

การจัดกำมะถันและไนโตรเจนแบบดูดซับของน้ำมันดีเซลโดยใช้ซีโอไลต์วายเป็นแบบแลกเปลี่ยนไอออน  
ในระบบสองขั้นตอน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ADSORPTIVE DESULFURIZATION AND DENITROGENATION OF DIESEL OIL USING ION-  
EXCHANGED Y ZEOLITE IN TWO-STAGE SYSTEM



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดกำมะถันและไนโตรเจนแบบดูดซับของน้ำมันดีเซล โดยใช้ซีโอไลต์ด้วยแบบแลกเปลี่ยนไอออนในระบบสอง ขั้นตอน
โดย	นายบวรชัย เจริญธีรบุรณ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิณชีระนันท์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวนิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิณชีระนันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.บุญญาวัฒน์ อยู่สุข)

บวรชัย เจริญธีรบุรณ์ : การขจัดกำมะถันและไนโตรเจนแบบดูดซับของน้ำมันดีเซลโดยใช้  
ซีโอไลต์วายเป็นแบบแลกเปลี่ยนไอออนในระบบสองขั้นตอน. ( ADSORPTIVE  
DESULFURIZATION AND DENITROGENATION OF DIESEL OIL USING ION-  
EXCHANGED Y ZEOLITE IN TWO-STAGE SYSTEM) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ.  
ดร.นพิตา หิณชี่ระนันท์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ

ในปัจจุบัน หลายประเทศให้ความสำคัญเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมด้านมลพิษทางอากาศเพิ่มมากขึ้น และหนึ่งในปัญหาสำคัญด้านมลพิษทางอากาศ คือ สารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนที่เกิดจากการเผาไหม้้ำมันดีเซลและเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องควบคุมอย่างเข้มงวด การดูดซับเป็นหนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพในการลดระดับของสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันดีเซล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ประสิทธิภาพการดูดซับของวายเป็นซีโอไลต์ที่แลกเปลี่ยนไอออนด้วยโลหะหลายชนิด เช่น Na-Y, Ni-Y, Cu-Y, Co-Y, La-Y, Ce-Y และ Fe-Y ที่มีผลต่อการขจัดสารประกอบกำมะถัน และการขจัดสารประกอบไนโตรเจน ใช้ระบบขั้นตอนเดียวและระบบสองขั้นตอน ภายใต้ภาวะแวดล้อมในระบบคอลัมน์แบบระบบขั้นตอนเดียวโดยซีโอไลต์ La-Y มีประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนที่ดีที่สุดที่น้ำมันจำลองที่ 4 และ ซีโอไลต์ Na-Y มีความสามารถในการดูดซับสารประกอบกำมะถันสูงสุดในน้ำมันจำลองที่ 1 และสำหรับระบบสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกจะบรรจุ La-Y ซีโอไลต์สำหรับการขจัดสารประกอบไนโตรเจน และคอลัมน์ที่สองบรรจุซีโอไลต์ Na-Y สำหรับการขจัดสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลองที่ 4 และพบว่ามีความร้อยละการดูดซับของสารประกอบควิโนลีน อินโดลและอะคริตินเท่ากับ 65.6, 49.2 และ 39.9 ตามลำดับ และร้อยละในการดูดซับของสารประกอบไดเบนโซโทโอพีน (DBT) และ 4,6 ไดเมทิลไดเบนโซโทโอพีน (4,6-DMDBT) คือ 38.8 และ 37.7 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าระบบคอลัมน์แบบสองขั้นตอนโดยใช้ซีโอไลต์ La-Y และ Na-Y เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับสารประกอบกำมะถัน และสารประกอบไนโตรเจนของน้ำมันดีเซล ทั้งนี้ยังสามารถเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับในระบบขั้นตอนเดียว และระบบสองขั้นตอน และนอกจากนี้ยังสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลายในระบบสองขั้นตอน

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6171994223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Adsorptive desulfurization Adsorptive denitrogenation Diesel oil Y-zeolite  
Bowornchai Chareonteraboon : ADSORPTIVE DESULFURIZATION AND  
DENITROGENATION OF DIESEL OIL USING ION-EXCHANGED Y ZEOLITE IN TWO-  
STAGE SYSTEM. Advisor: Assoc. Prof. NAPIDA HINCHIRANAN, Ph.D. Co-advisor:  
Prof. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, Ph.D.

Recently, air pollution becomes a serious concern in an environmental issue. The concentrations of sulfur and nitrogen compounds in diesel are accordingly required to be strictly controlled. Adsorption is one of the effective method to decrease the levels of sulfur and nitrogen compounds in diesel. Therefore, this work focused on the effect of Y-zeolite consisting of various metals such as Na-Y, Ni-Y, Cu-Y, Co-Y, La-Y, Ce-Y and Fe-Y on adsorptive desulfurization and denitrogenation. Under ambient condition, La-Y zeolite exhibited the best adsorption efficiency for nitrogen compounds (model oil 4), while Na-Y zeolite showed the maximum adsorption capacity for sulfur compounds (model oil 1) in a single-stage column system. For the double-stage system, the first stage contained La-Y zeolite for adsorptive denitrogenation and the second stage was loaded with Na-Y zeolite for adsorptive desulfurization. The total adsorption capacity of nitrogen compounds was 65.6%, 49.2% and 39.9% for quinoline, indole and acridine, respectively. Whereas, the total adsorption capacity of sulfur compounds was 38.8% and 37.7% for DBT and 4,6 DMDBT, respectively. The results indicated that the double-stage column system using La-Y and Na-Y zeolites was appropriate route for desulfurization and denitrogenation of diesel oil. And the adsorptive desulfurization and denitrogenation in both single-stage and double-stage system, the escalation in temperature increased the adsorption efficiency. In addition, the La-Y and Na-Y zeolites could be regenerated by the solvent extraction method in the double-stage system for the next adsorption cycle.

Field of Study:	Chemical Technology	Student's Signature .....
Academic Year:	2019	Advisor's Signature .....
		Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ธิญชีระนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้แนะนำให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหาและมอบโอกาสในการทำงานวิจัย และขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านใน ภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ออกคิด ความรู้และคำแนะนำต่างๆ

งานวิจัยเรื่อง "การขจัดกำมะถันและไนโตรเจนแบบดูดซับของน้ำมันดีเซลโดยใช้ซีโอไลต์ด้วย แบบแลกเปลี่ยนไอออนในระบบสองขั้นตอน" สามารถสำเร็จลุล่วงได้จากการได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่สนับสนุนค่าเล่าเรียน และทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.บุญญา วัฒน์ อยู่สุข กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่สละเวลาให้คำแนะนำ ให้ความคิดเห็นและให้ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ในการปรับแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จตามเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคและศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุ แห่งชาติที่ได้ให้ความสนับสนุน และความอนุเคราะห์ด้านเครื่องมือวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ อีกทั้งขอขอบคุณรุ่นพี่ และเพื่อนๆ ที่ให้คำปรึกษา และข้อชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่าง การทำงานวิจัยให้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ คอยให้คำแนะนำและให้การ สนับสนุนในเรื่องต่างๆ ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

บวรชัย เจริญธีรบูรณ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูป .....	6
บทที่ 1 บทนำ .....	9
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	9
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย .....	10
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	11
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม.....	12
2.2 มาตรฐานน้ำมัน .....	15
2.3 สมบัติและองค์ประกอบน้ำมันดีเซล .....	17
2.4 สารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันเชื้อเพลิง .....	20
2.4.1 สารประกอบกำมะถัน .....	20
2.4.2 สารประกอบไนโตรเจน .....	25
2.5 การขจัดสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนด้วยวิธีการดูดซับ .....	27
2.6 ตัวดูดซับซีโอไลต์ (Zeolite).....	30
2.7 กระบวนการคืนสภาพของตัวดูดซับ.....	34

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....	38
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์.....	39
3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง.....	40
3.3.1 การเตรียมน้ำมันจำลอง.....	40
3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับ.....	41
3.3.3 การทดลองการดูดซับและการวิเคราะห์น้ำมันแบบเบดนิ่งเดี่ยว .....	41
3.3.4 ระบบการดูดซับแบบเบดนิ่งแบบ 2 คอลัมน์ .....	43
3.3.5 การศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่.....	44
3.4 การวิเคราะห์.....	46
3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติตัวดูดซับ .....	46
3.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำมัน.....	47
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	48
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ .....	48
4.1.1 เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดย X-ray fluorescence spectroscopy (XRF).....	48
4.1.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD).....	50
4.1.3 เทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับโดย N <sub>2</sub> physisorption measurement ..	53
4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับในระดับจุลภาค (Scanning electron microscopy, SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX).....	55
4.1.5 การวิเคราะห์โดยเทคนิคการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารด้วยแสงอินฟราเรด (Fourier transform infrared Spectroscopy, FT-IR) .....	57
4.2 การดูดซับสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในระบบการดูดซับแบบขั้นตอนเดี่ยว.....	60



4.2.1	ผลของขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบกำมะถัน .....	61
4.2.2	การจัดสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับในน้ำมันจำลอง 1 .....	63
4.2.3	การจัดสารประกอบไนโตรเจนของตัวดูดซับในน้ำมันจำลอง 2 .....	66
4.2.4	การจัดสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนของตัวดูดซับในน้ำมันจำลอง 3.....	69
4.2.5	ผลของสารประกอบแอร์เมติกต่อการจัดสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนของตัวดูดซับในน้ำมันจำลอง 4.....	74
4.2.6	การเปลี่ยนแปลงค่าความจุเบรคทรูของสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนในน้ำมันจำลองต่างๆ .....	79
4.3	การดูดซับสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในระบบการดูดซับแบบสองขั้นตอน.....	82
4.3.1	ระบบสองขั้นตอน.....	82
4.3.2	การเปรียบเทียบระบบขั้นตอนเดียวและระบบสองขั้นตอน .....	83
4.4	ผลของอุณหภูมิของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบต่างๆ.....	87
4.4.1	ระบบขั้นตอนเดียว .....	87
4.4.2	ระบบสองขั้นตอน.....	90
4.5	การคืนสภาพตัวดูดซับด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction regeneration) .....	93
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	95
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	95
5.1.1	การจัดกำมะถันและไนโตรเจนด้วยการดูดซับด้วยระบบขั้นตอนเดียว .....	95
5.1.2	การดูดซับสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในระบบการดูดซับแบบสองขั้นตอน .....	95
5.1.3	ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถของการจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันในระบบขั้นตอนเดียวและระบบสองขั้นตอน.....	96
5.1.4	การคืนสภาพตัวดูดซับด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction regeneration) .....	96

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	96
บรรณานุกรม.....	97
ภาคผนวก ก.....	102
ก.1 ตัวอย่างการเตรียมตัวดูดซับ La-Y ซีโอไลต์ ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน.....	102
ก.2 การเตรียมน้ำมันจำลอง .....	102
ก.3 การคำนวณปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF (ข้อมูลการวิเคราะห์อยู่ในภาคผนวก จ) .....	107
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สารประกอบแอโรแมติก ไนโตรเจน และกำมะถันในน้ำมันจำลอง.....	108
ข.1 เส้นเทียบมาตรฐานของสารประกอบในน้ำมันจำลอง .....	109
ข.2 การคำนวณความจุการดูดซับจากเส้นโค้งเบรคทรู .....	110
ข.3 การคำนวณการคายซับ.....	112
ข.4 การคำนวณความจุการดูดซับในคอลัมน์ที่สองในระบบสองขั้นตอน.....	114
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบจากการทดลองดูดซับ .....	115
ภาคผนวก ฉ.....	130
ฉ.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติในการเผาตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y .....	130
ประวัติผู้เขียน.....	131

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์จากหอกลิ้นน้ำมันดิบ และการใช้ประโยชน์ [2].....	14
ตารางที่ 2.3 มาตรฐานน้ำมันเบนซิน (EN 288) [3].....	16
ตารางที่ 2.4 มาตรฐานน้ำมันดีเซล (EN 590) [3].....	16
ตารางที่ 2.5 ปริมาณอะตอมขององค์ประกอบทั้งหมดในน้ำมันดีเซลบริสุทธิ์ (Neat diesel) [4].....	17
ตารางที่ 2.6 มาตรฐาน SRM 2724b สารประกอบกำมะถันมาตรฐานในน้ำมันดีเซลที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC x AED [8].....	22
ตารางที่ 2.7 กลุ่มของสารประกอบกำมะถันในน้ำมันดีเซล [6].....	24
ตารางที่ 2.8 ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [13].....	29
ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำมันจำลอง.....	40
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRF .....	48
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิว BET และปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ .....	54
ตารางที่ 4.3 FTIR spectra ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงการสั่นหลังดูดซับในช่วงเลขคลื่น 1200-1600 $\text{cm}^{-1}$ .....	59
ตารางที่ 4.4 ความจุเบรคทูลและความจุทั้งหมดของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ขนาดอนุภาคต่างๆ ในการดูดซับกำมะถันในน้ำมันจำลอง 1 อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการการเก็บตัวอย่าง 2 มิลลิลิตรต่อครั้ง (เวลา 312 นาที).....	62
ตารางที่ 4.5 ร้อยละการดูดซับเบรคทูลและร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลอง 1 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการเก็บตัวอย่าง 2 นาทีต่อครั้ง (เวลา 312 นาที).....	65
ตารางที่ 4.6 ร้อยละการดูดซับเบรคทูลและร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันจำลอง 2 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการเก็บตัวอย่าง 2 นาทีต่อครั้ง (เวลา 312 นาที).....	68

ตารางที่ 4.7 ร้อยละการดูดซับเบรคทลูและร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจน ในน้ำมันจำลอง 3 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการเก็บตัวอย่าง 2 นาทีต่อครั้ง (เวลา 312 นาที) .....	72
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบร้อยละการดูดซับทั้งหมดของสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันจำลอง 4 ของตัวดูดซับต่างๆ .....	74
ตารางที่ 4.9 ร้อยละการดูดซับเบรคทลูและร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบกำมะถัน ไนโตรเจนและแอมโมเนียในน้ำมันจำลอง 4 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการเก็บตัวอย่าง 2 นาทีต่อครั้ง (เวลา 312 นาที).....	77
ตารางที่ 4.10 ร้อยละการลดลงของค่าความจุเบรคทลูของสารประกอบกำมะถัน (DBT และ 4,6-DMDBT) และไนโตรเจน (ควิโนลีน, อินโดว และ อะคริตีน) จากน้ำมันจำลอง 3 และ 4 เทียบกับน้ำมันจำลอง 1 และ 2 .....	80
ตารางที่ 4.11 แสดงความจุเบรคทลูและความจุทั้งหมดของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y และ La-Y ร่วมกับ Ni-Y ในระบบสองขั้นตอนและระบบหนึ่งขั้นตอน โดยดูดซับสารประกอบต่างๆ ในน้ำมันจำลอง 4 (ภาวะ: อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเวลา 312 นาที).....	86
ตารางที่ 4.12 ความจุเบรคทลูและความจุทั้งหมดของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ในการดูดซับสารประกอบต่างๆ ในน้ำมันจำลอง 4 (ภาวะ: อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส อัตราการเก็บตัวอย่าง 2 มิลลิลิตรต่อครั้ง และเวลา 312 นาที) .....	89
ตารางที่ 4.13 ความจุเบรคทลูและความจุทั้งหมดของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y ในระบบสองขั้นตอนโดยดูดซับสารประกอบต่างๆ ในน้ำมันจำลอง 4 (ภาวะ: อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส และเวลาทั้งหมด 312 นาที).....	92
ตารางที่ 4.14 ความจุทั้งหมด ร้อยละของสารคายซับและประสิทธิภาพการคืนสภาพจากการคืนสภาพตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y ในระบบสองขั้นตอน ด้วยตัวทำละลายโทลูอีนที่อัตราการไหลของตัวทำละลาย 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส .....	94
ตารางที่ ข1 ข้อมูลของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น Agilent Technologies รุ่น 7890B.....	108
ตารางที่ ค1 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 1 ที่ศึกษาขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ Na-Y ที่ส่งผลต่อการดูดซับ อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างที่ทุก 2 นาที .....	115





ตารางที่ ค21 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 4 ของตัวดูดซับ La-Y (คอลัมน์ที่ 1) และ Na-Y (คอลัมน์ที่ 2) ด้วยระบบดูดซับสองชั้นตอน อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม (อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส)..... 129



## สารบัญรูป

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 การจำแนกสารประกอบกำมะถันในน้ำมันแต่ละประเภทในกระบวนการจัดสารประกอบกำมะถันด้วยไฮโดรเจน [7].....	21
รูปที่ 2.2 โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลที่มีสารประกอบกำมะถันต่ำที่ความเข้มข้น 443 ppm ด้วย GC x AED [8].....	23
รูปที่ 2.3 โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลที่มีสารประกอบกำมะถันสูงที่ความเข้มข้น 2284 ppm ด้วย GC x AED [8].....	23
รูปที่ 2.4 สารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบส (Basic nitrogen compound) และสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง (Neutral nitrogen compound) [10] .....	25
รูปที่ 2.5 โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบบ 2 มิติ A) น้ำมันดีเซลที่ได้จากน้ำมันแก๊สออยล์ (Light gas oil) และ B) น้ำมันดีเซลที่ได้จากดีเซลกลั่นตรง (Straight-run diesel) .....	26
รูปที่ 2.6 การดูดซับสารประกอบกำมะถัน (ก) การดูดซับโดยตรง (ข) การดูดซับเชิงซ้อนแบบพาย ( $\pi$ ) .....	29
รูปที่ 2.7 การดูดซับสารประกอบไนโตรเจน ก) การดูดซับเชิงซ้อนแบบพาย ( $\pi$ ) ข) การดูดซับโดยตรง .....	30
รูปที่ 2.8 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยเล็กๆ (sub unit) ของซีโอไลต์ในหน่วยโครงสร้างแบบปฐุมภูมิ [19].....	32
รูปที่ 2.9 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิในโครงสร้างของซีโอไลต์ (a) single four ring (S4R), (b) single six ring (S6R), (c) single eight ring (S8R), (d) double four ring (D4R), (e) double eight ring (D8R). (f) complex 4-1, (g) complex 5-1 และ (h) complex 4-4-1 [19] .....	32
รูปที่ 2.10 หน่วยโครงสร้างของรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์ [19].....	33
รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดโครงสร้างของซีโอไลต์ของผลึกในแบบต่างๆ [19] .....	33
รูปที่ 3.1 แก๊สโครมาโทกราฟี Agilent Technologies Model 7890B .....	39
รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบการดูดซับแบบเบตนิ่ง .....	42



รูปที่ 3.3 แผนภาพระบบการดูดซับแบบเบตต์นึ่งแบบ 2 คอลัมน์.....	44
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับต่างๆ ด้วยเทคนิค XRD.....	51
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับ La-Y และ Ce-Y เปรียบเทียบกับ Na-Y ด้วยเทคนิค XRD.....	51
รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับซีโอไลต์ Fe-Y ที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆ ด้วยเทคนิค XRD.....	52
รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวัดปริมาณโลหะด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ของตัวดูดซับซีโอไลต์วายเป็นชนิดต่างๆ.....	55
รูปที่ 4.5 FTIR spectra ของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ก่อนดูดซับและหลังดูดซับในช่วงเลขคลื่น A) 1250-1500 $\text{cm}^{-1}$ , B) 700-800 $\text{cm}^{-1}$ .....	58
รูปที่ 4.6 FTIR spectra ของ A) 4,6 ไตเมทิลไดเบนโซโทโอฟิน และ B) ไดเบนโซโทโอฟิน.....	58
รูปที่ 4.7 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ได้จากการดูดซับสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลอง 1.....	61
รูปที่ 4.8 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงการดูดซับสารประกอบกำมะถันของซีโอไลต์ A) Na-Y, La-Y และ Ce-Y A') Ni-Y, Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) ในน้ำมันจำลองที่ 1.....	64
รูปที่ 4.9 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนของซีโอไลต์ A) Na-Y, Ni-Y, La-Y และ Ce-Y A') Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) ในน้ำมันจำลองที่ 2.....	67
รูปที่ 4.10 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงการดูดซับสารประกอบในน้ำมันจำลองที่ 3 ของซีโอไลต์ : .....	71
รูปที่ 4.11 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงการดูดซับสารประกอบในน้ำมันจำลองที่ 4 ของซีโอไลต์ : .....	75
รูปที่ 4.12 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y เปรียบเทียบกับตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Ni-Y ในระบบสองขั้นตอน โดยแสดงการดูดซับของ A) สารประกอบกำมะถัน B) สารประกอบไนโตรเจน และ C) สารประกอบแอมโรแมติก ในน้ำมันจำลองที่ 4.....	84
รูปที่ 4.13 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y ในระบบสองขั้นตอน เปรียบเทียบกับตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y และ Na-Y ในระบบขั้นตอนเดียว โดยแสดงการดูดซับของ A) สารประกอบกำมะถัน B) สารประกอบไนโตรเจน และ C) สารประกอบแอมโรแมติก ในน้ำมันจำลองที่ 4.....	85

- รูปที่ 4.14 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ที่อุณหภูมิดูดซับที่ต่างกัน แสดงการดูดซับของ A) สารประกอบกำมะถัน B) สารประกอบไนโตรเจน และ C) สารประกอบแอมโรแมติก ในน้ำมัน จำลองที่ 4 ..... 88
- รูปที่ 4.15 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y ในระบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิดูดซับที่ต่างกัน แสดงการดูดซับของ A) สารประกอบกำมะถัน B) สารประกอบไนโตรเจน และ C) สารประกอบแอมโรแมติก ในน้ำมันจำลองที่ 4 ..... 91



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันพบว่าสิ่งแวดล้อมที่เป็นธรรมชาติทั้งภายในประเทศและทั่วโลกมีแนวโน้มถูกทำลายเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากและขยายขอบเขตเป็นวงกว้างมากขึ้น จากการนำวัตถุอันตรายมาแปรรูปและใช้เพื่ออำนวยความสะดวกสบายในการดำรงชีวิตและการพัฒนาคุณภาพชีวิตที่ดีของมนุษย์ ด้วยปัจจัยเหล่านี้ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมหรือปัญหาโลกร้อน และหนึ่งสาเหตุหลักของปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม คือ ปัญหามลพิษทางอากาศ ที่เกิดจากท่อไอเสียที่ปล่อยออกมาจากรถยนต์ทั้งเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล ซึ่งน้ำมันเชื้อเพลิงที่เป็นพลังงานหลักของรถยนต์ปัจจุบันมีองค์ประกอบหลัก คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและสารประกอบอื่น ๆ เช่น กำมะถัน ไนโตรเจน และออกซิเจน โดยเฉพาะการควบคุมสารประกอบกำมะถันในน้ำมันดีเซลที่จะเกิดการเผาไหม้และก่อให้เกิดเป็นสารประกอบกำมะถันออกไซด์ (SO<sub>x</sub>) ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบนิเวศภายนอก อาทิเช่น ฝนกรดนำไปสู่การกัดกร่อน และทำลายสิ่งแวดล้อม ทั้งยังสร้างมลพิษทางอากาศ ทำให้เกิดปัญหาของระบบทางเดินหายใจของสัตว์ และมนุษย์อีกด้วย ทางภาครัฐจึงมีการออกกฎหมายควบคุมปริมาณของสารประกอบกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยมาตรฐานที่ประเทศไทยใช้ในปัจจุบัน คือ มาตรฐานยูโร 4 (Euro IV) ซึ่งควบคุมให้มีปริมาณกำมะถันต่ำกว่า 50 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก (ppm) และในประเทศไทยเริ่มมีการปรับมาตรฐานเป็นมาตรฐานยูโร 5 (Euro V) โดยกำหนดให้มีปริมาณกำมะถันที่ต่ำกว่า 10 ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก (ppm) อย่างไรก็ตามกระบวนการมาตรฐานที่ใช้ในอดีตจนถึงปัจจุบัน คือ กระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน (Hydrodesulfurization process) เป็นกระบวนการที่ใช้ทั้งอุณหภูมิ ความดัน และใช้ไฮโดรเจนในการขจัดสารประกอบกำมะถัน ทำให้มีข้อจำกัดเมื่อต้องมีการปรับปรุงมาตรฐานใหม่จากยูโร 4 (Euro IV) เป็น ยูโร 5 (Euro V) อาทิเช่น การปรับเปลี่ยนขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพิ่มความดัน เพิ่มอุณหภูมิ และเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้ในกระบวนการ จากข้อจำกัดเหล่านี้เป็นอุปสรรคต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการขจัดสารประกอบกำมะถันรูปแบบอนุพันธ์ไทโอพีนที่มีปริมาณสูงในน้ำมันดีเซล ทำให้เกิดการคิดค้นหากระบวนการใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการขจัดสารประกอบกำมะถันในน้ำมันดีเซล กระบวนการใหม่นี้มีนิยามศึกษาอย่างมากในปัจจุบัน คือ กระบวนการดูดซับกำมะถัน (Adsorptive desulfurization process) เนื่องจากไม่มีการใช้ไฮโดรเจนในกระบวนการ โดยใช้ภาวะในการดูดซับที่อุณหภูมิห้องและ

ความดันบรรยากาศ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับสารประกอบกำมะถันรูปแบบอนุพันธ์ไทโอพีน แต่ยังมีอุปสรรคอีกรูปแบบหนึ่ง คือ สารประกอบชนิดอื่นๆ เช่น สารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบแอโรแมติก ที่มีผลต่อการลดประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับสารประกอบกำมะถัน โดยสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบแอโรแมติกนั้นจะเกิดการแข่งขันกับสารประกอบกำมะถันในการดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบกำมะถันลดลง งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการดูดซับของสารประกอบไนโตรเจนกับสารประกอบกำมะถัน โดยเริ่มจากการศึกษาการดูดซับของวายเป็นไอโกลด์ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะชนิดต่าง ๆ เพื่อค้นหาตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจน และตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบกำมะถัน ในระบบแบบขั้นตอนเดียว เมื่อค้นพบตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนแล้ว ศึกษาต่อไปถึงทำการดูดซับในระบบสองขั้นตอนโดยการบรรจุตัวดูดซับวายเป็นไอโกลด์ที่มีประสิทธิภาพดูดซับสารประกอบไนโตรเจนในคอลัมน์แรกและการบรรจุตัวดูดซับวายเป็นไอโกลด์ที่มีประสิทธิภาพดูดซับสารประกอบกำมะถันในคอลัมน์ที่สอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดสารประกอบกำมะถันและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำมันจริง รวมทั้งการศึกษาคืนสภาพของตัวดูดซับด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย เพื่อนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ให้มีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกับตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เพื่อมุ่งเน้นการพัฒนากระบวนการดูดซับให้สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมโดยการพัฒนาไปสู่กระบวนการระดับใหญ่ (Scale-up)

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาการขจัดสารประกอบไนโตรเจนร่วมกับสารประกอบกำมะถันด้วยตัวดูดซับวายเป็นไอโกลด์แบบแลกเปลี่ยนไอออนชนิดต่าง ๆ และผลของสารประกอบแอโรแมติกที่ส่งผลต่อการขจัดสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจน
2. ศึกษาการขจัดสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนด้วยตัวดูดซับวายเป็นไอโกลด์ในระบบสองขั้นตอน
3. ศึกษาการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการคืนสภาพโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิงโดยการดูดซับด้วยระบบดูดซับแบบเบดนิ่ง (Fixed-bed adsorption) ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ โดยใช้อัตราการไหลน้ำมัน 1 มิลลิลิตรต่อนาที และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับแบบแลกเปลี่ยนไอออนโลหะชนิดต่าง ๆ
2. ศึกษาการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันในระบบสองขั้นตอน (Two-stage system) ด้วยตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุดที่อุณหภูมิต่างๆ (30, 40, 50 องศาเซลเซียส) และความดันบรรยากาศ โดยใช้อัตราการไหลน้ำมัน 1 มิลลิลิตรต่อนาที
3. ศึกษาผลของสารประกอบแอมโมเนียต่อการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันในน้ำมันดีเซล
4. ศึกษาการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการคืนสภาพโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ตัวดูดซับวายซีโอไลต์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการดูดซับในการขจัดสารประกอบไนโตรเจน และสารประกอบกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยเทคนิคการดูดซับด้วยระบบสองขั้นตอนที่เหมาะสม และการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยเทคนิคการสกัดด้วยตัวทำละลาย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ผลិតภัณฑ์ปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม คือ สารที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เป็นสารผสมของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ที่มีความซับซ้อน ทั้งที่อยู่ในสภาพของแข็ง ของเหลว และแก๊ส หรือทั้งสามสภาพปะปนกัน แต่เมื่อต้องการจะแยกประเภทเป็นปิโตรเลียมชนิดต่างๆ จะใช้คำว่า น้ำมันดิบ (Crude oil) แก๊สธรรมชาติ (Natural gas) และแก๊สธรรมชาติเหลว (Condensate) โดยปกติน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติมักจะเกิดร่วมกันในแหล่งปิโตรเลียม แต่บางแหล่งอาจมีเฉพาะน้ำมันดิบ และบางแหล่งอาจมีเฉพาะแก๊สธรรมชาติ โดยน้ำมันดิบหรือปิโตรเลียมส่วนมากมีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาล มีสมบัติแตกต่างกันตามแหล่งที่พบ บางแหล่งมีไขมัน บางแหล่งมียางมะตอยมาก ส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 85-90 ไฮโดรเจนร้อยละ 10-15 กำมะถันร้อยละ 0.001-7 และออกซิเจนร้อยละ 0.001-5 นอกนั้นเป็นไนโตรเจนและโลหะอื่น ๆ เมื่อนำน้ำมันดิบมาใช้ประโยชน์จะต้องนำน้ำมันดิบไปผ่านกระบวนการแยกสารหรือกระบวนการกลั่นลำดับส่วน (Refining process) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมซึ่งแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 [1]

1. แก๊สปิโตรเลียมเหลว หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แก๊สหุงต้ม เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ และการกลั่นส่วนบนสุดของหอกลั่นน้ำมันดิบ มีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศโดยประกอบด้วยแก๊สโพรเพน และแก๊สบิวเทน โดยมีส่วนผสมแตกต่างกัน
2. น้ำมันเบนซิน เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนหรือน้ำมันเบนซิน ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนในช่วง 5-12 อะตอม และมีจุดเดือดอยู่ในช่วง 30-200 องศาเซลเซียส ได้จากการกลั่นลำดับส่วน จากนั้นนำไปปรับปรุงคุณภาพและผสมสารประกอบชนิดต่างๆ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด
3. น้ำมันก๊าด ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนในช่วง 12-16 อะตอม และมีจุดเดือดในช่วง 150-300 องศาเซลเซียส นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องใช้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่สะอาด นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้เป็น

ตัวทำละลายสารบางชนิดในการผลิต น้ำมันทำความสะอาด น้ำมันชักเงา และสารกำจัดแมลง

4. น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบิน ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนในช่วง 12-16 อะตอม และมีจุดเดือดอยู่ในช่วง 150-300 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับกับน้ำมันก๊าด แต่น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบินต้องสะอาด บริสุทธิ์และมีสมบัติดีกว่าน้ำมันก๊าด โดยมีการควบคุมคุณภาพเพิ่มเติมให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล เช่น จุดเยือกแข็ง ต้องไม่สูงกว่า -47 องศาเซลเซียส
5. น้ำมันดีเซล ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนในช่วง 16-20 อะตอม และมีจุดเดือดอยู่ในช่วง 150-400 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาใช้งานต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพและการผสมสารประกอบอื่นๆ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด น้ำมันดีเซลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามการเลือกใช้กับความเร็วยรอบของเครื่องยนต์
  1. น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ใช้กับเครื่องยนต์ในการขนส่ง รถบรรทุก
  2. น้ำมันดีเซลหมุนช้า ใช้กับเครื่องยนต์ของเรือสมุทร เรือประมง
6. น้ำมันเตา เป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ส่วนล่างของหอกลิ้น ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนในช่วง 20-70 อะตอม และมีจุดเดือดอยู่ในช่วง 250-400 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาใช้งานต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพ และการผสมสารประกอบอื่นๆ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด
7. น้ำมันหล่อลื่น เป็นผลิตภัณฑ์ที่อยู่ส่วนล่างของหอกลิ้น เช่นเดียวกับน้ำมันเตา แต่ต้องนำมาผ่านกระบวนการกำจัดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก โดยที่น้ำมันหล่อลื่นเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนอยู่ในช่วง 20-50 อะตอม มีจุดเดือด 300 องศาเซลเซียส ขึ้นไป มีลักษณะหนืดและลื่น จึงนำมาใช้เป็นสารเคลือบผิวโลหะของชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่มีการเคลื่อนที่เพื่อลดการเสียดสีและลดการสึกกร่อนของโลหะ ทำให้เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานที่นานมากขึ้น

8. ยางมะตอย เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกากน้ำมัน บริเวณส่วนล่างสุดของหอกลั่นเช่นกัน แต่ต้องผ่านกระบวนการเป่าด้วยอากาศเพื่อลดส่วนระเหยง่ายออกไปและทำให้มีความหนืดมากขึ้น โดยปกติแล้วกระบวนการผลิตยางมะตอย จะต้องใช้น้ำมันดิบที่มีปริมาณของแอสฟัลต์ (Asphalt) ในน้ำมันดิบชนิดนั้นๆ สูงมากพอจึงสามารถผลิตยางมะตอยได้ ยางมะตอยเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนมากกว่า 70 อะตอม มีจุดเดือดสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านการปรับปรุงคุณภาพ จะทำให้ยางมะตอยมีคุณภาพดีขึ้น
9. สารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบยังได้สารประเภทแนฟทา (Naphtha) มีจุดเดือดประมาณ 60-100 องศาเซลเซียส สามารถนำไปใช้ผลิตเป็นเม็ดพลาสติก หรือใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

ตารางที่ 2.1 ผลิตภัณฑ์จากหอกลั่นน้ำมันดิบ และการใช้ประโยชน์ [2]

ผลิตภัณฑ์ที่ได้	จุดเดือด	สถานะ	จำนวน C	การใช้ประโยชน์
แก๊ส	< 30	แก๊ส	1 – 4	ทำสารเคมี วัสดุสังเคราะห์ เชื้อเพลิงแก๊สหุงต้ม
ปิโตรเลียม				
แนฟทาเบา	30 – 110	ของเหลว	5 – 7	น้ำมันเบนซิน ตัวทำละลาย
แนฟทาหนัก	65 – 170	ของเหลว	6 – 12	น้ำมันเบนซิน แนฟทาหนัก
น้ำมันก๊าด	170 – 250	ของเหลว	10 – 19	น้ำมันก๊าด เชื้อเพลิงเครื่องยนต์ไอพ่น และตะเกียง
น้ำมันดีเซล	250 – 340	ของเหลว	14– 19	เชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซล
น้ำมันหล่อลื่น	> 350	ของเหลว	19 – 35	น้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเครื่อง
ไข	> 500	ของแข็ง	> 35	ใช้ทำเทียนไข เครื่องสำอาง ยาขัดมัน ผลิตผงซักฟอก
น้ำมันเตา	> 500	ของเหลวหนืด	> 35	เชื้อเพลิงเครื่องจักร
ยางมะตอย	> 500	ของเหลวหนืด	> 35	ยางมะตอย เป็นของแข็งที่อ่อนตัวและเหนียวหนืด เมื่อถูกความร้อน ใช้เป็นวัสดุกันซึม



## 2.2 มาตรฐานน้ำมัน

ในหลายประเทศมีการออกกฎหมายมาควบคุมองค์ประกอบของสารต่างๆ ในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยเฉพาะองค์ประกอบของสารกำมะถันที่มีมาตรการควบคุมอย่างเข้มงวดและควบคุมองค์ประกอบ ในน้ำมันเชื้อเพลิงให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีกลุ่มประเทศในทวีปยุโรป (EUROPEAN EMISSION STANDARDS) เป็นผู้ริเริ่มให้มีการวางกฎระเบียบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันและ แก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อควบคุมมาตรฐานด้านการใช้เชื้อเพลิงในภาคการขนส่ง ซึ่งเป็นส่วน หนึ่งที่มีการปล่อยมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม ภายใต้มาตรฐานควบคุมการปล่อยมลพิษของยานยนต์ที่ ออกมาจากโรงงานสำหรับขายในภูมิภาคยุโรป อันเป็นที่มาของ มาตรฐานไอเสีย EURO ที่ใช้อยู่ใน ปัจจุบัน โดยเริ่มการควบคุมมาตรฐานยูโร (Euro) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1992 (พ.ศ. 2535) มีการกำหนด มาตรฐานไอเสียยูโร 1 (EURO 1) สำหรับยานพาหนะควบคู่กับมาตรฐานของเชื้อเพลิง เพื่อเป็น มาตรฐานในการผลิตยานพาหนะให้มีประสิทธิภาพในการควบคุมการปล่อยมลพิษและอยู่ในเกณฑ์ที่ มาตรฐานกำหนด และด้านในน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีการควบคุม คือ น้ำมันเบนซินและดีเซล โดยมีการ พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดองค์ประกอบของสารในน้ำมันเชื้อเพลิงที่ก่อให้เกิด มลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อให้ได้คุณภาพตามที่มาตรฐานกำหนด โดยในน้ำมันเบนซินจะเป็นไปตาม มาตรฐาน EN 228 และน้ำมันดีเซลจะเป็นไปตามมาตรฐาน EN 590 ดังตารางที่ 2.2 และ 2.3 ใน น้ำมันดีเซลจะกล่าวเฉพาะมาตรฐานที่กำหนดของสารประกอบกำมะถันและโพลีไซคลิกแอโรแมติก และไฮโดรคาร์บอน ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ดังนี้ [3]

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานน้ำมันเบนซิน (EN 288) [3]

มาตรฐาน น้ำมันเบนซิน	เริ่มบังคับใช้ (ค.ศ.)	ร้อยละโดยปริมาตรของสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอน			กำมะถัน (ppm)
		ไฮโดรคาร์บอน			
		แอโรแมติก	โอเลฟิน	เบนซิน	
Euro 1	1990	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด	N/A
Euro 2	1996	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด	5.0	500
Euro 3	2001	42	18	1.0	150
Euro 4	2006	35	18	1.0	50
Euro 5 (อนาคต)	2009	35	18	1.0	10
Euro 6 (อนาคต)	2015	ยังไม่กำหนด	ยังไม่กำหนด	ยังไม่กำหนด	ยังไม่กำหนด

ตารางที่ 2.3 มาตรฐานน้ำมันดีเซล (EN 590) [3]

มาตรฐาน น้ำมันดีเซล	เริ่มบังคับใช้ (ค.ศ.)	โพลีไซคลิก แอโรแมติก	กำมะถัน (ppm)
		ไฮโดรคาร์บอน PAH (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
Euro 1	1990	ไม่กำหนด	N/A
Euro 2	1996	ไม่กำหนด	500
Euro 3	2001	11	350
Euro 4	2006	11	50
Euro 5 (อนาคต)	2009	11	10
Euro 6 (อนาคต)	2015	ยังไม่กำหนด	ยังไม่กำหนด

### 2.3 สมบัติและองค์ประกอบน้ำมันดีเซล

องค์ประกอบน้ำมันดีเซลส่วนใหญ่ คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ตั้งแต่อะตอมคาร์บอนในโมเลกุล 10 ถึง 22 อะตอม โดยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่ นั้นประกอบไปด้วยสารประกอบพาราฟิน คือ นอร์มัลพาราฟิน ไอโซพาราฟิน และไซโคลพาราฟิน ซึ่งมีถึงร้อยละ 75 และอีกร้อยละ 25 คือ สารประกอบแอโรแมติก เช่น แนฟทาลีน และ แอลคิลเบนซีน แต่เมื่อนำน้ำมันดีเซลมาวิเคราะห์องค์ประกอบสารเคมีในน้ำมันดีเซลพบว่า มีองค์ประกอบสารอื่นๆ ที่ไม่ใช่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนนั้น คือ กำมะถันและไนโตรเจน ดังแสดงในตารางที่ 2.4 โดยกำมะถันและไนโตรเจนอยู่ในรูปแบบโครงสร้างที่รวมตัวกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็น สารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนหรือที่เรียกว่า เฮเทอโรอะตอม (Heteroatom) เช่น ควิโนลีน (Quinoline) อินโดล (Indole) คาร์บาโซล (Carbazole) และ อะคริดีน (Acridine) มีไนโตรเจนเป็นเฮเทอโรอะตอม และ 4,6 ไดเมทิลไดเบนโซไทโอพีน (4,6-DMDBT) มีกำมะถันเป็นเฮเทอโรอะตอม ถึงแม้ว่าจะมีอัตราส่วนน้อยมากเมื่อเทียบกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในโครงสร้าง แต่สารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและการปรับปรุงมาตรฐานน้ำมันดีเซลเป็นอย่างมากตามสัดส่วนและองค์ประกอบที่แตกต่างกันและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพและสมบัติของน้ำมันดีเซลด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2.4 ปริมาณอะตอมขององค์ประกอบทั้งหมดในน้ำมันดีเซลบริสุทธิ์ (Neat diesel) [4]

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
คาร์บอน	85.21
ไฮโดรเจน	14.04
ไนโตรเจน	0.47
กำมะถัน	0.169
ออกซิเจน	0

สมบัติพื้นฐานของน้ำมันดีเซล และสมบัติที่สำคัญที่ควรคำนึงถึงของน้ำมันดีเซล มีดังนี้ [5]

