงเวลา กระบวนการผลิตต้องลดสัดส่วนการผสมไบโอดีเซลลงเพื่อให้สมดุลกับวัตถุดิบในประเทศ ในปี 2557 ประเทศไทยมีโรงงานผลิตไบโอดีเซลเพิ่มเป็น 10 แห่ง กำลังการผลิตรวม 4.96 ล้านลิตรต่อวัน และใช้ไบโอดีเซลเพื่อทดแทนน้ำมันดีเซลรวม 1,054.92 ล้านลิตร หรือเทียบเท่า 2.89 ล้านลิตรต่อวัน

จากแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (AEDP2015) [2] มีเป้าหมายในการใช้พลังงานทดแทนเท่ากับ 30 wt% ของการใช้พลังงานขั้นสุดท้าย ในปี 2579 (รูปที่ 2-2) และมีเป้าหมายในการใช้ไบโอดีเซลจาก 2.89 ล้านลิตร/วัน ในปี 2557 เพิ่มเป็น 14.00 ล้านลิตร/วัน ในปี 2579 ดังตารางที่ 2-1 โดยส่งเสริมให้มีการใช้ B10 และ B20 ทั้งภาคขนส่งและอุตสาหกรรม





รูปที่ 2-2 แผนการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 [2]

ตารางที่ 2-1 สถานภาพและเป้าหมายการผลิตเชื้อเพลิงในภาคขนส่งจากพลังงานทดแทน [2]

ประเภทเชื้อเพลิง	สถานภาพ ณ สิ้นปี 2557		เป้าหมายปี 2579	
	ล้านลิตร/วัน	ktoe	ล้านลิตร/วัน	ktoe
1. ไบโอดีเซล	2.89	909.28	14.00	4,404.82
2. เอทานอล	3.21	872.88	11.30	2,103.50
3. น้ำมันไพโรไลซิส			0.53	170.87
4. ก๊าซไบโอมิเทนอัด (ตันต่อวัน)			4,800.00	2,023.24
5. เชื้อเพลิงทางเลือกอื่น*				10.00
<b>รวม (ktoe)</b>		<b>1,782.16</b>		<b>8,712.43</b>
ความต้องการเชื้อเพลิงในภาคขนส่งทั่วประเทศ		26,801.00		34,798.00
สัดส่วนผลิตเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนภาคขนส่ง (%)		6.65		25.04

\*อาทิ Bio-oil, ไฮโดรเจน เป็นต้น

### 2.1.3 ข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลในประเทศไทย

ตารางที่ 2-2 แสดงข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2562 ที่ประกาศโดยกรมธุรกิจพลังงาน [3] ซึ่งแบ่ง B100 ออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ B100 ชนิดที่ 1 ใช้สำหรับผสมเพื่อผลิตเป็นน้ำมันดีเซลหมุนเร็วที่นอกเหนือจาก B10 เช่น B7 และ B20 ในขณะที่ B100 ชนิดที่ 2 ใช้สำหรับผสมเพื่อผลิตน้ำมันดีเซลหมุนเร็วเฉพาะ B10 ซึ่ง

ข้อกำหนดสมบัติของ B100 ทั้ง 2 ชนิดมีระบุทั้งหมด 26 ข้อ โดยสามารถอธิบายความสำคัญในแต่ละหัวข้อได้ดังนี้

ตารางที่ 2-2 กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน [3]

รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	ชนิดที่ ๑	ชนิดที่ ๒	วิธีทดสอบ <sup>๑/</sup>	
๑	เมทิลเอสเทอร์ (Methyl esters)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่ต่ำกว่า	๙๖.๕	๙๖.๕	EN ๑๔๑๐๓
๒	ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ ๑๕ องศาเซลเซียส (Density at 15°C)	กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร kg/m <sup>3</sup>	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๘๖๐	๘๖๐	ASTM D ๑๒๙๘
๓	ความหนืด ณ อุณหภูมิ ๔๐ องศาเซลเซียส (Viscosity at 40°C)	เซนติสโตกส์ cSt	ไม่ต่ำกว่า และ ไม่สูงกว่า	๓.๕	๓.๕	ASTM D ๔๔๕
๔	จุดวาบไฟ (Flash point)	องศาเซลเซียส °C	ไม่ต่ำกว่า	๑๒๐	๑๒๐	ASTM D ๙๓
๕	กำมะถัน (Sulphur)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๐๑๐	๐.๐๐๑๐	ASTM D ๒๖๒๒
๖	กากถ่าน จากร้อยละ ๑๐ ของส่วนที่เหลือจากการกลั่น (Carbon residue on 10% distillation residue)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๓๐	๐.๓๐	ASTM D ๔๕๓๐
๗	จำนวนซีเทน (Cetane number)		ไม่ต่ำกว่า	๕๑	๕๑	ASTM D ๖๑๓
๘	เถ้าซัลเฟต (Sulphated ash)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๒	๐.๐๒	ASTM D ๘๗๔
๙	น้ำ (Water)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๕๐๐	๕๐๐	EN ISO ๑๒๙๓๗
๑๐	สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contamination)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๒๔	๒๔	EN ๑๒๖๖๒
๑๑	การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)		ไม่สูงกว่า	หมายเลข ๑	หมายเลข ๑	ASTM D ๑๓๐
๑๒	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ ๑๑๐ องศาเซลเซียส (Oxidation stability at 110°C)	ชั่วโมง hours	ไม่ต่ำกว่า	๑๐	๑๐	EN ๑๕๗๕๑
๑๓	ค่าความเป็นกรด (Acid value)	มิลลิกรัมโพตัสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม mg KOH/g	ไม่สูงกว่า	๐.๕๐	๐.๕๐	ASTM D ๖๖๔



รายการ	ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	ชนิดที่ ๑	ชนิดที่ ๒	วิธีทดสอบ <sup>๕</sup>	
๑๔	ค่าไอโอดีน (Iodine value)	กรัมไอโอดีน/๑๐๐ กรัม g Iodine/100g	ไม่สูงกว่า	๑๒๐	๑๒๐	EN ๑๔๑๑๑
๑๕	กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (Linolenic acid methyl ester)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๑๒.๐	๑๒.๐	EN ๑๔๑๐๓
๑๖	เมทานอล (Methanol)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๒๐	๐.๒๐	EN ๑๔๑๑๐
๑๗	โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๗๐	๐.๔๐	EN ๑๔๑๐๕
๑๘	ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๒๐	๐.๒๐	EN ๑๔๑๐๕
๑๙	ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๒๐	๐.๒๐	EN ๑๔๑๐๕
๒๐	กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๒	๐.๐๒	EN ๑๔๑๐๕
๒๑	กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๒๕	๐.๒๕	EN ๑๔๑๐๕
๒๒	โลหะกลุ่ม ๑ (โซเดียมและโปแตสเซียม) (Group I metals; Na + K)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๕.๐	๕.๐	EN ๑๔๕๓๘
	โลหะกลุ่ม ๒ (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (Group II metals; Ca + Mg)	มิลลิกรัม/กิโลกรัม mg/kg	ไม่สูงกว่า	๕.๐	๕.๐	EN ๑๔๕๓๘
๒๓	ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	ร้อยละโดยน้ำหนัก % wt.	ไม่สูงกว่า	๐.๐๐๑๐	๐.๐๐๑๐	EN ๑๔๑๐๗
๒๔	จุดขุ่น (Cloud point)	องศาเซลเซียส °C	รายงาน <sup>๖</sup>			
๒๕	จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold flow plugging point)	องศาเซลเซียส °C	รายงาน <sup>๖</sup>			
๒๖	สารเติมแต่ง (ถ้ามี) (Additives, if any)		ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจาก อธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน			

### 2.1.3.1 เมทิลเอสเทอร์ (Methyl Esters)

ค่าเมทิลเอสเทอร์ คือ ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ หรือ ไบโอดีเซล ค่าที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่มากกว่า 96.5 wt% กำหนดไว้เพื่อแสดงว่าไบโอดีเซลมีการเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ หากมีปริมาณเอสเทอร์ต่ำเมื่อใช้งานอาจเกิดตะกอนอุดตันหัวฉีดและปั๊ม ทดสอบโดยใช้เทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟีตามมาตรฐาน EN14103

### 2.1.3.2 ความหนาแน่น (Density)

สมบัติเบื้องต้นที่ใช้ระบุลักษณะทางกายภาพของไบโอดีเซล ทดสอบตามวิธี ASTM D1298 ซึ่งเกณฑ์กำหนดไม่ต่ำกว่า 860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และไม่สูงกว่า 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ 15 °C การวัดค่าความหนาแน่นทำการวัดโดยใช้อุปกรณ์ไฮโดรมิเตอร์ ถ้าน้ำมันหนักมากค่าความร้อนของน้ำมันต่อหน่วยน้ำหนักจะสูง

### 2.1.3.3 ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 °C (Viscosity at 40 °C)

ความหนืดในน้ำมันบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานการไหล และบอกถึงสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิว ใช้วิธีทดสอบตาม ASTM D445 ซึ่งผลที่ได้ให้ค่าในช่วง 3.5-5.0 (เซนติสโตกส์, cSt) ณ อุณหภูมิ 40 °C ทดสอบโดยใช้เครื่องมือวัดความหนืด (Viscometer) โดยอาศัยหลักการให้ของเหลวไหลผ่านช่องแคบๆ ที่ออกแบบและปรับตั้ง (Calibrated) ตามมาตรฐาน แล้วจับเวลาที่ของเหลวไหลผ่านช่องแคบนั้น และนำค่าเวลาไปคำนวณเป็นค่าความหนืด

ค่าความหนืดในน้ำมัน B100 ที่มีค่าความหนืดสูงเกินไป จะส่งผลให้การกระจายตัวของน้ำมันที่หัวฉีดไปยังห้องเผาไหม้กระจายตัวไม่เป็นฝอยละเอียด มีผลต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยตรง ทำให้เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เกิดเขม่า อีกทั้งยังสิ้นเปลืองน้ำมัน

### 2.1.3.4 จุดวาบไฟ (Flash Point)

จุดวาบไฟ คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเกิดระเหยจนมีปริมาณเพียงพอที่จะลุกติดไฟได้วูบหนึ่งแล้วดับเมื่อมีเปลวไฟผ่านเข้ามา ใช้วิธีตาม ASTM D93 (Pensky Martens Closed Cup Tester) ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่า 120 °C วิธีการทดสอบใช้อุปกรณ์และวิธีของ Pensky Martens โดยใช้ถ้วยปิด (Closed Cup) ต่อกับตัวจุดประกายไฟ กำหนดไว้เพื่อความปลอดภัยในการเก็บรักษาและการขนส่ง

### 2.1.3.5 กำมะถัน (Sulphur)

กำหนดไว้เพื่อป้องกันการเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และฝุ่นละอองขนาดเล็ก ที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งเป็นสารพิษ และเมื่อทำปฏิกิริยากับไอน้ำจะเกิดเป็นกรดกัดกร่อนอุปกรณ์ ตรวจวัดตามวิธี ASTM D2622 ด้วยเทคนิค Wavelength Dispersive X-ray Fluorescence (WDXRF) ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่เกิน 0.0010 wt%

### 2.1.3.6 คากถ่าน (Carbon residue on 10% distillation residue)

คากถ่าน คือ คากที่เหลือจากการเผาไหม้ในที่อับอากาศ เช่น กลีเซอรอลกรดไขมันอิสระ สบู่และตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น เนื่องจากมีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดเขม่าตกค้าง (Deposit) และไอเสีย ที่มีควันดำมาก วิธีการทดสอบให้ทดสอบตาม ASTM D4530 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.30 wt% โดยทดสอบจาก 10 vol% ของคากที่เหลือจากการกลั่น

### 2.1.3.7 จำนวนซีเทน (Cetane number)

ค่าที่แสดงถึงสมบัติจุดระเบิดของไบโอดีเซล ป้องกันเครื่องยนต์เกิดการน็อค โดยจำนวนค่าซีเทนจะสัมพันธ์กับเวลาหน่วงการจุดติดไฟ (Ignition Delay Time) คือเวลาที่เชื้อเพลิงฉีดผ่านเข้าสู่ห้องเผาไหม้ถึงจุดติดไฟ เมื่อจำนวนซีเทนสูง เวลาหน่วงการจุดติดไฟจะมีค่าสั้น การทดสอบจำนวนค่าซีเทน ใช้วิธีตาม ASTM D613 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่ต่ำกว่าเลข 51

### 2.1.3.8 เถ้าซัลเฟต (Sulphated ash)

เถ้าซัลเฟตเกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาในไบโอดีเซล และเถ้าของสารประกอบอื่นๆ ที่สามารถทำให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีด ปัม ลูกสูบ และแหวน

### 2.1.3.9 น้ำ (Water)

การตรวจหาน้ำใน B100 เพราะมีน้ำจะเร่งให้เกิดออกซิเดชันได้ง่าย และส่งผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์ทำให้อายุการใช้งานต่ำลงเพราะการเกิดสนิมและตะกรันตกค้างในส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ นอกจากนั้นน้ำยังเป็นแหล่งเพาะจุลินทรีย์ทำให้เกิดกรดและนำไปสู่การกัดกร่อนและอุดตันระบบกรองน้ำมัน การทดสอบใช้มาตรฐาน EN ISO 12937 ซึ่งต้องให้ค่าไม่เกิน 500 mg/kg ทดสอบโดยใช้วิธีการไตเตรทของคาร์ลฟิชเชอร์ (Karl Fischer titration)

### 2.1.3.10 สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (Total contamination)

ค่านี้บ่งบอกปริมาณสารที่แขวนลอยอยู่ในไบโอดีเซล ถ้ามีมากกว่าเกณฑ์มาตรฐานจะส่งผลเสียต่อระบบฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง เพราะจะเข้าไปอุดตันและจับตัวอยู่ในระบบ ทดสอบตามมาตรฐาน EN12662 ซึ่งค่าต้องไม่เกิน 24 mg/kg

### 2.1.3.11 การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)

ดัชนีที่ใช้วัดการกัดกร่อนชิ้นส่วนโลหะของน้ำมัน โดยทำตามมาตรฐาน ASTM D130 ทดสอบโดยการแช่แท่งทองแดงที่ผ่านการขัดเงาแล้วลงในน้ำมัน ให้ความร้อนที่ 50 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบสีตามมาตรฐาน ซึ่งต้องให้ค่าไม่เกินหมายเลข 1

### 2.1.3.12 เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C (Oxidation stability at 110 °C)

กำหนดไว้เพื่อไม่ให้ไบโอดีเซลเกิดการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดเป็นกรด ซึ่งจะก่อให้เกิดการกัดกร่อน ทดสอบตามวิธี EN 14112 ซึ่งผลการทดสอบต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 110 °C

### 2.1.3.13 ค่าความเป็นกรด (Acid value)

กำหนดไว้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนชิ้นส่วนอุปกรณ์ ในไบโอดีเซลใช้บ่งชี้ถึงกรดไขมันอิสระที่ทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ หรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือมีข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการล้างไบโอดีเซลที่มีการเติมกรดช่วยปรับ pH เป็นกลาง การมีค่าความเป็นกรดในน้ำมันสูงเกินไปส่งผลให้อายุการใช้งานของระบบจ่ายน้ำมันและเครื่องยนต์สั้นลง ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D664 ซึ่งผลที่ได้ต้องให้ค่าไม่สูงกว่า 0.5 mg KOH/g

### 2.1.3.14 ค่าไอโอดีน (Iodine value)

กำหนดไว้เพื่อป้องกันการเกิดคราบขางเหนียว กัดกร่อนโลหะ และทำให้น้ำมันเครื่องมีอายุการใช้งานสั้นลง ทดสอบตามวิธี EN 14111 ซึ่งผลจากการวัดต้องไม่สูงกว่า 120 g Iodine/100g

### 2.1.3.15 กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (Linolenic acid methyl ester)

กำหนดไว้เพื่อป้องกันการเกิดคราบอุดตัน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชัน ทดสอบตามวิธี EN 14103 ซึ่งตรวจวัดโดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี ผลทดสอบต้องมีกรดลิโนเลนิกเอสเทอร์ในไบโอดีเซลไม่สูงกว่า 12.0 wt%

### 2.1.3.16 เมทานอล (Methanol)

เมทานอลอาจหลงเหลือจากการกำจัดออกไม่หมดในกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งกำหนดไว้เพื่อป้องกันการกัดกร่อน และป้องกันความเสี่ยงที่จะลุดคุดไฟในการขนย้ายและจัดเก็บ ทดสอบตามมาตรฐาน EN 14110 เตรียมตัวอย่างโดยให้ความร้อนกับตัวอย่างที่ 80 °C ให้เมทานอล

ระเหยในภาชนะปิด จากนั้นไอระเหยจะถูกพาไปวิเคราะห์ต่อโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี ปริมาณเมทานอลจะต้องไม่สูงกว่า 0.20 wt%

### 2.1.3.17 โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ ไตรกลีเซอไรด์ (Monoglyceride, Diglyceride, Triglyceride)

กำหนดไว้เพื่อป้องกันการเกิดตะกอนอุดตันหัวฉีดและปั๊ม เกิดจากการทำปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ของไตรกลีเซอไรด์ ทดสอบตามมาตรฐาน EN 14105 ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี โดยกำหนดไม่ให้ค่าโมโนกลีเซอไรด์เกิน 0.70 wt% ใน B100 ชนิดที่ 1 และ 0.40 wt% ใน B100 ชนิดที่ 2 ค่าไดกลีเซอไรด์ไม่เกิน 0.20 wt% และไตรกลีเซอไรด์ไม่เกิน 0.20 wt% ใน B100 ทั้งสองชนิด

### 2.1.3.18 กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin)

ข้อกำหนดที่ระบุถึงปริมาณกลีเซอรินอิสระที่แยกออกไม่หมดจากไบโอดีเซล กำหนดไว้เพื่อป้องกันการตกตะกอนแยกชั้น ทำให้หัวฉีดอุดตัน ทดสอบตามมาตรฐาน EN 14105 ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี ค่าต้องไม่เกิน 0.02 wt%

### 2.1.3.19 กลีเซอรินทั้งหมด (Total glycerin)

กำหนดไว้เพื่อป้องกันการเกิดตกตะกอน และสิ่งสกปรกอุดตันหัวฉีดเมื่อใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ทดสอบตามมาตรฐาน EN 14105 ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี ปริมาณกลีเซอรินทั้งหมดต้องไม่เกิน 0.25 wt%

### 2.1.3.20 โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) (Group I metals; Na + K) และ โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (Group II metals; Ca + Mg)

กำหนดไว้เพื่อป้องกันเกิดการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ อุดตันไส้กรอง ทดสอบตามวิธี EN 14538 โดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรเมทรี (Atomic absorption spectrophotometry, AAS) ผลทดสอบโซเดียมและโพแทสเซียมต้องไม่สูงกว่า 5.0 mg/kg และการตรวจวัดโลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) ต้องมีโลหะกลุ่มสองรวมกันไม่สูงกว่า 5.0 mg/kg

### 2.1.3.21 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

กำหนดไว้เพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในท่อไอเสีย ทำให้อายุการใช้งานของ Catalytic converter สั้นลง ทดสอบตามมาตรฐาน EN 14107 ปริมาณฟอสฟอรัสต้องมีค่าไม่สูงกว่า 0.0010 wt%

### 2.1.3.22 จุดขุ่น (Cloud point, CP)

จุดขุ่นใช้ระบุถึงประสิทธิภาพของการใช้งานไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำ โดยรายงานเป็นอุณหภูมิที่เกิดจุดขุ่น ข้อกำหนดนี้ยังไม่มีค่าเกณฑ์ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่องข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน แต่ในประเทศที่มีอากาศหนาวเย็น มีหิมะตกถือเป็นสมบัติที่สำคัญ

### 2.1.3.23 จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold flow plugging point, CFPP)

กำหนดเพื่อบอกแนวโน้มในการเกิดปัญหาการอุดตันของน้ำมันในไส้กรองน้ำมันที่อุณหภูมิต่ำ ให้รายงานค่าด้วย แม้ยังไม่มีค่าเกณฑ์ตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่องข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

### 2.1.3.24 สารเติมแต่ง (Additives)

สารที่เติมผสมลงในไบโอดีเซลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ช่วยชะล้างและทำความสะอาดเครื่องยนต์หรืออื่นๆ

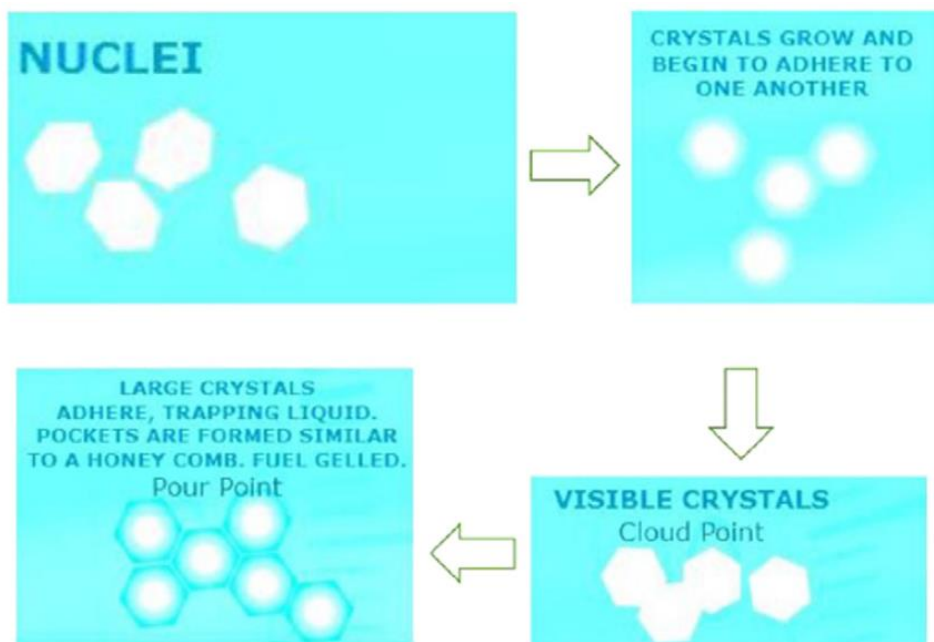
## 2.2 การใช้งานไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำ

### 2.2.1 สมบัติของไบโอดีเซลที่มีผลต่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

การทดสอบที่สามารถทำนายการเกิดปัญหาการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้มีหลายข้อกำหนด ได้แก่ จุดขุ่น (Cloud point ; CP), จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold flow plugging point ; CFPP) และ จุดไหลเท (Pour point ; PP) ซึ่ง CP สามารถบอกถึงอุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดเป็นไขและสามารถมองเห็นได้ด้วยตา ขณะที่ CFPP บอกถึงอุณหภูมิต่ำที่สุดที่เครื่องยนต์ยังสามารถใช้งานได้ โดยไม่เกิดการอุดตันไส้กรองของไขน้ำมันเชื้อเพลิง และ PP บ่งบอกถึงอุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงยังคงสามารถไหลได้ [4]

### 2.2.2 กลไกการเกิดตะกอนในไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำ

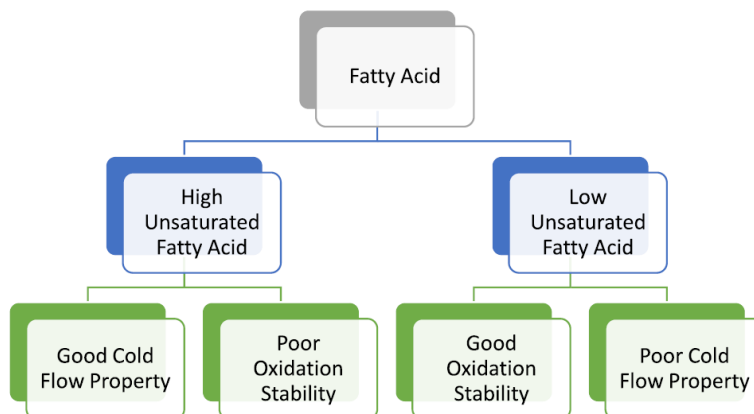
รูปที่ 2-3 อธิบายกระบวนการเกิดตะกอนของไบโอดีเซล ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงจนถึง CP จะเริ่มเกิดผลึกขึ้นเรียกว่า นิวคลีโอ (Nuclei) จากนั้นผลึกจะค่อยๆ โตขึ้นและสร้างเครือข่ายต่อกันจนกระทั่งเกิดตะกอนทั่วเนื้อน้ำมันจนไม่สามารถไหลได้ [5]



รูปที่ 2-3 กระบวนการเกิดผลึกน้ำมันในไบโอดีเซลที่อุณหภูมิต่ำ [5]

สมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำของไบโอดีเซลขึ้นกับองค์ประกอบของไบโอดีเซล รูปที่ 2-4 อธิบายถึงองค์ประกอบในน้ำมันไบโอดีเซลที่มีกรดไขมันเอสเทอร์ที่มีโครงสร้างแบบอิมตัวจะมีสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำต่ำกว่ากรดไขมันเอสเทอร์ชนิดไม่อิมตัว แต่ในทางกลับกันสมบัติในด้านการต้านทานการเกิดออกซิเดชันของกรดไขมันเอสเทอร์ชนิดอิมตัวดีกว่ากรดไขมันเอสเทอร์ชนิดไม่อิมตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-4 ผลกระทบของชนิดกรดไขมันในไบโอดีเซลที่มีต่อสมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำและความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน [5]

จากตารางที่ 2-3 พบว่าน้ำมันปาล์มไบโอดีเซลที่ใช้เป็นส่วนใหญ่ในประเทศไทย มีองค์ประกอบของกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 16 และ 18 เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ (C16:0 = 39.3-47.5 wt%) แสดงถึงสมบัติด้านการไหลเทที่อุณหภูมิต่ำที่ไม่ดี แต่มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชัน ซึ่งตรงข้ามกับน้ำมันไบโอดีเซลที่ผลิตจากถั่วเหลืองที่ใช้มากในแถบทวีปยุโรปและอเมริกา ที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนใหญ่ (C18:2 = 49.8-59.0 wt%) ซึ่งง่ายต่อการเกิดออกซิเดชัน แต่สมบัติด้านการไหลเทที่อุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นจึงเป็นผลให้ค่าของ CP, CFPP และ PP ของน้ำมันไบโอดีเซลปาล์มมีค่าที่สูงกว่ามากดังแสดงในตารางที่ 2-4 [6]

ตารางที่ 2-3 สมบัติและองค์ประกอบกรดไขมันหลักของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ [7]

น้ำมันชนิดดิบ	ค่าไอโอดีน	องค์ประกอบกรดไขมันหลัก						
		C12:0	C14:0	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3
ปาล์ม	14.1-21.0	ND-0.5	0.5-2.0	39.3-47.5	3.5-6.0	36.0-44.0	9.0-12.0	ND-0.5
ปาล์มโอสีน	≥ 56	0.1-0.5	0.5-1.5	38.0-43.5	3.5-5.0	39.8-46.0	10.0-13.5	ND-0.6
ปาล์มสเตียร์น	≤ 48	0.1-0.5	1.0-2.0	48.0-74.0	3.9-6.0	15.5-36.0	3.0-10.0	0.5
เมล็ดในปาล์ม	50.0-55.0	45.0-55.0	14.0-18.0	6.5-10.0	1.0-3.0	12.0-19.0	1.0-3.5	ND-0.2
มะพร้าว	6.3-10.6	45.1-53.2	16.8-21.0	7.5-10.2	2.0-4.0	5.0-10.0	1.0-2.5	ND
ถั่วลิสง	86-107	ND-0.1	ND-0.1	8.0-14.0	1.0-4.5	35.0-67.0	13.0-43.0	ND-0.3
เมล็ดสบู่ดำ	101	ND	ND	14.9	6.0	41.2	37.4	ND
เมล็ดเรพ	94-120	ND	ND-0.2	1.5-6.0	0.5-3.1	8.0-60.0	11.0-23.0	5.0-13.0
ถั่วเหลือง	124-139	ND-0.1	ND-0.2	8.0-13.5	2.0-5.4	17.7-28.0	49.8-59.0	5.0-11.0

ND = ไม่พบ

ตารางที่ 2-4 สมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำของไบโอดีเซลที่ผลิตจากน้ำมันพืชชนิดต่างๆ [6]

Feedstock lipid	CP, °C	PP, °C	CFPP, °C	LTFT, °C
Canola oil	-3	-4	-4	
Corn oil	-3	-4	-7	
Cottonseed oil	6	0	3	
Lard	11	12	8	
Linseed oil	0	-9	-7	
Olive oil	-2	-3	-6	
Palm oil	14	14	12	
Poultry fat	4	6	1	
Rapeseed oil (<5 wt% erucic)	-3	-9	-9	
Soybean oil (SME)	0	-2	-2	0
Sunflower seed oil	2	-3	-2	
Tallow	17	15	9	20
Used olive oil	-2	-6	-9	
Yellow grease	8	6	1	
No. 1 petrodiesel <sup>a</sup>	-31	-46	-42	-27
No. 2 petrodiesel <sup>a</sup> (S < 500 ppm)	-16	-27	-18	-14
No. 2 petrodiesel <sup>a</sup> (S < 50 ppm)	-5		-6	



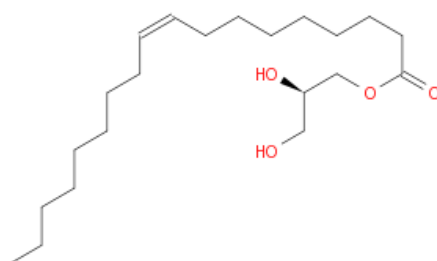
เนื่องจากยังไม่มีการกำหนดค่าสมบัติเหล่านี้ในข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซล แม้ว่าจะมีการกำหนดเฉพาะค่า จุดไหลเท (PP) ในกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล ที่ครอบคลุม B7, B10 และ B20 ว่าค่าจุดไหลเทจะต้องไม่เกิน 10 °C อย่างไรก็ตามก็ยังไม่สามารถแก้ปัญหาการเกิดตะกอนจากการใช้งานน้ำมันไบโอดีเซลผสมที่อุณหภูมิต่ำได้

### 2.2.3 สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลที่มีผลต่อการเกิดตะกอนในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

สิ่งที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่มีผลต่อการเกิดตะกอนที่อุณหภูมิต่ำ ได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์, โมโนกลีเซอไรด์ และกลีเซอรินอิสระ ซึ่งสัดส่วนของโมโนกลีเซอไรด์ถือว่าเป็นส่วนมาก โครงสร้างโมโนกลีเซอไรด์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ โมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัว (Saturated monoglyceride; SMG) คือโมโนกลีเซอไรด์ที่ประกอบด้วยกรดไขมันที่ไม่มีพันธะคู่อยู่ในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (รูปที่ 2-5) และโมโนกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated monoglyceride; UMG) คือโมโนกลีเซอไรด์ที่ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีพันธะคู่อย่างน้อย 1 ตำแหน่งในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน (รูปที่ 2-6) ซึ่ง SMG เป็นโมโนกลีเซอไรด์ที่ทำให้เกิดการตกตะกอนที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2-5 โครงสร้างของ Monopalmitin ซึ่งเป็น โมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัว (Saturated monoglyceride ; SMG)

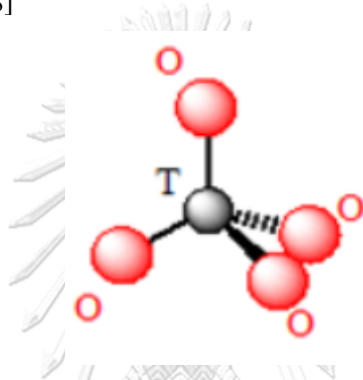


รูปที่ 2-6 โครงสร้างของ Monoolein ซึ่งเป็น โมโนกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated monoglyceride ; UMG)

## 2.3 ซีโอไลต์

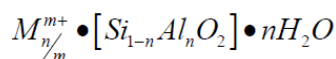
### 2.3.1 โครงสร้างและองค์ประกอบของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบเตตระฮีดรอน  $TO_4$  ( $T = Si, Al$ ) ที่ประกอบไปด้วยอะตอมออกซิเจนที่เชื่อมต่อกับโมเลกุลเตตระฮีดรอนอื่นๆ ดังรูปที่ 2-7 แต่ละเตตระฮีดรอนของ  $AlO_4$  ในโครงสร้างผลึก มีประจุลบที่ถูกทำให้สมดุลโดยโครงสร้างผลึกพิเศษของไอออนบวก จำนวนของ Al ที่อยู่ในโครงสร้างผลึกสามารถเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง ตั้งแต่สัดส่วนของ Si ต่อ Al เท่ากับหนึ่งถึงอนันต์ โครงสร้างของ Si ส่วนใหญ่อยู่ในรูป  $SiO_2$  [8]



รูปที่ 2-7 หน่วยโครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์ [8]

องค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์ประกอบไปด้วย 3 ส่วน ได้แก่ โครงสร้างผลึกพิเศษ (extra framework) โครงสร้างผลึก (framework) และส่วนที่ถูกดูดซับ (sorbed phase) ดังนี้



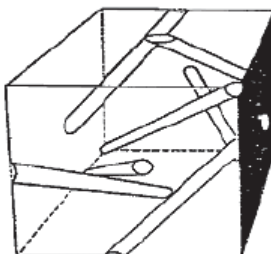
*extraframework cations · framework · sorbed phase*

โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงแบบเปิดที่อยู่ในรูปของช่องว่างและแบบกรง ซึ่งภายในบรรจุด้วยโมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) และ โครงสร้างผลึกไอออนบวก (extra-framework cations) น้ำอาจจะถูกกำจัดออกมาได้โดยการให้ความร้อน สำหรับไอออนบวก (Cation) อาจถูกแทนที่ด้วยไอออนบวกอื่นๆ โดยที่โครงสร้างไม่เปลี่ยนแปลง โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ถูกนิยามเป็นรหัสที่ประกอบไปด้วย 3 ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ตาม Structure Commission of the International Zeolite Association (IZA)

### 2.3.2 โครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์

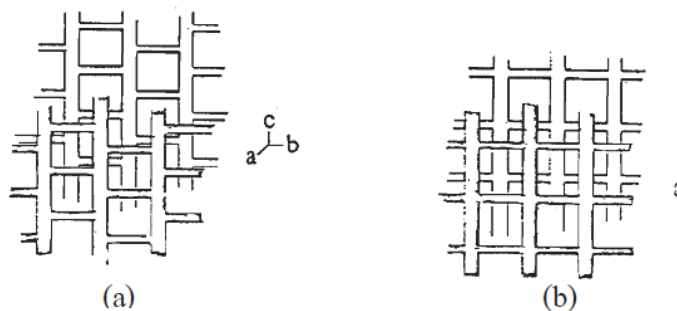
ช่องว่างหรือรูพรุนของซีโอไลต์แบ่งออกเป็น 3 ระบบดังนี้

**2.3.2.1 ระบบ 1 มิติ (One-dimensional system)** รูพรุนลักษณะนี้จะไม่ตัดกัน เช่น ช่องว่างในซีโอไลต์ชนิด Analcime ดังแสดงในรูปที่ 2-8 [9]



รูปที่ 2-8 รูพรุนแบบ 1 มิติ ของ Analcime [9]

**2.3.2.2 ระบบ 2 มิติ (Two-dimensional System)** ระบบนี้มีรูพรุนหลักอยู่ในระนาบ c ซึ่งเชื่อมโยกันด้วยโพรงเล็กๆ ในระนาบ a ดังแสดงในรูปที่ 2-9 มักพบในซีโอไลต์กลุ่ม Mordenite และ Natrolite



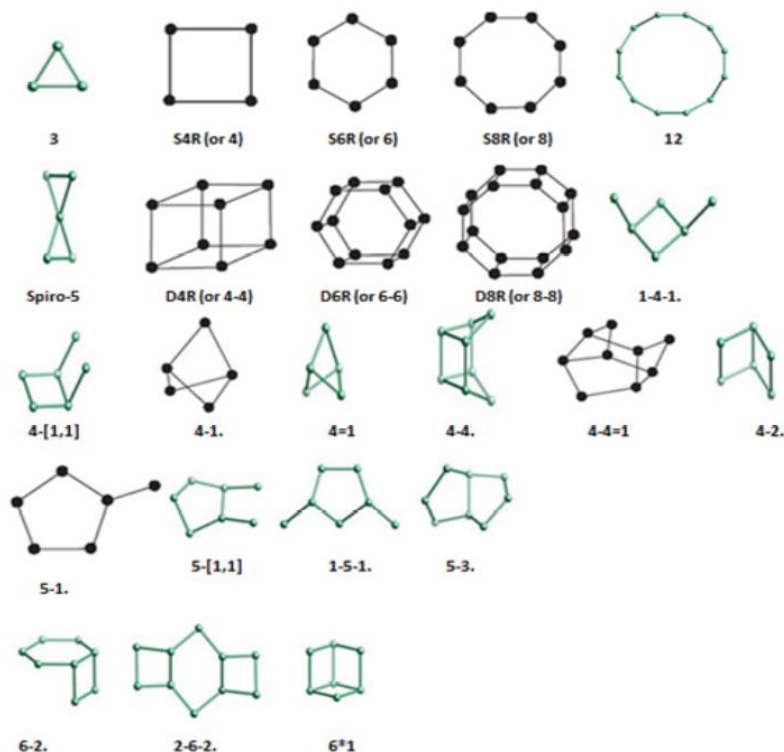
รูปที่ 2-9 รูพรุนแบบ 2 มิติ (a) ใน Mordenite (b) ใน Natrolite

**2.3.2.3 ระบบ 3 มิติ (Tree-dimensional System)** ระบบนี้เป็นรูพรุนที่ตัดกันในช่องว่างทุกทิศทาง

### 2.3.3 หน่วยโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์

โดยทั่วไปโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์จะถูกแบ่งออกเป็น 2 แบบได้แก่ โครงสร้างแบบปฐมภูมิ (Primary building units ; PBUs) และ โครงสร้างแบบทุติยภูมิ (Secondary building units ; SBUs) สำหรับ PBUs ประกอบไปด้วยอะตอมของ  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  และ  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  ที่มีรูปทรงแบบเตตระฮีดรอน การรวมตัวของสองหน่วยย่อยนี้จะเชื่อมต่อกันที่อะตอมของออกซิเจน และเกิดเป็นโครงสร้างแบบ SBUs

โครงสร้างแบบ SBUs มีหลากหลายรูปแบบตั้งแต่แบบ 1 วง 2 วง จนถึงวงหลายเหลี่ยม หรือมีการเชื่อมกันของวงจนเกิดโครงสร้างซับซ้อนเป็นลักษณะค้ำยกรง (Cage) ในหนึ่งหน่วย เซลล์ (Unit cell) ของซีโอไลต์ประกอบไปด้วยหลายหน่วยของ SBUs ปัจจุบันมี SBUs ที่เป็นที่รู้จัก 23 ชนิด ตามรูปที่ 2-10

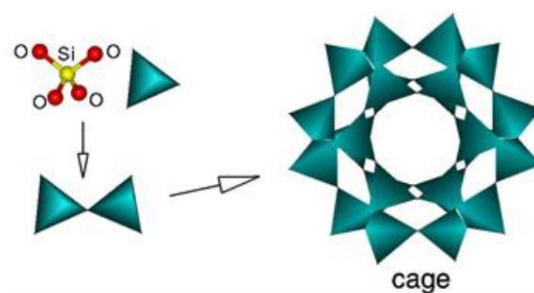


รูปที่ 2-10 โครงสร้างแบบทุติยภูมิในซีโอไลต์ [8]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

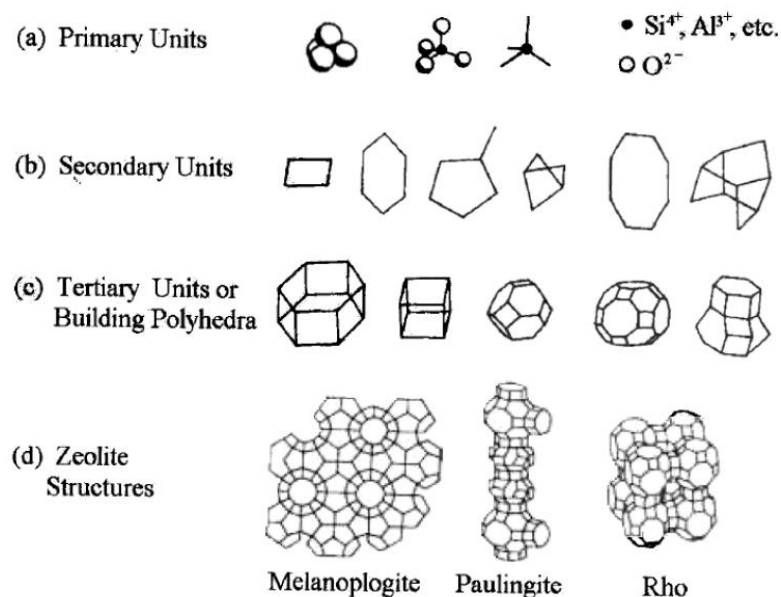
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ยกตัวอย่างการรวมตัวของ PBUs มาเป็น SBUs ในโครงสร้างแบบกรง (Cage) ดังรูปที่ 2-11



รูปที่ 2-11 การรวมกันของหน่วยปฐมภูมิ ( $\text{SiO}_4$ )<sup>4+</sup> เป็นโครงสร้างแบบทุติยภูมิที่มีลักษณะเป็นกรง  
[10]

นอกจากนี้เมื่อ SBUs เกิดการรวมตัวกันตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปจะทำให้เกิดหน่วยย่อยของโครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary building units ; TBUs) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้มีรูปร่างต่างๆ ตามรูปที่ 2-12 [10]



รูปที่ 2-12 การพัฒนาโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ (a) หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (PBUs) ของ ( $\text{SiO}_4$ )<sup>4+</sup> หรือ ( $\text{AlO}_4$ )<sup>5+</sup> ผ่าน (b) หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (SBUs) และ (c) หน่วยโครงสร้างตติยภูมิ (TBUs) ไปยัง (d) โครงสร้างของซีโอไลต์ [10]

### 2.3.4 ความมีขั้วของซีโอไลต์

ความมีขั้วของซีโอไลต์ขึ้นกับสนามไฟฟ้าสถิตภายในรูพรุนที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างประจุหรือสามารถพิจารณาจากปริมาณ Si/Al คือ ความมีขั้วของซีโอไลต์จะลดลงเมื่อสัดส่วนของ Si/Al มีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการเกิดการกำจัดอะลูมิเนียมออกจากโครงสร้างทำให้ไฟฟ้าสถิตลดลง ซึ่งตัวถูกดูดซับที่มีขั้วจะดูดซับได้ดีกับซีโอไลต์ที่มีขั้ว ขณะที่ตัวถูกดูดซับไม่มีขั้วก็จะดูดซับได้ดีกับซีโอไลต์ที่ไม่มีขั้ว [11]

### 2.3.5 แหล่งที่มาของซีโอไลต์

ซีโอไลต์สามารถจำแนกได้ตามแหล่งที่มา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

**2.3.5.1 ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural zeolite)** เป็นซีโอไลต์ที่เกิดตามธรรมชาติ พบจากการทำเหมืองแร่ซึ่งเป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกต ตัวอย่างของซีโอไลต์ธรรมชาติ เช่น Erionite, Mordenite และ Clinoptilolite เป็นต้น

**2.3.5.2 ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Synthetic Zeolite)** เป็นซีโอไลต์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของต่างออกไซด์ต่างๆ เช่น  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Na_2O$  ในระบบที่มีน้ำ จะได้ซีโอไลต์ที่มีน้ำในผลึก กระบวนการสังเคราะห์สามารถทำได้ทั้งที่เป็นเจล (gelation) เป็นรูพรุน (porous) และคล้ายเม็ดทราย (sandlike) เช่น zeolite A, X และ Y

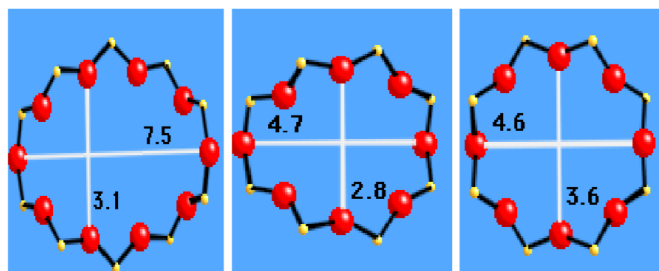
### 2.3.6 โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ธรรมชาติ

ตารางที่ 2-5 แสดงสมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ธรรมชาติ ซึ่งโครงสร้างที่พบส่วนใหญ่ของซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นชนิด Clinoptilolite มีโครงสร้างรูพรุนแบบ 2 มิติ และมีรูพรุน 3 ชนิด ได้แก่ รูพรุนชนิด A (10-member ring) มีขนาด  $3.1 \times 7.5$  อังสตรอม รูพรุนชนิด B (8-member ring) มีขนาด  $2.8 \times 4.7$  อังสตรอม และรูพรุนชนิด C (8-member ring) มีขนาด  $3.6 \times 4.6$  อังสตรอม ดังรูปที่ 2-13 โดยที่รูพรุนชนิด A และ B มีการจัดเรียงตัวแบบขนานกันตามแกน c ขณะที่รูพรุนชนิด C มีการเรียงตัวแบบตัดขวางตามแกน a ตามรูปที่ 2-14 [12] นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ธรรมชาติที่สำคัญอื่นๆ (รูปที่ 2-15)

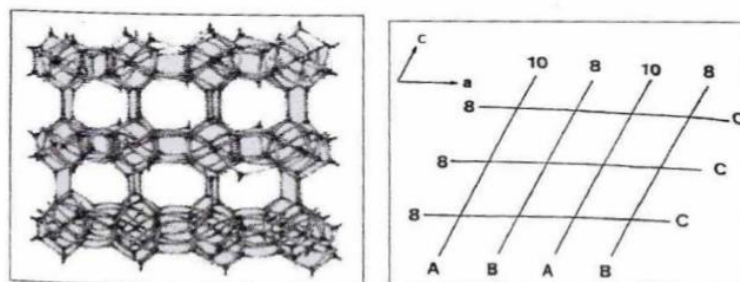
ตารางที่ 2-5 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดต่างๆ [8]

Mineral (code)	Formula	SBU	Channels Dimensions (Å) <sup>1</sup>	Si/Al	Channel System	Crystal System
Mordenite (MOR)	$(Ca, Na_2, K_2)Al_2Si_{10}O_{24} \cdot 7H_2O$	5-1	6.5×7 2.6×5.7	5.5	1-D	Orthorhombic
Clinoptilolite (CLI)	$(Na, K, Ca)_6(Si, Al)_36O_{72} \cdot 20H_2O$	4-4-1	3.6×4.6 3.1×7.5 2.8×4.7	6	2-D	Monoclinic
Ferrierite (FER)	$(Na, K)_2MgAl_3Si_{15}O_{36}(OH) \cdot 9H_2O$	5-1	3.5×4.8 4.2×5.4	5-10	2-D	Orthorhombic
Chabazite (CHA)	$CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 6H_2O$	6-6 or 6 or 4-2 or 4	3.8×3.8	4	3-D	Rhombohedral
Erionite (ERI)	$(K_2, Ca, Na_2)_2Al_4Si_{14}O_{36} \cdot 35H_2O$	6 or 4	3.6×5.1	4	3-D	Hexagonal
Phillipsite (PHI)	$(K, Na, Ca)_{12}(Si, Al)_8O_{16} \cdot 6H_2O$	8 or 4	3.8×3.8 3×4.3 3.2×3.3	2	3-D	Monoclinic
Analcime (ANA)	$NaAlSi_2O_6 \cdot H_2O$	6-2 or 6 or 4-[1,1] or 1-4-1 or 4	1.6×4.2	2	3-D	Cubic

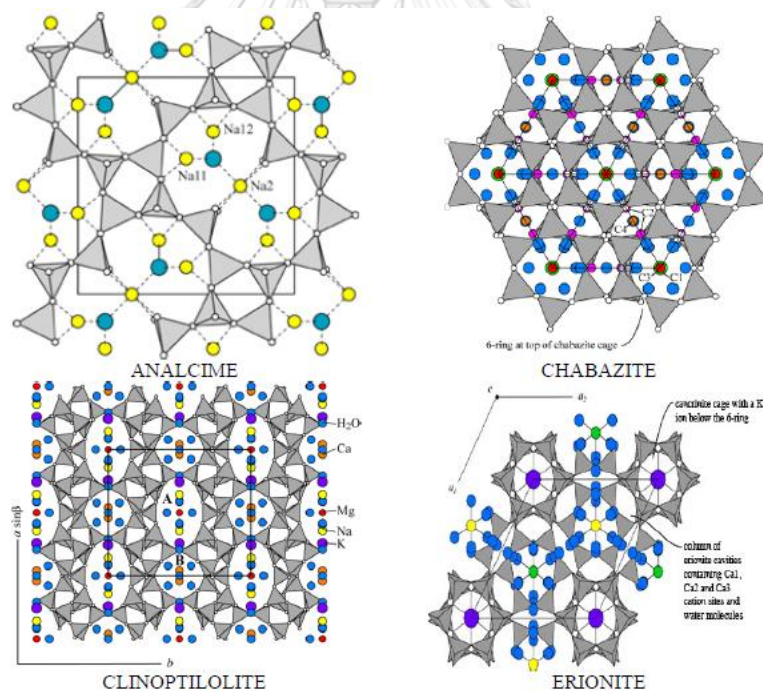




รูปที่ 2-13 รูปพรุนของ Clinoptilolite ชนิด A, B และ C (เรียงจากซ้ายไปขวา) [8]



รูปที่ 2-14 การจัดเรียงตัวของรูปพรุนชนิด A, B และ C ในโครงสร้างผลึก Clinoptilolite [12]



รูปที่ 2-15 โครงสร้างผลึกและรูปพรุนของซีโอไลต์ธรรมชาติที่สำคัญ [8]



## 2.4 ทฤษฎีการดูดซับ

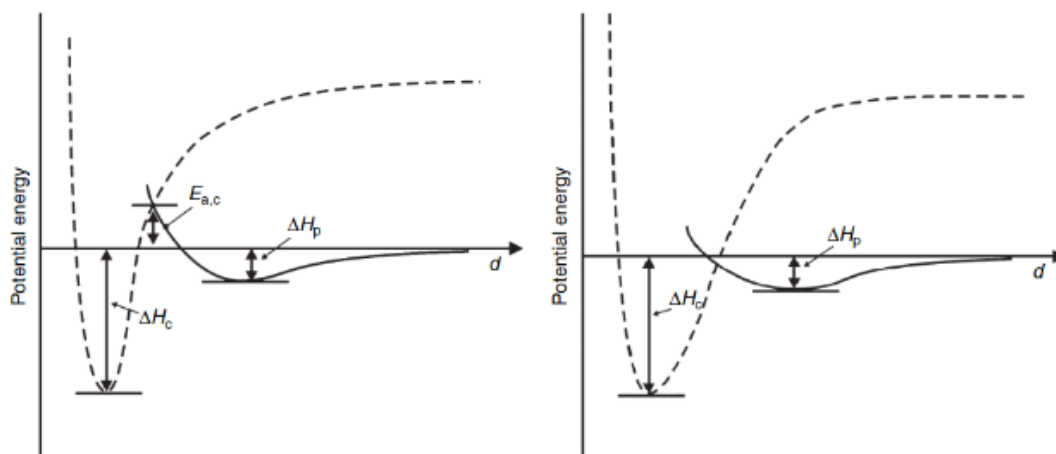
การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่โมเลกุล หรือประจุ ที่เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) สามารถอยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลว เกาะบนพื้นผิวของของแข็ง หรืออาจจะเป็นของเหลว ที่เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น และตัวถูกดูดซับไม่ได้แพร่เข้าไปยังโครงสร้างของตัวดูดซับ (หากมีการแพร่เข้าไปในตัวดูดซับจะเรียกกระบวนการนี้ว่าการดูดซึม (Absorption) ในขณะที่กระบวนการตรงข้ามคือการปล่อยให้โมเลกุลจากพื้นผิวของแข็งหลุดออกจากพื้นผิวจะเรียกว่าการคายสารออก (Desorption) กระบวนการนี้มักเกิดขึ้นเป็นธรรมชาติในสภาพแวดล้อม มีการนำไปใช้ประโยชน์เชิงอุตสาหกรรมมากมาย เช่น การแยกองค์ประกอบในแก๊ส หรือเพื่อลดการปลดปล่อยแก๊สหรือของเหลว นอกจากนี้ยังใช้ในกระบวนการสำคัญอื่นๆ เช่น การเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์หรือการแลกเปลี่ยนของไอออน [13]

### 2.4.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

**2.4.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)** คือ กระบวนการที่ตัวถูกดูดซับเกาะบนพื้นผิวอันเนื่องมาจากแรงทางกายภาพ ซึ่งเป็นแรงอ่อนๆ เช่น แรง Van Der Waals เมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมาสัมผัสที่พื้นผิวของตัวดูดซับที่พลังงานต่ำ จะทำให้เกิดความร้อนจากการสั่นของโครงสร้างผลึกของของแข็ง ซึ่งจะถูกกักเก็บไว้ที่บนพื้นผิว หากโมเลกุลมาสัมผัสบนพื้นผิวที่มีพลังงานมากเกินไป โมเลกุลจะไม่สามารถถูกดูดซับได้และจะกระเด็นออกไป การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีต่ำมาก ปกติจะน้อยกว่า  $20 \text{ kJ/mol}$  ทั้งตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจะ ไม่มีการเปลี่ยนสถานะทางเคมีใดๆ ได้แก่มิมีการเกิดพันธะใหม่ และไม่มีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงาน เป็นเพียงแค่ความร้อนของตัวดูดซับเล็กน้อยเท่านั้น การดูดซับชนิดนี้มักเปลี่ยนแปลงได้ง่ายมาก และสามารถเกิดกระบวนการย้อนกลับได้ง่ายเช่นกันแม้เพียงแค่ผลมาจากการสั่นสะเทือน อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการดูดซับชนิดนี้เกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ หรืออุณหภูมิต่ำ (ประมาณ  $20^\circ\text{C}$ ) เมื่อพิจารณาถึงลักษณะของแรงที่เกิด จะแสดงให้เห็นว่ากระบวนการนี้สามารถที่จะเกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ทรายที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับยังไม่สามารถลดแรงไฟฟ้าสถิตได้ ตัวถูกดูดซับโมเลกุลใหม่สามารถเกาะบนพื้นผิวตัวดูดซับได้เรื่อยๆ แม้ว่าจะมีโมเลกุลอื่นปกคลุมอยู่แล้วก็ตาม ปกติแล้วการเกิดการคายสารออกต้องการพลังงานที่น้อยกว่า เมื่อความแข็งแรงของการดูดซับลดลงในขณะที่มีการเพิ่มจำนวนชั้นของตัวถูกดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวตัวดูดซับ

**2.4.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption)** คือกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งจะมีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับแบบทางกายภาพ ปกติแล้วตัวดูดซับจะทำพันธะทางเคมีแบบพันธะโควาเลนต์กับตัวดูดซับ การเปลี่ยนแปลงพลังงานมีมากกว่า 40-400 kJ/mol ซึ่งเป็นค่าลบเสมอเนื่องจากการดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเอง กระบวนการดูดซับทางเคมีอาจต้องการกระบวนการกระตุ้นตัวถูกดูดซับก่อน เพื่อให้มีพลังงานขั้นต่ำในการดูดซับ ซึ่งขึ้นอยู่กับระดับพลังงานกำแพงระหว่างการดูดซับแบบทางกายภาพและทางเคมีดังรูปที่ 2-16



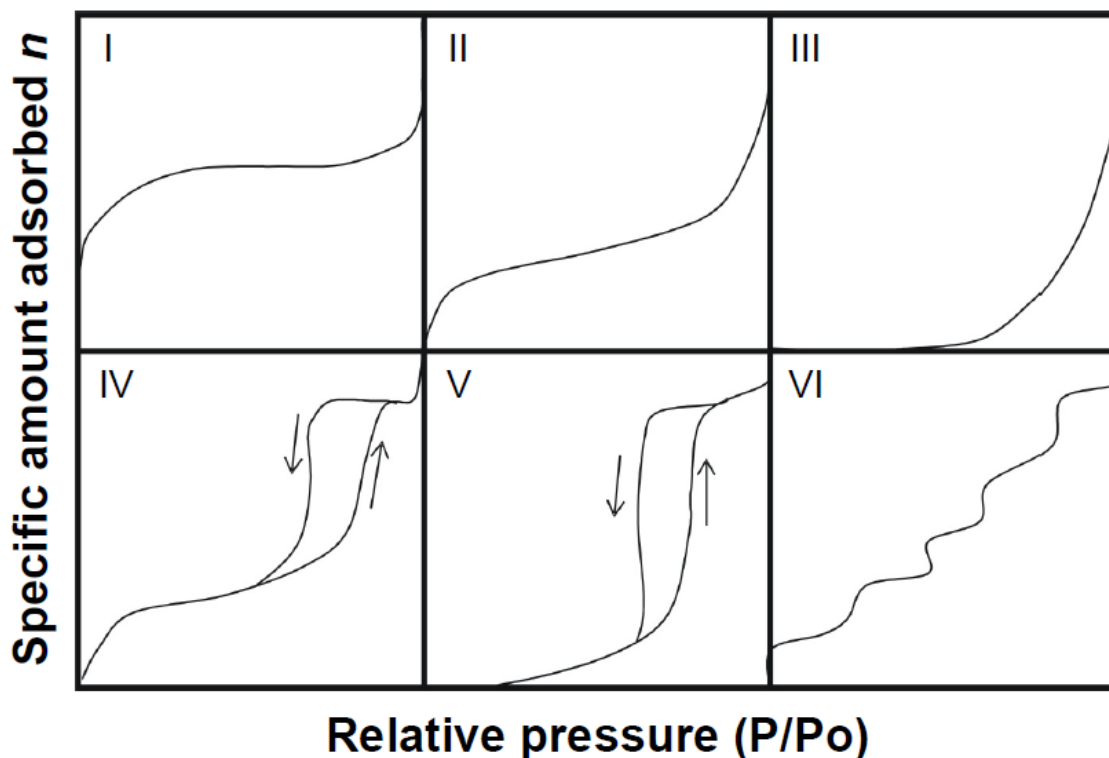
รูปที่ 2-16 แผนภาพแสดงพลังงานของการดูดซับที่ขึ้นกับระยะทางของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจากพื้นผิว เส้นทึบแสดงถึงการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) ที่เกี่ยวข้องกับพลังงานต่ำ ( $\Delta H_p$ ) และเส้นประแสดงถึงการดูดซับแบบทางเคมี เมื่อพลังงานที่ต้องการสูงกว่า ( $\Delta H_c$ ) รูปทางด้านซ้ายแสดงในกรณีที่มีการกระตุ้นพลังงานในการดูดซับทางเคมี ( $E_{a,c}$ ) [13]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ถ้าพลังงานขวางกันมีค่าสูงกว่าพลังงาน โมเลกุลอิสระ ตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับทางเคมีกับตัวดูดซับเฉพาะเมื่อมีมากกว่าพลังงานขวางกันเท่านั้น ไม่เช่นนั้นจะเกิดกระบวนการคายสารแทน ในกรณีที่พลังงานกำแพงต่ำกว่าพลังงาน โมเลกุลอิสระ โมเลกุลที่ถูกดูดซับแบบทางกายภาพไปแล้วทั้งหมดสามารถเกิดการสร้างพันธะเคมีอย่างรวดเร็วกับพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว การดูดซับทางเคมี จะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น เมื่อพื้นที่ทั้งหมดถูกครอบคลุมโดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ก็จะไม่มีความว่างสำหรับทำพันธะ

#### 2.4.2 ชนิดของไอโซเทิร์มในการดูดซับ

สมมูลของการดูดซับเป็นทฤษฎีที่สำคัญในการวิเคราะห์เทคโนโลยีการดูดซับ และเป็นพื้นฐานของการอธิบายความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่มีความเฉพาะต่อตัวถูกดูดซับ นอกจากนี้ยังทำให้เห็นถึงกลไกการดูดซับที่แตกต่างกัน หน่วยงาน IUPAC ได้จำแนกการดูดซับตามไอโซเทิร์ม ไว้ 6 แบบดังรูปที่ 2-17



รูปที่ 2-17 ไอโซเทิร์ม 6 ชนิดที่จำแนกตาม IUPAC (I) Microporous; (II และ III) Macroporous; (IV และ V) Mesoporous; และ (VI) Non-porous material [14]

ไอโซเทิร์มชนิด I เป็นชนิด Langmuir isotherm แสดงถึงภาวะการดูดซับบนพื้นผิววัสดุที่มีรูพรุนแบบ Micropore (ขนาดรูพรุน < 2 นาโนเมตร) ลักษณะของการดูดซับชนิดนี้คือจำนวนโมเลกุลของก๊าซที่ถูกดูดซับมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ (Relative pressure;  $P/P_0$ ) ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมเต็มรูพรุนของ Micropore หลังจากนั้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น กราฟการดูดซับจะเรียบหรือเกือบเรียบ ซึ่งบ่งบอกถึง Micropore ถูกดูดซับจนเต็มแล้ว และเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกการควบแน่นอาจเกิดขึ้นได้ ตัวดูดซับชนิดที่มีพื้นที่ผิวภายนอกนอกมักจะมีพฤติกรรมการดูดซับตรงกับไอโซเทิร์มชนิด I

ไอโซเทิร์มชนิด II เป็นชนิด S-shape isotherm แสดงการดูดซับบนพื้นผิววัสดุที่มีรูพรุนแบบ Macropore (ขนาดรูพรุน > 50 นาโนเมตร) ในกรณีนี้ ตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับจะมีแรงกระทำที่แข็งแรง

ไอโซเทิร์มชนิด III ยังคงแสดงถึงการดูดซับบนพื้นผิววัสดุที่มีรูพรุนแบบ Macropore แต่ในกรณีนี้แรงกระทำระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับที่พื้นผิวจะอ่อนกว่า

ไอโซเทิร์มชนิด IV แสดงถึงการดูดซับบนพื้นผิววัสดุแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) มักพบในตัวดูดซับที่มีรูพรุนแบบ Mesopore (ขนาดรูพรุน 2-50 นาโนเมตร) ที่ช่วงความดันสัมพัทธ์ต่ำซึ่งมีลักษณะการดูดซับเหมือนกับ ไอโซเทิร์มชนิด II และจะเกิดการควบแน่นแคปิลารีเมื่อความดันเพิ่มขึ้น

ไอโซเทิร์มชนิด V แสดงถึงการดูดซับบนพื้นผิววัสดุแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) ที่มีการควบแน่น มักพบในตัวดูดซับที่มีรูพรุนแบบ Mesopore

ไอโซเทิร์มชนิด VI เป็นการเกิดการดูดซับบนพื้นผิววัสดุแบบหลายชั้นที่เกิดกับตัวดูดซับชนิดที่ไม่มีรูพรุนและมีพื้นผิวเรียบ ลักษณะเฉพาะสำหรับชนิดนี้คือกราฟที่มีลักษณะคล้ายบันได

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัญหาการใช้งานน้ำมันไบโอดีเซลผสมที่อุณหภูมิต่ำพบบ่อยมากขึ้นในแถบทวีปยุโรปและอเมริกาเหนือ เนื่องจากมีการใช้งานปริมาณสัดส่วนไบโอดีเซลในไบโอดีเซลผสมเพิ่มขึ้น ลักษณะปัญหาที่พบได้แก่ เกิดการอุดตันไส้กรองน้ำมันในเครื่องยนต์ดีเซล และเกิดการอุดตันไส้กรองในตู้จ่ายน้ำมันดีเซล แม้ว่าน้ำมันไบโอดีเซลจะมีความสามารถในการกรองผ่าน (Cold soak filtration time, CSFT) ต่ำกว่า 200 วินาที ตามข้อกำหนดคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลของมาตรฐาน ASTM D6751 ก็ตาม แต่ยังคงพบปัญหาดังกล่าวอยู่

ปี 2011 Chupka และคณะ [15] พบว่า ตะกอนที่พบในไบโอดีเซลน้ำมันถั่วเหลือง (SO-B100) เป็น Saturated monoglycerides (SMG) ได้แก่ Monomyristin, Monopalmitin และ Monostearin และพบว่า SMG เพิ่มค่า Final melting temperature (FMT) ที่ความเข้มข้นเหนือจุดยูเทกติก (Eutectic point) อย่างมีนัยสำคัญ

ปี 2012 Chupka และคณะ [16] ศึกษาผลของน้ำ, Steryl glucoside (SG) และ SMG ที่เป็นสิ่งเจือปนใน SO-B100 ที่มีต่อสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ (low-temperature properties) พบว่า SMG

เท่านั้นที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ ต่อค่าจุดขุ่น และ Final melting temperature (FMT) ซึ่งความแตกต่างระหว่างค่า FMT กับจุดขุ่น เป็นการบ่งบอกถึงการเปลี่ยนเฟสจาก แอลฟา-เฟส ไปเป็น เบตา-เฟส ที่มีความสามารถในการละลายใน B100 ได้น้อยกว่า แอลฟา-เฟส ถึง 10 เท่า เนื่องจาก เบตา-เฟส มีเสถียรภาพและมีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเปลี่ยนเฟสลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ SMG ใน B100 มีค่าสูงกว่าช่วง 0.2–0.3 wt.%

อย่างไรก็ตาม ประเทศไทยใช้ไบโอดีเซลปาล์ม (PO-B100) เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีองค์ประกอบกรดไขมันชนิดที่มีสายโซ่ยาวและความอึดตัวมากกว่ากรดไขมันใน SO-B100 จึงมีการศึกษาตะกอนที่เกิดขึ้นใน PO-B100 โดยในปี 2008 Tang และคณะ [17] ระบุตะกอนที่เกิดขึ้นใน PO-B100 มีองค์ประกอบเป็น MG ขณะที่ ตะกอนที่เกิดขึ้นใน SO-B100 มีองค์ประกอบ เป็น SG

ปี 2014 Na-Ranong และคณะ [18] ศึกษาตะกอนที่เกิดขึ้นใน PO-B100 ใกล้เคียงจุดขุ่น พบว่า ตะกอนเหล่านั้นคือ SG เมื่อเพิ่มปริมาณ SG ใน PO-B100 เวลาที่เกิดการตกตะกอนจะลดลง ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพในการจัดเก็บลดลง ขณะที่เวลาที่เกิดการตกตะกอนไม่สัมพันธ์กับปริมาณ MG, DG และ Triglycerides (TG) ที่เปลี่ยนแปลงไป อย่างไรก็ตาม ในปี 2015 Plata และคณะ [19] พบว่า ตะกอนมีองค์ประกอบผสมของ SG และ MG และความสามารถในการกรองผ่านที่อุณหภูมิต่ำโดยการทดสอบ CSFT จะแปรผันกับปริมาณ SG ใน PO-B100

ปัจจุบันกรมธุรกิจพลังงาน ได้กำหนดให้ใช้ไบโอดีเซลผสมสูงสุดคือ B7 ซึ่งได้จากการผสมระหว่าง PO-B100 กับดีเซล (B0) ตามอัตราส่วน 7 ต่อ 93 โดยปริมาตร เพื่อใช้ในเครื่องยนต์ดีเซล แต่ยังคงพบว่า น้ำมันไบโอดีเซลผสมที่อัตราส่วนนี้มีตะกอนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำในบริเวณภาคเหนือและบนยอดดอยในช่วงฤดูหนาว

ปี 2014 Chupka และคณะ [20] ศึกษาผลของ SMG ที่มีต่อการใช้งานของน้ำมันไบโอดีเซลผสมชนิดต่างๆ ซึ่งได้จากการผสม B100 ของ Canola oil, Soy oil, และ Mixed feedstocks กับน้ำมันดีเซลอีก 4 แหล่ง ที่อัตราส่วน B5, B10 และ B20 พบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณ SMG 0.01 wt.% จะเพิ่มค่าจุดขุ่นถึง 4 °C และเมื่อระดับ SMG คงที่ การเพิ่มปริมาณไบโอดีเซลกลับทำให้ค่าจุดขุ่นต่ำลง ส่วนการเพิ่มปริมาณ แอโรแมติก ในดีเซลจะทำให้ค่าจุดขุ่นต่ำลงเช่นกัน เนื่องจากแอโรแมติกเพิ่มความสามารถในการละลายของ SMG นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นอัตราส่วนระหว่าง UMG ต่อ SMG โดยการผสม Monoolein จะทำให้ค่าจุดขุ่นต่ำลง ซึ่งอาจเป็นเพราะ Monoolein ไปยับยั้งการเกิด

nucleation ของ SMG และการเปลี่ยนเฟสของ SMG จาก แอลฟา-เฟส เป็น เบตา-เฟส ซึ่งสังเกตได้ในน้ำมันไบโอดีเซลผสมที่มีปริมาณ SMG ประมาณ 0.01 wt.%

แม้จะทราบแล้วว่า SMG เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ไขมันไบโอดีเซลผสมเกิดตะกอนที่อุณหภูมิต่ำ แต่ยังไม่มีการศึกษาปริมาณ SMG ใน PO-B100 ที่มีผลต่อสมบัติที่อุณหภูมิต่ำของไขมันไบโอดีเซลพาล์มผสม โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้เป็นการศึกษาในกรณีไขมันไบโอดีเซลผสมของ Canola oil และ Soy oil แต่การตอบสนองของค่าจุดขุ่นกับปริมาณ SMG ในไบโอดีเซลพาล์มผสมอาจมีความแตกต่างกับไบโอดีเซลชนิดอื่น เนื่องจากองค์ประกอบกรดไขมันในไบโอดีเซลแตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาปริมาณ SMG ใน PO-B100 ที่มีผลต่อสมบัติที่อุณหภูมิต่ำของไบโอดีเซลพาล์มผสม นอกจากนี้ยังศึกษาหาแนวทางการลดปริมาณ SMG ใน PO-B100 ก่อนนำไปผสมกับน้ำมันดีเซล

ในปัจจุบันกระบวนการที่เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในการทำให้ B100 บริสุทธิ์ มี 2 วิธี คือ การล้างแบบเปียก และ การล้างแบบแห้ง โดยการล้างแบบเปียกเป็นวิธีการดั้งเดิม ซึ่งประกอบด้วยหลายขั้นตอน ได้แก่ การตกตะกอน การกวน และการกรอง กระบวนการนี้ทำให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมาก ซึ่งจะต้องมีการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้ก่อนนำกลับมาใช้ซ้ำหรือปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ดังนั้นวิธีการล้างแบบแห้งโดยใช้ตัวดูดซับจึงมีข้อดีกว่าวิธีการล้างแบบเปียกคือ เป็นกระบวนการที่เร็วกว่าโดยปราศจากการผลิตน้ำเสีย ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการกำจัด SMG โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ เช่น Na-Ranong และคณะ [21] ศึกษาการดูดซับ MG ในไบโอดีเซลพาล์มด้วย Magnesium silicate (MS) หรือ Magnesol ซึ่งเป็นตัวดูดซับเกรดการค้าที่นิยมใช้ในขั้นตอนการล้าง และ Bleaching earth (BE) ที่มีโครงสร้างเป็นซิลิกาและอะลูมินาที่ใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการฟอกสีน้ำมันพืช พบว่า ประสิทธิภาพในการลดปริมาณ MG ของ MS สูงกว่า BE ในช่วงอุณหภูมิ 65–80 °C โดยใช้ตัวดูดซับ 1 wt.% ตัวดูดซับ MS สามารถลด MG ได้ 8.4–12.7 % ในขณะที่ BE สามารถลด MG ได้เพียง 4.5–6.7 % เนื่องจากตัวดูดซับ MS มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่า BE ถึง 8 เท่า และมีปริมาตรรูพรุนสูงกว่า 3 เท่า แต่เนื่องจากตัวดูดซับ MS ที่นิยมใช้มีราคาที่สูงขึ้นสูงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ดังนั้นปี 2016 Saengprachum และคณะ [22] จึงศึกษาการสังเคราะห์ตัวดูดซับซิลิกาที่สกัดจากเถ้าแกลบข้าวและเคลือบด้วย อะลูมิเนียมออกไซด์ (AO\_RHA) เพื่อดูดซับ MG ในไบโอดีเซลพาล์ม พบว่า AO\_RHA มีประสิทธิภาพในการดูดซับ MG ในไบโอดีเซลพาล์มดีกว่า Magnesol ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 wt.% ตัวดูดซับ AO\_RHA สามารถลด MG ได้ 91% ในขณะที่ Magnesol ลด MG ได้เพียง 47% โดยปัจจัยที่ทำให้

การดูดซับ MG ต่างกันคือ พื้นที่ผิวจำเพาะ, เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และปริมาณอะลูมินา พบว่าเมื่อทั้งสามปัจจัยนี้มีค่าสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับ MG ก็จะสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง mesopore โดยรายงานยังระบุว่า เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนที่ให้ค่าการดูดซับ MG ดีที่สุดคือประมาณ 15 nm

อย่างไรก็ดี การสังเคราะห์ AO\_RHA จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 700 °C และใช้เวลา มากกว่า 6 ชั่วโมง ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนในการเตรียมตัวดูดซับ งานวิจัยนี้จึงสนใจใช้ตัวดูดซับที่พัฒนาจากซีโอไลต์ธรรมชาติ เนื่องจากมีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินา ความพรุนสูง และราคาถูกกว่าตัวดูดซับทางการค้าถึง 11 เท่า และปัจจุบันยังไม่พบข้อมูลงานวิจัยใดที่ศึกษาการดูดซับ MG ในไบโอดีเซลโดยใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ



## บทที่ 3

### วิธีการวิจัย

#### 3.1 วัสดุ และอุปกรณ์

##### 3.1.1 น้ำมันเชื้อเพลิง

น้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิดได้รับความอนุเคราะห์จากสถาบันนวัตกรรม ปตท. ได้แก่

- น้ำมันดีเซล มาตรฐานยูโร 4 (B0-Euro4) ที่มีปริมาณแอมโมเนียสูง
- น้ำมันดีเซล มาตรฐานยูโร 5 (B0-Euro5) ที่มีปริมาณแอมโมเนียต่ำ
- น้ำมันปาล์มไบโอดีเซล (B100)

##### 3.1.2 ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ 5 ชนิด มีลักษณะดังรูปที่ 3-1 โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

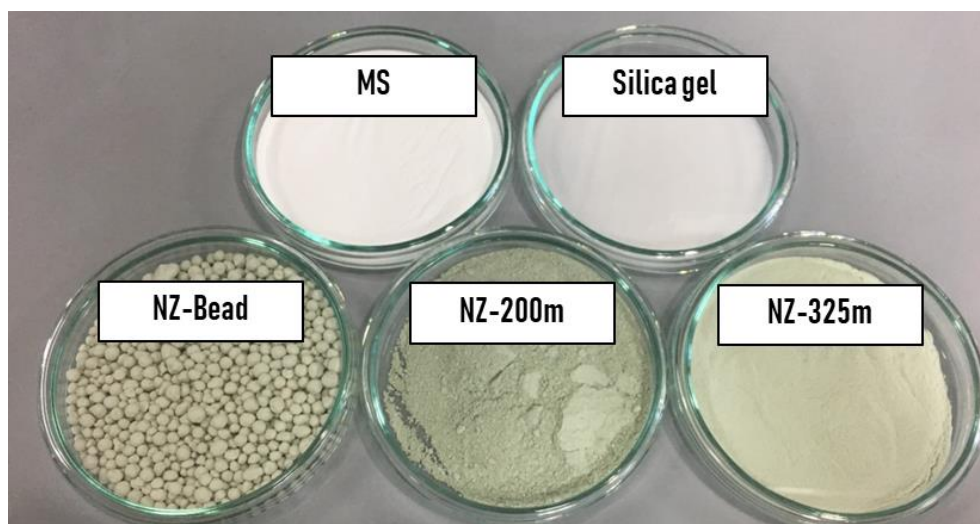
##### 3.1.2.1 ตัวดูดซับเกรดการค้า

- ตัวดูดซับ Magnesium silicate (MS) จากบริษัท The Dallas Group of America, Inc.
- ซิลิกาเจล (Silica gel) จากบริษัท MP EcoChrom

##### 3.1.2.2 ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural Zeolite)

- ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดเม็ด (NZ-Bead) จากบริษัท ฟินพานัท อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
- ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่ผ่านตะแกรงขนาด 200 mesh หรือ 74  $\mu\text{m}$  (NZ-200m) จากบริษัท ฟินพานัท อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด
- ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่ผ่านตะแกรงขนาด 325 mesh หรือ 44  $\mu\text{m}$  (NZ-325m) จากบริษัท ฟินพานัท อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด





รูปที่ 3-1 ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง

### 3.1.3 สารเคมี

- ผงโมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัว (Saturated monoglycerides powder ; SMG) ได้รับความอนุเคราะห์จาก สถาบันนวัตกรรม ปตท.
- กรดไนตริกความเข้มข้น 65% ยี่ห้อ RCI Labscan
- N-methyl-N-trimethylsilyltrifluoroacetamide (MSTFA) ยี่ห้อ SIGMA-ALDRICH
- Pyridine (AR grade) ยี่ห้อ Merck
- Heptane (AR grade) ยี่ห้อ Fisher Scientific
- 1,2,4-Butanetriol (ความเข้มข้น 1 mg/ml) ยี่ห้อ SIGMA-ALDRICH
- Glycerides stock solution (ความเข้มข้น 2.5 mg/ml) ยี่ห้อ Agilent
- น้ำกลั่น Type I

### 3.1.4 อุปกรณ์

- Hot plate รุ่น C-MAG HS 7 ยี่ห้อ IKA
- เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง รุ่น XS6002S ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น XS205 ยี่ห้อ METTLER TOLEDO
- เตาอบ (hot air oven)
- เครื่องวัด pH
- Syringe filter 0.45  $\mu$ m PTFE

- เครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วรอบสูง ยี่ห้อ TOSHIBA
- ทรายกรองขนาดรูพรุน 75  $\mu\text{m}$
- คอลัมน์ GC ชื่อ DB5-HT ยี่ห้อ Agilent
- กระดาษกรองเบอร์ 2
- โกร่งบดสาร

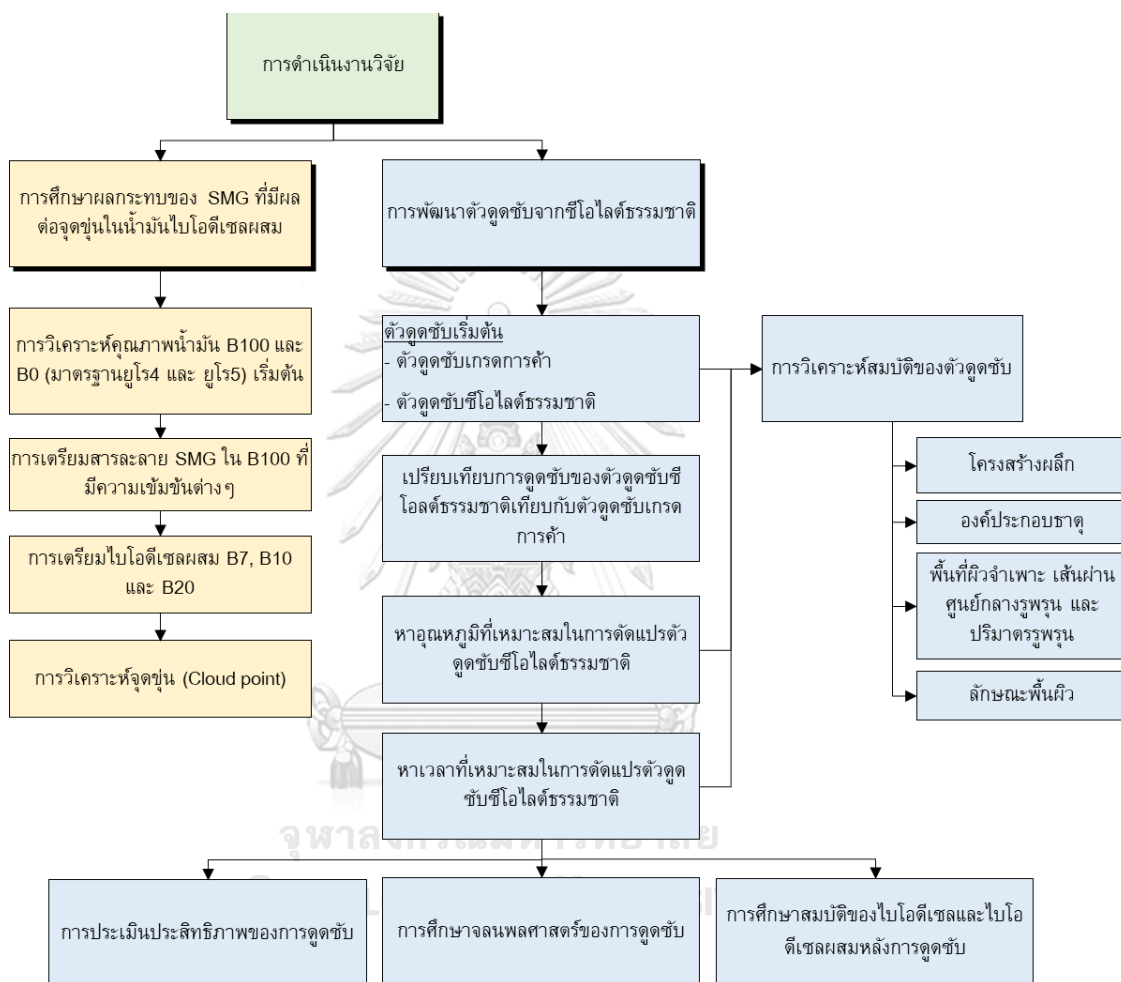
### 3.1.5 เครื่องมือวิเคราะห์

- เครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatograph) รุ่น 1200 ยี่ห้อ Agilent สำหรับทดสอบความเข้มข้นของแอโรแมติกตามมาตรฐาน IP 391
- เครื่องมือทดสอบ (Cold filter plugging point tester) รุ่น FPP 5Gs ยี่ห้อ ISL สำหรับทดสอบจุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำตามมาตรฐาน ASTM D6371
- เครื่องมือทดสอบจุดขุ่นและจุดไหลเท รุ่น CPP 5Gs ยี่ห้อ ISL สำหรับทดสอบจุดขุ่นตามมาตรฐาน ASTM D2500 และจุดไหลเทตามมาตรฐาน ASTM D5950
- เครื่องมือทดสอบหาความเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C รุ่น 743 Rancimat ยี่ห้อ Metrohm สำหรับทดสอบเสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C ตามมาตรฐาน EN 15751
- เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph) รุ่น 6890 ยี่ห้อ Agilent
- เครื่องวิเคราะห์ธาตุ Wavelength dispersive X-ray fluorescence spectrometer รุ่น Axios Petro ยี่ห้อ PANalytical
- เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบทางจุลภาค Electron probe micro analyzer (EPMA) รุ่น 1720H ยี่ห้อ Shimadzu
- เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffractometer)
- เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนด้วยเทคนิคของการดูดซับ และคายซับแบบคายภาพกับก๊าซไนโตรเจน รุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic

### 3.2 สถานที่ทำการวิจัย

ฝ่ายวิจัยผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีเชื้อเพลิงทางเลือก สถาบันนวัตกรรม บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

### 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3-2 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย

ตามรูปที่ 3-2 แสดงถึงภาพรวมในการดำเนินงานวิจัยทั้ง 2 ส่วน ซึ่งรายละเอียดในการดำเนินงานมีดังนี้

### 3.3.1 การศึกษาผลกระทบของ SMG ที่มีผลต่อจุดขุ่นในน้ำมันไบโอดีเซลผสม

#### 3.3.1.1 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำมัน B100 และ B0 (มาตรฐานยูโร4 และ ยูโร5) เริ่มต้น

เพื่อให้มั่นใจว่าน้ำมันที่นำมาทำงานวิจัยมีคุณภาพตามมาตรฐานของกรมธุรกิจพลังงาน จึงจำเป็นต้องทดสอบสมบัติตามประกาศข้อกำหนดของน้ำมันดีเซล (B0) และไบโอดีเซล (B100) และสมบัติอื่นๆที่จำเป็น ซึ่งรายการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 3-1 และ ตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-1 หัวข้อการทดสอบสมบัติของ B100 เริ่มต้น

สมบัติของ B100	มาตรฐาน
เมทิลเอสเทอร์ (Methyl esters, FAME)	EN 14103
กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (Linolenic acid methyl ester)	EN 14103
กลีเซอรินอิสระ (Free glycerin)	EN 14105
โมนอกลิเซอไรด์ (Monoglyceride)	EN 14105
โมนอกลิเซอไรด์ชนิดอิ่มตัว (Saturated monoglyceride)	EN 14105
โมนอกลิเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated monoglyceride)	EN 14105
ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride)	EN 14105
ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride)	EN 14105
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C (Oxidation stability at 110 °C)	EN 15751
น้ำ (Water content)	EN ISO 12937
ค่าความเป็นกรด (Acid value)	ASTM D664
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C (Density @ 15.0 °C)	ASTM D4052
จุดขุ่น (Cloud point)	ASTM D2500
จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold filter plugging point)	ASTM D6371
จุดไหลเท (Pour point)	ASTM D5950

ตารางที่ 3-2 หัวข้อการทดสอบสมบัติของ B0 มาตรฐานยูโร 4 และ ยูโร 5 เริ่มต้น

สมบัติของ B0 มาตรฐานยูโร 4 และ ยูโร 5	มาตรฐาน
แอโรแมติกวงเดียว (Mono-aromatics)	IP 391
แอโรแมติกสองวง (Di-aromatics)	IP 391
แอโรแมติกสามวง (Tri-aromatics)	IP 391
แอโรแมติกทั้งหมด (Total aromatics)	IP 391
น้ำ (Water content)	ISO 12937
จุดขุ่น (Cloud point)	ASTM D2500
จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold filter plugging point)	ASTM D6371
จุดไหลเท (Pour point)	ASTM D5950

### 3.3.1.2 การเตรียมสารละลาย SMG ใน B100 ที่มีความเข้มข้นต่างๆ

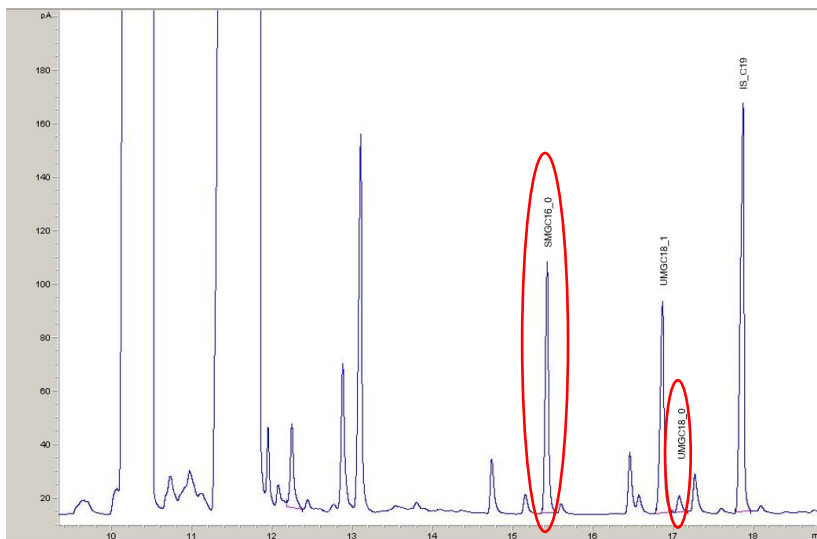
1. ชั่งผงโมโนกลีเซอรัไรด์ชนิดอิมิตัว (SMG powder) โดยใช้เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่งลงในขวดแก้วขนาด 100 ml ที่ทำการห้กลับน้ำหนักขวดแล้วจำนวน 7 ใบตามตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 น้ำหนัก SMG powder ที่ใช้ในการเตรียมสารละลาย SMG ใน B100 ที่มีความเข้มข้น 0.1-0.7 wt%

ขวดที่	ความเข้มข้น SMG ใน B100 (wt%)	น้ำหนัก SMG powder ที่ชั่ง (g)
1	0.1	0.07
2	0.2	0.17
3	0.3	0.27
4	0.4	0.37
5	0.5	0.47
6	0.6	0.57
7	0.7	0.67

2. เติม B100 (มีปริมาณ SMG เริ่มต้นเท่ากับ 0.03 wt% ดังตารางที่ 4-1) ลงไปในแต่ละขวดจนได้น้ำหนักรวมเท่ากับ 100.00 g
3. อุ้่นสารละลายบน Hot plate ที่อุณหภูมิ 60 °C และกวนด้วยแท่งแม่เหล็กกวนสารเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้ SMG powder ละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับ B100





รูปที่ 3-3 ตัวอย่างโครมาโตแกรมของสารละลาย SMG ใน B100 พิกของ SMG ปรากฏที่เวลา 10-18 นาที

### 3.3.1.3 การเตรียมไบโอดีเซลผสม B7, B10 และ B20

นำ B100 ที่มีความเข้มข้นของ SMG 0.1-0.7 wt% จากข้อ 3.3.1.2 มาผสมกับน้ำมัน B0 มาตรฐานยูโร 4 และ ยูโร 5 ให้ได้ B7, B10 และ B20 ตามแผนผังรูปที่ 3-4 โดยมีขั้นตอนการเตรียม ดังนี้

#### 3.3.1.3.1 การเตรียม B7 มาตรฐานยูโร4 และ ยูโร5

1. ปิเปต B100 เริ่มต้นที่มี SMG เท่ากับ 0.03 wt% มา 7 ml ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 ml จำนวน 2 ใบ
2. ขวดแรกปรับปริมาตรด้วย B0 ยูโร4 และขวดที่สองปรับปริมาตรด้วย B0 ยูโร5 จนถึงขีดบอกริมาตร เขย่าจนสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน
3. ถ่ายลงใส่ขวดแก้วขนาด 100 ml จำนวน 2 ใบ และติดฉลากให้ชัดเจน โดยอ้างอิงชื่อตามตารางที่ 3-4
4. ทำซ้ำข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนเป็นใช้ B100 ที่มีความเข้มข้น SMG เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 wt% ตามลำดับ

#### 3.3.1.3.2 การเตรียม B10 มาตรฐานยูโร4 และ ยูโร5

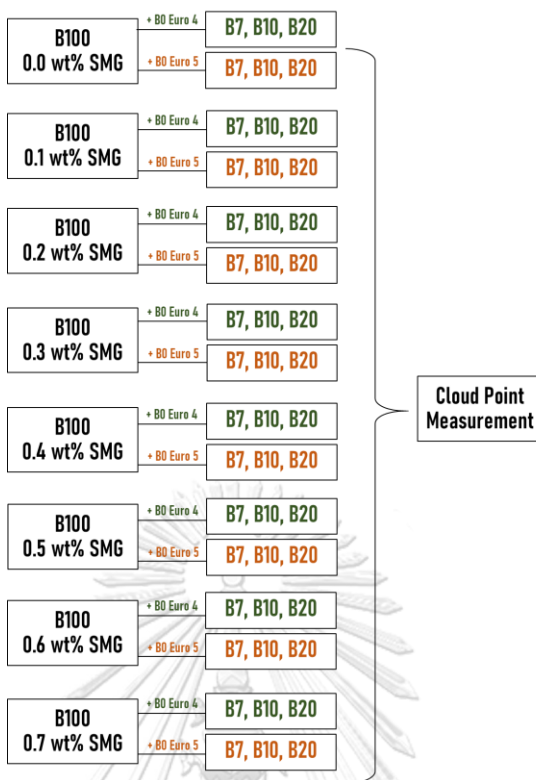
1. ปิเปต B100 เริ่มต้นที่มี SMG เท่ากับ 0.03 wt% มา 10 ml ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 ml จำนวน 2 ใบ

2. ขวดแรกปรับปริมาตรด้วย B0 ยูโร4 และขวดที่สองปรับปริมาตรด้วย B0 ยูโร5 จนถึงจิบออกปริมาตร เขย่าจนสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน
3. ถ่ายลงใส่ขวดแก้วขนาด 100 ml จำนวน 2 ใบ และติดฉลากให้ชัดเจน โดยอ้างอิงชื่อตามตารางที่ 3-4
4. ทำซ้ำข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนเป็นใช้ B100 ที่มีความเข้มข้น SMG เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 wt% ตามลำดับ

#### 3.3.1.3.3 การเตรียม B20 มาตรฐานยูโร4 และ ยูโร5

1. บีเปิด B100 เริ่มต้นที่มี SMG เท่ากับ 0.03 wt% มา 20 ml ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 ml จำนวน 2 ใบ
2. ขวดแรกปรับปริมาตรด้วย B0 ยูโร4 และขวดที่สองปรับปริมาตรด้วย B0 ยูโร5 จนถึงจิบออกปริมาตร เขย่าจนสารละลายจนเป็นเนื้อเดียวกัน
3. ถ่ายลงใส่ขวดแก้วขนาด 100 ml จำนวน 2 ใบ และติดฉลากให้ชัดเจน โดยอ้างอิงชื่อตามตารางที่ 3-4
4. ทำซ้ำข้อ 1-3 โดยเปลี่ยนเป็นใช้ B100 ที่มีความเข้มข้น SMG เท่ากับ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 wt% ตามลำดับ





รูปที่ 3-4 ภาพรวมในการเตรียมน้ำมันไบโอดีเซลผสม B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร 4 และ ยูโร 5 เพื่อทดสอบหาจุดขุ่น

หลังจากเตรียมไบโอดีเซลผสม B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร 4 และ ยูโร 5 แล้วจะได้ตัวอย่างทั้งหมด 45 ตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์จุดขุ่นในลำดับถัดไป โดยมีชื่อตัวอย่างตามตารางที่ 3-4 หลักการตั้งชื่อตัวอย่างประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ (1) สัดส่วนของไบโอดีเซลผสม เช่น B7, B10 และ B20 (2) B0 ที่นำมาใช้ผสม ได้แก่ Euro 4 และ Euro 5 และ (3) ความเข้มข้นของ SMG ในไบโอดีเซลผสมชนิดนั้น ยกตัวอย่างเช่น B7-Euro 4-SMG 0.002 หมายถึง ตัวอย่าง B7 ที่ใช้ B0 ยูโร 4 ที่มีปริมาณ SMG เท่ากับ 0.002 wt%

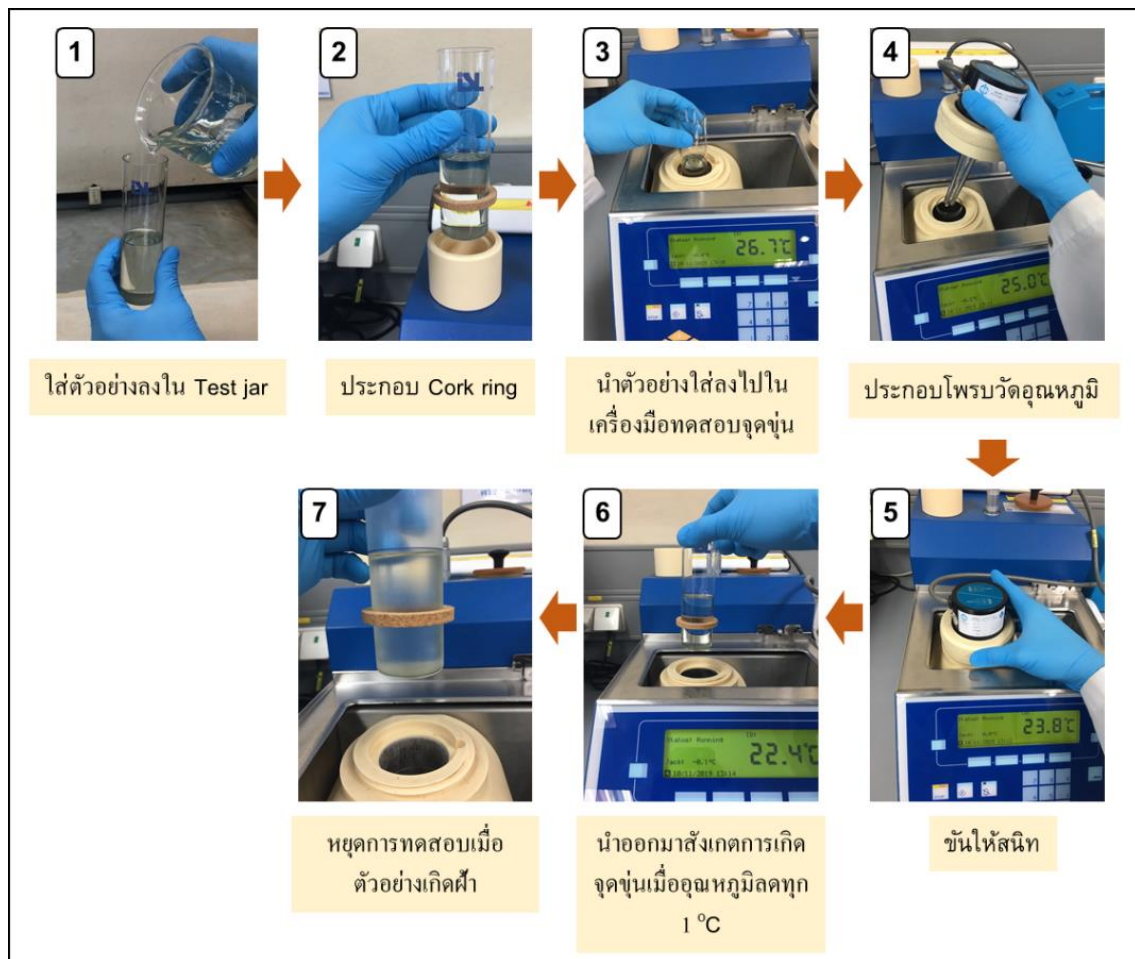
ตารางที่ 3-4 ชื่อตัวอย่างไบโอดีเซลผสมที่ถูกเตรียมสำหรับวิเคราะห์จุดขุ่น

ความเข้มข้น SMG ใน B100 (wt%)	ชนิดของไบโอดีเซลผสม					
	B7		B10		B20	
	ความเข้มข้น SMG ใน B7 (wt%)	ชื่อตัวอย่าง	ความเข้มข้น SMG ใน B10 (wt%)	ชื่อตัวอย่าง	ความเข้มข้น SMG ใน B20 (wt%)	ชื่อตัวอย่าง
0.0	0.002	B7-Euro4-SMG0.002	0.003	B10-Euro4-SMG0.003	0.006	B20-Euro4-SMG0.006
		B7-Euro5-SMG0.002		B10-Euro5-SMG0.003		B20-Euro5-SMG0.006
0.1	0.007	B7-Euro4-SMG0.007	0.010	B10-Euro4-SMG0.010	0.020	B20-Euro4-SMG0.020
		B7-Euro5-SMG0.007		B10-Euro5-SMG0.010		B20-Euro5-SMG0.020
0.2	0.014	B7-Euro4-SMG0.014	0.020	B10-Euro4-SMG0.020	0.040	B20-Euro4-SMG0.040
		B7-Euro5-SMG0.014		B10-Euro5-SMG0.020		B20-Euro5-SMG0.040
0.3	0.021	B7-Euro4-SMG0.021	0.030	B10-Euro4-SMG0.030	0.060	B20-Euro4-SMG0.060
		B7-Euro5-SMG0.021		B10-Euro5-SMG0.030		B20-Euro5-SMG0.060
0.4	0.028	B7-Euro4-SMG0.028	0.040	B10-Euro4-SMG0.040	0.080	B20-Euro4-SMG0.080
		B7-Euro5-SMG0.028		B10-Euro5-SMG0.040		B20-Euro5-SMG0.080
0.5	0.035	B7-Euro4-SMG0.035	0.050	B10-Euro4-SMG0.050	0.100	B10-Euro4-SMG0.100
		B7-Euro5-SMG0.035		B10-Euro5-SMG0.050		B10-Euro5-SMG0.100
0.6	0.042	B7-Euro4-SMG0.042	0.060	B10-Euro4-SMG0.060	0.120	B10-Euro4-SMG0.120
		B7-Euro5-SMG0.042		B10-Euro5-SMG0.060		B10-Euro5-SMG0.120
0.7	0.049	B7-Euro4-SMG0.049	0.070	B10-Euro4-SMG0.070	0.140	B10-Euro4-SMG0.140
		B7-Euro5-SMG0.049		B10-Euro5-SMG0.070		B10-Euro5-SMG0.140

### 3.3.1.4 การวิเคราะห์จุดขุ่น (Cloud point)

นำตัวอย่างที่เตรียมจากข้อ 3.3.1.3 ทั้งหมด 45 ตัวอย่าง ทำการทดสอบหาจุดขุ่นตามมาตรฐาน ASTM D2500 โดยใช้การสังเกตจุดขุ่นด้วยตา มีวิธีการทดสอบดังนี้

- ใส่ตัวอย่างลงใน Test jar จนถึงขีดปริมาตร ตามรูปที่ 3-5
- ประกอบ Cork ring ที่ความสูง 25 mm จากก้น Test jar
- นำตัวอย่างใส่ลงไปในห้องมือทดสอบจุดขุ่นและจุดไหลเท รุ่น CPP 5Gs ยี่ห้อ ISL ที่ควบคุมอุณหภูมิของอ่างทำความเย็น 0 °C
- ประกอบโพรบวัดอุณหภูมิบน Test jar และขันให้สนิท
- เมื่ออุณหภูมิตัวอย่างลดทุก 1 °C ให้ยกขึ้นมาสังเกตการเกิดจุดขุ่นภายใน 3 วินาที
- เมื่อตัวอย่างมีลักษณะขุ่นคล้ายหมอกทั่วทั้งสารละลายให้บันทึกอุณหภูมิเป็นจุดขุ่น และหยุดการทดสอบ



รูปที่ 3-5 ขั้นตอนการวิเคราะห์จุดขุ่นตามมาตรฐาน ASTM D2500

### 3.3.2 การพัฒนาตัวดูดซับจากซีโอไลต์ธรรมชาติ

ตัวดูดซับจากซีโอไลต์ธรรมชาติที่นำมาศึกษาและพัฒนา ประกอบด้วย 3 ชนิด ได้แก่ ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดเม็ด (NZ-Bead) ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่มีขนาด 200 mesh (NZ-200m) และตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่มีขนาด 325 mesh (NZ-325m) ซึ่งจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับกับตัวดูดซับทางการค้าที่มีประสิทธิภาพดีและใช้อย่างแพร่หลาย 2 ชนิด ได้แก่ ตัวดูดซับ Magnesium silicate (MS) และซิลิกาเจล (Silica gel)

#### 3.3.2.1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับจากซีโอไลต์ธรรมชาติและตัวดูดซับทางการค้ารวมถึงตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่ผ่านการคัดแปรแล้วมีดังนี้

- วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
- วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค X-ray fluorescence spectroscopy (XRF)

- วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค  $N_2$  physisorption measurement
- วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Electron probe micro analyzer

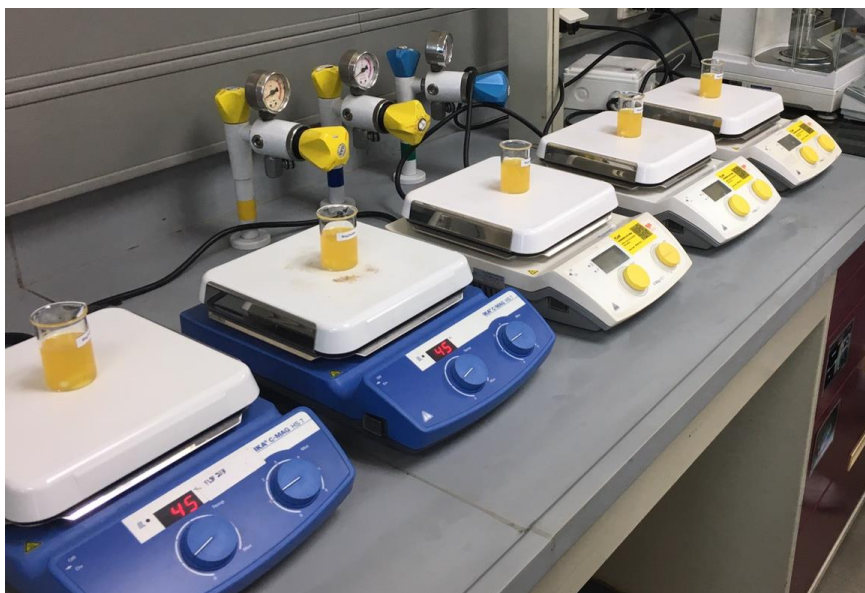
### 3.3.2.2 เปรียบเทียบการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติเทียบกับตัวดูดซับเกรดการค้า

เปรียบเทียบการดูดซับ SMG ใน B100 ของตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ 3 ชนิด ได้แก่ NZ-Bead, NZ-200m และ NZ-325m กับตัวดูดซับทางการค้า 2 ชนิด ได้แก่ MS และ Silica gel เพื่อคัดเลือกตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพในการพัฒนาต่อ โดยใช้ภาวะในการดูดซับ ดังนี้

- ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ : 5 wt%
- เวลาในการดูดซับ : 50 นาที
- อุณหภูมิในการดูดซับ : 45 °C
- ความเร็วในการกวน : 150 rpm

ขั้นตอนการดูดซับมีดังนี้

1. อบตัวดูดแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น
2. ชั่งตัวดูดซับแต่ละชนิดด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง 1.00xx g ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 ml
3. ชั่ง B100 ที่มีความเข้มข้น SMG 0.7 wt% ลงไป 19.00xx g จะได้น้ำหนักตัวดูดซับ 5 wt%
4. ใส่แท่งแม่เหล็กกวนสารลงไปในบีกเกอร์และนำไปวางบน Hot plate ที่ให้ความร้อน 45 °C โดยใช้ความเร็วรอบในการกวน 150 rpm ตามรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 การดูดซับ SMG ใน B100 โดยใช้ตัวดูดซับ 5 ชนิด

5. จับเวลาจนครบ 50 นาที และยกบีกเกอร์ออกจาก Hot plate
6. ใช้กระบอกฉีดยา (Syringe) ดูดเฉพาะส่วนใสด้านบนประมาณ 1.5 ml
7. ประกอบ Syringe filter ขนาดรูพรุน 45  $\mu\text{m}$  เข้ากับกระบอกฉีดยา และกดก้านกระบอกฉีดยาให้สารละลายผ่าน Syringe filter ไปยังขวดแก้วเก็บสารขนาด 2 ml
8. นำสารละลายที่กรองผ่าน Syringe filter มาวิเคราะห์ปริมาณ SMG ที่เหลือตามขั้นตอนในข้อ 3.3.1.2
9. คำนวณความเข้มข้น SMG ที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ (SMG content adsorbed) โดยนำค่าที่วิเคราะห์ได้คือความเข้มข้น SMG ที่เหลือใน B100 ลบออกจากความเข้มข้น SMG ใน B100 เริ่มต้น

### 3.3.2.3 การหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดัดแปรตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ

การดัดแปรตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ NZ-325m เลือกใช้วิธีการบำบัดด้วยกรดไนตริก (Acid treatment) เพื่อกำจัดอะลูมิเนียมในโครงสร้างของซีโอไลต์ ทำให้เกิดรูพรุนในโครงสร้างมากขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้กรดบำบัดอาจส่งผลต่อการกำจัดอะลูมิเนียมในโครงสร้าง จึงศึกษาทั้งสองอุณหภูมิได้แก่ ที่อุณหภูมิห้อง (NZ-325m\_RT1hr) และที่ 60 °C (NZ-325m\_60C1hr) โดยมีขั้นตอนการดัดแปรตัวดูดซับดังนี้

1. อบตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ NZ-325m ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น
2. ชั่งตัวดูดซับด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง 10.00xx g ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 ml
3. เติมกรดไนตริกความเข้มข้น 1 M ปริมาณ 100.00xx g จะได้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวดูดซับต่อสารละลายกรดเท่ากับ 1:10
4. กวนสารผสมตลอดเวลาโดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสาร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ อุณหภูมิห้อง
5. เมื่อครบกำหนด 1 ชั่วโมงแล้วตั้งบีกเกอร์ทิ้งไว้จนตัวดูดซับตกตะกอน และเทสารละลายส่วนใสทิ้ง
6. ถ่ายเทตัวดูดซับที่ผ่านการบำบัดลงในขวดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงขนาด 250 ml และเติมน้ำกลั่น Type I ลงไปในขวด จากนั้นเขย่าให้เข้ากัน
7. เทสารผสมแบ่งใส่ขวดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงขนาด 250 ml อีก 2 ใบ ให้มีปริมาตรเท่ากันทั้ง 3 ใบ
8. เติมน้ำกลั่น Type I ลงไปทั้ง 3 ขวดให้เต็มและเขย่าให้เข้ากัน
9. นำขวดพลาสติก ทั้ง 3 ใบ ใส่เข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วรอบสูง 1000 rpm ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 5 นาที
10. เทสารละลายส่วนใสทั้ง 3 ขวดใส่บีกเกอร์ขนาด 1 L
11. วัด pH ของสารละลายด้วย pH meter หากค่า pH ยังไม่เป็นกลาง (pH = 7) ให้ทำซ้ำตามข้อ 8-11 จนได้ pH เท่ากับ 7
12. ใช้กระดาษกรองเบอร์ 2 กรองเฉพาะตัวดูดซับและนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
13. บดตัวดูดซับด้วยโกร่งให้แตกละเอียดและนำไปร่อนผ่านตระแกรงขนาดรูพรุน 75  $\mu\text{m}$
14. เก็บตัวดูดซับไว้ในตู้ดูดความชื้นในขวดพลาสติกที่ปิดสนิท
15. ทำซ้ำข้อ 1-14 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิของการบำบัดด้วยกรดในข้อ 4 เป็นที่อุณหภูมิ 60 °C
16. นำตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดที่อุณหภูมิห้องและที่ 60 °C ทดสอบดูดซับ SMG ใน B100 ตามขั้นตอนข้อ 3.3.2.2



รูปที่ 3-7 ขั้นตอนการตัดแปรตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ

### 3.3.2.4 การหาเวลาที่เหมาะสมในการตัดแปรตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ

เนื่องจากเวลาที่ใช้กรดบำบัดอาจส่งผลต่อการกำจัดอะลูมิเนียมในโครงสร้าง จึงศึกษาเวลาในการบำบัดตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ NZ-325m ด้วยกรดเพิ่มเติมที่ 60 นาที ณ ที่อุณหภูมิ 60 °C (NZ-325m\_60C6hr) โดยมีขั้นตอนการตัดแปรตัวดูดซับดังนี้

1. อบตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ NZ-325m ที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และเก็บไว้ในตู้ดูดความชื้น
2. ชั่งตัวดูดซับด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง 10.00xx g ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 ml
3. เติมกรดไนตริกความเข้มข้น 1 M ปริมาณ 100.00xx g จะได้อัตราส่วน โดยน้ำหนักของตัวดูดซับต่อสารละลายกรดเท่ากับ 1:10
4. กวนสารผสมตลอดเวลาโดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสาร เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 60 °C
5. เมื่อครบกำหนด 6 ชั่วโมงแล้วตั้งบีกเกอร์ทิ้งไว้จนตัวดูดซับตกตะกอน และเทสารละลายส่วนใสทิ้ง

6. ถ่ายเทตัวดูดซับที่ผ่านการบำบัดลงในขวดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงขนาด 250 ml และเติมน้ำกลั่น Type I ลงไปในขวด จากนั้นเขย่าให้เข้ากัน
7. เทสารผสมแบ่งใส่ขวดพลาสติกสำหรับปั่นเหวี่ยงขนาด 250 ml อีก 2 ใบ ให้มีปริมาตรเท่ากันทั้ง 3 ใบ
8. เติมน้ำกลั่น Type I ลงไปที่ 3 ขวดให้เต็มและเขย่าให้เข้ากัน
9. นำขวดพลาสติก ทั้ง 3 ใบ ใส่เข้าเครื่องปั่นเหวี่ยงความเร็วรอบสูง 1000 rpm ที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 5 นาที
10. เทสารละลายส่วนใสทั้ง 3 ขวดใส่บีกเกอร์ขนาด 1 L
11. วัด pH ของสารละลายด้วย pH meter หากค่า pH ยังไม่เป็นกลาง (pH = 7) ให้ทำซ้ำตามข้อ 8-11 จนได้ pH เท่ากับ 7
12. ใช้กระดาษกรองเบอร์ 2 กรองเฉพาะตัวดูดซับและนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง
13. บดตัวดูดซับด้วยโกร่งให้แตกละเอียดและนำไปร่อนผ่านตระแกรงขนาดรูพรุน 75  $\mu\text{m}$
14. เก็บตัวดูดซับไว้ในตู้ดูดความชื้นในขวดพลาสติกที่ปิดสนิท
16. นำตัวดูดซับทดสอบดูดซับ SMG ใน B100 ตามขั้นตอนข้อ 3.3.2.2

### 3.3.2.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ NZ-325m โดยเปรียบเทียบกับตัวดูดซับทางการค้า MS และ Silica gel ตัวแปรที่ศึกษาคือเวลาในการดูดซับ และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ดังนี้

- เวลาที่ใช้ศึกษาในการดูดซับ ได้แก่ 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที
- ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ได้แก่ 1, 2, 3, 4 และ 5 wt%

ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติหลังบำบัดด้วยกรดที่ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (NZ-325m\_60C6hr) ตัวแปรที่ศึกษาคือเวลาในการดูดซับ และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ดังนี้

- เวลาที่ใช้ศึกษาในการดูดซับ ได้แก่ 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที
- ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ ได้แก่ 1 และ 5 wt%



ขั้นตอนในการดูดซับเป็นไปตามข้อ 3.3.2.2 แต่จะแตกต่างกันที่ชนิดตัวดูดซับ เวลาที่ใช้ดูดซับและปริมาณตัวดูดซับตามที่กล่าวไว้ข้างต้น จำนวนในการดูดซับเป็นไปตามตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 จำนวนการดูดซับเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ปริมาณตัวดูดซับ (wt%)	เวลาในการดูดซับ (นาที)	MS	Silica gel	NZ-325m	NZ-325m_60C6hr
1	10	/	/	/	/
	20	/	/	/	/
	30	/	/	/	/
	40	/	/	/	/
	50	/	/	/	/
2	10	/	/	/	
	20	/	/	/	
	30	/	/	/	
	40	/	/	/	
	50	/	/	/	
3	10	/	/	/	
	20	/	/	/	
	30	/	/	/	
	40	/	/	/	
	50	/	/	/	
4	10	/	/	/	
	20	/	/	/	
	30	/	/	/	
	40	/	/	/	
	50	/	/	/	
5	10	/	/	/	/
	20	/	/	/	/
	30	/	/	/	/
	40	/	/	/	/
	50	/	/	/	/
จำนวนการดูดซับ		25	25	25	10

### 3.3.2.6 การประเมินประสิทธิภาพของการดูดซับ

การประเมินประสิทธิภาพของการดูดซับจะพิจารณาสิ่งที่เหลือใน B100 หลังจากการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ ซึ่งจะพิจารณา 2 หัวข้อดังนี้

#### 3.3.2.6.1 ความจุการดูดซับ (Adsorption capacity)

ความจุการดูดซับ SMG ( $q_{SMG}$ ) ในหน่วย  $mg_{SMG}/g_{ads}$  คำนวณตามสมการด้านล่าง

$$q_{SMG} = \frac{W_{B100}(C_{SMG,i} - C_{SMG,f})}{W_{ads}} \times 10$$

โดยกำหนดให้  $q_{SMG}$  คือ ความจุการดูดซับ SMG,  $mg_{SMG}/g_{ads}$

$W_{B100}$  คือ น้ำหนัก B100 ที่ใช้ในการดูดซับ, g

$W_{abs}$  คือ น้ำหนักตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับ, g

$C_{SMG,i}$  คือ ความเข้มข้น SMG ที่อยู่ใน B100 ก่อนการดูดซับ, wt%

$C_{SMG,f}$  คือ ความเข้มข้น SMG ที่เหลือใน B100 หลังการดูดซับ, wt%

#### 3.3.2.6.2 การเลือกจำเพาะ (Selectivity) ในการดูดซับ SMG ใน B100

การเลือกจำเพาะในการดูดซับ โมโนกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัว ( $S_{SMG}$ ) โดยเทียบระหว่างความจุของการดูดซับของ โมโนกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัว ( $q_{SMG}$ ) กับผลรวมของความจุของการดูดซับของ โมโนกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัว ( $q_{UMG}$ ) ไดกลีเซอไรด์ ( $q_{DG}$ ) ไตรกลีเซอไรด์ ( $q_{TG}$ ) และกลีเซอรินอิสระ ( $q_{FG}$ ) โดยคำนวณตามสมการด้านล่าง

$$S_{SMG} = \frac{q_{SMG}}{q_{SMG} + q_{UMG} + q_{DG} + q_{TG} + q_{FG}}$$

โดยกำหนดให้  $S_{SMG}$  คือ การเลือกจำเพาะในการดูดซับ SMG

$q_{SMG}$  คือ ความจุการดูดซับ SMG,  $mg_{SMG}/g_{ads}$

$q_{UMG}$  คือ ความจุการดูดซับ UMG,  $mg_{UMG}/g_{ads}$

$q_{DG}$  คือ ความจุการดูดซับ Diglyceride,  $mg_{DG}/g_{ads}$

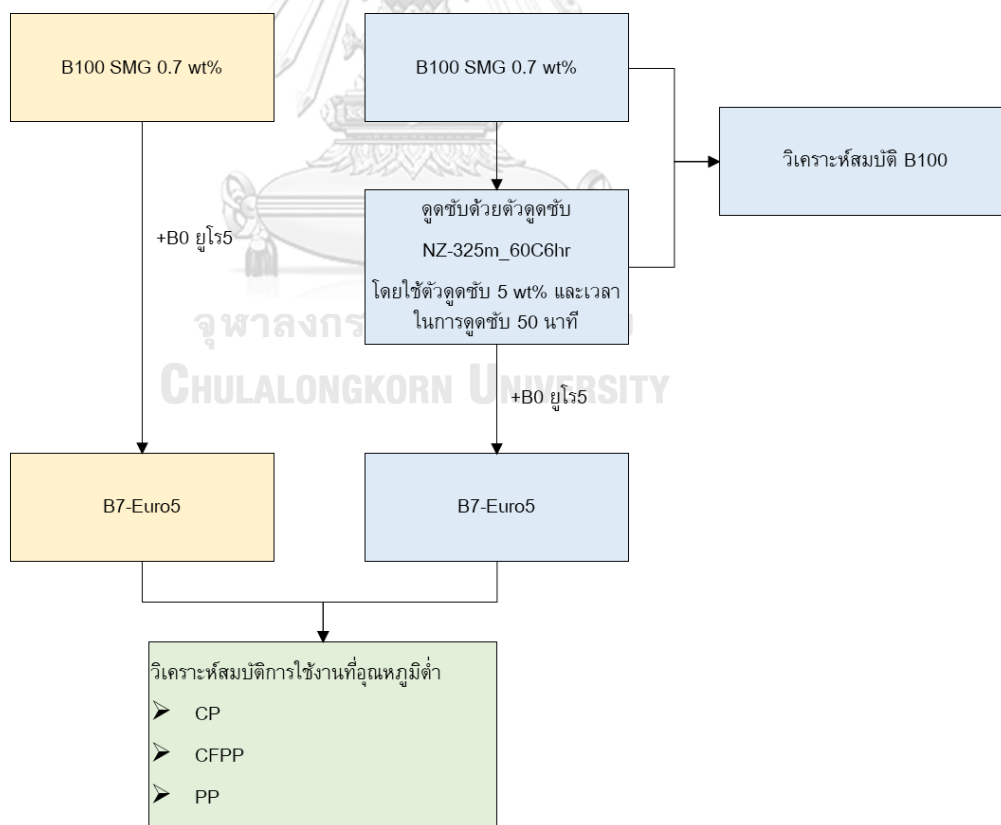
$q_{TG}$  คือ ความจุการดูดซับ Triglyceride,  $mg_{TG}/g_{ads}$

$q_{FG}$  คือ ความจุการดูดซับ Triglyceride,  $mg_{FG}/g_{ads}$

### 3.3.2.7 การศึกษาสมบัติของไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสมหลังการดูดซับ

ขั้นตอนการศึกษาสมบัติของ B100 และ B7 มีภาพรวมการทดลองตามรูปที่ 3-8 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ศึกษาสมบัติของ B100 ที่มีความเข้มข้น SMG 0.7 wt% ก่อนการดูดซับได้แก่ ปริมาณ FAME, SMG, UMG, DG, TG และ FG
2. ทำการดูดซับโดยตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่ผ่านการคัดแปร (NZ-325m\_60C6hr) ใช้ปริมาณ 5 wt% และใช้เวลาในการดูดซับ 50 นาที ตามขั้นตอนในข้อ 3.3.2.2
3. ศึกษาสมบัติของ B100 ที่ได้หลังจากการดูดซับ
4. นำ B100 ที่ได้จากการดูดซับ ผสมกับ B0 ยูโร5 เป็น B7 และนำไปทดสอบสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้แก่ จุดเกิดหมอก (CP), จุดจุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (CFPP) และจุดไหลเท (PP) เทียบกับ B7 ที่ผสมจาก B100 ที่มีความเข้มข้น SMG 0.7 wt% ก่อนการดูดซับ



รูปที่ 3-8 ภาพรวมการศึกษาสมบัติของไบโอดีเซลและไบโอดีเซลผสมหลังการดูดซับ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการศึกษาผลกระทบของ SMG ที่มีผลต่อจุดขุ่นในน้ำมันไบโอดีเซลผสม

##### 4.1.1 ผลการทดสอบสมบัติน้ำมัน B100 และ B0 มาตรฐานยูโร4 และยูโร5

ผลการทดสอบสมบัติของ B100 เริ่มต้นที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไปตามตารางที่ 4-1 พบว่ามีความบริสุทธิ์ของ FAME เท่ากับ 99.3 wt% ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ว่าต้องมากกว่า 96.5 wt% สำหรับองค์ประกอบที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันไม่สมบูรณ์ได้แก่ SMG, UMG, DG, TG และ FG มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด ความเข้มข้นของ SMG ใน B100 เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.03 wt% ซึ่งเหมาะแก่การนำมาปรับเพิ่มความเข้มข้น SMG ให้ได้อยู่ในช่วง 0.1-0.7 wt% เพื่อศึกษาผลกระทบของ SMG ต่อการเกิดจุดขุ่นในไบโอดีเซลผสม

สมบัติด้านความเสถียรของ B100 พบว่ามีความเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C เท่ากับ 17.8 ชั่วโมง ซึ่งผ่านค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ว่าต้องไม่ต่ำกว่า 10 ชั่วโมง และยังมีค่าความเป็นกรดผ่านค่ามาตรฐานจึงทำให้มั่นใจว่า B100 ชนิดนี้ เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย

สำหรับผลการทดสอบสมบัติของ B0 ยูโร4 และ B0 ยูโร5 เป็นไปตาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-2 พบว่า B0 ยูโร4 มีความเข้มข้นของแโรแมติกเท่ากับ 23.1 wt% ในขณะที่ B0 ยูโร5 มีค่าเท่ากับ 3.3 wt% จะเห็นว่า B0 ยูโร4 มีความเข้มข้นของแโรแมติกสูงกว่า B0 ยูโร5 ถึง 7 เท่า ซึ่งประเภทของแโรแมติกส่วนใหญ่เป็นแโรแมติกวงเดี่ยวที่มีสมบัติเป็นตัวทำละลายสูง

สมบัติด้านการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เช่น จุดขุ่นของ B100, B0 ยูโร4 และ B0 ยูโร5 พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมาก โดยที่ B100 มีค่าเท่ากับ 14 °C ในขณะที่ B0 ยูโร4 ที่มีค่าเท่ากับ 6 °C และ B0 ยูโร5 มีค่าเท่ากับ -2 °C

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของ B100 ที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติ B100	มาตรฐาน	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	ผลทดสอบ
เมทิลเอสเทอร์ (Methyl esters, FAME)	EN 14103	wt%	ไม่ต่ำกว่า 96.5	99.3
กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (Linolenic acid methyl ester)	EN 14103	wt%	ไม่สูงกว่า 12.0	0.3
กลีเซอรินอิสระ (Free glycerine, FG)	EN 14105	wt%	ไม่สูงกว่า 0.02	0.005
โมโนกลีเซอไรด์ (Monoglyceride)	EN 14105	wt%	ไม่สูงกว่า 0.70	0.05
<ul style="list-style-type: none"> <li>โมโนกลีเซอไรด์ชนิดอิ่มตัว (Saturated monoglyceride, SMG)</li> </ul>	EN 14105	wt%	-	0.03
<ul style="list-style-type: none"> <li>โมโนกลีเซอไรด์ชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated monoglyceride, UMG)</li> </ul>	EN 14105	wt%	-	0.02
ไดกลีเซอไรด์ (Diglyceride, DG)	EN 14105	wt%	ไม่สูงกว่า 0.20	0.01
ไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride, TG)	EN 14105	wt%	ไม่สูงกว่า 0.20	0.01
เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ณ อุณหภูมิ 110 °C (Oxidation stability at 110 °C)	EN 15751	ชั่วโมง	ไม่ต่ำกว่า 10	17.8
ค่าความเป็นกรด (Acid value)	ASTM D664	mgKOH/g	ไม่สูงกว่า 0.50	0.31
ความหนาแน่น ณ อุณหภูมิ 15 °C (Density @ 15.0 °C)	ASTM D4052	kg/m <sup>3</sup>	ไม่ต่ำกว่า 860 และ ไม่สูงกว่า 900	874.5
จุดขุ่น (Cloud point)	ASTM D2500	°C	-	14
จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold filter plugging point)	ASTM D6371	°C	-	12
จุดไหลเท (Pour point)	ASTM D5950	°C	-	15

ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของดีเซล (B0) ยูโร 4 และ ยูโร 5

สมบัติ B0	มาตรฐาน	หน่วย	ผลทดสอบ	
			B0 ยูโร 4	B0 ยูโร 5
แอโรแมติกวงเดี่ยว (Mono-aromatics)	IP 391	wt%	18.9	3.3
แอโรแมติกสองวง (Di-aromatics)	IP 391	wt%	3.9	0.0
แอโรแมติกสามวง (Tri-aromatics)	IP 391	wt%	0.3	0.0
แอโรแมติกทั้งหมด (Total aromatics)	IP 391	wt%	23.1	3.3
น้ำ (Water content)	ISO 12937	mg/kg	62	58
จุดขุ่น (Cloud point, CP)	ASTM D2500	°C	6	-2
จุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold filter plugging point, CFPP)	ASTM D6371	°C	6	-2
จุดไหลเท (Pour point, PP)	ASTM D5950	°C	3	-18

#### 4.1.2 ผลการเตรียมสารละลาย SMG ใน B100 ที่มีความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นที่แน่นอนของ SMG ใน B100 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโตกราฟตามมาตรฐาน EN 14105 เป็นไปตามตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ความเข้มข้นที่แน่นอนของ SMG ใน B100 ช่วงความเข้มข้น 0.0-0.7 wt%

ชื่อ B100	ความเข้มข้นของ SMG (wt%)	ความเข้มข้นของ UMG (wt%)	ความเข้มข้นของ MG (wt%)
B100 เริ่มต้น	0.03	0.02	0.05
B100 SMG 0.1 wt%	0.11	0.02	0.13

B100 SMG 0.2 wt%	0.21	0.02	0.23
B100 SMG 0.3 wt%	0.31	0.02	0.33
B100 SMG 0.4 wt%	0.41	0.02	0.43
B100 SMG 0.5 wt%	0.51	0.02	0.53
B100 SMG 0.6 wt%	0.61	0.02	0.63
B100 SMG 0.7 wt%	0.71	0.02	0.73

B100 ที่มีความเข้มข้นของ SMG 0.1-0.7 wt% เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลามากกว่า 24 ชั่วโมงจะพบตะกอนที่ความเข้มข้นของ SMG ตั้งแต่ 0.4 wt% ขึ้นไป และปริมาณตะกอนจะมากขึ้นตามความเข้มข้นของ SMG ดังรูปที่ 4-1 ซึ่งบ่งบอกว่า SMG สามารถละลายใน B100 ที่อุณหภูมิห้อง ได้สูงสุดไม่เกิน 0.4 wt% ดังนั้นจะเห็นว่ามาตรฐานที่กรมธุรกิจกำหนดเฉพาะปริมาณ MG ไม่ให้เกิน 0.7 wt% ใน B100 ชนิดที่ II อาจไม่เพียงพอที่จะป้องกันการเกิดตะกอนได้ เพราะ SMG ซึ่งเป็นชนิดย่อยของ MG มีความเข้มข้นเพียงแค่ 0.4 wt% ก็ก่อให้เกิดปัญหาการเกิดตะกอนใน B100 แล้ว



รูปที่ 4-1 ตะกอนที่พบใน B100 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.1-0.7 wt% หลังตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องมากกว่า 24 ชั่วโมง

#### 4.1.3 ลักษณะทางกายภาพของน้ำมันไบโอดีเซลผสม B7, B10 และ B20

ไบโอดีเซลผสม B7, B10 และ B20 ที่เตรียมจากข้อ 3.3.1.3 เมื่อตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลามากกว่า 24 ชั่วโมงจะพบว่าไม่มีตะกอนเกิดขึ้นมีลักษณะดังรูปที่ 4-2 ถึง รูปที่ 4-7



รูปที่ 4-2 B7 ที่ผสมจาก B0 ยูโร4 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.007-0.049 wt%



รูปที่ 4-3 B7 ที่ผสมจาก B0 ยูโร5 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.007-0.049 wt%



รูปที่ 4-4 B10 ที่ผสมจาก B0 ยูโร4 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.010-0.070 wt%





รูปที่ 4-5 B10 ที่ผสมจาก B0 ยูโร5 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.010-0.070 wt%



รูปที่ 4-6 B20 ที่ผสมจาก B0 ยูโร4 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.020-0.140 wt%



รูปที่ 4-7 B20 ที่ผสมจาก B0 ยูโร5 ที่มีความเข้มข้น SMG ในช่วง 0.020-0.140 wt%

จะเห็นว่า SMG สามารถละลายได้ใน B7-Euro4 และ B7-Euro5 ไม่เกิน 0.021 wt% แต่จะละลายได้มากขึ้นใน B10-Euro4 และ B10-Euro5 ไม่เกิน 0.030 wt% จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนไบ

โอดีเซลในไบโอดีเซลผสมจะช่วยทำให้ SMG ละลายได้ดีขึ้น เนื่องจากไบโอดีเซลมีโครงสร้างเป็น เมทิลเอสเทอร์ซึ่งมีขั้วใกล้เคียงกับ SMG [19]

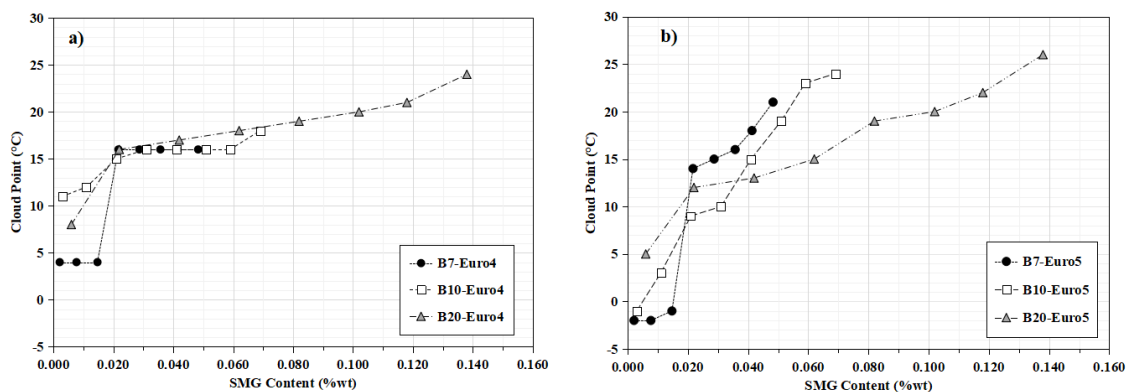
แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของไบโอดีเซลมากขึ้นเป็น B20 อิทธิพลของแอมโมเนียต่อความสามารถในการละลาย SMG จะเริ่มเด่นชัดขึ้น เพราะใน B20-Euro4 SMG สามารถละลายได้ไม่เกิน 0.080 wt% ตามแนวโน้มการเพิ่มสัดส่วนไบโอดีเซล แต่ใน B20-Euro5 กลับพบว่า SMG สามารถละลายได้น้อยไม่เกิน 0.020 wt% เป็นเพราะว่าใน B20-Euro5 มีความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำกว่าใน B20-Euro4 ถึง 7 เท่า จึงละลาย SMG ได้น้อยกว่า

#### 4.1.3 ผลกระทบของ SMG ที่มีต่อจุดขุ่นในน้ำมันไบโอดีเซลผสม

ผลการทดสอบหาจุดขุ่นใน B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร 4 ดังรูปที่ 4-8 (a) พบว่าทั้งใน B7-Euro4, B10-Euro4 และ B20-Euro4 เมื่อความเข้มข้นของ SMG มีค่าสูงถึง 0.02 wt% จะทำให้ค่าจุดขุ่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 12 °C, 4 °C และ 8 °C ตามลำดับ แต่เมื่อความเข้มข้นของ SMG มากขึ้นการเปลี่ยนแปลงจุดขุ่นจะเริ่มคงที่ใน B7-Euro4 และ B10-Euro4 หรือค่อยๆเพิ่มขึ้นใน B20-Euro4

สำหรับผลการทดสอบหาจุดขุ่นใน B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร 5 ดังรูปที่ 4-8 (b) พบว่าทั้งใน B7-Euro5, B10-Euro5 และ B20-Euro5 เมื่อความเข้มข้นของ SMG มีค่าสูงถึง 0.02 wt% จะทำให้ค่าจุดขุ่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 16 °C, 10 °C และ 7 °C ตามลำดับ และเมื่อความเข้มข้นของ SMG มากขึ้นจนถึงที่ความเข้มข้น 0.04 wt% จุดขุ่นของ B7-Euro5 จะกลับมามีค่าสูงกว่า B10-Euro5 และ B20-Euro5 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าในไบโอดีเซลผสมที่ได้จาก B0 ยูโร 5 ผลกระทบของ SMG ต่อจุดขุ่นจะน้อยลงเมื่อสัดส่วนของไบโอดีเซลมากขึ้น

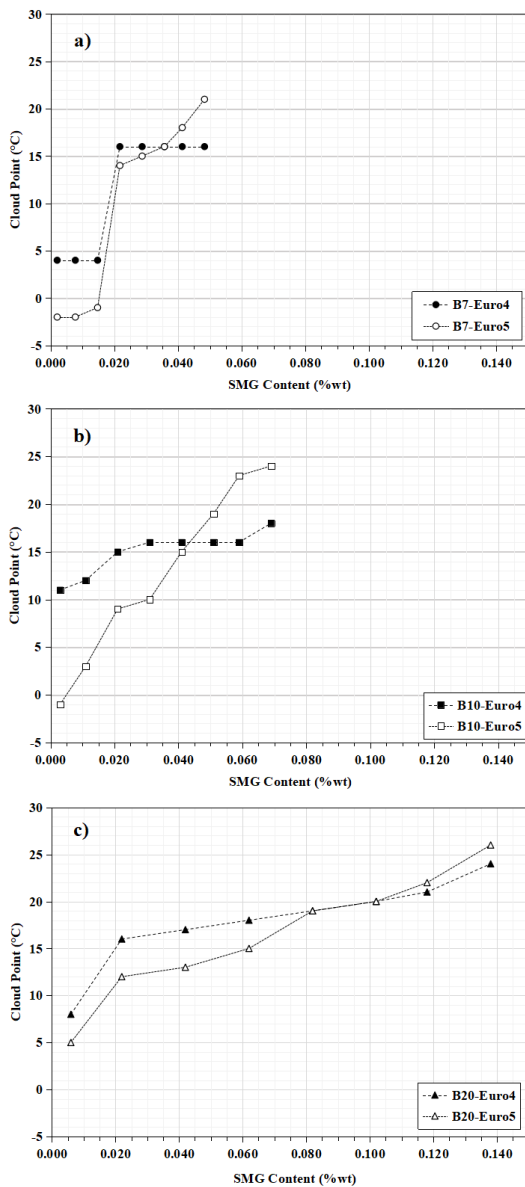
ดังนั้นความเข้มข้นของ SMG ใน B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร 4 และ มาตรฐานยูโร 5 ไม่ควรมีค่ามากกว่า 0.02 wt% หรือคิดเป็นความเข้มข้นของ SMG ใน B100 เริ่มต้นไม่ควรเกิน 0.3 wt%, 0.2 wt% และ 0.1 wt% ในการผสมเป็น B7, B10 และ B20 ตามลำดับ



รูปที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ SMG กับจุดขุ่น ใน B7, B10 และ B20 ที่ใช้ (a) B0 ยูโร4 และ (b) B0 ยูโร5

สาเหตุที่จุดขุ่นใน B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร4 ที่ช่วงความเข้มข้น SMG มากกว่า 0.02 wt% มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลยเมื่อเทียบกับ B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร5 เนื่องจากไบโอดีเซลผสมมาตรฐานยูโร4 มีความเข้มข้นของแโรแมติกสูงกว่าจึงช่วยละลาย SMG ได้ดีและจะพอง SMG ไม่ให้เกิดผลึก ในขณะที่ไบโอดีเซลผสมมาตรฐานยูโร5 มีปริมาณแโรแมติกต่ำ ความสามารถในการละลายของ SMG ในไบโอดีเซลผสมจึงแยกแ่กว่าและเกิดผลึกของ SMG ได้ง่ายทำให้ค่าจุดขุ่นสูงขึ้น

B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร4 ที่ความเข้มข้นของ SMG ต่ำจะมีจุดขุ่นมากกว่า B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร5 แต่ค่าจุดขุ่นจะกลับมามีค่าน้อยกว่าเมื่อความเข้มข้นของ SMG มีค่า 0.035 %wt, 0.040 %wt และ 0.100 wt% ใน B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร4 ตามลำดับดังรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ของจุดขึ้นกับความเข้มข้น SMG ในไบโอดีเซลผสมที่ใช้ B0 ยูโร4 และ B0 ยูโร5 ในการผสม a.) B7 b.) B10 และ c.) B20

#### 4.2 ผลการศึกษาการกำจัด SMG ใน B100 โดยใช้ตัวดูดซับเกรดการค้าเทียบกับซีโอไลต์ธรรมชาติ

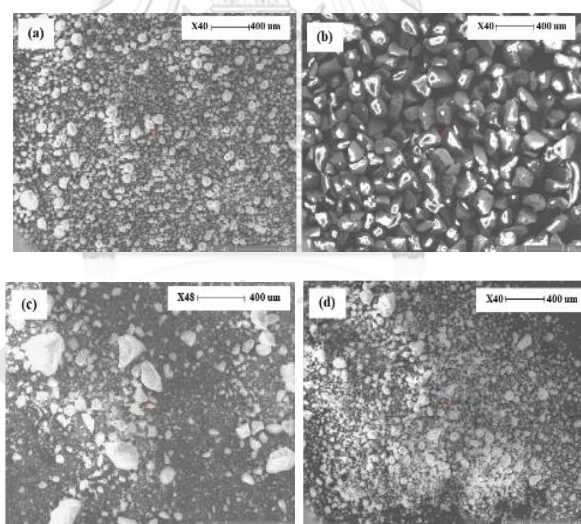
##### 4.2.1 สมบัติของตัวดูดซับเริ่มต้น

รูปที่ 3-1 แสดงถึงลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับทั้ง 5 ชนิดที่ได้นำมาศึกษาทดลองดูดซับ SMG ใน B100 โดย MS และ Silica gel เป็นตัวแทนของตัวดูดซับทางการค้า จะมีลักษณะเป็น

ผงละเอียดสีขาว ในขณะที่ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่เลือกมาศึกษามี 3 ชนิดมีลักษณะทางกายภาพดังนี้

1. ซีโอไลต์ธรรมชาติชนิดเม็ด (NZ-Bead) จะมีลักษณะเป็นเม็ดขนาดใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4-6 mm สีเทาอ่อน
2. ซีโอไลต์ธรรมชาติที่ผ่านตะแกรงขนาด 200 mesh (NZ-200m) มีลักษณะเป็นผงสีเขียวค่อนข้างเข้ม
3. ซีโอไลต์ธรรมชาติที่ผ่านตะแกรงขนาด 325 mesh (NZ-325m) มีลักษณะเป็นผงที่ละเอียดมากกว่า NZ-200m และมีสีอ่อนกว่า

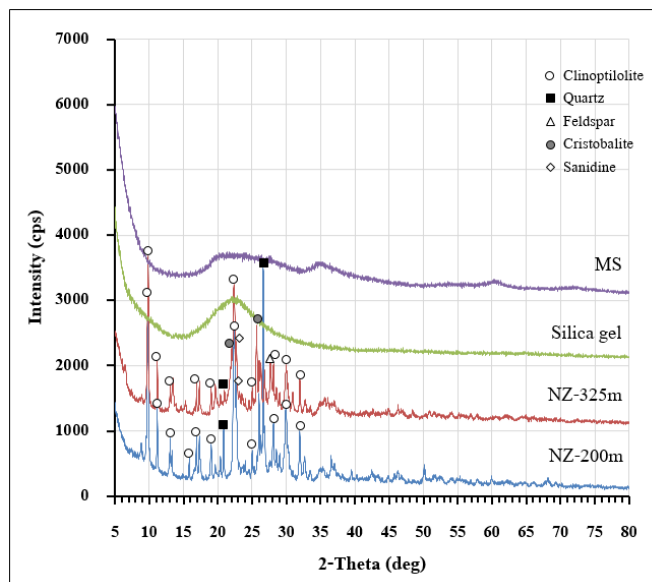
สำหรับภาพขยายอนุภาคจากเครื่อง Electron probe micro analyzer (EPMA) ในรูปที่ 4-10 จะเห็นว่าอนุภาคของ MS เป็นทรงกลมที่มีความสม่ำเสมอ ในขณะที่ Silica gel มีรูปร่างเป็นทรงหลายเหลี่ยมแต่ยังมีความสม่ำเสมอและมีขนาดอนุภาคประมาณ 100-200  $\mu\text{m}$  สำหรับ NZ-200m มีขนาดอนุภาคประมาณ 71  $\mu\text{m}$  และใหญ่กว่า NZ-325m ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 41  $\mu\text{m}$



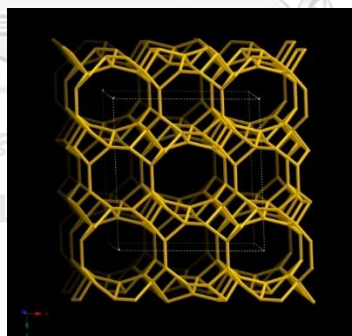
รูปที่ 4-10 ภาพขยายจากเครื่อง EPMA ของ a) MS b) Silica gel c) NZ-200m และ d) NZ-325m

ตัวดูดซับ 4 ชนิด ได้แก่ MS, Silica gel, NZ-200m และ NZ-325m ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD ตามรูปที่ 4-11 พบว่ารูปแบบ XRD ของ MS และ Silica gel มีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน (amorphous) เนื่องจากสัญญาณไม่เด่นชัด ในขณะที่ NZ-200m และ NZ-325m มีโครงสร้างผลึกส่วนใหญ่เป็น Clinoptilolite ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พบได้ทั่วไปของซี

โพลีเมอร์ชนิด [23] และมีโครงสร้างผลึกแบบ Quartz และ Cristobalite ปนเปื้อนอยู่ โครงสร้างผลึก Clinoptilolite มีสูตรทั่วไปคือ  $(\text{Na},\text{K},\text{Ca})_6(\text{Si},\text{Al})_{36}\text{O}_{72}\cdot 20\text{H}_2\text{O}$  ลักษณะรูพรุนประกอบไปด้วยโครงสร้างทุติยภูมิ แบบ 4-4-1 ดังรูปที่ 2-10 และรวมกันเป็น โครงสร้างแบบตติยภูมิดังรูปที่ 4-12



รูปที่ 4-11 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับ MS, Silicagel, NZ-325m และ NZ-200m



รูปที่ 4-12 ลักษณะรูพรุนของโครงสร้างผลึก Clinoptilolite

ส่วนองค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF เป็นไปตามตารางที่ 4-4 จะเห็นว่า Silica gel มีความบริสุทธิ์ของ  $\text{SiO}_2$  98.8 wt% ในขณะที่ MS มีองค์ประกอบหลักคือ  $\text{SiO}_2$  อยู่ที่ 78.5 wt% และมี  $\text{MgO}$  เป็นองค์ประกอบรองเท่ากับ 17.2 wt% สำหรับตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติทั้งสองชนิด ได้แก่ NZ-200m และ NZ-325m พบว่ามี  $\text{SiO}_2$  เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ที่ 75.1 wt% และ 76.5 wt% ตามลำดับ และมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นองค์ประกอบรองอยู่ที่ 13.3 wt% และ 13.0 wt% ตามลำดับ

ตารางที่ 4-4 องค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัย

องค์ประกอบธาตุ	Silica gel	MS	NZ-200m	NZ-325m	NZ-325m_RT1hr	NZ-325m_60C1hr	NZ-325m_60C6hr
SiO <sub>2</sub> (wt%)	98.8	78.5	75.1	76.5	78.5	79.4	81.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)	-	0.1	13.3	13.0	12.3	11.9	11.2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (wt%)	0.9	0.9	0.9	0.9	1.1	0.9	0.9
CaO (wt%)	0.2	0.4	4.2	2.9	2.9	2.5	2.5
MgO (wt%)	-	17.2	1.3	0.9	0.9	0.8	0.6
Na <sub>2</sub> O (wt%)	-	1.6	0.6	0.4	-	-	-
SO <sub>3</sub> (wt%)	0.1	1.2	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O (wt%)	-	-	2.2	3.2	2.8	2.6	2.4
TiO <sub>2</sub> (wt%)	-	-	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (wt%)	-	-	1.9	1.8	1.2	1.6	1.1
SrO (wt%)	-	-	0.1	-	-	-	-
Si	41.6	32.0	31.5	35.9	36.6	37.0	37.8
Al	0.0	0.0	6.3	6.9	6.5	6.3	5.9
Si/Al	∞	∞	5.0	5.2	5.6	5.9	6.4

#### 4.2.2 ความสามารถในการดูดซับ SMG ของตัวดูดซับเกรดการค้าเทียบกับซีโอไลต์ธรรมชาติ

จากตารางที่ 4-5 แสดงถึงประสิทธิภาพในการดูดซับ SMG ใน B100 ที่มีความเข้มข้น SMG เริ่มต้น 0.71 wt% ของตัวดูดซับ 5 ชนิดตั้งต้นได้แก่ Silica gel, MS, NZ-Bead, NZ-200m และ NZ-325m โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 wt% และใช้เวลาดูดซับ 50 นาที จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของ Silica gel และ MS สามารถลด SMG ได้สูงถึง 0.42 wt% และ 0.43 wt% ตามลำดับ และมีค่าความจุการดูดซับ SMG อยู่ที่ 79.8 mg<sub>SMG</sub>/g<sub>ads</sub> และ 81.7 mg<sub>SMG</sub>/g<sub>ads</sub> ตามลำดับ ในขณะที่ซีโอไลต์ธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด สามารถดูดซับ SMG ได้ต่ำอยู่ในช่วง 0.02-0.12 wt% และมีค่าความจุการดูดซับ SMG ในช่วง 3.8-23.4 mg<sub>SMG</sub>/g<sub>ads</sub> แสดงว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติมีประสิทธิภาพในการดูดซับ SMG แย่กว่าตัวดูดซับทางการค้าประมาณ 4 เท่า

แต่อย่างไรก็ตามซีโอไลต์ธรรมชาติก็ยังมีราคาที่ถูกกว่าตัวดูดซับทางการค้ามากถึง 11 เท่า และสามารถตัดแปรตัวดูดซับโดยการปรับปริมาณ Al ในโครงสร้างด้วยกระบวนการ Dealumination เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น [24] สำหรับตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่สามารถนำไปพัฒนาประสิทธิภาพในการดูดซับ SMG ต่อได้แก่ตัวดูดซับ NZ-325m เนื่องจากมีประสิทธิภาพการดูดซับดีกว่า NZ-200m และ NZ-Bead ตามลำดับ

ตารางที่ 4-5 ประสิทธิภาพในการดูดซับ SMG ใน B100 ที่มีความเข้มข้น SMG เริ่มต้นเท่ากับ 0.71 wt% โดยใช้ตัวดูดซับ 5 wt% และใช้เวลาในการดูดซับ 50 นาที เทียบกับลักษณะรูพรุนของตัวดูดซับ

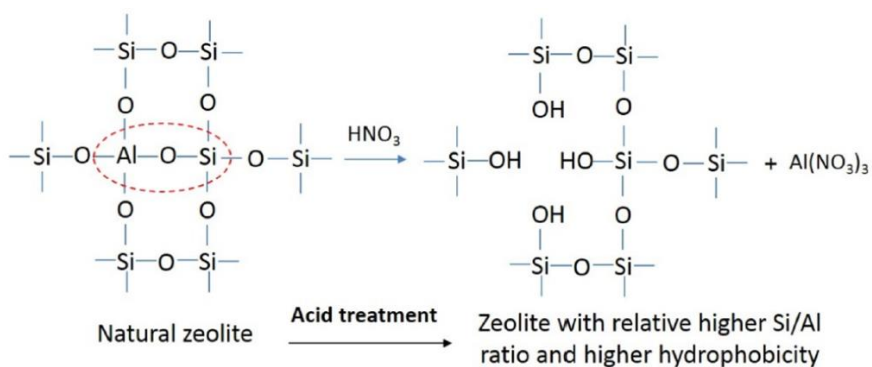
ตัวดูดซับ	ความเข้มข้น SMG ที่เหลือ ใน B100 (wt%)	ความเข้มข้น SMG ที่ถูกดูดซับ (wt%)	ความจุการดูดซับ SMG ( $q_{SMG}$ ), $mg_{SMG}/g_{ads}$	พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $m^2/g$ )	ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด ( $cm^3/g$ )	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ( $\text{\AA}$ )
Silica gel	0.29	0.42	79.8	-	-	-
MS	0.28	0.43	81.7	518.35	0.5664	43.71
NZ-Bead	0.69	0.02	3.8	-	-	-
NZ-200m	0.60	0.11	20.9	-	-	-
NZ-325m	0.59	0.12	23.4	93.67	0.1079	46.06
NZ-325m_RT1hr	0.54	0.17	32.3	-	-	-
NZ-325m_60C1hr	0.52	0.19	36.1	96.19	0.1086	45.14
NZ-325m_60C6hr	0.51	0.20	38.0	141.85	0.1208	34.07

#### 4.3 ผลการศึกษาการใช้กระบวนการบำบัดด้วยกรดในการดัดแปรตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ

##### 4.3.1 สมบัติของตัวดูดซับซีโอไลต์หลังการดัดแปรด้วยกระบวนการบำบัดด้วยกรดในตริก

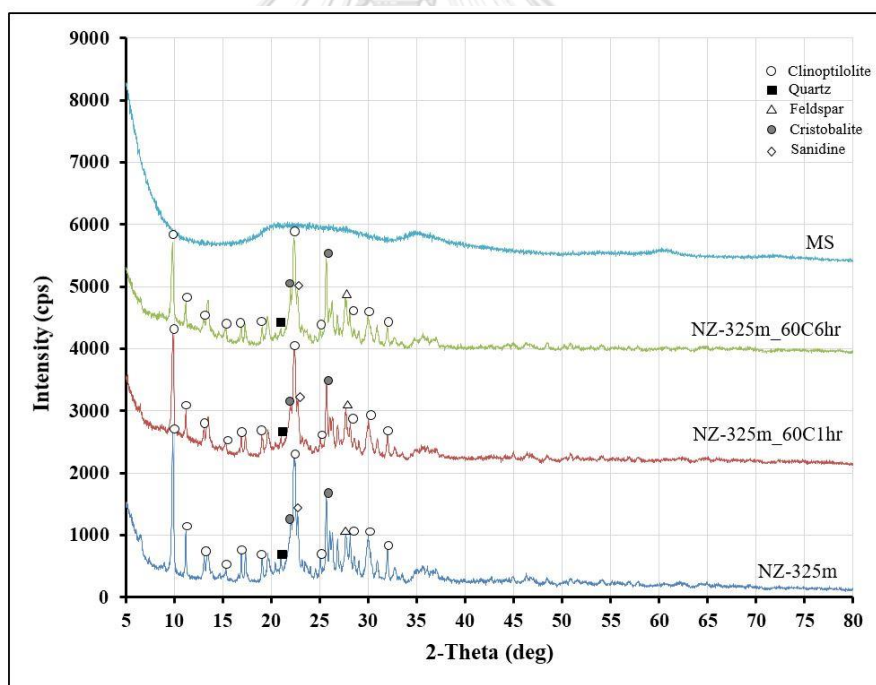
ผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการบำบัด NZ-325m จะทำให้เกิดการกำจัด Al ในโครงสร้างได้มากขึ้น โดยตัวดูดซับ NZ-325m ที่บำบัดด้วยกรดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (NZ-325m\_RT1hr) ตัวดูดซับ NZ-325m ที่บำบัดด้วยกรดที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (NZ-325m\_60C1hr) และ ตัวดูดซับ NZ-325m ที่บำบัดด้วยกรดที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (NZ-325m\_60C6hr) สามารถกำจัด Al ในโครงสร้างได้ 0.4 wt%, 0.6 wt% และ 1.0 wt% ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4-4 ทำให้ในโครงสร้างเกิดช่องว่างเป็นรูพรุนด้วยกระบวนการดึง Al ออกจากโครงสร้างซีโอไลต์ธรรมชาติดังรูปที่ 4-13 ซึ่งจะทำให้สัดส่วนของ Si/Al เพิ่มขึ้น ความมีขั้วของซีโอไลต์ธรรมชาติจึงลดลง ทั้งนี้ยังสามารถกำจัดองค์ประกอบธาตุอื่นๆที่ปนเปื้อนอยู่ใน NZ-325m ได้แก่ CaO, MgO, K<sub>2</sub>O และ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ทำให้ตัวดูดซับมีความบริสุทธิ์ของ SiO<sub>2</sub> สูงขึ้น





รูปที่ 4-13 แสดงการกำจัด Al ออกจากโครงสร้างซีโอไลต์ธรรมชาติโดยใช้กระบวนการบำบัดด้วยกรดไนตริก [24]

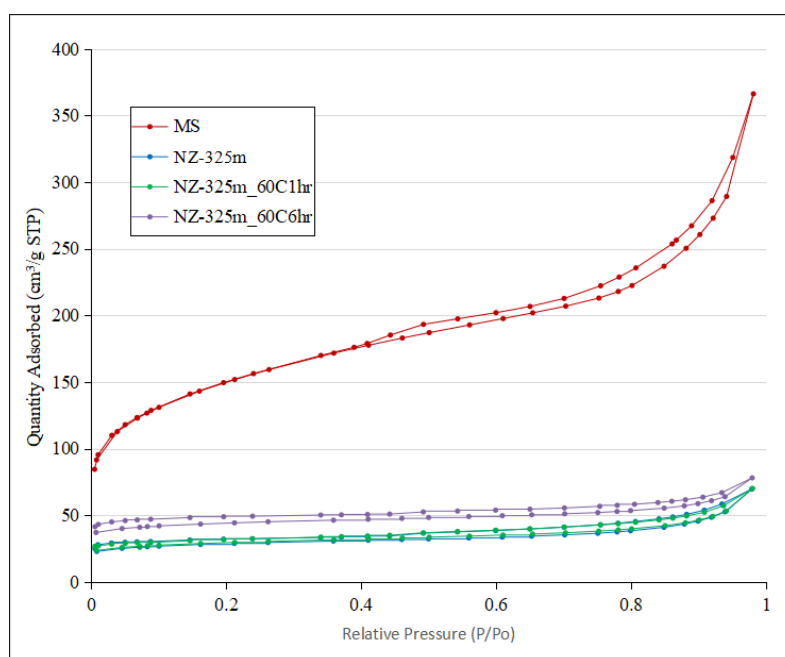
ในการบำบัดด้วยกรดไนตริกที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  ที่เวลา 1 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมง พบว่าไม่ทำให้ความเป็นผลึกของ NZ-325m เสียหาย แต่จะลดความเป็นผลึกของโครงสร้างผลึก Clinoptilolite เพียงเล็กน้อยตามผล XRD ในรูปที่ 4-14 สืบเนื่องจากความสูงของพีค Clinoptilolite ที่ลดลง



รูปที่ 4-14 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับ MS, NZ-325m, NZ-325m\_60C1hr และ NZ-325m\_60C6hr

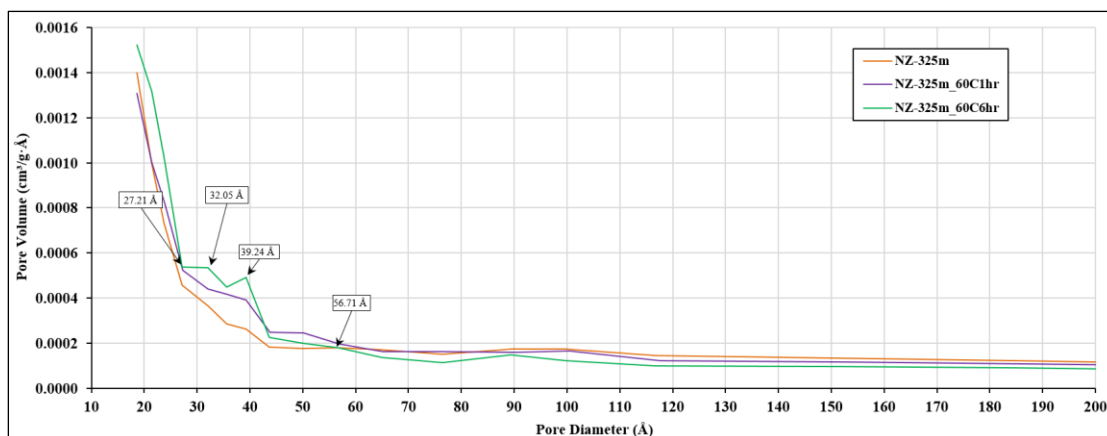
สำหรับการเปลี่ยนแปลงความเป็นรูพรุนของตัวดูดซับ จากผลการทดสอบ  $\text{N}_2$  physisorption ตาม ตารางที่ 4-5 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการบำบัด NZ-325m จาก 1 ชั่วโมง เป็น 6 ชั่วโมง ทำให้ตัวดูดซับ NZ-325m เกิดรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากสังเกตจากขนาดรู

พอร์เคลียที่มีขนาดเล็กลงจาก 46.06 Å เป็น 45.14 Å และ 34.07 Å ตามลำดับ แต่ปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจาก 0.1079 cm<sup>3</sup>/g เป็น 0.1086 cm<sup>3</sup>/g และ 0.1208 cm<sup>3</sup>/g ตามลำดับ อีกทั้งพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 93.67 m<sup>2</sup>/g เป็น 96.19 m<sup>2</sup>/g และ 141.85 m<sup>2</sup>/g ตามลำดับ จากผลการกระจายตัวของขนาดรูพรุนกับปริมาตรรูพรุนดังรูปที่ 4-16 จะพบว่า การบำบัดด้วยกรดของ NZ-325m ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง จะเพิ่มปริมาตรรูพรุนของรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า 56.71 Å ซึ่งขนาดรูพรุนที่เพิ่มสูงสุดคือที่ 39.24 Å และ 32.05 Å ตามลำดับ ในขณะที่ NZ-325m\_60C6hr มีการเพิ่มปริมาตรรูพรุนของรูพรุนขนาดที่เล็กกว่า 27.21 Å อย่างมาก



รูปที่ 4-15 ลักษณะไอโซเทิร์มของการดูดซับของตัวดูดซับ MS, NZ-325m, NZ-325m\_60C1hr และ NZ-325m\_60C6hr

ลักษณะไอโซเทิร์มของการดูดซับของ MS เทียบกับตัวดูดซับ NZ-325m, NZ-325m\_60C1hr และ NZ-325m\_60C6hr เป็นไปตามรูปที่ 4-15 จะเห็นว่า MS เกิดการดูดซับอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำและจะค่อยๆสูงขึ้น จนเกิดการดูดซับสูงสุดที่มากกว่า 350 cm<sup>3</sup>/g STP ในขณะที่ตัวดูดซับ NZ-325m, NZ-325m\_60C1hr และ NZ-325m\_60C6hr เกิดการดูดซับต่ำตลอดช่วงความดันสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น และเกิดการดูดซับสูงสุดไม่เกิน 80 cm<sup>3</sup>/g STP



รูปที่ 4-16 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนเทียบกับปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ NZ-325m, NZ-325m\_60C1hr และ NZ-325m\_60C6hr

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะรูพรุนของตัวดูดซับ NZ-325m กับตัวดูดซับทางการค้า MS พบว่า MS มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ  $43.71 \text{ m}^2/\text{g}$  ซึ่งเล็กกว่าตัวดูดซับ NZ-325m ที่มีขนาด  $46.06 \text{ m}^2/\text{g}$  แต่พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติหลังจากตัดแปรแล้วที่มีพื้นที่ผิวสูงสุดคือ NZ-325m\_60C6hr ที่มีค่าเท่ากับ  $141.85 \text{ m}^2/\text{g}$  ยังน้อยกว่าตัวดูดซับทางการค้า MS ที่มีค่าสูงถึง  $518.35 \text{ m}^2/\text{g}$  แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับทางการค้า MS มีความเป็นรูพรุนสูงกว่ามาก

#### 4.3.2 ประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์หลังการตัดแปรด้วยกระบวนการบำบัดด้วยกรดไนตริก

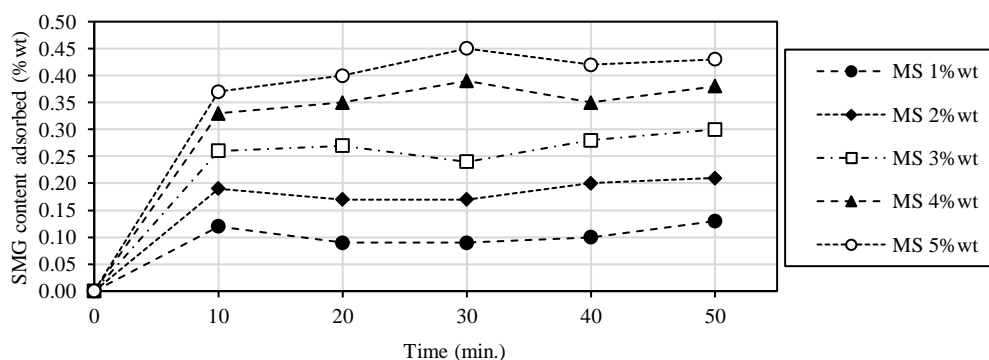
ประสิทธิภาพการดูดซับ SMG ของ NZ-325m\_60C1hr ดีกว่า NZ-325m\_RT1hr โดยที่ตัวดูดซับ NZ-325m\_60C1hr มีความจุการดูดซับ SMG เท่ากับ  $36.1 \text{ mg}_{\text{SMG}}/\text{g}_{\text{ads}}$  ซึ่งมากกว่า NZ-325m\_RT1hr ที่มีความจุการดูดซับ SMG เท่ากับ  $32.3 \text{ mg}_{\text{SMG}}/\text{g}_{\text{ads}}$  และเมื่อเพิ่มเวลาในการบำบัดตัว NZ-325m ที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่าสามารถลดความเข้มข้นของ SMG ได้ถึง 0.20 wt% และค่าความจุการดูดซับ SMG มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $38.0 \text{ mg}_{\text{SMG}}/\text{g}_{\text{ads}}$  ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวจำเพาะ

ดังนั้นจะเห็นว่าตัวดูดซับ NZ-325m\_60C6hr ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่ผ่านการตัดแปรจาก NZ-325m จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับ SMG ดีขึ้น 67 %

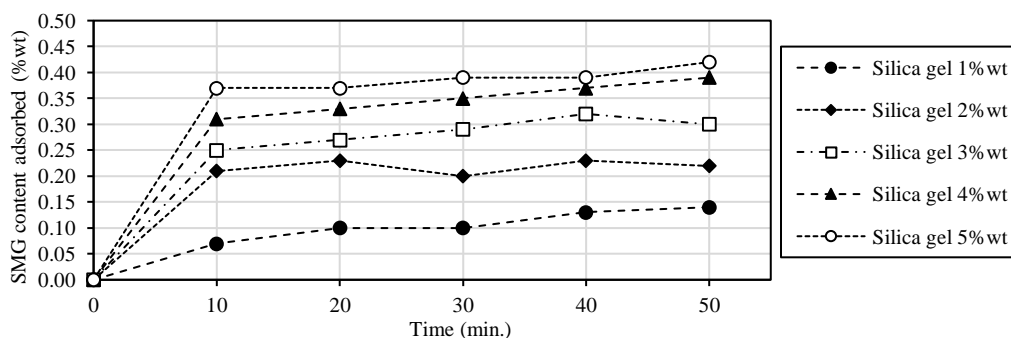
#### 4.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

รูปที่ 4-17 และ รูปที่ 4-18 แสดงปริมาณ SMG ที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ MS และ Silica gel หลังจากนำไปดูดซับ SMG ใน B100 ที่มีความเข้มข้น SMG เริ่มต้นเท่ากับ 0.71 wt% โดยใช้ตัวดูดซับ 1-5 wt% และเวลาการดูดซับที่ 0-50 นาที พบว่าตัวดูดซับ MS ที่การใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1-3 wt% การดูดซับ SMG จะเริ่มเข้าสู่สมดุลที่ 10 นาที ที่การใช้ปริมาณตัวดูดซับ 4 wt% การดูดซับ SMG จะเริ่มเข้าสู่สมดุลที่ 20 นาที และที่การใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 wt% การดูดซับ SMG จะเริ่มเข้าสู่สมดุลที่ 30 นาที ซึ่งการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทุก 1 wt% จะเพิ่มการดูดซับ SMG อย่างมีนัยสำคัญ

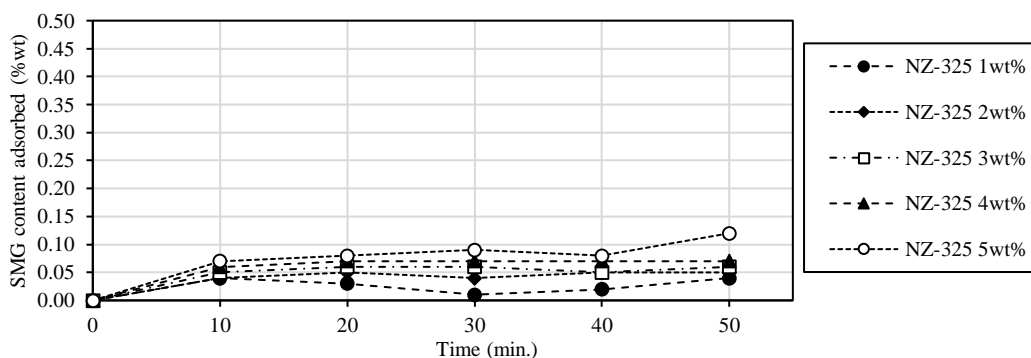
สำหรับการดูดซับ SMG ของตัวดูดซับ Silica gel พบว่าการดูดซับ SMG ที่ปริมาณการใช้ตัวดูดซับ 1 wt%, 4 wt% และ 5 wt% จะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึง 50 นาทีและยังไม่เข้าสู่สมดุล ในขณะที่การใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 2 wt% การดูดซับ SMG เริ่มเข้าสู่สมดุลที่ 10 นาที และการใช้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 3 wt% การดูดซับ SMG เริ่มเข้าสู่สมดุลที่ 40 นาที



รูปที่ 4-17 การดูดซับปริมาณ SMG ของ MS ใน B100 ที่ SMG เริ่มต้น 0.71 wt%



รูปที่ 4-18 การดูดซับปริมาณ SMG ของ Silica gel ใน B100 ที่ SMG เริ่มต้น 0.71 wt%

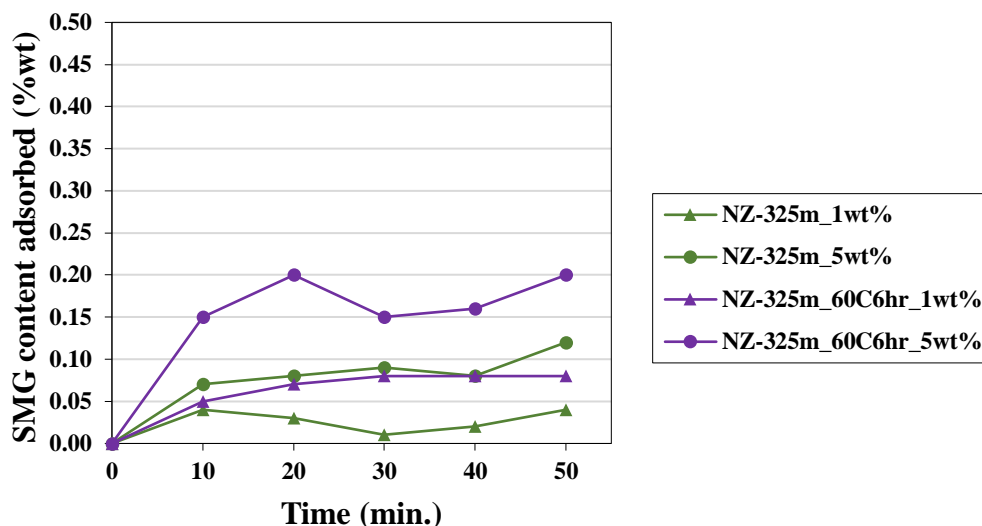


รูปที่ 4-19 การดูดซับปริมาณ SMG ของ NZ-325m ใน PO-B100 ที่ SMG เริ่มต้น 0.71 wt%

ในขณะที่ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ NZ-325m พบว่าการดูดซับเพียงเล็กน้อยที่ 10 นาที และจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนถึง 50 นาที ตามรูปที่ 4-19 ส่วนการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ 1-4 wt% พบว่าแทบไม่มีความแตกต่างในการดูดซับ SMG อย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับตัวดูดซับ NZ-325m\_60C6hr ที่ทำการดูดซับ SMG ใน B100 เริ่มต้นที่มี SMG 0.71 wt% ได้ใช้ตัวดูดซับที่ 1 wt% และ 5 wt% และเวลาในการดูดซับที่ 0-50 นาที เป็นไปตามรูปที่ 4-20 พบว่าการใช้ปริมาณตัวดูดซับ 1 wt% การดูดซับ SMG จะเข้าสู่สมดุลที่ 30 นาที และที่ การใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 wt% การดูดซับ SMG มีความผันผวนตั้งแต่ 10 นาทีถึง 50 นาที

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับ SMG ของ NZ-325m\_60C6hr กับ NZ-325m ก่อนคัดแปรจะ เห็นว่าการดูดซับของ NZ-325m\_60C6hr ที่ 1 wt% สามารถดูดซับ SMG ได้เทียบเท่ากับการดูดซับ ของ NZ-325m ที่ 5 wt% และการดูดซับของ NZ-325m\_60C6hr ที่ 5 wt% มีการดูดซับ SMG ที่สูง กว่า NZ-325m อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับปรุงตัวดูดซับให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น



รูปที่ 4-20 การดูดซับปริมาณ SMG ของ NZ-325m และ NZ-325m\_60C6hr ใน B100 ที่ SMG เริ่มต้น 0.71 wt% ที่ปริมาณตัวดูดซับ 1 wt% และ 5 wt%

จากตารางที่ 4-6 เป็นค่าความจุของการดูดซับ SMG จะพบว่าค่าความจุการดูดซับของตัวดูดซับทางการค้า Silica gel และ MS มีค่าเฉลี่ยประมาณ  $90.3 \text{ mg}_{\text{SMG}}/\text{g}_{\text{ads}}$  และ  $91.8 \text{ mg}_{\text{SMG}}/\text{g}_{\text{ads}}$  ตามลำดับ ในขณะที่ค่าความจุของการดูดซับของการดูดซับ SMG ของ NZ-325m\_60C6hr มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $51.9 \text{ mg}_{\text{SMG}}/\text{g}_{\text{ads}}$  ซึ่งสูงกว่า NZ-325m ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $22.3 \text{ mg}_{\text{SMG}}/\text{g}_{\text{ads}}$  จะเห็นว่าการดูดซับ SMG ที่ใช้ปริมาณตัวดูดซับต่ำจะให้ค่าความจุการดูดซับสูงกว่าการใช้ปริมาณตัวดูดซับสูง ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่า สามารถเลือกใช้ NZ-325m\_60C6hr ที่ 1 wt% และใช้เวลาในการดูดซับ 30 นาที (ลด SMG ได้ 0.08 wt%) จะให้ประสิทธิภาพเกือบเทียบเท่ากับการใช้ตัวดูดซับทางการค้า MS ที่ปริมาณตัวดูดซับ และเวลาเท่ากับกัน แต่หากต้องการลดปริมาณ SMG สูงในการดูดซับครั้งเดียวสามารถเลือกใช้ NZ-325m\_60C6hr โดยใช้ปริมาณตัวดูดซับ 5 wt% และใช้เวลาในการดูดซับ 20 นาที (ลด SMG ได้ 0.20 wt%)

ตารางที่ 4-6 ความจุการดูดซับของการดูดซับ SMG โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติเทียบกับตัวดูดซับทางการค้า

ปริมาณตัวดูดซับ (wt%)	เวลาที่ใช้ดูดซับ (นาที)	ความจุการดูดซับ (mg <sub>SMG</sub> /g <sub>ads</sub> )			
		Silica gel	MS	NZ-325m	NZ-325m_60C6hr
1	10	69.3	119.0	39.6	49.5
	20	99.0	89.1	29.7	69.3
	30	99.0	89.1	9.9	79.2
	40	128.7	99.0	19.8	79.2
	50	138.6	128.7	39.6	79.2
5	10	70.3	70.3	13.3	28.9
	20	70.3	76.0	15.2	38.1
	30	74.1	85.5	17.1	27.7
	40	74.1	79.8	15.2	29.9
	50	79.8	81.7	23.4	38.0
ค่าเฉลี่ย		90.3	91.8	22.3	51.9

#### 4.5 ผลการศึกษาการเลือกจำเพาะในการดูดซับ SMG ใน B100 ของตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาการเลือกจำเพาะในการดูดซับ SMG ของตัวดูดซับ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 5 wt% และใช้เวลาในการดูดซับ 50 นาทีดังตารางที่ 4-7 พบว่าตัวดูดซับทุกชนิดได้แก่ Silica gel, MS, NZ-325m และ NZ-325m\_60C6hr ไม่เกิดการดูดซับ DG และ TG แต่จะดูดซับเฉพาะ SMG, UMG และ FG โดยจะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับ SMG มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากความเข้มข้นของ SMG มีสัดส่วนมากที่สุดก่อนการดูดซับ (0.71 wt%) ในขณะที่ DG, TG และ FG มีความเข้มข้นก่อนการดูดซับต่ำเท่ากับ 0.01 wt%, 0.01 wt% และ 0.005 wt% ตามลำดับ

การเลือกจำเพาะในการดูดซับ SMG ของ NZ-325m\_60C6hr มีค่าเท่ากับ 0.97 ซึ่งสูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ อาจเนื่องจากโครงสร้างรูพรุนมีความซับซ้อนขึ้นจากการกำจัด Al ออกจากโครงสร้าง ทำให้โมเลกุล UMG ที่มีลักษณะโมเลกุลเกาะกะของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนตามรูปที่ 2-6 ไม่สามารถเกิดการดูดซับในรูพรุนได้

ตารางที่ 4-7 ความจุการดูดซับสารปนเปื้อนใน B100 และการเลือกจำเพาะในการดูดซับ SMG ของตัวดูดซับ

	Silica gel	MS	NZ-325m	NZ-325m_6hr
$q_{SMG}$ (mg <sub>SMG</sub> /g <sub>ads</sub> )	79.8	81.7	23.4	38
$q_{UMG}$ (mg <sub>UMG</sub> /g <sub>ads</sub> )	3	2.7	0.8	0
$q_{DG}$ (mg <sub>DG</sub> /g <sub>ads</sub> )	0	0	0	0
$q_{TG}$ (mg <sub>TG</sub> /g <sub>ads</sub> )	0	0	0	0
$q_{FG}$ (mg <sub>FG</sub> /g <sub>ads</sub> )	1.3	1.3	1.1	1.1
$S_{SMG}$	0.95	0.95	0.92	0.97

#### 4.6 สมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำของไบโอดีเซลผสมหลังใช้ B100 ที่ผ่านการดูดซับ SMG โดย NZ-325m\_60C6hr

ผลการทดสอบของค้ประกอบใน B100 ก่อนและหลังดูดซับด้วยตัวดูดซับ NZ-325m\_60C6hr ในปริมาณ 5 wt% และใช้เวลาในการดูดซับ 50 นาที เป็นไปตามตารางที่ 4-8 พบว่าปริมาณ SMG ลดลง 0.20 wt% ทำให้ปริมาณ FAME ใน B100 เพิ่มขึ้นจาก 96.5 wt% เป็น 96.7 wt% ในขณะที่ปริมาณ FG ลดลง 0.006 wt% และไม่เกิดการดูดซับ UMG, DG และ TG

B7 ยูโร5 ที่ได้จากการผสม B100 หลังการดูดซับสามารถลดค่าจุดขุ่น จาก 24 °C เป็น 18 °C ซึ่งให้ผลของจุดขุ่นที่ต่ำกว่าที่คาดไว้ตามผลการทดลองในรูปที่ 4-8 อาจเนื่องมาจากตัวดูดซับ NZ-325m\_60C6hr นอกจากจะดูดซับ SMG แล้วยังดูดซับ FG ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดตะกอนที่อุณหภูมิต่ำด้วย จึงทำให้ค่าจุดขุ่นต่ำลงได้อีก ในขณะที่ค่าจุดจุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ มีค่าลดลง 2 °C ส่วนค่าจุดไหลเทไม่เปลี่ยนแปลง



ตารางที่ 4-8 องค์ประกอบของ B100 ก่อนและหลังดูดซับด้วย NZ-325m\_6hr ที่ 5wt% และใช้เวลาในการดูดซับ 50 นาที รวมถึงสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำของ B7 ยูโร 5 ที่ใช้ B100 เหล่านี้

หัวข้อทดสอบ	B100 ก่อนดูดซับ	B100 หลังดูดซับ
FAME (wt%)	96.5	96.7
SMG (wt%)	0.71	0.51
UMG (wt%)	0.02	0.02
FG (wt%)	0.008	0.002
DG (wt%)	0.02	0.02
TG (wt%)	0.01	0.01
จุดขุ่น (CP) ของ B7 ยูโร 5 (°C)	24	18
จุดจุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (CFPP) ของ B7 ยูโร 5 (°C)	18	16
จุดไหลเท (PP) ของ B7 ยูโร 5 (°C)	-12	-12

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

##### 5.1.1 ผลกระทบของ SMG ที่มีต่อจุดขุ่นในน้ำมันไบโอดีเซลผสม

ผลกระทบของ SMG ต่อจุดขุ่นใน B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร 4 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ SMG มีค่าสูงถึง 0.02 wt% จะทำให้ค่าจุดขุ่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 12 °C, 4 °C และ 8 °C ตามลำดับ และใน B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร 5 เมื่อความเข้มข้นของ SMG มีค่าสูงถึง 0.02 wt% จะทำให้ค่าจุดขุ่นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 16 °C, 10 °C และ 7 °C ตามลำดับ

เนื่องจาก SMG สามารถละลายได้ดีใน B100 ดังนั้นผลกระทบของ SMG ต่อจุดขุ่นใน B7 จึงมากกว่าใน B10 และ B20 ตามลำดับ

ความเข้มข้นของ SMG ใน B7, B10 และ B20 มาตรฐานยูโร 4 และ มาตรฐานยูโร 5 ไม่ควรมีค่ามากกว่า 0.02 wt% หรือคิดเป็นความเข้มข้นของ SMG ใน B100 เริ่มต้นไม่ควรเกิน 0.3 wt%, 0.2 wt% และ 0.1 wt% ในการผสมเป็น B7, B10 และ B20 ตามลำดับ

SMG มีต่อจุดขุ่นในไบโอดีเซลผสมมาตรฐานยูโร 5 มากกว่าในไบโอดีเซลผสมมาตรฐานยูโร 4 เนื่องจากในไบโอดีเซลผสมมาตรฐานยูโร 4 มีความเข้มข้นของแอมโรแมติกสูงกว่าจึงช่วยละลาย SMG ได้ดี [15] และจะพอง SMG ไม่ให้เกิดผลึกค่าจุดขุ่นจึงไม่เปลี่ยนแปลง ในขณะที่ไบโอดีเซลผสมมาตรฐานยูโร 5 มีปริมาณแอมโรแมติกต่ำ ความสามารถในการละลายของ SMG ในไบโอดีเซลผสมจึงต่ำกว่าและเกิดผลึกของ SMG ได้ง่ายทำให้ค่าจุดขุ่นสูงขึ้น

##### 5.1.2 การกำจัด SMG ใน B100 โดยใช้ตัวดูดซับเกรดการค้าเทียบกับซีโอไลต์ธรรมชาติ

ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ NZ-325m มีโครงสร้างผลึกเป็นชนิด Clinoptilolite ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าตัวดูดซับทางการค้า Silica gel และ MS ประมาณ 5 เท่า จึงทำให้ดูดซับโมเลกุล SMG ใน B100 ที่อุณหภูมิ 45 °C ได้น้อย แนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพคือการบำบัดด้วยกรดไนตริก 1 M เพื่อกำจัด Al ในโครงสร้างและเพิ่มความเป็นรูพรุน ซึ่งภาวะในการบำบัดที่เหมาะสมคือการใช้ตัวดูดซับต่อกรดไนตริก 1 M เท่ากับ 1:10 บำบัดตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (NZ-325m\_60C6hr) ซึ่งพบว่าโครงสร้างตัวดูดซับหลังบำบัดมีปริมาณ Al ลดลง 1.0 wt% และเพิ่มความสามารถของ SiO<sub>2</sub> จาก 76.5 wt% เป็น 81.0 wt% และลดความมีขุ่นของโครงสร้างลง

ตามสัดส่วนของ Si/Al ที่เพิ่มขึ้น ความเป็นรูพรุนของ NZ-325m\_60C6hr มีความเป็นรูพรุนมากขึ้น โดยสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะได้จาก  $93.67 \text{ m}^2/\text{g}$  เป็น  $141.85 \text{ m}^2/\text{g}$  จึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้น 67 % ที่การใช้ตัวดูดซับ 5 wt% และใช้เวลาในการดูดซับ 50 นาที

NZ-325m\_60C6hr มีการเลือกจำเพาะต่อการดูดซับ SMG สูงกว่าตัวดูดซับทางการค้า Silica gel และ MS โดยเลือกดูดซับเฉพาะ SMG แต่ไม่ดูดซับ UMG ซึ่งช่วยในการลดจุดขุ่น นอกจากนี้ยังสามารถดูดซับ FG ที่มีปริมาณน้อยได้อีกด้วย

เมื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการใช้งานพบว่าการใช้งาน NZ-325m\_60C6hr ที่ 1 wt% และใช้เวลา 30 นาที จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงตัวดูดซับทางการค้า Silica gel และ MS ในขณะที่ราคาถูกกว่ามากประมาณ 11 เท่า

B100 ที่มีความเข้มข้น SMG 0.71 wt% หลังผ่านการดูดซับด้วย NZ-325m\_60C6hr ที่ 5 wt% ใช้เวลาดูดซับ 50 นาที พบว่าปริมาณ SMG ลดลง 0.20 wt% และ FG ลดลง 0.006 wt% เมื่อนำมาผสมเป็น B7 มาตรฐานยูโร 5 พบว่าสามารถลดจุดขุ่นได้ถึง  $6^\circ\text{C}$  และลดค่าจุดจุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำได้  $2^\circ\text{C}$

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

5.2.1 ทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับ SMG ใน B100 ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติ

5.2.2 ทดลองศึกษาภาวะในการนำซีโอไลต์ธรรมชาติหลังดูดซับกลับมาใช้ใหม่ และจำนวนในการนำกลับมาใช้ใหม่ที่ยังคงประสิทธิภาพในการดูดซับ SMG

5.2.3 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับ SMG ด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดไนตริกที่ความเข้มข้นต่างๆ

5.2.4 ทดลองเปรียบเทียบผลของความเร็วยวรอบในการกวนในการดูดซับ SMG จาก B100 โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## บรรณานุกรม

1. Candeia, R. A., M. C. D. Silva, J. R. Carvalho Filho, M. G. A. Brasilino, T. C. Bicudo, I. M. G. Santos, and A. G. Souza. "Influence of soybean biodiesel content on basic properties of biodiesel–diesel blends." *Fuel* 88 **2009**: 738-743.
2. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2558-2579. 2558.
3. กรมธุรกิจพลังงาน. ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่องข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2562. 2562.
4. Dwivedi, G., and M. P. Sharma, "Impact of cold flow properties of biodiesel on engine performance." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31 **2014**: 650-656.
5. Verma, P., M.P. Sharma, and G. Dwivedi. "Evaluation and enhancement of cold flow properties of palm oil and its biodiesel." *Energy Reports* 2 **2016**: 8-13.
6. Dunn, R. O. "Effects of minor constituents on cold flow properties and performance of biodiesel." *Progress in Energy and Combustion Science* 35 **2009**: 481-489.
7. คณะกรรมการการพลังงาน สภาผู้แทนราษฎร. พลังงานทดแทน เอทานอล และไบโอดีเซล 2545. 2545.
8. Vassilis J., and A. A. Z. Inglezakis. "Natural Zeolites Structure and Porosity" *Handbook of Natural Zeolites* **2012**: 133-146.
9. Breck, D.W. *Zeolite molecular sieves: structure, chemistry, and use*. 1973.
10. Moshoeshoe, and O. Veronica. "A Review of the Chemistry, Structure, Properties and Applications of Zeolites." *American Journal of Materials Science* 7 **2017**: 196-221.
11. Ruthven D.M. *Principles of Adsorption Processes* **1984**.
12. Ackley, M. W., R.F. Giese, and R.T. Yang. "Clinoptilolite: Untapped potential for kinetics gas separations." *Zeolites* 12 **1992**: 780-788.
13. Artioli, Y. "Adsorption." *In Encyclopedia of Ecology* **2008**: 60-65.
14. Manaia, E. B., M.P. Abuçafy, B.G. Chiari-Andréo, B.L. Silva, J.A. Oshiro Junior, and L.A. Chiavacci. "Physicochemical characterization of drug nanocarriers." *Int J Nanomedicine* 12 **2017**: 4991-5011.
15. Chupka, G. M., J. Yanowitz, G. Chiu, T. L. Alleman, and R. L. McCormick. "Effect of

- Saturated Monoglyceride Polymorphism on Low-Temperature Performance of Biodiesel." *Energy & Fuels* 25 **2011**: 398-405.
16. Chupka, G. M., L. Fouts, and R. L. McCormick. "Effect of Low-Level Impurities on Low-Temperature Performance Properties of Biodiesel." *Energy & Environmental Science* 5 **2012**: 8734-42.
  17. Tang, H., R.C. De Guzman, and S.O. Salley. "Formation of Insolubles in Palm Oil-, Yellow Grease-, and Soybean Oil-Based Biodiesel Blends After Cold Soaking at 4 °C." *Journal of the American Oil Chemists' Society* 85 **2008**: 1173-1182.
  18. Na-Ranong, D., and P. Kitchaiya. "Precipitation above cloud point in palm oil based biodiesel during production and storage." *Fuel* 122 **2014**: 287-293.
  19. Plata, V., P. Gauthier-Maradei, and V. Kafarov. "Influence of minor components on precipitate formation and filterability of palm oil biodiesel." *Fuel* 144 **2015**: 130-136.
  20. Chupka, G. M., L. Fouts, J.A. Lennon, T.L. Alleman, D.A. Daniels, and R.L. McCormick. "Saturated monoglyceride effects on low-temperature performance of biodiesel blends." *Fuel Processing Technology* 118 **2014**: 302-309.
  21. Na-Ranong, D., P. Laungthaleongpong, and S. Khambung. "Removal of steryl glucosides in palm oil based biodiesel using magnesium silicate and bleaching earth." *Fuel* 143 **2015**:229-235.
  22. Saengprachum, N., and S. Pengprecha. "Preparation and characterization of aluminum oxide coated extracted silica from rice husk ash for monoglyceride removal in crude biodiesel production." *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 58 **2016**:441-450.
  23. Mansouri, N., N. Rikhtegar, H. Panahi, F. Atabi, and B. Karimi Shahraki. "Porosity, characterization and structural properties of natural zeolite - Clinoptilolite - As a sorbent." *Environment Protection Engineering* 38 **2013**: 139.
  24. Wang, C. S. Leng, H. Guo, L. Cao, and J. Huang. "Acid and alkali treatments for regulation of hydrophilicity/hydrophobicity of natural zeolite." *Applied Surface Science* 478 **2019**:319-326.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับซีโอไลต์ธรรมชาติ NZ-325m, NZ-325m\_60C1hr, NZ-325m\_60C6hr และ MS

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



Sample: 325m  
 Operator: supote  
 Submitter: CU  
 File: D:\ICT008-63\000-411\_SMP

Started: 11/4/2019 5:36:50PM	Analysis Adsorptive: N2
Completed: 11/5/2019 7:25:57AM	Analysis Bath Temp.: -195.854 °C
Report Time: 11/6/2019 7:19:21AM	Thermal Correction: No
Sample Mass: 0.0427 g	Warm Free Space: 27.1710 cm <sup>3</sup> Measured
Cold Free Space: 83.3988 cm <sup>3</sup>	Equilibration Interval: 10 s
Ambient Temperature: 22.00 °C	Low Pressure Dose: None
Automatic Degas: Yes	

### Summary Report

#### Surface Area

Single point surface area at  $P/P_0 = 0.261776000$ : 95.1737 m<sup>2</sup>/g

BET Surface Area: 93.6660 m<sup>2</sup>/g

t-Plot Micropore Area: 53.4173 m<sup>2</sup>/g

t-Plot External Surface Area: 40.2507 m<sup>2</sup>/g

BJH Adsorption cumulative surface area of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 38.779 m<sup>2</sup>/g

BJH Desorption cumulative surface area of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 37.6592 m<sup>2</sup>/g

#### Pore Volume

Single point adsorption total pore volume of pores  
 less than 935.062 Å diameter at  $P/P_0 = 0.978847710$ : 0.107861 cm<sup>3</sup>/g

t-Plot micropore volume: 0.026780 cm<sup>3</sup>/g

BJH Adsorption cumulative volume of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 0.081511 cm<sup>3</sup>/g

BJH Desorption cumulative volume of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 0.075767 cm<sup>3</sup>/g

#### Pore Size

Adsorption average pore width (4V/A by BET): 46.0609 Å

BJH Adsorption average pore diameter (4V/A): 84.079 Å

BJH Desorption average pore diameter (4V/A): 80.477 Å

ภาพที่ ก.1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของตัวดูดซับ NZ-325m ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนด้วยเทคนิคของการดูดซับ และคายซับแบบกายภาพกับก๊าซไนโตรเจน รุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic

Sample: Magnesol  
 Operator: supote  
 Submitter: CU  
 File: D:\...\CT008-63\000-412.SMP

Started: 11/5/2019 7:33:47AM	Analysis Adsorptive: N2
Completed: 11/5/2019 12:24:57PM	Analysis Bath Temp.: -195.837 °C
Report Time: 11/6/2019 7:19:52AM	Thermal Correction: No
Sample Mass: 0.0468 g	Warm Free Space: 27.8319 cm <sup>3</sup> Measured
Cold Free Space: 86.4407 cm <sup>3</sup>	Equilibration Interval: 10 s
Ambient Temperature: 22.00 °C	Low Pressure Dose: None
Automatic Degas: Yes	

### Summary Report

#### Surface Area

Single point surface area at P/Po = 0.263246104: 511.0709 m<sup>2</sup>/g

BET Surface Area: 518.3473 m<sup>2</sup>/g

t-Plot Micropore Area: 108.6549 m<sup>2</sup>/g

t-Plot External Surface Area: 409.6924 m<sup>2</sup>/g

BJH Adsorption cumulative surface area of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 383.849 m<sup>2</sup>/g

BJH Desorption cumulative surface area of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 418.5206 m<sup>2</sup>/g

#### Pore Volume

Single point adsorption total pore volume of pores  
 less than 1049.254 Å diameter at P/Po = 0.981194184: 0.566408 cm<sup>3</sup>/g

t-Plot micropore volume: 0.051974 cm<sup>3</sup>/g

BJH Adsorption cumulative volume of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 0.510310 cm<sup>3</sup>/g

BJH Desorption cumulative volume of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 0.524593 cm<sup>3</sup>/g

#### Pore Size

Adsorption average pore width (4V/A by BET): 43.7087 Å

BJH Adsorption average pore diameter (4V/A): 53.178 Å

BJH Desorption average pore diameter (4V/A): 50.138 Å

ภาพที่ ก.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของตัวดูดซับ Magnesol (MS) ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนด้วยเทคนิคของการดูดซับ และคายซับแบบกายภาพ กับก๊าซไนโตรเจน รุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic

Sample: 325m\_HNO3 1M60c  
 Operator: supate  
 Submitter: CU  
 File: D:\...ACT008-63\000-413.SMP

Started: 11/5/2019 1:00:43PM  
 Completed: 11/5/2019 5:49:09PM  
 Report Time: 11/6/2019 7:20:24AM  
 Sample Mass: 0.0479 g  
 Cold Free Space: 86.6664 cm<sup>3</sup>  
 Ambient Temperature: 22.00 °C  
 Automatic Degas: Yes

Analysis Adsorptive: N2  
 Analysis Bath Temp.: -195.884 °C  
 Thermal Correction: No  
 Warm Free Space: 28.0647 cm<sup>3</sup> Measured  
 Equilibration Interval: 10 s  
 Low Pressure Dose: None

### Summary Report

#### Surface Area

Single point surface area at P/Po = 0.262189356: 97.8320 m<sup>2</sup>/g

BET Surface Area: 96.1910 m<sup>2</sup>/g

t-Plot Micropore Area: 55.3588 m<sup>2</sup>/g

t-Plot External Surface Area: 40.8322 m<sup>2</sup>/g

BJH Adsorption cumulative surface area of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 40.599 m<sup>2</sup>/g

BJH Desorption cumulative surface area of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 44.1987 m<sup>2</sup>/g

#### Pore Volume

Single point adsorption total pore volume of pores  
 less than 986.754 Å diameter at P/Po = 0.979978196: 0.108563 cm<sup>3</sup>/g

t-Plot micropore volume: 0.027746 cm<sup>3</sup>/g

BJH Adsorption cumulative volume of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 0.081770 cm<sup>3</sup>/g

BJH Desorption cumulative volume of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 0.079775 cm<sup>3</sup>/g

#### Pore Size

Adsorption average pore width (4V/A by BET): 45.1446 Å

BJH Adsorption average pore diameter (4V/A): 80.564 Å

BJH Desorption average pore diameter (4V/A): 72.197 Å

ภาพที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของตัวดูดซับ  
 NZ-325m\_60C1hr ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนด้วยเทคนิคของการดูดซับ และ  
 คายซับแบบกายภาพกับก๊าซไนโตรเจน รุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic

Sample: 325m\_HNO3 1M6h  
 Operator: supote  
 Submitter: CU  
 File: D:\...ICT008-63\000-414.SMP

Started: 11/5/2019 6:19:35PM  
 Completed: 11/5/2019 10:56:31PM  
 Report Time: 11/6/2019 7:21:14AM  
 Sample Mass: 0.0429 g  
 Cold Free Space: 86.9041 cm<sup>3</sup>  
 Ambient Temperature: 22.00 °C  
 Automatic Degas: Yes

Analysis Adsorptive: N2  
 Analysis Bath Temp.: -195.870 °C  
 Thermal Correction: No  
 Warm Free Space: 28.1064 cm<sup>3</sup> Measured  
 Equilibration Interval: 10 s  
 Low Pressure Dose: None

### Summary Report

#### Surface Area

Single point surface area at P/Po = 0.261793320: 145.2161 m<sup>2</sup>/g  
 BET Surface Area: 141.8461 m<sup>2</sup>/g  
 t-Plot Micropore Area: 98.2352 m<sup>2</sup>/g  
 t-Plot External Surface Area: 45.6109 m<sup>2</sup>/g  
 BJH Adsorption cumulative surface area of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 42.484 m<sup>2</sup>/g  
 BJH Desorption cumulative surface area of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 26.5022 m<sup>2</sup>/g

#### Pore Volume

Single point adsorption total pore volume of pores  
 less than 959.447 Å diameter at P/Po = 0.979396422: 0.120822 cm<sup>3</sup>/g  
 t-Plot micropore volume: 0.048281 cm<sup>3</sup>/g  
 BJH Adsorption cumulative volume of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 0.072171 cm<sup>3</sup>/g  
 BJH Desorption cumulative volume of pores  
 between 17.000 Å and 3000.000 Å diameter: 0.061970 cm<sup>3</sup>/g

#### Pore Size

Adsorption average pore width (4V/A by BET): 34.0710 Å  
 BJH Adsorption average pore diameter (4V/A): 67.952 Å  
 BJH Desorption average pore diameter (4V/A): 67.906 Å

ภาพที่ ก.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ของตัวดูดซับ  
 NZ-325m\_60C6hr ด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุนด้วยเทคนิคของการดูดซับ และ  
 ภายหลังแบบกายภาพกับก๊าซไนโตรเจน รุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic



ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์และการคำนวณความเข้มข้น SMG ใน B100 ที่เหลือหลังการดูดซับ และความจุการ  
ดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การคำนวณหาปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ (Adsorbent loading, wt%)

ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{ปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ (wt\%)} = \left( \frac{\text{น้ำหนักตัวดูดซับ (g)}}{\text{น้ำหนักตัวดูดซับ (g)} + \text{น้ำหนัก B100 (g)}} \right) \times 100$$

ยกตัวอย่างเช่น จากตาราง ข.1 Silica gel ที่ซึ่งได้มีน้ำหนักเท่ากับ 1.0040 g และน้ำหนักของ B100 ที่ใช้ในการดูดซับมีน้ำหนัก 19.0002 g จะได้ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 5.0 wt%

การคำนวณหาความจุการดูดซับ (Adsorption capacity)

ความจุการดูดซับ SMG ( $q_{SMG}$ ) สามารถคำนวณตามสมการด้านล่าง

$$q_{SMG} = \frac{W_{B100}(C_{SMG,i} - C_{SMG,f})}{W_{ads}} \times 10$$

โดยกำหนดให้  $q_{SMG}$  คือ ความจุการดูดซับ SMG,  $mg_{SMG}/g_{ads}$

$W_{B100}$  คือ น้ำหนัก B100 ที่ใช้ในการดูดซับ, g

$W_{abs}$  คือ น้ำหนักตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับ, g

$C_{SMG,i}$  คือ ความเข้มข้น SMG ที่อยู่ใน B100 ก่อนการดูดซับ, wt%

$C_{SMG,f}$  คือ ความเข้มข้น SMG ที่เหลือใน B100 หลังการดูดซับ, wt%

ยกตัวอย่างเช่น จากตาราง ข.1 น้ำหนัก Silica gel ที่ซึ่งได้มีน้ำหนักเท่ากับ 1.0040 g ( $W_{abs}$ ) และน้ำหนักของ B100 ที่ใช้ในการดูดซับมีน้ำหนัก 19.0002 g ( $W_{B100}$ ) ความเข้มข้น SMG ใน B100 ก่อนการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.71 wt% ( $C_{SMG,i}$ ) และความเข้มข้น SMG หลังการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.29 wt% ( $C_{SMG,f}$ ) ดังนั้นความจุการดูดซับ SMG ( $q_{SMG}$ ) จึงมีค่าเท่ากับ 79.8  $mg_{SMG}/g_{ads}$

ตารางที่ ข.1 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น SMG ใน B100 ที่เหลือหลังการดูดซับ และความจุการดูดซับจากการทดลองข้อ 3.3.2.2

ชนิดตัวดูดซับ	เวลาดูดซับ (นาที)	น้ำหนักตัวดูดซับ (g)	น้ำหนัก B100 (g)	น้ำหนักตัวดูดซับ B100 (g)	ปริมาณตัวดูดซับ (wt%)	น้ำหนัก B100 เพื่อวิเคราะห์ SMG ที่เหลือ (mg)	พื้นที่ที่ได้กราฟของ SMG	พื้นที่ที่ได้กราฟของ IS monoC19	น้ำหนักของ IS monoC19 (mg)	ความเข้มข้นของ SMG (wt%)	ความเข้มข้นของ SMG ที่ถูกดูดซับ (wt%)	ความจุการดูดซับ (mg <sub>SMG</sub> /g <sub>sub</sub> )
Silica gel	50	1.0040	19.0002	19.0002	5.0	108.0	193.8	312.5	0.5020	0.29	0.42	79.8
MS	50	1.0046	19.0004	19.0004	5.0	100.3	146.5	263.5	0.5020	0.28	0.43	81.7
NZ-Bead	50	1.0021	19.0020	19.0020	5.0	105.1	402.0	278.3	0.5020	0.69	0.02	3.8
NZ-200m	50	1.0009	19.0006	19.0006	5.0	114.5	401.1	293.2	0.5020	0.60	0.11	20.9
NZ-325m	50	1.0015	19.0011	19.0011	5.0	106.7	357.0	286.2	0.5020	0.59	0.12	23.4

ตารางที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น SMG ใน B100 ที่เหลือหลังการดูดซับ และความจุการดูดซับจากการทดลองข้อ 3.3.2.3 และ 3.3.2.4

ชนิดตัวดูดซับ	เวลาดูดซับ (นาที)	น้ำหนักตัวดูดซับ (g)	น้ำหนัก B100 (g)	น้ำหนักตัวดูดซับ B100 (g)	ปริมาณตัวดูดซับ (wt%)	น้ำหนัก B100 เพื่อวิเคราะห์ SMG ที่เหลือ (mg)	พื้นที่ที่ได้กราฟของ SMG	พื้นที่ที่ได้กราฟของ IS monoC19	น้ำหนักของ IS monoC19 (mg)	ความเข้มข้นของ SMG (wt%)	ความเข้มข้นของ SMG ที่ถูกดูดซับ (wt%)	ความจุการดูดซับ (mg <sub>SMG</sub> /g <sub>sub</sub> )
NZ-325m_RT1hr	50	1.0025	19.0022	19.0022	5.0	118.5	358.7	281.5	0.5020	0.54	0.17	32.3
NZ-325m_60C1hr	50	1.0032	19.0005	19.0005	5.0	110.7	321.8	280.9	0.5020	0.52	0.19	36.1
NZ-325m_60C6hr	50	1.0011	19.0014	19.0014	5.0	108.1	308.8	281.2	0.5020	0.51	0.20	38.0

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น SMG ใน B100 ที่เหลือหลังการดูดซับ และความจุการดูดซับจากการทดลองข้อ 3.3.2.5

ชนิดตัวดูดซับ	เวลาดูดซับ (นาที)	น้ำหนักตัวดูดซับ (g)	น้ำหนัก B100 (g)	ปริมาณตัวดูดซับ (wt%)	น้ำหนักวิเคราะห์ SMG ที่เหลือ (mg)	พื้นที่ใต้กราฟของ SMG	พื้นที่ใต้กราฟของ IS monoC19	น้ำหนักของ monoC19 (mg)	ความเข้มข้นของ SMG (wt%)	ความเข้มข้น SMG ที่ถูกดูดซับ (wt%)	ความจุการดูดซับ (mg <sub>SMG</sub> /g <sub>silica</sub> )
Silica gel	10	0.2011	19.8001	1.0	111.4	358.8	252.8	0.5020	0.64	0.07	69.3
Silica gel	20	0.2001	19.8002	1.0	111	355.0	263.2	0.5020	0.61	0.10	99.0
Silica gel	30	0.2005	19.8005	1.0	112.1	358.4	263.2	0.5020	0.61	0.10	99.0
Silica gel	40	0.2008	19.8011	1.0	105.7	354.4	290.4	0.5020	0.58	0.13	128.7
Silica gel	50	0.2004	19.8005	1.0	105	348.9	292.8	0.5020	0.57	0.14	138.6
Silica gel	10	0.4002	19.6004	2.0	103	286.1	280.7	0.5020	0.50	0.21	104.4
Silica gel	20	0.4005	19.6013	2.0	107.1	298.3	291.5	0.5020	0.48	0.23	112.7
Silica gel	30	0.4006	19.6032	2.0	108.4	301.7	275.5	0.5020	0.51	0.20	99.3
Silica gel	40	0.4001	19.6020	2.0	108.3	306.8	298.5	0.5020	0.48	0.23	114.4
Silica gel	50	0.4006	19.6005	2.0	107.4	305.2	291.3	0.5020	0.49	0.22	107.8
Silica gel	10	0.6001	19.4013	3.0	108.9	269.9	271.5	0.5020	0.46	0.25	81.4
Silica gel	20	0.6008	19.4006	3.0	106.1	247.6	268.5	0.5020	0.44	0.27	88.4
Silica gel	30	0.6010	19.4020	3.0	106.3	246.5	275.1	0.5020	0.42	0.29	92.6
Silica gel	40	0.6005	19.4030	3.0	113.5	273.9	311.4	0.5020	0.39	0.32	103.7
Silica gel	50	0.6000	19.4017	3.0	104.6	248.7	291.2	0.5020	0.41	0.30	97.0
Silica gel	10	0.8002	19.2001	4.0	115.5	235.5	258.9	0.5020	0.40	0.31	75.5
Silica gel	20	0.8003	19.2020	4.0	103.4	204.2	264.6	0.5020	0.37	0.34	80.5
Silica gel	30	0.8015	19.2035	4.0	110.1	212.4	267.4	0.5020	0.36	0.35	83.3
Silica gel	40	0.8005	19.2042	4.0	107.4	220.3	307	0.5020	0.34	0.37	89.9
Silica gel	50	0.8008	19.2011	4.0	102.8	210.6	321.9	0.5020	0.32	0.39	93.6



ตารางที่ ๖.3 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น SMG ใน B100 ที่เหลือหลังการดูดซับ และความจุการดูดซับจากการทดลองข้อ 3.3.2.5 (ต่อ)

ชนิดตัวดูดซับ	เวลาดูดซับ (นาที)	น้ำหนักตัวดูดซับ (g)	น้ำหนัก B100 (g)	ปริมาณตัวดูดซับ (wt%)	น้ำหนัก B100 เพื่อวิเคราะห์ SMG ที่เหลือ (mg)	พื้นที่ที่กราฟของ SMG	พื้นที่ที่ใช้กราฟของ IS monoC19	น้ำหนักของ IS monoC19 (mg)	ความเข้มข้นของ SMG (wt%)	ความเข้มข้น SMG ที่ถูกดูดซับ (wt%)	ความจุการดูดซับ (mg <sub>SMG</sub> /g <sub>ads</sub> )
Silica gel	10	1.0032	19.0037	5.0	109.9	190.1	256.3	0.5020	0.34	0.37	70.3
Silica gel	20	1.0012	19.0044	5.0	101.7	181.5	263.6	0.5020	0.34	0.37	70.3
Silica gel	30	1.0015	19.0019	5.0	108.9	188.2	271.4	0.5020	0.32	0.39	74.1
Silica gel	40	1.0001	19.0004	5.0	101.6	184.1	284.5	0.5020	0.32	0.39	74.1
Silica gel	50	1.0040	19.0002	5.0	108.0	193.8	312.5	0.5020	0.29	0.42	79.8
MS	10	0.2004	19.8011	1.0	102.4	360.8	300	0.5020	0.59	0.12	119.0
MS	20	0.2005	19.8010	1.0	106	347.7	265.7	0.5020	0.62	0.09	89.1
MS	30	0.2007	19.8002	1.0	104.2	346.5	269.4	0.5020	0.62	0.09	89.1
MS	40	0.2015	19.8013	1.0	107.9	344.8	263.3	0.5020	0.61	0.10	99.0
MS	50	0.2009	19.8007	1.0	104.5	337.6	279.9	0.5020	0.58	0.13	128.7
MS	10	0.4022	19.6002	2.0	103.1	321.8	304.3	0.5020	0.51	0.20	95.1
MS	20	0.4032	19.6022	2.0	114.7	322.6	264	0.5020	0.53	0.18	85.2
MS	30	0.4014	19.6035	2.0	103.1	303	275.4	0.5020	0.54	0.17	85.1
MS	40	0.4005	19.6017	2.0	102.8	277.6	263.9	0.5020	0.51	0.20	96.1
MS	50	0.4011	19.6019	2.0	105.8	280.5	266.5	0.5020	0.50	0.21	102.9
MS	10	0.6020	19.4010	3.0	102	272.5	297	0.5020	0.45	0.26	83.3
MS	20	0.6008	19.4006	3.0	100.6	230.7	262.5	0.5020	0.44	0.27	87.7
MS	30	0.6003	19.4014	3.0	107.3	265.9	265.1	0.5020	0.47	0.24	77.8
MS	40	0.6004	19.4030	3.0	102.6	231.7	262.5	0.5020	0.43	0.28	89.9
MS	50	0.6011	19.4025	3.0	105.8	229.3	265.7	0.5020	0.41	0.30	97.0

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น SMG ใน B100 ที่เหลือหลังการดูดซับ และความจุการดูดซับจากการทดลองข้อ 3.3.2.5 (ต่อ)

ชนิดตัวดูดซับ	เวลาดูดซับ (นาที)	น้ำหนักตัวดูดซับ (g)	น้ำหนัก B100 (g)	ปริมาณตัวดูดซับ (wt%)	น้ำหนัก B100 เพื่อวิเคราะห์ SMG ที่เหลือ (mg)	พื้นที่ใต้กราฟของ SMG	พื้นที่ใต้กราฟของ IS monoC19	น้ำหนักของ IS monoC19 (mg)	ความเข้มข้นของ SMG (wt%)	ความเข้มข้น SMG ที่ถูกดูดซับ (wt%)	ความจุการดูดซับ (mg <sub>SMG</sub> /g <sub>ads</sub> )
MS	10	0.8016	19.2033	4.0	102.7	226.1	293.3	0.5020	0.38	0.33	79.8
MS	20	0.8014	19.2005	4.0	113.6	220.4	273.2	0.5020	0.36	0.35	84.7
MS	30	0.8005	19.2033	4.0	100.9	170.4	267	0.5020	0.32	0.39	94.2
MS	40	0.8002	19.2016	4.0	107.2	205.5	265.7	0.5020	0.36	0.35	83.5
MS	50	0.8007	19.2009	4.0	118.3	207.5	267.2	0.5020	0.33	0.38	91.2
MS	10	1.0012	19.0028	5.0	119.2	240.1	297.8	0.5020	0.34	0.37	70.3
MS	20	1.0020	19.0031	5.0	103.7	166.7	260.9	0.5020	0.31	0.40	76.0
MS	30	1.0014	19.0005	5.0	112.9	155	265.7	0.5020	0.26	0.45	85.5
MS	40	1.0022	19.0011	5.0	105	162.2	268.3	0.5020	0.29	0.42	79.8
MS	50	1.0046	19.0004	5.0	100.3	146.5	263.5	0.5020	0.28	0.43	81.7
NZ-325m	10	0.2014	19.8010	1.0	105.7	440	312	0.5020	0.67	0.04	39.6
NZ-325m	20	0.2023	19.8007	1.0	119.1	517	320.6	0.5020	0.68	0.03	29.7
NZ-325m	30	0.2008	19.8014	1.0	118.4	519.7	314.8	0.5020	0.70	0.01	9.9
NZ-325m	40	0.2019	19.8008	1.0	108.8	502.6	336.2	0.5020	0.69	0.02	19.8
NZ-325m	50	0.2010	19.8003	1.0	103.7	479	346.2	0.5020	0.67	0.04	39.6
NZ-325m	10	0.4002	19.6007	2.0	111.6	530	356.4	0.5020	0.67	0.04	20.1
NZ-325m	20	0.4018	19.6016	2.0	102.1	408.2	303.3	0.5020	0.66	0.05	23.5
NZ-325m	30	0.4017	19.6025	2.0	109.3	481.1	330.7	0.5020	0.67	0.04	20.4
NZ-325m	40	0.4023	19.6012	2.0	108.3	475.3	333.8	0.5020	0.66	0.05	24.4
NZ-325m	50	0.4031	19.6018	2.0	102.5	462.5	343.4	0.5020	0.66	0.05	24.5

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น SMG ใน B100 ที่เหลือหลังการดูดซับ และความจุการดูดซับจากการทดลองข้อ 3.3.2.5 (ต่อ)

ชนิดตัวดูดซับ	เวลาดูดซับ (นาที)	น้ำหนักตัวดูดซับ (g)	น้ำหนัก B100 (g)	ปริมาณตัวดูดซับ (wt%)	น้ำหนัก B100 เพื่อวิเคราะห์ SMG ที่เหลือ (mg)	พื้นที่ผิวกราฟของ SMG	พื้นที่ที่ใช้กราฟของ IS monoC19	น้ำหนักของ IS monoC19 (mg)	ความเข้มข้นของ SMG (wt%)	ความเข้มข้น SMG ที่ถูกดูดซับ (wt%)	ความจุการดูดซับ (mg <sub>SMG</sub> /g <sub>ads</sub> )
NZ-325m	10	0.6010	19.4024	3.0	116.2	489.0	320.8	0.5020	0.66	0.05	16.6
NZ-325m	20	0.6007	19.4008	3.0	110.1	452.0	316.4	0.5020	0.65	0.06	18.9
NZ-325m	30	0.6001	19.4009	3.0	113.3	475.3	322.8	0.5020	0.65	0.06	18.6
NZ-325m	40	0.6002	19.4012	3.0	106.7	440.8	315.9	0.5020	0.66	0.05	17.3
NZ-325m	50	0.6005	19.4037	3.0	105.3	454.4	333.3	0.5020	0.65	0.06	19.4
NZ-325m	10	0.8025	19.2015	4.0	106.8	450.2	326.8	0.5020	0.65	0.06	14.9
NZ-325m	20	0.8034	19.2009	4.0	118.7	486.9	320.1	0.5020	0.64	0.07	15.9
NZ-325m	30	0.8002	19.2005	4.0	107.5	432.7	314.6	0.5020	0.64	0.07	16.2
NZ-325m	40	0.8003	19.2013	4.0	110.6	474.4	335.1	0.5020	0.64	0.07	16.2
NZ-325m	50	0.8008	19.2041	4.0	110.7	499.4	353.9	0.5020	0.64	0.07	16.8
NZ-325m	10	1.0016	19.0037	5.0	118.5	465.5	308.2	0.5020	0.64	0.07	13.3
NZ-325m	20	1.0007	19.0005	5.0	106.2	430.6	323.1	0.5020	0.63	0.08	15.2
NZ-325m	30	1.0018	19.0007	5.0	114.5	453.8	321	0.5020	0.62	0.09	17.1
NZ-325m	40	1.0015	19.0017	5.0	101.6	430	337.3	0.5020	0.63	0.08	15.2
NZ-325m	50	1.0015	19.0011	5.0	106.7	357.0	286.2	0.5020	0.59	0.12	23.4
NZ-325m60C6hr	10	0.2017	19.8002	1.0	115.4	218.9	144.4	0.5020	0.66	0.05	49.6
NZ-325m60C6hr	20	0.2011	19.8009	1.0	121.9	439.7	283.1	0.5020	0.64	0.07	69.3

ตารางที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์ความเข้มข้น SMG ใน B100 ที่เหลือหลังการดูดซับ และความจุการดูดซับจากการทดลองข้อ 3.3.2.5 (ต่อ)

ชนิดตัวดูดซับ	เวลาดูดซับ (นาที)	น้ำหนักตัวดูดซับ (g)	น้ำหนัก B100 (g)	ปริมาณตัวดูดซับ (wt%)	น้ำหนัก B100 เพื่อวิเคราะห์ SMG ที่เหลือ (mg)	พื้นที่ผิวกราฟของ SMG	พื้นที่ผิวกราฟของ IS monoC19	น้ำหนักของ IS monoC19 (mg)	ความเข้มข้นของ SMG (wt%)	ความเข้มข้น SMG ที่ถูกดูดซับ (wt%)	ความจุการดูดซับ (mg <sub>SMG</sub> /g <sub>ads</sub> )
NZ-325m60C6hr	30	0.2005	19.8012	1.0	100.7	362.7	287.1	0.5020	0.63	0.08	79.2
NZ-325m60C6hr	40	0.2008	19.8007	1.0	101.8	366.4	286.9	0.5020	0.63	0.08	79.2
NZ-325m60C6hr	50	0.2015	19.8001	1.0	110.4	393.5	284.3	0.5020	0.63	0.08	79.2
NZ-325m60C6hr	10	1.0017	19.0026	5.0	104.0	325.3	281.7	0.5020	0.56	0.15	28.9
NZ-325m60C6hr	20	1.0033	19.0001	5.0	109.5	315.4	284.1	0.5020	0.51	0.20	38.1
NZ-325m60C6hr	30	1.0026	19.0009	5.0	115.7	342.2	263.3	0.5020	0.56	0.15	27.7
NZ-325m60C6hr	40	1.0009	19.0033	5.0	120.1	340.1	257.2	0.5020	0.55	0.16	29.9
NZ-325m60C6hr	50	1.0011	19.0014	5.0	108.1	308.8	281.2	0.5020	0.51	0.20	38.0



ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการทดสอบ จุดจุดต้นการไหลที่อุณหภูมิต่ำ และจุดไหลเทในน้ำมัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

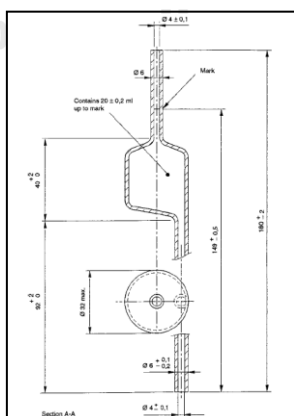
## การทดสอบหาจุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ (Cold Filter Plugging Point, CFPP) ของน้ำมันดีเซล

### 1. เครื่องมือ / อุปกรณ์ ( Instrument / Apparatus )

1.) เครื่องมือทดสอบ (Cold filter plugging point tester) รุ่น FPP 5Gs ยี่ห้อ ISL

มีอุปกรณ์ประกอบดังนี้

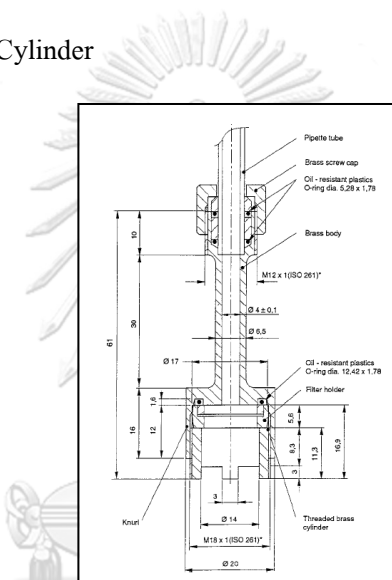
- Test Jar เป็นแก้วใสทรงกระบอก ก้นแบน มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $31.5 \pm 0.5$  mm ผนังด้านข้างหนา  $1.25 \pm 0.25$  mm สูง  $120 \pm 5$  mm. มีขีดระดับที่แสดงปริมาตร  $45 \pm 1$  mL
- Jacket เป็นทรงกระบอกทองเหลือง ก้นแบน มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $45 \pm 0.25$  mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก  $48 \pm 0.25$  mm สูง  $115 \pm 3$  mm
- Insulating Ring ทำจากพลาสติกวางที่ด้านล่างของ Jacket เพื่อเป็นฉนวนให้กับ Test jar
- Spacer มี 2 อัน หนาประมาณ 5 mm ทำจากพลาสติกอยู่ด้านบนของ Test jar เพื่อเป็นฉนวน
- Supporting Ring ทำจากพลาสติกช่วยวาง Jacket ใน cooling bath ให้มีความแข็งแรง
- Stopper ทำจากพลาสติกมี 3 รู สำหรับประกอบ Pipet, thermometer และ ช่องระบายอากาศในกรณีที่ทำเป็นเมื่ออุณหภูมิเกินช่วงใช้งานของ Thermometer
- Pipet กับ Filter Unit: Pipet (รูปที่ ค.1) ทำจากแก้วใสมีขีดระดับมาตรฐานแสดงถึงปริมาตร  $20 \pm 0.2$  mL ที่ความสูง  $149 \pm 0.5$  mm จากด้านล่างสุดของ Pipet



รูปที่ ค.1 Pipet ของเครื่องมือทดสอบจุดอุดตันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ รุ่น FPP 5Gs ยี่ห้อ ISL

➤ Filter Unit ประกอบด้วย

- (1) Brass Body มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $4 \pm 0.1$  mm.
- (2) Brass Screw Cap เป็นชิ้นบนสุดของ Filter Unit ต่อกับส่วนล่างของ Pipet
- (3) Disc มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $15 \pm 0.1$ -mm เป็นตะแกรงเหล็กสแตนเลส ขนาด 45  $\mu\text{m}$ .
- (4) Filter Holder of Brass
- (5) Brass Cylinder



รูปที่ ค.2 Filter Unit ของเครื่องมือทดสอบจุดจุดดันการไหลที่อุณหภูมิต่ำ รุ่น FPP 5Gs ยี่ห้อ ISL

CHULALONGKORN UNIVERSITY

➤ Cooling Bathสามารถทำอุณหภูมิอัตโนมัติเป็นไปตาม ข้อ 8.3.5 ภายใน 2 นาที 30 วินาที

- 2.) Vacuum Pump มีกำลังอย่างน้อย  $15 \pm 1$  L/h และรักษาความดันสุญญากาศได้เท่ากับ  $200 \pm 1$  mm ( $2 \pm 0.05$  kPa) ในช่วงเวลาการทดสอบ
- 3.) Buchner funnel สำหรับกรองในขั้นตอนเตรียมตัวอย่าง
- 4.) Vacuum flask สำหรับกรองในขั้นตอนเตรียมตัวอย่าง
- 5.) Vacuum Pump สำหรับกรองในขั้นตอนเตรียมตัวอย่าง

## 2. วัสดุและสารเคมี

- 1.) Heptane เกรด commercial หรือ เกรด reagent สำหรับทำความสะอาดอุปกรณ์
- 2.) Acetone เกรด commercial หรือ เกรด reagent สำหรับทำความสะอาดอุปกรณ์
- 3.) กระดาษกรองขนาดประมาณ 4 - 6  $\mu\text{m}$

## 3. วิธีการทดสอบ

### 1.) การเตรียมตัวอย่าง (Preparation of sample)

- 1.1.) กรองตัวอย่าง ประมาณ 50 mL. ที่อุณหภูมิห้อง แต่บางกรณีไม่สามารถทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15  $^{\circ}\text{C}$  ผ่านกระดาษกรอง โดยมีการต่อชุดกรองดังรูปที่ค.3



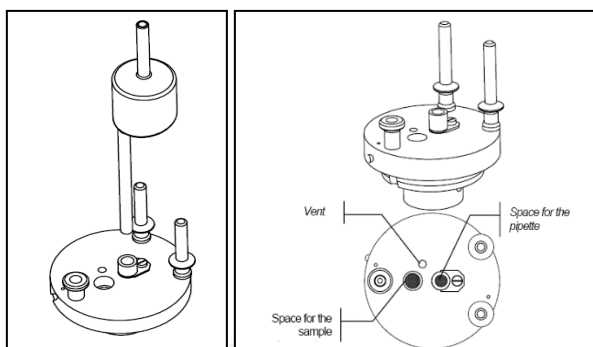
รูปที่ ค.3 การต่อชุดกรองเข้ากับ Vacuum Pump

### 2.) การเตรียมเครื่องมือ (Preparation of apparatus)

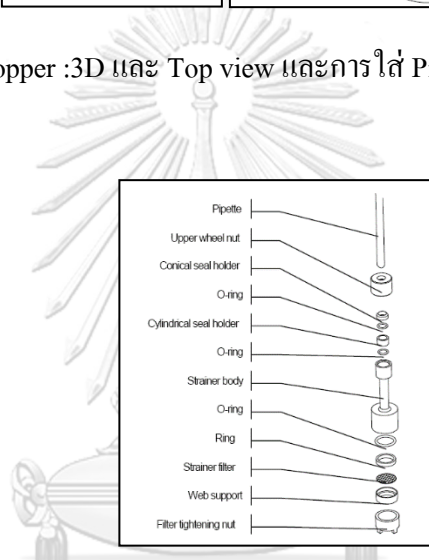
- 2.1.) เตรียมเครื่องมือ Automated CFPP Apparatus ตามที่ผู้ผลิตระบุไว้ในเครื่องมือ รวมทั้งการ calibration, การตรวจสอบ, และการใช้งานเครื่อง
- 2.2.) เปิดเครื่อง เตรียมอุณหภูมิให้กับ Jacket ก่อนการทดสอบ (Jacket Preparation) เป็น  $-34^{\circ}\text{C}$
- 2.3.) ก่อนการทดสอบในแต่ละครั้ง ให้แยกส่วนประกอบ Filter unit ออกจากกันดังรูปที่ค.5 รวมทั้ง Test jar , Pipet และ Platinum resistance ล้างแต่ละชิ้นด้วย Heptane จากนั้น rinse ด้วย Acetone แล้วเป่าให้แห้งด้วย Stream of filtered air ตรวจสอบความสะอาดและความ



แห้งของอุปกรณ์ทุกชิ้น รวมถึง Jacket ตรวจสอบความเสียหายของตะแกรงลวด และข้อต่อ Filter unit ถ้าพบว่ามี ความเสียหายเกิดขึ้นให้เปลี่ยนชิ้นใหม่



รูปที่ ค.4 Stopper :3D และ Top view และการใส่ Pipet เข้ากับ Stopper



รูปที่ ค.5 การประกอบชิ้นส่วนต่างๆของ filter unit

2.4.) ตรวจสอบความแน่นของ Screw cap ในการประกอบ Filter unit กับ Pipet

### 3.) การทดสอบ

3.1.) ตรวจสอบการทำงานของ Cooling bath และการทำอุณหภูมิตามที่ระบุในคู่มือ

3.2.) เทตัวอย่างที่ผ่านการกรองลงใน test jar ในขีดระดับที่กำหนดไว้ (45 mL.)

3.3.) ปิด Test jar ด้วย Stopper ที่ประกอบกับ Pipet และ filter unit และ Platinum resistance Thermometer ปรับตำแหน่ง Filter unit อยู่ที่ก้นของ Test jar และวาง Thermometer เหนือตำแหน่งล่างสุดของ Test jar  $1.5 \pm 0.2$  mm ระวังมิให้ Thermometer สัมผัสที่ด้านข้าง Test jar หรือสัมผัสกับ Filter unit

3.4.) ต่อ pipet เข้ากับ vacuum system โดยมีอัตรา air flow rate เท่ากับ 15 L/h หรือมีค่าความดันแสดงเท่ากับ  $2 \pm 0.05$  kPa.

3.5.) กดปุ่ม start อย่างรวดเร็วหลังจากที่ได้ส่วนประกอบทั้งหมดของ test jar ในกรณีที่ทราบค่า cloud point สามารถตั้งค่าในการเริ่มทำความเย็น โดยสูงกว่าจุด cloud point ไม่น้อยกว่า  $5^{\circ}\text{C}$  เครื่องมือจะดำเนินการตามวิธีทดสอบ ซึ่งมีการกรองตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิลดลงทุก  $1^{\circ}\text{C}$  ถ้าใช้เวลาเกิน 60 วินาทีในการไหลของตัวอย่าง 20 mL จะหยุดทดสอบในครั้งแรก และจะทำซ้ำโดย เริ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น เครื่องมือจะบันทึกค่าอุณหภูมิแรกที่กรองไม่ผ่านในปริมาตร 20 mL และใช้เวลาไม่น้อยกว่า 60 วินาที หรือตัวอย่างไม่สามารถผ่าน กลับมายัง test jar ได้ รายงานเป็นค่า CFPP การทดสอบจะไม่ทำงานต่อเนื่องถ้าตัวอย่างมีอุณหภูมิต่ำจนถึง  $-51^{\circ}\text{C}$  แล้วไม่เกิดการอุดตัน ในระหว่างการทดสอบอุณหภูมิของ Cooling bath จะเปลี่ยนแปลงในอัตโนมัติ ดังที่แสดงตามข้างล่าง

	Bath Temperature
Start of test	$-34 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$
When (if) specimen reaches $-20^{\circ}\text{C}$	$-51 \pm 1^{\circ}\text{C}$
When (if) specimen reaches $-35^{\circ}\text{C}$	$-67 \pm 2^{\circ}\text{C}$

3.6.) บันทึกผลการทดสอบลงในแบบบันทึกผล

## วิธีการทดสอบหาค่าจุดไหลเท (Pour point) ของ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม

### เครื่องมือ / อุปกรณ์

- เครื่องมือทดสอบจุดขุ่นและจุดไหลเท รุ่น CPP 5Gs ยี่ห้อ ISL
- โพรบ วัดอุณหภูมิ (Temperature Probe) Class A  $T = 6 (0.15 + 0.002 |T|)$  สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ +70 ถึง  $-80^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของ Test Jar
- Test Jar เป็นแก้วใสทรงกระบอก ก้นแบน มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก  $34 \pm 0.1$  mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $31 \pm 0.3$  mm สูง  $120 \pm 0.5$  mm. หน้า 2.4 mm มีขีดระดับที่แสดงปริมาตรที่ความสูง  $54 \pm 0.5$  mm จากด้านล่างสุด
- Jacket เป็นทรงกระบอกทองเหลือง ก้นแบน สูง  $113 \pm 0.2$  mm มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 45 mm จะถูกทำให้เย็นตาม Cooling profile
- Cooling Circulating Bath สามารถรักษาการทำอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของ Jacket ตามตารางที่ 1 อย่างน้อย  $10^{\circ}\text{C}$
- Cork Disk หน้า  $6 \pm 0.2$  mm สำหรับวางที่ด้านล่างของ Jacket
- Cork Ring จะอยู่ด้านนอกของ Test jar เพื่อป้องกันมิให้สัมผัสกับ Jacket



รูปที่ ค.6 หน้าจอเครื่องมือทดสอบจุดขุ่นและจุดไหลเท รุ่น CPP 5Gs ยี่ห้อ ISL

### วัสดุและสารเคมี

- ตัวทำละลาย สำหรับ ใช้กับ Test jar และ Measuring head เพื่อทำความสะอาดและทำให้แห้งเช่น Hexane

## วิธีการทดสอบ

### การเตรียมตัวอย่าง

น้ำมันตัวอย่างที่มีความหนืดมากๆ ให้อุ่นตัวอย่างกระทั่งเป็นของไหลก่อนที่จะเทตัวอย่างเพื่อการทดสอบ อย่างไรก็ตามไม่ควรให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเกินความจำเป็น และไม่ควรให้ความร้อนแก่ตัวอย่างเกิน 70°C ขณะบรรจุใน Test Jar

### การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.) ต่อ Pour point measuring head เข้ากับเครื่อง เครื่องจะปรับการทำงานเป็นโหมดของ Pour point โดยอัตโนมัติเมื่อเปิดเครื่อง
- 2.) เปิดเครื่อง เมื่อเปิดเครื่องให้กดปุ่มใดๆเพื่อเริ่ม (Press any key to continue) และอุ่นเครื่องเป็นเวลา 30 นาที
- 3.) ใส่ชื่อตัวอย่างน้ำมัน โดยเลือกเมนู Sample แล้วกดใส่ข้อมูลด้วยปุ่มสำหรับเลื่อน Cursor กด insert หรือ delete เมื่อเสร็จกด OK
- 4.) ใส่ชื่อผู้ทดสอบ โดยเลือกเมนู Oper. ด้วยปุ่มสำหรับเลื่อน Cursor กด OK
- 5.) ใส่ค่า Expected pour point
- 6.) ทำความสะอาด Test jar และ measuring head และทำให้แห้งด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม
- 7.) ปรับค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำความเย็นแก่ jackets ดังตารางด้านล่าง

Specimen Temperature, °C	Jacket Temperature, °C
+27 >= ST > +9	0 ± 0.5
+9 >= ST > -6	-18 ± 0.5
-6 >= ST > -24	-33 ± 0.5
-24 >= ST > -42	-51 ± 0.5
-42 >= ST > -58	-69 ± 0.5

Specimen Temperature (°C)	Jacket Temperature (°C)
+27 >= ST > +9	0 ± 0.5
+9 >= ST > -6	-18 ± 0.5
-6 >= ST > -24	-33 ± 0.5
-24 >= ST > -42	-51 ± 0.5
-42 >= ST > -58	-69 ± 0.5

### ขั้นตอนการทดสอบ

- 1.) เทตัวอย่างลงใน test jar จนถึงระดับที่กำหนด
- 2.) ใส่น้ำ Cork ที่กั้น jacket
- 3.) นำ test jar วางลงใน test cell
- 4.) กด Start Now เพื่อเริ่มทดสอบ หลังจากกด (Start Now) จะแสดงสถานะ Running และชื่อตัวอย่าง อุณหภูมิ พร้อมทั้งเวลา วันที่
- 5.) เมื่อเครื่องทำการทดสอบเสร็จเครื่องมือจะแสดงค่า Pour point และเริ่มให้ความร้อนแก่ตัวอย่างอีกครั้ง



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	พีระภักดิ์ ศรีขวัญใจ
วัน เดือน ปี เกิด	22 ธันวาคม 2534
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2557 : วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	55 ซอยบางแค3 ถนนสุขาภิบาล1 แขวงบางแค เขตบางแค กรุงเทพฯ 10160



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY