

การศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของซีโอไลต์ชนิด เอ กับซีโอไลต์
ชนิด เอ ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอททีลีนไอมิน และ สารละลาย
ลิเทียมคลอไรด์

STUDY OF CARBON DIOXIDE ADSORPTION IN ZEOLITE A AND ZEOLITE A
IMPREGNATED WITH POLYETHYLENEIMINE AND LITHIUM CHLORIDE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-030-007

การศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของซีโอไลต์ชนิด เอ กับซีโอไลต์
ชนิด เอ ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอททีลีนไอมิน และ สารละลาย
ลิเทียมคลอไรด์

STUDY OF CARBON DIOXIDE ADSORPTION IN ZEOLITE A AND ZEOLITE A
IMPREGNATED WITH POLYETHYLENEIMINE AND LITHIUM CHLORIDE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-M-030-007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF CARBON DIOXIDE ADSORPTION IN ZEOLITE A AND ZEOLITE A
IMPREGNATED WITH POLYETHYLENEIMINE AND LITHIUM CHLORIDE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-EN-M-030-007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ ซีโอไลต์ชนิด เอ กับซีโอไลต์ชนิด เอ ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอททิลีนไอมินและสารละลายลิเทียมคลอไรด์
นักศึกษา	นายพฤกษ์ วงศ์พานิชย์
รหัสประจำตัว	56601416
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ ซีโอไลต์ชนิด เอ (3A, 4A, 5A) กับซีโอไลต์ชนิด เอ ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอททิลีนไอมินและสารละลายลิเทียมคลอไรด์ในการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ กระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพนี้จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านความร้อนในการนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าและในภาคการขนส่ง โดยการศึกษาจะเน้นประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ (คาร์บอนไดออกไซด์ 37%, มีเทน 52%, ไนโตรเจน 11% และไฮโดรเจนซัลไฟด์ 105 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยแสดงในพจน์ของค่าการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ ค่าการเลือกการดูดซับแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ ชนิด 5A เอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอททิลีนไอมิน เป็นสารดูดซับที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และมีสัดส่วนการเลือกมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สูงสุด

Thesis Title	Study of Carbon Dioxide Adsorption in Zeolite A and Zeolite A Impregnated with Polyethyleneimine and Lithium Chloride
Student ID.	Mr.Pleuk Vongpanit
Degree	Master Degree of Engineering
Programme	Mechanical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Pongjet Promvonge

ABSTRACT

This research aims at studying the adsorption of carbon dioxide (CO₂) and hydrogen sulfide (H₂S) in a biogas purification using zeolite A and zeolite A impregnated with polyethyleneimine (PEI) and lithium chloride (LiCl). The use of purified biogas fuel can help upgrade the thermal efficiency in producing electricity and in transport vehicles. The study was focused on the removal efficiency of CO₂ and H₂S contained in the original synthetic biogas (37% CO₂, 52% CH₄, 11% N₂ and 105 mg/l H₂S) in terms of the removal efficiency of CO₂ and the CH₄/CO₂ selectivity. The experimental results show that the zeolite 5A with PEI impregnated not only provides the excellent adsorbent for CO₂ and H₂S removal but also is considered to be a higher potential adsorbent due to the best selectivity of CH₄/CO₂.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยคำสั่งสอน , ให้คำแนะนำ, ให้คำปรึกษาและความกรุณาของ รศ.ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และที่ปรึกษา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้ให้แก่ลูกศิษย์คนนี้ ขอขอบพระคุณยิ่ง

ขอขอบคุณทีมงานศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมวัสดุ และ ทีมงานศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ทีมงานของ ดร.เรวดี อนุวัฒนา (วว.) คลอง 5 จ.ปทุมธานี ที่ได้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบคุณบิดา มารดา ภรรยา บุตรชาย และญาติ ๆ ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจ เลี้ยงดูและคอยอบรมสั่งสอนให้ผู้วิจัยก้าวมาถึงวันนี้

ขอแสดงความขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นอย่างสูง ที่ได้สนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ในฉบับนี้

พฤกษ์ วงศ์พานิชย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การทดลองของ Xiaochun Xu และคณะ (2002).....	5
2.2 การทดลองของ Abdelhamid Sayari และคณะ (2010).....	7
2.3 การทดลองของ Aliakbar Heydari-Gorji และคณะ (2012).....	9
2.4 การทดลองของ Abdelhamid Sayari และคณะ (2012).....	11
2.5 การทดลองของ Supasine Pipatsantipong และคณะ (2012).....	13
2.6 การทดลองของ Zhenhe Chen และคณะ (2013).....	17
2.7 การทดลองของ Lihuo Zhang และคณะ (2016).....	19
บทที่ 3 ทฤษฎี.....	22
3.1 นิยาม และความสำคัญของกระบวนการดูดซับสาร.....	22
3.2 วัสดุดูดซับ.....	24
3.2.1 ประเภทของสารดูดซับ.....	24
3.3 การจำแนกระบบดูดซับสาร.....	25
3.3.1 จำแนกตามวิธีนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Adsorbent Regeneration)	25
3.3.2 จำแนกตามองค์ประกอบของสารผสม (Feed Composition).....	25
3.3.3 จำแนกตามกลไกของการแยก (Mechanism of Separation).....	26
3.3.4 จำแนกตามลักษณะของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (Interaction Forces)	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 แร่งตั้งดูดสำหรับการดูดซับทางกายภาพ.....	29
3.5 ชนิดของสารดูดซับ และการประยุกต์ใช้งาน.....	32
3.6 สมดุลในการดูดซับ.....	34
3.6.1 กฎของเฮนรี่ (Henry's Law)	36
3.6.2 แล่งเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm).....	37
3.6.3 ฟรอนด์ลิชและแล่งเมียร์-ฟรอนด์ลิชไอโซเทอม (Freundlich – Langmuir Isotherm)	38
3.6.4 ไอโซเทอมของระบบสององค์ประกอบและหลายองค์ประกอบ.....	39
3.7 จลนศาสตร์ของการดูดซับ.....	40
3.7.1 การแพร่ผ่านชั้นรอบตัวดูดซับ.....	41
3.7.2 การแพร่ผ่านชั้นรอบตัวดูดซับทรงกลม.....	41
3.7.3 การแพร่ผ่านชั้นรอบตัวดูดซับทรงกระบอก.....	43
3.7.4 การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับ.....	45
3.7.5 การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกลม.....	45
3.7.6 การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกระบอก.....	47
3.7.7 สัมประสิทธิ์การดูดซับของหน่วยดูดซับ.....	48
3.7.8 การเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับผ่านชั้นตัวดูดซับ.....	52
บทที่ 4 วัสดุ อุปกรณ์ การเตรียมสารดูดซับ และวิธีการทดลอง.....	60
4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์ชนิดเอ.....	60
4.1.1 การเตรียมสารดูดซับ.....	60
4.1.2 กระบวนการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และสารละลายโพลิเอ ทิลีนไอมิน.....	62
4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของสารดูดซับซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A, 5A) และ ซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A, 5A) ที่เอ็บซุ่มด้วยลิเทียมคลอไรด์ (LiCl), โพลิเอททิลีนไ มิน(PEI) โดยการทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน.....	64
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	54
4.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์สารดูดซับ.....	67
4.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน: Scanning electron microscope (SEM).....	67
4.4.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์: X-rays Diffraction Spectroscopy (XRD).....	68
4.4.3 การทดสอบหาปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิว ด้วยกระบวนการ Brunauer–Emmett–Teller (BET).....	69
4.4.5 เครื่องตรวจวัดส่วนประกอบของแก๊ส Gas Chromatography(GC)...	70
4.5 วิธีการทดลองการดูดซับ.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การประเมินความคุ้มค่าของสารดูดซับ.....	70
บทที่ 5 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	71
5.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของสารดูดซับ ซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A, 5A) และ ซีโอไลต์ชนิดเอ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการเอ็บซุ่มลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) และ โพลีเอททิลีนไอมิน(PEI).....	71
5.1.1 ลักษณะสีของสารดูดซับ.....	71
5.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	72
5.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction(XRD).....	74
5.2 ผลการทดสอบทางเคมีของ ซีโอไลต์ 3A, 4A, 5A และซีโอไลต์ 3A, 4A, 5A ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอททิลีนไอมิน.....	75
5.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของซีโอไลต์ 3A, 4A, 5A และซีโอไลต์ 3A, 4A, 5A ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอททิลีนไอมิน และ โพลีเอททิลีนไอมิน.....	76
5.4 ผลการประเมินความคุ้มค่า.....	80
บรรณานุกรม.....	82
ภาคผนวก ก.....	84
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	84
ภาคผนวก ข.....	92
ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ของสารทดลองแต่ละชนิด.....	92
ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทน จากแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ของสารทดลองแต่ละชนิด.....	93
ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยวิธี Calcium exchange Capacity (CEC).....	94
ประวัติผู้เขียน.....	96

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี.....	28
3.2 สมบัติทางไฟฟ้าสถิตของโมเลกุลของแก๊สชนิดต่างๆ.....	31
3.3 การจำแนกลักษณะการดูดซับแบบเจาะจง และแบบไม่เจาะจง.....	31
3.4 การจำแนกประเภทของสารดูดซับ.....	33
3.5 สมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับประเภทต่าง ๆ.....	33
5.1 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของสารดูดซับซีโอไลท์ชนิดเอ.....	75
5.2 เปรียบเทียบราคา และ ความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ของสารดูดซับ Zeolite 5A, 5A+PEI และ MCM-41 + PEI.....	80



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ผลการตรวจสอบสารดูดซับ MCM-41 ด้วยวิธี XRD ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วย PEI ที่ปริมาณต่างๆ.....	6
2.2 ผลการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ MCM41 และ MCM41-PEI.....	6
2.3 พื้นที่ผิวของสารดูดซับ MCM-41 ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วย PEI ที่ปริมาณแตกต่างกัน	7
2.4 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิดต่างๆที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆภายใต้สภาวะที่ไม่มีควมชื้น.....	8
2.5 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิดต่างๆที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆภายใต้สภาวะที่มีความชื้น.....	8
2.6 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิดต่างๆที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆภายใต้สภาวะที่ไม่มีควมชื้นและมีความชื้น ที่อุณหภูมิ 75/105 องศาเซลเซียส.....	10
2.7 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิดต่างๆที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆภายใต้สภาวะที่ไม่มีควมชื้นและมีความชื้น ที่อุณหภูมิ 75/120 องศาเซลเซียส.....	10
2.8 โครงสร้างทางเคมีของสารกลุ่ม Amine ชนิดต่างๆที่นำมาใช้ในการปรับปรุงสารดูดซับ.....	11
2.9 ผลการทดสอบการเสื่อมสภาพของสารดูดซับที่ปรับปรุงด้วยสารกลุ่ม Amine ด้วยวิธีการกราฟ.....	12
2.10 ผลการทดสอบการเสื่อมสภาพของสารดูดซับที่ปรับปรุงด้วยสารกลุ่ม Amine ด้วยวิธีการเอิบซุ่ม.....	12
2.11 อุปกรณ์การทดลอง และการต่อพ่วงอุปกรณ์สำหรับชุดทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ของสารดูดซับชนิด AC ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วย PEI....	13
2.12 ผลการวิเคราะห์พื้นผิว และปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับชนิด AC ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย PEI.....	14
2.13 ผลการทดสอบการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่แรงดันสัมพัทธ์ 0-1 atm ($P^0=1$ atm)....	14
2.14 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ AC ที่ถูกปรับปรุงด้วย PEI ที่ปริมาณต่างกันภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	15
2.15 เปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ AC ที่ถูกปรับปรุงด้วย PEI 0.22wt% กับ AC ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง ภายใต้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส.....	16
2.16 เปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ AC ที่ถูกปรับปรุงด้วย PEI 0.22wt% กับ AC ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง ภายใต้อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.17 ลักษณะและการกระจายตัวของ PEI บน เรซินที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่ม.....	17
2.18 ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเรซินแต่ละชนิด ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วย PEI 40 wt%.....	18
2.19 ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(mg CO ₂ /g sorbent)ต่อปริมาณการเอ็บซุ่ม PEI (wt.%).....	18
2.20 ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ เรซินที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วย PEI ใน การทดลอง 5 Cycle.....	19
2.21 ผลการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ MMSV(a) และ MMSV(c) ที่เอ็บซุ่มด้วย PEI ในช่วง 40-60wt%.....	20
2.21 ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(mmol CO ₂ /g sorbent)ต่อปริมาณการเอ็บซุ่ม PEI (wt.%) และประสิทธิภาพของ Amine ที่เอ็บซุ่ม.....	20
2.22 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ MMSV(a) และ MMSV(c) ที่เอ็บซุ่มด้วย PEI 60wt% ที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆภายใต้สภาวะที่ไม่มีควมชื้น และมีความชื้น ที่อุณหภูมิ 75-90 องศาเซลเซียส.....	21
3.1 แผนภูมิอย่างง่ายแสดงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ.....	23
3.2 กลไกการแยกโดยอาศัยความแตกต่างของรูปร่างโมเลกุลระหว่าง n-octane (โซ่ตรง) และ iso-octane (โซ่กิ่ง) โดยใช้ซีโอไลต์ 5A.....	26
3.3 ความแตกต่างของอัตราเร็วการดูดซับ O ₂ และ N ₂ โดยคาร์บอนโมเลกุลซีฟ (CMS)..	26
3.4 สมดุลการดูดซับของ O ₂ และ N ₂ โดยใช้ซีโอไลต์ 5A ที่อุณหภูมิการดูดซับ 20° C.....	27
3.5 การเกิดแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของแก๊สสองโมเลกุลที่มีความแตกต่างของสภาพขั้วคู่ จุดตำแหน่งอิเล็กตรอน ซึ่งมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา.....	29
3.6 การกระจายขนาดรูพรุนของสารดูดซับประเภทต่าง ๆ โดยแสดงเป็นปริมาตรสะสมเปรียบเทียบขนาดรูพรุน.....	33
3.7 ตัวอย่างการกระจายขนาดรูพรุนของสารดูดซับ แสดงเป็นร้อยละของปริมาตรรูพรุนเทียบกับช่วงขนาดรูพรุน (Yang) : (a) zeolite type 3A, (b) 4A, (c) 5A, (d) 10X, (e) 13X, (f) carbon molecular sieve, (g) activated carbon.....	34
3.8 การจำลองวัฏภาคดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น.....	35
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของเฮนรีกับอุณหภูมิ สำหรับ ออกซิเจน ไนโตรเจน และ มีเทน บนสารซีโอไลต์ 5A (Douglas และคณะ, 1994).....	37
3.10 ข้อมูลการสมดุลของออกซิเจนและไนโตรเจนบนคาร์บอน เมโมลูการ์ซีฟ (Douglas และคณะ, 1994).....	38
3.11 ข้อมูลสมดุลของออกซิเจนและไนโตรเจนบนซีโอไลต์ 5A.....	40
3.12 ภาพจำลองการแพร่ของสารถูกดูดซับผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับไปสู่ผิววนอกของตัวดูดซับชนิดทรงกลม.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 ภาพจำลองการแพร่ของสารถูกดูดซับผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับไปสู่ผิวนอกของตัวดูดซับชนิดทรงกระบอก.....	42
3.14 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนพื้นผิวด้านข้างของตัวดูดซับทรงกระบอกต่อพื้นผิวนอกทั้งหมดกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับทรงกระบอก.....	44
3.15 ภาพตัดแสดงทิศทางการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกลมซึ่งเกิดขึ้นในแนวรัศมีของตัวดูดซับเท่านั้น.....	46
3.16 ภาพตัดแสดงทิศทางการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกระบอกซึ่งเกิดขึ้นทั้งในแนวรัศมีและในแนวแกนของตัวดูดซับพร้อมกัน.....	47
3.17 แผนภาพจำลองกลไกการดูดซับก๊าซประกอบการแพร่ผ่านชั้นก๊าซหุดยุติ การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับ และการดูดซับบนผิวในโพรงของตัวดูดซับ ตามลำดับ.....	49
3.18 การแบ่งเขตของชั้นตัวดูดซับของหน่วยดูดซับออกเป็น 3 เขต ประกอบด้วยสมดุลเขตดูดซับ และเขตสำรอง ตามลำดับ ในขณะที่หน่วยดูดซับกำลังแยกสารเจือปนออกจากผลิตภัณฑ์.....	53
3.19 ชนิดของอัตราการเปลี่ยนปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะต่อหน่วยความเข้มข้นสมดุลของระบบสมดุลดูดซับ.....	56
3.20 ลักษณะการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับในเขตดูดซับในชั้นตอนดูดซับ (บน) และในชั้นตอนปรับสภาพตัวดูดซับ (ล่าง) ตามลำดับ เมื่อสมดุลดูดซับเป็นเส้นโค้งคว่ำ.....	57
3.21 ลักษณะการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับในเขตดูดซับในชั้นตอนดูดซับ (บน) และในชั้นตอนปรับสภาพตัวดูดซับ (ล่าง) ตามลำดับ เมื่อสมดุลดูดซับเป็นเส้นโค้งหงาย.....	58
3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในเขตดูดซับกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เริ่มเคลื่อนที่ออกจากชั้นตัวดูดซับจนหน่วยดูดซับไม่สามารถแยกสารถูกดูดซับจากของผสมได้อีก.....	59
4.1 สารดูดซับซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A และ 5A.....	60
4.2 Sieve Shaker รุ่น MINOR 200 ยี่ห้อ Endecotts.....	61
4.3 ตู้อบความร้อน แบบ Tubular furnace อุณหภูมิสูงสุด 800 องศาเซลเซียส.....	61
4.4 ตู้ดูดความชื้น (desiccator).....	62
4.5 การผสมสารดูดซับซีโอไลต์ชนิด A (3A, 4A, 5A) กับสารละลายที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม....	62
4.6 ตู้อบความร้อน: WTB Binding, Germany อุณหภูมิสูงสุด 150 องศาเซลเซียส.....	63
4.7 สารดูดซับแต่ละชนิด ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเอ็บซุ่ม.....	63
4.8 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองสารดูดซับ.....	64
4.9 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเข้า.....	65
4.10 อุปกรณ์บอวลวาล์ว, เกจวัดความดัน และท่อบรรจุสารดูดซับ.....	66
4.11 ถังสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊ส.....	66
4.12 อุปกรณ์วัดความเข้มข้นแก๊ส (Biogas 5000).....	67
4.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 เครื่อง X-rays Diffraction Spectroscopy(XRD).....	69
4.15 เครื่อง Brunauer–Emmett–Teller (BET).....	69
4.16 เครื่อง Gas Chromatography (GC) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น GC-2014.....	70
5.1 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ Zeolite 3A(ก), 3A เอ็บซุ่มด้วยLiCl(ข) และ 3A เอ็บซุ่มด้วยPEI (ค).....	71
5.2 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ Zeolite 4A(ก), 4Aเอ็บซุ่มด้วยLiCl(ข) และ 4A เอ็บซุ่มด้วย PEI (ค).....	71
5.3 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ Zeolite 5A(ก), 5Aเอ็บซุ่มด้วย LiCl(ข) และ 5A เอ็บซุ่มด้วยPEI (ค).....	72
5.4 ผลึกของ ซีโอไลต์ 3A กับ ซีโอไลต์ 3A ที่เอ็บซุ่ม LiCl(ก) และ PEI(ข).....	72
5.5 ผลึกของ ซีโอไลต์ 4A กับ ซีโอไลต์ 4A ที่เอ็บซุ่ม LiCl(ก) และ PEI(ข).....	73
5.6 ผลึกของ ซีโอไลต์ 5A กับ ซีโอไลต์ 5A ที่เอ็บซุ่ม LiCl(ก) และ PEI(ข).....	73
5.7 ผลการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน(PEI) ของ ซีโอไลต์ชนิด 3A.....	74
5.8 ผลการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน(PEI) ของ ซีโอไลต์ชนิด 4A.....	74
5.9 ผลการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน(PEI) ของ ซีโอไลต์ชนิด 5A.....	75
5.10 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บน Zeolite 4A ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายคลอไรด์ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน.....	76
5.11 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บน Zeolite 3A.....	76
5.12 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บน Zeolite 4A.....	77
5.13 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บน Zeolite 5A.....	77
5.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารดูดซับ ซีโอไลต์ชนิด A (3A, 4A และ 5A) ที่เอ็บซุ่มสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน.....	78
5.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารดูดซับ ซีโอไลต์ชนิด A (3A, 4A และ 5A) ที่เอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์.....	78
5.16 เปรียบเทียบปริมาณแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองสารดูดซับ ซีโอไลต์ 5A และ ซีโอไลต์ 5A ที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่ม สารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน....	79
5.17 เปรียบเทียบปริมาณแก๊ส ไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากผลการทดลองสารดูดซับซีโอไลต์ 5A และ ซีโอไลต์ 5A ที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่ม สารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน.....	79
5.18 เปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากการทดลองสารดูดซับ กลุ่มซีโอไลต์ 5A.....	80



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
2θ	มุมสะท้อนของรังสี X	องศา
m	มวล	กรัม
LOI	Lost on ignition	%
CEC	Calcium Exchange Capacity	มิลลิกรัม(แคลเซียมคาร์บอเนต)/กรัม(สารดูดซับ)
t_e	ระยะเวลาที่ความเข้มข้นของแก๊สถึงจุด Breakthrough	วินาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในภาวะปัจจุบันความต้องการพลังงานทางเลือกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง พลังงานทางเลือกถูกนำมาใช้งานด้านต่างๆ เช่น ใช้ทำความร้อน ผลิตกระแสไฟฟ้า และนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงยานยนต์ เป็นต้น ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (Natural Gas Vehicle : NGV) เป็นก๊าซที่เกิดจากการขุดเจาะและ ถูกส่งผ่านมาตามท่อส่งก๊าซจากอ่าวไทย ด้วยการอัดเข้าถังที่ความดันสูง (Compressed Natural Gas:CNG) เพื่อใช้งานในภาคการขนส่ง ประเทศไทยมีการใช้งานก๊าซธรรมชาติ เพื่อใช้งานในภาคการขนส่งสูงถึงร้อยละ 7.1 (กรมพลังงาน, 2557) แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาหลักการใช้งานของก๊าซธรรมชาติ ในภาคการขนส่งในทางภาคเหนือ พบว่ายังคงมีขีดจำกัด จากความไม่เหมาะสมของภูมิประเทศ (พพ, 2554) การหาพลังงานทางเลือก เพื่อใช้ทดแทนก๊าซธรรมชาตินับเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้อย่างเป็นรูปธรรม

ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหมักย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ (Anaerobic Process) องค์ประกอบก๊าซชีวภาพขึ้นกับชนิดของสารตั้งต้นที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ โดยทั่วไป ก๊าซชีวภาพสามารถผลิตจากสารอินทรีย์ทางการเกษตร เช่น ฟาร์มปศุสัตว์ โดยพบว่าก๊าซชีวภาพ มักมีองค์ประกอบหลักของก๊าซมีเทน ประมาณ ร้อยละ 55-70, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณร้อยละ 30-45, และ ก๊าซไฮโดรเจน 1,000-3,000 ส่วนในล้านส่วน ในขณะที่ สารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบสารอินทรีย์ประเภทโปรตีน มีปริมาณแอมโมเนีย 80-100 ส่วนในล้านส่วน, และ ก๊าซธรรมชาติที่เกิดจากหลุมฝังกลบ (Landfill) ยังคงมีปริมาณไฮโดรคาร์บอน น้อยกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน เป็นต้น โดยทั่วไปก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบหลักของก๊าซมีเทน มีคุณสมบัติในการลุกติดไฟสูง และสามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้ทดแทนในรูปแบบพลังงานต่างๆ เช่น การเผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง ใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไอน้ำและไฟฟ้า และเชื้อเพลิงขับเคลื่อนเครื่องยนต์สำหรับสันดาปภายใน เป็นต้น ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ให้ค่าความร้อนประมาณ 9,000 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร (21,000 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร) เมื่อนำก๊าซชีวภาพมาทำความสะอาดเพื่อผลิตเป็นพลังงานทดแทนที่มีก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ 96 เรียกว่า “ไบโอมีเทน” ซึ่งมีความบริสุทธิ์ใกล้เคียงเหมือนก๊าซธรรมชาติ และสามารถนำมาอัดให้เป็นก๊าซแล้วต่อกับเครื่องยนต์ใช้ทดแทนก๊าซ NGV หรือรู้จักในนาม Compressed Biomethane Gas (CBG) สามารถใช้ทดแทนก๊าซธรรมชาติในภาคขนส่ง ซึ่งไบโอมีเทนเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ไม่มีวันหมดและความยั่งยืนในการใช้พลังงาน อีกทั้งยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในการนำของเสียมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพเพื่อลดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนซึ่งเป็นสาเหตุหลักต่อการเกิดภาวะโลกร้อนสู่สิ่งแวดล้อม การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มค่าความร้อนจึงสามารถลดภาวะโลกร้อนได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกกำจัดสามารถนำมาผลิตก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis Gas) และสารเคมีจำพวกเมทานอลด้วยปฏิกิริยา Dry Reforming ได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการผลิตก๊าซชีวภาพ(Yu et al., 2013) ในการสร้างมูลค่าเพิ่ม แต่อย่างไรก็ตาม การใช้งานจากก๊าซชีวภาพมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพ จาก ก๊าซที่เป็นพิษอื่นๆ ที่มีฤทธิ์กัดกร่อนเช่น

ก๊าซไข่เน่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และฮาโลเจนไฮโดรคาร์บอนเป็นต้น การหาแนวทางเพื่อศึกษา การดูดซับจึงเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่ง โดยทั่วไปกระบวนการทำความสะอาดก๊าซชีวภาพสามารถทำได้ด้วยการดูดซึม และดูดซับ โดยการดูดซึม หรือดูดซับด้วยสารเคมี สามารถกำจัดก๊าซเจือปนที่มีความสกปรกสูง แต่ไม่สามารถกำจัดสิ่งเจือปนที่มีความเข้มข้นต่ำๆได้ กระบวนการดูดซับเป็นอีกแนวทางเลือกในการกำจัดก๊าซเจือปนเหล่านี้ โดยทั่วไปแล้ว จะใช้สารละลายชนิดต่างๆ เช่นสารละลายเอมีน ซึ่งปัจจุบันพบว่ามักไม่ประสบความสำเร็จในการดักจับแก๊สปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นต่ำ อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายสูง การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง (solid adsorbent) จำพวกถ่านกัมมันต์ และ ซีโอไลต์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความสะดวกจากนักวิจัยจำนวนมาก เนื่องจากมีอัตราการดูดซับสูง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และไม่กัดกร่อน จากผลการศึกษาโลหะทรานซิชัน ที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวถูกออกซิไดซ์ เช่น Zn, Cu และ Fe มีการนำโลหะเหล่านี้มาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซีโอไลต์เป็นสารดูดซับประเภทหนึ่ง ที่มีโครงสร้างในรูปโซเดียมอะลูมิโนซิลิเกต และนิยมนำมาใช้ในการกำจัดแก๊สต่างๆที่มีความเข้มข้นต่ำ Sayari et al. (2010, 2012) สารดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายในกลุ่มเอมีน มีผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดี แม้ในสภาวะความดันต่ำ และมีค่าการคัดเลือกสูง อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ Heydari-Gorji et al. (2012) ทั้งนี้ สารประกอบที่มีรูพรุนที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมินให้ผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด Song et al. (2003) ได้พัฒนาสารประกอบที่นำสารโพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) โหลดบน SBA-15 และ MCM-41 ซึ่งเรียกว่า โมเลกุลตะกร้า (Molecular Basket) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 87 มิลลิกรัม H₂S ต่อกรัมสารดูดซับ Zhang et al. (2016) ได้พัฒนาสารประกอบซึ่งผ่านการเอ็บซุ่มด้วยสาร โพลีเอทิลีนไอมิน(PEI) ในสารเมโซพอร์ส (MMSV) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผลที่ได้คือสารเมโซพอร์สที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่มสารโพลีเอทิลีนไอมิน มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีขึ้นและในงานวิจัยของ Chen et al. (2013) พบว่าการเอ็บซุ่มสารโพลีเอทิลีนไอมินบนเรซิน สามารถเพิ่มอัตราการดูดซับ และ ความจุในการดูดซับให้แก่สารดูดซับได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารดูดซับ ซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A และ 5A) โดยใช้สารที่มีคุณสมบัติในการถูกออกซิไดซ์ เช่น ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และขยายผลต่อในทางปฏิบัติ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดซับ ซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A, 5A และ ซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับสภาพโดยการเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย ลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอทิลีนไอมิน

1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย สารดูดซับ ประเภทต่างๆ ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A, 5A และ ซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับสภาพโดยการเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย ลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอทิลีนไอมิน

1.2.3 เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบค่าการคัดเลือกการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน ของสารดูดซับ ซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A, 5A และ ซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับสภาพโดยการเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย ลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอทิลีนไอมิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

สารดูดซับแก๊สในปัจจุบัน มีหลายประเภท เช่น ถ่านกัมมันต์, ซิลิกาเจล, และ ซีโอไลต์ การใช้งานสารดูดซับมักประสบปัญหาความสามารถในการคัดเลือกการดูดซับแก๊สที่ไม่ต้องการออกจากแก๊สที่ต้องการต่ำ อีกทั้งสารดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ ไม่ทนต่อความร้อนสูง ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพ การคัดเลือกการดูดซับจึงมีความจำเป็น สารดูดซับที่นิยมได้แก่ ซีโอไลต์ A ซึ่งจัดเป็นซีโอไลต์ที่มีราคาต่ำ ง่าย การศึกษาโดยการปรับสภาพจึงมีความจำเป็น โดยทั่วไปซีโอไลต์ ชนิด 3A, 4A และ 5A เป็นสารดูดซับที่ใช้หลักการสมดุลของวัสดุ และหลักจลศาสตร์ ในการดูดซับแก๊ส ซึ่งให้ผลการดูดซับแก๊สที่ดี แต่มีค่าการคัดเลือกในการดูดซับน้อย ส่งผลให้เมื่อนำมาใช้งาน จะทำให้สูญเสียแก๊สมีเทนปริมาณหนึ่งไปในกระบวนการคัดแยก หรือกำจัดแก๊สที่ไม่ต้องการ ดังนั้น จึงนำสารดูดซับซีโอไลต์ ชนิด 3A, 4A และ 5A มาเอิบซุ่มด้วยสารละลาย โพลีเอทิลีนไอมิน ซึ่งเป็นสารละลายกลุ่มเอมีน มีคุณสมบัติทางเคมีในการถูกออกซิไดซ์ ที่จะช่วยในการจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดเลือกการดูดซับให้ดียิ่งขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเอมีนมักใช้กันอย่างแพร่หลายในทางอุตสาหกรรม และพัฒนาเพื่อกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติ สารละลายเอมีนที่ใช้งาน ได้แก่ สารละลาย Monoethanolamine (MEA) Diethanolamine (DEA) และ Polyethyleneimine (PEI) ซึ่งสารละลายในกลุ่มเอมีนมีคุณสมบัติเป็นต่าง ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และสารละลายเอมีนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 80-100 องศาเซลเซียส และลดความดันเพื่อนำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายและนำกลับมาใช้ใหม่สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1) และ (2)



ประโยชน์ของสารละลายเอมีนคือจะเลือกจับเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า

1.5 ขอบเขตการวิจัย

- 1.5.1 ทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารดูดซับ
- 1.5.2 ทำการทดลองหาประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.5.3 ทำการทดลองหาประสิทธิภาพค่าการคัดเลือกการดูดซับของสารดูดซับ ระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน ของสารดูดซับ
- 1.5.4 ทำการวิเคราะห์ผลการวิจัยที่เกิดขึ้น

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.6.2 ศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.6.3 ทำการออกแบบการทดลอง และเตรียมสารทดลองสำหรับใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพ ในการดูดซับ
- 1.6.4 ทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ และค่าการคัดเลือกการดูดซับ แก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.6.5 ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง
- 1.6.6 สรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

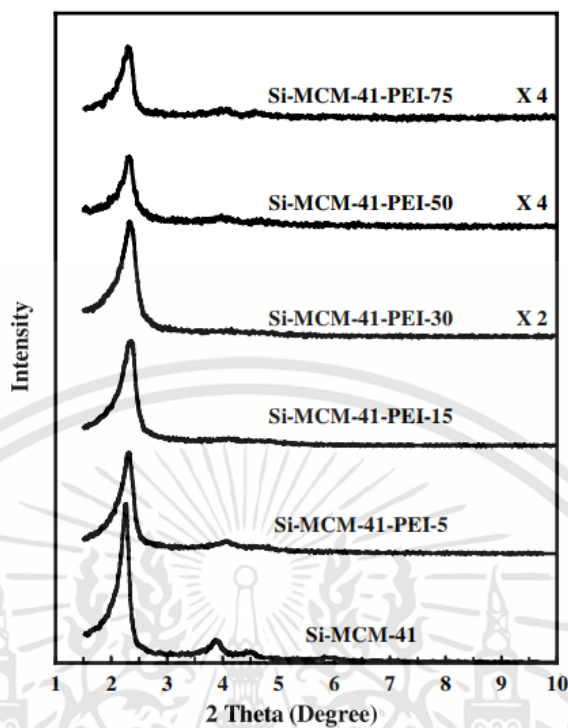
บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), มีเทน (CH_4), ไนโตรเจน (N_2) และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จัดเป็นแก๊สที่มีกลิ่นเหม็น และมีคุณสมบัติกัดกร่อน เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ เมื่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกเผาพร้อมกับแก๊สชนิดอื่น ๆ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดมลภาวะทางอากาศ โดยทั่วไปมีเทคโนโลยีกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้แก่ กระบวนการดูดซับ โดยการใช้สารละลายชนิดต่างๆ เช่น สารละลายเอมีน ซึ่งปัจจุบันพบว่ามักไม่ประสบความสำเร็จในการดักจับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายสูง การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง (Solid Adsorbent) จำพวกถ่านกัมมันต์ และ ซีโอไลต์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมาก เนื่องจากมีอัตราการดูดซับสูง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และไม่กัดกร่อน จากผลการศึกษาโลหะทรานซิชัน ที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวดูดซับออกซิไดซ์ เช่น Zn, Cu และ Fe มีการนำโลหะเหล่านี้มาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

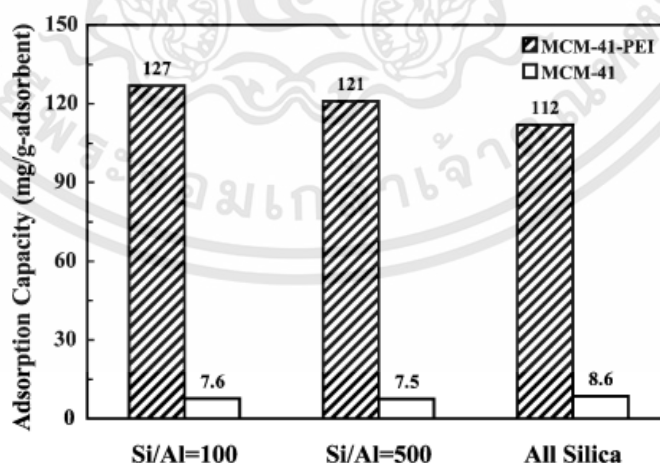
2.1 การทดลองของ Xiaochun Xu และคณะ (2002)

ในชื่อเรื่อง Preparation and characterization of novel CO_2 “molecular basket” adsorbents based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM-41 ในบทความนี้ได้ศึกษาถึง การดัดแปลงสารดูดซับ molecular sieve MCM-41 โดยใช้ Polyethyleneimine (PEI) ด้วยวิธีการเอ็บซุ่ม (impregnation method) เพื่อเพิ่มความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้แก่สารดูดซับ โดยทดลองการเอ็บซุ่มที่ปริมาณแตกต่างกัน เพื่อหาค่าความเหมาะสมของปริมาณการเอ็บซุ่ม และตรวจสอบความแตกต่างเชิงกายภาพของสารดูดซับด้วยวิธีการ X-ray Diffraction (XRD)



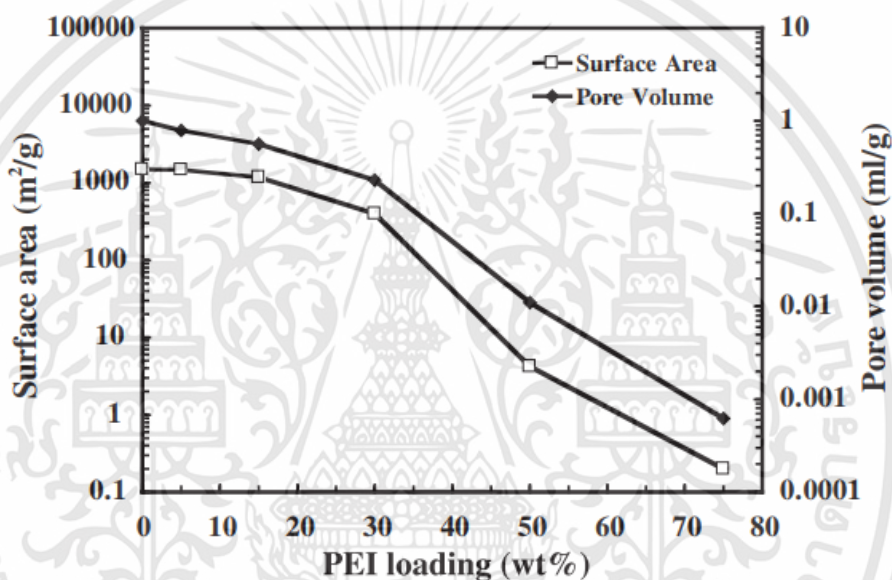
รูปที่ 2.1 ผลการตรวจสอบสารดูดซับ MCM-41 ด้วยวิธี XRD ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วย PEI ที่ปริมาณต่างๆ

พบว่าสารดูดซับ MCM-41 ที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่มด้วย PEI จะมีลักษณะทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป โดยได้ค่าของ XRD ในแต่ละความเข้มข้นของ PEI แตกต่างกันไปดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 และเมื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ อุปกรณ์ Thermogravimetry Analysis (TGA) โดยใช้สารดูดซับที่ปริมาณ 10 มิลลิกรัม ทดสอบภายใต้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนได้อุณหภูมิสูงสุดที่ 600 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สที่ 10 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 2.2 ผลการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ MCM41 และ MCM41-PEI

ซึ่งจากผลสรุปในการทดลองดังกล่าว พบว่า สารดูดซับ MCM-41 ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย PEI โดยใช้วิธีการเอ็บซุ่ม สามารถเพิ่มความจุในการดูดซับให้แก่สารดูดซับได้มากถึง 30 เท่า แต่การปรับปรุงคุณภาพของสารดูดซับด้วย PEI ที่มีปริมาณมากเกินไปกว่าร้อยละ 50 โดยมวลของสารดูดซับ จะส่งผลให้ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องจากการกระจายตัวของ PEI บนรูพรุนของ MCM-41 ไม่สม่ำเสมอ และมีการอุดตัน จากผลดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของปริมาณพื้นที่ผิวของสารดูดซับ และนำมาเปรียบเทียบกับปริมาณของ PEI ที่เอ็บซุ่มลงบนตัวสารดูดซับ ซึ่งผลที่ได้แสดงอยู่ในรูปของกราฟ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ปริมาณพื้นที่ผิว และปริมาตรของรูพรุนของวัสดุดูดซับนั้น ลดลงเมื่อปริมาณของ PEI ที่นำมาเอ็บซุ่มเพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญ

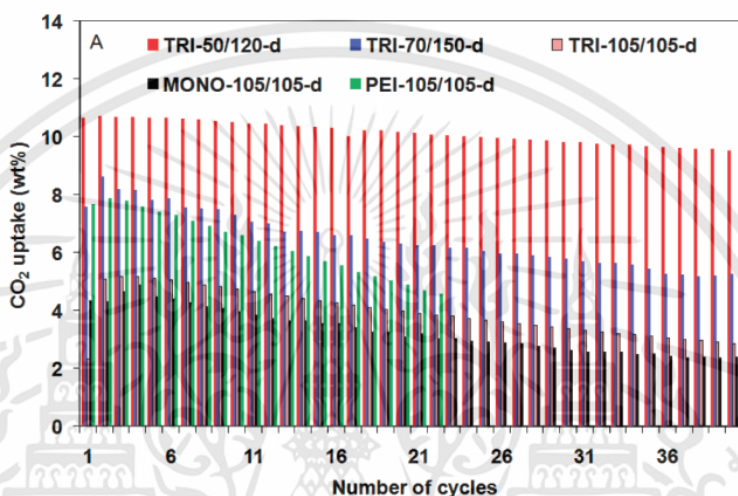


รูปที่ 2.3 พื้นที่ผิวของสารดูดซับ MCM-41 ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วย PEI ที่ปริมาณแตกต่างกัน

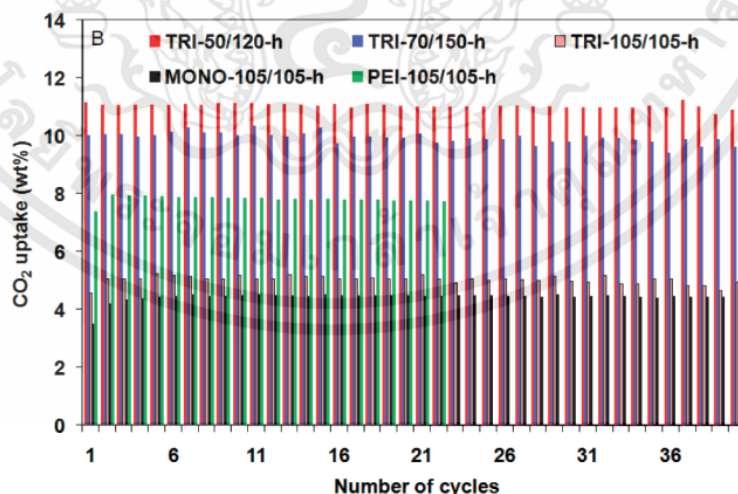
2.2 การทดลองของ Abdelhamid Sayari และคณะ (2010)

ในชื่อเรื่อง Stabilization of Amine-Containing CO₂ Adsorbents: Dramatic Effect of Water Vapor ได้ศึกษาถึงเสถียรภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับที่ถูกปรับปรุงโดยใช้สารกลุ่ม Amine (MONO, TRI, PEI, UREA) ด้วยวิธีการเอ็บซุ่ม โดยศึกษาถึงผลกระทบของไอน้ำที่จะมีผลต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับดังกล่าว โดยมีรูปแบบการทดลองเป็นการนำสารดูดซับมาทดสอบดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซ้ำๆ และบันทึกค่าการดูดซับในแต่ละครั้งของการใช้งาน เพื่อเก็บข้อมูลเชิงสถิติในด้านของปริมาณการใช้งานสูงสุดที่เป็นไปได้ ภายใต้ขอบเขตของค่าการดูดซับที่ยอมรับได้

ในการทดลองการดูดซับ-คายการดูดซับนั้นจะถูกทำภายใต้สภาวะแรงดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 รูปแบบคือ แบบที่มีความชื้น และแบบไม่มีความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทำการทดลองทั้งหมด 40 cycle เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของความชื้นที่มีผลต่อจำนวนครั้งการใช้งานและประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับที่ถูกปรับปรุงด้วยสารกลุ่ม Amine ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 2.4 และ 2.5 โดยจะเรียกชนิดของสารดูดซับดังนี้ (สารกลุ่ม Amine)-(อุณหภูมิตอนดูดซับ)/(อุณหภูมิตอนคลาย)-(มีความชื้น[d],ไม่มีความชื้น[h])



รูปที่ 2.4 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิดต่างๆที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีความชื้น



รูปที่ 2.5 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิดต่างๆที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆ ภายใต้สภาวะที่มีความชื้น

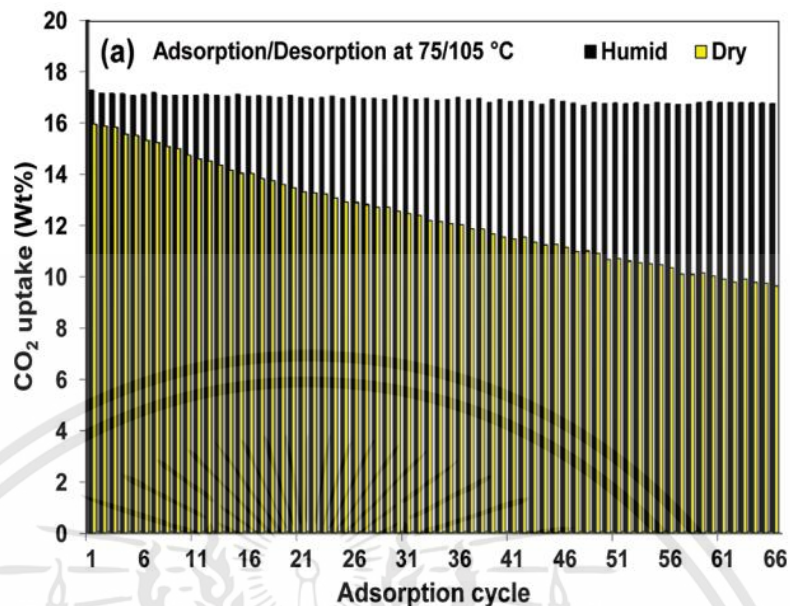
จากผลการทดสอบการดูดซับ-คายทั้งหมด 40 cycle ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นและไม่มี ความชื้น เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะเห็นได้ชัดเจนว่า สารดูดซับที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายกลุ่ม Amine สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า เมื่อทำงานภายใต้สภาวะที่มีความชื้น และยังสามารถใช้ งานแบบห้วงผลได้มากกว่า เมื่อเทียบกับการใช้งานภายใต้สภาวะที่ไม่มี ความชื้น ทั้งนี้สันนิษฐานได้ว่า ภายใต้สภาวะที่ไม่มี ความชื้น สารกลุ่ม Amine จะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กลายเป็น carbamate ที่ปริมาณสัมพันธ์ คาร์บอนไดออกไซด์ต่อไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 0.5 ในขณะที่ภายใต้สภาวะ ที่มีความชื้น สารกลุ่ม Amine จะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วเกิดเป็น Bicarbonate ที่ ปริมาณสัมพันธ์คาร์บอนไดออกไซด์ต่อไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 1 จึงส่งผลให้เกิดการจับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่า

2.3 การทดลองของ Aliakbar Heydari-Gorji และคณะ (2012)

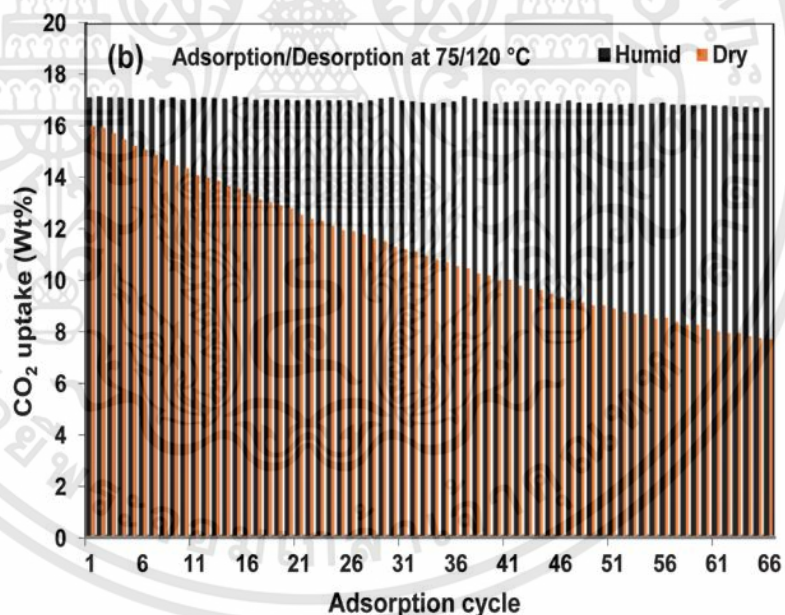
ใน ชื่อ เรื่อง Thermal, Oxidative and CO₂ - Induced Degradation of Supported Polyethylenimine Adsorbents ได้ศึกษาถึงเสถียรภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับที่ถูกปรับปรุงโดยใช้ PEI ด้วยวิธีการเอ็บซุ่ม โดยศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิ, การออกซิไดซ์ ที่จะมีผลต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับดังกล่าว

ในขั้นตอนการเตรียมสารดูดซับที่ใช้สำหรับในการทดสอบ สารดูดซับชนิด SBA-15 แบบเกล็ดถูกนำมาใช้เป็นสารดูดซับพื้นฐาน และถูกนำมาปรับปรุงโดยใช้ PEI ด้วยกระบวนการเอ็บซุ่ม โดยใช้ปริมาณการเอ็บซุ่มของ PEI อยู่ที่ 55 wt% ซึ่งจะได้ค่าความหนาแน่นของ PEI อยู่ที่ 1.05 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร และนำสารดูดซับที่ได้ไปทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพโดยใช้เครื่อง Micromeritics 2020 apparatus และกระบวนการ SEM ด้วยเครื่อง JSM-7500F

การทดสอบการวัดค่าการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลองของงานวิจัยนี้ ทั้งในรูปแบบของการทดสอบภายใต้สภาวะที่มีความชื้น และไม่มี ความชื้น โดยแก๊สที่ใช้ในการทดสอบคือแก๊สผสม ที่มี ส่วนผสมของคาร์บอนไดออกไซด์ 5% ไนโตรเจน 95% ก่อนเริ่มทำการทดสอบการดูดซับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ สารดูดซับที่เตรียมไว้ในชุดทดลอง จะถูกเตรียมพร้อมโดยการให้แก๊สไนโตรเจนไหลผ่าน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาทีเพื่อไล่แก๊สที่อาจคงค้างอยู่ในสารดูดซับออก หลังจากนั้นจึงป้อนแก๊สสำหรับใช้ทดสอบเข้าสู่ชุดทดลอง โดยทดสอบเป็นเวลาทั้งหมด 10 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ ต่างๆในช่วง 85-120 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจึงไล่แก๊สที่ถูกดูดซับไว้โดยใช้แก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ เดียวกันกับในกระบวนการดูดซับ โดยใช้เวลา 1.5 ชั่วโมง สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าการดูดซับสูงสุด



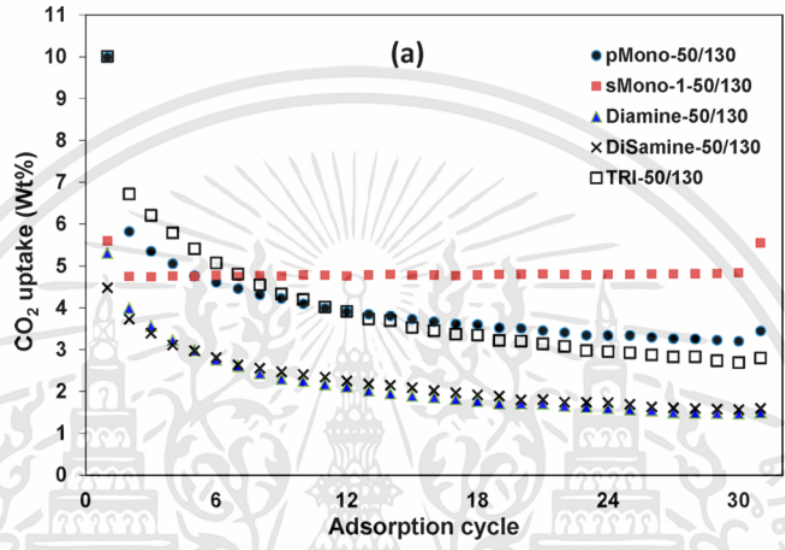
รูปที่ 2.6 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิดต่างๆที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆ ภายใต้อุณหภูมิที่ไม่มีความชื้นและมีความชื้น ที่อุณหภูมิ 75/105 องศาเซลเซียส



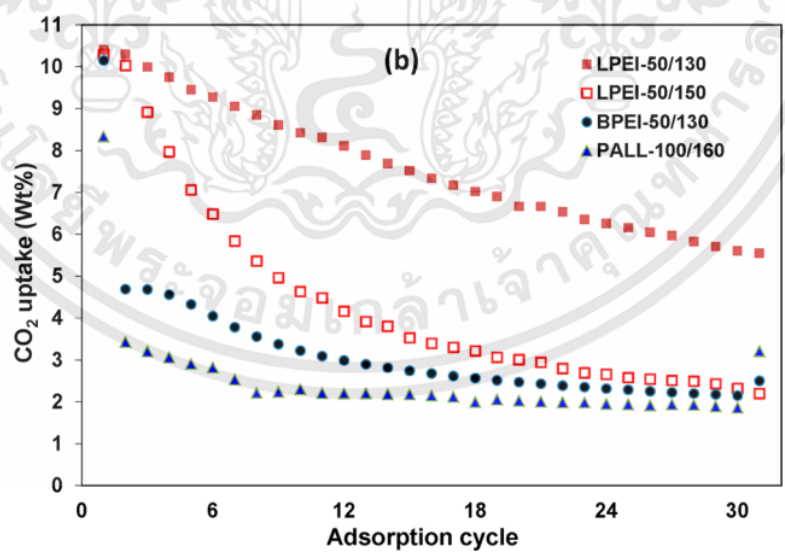
รูปที่ 2.7 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิดต่างๆที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆ ภายใต้อุณหภูมิที่ไม่มีความชื้นและมีความชื้น ที่อุณหภูมิ 75/120 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองในรูปแบบ cyclic adsorption-desorption ทั้งในระบบที่มีความชื้น และไม่มี ความชื้นที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.6 และ รูปที่ 2.7 ชี้ให้เห็นว่าสารดูดซับที่ถูกปรับปรุงด้วย PEI สามารถทำการดูดซับได้ดีแม้จะผ่านการทำงานหลายครั้ง ในสภาพที่มีความชื้น แต่ในสภาพที่ไม่มีความชื้น

ในการทดลอง จะใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 99.99% เป็นแก๊สทดลอง และกระทำภายใต้สภาวะที่ไม่มีมีความชื้น ทั้งนี้เนื่องจากเป้าหมายของการทดลองของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับที่ถูกปรับปรุงด้วยสารกลุ่ม Amine โดยลักษณะการทดลองจะอยู่ในรูปแบบของ temperature swing adsorption (TSA) ซึ่งใช้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพื่อทำให้เกิดการดูดซับ และการคลายแก๊สที่ถูกดูดซับเข้าไปในสารดูดซับ



รูปที่ 2.9 ผลการทดสอบการเสื่อมสภาพของสารดูดซับที่ปรับปรุงด้วยสารกลุ่ม Amine ด้วยวิธีการกราฟ

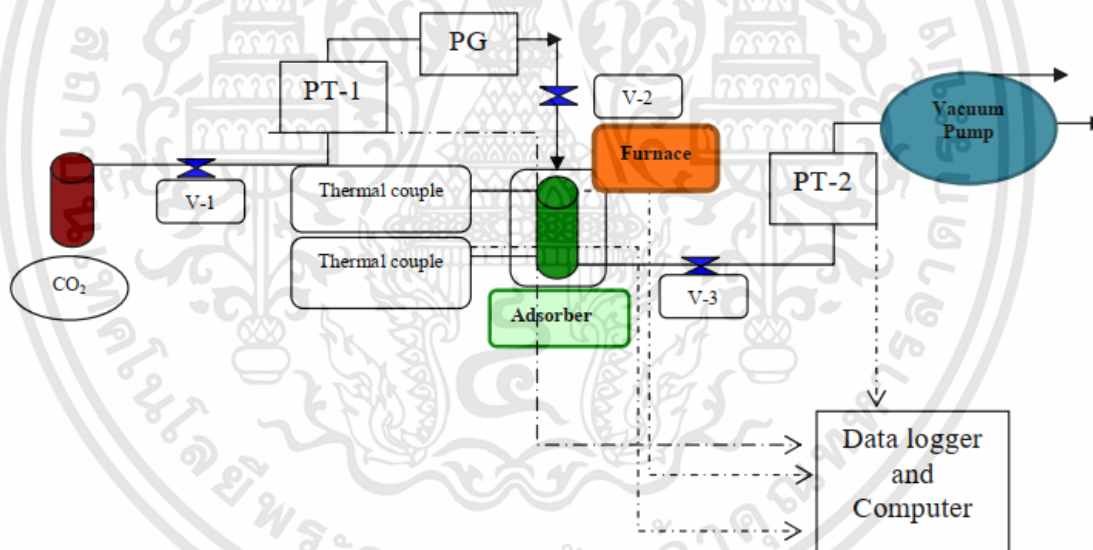


รูปที่ 2.10 ผลทดสอบการเสื่อมสภาพของสารดูดซับที่ปรับปรุงด้วยสารกลุ่ม Amine ด้วยวิธีการเอ็บซุ่ม

จากการทดลองแบบ TSA ทั้งหมด 30 cycle ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสารดูดซับในกลุ่มที่ถูกปรับปรุงคุณภาพโดยวิธีการกราฟด้วยสาร pMono, sMono-1, sMono-2, Diamine และ TRI มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงไปกว่าร้อยละ 65 จากเดิมตั้งรูปที่ 2.9 ซึ่งให้ผลที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับสารดูดซับที่ถูกปรับปรุงคุณภาพโดยการเอ็บซุ่มด้วยสาร BPEI, LPEI และ PALL ดังที่แสดงในรูปที่ 2.10 แต่ทั้งนี้ ในกลุ่มของสารที่ปรับปรุงด้วยกระบวนการเอ็บซุ่มนั้น ชี้ให้เห็นถึงการเสื่อมสภาพที่ช้ากว่าในกรณีเอ็บซุ่มในปริมาณที่มากขึ้น และสามารถทำงานได้แม้ในสภาพอะอุนหภูมิที่สูงกว่า

2.5 การทดลองของ Supasine Pipatsantipong และคณะ (2012)

ในชื่อเรื่อง Towards CO₂ Adsorption Enhancement via Polyethyleneimine Impregnation งานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในด้านของการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิด AC โดยใช้วิธีการเอ็บซุ่ม ด้วยสารละลาย PEI ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน เพื่อหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม และได้ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์การทดลอง และการต่อพ่วงอุปกรณ์สำหรับชุดทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ของสารดูดซับชนิด AC ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วย PEI

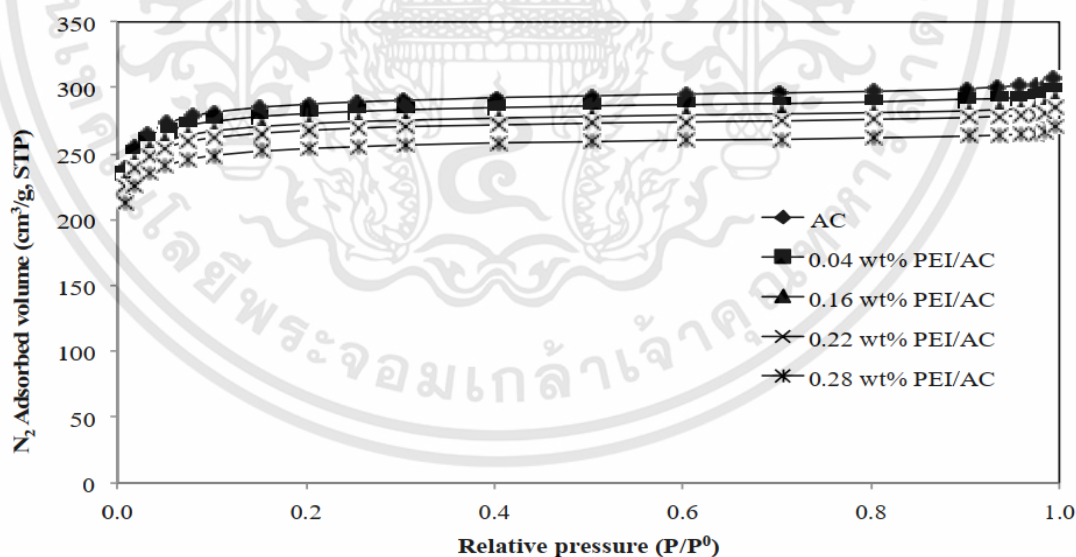
รูปแบบการทดลองใช้อุปกรณ์ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11 มีลักษณะเป็นชุดทดลองการดูดซับแบบ single column ที่มีชุดควบคุมอุณหภูมิติดตั้งอยู่ที่กระบอกบรรจุสารดูดซับ และบันทึกสภาวะระหว่างการทดลองทั้งหมดผ่านเซ็นเซอร์ที่ต่อไปยังอุปกรณ์เก็บข้อมูล และคอมพิวเตอร์ รูปแบบการทดลองจะเป็น

การทดลอง ที่ 3 ช่วงอุณหภูมิ คือ 30, 50 และ 75 องศาเซลเซียส และควบคุมความดันภายในชุดทดลอง ให้อยู่ในช่วง 0-1 บรรยากาศ

Adsorbents	BET surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore Diameter (Å)
AC	1,325	0.4757	13.40
0.04 wt% PEI/AC	1,288	0.4620	13.20
0.16 wt% PEI/AC	1,248	0.4488	13.20
0.22 wt% PEI/AC	1,225	0.4406	13.18
0.28 wt% PEI/AC	1,177	0.4226	13.16

รูปที่ 2.12 ผลการวิเคราะห์พื้นผิว และปริมาตรรูพรุนของวัสดุดูดซับชนิด AC ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย PEI

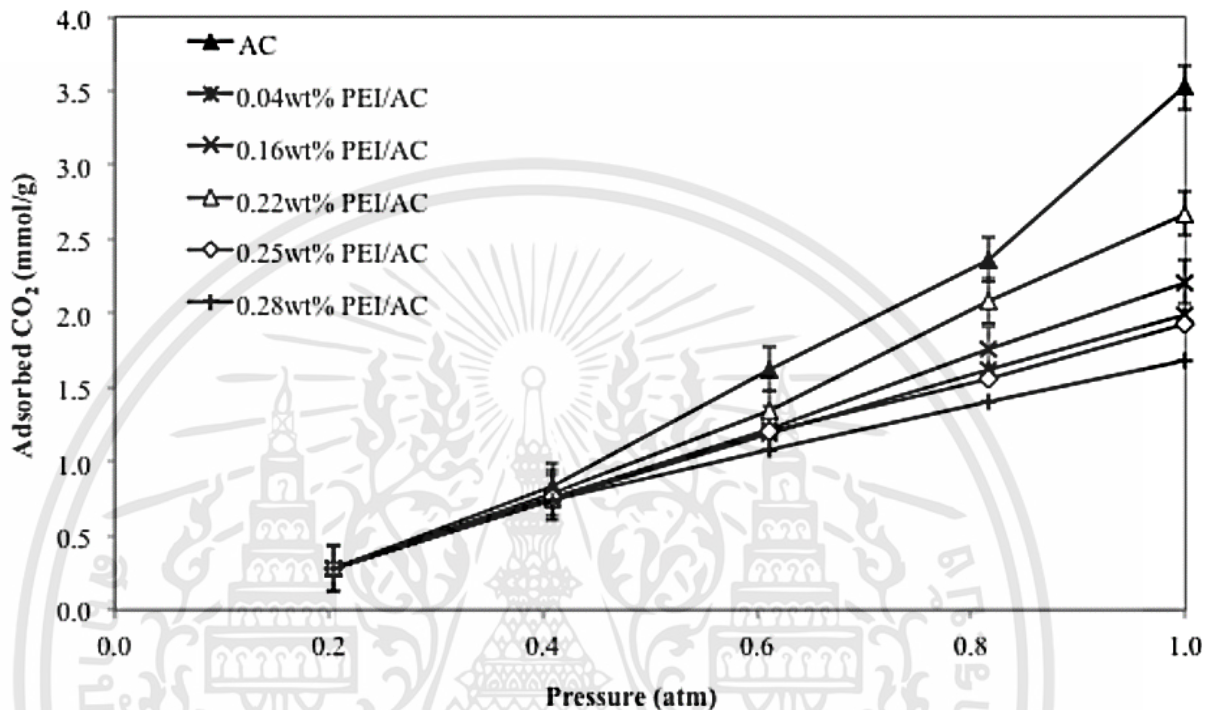
จากรูปที่ 2.12 ผลการทดสอบลักษณะทางกายภาพด้วยวิธีการ thermogravimetry/different thermal analysis (TG/DTA) และ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ของวัสดุดูดซับชนิด AC ที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วย PEI ที่ปริมาณแตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่า รูพรุนของวัสดุดูดซับ ถูกแทนที่ด้วยสารที่นำมาเอ็บซุ่ม ดังนั้น เมื่อมีปริมาณของสารเอ็บซุ่มเพิ่มขึ้น ปริมาณของพื้นที่ผิว และปริมาตรของรูพรุนจึงลดลงตามลำดับ



รูปที่ 2.13 ผลการทดสอบการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่แรงดันสัมพัทธ์ 0-1 atm ($P^0=1$ atm)

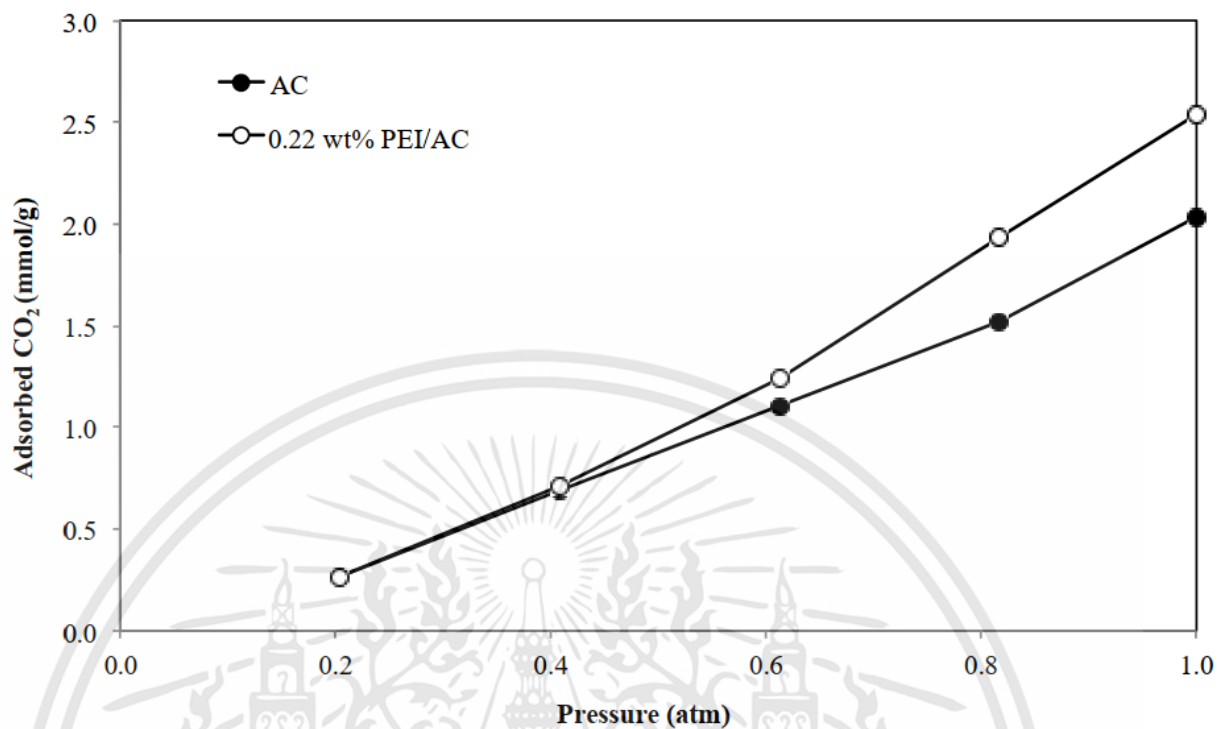
ผลการทดลองการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่ช่วงแรงดันสัมพัทธ์ 0-1 แสดงให้เห็นว่าสารดูดซับชนิด AC และสารดูดซับชนิด AC ที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย PEI สามารถดูดซับไนโตรเจนได้

เป็นปริมาณมากในช่วงแรงดันสัมพัทธ์ที่ 0 – 0.2 และสูงสุดในช่วงแรงดันสัมพัทธ์ที่ 0.3 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสารดูดซับที่นำมาทดลองนั้น จัดอยู่ในสารดูดซับวัสดุพรุนประเภท micropores ซึ่งความจุการดูดซับของสารดูดซับนั้น จะขึ้นอยู่กับปริมาณของ micropores ในตัวสารดูดซับนั้น ดังที่แสดงในรูปที่ 2.13

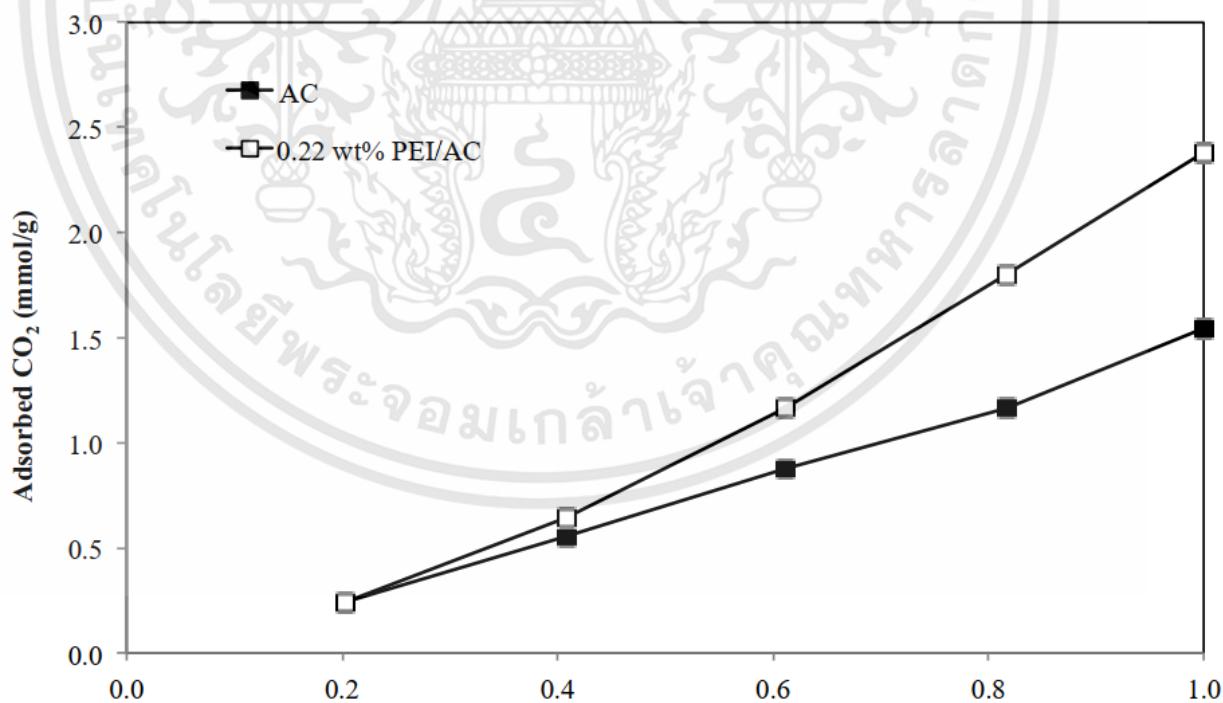


รูปที่ 2.14 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ AC ที่ถูกปรับปรุงด้วย PEI ที่ปริมาณต่างกัน ภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิด AC เปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิด AC ที่ผ่านการปรับปรุงโดยกระบวนการเอ็บซุ่มด้วยสาร PEI ภายใต้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่ช่วงแรงดัน 0-1 บรรยากาศ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า สารดูดซับที่ถูกปรับปรุงด้วย PEI ที่ปริมาณมากขึ้น จะมีความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงขึ้น ดังที่เห็นในผลการทดลองในช่วงปริมาณ PEI 0.04 wt% ถึง 0.22 wt% แต่ทั้งนี้ ที่ปริมาณ PEI มากไปกว่าช่วงดังกล่าว ไปจนถึง 0.25wt% หรือสูงกว่า จะส่งผลให้ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการอุดตันของรูพรุนที่ตัววัสดุดูดซับ เนื่องจากถูกแทนที่ด้วย PEI ที่มีปริมาณมากเกินไป ดังที่แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ AC ที่ถูกปรับปรุงด้วย PEI 0.22wt% กับ AC ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง ภายใต้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

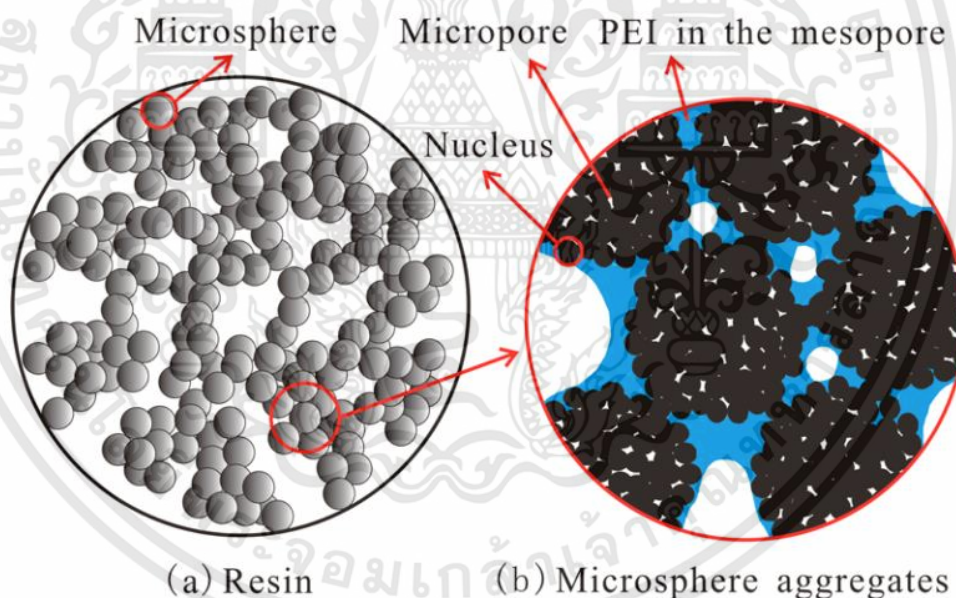


รูปที่ 2.16 เปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ AC ที่ถูกปรับปรุงด้วย PEI 0.22wt% กับ AC ที่ไม่ได้ผ่านการปรับปรุง ภายใต้อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 2.15 และ 2.16 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับชนิด AC เปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิด AC ที่ปรับปรุงด้วยสาร PEI ในสถานะที่มีอุณหภูมิ 50 และ 75 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่า PEI สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้ดีขึ้นในอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งช่วยลดข้อเสียของสารดูดซับชนิด AC ซึ่งมีประสิทธิภาพการทำงานที่ลดลงเมื่อใช้งานภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส

2.6 การทดลองของ Zhenhe Chen และคณะ (2013)

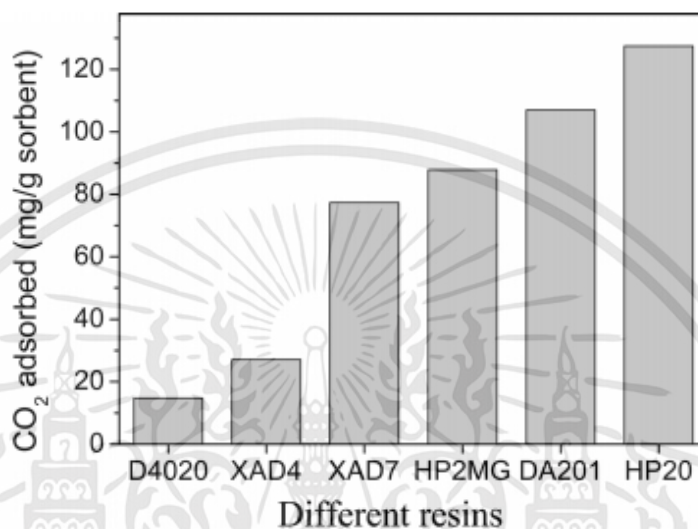
ในชื่อเรื่อง Polyethylenimine-Impregnated Resin for High CO₂ Adsorption: An Efficient Adsorbent for CO₂ Capture from Simulated Flue Gas and Ambient Air ที่ศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะความดันบรรยากาศ โดยการใช้ เรซิน ซึ่งผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย PEI ด้วยกระบวนการเอ็บซุ่ม



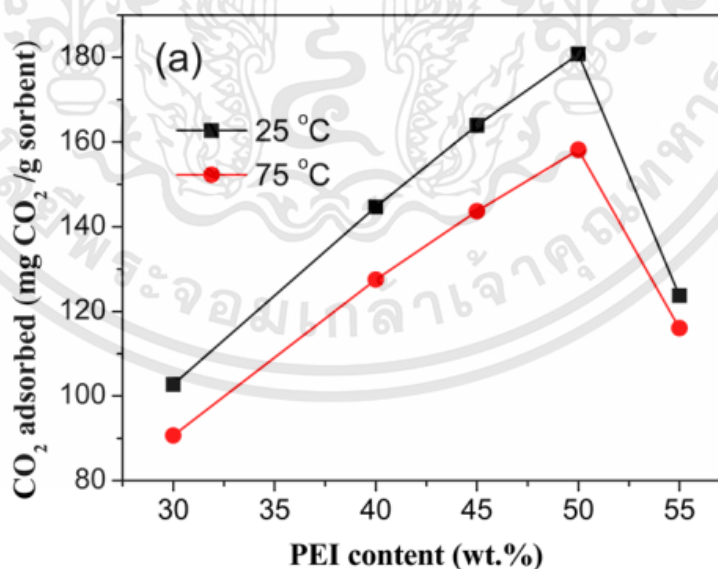
รูปที่ 2.17 ลักษณะและการกระจายตัวของ PEI บน เรซินที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่ม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานำเรซินหลายชนิดมาใช้ในการเอ็บซุ่มสารละลาย PEI ได้แก่ D4020, XAD4, XAD7, HP2MG, DA201 และ HP20 ซึ่งจากผลการทดลองนำมาเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย PEI ที่ ปริมาณ 40 wt% โดยที่ตรงการให้มีการกระจายตัวของ PEI อย่างเหมาะสมดังที่แสดงในรูปที่ 2.17 ใน การทดลองดังกล่าวพบว่า เรซินบางชนิดไม่สามารถคงสภาพรูพรุนไว้ได้ ทำให้สูญเสียประสิทธิภาพในการ

ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไป ดังที่แสดงในรูปที่ 2.18 จะเห็นว่าเรซินชนิด D4020 และ XAD4 มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าเรซินชนิดอื่น จากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ พบว่าขนาดรูพรุนของเรซินดังกล่าว มีขนาดเพียง 10 นาโนเมตร ส่งผลให้ไม่สามารถดูดซับได้ดีนัก

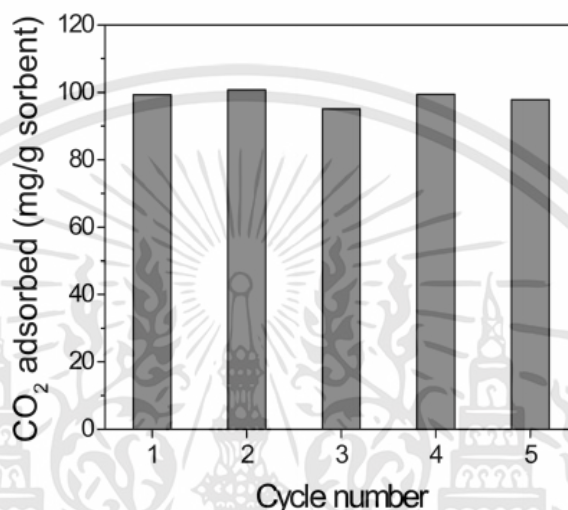


รูปที่ 2.18 ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเรซินแต่ละชนิด ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วย PEI ปริมาณ 40 wt%



รูปที่ 2.19 ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์(mg CO₂/g sorbent)ต่อปริมาณการเอ็บซุ่ม PEI (wt.%)

จากผลการทดสอบความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งพบว่า เรซินชนิด HP20 ที่ถูกปรับปรุงด้วย PEI มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ดังนั้น จึงมีการทดสอบในด้านของปริมาณการเอิบซุ่มที่เหมาะสม โดยทดสอบปริมาณการเอิบซุ่ม PEI ในช่วง 30-55 wt% ภายใต้สภาวะอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 2 ช่วง อุณหภูมิคือ 25 และ 75 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้ พบว่า การเอิบซุ่ม PEI ที่ปริมาณ 50 wt% ให้ผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุด ทั้งใน 2 ช่วงอุณหภูมิ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.19



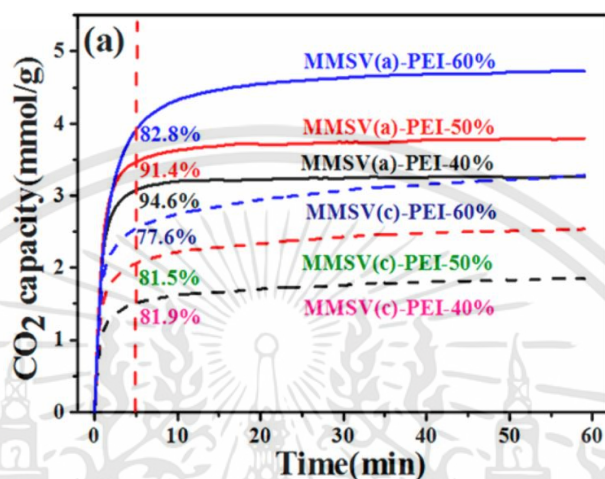
รูปที่ 2.20 ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ เรซินที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วย PEI ในการทดลอง 5 Cycle

จากรูปที่ 2.19 หลังจากทราบปริมาณการเอิบซุ่ม PEI ที่เหมาะสม สำหรับเรซิน HP20 จึงได้ทำการทดสอบ HP20 ที่เอิบซุ่มด้วย PEI 50 wt% ในรูปแบบของ Cyclic Experiment เพื่อศึกษาเสถียรภาพในการทำงานของสารดูดซับ เมื่อต้องทำงานอย่างต่อเนื่อง ผลจากการทดลอง 5 cycle พบว่า เรซิน HP20 ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วย PEI 50 wt% สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี โดยมีความแตกต่างในปริมาณการดูดซับแต่ละรอบของการทดลองไม่เกิน 10% ดังที่แสดงในรูปที่ 2.20

2.7 การทดลองของ Lihuo Zhang และคณะ (2016)

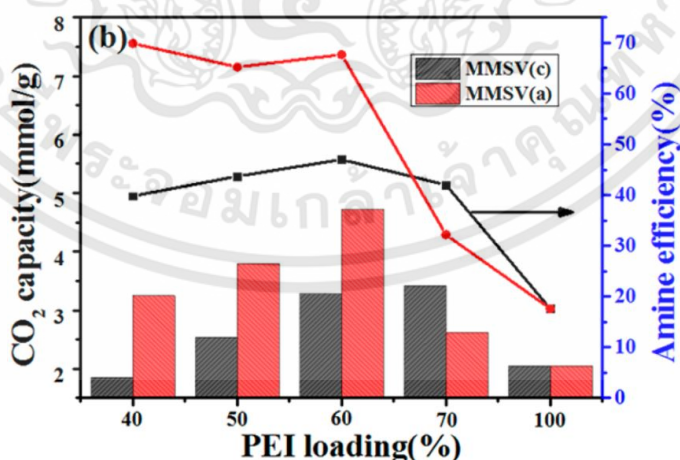
ในชื่อเรื่อง “Impregnation of Polyethylenimine in Mesoporous Multilamellar Silica Vesicles for CO₂ Capture: A Kinetic Study” ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และพฤติกรรมของการดูดซับ ของสารดูดซับ mesoporous multilamellar silica vesicle (MMSV) ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมาให้มีปริมาณรูพรุน และขนาดของรูพรุนเหมาะสมแก่การนำมาใช้ในการเอิบซุ่มด้วย PEI โดยเฉพาะ และทำการทดลองโดยการเอิบซุ่มด้วยสารละลาย PEI ที่ปริมาณแตกต่างกัน ในช่วงตั้งแต่ 40-60 wt% เพื่อหาปริมาณการเอิบซุ่มที่เหมาะสม ที่จะทำให้เกิดการกระจายตัว

ของ PEI ที่สม่ำเสมอ และไม่เกิดการอุดตันรูพรุนที่เกิดจากการไม่สามารถกระจายตัวได้ของ PEI เนื่องจาก ปริมาณของ PEI ที่มากเกินไป โดยได้เตรียมสารดูดซับชนิด MMSV แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ MMSV(a) และ สารที่ได้จากการทำ MMSV(a) ไปผ่านกระบวนการ calcinate โดยการเผาด้วยอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยเรียกว่าสารนั้นว่า MMSV(c)



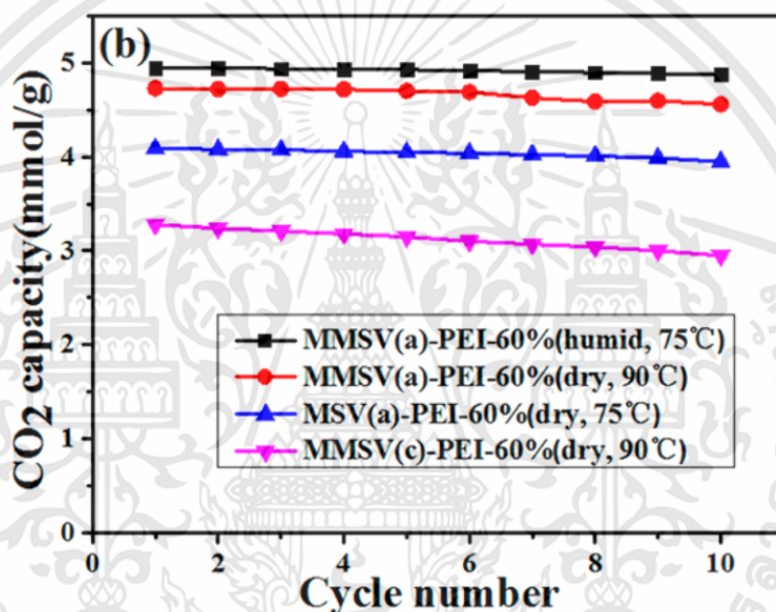
รูปที่ 2.21 ผลการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ MMSV(a) และ MMSV(c) ที่เอ็บซุ่มด้วย PEI ในช่วง 40-60wt%

รูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่าสารดูดซับที่เอ็บซุ่มด้วย ปริมาณ PEI ที่มากกว่า จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีกว่า โดยเห็นได้ชัดเจนในทั้ง สารดูดซับ MMSV(a) และ MMSV(c) และ สารดูดซับที่ให้ผลการดูดซับที่ดีที่สุดจากการทดลองคือสาร MMSV(a) ที่เอ็บซุ่มด้วย PEI 60wt%



รูปที่ 2.21 ความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (mmol CO₂/g sorbent) ต่อปริมาณการเอ็บซุ่ม PEI (wt.%) และประสิทธิภาพของ Amine ที่เอ็บซุ่ม

รูปที่ 2.21 แสดงถึงผลการทดลองเพื่อหาปริมาณการเอ็บซุ่ม PEI ที่เหมาะสมแก่สารดูดซับชนิด MMSV(a) และ MMSV(c) ซึ่งผลที่ได้พบว่า สารดูดซับทั้ง 2 ชนิด สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงที่สุด และแสดงให้เห็นถึงผลของประสิทธิภาพของ PEI ที่นำมาเอ็บซุ่มได้ดีที่สุด ที่ปริมาณการเอ็บซุ่ม PEI 60 wt% และแสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับจะลดลงอย่างชัดเจน เมื่อมีการเอ็บซุ่ม PEI ที่เกินกว่า 60 wt% เนื่องจากผลของการกระจายตัวที่ไม่ดีของ PEI ที่เกิดจากปริมาณ PEI บนพื้นผิวของสารดูดซับมีมากเกินไป และเกิดการอุดตันรูพรุน ทำให้ขนาดของรูพรุนไม่เหมาะสมแก่การไหลผ่าน และดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.22 ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของสารดูดซับ MMSV(a) และ MMSV(c) ที่เอ็บซุ่มด้วย PEI 60wt% ที่ผ่านการใช้งานซ้ำๆ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีความชื้นและมีความชื้น ที่อุณหภูมิ 75-90 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับของสารดูดซับ MMSV(a) และ MMSV(c) ที่เอ็บซุ่มด้วย PEI 60wt% ภายใต้สภาวะที่มีความชื้น และไม่มีความชื้น โดยทดสอบแบบ Cyclic adsorption-desorption เป็นปริมาณ 10 Cycle ผลปรากฏว่า ภายใต้สภาวะที่มีความชื้น สารดูดซับที่ถูกเอ็บซุ่มด้วย PEI จะมีประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น เมื่อเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่มีความชื้น และมีอัตราการเสื่อมสภาพที่ต่ำกว่าการทำงานภายใต้สภาวะที่ไม่มีความชื้นเล็กน้อย

บทที่ 3

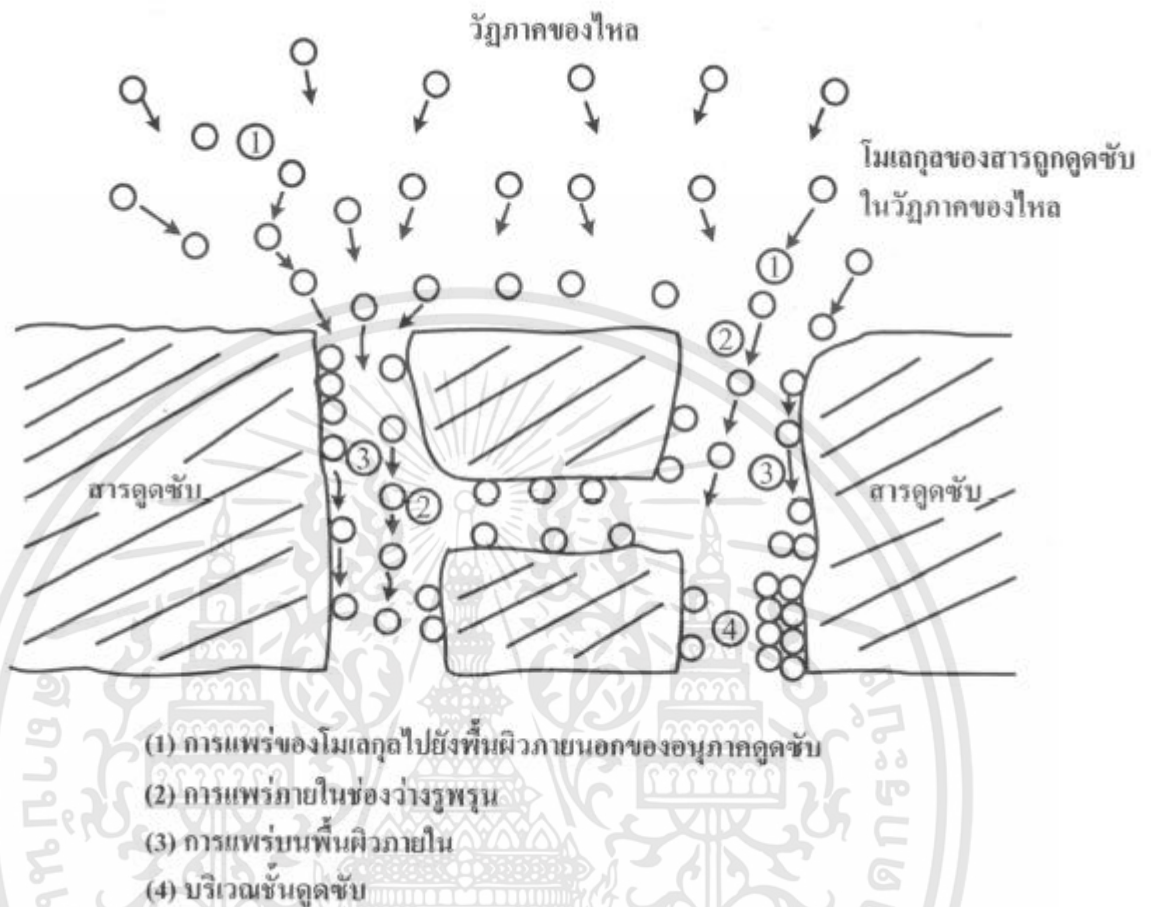
ทฤษฎี

3.1 นิยาม และความสำคัญของกระบวนการดูดซับสาร

กระบวนการดูดซับสาร (adsorption process) เป็นหนึ่งในกระบวนการแยกสาร (separation processes) ซึ่งวิศวกรรม ที่มีความสำคัญในทางอุตสาหกรรมเช่นเดียวกับกระบวนการแยกสารอื่น ๆ เช่น การกลั่น (distillation) การดูดกลืนแก๊ส (gas absorption) และการสกัดสาร (extraction) เป็นต้น กระบวนการดูดซับสารเป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคของไหล (แก๊ส, ไอ, ของเหลว) โดยอาศัยการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารที่ต้องการแยก ซึ่งจะเรียกว่าตัวถูกดูดซับ หรือสารถูกดูดซับ (adsorbate) โดยกลไกของการแพร่ไปสะสมอยู่บนพื้นผิวภายในของของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ หรือสารดูดซับ (adsorbate) ทำให้ความหนาแน่น หรือความเข้มข้นของสารถูกดูดซับบนผิวของแข็งมีค่าสูงกว่าในบริเวณที่ไกลออกไปในวัฏภาคของไหล การดูดซับนี้เกิดขึ้นได้จากแรงกระทำ (interaction forces) ระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ โดยอาจเป็นแรงดูดอย่างอ่อนที่เรียกแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) ซึ่งจัดเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) หรืออาจเกิดจากการสร้างพันธะเคมีที่มีความแข็งแรงกว่า ซึ่งจัดเป็นการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) เนื่องจากการดูดซับสารเป็นปรากฏการณ์พื้นผิว (surface phenomenon) ดังนั้นคุณลักษณะเบื้องต้นของสารดูดซับที่ดี ซึ่งหมายถึงมีความสามารถดูดซับสารต่อหน่วยน้ำหนัก หรือต่อหน่วยปริมาตรได้มาก จึงจำเป็นต้องมีค่าพื้นผิวจำเพาะที่สูง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งจะต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุน และประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก เพื่อให้มีพื้นที่ผิวภายในสูงนั่นเอง อย่างไรก็ตามลักษณะของโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสม ได้แก่ สัดส่วนปริมาตรของรูพรุนขนาดต่าง ๆ ก็มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการดูดซับเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมของกระบวนการดูดซับสารซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของโมเลกุลสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังตำแหน่งพื้นผิวภายนอกของอนุภาคในกระบวนการ ตามด้วยการแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับ ซึ่งประกอบด้วย การแพร่ภายในช่องว่างของรูพรุน (pore diffusion) ในกระบวนการ และการแพร่ไปบนพื้นผิวภายในรูพรุน (surface diffusion) ในกระบวนการ และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการดูดซับบนตำแหน่งที่เหมาะสมบนพื้นผิว (adsorption sites) ในกระบวนการ สำหรับปรากฏการณ์ที่เกิดในทิศทางตรงกันข้าม ได้แก่ การที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนย้ายออกจากพื้นผิวภายในของสารดูดซับจะเรียกกระบวนการคายสาร (desorption process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่กระทำเพื่อไล่สารที่ถูกดูดซับไว้ ทำให้สามารถนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้อีก เรียกกระบวนการนี้ว่า “การคืนสภาพ” (adsorbent regeneration) สำหรับกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับแก๊ส การคายสารทำได้โดยวิธีลดความดันของระบบ หรือโดยการให้ความร้อนแก่ระบบ โดยใช้ตัวกลางที่มีอุณหภูมิสูง ได้แก่ ไอน้ำ แก๊สเฉื่อย หรือแก๊สผสมจากกระบวนการอื่น เป็นต้น



รูปที่ 3.1 แผนภูมิอย่างง่ายแสดงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ

เนื่องจากการใช้งานจริง กระบวนการดูดซับสารจะถูกจำกัดด้วยความจุของสารดูดซับ โดยเมื่อสารดูดซับถูกใช้งานไปได้ระยะหนึ่ง และเกิดสภาพอิ่มตัว (saturation) จะต้องทำการคืนสภาพให้กับสารดูดซับเป็นระยะ ๆ เพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ เป็นการประหยัดการใช้สารดูดซับ ด้วยเหตุนี้ในระยะต้นของการประยุกต์กระบวนการดูดซับมาใช้ในกระบวนการแยกสารจึงไม่มีใครได้รับความนิยมมากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อถูกนำมาทำงานร่วมกับกระบวนการแยกสารประเภทอื่น ตัวอย่างเช่น กระบวนการกลั่น ซึ่งทำงานแบบต่อเนื่อง อีกทั้งยังมีความยุ่งยากในการสังเคราะห์สารดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ ให้มีสมบัติในการดูดซับที่คงที่ สม่ำเสมอ เนื่องจากสารดูดซับส่วนใหญ่จะถูกสังเคราะห์จากวัฏธรรมาชาติ เช่น ซิวมวล ถ่านหิน หรือแร่ธาตุ ดังนั้นการออกแบบ และการทำงานของระบบดูดซับสารในระดับอุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องมีความยืดหยุ่นค่อนข้างสูง เพื่อรับกับการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าว อย่างไรก็ตาม ได้มีพัฒนาการของวิธีสังเคราะห์สารดูดซับประเภทต่าง ๆ ที่มีความหลากหลายของสมบัติการดูดซับ ตลอดจนมีความเฉพาะเจาะจงต่อสารถูกดูดซับมากขึ้น ทำให้สามารถเลือกใช้สารดูดซับที่เหมาะสมต่อการใช้งานเฉพาะอย่าง ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับ ทำให้สามารถเข้าใจถึงกลไก ตลอดจนพลศาสตร์การดูดซับได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาวิธีคำนวณออกแบบระบบดูดซับที่ได้รับการยอมรับเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการแยกสาร และกระบวนการทำบริสุทธิ์ในระดับอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น การลดความชื้นของแก๊สผสม การกำจัดไอของตัวทำละลายอินทรีย์ การดูดความชื้นจากบรรจุภัณฑ์ การแยกออกซิเจน และไนโตรเจน จากอากาศ ตลอดจนการกำจัดมลพิษต่าง ๆ ออกจากน้ำ และอากาศ เป็นต้น

3.2 วัสดุดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งเป็นอย่างน้อย ณ บริเวณผิวร่วม (interface) ระหว่างวัฏภาค (phase) เช่น ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคก๊าซกับวัฏภาคของเหลว ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคของเหลวที่แยกชั้นผิวระหว่างวัฏภาคก๊าซกับวัฏภาคของแข็ง และผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคของแข็ง เป็นต้น ของแข็งมีพื้นผิวจำเพาะคงตัว ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของระบบที่มีของแข็งจึงสามารถกำหนดได้อย่างชัดเจน ระบบดูดซับทั่วไปจึงมักมีส่วนแข็งเป็นส่วนประกอบ แต่ในทางตรงกันข้าม ระบบที่มีของแข็งเป็นส่วนประกอบอาจไม่เป็นระบบดูดซับ

ระบบของแข็งที่เก็บสะสมสารประกอบอื่น ๆ ไว้บนผิวเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ส่วนสารประกอบต่าง ๆ ที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (adsorbate) ดังนั้น ตัวดูดซับมักเป็นของแข็งที่มีโพรงจำนวนมาก เพื่อเพิ่มพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีผลให้สามารถดูดซับได้มากขึ้นตามสัดส่วนพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น แม้ว่าการเพิ่มปริมาณโพรงขนาดเล็กในตัวดูดซับมีผลให้ตัวดูดซับมีพื้นผิวจำเพาะมากขึ้น แต่โพรงขนาดเล็กอาจเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของสารถูกดูดซับภายในโพรงของตัวดูดซับ ไปยังพื้นผิวในโพรงขนาดเล็กดังกล่าว เมื่อพิจารณาตามหลักลักษณะทางกายภาพของโพรงในตัวดูดซับ โพรงส่วนใหญ่ของตัวดูดซับจึงควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของสารดูดซับ ในสถานะก๊าซหรือไอ เพื่อให้สารถูกดูดซับนั้น สามารถแพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับและสามารถแพร่ต่อไปยังพื้นผิวในโพรงเหล่านั้นได้อย่างสะดวก

3.2.1 ประเภทของสารดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาค และแรงเคมี การดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ ดังนี้

ประเภทที่ 1 การดูดซับแบบกายภาพ (physisorption) คือ การดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ ด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดร่วมกัน แรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ ได้แก่

1. แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ
2. แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ

3. แร่งดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ

ประเภทที่ 2 การดูดซับแบบเคมี (chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้น การดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูง ๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือ การดูดซับแบบเคมีนี้จะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับแบบกายภาพ การดูดซับแบบเคมีนี้จึงเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้น และมักเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า “การดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption)” ความร้อนของการดูดซับประเภทนี้ จึงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของการดูดซับแบบกายภาพ หรือมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารถูกดูดซับชนิดนั้น ๆ ไม่น้อยกว่า 3 เท่า

3.3 การจำแนกระบบดูดซับสาร

เราสามารถจำแนกระบบดูดซับสารได้หลายแบบดังต่อไปนี้

3.3.1 จำแนกตามวิธีนำสารดูดซับกลับมาใช้ใหม่ (Adsorbent Regeneration)

3.3.1.1 ระบบดูดซับแบบแปรอุณหภูมิ (Temperature Swing Adsorption, TSA)

ในระบบนี้การนำสารดูดซับที่อิ่มตัวแล้วกลับมาใช้ใหม่จะทำได้โดยให้ความร้อนกับระบบดูดซับ เช่น การใช้ไอน้ำ หรือแก๊สร้อน เพื่อไล่สารถูกดูดซับให้ไหลปนออกมากับตัวกลางให้ความร้อน วิธีการนี้ใช้ได้กับระบบดูดซับที่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับอยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากการให้ความร้อนจะช่วยให้การไล่สารในปริมาณน้อยเกิดได้อย่างรวดเร็ว

3.3.1.2 ระบบดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption, PSA)

ระบบนี้จะใช้วิธีลดความดันของระบบเพื่อไล่สารถูกดูดซับแก๊สออกจากสารดูดซับที่ใช้ทำงานจนอิ่มตัวแล้ว เป็นวิธีที่สามารถใช้กับระบบดูดซับที่มีอัตราไหลสูงได้ดี เนื่องจากมีความรวดเร็ว และคล่องตัวของวงจรการทำงาน ซึ่งประกอบด้วยวงจรการดูดซับ และวงจรการไล่สารถูกดูดซับ ซึ่งทำงานสลับกัน

3.3.2 จำแนกตามองค์ประกอบของสารผสม (Feed Composition)

3.3.2.1 ระบบดูดซับเพื่อการแยกสาร (bulk separation)

เป็นระบบที่ปริมาณการดูดซับสารมีค่าสูงกว่า 10% เมื่อเทียบกับน้ำหนักของสารผสม

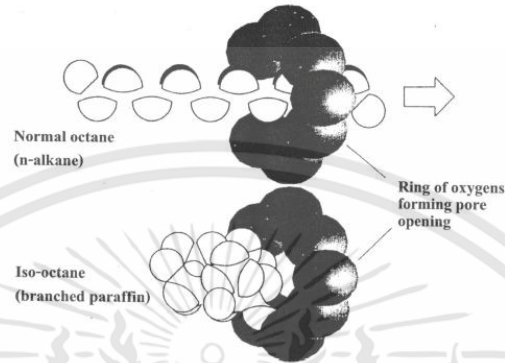
3.3.2.2 ระบบดูดซับเพื่อการทำบริสุทธิ์ (purification)

เป็นระบบดูดซับที่ปริมาณการดูดซับมีค่าต่ำกว่า 10% โดยน้ำหนักของสารผสมที่ต้องการแยก เช่น การดูดซับสารเพื่อนำสารที่มีคุณค่า หรือราคาสูงกลับมาใช้ประโยชน์

3.3.3 จำแนกตามกลไกของการแยก (Mechanism of Separation)

3.3.3.1 ระบบที่ใช้ความแตกต่างของรูปร่าง และขนาด (steric effect)

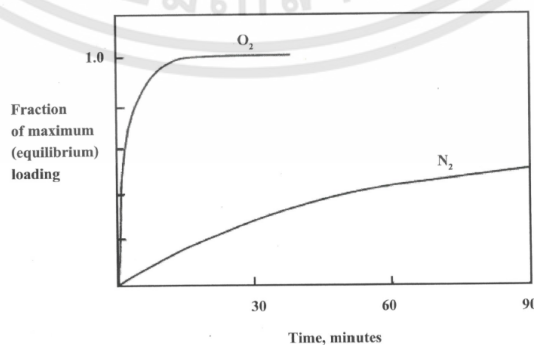
เป็นการแยกโดยอาศัยความแตกต่างทางขนาด และ/หรือรูปร่างของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ตัวอย่างเช่น การใช้สารดูดซับซีโอไลต์ชนิด 5A ในการแยกสารประกอบพาราฟินชนิดไซโซตรงออกจากชนิดไซโซกิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กลไกการแยกโดยอาศัยความแตกต่างของรูปร่างโมเลกุลระหว่าง n-octane (ไซโซตรง) และ iso-octane (ไซโซกิ่ง) โดยใช้ซีโอไลต์ 5A (Crittenden & Thomas)

3.3.3.2 ระบบที่ใช้ความแตกต่างของจลนพลศาสตร์การแพร่ (kinetic effect)

การแยกสารจะอาศัยความแตกต่างของอัตราการแพร่ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับภายในโครงสร้างรูพรุนของสารดูดซับ ตัวอย่างเช่น การแยกไนโตรเจน และออกซิเจนจากอากาศโดยใช้สารดูดซับประเภทคาร์บอนโมเลกุลซีฟ (carbon molecular sieve, CMS) ซึ่งสามารถดูดซับโมเลกุลออกซิเจนไว้ภายในได้มากกว่า เนื่องจากออกซิเจนสามารถแพร่และเดินทางลึกเข้าไปในรูพรุนได้รวดเร็วกว่าโมเลกุลของไนโตรเจน ซึ่งการแยกโดยวิธีนี้จะใช้ได้ผลดีในช่วงเวลาเริ่มต้นของการดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ก่อนที่ปริมาณการดูดซับของทั้งออกซิเจน และไนโตรเจนจะมีค่าเข้าใกล้กันเมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ จนระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล

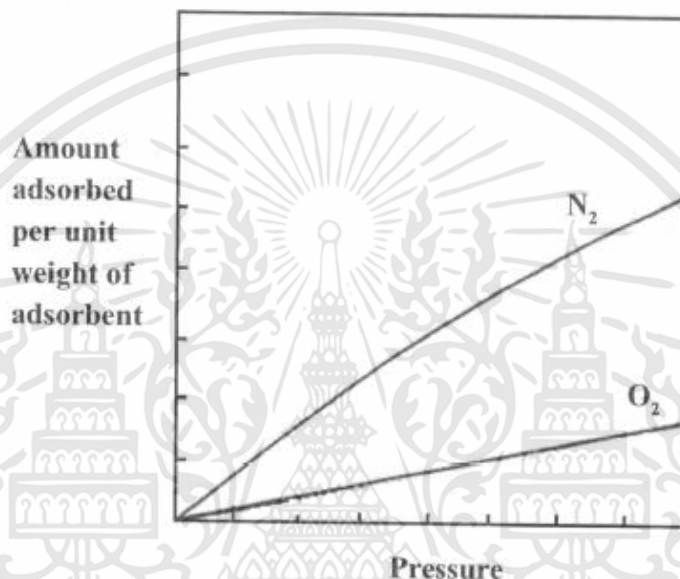


รูปที่ 3.3 ความแตกต่างของอัตราเร็วการดูดซับ O_2 และ N_2 โดยคาร์บอนโมเลกุลซีฟ (CMS) (Crittenden & Thomas)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.3 ระบบที่ใช้ความแตกต่างของปริมาณสมดุลของการดูดซับ (equilibrium effect)

เป็นระบบที่ใช้หลักความแตกต่างของความจุของสารถูกดูดซับ (adsorption capacity) ภายในสารดูดซับที่สภาวะสมดุล หรือที่เวลานานพอ ตัวอย่างเช่น ซีโอไลต์ชนิด 5A สามารถดูดซับไนโตรเจนจากอากาศไว้ได้ในปริมาณมากกว่าออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ดังนั้นในระบบการแยกอากาศแบบต่อเนื่องความเข้มข้นของออกซิเจนตรงทางออกของหอดูดซับจะมีค่าสูงกว่าของไนโตรเจนทำให้การแยกเกิดขึ้นได้



รูปที่ 3.4 สมดุลการดูดซับของ O_2 และ N_2 โดยซีโอไลต์ 5A ที่อุณหภูมิการดูดซับ $20^\circ C$ (Crittenden & Thomas)

3.3.4 จำแนกตามลักษณะของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล (Interaction Forces)

นอกเหนือจากการจำแนกระบบดูดซับออกเป็นประเภทต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้วระบบดูดซับสารยังสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของแรงกระทำ หรือแรงดึงดูด ที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ โดยแบ่งได้เป็นสองประเภทได้แก่ ระบบดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) และ ระบบดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption)

สำหรับการดูดซับทางกายภาพนั้น แรงดึงดูดจะค่อนข้างอ่อน และเกี่ยวข้องกับแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals forces) เป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่การดูดซับทางเคมีนั้น แรงยึดเหนี่ยวจะเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนของอิเล็กตรอน ซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมี ระหว่างสารถูกดูดซับและพื้นผิวของสารดูดซับ ดังนั้นแรงดึงดูดจึงมีค่ามากกว่าที่เกิดขึ้นในระบบดูดซับทางกายภาพ และยังมีสภาพจำเพาะ (specificity) ของสารดูดซับต่อสารที่จะถูกดูดซับมากกว่าอีกด้วยเนื่องจากการดูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นที่มีการสร้างพันธะเคมี ระบบดูดซับทางเคมีที่เกิดขึ้นเพียงหนึ่งชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับเท่านั้น (monolayer adsorption) อนึ่งโดยทั่วไปแล้วการประยุกต์ใช้ระบบดูดซับสารเพื่อการแยกและการทำบริสุทธิ์ในกระบวนการต่าง ๆ จะใช้หลักการของการดูดซับสารทางกายภาพเป็นหลัก เนื่องจากสามารถดูดซับโมเลกุลของสารได้หลายชั้น (multilayer adsorption) ทำให้มีค่าความจุต่อน้ำหนักของสารดูดซับที่สูงกว่า และที่สำคัญการดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ทำให้สามารถนำสารดูดซับที่ใช้งานจนอิ่มตัวแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

ตารางที่ 3.1 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพ และทางเคมี

ลักษณะความแตกต่าง	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนการดูดซับ	ต่ำ (อยู่ในช่วง 20-40 kJ/mol และมีค่าใกล้เคียงกับค่าความร้อนของการควบแน่นของสารถูกดูดซับที่เป็นแก๊ส)	สูง (มากกว่า 80 kJ/mol เทียบเท่ากับค่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมี)
2. สภาพจำเพาะของการดูดซับ	ไม่เจาะจง (สารดูดซับหนึ่ง ๆ สามารถดูดซับสารได้หลายชนิด)	มีความเจาะจงสูง (เลือกดูดซับสารเป็นบางชนิด ขึ้นกับสภาพของเคมีพื้นผิว)
3. ลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียว หรือหลายชั้นและไม่มีการแตกตัวของสารถูกดูดซับ	เป็นแบบชั้นเดียวเท่านั้น และอาจเกิดการแตกตัวของสารถูกดูดซับได้
4. อุณหภูมิของการดูดซับ	ดูดซับได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ	ดูดซับได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่า
5. แรงดึงดูดของการดูดซับ	ไม่มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนถึงแม้จะเกิดสภาพมีขั้วของสารถูกดูดซับจากการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งนำไปสู่การสร้างพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับและสารดูดซับ
6. สภาพผันกลับได้	การดูดซับสามารถผันกลับได้ และมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับต่ำ	การดูดซับเป็นแบบไม่ผันกลับและมีพลังงานกระตุ้นของการดูดซับสูง
7. อัตราเร็วของการดูดซับ	เร็ว และถูกควบคุมโดยความต้านทานการถ่ายโอนมวลภายในรูพรุนของสารดูดซับ	ช้า และถูกควบคุมโดยขั้นตอนของปฏิกิริยาเคมีบนพื้นผิวภายในของสารดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

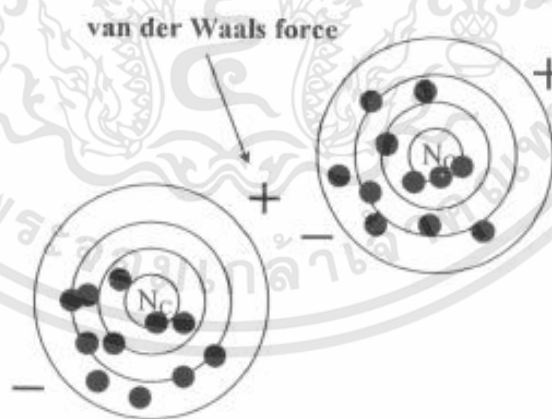
3.4 แรงดึงดูดสำหรับการดูดซับทางกายภาพ

เนื่องจากการใช้งานของสารดูดซับทางอุตสาหกรรมจะใช้หลักการดูดซับทางกายภาพเป็นส่วนใหญ่ ในหัวข้อนี้จะพิจารณารายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับธรรมชาติของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล หรืออะตอมของสารที่ถูกดูดซับ และของสารดูดซับของแข็ง แรงดึงดูดที่ทำให้เกิดลักษณะการดูดซับทางกายภาพแบ่งออกเป็น

แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) หรือแรงระหว่างโมเลกุล (inter-molecular force) ซึ่งประกอบด้วยแรงดึงดูด(dispersive or attractive force) และแรงผลักระยะใกล้ (short-range repulsive force)

แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic or coulombic force) ซึ่งเป็นแรงดึงดูดเสริมที่เกิดขึ้นในกรณีที่สารดูดซับของแข็ง หรือสารที่ถูกดูดซับเกิดสภาพมีขั้ว (polarity)

แรงดึงดูดโดยแรงแวนเดอร์วาลส์เกิดได้จากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน (electron cloud) ซึ่งเคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียสของอะตอม รูปร่างของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนจะไม่สมมาตรแต่จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดสภาพขั้วคู่ (electric dipole) ที่มีระดับต่างกันระหว่างอะตอม หรือโมเลกุลของสาร ลักษณะเช่นนี้ทำให้แรงดึงดูดอย่างอ่อนระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และสารดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 แรงดึงดูดนี้เกิดขึ้นได้กับสารทุกชนิด ทั้งชนิดที่มีขั้วอย่างถาวร (polar substances) หรือชนิดไม่มีขั้ว (nonpolar substances) สำหรับแรงผลักระยะใกล้จะเกิดขึ้นเมื่ออะตอม หรือโมเลกุลเข้ามาใกล้กันจนเกิดการทับซ้อนของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอน (overlapping of electron cloud) ดังนั้นแรงดึงดูดสุทธิระหว่างอะตอม หรือโมเลกุลจะเป็นผลต่างระหว่างแรงดึงดูด และแรงผลักรุนแรง



รูปที่ 3.5 การเกิดแรงดึงดูดแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลของแก๊สสองโมเลกุลที่มีความแตกต่างของสภาพขั้วคู่ จุดตำแหน่งอิเล็กตรอน ซึ่งมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา

นอกเหนือจากแรงแวนเดอร์วาลส์ซึ่งเป็นแรงพื้นฐานที่ทำให้เกิดการดูดซับแล้ว หากสารดูดซับแสดงสภาพความเป็นขั้ว (polarity) หรือมีประจุ (charges) ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างของสารดูดซับที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบด้วย อีออน (ionic solid) หรือมีกลุ่มที่แสดงควมมีขั้ว (polar functional groups) บนพื้นผิวของแข็งก็จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสถิต (electrostatic field) แผลออกจากพื้นผิวของสารดูดซับได้ แรงจากสนามไฟฟ้านี้เองสามารถจะเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพมีขั้วขึ้นในโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้ ส่งผลให้แรงดูดซับระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น แรงเนื่องจากไฟฟ้าสถิตดังกล่าวซึ่งทำให้เกิดพลังงานศักย์ของการดูดซับแบ่งออกเป็น

พลังงานโพลาริเซชัน หรือพลังงานการเกิดขั้ว (polarization energy) พลังงานประเภทนี้เกิดจากการที่สนามไฟฟ้าของโมเลกุลของสารดูดซับไปเหนี่ยวนำให้เกิดสภาพขั้วคู่ (induced dipole) ของโมเลกุลในสารถูกดูดซับ โดยที่ขนาดของพลังงานจะขึ้นกับคุณสมบัติสภาพมีขั้วได้ (polarizability) ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ

พลังงานดึงดูดจากสภาพขั้วคู่ถาวร (permanent dipole interaction energy) พลังงานประเภทนี้เกิดจากแรงกระทำระหว่างโมเมนต์ขั้วคู่แบบถาวรของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ และความเข้มของสนามไฟฟ้าสถิต

พลังงานดึงดูดจากสภาพสี่ขั้วแบบถาวร (permanent quadrupole interaction energy) เป็นพลังงานที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเมนต์สี่ขั้ว (quadrupole moment, Q) ของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ (ตัวอย่างเช่น โมเลกุลของ CO, CO₂ และ N₂ เป็นต้น) กับเกรเดียนต์ของสนามไฟฟ้าสถิต (F) ของสารดูดซับ

นอกเหนือจากแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นโดยตรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับ และของสารดูดซับแล้ว ยังมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับด้วยกันเองบนพื้นผิวของสารดูดซับ (self-interaction energy) พลังงานในส่วนนี้จะมิมีบทบาท และสำคัญเฉพาะเมื่อเกิดการดูดซับในปริมาณมากพอเท่านั้น โดยสรุปพลังงานศักย์ของแรงดึงดูดทั้งหมดที่ช่วยให้เกิดการดูดซับเป็นผลรวมของพลังงานดึงดูดในรูปแบบต่าง ๆ

พลังงานของการดึงดูดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดได้กับสารที่มีขั้วและไม่มีขั้วนั้นอาจพิจารณาว่าทำให้เกิดการดูดซับแบบไม่เฉพาะเจาะจง (non-specific adsorption) ในขณะที่การดูดซับแบบเจาะจง (specific adsorption) จะเกิดขึ้นในกรณีที่มีแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ซึ่งเกิดเฉพาะกับสารดูดซับที่มีขั้วเท่านั้น ทำให้เกิดพลังงานดึงดูดแบบ Kiselev และคณะ ได้จับคู่ลักษณะของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับเพื่อบ่งบอกถึงลักษณะการดูดซับว่าเป็นแบบเจาะจง หรือไม่เจาะจง หรือทั้งสองอย่าง ดังแสดงสรุปไว้ใน ตารางที่ 3.2 และตารางที่ 3.3 โดยแบ่งลักษณะของสารดูดซับเป็น 3 ประเภท ดังนี้

ไม่มีอีออน หรือประจุ หรือมีกลุ่มที่ไม่แสดงขั้ว เช่น แกรไฟต์

สารที่แสดงประจุบวกอย่างหนาแน่น ตัวอย่างเช่นสารที่มีหมู่ OH บนสารประกอบ hydroxylated oxide

สารที่มีประจุอย่างหนาแน่น เช่น มีหมู่ = O หรือ = CO

และแบ่งสารถูกดูดซับเป็น 4 ประเภทดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงลักษณะของพันธะแบบซิกมา (σ – bonds) ตัวอย่างเช่น แก๊สมีสกุล (noble gases) หรือแก๊สเฉื่อย (inert gases) และไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbons)

แสดงลักษณะของพันธะแบบพาย (π – bonds) เช่น สารแอโรแมติก สารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว หรือพวกที่แสดงอิเล็กตรอนแบบคูโดดเดี่ยว (lone pair electron) เช่น อีเธอร์ (ethers) หรืออามีน (amines) เป็นต้น

แสดงประจวบบริเวณด้านนอกของโมเลกุล

มีหมู่ฟังก์ชันซึ่งมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และแสดงประจวบ เช่น โมเลกุลที่มีหมู่ $-OH$ หรือ $-b$ เป็นต้น

ตารางที่ 3.2 สมบัติทางไฟฟ้าสถิตของโมเลกุลของแก๊สชนิดต่าง ๆ

Molecule	Polarizability, $\alpha \times 10^{40}, C^2 - m^2 / J$	Dipole moment, $\mu \times 10^{30}, C - m$	Quadrupole moment, $\alpha \times 10^{40}, C^2 - m^2 / J$
Ar	1.83	0.00	0.00
H ₂	0.90	0.00	2.09
N ₂	0.78	0.00	-4.91
O ₂	1.77	0.00	-1.33
CO	2.19	0.37	-6.92
CO ₂	3.02	0.00	-13.71
CS ₂	9.41	0.00	12.73
N ₂ O	3.32	0.54	-12.02
NH ₃	2.67	5.10	-7.39
C ₂ H ₆	4.97	0.00	-3.32
C ₆ H ₆	11.49	0.00	-30.7
HCl	2.94	3.57	13.28

หมายเหตุ : C = coulomb, m = meter, J = joule

ตารางที่ 3.3 การจำแนกลักษณะการดูดซับแบบเจาะจง และแบบไม่เจาะจง (n = ดูดซับแบบไม่เจาะจง, s = ดูดซับแบบเจาะจง)

ประเภทของสารถูกดูดซับ	ประเภทของสารดูดซับ		
	แบบ I	แบบ II	แบบ III
(a)	n	n	n
(b)	n+s	n+s	n+s
(c)	n+s	n+s	n+s
(d)	n+s	n+s	n+s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ชนิดของสารดูดซับ และการประยุกต์ใช้งาน

เพื่อให้สามารถดูดซับสารได้ในปริมาณมาก สารดูดซับที่นำมาใช้งานจำเป็นต้องมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูง กล่าวคือต้องเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง และประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับนอกจากจะขึ้นกับโครงสร้างของรูพรุน ได้แก่ ขนาดและการกระจายขนาดของรูพรุนแล้ว ยังขึ้นกับเคมีพื้นผิวของสารดูดซับอีกด้วย ซึ่งรวมถึงสมบัติความเป็นขั้วและหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ (surface functionality) ที่ปรากฏบนพื้นผิว สารดูดซับที่ใช้ประโยชน์ในงานด้านต่าง ๆ สามารถแบ่งตามคุณลักษณะได้ดังนี้

1. แบ่งตามความเป็นระเบียบของลักษณะโครงสร้าง (structural nature) ได้แก่
 - สารดูดซับอสัณฐาน (amorphous adsorbents)
 - สารดูดซับโครงสร้างผลึก (crystalline adsorbents)
2. แบ่งตามช่วงการกระจายขนาดของรูพรุนภายใน (pore size distribution) ได้แก่
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2 nm)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (2-50 nm)
 - สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (มากกว่า 50 nm)
3. แบ่งตามความเป็นขั้วของพื้นผิว (surface polarity) ได้แก่
 - สารดูดซับที่แสดงความเป็นขั้ว
 - สารดูดซับที่ไม่มีขั้ว
4. แบ่งตามองค์ประกอบทางเคมีของสารดูดซับ (chemical compositions) เช่น สารดูดซับที่มีองค์ประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต ได้แก่ ซีโอไลต์ และแร่ดิน (clay adsorbents) พวกที่มีองค์ประกอบของแกรไฟต์ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ และคาร์บอนโมเลกุลาสีฟ หรือสารดูดซับเรซินที่มีองค์ประกอบของพอลิเมอร์ เป็นต้น

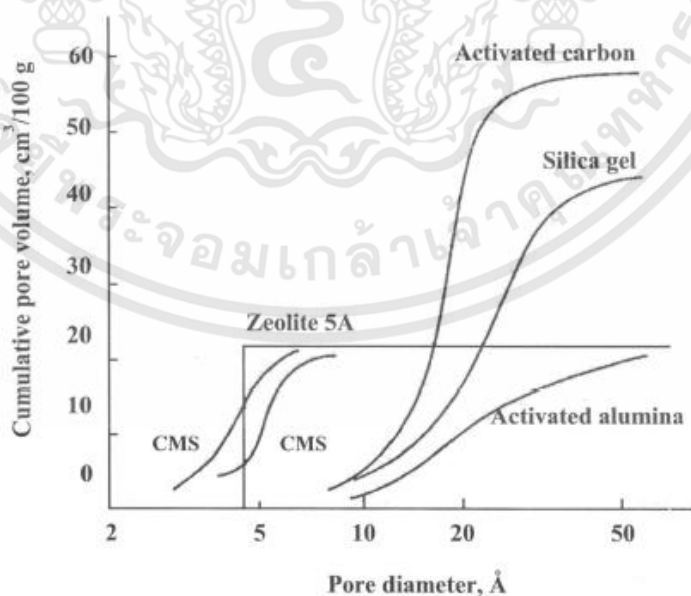
ชนิดของสารดูดซับที่มีความสำคัญ แสดงใน ตารางที่ 3.4 และถูกนำไปใช้งานในด้านต่าง ๆ โดยจำแนกตามลักษณะโครงสร้าง ขนาดของรูพรุน และความมีขั้วของพื้นผิวดูดซับ ได้แก่ ซีโอไลต์ (zeolite) ซิลิกาไลต์ (silicalite) ซิลิกาเจล (silica gel) อะลูมินากัมมันต์ (activated alumina) ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) และคาร์บอนโมเลกุลาสีฟ (carbon molecular sieve, CMS) ส่วนตารางที่ 3.5 แสดงสมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับที่มีโครงสร้างอสัณฐาน และโครงสร้างผลึก ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างข้อมูลการกระจายขนาดรูพรุนของสารดูดซับประเภทต่าง ๆ ในรูปของปริมาตรสะสมและปริมาตรในแต่ละช่วงขนาดตามลำดับ

ตารางที่ 3.4 การจำแนกประเภทของสารดูดซับ

Surface polarity	Pore size distribution		Structural nature
	Narrow	Broad	
Polar	¹ Zeolite (A1 rich)	^{1,2} Activated alumina ² Silica gel	1 = crystalline structure 2 = amorphous structure
Nonpolar	¹ Silicalite (Si rich) ² Carbon molecular sieve (CMS)	² Activated carbon	structure

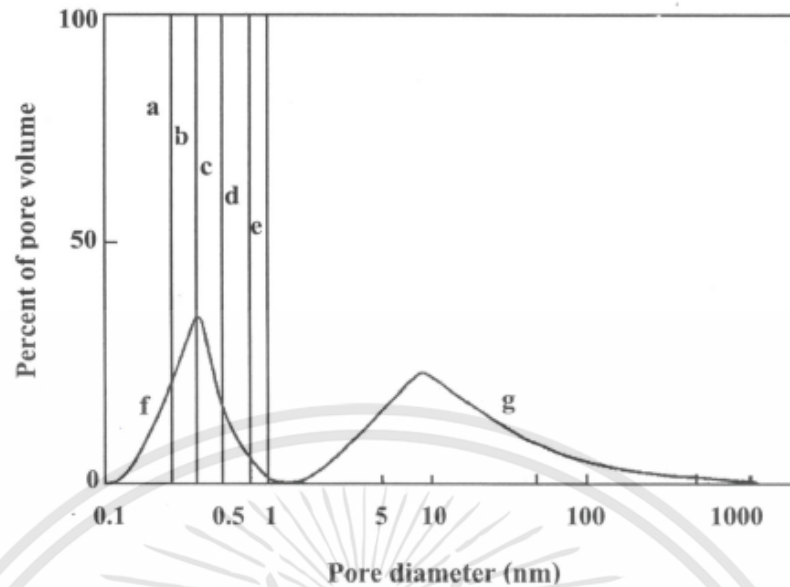
ตารางที่ 3.5 สมบัติเบื้องต้นของสารดูดซับประเภทต่าง ๆ

Adsorbent	Pore diameter (nm)	Particle density (g/cm ³)	Specific area (m ² /g)
Activated carbon (large pore)	1-10 ³ (broad range)	0.6-0.8	200-600
Activated carbon (small pore)	1-10	0.5-0.9	400-1200
Carbon molecular sieve	0.4-0.5, 10-10 ² (bimodal)	0.9-1.0	100-300
Silica gel (high area)	2-10	1.09	800
Silica gel (low area)	10-50	0.62	300
Activated alumina	2-10	1.2-1.3	300-400
Zeolite	0.3-1.1	1.92-2.8	400-800



รูปที่ 3.6 การกระจายขนาดรูพรุนของสารดูดซับประเภทต่าง ๆ โดยแสดงเป็นปริมาตรสะสมเปรียบเทียบขนาดรูพรุน

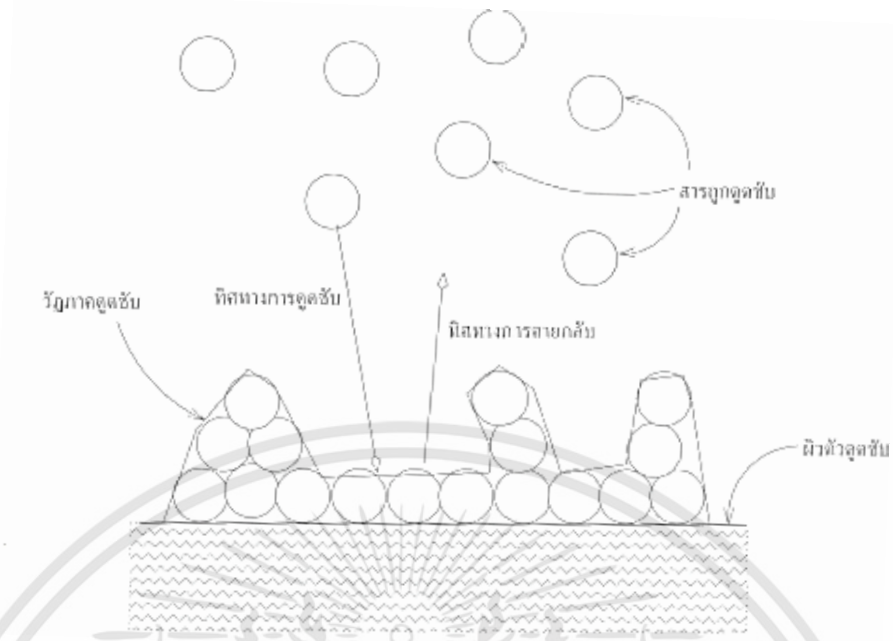
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการกระจายขนาดรูพรุนของสารดูดซับ แสดงเป็นร้อยละของปริมาตรรูพรุนเทียบกับช่วงขนาดรูพรุน (Yang) : (a) zeolite type 3A, (b) 4A, (c) 5A, (d) 10X, (e) 13X, (f) carbon molecular sieve, (g) activated carbon

3.6 สมดุลในการดูดซับ

เมื่อการดูดซับเกิดขึ้น วัฏภาคดูดซับ (adsorbed phase) เกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 สารถูกดูดซับที่อยู่วัฏภาคของไหล (fluid phase) ซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซ หรือของเหลวสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และจะถ่ายโอนไปยังวัฏภาคดูดซับ ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ เช่น อุณหภูมิที่กำหนดให้คงที่ เป็นต้น เมื่ออัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังวัฏภาคดูดซับเท่ากับอัตราการถ่ายโอนสารถูกดูดซับจากวัฏภาคดูดซับไปยังวัฏภาคของไหล นั่นคือ อัตราการดูดซับสุทธิเป็นศูนย์ แม้ว่าสารถูกดูดซับยังคงถ่ายโอนระหว่างวัฏภาคของไหลกับวัฏภาคดูดซับ แต่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในวัฏภาคของไหลและปริมาณดูดซับจำเพาะในวัฏภาคดูดซับไม่เปลี่ยนแปลงอีก ณ สภาวะที่ควบคุมไว้ ดังนั้น การดูดซับสารถูกดูดซับดังกล่าวจึงเข้าสู่สมดุล (equilibrium) ของการถ่ายโอนมวลสารถูกดูดซับระหว่างวัฏภาคทั้งสองแล้ว สมดุลดูดซับ (adsorption equilibrium) เป็นปัจจัยสำคัญต่อการแยกของผสมเนื้อเดียว (homogeneous mixture) สมดุลดูดซับไม่เพียงแยกสารถูกดูดซับออกจากของผสมเนื้อเดียว สมดุลดูดซับยังมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับอีกด้วย



รูปที่ 3.8 การจำลองวัฏภาคดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น

สมมูลดูดซับแปรตามชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของสารถูกดูดซับ ความเข้มข้นหรือความดันของสารถูกดูดซับ และอุณหภูมิของระบบดูดซับ สมมูลดูดซับจำเพาะของสารถูกดูดซับชนิดใด ๆ ด้วยตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่กำหนดไว้ จึงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมมูลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับที่เลือกไว้ ความเข้มข้นสมมูล ของสารถูกดูดซับชนิดนั้น หรือความดันสมมูล ของสารถูกดูดซับชนิดนั้น และอุณหภูมิสมมูล ของระบบดูดซับนั้น แบบจำลองสมมูลการดูดซับ จึงจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ตามชนิดตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่ ดังนี้

แบบจำลองสมมูลดูดซับอุณหภูมิคงที่ (adsorption isotherm) เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมมูลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ของตัวดูดซับที่กำหนด กับความดันสมมูล ของก๊าซหรือไอของสารถูกดูดซับนั้น หรือความเข้มข้นสมมูล ของสารถูกดูดซับในของเหลวผสม ณ อุณหภูมิของระบบดูดซับที่กำหนดไว้

แบบจำลองสมมูลดูดซับความดันคงที่ (adsorption isobar) หรือประเภทความเข้มข้นคงที่ เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมมูลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ของตัวดูดซับที่กำหนดไว้ กับอุณหภูมิสมมูล ของระบบดูดซับ ณ ความดันสมมูล ของก๊าซหรือไอของสารถูกดูดซับที่กำหนด หรือความเข้มข้นสมมูล ของสารถูกดูดซับในของเหลวผสมที่กำหนดไว้

แบบจำลองสมมูลดูดซับปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะคงที่ (adsorption isostere) เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสมมูล ของก๊าซหรือไอของสารถูกดูดซับ หรือความเข้มข้นของสมมูล ของสารถูกดูดซับจำเพาะ ของตัวดูดซับที่กำหนดไว้

แม้ว่าการดูดซับเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน ความร้อนของการดูดซับทั่วไปมักมีค่าน้อยกว่า ความร้อนของปฏิกิริยาเคมีมาก และสามารถระบายออกจากระบบดูดซับได้โดยง่าย อุณหภูมิของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการดูดซับจึงเปลี่ยนแปลงน้อย จึงนิยมวัดสมมูลดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ที่กำหนดไว้ นั่นคือ สมมูลดูดซับสารถูกดูดซับชนิดใดชนิดหนึ่งของตัวดูดซับที่เลือกไว้ ควรวัด ณ อุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิ ดำเนินการปกติของหน่วยดูดซับนั้น ๆ นอกจากนี้สมมูลดูดซับของระบบดูดซับก๊าซหรือไอน้ำก็มี ลักษณะแตกต่างจากสมมูลดูดซับของระบบดูดซับของเหลว แบบจำลองสมมูลการดูดซับจึงจำแนก ตามระบบดูดซับดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.6.1 กฎของเฮนรี (Henry's Law)

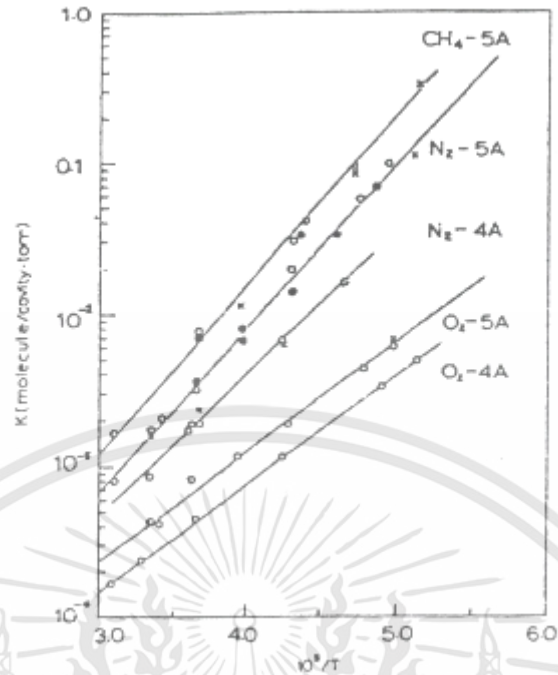
ชั้นในการดูดซับที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุดูดซับ สามารถพิจารณาให้เป็นอีกเฟสหนึ่ง (Distinct Phase) ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเกิดสมดุลกับก๊าซที่เป็นสิ่งแวดล้อม และอธิบายได้โดยกฎของ เทอร์โมไดนามิกส์ โดยกาดูดซับทางฟิสิกส์ จะเป็นกระบวนการคายความร้อน ดังนั้น จะเกิดการดูดซับ ที่อุณหภูมิต่ำและเกิดการคลายการดูดซับที่อุณหภูมิสูง ที่ความเข้มข้นต่ำความสัมพันธ์ระหว่างความ เข้มข้นในวัสดุดูดซับกับความเข้มข้นในก๊าซเฟสสามารถอธิบายได้โดยกฎของเฮนรี ดังสมการที่ 3.1

$$q = K'p = Kc \quad (3.1)$$

โดย K' และ K คือค่าคงที่ของเฮนรี ซึ่งอาจเรียได้ว่าค่าคงที่สมดุลในการดูดซับ โดยที่ ความสัมพันธ์ของค่าคงที่เฮนรีกับอุณหภูมิสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของ แวนฮอฟฟ์ (Vann Hoff) ดังสมการที่ 3.2

$$K' = K'_0 e^{-\Delta H/RT}; \quad K = K'_0 e^{-\Delta H/RT} \quad (3.2)$$

โดย $\Delta H = \Delta U + RT$ คือ เอนทาลปีที่เปลี่ยนแปลงไปในการดูดซับ สำหรับ กระบวนการคายความร้อนค่า ΔH และ ΔU จะมีค่าเป็นลบ ดังนั้นค่าคงที่เฮนรีจะลดลงเมื่อเพิ่ม อุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



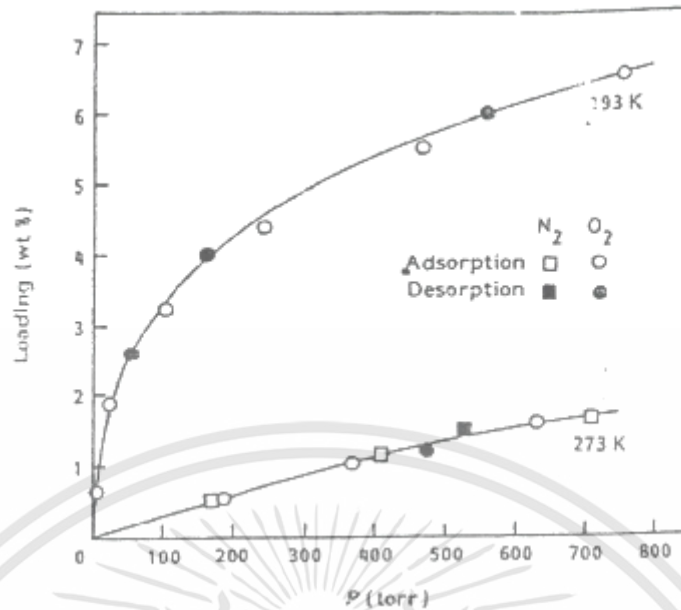
รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของเฮนรีกับอุณหภูมิ สำหรับ ออกซิเจน ไนโตรเจน และ มีเทน บนสารซีโอไลต์ 5A

3.6.2 แลงเมียร์ไอโซเทอม (Langmuir Isotherm)

สำหรับวัสดุดูดซับแบบไมโครพอร์ (Micropore) ไอโซเทอมในการดูดซับ สามารถประมาณได้ โดยสมการของแลงเมียร์ ดังสมการที่ 3.3

$$\frac{q}{q_s} = \frac{bc}{1+bc} \quad (3.3)$$

จากสมการที่ 3.3 เห็นว่าได้ที่ความเข้มข้นต่ำ สมการจะสามารถลดรูปไปเป็นกฎของเฮนรี โดยค่า b จะมีความสัมพันธ์กับค่าคงที่ของเฮนรี ตามสมการ $K = q_s b$ โดยที่ b จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า b จะลดลง และทำให้เส้นไอโซเทอมมีความเป็นเส้นตรงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ข้อมูลการสมดุลของออกซิเจนและไนโตรเจนบนคาร์บอน เมลิกูลาร์

แต่อย่างไรก็ตามมีระบบเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เป็นไปตามไอโซเทอมของแลงเมียร์ ซึ่งส่วนใหญ่จะสามารถพอประมาณค่าได้เท่านั้น แต่ข้อดีของไอโซเทอมของแลงเมียร์ คือ สามารถลดรูปเป็นกฎของเฮนรีได้ที่ความเข้มข้นต่ำ ทำให้ไอโซเทอมของแลงเมียร์เป็นที่ยอมรับในการทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน

3.6.3 ฟรุนดลิชและแลงเมียร์-ฟรุนดลิชไอโซเทอม (Freundlich - Langmuir Isotherm)

นอกจากไอโซเทอมของแลงเมียร์ บางครั้งอาจจะใช้ไอโซเทอมของฟรุนดลิช ดังสมการที่ 3.4

$$q = bc^{1/n}, \quad n > 1.0 \quad (3.4)$$

ฟรุนดลิชไอโซเทอมเป็นสมการที่ได้จากการทดลองและไม่สามารถลดรูปเป็นกฎของเฮนรี แต่ฟรุนดลิชไอโซเทอมสามารถให้ความถูกต้องกับระบบส่วนใหญ่มากกว่าแลงเมียร์ไอโซเทอม ซึ่งอาจนำฟรุนดลิชไอโซเทอมมาผนวกกับแลงเมียร์ไอโซเทอมเพื่อเพิ่มความถูกต้องของแลงเมียร์ไอโซเทอม ดังสมการที่ 3.5

$$\frac{q_A}{q_s} = \frac{bc^{1/n}}{1+bc^{1/n}} \quad (3.5)$$

3.6.4 ไอโซเทอมของระบบสององค์ประกอบและหลายองค์ประกอบ

สมการที่ 2-3 เป็นไอโซเทอมของแลงเมียร์ชนิดองค์ประกอบเดียว แต่ในระบบการแยกสาร ส่วนใหญ่จะมีสารสองสปีชีส์หรือมากกว่านั้น ดังนั้น เพื่อความถูกต้องจึงต้องใช้ไอโซเทอมของระบบสององค์ประกอบและหลายองค์ประกอบดังสมการ 3.6

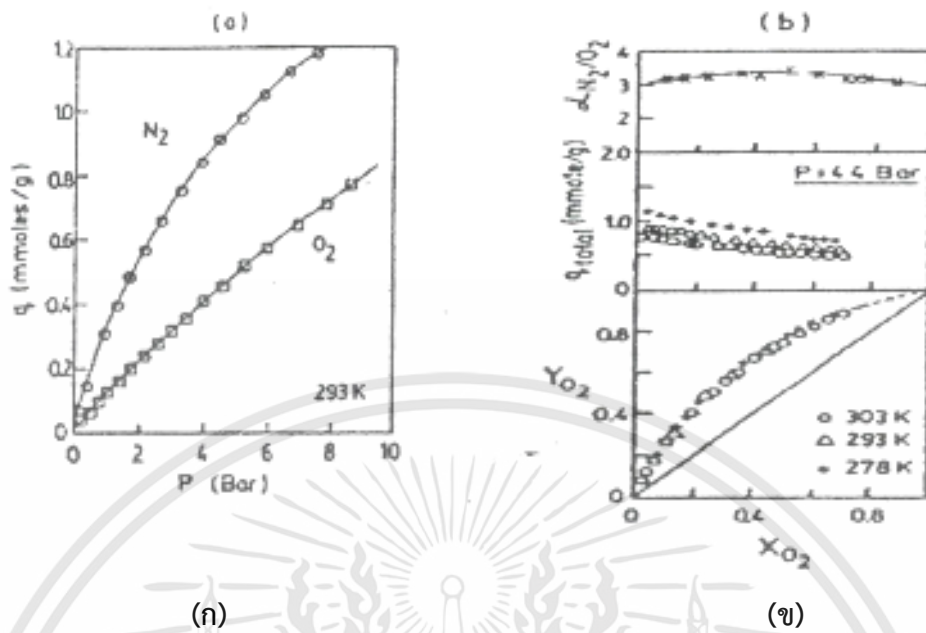
$$\frac{q_A}{q_s} = \frac{b_A P_A}{1 + b_A P_A + b_B P_B + \dots} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ (ซึ่งแปรผันโดยตรงกับ b) และความดันย่อยเดียวกัน ปริมาณสารที่ถูกดูดซับจะน้อยกว่าไอโซเทอมแบบองค์ประกอบเดียว เนื่องจากตัวส่วนในสมการ 1.6 ($1 + b_A P_A + b_B P_B + \dots$) มีค่ามากกว่าตัวส่วนในไอโซเทอมแบบองค์ประกอบเดียว ($1 + b_A P_A$) และเช่นเดียวกับไอโซเทอมแบบองค์ประกอบเดียว ไอโซเทอมของระบบหลายองค์ประกอบถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในงานวิจัยต่าง ๆ แต่มีไม่กี่ระบบเท่านั้นที่ไอโซเทอมของระบบหลายองค์ประกอบจะสามารถให้ค่าได้ถูกต้องแม่นยำ แต่หากระบบดำเนินการที่สภาวะภาระของวัสดุดูดซับต่ำ $\frac{q}{q_s} < 0.5$ ไอโซเทอมนี้จะให้ความถูกต้องในระดับหนึ่งจากสมการที่ 1.6 สามารถนิยามอัตราส่วนการแยกจากสัดส่วนของค่าคงที่สมดุลดังสมการ 3.7

$$\alpha = \left(\frac{x_A}{y_A} \right) \left(\frac{1 - y_A}{1 - x_A} \right) = \frac{b_A}{b_B} \quad (3.7)$$

เห็นว่าได้ค่าสัดส่วนการแยกจะไม่ขึ้นกับองค์ประกอบของสาร แต่จะขึ้นกับชนิดของสารเท่านั้น เพราะฉะนั้นค่าสัดส่วนการแยกจะเป็นค่าคงที่ของระบบหนึ่ง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งแสดงข้อมูลสมดุลของ และระบบสององค์ประกอบ N_2, O_2 และระบบสององค์ประกอบ N_2, O_2 บนวัสดุดูดซับซีโอไลต์ 5A จะเห็นว่าค่าสัดส่วนการแยกมีค่าค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับภาระ (Load) ของวัสดุดูดซับ เมื่อแลงเมียร์ไอโซเทอมไม่สามารถทำนายผลได้อย่างถูกต้อง สามารถใช้แลงเมียร์ฟรอนตลิกซ์ หรือเรียกว่า สมการของชิปปี้ (Sipp) ดังสมการที่ 3.8 ได้ แต่ข้อเสีย คือต้องการการทดลองเพื่อนำมาหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ

$$\frac{q_A}{q_s} = \frac{b_A P_A^{1/n_A}}{1 + b_A P_A^{1/n_A} + b_B P_B^{1/n_B} + \dots} \quad (3.8)$$



รูปที่ 3.11 ข้อมูลสมดุลของออกซิเจนและไนโตรเจนบนซีโอไลต์ 5A (ก)ระบบแบบองค์ประกอบเดียว และ (ข)ระบบแบบสององค์ประกอบ และค่าสัดส่วนการแยก (Douglas และคณะ, 1994)

3.7 จลนศาสตร์ของการดูดซับ

ตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม มีลักษณะคล้ายทรงกลมหรือทรงกระบอกที่มีความยาวประมาณ 5-10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง ตัวดูดซับบรรจุไว้ในหน่วยดูดซับรูปทรงกระบอกตั้งที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 10 เท่าของขนาดเฉลี่ยของตัวดูดซับ ดังนั้น การดูดซับสารถูกดูดซับชนิดหนึ่งจึงต้องประกอบด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบ ๆ ตัวดูดซับ และการแพร่ในโพรงตัวดูดซับไปยังพื้นผิวตัวดูดซับหรือวัฏจักรภาคดูดซับตามลำดับ ขั้นตอนการแพร่ขั้นตอนใดที่เกิดขึ้นช้าที่สุด ขั้นตอนการแพร่นั้นจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับของระบบดูดซับนั้น ๆ

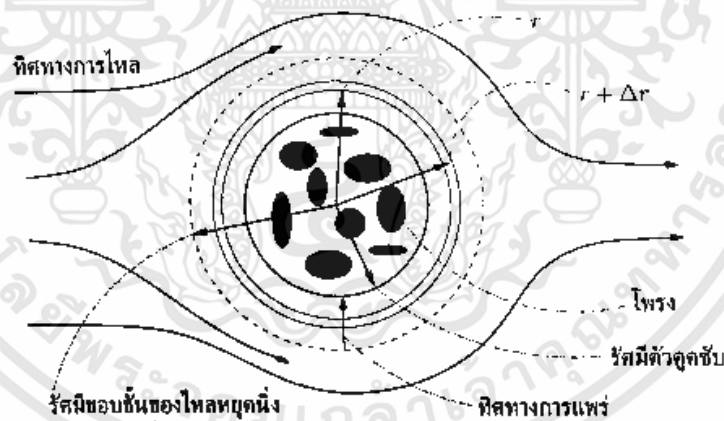
นอกจากลักษณะสมดุลดูดซับแล้ว อัตราการดูดซับยังมีผลต่อการกระจายตัวของสารถูกดูดซับแล้ว อัตราการดูดซับยังมีผลต่อการกระจายตัวของสารดูดซับภายในหน่วยดูดซับชนิดตัวดูดซับอยู่นิ่ง และขนาดของหน่วยดูดซับ นั่นคือ เมื่อตัวดูดซับดูดสารถูกดูดซับได้ช้าลง สารถูกดูดซับจะกระจายตัวตามทิศทางการเคลื่อนที่ของ ของไหลทั่วหน่วยดูดซับได้เร็วมากขึ้น และหน่วยดูดซับต้องมีขนาดใหญ่มากขึ้นหรือต้องใช้ตัวดูดซับปริมาณมากขึ้นเพื่อให้มีคาบการดูดซับเพียงพอ ซึ่งอาจนานกว่าที่กำหนดไว้

3.7.1 การแพร่ผ่านชั้นรอบตัวดูดซับ

ในหลังของการถ่ายโอนโมเมนตัม ของไหลที่อยู่รอบตัวดูดซับที่หยุดนิ่งจะเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ จึงเกิดขึ้นของไหลบาง ๆ ล้อมรอบตัวดูดซับ ชั้นของไหลนี้เป็นอุปสรรคต่อการดูดซับ นอกจากนี้ความหนาของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับแปรผกผันกับอัตราการเคลื่อนที่ของของไหล นั่นคือ เมื่อของไหลเคลื่อนที่เร็วมากขึ้น ความหนาของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับจะลดบางลง ของไหลในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับนี้เคลื่อนที่ช้ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการเคลื่อนที่เฉลี่ยของของไหลนั้น ๆ จึงมักพิจารณาให้เสมือนหยุดนิ่ง โมเลกุลของสารถูกดูดซับจึงแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับเข้าสู่โพรงของตัวดูดซับ โดยปราศจากอิทธิพลการพาด้วยของไหลดังกล่าว การแพร่ของสารถูกดูดซับจึงเกิดขึ้นจากผลต่างของความเข้มข้นของสารถูกดูดซับตามกฎการแพร่ของฟิค (Fick's law of diffusion) เพียงอย่างเดียว

3.7.2 การแพร่ผ่านชั้นรอบตัวดูดซับทรงกลม

พิจารณาตัวดูดซับทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p ชั้นของไหลรอบตัวดูดซับหยุดนิ่งมีความหนา δ จากพื้นผิวด้านนอกของตัวดูดซับ สารถูกดูดซับแพร่ผ่านเข้าสู่หรือแพร่ออกจากชั้นของไหลรอบตัวดูดซับในทิศตั้งฉากกับพื้นผิวของตัวดูดซับ หรือในแนวรัศมีของตัวดูดซับ ($r > \frac{d_p}{2}$) ดังแสดงในรูปที่ 3.12 พื้นที่ของการถ่ายโอนมวลของสารถูกดูดซับ



รูปที่ 3.12 ภาพจำลองการแพร่ของสารถูกดูดซับผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับไปสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับชนิดทรงกลม

ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับเข้าสู่โพรงของตัวดูดซับ เท่ากับ $4\pi r^2$ พื้นที่ถ่ายโอนมวลของตัวดูดซับทรงกลมจึงแปรตามระยะห่างจากพื้นผิวของตัวดูดซับ อัตราการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ของการถ่ายโอนมวลผ่านชั้นของไหลหยุดนิ่งรอบตัวดูดซับทรงกลมไปยังโพรงในตัวดูดซับ จึงเปลี่ยนแปลงตามระยะทางของการแพร่ หรือระยะห่างจากผิวหน้าของตัวดูดซับนั่นเอง ในขณะที่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับอาจเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสาร

ถูกดูดซับในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับจึงสัมพันธ์กับอัตราการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ (J_r) และระยะห่างจากพื้นผิววนอกของตัวดูดซับ ($r > \frac{d_p}{2}$) ตามกฎอนุรักษ์มวลของสารถูกดูดซับในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับดังนี้

$$4\pi r^2 \Delta r (C|_{t+\Delta t} - C|_t) = 4\pi r^2 J_r \Delta t - 4\pi (r + \Delta r)^2 J_{r+\Delta r} \Delta t$$

$$\left(\frac{C|_{t+\Delta t} - C|_t}{\Delta t} \right) = - \left(\frac{(r+\Delta r)^2 J_{r+\Delta r} - r^2 J_r}{r^2 \Delta r} \right)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 J_r)}{\partial r} \quad (3.9)$$

อัตราการแพร่ของสารถูกดูดซับต่อหน่วยพื้นที่การแพร่ในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับในแนวรัศมีของตัวดูดซับทรงกลม (J_r) แปรตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับ (กฎการแพร่ของฟิก) ดังนี้

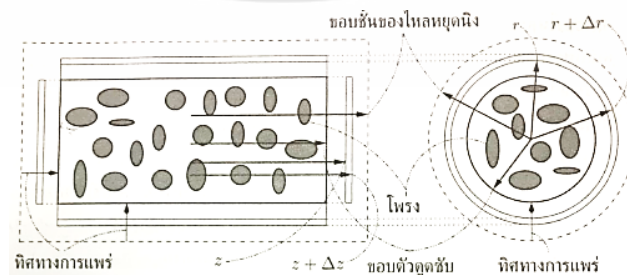
$$J_r = -D_{am} \frac{\partial C}{\partial r} \quad (3.10)$$

อัตราการแพร่ผ่านชั้นของไหลหุดยุติงรอบตัวดูดซับที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p ณ บริเวณผิววนอกของตัวดูดซับทรงกลมคือ

$$W_{fm} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{d_p^2 \sin \theta J_r|_{r=d_p/2}}{4} d\theta d\phi \quad (3.11)$$

เมื่ออัตราการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ผ่านชั้นของไหลรอบ ๆ ผิววนอกตัวดูดซับทรงกลมกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งพื้นผิววนอกของตัวดูดซับ อัตราการแพร่ผ่านชั้นของไหลหุดยุติงรอบตัวดูดซับทรงกลมในสมการ 3.11 จึงมีผลลัพธ์เป็น

$$W_{fm} = \pi d_p^2 J_r|_{r=d_p/2} \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.13 ภาพจำลองการแพร่ของสารถูกดูดซับผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับไปสู่ผิววนอกของตัวดูดซับชนิดทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 การแพร่ผ่านชั้นรอบตัวดูดซับทรงกระบอก

พิจารณาตัวดูดซับทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p และมีความยาว kd_p โดยทั่วไปเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับมักสั้นกว่าความยาวของตัวดูดซับ ($k > 1$) ชั้นของไหลรอบตัวดูดซับมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกที่มีแกนทรงกระบอกและมีจุดศูนย์กลางมวลร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 สารถูกดูดซับจะแพร่ผ่านชั้นของไหลหุดยุคหนึ่งไปยังโพรงของตัวดูดซับในทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวนอกของตัวดูดซับ การแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับจึงเกิดได้ทั้งในแนวรัศมี ($r > d_p/2$) และในแนวแกน ($z = kd_p/2$) ของตัวดูดซับ พื้นที่ของการแพร่สารถูกดูดซับในแนวรัศมีของตัวดูดซับคือ $2k\pi r^2$ ส่วนพื้นที่ของการแพร่สารถูกดูดซับในแนวแกนของตัวดูดซับ คือ πr^2 อัตราการแพร่ผ่านชั้นของไหลหุดยุคหนึ่งต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งจำแนกเป็นอัตราการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ในแนวรัศมีของตัวดูดซับ (J_r) และอัตราการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ในแนวแกนของตัวดูดซับ (J_z) ตามลำดับ

การแพร่ผ่านชั้นของไหลหุดยุคหนึ่งในแนวรัศมีของตัวดูดซับทรงกระบอก คือ การแพร่ผ่านผิวด้านข้างของตัวดูดซับที่มีพื้นที่การแพร่เท่ากับ $2\pi rkd_p$ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในชั้นของไหลบริเวณด้านข้างของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราการแพร่ผ่านชั้นของไหลดังกล่าวดังนี้

$$(2\pi rkd_p \Delta r)(C|_{t+\Delta t} - C|_t) = (2\pi rkd_p \Delta t)(rJ_r - (r + \Delta r)J_{r+\Delta r})$$

$$\frac{C|_{t+\Delta t} - C|_t}{\Delta t} = -\frac{1}{r} \left(\frac{(r + \Delta r)J_{r+\Delta r} - rJ_r}{\Delta r} \right)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial rJ_r}{\partial r} \quad (3.13)$$

อัตราการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ในแนวรัศมี (J_r) ของตัวดูดซับทรงกระบอกจึงสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในแนวรัศมีดังนี้

$$(J_r) = -\mathcal{D}_{am} \frac{\partial C}{\partial r} \quad (3.14)$$

ส่วนการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับในแนวแกนของตัวดูดซับทรงกระบอก คือ การแพร่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของแกนตัวดูดซับ ซึ่งเป็นรูปวงกลม มี 2 ด้าน และพื้นที่การแพร่ คือ $2\pi d_p^2/4$ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในชั้นของไหลบริเวณด้านหน้าและด้านหลังของตัวดูดซับจึงมีอิทธิพลต่ออัตราการแพร่ผ่านชั้นของไหลในแนวแกนของตัวดูดซับทรงกระบอกดังกล่าวดังนี้

$$\left(\frac{2\pi d_p^2 \Delta z}{4} \right) (C|_{t+\Delta t} - C|_t) = \left(\frac{2\pi d_p^2 \Delta z}{4} \right) (J_z + J_{z+\Delta z})$$

$$\frac{(C|_{t+\Delta t} - C|_t)}{\Delta t} = -\frac{J_{z+\Delta z} - J_z}{\Delta z}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial J_z}{\partial z} \quad (3.15)$$

อัตราการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ในแนวแกน (J_z) ของตัวดูดซับทรงกระบอกจึงสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในแนวแกนดังนี้

$$(J_z) = -\vartheta_{am} \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.16)$$

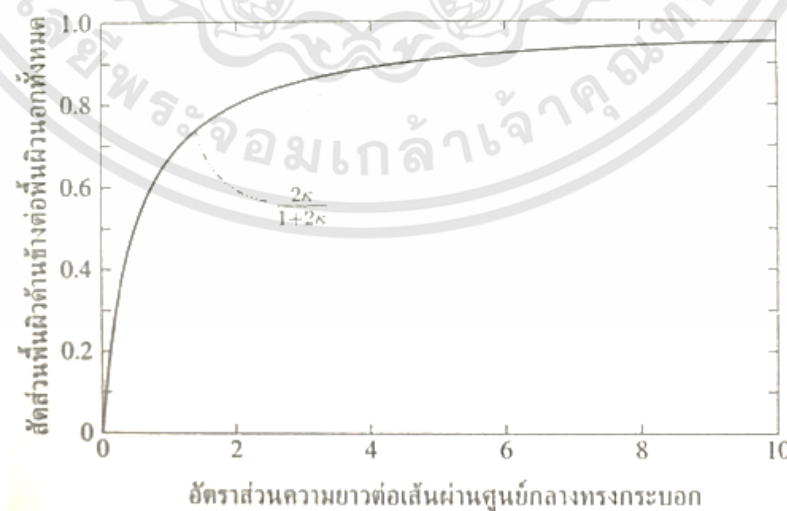
อัตราการแพร่ผ่านชั้นของไหลหยุดนิ่งรอบตัวดูดซับทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p และมีความยาว kd_p เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับ เป็นผลรวมของอัตราการแพร่ในแนวรัศมี และแนวแกนดังนี้

$$W_{fm} = \int_{-kd_p/2}^{kd_p/2} \int_0^{2\pi} \frac{d_p J_r |_{r=d_p/2}}{2} d\theta dz + 2 \int_0^{2\pi} \int_0^{d_p/2} r J_z |_{z=kd_p/2} dr d\theta \quad (3.17)$$

เมื่ออัตราการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ทั้งในแนวรัศมีและแนวแกนของตัวดูดซับ ณ ผิววนอกของตัวดูดซับกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวทรงกระบอกของตัวดูดซับ อัตราการแพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับในสมการ 4.9 จึงมีผลลัพธ์เป็น

$$W_{fm} = \pi d_p^2 \left(k J_r |_{r=d_p/2} + \frac{1}{2} J_z |_{z=kd_p/2} \right) \quad (3.18)$$

เมื่อตัวดูดซับทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p และมีความยาว kd_p พื้นผิวด้านข้างของตัวดูดซับ ($k\pi d_p^2$) มีขนาดเป็น $2k$ เท่าของพื้นที่รวมด้านหน้าและด้านหลัง (พื้นที่วงกลมของตัวดูดซับ $\pi d_p^2/2$ ในอีกนัยหนึ่งอัตราส่วนพื้นผิวด้านข้างของตัวดูดซับต่อพื้นผิววนอกของตัวดูดซับทรงกระบอกทั้งหมด คือ $2k/(1+2k)$ ดังนั้น เมื่อตัวดูดซับทรงกระบอกมีความยาวมากกว่า 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง สัดส่วนพื้นผิวด้านข้างต่อพื้นผิววนอกทั้งหมดของตัวดูดซับมีค่ามากกว่า 0.8 ดังแสดงในรูปที่ 3.14 และสัดส่วนพื้นที่ผิวด้านข้างต่อพื้นผิว



รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ของสัดส่วนพื้นที่ผิวด้านข้างของตัวดูดซับทรงกระบอกต่อพื้นผิววนอกทั้งหมด

กับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกทั้งหมดของตัวดูดซับทรงกระบอกดังกล่าวเพิ่มขึ้นเป็นมากกว่า 0.9 เมื่อตัวดูดซับมีความยาวมากกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง อัตราการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับทรงกระบอกที่มีความยาวมากกว่า 4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางจึงเกิดขึ้นรอบผิวด้านข้างของตัวดูดซับมากกว่าร้อยละ 90 ของอัตราการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับทรงกระบอกทั้งหมด ดังนั้น อัตราการแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับเข้าสู่โพรงของตัวดูดซับจึงอาจประมาณให้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับทรงกระบอกในแนวรัศมีเท่านั้น สมการแบบจำลองการแพร่ของสารถูกดูดซับผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับทรงกระบอกจึงประกอบด้วยสมการ 3.13 และสมการ 3.14 เมื่ออัตราการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ในแนวรัศมีกระจายสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวด้านข้างของตัวดูดซับทรงกระบอก อัตราการแพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับในสมการ 3.18 จึงคำนวณประมาณได้จากอัตราการแพร่ในทิศทางรัศมีเพียงทิศทางเดียวเท่านั้นดังนี้

$$W_{fm} \cong \pi d_p^2 k J_r |_{r=d_p/2} \quad (3.19)$$

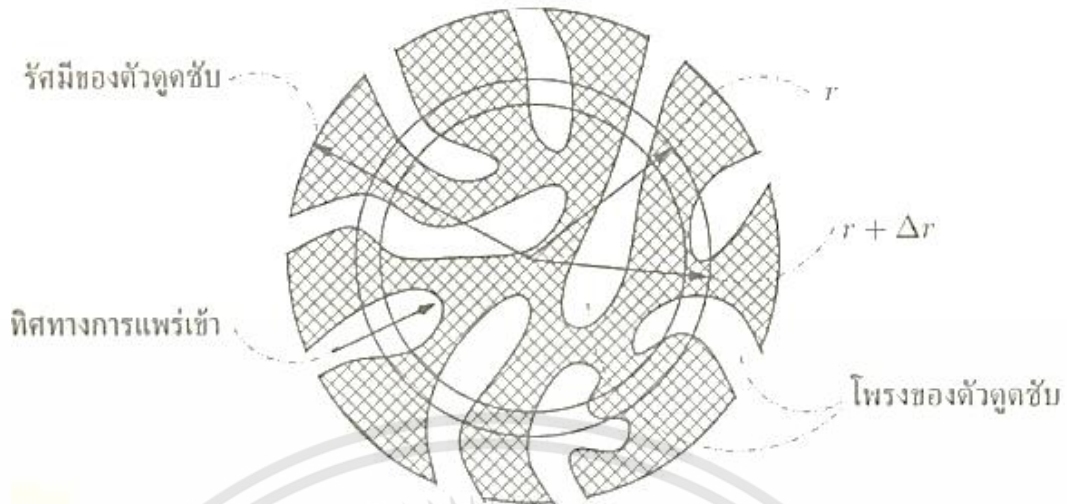
เนื่องจากวัฏจักรภาคดูดซับของระบบดูดซับของเหลว คือ ของเหลวที่อยู่ในโพรงของตัวดูดซับ ดังนั้น อัตราการแพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับจึงเท่ากับอัตราการดูดซับสารถูกดูดซับในระบบดูดซับของเหลว ดังกล่าว

3.7.4 การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับ

เมื่อสารถูกดูดซับแพร่ผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับถึงผิวนอกของตัวดูดซับ แม้ว่าสารถูกดูดซับอาจเกาะติดผิวนอกของตัวดูดซับซึ่งเป็นพื้นผิวดูดซับส่วนน้อยของตัวดูดซับ สารถูกดูดซับส่วนใหญ่จะแพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับและแพร่ไปยังพื้นผิวดูดซับ ส่วนใหญ่ที่อยู่ในโพรงของตัวดูดซับนั้น ในขณะที่สารถูกดูดซับแพร่ในโพรงของตัวดูดซับ สารถูกดูดซับบางส่วนยังคงแพร่เข้าสู่ส่วนลึกของโพรงต่อไป ดังนั้น การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับและการดูดซับสารถูกดูดซับจึงเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน แม้ว่าโพรงในตัวดูดซับจะมีขนาดแตกต่างกันและมีรูปร่างไม่แน่นอนทิศทางการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับมักพิจารณาให้สมนัยกับรูปร่างของตัวดูดซับดังต่อไปนี้

3.7.5 การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกลม

การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p และมีความพรุนเฉลี่ย ϵ_p มักพิจารณาให้เกิดขึ้นในแนวรัศมีของตัวดูดซับ $r < d_p/2$ เท่านั้น พื้นที่ของการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับซึ่งแปรตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวดูดซับ คือ $4\epsilon_p\pi r^2$ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ในขณะเดียวกันการดูดซับบนผิวในโพรงของตัวดูดซับมีผลให้ปริมาณดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนถึงปริมาณ



รูปที่ 3.15 ภาพตัดแสดงทิศทางการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกลมซึ่งเกิดขึ้นในแนวรัศมีของตัวดูดซับเท่านั้น

สมมติดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะในโพรงดังกล่าว อัตราการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกลมจะสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในโพรง ปริมาณดูดซับจำเพาะในโพรงดังกล่าว และระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของตัวดูดซับตามกฎอนุรักษ์มวลสารถูกดูดซับภายในโพรงของตัวดูดซับดังนี้

$$\begin{aligned}
 & 4\pi\rho_p r^2 \Delta r (q|_{t+\Delta t} - q|_t) + 4\pi\epsilon_p r^2 (C|_{t+\Delta t} - C|_t) \\
 & = 4\pi\epsilon_p r^2 J_{p0,r} \Delta t - 4\pi\epsilon_p (r + \Delta r)^2 J_{p0,r+\Delta r} \Delta t \\
 & \frac{\rho_p}{\epsilon_p} \left(\frac{q|_{t+\Delta t} - q|_t}{\Delta t} \right) + \left(\frac{C|_{t+\Delta t} - C|_t}{\Delta t} \right) = - \left(\frac{(r + \Delta r)^2 J_{p0,r+\Delta r} - r^2 J_{p0,r}}{r^2 \Delta r} \right) \\
 & \frac{\partial q}{\partial t} = - \frac{\epsilon_p}{\rho_p} \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\epsilon_p}{\rho_p r^2} \frac{\partial (r^2 J_{p0,r})}{\partial r} \quad (3.20)
 \end{aligned}$$

อัตราการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกลม ($J_{p0,r}$) สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในโพรงของตัวดูดซับตามแนวรัศมีของตัวดูดซับดังนี้

$$J_{p0,r} = -\vartheta_{p0} \frac{\partial C}{\partial r} \quad (3.21)$$

นั่นคือ อัตราการดูดซับ ($\partial q / \partial t$) แปรตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับภายในโพรง ณ ขณะใด ๆ ($\partial q / \partial t$) และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับตามความลึกของโพรงตาม

แนวรัศมีของตัวดูดซับ ($\partial C/\partial r$) สัมประสิทธิ์การแพร่ในโพรงของสารดูดซับ (ϑ_{po}) คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\vartheta_{po} = \frac{d_{po}}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi\omega}} \quad (3.22)$$

3.7.6 การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกระบอก

การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d_p มีความยาว kd_p และมีความพรุนเฉลี่ย ϵ_p เกิดขึ้นทั้งในแนวรัศมีของตัวดูดซับ ($r < d_p/2$) และในแนวแกนของตัวดูดซับ ($z < kd_p/2$) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 พื้นที่ของการแพร่สารดูดซับในโพรงของตัวดูดซับตามแนวรัศมีของตัวดูดซับ คือ $2\epsilon_p k\pi r^2$ ส่วนพื้นที่ของการแพร่สารดูดซับในโพรงของตัวดูดซับตามแนวแกนของตัวดูดซับ คือ $\epsilon_p \pi r^2$ ในขณะที่การดูดซับสารดูดซับไว้บนผิวของโพรงในตัวดูดซับนั้น มีผลให้ปริมาณดูดซับจำเพาะในโพรงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนถึงประมาณสมดุลดูดซับจำเพาะในโพรงดังกล่าว อัตราการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกระบอกจึงสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารดูดซับในโพรงของตัวดูดซับ ปริมาณดูดซับจำเพาะในโพรงของตัวดูดซับ ระยะทางตามแนวรัศมี (r) จากแกนของตัวดูดซับ และระยะทางตามแนว



รูปที่ 3.16 ภาพตัดแสดงทิศทางการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับทรงกระบอกซึ่งเกิดขึ้นทั้งในแนวรัศมีและในแนวแกนของตัวดูดซับพร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกน (z) จากจุดศูนย์กลางมวลของตัวดูดซับตามกฎอนุรักษ์มวลสารถูกดูดซับภายในโพรงของตัวดูดซับดังกล่าวดังนี้

$$\begin{aligned}
 & (2\pi r)\rho_p\Delta r\Delta z(q|_{t+\Delta t} - q|_t) + (2\pi r)\epsilon_p\Delta r\Delta z(C|_{t+\Delta t} - C|_t) = \\
 & (2\pi r)\epsilon_p\Delta zJ_{po,r}\Delta t - 2\pi(r + \Delta r)\epsilon_p\Delta zJ_{po,r+\Delta r}\Delta t + (2\pi r\Delta r)(J_{po,z} - \\
 & J_{po,z+\Delta z})\Delta t \\
 & \left(\frac{\rho_p}{\epsilon_p}\right)\frac{q|_{t+\Delta t}-q|_t}{\Delta t} + \frac{C|_{t+\Delta t}-C|_t}{\Delta t} = -\frac{(r + \Delta r)J_{po,r+\Delta r} - J_{po,r}}{r\Delta r} - \frac{J_{po,z+\Delta z} - J_{po,z}}{\Delta z} \\
 & \left(\frac{\rho_p}{\epsilon_p}\right)\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{1}{r}\frac{\partial(rJ_{po,r})}{\partial r} - \frac{\partial J_{po,z}}{\partial z} \quad (3.23)
 \end{aligned}$$

ในกรณีที่ตัวดูดซับทรงกระบอกมีความยาวมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางหลายเท่า เช่น k มีค่ามากกว่า 4 เป็นต้น พื้นที่ของการแพร่ในโพรงตามแนวรัศมีของตัวดูดซับเทียบเท่าหรือมากกว่าร้อยละ 90 ของพื้นที่ของการแพร่ในโพรงทั้งหมด อัตราการดูดซับ ($\partial q/\partial t$) จึงกำหนดให้สัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในโพรง ($\partial C/\partial t$) และอัตราการแพร่ในโพรงตามแนวรัศมีของตัวดูดซับเท่านั้นดังนี้

$$\frac{\partial q}{\partial t} \cong -\frac{\epsilon_p}{\rho_p}\frac{\partial C}{\partial t} - \frac{\epsilon_p}{\rho_p r}\frac{\partial(J_{po,r})}{\partial r} \quad (3.24)$$

อัตราการแพร่ต่อหน่วยพื้นที่ในโพรงของตัวดูดซับตามแนวรัศมีของตัวดูดซับทรงกระบอก คือ

$$J_{po,r} = -D_{po}\frac{\partial C}{\partial r} \quad (3.25)$$

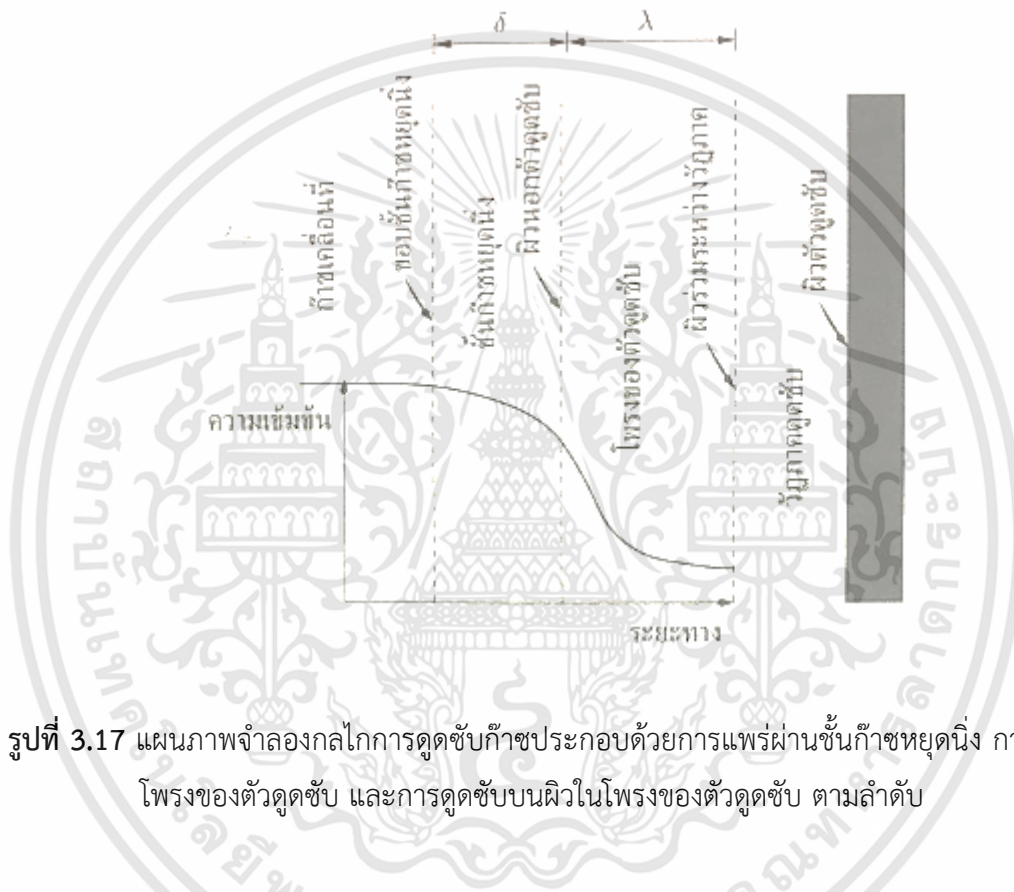
สัมประสิทธิ์การแพร่ในโพรงของสารถูกดูดซับคำนวณจากสมการ 3.22 ข้างต้น

3.7.7 สัมประสิทธิ์การดูดซับของหน่วยดูดซับ

ตัวดูดซับพาณิชย์ที่ผ่านขั้นตอนการอัดเม็ดมักมีรูพรุนคล้ายทรงกลมหรือคล้ายทรงกระบอกโค้งงอ ส่วนตัวดูดซับที่ผลิตด้วยกรรมวิธีย่อยขนาดมักมีรูพรุนหลายเหลี่ยมอย่างไม่จำกัด รูพรุนของโพรงมีลักษณะต่าง ๆ และโพรงมักมีขนาดไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ความหนาของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับ (δ) มักแปรตามรูพรุนและขนาดของตัวดูดซับ และความหนาของชั้นของไหลดังกล่าวแปรผกผันกับอัตราการเคลื่อนที่ของของไหลรอบตัวดูดซับนั้น ๆ ความหนาของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับจึงเป็นอุปสรรคสำคัญของการคำนวณอัตราการแพร่ผ่านชั้นของไหลดังกล่าวข้างต้น นอกจากนี้ความลึกของโพรง (λ) และลักษณะของโพรงในตัวดูดซับมักไม่สามารถกำหนดได้ชัดเจน ลักษณะรูพรุนของโพรงขนาดของโพรง และความลึกของโพรง เป็นปัจจัยสำคัญของการจำลองการแพร่ของสารถูกดูดซับ

ภายในโพรงของตัวดูดซับ ดังนั้น ลักษณะรูปทรงและขนาดของโพรงจึงเป็นอุปสรรคสำคัญของการคำนวณอัตราการดูดซับจากแบบจำลองการแพร่ในโพรงข้างต้นด้วย

กลไกของการดูดซับสารถูกดูดซับในก๊าซผสมอาจจำลองเป็นการถ่ายโอนมวลจากก๊าซที่เคลื่อนที่ซึ่งมีความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเป็น C ผ่านชั้นก๊าซหุดยุติหนึ่งรอบตัวดูดซับและผ่านเข้าสู่โพรงของตัวดูดซับตามลำดับจนถึงวัฏภาคดูดซับซึ่งอยู่บนผิวของโพรงในตัวดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 เมื่อการถ่ายโอนมวลของ



รูปที่ 3.17 แผนภาพจำลองกลไกการดูดซับก๊าซประกอบด้วยการแพร่ผ่านชั้นก๊าซหุดยุติ การแพร่ในโพรงของตัวดูดซับ และการดูดซับบนผิวในโพรงของตัวดูดซับ ตามลำดับ

สารถูกดูดซับผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด อัตราการดูดซับ ($\frac{dq}{dt}$) หรืออัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณดูดซับจำเพาะบนผิวในโพรงของตัวดูดซับหรือในวัฏภาคดูดซับจะเท่ากับอัตราการถ่ายโอนมวลผ่านชั้นของไหลรอบตัวดูดซับ ซึ่งนิยามให้เป็นผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลผ่านชั้นของไหลหุดยุติหนึ่งรอบตัวดูดซับ (film mass transfer coefficient, k_{fm}) กับผลต่างของความเข้มข้นเฉลี่ยของสารถูกดูดซับ (C) ในของไหลเคลื่อนที่กับความเข้มข้นเฉลี่ยของสารถูกดูดซับที่ผิวนอกของตัวดูดซับ (C_s) ดังนี้

$$\frac{dq}{dt} = k_{fm}(C - C_s) \quad (3.26)$$

ในกรณีที่การถ่ายโอนมวลของสารถูกดูดซับในโพรงเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด อัตราการดูดซับ ($\partial q/\partial t$) จะเท่ากับอัตราการถ่ายโอนมวลในโพรงของตัวดูดซับ ซึ่งนิยามให้เป็นผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในโพรง (pore mass transfer coefficient, k_{po}) กับผลต่างของความเข้มข้นเฉลี่ยของสารถูกดูดซับที่ผิวหน้าของตัวดูดซับ (C_s) กับความเข้มข้นเฉลี่ยของสารถูกดูดซับที่สมดุลกับปริมาณดูดซับจำเพาะเฉลี่ย (C_e) ณ ขณะนั้นดังนี้

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k_{po}(C_s - C_e) \quad (3.27)$$

เมื่ออัตราการถ่ายโอนมวลของสารถูกดูดซับทั้งในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับและในโพรงของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซับในทางปฏิบัติจึงนิยามอัตราการดูดซับ ($\partial q/\partial t$) ให้เป็นผลคูณของสัมประสิทธิ์การดูดซับ (adsorption coefficient, k_o) และผลต่างของความเข้มข้นเฉลี่ยของสารถูกดูดซับ (C) ในวัฏภาคของไหลที่เคลื่อนที่กับความเข้มข้นที่สมดุลกับปริมาณดูดซับจำเพาะเฉลี่ย (C_e) ณ ขณะนั้นดังนี้

$$\frac{\partial q}{\partial t} = k_o(C - C_e) \quad (3.28)$$

ดังนั้น สัมประสิทธิ์การดูดซับ (k_o) สัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลผ่านชั้นของไหลหยุดนิ่งรอบตัวดูดซับ (k_{fm}) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลในโพรงของตัวดูดซับ (k_{po}) ดังนี้

$$C - C_e = (C - C_s) + (C - C_e)$$

$$\frac{1}{k_o} \frac{\partial q}{\partial t} = \frac{1}{k_{fm}} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{k_{po}} \frac{\partial q}{\partial t}$$

$$\frac{1}{k_o} = \frac{1}{k_{fm}} + \frac{1}{k_{po}} \quad (3.29)$$

นั่นคือ สัมประสิทธิ์การดูดซับ (k_o) คือ ผลลัพธ์สุทธิของอิทธิพลต่าง ๆ ที่มีต่ออัตราการดูดซับ เช่น รูปทรงของตัวดูดซับ ความหนาของชั้นของไหลรอบตัวดูดซับ ความพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ และขนาดของโพรง เป็นต้น สัมประสิทธิ์การดูดซับจึงเป็นสมบัติเฉพาะของระบบดูดซับนั้น ๆ ซึ่งแปรเปลี่ยนตามรูปทรงของตัวดูดซับ ขนาดของตัวดูดซับ (d_p) ความพรุนเฉลี่ยของชั้นตัวดูดซับ (ϵ_b) อัตราการไหล (v_b) สมบัติการถ่ายโอนโมเมนตัมและการถ่ายโอนมวล ได้แก่ ความหนืด (μ) ความหนาแน่น (ρ) สัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นของไหลรอบตัวดูดซับ (ν_{po}) ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของโพรง และลักษณะสมบัติของสารถูกดูดซับ เช่น รูปทรงโมเลกุลสารถูกดูดซับ ขนาดโมเลกุลสารถูกดูดซับ ระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลสารถูกดูดซับเคลื่อนที่ได้ก่อนชนโมเลกุลอื่น ๆ (mean free path) เป็นต้น

ระบบดูดซับก๊าซที่อัตราการแพร่ผ่านชั้นก๊าซรอบตัวดูดซับควบคุมอัตราการดูดซับสัมประสิทธิ์การดูดซับ (k_o) ของตัวดูดซับทรงกลมหรือเทียบเท่าทรงกลมที่บรรจุในหน่วยดูดซับ และชั้นตัวดูดซับมีความพรุนเฉลี่ย 0.3-0.5 คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\left(\frac{k_o}{v_o}\right) \left(\frac{\mu}{\rho v_{am}}\right)^{2/3} = \frac{0.4548}{\epsilon_b} \left(\frac{\mu}{\rho d_p v_o}\right)^{0.4069} \quad (3.30)$$

$$10 < \frac{\rho d_p v_o}{\mu} < 10^5$$

ในกรณีที่ทั้งอัตราการแพร่ใช้ชั้นก๊าซรอบตัวดูดซับและอัตราการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราการดูดซับ สัมประสิทธิ์การดูดซับ (k_o) ของระบบดูดซับสามารถทดสอบได้ด้วยวิธีเดียวกับวิธีทดสอบค่าคงที่สมดุลดูดซับ (รายละเอียดในหัวข้อ 3.3.4) นั่นคือ สัมประสิทธิ์การดูดซับ (k_o) ของระบบดูดซับก๊าซดังกล่าวสัมพันธ์กับความแปรปรวนของเวลา (σ^2) ที่ปริมาณสารถูกดูดซับทั้งหมดเคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวดูดซับของระบบทดสอบสมดุลดูดซับดังกล่าว ความแปรปรวน (σ^2) นี้ คำนวณได้จากผลวิเคราะห์จากการทดสอบค่าคงที่สมดุลดูดซับได้ดังนี้

$$(\sigma^2) = \frac{\int_{t_{bo}}^{t_{bf}} C_b(t)(t-\bar{t}_b)^2 dt}{\int_{t_{bo}}^{t_{bf}} C_b(t) dt} \quad (3.31)$$

ความแปรปรวนของเวลาที่สารถูกดูดซับทั้งหมดเคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวดูดซับของระบบทดสอบค่าคงที่สมดุลดูดซับข้างต้นเป็นผลลัพธ์สุทธิของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อระบบดูดซับ ได้แก่ ขนาดของตัวดูดซับ (d_p) ความพรุนของชั้นตัวดูดซับ (ϵ_b) ความพรุนของตัวดูดซับ (ϵ_b) ความหนาแน่นของตัวดูดซับ (ρ_b) หรือความหนาแน่นของตัวดูดซับ (ρ_b) ความสูงของชั้นตัวดูดซับทดสอบ (H) อุณหภูมิของการทดสอบ (T) ค่าคงที่สมดุลดูดซับของเฮนรี (K_H) อัตราการแพร่ในก๊าซ และอัตราการแพร่ในโพรงของตัวดูดซับ ดังนั้น สมการความสัมพันธ์ของความแปรปรวนนี้กับปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อสัมประสิทธิ์การดูดซับ (k_o) จึงสรุปได้ดังนี้

$$\frac{\sigma^2}{2t_b^2} = \frac{v_{am}}{v_o H} + \frac{v_o}{H} \left(\frac{\epsilon_b}{k_o \rho_b K_H}\right) \left(1 + \frac{\epsilon_b}{\rho_b K_H}\right)^{-2} \quad (3.32)$$

ในระบบดูดซับของเหลวอัตราการแพร่ผ่านชั้นของเหลวที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะควบคุมอัตราการดูดซับสารถูกดูดซับของระบบดูดซับของเหลวนั้น สัมประสิทธิ์การดูดซับ (k_o) ในของเหลวจึงคำนวณได้จากลักษณะการไหลของของเหลวผสม นั่นคือ เมื่อของเหลวไหลผ่านชั้นตัวดูดซับอย่างช้า ๆ สัมประสิทธิ์การดูดซับ (k_o) สารถูกดูดซับในของเหลวจึงคำนวณได้จากสมการ 3.33 ดังนี้

$$\left(\frac{k_o}{v_o}\right) \left(\frac{\mu}{\rho v_{am}}\right)^{2/3} = \frac{1.09}{\epsilon_b} \left(\frac{\mu}{\rho d_p v_o}\right)^{2/3} \quad (3.33)$$

$$\frac{\rho d_p v_o}{\mu} < 55$$

เมื่ออัตราการไหลของของไหลในหลอดซึบสูงมากขึ้น สัมประสิทธิ์การดูดซึบ (k_o) ของระบบดูดซึบของเหลวนั้นคำนวณได้จากสมการ 3.34 ดังนี้

$$\left(\frac{k_o}{v_o}\right) \left(\frac{\mu}{\rho v_{am}}\right)^{2/3} = \frac{0.250}{\epsilon_b} \left(\frac{\mu}{\rho d_p v_o}\right)^{0.31} \quad (3.34)$$

$$\frac{\rho d_p v_o}{\mu} < 55$$

3.7.8 การเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซึบผ่านชั้นตัวดูดซึบ

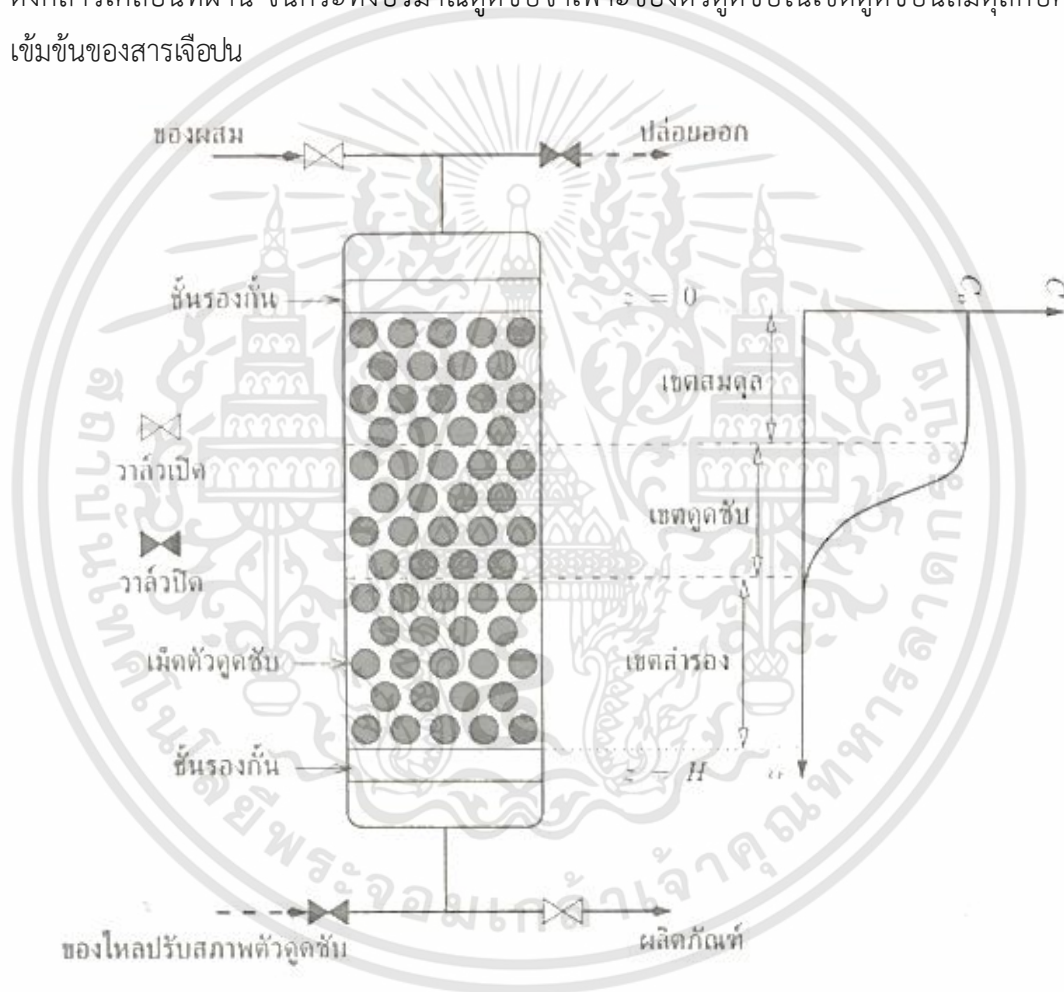
เมื่อสารถูกดูดซึบเข้าสู่หน่วยดูดซึบอย่างต่อเนื่อง สารถูกดูดซึบส่วนหนึ่งจะแพร่ไปยังพื้นผิวของตัวดูดซึบตามกลไกการดูดซึบที่อธิบายแล้วข้างต้น ในขณะที่สารถูกดูดซึบส่วนที่เหลือจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับสารประกอบอื่น ๆ ที่ไม่ถูกดูดซึบ อัตราส่วนของสารถูกดูดซึบที่แพร่ไปยังพื้นที่ตัวดูดซึบแปรตามอัตราการดูดซึบ และสมดุลดูดซึบของตัวดูดซึบที่บรรจุไว้ในหน่วยดูดซึบ เมื่ออัตราการดูดซึบเกิดขึ้นเร็วหรือสมดุลดูดซึบมีค่าสูง สารถูกดูดซึบส่วนใหญ่แพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซึบ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซึบส่วนที่เหลือจึงลดลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นของสารถูกดูดซึบในแนวทิศทางเดียวกับทิศทางของการเคลื่อนที่ด้วย ซึ่งมีผลให้เกิดการแพร่ในแนวขนานกับทิศของการเคลื่อนที่ ทิศทางการแพร่ตามแนวแกนของชั้นตัวดูดซึบนี้จะเกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับผลต่างของความเข้มข้นของสารถูกดูดซึบตามแนวแกนของชั้นตัวดูดซึบ นั่นคือ การแพร่เกิดขึ้นตามทิศทางของการไหล เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซึบลดลงตามระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ แต่การแพร่จะเกิดขึ้นในทิศตรงข้ามกับทิศของการไหล เมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซึบเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ ดังนั้น อัตราการดูดซึบจึงมีอิทธิพลต่อการกระจายความเข้มข้นตามแนวแกนของหน่วยดูดซึบ นอกจากนี้ลักษณะสมดุลดูดซึบในหน่วยดูดซึบดังกล่าวมีอิทธิพลต่อการกระจายความเข้มข้นตามแนวแกนของหน่วยดูดซึบ หรือมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซึบภายในหน่วยดูดซึบอีกด้วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

หน่วยดูดซึบทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D บรรจุตัวดูดซึบสูง H หน่วยดูดซึบมีความหนาแน่น (ρ_b) และชั้นตัวดูดซึบมีความพรุนเฉลี่ย (ϵ_b) ในขณะที่หน่วยดูดซึบทำหน้าที่แยกสารถูกดูดซึบออกจากสารผสมที่กำลังไหลในหน่วยดูดซึบนั้นและปล่อยผลิตภัณฑ์ออกทางปลายอีกด้านหนึ่งของหน่วยดูดซึบ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ชั้นของตัวดูดซึบในหน่วยดูดซึบดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 เขต ตามความสูง (หรือความยาว) ของชั้นตัวดูดซึบที่ประกอบด้วยเขตสมดุล เขตดูดซึบ และเขตสำรองตามลำดับดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขตสมดุ คือ บริเวณชั้นของตัวดูดซับที่ได้ดูดซับสารถูกดูดซับไว้ และปริมาณดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับในชั้นนี้สมดุกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของผสมที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับ ตัวดูดซับในเขตสมดุนี้ได้ทำหน้าที่แยกสารถูกดูดซับแล้ว และไม่สามารถทำหน้าที่แยกสารถูกดูดซับได้ชั่วคราว เขตสมดุนี้อยู่ในบริเวณด้านปลายของหน่วยดูดซับ (รูปที่ 4.7) ที่ให้ของผสมที่มีสารเจือปนไหลเข้าหน่วยดูดซับ นอกจากนี้เขตสมดุนี้จะขยายกว้างขึ้นตามความสูง (หรือความยาว) ของหน่วยดูดซับ โดยจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของผสมที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับดังกล่าว

เขตดูดซับ คือ บริเวณชั้นของตัวดูดซับที่กำลังดูดซับสารถูกดูดซับ ในขณะที่สามารถดูดซับดังกล่าวเคลื่อนที่ผ่าน จนกระทั่งปริมาณดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับในเขตดูดซับนี้สมดุกับความเข้มข้นของสารเจือปน



รูปที่ 3.18 การแบ่งเขตของชั้นตัวดูดซับของหน่วยดูดซับออกเป็น 3 เขต ประกอบด้วยสมดุ เขตดูดซับ และเขตสารรอง ตามลำดับ ในขณะที่หน่วยดูดซับกำลังแยกสารเจือปนออกจากผลิตภัณฑ์

ในของผสมที่กำลังเคลื่อนที่ผ่าน เขตดูดซับนี้แทรกอยู่ระหว่างเขตสมดุลกับเขตสำรอง (รูปที่ 3.18) นอกจากนี้เขตดูดซับจะเคลื่อนที่จากปลายของหน่วยดูดซับที่ของผสมไหลเข้า ไปที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหน่วยดูดซับที่ผลิตภัณฑ์ไหลออก

เขตสำรอง คือ บริเวณชั้นของตัวดูดซับที่ไม่มีสารถูกดูดซับและอยู่ที่ส่วนด้านปลายของหน่วยดูดซับที่ผลิตภัณฑ์ไหลออกจากหน่วยดูดซับดังกล่าว (รูปที่ 3.18) เขตสำรองนี้เป็นบริเวณของชั้นตัวดูดซับทดแทนเขตสมดุลที่ขยายกว้างขึ้น ความกว้างของเขตสำรองนี้จึงแปรผกผันความกว้างของเขตสมดุลของหน่วยดูดซับเดียวกัน

สมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับ ณ ตำแหน่งใด ๆ ในชั้นตัวดูดซับที่อยู่ในเขตดูดซับ ณ ขณะใด ๆ เมื่อกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของของผสมในลักษณะเดียวกับการเคลื่อนที่ของลูกสูบในกระบอกสูบ (ความเร็วของการไหล v_z ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างจากผนังของหน่วยดูดซับ) คือ

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left(\frac{\rho_b}{\epsilon_b}\right) \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(v_z C)}{\partial z} - \vartheta_{am} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad (3.35)$$

อัตราการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับจะแปรตามอัตราการดูดซับ อัตราการเปลี่ยนความเข้มข้นในชั้นตัวดูดซับ และอัตราการแพร่ตามแนวขนานทิศการไหล ในกรณีที่มีการแพร่ในแนวแกนของหน่วยดูดซับมีอิทธิพลน้อย เช่น อัตราการเคลื่อนที่ของของผสมตามแนวแกนของหน่วยดูดซับสูงกว่าอัตราการแพร่ของสารถูกดูดซับในแนวแกนของหน่วยดูดซับนั้นมาก ๆ เป็นต้น สมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับจึงลดเหลือ

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left(\frac{\rho_b}{\epsilon_b}\right) \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(v_z C)}{\partial z} = 0 \quad (3.36)$$

เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นได้เร็ว การดูดซับสารถูกดูดซับในเขตดูดซับนั้น สามารถเข้าสู่ภาวะสมดุลดูดซับ ณ ความเข้มข้นในบริเวณนั้นได้ ในขณะที่ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในบริเวณดังกล่าวยังคงเปลี่ยนแปลง และมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นเริ่มต้น นั่นคือ ปริมาณดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับในบริเวณนั้นสมดุลกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่อยู่ในบริเวณเดียวกัน ดังนั้น อัตราการดูดซับจึงสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสมดุลดูดซับ ($\partial q/\partial C$) และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในบริเวณนั้น ๆ ($\partial C/\partial t$) ดังนี้

$$\left\{1 + \left(\frac{\rho_b}{\epsilon_b}\right) \frac{\partial q}{\partial C}\right\} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(v_z C)}{\partial z} = 0 \quad (3.37)$$

ความเร็วของการไหล (v_z) ในหน่วยดูดซับที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอ และชั้นตัวดูดซับมีความพรุนสม่ำเสมอตลอดความสูงของชั้นตัวดูดซับจะคงที่ตลอดความสูงของชั้นตัวดูดซับสมการแบบจำลองการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับในหน่วยดูดซับสมดุลจึงแปลงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left\{1 + \left(\frac{\rho_b}{\epsilon_b}\right) \frac{\partial q}{\partial C}\right\} \frac{\partial C}{\partial t} + v_z \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (3.38)$$

เนื่องจากการดูดซับไม่ได้ทำลายสารถูกดูดซับให้สูญหายจากระบบหรือเปลี่ยนสารถูกดูดซับให้เป็นสารประกอบอื่น ๆ ปริมาณสารถูกดูดซับที่เข้าสู่หน่วยดูดซับแล้วจึงไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับตามเวลาที่ผ่านไปจึงสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับตามตำแหน่งที่เคลื่อนผ่านดังนี้

$$\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right) dt + \left(\frac{\partial C}{\partial z}\right) dz = 0 \quad (3.39)$$

$$\frac{dz}{dt} = - \frac{\partial C / \partial t}{\partial C / \partial z} \quad (3.40)$$

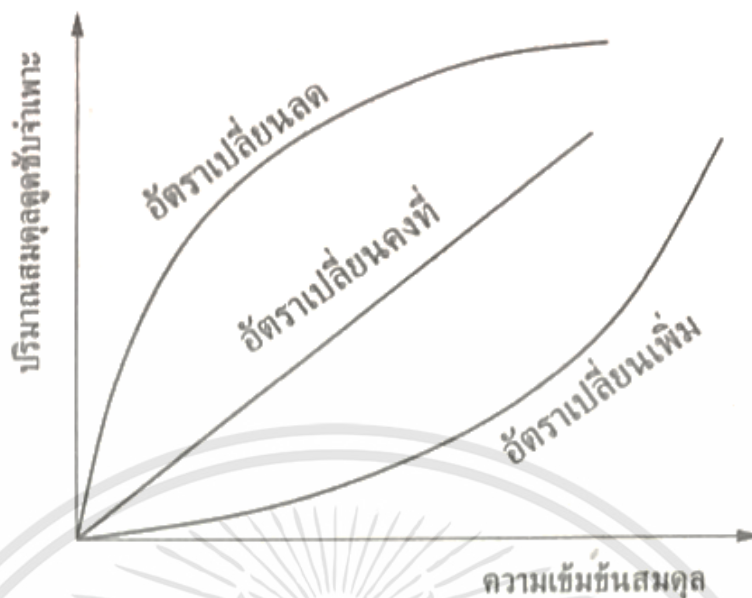
เมื่อจัดรูปสมการ 3.38 ให้มีลักษณะเหมือนกับสมการ 3.40 อัตราการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับในชั้นตัวดูดซับ (dz/dt) จะแปรเปลี่ยนเป็นสัดส่วนกับความเร็วของการไหล (v_z) ดังนี้

$$\frac{dz}{dt} = \frac{v_z}{1 + \frac{\rho_b}{\epsilon_b} \left(\frac{\partial q}{\partial C}\right)} \quad (3.41)$$

อัตราการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับในชั้นตัวดูดซับ (dz/dt) แปรผกผันกับอัตราการเปลี่ยนปริมาณสมมูลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะต่อหน่วยการเปลี่ยนความเข้มข้นสมมูล ($\partial q / \partial C$) ของสารถูกดูดซับ หรือความชันของเส้นโค้งสมมูลดูดซับของระบบดูดซับนั้น อัตราการเปลี่ยนปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะต่อหน่วยการเปลี่ยนความเข้มข้นสมมูลดังกล่าว จำแนกได้ 3 ชนิด ได้แก่ อัตราเปลี่ยนคงที่ อัตราเปลี่ยนลด และอัตราเปลี่ยนเพิ่ม ตามลักษณะของเส้นสมมูลดูดซับ 3 ชนิด คือ เส้นสมมูลดูดซับชนิดเส้นตรง เส้นสมมูลดูดซับชนิดโค้งคว่ำ และเส้นสมมูลดูดซับชนิดโค้งหงาย ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.19

เมื่อเส้นสมมูลดูดซับของระบบดูดซับเป็นเส้นตรง อัตราการเปลี่ยนปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะต่อหน่วยความเข้มข้นสมมูล ($\partial q / \partial C$) หรือค่าคงที่สมมูลดูดซับของเฮนรี (K_H) เป็นค่าคงที่ของระบบดูดซับดังกล่าว อัตราการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับในชั้นตัวดูดซับ (ซึ่งช้ากว่าอัตราการไหล หรืออัตราการเคลื่อนที่ของสารอื่น ๆ ที่ไม่ถูกดูดซับ) ไม่แปรเปลี่ยนตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในชั้นตัวดูดซับดังกล่าว

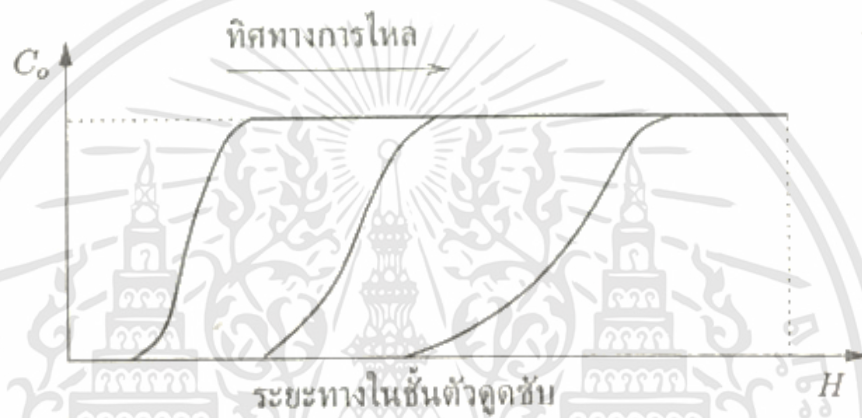
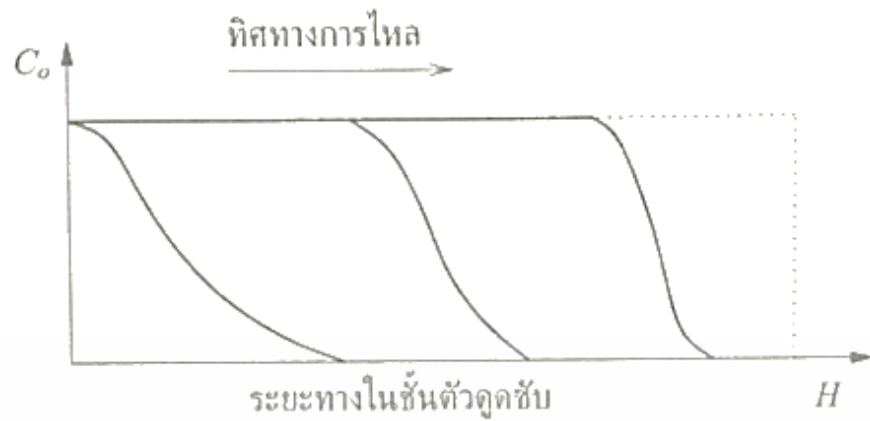
ในกรณีที่เส้นสมมูลดูดซับของระบบดูดซับนั้นเป็นชนิดโค้งคว่ำ อัตราการเปลี่ยนปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะต่อหน่วยความเข้มข้นสมมูล ($\partial q / \partial C$) จะเป็นอัตราเปลี่ยนลด นั่นคือ อัตราการเปลี่ยนปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะต่อหน่วยความเข้มข้นสมมูล ณ ความเข้มข้นสมมูลสูงมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนปริมาณ



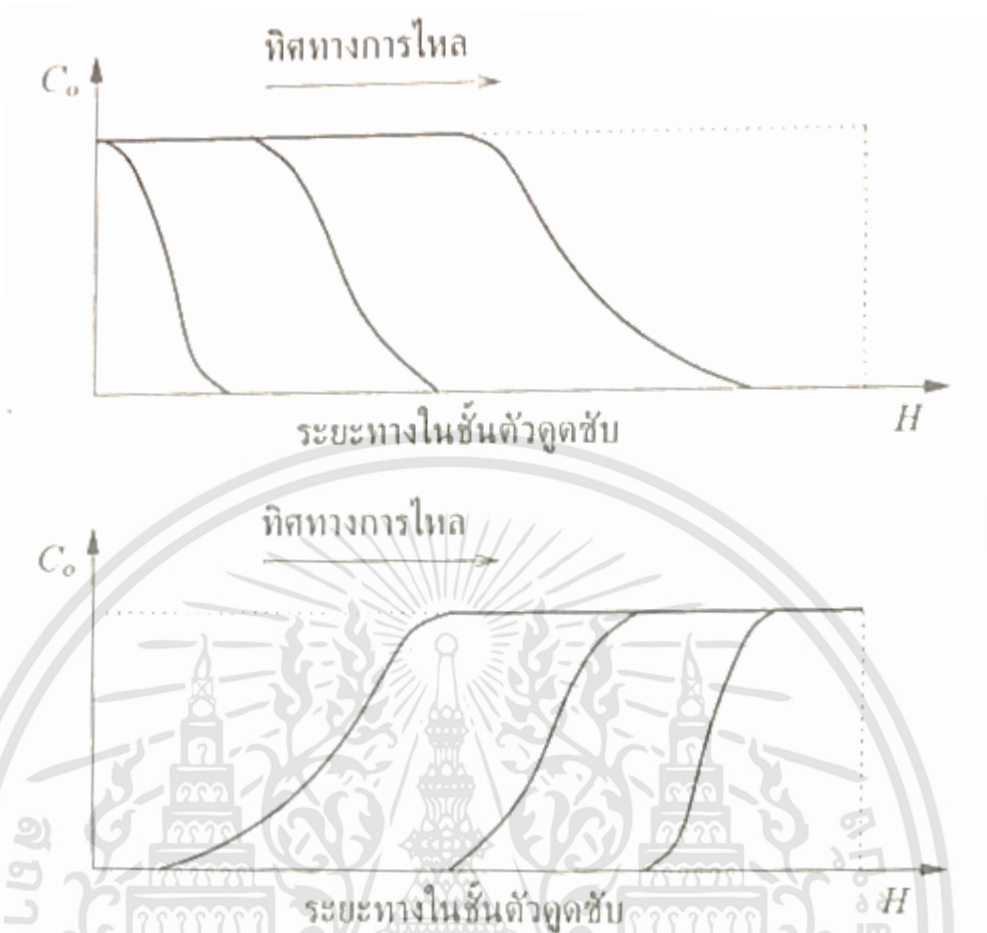
รูปที่ 3.19 ชนิดของอัตราการเปลี่ยนปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะต่อหน่วยความเข้มข้นสมมูลของระบบสมมูลดูดซับ

สมมูลดูดซับจำเพาะต่อหน่วยความเข้มข้นสมมูล q ความเข้มข้นสมมูลต่ำ ดังนั้น สารถูกดูดซับในบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าสารถูกดูดซับในบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ และมีผลให้กระจายความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในเขตดูดซับข้างต้น (รูปที่ 3.18) ที่กำลังเคลื่อนที่ในหน่วยดูดซับหัดแคบลงในชั้นตอนดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 (บน) จนกระทั่งความกว้างของเขตดูดซับนี้ไม่หัดแคบลงอีกเมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวดูดซับในบริเวณที่เหลือของหน่วยดูดซับนั้น แต่การกระจายความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะขยายกว้างขึ้นตามแนวแกนของหน่วยดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 (ล่าง) ในชั้นตอนปรับสภาพตัวดูดซับของหอดูดซับที่ไม่สามารถแยกของผสมดังกล่าวได้อีก

ในทางตรงกันข้าม เมื่อเส้นสมมูลดูดซับของระบบดูดซับเป็นชนิดโค้งงาย อัตราการเปลี่ยนปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะต่อหน่วยความเข้มข้นสมมูล (dq/dC) จะเป็นอัตราเปลี่ยนเพิ่ม นั่นคือ อัตราการเปลี่ยนปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะต่อหน่วยความเข้มข้นสมมูล q ความเข้มข้นสมมูลต่ำมีค่าน้อยกว่าอัตราการเปลี่ยนปริมาณสมมูลดูดซับจำเพาะต่อหน่วยความเข้มข้นสมมูล q ความเข้มข้นสูง ดังนั้น สารถูกดูดซับในบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าสารถูกดูดซับในบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง และมีผลให้กระจาย



รูปที่ 3.20 ลักษณะการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับในเขตดูดซับในชั้นตอนดูดซับ (บน) และในชั้นตอนปรับสภาพตัวดูดซับ (ล่าง) ตามลำดับ เมื่อสมมูลดูดซับเป็นเส้นโค้งค้ำ



รูปที่ 3.21 ลักษณะการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับในเขตดูดซับในชั้นตอนดูดซับ (บน) และในชั้นตอนปรับสภาพตัวดูดซับ (ล่าง) ตามลำดับ เมื่อสมมูลดูดซับเป็นเส้นโค้งหงาย

ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในเขตดูดซับที่กำลังเคลื่อนที่ในหน่วยดูดซับดังกล่าว ขยายกว้างขึ้นในชั้นตอนดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 (บน) ส่วนการกระจายความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในเขตดูดซับนี้จะหดแคบลงในชั้นตอนปรับสภาพตัวดูดซับของหน่วยดูดซับที่ไม่สามารถแยกของผสมดังกล่าวได้อีก ดังแสดงในรูปที่ 3.21 (ล่าง)

การกระจายความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในเขตดูดซับดังกล่าวนี้มีความสำคัญต่อการคำนวณออกแบบหน่วยดูดซับมาก แต่การวัดการกระจายสารถูกดูดซับภายในเขตดูดซับนี้โดยตรงมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก เมื่อเขตดูดซับนี้เคลื่อนที่มาถึงบริเวณส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของหน่วยดูดซับ การกระจายสารถูกดูดซับในเขตดูดซับนี้สามารถคำนวณประมาณได้จากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่เคลื่อนที่ออกจากหน่วยดูดซับ นั่นคือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ไหลออกจากหน่วยดูดซับเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ผ่านไป หรือปริมาณของสารถูกดูดซับที่ไหลออกจากหน่วยดูดซับเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ผ่านไป หรือปริมาณของผสมที่ไหลเข้าหน่วยดูดซับ จนกระทั่งความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่ไหลออกจากหน่วยดูดซับมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในของผสมที่

บทที่ 4

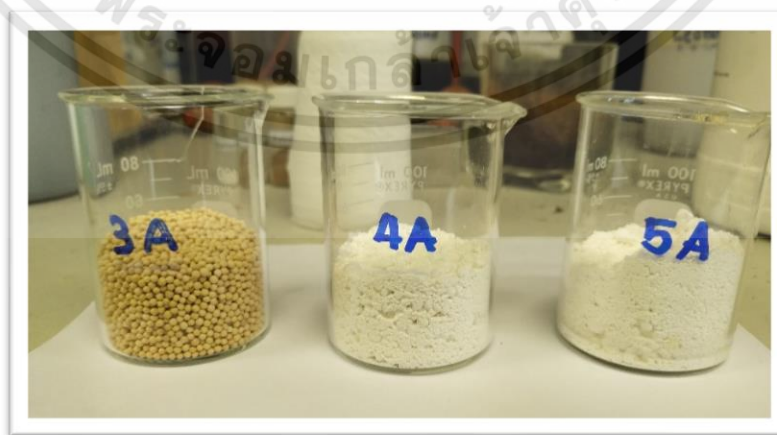
วัสดุ อุปกรณ์ การเตรียมสารดูดซับ และวิธีการทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์โดยใช้สารดูดซับชนิดซีโอไลต์ เอ(3A, 4A, 5A) การเอิบซุ่ม โดยเลือกสารดูดซับหลัก ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A และ 5A และมีขั้นตอนการเตรียมสารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการเอิบซุ่มสารละลาย สองชนิดได้แก่ ลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอททิลีนไอมิน โดยทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยอุปกรณ์ดังรายการต่อไปนี้

4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A, 5A) และ ซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A, 5A) ที่ผ่านการปรับสภาพโดยการเอิบซุ่มด้วยลิเทียมคลอไรด์ (LiCl), โพลีเอททิลีนไอมิน(PEI)

4.1.1 การเตรียมสารดูดซับ

สารประกอบซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A และ 5A จากบริษัท ไทยซิลิเกต จำกัด ถูกเตรียมขึ้นโดยการคัดขนาด โดยนำมาบดให้ละเอียดด้วยโกร่งบดสาร และร่อนผ่านด้วยตะแกรง แบบสั่นสะเทือน(Sieve Shaker รุ่น MINOR 200) ให้คงค้างผ่านตะแกรงให้มีขนาดเท่ากับ 325 ไมครอน ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 นำสารดูดซับที่ต้องการผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ด้วยเตาเผาแบบ Tubular furnace รุ่น 3-1750, USA ดังรูปที่ 4.3 เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อไล่แก๊สปนเปื้อนและความชื้นที่อาจจะฝังตัวอยู่ในสารดูดซับ สารประกอบซีโอไลต์ ที่ผ่านกระบวนการเตรียมสารแล้วจะถูกนำเก็บในตู้ดูดความชื้น(desiccator) ที่ตั้งค่าควบคุมความชื้นให้อยู่ที่ 30%RH ดังรูปที่ 4.4 เพื่อเตรียมการใช้งานสำหรับขั้นตอนการเอิบซุ่ม และทดสอบการใช้งานต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 สารดูดซับซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A และ 5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 Sieve Shaker รุ่น MINOR 200 ยี่ห้อ Endecotts



รูปที่ 4.3 ตู้อบความร้อน แบบ Tubular furnace อุณหภูมิสูงสุด 800 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ตู้ดูดความชื้น (desiccator)

4.1.2 กระบวนการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน

สารละลายเพื่อใช้ในการปรับสภาพ ได้แก่สารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) ถูกเตรียมที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน(PEI) ถูกเตรียมมาเอ็บซุ่มกับซีโอไลต์ชนิด A (3A, 4A และ 5A) ด้วยอัตราส่วนเท่ากับร้อยละ 30 โดยมวล ด้วยวิธีการกวนผสมแบบเอ็บซุ่ม ดังรูปที่ 4.5 นำตัวอย่างสารดูดซับที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่มสารละลายทั้งสองชนิด มากรองแยกสารแขวนลอยออก และอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบความร้อน: WTB Binding, Germany ดังรูปที่ 4.6 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสด้วยเตาเผาแบบ Tubular furnace เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



รูปที่ 4.5 การผสมสารดูดซับซีโอไลต์ชนิด A (3A, 4A, 5A) กับสารละลายที่ใช้ในการเอ็บซุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ตู้อบความร้อน: WTB Binding, Germany อุณหภูมิสูงสุด 150 องศาเซลเซียส

หลังจากกวนผสมและผ่านการอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน ตัวอย่างสารดูดซับที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วย ลิเทียมคลอไรด์ และโพสเทอทีลีนไอมิน ถูกนำมาบดด้วยโกร้งบดสาร เพื่อให้อยู่ในรูปผง และผ่านการคัดขนาดโดยผ่านการร่อนโดยใช้ตะแกรงขนาด 325 ไมครอน เพื่อเลือกเอาขนาดของสารดูดซับที่มีขนาดเดียวกัน มาใช้งาน หลังจากร่อนและคัดแยกขนาดของสารดูดซับที่ต้องการ โดยแบ่งตามชนิดของสารดูดซับ และสารเอิบซุ่ม ดังรูปที่ 4.7 และนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้น วิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction(XRD) และ พื้นผิว โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope(SEM)



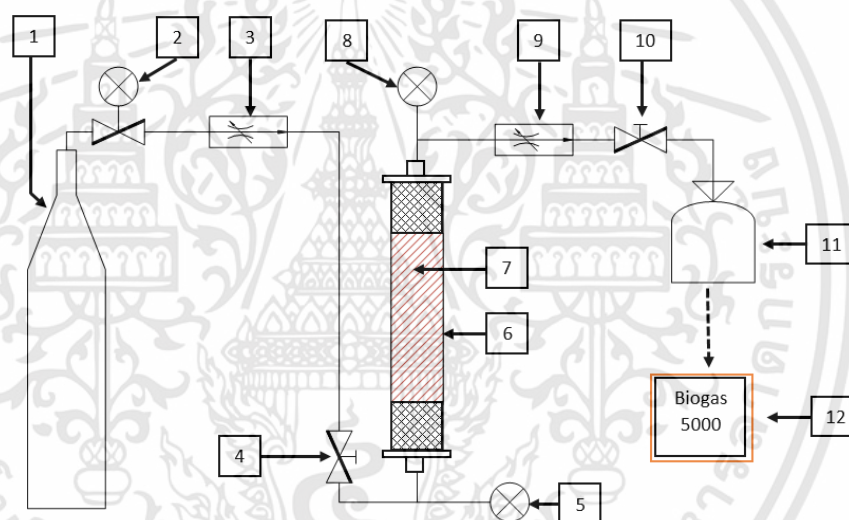
รูปที่ 4.7 สารดูดซับแต่ละชนิด ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยการเอิบซุ่ม
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของสารดูดซับซีโอไลตชนิดเอ (3A, 4A, 5A) และซีโอไลตชนิดเอ (3A, 4A, 5A) ที่ผ่านการปรับสภาพโดยการเอ็บซุ่มด้วยลิเทียมคลอไรด์ (LiCl), โพลีเอททิลีนไอมิน(PEI)

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ของสารดูดซับถูกวิเคราะห์จากความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของสารดูดซับ เพื่อตรวจหาความเปลี่ยนแปลงในความสามารถการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของสารดูดซับหลังจากถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์และสารละลายโพลีเอททิลีนไอมิน โดยมีขั้นตอนการสารละลายสำหรับการใช้ในการทดสอบดังนี้

4.3 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ชุดทดลองถูกประกอบขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของสารดูดซับแต่ละชนิด ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองสารดูดซับ

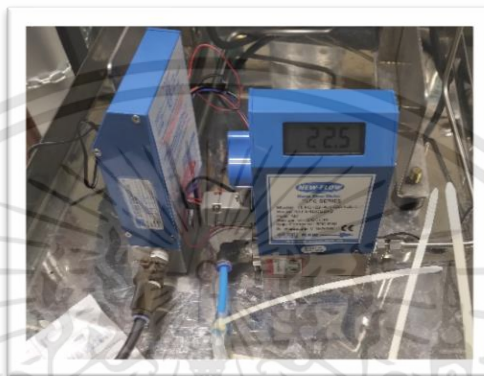
โดยชุดทดลองประกอบไปด้วยอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

- ถังบรรจุแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ ประกอบด้วย
 - แก๊สชีวภาพสังเคราะห์ (CO_2 คาร์บอนไดออกไซด์ 37%, CH_4 มีเทน 52%, N_2 ไนโตรเจน 11% และ H_2S ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 105 มิลลิกรัมต่อลิตร), (Lab Gas Co.,Ltd Thailand)
 - แก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99%, (Lab Gas Co.,Ltd Thailand)
 - แก๊สฮีเลียม ความบริสุทธิ์ 99.99%, (Lab Gas Co.,Ltd Thailand)

ทุกถังติดตั้งวาล์วควบคุมแรงดันแบบมีเกจบอกความดันที่หัวถัง

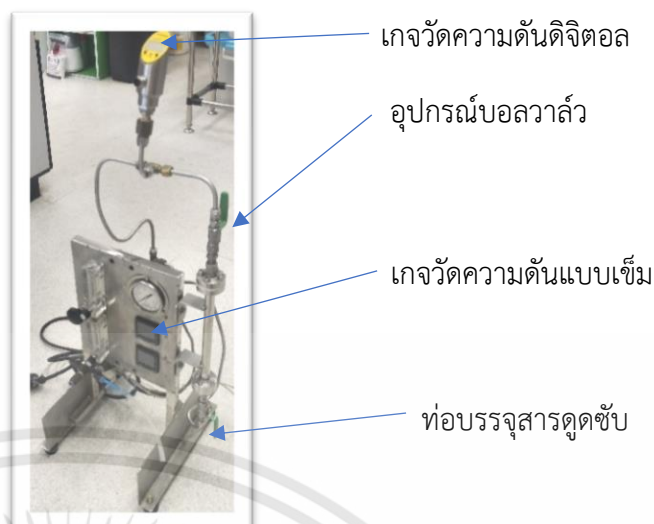
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเข้า เป็นอุปกรณ์ที่จะทำหน้าที่ในการนำสัญญาณที่ได้จากอัตราการไหลของแก๊สมาแสดงเพื่อให้ทราบค่าที่แก๊สผ่านได้ โดยสามารถควบคุมปริมาณเมื่อต่อร่วมกับชุด Control และ Valve และควบคุมอัตราการไหล เมื่อต่อร่วมกับ Control, Valve และ Inverter เพื่อทำการปรับอัตราการไหลโดยการควบคุมรอบของ Pump ได้ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเข้า

3. บอลวาล์วแบบเปิด-ปิดด้วยมือ ก่อนทางเข้าท่อบรรจุสารดูดซับ
4. เกจวัดความดันทางเข้าท่อบรรจุสารดูดซับ
5. ท่อบรรจุสารดูดซับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 12 มิลลิเมตร
6. เกจวัดความดันทางออกท่อบรรจุสารดูดซับ
7. วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางออก
8. บอลวาล์วแบบเปิด-ปิดด้วยมือ หลังทางออกท่อบรรจุสารดูดซับ



รูปที่ 4.10 อุปกรณ์บอลวาล์ว, เกจวัดความดัน และท่อบรรจุสารดูดซับ

9. ถังสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊ส ถังเก็บตัวอย่างอากาศชนิด Dual valve มีวาล์วชนิด PTFE คุณภาพสูง ป้องกันการรั่วไหลของอากาศที่เก็บในถังมี O-ring ซีลป้องกันการปนเปื้อน มีวาล์วแยกเปิด-ปิด และ septum สำหรับดูดตัวอย่างไปยังเครื่องมือวิเคราะห์ต่อไป ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ถังสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊ส

10. อุปกรณ์วัดความเข้มข้นแก๊ส (Biogas 5000) เป็นเครื่องวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพทั้งแบบพกพา ผลิตภัณฑ์ Geotech จากประเทศอังกฤษ ซึ่งเครื่องมือวิเคราะห์นี้เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานในด้านการตรวจปริมาณก๊าซมีเทนและองค์ประกอบอื่น ๆ จากกระบวนการ Anaerobic Digestion ก่อนนำก๊าซไปใช้ การหาประสิทธิภาพของระบบกำจัด H_2S โดยการวัดก่อนและหลังผ่านกระบวนการ และยังสามารถตรวจวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่อาจรั่วไหลจากบ่อหมัก ตรวจวัดก๊าซพิษ เช่น NH_3 ในกระบวนการย่อยสลายเศษอาหารได้ และในกระบวนการอื่น ๆ อีกมากมายที่เกี่ยวข้อง สามารถวัดค่าก๊าซออกซิเจน (O_2), มีเทน (CH_4), คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ช่วงการวัด CH_4 0-100%, CO_2 0-100%, O_2 0-25%, H_2 0-1,000 ppm, NH_3 0-1,000ppm และ H_2S 0-500 ppm, 0-5000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ppm, 0-10,000 ppm บันทึกได้ 500 ดังรูปที่ 4.12 และเปรียบเทียบกับผลทดสอบจากเครื่อง Gas Chromatography (GC)



รูปที่ 4.12 อุปกรณ์วัดความเข้มข้นแก๊ส (Biogas 5000)

4.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์สารดูดซับ

ตัวอย่างสารดูดซับซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A, 5A และ ตัวอย่างสารดูดซับซีโอไลต์ ชนิด 3A, 4A, 5A ที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายโพลิเอททิลีนไอมิน และสารละลายลิเทียมโครไลต์ จะถูกตรวจสอบคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพโดยใช้เครื่องมือ และวิธีการดังต่อไปนี้

4.4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน: Scanning electron microscope (SEM)

เนื่องจากอิเล็กตรอนมีความยาวคลื่นสั้นกว่าโฟตอนของแสงที่มนุษย์มองเห็นได้ถึง 100,000 เท่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงมีกำลังขยายสูงกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงและสามารถเปิดเผยให้เห็นโครงสร้างของวัตถุที่มีขนาดเล็กมากๆได้ ในงานวิจัยนี้ได้นำมาใช้ในการตรวจสอบรูปร่างของผลึก โดยการส่องขยายที่อัตราการขยาย 10000 เท่า เพื่อบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงและความแตกต่างในลักษณะของผลึก ของตัวอย่างสารดูดซับแต่ละชนิด โดยในที่นี้เครื่องมือที่ใช้คือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน : Scanning electron microscope (SEM), รุ่น LEO 1530 ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

4.4.2 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์: X-rays Diffraction Spectroscopy (XRD)

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบที่สารดูดซับ ทำให้เกิดการสะท้อนและเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ โดยมีเซ็นเซอร์รับแสงคอยวัดมุมตกกระทบ และความเข้มของรังสีเอ็กซ์ในมุมต่างๆ ซึ่งกระบวนการณ์ดังกล่าวจะทำให้ทราบถึงองค์ประกอบ, รูปร่าง และลักษณะผลึกของสารดูดซับ เนื่องจากรูปผลึกหรือรูปร่างที่แตกต่างกัน จะให้มุมสะท้อนและความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันไป โดยในที่นี้เครื่องมือที่ใช้คือ เครื่อง X-rays Diffraction Spectroscopy รุ่น Rigaku Ultima III with $\text{CuK}\alpha$ Radiation ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 เครื่อง X-rays Diffraction Spectroscopy(XRD)

4.4.3 การทดสอบหาปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิว ด้วยกระบวนการ Brunauer–Emmett–Teller (BET)

นำตัวอย่างสารดูดซับแต่ละชนิด ส่งวิเคราะห์ด้วยวิธี Brunauer–Emmett–Teller (BET) เพื่อหาค่าปริมาตรของรูพรุนและพื้นที่ผิว ของสารดูดซับ เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกับประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.15 เครื่อง Brunauer–Emmett–Teller (BET)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 เครื่องมือตรวจวัดส่วนประกอบของแก๊ส Gas Chromatography (GC)

ใช้ในการตรวจวัดส่วนประกอบของแก๊สตัวอย่างที่ได้จากการทดลองประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ชุดทดลองในรูปที่ 4.10 โดยเครื่องที่ใช้จะเป็นรุ่น SHIMADZU GZ-2014 ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว ดังที่แสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.16 เครื่อง Gas Chromatography (GC) ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น GC-2014

4.5 วิธีการทดลองการดูดซับ

จากรูปที่ 4.8 ที่แสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดสอบการดูดซับ แก๊สชีวภาพจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบ ไทลผ่านตัวอย่างสารดูดซับ ซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A, 5A) และ ซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A, 5A) ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วยลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) และโพลีเอททิลีนไอมิน (PEI) ที่ถูกบรรจุอยู่ในคอลัมน์ ซึ่งทำจากวัสดุ สเตนเลส ชนิด 304 เปิดวาล์ว(4) โดยควบคุมอัตราการไหลด้วย Mass Flow Control และเก็บแก๊สขาออกลงในถุงเก็บแก๊ส และวัดคุณภาพแก๊ส CH_4 , CO_2 และ H_2S ขาออกโดยใช้เครื่องมือ Biogas 500 และเครื่อง Gas chromatography(GC)

4.6 การประเมินความคุ้มค่าของสารดูดซับ

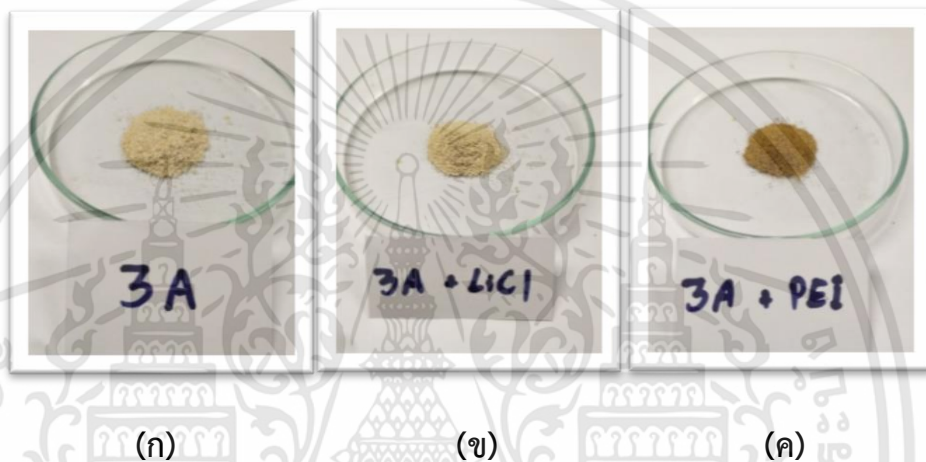
ศึกษาเปรียบเทียบความคุ้มค่าของสารดูดซับ โดยเปรียบเทียบค่าความจุของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของซีโอไลต์ 5A และซีโอไลต์ 5A ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วยโพลีเอททิลีนไอมินที่ใช้ในการทดลอง เปรียบเทียบกับสารดูดซับที่นิยมใช้ทั่วไป ได้แก่ MCM-41 ที่ผ่านการปรับสภาพโดยการเอ็บซุ่มด้วยโพลีเอททิลีนไอมิน

บทที่ 5

ผลการทดลอง และ วิเคราะห์ผล

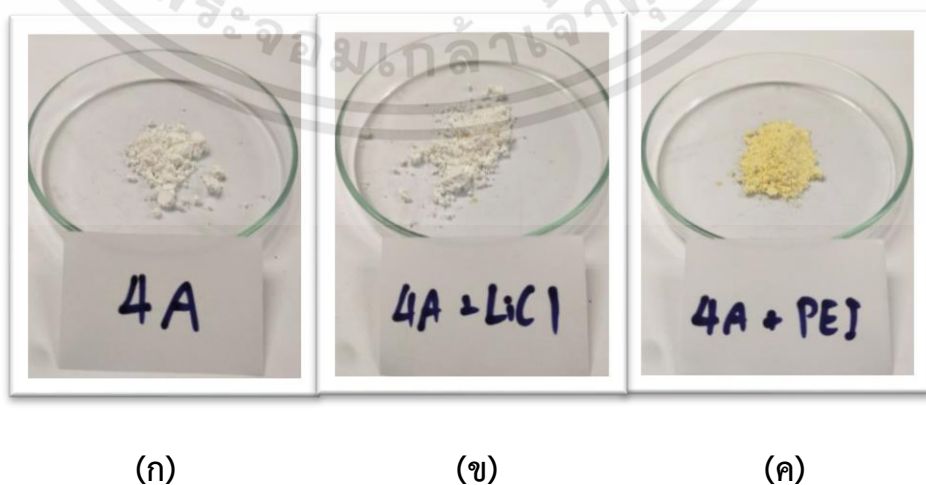
5.1 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A, 5A) และซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A, 5A) ที่ผ่านการปรับสภาพโดยการเอ็บซุ่มด้วยลิเทียมคลอไรด์ (LiCl), โพลีเอททิลีนไอมิน(PEI)

5.1.1 ลักษณะสีของสารดูดซับ



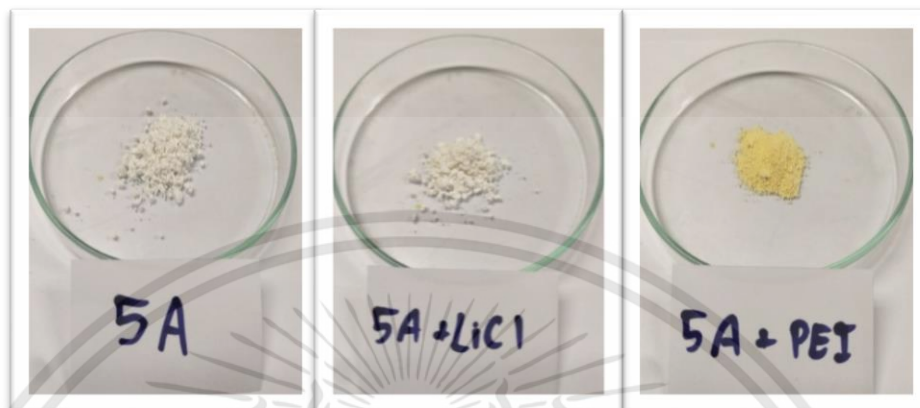
รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ Zeolite 3A(ก), 3A เอ็บซุ่มด้วยLiCl(ข) และ 3A เอ็บซุ่มด้วยPEI (ค)

จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ พบว่า ซีโอไลต์ชนิด 3A มีสีค่อนข้างเหลืองอมน้ำตาล ดังรูปที่ 5.1(ก) เมื่อนำมาเอ็บซุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) พบว่าสีของสารดูดซับตัวอย่างยังคงเป็นสีเหลืองอมน้ำตาลดังรูปที่ 5.1(ข) และเมื่อผ่านการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอททิลีนไอมิน พบว่า จะมีสีน้ำตาลเข้มขึ้น ดังรูปที่ 5.1(ค)



รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ Zeolite 4A(ก), 4Aเอ็บซุ่มด้วยLiCl(ข) และ 4A เอ็บซุ่มด้วย PEI (ค)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารดูดซับซีโอไลต์ชนิด 4A พบว่า ซีโอไลต์ชนิด 4A เป็นผงสีขาวดังรูปที่ 5.2(ก) เมื่อนำมาเอ็บชุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) พบว่าได้สีของสารดูดซับตัวอย่างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และยังคงเป็นสีขาวเช่นเดิมดังรูปที่ 5.2(ข) และเมื่อผ่านการเอ็บชุ่มด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน พบว่า จะมีสีเหลืองเด่นชัด ดังรูปที่ 5.2(ค)



(ก)

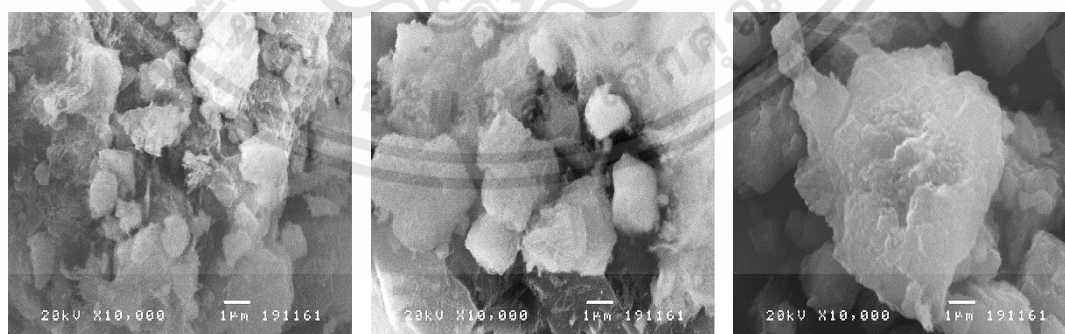
(ข)

(ค)

รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายผลิตภัณฑ์ Zeolite 5A(ก), 5Aเอ็บชุ่มด้วย LiCl(ข) และ 5A เอ็บชุ่มด้วยPEI (ค)

จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารดูดซับซีโอไลต์ชนิดต่างๆ พบว่า ซีโอไลต์ชนิด 5A เป็นผงสีขาวดังรูปที่ 5.3(ก) เมื่อนำมาเอ็บชุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) พบว่าได้สีของสารดูดซับตัวอย่างไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และยังคงเป็นสีขาวเช่นเดิมดังรูปที่ 5.3(ข) และเมื่อผ่านการเอ็บชุ่มด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน พบว่า จะมีสีเหลืองเด่นชัด ดังรูปที่ 5.3(ค)

5.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



(ก)

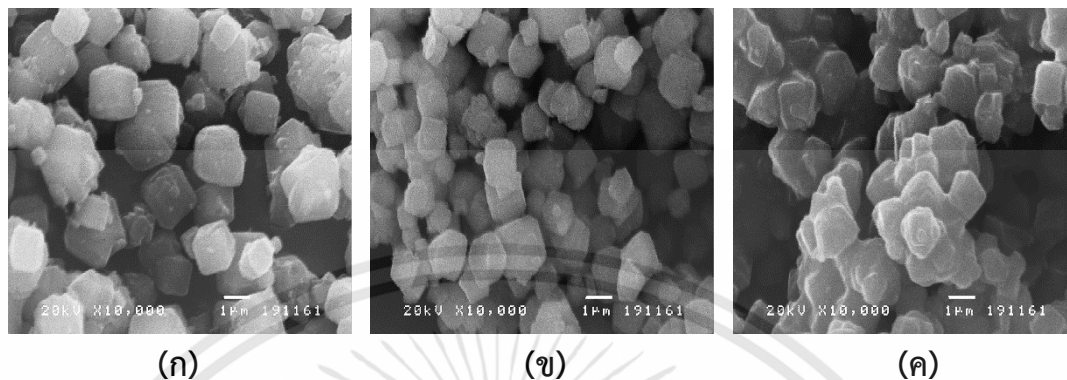
(ข)

(ค)

รูปที่ 5.4 ผลึกของ ซีโอไลต์ 3A กับ ซีโอไลต์ 3A ที่เอ็บชุ่ม LiCl(ก) และ PEI(ข)

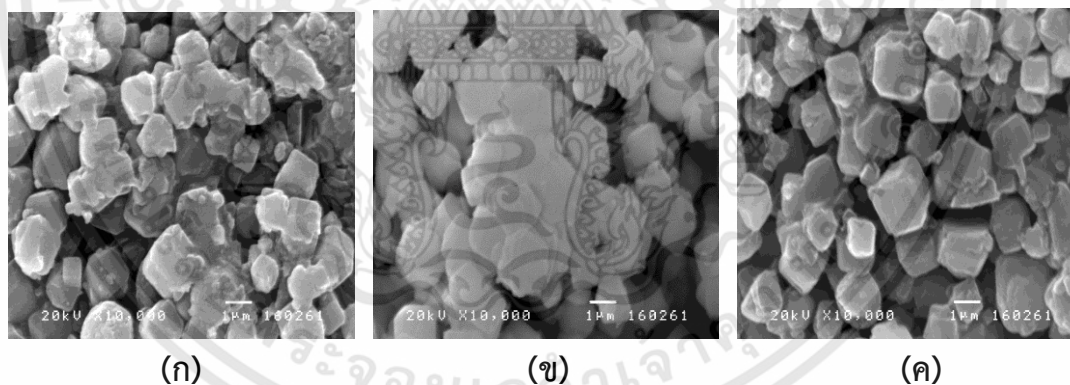
จากรูปที่ 5.4(ก) พบว่าพื้นผิวของซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 3A มีลักษณะรูปทรงลูกบาศก์แต่ไม่เด่นชัด และวัดขนาดได้ 0.8 ไมครอน เมื่อผ่านขั้นตอนการเอ็บชุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 5.4(ข) พบว่าขนาดของผลึกซีโอไลต์มีขนาด 1.2 ไมครอน ในขณะที่ซีโอไลต์ชนิด 3A ที่เอิบชุ่มด้วยสารละลายโพลีเอททิลีนไอมิน(PEI) ดังรูปที่ 5.4(ค) พบว่าเกิดการเกาะกลุ่มกันของผลึก สามารถวัดขนาดได้ 1.6 ไมครอน



รูปที่ 5.5 ผลึกของ ซีโอไลต์ 4A กับ ซีโอไลต์ 4A ที่เอิบชุ่ม LiCl(ก) และ PEI(ข)

จากรูปที่ 5.5(ก) พบว่าพื้นผิวของซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 4A มีลักษณะรูปทรงลูกบาศก์อย่างเด่นชัด และวัดขนาดได้ 0.8 ไมครอน เมื่อผ่านขั้นตอนการเอิบชุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) ดังรูปที่ 5.5(ข) พบว่าขนาดของผลึกซีโอไลต์มีขนาด 1.3 ไมครอน ในขณะที่ซีโอไลต์ชนิด 4A ที่เอิบชุ่มด้วยสารละลายโพลีเอททิลีนไอมิน(PEI) ดังรูปที่ 5.5(ค) พบว่าเกิดการเกาะกลุ่มกันของผลึก สามารถวัดขนาดได้ 1.6 ไมครอน

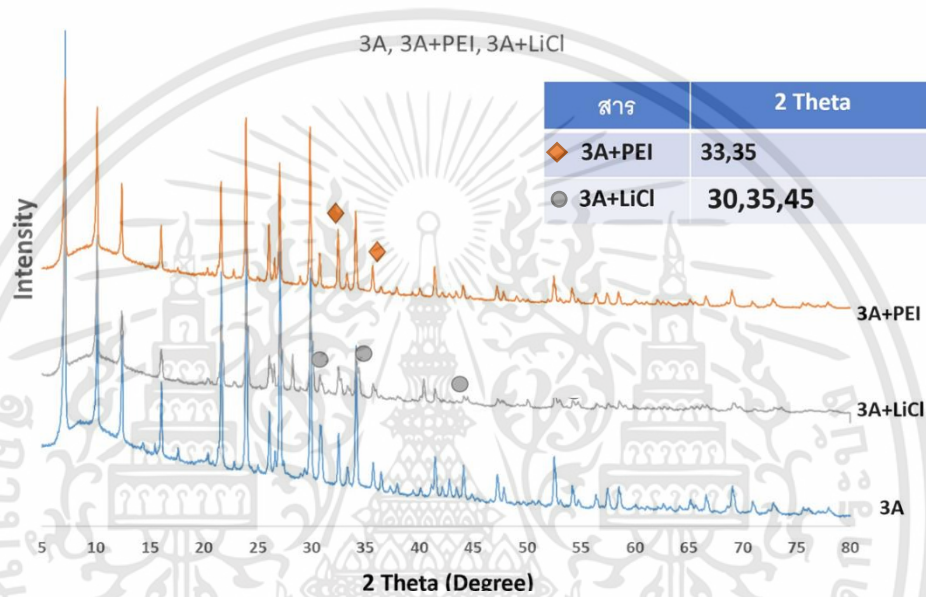


รูปที่ 5.6 ผลึกของ ซีโอไลต์ 5A กับ ซีโอไลต์ 5A ที่เอิบชุ่ม LiCl(ก) และ PEI(ข)

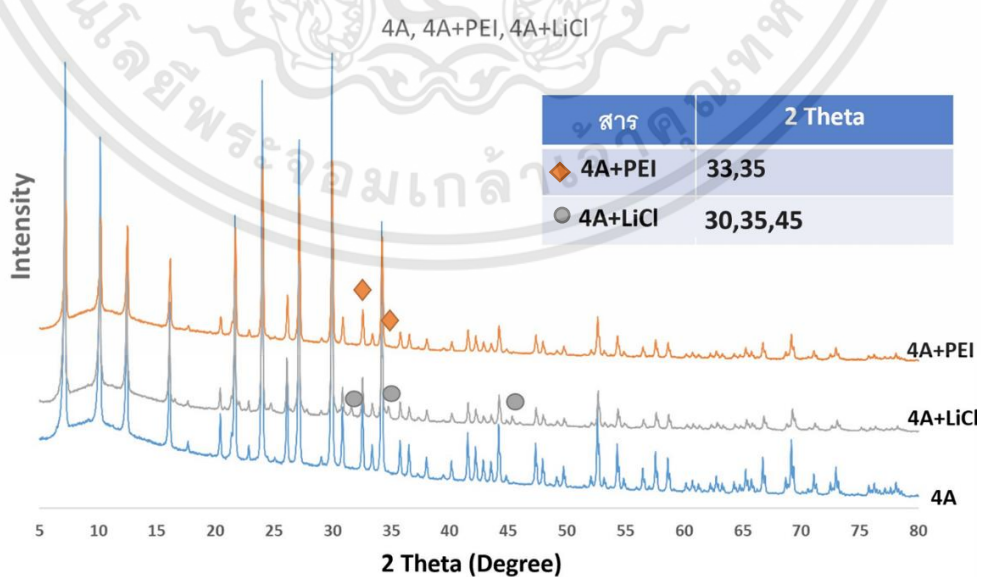
จากรูปที่ 5.6(ก) พบว่าพื้นผิวของซีโอไลต์มาตรฐานชนิด 5A มีลักษณะรูปทรงลูกบาศก์ค่อนข้างเด่นชัด และวัดขนาดได้ 1.3 ไมครอน เมื่อผ่านขั้นตอนการเอิบชุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) ดังรูปที่ 5.6(ข) พบว่าเกิดการเกาะกลุ่มกันของผลึก โดยมีขนาดของผลึกซีโอไลต์อยู่ที่ 1.5 ไมครอน ในขณะที่ซีโอไลต์ชนิด 5A ที่เอิบชุ่มด้วยสารละลาย โพลีเอททิลีนไอมิน(PEI) ดังรูปที่ 5.6(ค) สามารถวัดขนาดได้ 1.6 ไมครอน

5.1.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction(XRD)

จากการทดสอบ ชนิด สารประกอบซีโอไลต์ ชนิด 3A, 4A และ 5A โดยการเอ็บซุ่มด้วย สารละลาย ชนิด ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) พบว่า มีตำแหน่งของลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ปรากฏที่มุม 2theta เท่ากับ 30, 35, 45 และ โพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) ปรากฏที่มุม 2theta เท่ากับ 33, 35 ดังแสดงใน รูปที่ 5.7, รูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 จากผลการศึกษา พบว่าขั้นตอนการเติม ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) ด้วยกระบวนการเอ็บซุ่ม สามารถปรับปรุง คุณสมบัติซีโอไลต์ชนิดเอ ได้ โดยสามารถตรวจสอบพบตำแหน่งลิเทียมคลอไรด์(LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน(PEI) ภายหลังจากการเอ็บซุ่ม

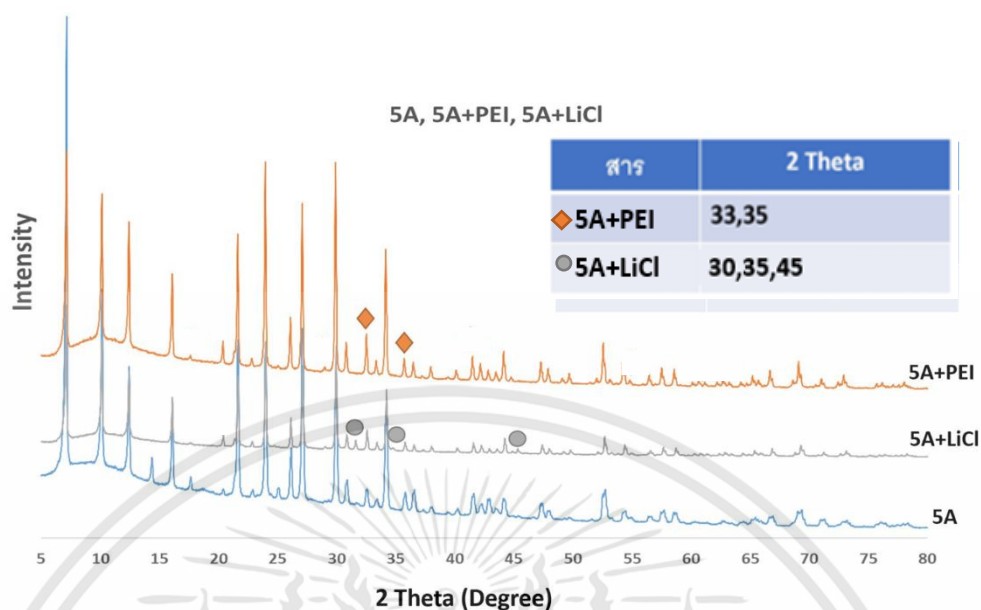


รูปที่ 5.7 ผลการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน(PEI) ของซีโอไลต์ ชนิด 3A



รูปที่ 5.8 ผลการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน(PEI) ของซีโอไลต์ ชนิด 4A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.9 ผลการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) ของซีโอไลต์ชนิด 5A

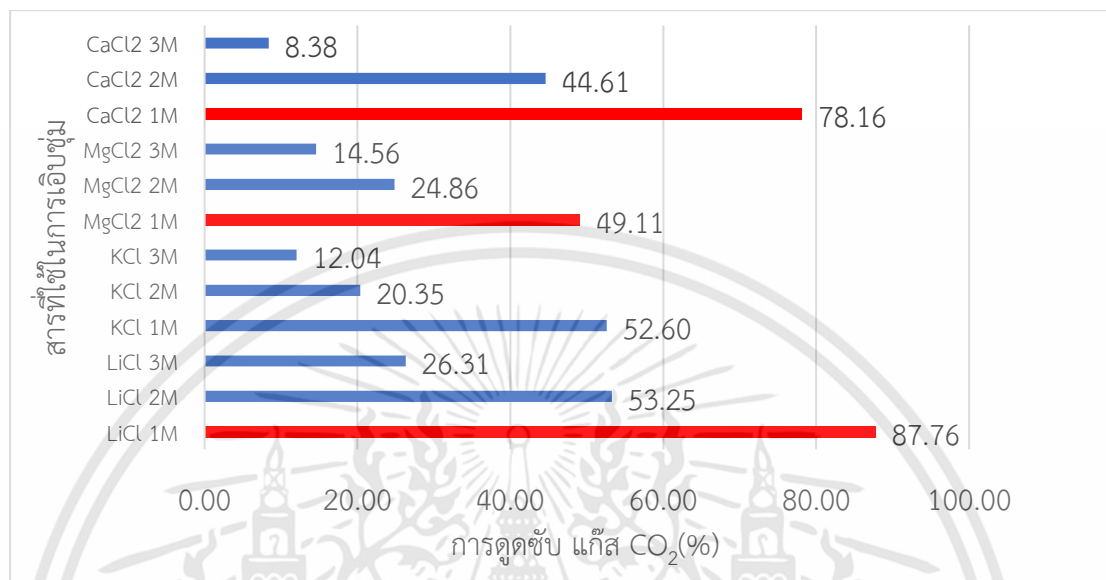
5.2 ผลการทดสอบทางเคมีของ ซีโอไลต์ 3A, 4A, 5A และซีโอไลต์ 3A, 4A, 5A ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอทิลีนไอมิน

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุ Calcium exchange capacity (CEC) ของซีโอไลต์ 3A, 4A, 5A และซีโอไลต์ 3A, 4A, 5A ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอทิลีนไอมิน โดยได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุของสารดูดซับซีโอไลต์ชนิดเอ

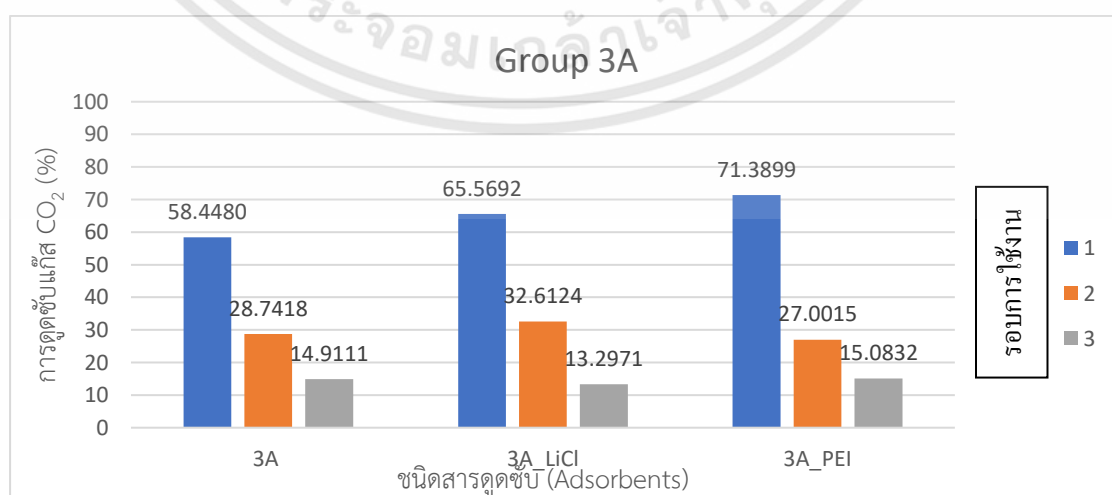
ตัวอย่างสารดูดซับ	มวลก่อนเผาไหม้ (กรัม)	มวลหลังเผาไหม้ (กรัม)	ค่าสูญเสียจากเผาไหม้ (ร้อยละ)	CEC
5A	0.5005	0.4978	0.539461	251.5822
5A+LiCl	0.5006	0.4902	2.077507	442.9251
5A+PEI	0.5004	0.4087	18.32534	592.3114
4A+PEI	0.5014	0.3950	21.22058	804.656
3A+PEI	0.5005	0.4414	11.80819	529.6259

5.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของซีโอไลต์ 3A, 4A, 5A และซีโอไลต์ 3A, 4A, 5A ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการเอิบซุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอททิลีนไอมิน



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บน Zeolite 4A ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วยสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน

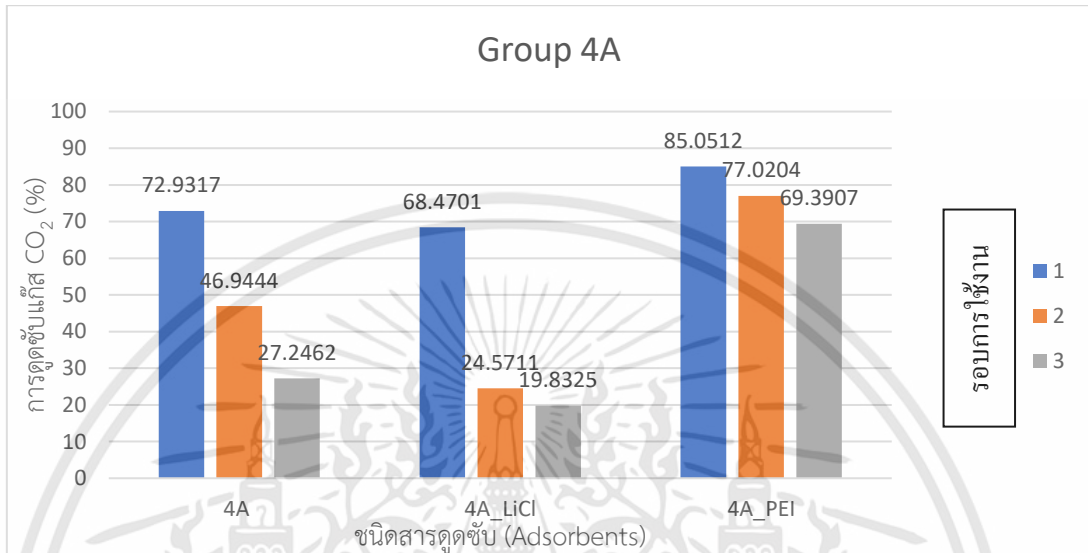
จากผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดย ซีโอไลต์ ชนิด 4A ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วยสารละลายคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ได้แก่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์(CaCl₂), สารละลายแมกนีเซียมคลอไรด์(MgCl₂), สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์(KCl) และสารละลาย ลิเทียมคลอไรด์(LiCl) ที่มีความเข้มข้น 1, 2 และ 3 โมลต่อลิตร พบว่า สารดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการเอิบซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร สามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงสุด ซึ่งไม่น้อยกว่า ร้อยละ 87 ดังรูปที่ 5.10 จึงเลือกนำสารละลายลิเทียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรมาใช้ในการปรับสภาพ ซีโอไลต์ชนิดเอ



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บน Zeolite 3A

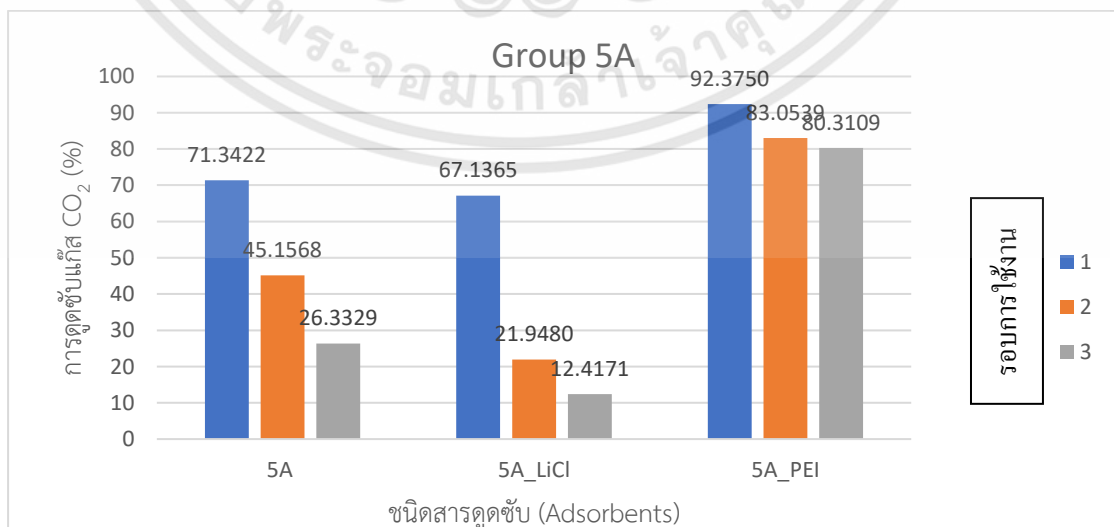
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดย ซีโอไลต์ ชนิด 3A ที่ผ่านการเอิบชุ่มด้วยสารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน (PEI) พบว่าสามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 71 ซึ่งมากกว่า ซีโอไลต์ 3A และซีโอไลต์ 3A ที่ผ่านการเอิบชุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) ซึ่งสามารถกำจัดแก๊สได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 58 และ 65 ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บน Zeolite 4A

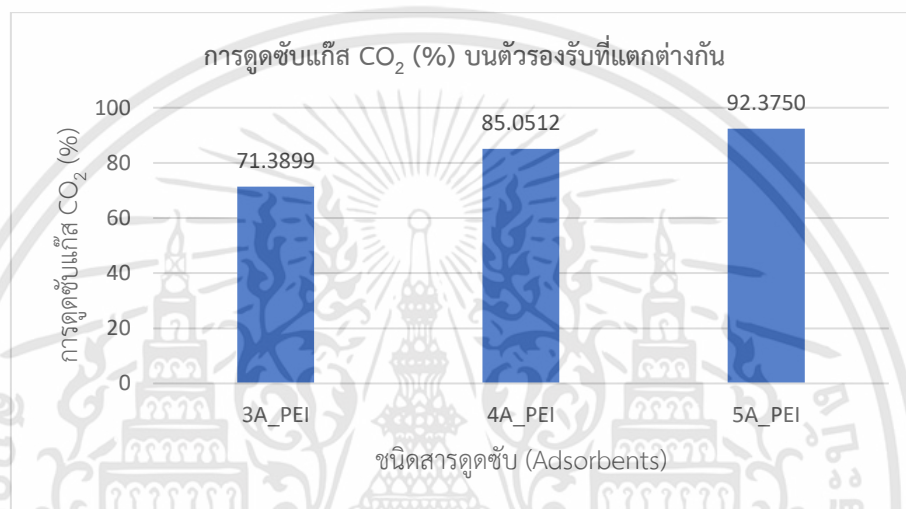
จากผลการทดสอบดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดย ซีโอไลต์ ชนิด 4A ที่ผ่านการเอิบชุ่มด้วยสารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน(PEI) พบว่าสามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ซึ่งมากกว่า ซีโอไลต์ 4A และซีโอไลต์ 4A ที่ผ่านการเอิบชุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) ซึ่งสามารถกำจัดแก๊สได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 72 และ 68 ตามลำดับ อีกทั้งยังมีอัตราการเสื่อมสภาพน้อยน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ 4A และซีโอไลต์ 4A ที่เอิบชุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเอิบชุ่มด้วยสารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน(PEI) สามารถเพิ่มค่าการนำกลับมาใช้ใหม่ของสารดูดซับได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 5.12



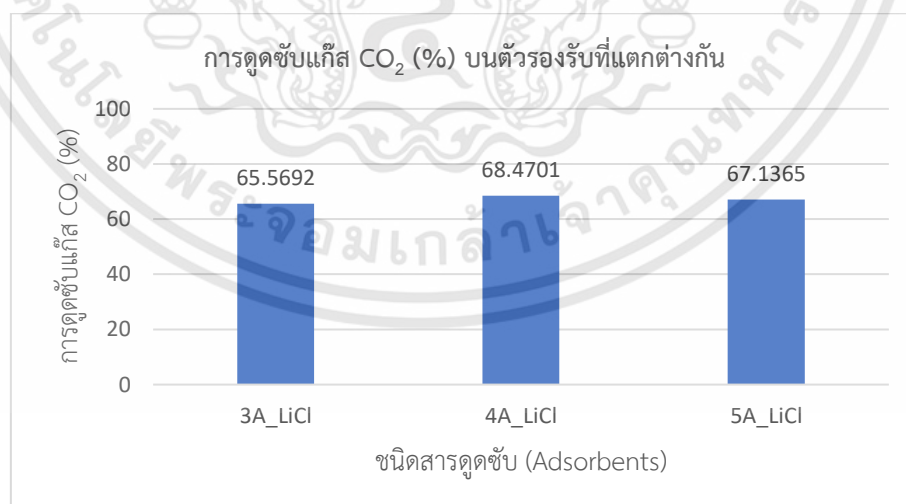
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บน Zeolite 5A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ซีโอไลต์ ชนิด 5A ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน (PEI) สามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 92 ซึ่งมากกว่า ซีโอไลต์ 5A และซีโอไลต์ 5A ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ซึ่งสามารถกำจัดแก๊สได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 71 และ 67 ตามลำดับ อีกทั้งยังมีอัตราการเสื่อมสภาพน้อยที่สุด โดยสามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 83 ในรอบที่สอง และ 80 ในรอบที่สาม ตามลำดับ เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ 5A และซีโอไลต์ 5A ที่เอิบซุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน (PEI) สามารถเพิ่มค่าการนำกลับมาใช้ใหม่ของสารดูดซับได้ ดังที่แสดงในรูปที่ 5.13



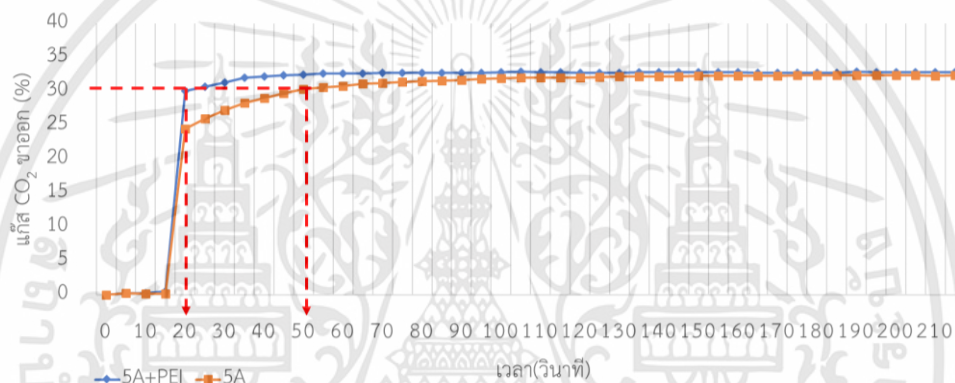
รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารดูดซับซีโอไลต์ ชนิด A (3A, 4A และ 5A) ที่เอิบซุ่มสารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน



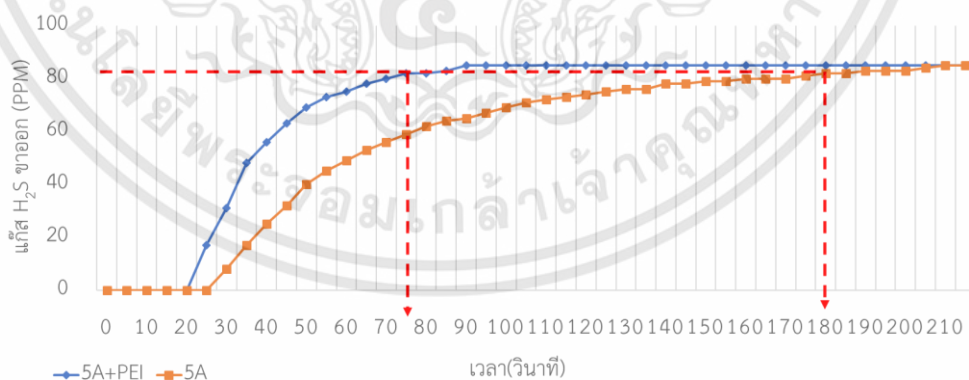
รูปที่ 5.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารดูดซับซีโอไลต์ ชนิด A (3A, 4A และ 5A) ที่เอิบซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์

จากผลการเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ บนสารดูดซับที่ผ่านการปรับสภาพด้วยกระบวนการเอ็บซุ่ม บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเอ ในรูปที่ 5.11, รูปที่ 5.12 และ รูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นว่า ซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A และ 5A ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายโพลีเอททิลีนไอมิน สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงที่สุด โดยที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้กว่าร้อยละ 71, 85 และ 92 ตามลำดับ ดังที่แสดงในรูปที่ 5.14 แต่กลับพบการลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับเมื่อเอ็บซุ่มด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์(LiCl) บน ซีโอไลต์ชนิด 4A และ 5A ซึ่งสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 68 และ 67 ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ยังคงมีประสิทธิภาพสูงกว่าซีโอไลต์ชนิด 3A ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วยลิเทียมคลอไรด์(LiCl) ด้วยเช่นกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 5.15

จาก รูปที่ 5.14 ซึ่ให้เห็นว่าซีโอไลต์ชนิด 5A ที่ปรับสภาพโดยการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอททิลีนไอมิน มีประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดอื่น เนื่องจากขนาดช่องรูพรุนของซีโอไลต์ชนิด 5A มีค่าใกล้เคียงกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



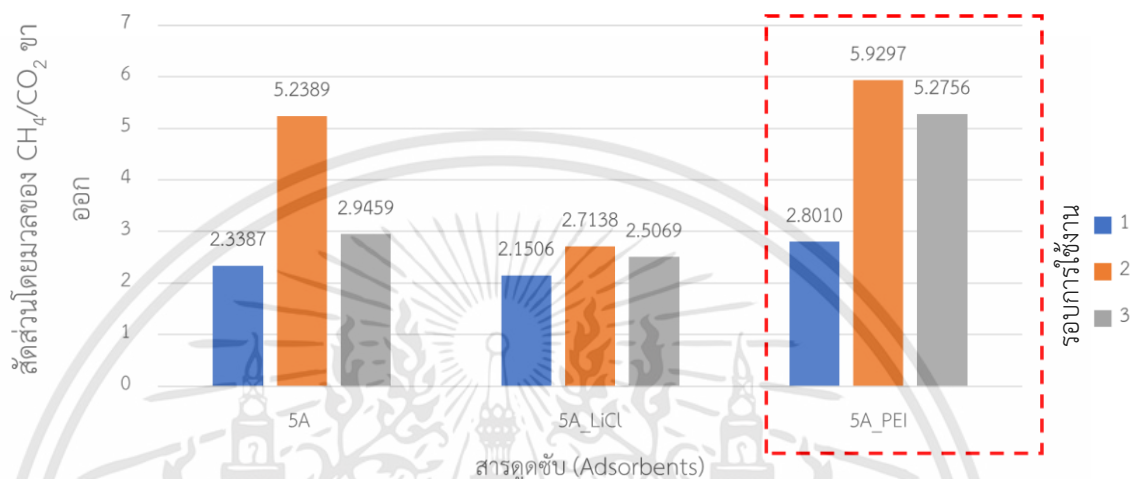
รูปที่ 5.16 เปรียบเทียบปริมาณแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองสารดูดซับซีโอไลต์ 5A และ ซีโอไลต์ 5A ที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่ม สารละลายโพลีเอททิลีนไอมิน



รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบปริมาณแก๊ส ไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากผลการทดลองสารดูดซับซีโอไลต์ 5A และ ซีโอไลต์ 5A ที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่ม สารละลายโพลีเอททิลีนไอมิน

จาก รูปที่ 5.16 และรูปที่ 5.17 ซึ่ให้เห็นถึงการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้สารละลายโพลีเอททิลีนไอมิน ต่อการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ประสิทธิภาพจากค่า

Breakthrough ที่ร้อยละ 80 พบว่าการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมินให้เวลาการดูดซับเข้าสู่สมดุล (t_e) สำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 20 วินาที และสำหรับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ คือ 75 วินาที ในส่วนขอซีโอไลต์ชนิด 5A แบบมาตรฐาน ได้เวลาการดูดซับเข้าสู่สมดุล (t_e) สำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 50 วินาที และสำหรับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ คือ 180 วินาที เนื่องจากการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน ที่มีปริมาณมากเกินไป อาจส่งผลให้ช่องว่างของซีโอไลต์ชนิด 5A ที่ผ่านการเอิบซุ่มลดลง



รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สมิเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากการทดลองสารดูดซับ กลุ่มซีโอไลต์ 5A

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพและซีโอไลต์ชนิด 5A ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมินสามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ และไม่ส่งผลต่อการกำจัดแก๊สมิเทน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ซีโอไลต์ชนิด 5A ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการเอิบซุ่มสารละลาย โพลีเอทิลีนไอมิน มีความเหมาะสม และสามารถนำมาใช้ในการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพได้ดังรูป 5.18

5.4 ผลการประเมินความคุ้มค่า

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบราคา และ ความจุในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ของสารดูดซับ Zeolite 5A, 5A+PEI และ MCM-41 + PEI

สารดูดซับ	ความจุในการดูดซับ CO ₂ (โมล/กรัมสารดูดซับ)	ราคา (USD)
Zeolite 5A	0.0064	2.5
Zeolite 5A + PEI	0.0084	7.5
Zeolite MCM-41 + PEI	0.0112	125

จากตารางที่ 5.2 ชี้ให้เห็นว่า ซีโอไลต์ 5A ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมินมีค่าความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ 0.0084 โมลต่อกรัมสารดูดซับ และ MCM-41 ที่เอิบซุ่มสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซุ่มด้วยสารละลายโพลิเอททีลีนไอมินมีค่าความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ 0.0112 ซึ่ง ซีโอไลต์ 5A ที่เอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลิเอททีลีนไอมิน นั้นมีประสิทธิภาพน้อยกว่าร้อยละ 25 แต่จากการศึกษาด้านราคา พบว่า ซีโอไลต์ 5A ที่เอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลิเอททีลีนไอมินมีราคาน้อยกว่า MCM-41 ที่เอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลิเอททีลีนไอมินประมาณ 17 เท่า ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ซีโอไลต์ 5A ที่เอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลิเอททีลีนไอมิน สามารถนำมาใช้เป็นสารดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ทดแทน MCM-41 ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Sayari, A., Belmabkhout, Y. 2010. Stabilization of amine-containing CO₂ adsorbents: dramatic effect of water vapor. *Journal of the American Chemical Society* 132, 6312-6314
- [2] Sayari, A., Heydari-Gorji, A. 2012. CO₂-induced degradation of amine-containing adsorbents: reaction products and pathways. *Journal of the American Chemical Society* 134, 13834-13842
- [3] Heydari-Gorji, A., Sayari, A. 2012. Thermal, oxidative, and CO₂ - induce degradation of supported polyethylenimine adsorbent. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 51, 6887-6894
- [4] Xu, X., Song, C., Anderesen, J. M., Miller, B. G., Scaroni, A. W. 2004. Preparation and characterization of novel CO₂ 'molecular basket' adsorbent base on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM41. *Microporous and Mesoporous Materials* 62, 29-45
- [5] Zhang, L., Zhan, N., Jin, Q., Liu, H., Hu, J. 2016. Impregnation of polyethylenimine in Mesoporous Multilamellar Silica Vesicles of CO₂ Capture: A Kinetic Study. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 55, 5885-5891
- [6] Chen, Z., Deng, S., Wei, H., Wang, B., Huang, J., Yu, G. 2013. Polyethylenimine-Impregnated Resin for High CO₂ Adsorption: An Efficient Adsorbent for CO₂ Capture from Simulated Flue Gas and Ambient Air. *Applied Materials and Interfaces* 5, 6937-6945
- [7] Supasinee, P., Pramoch, R., Santi, K. 2013. Towards CO₂ Adsorption Enhancement via Polyethyleneimine Impregnation. *International Journal of Chemical and Biological Engineering* 6, 291-295



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

METAL WORK

PEA

KU KASETSART UNIVERSITY

TSAE THAILAND 2018

The 11th TSAE International Conference
การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทยระดับชาติ ครั้งที่ 19
26-27 APRIL 2018
Chulabhorn International Convention Center
(Wora Wana Hua Hin Hotel & Convention)
Hua Hin, Prachuap Khiri Khan, Thailand

วิศวกรรมเกษตร
เปิดแนวคิดวิศวกรรมสู่การเกษตรแนวใหม่
AGRICULTURAL ENGINEERING
Imagineering Novel Agriculture

Topics of Oral and Poster Presentation

- Power and machinery
- Soil and water engineering
- Post-harvest and food engineering
- Structures and buildings
- Agricultural systems
- Electronics and information technology
- Energy and environment

รูปที่ ผก1 หน้าปกวารสารทางวิชาการที่ลงตีพิมพ์บทความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	สารบัญ (Content)	Page
NE06-06	การศึกษาการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากความร้อนเหลือทิ้งโดยใช้ชุดผลิตไฟฟ้าจากความร้อนขนาดเล็ก	195
NE07-07	การเปรียบเทียบการให้พลังงานสำหรับการตัดแบบแพนดูลัมโดยการปรับมุมใบมีดสำหรับกระบวนการตัดกล้วยน้ำว้า	199
NE08-26	การศึกษาปัจจัยเบื้องต้นในการลดความชื้นข้าวเปลือกในชุดอุปกรณ์ลำเลียงโดยใช้ไอเสียเครื่องยนต์	204
NE09-27	ผลของรูปร่างชิ้นกล้วยในการอบแห้งเพื่อการผลิตแป้งกล้วย	208
NE10-28	การศึกษาพารามิเตอร์ของการให้ความร้อนด้วยคลื่นวิทยุสำหรับกระบวนการต่อเนื่อง	212
NE11-42	ผลของความสูงทอร์ฟลักซ์ต่อปริมาณผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสกากยางเหนียวของน้ำมันยางนา	216
NE12-43	การประเมินผลกระทบจากการใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืชในนาข้าวและสิ่งแวดล้อมในจังหวัดนครปฐม ประเทศไทย	220
NE13-44	การทำแก๊สชีวภาพบริสุทธิ์โดยการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยซีโอไซด์ชนิดเอและซีโอไซด์ชนิด เอ ที่ผ่านการปรับปรุงโดยกระบวนการเอ็บซุ่ม	226
NE14-45	การไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ	232
	กลุ่มเครื่องจักรกลก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว	
NM01-08	การศึกษาและพัฒนาเครื่องอัดวัสดุเพาะเห็ดจากเศษเปลือกฝักข้าวโพดแบบก้อนยาว	238
NM02-09	วิจัยและพัฒนาเครื่องใส่ปุ๋ยตามค่าวิเคราะห์ดินแบบแยกถังปุ๋ยสำหรับอ้อย	245
NM03-10	การเพิ่มประสิทธิภาพการรีดน้ำอ้อยโดยการออกแบบชุดรีดและหาความเร็วรอบที่เหมาะสม	250
NM04-11	อุปกรณ์วัดการแข็งตัวของก้อนยางพาราที่เหมาะสมสำหรับการรีดขึ้นรูป	257
NM05-12	การศึกษาและการพัฒนาเครื่องคัดแยกเมล็ดพันธุ์ปลอมปนสำหรับข้าวโพดหวาน	261
NM06-13	การหาแรงดันของดินสำหรับไถดินดานชนิดขาโค้งด้วยโปรแกรมทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	265
NM07-14	การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการถนอมมันสำปะหลัง	270
NM08-35	การกำหนดกลไกและระบบส่งกำลังในเครื่องจักรผลิตวัสดุผงหลังจากจากหญ้าแฝก	275
NM09-36	เครื่องขึ้นรูปพลาสติกแบบหมุนเคลื่อนที่ สำหรับกลุ่มสถานประกอบการเกษตรขนาดกลางและขนาดย่อม	281
NM10-37	การทดสอบชุดปลุกของเครื่องปลุกมันสำปะหลังแบบเปิดร่อง	284
NM11-38	การศึกษาและออกแบบเครื่องคัดขนาดผลมะพร้าว	289
NM12-39	ผลของอุณหภูมิและความชื้นอากาศป้อนเข้าที่มีต่อสมรรถนะของเครื่องยนต์เอนกประสงค์ขนาดเล็ก	293
NM13-40	การพัฒนาชุดปอกเปลือกขึ้นมะม่วงทอง	299
NM14-41	การศึกษาผลของมุมหลบบริเวณส่วนตรงใบมีดที่มีต่อพลังงานการไถพรวนจำเพาะ	303

รูปที่ ผก2 สารบัญวารสารทางวิชาการที่ลงตีพิมพ์บทความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้ชีวภาพบริสุทธิ์โดยการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยซีโอไลต์ชนิดเอและซีโอไลต์ชนิดเอ ที่ผ่านการปรับปรุงโดยกระบวนการเอ็บซุ่ม

Biogas Purification by CO₂ and H₂S Removal with Type-A and Impregnated Type-A Zeolites

พลฤกษ์ วงศ์พาณิชย์^{1,2}, พงษ์เจต พรหมวงศ์^{1*}, เรวดี อนุวัฒนา²

Pleuk Vongpanit^{1,2}, Pongjet Promvongse^{1*}, Rewadee Anuwattana²

¹สาขาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 10520

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand

²สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.), ปทุมธานี, 12120

²Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Pathumthani, 12120, Thailand

*Corresponding author: Tel: +66-8-1633-2856, E-mail:kppongje@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเกี่ยวข้องกับการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพสังเคราะห์โดยการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกไปด้วยการใช้ซีโอไลต์ชนิดเอ (ซีโอไลต์ 3A, 4A และ 5A) และซีโอไลต์ชนิดเอที่ผ่านการปรับปรุงสภาพโดยการเอ็บซุ่ม กระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพก็เพื่อให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านความร้อน, การนำไปใช้ผลิตไฟฟ้า และเชื้อเพลิงใช้ในการขนส่ง การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ซีโอไลต์-A (3A, 4A และ 5A) และ ซีโอไลต์-A ที่ผ่านการปรับปรุงโดยการเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย (ลิเทียมคลอไรด์และโพลีเอทิลีนไอมิน) กระทำในแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ (คาร์บอนไดออกไซด์ 37%, มีเทน 52%, ไนโตรเจน 11% และไฮโดรเจนซัลไฟด์ 105 มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และ ค่าการเลือกการดูดซับแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าซีโอไลต์-5A เอ็บซุ่มด้วยสารโพลีเอทิลีนไอมิน เป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และมีสัดส่วนการเลือกมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สูงสุด

คำสำคัญ: การดูดซับ, สารดูดซับ, แก๊สชีวภาพ, คาร์บอนไดออกไซด์, ไฮโดรเจนซัลไฟด์, ลิเทียมคลอไรด์, โพลีเอทิลีนไอมิน

Abstract

The work deals with biogas purification by removing carbon dioxide (CO₂) and hydrogen sulfide (H₂S) using zeolite-A (3A, 4A and 5A) and modified/impregnated zeolite-A. The purification process is to upgrade its conversion efficiency for heat, electricity and vehicle fuel. The comparative study of CO₂ and H₂S adsorption using Zeolite-A (3A, 4A and 5A) and the modified zeolite-A with impregnated solutions (Lithium chloride, LiCl and Polyethylenimine, PEI) is made for the synthetic biogas (37% CO₂, 52% CH₄, 11% N₂ and 105 mg/litre H₂S). The efficiency of CO₂ and H₂S removal and the CH₄/CO₂ selectivity have been investigated. The study shows that PEI-impregnated Zeolite-5A is the best adsorbent for CO₂ and H₂S removal and is considered to be a potential adsorbent due to the highest selectivity of CH₄/CO₂

Keywords: Adsorption, Adsorbent, Bio gas, Carbon Dioxide, Hydrogen Sulfide, Lithium impregnation, Polyethylenimine

1. บทนำ

แก๊สชีวภาพประกอบด้วยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂), มีเทน (CH₄), ไนโตรเจน (N₂) และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จัดเป็นแก๊สที่มีกลิ่นเหม็น และมีคุณสมบัติกัดกร่อนเครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ เมื่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกเผาพร้อมกับแก๊สชนิดอื่นๆ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดมลภาวะทางอากาศ โดยทั่วไปมีเทคโนโลยีกำจัดแก๊ส

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้แก่ กระบวนการดูดซับ โดยการใช้สารละลายชนิดต่างๆ เช่นสารละลายเอมีน ซึ่งปัจจุบันพบว่าไม่ประสบความสำเร็จในการดักจับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นต่ำ อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายสูง การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง (solid adsorbent) จำพวกถ่านกัมมันต์ และ ซีโอไลต์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้ได้รับความสนใจจากนักวิจัยจำนวนมาก เนื่องจากมีอัตราการดูดซับสูง สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และไม่กัดกร่อน จากผลการศึกษาโลหะทรานซิชัน ที่มีคุณสมบัติใน

การเป็นตัวถูกออกซิไดซ์ เช่น Zn, Cu และ Fe มีการนำโลหะเหล่านี้มาปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

ซีโอไลต์เป็นสารดูดซับประเภทหนึ่ง ที่มีโครงสร้างในรูปโซ่เดี่ยวอะลูมิโนซิลิเกต และนิยมนำมาใช้ในการกำจัดแก๊สต่างๆที่มีความเข้มข้นต่ำ Sayari et al. (2010, 2012) สารดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายในกลุ่มเอมีน มีผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดี แม้ในสภาวะความดันต่ำ และมีความการคัดเลือกสูง อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ Heydari-Gorji et al. (2012) ทั้งนี้ สารประกอบที่มีรูพรุนที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน ให้ผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด Song et al. (2003) ได้พัฒนาสารประกอบที่นำสารโพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) โหลดบน SBA-15 และ MCM-41 ซึ่งเรียกว่า โมเลกุลตะกร้า (Molecular Basket) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 87 มิลลิกรัม H₂S ต่อกรัมสารดูดซับ Zhang et al. (2016) ได้พัฒนาสารประกอบซึ่งผ่านการเอ็บซุ่มด้วยสาร โพลีเอทิลีนไอมิน(PEI) ในสารเมโซพอร์ส (MMSV) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผลที่ได้คือสารเมโซพอร์สที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่มสารโพลีเอทิลีนไอมิน มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีขึ้นและในงานวิจัยของ Chen et al. (2013) พบว่าการเอ็บซุ่มสารโพลีเอทิลีนไอมินบนเรซิน สามารถเพิ่มอัตราการดูดซับ และ ความจุในการดูดซับให้แก๊สสารดูดซับได้ งานวิจัยนี้จึงศึกษาเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารดูดซับ ซีโอไลต์ชนิดเอ (3A, 4A และ 5A) โดยใช้สารที่มีคุณสมบัติในการถูกออกซิไดซ์ เช่น ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สไข่เน่าและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมสารดูดซับ ซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A และ 5A

ใช้สารประกอบซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิด (3A, 4A และ 5A) จากบริษัท ไทยซิลิเกต จำกัด เตรียมสารประกอบให้พร้อมใช้งานโดยนำสารประกอบซีโอไลต์ชนิด A ทั้ง 3 ชนิด มาผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อไล่แก๊สปนเปื้อน สารประกอบซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการเตรียมสารแล้ว จะถูกบรรจุลงในภาชนะแก้ว และนำเก็บในตู้ควบคุมความชื้นเพื่อเตรียมการใช้งานต่อไป

2.2 การเตรียมสารดูดซับ ซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A และ 5A

ใช้สารประกอบซีโอไลต์ชนิด 3A, 4A และ 5A จากบริษัท ไทยซิลิเกต จำกัด เตรียมสารประกอบให้พร้อมใช้งานโดยนำสารประกอบซีโอไลต์ชนิด A ทั้ง 3 ชนิด มาผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อไล่แก๊สปนเปื้อน สารประกอบซีโอไลต์ที่ผ่านกระบวนการเตรียมสารแล้ว จะถูกบรรจุลงในตู้ควบคุมความชื้นเพื่อเตรียมการใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา

2.3 กระบวนการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ สารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน

สารละลาย ลิเทียมคลอไรด์ ถูกเตรียมที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และเอ็บซุ่มกับซีโอไลต์ชนิด A (3A, 4A และ 5A) สารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน เตรียมจากการละลายโพลีเอทิลีนไอมิน 20 กรัม ในเอทานอล 40 กรัม และนำมาผสมกับซีโอไลต์ชนิด A โดยวิธีการเอ็บซุ่ม ในอัตราส่วนสารละลายโพลีเอทิลีนไอมินเท่ากับร้อยละ 30 โดยมวล นำตัวอย่างสารดูดซับที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่มสารละลายทั้งสองชนิด มากรองและอบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง และเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์พื้นผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และ ตรวจสอบชนิดผลึกด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)

2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ชุดทดลองถูกประกอบขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของสารดูดซับแต่ละชนิด โดยชุดทดลองจะประกอบไปด้วยถังบรรจุแก๊สชีวภาพสังเคราะห์(1), ติดตั้งวาล์วควบคุมแรงดันแบบมีเกจบอกความดันที่หัวถัง(2), วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางเข้า(3), บอลวาล์วแบบเปิด-ปิดด้วยมือ ก่อนทางเข้าท่อบรรจุสารดูดซับ(4), เกจวัดความดันทางเข้าท่อบรรจุสารดูดซับ(5), ท่อบรรจุสารดูดซับ(6), เกจวัดความดันทางออกท่อบรรจุสารดูดซับ(8), วาล์วควบคุมอัตราการไหลทางออก(9), บอลวาล์วแบบเปิด-ปิดด้วยมือ หลังทางออกท่อบรรจุสารดูดซับ(10), ถังสำหรับเก็บตัวอย่างแก๊ส(11) และ อุปกรณ์วัดความเข้มข้นแก๊ส (Biogas 5000)(12) โดยอุปกรณ์ทั้งหมดถูกประกอบเข้าด้วยกันดังแสดงใน Figure 1

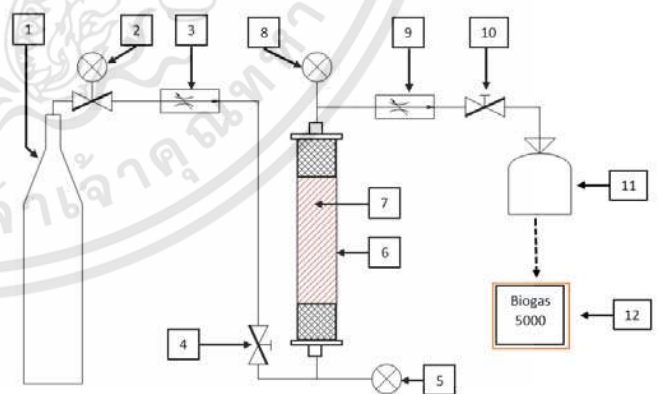


Figure 1 แสดงการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลองสารดูดซับ

3. ผลและวิจารณ์

จากการทดสอบ ชนิด สารประกอบซีโอไลต์ ชนิด 3A, 4A และ 5A โดยการเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย ชนิด ลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) พบว่า มีตำแหน่งของลิเทียมคลอไรด์ (LiCl) ปรากฏที่มุม 2theta เท่ากับ 32 และ โพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) ปรากฏที่มุม 2theta เท่ากับ 19 ดังแสดงใน Figures 2, 3 และ 4 จากผลการศึกษาพบว่าขั้นตอนการเติม ลิเทียมคลอ

ไรต์ (LiCl) และ โพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) ด้วยกระบวนการเอ็บซุ่ม สามารถปรับปรุง ซีโอไลต์-5A ได้

Figures 2, 3 และ 4 ชี้ให้เห็นว่า สารดูดซับ (ได้แก่ ซีโอไลต์-3A, 4A และ 5A) โดยมีองค์ประกอบของ ลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอทิลีนไอมิน โดย โพลีเอทิลีนไอมิน มีคุณสมบัติในการลดอัตราส่วน C-H ซึ่งสามารถเพิ่ม การดูดซับ แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงขึ้น ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Supasinee et al. (2012)

ผลการศึกษารูปพื้นผิวของ ซีโอไลต์-5A ที่ผ่านการเอ็บซุ่มด้วยสารละลาย ลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอทิลีนไอมิน โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่า ลักษณะสัณฐานของซีโอไลต์ 5A จะมีความเป็นผลึกทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งไม่สามารถระบุความแตกต่างระหว่าง ซีโอไลต์-5A และ ซีโอไลต์-5A ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกระบวนการเอ็บซุ่มโดยใช้สารละลาย ลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอทิลีนไอมิน ดัง Figures 5, 6 และ 7 ตามลำดับ

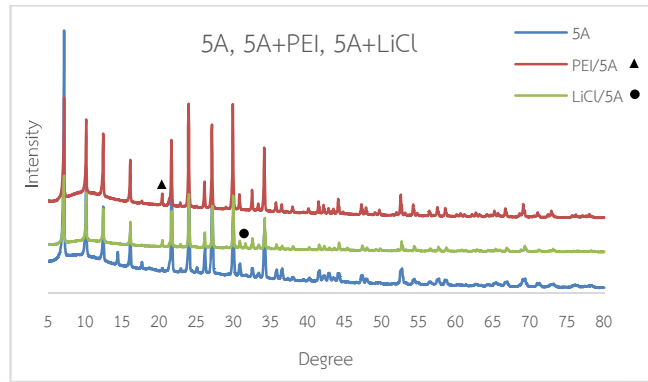


Figure 4 กราฟแสดงผลการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ สารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน ของซีโอไลต์-5A

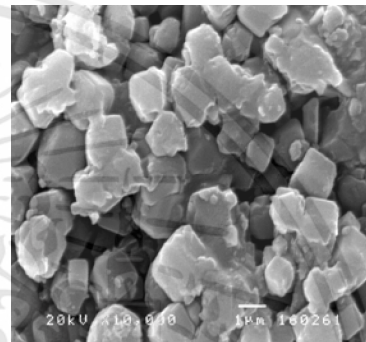


Figure 5 รูปผลึกของ ซีโอไลต์-5A ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

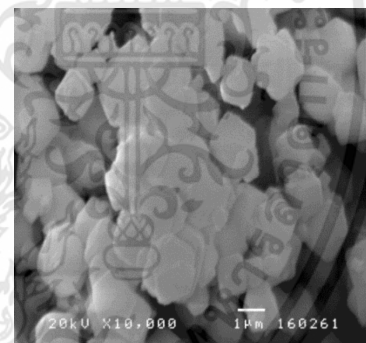


Figure 6 รูปผลึกของซีโอไลต์-5A ที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่มด้วย สารละลายลิเทียมคลอไรด์ ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

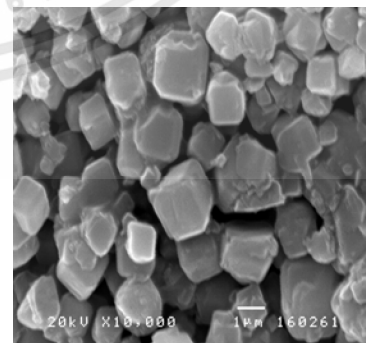


Figure 7 รูปผลึกของซีโอไลต์-5A ที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่มด้วย สารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า

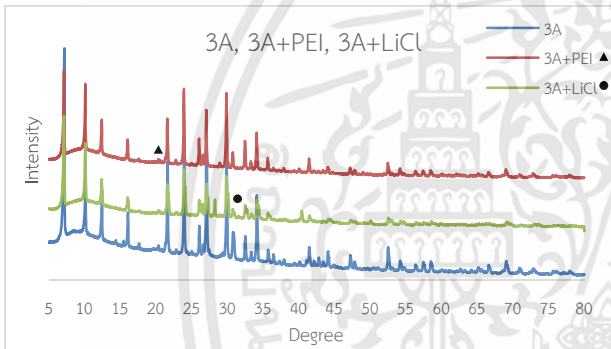


Figure 2 แสดงผลการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอทิลีนไอมิน ของซีโอไลต์-3A

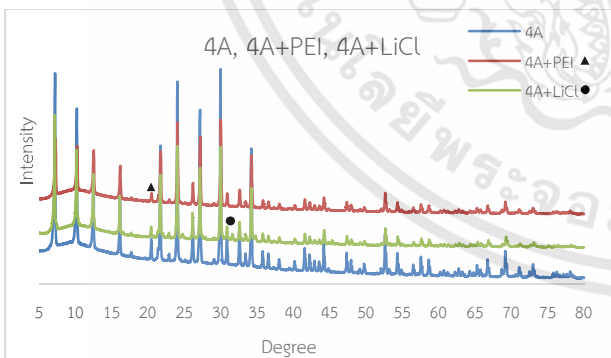


Figure 3 แสดงผลการเอ็บซุ่มสารละลายลิเทียมคลอไรด์ และ โพลีเอทิลีนไอมิน ของซีโอไลต์-4A

จากผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ซีโอไลต์-3A ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) สามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ซีโอไลต์-4A ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน สามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 และซีโอไลต์-5A ที่ผ่านการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) มีคุณสมบัติในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้สูงกว่า 3 รอบการดูดซับ และพบว่ามีความสามารถในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ร้อยละ 90 จากผลการศึกษาดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงผลของการปรับปรุงคุณภาพโดยการเอิบซุ่มด้วยสารละลาย โพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) มีความสามารถในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้สูงกว่า การปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายลิเทียมคลอไรด์ โดยซีโอไลต์-5A ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลาย โพลีเอทิลีนไอมิน (PEI) ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าซีโอไลต์-4A และ -3A ดัง Figures 10, 11, 12 และ 13 ตามลำดับ

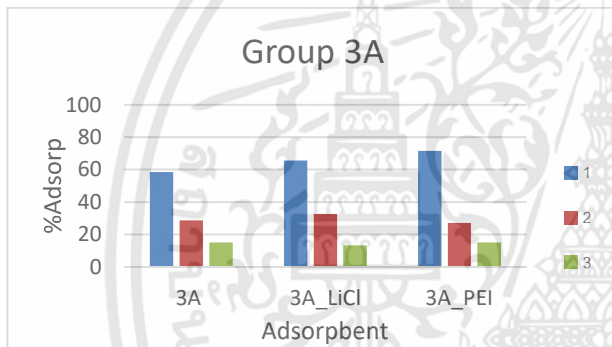


Figure 10 เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของซีโอไลต์-3A

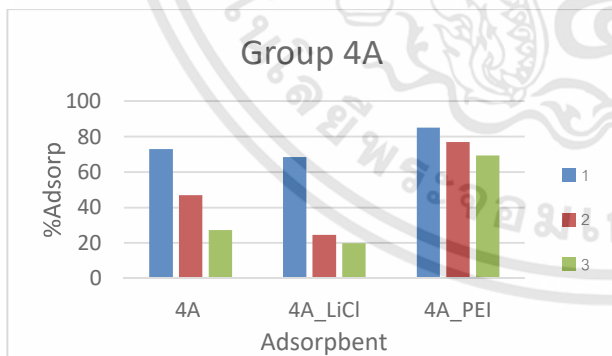


Figure 11 เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของซีโอไลต์-4A

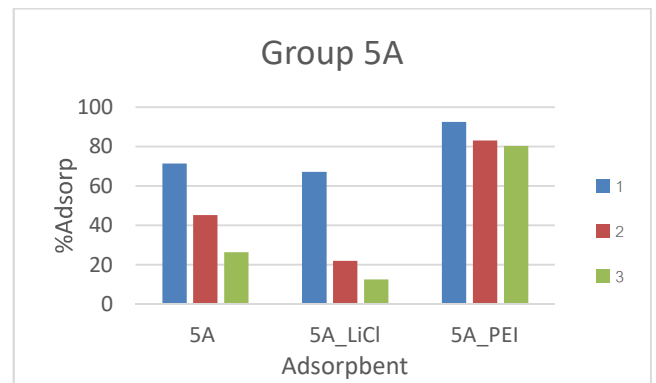


Figure 12 เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของซีโอไลต์-5A

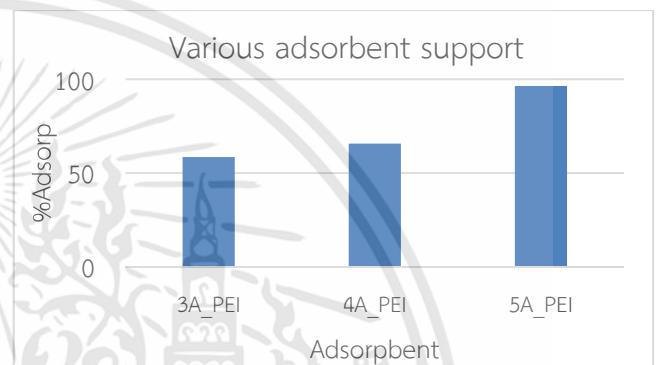


Figure 13 เปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารดูดซับซีโอไลต์-A (3A, 4A และ 5A) ที่เอิบซุ่มสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน

จาก Figure 13 ชี้ให้เห็นว่าซีโอไลต์-5A ที่ปรับปรุงคุณภาพโดยการเอิบซุ่มด้วยสารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน มีประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า ตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดอื่น เนื่องจากขนาดช่องรูพรุนของซีโอไลต์-5A มีค่าใกล้เคียงกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

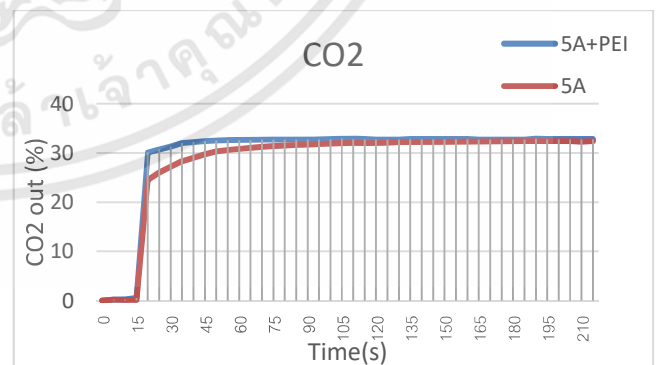


Figure 14 เปรียบเทียบปริมาณแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองสารดูดซับซีโอไลต์-5A และ ซีโอไลต์-5A ที่ผ่านกระบวนการเอิบซุ่ม สารละลายโพลีเอทิลีนไอมิน

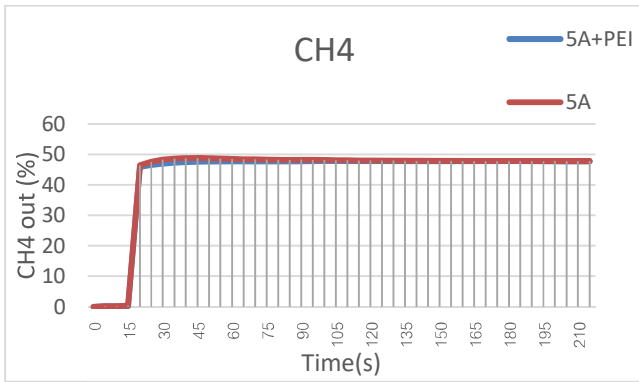


Figure 15 เปรียบเทียบปริมาณแก๊ส มีเทน จากผลการทดลองสารดูดซับซีโอไลต์-5A และ ซีโอไลต์-5A ที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่ม สารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน

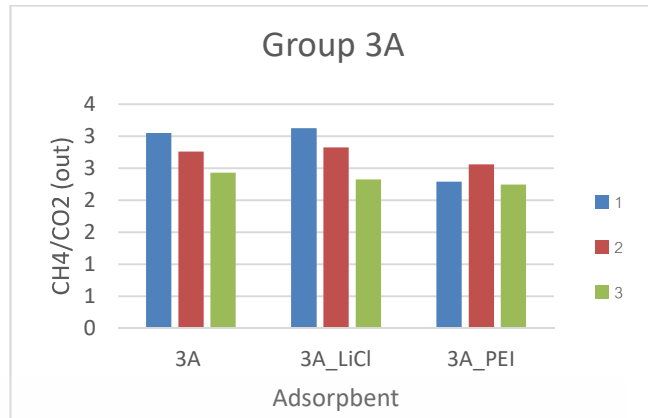


Figure 17 เปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับผลการทดลองสารดูดซับกลุ่มซีโอไลต์-3A

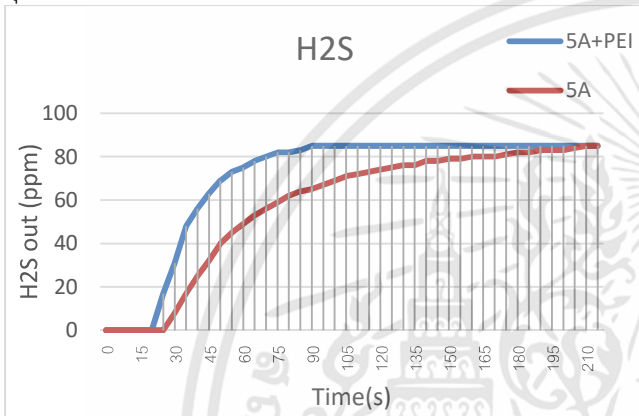


Figure 16 เปรียบเทียบปริมาณแก๊ส ไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากผลการทดลองสารดูดซับซีโอไลต์-5A และ ซีโอไลต์-5A ที่ผ่านกระบวนการเอ็บซุ่ม สารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน

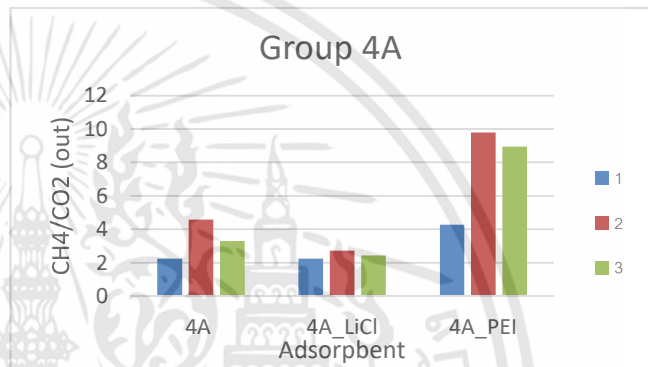


Figure 18 เปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับผลการทดลองสารดูดซับกลุ่มซีโอไลต์-4A

Figures 14, 15 และ 16 แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้สารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน ต่อการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน บนตัวรองรับซีโอไลต์-5A ให้ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงกว่าตัวรองรับชนิดอื่นๆ แต่ประสิทธิภาพการกำจัด แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ต่ำกว่าการใช้ซีโอไลต์-5A เนื่องจากการเอ็บซุ่มด้วยสารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน ที่มีปริมาณมากเกินไป จะส่งผลให้ช่องว่างของซีโอไลต์-5A ที่ผ่านการเอ็บซุ่มลดลง

Figures 17, 18 และ 19 ชี้ให้เห็นว่า การปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายโพลิเอทิลีนไอมินบนตัวรองรับซีโอไลต์-5A ให้สัดส่วนการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ดีกว่า ซีโอไลต์-5A ธรรมดาและซีโอไลต์-5A ที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน สามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้และไม่ส่งผลต่อการกำจัดแก๊สมีเทน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์-5A ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการเอ็บซุ่มสารละลาย โพลิเอทิลีนไอมิน มีความเหมาะสม และสามารถนำมาใช้ในการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพได้

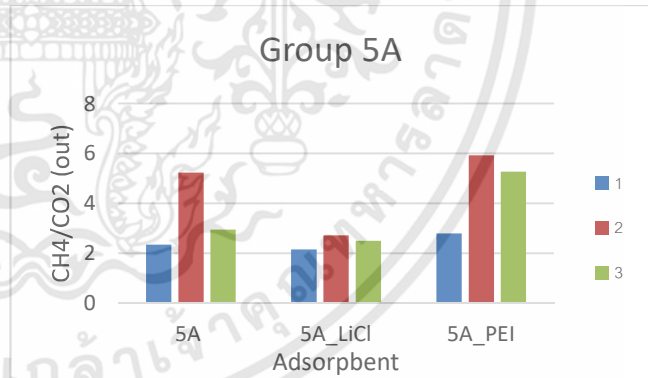


Figure 19 เปรียบเทียบสัดส่วนแก๊สมีเทนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับผลการทดลองสารดูดซับกลุ่มซีโอไลต์-5A

4. สรุป

จากผลการศึกษาวิจัย พบว่า ซีโอไลต์-A มีคุณสมบัติในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยซีโอไลต์-5A มีประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงที่สุด การปรับปรุงคุณภาพสารดูดซับด้วยสารละลายโพลิเอทิลีนไอมิน บนสารดูดซับซีโอไลต์-5A ให้ประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงสุด

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณ ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.) ที่สนับสนุนในด้านเงินทุน, สถานที่, และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณความร่วมมือจากทีมงานศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมวัสดุ ในด้านการตรวจสอบคุณลักษณะของตัวอย่างสารดูดซับที่นำมาใช้ในงานวิจัย และศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมเครื่องจักรกลและระบบอัตโนมัติ ที่ใช้เครื่องมือในการวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Sayari, A. , Belmabkhout, Y. 2010. Stabilization of amine-containing CO₂ adsorbents: dramatic effect of water vapor. *Journal of the American Chemical Society* 132, 6312-6314
- Sayari, A. , Heydari-Gorji, A. 2012. CO₂-induced degradation of amine-containing adsorbents: reaction products and pathways. *Journal of the American Chemical Society* 134, 13834-13842
- Heydari-Gorji, A., Sayari, A. 2012. Thermal, oxidative, and CO₂ - induce degradation of supported polyethylenimine adsorbent. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 51, 6887-6894
- Xu, X., Song, C., Anderesen, J. M., Miller, B. G., Scaroni, A. W. 2004. Preparation and characterization of novel CO₂ 'molecular basket' adsorbent based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM41. *Microporous and Mesoporous Materials* 62, 29-45
- Zhang, L., Zhan, N., Jin, Q., Liu, H., Hu, J. 2016. Impregnation of polyethylenimine in Mesoporous Multilamellar Silica Vesicles for CO₂ Capture: A Kinetic Study. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 55, 5885-5891
- Chen, Z., Deng, S., Wei, H., Wang, B., Huang, J., Yu, G. 2013. Polyethylenimine-Impregnated Resin for High CO₂ Adsorption: An Efficient Adsorbent for CO₂ Capture from Simulated Flue Gas and Ambient Air. *Applied Materials and Interfaces* 5, 6937-6945
- Supasinee, P., Pramoch, R., Santi, K. 2013. Towards CO₂ Adsorption Enhancement via Polyethyleneimine Impregnation. *International Journal of Chemical and Biological Engineering* 6, 291-295

ภาคผนวก ข.- 1

ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ของสาร
ทดลองแต่ละชนิด

Sample	CO ₂			m(g)	C/C0	Q (lit/min)	CO ₂ [1min]	Adsorb(mol)
	1	2	3					
CO ₂	37.1253	-	-			0.096	0.0356	
						CO ₂ _out(lit)	n(mol)	(mol/g)
13X	16.2974	30.3199	33.5860	0.3574	0.4390	0.0058	0.0003	2.6016
13X_KCl	6.4595	9.8014	14.4485	0.3151	0.1740	0.0023	0.0001	4.3447
13X_LiCl	6.1380	13.9800	23.2409	0.3563	0.1653	0.0022	0.0001	3.8826
13X_MEA	0.0454	0.0216	0.0880	0.3601	0.0012	0.0000	0.0000	4.5969
13X_NaCl	9.4971	17.5348	18.9926	0.3475	0.2558	0.0034	0.0002	3.5494
13X_PEI	9.7284	11.5849	15.2354	0.3903	0.2620	0.0035	0.0002	3.1337
3A	13.8334	26.4852	31.4646	0.2643	0.3726	0.0049	0.0002	3.9342
3A_LiCl	9.5164	26.9634	32.1941	0.3527	0.2563	0.0034	0.0002	3.4946
3A_MEA	1.4012	10.9232	24.1618	0.2878	0.0377	0.0005	0.0000	5.5414
3A_PEI	8.1045	30.1354	33.2201	0.3477	0.2183	0.0029	0.0001	3.7261
4A	5.1193	15.9511	23.9351	0.2118	0.1379	0.0018	0.0001	6.7462
4A_LiCl	13.4028	29.9110	31.9254	0.2389	0.3610	0.0048	0.0002	4.4330
4A_MEA	5.3985	11.5596	13.0281	0.2222	0.1454	0.0019	0.0001	6.3743
4A_PEI	2.2494	9.9470	11.0129	0.1911	0.0606	0.0008	0.0000	8.1474
5A	7.8774	16.8513	27.8263	0.2188	0.2122	0.0028	0.0001	5.9676
5A+LiCl	9.8025	25.4924	26.7009	0.2607	0.2640	0.0035	0.0002	4.6788
5A_MEA	3.8476	14.0648	15.7826	0.2397	0.1036	0.0014	0.0001	6.1978
5A+PEI	11.6066	15.3649	17.4066	0.2227	0.3126	0.0041	0.0002	5.1155
AC	0.0662	1.6532	7.3412	0.2247	0.0018	0.0000	0.0000	7.3628
AC_KCl	1.5878	6.8059	19.2062	0.2039	0.0428	0.0006	0.0000	7.7808
AC_LiCl	0.1316	4.8677	10.5817	0.2578	0.0035	0.0000	0.0000	6.4062
AC_MEA	0.2341	2.1656	7.8691	0.2369	0.0063	0.0001	0.0000	6.9520
AC_NaCl	0.0917	10.5095	15.7079	0.1765	0.0025	0.0000	0.0000	9.3671
AC_PEI	6.7780	7.7070	20.2412	0.1617	0.1826	0.0024	0.0001	8.3784
MCM-41	0.0724	0.0839	14.3207	0.0858	0.0020	0.0000	0.0000	19.2791
MCM-41_KCl	0.1185	26.6795	33.5653	0.1488	0.0032	0.0000	0.0000	11.1028
MCM-41_LiCl	2.9256	28.6123	32.4882	0.15173	0.0788	0.0010	0.0000	10.0624
MCM-41_MEA	0.0437	4.7831	17.2032	0.1787	0.0012	0.0000	0.0000	9.2637
MCM-41_NaCl	0.3155	18.3579	29.9704	0.1228	0.0085	0.0001	0.0000	13.3819
MCM-41_PEI	11.9362	21.3793	25.8091	0.1758	0.3215	0.0043	0.0002	6.3965

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.- 2

ผลการคำนวณปริมาณการดูดซับแก๊สมีเทน จากแก๊สชีวภาพสังเคราะห์ของสารทดลองแต่ละชนิด

Sample	Ch4			CH4/CH40	Q (lit/min)	CH4 [1min]	Adsorb(mol)
	1	2	3				
CH4	52.6074	-	-		0.096	0.0505	
13X	28.8625	53.7642	53.564	0.7774	CH4_out(lit)	n(mol)	(mol/g)
13X_KCl	30.3847	29.3478	35.602	0.8184	0.0146	0.0007	2.9660
13X_LiCl	14.8294	64.8126	57.910	0.3994	0.0153	0.0007	3.1485
13X_MEA	6.5344	42.1264	49.898	0.1760	0.0075	0.0003	4.7334
13X_NaCl	16.9763	55.0340	60.129	0.4573	0.0033	0.0001	5.7118
13X_PeI	22.9738	61.7473	60.799	0.6188	0.0086	0.0004	4.5775
3A	29.7533	51.5329	53.894	0.8014	0.0116	0.0005	3.3895
3A_LiCl	20.9757	53.7484	52.734	0.5650	0.0150	0.0007	3.8603
3A_MEA	38.5302	56.0921	53.314	1.0378	0.0106	0.0005	4.0038
3A_PeI	13.0844	54.4004	52.536	0.3524	0.0195	0.0009	2.1836
4A	8.1073	51.4709	55.579	0.2184	0.0066	0.0003	5.0745
4A_LiCl	21.2586	57.5781	54.889	0.5726	0.0041	0.0002	9.3796
4A_MEA	16.8844	66.6297	69.188	0.4548	0.0107	0.0005	5.8581
4A_PeI	6.7880	68.7561	69.604	0.1828	0.0085	0.0004	7.1772
5A	13.0009	62.3010	57.850	0.3502	0.0034	0.0002	10.7038
5A+LiCl	14.8772	48.8216	47.237	0.4007	0.0066	0.0003	8.0811
5A_MEA	13.0164	68.1949	66.701	0.3506	0.0075	0.0003	6.4610
5A+PeI	22.9427	64.2968	64.805	0.6180	0.0066	0.0003	7.3736
AC	0.0037	45.2996	58.350	0.0001	0.0116	0.0005	5.9466
AC_KCl	20.0299	48.5427	62.320	0.5395	0.0000	0.0000	10.4512
AC_LiCl	0.3312	56.3958	67.449	0.0089	0.0101	0.0005	7.1327
AC_MEA	0.0000	39.9731	66.571	0.0000	0.0002	0.0000	9.0526
AC_NaCl	17.6763	61.3794	62.904	0.4761	0.0000	0.0000	9.9136
AC_PeI	13.5139	66.5630	62.428	0.3640	0.0089	0.0004	8.8352
MCM-41	21.7798	2.7142	51.567	0.5867	0.0068	0.0003	10.7931
MCM-41_KCl	7.1355	58.7247	54.854	0.1922	0.0110	0.0005	16.0400
MCM-41_LiCl	19.6544	52.5947	54.297	0.5294	0.0036	0.0002	13.6424
MCM-41_MEA	11.4359	73.1038	69.133	0.3080	0.0099	0.0004	9.6956
MCM-41_NaCl	16.4932	53.8776	55.463	0.4443	0.0058	0.0003	10.2855
MCM-41_PeI	25.8503	64.0456	60.516	0.6963	0.0083	0.0004	13.1290

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.- 3

ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนด้วยวิธี Calcium exchange Capacity (CEC)

1. เตรียมสารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม (CaCl_2) ที่ความเข้มข้น 0.01 โมล โดยใช้แคลเซียมคลอไรด์ 1000 มิลลิกรัม ต่อน้ำ 1 กิโลกรัม
2. เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้น 1 โมล ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. เตรียมสารละลาย อีริโอโครม แบลค ที (Eriochrome Black T) สำหรับใช้ในกระบวนการไทเทรต
4. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) สำหรับใช้ในกระบวนการไทเทรต โดยใช้สารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 43.75 กรัม ผสมน้ำกลั่น 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมน้ำกลั่นให้เต็มสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 285 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วจึงถ่ายใส่ขวดแก้วเพื่อปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร
5. เตรียมสารละลาย กรดเอทิลีนไดอามีนเตตราอะซิติก (Ethylenediaminetetraacetic acid หรือ EDTA) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมล โดยใช้ EDTA ปริมาณ 37.43 กรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

เมื่อเตรียมสารละลายสำหรับทดสอบทั้งหมดครบตามกระบวนการข้างต้น จึงเริ่มเตรียมสารดูดซับสำหรับนำมาใช้ในการทดสอบหาค่า CEC โดยเริ่มจากการทำ Lost on ignition (LOI) หรือคือการหาค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ เพื่อใช้ค่าดังกล่าวในการคำนวณค่า CEC ในภายหลัง โดยในที่นี้จะใช้ตัวอย่างสารดูดซับแต่ละชนิด ปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องแบบมีฝาปิด นำเข้าสู่เตาเผาที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 600 องศาเซลเซียส โดยทำการเผาเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากเผาเสร็จ จึงนำตัวอย่างสารดูดซับที่ผ่านการเผา มาชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า LOI ดังสมการต่อไปนี้

$$LOI = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

โดยที่ m_1 = น้ำหนักของตัวอย่างสารดูดซับก่อนการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

m_2 = น้ำหนักของตัวอย่างสารดูดซับหลังจากผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

เมื่อได้ค่า LOI จากการคำนวณในสมการ ที่ 4.1 จึงจะเริ่มกระบวนการไทเทรต เพื่อหาค่า CEC โดยมีขั้นตอนการทำดังนี้

1. ถ่ายสารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม 250 ลูกบาศก์เซนติเมตรลงในปิเกตอร์ และใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวนสาร หลังจากนั้นนำขึ้นแท่นกวนสาร โดยปรับความเร็วที่ 600 รอบ/นาทิจ เป็นเวลา 15 นาที
2. เตรียมตัวอย่างสารดูดซับที่ต้องการทดสอบ ปริมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงในสารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียมที่กวนเสร็จแล้ว และกวนต่อด้วยความเร็ว 600 รอบ/นาทิจ เป็นเวลา 15 นาที หลังจากนั้นจึงนำไปกรองเอาสารแขวนลอยที่เหลืออยู่ออก
3. ใช้ปิเปตดูดสารละลายที่ผ่านการกรองแล้ว ปริมาณ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ขวดรูปชมพู่ และนำมาเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลที่เตรียมไว้ ปริมาณ 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายบัฟเฟอร์ปริมาณ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเติม Eriochrome Black T ที่ปริมาณ 0.1 กรัม หรือเท่ากับปริมาณ 1 – 2 หยด ซึ่งจะทำให้สารละลายกลายเป็นสีแดง
4. ทำสารละลายแบลนค์สำหรับการเปรียบเทียบในขั้นตอนไทเทรต โดยใช้ส่วนผสมเช่นเดียวกับในขั้นตอนที่ 3 แต่ใช้สารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียมที่ไม่ผ่านการผสมกับตัวอย่างสารดูดซับ
5. ไทเทรตสารละลายที่ผสมในขั้นตอนที่ 4 กับ EDTA จนถึงจุดยุติ คือ เปลี่ยนจากสีแดงเป็น สีน้ำเงิน แล้วจึงทำการไทเทรตสารละลายที่ผสมในขั้นตอนที่ 3 โดยเทียบสีกับแบลนค์ และจดบันทึกปริมาณ EDTA ที่ใช้ไป

เมื่อได้ค่า LOI และ ปริมาณ EDTA ที่ใช้ไปของแต่ละตัวอย่างสารดูดซับแล้ว จึงนำมาคำนวณหาค่า CEC โดยใช้สมการดังนี้

$$CEC = \frac{(V_1 - V_2) \times C \times 100.09 \times 25}{m} \times \frac{100}{100 - L}$$

โดยที่ V_1 = ปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายตัวอย่าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

V_2 = ปริมาตร EDTA ที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลนค์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

C = ความเข้มข้นของ EDTA

100.09 = มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต

m = มวลของตัวอย่างสารดูดซับ (กรัม)

L = ค่า LOI หรือน้ำหนักที่สูญเสียจากการเผา (ร้อยละ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายพฤกษ์ วงศ์พาณิชย์ เกิดเมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2533 ที่จังหวัดชลบุรี
ที่อยู่ 72/143 หมู่ 3 หมู่บ้านลิพิงนารา ต.บึงยี่โถ อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12130

ประวัติการศึกษา พ.ศ.2555 จบการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และได้เข้า
ศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ณ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2556

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ.2560-ปัจจุบัน สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ตำแหน่ง นักทดลอง
วิทยาศาสตร์-วิจัย

พ.ศ.2555-2560 บริษัท ธารากอนท์ มาสเตอร์ เอ็นจิเนียริง ตำแหน่ง วิศวกรมออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้