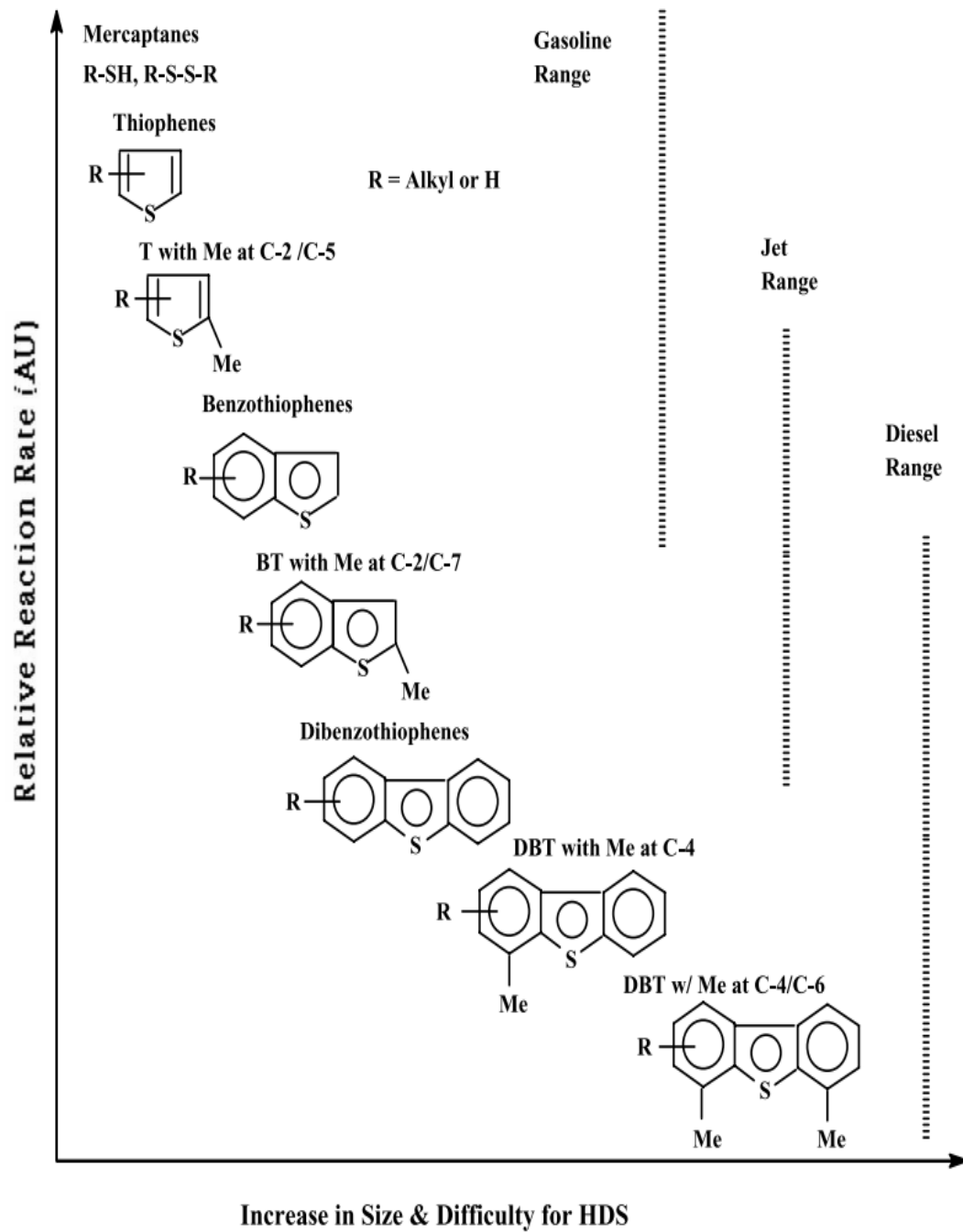
1. การติดไฟ (Ignition quality) การติดไฟของน้ำมันดีเซล นั้นแสดงถึงการติดเครื่องยนต์ได้อย่างรวดเร็วเมื่อเครื่องยนต์มีอุณหภูมิต่ำ เพื่อป้องกันการจุดระเบิดผิดจังหวะในเครื่องยนต์ระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ ค่าการติดไฟ แสดงถึงการมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ และสมบัติต่างๆ ของน้ำมันดีเซล จะแสดงออกมาเป็นค่าดัชนีซีเทนหรือค่าซีเทนัมเบอร์ (Cetane number) ทั่วไปค่าซีเทนัมเบอร์ของน้ำมันดีเซลต้องไม่ต่ำกว่า 47 ถ้าค่าซีเทนัมเบอร์มีมากเกินไปจะเกิดการเผาไหม้ไม่หมดทำให้เกิด เขม่า คว้นดำ แต่ถ้าวค่าซีเทนัมเบอร์น้อยเกินไปจะทำให้เครื่องยนต์ทำงานผิดจังหวะ เนื่องจากน้ำมันมีการจุดระเบิดช้า ทำให้เครื่องยนต์เกิดสะดุดหรือที่เรียกว่าการน็อค
2. ความสะอาด (Cleanliness) เป็นสมบัติที่สำคัญ เนื่องจากน้ำมันดีเซลต้องมีความสะอาดทั้งก่อนและหลังการเผาไหม้ เพราะเมื่อเกิดการเผาไหม้จะมีน้ำ ตะกอน กากถ่าน หรือที่เรียกว่าเขม่า โดยต้องควบคุมให้มีปริมาณน้อยที่สุด เนื่องจากระบบเครื่องยนต์ดีเซลใช้หัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ จึงจำเป็นต้องควบคุมความสะอาดเพื่อป้องกันการอุดตันของหัวฉีด
3. การกระจายเป็นฝอย (Fluidity-atomization) เป็นสมบัติที่สำคัญ สมบัตินี้ขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำมันดีเซล ซึ่งความหนืดที่เหมาะสมจะช่วยให้การกระจายเป็นฝอยอย่างเหมาะสม ในขณะที่หัวฉีดกำลังฉีดน้ำมันในช่วงเริ่มการเผาไหม้ ค่าความหนืดของน้ำมันดีเซลมีผลต่อระบบปั๊มของน้ำมันเชื้อเพลิงเพราะน้ำมันเป็นตัวทำหน้าที่หล่อลื่นลูกสูบปั๊ม (Plunger) ไปในตัวด้วย
4. การระเหยตัว (Volatility) ความสามารถในการระเหยตัวของน้ำมันมีผลต่อจุดเดือด (Boiling point) จุดวาบไฟ (Flash point) และจุดติดไฟ (Fire point) ของน้ำมันดีเซลด้วย ช่วงจุดเดือดของน้ำมันดีเซลทั่วไปมีค่าประมาณ 280-725 องศาฟาเรนไฮต์ (138 - 385 องศาเซลเซียส)
5. เลขซีเทน (Cetane number, CN) เลขซีเทนหรือดัชนีซีเทนเป็นที่ใช้วัดคุณภาพของน้ำมันดีเซลใน ด้านของคุณสมบัติในการติดไฟ เลขซีเทนควรให้สูงพอกับความเร็รรอบเครื่องยนต์ ทำให้การติดเครื่องยนต์ง่าย ไม่เกิดการน็อคในเครื่องยนต์ และเป็นการประหยัดการใช้เชื้อเพลิงด้วย

6. ดัชนีดีเซล (Diesel index; DI) ในการหาเลขซีเทนของน้ำมันดีเซลโดย วิธีเดินเครื่องยนต์ มาตรฐานนั้นทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ในการนี้อาจจะหาเลขซีเทนของน้ำมันดีเซลโดยวิธี ที่ง่ายกว่า แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่มีอยู่แล้ว และค่าที่ได้ก็นับว่า เป็น ค่าที่ใกล้เคียงกับความจริง การทดสอบดังกล่าวมี 3 วิธี คือ
- ดัชนีดีเซล (Diesel index; DI)
  - ค่าคำนวณดัชนีซีเทน (Calculated cetane index; CCI)
  - หาจากโนโมกราฟ (Nomograph)
7. ลักษณะสีของน้ำมันดีเซล ตามปกติน้ำมันดีเซลมีสีชาอ่อน แต่ในบางครั้งน้ำมันดิบจาก แหล่งที่มาต่างกันเมื่อนำไปกลั่นพบว่ามีโอกาสให้สีที่เปลี่ยนไปจากเดิม แต่ประสิทธิภาพการ เผาไหม้ยังคงเหมือนเดิมไม่แตกต่างกัน ดังนั้นสีจึงไม่ได้เป็นตัวสำคัญที่ใช้กำหนดคุณภาพของ น้ำมัน โดยกระทรวงพลังงานได้กำหนดมาตรฐานสีที่มีค่าไม่เกิน 3 ซึ่งเป็นสีคล้ายสีชา และสีของ น้ำมันดีเซลมีโอกาสที่สีจะเข้มขึ้นหากเก็บไว้นาน
8. ปริมาณกำมะถัน (Sulphur content) เป็นสมบัติที่ควบคุมอย่างเข้มงวดในน้ำมันดีเซล เนื่องจากเมื่อสารประกอบกำมะถันในน้ำมันดีเซลเกิดการเผาไหม้กับอากาศเปลี่ยนเป็นก๊าซ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้น ในอากาศกลายเป็นกรดกำมะถัน ทำให้เกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องยนต์ ลักษณะการกัดกร่อนของกำมะถันในน้ำมันมี 2 รูปแบบ รูปแบบแรกจะเกิดการกัดกร่อน ภายหลังการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล เกิดจากก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ไปรวมตัวกับน้ำและ กลายเป็นสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรด และเกิดการกัดกร่อนชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ รูปแบบที่ สอง เกิดจากกำมะถันในน้ำมันดีเซลโดยตรงเมื่อน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันถูกจ่ายเข้า เครื่องยนต์เกิดการกัดกร่อนในชิ้นส่วนระบบหัวฉีดเครื่องยนต์ดีเซล กำมะถันในน้ำมันดีเซลมี มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำมันดิบและกระบวนการกลั่นหรือกระบวนการ กำจัดกำมะถันในน้ำมันดีเซล สารประกอบกำมะถันอยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น ไดซัลไฟด์ (Disulfide) เมอร์แคปแทน (Mercaptan) หรือสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic) เช่น ไดเบนโซไทโอเฟน (Dibenzothiophene)

## 2.4 สารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันเชื้อเพลิง

### 2.4.1 สารประกอบกำมะถัน

ในน้ำมันเชื้อเพลิงยังมีสารประกอบกำมะถันอยู่ด้วยกันหลากหลายรูปแบบดังรูปที่ 2.1 แสดงการจำแนกสารประกอบกำมะถันของน้ำมันแต่ละประเภท ในกระบวนการขจัดสารประกอบกำมะถันด้วยไฮโดรเจน ในน้ำมันดีเซลจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หาข้อมูลปริมาณของสารประกอบกำมะถันและลักษณะโครงสร้างของสารประกอบกำมะถันในน้ำมันดีเซล เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปพัฒนากระบวนการการขจัดสารประกอบกำมะถันให้มีความจำเพาะเจาะจงและมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการวิเคราะห์สารประกอบกำมะถันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบบอะตอมมิคอีมิชชัน (Gas chromatography : atomic emission detection, GC x AED) มาใช้วิเคราะห์ด้วยสารมาตรฐานของสถาบันมาตรฐานและเทคโนโลยี (National Institute of Standards and Technology) ดังตารางที่ 2.5 แสดงมาตรฐาน SRM 2724b สารประกอบกำมะถันมาตรฐานในน้ำมันดีเซลที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC x AED รูปที่ 2.2 แสดงโครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลที่มีสารประกอบกำมะถันต่ำโดยมีความเข้มข้นอยู่ที่ 443 (ส่วนในล้านส่วนโดยน้ำหนัก, ppm) GC x AED และรูปที่ 2.3 แสดงโครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลที่มีสารประกอบกำมะถันสูงโดยมีความเข้มข้นอยู่ที่ 2284 ppm GC x AED เมื่อนำน้ำมันดีเซลที่มีความเข้มข้นปริมาณสารประกอบกำมะถันต่างกันมาทำการวิเคราะห์ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 2.2 และ 2.3 จึงพบว่าสารประกอบกำมะถันมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันในน้ำมันดีเซลและสารแต่ละชนิดที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [6] ดังแสดงในตาราง 2.6 ในปัจจุบันน้ำมันดีเซลที่ใช้งานจริงก็ยังคงมีสารประกอบกำมะถันที่มีโครงสร้างอนุพันธ์ไทโอฟิน เช่น ไตเบนโซไทโอฟิน และ 4,6-ไดเมทิลไตเบนโซไทโอฟิน เป็นองค์ประกอบหลักจึงเป็นสารประกอบกำมะถันที่ยากต่อการขจัดออกจากน้ำมันดีเซล เพราะมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และมีความเสถียรจึงทำให้สารประกอบดังกล่าวยังคงอยู่ในน้ำมันดีเซลแม้จะผ่านกระบวนการไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชันแล้ว

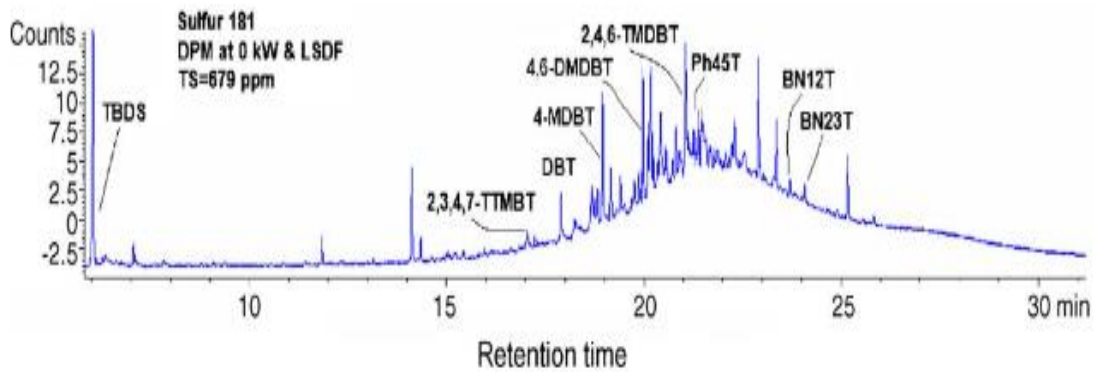


รูปที่ 2.1 การจำแนกสารประกอบกำมะถันในน้ำมันแต่ละประเภทในกระบวนการขจัดสารประกอบกำมะถันด้วยไฮโดรเจน [7]

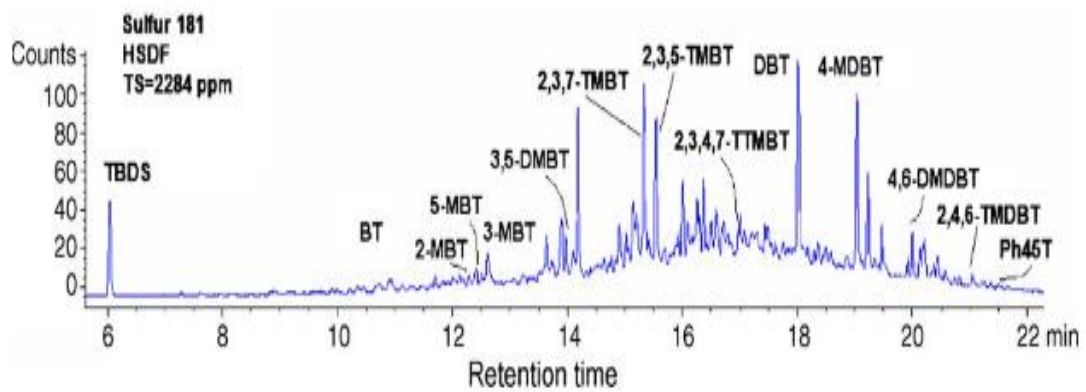
ตารางที่ 2.5 มาตรฐาน SRM 2724b สารประกอบกำมะถันมาตรฐานในน้ำมันดีเซลที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC x AED [8]

No.	Compound	Abbreviation	MW
1	Thiophene	T	84
2	2-Methylthiophene	2-MT	98
3	3-Methylthiophene	3-MT	98
4	2,3-Dimethylthiophene	2,3-DMT	112
5	2,5-Dimethylthiophene	2,5-DMT	112
6	2-Ethylthiophene	2-ET	112
7	2-Propylthiophene	2-PT	126
8	Benzothiophene	BT	134
9	2-Methylbenzothiophene	2-MBT	148
10	3-Methylbenzothiophene	3-MBT	148
11	5-Methylbenzothiophene	5-MBT	148
12	3,5-Dimethylbenzothiophene	3,5-DMBT	162
13	2,3,5-Trimethylbenzothiophene	2,3,5-TMBT	162
14	2,3,7-Trimethylbenzothiophene	2,3,7-TMBT	162
15	2,3,4,7-Tetramethylbenzothiophene	2,3,4,7-TTMBT	176
16	Dibenzothiophene	DBT	184
17	4-Methyldibenzothiophene	4-MDBT	198
18	4,6-Dimethyldibenzothiophene	4,6-DMDBT	212
19	2,4,6-Trimethyldibenzothiophene	2,4,6-TMDBT	226
20	Phenanthro[4,5-bcd]thiophene	Ph45T	208
21	Benzo[b]naphtho[1,2-d]thiophene	BN12T	234
22	Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophene	BN21T	234
23	Benzo[b]naphtho[2,3-d]thiophene	BN23T	234
24	Phenanthro[3,4-b]thiophene	Ph34T	234
25	Benzo[b]phenanthro[9,10-d]thiophene	BPh9,10T	284
26	Diacenaphthothiophene	DiAT	332




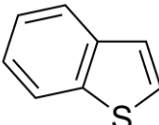
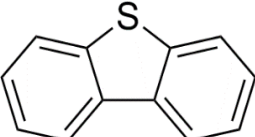


รูปที่ 2.2 โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลที่มีสารประกอบกำมะถันต่ำที่ความเข้มข้น 443 ppm ด้วย GC x AED [8]



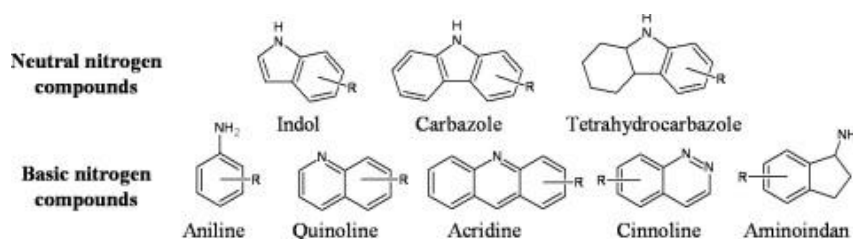
รูปที่ 2.3 โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลที่มีสารประกอบกำมะถันสูงที่ความเข้มข้น 2284 ppm ด้วย GC x AED [8]

ตารางที่ 2.6 กลุ่มของสารประกอบกำมะถันในน้ำมันดีเซล [6]

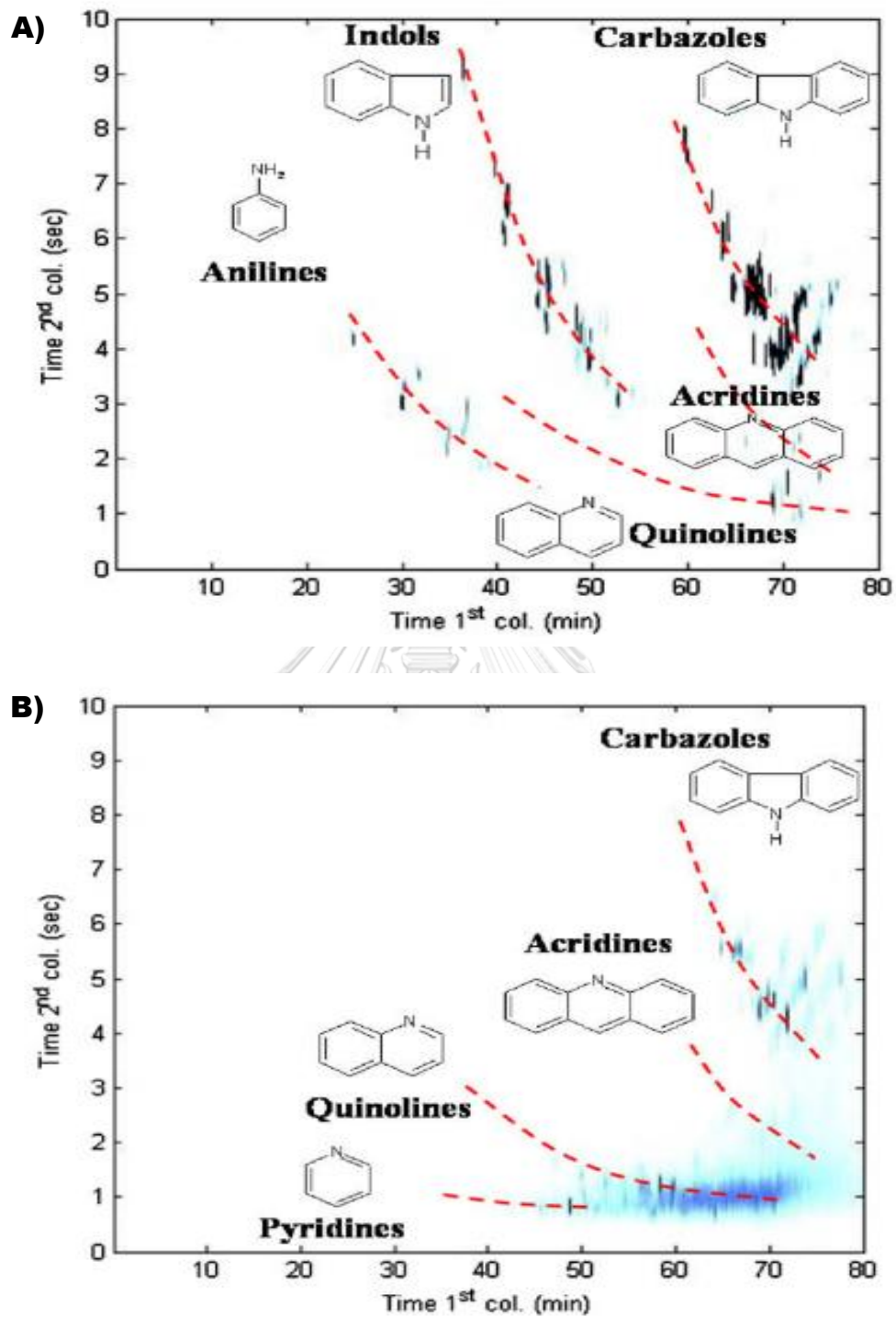
Group	Compound	Kinetic diameter	Structure
1	Thiols		R-S-H
	Sulfides		R-S-R'
	Disulfides	$\geq 5.3 \text{ \AA}$	R-S-S-R'
	Thiophenes, TPs		
2	Benzothiophenes, BTs	$\geq 6 \text{ \AA}$	
3	Dibenzothiophenes, DBTs	$\geq 9 \text{ \AA}$	

### 2.4.2 สารประกอบไนโตรเจน

เนื่องจากในน้ำมันเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของสารประกอบไนโตรเจนอยู่ที่ประมาณร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักและส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างวงแอรอแมติก การมีสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันจะลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและลดประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์เนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนที่ภาวะความดันและอุณหภูมิที่เหมาะสมจะเกิดการจับตัวแล้วรวมตัวกันเป็นก้อนหรือเรียกว่า กัม (Gum) ทำให้เกิดการอุดตันในเครื่องปฏิกรณ์หรือเกิดปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ไม่สามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้ และเมื่อมีการจัดเก็บน้ำมันไว้เป็นเวลานานสารประกอบไนโตรเจนจะลดประสิทธิภาพหรือความเสถียรของน้ำมันลง [9] สารประกอบไนโตรเจนนั้นองค์ประกอบที่แตกต่างกันในน้ำมันดีเซลแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ สารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบส (Basic nitrogen compound) เช่น ควิโนลีน และอะครีดีน กับสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง (Neutral nitrogen compound) เช่น อินโดล และคาร์บาโซล [10] แสดงดังรูปที่ 2.4 จึงต้องทำการวิเคราะห์น้ำมันแต่ละชนิดว่ามีสารประกอบไนโตรเจนตัวไหนและมีปริมาณเท่าไร เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปพัฒนากระบวนการกำจัดสารประกอบไนโตรเจนให้มีความจำเพาะเจาะจงและมีประสิทธิภาพ เช่นเดียวกับสารประกอบกำมะถัน ดังนั้นต้องมีการวิเคราะห์สารประกอบไนโตรเจนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบบวิเคราะห์มวลสาร (Gas chromatography : Mass spectrometer detection, GC x GC MS) จากการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลจากแหล่งที่มาที่ต่างกันเช่น น้ำมันแก๊สออยล์ (Light gas oil) หรือ ดีเซลกลั่นตรง (Straight-run diesel) พบว่ามีสารประกอบไนโตรเจนที่แตกต่างชนิดกันและปริมาณสารประกอบที่ไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 2.5 แสดงโครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบบ 2 มิติ A) น้ำมันดีเซลที่ได้จากน้ำมันแก๊สออยล์ (Light gas oil) และ B) น้ำมันดีเซลที่ได้จากดีเซลกลั่นตรง (Straight-run diesel)



รูปที่ 2.4 สารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบส (Basic nitrogen compound) และสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง (Neutral nitrogen compound) [10]



รูปที่ 2.5 โครมาโตแกรมที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำมันดีเซลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีแบบ 2 มิติ  
 A) น้ำมันดีเซลที่ได้จากน้ำมันแก๊สออยล์ (Light gas oil) และ B) น้ำมันดีเซลที่ได้จากดีเซลกลั่นตรง  
 (Straight-run diesel)

## 2.5 การขจัดสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนด้วยวิธีการดูดซับ

ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันในช่วงแรกของอุตสาหกรรมน้ำมันไม่ค่อยให้ความสนใจในวิธีการขจัดสารประกอบกำมะถันด้วยไฮโดรเจน (Hydrodesulfurization) และกระบวนการขจัดสารประกอบไนโตรเจน (Hydrodenitrogenation) เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีราคาแพง แต่ภายหลังได้มีการปรับปรุงพัฒนากระบวนการขจัดกำมะถันและไนโตรเจนด้วยไฮโดรเจนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และจากการค้นพบน้ำมันดิบที่มีกำมะถันปริมาณมากขึ้นรวมถึงข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณภาพน้ำมันที่เข้มงวดมากขึ้น ทำให้กระบวนการขจัดสารประกอบกำมะถันด้วยไฮโดรเจนเป็นสิ่งจำเป็นในปัจจุบัน จากกระบวนการขจัดสารประกอบกำมะถันจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) และการขจัดสารประกอบไนโตรเจนก็เป็นสิ่งจำเป็นเช่นเดียวกันเนื่องจากสารประกอบไนโตรเจนจะเกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพดังนั้นจึงต้องขจัดสารประกอบไนโตรเจน ในกระบวนการขจัดสารประกอบไนโตรเจนด้วยไฮโดรเจนสารประกอบไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแอมโมเนีย ( $NH_3$ ) ทำให้กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่จำเป็นในการผลิตน้ำมันและปรับปรุงคุณภาพน้ำมันในโรงกลั่นน้ำมัน [11] แต่กระบวนการขจัดสารประกอบกำมะถันด้วยไฮโดรเจนก็ยังมีข้อจำกัดอยู่เนื่องจากกำมะถันในรูปแบบอนุพันธ์ไพโอฟินยังคงเหลืออยู่ในน้ำมันดีเซลในปริมาณมากที่ความเข้มข้นของสารประกอบกำมะถันต่ำๆ [12] จึงเป็นสาเหตุให้ในปัจจุบันมีการคิดค้นกระบวนการขจัดกำมะถันที่ความเข้มข้นต่ำๆ และมีความจำเพาะเจาะจงต่อกำมะถันในรูปแบบอนุพันธ์ไพโอฟินในน้ำมันดีเซล ซึ่งกระบวนการนี้ คือ กระบวนการขจัดกำมะถันด้วยการดูดซับ (Adsorptive desulfurization process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่น่าสนใจ เนื่องจากไม่มีการใช้แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการ ทำการดูดซับที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ [13]

กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) คือ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของตัวดูดซับซึ่งมีพลังงานอิสระที่ผิว (Surface free energy) ที่ต่ำจะเกิดการดูดซับ ในขณะที่ตัวดูดซับที่มีพลังงานอิสระที่พื้นผิวสูงจะไม่เกิดการดูดซับ โดยกระบวนการดูดซับนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างตัวดูดซับ (Adsorbent) และสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ในระบบโดยทั่วไป โดยจะพิจารณาเฉพาะรูปแบบ ของเหลว-ของแข็ง (Liquid–solid interface) ซึ่งลักษณะการดูดซับจะดูดสารแขวนลอยไปติดหรือเกาะที่พื้นผิวของตัวดูดซับ โดยโมเลกุลในสารละลายส่วนใหญ่จะถูกดึงดูดกับพื้นผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและจะมีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ดึงดูดอยู่ที่ผิว

ภายนอกของตัวดูดซับ ลักษณะการถ่ายโอนโมเลกุลจากสารละลายไปหาตัวดูดซับจะเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ จนถึงจุดสมดุลจึงหยุดกระบวนการดูดซับ และที่จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในสารละลายจะเหลือน้อยกว่าเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ไปจับกับตัวดูดซับ โดยลักษณะในการดึงดูดซับนั้น เรียกว่า แรงขับเคลื่อน (Driving Force) แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

#### ประเภทของการดูดซับ

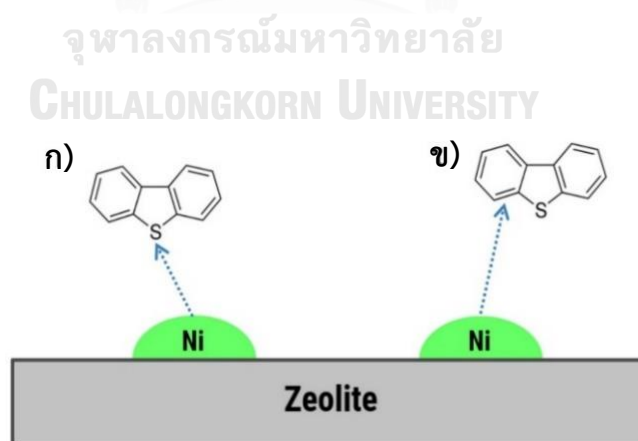
1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) [14] คือ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) โดยการดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 15-20 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งสามารถเกิดการผันกลับของการดูดซับทางกายภาพได้ง่ายจึงเป็นข้อดีในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายและเหมาะสมกับการนำกลับมาใช้ใหม่ และลักษณะตัวถูกดูดซับจับหรือเกาะอยู่รอบๆ ผิวของตัวดูดซับได้ในลักษณะหลายชั้น (Multilayer) และในแต่ละชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลาย [13]
2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption) [14] เป็นกระบวนการดูดซับที่มีพันธะเคมีเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ ทำให้ความแข็งแรงของการดูดซับมากกว่าการดูดซับเชิงกายภาพ โดยการดูดซับเชิงเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าการดูดซับเชิงกายภาพ และมีความร้อนของการเกิดการดูดซับเชิงเคมี 50-400 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งการเกิดพันธะเคมีทำให้ตัวถูกดูดซับจะถูกนำออกจากผิวของตัวดูดซับได้ยาก คือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้เป็น การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่างดังตารางที่ 2.7 [13]

ตารางที่ 2.7 ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [13]

ตัวแปรการดูดซับ	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
2. อุณหภูมิการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนแก๊ส-ของแข็ง	ได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

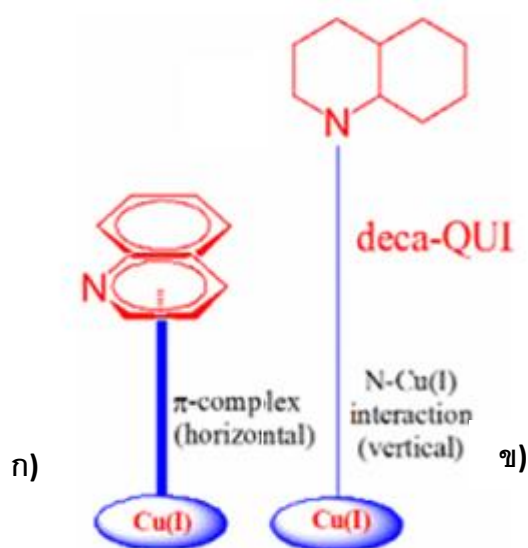
#### การดูดซับสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับ [15]

ลักษณะการดูดซับสารประกอบกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิงมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 2 แบบ ได้แก่ การดูดซับโดยตรง (Direct adsorption) หรือ การดูดซับแบบไฮโดรดีซัลฟูไรเซชันเพอโรเซชัน (Hydrodesulfurization adsorption) เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างกำมะถันอะตอมในสารประกอบกำมะถันกับไอออนของโลหะบนตัวดูดซับ และการดูดซับเชิงซ้อนแบบพาย ( $\pi$ -complexation adsorption) หรือพันธะคูในวงแหวนของสารประกอบกำมะถันกับไอออนโลหะบนตัวดูดซับ ดังรูปที่ 2.6

รูปที่ 2.6 การดูดซับสารประกอบกำมะถัน (ก) การดูดซับโดยตรง (ข) การดูดซับเชิงซ้อนแบบพาย ( $\pi$ )

### การดูดซับสารประกอบไนโตรเจนของตัวดูดซับ [16]

ลักษณะการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันเชื้อเพลิงมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 2 แบบ เช่นเดียวกับสารประกอบกำมะถัน ได้แก่ การดูดซับโดยตรง (Direct adsorption) หรือการดูดซับแบบไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation adsorption) เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างไนโตรเจนอะตอมในสารประกอบไนโตรเจนกับไอออนของโลหะบนตัวดูดซับ และการดูดซับเชิงซ้อนแบบพาย ( $\pi$ -complexation adsorption) หรือพันธะคู่นิวเคลียสของสารประกอบไนโตรเจนกับไอออนโลหะบนตัวดูดซับ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การดูดซับสารประกอบไนโตรเจน ก) การดูดซับเชิงซ้อนแบบพาย ( $\pi$ ) ข) การดูดซับโดยตรง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 2.6 ตัวดูดซับซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ คือ ผลึกที่ประกอบด้วยอะลูมิโนซิลิเกตที่มีน้ำและผลึกของโลหะอัลคาไลน์ หรืออัลคาไลน์เอิร์ท ซึ่งโดยมากมักจะเป็นโลหะหมู่ 1 และหมู่ 2 ได้แก่ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) ลิเทียม (Li) สตรอนเชียม (Sr) และ แบเรียม (Ba) ไปแทรกตัว อยู่ตามช่องว่างในโครงสร้างที่มีลักษณะเป็น 3 มิติของอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{AlO}_4$ ) และซิลิกอนออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{SiO}_4$ ) ซึ่งประกอบกันเป็นอะลูมิโนซิลิเกตโดยการเชื่อมต่อ ของออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุด คือ เป็นโคโพลิเมอร์ (Copolymer) [17]



### โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Crystalline aluminosilicates) [18] เป็นสารที่มีรูพรุนและมีความเป็นผลึก โดยมีสูตรโครงสร้างของซีโอไลต์ทั่วไป คือ  $M_x/n(AlO_2)_x(SiO_2)_y$

เมื่อ  $n$  คือ ประจุของไอออนบวก  $M$

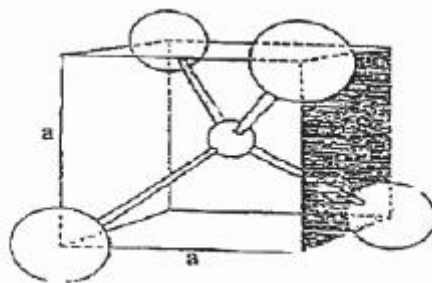
$x+y$  คือ จำนวนหน่วยเตตระฮีดรอลต่อหน่วยเซลล์

$y/x$  คือ อัตราส่วน Si/Al แปรผันได้จาก 1 ถึง  $\infty$

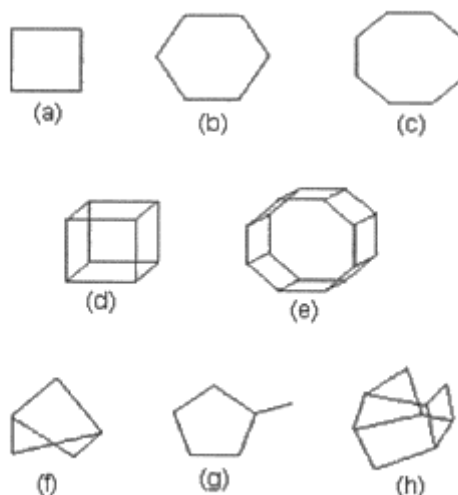
โดยหน่วยย่อยที่ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม ( $[SiO_4]^{4-}$  หรือ  $[AlO_4]^{5-}$ ) จะสร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล และมีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างซีโอไลต์ โดยจะเริ่มจากหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary units) ของซีโอไลต์ คือ รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจน โคออร์ดิเนตกับซิลิกอน ( $SiO_4$ ) หรืออะลูมิเนียม ( $AlO_4$ ) ดังรูปที่ 2.8 และเมื่อหลายหน่วยของ โครงสร้างปฐมภูมิจับตัวกันกลายเป็นหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building units) เกิด เป็นรูปสี่เหลี่ยมต่างๆ เป็นวงเดี่ยว เช่น S4R, S6R หรือต่อเป็นวงคู่ เช่น D4R, D6R ดังรูปที่ 2.9 ตำแหน่งของมุมแทน Si หรือ Al เส้นตรงแทนอะตอมของออกซิเจน และหลังจากนั้นจะประกอบหน่วยโครงสร้างเป็นรูปทรงหลายหน้า (Polyhedral units) เป็นรูปทรงสมมาตรขนาดใหญ่ ซึ่ง เกิดขึ้นจากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นรูปทรงที่สลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้นดังตัวอย่าง ในรูปที่ 2.10 โดยแบ่งเป็นดังนี้

- ทรงเหลี่ยมยี่สิบหกหน้า หรือ  $\alpha$  (Truncated cuboctahedron)
- ทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด หรือ  $\beta$  (Truncated octahedron)
- ทรงเหลี่ยมสิบแปดหน้า หรือ  $\gamma$  (18-hedron)
- ทรงสิบเหลี่ยมเอ็ดหน้า หรือ  $\epsilon$  (11-hedron)

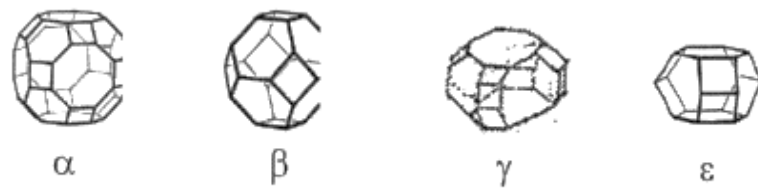
เมื่อหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิทั้งแบบวงเดี่ยวและวงคู่ และหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้ามารวมกันจึงเกิดเป็นโครงสร้างของซีโอไลต์ ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์จะประกอบด้วยโพรง (Cavity) มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-10 อังสตรอมดังรูป 2.11 ตัวอย่างโครงสร้างซีโอไลต์ ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิด Faujasite (FAU) ซึ่งเกิดจากทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด หรือ  $\beta$  (Truncated octahedron type) หรือ 8 cage ที่มีโพรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 อังสตรอม เชื่อมต่อกันด้วยโครงสร้างทุติยภูมิ double six ring (D6R) เป็นโครงสร้างทรงลูกบาศก์ (Cubic structure) ทำให้เกิดโพรงขนาดใหญ่หรือซูเปอร์เคจ (Super cage)



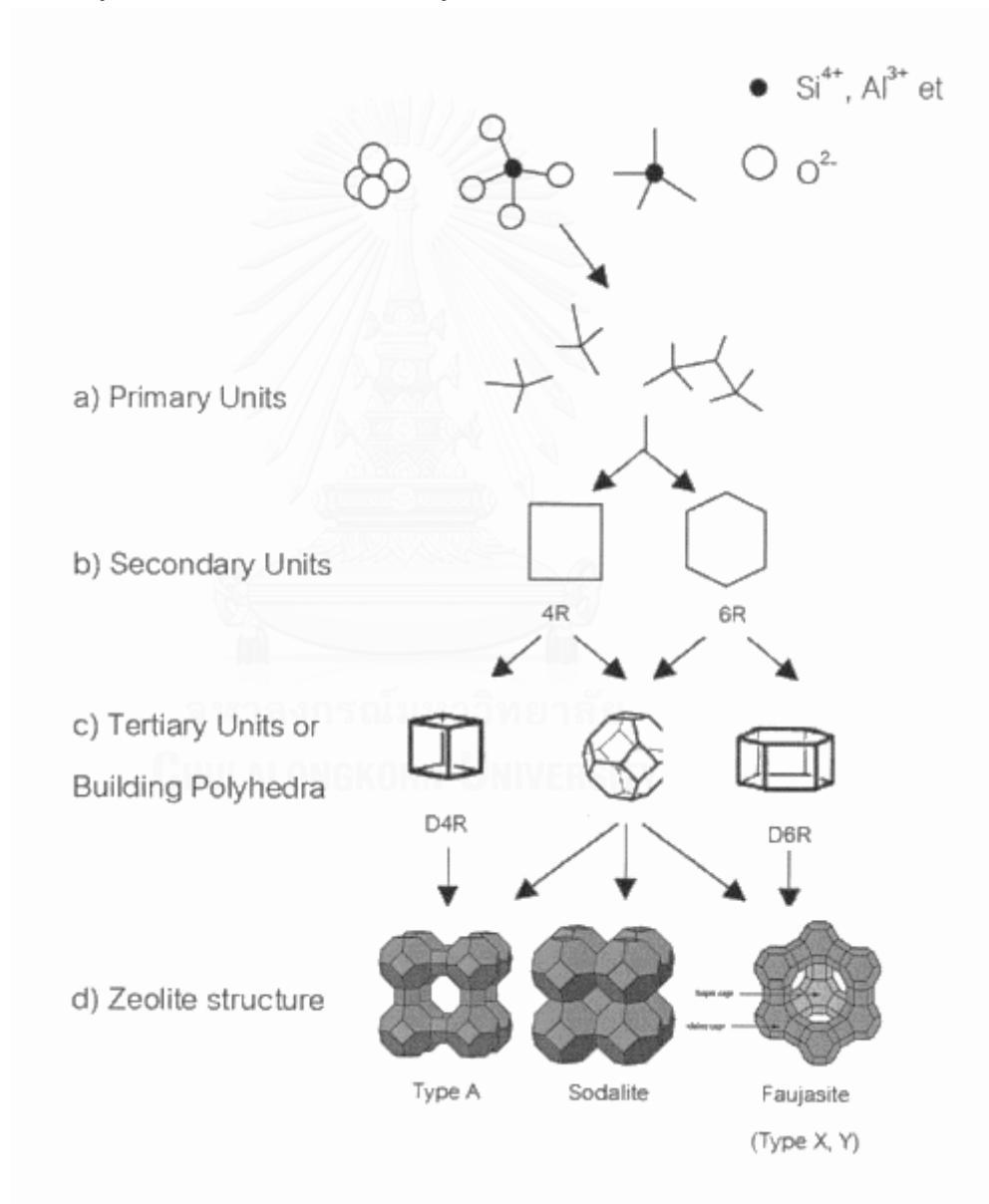
รูปที่ 2.8 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยเล็ก ๆ (sub unit) ของซีโอไลต์ในหน่วยโครงสร้างแบบปฐมภูมิ [19]



รูปที่ 2.9 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิในโครงสร้างของซีโอไลต์ (a) single four ring (S4R), (b) single six ring (S6R), (c) single eight ring (S8R), (d) double four ring (D4R), (e) double eight ring (D8R). (f) complex 4-1, (g) complex 5-1 และ (h) complex 4-4-1 [19]



รูปที่ 2.10 หน่วยโครงสร้างของรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์ [19]



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดโครงสร้างของซีโอไลต์ของผลึกในแบบต่างๆ [19]

เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ประกอบไปด้วยช่องว่าง และมีการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลจำนวนมาก จึงมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) สามารถนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ เช่น การบำบัดน้ำเสีย (Water treatment) และยังมีความสามารถในการเป็นสารที่ดูดซับสารประกอบต่างๆ เช่น สารประกอบกำมะถัน สารประกอบไนโตรเจนและน้ำ โดยโครงสร้างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของโครงสร้าง ดังนั้นซีโอไลต์จึงเป็นสาร Molecular sieve ที่ทำให้มีสมบัติต่างจากตัวดูดซับประเภทอื่น และซีโอไลต์ลักษณะทางโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกันทำให้มีสมบัติทางเคมีและกายภาพมีความแตกต่างกันตามโครงสร้างและชนิดของซีโอไลต์ โดยซีโอไลต์นั้นมีอยู่ประมาณ 600 ชนิด และสามารถแบ่งกลุ่มตามลักษณะของโครงสร้างซีโอไลต์แบ่งได้ประมาณ 40 กลุ่ม ดังนั้นลักษณะทางโครงสร้างที่มีความแตกต่างจึงส่งผลต่อสมบัติต่างๆ ของซีโอไลต์ ด้วยเช่นกัน

## 2.7 กระบวนการคืนสภาพของตัวดูดซับ

กระบวนการคืนสภาพของตัวดูดซับ คือ กระบวนการที่นำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานหรือผ่านการดูดซับแล้ว นำมาคืนสภาพของตัวดูดซับให้สามารถกลับมาใช้ใหม่และมีประสิทธิภาพในการดูดซับเช่นเดิม โดยในปัจจุบันมีวิธีการในการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่หรือคืนสภาพตัวดูดซับมีอยู่ 3 วิธี คือ

1. วิธีการคืนสภาพด้วยความร้อน คือ วิธีการที่ให้ความร้อนกับตัวดูดซับเพื่อสลายพันธะระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับหรือตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว แต่วิธีการนี้ทำให้โครงสร้างของตัวถูกดูดซับแตกพันธะในโครงสร้างแทนที่จะสลายพันธะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ทำให้เกิดการจับพันธะใหม่ของคาร์บอนเกิดการสะสมเป็นถ่านโค้ก (Coke) จึงเป็นผลให้ตัวดูดซับที่คืนสภาพด้วยความร้อนมีประสิทธิภาพลดลงในการดูดซับครั้งต่อไป [20]
2. วิธีการคืนสภาพด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย คือ วิธีการที่ใช้ตัวทำละลายมาสกัดตัวถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับ แต่วิธีการนี้ก็ไม่สามารถสกัดตัวถูกดูดซับออกไปจากตัวดูดซับได้ทั้งหมด จึงส่งผลให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพลดลงในการดูดซับในครั้งถัดไป [20]
3. วิธีการคืนสภาพด้วยอัลตราซาวด์ คือ วิธีการที่ใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมกับตัวทำละลายเพื่อตัวดูดซับเกิดการคายซับออกมา โดยกระบวนการนี้จะช่วยทำให้เกิดการสกัดสารที่ถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับ แต่วิธีการนี้ก่อให้เกิดการติดค้างอยู่ของตัวทำละลายในตัวดูดซับ ส่งผลให้ตัวดูดซับที่ผ่านการคืนสภาพด้วยวิธีการนี้ทำให้ความสามารถดูดซับประสิทธิภาพลดลง [21]

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการคืนสภาพของตัวดูดซับจากวิธีต่างๆ พบว่าวิธีการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยวิธีการการสกัดด้วยตัวทำละลายนั้นจะมีประสิทธิภาพในการคืนสภาพที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hong และ Tang [22] ศึกษาการขจัดสารประกอบไนโตรเจน ได้แก่ ควิโนลีนในน้ำมันจำลอง และน้ำมันดีเซล ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y, Cr-Y, Zn-Y และ Cu-Y พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y, Cr-Y, Zn-Y และ Cu-Y มีความจุทั้งหมดของการดูดซับควิโนลีนในน้ำมันจำลองมีค่าเท่ากับ 34.2, 41.6, 36.6 และ 38.5 มิลลิกรัมไนโตรเจนต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ พบว่า Cr-Y มีประสิทธิภาพสูงที่สุด แต่เมื่อทำการขจัดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันดีเซลที่มีสารประกอบไนโตรเจน ที่มีฤทธิ์เป็นเบสและใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y, Cr-Y, Zn-Y และ Cu-Y พบว่ามีค่าร้อยละการขจัดสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบสทั้งหมดเท่ากับ 23.7, 56.5, 37.4 และ 60.1 ตามลำดับ และพบว่านอกจากนั้นแล้วยังได้ศึกษาผลของเวเลนซ์อิเล็กตรอนต่อการขจัดสารประกอบไนโตรเจนของตัวดูดซับ พบว่าปริมาณของเวเลนซ์อิเล็กตรอนของโลหะที่สูงส่งผลให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

Liu และคณะ [23] ศึกษาการดูดซับสารประกอบไนโตรเจน 2 รูปแบบ ได้แก่ สารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง เช่น อินโดล และสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบส เช่น ควิโนลีน และอะครีติน โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ Cu-Y โดยใช้โปรแกรมจำลองและวิธีคำนวณด้วยเทคนิค Density Functional Theory พบว่า สารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบสหรือ ควิโนลีน และอะครีติน จะเสถียรเมื่อดูดซับระหว่างตำแหน่งกัมมันต์หรือ Cu กับอะตอมของไนโตรเจน และสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นกลางจะเสถียรเมื่อมีการดูดซับระหว่างตำแหน่งกัมมันต์ Cu กับพันธะคู่ของวงแหวนพินิล หรือวงแหวนไพโรลิ หรือวงแหวนพิริดีน แสดงให้เห็นว่าสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นกลางเกิดการแข่งขันการดูดซับกับสารประกอบแอมโรแมติกมากกว่าสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบส และเมื่อเปรียบเทียบพลังงานการดูดซับสารประกอบต่างๆ ในน้ำมัน เรียงลำดับความเสถียรในการดูดซับได้ดังนี้ สารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบส > สารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง > สารประกอบไทโอพีนิค แสดงให้เห็นว่าสารประกอบไนโตรเจนมีความสามารถในการแย่งชิงให้การดูดซับมากกว่าสารประกอบกำมะถัน

Bhandari และคณะ [24] ศึกษาการขจัดสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลองและน้ำมันดีเซล ซึ่งสารประกอบกำมะถัน ได้แก่ เบนโซโทไธโอพีน (BT), ไตเบนโซโทไธโอพีน (DBT) และ 4,6-ไดเมทิลไตเบนโซโทไธโอพีน (4,6-DMDBT) โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ Cu-Y และ Ni-Y เป็นตัวดูดซับ พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y มีความจุเบรกทูร (Breakthrough) ในการดูดซับสารประกอบกำมะถันสูงกว่า Cu-Y (ความจุเบรกทูรของ Ni-Y และ Cu-Y เท่ากับ 42 และ 31 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ) และยังได้ทำการศึกษาผลของสารประกอบแอรโม่ติกต่อการขจัดสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับซีโอไลต์ พบว่าการเพิ่มปริมาณของเบนซีนหรือวงแหวนแอรโม่ติกในน้ำมันจำลองส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบกำมะถันมีประสิทธิภาพลดลง โดยเกิดจากการแข่งขันกันดูดซับระหว่างสารประกอบกำมะถันกับสารประกอบแอรโม่ติกที่ตำแหน่งพันธะพายกับไอออนโลหะ

Tang และ Hong [25] ศึกษาการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง โดยใช้ MCM-41 เป็นตัวดูดซับสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันดีเซล การเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยการใส่โคบอลออกไซด์ (CoO) ลงไปในอัตราส่วนต่างๆ ทำให้ได้ Co-MCM-41 เพื่อนำมาเปรียบเทียบการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนพบว่า Co-MCM-41 มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่า MCM-41 โดยมีค่าความจุของการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนของ Co-MCM-41 และ MCM-41 เท่ากับ 9.1 และ 7.6 มิลลิกรัมของไนโตรเจนต่อกรัมของตัวดูดซับ

Xiao และคณะ [26] ศึกษาผลของการขจัดสารประกอบกำมะถันของน้ำมันดีเซลที่มีกำมะถันโดยมีสารประกอบอื่นๆ เช่น สารเติมแต่งของน้ำมันดีเซล, สารประกอบแอรโม่ติก สารประกอบไนโตรเจน และความชื้น ด้วยตัวดูดซับกำมะถันที่แสดงให้เห็นเห็นว่ากำมะถันที่มีสมบัติการดูดซับสารประกอบกำมะถันได้ดีโดยมีลักษณะการดูดซับที่ตำแหน่งพันธะพายอเล็กตรอนกับตำแหน่งกำมะถันของกำมะถันที่สูง พบว่าสารประกอบกำมะถันที่ไม่มีหมู่เมทิล เช่น DBT เกิดอันตรกิริยาที่น้อยกว่าสารประกอบกำมะถันที่มีหมู่เมทิล เช่น 4,6-DMDBT เพราะสารประกอบที่ไม่มีหมู่เมทิลเมื่อเพิ่มปริมาณของสารมอดอแอรโม่ติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เทอเทียร์-บิวทิลเบนซีน (Tert-Butylbenzene) โดยนำมาเติมในน้ำมันจำลองร้อยละโดยน้ำหนักตั้งแต่ 0 ถึง 10 แสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการขจัดสารประกอบกำมะถันที่ลดลงเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิแอรโม่ติกไฮโดรคาร์บอนหรือพีแนนทรินประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าการดูดซับสารประกอบกำมะถันลดลงอย่างเห็นได้ชัดและนอกจากนั้นแล้ว เมื่อเพิ่มปริมาณของสารเติมแต่งของ

น้ำมันดีเซล เช่น เอทิลเฮกซิลไนเตรต เพิ่มความชื้น และสารประกอบไนโตรเจน พบว่าเมื่อเติมสารประกอบต่างๆ เหล่านี้ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบกำมะถันลดลง

Boonyawan และคณะ [27] ศึกษาการดูดซับสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลองโดยใช้สารประกอบกำมะถัน 2 ชนิด คือ DBT และ 4,6-DMDBT และมีสารประกอบอื่นๆ คือ สารประกอบไนโตรเจน (ควิโนลีนและอินโดว) และสารประกอบแอมโรแมติก (แนฟทาลีน) ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารประกอบกำมะถันโดยที่ไม่มีสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบแอมโรแมติก ดูดซับด้วยซีโอไลต์ Na-Y ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนดังนี้ คือ Ni-Y, La-Y, Ce-Y, Ni-La-Y และ Ni-Ce-Y พบว่า Na-Y ให้ประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบกำมะถันสูงที่สุด และรองลงมา คือ Ni-Y > La-Y ~ Ce-Y > Ni-Ce-Y ตามลำดับ เมื่อมีสารประกอบไนโตรเจนและแอมโรแมติกในน้ำมันจำลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง เนื่องจากสารประกอบแอมโรแมติกหรือไนโตรเจนเกิดการแข่งขันในการดูดซับกับสารประกอบกำมะถันบนตำแหน่งกัมมันต์ที่อยู่บนตัวดูดซับทำให้ค่าความจุในการดูดซับกำมะถันที่ลดน้อยลง และจากผลการทดลองพบว่าสารประกอบไนโตรเจนมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงมากกว่าสารประกอบแอมโรแมติก นอกจากนี้ยังศึกษาการนำมาใช้ใหม่ของตัวดูดซับ Na-Y โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลายโดยใช้เฮกเซนและโทลูอีน พบว่าโทลูอีนให้ประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดีกว่า โดยใช้อัตราการไหลต่ำและอุณหภูมิสูง ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดียิ่งขึ้น

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินงานวิจัย

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลองด้วยเทคนิคระบบดูดซับแบบเบตนิ่งแบบเดี่ยว โดยศึกษาผลของชนิดของตัวดูดซับ และขนาดของอนุภาคและอุณหภูมิของ Na-Y ซีโอไลต์ ศึกษาผลของสารประกอบแอมโมเนียต่อการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถัน จากนั้นทำการศึกษาการดูดซับ ด้วยระบบดูดซับแบบเบตนิ่ง 2 คอลัมน์ เพื่อดูประสิทธิภาพของการขจัดสารประกอบกำมะถันเมื่อมีการขจัดสารประกอบไนโตรเจนก่อนในเบตแรกแล้วขจัดสารประกอบกำมะถันในเบตที่สอง รวมถึงการนำตัวดูดซับที่ใช้งานแล้วกลับมาใช้งานใหม่ด้วยวิธีการสกัดด้วยตัวทำละลาย

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ซีโอไลต์โซเดียมวาย (Na-Y zeolite) (Sigma Aldrich)
2. นิกเกิลไนเตรต ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (A.R. Grade, Ajax Finechem)
3. คอปเปอร์ไนเตรต ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) (A.R. Grade, Ajax Finechem)
4. แลนทานัมไนเตรต ( $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (A.R. Grade, Aldrich chemistry)
5. โคบอลไนเตรต ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (A.R. Grade, Carlo Erba reagents)
6. ซีเรียมไนเตรต ( $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) (A.R. Grade, Aldrich chemistry)
7. เหล็กไนเตรต ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) (A.R. Grade, Daejung reagents)
8. เหล็กซัลเฟต ( $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) (A.R. Grade, Ajax Finechem)
9. ไดเบนโซไทโอเฟน (Dibenzothiohene) (Aldrich chemistry)
10. 4,6 ไดเมทิลไดเบนโซไทโอเฟน (4,6 Dimethyldibenzothiohene) (Aldrich chemistry)
11. แนฟทาลีน (Naphthalene) (Loba Chemie)
12. ควิโนลีน (Quinoline) (Aldrich chemistry)
13. อินโดล (Indole) (Aldrich chemistry)
14. อะคริดีน (Acridine) (Aldrich chemistry)
15. นอร์มัลออกเทน (n-octane) (A.R. Grade, RCI Labscan)



16. โทลูอีน (Toluene) (A.R. Grade, RCI Labscan)

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์

1. Gas chromatography-flame ionization detection and pulsed Flame photometric detector (GC-FID x PFPD) : ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7890B (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 แก๊สโครมาโทกราฟี Agilent Technologies Model 7890B

2. ปั๊มแบบชักลูกสูบ (Reciprocating pumps): ยี่ห้อ PCS Pump รุ่น SP-11
3. เครื่องชั่งไฟฟ้า (Analytical balance): ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น ML-series
4. เครื่องกวนสารละลายให้ความร้อน (Hot plate stirrer): ยี่ห้อ Ika รุ่น C-MAG HS10
5. อุปกรณ์การกรองประกอบด้วย กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) ขวดกรอง (Suction or filter flask) เครื่องดูดอากาศ (Aspirator) และกระดาษกรอง Whatman No.42
6. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven): ยี่ห้อ Memmert รุ่น UF75
7. เตาเผา (Furnace): ยี่ห้อ Carbolite รุ่น aaf1100
8. อุปกรณ์ดูดความชื้น บรรจุด้วยซิลิกาเจล (Silica gel)
9.  $N_2$  adsorption-desorption measurement: ยี่ห้อ Quantachrome Instruments
10. X-ray diffraction (XRD): ยี่ห้อ PAN analytical รุ่น X' Pert PRO
11. X-ray fluorescence spectroscopy (XRF): ยี่ห้อ EDAX รุ่น Orbis PC

12. Scanning electron microscopy (SEM): ยี่ห้อ Hitachi รุ่น S-3400N
13. Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX)
14. Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) เครื่อง Perkinelmer รุ่น Spectrum Spotlight 300 FT-IR

### 3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมน้ำมันจำลอง

การศึกษาการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลองโดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ และผลของสารประกอบแอมโมเนียที่ลดประสิทธิภาพการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถัน การทดลองนี้ได้แบ่งน้ำมันจำลอง 4 แบบ ดังตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำมันจำลอง

องค์ประกอบ	น้ำมันจำลอง			
	1	2	3	4
DBT (75 ppm S)	✓		✓	✓
4,6-DMDBT (75 ppm S)	✓		✓	✓
Quinoline (32.5 ppm N)		✓	✓	✓
Indole (32.5 ppm N)		✓	✓	✓
Acridine (32.5 ppm N)		✓	✓	✓
Naphthalene (500 ppm)				✓

\*โดยจากค่า 75 ppm ของกำมะถัน มีค่าเท่ากับ 0.0007 mol ของกำมะถัน

และ 32.5 ppm ของไนโตรเจน มีค่าเท่ากับ 0.0007 mol ของไนโตรเจน

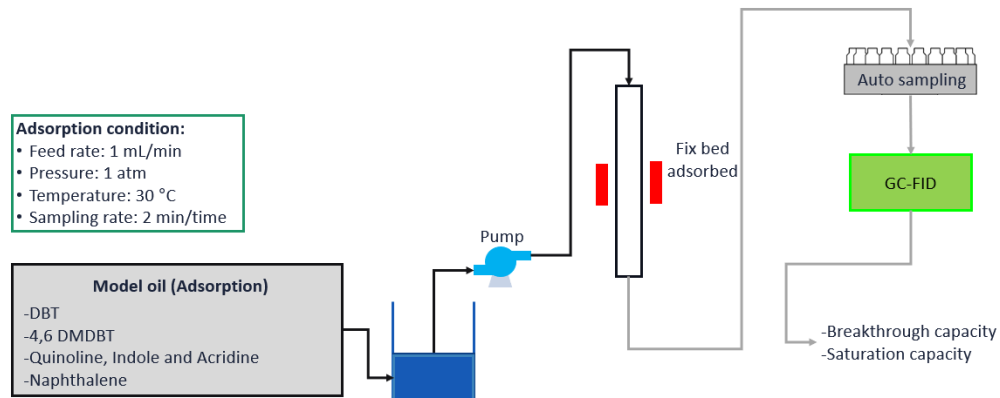
### 3.3.2 การเตรียมตัวดูดซับ

การเตรียมตัวดูดซับซีโอไลต์วายชนิดต่างๆ ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน คือ ตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y, Ce-Y, Ni-Y, Co-Y, Cu-Y, Fe-Y (แลกเปลี่ยนด้วยโลหะไนเตรต) และ Fe-Y(S) (แลกเปลี่ยนด้วยโลหะซัลเฟต) เตรียมโดยการนำซีโอไลต์ Na-Y ที่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ด้วยความดันบรรยากาศ จำนวน 5 กรัมมาแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลาย  $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ ,  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ ,  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  และ  $\text{Fe}(\text{SO}_4)$  ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร โดยการปั่นกวนที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับ  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$  ใช้เวลาแลกเปลี่ยนไอออนเป็นเวลา 2 กับ 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างตัวดูดซับด้วยน้ำปราศจากไอออนจำนวน 2 ลิตร และอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12-24 ชั่วโมง และนำไปซีโอไลต์ที่ผ่านการอบแห้งมาบดหยาบ ก่อนนำไปอัดเม็ดและบด แล้วกรองผ่านตะแกรงที่มีขนาดช่วง 212 ถึง 425 ไมโครเมตร แล้วเก็บตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y, La-Y, Ce-Y, Ni-Y, Co-Y, Cu-Y, Fe-Y และ Fe-Y(S) ไว้ในตู้ดูดความชื้น จากนั้นนำตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y, Ni-Y, Cu-Y, La-Y, Co-Y, Ce-Y, Fe-Y และ Fe-Y(S) ไปเผาที่อุณหภูมิ 450, 450, 450, 530, 450, 550, 600 และ 600 องศาเซลเซียส โดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 2, 2, 2, 5, 2, 4, 6 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ [28,31]

### 3.3.3 การทดลองการดูดซับและการวิเคราะห์น้ำมันแบบเบตนิ่งเดี่ยว

การดูดซับทดลองในกระบวนการดูดซับแบบเบตนิ่งแบบเดี่ยวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยตัวดูดซับ ได้แก่ ซีโอไลต์ Na-Y, La-Y, Ce-Y, Ni-Y, Co-Y, Cu-Y, และ Fe-Y จะถูกบรรจุใส่คอลัมน์เหล็กกล้าไร้สนิมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 มม. และยาว 75 มม. บรรจุปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นให้ความร้อนตัวดูดซับภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อขจัดความชื้นและสิ่งเจือปนในโครงสร้างของซีโอไลต์ หลังจากนั้นรอให้อุณหภูมิของคอลัมน์เย็นตัวลงจึงเริ่มทำการดูดซับที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ด้วยการป้อนน้ำมันจำลองจากทางด้านบนของคอลัมน์ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที แล้วทำการเก็บน้ำมันจำลองหลังผ่านการดูดซับที่ออกจากด้านล่างของคอลัมน์ทุกๆ 2 นาที (หรือ 2 มิลลิลิตร) หลังจากนั้นวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Agilent Technologies รุ่น 7890B ที่ประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบแฟรมไอออนในเซชัน (Flame ionization detector; FID) โดยใช้คอลัมน์ DB-5 แล้วนำผล

การทดลองที่ได้มาวิเคราะห์แล้วแสดงผลการทดลองในรูปของเส้นโค้งเบรคทูร (Breakthrough curve) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นสารขาออกและความเข้มข้นสารขาเข้า ( $C_t/C_0$ ) เทียบกับ ปริมาณสะสมของสารขาออกต่อน้ำหนักตัวดูดซับและคำนวณความจุการดูดซับดังสมการที่ (3.1) [32]



รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบการดูดซับแบบเบดนิ่ง

$$q = \left( \frac{v''}{m_{\text{adsorbent}}} \right) \rho_{\text{fuel}} X_i \int_0^t \left[ 1 - \frac{C(t)}{C_0} \right] dt \quad (3.1)$$

- โดย  $q$  = ความจุการดูดซับ (มิลลิกรัมของกำมะถันต่อกรัมของตัวดูดซับ)
- $v''$  = อัตราการป้อนสารขาเข้า (มิลลิลิตรต่อนาที)
- $m_{\text{adsorbent}}$  = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)
- $\rho_{\text{fuel}}$  = ความหนาแน่นของน้ำมัน (กรัมต่อมิลลิลิตร)
- $X_i$  = สัดส่วนโดยน้ำหนักของกำมะถันหรือไนโตรเจนหรือแอมโมเนียในสารขาเข้า
- $C(t)$  = ความเข้มข้นของสารประกอบนั้น (ppm) ในน้ำมันจำลองขาออกที่เวลาต่างๆ (นาที)
- $C_0$  = ความเข้มข้นของสารประกอบนั้น (ppm) ในน้ำมันจำลองขาเข้า

และคำนวณปริมาณของสารที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ จากเส้นโค้งเบรคทูรดังสมการที่ (3.2) [27] และตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก

$$\text{ปริมาณของสาร} = \left( \frac{v''}{m_{\text{adsorbent}}} \right) \rho_{\text{fuel}} X_i (T_i - 0) \quad (3.2)$$

โดย  $v''$  = อัตราการป้อนสารขาเข้า (มิลลิลิตรต่อนาที)

$m_{\text{adsorbent}}$  = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

$\rho_{\text{fuel}}$  = ความหนาแน่นของน้ำมัน (กรัมต่อมิลลิลิตร)

$T_i$  = เวลาทั้งหมด (นาที)

$X_i$  = สัดส่วนโดยน้ำหนักของกำมะถันหรือไนโตรเจนหรือแอมโมเนียในสารขาเข้า

จากปริมาณของสารที่ป้อนที่ได้ตั้งสมการที่ (3.2) และปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (ความจุเบรคทูลและความจุทั้งหมด) จากสมการที่ (3.1) ทำให้สามารถคำนวณร้อยละของการดูดซับสารนั้น ที่ค่าความจุเบรคทูลหรือความจุทั้งหมดที่สิ้นสุดของตัวดูดซับแต่ละชนิดเทียบกับปริมาณของสารนั้นๆ ที่ป้อนเข้าสู่การดูดซับในระยะเวลาที่เกิดการดูดซับได้จากสมการที่ (3.3) [27]

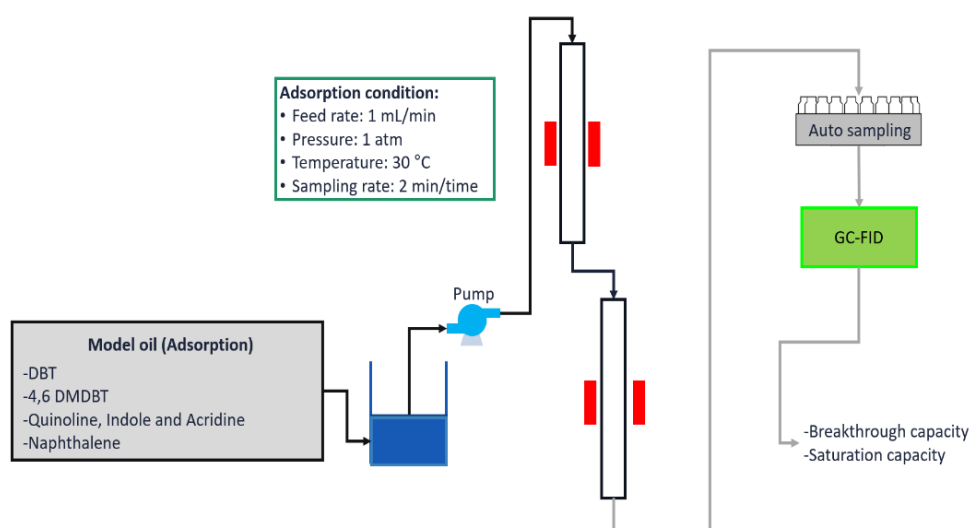
$$\text{ร้อยละของสารดูดซับความจุเบรคทูล} = \frac{\text{ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับความจุเบรคทูล}}{\text{ปริมาณของสารที่ป้อน}} \times 100 \quad (3.3)$$

$$\text{ร้อยละของสารดูดซับความจุทั้งหมด} = \frac{\text{ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับความจุทั้งหมด}}{\text{ปริมาณของสารที่ป้อน}} \times 100 \quad (3.4)$$

### 3.3.4 ระบบการดูดซับแบบเบตนิ่งแบบ 2 คอลัมน์

การดูดซับทดลองในกระบวนการดูดซับแบบเบตนิ่งแบบ 2 คอลัมน์ดังรูปที่ 3.3 โดยคอลัมน์ที่ 1) บรรจุซีโอไลต์ La-Y และ คอลัมน์ที่ 2) บรรจุซีโอไลต์ Na-Y ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซีโอไลต์ La-Y และ Na-Y ถูกบรรจุใส่คอลัมน์เหล็กกล้าไร้สนิมเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.6 มม. และยาว 75 มม. บรรจุปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นให้ความร้อนตัวดูดซับภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปล่อยให้วุ้นให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นทำการทดสอบด้วยการป้อนเฉพาะน้ำมันจำลองแบบที่ 4 ด้วยอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที แล้วทำการเก็บน้ำมันจำลองหลังผ่านการดูดซับที่ออกจากด้านล่างของคอลัมน์ทุก 2 นาที (หรือ 2 มิลลิลิตร) ที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นวิเคราะห์ผลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

Agilent Technologies รุ่น 7890B ที่ประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบแฟรมไอออไนเซชัน (Flame ionization detector; FID) โดยใช้คอลัมน์ DB-5 แล้วนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์แล้วแสดงผลการทดลองในรูปของเส้นโค้งเบรคทูร์ (Breakthrough curve) เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นสารขาออกและความเข้มข้นสารขาเข้า ( $C_t/C_0$ ) เทียบกับ ปริมาณสะสมของสารขาออกต่อน้ำหนักตัวดูดซับ สามารถคำนวณความจุการดูดซับสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.3 แผนภาพระบบการดูดซับแบบเบตนิ่งแบบ 2 คอลัมน์

### 3.3.5 การศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

ศึกษาการคืนสภาพเพื่อนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ การทดลองนี้เลือกใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y และ La-Y มาดูดซับน้ำมันจำลองที่ 4 ประกอบไปด้วยสารประกอบกำมะถัน ไนโตรเจน และแอมโมเนีย ก่อนที่จะทำการคืนสภาพด้วยวิธีการสกัดด้วยโทลูอีนแล้วกระตุ้นตัวดูดซับที่ภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยแผนภาพของการศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับแสดงดังรูปที่ 3.1

ผลการทดลองที่ได้จะแสดงในรูปของเส้นโค้งเบรคทูร์เช่นเดียวกับการดูดซับ โดยจากเส้นโค้งดังกล่าวนำมาคำนวณหาปริมาณของการคายได้จากสมการที่ (3.4) [27]

$$\text{ปริมาณของสารที่เกิดการคายซับ} = \left( \frac{v''}{m_{\text{adsorbent}}} \right) \rho_{\text{fuel}} X_i \int_0^t \left[ \frac{C(t)}{C_0} \right] dt \quad (3.4)$$

- โดย  $v''$  = อัตราการป้อนสารขาเข้า (มิลลิลิตรต่อนาที)
- $m_{\text{adsorbent}}$  = น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)
- $\rho_{\text{fuel}}$  = ความหนาแน่นของน้ำมัน (กรัมต่อมิลลิลิตร)
- $X_i$  = สัดส่วนโดยน้ำหนักของกำมะถันหรือไนโตรเจนหรือแอมโมเนียในสารขาเข้า
- $C(t)$  = ความเข้มข้นของสารประกอบนั้น (ส่วนในล้านส่วน) ในน้ำมันจำลองขาออกที่เวลาต่างๆ (นาที่)
- $C_0$  = ความเข้มข้นของสารประกอบนั้น (ส่วนในล้านส่วน) ในน้ำมันจำลองขาเข้า

โดยจากปริมาณของสารประกอบนั้นๆ ที่เกิดการคายที่ได้จากสมการที่ (3.4) คำนวณร้อยละของการคายของสารประกอบนั้นๆ จากสมการที่ (3.5)

$$\text{ร้อยละของการคายของสารถูกดูดซับ} = \frac{\text{ปริมาณของสารนั้นๆ ที่เกิดการคาย}}{\text{ปริมาณของสารนั้นๆ ที่ป้อน}} \times 100 \quad (3.5)$$

ซึ่งร้อยละของการคายของสารทั้งหมดจะสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของการคืนสภาพโดยคำนวณจากสัดส่วนของสารประกอบที่เกิดการคายกับสารประกอบทั้งหมดที่เกิดการดูดซับดังสมการที่ (3.6)

$$\text{ร้อยละประสิทธิภาพของการคืนสภาพ} = \frac{\text{ปริมาณของสารทั้งหมดที่เกิดการคาย}}{\text{ปริมาณของสารทั้งหมดที่เกิดการดูดซับ}} \times 100 \quad (3.6)$$

### 3.4 การวิเคราะห์

#### 3.4.1 การวิเคราะห์สมบัติตัวดูดซับ

1. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกโดยการยิงรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer, XRD) : เครื่อง PAN analytical รุ่น X' Pert PRO โดยวิเคราะห์ตัวอย่างในช่วง  $2\theta$  เท่ากับ 5.00-70.00 องศา Step size: 0.04 Time per step: 0.5 วินาที
2. การวิเคราะห์ธาตุโดย X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) : เครื่อง EDAX รุ่น Orbis PC ใช้ Rh source, Energy: 30 kV collected time: 60 วินาที
3. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยวิธีบีอีที ( $N_2$  adsorption-desorption measurement, BET) : เครื่อง Quantachrome Instruments วิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้  $N_2$  ที่ภาวะ Outgas temp: 300 องศาเซลเซียส Outgas time: 12 ชั่วโมง
4. การวิเคราะห์ขนาดและโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) : เครื่อง Hitachi S-3400N โดยใช้ตัวอย่างเคลือบด้วยทองเป็นเวลา 30 วินาที
5. การวิเคราะห์ธาตุเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX) : เครื่อง Hitachi S-3400N โดยตัวอย่างเคลือบด้วยทองเป็นเวลา 30 วินาที
6. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารด้วยแสงอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR) : เครื่อง Perkinelmer รุ่น Spectrum Spotlight 300 FT-IR วิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้ resolution 4  $cm^{-1}$  จำนวนรอบ 64 รอบ/ครั้ง
7. การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ทั้ง 3 ขนาดส่งผลต่อการดูดซับสารประกอบกำมะถันโดยมีขนาดของอนุภาค ดังนี้ 1) น้อยกว่า 150 ไมโครเมตร 2) 212 ถึง 425 ไมโครเมตร และ 3) มากกว่า 425 ถึง 725 ไมโครเมตร
8. การวิเคราะห์ผลการดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ที่อุณหภูมิต่างๆ คือ 30, 40, และ 50 องศาเซลเซียส



### 3.4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำมัน

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบสารประกอบไนโตรเจน กำมะถันและแอมโมเนียของน้ำมันจำลอง ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบ FID การวิเคราะห์เริ่มด้วยการนำน้ำมันจำลองมาวิเคราะห์ด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Gas chromatography แบบ Flame ionization detection (GC-FID) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7890B โดยมีข้อมูลดังนี้

- Column : DB-5; 60 m, 0.25 mm. i.d., 0.25  $\mu$ m

- Injector temp : 300  $^{\circ}$ C

- FID temp : 250  $^{\circ}$ C

- Oven temp : initial temp : 120  $^{\circ}$ C

Ramp to 170  $^{\circ}$ C (rate 6  $^{\circ}$ C/min)

Ramp to 300  $^{\circ}$ C (rate 20  $^{\circ}$ C/min), hold 0.5 min

- Helium carrier gas flow : 1.5 mL/min

- Injection mode : split ratio = 50

2. การวิเคราะห์หาสารประกอบกำมะถันในน้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แบบ PFPD วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7890B แบบ Pulsed Flame Photometric Detector โดยใช้ Detector ยี่ห้อ OI Analytical รุ่น 5383 PFPD โดยมีข้อมูลดังนี้

- Column : HP-5ms; 30 m, 0.25 mm. i.d., 0.25  $\mu$ m

- Injector temp : 290  $^{\circ}$ C

- Oven temp : initial temp : 120  $^{\circ}$ C

Ramp to 170  $^{\circ}$ C (rate 6  $^{\circ}$ C/min)

Ramp to 300  $^{\circ}$ C (rate 20  $^{\circ}$ C/min), hold 15 min

- Injection mode : split ratio = 100

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ

##### 4.1.1 เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดย X-ray fluorescence spectroscopy (XRF)

เทคนิค XRF เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวดูดซับโดยการยิงรังสีเอกซ์และปริมาณของโลหะที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนกับซีโอไลต์ Na-Y และการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมก่อนการแลกเปลี่ยนไอออนกับภายหลังการแลกเปลี่ยนไอออน แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าซีโอไลต์ Na-Y ที่ผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและกระบวนการเผา (ลำดับที่ 1-7) มีอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมที่ไม่แตกต่างกัน คือ อยู่ในช่วง 3.31-3.57 แสดงว่าการแลกเปลี่ยนไอออนและกระบวนการเผาไม่ก่อให้เกิดการกำจัดอะลูมิเนียม (Dealumination) ออกจากโครงสร้างของซีโอไลต์ [33]

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ของตัวดูดซับด้วยเทคนิค XRF

ลำดับที่	ตัวดูดซับ	ปริมาณโลหะที่แลกเปลี่ยนไอออน (mmol/g)	ปริมาณโลหะบนตัวดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม
1	Na-Y	3.1*	7.14	3.57
2	La-Y	1.15	15.91	3.48
3	Ce-Y	1.10	15.41	3.5
4	Ni-Y	1.69	9.95	3.54
5	Co-Y	1.70	10.03	3.52
6	Cu-Y	1.68	10.7	3.31
7	Fe-Y(S)	1.95	10.90	3.56
8	Fe-Y 2h	1.35	7.56	9.85
9	Fe-Y 24h	1.49	8.34	16.64

\*ปริมาณของ Na ไอออนที่แลกเปลี่ยนได้

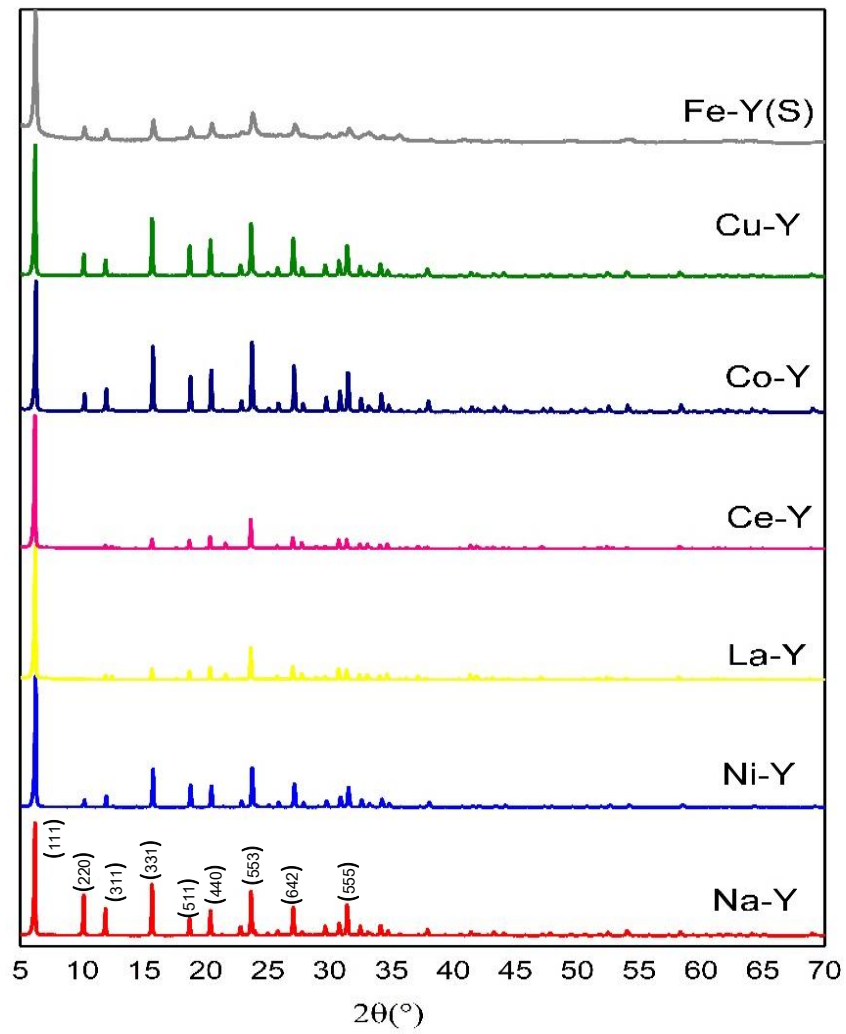
เมื่อพิจารณาปริมาณโลหะที่แลกเปลี่ยนกับซีโอไลต์ Na-Y พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y, Co-Y, Cu-Y, และ Fe-Y(S) มีปริมาณของโลหะที่แลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 1.69, 1.70, 1.68, และ 1.95 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากไอออนโลหะทั้งหมดมีประจุ +2 และไอออนโลหะของนิกเกิล (Ni), โคบอล (Co), คอปเปอร์ (Cu), และธาตุเหล็ก (Fe) และ นั้นมีรัศมีอะตอมที่มีขนาดใกล้เคียงกัน คือ 135, 135, 135 และ 140 พิโกเมตร (pm) ในขณะที่ตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y และ Ce-Y พบว่ามีรัศมีอะตอมเท่ากับ 195 และ 185 pm ตามลำดับ และมีค่าปริมาณโลหะที่แลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 1.15 และ 1.10 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ โดยแสดงให้เห็นว่ามีปริมาณของโลหะที่แลกเปลี่ยนไอออนน้อยกว่าโลหะที่มีไอออน +2 เนื่องจากไอออนของโลหะแลนทานัมและซีเรียมมีประจุ +3 และมีรัศมีอะตอมที่ใหญ่กว่า [34]

จากตารางที่ 4.1 พบว่าซีโอไลต์ Na-Y ที่แลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายเหล็กไนเตรตที่เวลา 2 และ 24 ชั่วโมงจนได้ซีโอไลต์ Fe-Y 2 h และ Fe-Y 24 h ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณของเหล็กที่แลกเปลี่ยนไอออนนั้นเพิ่มขึ้นและยิ่งสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการแลกเปลี่ยนที่นานขึ้น แต่เมื่อสังเกตอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมพบว่าอัตราส่วนสูงขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ Na-Y แสดงว่าเกิดการกำจัดอะลูมิเนียมออกจากโครงสร้างของววายซีโอไลต์ ซึ่งเป็นผลมาจากสารละลายเหล็กไนเตรตที่นำมาแลกเปลี่ยนไอออนมีความเป็นกรด พบว่ามีค่า pH เท่ากับ 1.31 (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส, 100 กรัม/ลิตรของน้ำ) [35] แสดงให้เห็นว่าเหล็กไนเตรตนั้นมีความเป็นกรดและทำให้เกิดการละลายอะลูมิเนียมออกด้วยกรด (Acid leaching) ส่งผลให้ปริมาณอะลูมิเนียมในโครงสร้างซีโอไลต์ Fe-Y(N) ลดลงอย่างเห็นได้ชัดและผลของเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง 2 และ 24 ชั่วโมงพบว่าเวลาแลกเปลี่ยนไอออนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงขึ้น จึงสรุปได้ว่าปริมาณของอะลูมิเนียมที่การละลายออกจะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อใช้ระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนที่มากขึ้น [36]

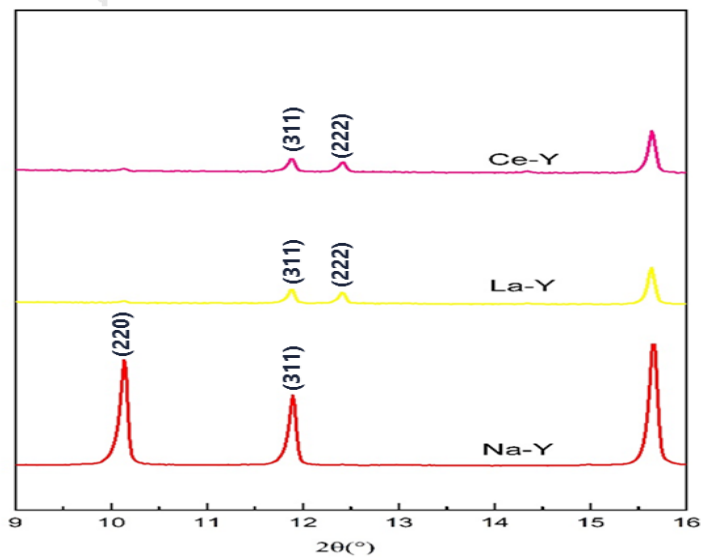
#### 4.1.2 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

เทคนิค XRD เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์และระบุชนิดสารประกอบ โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง โดยนำมาใช้วิเคราะห์ตัวดูดซับที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนและผ่านการเผาเพื่อระบุเฟสหรือระนาบของตัวดูดซับ แสดงรูปที่ 4.1 พบว่าซีโอไลต์ Ni-Y, Cu-Y, และ Fe-Y เมื่อผ่านกระบวนการการแลกเปลี่ยนไอออนและการเผาไม่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของตัวดูดซับ สังเกตได้จากรูปแบบของพีคที่ปรากฏของตัวดูดซับที่ถูกแลกเปลี่ยนไอออนมีรูปแบบของพีคที่เหมือนกับรูปแบบของพีคตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y [37] และยังสามารถคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF โดยพบว่าความสูงของพีคจากกราฟ XRD ของตัวดูดซับที่ถูกแลกเปลี่ยนไอออนแสดงความเข้มของพีคหรือความสูงของพีคนั้นลดลง คือ ความเป็นผลึกของตัวดูดซับลดลง อันเป็นผลมาจากการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะ(โลหะนิกเกิล, คอปเปอร์, โคบอล, แลนทานัม, ซีเรียม, และเหล็ก) ที่มีขนาดใหญ่กว่าไอออนของโลหะโซเดียม และการบดบังโครงสร้างของตัวดูดซับโดยไอออนโลหะ เป็นสาเหตุให้พีคที่ได้มีความเข้มขึ้นที่ลดลงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y [38] และยังพบว่าจากพีคที่ได้จากตัวดูดซับที่ถูกแลกเปลี่ยนไอออนโลหะนั้นพีคของโลหะเหล่านั้นไม่ปรากฏ แสดงถึงการที่โลหะที่แลกเปลี่ยนไอออนมีขนาดผลึกเล็กและมีการกระจายตัวที่ดี [37]

เมื่อพิจารณาตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y และ Ce-Y ด้วยเทคนิค XRD พบว่าระนาบที่ (220), (311), (331), (511), และ (440) รูปแบบของพีคเกิดการลดลงและหายไปอย่างเห็นได้ชัด โดยระนาบทั้งหมดที่กล่าวนี้ คือ ส่วนของทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด (Truncated octahedron type) หรือเรียกว่า sodalite cage เป็นผลมาจากเกิดการแทรกตัวของโลหะแลนทานัมและโลหะซีเรียมโดยโลหะแลนทานัมและซีเรียมมีขนาดของอะตอมที่ใหญ่ส่งผลให้เมื่อเข้าไปในผลึกของ Sodalite cage ทำให้เกิดการลดลงเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึก และจากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเกิดระนาบผลึกใหม่ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 12.5 องศา หรือที่ระนาบ (222) แสดงให้เห็นว่าเกิดการที่โลหะแลนทานัมและซีเรียมเข้าไปแทรกตัวอยู่ในผลึก (Migration) ในตำแหน่งโพรงขนาดใหญ่ (Supercage) ทำให้เกิดรูปแบบของผลึกหรือระนาบใหม่ขึ้นมา [39]

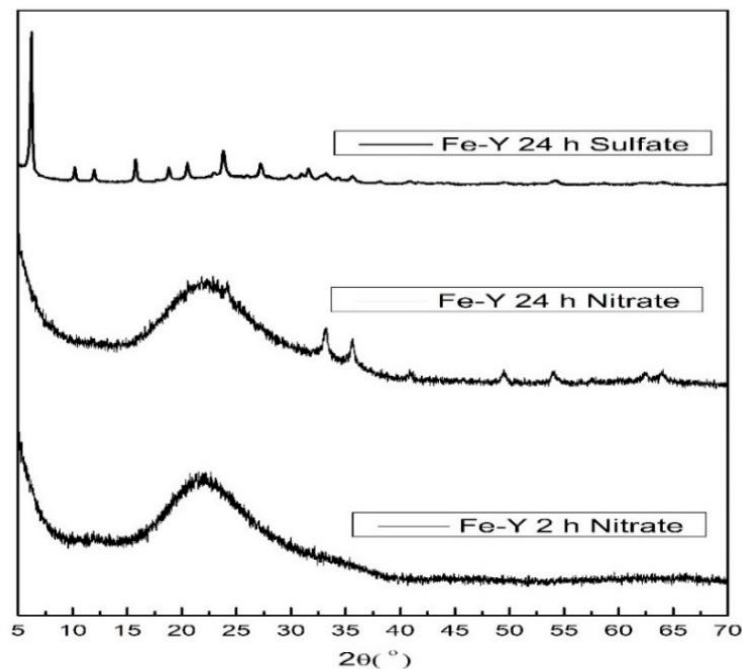


รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หัตถ์ดุดซ์ต่างๆ ด้วยเทคนิค XRD



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์หัตถ์ดุดซ์ La-Y และ Ce-Y เปรียบเทียบกับ Na-Y ด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์ผลการเตรียมซีโอไลต์ Fe-Y ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยเหล็กซัลเฟตและเหล็กไนเตรดดังรูปที่ 4.3 พบว่า การเตรียมซีโอไลต์ Fe-Y ด้วยเหล็กซัลเฟตมีลักษณะหรือรูปแบบของผลึกไม่ต่างจากตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y แต่เมื่อนำมาแลกเปลี่ยนไอออนกับเหล็กไนเตรดพบว่ารูปแบบของพีคแสดงโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) เนื่องจากเหล็กไนเตรดมีสมบัติเป็นกรดจึงทำให้เกิดการละลายอะลูมิเนียมออกไซด์ด้วยกรดผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผล XRF ที่ปริมาณของอะลูมิเนียมลดลงสำหรับเวลาการแลกเปลี่ยน 24 ชั่วโมงของเหล็กไนเตรดนั้นมีพีคของผลึกขึ้นมาโดยเป็นพีคของเหล็กออกไซด์ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRF เช่นเดียวกันโดยปริมาณของเหล็กที่แลกเปลี่ยนไอออนนั้นรวมตัวกันเป็นเหล็กออกไซด์เมื่อใช้เวลาแลกเปลี่ยนที่นานขึ้น



รูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับซีโอไลต์ Fe-Y ที่เตรียมด้วยวิธีต่างๆ ด้วยเทคนิค XRD

#### 4.1.3 เทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับโดย $N_2$ physisorption measurement

เทคนิค BET เป็นการวิเคราะห์หาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวดูดซับ โดยอาศัยเทคนิค  $N_2$  physisorption measurement เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ตัวดูดซับหลังแลกเปลี่ยนไอออนและผ่านกระบวนการเผาโดยแสดงผลเป็นพื้นที่ผิว BET และปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด ดังตารางที่ 4.2 พบว่าซีโอไลต์ Na-Y ที่ถูกแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนโลหะชนิดต่างๆ มีพื้นที่ผิวลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ Na-Y ที่ยังไม่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออน [40] โดยการลดลงของพื้นที่ผิว BET และปริมาตรรูพรุนนั้นเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะทำให้ไอออนโซเดียมลดลง และมีไอออนโลหะต่างๆ ที่นำมาแลกเปลี่ยนเพิ่มขึ้นและแสดงผล XRF จึงเป็นสาเหตุทำให้พื้นที่ผิวลดลงเนื่องจากไอออนโลหะต่างๆ นั้นมีรัศมีอะตอมขนาดใหญ่กว่าไอออนโซเดียม ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD เช่นเดียวกันที่รูปแบบความเข้มของพีคลดลงโดยแสดงถึงการที่ไอออนโลหะเข้าไปปกคลุมพื้นที่ผิวและภายในรูพรุน ทำให้พื้นที่ผิว BET และปริมาตรของรูพรุนของตัวดูดซับลดลง เมื่อพิจารณาจากการเตรียมตัวดูดซับซีโอไลต์ Y ด้วยวิธีการอัดเม็ด และแบ่งเป็น 3 ช่วงขนาด คือ ขนาดน้อยกว่า 210 ไมโครเมตร ระหว่าง 210 ไมโครเมตรถึง 425 ไมโครเมตร และมากกว่า 425 ไมโครเมตรขึ้นไป พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิว BET เพิ่มขึ้นด้วยการใช้อุณหภูมิขนาดน้อยกว่า 210 ไมโครเมตรเกิดความดันสูง (Pressure drop) ทำให้แก๊สไหลผ่านด้วยอัตราการไหลต่ำ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซีโอไลต์ Y ที่ขนาดระหว่าง 210 ไมโครเมตรถึง 425 ไมโครเมตร

จากตารางที่ 4.2 พบว่าซีโอไลต์ Na-Y ที่นำมาแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายเหล็กไนเตรดที่เวลา 2 และ 24 ชั่วโมงจนได้ซีโอไลต์ Fe-Y(N) มีพื้นที่ผิว BET มีค่าน้อยมากเพียง 8.00 และ 8.29 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับผล XRF ที่ยืนยันว่าสารละลายเหล็กไนเตรดที่นำมาแลกเปลี่ยนไอออนมีความเป็นกรดทำให้เกิดการละลายอะลูมิเนียมด้วยกรด (Acid leaching) ทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมในโครงสร้างซีโอไลต์ Fe-Y(N) ลดลงอย่างเห็นได้ชัด [29] และสอดคล้องกับผลของ XRD เช่นเดียวกันที่แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกที่ซีโอไลต์ Na-Y แลกเปลี่ยนด้วยสารละลายเหล็กไนเตรดหลังแลกเปลี่ยนแล้วเกิดโครงสร้างอสัณฐาน และมีความเป็นผลึกของเหล็กออกไซด์ในรูปแบบพีคของ Fe-Y(N)

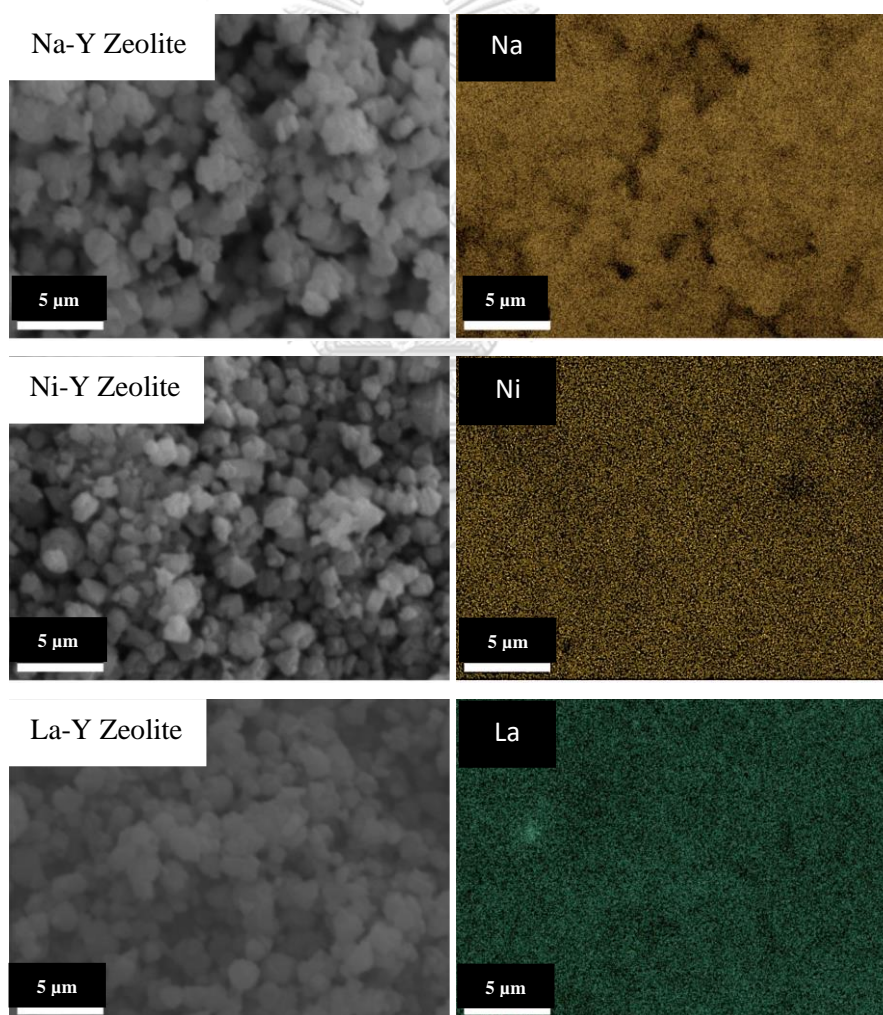
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิว BET และปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิวปอร์ที่ BET (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุน ทั้งหมด (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดของรูพรุน (°A)
Na-Y < 210 μm	852.5	0.33	0.51
Na-Y 212 μm ถึง 425 μm	819.9	0.32	0.51
Na-Y 425 μm ถึง 715 μm	799.9	0.31	0.52
Na-Y	819.9	0.32	0.51
Ni-Y	714.5	0.31	0.56
La-Y	694.1	0.3	0.52
Ce-Y	710.1	0.31	0.56
Co-Y	635.6	0.25	0.53
Cu-Y	686.0	0.26	0.52
Fe-Y(S)	507.5	0.21	0.55
Fe-Y(N) 2hr	8.00	0.01	3.19
Fe-Y(N) 24hr	8.29	0.008	32.85

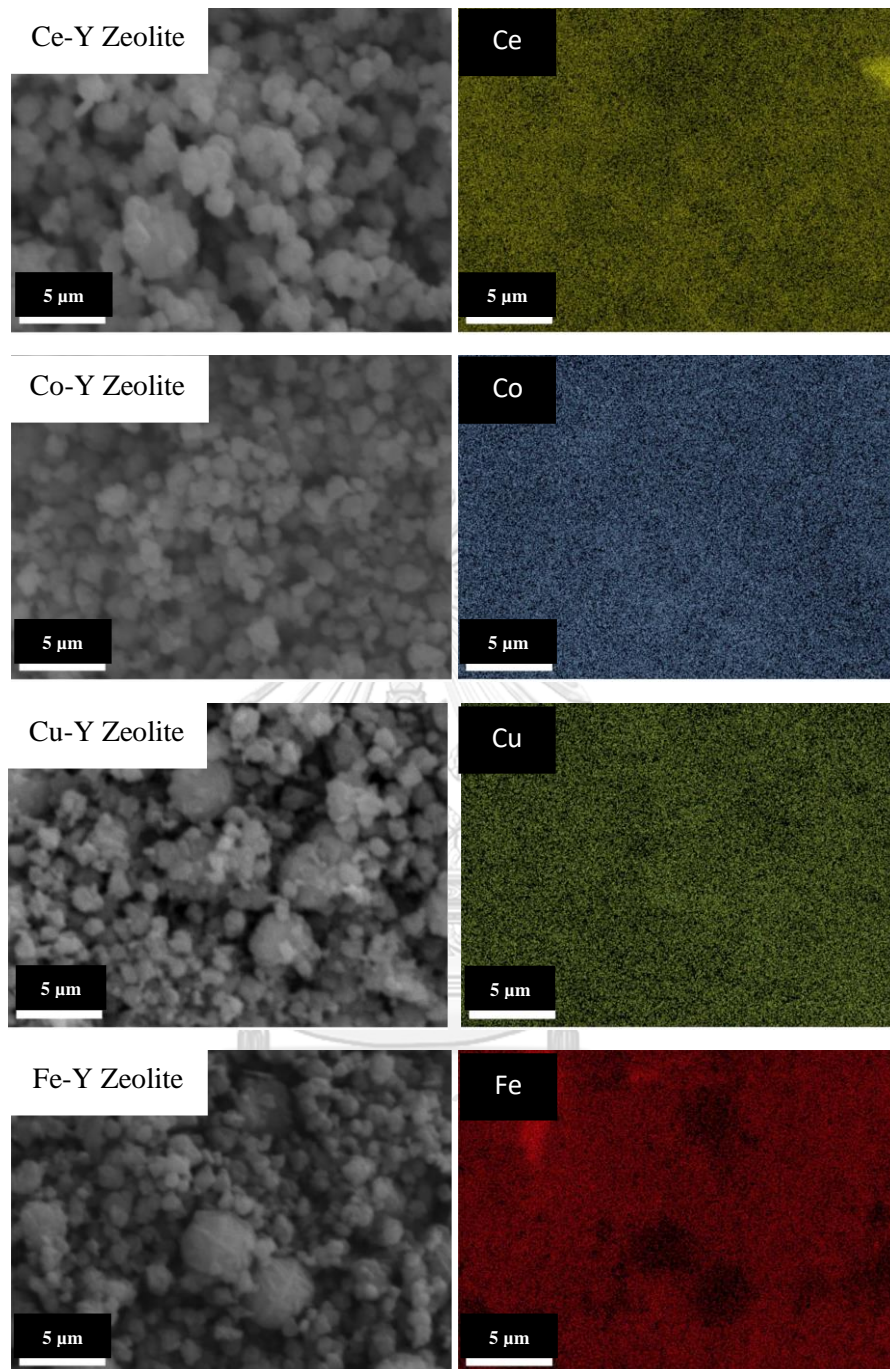


#### 4.1.4 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับในระดับจุลภาค (Scanning electron microscopy, SEM) และการวิเคราะห์ธาตุเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDX)

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Morphology) และการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการกระจายของตัวดูดซับซีโอไลต์ Y ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า จากภาพจะเห็นได้ว่าตัวดูดซับซีโอไลต์วายทั้ง 7 ชนิดมีลักษณะสัณฐานที่เหมือนกัน โดยลักษณะผลึกจะจับตัวกันเป็นก้อนกลมและรูปร่างผลึกหลายเหลี่ยมซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ที่ลักษณะผลึกมีความเหมือนกันและเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX พบว่ามีการกระจายตัวของโลหะที่พื้นผิวของซีโอไลต์วายดังรูปที่ 4.4 โดยมีลักษณะการกระจายตัวของโลหะชนิดต่างๆ บนซีโอไลต์วายอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 4.4 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวัดปริมาณโลหะด้วยเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ของตัวดูดซับซีโอไลต์วายชนิดต่างๆ

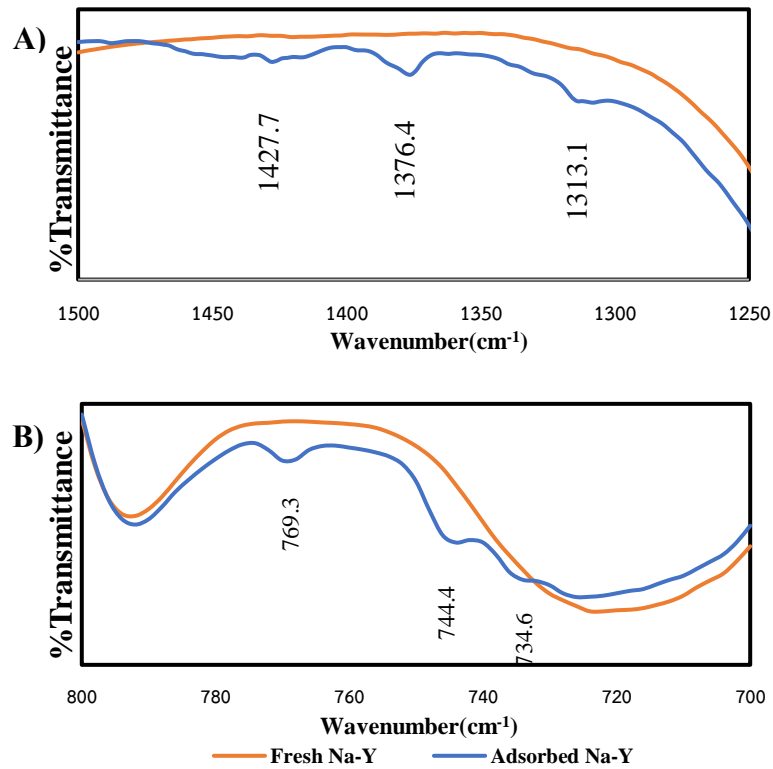


รูปที่ 4.4 (ต่อ)

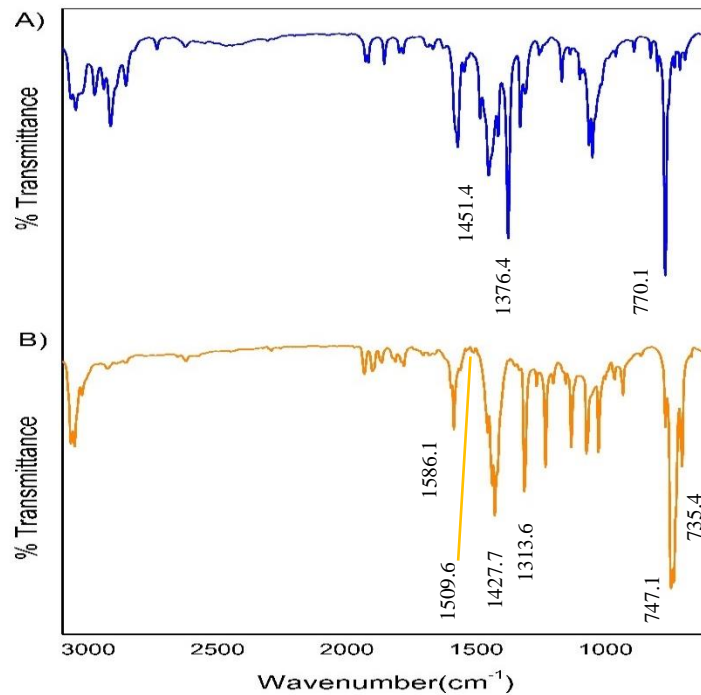
#### 4.1.5 การวิเคราะห์โดยเทคนิคการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารด้วยแสงอินฟราเรด (Fourier transform infrared Spectroscopy, FT-IR)

รูปที่ 4.5A แสดง FT-IR spectra ของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ก่อนดูดซับและหลังดูดซับ ในช่วงเลขคลื่น 1250 ถึง 1500  $\text{cm}^{-1}$  พบว่าในซีโอไลต์ Na-Y ก่อนดูดซับสารประกอบกำมะถันไม่ปรากฏพิกซ์ขึ้นในช่วงเลขคลื่น 1250 ถึง 1500  $\text{cm}^{-1}$  แต่เมื่อผ่านการดูดซับสารประกอบกำมะถันหรือ ไคเบนโซไทโอพีน (DBT) และ 4,6 ไดเมทิลไคเบนโซไทโอพีน (4,6-DMDBT) แสดงการสั่นของหมู่แอมโรแมติกที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1427.7 และ 1313.1  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพิกซ์ที่ปรากฏในตำแหน่งเดียวกันกับพิกซ์ของสาร DBT บริสุทธิ์(ของแข็ง) ดังรูป 4.6B ดังนั้นจึงสามารถยืนยันได้ว่าซีโอไลต์ Na-Y มีการดูดซับ DBT และพบพิกซ์ขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1376.4  $\text{cm}^{-1}$  เกิดขึ้นเช่นกันเมื่อผ่านการดูดซับ เป็นพิกซ์การสั่นของ C=C ของแอมโรแมติกในโครงสร้าง 4,6-DMDBT พบว่าขึ้นที่ตำแหน่งพิกซ์เดียวกันกับสาร 4,6-DMDBT บริสุทธิ์(ของแข็ง) ดังแสดงในรูป 4.6A

รูปที่ 4.5B แสดงผล FT-IR spectra ของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ก่อนดูดซับและหลังดูดซับ ในช่วงเลขคลื่น 700 ถึง 800  $\text{cm}^{-1}$  พบการเปลี่ยนแปลงของกราฟก่อนดูดซับและหลังการดูดซับ พบว่ามีพิกซ์ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งเลขคลื่น 734.6 และ 744.4  $\text{cm}^{-1}$  เป็นพิกซ์ของ DBT โดยการนำสาร DBT บริสุทธิ์(ของแข็ง) ไปวิเคราะห์เกิดพิกซ์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 735.4 และ 747.1  $\text{cm}^{-1}$  แสดงดังรูป 4.6B ในทำนองเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบซีโอไลต์ Na-Y ก่อนดูดซับกับหลังการดูดซับ ปรากฏพิกซ์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 769.3  $\text{cm}^{-1}$  และเมื่อวิเคราะห์สาร 4,6-DMDBT บริสุทธิ์(ของแข็ง) แสดงดังรูป 4.6A พบพิกซ์ปรากฏ 770.1  $\text{cm}^{-1}$  แสดงเมื่อเกิดการดูดซับของซีโอไลต์ Na-Y พิกซ์ที่ปรากฏขึ้นเกิดการเคลื่อน (Shift) ไปที่ตำแหน่งเลขคลื่นลดลงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่ามีการใช้พลังงานในการสั่นพันธะที่เพิ่มขึ้นเพราะความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron density) ในวงแอมโรแมติกลดลง ซึ่งจึงกล่าวได้ว่าพันธะคู่ของ DBT และ 4,6-DMDBT เกิดลักษณะการดูดซับด้วยพันธะพาย (pi-bond) [6,41]



รูปที่ 4.5 FTIR spectra ของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ก่อนดูดซับและหลังดูดซับที่ช่วงเลขคลื่น  
 A) 1250-1500  $\text{cm}^{-1}$ , B) 700-800  $\text{cm}^{-1}$



รูปที่ 4.6 FTIR spectra ของ A) 4,6 ไดเมทิลโดเบนโซไทโอพีน และ B) โดเบนโซไทโอพีน

ตารางที่ 4.3 FTIR spectra ของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงการสั่นหลังดูดซับในช่วงเลขคลื่น 1200-1600  $\text{cm}^{-1}$

ตัวดูดซับ	การสั่นของพันธะที่เลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	
	DBT	4,6-DMDBT
Na-Y	1427.7	1376.4, 1313.1
Ni-Y	1425.1	1445.9, 1376.1
La-Y	1426.9	1445.6, 1377.5
Ce-Y	1506.6	1448.1, 1378.0
Co-Y	1424.3	1446.6, 1377.1
Cu-Y	1509.9	1449.2, 1381.7
Fe-Y(S)	1424.1	1448.1, 1377.2

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ของตัวดูดซับของซีโอไลต์วายชนิดต่างๆ ที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อเกิดการดูดซับสารประกอบกำมะถันที่อุณหภูมิห้อง พบว่า FTIR spectra แสดงพีคการสั่นเกิดขึ้นหลังผ่านการดูดซับสารประกอบกำมะถันที่ตำแหน่งใกล้เคียงกับตำแหน่งเลขคลื่นที่  $1376.4 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1451.4 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งพีคนี้เป็นพีคการสั่นของ 4,6-DMDBT ที่ตำแหน่งการสั่นของพันธะคู่ในวงแอโรแมติก (C=C stretching) แสดงดังรูปที่ 4.6A และพบพีคที่ใกล้เคียงกับเลขคลื่น  $1427.7 \text{ cm}^{-1}$  และ  $1509.9 \text{ cm}^{-1}$  เป็นพีคของ DBT แสดงดังรูปที่ 4.6B พบว่าซีโอไลต์ Ni-Y, La-Y, Co-Y, และ Fe-Y(S) มีพีคใกล้เคียงกับ  $1427.7 \text{ cm}^{-1}$  และซีโอไลต์ Ce-Y และ Cu-Y พบพีคตำแหน่งใกล้เคียง  $1509.9 \text{ cm}^{-1}$  จากผลแสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์วายที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนมีการดูดซับสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับ

#### 4.2 การดูดซับสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในระบบการดูดซับแบบขั้นตอนเดียว

เนื่องจากน้ำมันดีเซลมีเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน พาราฟินแล้วยังมีสารประเภทอื่น องค์ประกอบหลัก 3 กลุ่ม คือ สารประกอบกำมะถัน, สารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบแอมโรแมติก งานวิจัยนี้ออกแบบน้ำมันจำลอง (Model oil) เพื่อศึกษาผลการขจัดสารประกอบกำมะถันและการขจัดสารประกอบไนโตรเจน ร่วมกับผลของสารประกอบแอมโรแมติก โดยน้ำมันจำลองได้ถูกแบ่งออกเป็น 4 ประเภทดังนี้

- น้ำมันจำลองมีเพียงสารประกอบกำมะถัน (น้ำมันจำลอง 1) เพื่อศึกษาความสามารถของตัวดูดซับในการขจัดสารประกอบกำมะถันที่สูงที่สุด
- น้ำมันจำลองมีสารประกอบไนโตรเจน (น้ำมันจำลอง 2) เพื่อศึกษาความสามารถของตัวดูดซับในการขจัดสารประกอบไนโตรเจนที่สูงที่สุด
- น้ำมันจำลองมีสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจน (น้ำมันจำลอง 3) เพื่อศึกษาผลของสารประกอบไนโตรเจนต่อความสามารถในการขจัดสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับ และศึกษาผลของสารประกอบกำมะถันต่อความสามารถในการขจัดสารประกอบไนโตรเจนของตัวดูดซับ
- น้ำมันจำลองมีสารประกอบกำมะถัน ไนโตรเจนและแอมโรแมติก (น้ำมันจำลอง 4) เพื่อศึกษาความสามารถในการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับในน้ำมันจำลองที่มีองค์ประกอบคล้ายน้ำมันดีเซลที่ใช้ทั่วไป

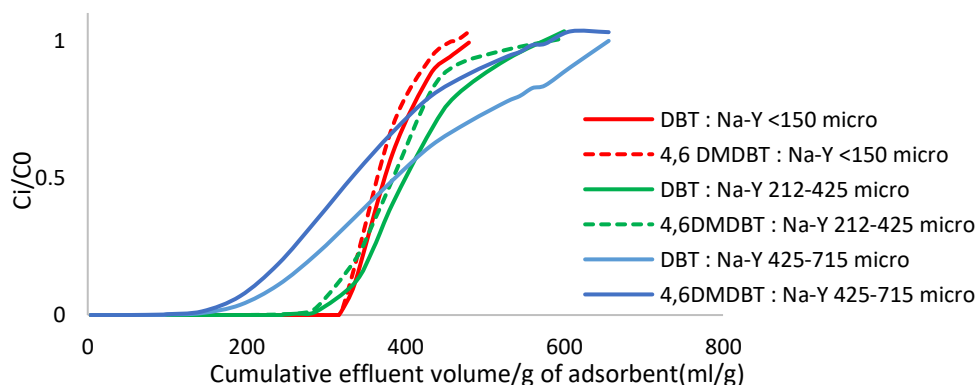
งานวิจัยนี้นำตัวดูดซับบรรจุลงในคอลัมน์แบบเบดนิ่งและจากนั้นให้ความร้อนตัวดูดซับภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และเริ่มทำการป้อนน้ำมันผ่านจากด้านบนลงสู่ด้านล่างเพื่อให้ น้ำมันจำลองผ่านและสัมผัสกับตัวดูดซับก่อนเก็บตัวอย่างน้ำมันจำลองที่ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที โดยเก็บตัวอย่างทุก 2 นาทีหรือ 2 มิลลิลิตรต่อครั้ง แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยผลการวิเคราะห์แสดงในรูปของเส้นโค้งเบรคทูร ความจุเบรคทูร ร้อยละการดูดซับเบรคทูร ความจุทั้งหมด (เวลาทั้งหมด 312 นาที) และร้อยละการดูดซับทั้งหมด

#### 4.2.1 ผลของขนาดอนุภาคของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบกำมะถัน

การศึกษาความสามารถในการกำจัดสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน คือ 1) ขนาดน้อยกว่า 150 ไมโครเมตร 2) ขนาด 212 ถึง 425 ไมโครเมตร 3) ขนาด 425 ถึง 715 ไมโครเมตร มาดูดซับน้ำมันจำลอง 1 ที่มีเพียงสารประกอบกำมะถัน โดยผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งบอกค่าความจุเบรคทูลู ร้อยละการดูดซับเบรคทูลู ความจุทั้งหมด และร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับ Na-Y ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน

จากตารางที่ 4.4 ตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ที่มีขนาดน้อยกว่า 150 ไมโครเมตรมีค่าความจุเบรคทูลูมากที่สุด เท่ากับ 0.52 และ 0.52 มิลลิโมลของ DBT และ 4,6-DMDBT ต่อกรัมของตัวดูดซับ และพบว่ามีร้อยละการดูดซับมากที่สุด คือ 79.6 และ 77.4 ตามลำดับ โดยมีค่าความจุเบรคทูลู และร้อยละการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ที่มีขนาด 212 ถึง 425 ไมโครเมตร ซึ่งมีความจุเบรคทูลู เท่ากับ 0.40 และ 0.32 มิลลิโมลของ DBT และ 4,6-DMDBT ต่อกรัมของตัวดูดซับ และพบว่ามีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 68.3 และ 64.6 ตามลำดับ และพบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ที่มีขนาด 425 ถึง 715 ไมโครเมตรมีค่าความจุเบรคทูลูน้อยที่สุด คือ 0.16 และ 0.08 มิลลิโมลของ DBT และ 4,6-DMDBT ต่อกรัมของตัวดูดซับ และพบว่ามีร้อยละการดูดซับเท่ากับ 65.7 และ 48.2 ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณการดูดซับสารประกอบกำมะถันเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดของอนุภาคของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y เล็กลง โดยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว BET ดังนั้นเมื่อขนาดอนุภาคของ Na-Y มีขนาดเล็กนั้นส่งผลให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความจุและร้อยละการดูดซับสูง [42] เป็นผลมาจากการที่ตัวดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้นทำให้เกิดช่องว่างระหว่างตัวดูดซับกับผนัง (Void fraction) ของคอลัมน์ที่บรรจุ ทำให้เกิดไหลลัดของตัวถูกดูดซับออกไปทางช่องว่างระหว่างตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ขึ้นกับผนัง (Channelling) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงเมื่อตัวดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้น [43]

Breakthrough curve of S compounds(DBT and 4,6 DMDBT)



รูปที่ 4.7 เส้นโค้งเบรคทูลูของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ขนาดอนุภาคต่างๆ ที่ได้จากการดูดซับสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลอง 1

ตารางที่ 4.4 ความจุเบรคทูลและความจุทั้งหมดของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ขนาดอนุภาคต่างๆ ในการดูดซับกำมะถันในน้ำมันจำลอง 1 อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการการเก็บตัวอย่าง 2 มิลลิลิตรต่อครั้ง (เวลา 312 นาที )

ตัวดูดซับ Na-Y ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร)	ตัวถูกดูดซับ	ปริมาณที่ ป้อน (mmol/g)	ความจุ เบรคทูล (mmol/g)	ร้อยละการ ดูดซับ เบรคทูล	ความจุ ทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละการ ดูดซับ ทั้งหมด
<150	DBT	0.78	0.52	65.8	0.63	79.6
	4,6-DMDBT	0.78	0.52	65.8	0.61	77.4
212-425	DBT	0.98	0.40	40.6	0.67	68.3
	4,6-DMDBT	0.98	0.32	32.0	0.63	64.6
425-715	DBT	1.07	0.16	14.6	0.64	59.0
	4,6-DMDBT	1.07	0.14	13.4	0.52	48.2



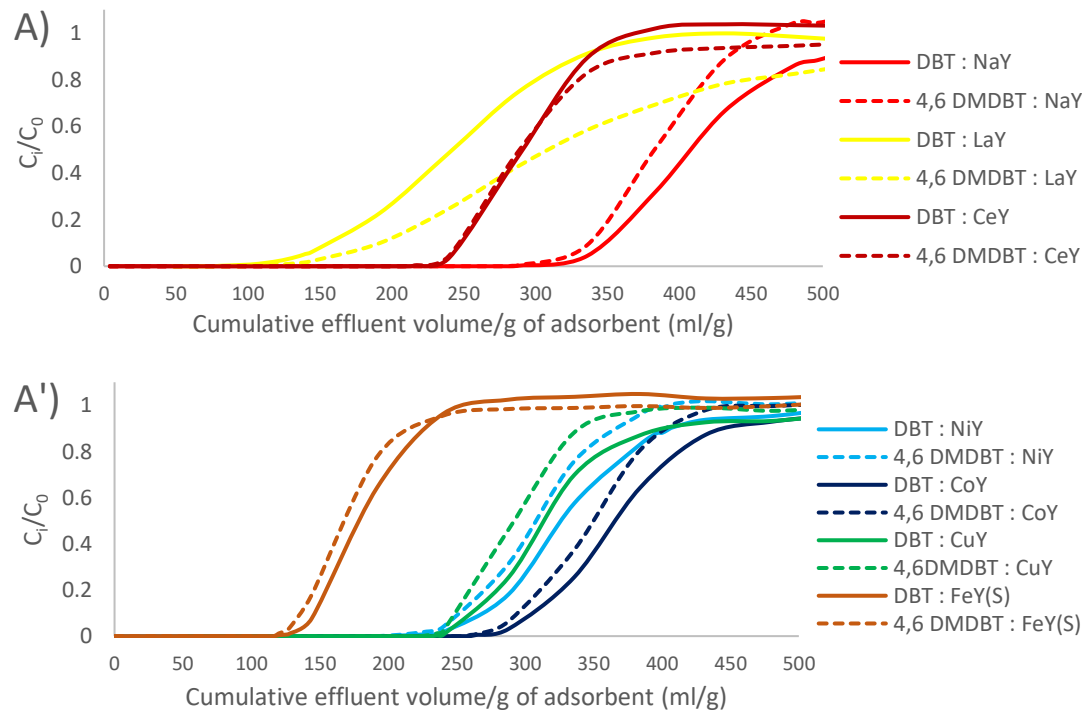
#### 4.2.2 การจัดสรรประกอบกำมะถันของตัวดูดซับในน้ำมันจำลอง 1

การศึกษาความสามารถในการจัดสรรประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลอง 1 ของตัวดูดซับต่างๆ ขนาด 212-425 ไมโครเมตร และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8 ในรูปของเส้นโค้งเบรคทรูของการดูดซับสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับต่างๆ ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละการดูดซับเบรคทรูและร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับต่างๆ (เวลา 312 นาที)

ตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.8A, A' แสดงการดูดซับในน้ำมันจำลองที่ 1 พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุดโดยมีค่าร้อยละการดูดซับเบรคทรูของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 45.5 และ 44.9 ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ยังคงมีร้อยละการดูดซับทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 67.1 และ 59.9 ตามลำดับ และตัวดูดซับซีโอไลต์ Co-Y, Ni-Y และ Cu-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยกว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y และตัวดูดซับทั้งหมดในกลุ่มโลหะไอออน +2 มีประสิทธิภาพการดูดซับใกล้เคียงกันโดยทั้งหมด โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y และ Ce-Y เป็นโลหะที่มีไอออน +3 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยกว่ากลุ่มโลหะที่มีไอออน 2+ แต่ตัวดูดซับซีโอไลต์ Fe-Y(S) ซึ่งเป็นโลหะที่มีไอออน +2 เช่นกัน แสดงผลในทางกลับกัน คือ แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำที่สุด จากวิเคราะห์พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y มีปริมาณพื้นที่ผิว 819.9 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาณของโลหะบนตัวดูดซับ 3.31 มิลลิโมลต่อกรัม มากกว่าตัวดูดซับตัวอื่นๆ เป็นสาเหตุให้ตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y มีค่าร้อยละความจุเบรคทรูและร้อยละความจุทั้งหมดมากกว่าตัวดูดซับตัวอื่นที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าและปริมาณไอออนโลหะน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบไอออนโลหะ +2 และ +3 พบว่าไอออนโลหะ +2 มีประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่าโลหะกลุ่ม +3 เพราะเนื่องจากโลหะกลุ่ม +2 นั้นส่งเสริมลักษณะการดูดซับในรูปแบบพันธะพายและดูดซับโดยตรง [42] ในขณะที่ไอออนโลหะ +3 นั้นส่งเสริมการดูดซับแบบโดยตรงมากกว่า [28, 37] และคาดการณ์ว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Fe-Y(S) เป็นไอออนโลหะ +2 แต่มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำที่สุดนั้นเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับน้อยที่สุด คือ 507.5 ตารางเมตรต่อกรัม จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำที่สุด

การเปรียบเทียบจากร้อยละการดูดซับสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับในน้ำมันจำลองที่ 1 แสดงดังนี้

น้ำมันจำลองที่ 1 : Na-Y ~ Co-Y > Ni-Y > Cu-Y ~ La-Y > Ce-Y > Fe-Y(S)



รูปที่ 4.8 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงการดูดซับสารประกอบกำมะถันของซีโอไลต์ A) Na-Y, La-Y และ Ce-Y A') Ni-Y, Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) ในน้ำมันจำลองที่ 1

ตารางที่ 4.5 ร้อยละการดูดซับเบรคทลูและร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลอง 1 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการเก็บตัวอย่าง 2 นาทีต่อครั้ง (เวลา 312 นาที)

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	ปริมาณที่ป้อน (mmol/g)	ความจุ เบรคทลู (mmol/g)	ร้อยละการดูด ซับเบรคทลู	ความจุ ทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละการดูด ซับทั้งหมด
Na-Y	DBT	1.02	0.47	45.5	0.69	67.1
	4,6-DMDBT	1.02	0.46	44.9	0.61	44.9
La-Y	DBT	1.02	0.13	12.2	0.41	40.3
	4,6-DMDBT	1.02	0.18	17.9	0.59	57.1
Ce-Y	DBT	1.02	0.35	33.9	0.47	45.8
	4,6-DMDBT	1.02	0.34	33.3	0.51	49.5
Ni-Y	DBT	1.02	0.33	32.1	0.55	54.1
	4,6-DMDBT	1.02	0.32	30.8	0.50	48.8
Co-Y	DBT	1.02	0.42	41.7	0.62	60.7
	4,6-DMDBT	1.02	0.42	41.0	0.58	56.1
Cu-Y	DBT	1.02	0.36	35.3	0.54	52.8
	4,6-DMDBT	1.02	0.32	30.8	0.49	47.9
Fe-Y(S)	DBT	1.02	0.19	20.1	0.28	29.7
	4,6-DMDBT	1.02	0.19	20.1	0.29	30.4

Model oil 1: DBT และ 4,6-DMDBT

### 4.2.3 การจัดสรรประกอบไนโตรเจนของตัวดูดซับในน้ำมันจำลอง 2

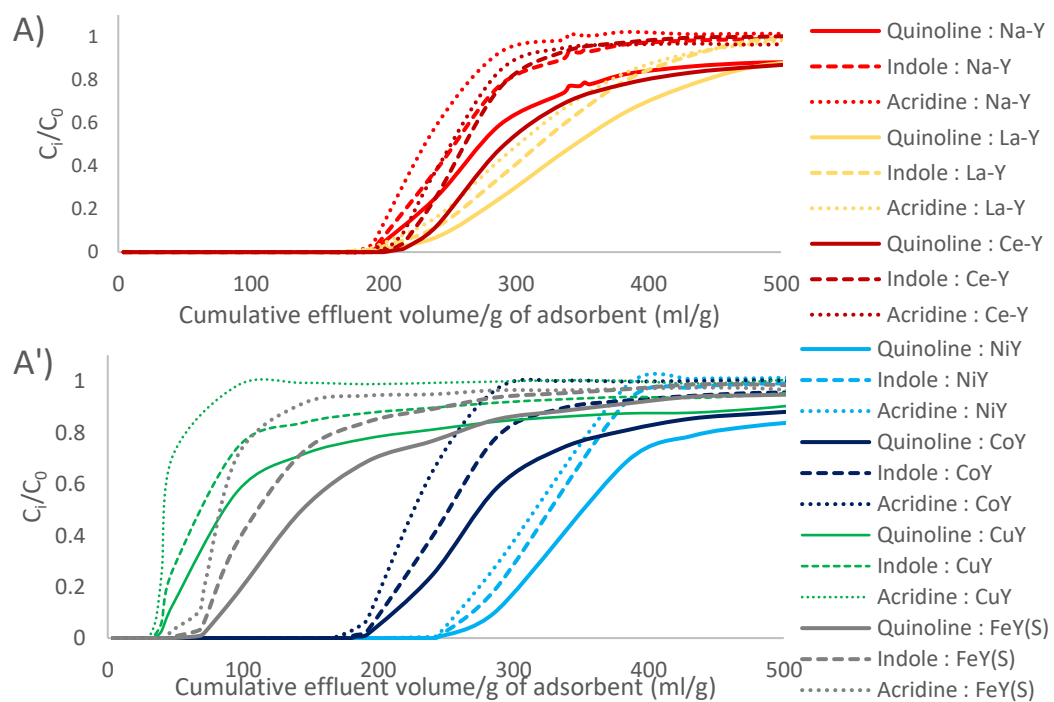
การศึกษาความสามารถในการจัดสรรประกอบไนโตรเจนในน้ำมันจำลอง 2 ของตัวดูดซับต่างๆ ขนาด 212-425 ไมโครเมตร และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 ในรูปของเส้นโค้งเบรคทูลของการดูดซับสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับต่างๆ ตารางที่ 4.6 แสดงร้อยละการดูดซับเบรคทูล และร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับต่างๆ (เวลา 312 นาที)

จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.9B, B' แสดงการดูดซับในน้ำมันจำลองที่ 2 พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุดโดยมีค่าร้อยละการดูดซับเบรคทูลของควิโนลีน, อินโดล และอะคริตินเท่ากับ 38.5, 38.5 และ 30.7 ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y ยังคง มีร้อยละการดูดซับทั้งหมดของควิโนลีน, อินโดล และอะคริตินเท่ากับ 61.8, 52.8 และ 50.3 ตามลำดับ และตัวดูดซับ La-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกันกับ Ni-Y โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y, Ce-Y, Co-Y และ Fe-Y(S) มีประสิทธิภาพในการดูดซับใกล้เคียงกันและพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนของ Cu-Y ดูดซับสารประกอบไนโตรเจนได้น้อยที่สุด จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงที่สุดและมากกว่า Na-Y ที่มีพื้นที่ผิวและปริมาณของโลหะไอออนสูงที่สุด เนื่องจากการดูดซับผ่านพันธะพายมีลักษณะการดูดซับ 2 รูปแบบ คือ 1) การดูดซับแบบ  $\sigma$ -donation เป็นการดูดซับโดยอิเล็กตรอนจากออร์บิทัลของพันธะพายในตัวถูกดูดซับ (ควิโนลีน, อินโดล และ อะคริติน) นั้นเกิดการใช้อิเล็กตรอนร่วมกับตำแหน่งออร์บิทัล s ของโลหะไอออน โดยการดูดซับลักษณะนี้เกิดกับตัวดูดซับที่ตำแหน่งออร์บิทัล s มีช่องว่างซึ่งงานวิจัยนี้ตัวดูดซับทั้งหมดมีสมบัตินี้ และ 2) การดูดซับแบบ d- $\pi^*$  back donation เป็นการดูดซับโดยอิเล็กตรอนจากออร์บิทัล d ของโลหะไอออน (Ni, Co, Cu, Fe, La และ Ce) เกิดใช้อิเล็กตรอนร่วมกับตำแหน่งพันธะพาย\* (antibonding p orbital) ของตัวถูกดูดซับ โดยการดูดซับลักษณะนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะโลหะกลุ่มธาตุทรานซิชัน แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ Na-Y มีลักษณะการดูดซับพันธะพายเพียงรูปแบบเดียว คือ  $\sigma$ -donation ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำกว่าซีโอไลต์ Ni-Y ที่มีลักษณะการดูดซับได้ทั้ง 2 รูปแบบ คือ  $\sigma$ -donation และ d- $\pi^*$  back donation [44,45] และจากการศึกษาพบว่า การดูดซับสารประกอบไนโตรเจนชนิดต่างๆ เรียงลำดับตัวถูกดูดซับที่ดูดซับได้ดีจากมากไปน้อยดังนี้ คือ ควิโนลีน > อินโดล > อะคริติน โดยอะคริตินนั้นถูกดูดซับได้น้อยที่สุดเนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่กว่าควิโนลีนและอินโดล โดยควิโนลีนและอินโดลนั้นมีขนาดโครงสร้างโมเลกุลที่ใกล้เคียงกัน แต่พบว่าควิโนลีนมีความสามารถดูดซับได้ดีกว่าอินโดล เนื่องจากควิโนลีนเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบสประเภทลิวอิสและตำแหน่งโลหะบนซีโอไลต์มีความเป็นกรดลิวอิสเช่นเดียวกัน จึงทำให้เกิดการดูดซับโดยตรงระหว่างไนโตรเจนในโครงสร้างโมเลกุลควิโนลีน แต่อินโดลนั้นมีฤทธิ์เป็นกลาง ทำให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจนจะเข้าไปเคลื่อนที่ในระบบพันธะ

พายอเล็กตรอนของแอรโรแมติกหรือภายในโครงสร้างของโมเลกุลอินโดวทำให้เกิดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนภายในโครงสร้างสารประกอบอินโดว จึงทำเป็นสาเหตุทำให้เกิดการดูดซับแบบพันธะพายหรือพันธะไฮโดรเจนของโครงสร้างโมเลกุลสารประกอบอินโดว [46]

การเปรียบเทียบจากร้อยละการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนของตัวดูดซับในน้ำมันจำลองที่ 2 แสดงดังนี้

น้ำมันจำลองที่ 2 : Ni-Y ~ La-Y > Na-Y ~ Ce-Y ~ Co-Y > Fe-Y(S) > Cu-Y



รูปที่ 4.9 เส้นโค้งเบรคทธรูของตัวดูดซับซีไอโอด์ชนิดต่างๆ แสดงการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนของซีไอโอด์ A) Na-Y, Ni-Y, La-Y และ Ce-Y A') Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) ในน้ำมันจำลองที่ 2

ตารางที่ 4.6 ร้อยละการดูดซับเบรคทรูและร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันจำลอง 2 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการเก็บตัวอย่าง 2 นาทีต่อครั้ง (เวลา 312 นาที)

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	ปริมาณที่ป้อน (mmol/g)	ความจุเบรคทรู (mmol/g)	ร้อยละการดูดซับเบรคทรู	ความจุทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละการดูดซับทั้งหมด
Na-Y	Quinoline	1.02	0.30	29.5	0.57	55.8
	Indole	1.02	0.30	28.8	0.50	48.4
	Acridine	1.02	0.29	28.2	0.46	44.8
La-Y	Quinoline	1.02	0.30	28.8	0.61	58.9
	Indole	1.02	0.28	26.9	0.53	51.8
	Acridine	1.02	0.27	26.2	0.51	50.3
Ce-Y	Quinoline	1.02	0.33	32.1	0.56	54.2
	Indole	1.02	0.34	32.7	0.46	44.6
	Acridine	1.02	0.32	30.8	0.44	42.9
Ni-Y	Quinoline	1.02	0.39	38.5	0.63	61.8
	Indole	1.02	0.39	38.4	0.54	52.8
	Acridine	1.02	0.32	30.8	0.52	50.3
Co-Y	Quinoline	1.02	0.30	28.8	0.52	51.1
	Indole	1.02	0.28	26.9	0.45	44.3
	Acridine	1.02	0.27	26.2	0.38	37.1
Cu-Y	Quinoline	1.02	0.05	5.1	0.26	25.5
	Indole	1.02	0.04	4.5	0.19	18.7
	Acridine	1.02	0.04	4.5	0.09	8.3
Fe-Y(S)	Quinoline	1.02	0.08	12.5	0.31	49.5
	Indole	1.02	0.07	11.5	0.23	36.6
	Acridine	1.02	0.07	10.4	0.18	28.8

Model oil 2: Quinoline, Indole และ Acridine

#### 4.2.4 การขจัดสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนของตัวดูดซับในน้ำมันจำลอง 3

การศึกษาความสามารถในการขจัดสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนในน้ำมันจำลองที่ 3 ของตัวดูดซับต่างๆ ขนาด 212-425 ไมโครเมตร แสดงผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.10 ในรูปของเส้นโค้งเบรคทรูของการดูดซับไนโตรเจนของตัวดูดซับต่างๆ และในตารางที่ 4.7 ซึ่งบอกค่าร้อยละการดูดซับเบรคทรู และร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับต่างๆ (เวลา 312 นาที)

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.10A, A' แสดงการดูดซับในน้ำมันจำลองที่ 3 ที่มีสารประกอบไนโตรเจนร่วมกับสารประกอบกำมะถันพบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบกำมะถันลดลง เนื่องจากเกิดการแข่งขันในการดูดซับระหว่างสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถัน จากการศึกษาการดูดซับน้ำมันจำลอง 3 โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y มีร้อยละการดูดซับทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 20.3 และ 19.4 ตามลำดับ และตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y มีร้อยละการดูดซับทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 29.0 และ 28.9 ตามลำดับ

ตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y มีร้อยละการดูดซับทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 26.9 และ 24.4 ตามลำดับ พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y และ Ni-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงอย่างมากเนื่องจากตัวดูดซับทั้งสองมีความสามารถในการดูดซับสารประกอบกำมะถันได้ดีในน้ำมันจำลองที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันจำลองที่ 3 ที่มีสารประกอบไนโตรเจนร่วมกับสารประกอบกำมะถัน แสดงให้เห็นว่าสารประกอบไนโตรเจนมีสมบัติในการถูกดูดซับหรือแข่งขันดีกว่าสารประกอบกำมะถันเพราะความเป็นเบสลิวิสของควิโนลีนและอะครีดีน และการจับที่ตำแหน่งพันธะพายของควิโนลีน อินโดล และอะครีดีน งานวิจัยของ Shi และคณะ [33] เสนอว่าการดูดซับของทุกตัวดูดซับที่มีตำแหน่งกรดลิวิสนั้นเหมาะสมในการดูดซับสารประกอบกำมะถันที่ตำแหน่งพันธะพาย และตำแหน่งกรดบรอนสเต็ดของตัวดูดซับนั้นเหมาะสมต่อการดูดซับโดยตรงระหว่างกำมะถันและโลหะบนตัวดูดซับ จากงานวิจัยนี้แสดงไอออนโลหะต่างๆ มีสมบัติเป็นกรดลิวิสจึงทำให้เกิดการดูดซับสารประกอบกำมะถันที่ตำแหน่งพันธะพายเป็นหลัก ดังนั้นสารประกอบไนโตรเจนที่ดูดซับโดยตรงและพันธะพายจึงมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าสารประกอบกำมะถันที่ดูดซับแบบพันธะพายเป็นหลัก

การเปรียบเทียบจากร้อยละการดูดซับสารประกอบกำมะถันของตัวดูดซับในน้ำมันจำลองที่ 3 แสดงดังนี้

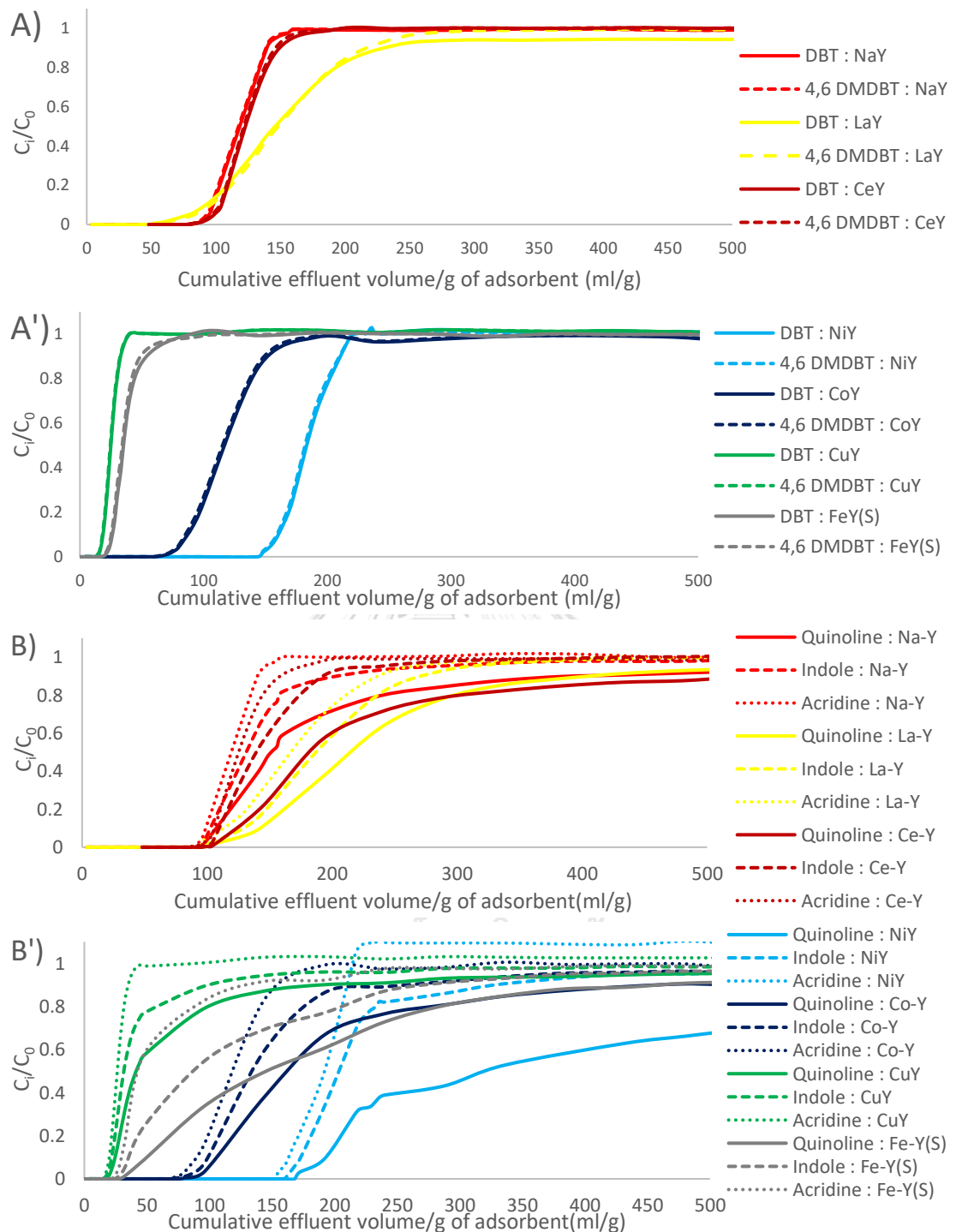
น้ำมันจำลองที่ 3 : Ni-Y > La-Y > Ce-Y ~ Na-Y ~ Co-Y > Fe-Y(S) > Cu-Y

ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.10B, B' แสดงการดูดซับในน้ำมันจำลองที่ 3 พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y ยังคงมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุด คือ ค่าร้อยละการดูดซับเบรคทรูของควิโนลีน, อินโดว และอะคริตินเท่ากับ 26.9 , 25.6 และ 24.3 ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y ยังคง มีร้อยละการดูดซับทั้งหมดของควิโนลีน, อินโดว และอะคริตินเท่ากับ 60.7 , 37.1 และ 24.3 ตามลำดับ และรองลงมา คือ ตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y และ Ce-Y เป็นโลหะประจุ +3 แสดงให้เห็นว่า ร้อยละการดูดซับทั้งหมดลดลงเพียงเล็กน้อย โดยแลนทานัมและซีเรียมนั้นมีความเป็นกรดลิวอิสซึ่งทำให้สามารถดูดซับสารประกอบไนโตรเจนที่มีฤทธิ์เป็นเบสลิวอิสได้ดี และดูดซับสารอินทรีย์ที่เป็นกลาง (อินโดว) ด้วยตำแหน่งพันธะพายในรูปแบบโมเลกุลระนาบอยู่บนโลหะบนตัวดูดซับ [47] ทั้งนี้ยังพบว่า ความสามารถการดูดซับ (ร้อยละการดูดซับทั้งหมด) Na-Y, Co-Y, Fe-Y(S) และ Cu-Y ลดลงแบบ ไกล่เคียงกัน

การเปรียบเทียบจากร้อยละการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนของตัวดูดซับในน้ำมันจำลองที่ 3 แสดงดังนี้

น้ำมันจำลองที่ 3 : Ni-Y > Ce-Y > La-Y > Co-Y ~ Na-Y > Fe-Y(S) > Cu-Y





รูปที่ 4.10 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงการดูดซับสารประกอบในน้ำมันจำลองที่ 3 ของซีโอไลต์ :

A) Na-Y, La-Y และ Ce-Y    A') Ni-Y, Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) การดูดซับสารประกอบกำมะถัน

B) Na-Y, La-Y และ Ce-Y    B') Ni-Y, Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) การดูดซับสารประกอบไนโตรเจน

ตารางที่ 4.7 ร้อยละการดูดซับเบรคทรูและร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจน ในน้ำมันจำลอง 3 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการเก็บตัวอย่าง 2 นาทีต่อครั้ง (เวลา 312 นาที)

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	ปริมาณที่ป้อน (mmol/g)	ความจุเบรคทรู (mmol/g)	ร้อยละการดูดซับเบรคทรู	ความจุทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละการดูดซับทั้งหมด
Na-Y	DBT	1.02	0.13	12.8	0.21	20.3
	4,6 DMDBT	1.02	0.12	12.2	0.20	19.4
	Quinoline	1.02	0.15	14.7	0.36	35.5
	Indole	1.02	0.15	14.7	0.28	26.8
	Acridine	1.02	0.14	14.1	0.21	20.6
La-Y	DBT	1.02	0.08	8.0	0.28	26.9
	4,6 DMDBT	1.02	0.08	8.0	0.25	24.4
	Quinoline	1.02	0.16	16.7	0.40	42.6
	Indole	1.02	0.16	16.7	0.33	34.3
	Acridine	1.02	0.15	15.9	0.29	30.6
Ce-Y	DBT	1.02	0.13	12.2	0.21	20.5
	4,6 DMDBT	1.02	0.13	12.2	0.21	20.2
	Quinoline	1.02	0.16	18.2	0.40	46.1
	Indole	1.02	0.14	16.6	0.25	28.7
	Acridine	1.02	0.14	15.9	0.22	25.9
Ni-Y	DBT	1.02	0.24	23.1	0.30	29.0
	4,6 DMDBT	1.02	0.24	23.1	0.30	28.9
	Quinoline	1.02	0.27	26.9	0.28	60.7
	Indole	1.02	0.26	25.6	0.26	37.1
	Acridine	1.02	0.25	24.4	0.25	23.9

Model oil 3: Quinoline, Indole, Acridine, DBT และ 4,6-DMDBT

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	ปริมาณที่ป้อน (mmol/g)	ความจุ เบรคทรู (mmol/g)	ร้อยละการดูด ซับเบรคทรู	ความจุ ทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละการดูด ซับทั้งหมด
Co-Y	DBT	1.02	0.10	0.10	0.21	20.4
	4,6 DMBT	1.02	0.09	0.09	0.20	19.3
	Quinoline	1.02	0.13	12.2	0.36	34.8
	Indole	1.02	0.11	10.9	0.27	26.5
	Acridine	1.02	0.11	10.9	0.21	20.1
Cu-Y	DBT	1.02	0.02	1.9	0.05	4.7
	4,6 DMBT	1.02	0.02	1.9	0.04	4.1
	Quinoline	1.02	0.03	2.7	0.15	15.9
	Indole	1.02	0.02	2.1	0.09	9.8
	Acridine	1.02	0.02	2.1	0.02	2.6
Fe-Y(S)	DBT	1.02	0.03	2.7	0.07	7.2
	4,6 DMBT	1.02	0.03	2.8	0.07	6.9
	Quinoline	1.02	0.05	4.9	0.33	34.6
	Indole	1.02	0.04	4.2	0.22	23.5
	Acridine	1.02	0.03	3.4	0.12	12.9

Model oil 3: Quinoline, Indole, Acridine, DBT และ 4,6-DMBT

#### 4.2.5 ผลของสารประกอบแอโรแมติกต่อการจัดสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนของตัวดูดซับในน้ำมันจำลอง 4

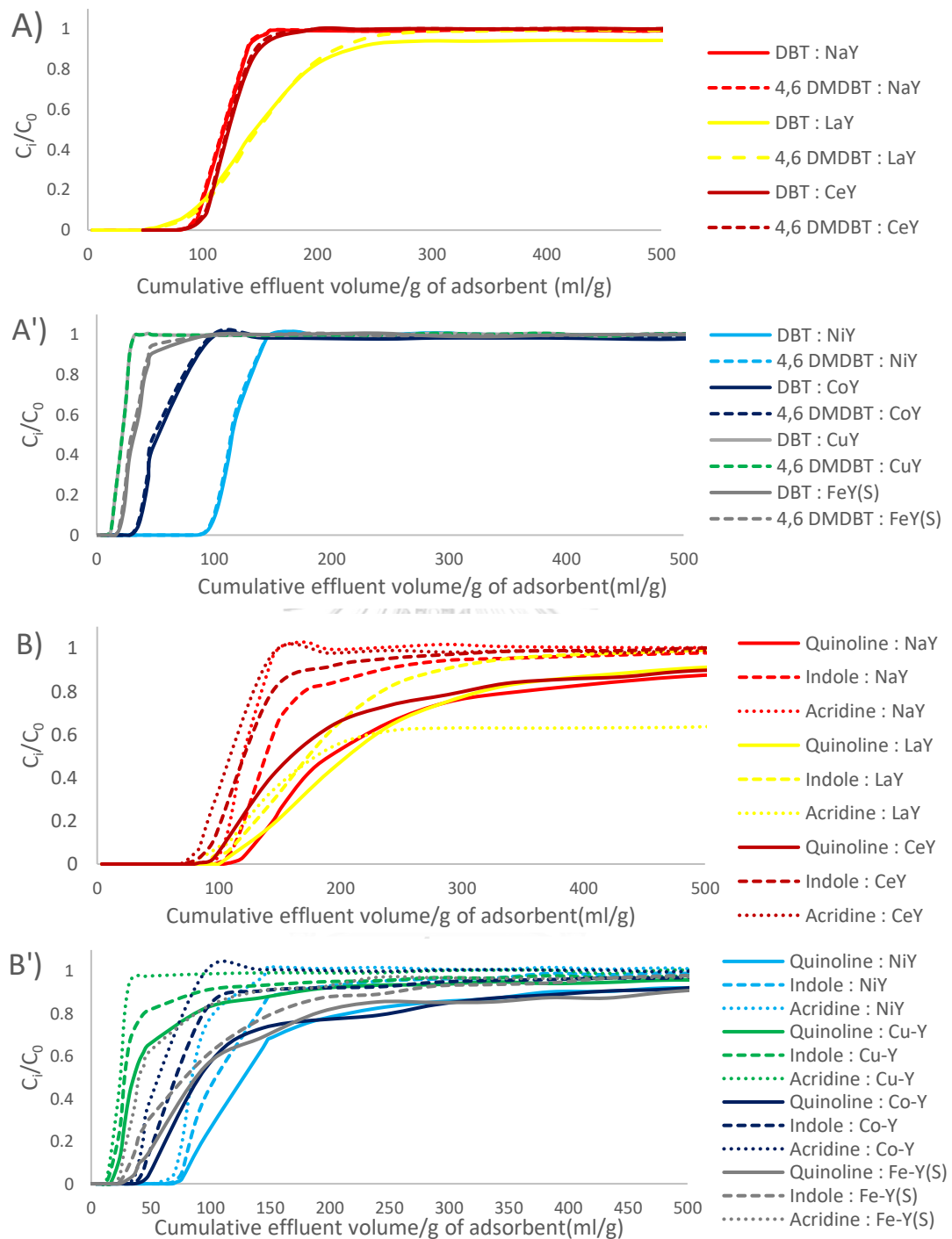
การศึกษาความสามารถในการจัดสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนในน้ำมันจำลอง 4 ของตัวดูดซับต่างๆ ขนาด 212-425 ไมโครเมตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11 ในรูปของเส้นโค้งเบรคทรูของการดูดซับไนโตรเจนของตัวดูดซับต่างๆ ตารางที่ 4.9 ซึ่งบอกค่าร้อยละการดูดซับเบรคทรูและร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับต่างๆ (เวลา 312 นาที)

ตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.11A, A' แสดงการดูดซับในน้ำมันจำลองที่ 4 ที่มีสารประกอบไนโตรเจน, สารประกอบกำมะถันและสารประกอบแอโรแมติกพบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ทุกชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงมากกว่าเดิมเมื่อเทียบกับน้ำมันจำลองโมเดลที่ 3 เนื่องจากเกิดการแข่งขันในการดูดซับระหว่างสารประกอบทั้ง 3 ชนิด จากการศึกษาดูดซับน้ำมันจำลอง 4 โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y มีร้อยละการดูดซับทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 14.5 และ 14.9 ตามลำดับ และตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y มีร้อยละการดูดซับทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 18.8 และ 18.6 ตามลำดับ ตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y มีร้อยละการดูดซับทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 19.6 และ 20.4 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสารประกอบแอโรแมติกนั้นส่งผลต่อให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบกำมะถันลดลง แต่มีผลน้อยกว่าสารประกอบไนโตรเจนที่มีความสามารถในการแข่งขันดูดซับมากกว่า [12]

ตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.11B, B' โดยแสดงการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y มีค่าการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนสูงสุด โดยมีค่าร้อยละการดูดซับเบรคทรูของควิโนลีน, อินโดว และอะคริตินเท่ากับ 16.0 , 15.4 และ 12.8 ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ยังคงมีร้อยละการดูดซับทั้งหมดของควิโนลีน, อินโดว และอะคริตินเท่ากับ 40.2 , 32.0 และ 26.7 รองลงมาคือ ซีโอไลต์ Ni-Y พบว่าสารประกอบแอโรแมติกส่งผลให้ซีโอไลต์ Ni-Y ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ La-Y จึงสามารถยืนยันได้ว่าซีโอไลต์ Ni-Y มีการแข่งขันการดูดซับด้วยตำแหน่งพันธะพายระหว่างโมเลกุลของสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบแอโรแมติก ซึ่งแตกต่างจากตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ที่มีลักษณะการดูดซับโดยตรง

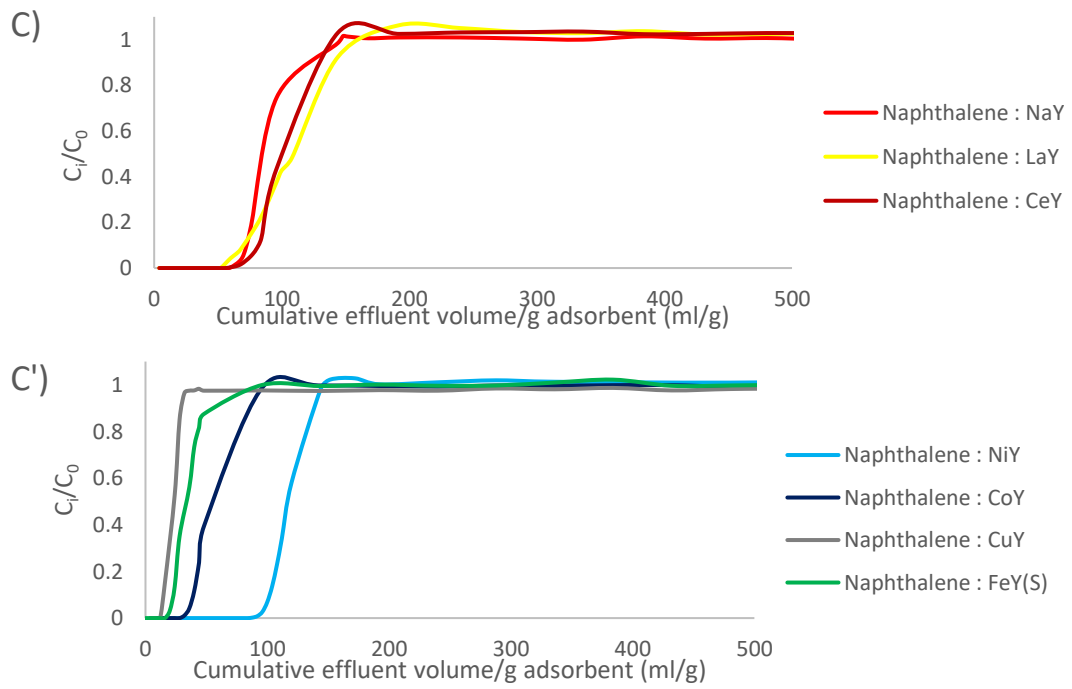
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบร้อยละการดูดซับทั้งหมดของสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันจำลอง 4 ของตัวดูดซับต่างๆ

สารประกอบ	ลำดับร้อยละการดูดซับทั้งหมด
สารประกอบกำมะถัน	La-Y > Ni-Y > Ce-Y > Na-Y > Co-Y > Fe-Y(S) > Cu-Y
สารประกอบไนโตรเจน	La-Y > Ni-Y > Ce-Y > Na-Y > Fe-Y(S) > Co-Y > Cu-Y



รูปที่ 4.11 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงการดูดซับสารประกอบในน้ำมันจำลองที่ 4 ของซีโอไลต์ :

- A) Na-Y, La-Y และ Ce-Y    A') Ni-Y, Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) การดูดซับสารประกอบกำมะถัน  
 B) Na-Y, La-Y และ Ce-Y    B') Ni-Y, Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) การดูดซับสารประกอบไนโตรเจน  
 C) Na-Y, La-Y และ Ce-Y    C') Ni-Y, Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) การดูดซับสารประกอบแอรอแมติก



รูปที่ 4.11 (ต่อ)



ตารางที่ 4.9 ร้อยละการดูดซับเบรคทรูและร้อยละการดูดซับทั้งหมดของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบกำมะถัน ไนโตรเจนและแอโรแมติกในน้ำมันจำลอง 4 ที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการเก็บตัวอย่าง 2 นาทีต่อครั้ง (เวลา 312 นาที)

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	ปริมาณที่ ป้อน (mmol/g)	ความจุ เบรคทรู (mmol/g)	ร้อยละการ ดูดซับ เบรคทรู	ความจุ ทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละการ ดูดซับ ทั้งหมด
Na-Y	DBT	1.02	0.09	8.9	0.15	14.5
	4,6 DMDBT	1.02	0.09	8.3	0.15	14.9
	Naphthalene	1.71	0.15	14.2	0.24	14.2
	Quinoline	1.02	0.09	10.6	0.28	32.3
	Indole	1.02	0.10	11.4	0.20	23.3
	Acridine	1.02	0.09	9.8	0.14	16.3
La-Y	DBT	1.02	0.09	8.3	0.20	19.5
	4,6 DMDBT	1.02	0.09	8.3	0.21	20.4
	Naphthalene	1.71	0.14	8.3	0.26	14.9
	Quinoline	1.02	0.16	16.0	0.41	40.2
	Indole	1.02	0.16	15.4	0.33	32.0
	Acridine	1.02	0.13	12.8	0.27	26.7
Ce-Y	DBT	1.02	0.12	11.5	0.18	18.0
	4,6 DMDBT	1.02	0.09	8.9	0.16	15.7
	Naphthalene	1.71	0.15	8.9	0.25	14.5
	Quinoline	1.02	0.16	15.4	0.37	36.1
	Indole	1.02	0.14	13.5	0.23	22.3
	Acridine	1.02	0.12	11.5	0.20	19.0
Ni-Y	DBT	1.02	0.13	13.5	0.19	18.8
	4,6 DMDBT	1.02	0.13	12.8	0.19	18.6
	Naphthalene	1.71	0.23	13.5	0.31	18.1
	Quinoline	1.02	0.17	16.7	0.42	41.4
	Indole	1.02	0.16	15.3	0.27	26.3
	Acridine	1.02	0.13	12.8	0.19	18.9

Model oil 4: Quinoline, Indole, Acridine, DBT, 4,6-DMDBT และ Naphthalene

ตารางที่ 4.9 (ต่อ)

ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	ปริมาณที่ ป้อน (mmol/g)	ความจุ เบรคทรู (mmol/g)	ร้อยละการ ดูดซับ เบรคทรู	ความจุ ทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละการ ดูดซับ ทั้งหมด
Co-Y	DBT	1.02	0.05	4.5	0.11	11.1
	4,6 DMDBT	1.02	0.05	4.5	0.10	9.9
	Naphthalene	1.71	0.08	4.5	0.17	10.0
	Quinoline	1.02	0.06	5.7	0.27	25.9
	Indole	1.02	0.05	4.5	0.16	15.5
	Acridine	1.02	0.05	4.5	0.09	0.09
Cu-Y	DBT	1.02	0.02	1.9	0.04	3.5
	4,6 DMDBT	1.02	0.01	1.3	0.04	3.5
	Naphthalene	1.71	0.03	1.9	0.10	5.6
	Quinoline	1.02	0.03	2.5	0.14	13.5
	Indole	1.02	0.02	1.9	0.09	9.1
	Acridine	1.02	0.02	1.9	0.04	4.1
Fe-Y(S)	DBT	1.02	0.03	2.6	0.06	5.7
	4,6 DMDBT	1.02	0.03	2.6	0.06	5.4
	Naphthalene	1.71	0.04	2.6	0.10	5.8
	Quinoline	1.02	0.04	3.8	0.26	25.3
	Indole	1.02	0.03	3.2	0.19	18.4
	Acridine	1.02	0.03	2.5	0.12	12.1

Model oil 4: Quinoline, Indole, Acridine, DBT, 4,6-DMDBT และ Naphthalene



#### 4.2.6 การเปลี่ยนแปลงค่าความจุเบรคทูลของสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนในน้ำมัน จำลองต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบผลของมีสารประกอบไนโตรเจนต่อการขจัดสารประกอบกำมะถันและผลของสารประกอบกำมะถันต่อการขจัดสารประกอบไนโตรเจน หรือสารประกอบแโรแมติกส่งผลต่อการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถัน พบว่าค่าความจุเบรคทูลของตัวดูดซับทุกตัวลดลงเมื่อเทียบกับค่าความจุเบรคทูลของสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลองที่ 1 และพบว่าค่าความจุเบรคทูลของสารประกอบไนโตรเจนน้ำมันจำลองที่ 2 นั้นลดลงเช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.10 โดยการลดลงมีค่าที่ต่างกันไปตามชนิดของตัวดูดซับ แสดงให้เห็นถึงประเภทของการดูดซับสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนของตัวดูดซับแต่ละชนิดนั้นดูดซับสารประกอบต่างๆ แตกต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาการดูดซับสารประกอบกำมะถันพบว่าในน้ำมันจำลองที่ 3 ที่มีสารประกอบไนโตรเจนและกำมะถัน พบว่า ตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y จะมียุทธศาสตร์การลดลงของค่าความจุเบรคทูลน้อยที่สุดตรงข้ามกับตัวดูดซับ ซีโอไลต์ Na-Y เป็นผลมาจากการที่ตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y นั้นมีลักษณะการดูดซับเพียงรูปแบบเดียว คือ การดูดซับแบบพันธะพายในรูปแบบ  $\sigma$ -donation ส่งผลให้ค่าการลดลงของความจุเบรคทูลค่อนข้างมาก แต่ลักษณะการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y แสดงการดูดซับที่มากกว่า คือ การดูดซับในรูปแบบโดยตรงร่วมกับการดูดซับแบบพันธะพายในรูปแบบ  $\sigma$ -donation และ  $d-\pi^*$  back donation แสดงให้เห็นว่ามีลักษณะการดูดซับที่มากกว่า Na-Y ทำให้ตัวดูดซับ Ni-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนและกำมะถันสูงที่สุดในน้ำมันจำลองที่ 3 และพบว่าซีโอไลต์ La-Y และ Ce-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงที่ใกล้เคียงกัน และมีประสิทธิภาพการดูดซับรองลงมาจากตัวดูดซับซีโอไลต์ Ni-Y เนื่องจากตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y และ Ce-Y นั้นส่งเสริมการดูดซับแบบโดยตรงและมีปริมาณของโลหะไอออนที่น้อยกว่าซีโอไลต์ Ni-Y จึงทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจนน้อยกว่าซีโอไลต์ Ni-Y และเมื่อพิจารณาน้ำมันจำลองที่ 4 ที่มีสารประกอบกำมะถัน, สารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบแโรแมติกพบว่าการดูดซับของซีโอไลต์ Ni-Y ลดลงอย่างมากเมื่อมีสารประกอบแโรแมติกและซีโอไลต์ La-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันที่มากกว่าซีโอไลต์ Ni-Y แสดงให้เห็นถึงลักษณะการดูดซับโดยตรงของโลหะกลุ่ม +3 จากการศึกษาพบว่าลำดับการดูดซับที่เสถียรเรียงลำดับดังนี้

สารประกอบไนโตรเจน > สารประกอบกำมะถัน > สารประกอบแโรแมติก

เนื่องจากการดูดซับของสารประกอบไนโตรเจนบนตัวดูดซับมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา มากกว่าการดูดซับของสารประกอบกำมะถันและสารประกอบแโรแมติกซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดการดูดซับบนตัวดูดซับที่เสถียรของสารประกอบไนโตรเจน นำมาสู่การที่สารประกอบไนโตรเจนเกิดการดูด

ซับซ้อนได้มากกว่าสารประกอบกำมะถันและสารประกอบแอโรแมติก [12] ซึ่งสอดคล้องกับร้อยละการดูดซับเบรคทรูและร้อยละการดูดซับทั้งหมดที่แสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 จากการทดลองพบว่าในน้ำมันจำลองที่ 3 และ 4 จะเกิดการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนสูงที่สุด และพบว่าในน้ำมันจำลองที่ 4 แสดงให้เห็นถึงลำดับการดูดซับโดยสารประกอบไนโตรเจนถูกดูดซับสูงที่สุด รองลงมา คือ สารประกอบกำมะถัน และสารประกอบแอโรแมติกถูกดูดซับน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.10 ร้อยละการลดลงของค่าความจุเบรคทรูของสารประกอบกำมะถัน (DBT และ 4,6-DMDBT) และไนโตรเจน (ควิโนลีน, อินโดล และ อะคริดีน) จากน้ำมันจำลอง 3 และ 4 เทียบกับน้ำมันจำลอง 1 และ 2

ตัวดูดซับ	เปรียบเทียบ น้ำมันจำลองที่	ตัวถูกดูดซับ	ร้อยละการลดลงของค่าความจุเบรคทรู	
			น้ำมันจำลอง 3	น้ำมันจำลอง 4
Na-Y	1	DBT	69.7	78.3
		4,6-DMDBT	67.6	75.1
	2	Quinoline	36.4	42.3
		Indole	44.6	52.1
		Acridine	54.0	63.6
		DBT	33.3	51.4
La-Y	1	4,6-DMDBT	57.3	64.3
		Quinoline	27.7	31.7
	2	Indole	34.0	38.2
		Acridine	39.2	46.9
		DBT	55.2	60.9
Ce-Y	1	4,6-DMDBT	59.2	68.3
		Quinoline	14.9	33.4
	2	Indole	35.7	50.0
		Acridine	39.6	55.7

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

ตัวดูดซับ	เปรียบเทียบ น้ำมันจำลองที่	ตัวถูกดูดซับ	ร้อยละการลดลงของค่าความจุเบรคทรู	
			น้ำมันจำลอง 3	น้ำมันจำลอง 4
Ni-Y	1	DBT	46.4	65.2
		4,6-DMDBT	40.8	61.9
	2	Quinoline	1.8	33.2
		Indole	29.7	50.2
		Acridine	52.5	62.2
Co-Y	1	DBT	66.4	81.7
		4,6-DMDBT	65.6	82.5
	2	Quinoline	31.9	52.1
		Indole	40.3	64.9
		Acridine	46.0	71.8
Cu-Y	1	DBT	91.1	93.4
		4,6-DMDBT	91.4	92.7
	2	Quinoline	37.6	47.1
		Indole	47.6	51.9
		Acridine	39.8	50.6
Fe-Y(S)	1	DBT	75.8	80.8
		4,6-DMDBT	77.3	82.2
	2	Quinoline	30.1	48.9
		Indole	35.8	49.7
		Acridine	55.2	58.0

### 4.3 การดูดซับสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในระบบการดูดซับแบบสองชั้นตอน

#### 4.3.1 ระบบสองชั้นตอน

การศึกษาการขจัดสารประกอบไนโตรเจน, สารประกอบกำมะถันและสารประกอบแอมโมเนียในน้ำมันจำลอง 4 โดยนำตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y บรรจุในคอลัมน์แรกและบรรจุตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ในคอลัมน์ที่สอง หลังจากนั้นให้ความร้อนตัวดูดซับภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส แสดงผลในรูปของเส้นโค้งเบรคทรู ดังรูปที่ 4.12 ความจุเบรคทรู ร้อยละการดูดซับเบรคทรู ความจุทั้งหมด และร้อยละความจุทั้งหมด (เวลา 312 นาที)

จากตารางที่ 4.11 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของ La-Y ร่วมกับ Na-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนและกำมะถันสูงกว่าตัวดูดซับ La-Y ร่วมกับ Ni-Y โดยตัวดูดซับ La-Y ร่วมกับ Na-Y มีค่าร้อยละการดูดซับสารประกอบกำมะถันทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 38.0 และ 37.7 ตามลำดับ มีร้อยละการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดของ คิวโนลีน อินโดว และ อะคริตีน เท่ากับ 65.6, 49.2 และ 39.9 ตามลำดับ และพบว่ามีร้อยละการดูดซับสารประกอบแอมโมเนียเท่ากับ 38.2 ระบบสองชั้นตอนที่มีตัวดูดซับ La-Y ร่วมกับ Ni-Y มีค่าร้อยละการดูดซับสารประกอบกำมะถันทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 31.9 และมีร้อยละการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดของ คิวโนลีน อินโดว และ อะคริตีน เท่ากับ 57.3, 38.7 และ 36.1 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ามีร้อยละการดูดซับสารประกอบแอมโมเนียเท่ากับ 27.3

จากการศึกษาพบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y มีค่าร้อยละการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Ni-Y เนื่องจากใช้ตัวดูดซับ La-Y บรรจุลงในคอลัมน์แรกเช่นเดียวกันดังนั้นความแตกต่างจึงอยู่ที่คอลัมน์ที่ถัดมา คือ Na-Y กับ Ni-Y โดยพบว่าตัวดูดซับ Na-Y ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการขจัดสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนมากกว่า Ni-Y เป็นผลเนื่องมาจากทั้ง Na-Y และ Ni-Y มีลักษณะการดูดซับที่คล้ายกัน คือ ดูดซับที่ตำแหน่งพันธะพายมากกว่าการดูดซับโดยตรง แต่ข้อแตกต่างของทั้งสองตัวดูดซับ คือ ปริมาณพื้นที่ผิวและปริมาณไอออนโลหะบนพื้นที่ผิวตัวดูดซับของตัวดูดซับ Na-Y มีมากกว่า Ni-Y จึงเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงกว่า La-Y ร่วมกับ Ni-Y

#### 4.3.2 การเปรียบเทียบระบบชั้นตอนเดียวและระบบสองชั้นตอน

การเปรียบเทียบการดูดซับสารประกอบไนโตรเจน สารประกอบกำมะถันและสารประกอบแอมโมเนียในระบบชั้นตอนเดียวและระบบสองชั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.11 โดยใช้ น้ำมันจำลองที่ 4 พบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y พบว่ามีร้อยละการดูดซับสารประกอบกำมะถันสูงสุด คือ 38.0 และ 37.7 ตามลำดับ โดยเลือก La-Y ร่วมกับ Na-Y มาทำการเปรียบเทียบเนื่องจากมีประสิทธิภาพโดยรวมดีกว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y และ Ni-Y ในระบบสองชั้นตอน

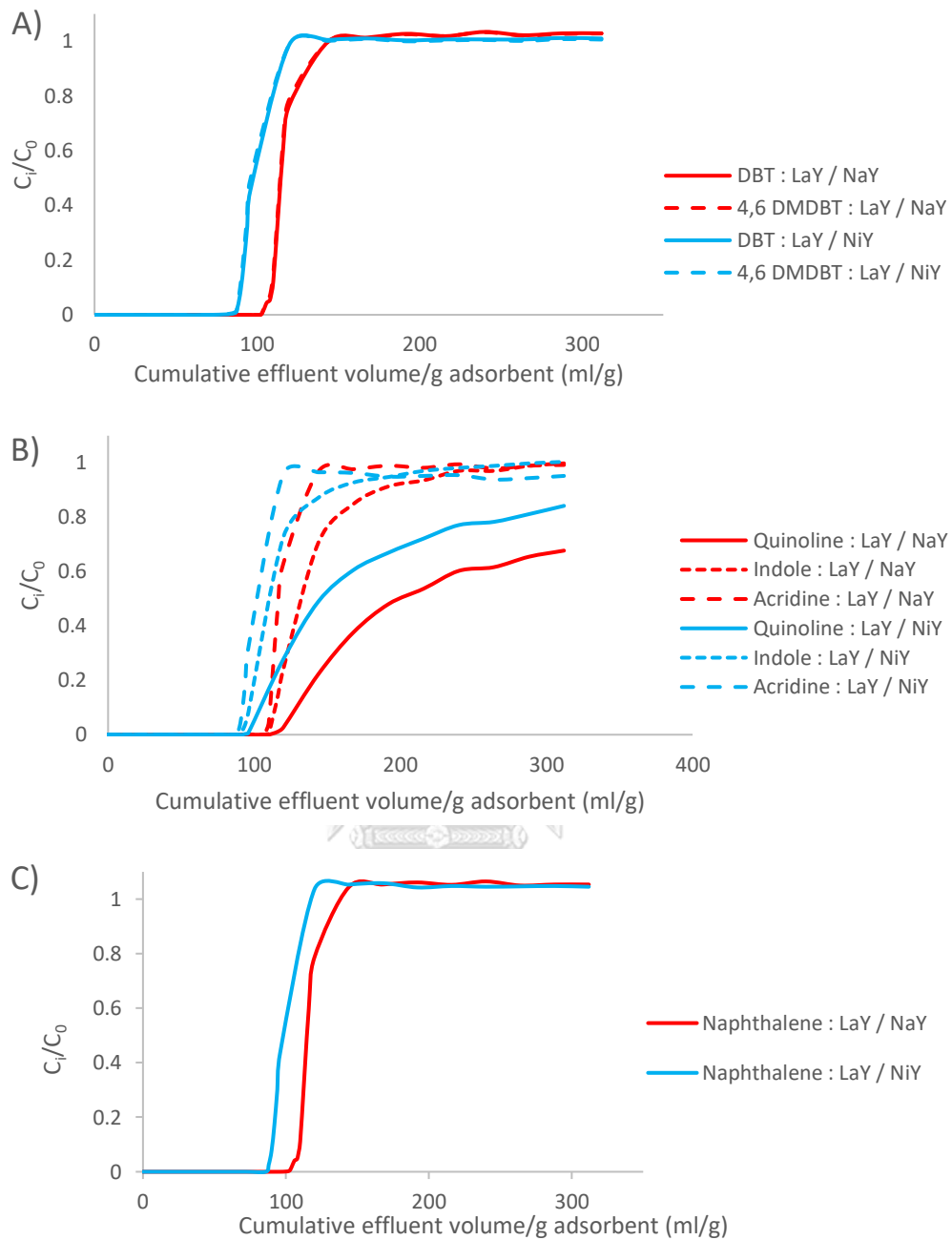
การดูดซับด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ในระบบชั้นตอนเดียว (ตารางที่ 4.10) มีประสิทธิภาพในการขจัดสารประกอบไนโตรเจนสูงสุด โดยมีค่าร้อยละการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดของ คิวโนลีน อินโดล และ อะคริดีน เท่ากับ 65.5, 58.0 และ 46.4 ตามลำดับ และพบว่าตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ดูดซับด้วยระบบชั้นตอนเดียวมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนและกำมะถันต่ำที่สุด

จากร้อยละการดูดซับทั้งหมดสามารถสรุปลำดับตัวดูดซับในระบบชั้นตอนเดียวแล้วระบบสองชั้นตอน พบว่าลำดับความสามารถดูดซับสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลอง 4 ได้ดังนี้

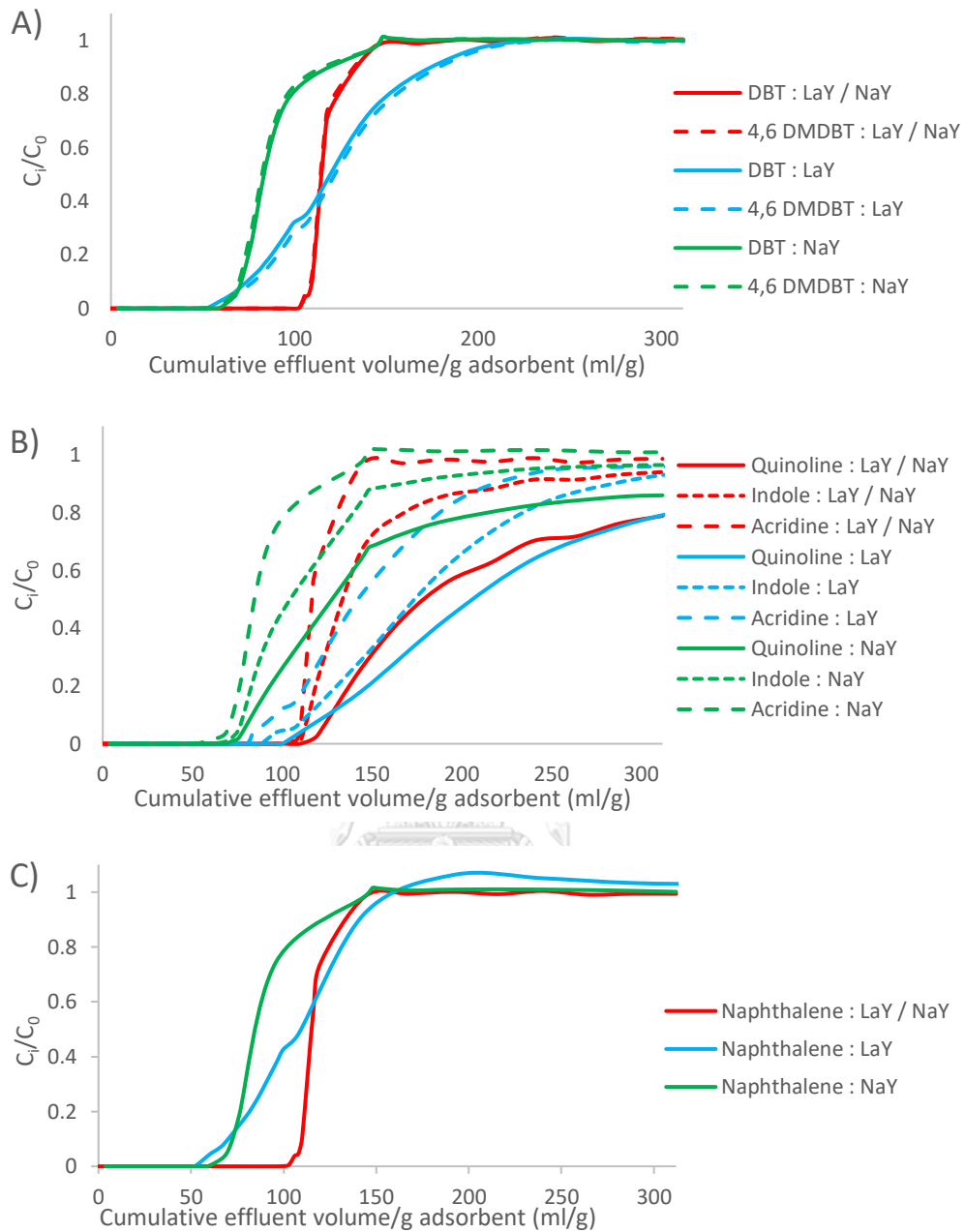
La-Y / Na-Y (ระบบสองชั้นตอน) > La-Y (ระบบชั้นตอนเดียว) > Na-Y (ระบบชั้นตอนเดียว)

และพบลำดับความสามารถดูดซับสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันจำลอง 4 ได้ดังนี้

La-Y (ระบบชั้นตอนเดียว) > La-Y / Na-Y (ระบบสองชั้นตอน) > Na-Y (ระบบชั้นตอนเดียว)



รูปที่ 4.12 เส้นโค้งเบรคทราของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y เปรียบเทียบกับตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Ni-Y ในระบบสองขั้นตอน โดยแสดงการดูดซับของ A) สารประกอบกำมะถัน B) สารประกอบไนโตรเจน และ C) สารประกอบแอโรแมติก ในน้ำมันจำลองที่ 4



รูปที่ 4.13 เส้นโค้งเบรคทราของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y ในระบบสองขั้นตอน เปรียบเทียบกับตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y และ Na-Y ในระบบขั้นตอนเดียว โดยแสดงการดูดซับของ A) สารประกอบกำมะถัน B) สารประกอบไนโตรเจน และ C) สารประกอบแอโรแมติก ในน้ำมัน จำลองที่ 4

ตารางที่ 4.11 แสดงความจุเบรคทรรูและความจุทั้งหมดของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y และ La-Y ร่วมกับ Ni-Y ในระบบสองขั้นตอนและระบบหนึ่งขั้นตอน โดยดูดซับสารประกอบต่างๆ ในน้ำมันจำลอง 4 (ภาวะ: อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเวลา 312 นาที)

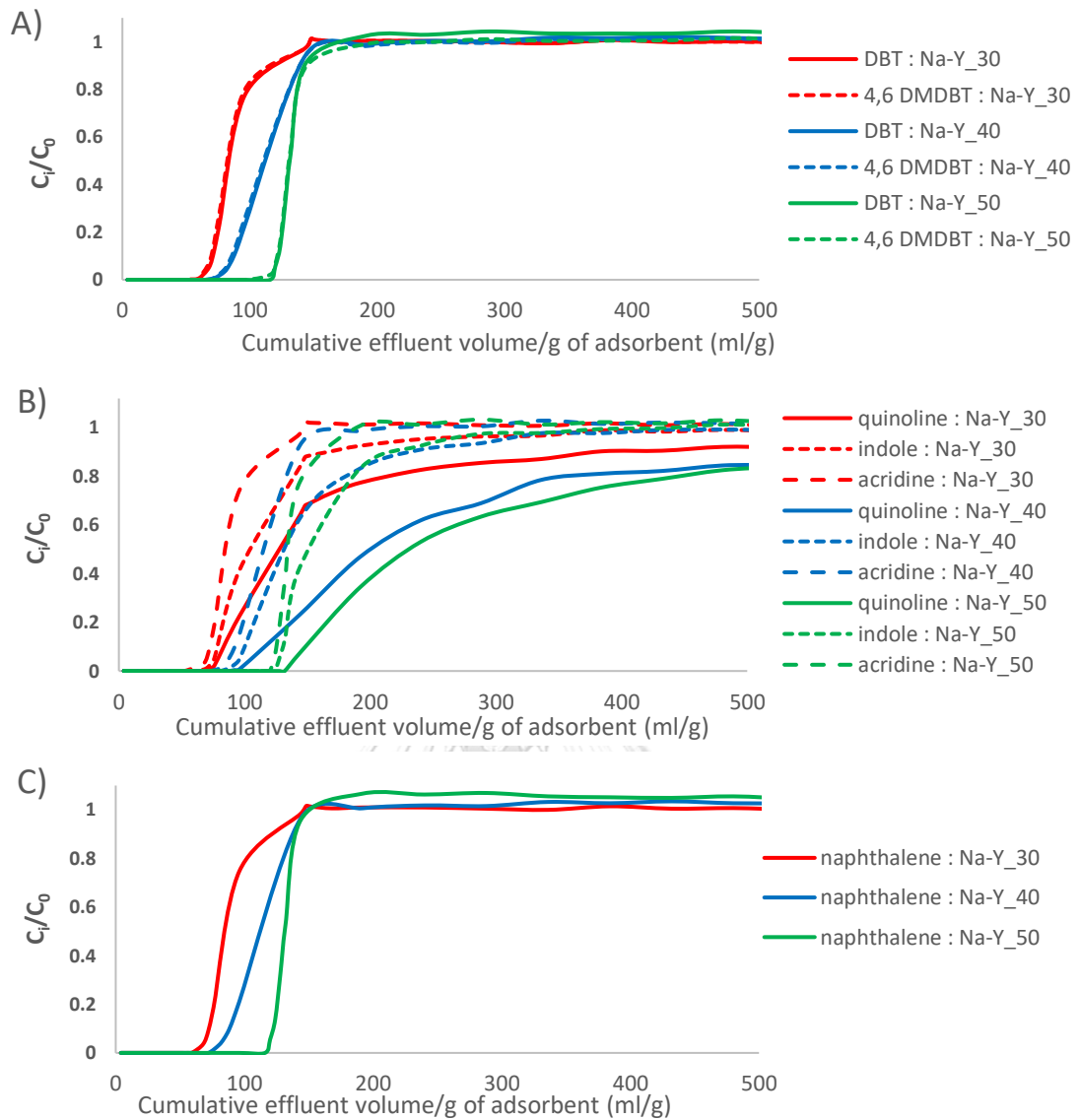
ตัวดูดซับ	ตัวถูกดูดซับ	ปริมาณที่ ป้อน (mmol/g)	ความจุ เบรคทรรู (mmol/g)	ร้อยละการ ดูดซับ เบรคทรรู	ความจุ ทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละการ ดูดซับ ทั้งหมด
La-Y (คอลัมน์ที่ 1)	DBT	0.51	0.17	32.7	0.20	38.0
	4,6-DMDBT	0.51	0.17	32.7	0.19	37.7
	Naphthalene	0.86	0.26	30.9	0.33	38.2
Na-Y (คอลัมน์ที่ 2)	Quinoline	0.51	0.18	35.2	0.34	65.6
	Indole	0.51	0.18	34.6	0.25	49.2
	Acridine	0.51	0.17	33.4	0.20	39.9
La-Y (คอลัมน์ที่ 1) Ni-Y (คอลัมน์ที่ 2)	DBT	0.51	0.12	23.1	0.16	31.9
	4,6-DMDBT	0.51	0.12	23.1	0.16	31.9
	Naphthalene	0.86	0.20	23.1	0.23	27.3
	Quinoline	0.51	0.15	29.5	0.29	57.3
	Indole	0.51	0.15	28.2	0.20	38.7
	Acridine	0.51	0.14	28.2	0.19	36.1
La-Y (คอลัมน์เดียว)	DBT	0.51	0.09	15.5	0.18	35.7
	4,6-DMDBT	0.51	0.09	15.5	0.19	37.4
	Naphthalene	0.86	0.14	15.5	0.28	32.6
	Quinoline	0.51	0.16	32.0	0.36	68.9
	Indole	0.51	0.16	30.7	0.32	61.9
	Acridine	0.51	0.13	31.0	0.25	49.6
Na-Y (คอลัมน์เดียว)	DBT	0.51	0.09	17.9	0.15	28.9
	4,6-DMDBT	0.51	0.08	30.8	0.15	29.8
	Naphthalene	0.86	0.15	17.9	0.25	29.1
	Quinoline	0.51	0.09	18.0	0.23	44.6
	Indole	0.51	0.10	19.2	0.20	38.1
	Acridine	0.51	0.08	16.7	0.15	28.9



#### 4.4 ผลของอุณหภูมิของตัวดูดซับในการดูดซับสารประกอบต่างๆ

##### 4.4.1 ระบบชั้นตอนเดียว

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อระบบการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ที่อุณหภูมิ 30, 40, และ 50 องศาเซลเซียส บ้อนสารด้วยอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อดูดซับน้ำมันจำลอง 4 ผลการดูดซับของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ต่อสารประกอบกำมะถัน, สารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบแอมโรแมติกแสดงดังรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อระบบมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Muzic และคณะ [48] ที่ศึกษาการดูดซับสารประกอบกำมะถันในน้ำมันดีเซลด้วยถ่านกัมมันต์พบว่าที่อุณหภูมิ 30 ถึง 50 มีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมินั้น คือ การเพิ่มพลังงานของโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทำให้เกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ได้มากขึ้น จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นั้นมีค่าให้การดูดซับสารประกอบต่างๆ ของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y สูงที่สุด (โดยมีร้อยละการดูดซับมากที่สุด คือ 19.0, 21.1, 45.4, 26.0 และ 17.3 ของ DBT, 4,6-DMDBT, ควิโนลีน, อินโดว และ อะคริติน ตามลำดับ) แต่พบว่าแนฟทาลีนเกิดการคายซับโดยสังเกตได้จากร้อยละการดูดซับเบรคทูล (ร้อยละ 18.6) มีค่ามากกว่าร้อยละการดูดซับทั้งหมด (ร้อยละ 17.3) เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการหลุดออกของแนฟทาลีนที่ดูดซับเชิงซ้อนแบบพาย ( $\pi$ ) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Boonyawan และคณะ [27] สามารถอธิบายได้ว่าการนำตัวดูดซับซีโอไลต์กลับมาใช้ใหม่ด้วยการสกัดพบว่าแนฟทาลีนถูกสกัดออกมามากที่สุดเมื่อเทียบกับสารประกอบอื่นๆ และแสดงว่าการดูดซับเชิงซ้อนแบบพาย ( $\pi$ ) เกิดการสลายพันธะได้ง่ายกว่าดูดซับแบบการดูดซับโดยตรง และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hernández [49] แสดงพลังงานในการดูดซับพบว่าวงเบนซีนหรือสารประกอบแอมโรแมติกนั้นดูดซับด้อยกว่าสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถัน ซึ่งคำนวณด้วยทฤษฎีฟังก์ชันนัลความหนาแน่น (DFT)



รูปที่ 4.14 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ที่อุณหภูมิดูดซับที่ต่างกัน แสดงการดูดซับของ A) สารประกอบกำมะถัน B) สารประกอบไนโตรเจน และ C) สารประกอบแอโรแมติก ในน้ำมัน จำลองที่ 4

ตารางที่ 4.12 ความจุเบรคทรูและความจุทั้งหมดของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ในการดูดซับสารประกอบต่างๆ ในน้ำมันจำลอง 4 (ภาวะ: อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส อัตราการการเก็บตัวอย่าง 2 มิลลิลิตรต่อครั้ง และเวลา 312 นาที)

ตัวดูดซับ Na-Y ที่อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ตัวถูกดูดซับ	ปริมาณที่ป้อน (mmol/g)	ความจุเบรคทรู (mmol/g)	ร้อยละการดูดซับเบรคทรู	ความจุทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละการดูดซับทั้งหมด
30	DBT	1.02	0.09	8.97	0.14	14.5
	4,6-DMDBT	1.02	0.08	8.33	0.15	14.8
	Naphthalene	1.71	0.15	8.97	0.24	14.2
	Quinoline	1.02	0.09	8.97	0.28	27.2
	Indole	1.02	0.09	9.62	0.20	19.7
	Acridine	1.02	0.08	8.33	0.14	13.8
40	DBT	1.02	0.10	10.3	0.17	16.9
	4,6-DMDBT	1.02	0.32	10.3	0.18	18.5
	Naphthalene	1.71	0.17	10.2	0.26	15.4
	Quinoline	1.02	0.14	14.1	0.44	42.7
	Indole	1.02	0.13	12.8	0.26	24.9
	Acridine	1.02	0.11	11.5	0.19	18.1
50	DBT	1.02	0.19	18.5	0.19	19.0
	4,6-DMDBT	1.02	0.16	15.3	0.21	21.1
	Naphthalene	1.71	0.31	18.6	0.29	17.3
	Quinoline	1.02	0.19	18.6	0.46	45.4
	Indole	1.02	0.20	19.2	0.27	26.0
	Acridine	1.02	0.16	15.3	0.18	17.3

#### 4.4.2 ระบบสองขั้นตอน

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อระบบการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y และ Na-Y ในระบบสองขั้นตอน ที่อุณหภูมิ 30, 40, และ 50 องศาเซลเซียส ป้อนสารด้วยอัตราการไหล 1 มิลลิลิตร ต่อนาที และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับในระบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน โดยแสดงผลดังรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนมีแนวโน้มที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในทางกลับกันพบว่าสารประกอบแอมโรแมติกหรือแนฟทาลินถูกดูดซับได้ลดลง จากที่ได้เคยกล่าวไว้ในบท 4.2.2) ว่าการเพิ่มอุณหภูมินั้น คือ การเพิ่มพลังงานของโมเลกุลของสารประกอบต่างๆ ทำให้เกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับซีโอไลต์ได้มากขึ้นและพลังงานการดูดซับของสารประกอบแอมโรแมติกมีค่าพลังงานการดูดซับกับตัวดูดซับที่ติดลบน้อยกว่าสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถัน เมื่อพันธะระหว่างตัวดูดซับกับสารประกอบแอมโรแมติกมีค่าพลังงานในการดูดซับน้อยจึงเป็นสาเหตุให้เกิดการหลุดออกของสารประกอบแอมโรแมติกได้ง่าย ทำให้สารประกอบชนิดอื่นเข้ามาแทนที่ได้

โดยตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y ในระบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีร้อยละการดูดซับสารประกอบกำมะถันทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 38.0 และ 37.7 ตามลำดับ และมีร้อยละการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดของ ควิโนลีน อินโดล และ อะคริดีน เท่ากับ 62.9, 45.4 และ 29.7 ตามลำดับ

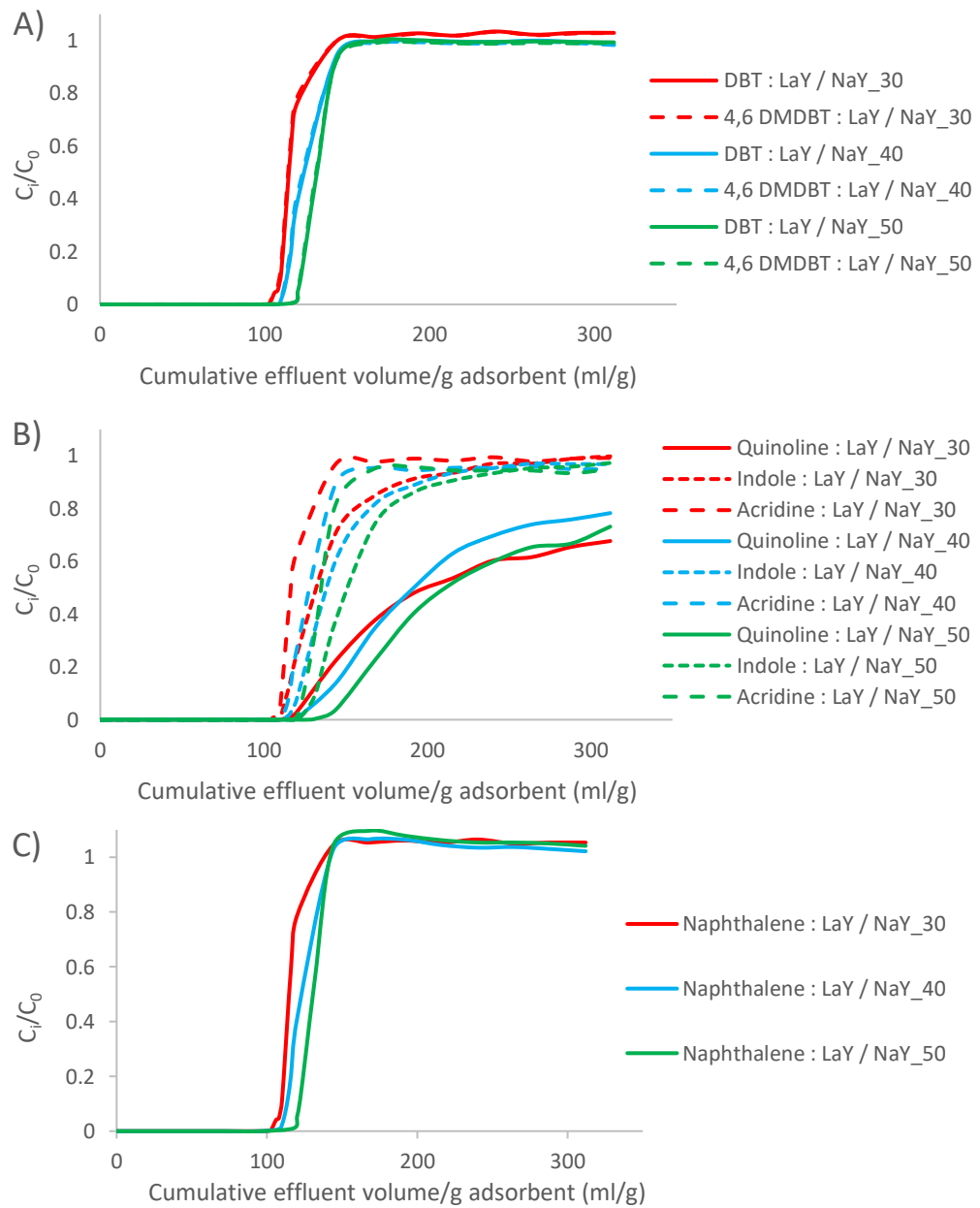
ตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y ในระบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีร้อยละการดูดซับสารประกอบกำมะถันทั้งหมดของ DBT และ 4,6-DMDBT เท่ากับ 42.7 และมีร้อยละการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนทั้งหมดของ ควิโนลีน อินโดล และ อะคริดีน เท่ากับ 73.3, 52.5 และ 46.7 ตามลำดับ และพบว่าร้อยละการดูดซับสารประกอบแอมโรแมติกหรือแนฟทาลินที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส โดยมีร้อยละการดูดซับ เท่ากับ 30.5, 30.0, และ 29.7 ตามลำดับ

จากร้อยละการดูดซับทั้งหมดสามารถสรุปลำดับตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถดูดซับสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันจำลอง 4 ได้ดังนี้

50 องศาเซลเซียส > 40 องศาเซลเซียส > 30 องศาเซลเซียส

และจากร้อยละการดูดซับทั้งหมดสามารถสรุปลำดับตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถดูดซับสารประกอบแอมโรแมติกในน้ำมันจำลอง 4 ได้ดังนี้

30 องศาเซลเซียส > 40 องศาเซลเซียส > 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 เส้นโค้งเบรคทรูของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y ในระบบสองชั้นตอนที่อุณหภูมิดูดซับที่ต่างกัน แสดงการดูดซับของ A) สารประกอบกำมะถัน B) สารประกอบไนโตรเจน และ C) สารประกอบแอโรแมติก ในน้ำมันจำลองที่ 4

ตารางที่ 4.13 ความจุเบรคทรูและความจุทั้งหมดของตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y ในระบบสองขั้นตอนโดยดูดซับสารประกอบต่างๆ ในน้ำมันจำลอง 4 (ภาวะ: อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อ นาที, อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส และเวลาทั้งหมด 312 นาที)

ตัวดูดซับ Na-Y ที่อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ตัวถูกดูดซับ	ปริมาณที่ป้อน (mmol/g)	ความจุ เบรคทรู (mmol/g)	ร้อยละการ ดูดซับ เบรคทรู	ความจุ ทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละการ ดูดซับ ทั้งหมด
30	DBT	0.51	0.17	32.7	0.20	38.0
	4,6-DMDBT	0.51	0.17	32.7	0.19	37.7
	Naphthalene	0.86	0.19	23.1	0.26	30.5
	Quinoline	0.51	0.17	32.7	0.32	62.9
	Indole	0.51	0.16	30.7	0.23	45.4
	Acridine	0.51	0.12	23.1	0.15	29.7
40	DBT	0.51	0.18	34.6	0.21	40.8
	4,6-DMDBT	0.51	0.18	34.6	0.21	40.8
	Naphthalene	0.86	0.19	23.1	0.26	30.0
	Quinoline	0.51	0.18	34.6	0.33	65.1
	Indole	0.51	0.16	30.8	0.23	44.2
	Acridine	0.51	0.12	23.1	0.16	32.0
50	DBT	0.51	0.16	30.8	0.22	42.7
	4,6-DMDBT	0.51	0.16	30.8	0.22	42.7
	Naphthalene	0.86	0.19	23.1	0.25	29.7
	Quinoline	0.51	0.21	40.4	0.38	73.3
	Indole	0.51	0.20	38.4	0.27	52.5
	Acridine	0.51	0.19	37.8	0.24	46.7

#### 4.5 การคืนสภาพตัวดูดซับด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction regeneration)

การนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่เป็นอีกหนึ่งแนวทางที่ช่วยเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันด้วยการดูดซับ ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วมีการปกคลุมของสารที่ถูกดูดซับส่งผลให้ตัวดูดซับดังกล่าวไม่สามารถดูดซับหรือมีความสามารถในการดูดซับสารอื่นที่ลดลง ดังนั้นการคืนสภาพตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกครั้งจึงจัดเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยลดต้นทุนของกระบวนการ และเพื่อพัฒนากระบวนการดูดซับเข้าสู่กระบวนการอุตสาหกรรม

กระบวนการคืนสภาพของตัวดูดซับสามารถทำได้หลายกระบวนการ Han และคณะ [20] ศึกษากระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว ได้แก่ กระบวนการคืนสภาพด้วยอัลตราซาวนด์ กระบวนการคืนสภาพด้วยความร้อน และกระบวนการคืนสภาพด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย พบว่ากระบวนการคืนสภาพด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายทำให้ตัวดูดซับที่ผ่านการคืนสภาพสามารถดูดซับได้ในปริมาณที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่นๆ และพบภาวะในการคืนสภาพตัวดูดซับจากงานวิจัยของ Boonyawan และคณะ [27] ใช้โทลูอินและเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย พบว่าโทลูอินมีประสิทธิภาพในการคืนสภาพที่ดีกว่าเฮกเซน โดยภาวะในการคืนสภาพตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และใช้โทลูอิน มาทำการคืนสภาพด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการศึกษากการคืนสภาพด้วยภาวะเดียวกันด้วยระบบสองขั้นตอน

จากการศึกษาโดยภาวะที่เหมาะสมในการคืนสภาพตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y และ Na-Y ที่ผ่านการใช้งานแล้วที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที มาทำการคืนสภาพด้วยโทลูอินที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและอัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที มาวิเคราะห์การคืนสภาพกับตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y จากตารางที่ 4.14 แสดงผลการคายซับของสารประกอบแต่ละชนิดที่อยู่ในโครงสร้างของซีโอไลต์ และสามารถคืนสภาพตัวดูดซับได้ถึงร้อยละ 55.4 และพบว่าสารประกอบแอมโมเนียหรือแอมโมเนียมสามารถเกิดการคายซับได้ง่ายที่สุด และรองลงมา คือ สารประกอบกำมะถันที่เกิดการคายซับมากโดยมีค่าการคายซับอยู่ที่ร้อยละ 75.1 และ 60.2 ของ DBT และ 4,6-DMDBT ตามลำดับ โดยสารประกอบไนโตรเจนเกิดการคายซับน้อยที่สุดมีค่าร้อยละการคายซับเท่ากับ 25.1, 39.4 และ 22.7 ของควิโนลีน, อินโดล และอะคริติน ตามลำดับ [46]

ตารางที่ 4.14 ความจุทั้งหมด ร้อยละของสารคายซับและประสิทธิภาพการคืนสภาพจากการคืนสภาพ  
ตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y ร่วมกับ Na-Y ในระบบสองขั้นตอน ด้วยตัวทำละลายโทลูอีนที่อัตราการไหล  
ของตัวทำละลาย 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

สารถูกดูดซับ	ความจุทั้งหมด (mmol/g)	ร้อยละ การคายซับ	ร้อยละประสิทธิภาพ ของการคืนสภาพ*
DBT	0.19	75.1	
4,6-DMDBT	0.19	60.2	
Naphthalene	0.26	96.1	53.1
Quinoline	0.32	25.1	
Indole	0.23	39.4	
Acridine	0.15	22.7	

\* คิดจากปริมาณสารที่เกิดการคายซับทั้งหมดเทียบกับสารที่ดูดซับทั้งหมด หน่วยเปอร์เซ็นต์



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบแอมโมเนียต่อความสามารถในการขจัดสารประกอบกำมะถัน โดยใช้ตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y, Ni-Y, Cu-Y, La-Y, Co-Y, Ce-Y และ Fe-Y(S) เป็นตัวดูดซับที่ภาวะ 30 องศาเซลเซียสและอัตราการไหลของน้ำมันจำลอง 1 มิลลิลิตรต่อนาที โดยศึกษาการขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันด้วยระบบสองขั้นตอนเพื่อเปรียบเทียบกับระบบขั้นตอนเดียว รวมถึงศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับในระบบขั้นตอนเดียวกับระบบสองขั้นตอน และหาประสิทธิภาพการคืนสภาพด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายโทลูอีนที่ภาวะ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและอัตราการไหลน้ำมันจำลอง 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที

##### 5.1.1 การขจัดกำมะถันและไนโตรเจนด้วยการดูดซับด้วยระบบขั้นตอนเดียว

จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคของตัวดูดซับที่มีขนาดต่างๆ เมื่อนำมาดูดซับสารประกอบกำมะถันพบว่ายิ่งมีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงหรือความจุทั้งหมดของตัวดูดซับลดลง จากผลการศึกษาการขจัดสารประกอบไนโตรเจน (Denitrogenation) ด้วยระบบขั้นตอนเดียว พบว่าสารประกอบกำมะถันและสารประกอบแอมโมเนียลดประสิทธิภาพการดูดซับสารประกอบไนโตรเจน และผลศึกษาการขจัดสารประกอบกำมะถัน (Desulfurization) พบว่าสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบแอมโมเนียลดประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบกำมะถันเช่นเดียวกัน และจากการศึกษาการดูดซับสารประกอบในน้ำมันจำลองที่ 4 พบว่าสารประกอบไนโตรเจนถูกดูดซับมากที่สุด ตามด้วยสารประกอบกำมะถันและสารประกอบแอมโมเนียถูกดูดซับน้อยที่สุด

##### 5.1.2 การดูดซับสารประกอบกำมะถันและสารประกอบไนโตรเจนในระบบการดูดซับแบบสองขั้นตอน

การขจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลองที่ 4 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบกำมะถันเพิ่มขึ้นเนื่องจาก การขจัดสารประกอบไนโตรเจนในคอลัมน์แรก ทำให้ความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนที่ถูกป้อนเข้าในคอลัมน์ที่สองมีความเข้มข้นลดลง ทำให้เกิดการดูดซับสารประกอบกำมะถันเพิ่มสูงขึ้นในคอลัมน์ที่สอง มากกว่าการดูดซับแบบคอลัมน์แบบเดียว สำหรับคอลัมน์แบบเดียวที่บรรจุตัวดูดซับซีโอไลต์ La-Y พบว่ามีความสามารถในการดูดซับสารประกอบไนโตรเจนที่สูงกว่า

### 5.1.3 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถของการจัดสารประกอบไนโตรเจนและสารประกอบกำมะถันในระบบขั้นตอนเดียวและระบบสองขั้นตอน

การเพิ่มอุณหภูมิในระบบเป็นการเพิ่มความจุในการดูดซับของระบบขั้นตอนเดียวและระบบสองขั้นตอน เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้สารประกอบมีพลังงานในการถ่ายเทมวลสารเข้าสู่รูพรุนของตัวดูดซับ สำหรับระบบสองขั้นตอนพบว่าความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่พบว่าสารประกอบแอมโรแมติกมีการดูดซับลดลงเนื่องจากพลังงานพันธะระหว่างสารประกอบแอมโรแมติกและตัวดูดซับซีโอไลต์ Y ชนิดต่างๆ มีพลังงานการดูดซับที่ต่ำกว่าสารประกอบกำมะถันและไนโตรเจน ส่งผลให้เมื่อเกิดการแข่งขันในการดูดซับทำให้เกิดการหลุดออกของสารประกอบแอมโรแมติกเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

### 5.1.4 การคืนสภาพตัวดูดซับด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction regeneration)

การคืนสภาพด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายโทลูอีน โดยใช้ภาวะในการคืนสภาพตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที, อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และใช้โทลูอีนเป็นตัวทำละลาย แสดงการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยตัวทำละลายมีประสิทธิภาพในการคืนสภาพตัวดูดซับในระบบสองขั้นตอน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาและค้นหาตัวดูดซับชนิดต่างๆ สำหรับการดูดซับในระบบสองขั้นตอน เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือ วัสดุโครงข่ายโลหะอินทรีย์ (Metal organic framework)
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อตัวดูดซับซีโอไลต์ที่เหมาะสมเช่น Na-Y, Ni-Y, La-Y และ Ce-Y ในระบบสองขั้นตอน

1) Ni-Y/Na-Y      2) Ce-Y/Na-Y

3) La-Y/Ni-Y      4) Ce-Y/Ni-Y

## บรรณานุกรม

- [1] ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์, ปีเตอร์เลียม. 05 มิถุนายน 2563.
- [2] Petroleum, A.I.o., Refining of Petroleum. 01 Sep 2017. สืบค้นจาก:  
<https://aip.com.au/resources/refining-petroleum>
- [3] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กรมธุรกิจพลังงาน กระทรวงพลังงาน. น้ำมันยูโร 4. กระทรวงพลังงาน, 2552.
- [4] Rao, M.S. and R. Anand, Production characterization and working characteristics in DICI engine of Pongamia biodiesel. Ecotoxicology and environmental safety, 2015. 121: p. 16-21.
- [5] Diesel Fuel.[ออนไลน์]. สืบค้นจาก: <https://ienergyguru.com/knowledgebase/diesel-fuel/> [30 เมษายน 2563]
- [6] Lee, K.X. and J.A. Valla, Adsorptive desulfurization of liquid hydrocarbons using zeolite-based sorbents: a comprehensive review. Reaction Chemistry & Engineering, 2019. 4(8): p. 1357-1386.
- [7] Song, C., An overview of new approaches to deep desulfurization for ultra-clean gasoline, diesel fuel and jet fuel. Catalysis today, 2003. 86(1-4): p. 211-263.
- [8] Liang, F., et al., Determination of polycyclic aromatic sulfur heterocycles in diesel particulate matter and diesel fuel by gas chromatography with atomic emission detection. Journal of Chromatography A, 2006. 1114(1): p. 145-153.
- [9] da Cunha, A.L.M., et al., Determination of nitrogen-containing polycyclic aromatic compounds in diesel and gas oil by reverse-phase high performance liquid chromatography using introduction of sample as detergentless microemulsion. Fuel, 2016. 176: p. 119-129.
- [10] Adam, F., et al., Comprehensive two-dimensional gas chromatography for basic and neutral nitrogen speciation in middle distillates. Fuel, 2009. 88(5): p. 938-946.
- [11] Mohebbali, G. and A.S. Ball, Biocatalytic desulfurization (BDS) of petrodiesel fuels. Microbiology, 2008. 154(8): p. 2169-2183.
- [12] Kim, J.H., et al., Ultra-deep desulfurization and denitrogenation of diesel fuel by

- selective adsorption over three different adsorbents: a study on adsorptive selectivity and mechanism. *Catalysis Today*, 2006. 111(1-2): p. 74-83.
- [13] Weblog, P.s. กระบวนการดูดซับ. 2551; Available from: <http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>
- [14] นพิตา ทิพย์ธีระนันทน์, ช.ง., เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา. 2556.
- [15] Hernández-Maldonado, A.J., et al., Desulfurization of transportation fuels by  $\pi$ -complexation sorbents: Cu (I)-, Ni (II)-, and Zn (II)-zeolites. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2005. 56(1-2): p. 111-126.
- [16] Khan, N.A., et al., Adsorptive denitrogenation of model fuel with CuCl-loaded adsorbents: contribution of  $\pi$ -complexation and direct interaction between adsorbates and cuprous ions. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017. 121(21): p. 11601-11608.
- [17] Montree., T., sythesis of zeolite from coal fly ash. 1999.
- [18] ซีโอล์ด. [ออนไลน์]. สืบค้นจาก: <http://www.vcharkarn.com/vblog/38694> [20 มิถุนายน 2563]
- [19] Moshoeshe, M., M. Nadiye-Tabbiruka, and V. Obuseng, A review of the chemistry, structure, properties and applications of zeolites. *Am. J. Mater. Sci*, 2017. 7(5): p. 196-221.
- [20] Han, X., H. Lin, and Y. Zheng, Regeneration methods to restore carbon adsorptive capacity of dibenzothiophene and neutral nitrogen heteroaromatic compounds. *Chemical Engineering Journal*, 2014. 243: p. 315-325.
- [21] Blanco-Brieva, G., et al., Efficient solvent regeneration of Basolite C300 used in the liquid-phase adsorption of dibenzothiophene. *Fuel*, 2013. 113: p. 216-220.
- [22] Hong, X. and K. Tang, Adsorptive denitrogenation of diesel oil using a modified NaY molecular sieve. *Petroleum Science and Technology*, 2015. 33(15-16): p. 1471-1478.
- [23] Liu, D., J. Gui, and Z. Sun, Adsorption structures of heterocyclic nitrogen compounds over Cu (I) Y zeolite: a first principle study on mechanism of the denitrogenation and the effect of nitrogen compounds on adsorptive desulfurization. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2008. 291(1-2): p. 17-

- 21.
- [24] Bhandari, V.M., et al., Desulfurization of diesel using ion-exchanged zeolites. *Chemical Engineering Science*, 2006. 61(8): p. 2599-2608.
- [25] Tang, K. and X. Hong, Preparation and characterization of co-MCM-41 and its adsorption removing basic nitrogen compounds from fluidized catalytic cracking diesel oil. *Energy & Fuels*, 2016. 30(6): p. 4619-4624.
- [26] Xiao, J., et al., Effects of aromatics, diesel additives, nitrogen compounds, and moisture on adsorptive desulfurization of diesel fuel over activated carbon. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012. 51(8): p. 3436-3443.
- [27] Yoosuk, B., A. Silajan, and P. Prasassarakich, Deep adsorptive desulfurization over ion-exchanged zeolites: Individual and simultaneous effect of aromatic and nitrogen compounds. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 248: p. 119291.
- [28] Tian, F., et al., The study of thiophene adsorption onto La (III)-exchanged zeolite NaY by FT-IR spectroscopy. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006. 301(2): p. 395-401.
- [29] Xue, M., et al., Preparation of cerium-loaded Y-zeolites for removal of organic sulfur compounds from hydrodesulfurized gasoline and diesel oil. *Journal of colloid and interface science*, 2006. 298(2): p. 535-542.
- [30] Yang, X., et al., Recyclable Fenton-like catalyst based on zeolite Y supported ultrafine, highly-dispersed Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles for removal of organics under mild conditions. *Chinese Chemical Letters*, 2019. 30(2): p. 324-330.
- [31] Guo, X., et al., Influence of modifications on the deep desulfurization behavior of NaY and Na13X zeolites in gasoline. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019. 26(13): p. 13138-13146.
- [32] Wang, L., et al., Effects of aromatics on desulfurization of liquid fuel by  $\pi$ -complexation and carbon adsorbents. *Chemical engineering science*, 2012. 73: p. 208-217.
- [33] Shi, Y., et al., Effect of cyclohexene on thiophene adsorption over NaY and LaNaY zeolites. *Fuel processing technology*, 2013. 110: p. 24-32.
- [34] The University of Sheffield and WebElements Ltd, U., Atomic radius (empirical).

2020.

- [35] Iron(III) nitrate nonahydrate [ออนไลน์],(2020) สืบค้นจาก :  
<https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/mm/103883?lang=en&region=TH>  
.
- [36] Alotaibi, F.M., et al., The catalytic stability of some selected bifunctional nanoporous-based catalysts in the hydroisomerisation of n-C7 and the effect of post-synthesis modification techniques. *Applied Petrochemical Research*, 2014. 4(1): p. 95-136.
- [37] Song, H., Y. Chang, and H. Song, Deep adsorptive desulfurization over Cu, Ce bimetal ion-exchanged Y-typed molecule sieve. *Adsorption*, 2016. 22(2): p. 139-150.
- [38] Zhang, Z., et al., Adsorptive removal of aromatic organosulfur compounds over the modified Na-Y zeolites. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2008. 82(1-2): p. 1-10.
- [39] Limei, Q., et al., Investigation on the cation location, structure and performances of rare earth-exchanged Y zeolite. *Journal of Rare Earths*, 2017. 35(7): p. 658-666.
- [40] Song, H., et al., Deep desulfurization of model gasoline by selective adsorption over Cu–Ce bimetal ion-exchanged Y zeolite. *Fuel processing technology*, 2013. 116: p. 52-62.
- [41] Larrubia, M.A., et al., A FT-IR study of the adsorption of indole, carbazole, benzothiophene, dibenzothiophene and 4, 6-dibenzothiophene over solid adsorbents and catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 2002. 224(1-2): p. 167-178.
- [42] Huang, C., Y.-C. Chung, and M.-R. Liou, Adsorption of Cu (II) and Ni (II) by pelletized biopolymer. *Journal of Hazardous Materials*, 1996. 45(2-3): p. 265-277.
- [43] Frilund, C., et al., Desulfurization of biomass syngas using ZnO-based adsorbents: Long-term hydrogen sulfide breakthrough experiments. *Energy & Fuels*, 2020. 34(3): p. 3316-3325.
- [44] Oliveira, M., et al., Adsorption of thiophene and toluene on NaY zeolites exchanged with Ag (I), Ni (II) and Zn (II). *Fuel*, 2009. 88(10): p. 1885-1892.

- [45] Linhua, S., et al., Preparation of Cu-, Zn-, Co-zeolites and application for adsorptive desulfurization of Saudi Arabian medium crude. *China Petroleum Processing & Petrochemical Technology*, 2017. 19(3): p. 23-31.
- [46] Laredo, G.C., et al., Comparison of the metal-organic framework MIL-101 (Cr) versus four commercial adsorbents for nitrogen compounds removal in diesel feedstocks. *Fuel*, 2016. 180: p. 284-291.
- [47] Geng, W., et al., Theoretical studies of the nitrogen containing compounds adsorption behavior on Na (I) Y and rare earth exchanged RE (III) Y zeolites. *Journal of molecular modeling*, 2015. 21(1): p. 10.
- [48] Muzic, M., K. Sertic-Bionda, and T. Adzamic, Desulfurization of diesel fuel in a fixed bed adsorption column: experimental study and simulation. *Petroleum science and technology*, 2011. 29(22): p. 2361-2371.
- [49] Hernández-Maldonado, A.J. and R.T. Yang, Denitrogenation of transportation fuels by zeolites at ambient temperature and pressure. *Angewandte Chemie*, 2004. 116(8): p. 1022-1024.

### ภาคผนวก ก

#### ก.1 ตัวอย่างการเตรียมตัวดูดซับ La-Y ซีโอไลต์ ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออน

เตรียมสารละลาย  $\text{La}(\text{NO}_3)_3$  ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (หรือ 0.1 โมลต่อลิตร) ปริมาตร 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้  $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  โมลโมเลกุล 433.01 กรัม/โมล

ดังนั้น	$\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1	โมล มีน้ำหนัก	433.01	กรัม
	$\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.10	โมล มีน้ำหนัก	$0.1 \times \frac{433.01}{1}$	กรัม
				= 43.30	กรัม

โดยโมเลกุลของ  $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  จำนวน 1 โมล จะมีน้ำอยู่ 6 โมล หรือเท่ากับ

$$0.10 \text{ โมลของ } \text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \text{ มีน้ำ} = 0.10 \times 6 \times 18 \text{ กรัม}$$

$$\text{มีน้ำอยู่ในโมเลกุลของ } \text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \text{ ที่ } 0.1 \text{ โมล} = 10.8 \text{ กรัม}$$

โดยต้องการน้ำปริมาตร 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\text{ดังนั้น ต้องเติมน้ำปริมาตร } 1,000 - 10.8 = 989.2 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

ดังนั้น ต้องนำ  $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  43.30 กรัม ไปละลายน้ำปริมาตร 989.2 ลูกบาศก์เซนติเมตร

#### ก.2 การเตรียมน้ำมันจำลอง

วิธีการคำนวณการเตรียมน้ำมันจำลองที่มีสารประกอบต่างชนิดในนอร์มัลออกเทน ปริมาณ 400 มิลลิลิตร โดยมีองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

- DBT โดยมีความเข้มข้นกำหนดเท่ากับ A ppmw
- 4,6-DMDBT โดยมีความเข้มข้นกำหนดเท่ากับ B ppmw
- แนฟทาลีน โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ C ppmw
- ควิโนลีน โดยมีความเข้มข้นไนโตรเจนเท่ากับ D ppmw
- อินโดว โดยมีความเข้มข้นไนโตรเจนเท่ากับ E ppmw
- อะคริติน โดยมีความเข้มข้นไนโตรเจนเท่ากับ F ppmw

โดยหน่วย ppm หรือหนึ่งในล้านส่วนโดยน้ำหนัก คือ ปริมาณสารละลายหรือนอร์มัลออกเทน  $10^6$  กรัม มีกำหนดจาก DBT เท่ากับ A กรัม, กำหนดจาก 4,6-DMDBT เท่ากับ B กรัม, แนฟทาลีน เท่ากับ C กรัม, ไนโตรเจนจากควิโนลีนเท่ากับ D กรัม, ไนโตรเจนจากอินโดวเท่ากับ E กรัม และ ไนโตรเจนจากอะคริตินเท่ากับ F กรัม



โดยการทดลองใช้ปริมาณตัวทำละลายหรือนอร์มัลออกเทน 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงวิธีการคำนวณหาปริมาณที่นำสารมาผสมดังนี้

โดย ปริมาณสารทั้งหมด คือ 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของนอร์มัลออกเทนเท่ากับ 0.703 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{โดยแสดงวิธีคำนวณกำมะถันจาก DBT} &= 400 \times 0.703 \times \frac{A}{(10^6 - A - B - C - D - E - F)} \text{ กรัม} \\ &= a \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณกำมะถันในโมเลกุลของ DBT จึงคำนวณหาปริมาณของ DBT ที่ต้องใช้ดังนี้

$$\text{DBT มีมวลโมเลกุล} = 184.26 \text{ กรัม/โมล}$$

$$\text{ปริมาณกำมะถัน 32.16 กรัม ใน DBT ปริมาณ 184.26 กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณกำมะถัน } a \text{ กรัม ใน DBT ปริมาณ} &= a \times \frac{184.26}{32.16} \text{ กรัม} \\ &= 5.73a \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำมะถันจาก 4,6-DMDBT} &= 400 \times 0.703 \times \frac{B}{(10^6 - A - B - C - D - E - F)} \text{ กรัม} \\ &= b \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เทียบหาปริมาณของ 4,6-DMDBT

$$\text{4,6-DMDBT มีมวลโมเลกุล} = 212.31 \text{ กรัม/โมล}$$

$$\text{ปริมาณกำมะถัน 32.16 กรัม ใน 4,6-DMDBT 212.31 กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณกำมะถัน } b \text{ กรัม ใน 4,6-DMDBT ปริมาณ} &= b \times \frac{212.31}{32.16} \text{ กรัม} \\ &= 6.60b \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ไนโตรเจนจากควิโนลีน} &= (400 \times 0.703) \times \frac{C}{(10^6 - A - B - C - D - E - F)} \text{ กรัม} \\ &= c \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณไนโตรเจนในโมเลกุลของควิโนลีน จึงคำนวณหาปริมาณของควิโนลีนที่ต้องใช้ดังนี้

$$\text{มวลโมเลกุลของควิโนลีน} = 129.16 \text{ กรัม/โมล}$$

$$\text{ปริมาณไนโตรเจน 14.01 กรัม ในควิโนลีน 129.16 กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณไนโตรเจน } c \text{ กรัม ในควิโนลีนปริมาณ } c &\times \frac{129.16}{14.01} \text{ กรัม} \\ &= 9.22c \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ไนโตรเจนจากอินโดว} &= (400 \times 0.703) \times \frac{D}{(10^6 - A - B - C - D - E - F)} \text{ กรัม} \\ &= d \qquad \qquad \qquad \text{กรัม} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณไนโตรเจนในโมเลกุลของอินโดว จึงคำนวณหาปริมาณของอินโดวที่ต้องใช้ดังนี้

$$\text{มวลโมเลกุลของอินโดว} = 117.15 \quad \text{กรัม/โมล}$$

ปริมาณไนโตรเจน 14.01 กรัม ในอินโดว 117.15 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณไนโตรเจน } d \text{ กรัม ในอินโดวปริมาณ } d &\times \frac{117.15}{14.01} \quad \text{กรัม} \\ &= 8.36d \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ไนโตรเจนจากอะคริติน} &= (400 \times 0.703) \times \frac{E}{(10^6 - A - B - C - D - E - F)} \text{ กรัม} \\ &= E \quad \qquad \qquad \text{กรัม} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณไนโตรเจนในโมเลกุลของอะคริติน จึงคำนวณหาปริมาณของอะคริตินที่ต้องใช้ดังนี้

$$\text{มวลโมเลกุลของอินโดว} = 179.13 \quad \text{กรัม/โมล}$$

ปริมาณไนโตรเจน 14.01 กรัม ในอินโดว 179.13 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณไนโตรเจน } E \text{ กรัม ในอินโดวปริมาณ } E &\times \frac{179.13}{14.01} \quad \text{กรัม} \\ &= 12.79E \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แวนทาลีน} &= (400 \times 0.703) \times \frac{F}{(10^6 - A - B - C - D - E - F)} \text{ กรัม} \\ &= F \quad \qquad \qquad \text{กรัม} \end{aligned}$$

#### ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมน้ำมันจำลอง 4

การเตรียมน้ำมันจำลองในนอร์มัลออกเทน ปริมาณ 400 มิลลิลิตร โดยมีองค์ประกอบ คือ

- กำมะถันจาก DBT 75 ppmw
- กำมะถันจาก 4,6-DMDBT 75 ppmw
- ไนโตรเจนจาก คิวโนลีน 32.5 ppmw
- ไนโตรเจนจาก อินโดว 32.5 ppmw
- ไนโตรเจนจาก อะคริติน 32.5 ppmw
- แวนทาลีน 500 ppmw

โดยการทดลองใช้ปริมาณตัวทำละลายหรือนอร์มัลออกเทน 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงวิธีการคำนวณหาปริมาณที่นำสารมาผสมดังนี้

โดย ปริมาณสารทั้งหมด คือ 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของนอร์มัลออกเทนเท่ากับ 0.703 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น กัมมะถันใน DBT} &= 400 \times 0.703 \times \frac{75}{(10^6 - 75 - 75 - 500 - 32.5 - 32.5 - 32.5)} \text{ กรัม} \\ &= 0.0211 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณกัมมะถันในโมเลกุลของ DBT จึงคำนวณหาปริมาณของ DBT ที่ต้องใช้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ DBT} &= 184.26 \text{ กรัม/โมล} \\ \text{ปริมาณกัมมะถัน 32.16 กรัม ใน DBT ปริมาณ 184.26} & \text{ กรัม} \\ \text{ปริมาณกัมมะถัน 0.0211 กรัม ใน DBT } &0.0211 \times \frac{184.26}{32.16} \text{ กรัม} \\ &= 0.1209 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กัมมะถันใน 4,6-DMDBT} &= 400 \times 0.703 \times \frac{75}{(10^6 - 75 - 75 - 500 - 32.5 - 32.5 - 32.5)} \text{ กรัม} \\ &= 0.0211 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณกัมมะถันในโมเลกุลของ 4,6 DMDBT คำนวณปริมาณ 4,6 DMDBT ที่ต้องใช้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ 4,6 DMDBT} &= 212.31 \text{ กรัม/โมล} \\ \text{ปริมาณกัมมะถัน 32.16 กรัม ใน 4,6 DMDBT ปริมาณ 212.31} & \text{ กรัม} \\ \text{ปริมาณกัมมะถัน 0.0211 กรัม ใน 4,6 DMDBT } &0.0211 \times \frac{212.31}{32.16} \text{ กรัม} \\ &= 0.1393 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ไนโตรเจนในควิโนลีน} &= 400 \times 0.703 \times \frac{32.5}{(10^6 - 75 - 75 - 500 - 32.5 - 32.5 - 32.5)} \text{ กรัม} \\ &= 0.0091 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณไนโตรเจนในโมเลกุลของควิโนลีน จึงคำนวณหาปริมาณของควิโนลีนที่เลือกใช้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของควิโนลีน} &= 129.16 \text{ กรัม/โมล} \\ \text{ปริมาณไนโตรเจน 14.01 กรัม ในควิโนลีนปริมาณ 129.16} & \text{ กรัม} \\ \text{ปริมาณไนโตรเจน 0.0091 กรัม ในควิโนลีน } &0.0091 \times \frac{129.16}{14.01} \text{ กรัม} \\ &= 0.084 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ไนโตรเจนจากอินโดล} &= 400 \times 0.703 \times \frac{32.5}{(10^6 - 75 - 75 - 500 - 32.5 - 32.5 - 32.5)} \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$= 0.0091 \quad \text{กรัม}$$

เมื่อทราบปริมาณไนโตรเจนในโมเลกุลของอินโดว จึงคำนวณหาปริมาณของอินโดวที่ต้องใช้ดังนี้

$$\text{มวลโมเลกุลของอินโดว} = 117.15 \quad \text{กรัม/โมล}$$

$$\text{ปริมาณไนโตรเจน 14.01 กรัม ในอินโดวปริมาณ 117.15 กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณไนโตรเจน 0.0091 กรัม ในอินโดวปริมาณ 0.0091} &\times \frac{117.15}{14.01} \quad \text{กรัม} \\ &= 0.076 \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ไนโตรเจนในอะคริตีน} &= 400 \times 0.703 \times \frac{32.5}{(10^6 - 75 - 75 - 500 - 32.5 - 32.5 - 32.5)} \quad \text{กรัม} \\ &= 0.0091 \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

เมื่อทราบปริมาณไนโตรเจนในโมเลกุลของอะคริตีน จึงคำนวณหาปริมาณของอะคริตีนที่ต้องใช้ดังนี้

$$\text{มวลโมเลกุลของอะคริตีน} = 179.22 \quad \text{กรัม/โมล}$$

$$\text{ปริมาณไนโตรเจน 14.01 กรัม ในอะคริตีนปริมาณ 179.22 กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณไนโตรเจน 0.0091 กรัม ในอะคริตีน 0.0091} &\times \frac{179.22}{14.01} \quad \text{กรัม} \\ &= 0.1164 \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แนฟทาลีน} &= 400 \times 0.703 \times \frac{500}{(10^6 - 75 - 75 - 500 - 32.5 - 32.5 - 32.5)} \quad \text{กรัม} \\ &= 0.1407 \quad \text{กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น น้ำมันจำลอง 4 ปริมาณ 400 ลูกบาศก์เซนติเมตรจะประกอบไปด้วย

- นอมัลลอคเทน ปริมาณ 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- DBT ปริมาณ 0.1209 กรัม
- 4,6-DMDBT ปริมาณ 0.1393 กรัม
- ควิโนลีน ปริมาณ 0.0387 กรัม
- อินโดว ปริมาณ 0.0351 กรัม
- อะคริตีน ปริมาณ 0.1164 กรัม
- แนฟทาลีน ปริมาณ 0.1407 กรัม

### ก.3 การคำนวณปริมาณธาตุที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF (ข้อมูลการวิเคราะห์อยู่ในภาคผนวก จ)

วิธีการคำนวณปริมาณของไอออนโลหะ Na ในตัวดูดซับ Na-Y zeolite

จากการวิเคราะห์พบว่า  $\text{Na}_2\text{O}$  มีปริมาณอยู่ ร้อยละโดยน้ำหนัก

ถ้าตัวดูดซับ 100 กรัม	มี $\text{Na}_2\text{O}$	9.61	กรัม
$\text{Na}_2\text{O}$ มวลโมเลกุล	61.98		กรัม/โมล
Na มวลโมเลกุล	22.99		กรัม/โมล
ดังนั้น มี Na	$= 2 \times 22.99 \times \frac{9.61}{61.98}$		กรัม
	$= 7.13$		กรัม ในตัวดูดซับ 100 กรัม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ภาคผนวก ข

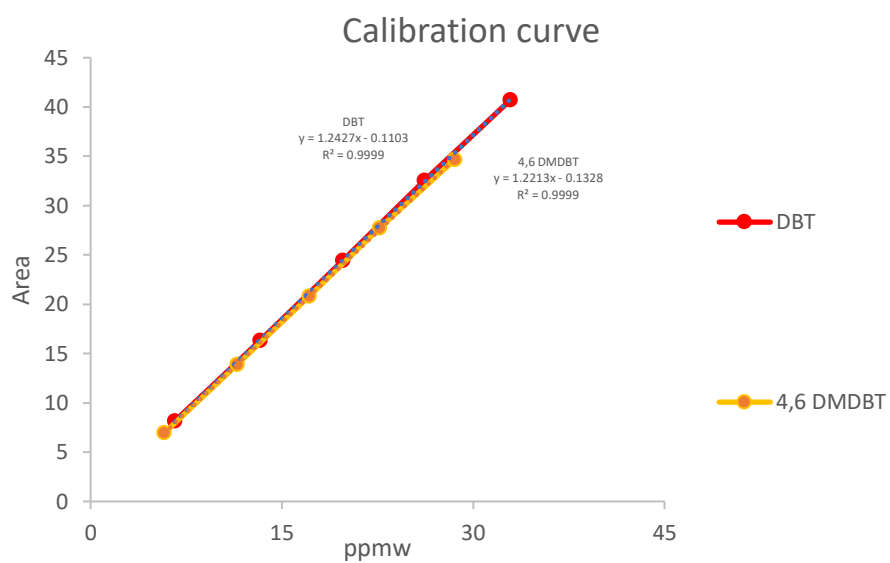
#### การวิเคราะห์สารประกอบแอมติก ไนโตรเจน และกำมะถันในน้ำมันจําลอง

จากการวิเคราะห์สารประกอบในน้ำมันจําลองโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่ของ Agilent Technologies รุ่น 7890B ประกอบด้วยดีเทคเตอร์แบบ Pulsed Flame Photometric Detector (PFPD) และ Flame ionization detector (FID) โดยคอลัมน์แบบ DB-5 โดยข้อมูลและภาวะของเครื่องแสดงดังตารางที่ ข1 เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบที่อยู่ในน้ำมันจําลอง

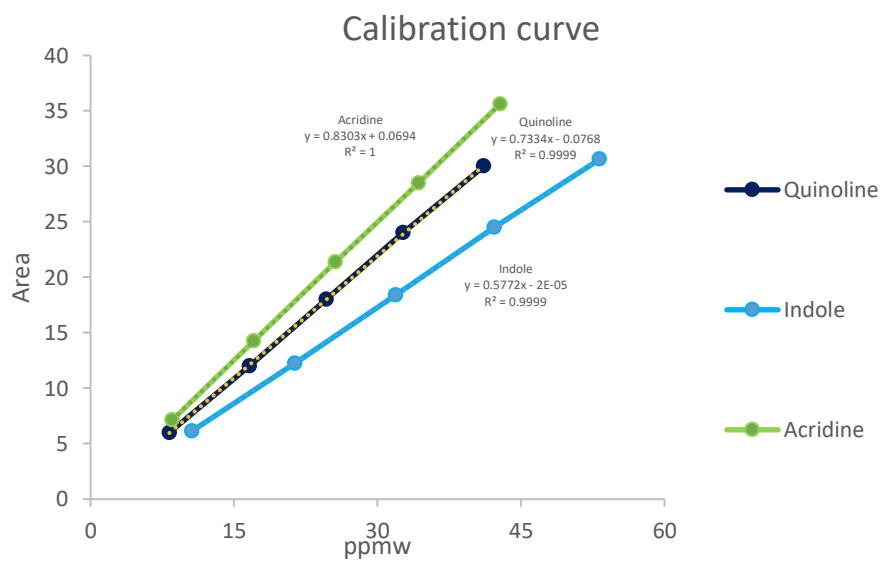
ตารางที่ ข1 ข้อมูลและภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟรุ่น Agilent Technologies รุ่น 7890B

	Column	DB-5
	Temperature (°C)	300
Injection	Pressure (psi)	20.8
	Split ratio	50
	Temperature (°C)	250
Column	Time (min)	14.5
	Temperature (°C)	250
	H <sub>2</sub> Flow (mL/min)	35
FID	Air Flow (mL/min)	400
	Makeup Flow (mL/min)	25

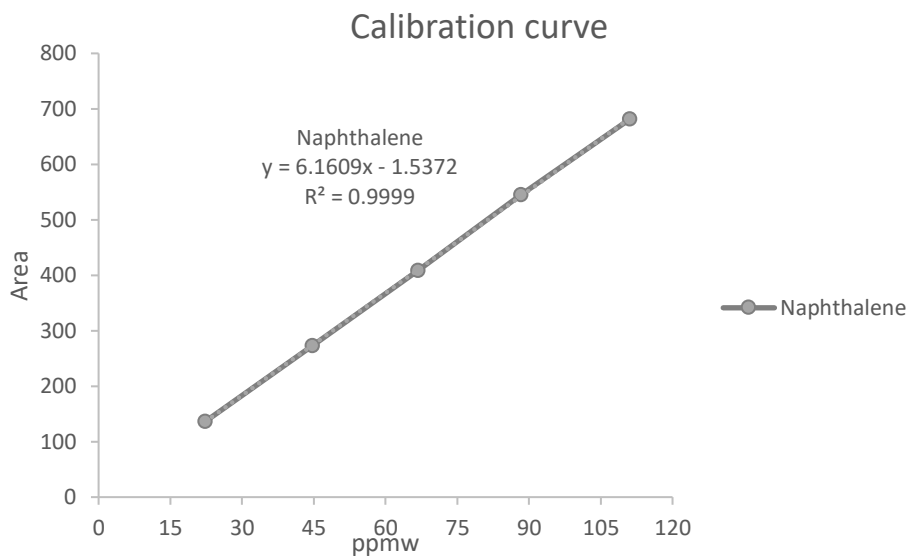
### ข.1 เส้นเทียบมาตรฐานของสารประกอบในน้ำมันจำลอง



รูปที่ ข1 เส้นเทียบมาตรฐานของสารประกอบกำมะถันในน้ำมันจำลอง

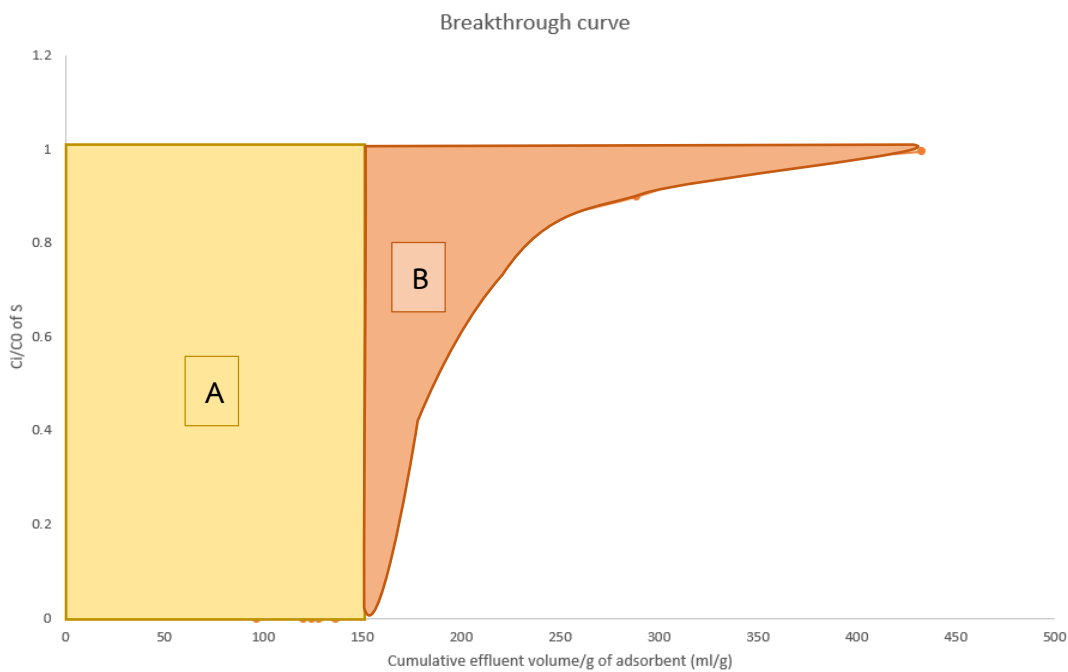


รูปที่ ข1.1 เส้นเทียบมาตรฐานของสารประกอบไนโตรเจนในน้ำมันจำลอง



รูปที่ ข1.2 เส้นเทียบมาตรฐานของสารประกอบแอโรแมติกในน้ำมันจำลอง

**ข.2 การคำนวณความจุการดูดซับจากเส้นโค้งเบรคทรู**



รูปที่ ข2 เส้นโค้งเบรคทรูของการดูดซับและแสดงพื้นที่สำหรับคำนวณการดูดซับ



$$\text{Breakthrough capacity} = \text{Area}_A \times \rho_{\text{fuel}} \times X_0$$

$$\text{Total adsorption capacity} = (\text{Area}_A + \text{Area}_B) \times \rho_{\text{fuel}} \times X_0$$

$X_0$  = Total sulfur or nitrogen or naphthalene fraction (by weight) in feed

### ตัวอย่างการคำนวณความจุการดูดซับ

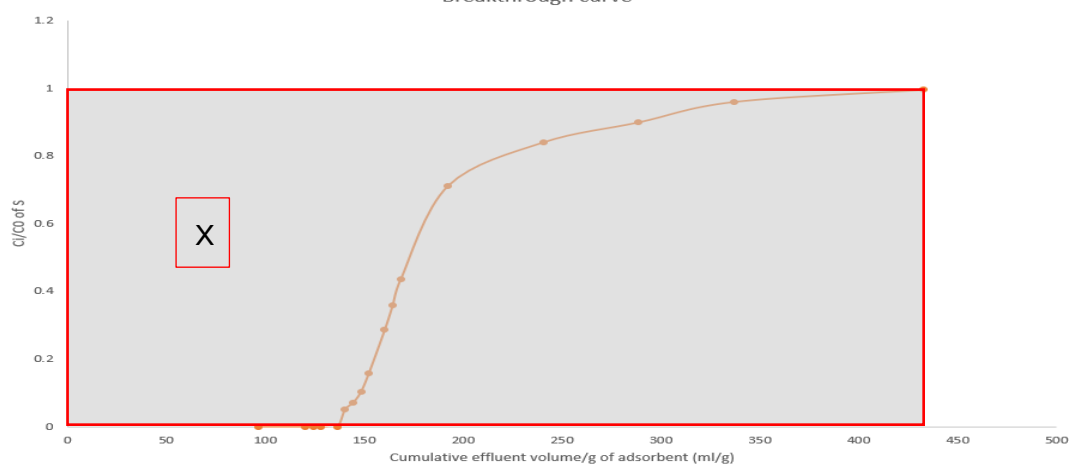
ยกตัวอย่างการดูดซับ DBT ในน้ำมันจำลอง 1 ของตัวดูดซับ Na-Y ซีโอไลต์

สมมุติว่ามีความจุทั้งหมดของการดูดซับ หรือ  $\text{Area}_A + \text{Area}_B = 321.00$  มิลลิลิตร/กรัมของตัวดูดซับ

ดังนั้น จะมีความจุในหน่วยมิลลิลิตรของกำมะถัน

$$\begin{aligned}
 &= 321.0 \times 0.703 \times \frac{75}{(10^6 - 75 - 75 - 0 - 0 - 0 - 0)} \\
 &= 0.0169 \text{ กรัมของกำมะถัน/กรัมของตัวดูดซับ} \\
 &= 16.9272 \text{ มิลลิกรัมของกำมะถัน/กรัมของตัวดูดซับ} \\
 &= \frac{16.9272}{32.06} \times 184.26 \text{ มิลลิกรัมของ DBT/กรัมของตัวดูดซับ} \\
 &= 97.378 \text{ มิลลิกรัมของ DBT/กรัมของตัวดูดซับ} \\
 &= \frac{97.378}{184.26} = 0.5284 \text{ มิลลิโมลของ DBT/กรัมของตัวดูดซับ}
 \end{aligned}$$

Breakthrough curve



รูปที่ ข3 ตัวอย่างเส้นโค้งเบรคทรูของการดูดซับ (กรณีคิดปริมาณสารที่ป้อน)

$$\text{Feeding} = \text{Area}_X \times \rho_{\text{fuel}} \times X_0$$

### ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการดูดซับ

จากการดูดซับ DBT ในน้ำมันจำลอง 1 ของตัวดูดซับ Na-Y ซีโอไลต์

โดยสมมติว่าป้อนสารเข้าระบบ หรือ  $\text{Area}_x = 450.2$  มิลลิลิตร/กรัมของตัวดูดซับ

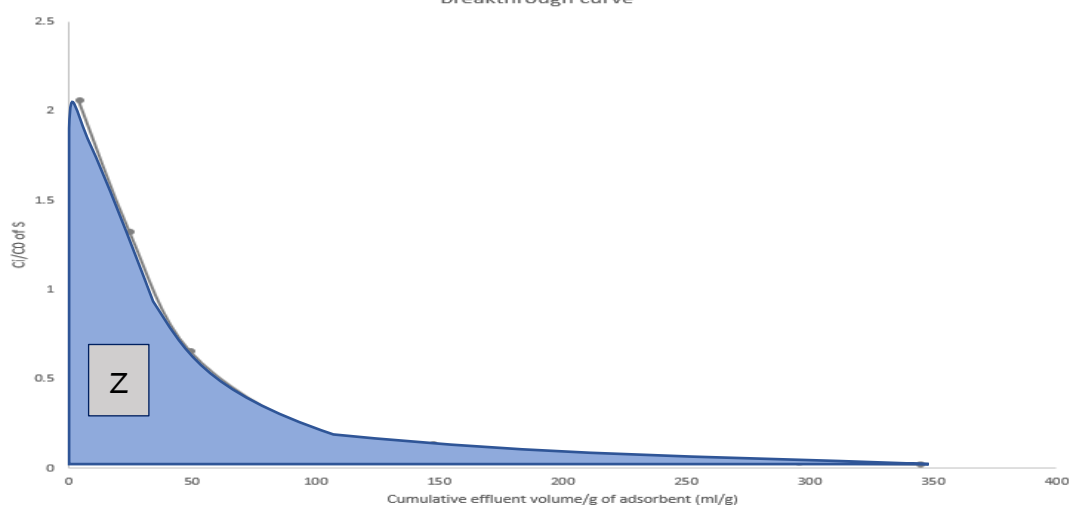
ดังนั้น จะป้อน DBT ในหน่วยมิลลิกรัมของกำมะถัน

$$\begin{aligned}
 &= 450.2 \times 0.703 \times \frac{75}{(10^6 - 75 - 75 - 0 - 0 - 0 - 0)} \\
 &= 0.02374 \text{ กรัมของกำมะถัน/กรัมของตัวดูดซับ} \\
 &= 23.7404 \text{ มิลลิกรัมของกำมะถัน/กรัมของตัวดูดซับ} \\
 &= \frac{23.7404}{32.06} \times 184 \text{ มิลลิกรัมของ DBT/กรัมของตัวดูดซับ} \\
 &= 134.1842 \text{ มิลลิกรัมของ DBT/กรัมของตัวดูดซับ} \\
 &= \frac{134.1842}{184.26} = 0.7282 \text{ มิลลิโมลของ DBT/กรัมของตัวดูดซับ}
 \end{aligned}$$

จึงสามารถคำนวณร้อยละการดูดซับได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละการดูดซับ} &= \frac{\text{Adsorbed}}{\text{Feeding}} \times 100 \\
 &= \frac{0.5284}{0.7282} \times 184 = 72.56
 \end{aligned}$$

### ข.3 การคำนวณการคายซับ



รูปที่ ข4 ตัวอย่างเส้นโค้งเบรคทรูของการคายซับ

$$\text{Total desorption capacity} = \text{Area}_C \times \rho_{\text{fuel}} \times X_0$$

ตัวอย่างการคำนวณการคายซั้บ

การคายซั้บ DBT ในโทลูอินจากน้ำมันจำลอง 1 ของตัวดูดซั้บซีโอไลต์ Na-Y

โดยสมมุติให้มีความจุทั้งหมดของการดูดซั้บ หรือ  $Area_C = 120.0$  มิลลิลิตร/กรัมของตัวดูดซั้บ

ดังนั้น จะมีความจุในหน่วยมิลลิกรัมของกำมะถัน

$$\begin{aligned}
 &= 120.0 \times 0.703 \times \frac{75}{(10^6 - 75 - 75 - 0 - 0 - 0 - 0)} \\
 &= 0.0063 \text{ กรัมของกำมะถัน/กรัมของตัวดูดซั้บ} \\
 &= 6.3279 \text{ มิลลิกรัมของกำมะถัน/กรัมของตัวดูดซั้บ} \\
 &= \frac{6.3279}{32.06} \times 184 \text{ มิลลิกรัมของ DBT/กรัมของตัวดูดซั้บ} \\
 &= 36.3689 \text{ มิลลิกรัมของ DBT/กรัมของตัวดูดซั้บ} \\
 &= \frac{36.3689}{184.26} = 0.1974 \text{ มิลลิโมลของ DBT/กรัมของตัวดูดซั้บ}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการคายซั้บ

ยกตัวอย่างเช่น ตัวดูดซั้บซีโอไลต์ Na-Y ดูดซั้บ DBT = 0.30 มิลลิโมลของ DBT/กรัมของตัวดูดซั้บ

เกิดการคายซั้บออกมาในโทลูอิน (ภาวะในการคืนสภาพ: อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส) = 0.22 มิลลิโมลของ DBT/กรัมของตัวดูดซั้บ

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละการคายซั้บ} &= \frac{0.22}{0.30} \times 100 \\
 &= 73.33
 \end{aligned}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

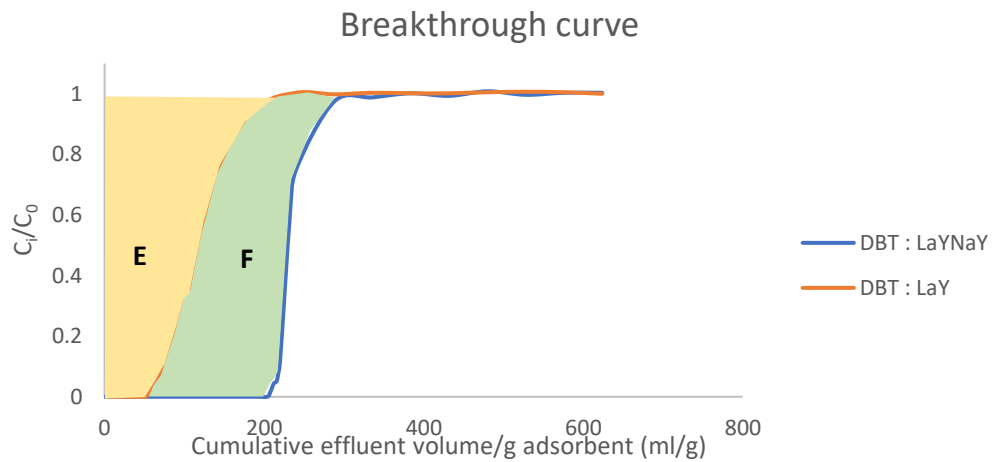
ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพของการคืนสภาพ

เนื่องจากตัวดูดซั้บซีโอไลต์ Na-Y ดูดซั้บสารทั้งหมด = 2.2 mmol

แต่สามารถคายซั้บออกมาในโทลูอิน (ภาวะในการคืนสภาพ: อัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส) = 1.2 mmol

$$\begin{aligned}
 \text{ร้อยละการคายซั้บ} &= \frac{1.2}{2.2} \times 100 \\
 &= 54.54
 \end{aligned}$$

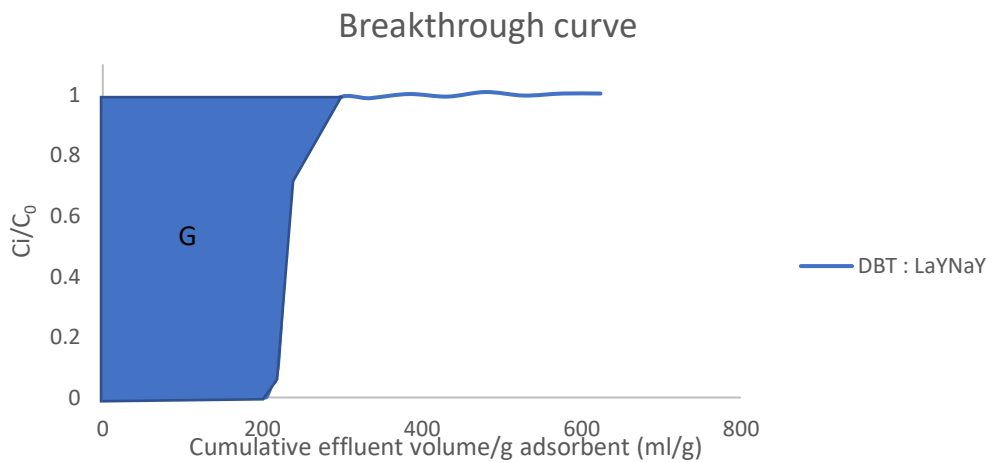
ข.4 การคำนวณความจุการดูดซับในคอลัมน์ที่สองในระบบสองขั้นตอน



รูปที่ ข5 เส้นโค้งเบรคทูรของการดูดซับและแสดงพื้นที่สำหรับคำนวณการดูดซับในคอลัมน์ที่สอง

$$\text{Total adsorption capacity} = (\text{Area}_F) \times \rho_{\text{fuel}} \times X_0$$

$X_0$  = Total sulfur or nitrogen or naphthalene fraction (by weight) in feed



รูปที่ ข6 เส้นโค้งเบรคทูรของการดูดซับและแสดงพื้นที่สำหรับคำนวณการดูดซับในระบบสองขั้นตอน

การหาพื้นที่การดูดซับในคอลัมน์ที่สอง

$$\text{Area}_F (\text{Area in second column}) = \text{Area}_G (\text{Area in double stage}) - \text{Area}_E (\text{Area in single stage})$$

## ภาคผนวก ค

## ข้อมูลดิบจากการทดลองดูดซับ

ตารางที่ ค1 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันเจ้าลองประเภทที่ 1 ที่ศึกษานาตอมนุภาคของตัวดูดซับ Na-Y ที่สังเกตต่อการดูดซับ อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างที่ทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume per 0.5 g		Concentration (ppm)
	Volume (mL)	Volume per 1 g (mL)	
	<150 $\mu\text{m}$		
			Feed
1	2	4	67.62
78	156	312	0.00
79	158	316	0.00
80	160	320	0.96
84	168	336	11.60
96	192	384	45.50
108	216	432	62.00
114	228	456	65.70
116	232	464	66.00
120	240	480	68.20

Sampling (time)	Volume per 0.5 g		Concentration (ppm)
	Volume (mL)	Volume per 1 g (mL)	
	212-425 $\mu\text{m}$		
			Feed
1	2	4	70.91
12	24	48	0.00
60	120	240	0.00
61	122	244	0.00
62	124	248	0.21
66	132	264	0.37
72	144	288	0.93
84	168	336	8.29
132	264	528	66.04
150	300	600	69.98
			425-715 $\mu\text{m}$
			Feed
1	2	4	81.17
23	46	92	0.00
24	48	96	0.00
25	50	100	0.15
36	72	144	0.17
48	96	192	0.59
84	168	336	3.03
108	216	432	28.81
144	288	576	49.99
152	304	608	67.88
164	328	656	73.27
			74.57
			0.00
			0.12
			0.15
			0.24
			1.00
			5.16
			38.24
			59.43
			73.67
			77.03
			76.81

ตารางที่ ๓2 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 1 ของตัวดูดซับ Na-Y, La-Y และ Ce-Y อัตราการไหล 1 มิลลิเมตรต่อเวลาที่ ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างที่ทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)	
			DBT	4,6-DMDBT
Na-Y				
Feed				
1	2	4	74.32575	71.7632
12	24	48	0	0
68	136	272	0	0
69	138	276	0	0
70	140	280	0	0
71	142	284	0	0.146554
72	144	288	0.15786	0.289295
84	168	336	3.28875	6.50354
96	192	384	23.9421	36.55438
108	216	432	49.59435	63.80197
120	240	480	63.9333	74.90284
124	248	496	65.64345	74.90284
132	264	528	69.4584	77.14544
144	288	576	71.8263	77.25757
156	312	624	72.6156	77.14544
La-Y				
Feed				
12	24	48	72.74715	72.99663
19	38	76	0	0
20	40	80	0	0
24	48	96	0.13	0
25	50	100	0.41	0
			0.49	0.14

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)	
			DBT	4,6-DMDBT
La-Y (ต่อ)				
26	52	104	0.61	0.17
28	56	112	1	0.28
31	62	124	1.8	0.52
34	68	136	3.1	0.94
35	70	140	3.7	1.1
36	72	144	4.2	1.4
48	96	192	15	6.5
132	264	528	52.2	56.5
144	288	576	52.3	58.7
156	312	624	52.2	60.1
Ce-Y				
Feed				
1	2	4	0	0
52	104	208	0	0
53	106	212	0	0.145769
54	108	216	0	0.22426
60	120	240	2.76255	3.25177
72	144	288	36.43935	35.32095
84	168	336	69.1953	59.54103
96	192	384	79.06155	65.82031
108	216	432	80.37705	67.278
120	240	480	80.11395	67.95078
132	264	528	79.7193	68.84782
144	288	576	79.32465	69.29634
156	312	624	80.11395	70.6419

ตารางที่ ค3 ข้อมูลการดูดซับน้ำมีจำลองประเภทที่ 1 ของตัวดูดซับ Ni-Y, Co-Y และ Cu-Y อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อเวลาที่ ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างที่ทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)	
			DBT	4,6-DIMDBT
Ni-Y				
Feed				
0	0	0	74.07228	69.0097
12	24	48	0	0
48	96	192	0	0
50	100	200	0	0
52	104	208	0.18417	0.235473
57	114	228	0.618285	0.426094
60	120	240	1.3155	1.45769
72	144	288	13.81275	2.91538
84	168	336	43.80615	23.21091
96	192	384	63.144	55.95287
99	198	396	66.8274	70.86616
120	240	480	72.48405	73.44515
132	264	528	74.11793	74.11793
144	288	576	74.9835	75.35136
156	312	624	75.64125	75.57562
Co-Y				
Feed				
12	24	48	72.74715	72.99663
64	128	256	0	0
65	130	260	0	0.370029
66	132	264	0	0.627928
72	144	288	2.49945	4.59733

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)	
			DBT	4,6-DIMDBT
Co-Y (ต่อ)				
84	168	336	15.12825	26.57481
96	192	384	48.27885	57.1863
108	216	432	68.1429	69.5206
120	240	480	72.6156	70.75403
132	264	528	74.58885	71.31468
144	288	576	74.7204	70.75403
156	312	624	76.299	70.6419
Cu-Y				
Feed				
12	24	48	76.5621	66.1567
56	112	224	0	0
57	114	228	0	0.213047
58	116	232	0	0.426094
59	118	236	0.249945	0.840975
60	120	240	0.434115	1.34556
72	144	288	19.2063	30.61149
84	168	336	51.96225	58.41973
96	192	384	65.5119	64.47475
108	216	432	72.74715	65.48392
120	240	480	74.1942	64.58688
132	264	528	73.668	65.37179
144	288	576	74.06265	65.25966
156	312	624	74.32575	65.93244

ตารางที่ ค4 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 1 ของตัวดูดซับ Fe-Y(S) อัตราการไหล 1 ไมล์ 1 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างที่ตัวอย่างที่ทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)	
			DBT	4,6-DIMDBT
Fe-Y(S)				
Feed			74.85195	69.85699
12	24	48	0	0
30	60	120	0	0
31	62	124	0.302565	0.818549
32	64	128	0.44727	1.45769
36	72	144	0.84192	2.57899
48	96	192	5.65665	12.44643
60	120	240	48.27885	54.38305
72	144	288	72.0894	66.71735
84	168	336	76.69365	68.73569
96	192	384	77.6145	69.07208
108	216	432	78.53535	69.63273
120	240	480	77.0883	69.07208
132	264	528	77.21985	69.63273
144	288	576	77.8776	70.6419
156	312	624	77.74605	70.6419

ตารางที่ ค5 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 2 ของตัวดูดซับ Na-Y อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างที่ทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)		
			Quinoline	Indole	Acridine
Na-Y					
Feed			27.50176	32.7075	31.11627
1	2	4	0	0	0
44	88	176	0	0	0
45	90	180	0	0	0.179674
46	92	184	0	0.156982	0.40835
47	94	188	0	0.414881	0.89837
48	96	192	0.31572	0.661567	1.14338
60	120	240	11.8395	22.87452	18.29408
72	144	288	27.3624	46.30969	28.82951
84	168	336	34.203	53.71027	30.62625
85	170	340	35.65005	55.72861	31.52462
87	174	348	35.65005	55.39222	31.19794
88	176	352	36.43935	56.17713	31.52462
89	178	356	36.0447	55.72861	31.19794
96	192	384	38.28105	57.74695	31.76963
108	216	432	39.85965	58.75612	31.44295
120	240	480	40.64895	59.09251	31.52462
132	264	528	40.91205	59.54103	31.44295
144	288	576	42.3591	60.32594	31.52462
156	312	624	43.54305	60.88659	31.93297



ตารางที่ ๓6 ข้อมูลการดูดซับน้ำจืดของประเภทที่ 2 ของตัวดูดซับ La-Y, Ce-Y และ Ni-Y อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม เก็บสารตัวอย่างที่ทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)		
			Quinoline	Indole	Acridine
La-Y					
0	0	Feed	32.89273	33.25875	31.68796
1	2	4	0	0	0
12	24	48	0	0	0
42	84	168	0	0	0
43	86	172	0	0.269112	0.130672
44	88	176	0	0.302751	0.155173
45	90	180	0	0.347603	0.228676
46	92	184	0.18417	0.482159	0.285845
48	96	192	0.355185	0.78491	0.359348
60	120	240	3.81495	7.06419	0.65336
72	144	288	13.81275	21.08044	5.14521
84	168	336	25.65225	36.10586	13.55722
96	192	384	36.17625	48.66442	21.07086
108	216	432	43.01685	55.50435	26.46108
132	264	528	49.33125	60.21381	29.23786
144	288	576	50.12055	61.55937	31.68796
156	312	624	51.17295	61.33511	30.87126
Ce-Y					
1	2	4	29.37688	33.74875	32.09631
49	98	196	0	0	0
50	100	200	0	0.213047	0.8167
Ni-Y					
1	2	4	33.20525	33.32	32.09631
36	72	144	0	0	0
48	96	192	0	0	0
59	118	236	0	0	0
60	120	240	0	0	0.228676
61	122	244	0	0.280325	0.351181
72	144	288	6.0513	12.11004	9.22871
96	192	384	38.4126	56.17713	31.52462
108	216	432	43.9377	59.4289	32.34132
120	240	480	46.17405	60.32594	32.42299
132	264	528	47.358	60.43807	32.58633
144	288	576	48.54195	60.99872	32.34132
156	312	624	50.2521	62.00789	32.99468

ตารางที่ ๗ ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 2 ของตัวดูดซับ Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)		
			Quinoline	Indole	Acridine
Co-Y					
0	0	29.37688	32.76875	32.09631	
1	2	0	0	0	
41	82	164	0	0	
42	84	168	0	0	
43	86	172	0	0	0.130672
44	88	176	0	0	0.285845
45	90	180	0	0.22426	0.612525
46	92	184	0.31572	0.773697	1.30672
48	96	192	0.71037	1.68195	2.36843
60	120	240	12.1026	23.65943	20.74418
72	144	288	28.941	46.98247	31.11627
84	168	336	36.5709	53.59814	32.09631
96	192	384	39.9912	55.39222	32.01464
132	264	528	43.9377	57.41056	32.09631
144	288	576	44.727	57.85908	32.17798
156	312	624	45.2532	57.97121	32.01464
Cu-Y					
1	2	29.6894	33.38125	32.42299	
8	16	0	0	0	
9	18	0	0.22426	0.596191	
		36	0.34203	1.23343	2.69511

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)		
			Quinoline	Indole	Acridine
Cu-Y(ต่อ)					
12	24	48	6.44595	16.14672	22.94927
24	48	96	28.54635	45.30052	31.8513
36	72	144	35.65005	51.13128	32.17798
48	96	192	38.80725	53.48601	32.01464
60	120	240	40.5174	54.71944	32.17798
72	144	288	42.096	55.95287	32.34132
84	168	336	43.01685	56.73778	32.50466
96	192	384	43.6746	57.29843	32.42299
132	264	528	45.64785	58.75612	32.83134
144	288	576	45.64785	58.53186	32.58633
156	312	624	45.91095	58.75612	32.58633
Fe-Y(S)					
1	2	26.72046	30.7475	31.44295	
10	20	40	0	0	
11	22	44	0	0	
12	24	48	0	0	0.302179
17	34	68	0	1.79408	3.34847
18	36	72	0	4.03668	6.69694
24	48	96	7.893	21.08044	22.29591
36	72	144	22.49505	40.59106	28.66617
72	144	288	38.28105	52.7011	30.29957
84	168	336	39.7281	53.59814	30.29957
120	240	480	42.49065	55.50435	30.54458
144	288	576	43.6746	56.065	30.54458
156	312	624	44.59545	56.62565	30.78959

ตารางที่ ค8 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 3 ของตัวดูดซับ Na-Y, La-Y และ Ce-Y อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างที่ทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume		Concentration (ppm)					
	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	DBT	4,6 DMDBT	
Na-Y								
	Feed	30.00	34.18	32.26	80.64	75.80		
0	0	0	0	0	0	0		
1	2	4	0.00	0.00	0.00	0.00		
38	76	152	0.00	0.00	0.00	0.37		
39	78	156	0.00	0.00	0.00	0.84		
40	80	160	0.00	0.00	0.00	1.35		
41	82	164	0.00	0.20	0.62	3.14		
42	84	168	0.00	0.39	1.47	6.62		
43	86	172	0.00	21.19	28.91	73.14	69.86	
44	88	176	14.22	24.26	30.95	75.12	73.22	
60	120	240	23.99	31.91	32.34	80.64	75.13	
72	144	288	25.31	32.59	32.42	80.90	75.35	
84	168	336	26.33	33.14	32.83	80.51	75.69	
120	240	480	27.50	33.44	32.18	80.38	75.13	
144	288	576	27.58	33.38	32.42	80.25	74.79	
156	312	624	28.20	33.81	32.67	80.51	75.69	
La-Y								
	Feed	29.92	33.26	31.03	80.51	73.89		
1	2	4	0.00	0.00	0.00	0.00		
13	26	52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	
15	30	60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	

Sampling (time)	Volume		Concentration (ppm)					
	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	DBT	4,6 DMDBT	
La-Y(ต่อ)								
22	44	88	0.00	0.00	0.00	0.00	4.93	
23	46	92	0.00	0.00	0.00	8.02	6.06	
24	48	96	0.00	0.00	1.06	9.60	7.40	
25	50	100	0.34	0.67	1.31	11.44	8.97	
36	72	144	3.20	5.88	9.39	39.20	34.54	
96	192	384	26.56	32.71	30.71	75.90	73.33	
108	216	432	27.35	33.01	31.12	76.04	73.56	
120	240	480	27.81	33.14	30.79	75.90	73.33	
144	288	576	28.52	33.38	30.87	76.04	73.45	
156	312	624	28.75	33.44	30.87	75.90	73.45	
Ce-Y								
	Feed	28.99	33.69	31.36	77.61	69.97		
12	24	48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
19	38	76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
20	40	80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	
21	42	84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	
22	44	88	0.00	0.00	0.16	0.00	0.98	
23	46	92	0.00	0.12	0.30	0.00	1.79	
24	48	96	0.00	0.23	0.63	2.76	3.14	
25	50	100	0.13	0.47	1.14	4.60	5.05	
36	72	144	6.17	18.56	24.99	66.30	61.56	
96	192	384	24.61	33.44	31.12	77.61	70.08	
120	240	480	25.39	33.75	30.87	77.61	69.97	
144	288	576	25.94	33.63	30.79	77.22	69.63	
156	312	624	26.56	34.12	31.12	78.14	70.31	

ตารางที่ ๑๑ ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจากของประเภทที่ 3 ของตัวดูดซับชั้น Ni-Y, Co-Y และ Cu-Y อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume		Concentration (ppm)					
	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	DBT	4,6 DMDBT	
Ni-Y								
	Feed	30.94	33.75	29.40	79.72	75.13		
0	0	0	0	0	0	0		
1	2	4	0.00	0.00	0.00	0.00		
36	72	144	0.00	0.00	0.00	0.00		
37	74	148	0.00	0.00	0.00	0.00	1.91	
38	76	152	0.00	0.00	0.00	0.00	3.36	
39	78	156	0.00	0.00	1.23	0.00	5.27	
40	80	160	0.00	0.00	1.72	0.00	8.07	
42	84	168	0.00	1.96	4.82	15.00	15.81	
43	86	172	0.94	3.00	6.21	20.13	20.97	
55	110	220	10.00	24.62	31.77	79.32	75.01	
72	144	288	13.36	29.03	32.18	81.30	75.69	
84	168	336	16.33	30.56	32.18	80.64	75.69	
120	240	480	20.47	32.10	32.42	80.64	75.80	
132	264	528	21.49	32.40	32.18	80.25	75.35	
156	312	624	23.28	33.26	32.75	81.30	76.47	
Co-Y								
	Feed	30.39	33.81	31.20	78.40	70.42		
1	2	4	0.00	0.00	0.00	0.00		
15	30	60	0.00	0.00	0.00	0.00		
16	32	64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	
17	34	68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	

Sampling (time)	Volume		Concentration (ppm)					
	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	DBT	4,6 DMDBT	
Co-Y(ต่อ)								
18	36	72	0.00	0.10	0.23	0.00	1.23	
19	38	76	0.00	0.18	0.48	0.00	2.24	
20	40	80	0.00	0.34	0.98	0.00	3.70	
24	48	96	0.00	2.45	5.06	14.73	15.03	
36	72	144	11.56	20.15	25.97	66.43	60.89	
96	192	384	26.56	32.28	31.03	77.88	69.97	
108	216	432	27.11	32.40	31.12	77.75	70.08	
120	240	480	27.50	32.59	31.12	77.35	69.63	
156	312	624	28.52	33.20	31.61	78.40	70.64	
Cu-Y								
	Feed	29.22	33.69	31.69	78.54	76.02		
1	2	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	6	12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	8	16	0.00	0.10	0.22	0.00	2.13	
5	10	20	0.00	1.59	3.19	0.00	13.79	
6	12	24	0.00	6.00	10.62	0.00	34.31	
7	14	28	0.00	12.01	19.36	0.00	54.27	
8	16	32	0.00	17.40	25.73	0.00	66.61	
9	18	36	0.00	21.13	29.16	73.93	72.55	
10	20	40	13.99	23.58	30.79	76.96	75.24	
24	48	96	23.13	30.14	31.77	77.09	75.01	
48	96	192	26.33	32.34	32.67	78.40	76.36	
96	192	384	27.42	32.95	32.50	78.01	76.02	
144	288	576	28.13	33.38	32.50	78.14	76.02	
156	312	624	28.20	33.32	32.50	77.75	76.02	

ตารางที่ ค10 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจากของประเภทที่ 3 ของตัวดูดซับซัพ Fe-Y(S) อัตรา ตารางที่ ค11 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจากของประเภทที่ 4 ของตัวดูดซับซัพ Na-Y อัตรา การไหล 1 มิลลิลิตร/นาที่ ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสาร การไหล 1 มิลลิลิตร/นาที่ ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บ ตัวอย่างที่ทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume		Concentration (ppm)										
	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	DBT	4,6-DMDBT	Fe-Y(S)					
Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	Naphthalene	DBT		4,6-DMDBT	Na-Y			
Feed			Feed										
0	0	0	29.61	33.38	31.36	76.04	70.31		33.69	32.18	521.58	78.40	70.42
4	8	16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	10	20	0.00	0.00	0.00	0.43	0.77		0.00	0.00	0.00	0.00	0.17
6	12	24	0.00	0.00	0.32	3.29	4.37		0.00	0.19	0.00	0.00	0.13
7	14	28	0.00	0.52	1.88	11.97	14.13		0.00	0.42	1.46	0.00	0.58
8	16	32	0.34	1.59	5.06	25.92	27.92		0.23	1.06	19.06	0.00	5.38
12	24	48	2.66	8.21	18.21	64.85	62.68		0.74	2.94	47.65	0.00	11.77
24	48	96	10.00	18.25	25.97	76.69	69.52		1.78	6.13	97.20	0.00	20.97
36	72	144	14.69	23.15	28.75	75.51	70.08		0.00	23.93	389.44	61.30	60.77
48	96	192	17.97	25.73	28.91	76.43	70.87		18.99	31.36	513.96	77.22	74.23
60	120	240	21.56	29.09	30.63	76.17	70.53		24.53	32.75	526.66	79.46	76.36
72	144	288	23.83	30.38	30.63	76.04	70.31		25.39	32.50	524.12	79.06	76.14
84	168	336	25.16	31.05	30.54	75.25	69.63		25.86	32.42	521.58	78.67	75.80
96	192	384	26.10	31.73	30.87	76.17	70.31		26.80	32.75	529.20	79.72	76.81
108	216	432	26.33	31.85	31.03	75.90	70.08		26.88	32.50	524.12	79.06	76.25
120	240	480	26.88	32.16	30.95	75.90	70.31		27.89	32.83	529.20	79.85	76.81
132	264	528	27.03	32.16	30.95	75.64	69.97		27.58	32.34	520.95	78.67	75.69
144	288	576	27.03	32.10	30.79	75.12	69.52						
156	312	624	27.19	32.40	31.12	76.30	70.53						

ตารางที่ ค12 ข้อมูลการดูดซับน้ำหนักจำลองประเภทที่ 4 ของตัวดูดซับ La-Y, Ce-Y และ Ni-Y อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)					
			Quinoline	Indole	Acridine	Naphthalene	DBT	4,6 DMBT
La-Y								
0	0	0	29.69	33.20	31.36	521.58	76.83	70.98
1	2	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	26	52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	30	60	0.00	0.00	0.00	22.24	0.00	1.57
16	32	64	0.00	0.00	0.00	31.13	0.00	2.35
17	34	68	0.00	0.00	0.00	42.57	0.00	3.36
20	40	80	0.00	0.00	0.00	94.66	0.00	8.07
21	42	84	0.00	0.00	1.31	115.62	13.02	10.09
22	44	88	0.00	0.00	1.80	139.77	15.65	12.33
24	48	96	0.00	1.23	3.10	193.13	21.71	17.60
25	50	100	0.00	1.53	3.84	219.18	24.73	20.41
27	54	108	0.94	2.02	4.74	247.13	27.89	23.44
72	144	288	22.35	30.07	30.05	529.20	76.69	70.53
96	192	384	25.55	32.16	30.05	531.11	76.96	70.75
108	216	432	26.25	32.46	30.14	523.49	76.96	70.75
156	312	624	27.58	32.95	29.97	520.31	76.83	70.64
Ce-Y								
1	2	4	28.28	33.69	31.69	501.25	75.64	70.08
14	28	56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	30	60	0.00	0.00	0.00	1.84	0.00	0.19

Sampling (time)	Volume per 0.5 g (mL)	Volume per 1 g (mL)	Concentration (ppm)					
			Quinoline	Indole	Acridine	Naphthalene	DBT	4,6 DMBT
Ce-Y(ต่อ)								
17	34	68	0.00	0.00	0.00	8.26	0.00	1.35
18	36	72	0.00	0.10	0.33	16.52	0.00	2.47
19	38	76	0.00	0.28	0.90	26.68	3.95	4.15
20	40	80	0.00	0.54	1.55	41.29	6.05	6.39
21	42	84	0.18	0.98	2.37	65.44	9.34	9.76
60	120	240	20.78	32.10	31.36	517.13	76.69	71.31
72	144	288	22.19	32.71	31.12	517.77	76.56	71.09
84	168	336	23.67	33.20	31.28	519.04	76.69	71.09
144	288	576	25.78	33.75	31.28	513.96	76.43	70.87
156	312	624	26.25	33.93	31.36	518.40	76.69	71.09
Ni-Y								
1	2	4	29.69	33.87	32.18	518.40	76.27	75.13
20	40	80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	42	84	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.13
22	44	88	0.00	0.00	0.28	1.21	0.00	0.28
23	46	92	0.00	0.00	0.36	4.64	0.00	1.08
24	48	96	0.00	0.00	0.39	13.98	0.00	3.36
25	50	100	0.00	0.23	1.23	35.58	0.00	7.62
27	54	108	0.13	1.35	5.23	119.44	20.39	21.98
38	76	152	7.89	23.40	32.50	530.48	79.06	75.80
43	86	172	12.19	27.32	33.08	533.02	79.32	76.14
48	96	192	14.92	28.36	32.01	519.68	77.48	74.34
84	168	336	23.52	32.28	32.42	525.59	76.27	75.24
120	240	480	25.78	33.08	32.26	523.49	76.27	75.01
156	312	624	26.72	33.50	32.50	527.30	78.80	75.58

ตารางที่ ค1.3 ข้อมูลการดูดซับน้ำมีจำลองประเภทที่ 4 ของตัวดูดซับ Co-Y, Cu-Y และ Fe-Y(S) อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume		Concentration (ppm)					
	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	Naphthalene	DBT	4,6 DMDBT
Co-Y								
	Feed	30.16	34.18	32.50	514.59	78.14	70.87	
0	0	0	0	0	0	0	0	
1	2	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2	4	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	6	12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7	14	28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
8	16	32	0.00	0.16	5.91	1.09	1.46	
9	18	36	0.00	0.20	0.98	21.60	4.34	5.38
10	20	40	0.14	0.80	3.35	59.72	11.58	13.12
36	72	144	22.11	31.05	32.75	513.32	76.83	70.42
72	144	288	25.39	32.40	32.67	513.32	76.83	70.42
84	168	336	26.33	32.71	32.75	512.69	76.83	70.42
96	192	384	26.80	32.83	32.67	513.96	76.83	70.53
108	216	432	27.35	33.08	32.67	513.96	76.56	70.31
156	312	624	28.67	33.57	32.75	513.32	76.83	70.42
Cu-Y								
	Feed	29.77	34.30	32.91	536.19	78.01	76.36	
1	2	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3	6	12	0.00	0.00	0.00	0.00	1.46	
6	12	24	0.00	8.76	15.60	283.34	0.00	46.87
7	14	28	0.00	17.27	26.30	456.78	0.00	68.96
8	16	32	0.00	22.66	31.20	517.77	0.00	76.02

Sampling (time)	Volume		Concentration (ppm)					
	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	Naphthalene	DBT	4,6 DMDBT
Cu-Y(ต่อ)								
9	18	36	0.00	24.93	32.10	522.85	77.88	76.25
10	20	40	17.11	26.34	32.26	523.49	78.01	76.36
24	48	96	24.61	31.24	32.50	523.49	77.88	76.14
72	144	288	27.89	33.26	32.99	527.93	78.54	76.81
84	168	336	28.28	33.20	33.08	526.03	78.14	76.47
96	192	384	28.05	33.57	33.08	529.20	78.54	76.81
132	264	528	28.52	33.69	32.99	527.30	78.14	76.47
144	288	576	29.77	33.38	32.75	522.85	77.61	75.80
156	312	624	29.77	33.44	32.91	523.49	77.88	76.14
Fe-Y(S)								
	Feed	34.61	33.32	31.61	509.51	76.56	70.53	
0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4	8	16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5	10	20	0.00	0.00	0.26	16.52	3.16	4.49
6	12	24	0.00	0.34	1.23	68.61	12.50	15.47
7	14	28	0.38	1.47	5.06	179.15	29.99	31.84
9	18	36	1.48	4.72	11.19	285.89	45.91	46.09
10	20	40	3.28	7.47	15.93	373.56	58.67	57.07
60	120	240	29.61	29.71	30.71	507.60	77.09	70.19
72	144	288	29.53	30.99	30.63	508.24	76.04	70.31
84	168	336	29.61	31.24	30.54	514.59	75.77	70.42
96	192	384	30.31	31.48	30.54	520.95	76.30	70.19
108	216	432	30.24	32.22	30.63	507.60	76.56	70.53
132	264	528	31.88	32.77	30.87	509.51	76.69	70.75
144	288	576	32.81	33.20	31.03	508.24	76.83	70.53
156	312	624	33.05	33.32	31.44	510.15	76.43	69.86

ตารางที่ ค14 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 4 ของตัวดูดซับ La-Y (คอลัมน์ที่ 1) ตารางที่ ค15 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 4 ของตัวดูดซับ La-Y (คอลัมน์ที่ 1) และ Na-Y (คอลัมน์ที่ 2) ด้วยระบบดูดซับสองขั้นตอน อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที และ Ni-Y (คอลัมน์ที่ 2) ด้วยระบบดูดซับสองขั้นตอน อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างที่ทุก 2 นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารตัวอย่างที่ทุก 2 นาที

Sampling (time)	Volume		Concentration (ppm)							Concentration (ppm)				
	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	Naphthalene	DBT	4,6 DMDBT	Quinoline	Indole	Acridine	Naphthalene	DBT	4,6 DMDBT
	Feed	Feed	29.69	35.34	31.77	540.01	78.54	72.10	33.13	33.08	30.63	507.60	75.90	69.52
0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	24	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	48	48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
36	72	72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	96	96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57
51	102	102	0.00	0.00	0.00	1.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	12.71	0.00	2.80
52	104	104	0.00	0.00	0.00	8.89	1.30	1.46	0.00	0.10	0.90	38.12	6.97	8.30
53	106	106	0.00	0.00	0.29	20.96	3.42	3.92	0.00	0.53	2.94	85.77	14.87	16.26
54	108	108	0.00	0.00	0.41	24.78	4.21	5.05	0.00	1.35	6.13	147.39	24.60	25.57
55	110	110	0.00	0.19	1.47	56.54	9.34	10.54	0.00	2.70	9.80	214.10	34.73	34.65
58	116	116	0.38	4.59	14.54	304.31	46.04	44.63	0.00	24.07	29.40	507.60	75.12	68.85
60	120	120	0.94	8.09	19.93	400.87	58.80	55.73	9.22	28.85	29.56	515.86	76.30	69.63
72	144	144	7.73	23.58	30.63	531.75	76.56	70.53	16.25	30.69	29.48	518.40	76.69	70.08
84	168	168	13.05	28.30	30.87	536.83	77.61	71.31	20.08	31.36	29.07	510.78	76.17	69.52
96	192	192	16.64	30.44	31.28	540.64	78.67	72.32	22.19	32.10	29.16	513.32	76.43	69.74
108	216	216	18.59	31.18	31.03	536.19	78.01	71.88	25.55	32.46	29.24	512.05	76.43	69.86
120	240	240	20.86	32.34	31.44	542.55	79.19	72.88	25.94	32.71	28.75	512.69	76.43	69.63
132	264	264	21.33	32.34	30.95	534.92	78.27	71.99	26.88	33.01	28.91	513.32	76.83	70.08
144	288	288	22.66	32.95	31.28	536.83	78.80	72.44	27.89	33.20	29.16	512.05	76.69	69.97
156	312	312	23.44	33.26	31.36	536.83	78.80	72.55						

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ค16 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 4 ของตัวดูดซับ Na-Y ด้วยระบบดูดซับขั้นตอนเดียว อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม (อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) ตารางที่ ค17 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 4 ของตัวดูดซับ Na-Y ด้วยระบบดูดซับขั้นตอนเดียว อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม (อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส)

Sampling g (time)	Volume		Sampling (time)	Volume		Concentration (ppm)						
	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)		per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	Naphthalene	DBT	4,6 DMDBT	
Na-Y (30 องศาเซลเซียส)												
	Feed	29.69	33.69	32.18	521.58	79.19	76.25					
1	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
12	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
13	26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17					
14	28	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.13					
15	30	0.00	0.00	0.42	1.46	0.39	0.58					
17	34	0.00	0.23	1.06	19.06	4.08	5.38					
18	36	0.27	0.74	2.94	47.65	9.60	11.77					
19	38	0.66	1.78	6.13	97.20	18.02	20.97					
24	48	6.72	13.97	23.93	389.44	61.30	60.77					
36	72	18.99	28.24	31.36	513.96	77.22	74.23					
37	74	20.16	29.58	32.91	529.84	80.11	77.15					
38	76	20.47	29.83	32.83	528.57	79.85	76.92					
42	84	21.64	30.38	32.75	524.76	79.19	76.25					
48	96	22.97	31.18	32.59	526.66	79.46	76.58					
72	144	25.39	32.46	32.50	524.12	79.06	76.14					
84	168	25.86	32.59	32.42	521.58	78.67	75.80					
96	192	26.80	33.32	32.75	529.20	79.72	76.81					
132	264	27.35	33.26	32.42	522.85	78.93	76.02					
144	288	27.89	33.63	32.83	529.20	79.85	76.81					
156	312	27.58	33.20	32.34	520.95	78.67	75.69					
Na-Y (40 องศาเซลเซียส)												
	Feed	27.66	32.52	31.20	489.18	75.90	68.74					
1	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
12	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
16	32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
18	36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00					
20	40	0.00	0.00	0.31	15.25	0.00	0.00					
21	42	0.00	0.15	0.75	27.95	0.00	0.00					
22	44	0.00	0.42	1.72	46.38	0.00	0.00					
23	46	0.00	0.86	3.02	73.06	0.00	0.00					
24	48	0.00	1.59	4.74	102.92	0.00	0.00					
36	72	6.41	20.40	28.91	472.66	17.23	17.60					
48	96	12.97	27.07	30.79	492.36	17.23	17.60					
60	120	17.11	29.58	31.36	498.08	17.23	17.60					
72	144	19.06	30.44	31.36	496.80	17.23	17.60					
84	168	21.72	31.79	32.10	505.06	17.23	17.60					
96	192	22.42	31.79	31.69	502.52	17.23	17.60					
108	216	22.74	32.22	31.85	506.33	17.23	17.60					
120	240	23.36	32.28	31.77	502.52	17.23	17.60					
132	264	23.52	32.22	31.61	502.52	17.23	17.60					
144	288	24.45	32.59	31.69	503.16	17.23	17.60					

ตารางที่ ค18 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 4 ของตัวดูดซับ Na-Y ด้วยระบบดูด ตารางที่ ค19 ข้อมูลการดูดซับน้ำมันจำลองประเภทที่ 4 ของตัวดูดซับ La-Y (คอลัมน์ที่ 1) ซับขั้นตอนเดียว อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที่ ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม (อุณหภูมิ 50 และ Na-Y (คอลัมน์ที่ 2) ด้วยระบบดูดซับสองขั้นตอน อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที่ ปริมาณตัวดูดซับ 0.5 กรัม (อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) องศาเซลเซียส)

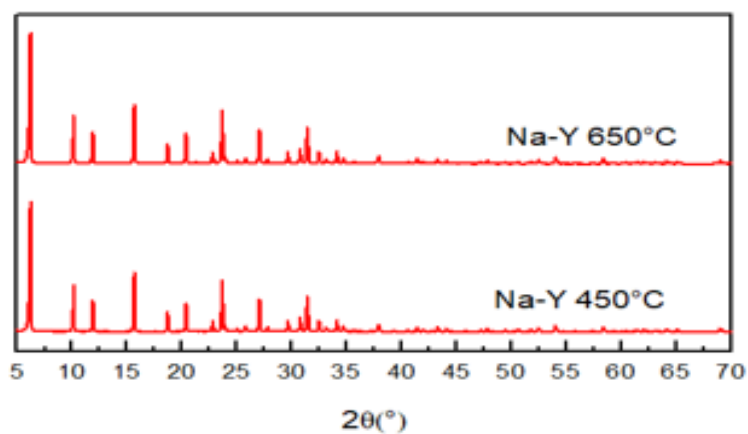
Sampling (time)	Volume		Concentration (ppm)							Volume		Concentration (ppm)						
	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	Naphthalene	DBT	4,6-DMDBT	Sampling (time)	per 0.5 g (mL)	per 1 g (mL)	Quinoline	Indole	Acridine	Naphthalene	DBT	4,6-DMDBT	
Na-Y (50 องศาเซลเซียส)																		
	Feed	28.60	33.63	32.18	503.16	76.30	73.89		0	0	33.13	33.08	30.63	507.60	75.90	69.52		
1	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
12	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
24	48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48	48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
29	58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.57	0.00	72	72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
30	60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.93	0.00	86	86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	
31	62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.11	0.00	88	88	0.00	0.00	0.14	12.71	0.00	2.80	8.30	
32	64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.24	0.00	90	90	0.00	0.10	0.90	38.12	6.97	8.30	16.26	
33	66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	40.25	0.00	92	92	0.00	0.53	2.94	85.77	14.87	16.26	25.57	
36	72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	66.04	0.00	94	94	0.00	1.35	6.13	147.39	24.60	25.57	34.65	
48	96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	73.22	0.00	96	96	0.00	2.70	9.80	214.10	34.73	34.65	68.85	
60	120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	73.78	0.00	120	120	9.22	24.07	29.40	507.60	75.12	68.85	69.63	
72	144	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.68	0.00	144	144	16.25	28.85	29.56	515.86	76.30	69.63	70.08	
84	168	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.12	0.00	168	168	20.08	30.69	29.48	518.40	76.69	70.08	69.52	
96	192	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.23	0.00	192	192	22.19	31.36	29.07	510.78	76.17	69.52	69.74	
108	216	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.34	0.00	216	216	23.91	32.10	29.16	513.32	76.43	69.74	69.86	
120	240	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	75.01	0.00	240	240	25.55	32.46	29.24	512.05	76.43	69.86	69.63	
144	288	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.34	0.00	264	264	25.94	32.71	28.75	512.69	76.43	69.63	70.08	
156	312	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	74.57	0.00	288	288	26.88	33.01	28.91	513.32	76.83	70.08	69.97	
									312	312	27.89	33.20	29.16	512.05	76.69	69.97		



## ภาคผนวก ฉ

### ฉ.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิในการเผาตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y

จากรูปที่ ฉ1 แสดงผลของอุณหภูมิในการเผาตัวดูดซับ Na-Y ที่ 450 และ 650 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะผลึกไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ ฉ1 การวิเคราะห์ตัวดูดซับหลังเผาตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-Y ที่อุณหภูมิ 450 และ 650 องศาเซลเซียสด้วยเทคนิค XRD



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	บวรชัย เจริญธีรบูรณ์
วัน เดือน ปี เกิด	3 สิงหาคม 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลเปาโลพหลโยธิน กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษา ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเข้าศึกษาต่อ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	53/152 ถ.นวมินทร์ ซ.นวมินทร์105 แขวงคลองกุ่ม เขตบึงกุ่ม กรุงเทพมหานคร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY