

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้พุ่มซิลิกาตัดแปรด้วยเอมีน

นางสาวทิพย์รัตน์ วงษ์สง่า

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

ADSORPTION OF CO₂ AND H₂S USING FUMED SILICA MODIFIED WITH AMINES

Miss Tippayarat Wongsanga

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ฟิวซิลิกัดดแปรด้วยเอมีน
โดย	นางสาวทิพย์รัตน์ วงษ์สง่า
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. บุญญวัฒน์ อยู่สุข

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. บุญญวัฒน์ อยู่สุข)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. อังคณา วงศ์ศิริวรรณ)

ทิพย์รัตน์ วงษ์สง่า: การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ฟิวเมซิลิกา
 กัดดัดแปรด้วยเอมีน. (ADSORPTION OF CO₂ AND H₂S USING FUMED SILICA
 MODIFIED WITH AMINES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. ภัทรพรรณ
 ประศาสน์สารกิจ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. บุญญาวัดณ์ อยู่สุข, 104 หน้า.

ตัวดูดซับรูพรุนสูง ได้แก่ อะลูมินากัมมันต์, แคลไซต์อะลูมินา และฟิวเมซิลิกา กัดดัดแปรด้วย
 การเติมสารละลายเอมีนเตรียมเพื่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์
 ศึกษาผลของตัวแปร คือ ตัวรองรับ ชนิดของเอมีน (พอลิเอมีนมวลโมเลกุล 800 อะมิโนเอทิล
 เอทานอลามีน ไตรเอมีน ไดเอทิลีนไตรเอมีน ไตรเอทิลีนเตตระเอมีน และเตตระเอทิลีนเพน
 ตะเอมีน) และปริมาณเอมีนต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไฮโดรเจนซัลไฟด์
 (H₂S) งานวิจัยนี้วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานส
 ฟอर्मอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (FTIR) วิเคราะห์ธาตุคาร์บอน, ไนโตรเจน และออกซิเจน
 (CHN Analyzer) พื้นผิวและขนาดรูพรุน (BET) สมบัติทางความร้อน (TGA) และสัณฐาน
 วิทยา (SEM) ผลงานวิจัยแสดงว่า การเติมกลุ่มเอมีนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด
 CO₂ และ H₂S และตัวดูดซับมีการเลือกจำเพาะที่ดีต่อแก๊สกรด จากการดูดซับ
 คาร์บอนไดออกไซด์ ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 มีความสามารถในการดูดซับ
 คาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough 3.494 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับและที่อิ่มตัวได้ 4.673
 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ สำหรับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ FSi-PEI800-40 มี
 ความสามารถในการดูดซับที่ Breakthrough 0.063 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับและที่อิ่มตัวได้
 0.097 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับ
 มีความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ อีกทั้งสามารถฟื้นฟู
 สภาพตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่ได้และมีเสถียรภาพที่ดีโดยตามวัฏจักรการดูดซับ-การ
 คาย

ภาควิชาเคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2556.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5471981023 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS : CO₂ REMOVAL / H₂S REMOVAL / AMINE / ADSORPTION

TIPPAYARAT WONGSANGA: ADSORPTION OF CO₂ AND H₂S USING FUMED SILICA MODIFIED WITH AMINES. ADVISOR : PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, Ph.D., CO-ADVISOR : BOONYAWAN YOOSUK, Ph.D., 104 pp.

The high porosity adsorbents, activated alumina, calcined alumina and fumed silica modified by the addition of amine solution were prepared for CO₂ and H₂S adsorption. The effect of variables, support type, amine type (polyethyleneimine (Mw. 800), aminoethyl ethanolamine, N-(3-trimethoxysilypropyl) diethylenetriamine, diethylenetriamine, triethylenetetramine and tetraethylenepentamine) and amount of amine loading on CO₂ and H₂S adsorption were investigated. The adsorbent was also characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR), CHN Analyzer, Brunauer Emmett Teller Analyzer (BET), Thermo Gravimetric Analysis (TGA) and Scanning Electron Microscope (SEM). The results showed that the addition of amine groups enhanced carbon dioxide and hydrogen sulfide removal efficiency and the adsorbent had a good selectivity of acid gasses. For CO₂ adsorption, FSi-PEI800-40 gave a good breakthrough and saturation capacity of 3.494 mmol/g-sorb and 4.673 mmol/g-sorb, respectively. For H₂S adsorption, FSi-PEI800-40 gave a good breakthrough and saturation capacity of 0.063 mmol/g-sorb and 0.097 mmol/g-sorb, respectively. This result indicated that the adsorbents are promising for removing carbon dioxide and hydrogen sulfide. Moreover, FSi-PEI800-40 had good regenerability and stability with repeating adsorption – desorption cycles.

Department : Chemical Technology Student's Signature

Field of Study : Fuel Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2013 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความร่วมมือจากหลายๆฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และดร. บุญญาวัฒน์ อยู่สุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้คอยให้ความช่วยเหลือเป็นห่วงเป็นใยในทุกๆด้าน ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

งานวิจัยเรื่อง “การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้พุ่มซิลิกาตัดแปรด้วยเอมีน” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยเชื้อเพลิงภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ พี่ๆ นักวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (National Metal and Materials Technology center: MTEC) ที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกและความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ รวมถึงคำแนะนำและข้อคิดดีๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์พานิช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรุสศิริวิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. อังคณา วงศ์ศิริวรรณ กรรมการจากภายนอก ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและความช่วยเหลือในการใช้เครื่องวิเคราะห์ต่างๆ รวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการวิจัยและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และการสนับสนุนด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีการเกิดแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสัตว์.....	4
2.2 กระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ.....	5
2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption).....	5
2.2.2 กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น (Membrane separation).....	6
2.2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	6
2.3 การดูดซับ.....	7
2.3.1 ประเภทของการดูดซับ.....	8
2.4 ทฤษฎีการดูดซับ.....	10
2.4.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm).....	10
2.4.2 ไอโซเทอมแบบฟรอยด์ลิค (Freundlich isotherm).....	11
2.4.3 ไอโซเทอมแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller isotherm).....	12
2.5 ตัวดูดซับ.....	13
2.6 ปฏิกริยาเคมีการดูดซับแก๊สกรดด้วยเอมีน.....	14
2.7 วิธีการทำให้สารดูดซับคืนกลับสภาพเดิม.....	15
2.8 อันตรายของแก๊สกรดต่อสุขภาพ.....	16

	หน้า
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง	20
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	20
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	21
3.3 วิธีการทดลอง	21
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ	21
3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์	23
3.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ	29
3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	33
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ	33
4.2 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์	45
4.3 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม	60
4.4 การศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ	66
4.5 เสถียรภาพของตัวดูดซับต่อการดูดซับแก๊สผสม	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
5.1 สรุปผลการทดลอง	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
รายการอ้างอิง	74
ภาคผนวก	78
ภาคผนวก ก	79
ภาคผนวก ข	83
ภาคผนวก ค	94
ภาคผนวก ง	98
ภาคผนวก จ	99
ภาคผนวก ฉ	100
ภาคผนวก ช	101
ภาคผนวก ซ	102
ภาคผนวก ฌ	103

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	104
----------------------------------	-----

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	10
3.1	22
4.1	37
4.2	40
4.3	47
4.4	48
4.5	51
4.6	52
4.7	55
4.8	56
4.9	58
4.10	59
4.11	62

ตารางที่		หน้า
4.12	ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในแก๊สผสมและไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตรในไนโตรเจนด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40.....	63
4.13	ความสามารถของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในแก๊สผสมด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40.....	65
4.14	ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (ก) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ข) ในแก๊สผสมด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40.....	70
ข.1	ผลการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกจากแก๊สโครมาโทกราฟี.....	84
ข.2	ผลการวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากแก๊สโครมาโทกราฟี.....	89
ง.1	จำนวนคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอื่นๆ ในเอมีนตามทฤษฎี.....	98
จ.1	จำนวนโมลของไนโตรเจนในเอมีนต่างชนิดกันที่เติมลงบนตัวรองรับ ในปริมาณต่างๆ.....	99
ฉ.1	อุณหภูมิและลักษณะการหลอมละลายของเอมีนชนิดต่างๆ.....	100

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	กระบวนการดูดซึมแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สผสม..... 6
2.2	กระบวนการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่น..... 6
2.3	กระบวนการดูดซับแยกแก๊สกรดออกจากแก๊สผสม..... 7
2.4	ไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบก๊าซ..... 12
3.1	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (ก) คอลัมน์ดูดซับ, (ข) ชุดควบคุมอัตราการไหลแก๊ส และ (ค) แก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก..... 24
3.2	แผนผังชุดอุปกรณ์ทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์..... 25
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (ก) คอลัมน์ที่ 1 และ (ข) คอลัมน์ที่ 2..... 26
3.4	แผนผังชุดอุปกรณ์ทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม..... 26
4.1	โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ Act-Al ₂ O ₃ -PEI800-20 Cal-Al ₂ O ₃ -PEI800-20 และ FSi-PEI800-20 ที่มีปริมาณเอมีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก..... 35
4.2	โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-AEEA-20, FSi-TRI-20, FSi-DETA-20, FSi-TETA-20 และ FSi-TEPA-20 ที่มีปริมาณเอมีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก..... 36
4.3	โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-PEI800-30, FSi-PEI800- -40, FSi-PEI800-50 และ FSi-PEI800-50 ที่มีปริมาณเอมีนร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ..... 36
4.4	การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ FSi-PEI ที่มีปริมาณเอมีนแตกต่างกัน..... 40
4.5	ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวของ ขนาดรูพรุนของ (ก) FSi-PEI800-20, (ข) FSi-PEI800-30, (ค) FSi-PEI800-40, (ง) FSi-PEI800-20 และ (จ) FSi-PEI800-60..... 41
4.6	รูปการสลายตัวของตัวดูดซับ FSi และ FSi ที่มีชนิดเอมีนที่แตกต่างกัน..... 43
4.7	สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ PEI มวลโมเลกุล 800 บนฟุ่มซิลิกา..... 44
4.8	ลักษณะของตัวดูดซับที่เตรียมได้ (ก) ตัวดูดซับ Act-Al ₂ O ₃ -PEI800-20, (ข) Cal-Al ₂ O ₃ -PEI800-20 และ (ค) FSi-PEI800-20..... 45

ภาพที่	หน้า	
4.9	ผลของชนิดของตัวรองรับต่อประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ตัวดูดซับ Act-Al ₂ O ₃ -PEI800-20, Cal-Al ₂ O ₃ -PEI800-20 และ FSi-PEI800-20 ภาวะ : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที.....	47
4.10	ผลของชนิดของตัวรองรับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วย ตัวดูดซับ Act-Al ₂ O ₃ -PEI800-20, Cal-Al ₂ O ₃ -PEI800-20 และ FSi-PEI800-20 ภาวะ : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....	48
4.11	ผลของชนิดของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-AEEA-20, FSi-TRI-20, FSi-TEPA-20 และ FSi- TEPA-20 ภาวะ : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊ส ไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที....	51
4.12	ผลของชนิดของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วย ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-AEEA-20, FSi-TRI-20, FSi-TEPA-20 และ FSi- TEPA-20 ภาวะ : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....	52
4.13	ผลของชนิดของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-PEI800-30, FSi-PEI800-40, FSi-PEI800-50 และ FSi-PEI800-60 ภาวะ : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊ส ไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที....	55
4.14	ผลของชนิดของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วย ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-PEI800-30, FSi-PEI800-40, FSi-PEI800-50 และFSi-PEI800-60 ภาวะ : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊ส ไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที..	56
4.15	ความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 เปรียบเทียบกับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular Sieve 5A ภาวะ : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศา เซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที.....	58

ภาพที่	หน้า	
4.16	ความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 เปรียบเทียบกับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular Sieve 5A ภาวะ : แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....	59
4.17	ความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-40 ภาวะ: ความเข้มข้นมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส...	62
4.18	ความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-40 ภาวะ: ความเข้มข้นมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาทีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส...	63
4.19	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วย ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ด้วยระบบต่อเนื่อง ภาวะ: ความเข้มข้นมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 1) และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 2).....	65
4.20	การคายการดูดซับแก๊สผสมของตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเข้มข้น 99.999% โดยปริมาตร อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	66
4.21	รอบของการดูดซับ (ก) และเวลาของการคาย (ข) คาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40	68
4.22	รอบของการดูดซับ (ก) และเวลาของการคาย (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40	69
ก.1	โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ, (1) นาทีที่ 3 ที่ภาวะอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที.....	79
ก.2	โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1 % โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ, (1) นาทีที่ 3 ที่ภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....	81

ภาพที่	หน้า
ข.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ FS-PEI800-30 ที่ภาวะคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 10% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 5 มิลลิลิตร ต่อนาที.....	86
ข.2 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ FS-PEI800-30 ที่ภาวะไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....	92
ค.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวรองรับแอคทีวอะลูมินา (Act-Al ₂ O ₃).....	94
ค.2 Pore size distribution ของตัวรองรับแอคทีวอะลูมินา (Act-Al ₂ O ₃).....	94
ค.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวรองรับแคลไซต์อะลูมินา (Cal-Al ₂ O ₃).....	95
ค.4 Pore size distribution ของตัวรองรับแคลไซต์อะลูมินา (Cal-Al ₂ O ₃).....	95
ค.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวรองรับฟุ่มซิลิกา (FSi).....	96
ค.6 Pore size distribution ของตัวรองรับฟุ่มซิลิกา (FSi).....	96
ค.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A.....	97
ค.8 Pore size distribution ของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A.....	97
ช.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่มีปริมาณเอมีนต่างกัน	101
ช.2 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์บนตัวดูดซับที่มีปริมาณเอมีนต่างกัน	101
ช.1 ลักษณะอันตรกิริยาของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับดัดแปรด้วยพอลิเอมีน	102
ช.2 ลักษณะอันตรกิริยาของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับดัดแปรด้วยพอลิเอมีน	102
ฅ.1 การเติมเอมีนที่มากเกินไปหลังนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	103

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ความต้องการแก๊สเชื้อเพลิงในปัจจุบันมีปริมาณเพิ่มขึ้น แก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวสามารถผลิตได้จากกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติหรือจากกระบวนการสังเคราะห์แก๊สชีวภาพ แต่ในแก๊สชีวภาพนั้นมีคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและทำให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้ลดลง ส่งผลเสียต่อเครื่องจักรรวมถึงท่อส่งแก๊สและยานพาหนะ แม้ว่ามีคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในปริมาณน้อย แต่หากปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมก็เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งยังก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้นกระบวนการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความสำคัญอย่างมาก

การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์นิยมใช้วิธีการกำจัดทางเคมีด้วยเอมีนในวัฏภาคของเหลว (liquid-phase chemical scrubbing with amines) ซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ (absorbent) สูง และมีประสิทธิภาพต่ำ เทคโนโลยีการดูดซับ (adsorption) เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สกรดด้วยความสามารถในการดูดซับ (capacity) มีสภาพการเลือก (selectivity) กับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์อีกทั้งยังมีการลงทุนและค่าใช้จ่ายต่ำ วัสดุที่ใช้สำหรับกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรม เช่น ถ่านกัมมันต์ และซีโอไลต์ ยังมีข้อจำกัดเพราะมีสภาพการเลือกต่อคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่ำและอ่อนไหวต่อน้ำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาตัวดูดซับสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้มีประสิทธิภาพ และตัวดูดซับมีเสถียรภาพ ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับดัดแปรพื้นผิวโดยการเติมหมู่เอมีนบนตัวรองรับอะลูมินากัมมันต์ (activated alumina) แคลไซต์ อะลูมินา และฟลูซิลิกา และเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับตัวดูดซับที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับดัดแปรโดยการเติมหมู่เอมีนบนตัวรองรับอะลูมินากัมมันต์ แคลไซต์อะลูมินา และฟลูออไรด์ที่มีปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง
2. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแก๊สผสมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่เตรียมได้ และศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการดัดแปรตัวดูดซับโดยการเติมหมู่เอมีนบนตัวรองรับแอคทิเวทอะลูมินา แคลไซต์อะลูมินา และฟลูออไรด์ ซึ่งหมู่เอมีนที่เติมคือ Polyethyleneimine (Mw 800), Amino ethylethanolamine, N-3-(trimethoxysilyl)-propyldiethylenetriamine, Diethylene-triamine, Triethylenetetramine และ Tetraethylenepentamine
2. วิเคราะห์โครงสร้างและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
3. ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแก๊สผสมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบต่อเนื่องในคอลัมน์เบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ
4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้กับตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกแก๊สกรด
2. จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและสารเคมี
 - เตรียมอุปกรณ์การเตรียมตัวดูดซับ
 - เตรียมชุดทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์
3. เตรียมตัวรองรับและตัวดูดซับดัดแปรพื้นที่ผิวด้วยการเติมเอมีน
4. วิเคราะห์โครงสร้างและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่เตรียมได้
 - วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer
 - วิเคราะห์ธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจนด้วยเครื่อง CHN analyzer
 - วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่อง Surface area and porosity analyzer
 - วิเคราะห์อุณหภูมิสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer
 - วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning electron microscope

5. ทำการดัดแปรตัวดูดซับโดยการเติมหมู่เอมีนลงบนตัวรองรับแอคทีวอะลูมินา แคลไซต์ อะลูมินา และฟลูซิลิกา โดยวิธีอิมเพรกเนชัน (impregnation) ซึ่งหมู่เอมีนที่เติมคือ Polyethyleneimine (MW 800), Aminoethylethanolamine, N-3-(trimethoxysilyl)-propyl diethylenetriamine, Diethylenetriamine, Triethylenetetramine และ Tetraethylene pentamine
6. ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบต่อเนื่องด้วยคอลัมน์เบตนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ ศึกษาผลของตัวแปรดังนี้
 - ชนิดของตัวรองรับ
 - ชนิดของเอมีนบนตัวรองรับ
 - ปริมาณของเอมีนบนตัวรองรับ
7. เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้กับตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม
8. ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมแบบต่อเนื่อง
 - คอลัมน์เบตนิ่งเดี่ยว (1เครื่อง)
 - คอลัมน์เบตนิ่ง 2 คอลัมน์ ต่ออนุกรม
 - เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้กับตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม
9. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับดัดแปร
10. สรุป วิเคราะห์ผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการเกิดแก๊สชีวภาพจากฟาร์มสัตว์ [1]

แก๊สชีวภาพ เป็นพลังงานสะอาดที่เกิดจากการนำของเสีย เช่น มูลสัตว์ น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์มาผ่านกระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) โดยแบคทีเรียหลายชนิด เมื่อสภาวะแวดล้อมเหมาะสม แบคทีเรียจะเจริญเติบโต และย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จนกระทั่งในที่สุดเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊สชีวภาพ ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาพไร้ออกซิเจน แบ่งได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 การสลายสารโมเลกุลใหญ่ (Hydrolysis) สารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากแบคทีเรียพวก Hydrolytic Organisms ทำให้แตกตัวมีขนาดโมเลกุลเล็กลง

ขั้นที่ 2 การผลิตกรดอินทรีย์ (Acidogenesis) สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กลงจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile acid) และสารอื่นๆ โดยแบคทีเรียพวกสร้างกรด (acid former) กรดที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ คือ กรดแอสติก (Acetic acid) และกรดโพรพิโอนิก (Propionic acid)

ขั้นที่ 3 การผลิตแก๊สมีเทน (Methanogenesis) กรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกย่อยสลายเป็นแก๊สมีเทน (CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนใหญ่อาจมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) และไฮโดรเจน (H_2) และไอน้ำผสมอยู่ด้วยซึ่งรวมกันเรียกว่า “แก๊สชีวภาพ”

แก๊สชีวภาพมีองค์ประกอบหลัก คือ แก๊สมีเทนประมาณร้อยละ 50-75 ซึ่งเป็นแก๊สที่ติดไฟได้จึงนำไปเป็นพลังงานทดแทนได้ คาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 36-39 ซึ่งเป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟ และแก๊สอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ประมาณร้อยละ 1-3 ซึ่งเป็นแก๊สที่ติดไฟ ดังนั้นสมบัติของแก๊สชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สมีเทน

แก๊สชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตรที่ประกอบด้วยมีเทนร้อยละ 60 มีค่าความร้อน 5,000-5,500 กิโลแคลอรีซึ่งเทียบเท่ากับน้ำมันดีเซล 0.60 ลิตร น้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร น้ำมันเตา 0.81 ลิตร พลังงานไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์-ชั่วโมง แก๊สหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม ไม้ฟืน 1.5 กิโลกรัม

แก๊สมีเทนมีสมบัติเบากว่าอากาศประมาณครึ่งหนึ่ง (น้ำหนักโมเลกุล 16.04) ละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย ไม่มีรส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ส่วนแก๊สชีวภาพซึ่งเป็นแก๊สผสมเป็นแก๊สที่มีกลิ่นเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำให้ผู้ใช้บางคนไม่ชอบนำไปหุงต้ม แต่ที่จริงแล้วกลิ่นของแก๊สนี้ไม่ได้ทำให้รสชาติของอาหารมีกลิ่น ซึ่งกลิ่นนี้จะระเหยไปหมดเมื่อเผาไหม้

2.2 กระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ

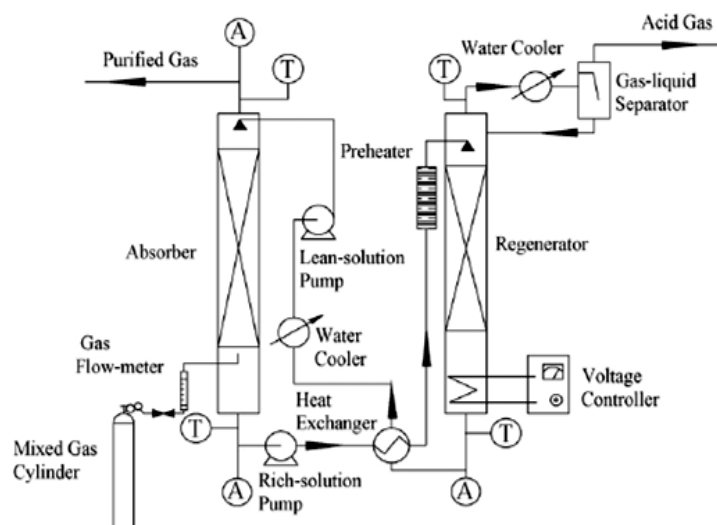
2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption) [2]

การดูดซึมหรือการดูดกลืนเป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลซึ่งใช้กำจัดสารมลพิษที่เป็นแก๊สออกจากกระแสาอากาศโดยให้สัมผัสกับของเหลว การที่โมเลกุลสามารถถ่ายโอนจากสภาพแก๊สไปยังสภาพของเหลวได้เนื่องจากทั้ง 2 เฟสนั้นมีความเข้มข้นต่างกัน (Concentration gradient) ที่ผิวของเหลวและแก๊สเป็นแรงดัน (Driving force) ให้เกิดการถ่ายโอนมวลนอกจากนี้แล้วพื้นที่ผิวสัมผัสสูง การปั่นป่วน (Turbulent) และสัมประสิทธิ์การแพร่มวลสูงจะช่วยเร่งการเกิดการดูดซึม

ในแ่งมลพิษทางอากาศ การดูดซึมเป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการลดปริมาณสารมลพิษก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ สารมลพิษที่เป็นแก๊สที่ถูกจำกัดโดยการดูดซึม ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไฮโดรเจนคลอไรด์ คลอรีน แอมโมเนีย ไนโตรเจนออกไซด์ และสารไฮโดรคาร์บอนเบา อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้ยังคงพบปัญหาในกระบวนการคือ เกิดการกัดกร่อน ระบบใช้พลังงานสูง เกิดปัญหาการกำจัดน้ำ และกระบวนการกำจัดมีประสิทธิภาพต่ำ

Liquid-phase Chemical Absorption with Amines [3]

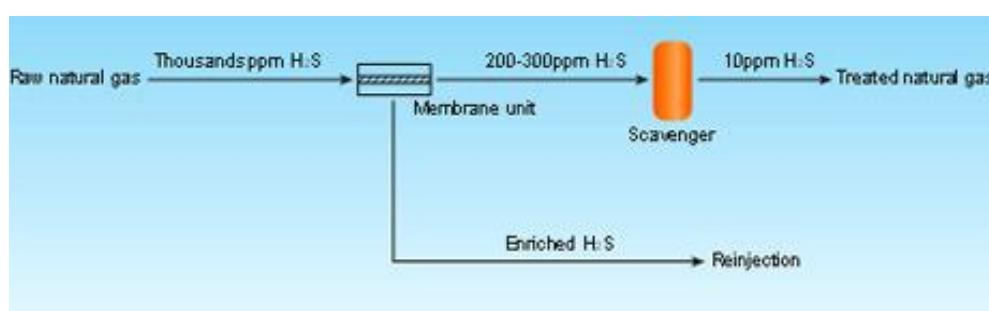
กระบวนการนี้ทำได้โดยผ่านแก๊สชีวภาพไปยังส่วนล่างของหอดูดซึม เพื่อให้สารละลายเอมีนที่ไหลผ่านเข้าไปยังส่วนบนของหอดูดซึมดูดซึมแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออก จะได้แก๊สชีวภาพที่บริสุทธิ์ออกไปยังส่วนบนของหอดูดซึม ส่วนสารผสมเอมีน-ไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกนำกลับไปยังส่วนบนของหอคืนสภาพ (Regenerator) ได้สารละลายเอมีนบริสุทธิ์ที่ส่วนล่างของหอคืนสภาพ ส่วนไฮโดรเจนซัลไฟด์จะออกทางส่วนบนของหอคืนสภาพ



ภาพที่ 2.1 กระบวนการดูดซึ่มแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สผสม [3]

2.2.2 กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น (Membrane separation) [4]

วิธีนี้สามารถแยกแก๊สได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดของแผ่นแยก สำหรับการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้น วิธีนี้สามารถแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้บางส่วน พบว่ามีไฮโดรเจนซัลไฟด์ปะปนออกมา ตัวระบบเหมาะกับการกำจัดแก๊สเสียปริมาณน้อยๆ นอกจากนั้น กระบวนการนี้ยังพบข้อจำกัดคือ ระบบใช้พลังงานสูงเนื่องจากต้องใช้ความดันสูง ระบบติดตั้งมีราคาสูง ตัวเยื่อแผ่นมีราคาแพง กระบวนการเสี่ยงต่อการอุดตันบนเยื่อ และเกิดความเสียหายง่าย ซึ่งหากรบบเกิดความเสียหายจำเป็นต้องเปลี่ยนวัสดุเกือบทั้งระบบ

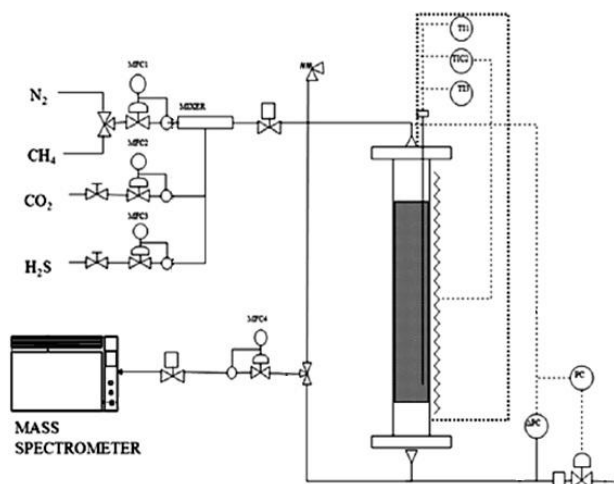


ภาพที่ 2.2 กระบวนการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่น [5]

3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการนี้สามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างสมบูรณ์ด้วยคอลัมน์ดูดซับ (Adsorber) แบบเบตนิ่ง ซึ่งสามารถออกแบบระบบให้มีความเหมาะสมกับแก๊สที่ต้องการกำจัด

โดยการพัฒนาตัวดูดซับให้มีความจำเพาะกับแก๊สดังกล่าว อีกทั้งยังเกิดของเสียในกระบวนการน้อย ทำโดยการบรรจุตัวดูดซับลงในคอลัมน์ดูดซับ จากนั้นผ่านแก๊สผสมไปยังตัวดูดซับ ได้แก๊สบริสุทธิ์ วิธีนี้สามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้



ภาพที่ 2.3 กระบวนการดูดซับแยกแก๊สกรดออกจากแก๊สผสม [6]

2.3 การดูดซับ [7]

การดูดซับ (adsorption) เป็นปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบชนิดหนึ่งเป็น อย่างน้อย ๓ บริเวณผิวร่วม (interface) ระหว่างวัฏภาค (phase) เช่น ผิวร่วมระหว่างวัฏภาค แก๊สกับวัฏภาคของเหลว ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคของเหลวที่แยกชั้น ผิวร่วม ระหว่างวัฏภาคแก๊สกับวัฏภาคของแข็ง และผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของเหลวกับวัฏภาคของแข็ง เป็นต้น ของแข็งมีพื้นผิวจำเพาะคงตัว ผิวร่วมระหว่างวัฏภาคของระบบที่มีของแข็งจึงสามารถ กำหนดได้อย่างชัดเจน ระบบดูดซับทั่วไปจึงมักมีของแข็งเป็นส่วนประกอบ แต่ในทางตรงกันข้าม ระบบที่มีของแข็งเป็นส่วนประกอบอาจไม่เป็นระบบดูดซับ ได้แก่ ระบบของแข็งที่มีสมบัติ ดูดความชื้นได้ดี เช่น ผลิกเกลือแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) บริสุทธิ์ และผลิกโซดาไฟ (NaOH) บริสุทธิ์ เป็นต้น เมื่อของแข็งดังกล่าวดูดความชื้นแล้ว ของแข็งเหล่านี้จะเปลี่ยนโครงสร้างจาก ผลิกไร้น้ำ (anhydrous crystal) เป็นผลิกรวมน้ำ (hydrous crystal) และเมื่อผลิกรวมน้ำเหล่านี้ ดูดความชื้นต่อไปอีก ผลิกรวมน้ำดังกล่าวจะเปลี่ยนเป็นสารละลายของของแข็งเหล่านั้นในที่สุด ดังนั้น การดูดซับที่ใช้กันอย่างแพร่หลายจึงหมายถึง “ปรากฏการณ์ของการสะสมสารประกอบ ชนิดหนึ่งหรือสารประกอบหลายชนิดไว้บนผิวของแข็ง โดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างของแข็งนั้น”

ระบบของแข็งที่เก็บสะสมสารประกอบอื่นๆ ไว้บนผิว เรียกว่า “ตัวดูดซับ (adsorbent)” ส่วนสารประกอบต่างๆที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับ เรียกว่า “สารถูกดูดซับ (adsorbate)”

ดังนั้นตัวดูดซับจึงมักเป็นของแข็งที่มีโพรงจำนวนมาก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีผลให้สามารถดูดซับได้มากตามสัดส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น แม้ว่าการเพิ่มปริมาณโพรงขนาดเล็กในตัวดูดซับมีผลให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากขึ้น แต่โพรงขนาดเล็กอาจเป็นอุปสรรคต่อการแพร่ของสารถูกดูดซับภายในโพรงของตัวดูดซับไปยังพื้นผิวในโพรงขนาดเล็กดังกล่าว เมื่อพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพของโพรงในตัวดูดซับ โพรงส่วนใหญ่ของตัวดูดซับจึงควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดซับในสถานะแก๊สหรือไอ เพื่อให้สารถูกดูดซับนั้นสามารถแพร่เข้าสู่โพรงของตัวดูดซับและสามารถแพร่ต่อไปยังพื้นผิวในโพรงเหล่านั้นได้อย่างสะดวก

ส่วนการดูดซับสารชนิดต่างๆ ที่อยู่ในสถานะของเหลวนั้น เช่น การดูดซับไอออนชนิดต่างๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ละลายน้ำ เป็นต้น โพรงส่วนใหญ่ของตัวดูดซับควรมีขนาดใหญ่เพียงพอ เพื่อให้ของเหลวที่มีสารถูกดูดซับเหล่านั้นสามารถไหลเข้าสู่โพรงของตัวดูดซับได้อย่างสะดวก โดยที่สารถูกดูดซับยังคงอยู่ในลักษณะเดิม นั่นคือ เมื่อดูดซับไอออนชนิดต่างๆ หรือสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ละลายน้ำแล้ว ไอออนหรือสารประกอบอินทรีย์เหล่านั้นยังคงสภาพเป็นสารละลายของไอออนหรือสารละลายของสารประกอบอินทรีย์ดังกล่าว เช่นเดิม การดูดซับสารถูกดูดซับในระบบของเหลวมักมีผลให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่อยู่ในโพรงของตัวดูดซับมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของสารถูกดูดซับชนิดเดียวกันที่อยู่ภายนอกตัวดูดซับ ดังนั้น สารประกอบทุกชนิดที่อยู่ในโพรงของตัวดูดซับจัดเป็น “สารถูกดูดซับ” ของระบบดูดซับของเหลวโดยไม่ต้องเกาะติดผิวในโพรงของตัวดูดซับ

2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยจำแนกแรงดังกล่าวออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพและแรงเคมี การดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับดังนี้

การดูดซับทางกายภาพ (physisorption) คือ การดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดร่วมกัน แรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ ได้แก่

1. แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ (Electrostatic force) เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกดูดความชื้น ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วลบบนผิวผลึกดูดความชื้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วลบของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วบวกบนผิวผลึกดูดความชื้น เป็นต้น
2. แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ (Ion Exchange) เช่น การดูดซับไอออนแคลเซียม (Ca^{2+}) และไอออนแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ในน้ำกระด้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนบนผิวตัวดูดซับชนิดพอลิเมอร์ เป็นต้น
3. แรงดึงดูดมวลระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ (Vander waals' force) เช่น การดูดซับกลิ่นซึ่งมักเป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ด้วยถ่านดูดซับ หรือการดูดซับไอสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยถ่านดูดซับ เป็นต้น

ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดี ณ อุณหภูมิปกติ หรือ ณ อุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้น ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ เช่น การดูดซับกลิ่นอับต่างๆ ในตู้เย็นและในห้องโดยสารปรับอากาศ เป็นต้น สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่เหมาะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวนโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงมักเรียกการดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงมักเรียกการดูดซับลักษณะนี้ว่า “การดูดซับหลายชั้น (multilayer adsorption)”

ความร้อนของการดูดซับแบบกายภาพนี้มักมีค่าประมาณ 2-3 เท่าของความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารถูกดูดซับชนิดนั้นๆ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ความร้อนของการดูดซับ นั่นคือ แรงของการดูดซับมีค่ามาก มีผลให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง เช่น แรงดึงดูดระหว่างขั้วมักมีค่าสูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลการดูดซับ ความร้อนของการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างขั้ว จึงมีค่าสูงกว่าความร้อนของการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล เป็นต้น

การดูดซับแบบเคมี (chemisorption) คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้น เช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป

ดังนั้น การดูดซับจึงมักเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูงๆ และการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือ การดูดซับแบบเคมีนี้จะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับแบบกายภาพ การดูดซับแบบเคมีนี้จึงเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้นและมักเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า “การดูดซับชั้นเดียว (monolayer adsorption)” ความร้อนของการดูดซับประเภทนี้ จึงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของการดูดซับแบบกายภาพ หรือมีค่าสูงกว่าความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารที่ถูกดูดซับชนิดนั้นๆ ไม่น้อยกว่า 3 เท่า

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [8]

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

2.4 ทฤษฎีการดูดซับ [9]

ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของแก๊สหรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอร์มการดูดซับแบ่งออกได้เป็นดังนี้

2.4.1 ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปีค.ศ.1916 เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอร์มแบบง่ายที่สุดโดยมีสมมติฐานคือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสาร

ดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ (2.1)

$$q_e = \frac{Q^0 b C_e}{(1 + b C_e)} \quad (2.1)$$

เมื่อ q_e = ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

Q^0 = ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว

b = ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

หรือ
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b Q^0} + \frac{C_e}{Q^0} \quad (2.2)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน C_e/q_e เป็น $1/bQ^0$ และมีความชันเท่ากับ $1/Q^0$

2.4.2 ไอโซเทอมแบบฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm)

ในปีค.ศ. 1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมีชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการ (2.3)

$$q_e = \frac{X}{m} = k_f C_e^{1/n} \quad (2.3)$$

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล

X/m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ

k_f และ n = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการฟรอยด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log \frac{X}{m} = \log k_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (2.4)$$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกนสามารถนำมาหาค่า k_f ได้และความชันของกราฟเป็น $1/n$ บางกรณีทีพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ แล้วไม่ได้เส้นตรงแสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟรอยด์ลิช

เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้สารถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

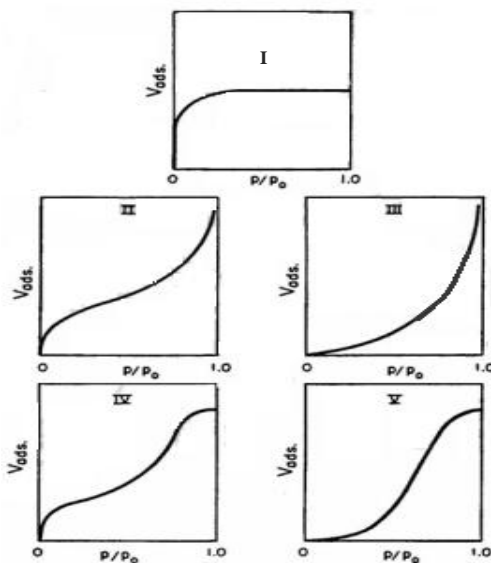
2.4.3 ไอโซเทอมแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller isotherm)

ในปี ค.ศ. 1903-1986 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน Stephen Brunauer และในปี ค.ศ. 1900-1985 Paul Emmett และ Edward Teller ได้ศึกษาการดูดซับหลายชั้นและเสนอดังสมการ (2.5)

$$\frac{P P_0}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_0 k} + \frac{P}{P_0} \tag{2.5}$$

- เมื่อ P = ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ
- V = ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน
- V₀ = ปริมาตรที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียว
- P₀ = ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
- k = ค่าคงที่

Brunauer-Emmett-Teller ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอรั่มออกเป็น 5 แบบ ดังรูป 2.4 ซึ่งอธิบายการดูดซับแต่ละแบบดังนี้



ภาพที่ 2.4 ไอโซเทอรั่มของการดูดซับแบบต่างๆ ของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบแก๊ส

แบบ I เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่ตัวดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กของตัวดูดซับนี้อย่างสมบูรณ์และมีการอึดตัวที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว

แบบ II และ III เป็นไอโซเทอร์มที่ตัวดูดซับที่การกระจายขนาดรูพรุนในช่วงกว้างในระบบนี้เกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียวจนถึงโมเลกุลหลายชั้น โดยในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II

แบบ IV เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่มีรูพรุนใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมากจึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer)

แบบ V เป็นไอโซเทอร์มที่เกิดขึ้น เมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีความแรงมากขึ้น

2.5 ตัวดูดซับ [10, 11]

ตัวดูดซับ (adsorbent) หมายถึง สารที่มีอำนาจดูดซับสารอื่นไว้บนผิวได้ ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับขึ้นกับ ลักษณะและความมีขั้วของผิว สามารถแบ่งสารดูดซับเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะขั้วของผิว คือ ชนิดที่มีขั้ว ได้แก่ ซีโอไลต์ (zeolites), อะลูมินา (porous alumina), ซิลิกา เจล (silica gel) เป็นต้น และชนิดไม่มีขั้ว ได้แก่ ถ่านกัมมันต์, ตัวดูดซับพอลิเมอร์ (polymer adsorbent) เป็นต้น

ซีโอไลต์ (zeolites) เป็นสารประกอบของ alumino silicate คือ ประกอบด้วย ซิลิกอน 1 อะตอม และออกซิเจน 4 อะตอม โดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ พบในประเทศญี่ปุ่นและประเทศใกล้เคียง นิยมใช้ในการดูดซับความชื้น กลิ่น เพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์ รวมทั้งแยกอื้อของแอมโมเนียหรือธาตุของโลหะหนักออกจากน้ำ และ Zeolites ชนิดสังเคราะห์ มีความจำเพาะในการดูดซับสูงมาก สามารถดูดซับสารที่ขนาดเล็กกว่า 4 อังสตรอม ($1 \text{ อังสตรอม} = 1e-10 \text{ ม.}$) ได้

อะลูมินา หรือ อะลูมินา ออกไซด์ (Alumina หรือ aluminum oxide) สังเคราะห์ขึ้นโดยกำจัดน้ำออกจาก alumina hydrates ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) มีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 150-500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง ของรูพรุนประมาณ 15-60 อังสตรอม นิยมใช้เพื่อดูดซับความชื้นหรือแก๊สที่มีขั้วออกจากแก๊สไฮโดรคาร์บอน

ซิลิกา เจล (Silica gel) สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยากำจัดน้ำออกจาก silicic acid หรือปฏิกิริยาระหว่าง sodium silicate กับ sulfuric acid ในทางการค้ามี 2 แบบ คือ แบบ A มีพื้นที่

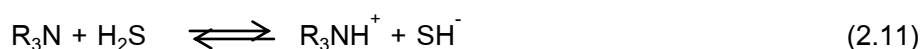
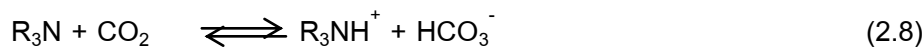
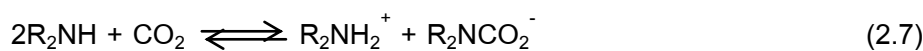
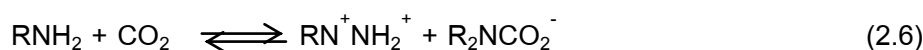
ผิวทั้งหมดประมาณ 650 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 2-3 อังสตรอม และแบบ B มีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 450 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 7 อังสตรอม นิยมใช้เพื่อดูดความชื้นออกจากแก๊สต่างๆ

ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) สังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุต่างๆ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่าน ถ่านหิน กะลาตาลโดนด ฯลฯ ในทางการค้ามี 4 แบบคือ 1) แบบผงมีขนาดอนุภาคประมาณ 15–25 ไมครอน (1 ไมครอน = $10e-6$ ม.) นิยมใช้เพื่อกำจัดสีออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การผลิตน้ำตาลทรายขาว การผลิตน้ำดื่ม ฯลฯ 2) แบบเม็ดมีขนาดอนุภาคประมาณ 4–6 มิลลิเมตร นิยมใช้เพื่อดูดซับแก๊สหรือของเหลวได้ เช่น ใช้ในการฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ ใช้ในการกำจัดซัลเฟอร์ออกจากแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ ฯลฯ 3) แบบโมเลกุลาร์ซีฟ (molecular sieve) มีความจำเพาะ ในการดูดซับสูงมากเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ลักษณะทั่วไปอาจเป็นผงหรือเป็นเม็ดก็ได้มักใช้เพื่อดูดซับแก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศ และ 4) แบบไฟเบอร์ สังเคราะห์ขึ้นโดยเลือกสารตั้งต้นเป็น phenolic resin, polyacrylic resin, viscous rayon ลักษณะทั่วไปคล้ายตาข่ายที่มีช่องว่างกว้างประมาณ 7–15 ไมครอน นิยมใช้ผลิตหน้ากาก หรือใช้ในกระบวนการนำสารละลายที่ใช้แล้ว กลับใช้ใหม่

โมเลกุลาร์ซีฟ เป็นสารดูดซับที่มีโครงสร้างเป็นผลึก ฉะนั้นจึงมีรูพรุนกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางหนึ่ง ๆ สามารถใช้โมเลกุลาร์ซีฟเพื่อจับหรือแยกแก๊สที่มีขนาดและรูปร่างแบบโมเลกุลออกยกตัวอย่างเช่น ในกระบวนการกลั่นน้ำมันบางครั้งจะใช้โมเลกุลาร์ซีฟเพื่อแยกสารพาราฟินชนิดที่มีโซ่ตรงออกจากสารประกอบที่เป็นกิ่งและที่เป้นไซคลิกแต่การใช้ประโยชน์หลักของโมเลกุลาร์ซีฟคือเพื่อกำจัดไอน้ำออกจากกระแสแก๊ส

2.6 ปฏิกริยาเคมีการดูดซับแก๊สกรดด้วยเอมีน [12,13]

แก๊สกรด (CO_2 และ H_2S) จะต้องถูกกำจัดออกจากแก๊สเชื้อเพลิงก่อนนำไปใช้งาน เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและให้ค่าความร้อนของแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้สูงขึ้น แก๊สกรดที่มีปริมาณความเข้มข้นที่อยู่ในระดับต่ำอาจกำจัดออกได้โดยการดูดซับ (Adsorption) ระบบดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เคลือบด้วยสารเคมีบางชนิด เช่น เอมีน หรือสารเคมีที่มีความเป็นกรดหรือต่างอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้ความสามารถในการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็นหลายเท่าตัวของตัวดูดซับธรรมดา โดยทั่วไปนิยมใช้เอมีนในการดูดซับแก๊สกรด ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับเป็นดังนี้ [12,13,14]



เมื่อ R คือ หมู่แอลคิล

เมื่อเอมีนเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สกรดจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือเกิดขึ้น โดยตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการบำบัดสารที่ดูดซับไว้และทำการปรับสภาพใหม่

2.7 วิธีการทำให้สารดูดซับคืนกลับสภาพเดิม [2]

การเปลี่ยนแปลงเบตสารดูดซับใหม่หรือการทำให้เบตสารดูดซับที่อิ่มตัวแล้วคืนกลับสภาพเดิมเป็นระยะ ๆ เป็นสิ่งที่ควรกระทำอย่างยิ่งเมื่อมีความเข้มข้นของสารมลพิษสูงและ/หรือมีระยะเวลาที่ใช้งานได้สั้น (น้อยกว่า 12 ชั่วโมง) วิธีการเปลี่ยนแปลงเบตสารดูดซับใหม่จะไม่คุ้ม ควรเลือกวิธีการทำให้คืนกลับสภาพเดิมจะเหมาะสมกว่าในเชิงพาณิชย์มีวิธีการทำให้คืนกลับสภาพเดิม 4 วิธีคือ

- 1) การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption) : เมื่อเบตร้อนขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงโมเลกุลของแก๊สซึ่งถูกดูดซับไว้จะออกจากผิวของสารดูดซับและจะถูกกำจัดออกจากภาชนะโดยการเป่าไล่ด้วยแก๊สเฉื่อยต้องมีการระบายความร้อนออกก่อนที่จะเริ่มให้มีการดูดซับต่อไป
- 2) การเปลี่ยนแปลงของความดัน (Pressure swing adsorption) : ความดันจะถูกลดต่ำลงที่อุณหภูมิที่คงที่เพื่อลดความสามารถของสารดูดซับ
- 3) การเป่าไล่ด้วยแก๊สเฉื่อย (degassing) : การไล่โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับไว้ ออกเกิดขึ้นเนื่องจากแก๊สเฉื่อย ซึ่งจะปลดความดันย่อยของสารมลพิษในเฟสแก๊สทำให้เกิดการพลิก

กลับของแกรเดียนท์ความเข้มข้นโมเลกุลของแก๊สมลพิษจึงหลุดออกจากผิวเข้าไปในกระแสแก๊ส

- 4) การแทนที่ (Solvent displacement) : โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้ถูกแทนที่ด้วยสารซึ่งสามารถดูดซับไว้ได้บางชนิดวิธีนี้จะใช้ต่อเมื่อสารซึ่งถูกดูดซับไว้เมื่อครั้งแรกนั้นมีคุณค่าและไวต่อความร้อนและไม่อาจใช้วิธีลดความดัน

2.8 อันตรายของแก๊สกรดต่อสุขภาพอนามัย [15,16]

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เป็นแก๊สตามธรรมชาติที่รู้จักกันดี เกิดจากการเผาไหม้ของสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ประโยชน์ใช้ทำน้ำแข็งแห้ง และใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืช หากสัมผัสกับแก๊สนี้จะทำให้เกิดอันตรายคือ ถ้าหากหายใจเข้าไปทำให้คลื่นไส้ หัวใจเต้นผิดปกติ ปวดศีรษะ มึนงง รบกวนการมองเห็น หายใจไม่ออก มีอาการชัก อากาศโคมา หากสัมผัสถูกผิวหนังจะเป็นแผลพอง เหมือนน้ำแข็งกัด หากกลืนหรือกินเข้าไป มีอาการเหมือนน้ำแข็งกัดบริเวณริมฝีปาก ปาก และเยื่อเมือกจะมีผลทำลายตับ หากสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง การมองเห็นไม่ชัดเจน อีกทั้งแก๊สนี้สารนี้เป็นสารก่อมะเร็ง ตาม OSHA , NTP , IARC

แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) หรือ แก๊สไข่เน่า เป็นแก๊สที่หนักกว่าอากาศ มีกลิ่นฉุนเหม็นจัด ระดับรับสัมผัสกลิ่นอยู่ที่เพียง 0.025 ppm เท่านั้น ติดไฟได้ง่าย และเกิดการระเบิดได้ มีผลต่อร่างกายโดยเข้าจับและยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ชนิดหนึ่งในร่างกายทำให้เซลล์ไม่สามารถหายใจได้ ซึ่งเป็นกลไกเดียวกับพิษของไซยาไนด์ อาการจากฤทธิ์ยับยั้งการหายใจสามารถเกิดได้เร็วเนื่องจากแก๊สสามารถดูดซึม เข้าสู่ร่างกายได้ดีมาก โดยที่ความเข้มข้น 600 – 800 ppm จะทำให้ผู้ที่สูดดมแก๊สหมดสติและเสียชีวิตทันที อาการ นี้เป็นอาการที่พบได้บ่อยมากสำหรับการประสบเหตุจากแก๊สชนิดนี้ กรณีอาการรุนแรงน้อยกว่าจะพบอาการ ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียน คลุ้มคลั่ง ชัก และโคมา นอกจากนี้ยังมีฤทธิ์ระคายเคืองจะทำให้จุกไม่ได้กลิ่น เกิดได้ที่ความเข้มข้น 100 – 150 ppm ซึ่งทำให้สูญเสียความสามารถในการระมัดระวังตัว ผู้สัมผัสอาจมีอาการเคืองตา จมูก คอ หลอดลม แสบหน้าอก หายใจเร็ว หายใจสั้น อาจพบอาการหนังตากระตุกหรือผิวหนังแสบร้อน และอาจมีอาการระคายเคืองปอด ทำให้ปอดบวมน้ำ เกิดการอักเสบของเนื้อปอด อาการระคายเคืองเกิดขึ้นได้ภายใน 2 – 3 ชั่วโมงหลังการสัมผัส สำหรับอาการจากการสัมผัสปริมาณน้อยๆ ในระยะยาว จะทำให้เกิดระคายเคืองตา กระจกตาเป็นแผล มีน งง อ่อนเพลีย คลื่นไส้ เมื่อได้รับกลิ่นไปนานๆ จมูก

จะปรับตัวทำให้ไม่ได้กลิ่นแก๊สนี้ ซึ่งเป็นเหตุให้ไม่สามารถระมัดระวังตัวได้เมื่อแก๊สนี้มีปริมาณสูงผิดปกติ และมีกลิ่นฉุนแรงขึ้น ดังนั้นผู้ปฏิบัติงานที่ต้องเกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนซัลไฟด์ จำเป็นต้องรู้ถึงอันตรายที่อาจเกิดขึ้น และต้องใช้ระบบรวมถึงอุปกรณ์ป้องกันความปลอดภัยอย่างเคร่งครัด สำหรับพื้นที่ปฏิบัติงานควรติดตั้งเครื่องตรวจวัดแก๊สชนิดนี้ และติดตั้งสัญญาณเตือนภัยเมื่อมีการรั่วไหล

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ma และคณะ [17] ศึกษาการแยกคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมหลายชนิดโดยใช้ตัวดูดซับ Molecular basket (SBA-15) ที่ผ่านการเติมด้วย Polyethyleneimine (PEI) จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับพบว่า PEI มีการกระจายตัวที่ดีภายในรูพรุนของ Molecular basket โดยที่โครงสร้างของ Molecular basket ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากการศึกษาค้นคว้าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิ 75 °C และดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่อุณหภูมิ 22 °C และจากการศึกษาค้นสภาพและเสถียรภาพของตัวดูดซับพบว่าตัวดูดซับสามารถคืนสภาพได้ดีแสดงว่าตัวดูดซับมีเสถียรภาพในการใช้งาน

Belmabkhout และคณะ [18] ศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สธรรมชาติและแก๊สชีวภาพด้วยตัวดูดซับซิลิกา รูพรุนขนาดกลาง (MCM-41) ที่กราฟท์ด้วย Triamine (TRI) จากการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และมีเทน แบบ Single-component พบว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่าแก๊สมีเทน และมีสภาพการเลือก (selectivity) ต่อการดูดซับกับแก๊สกรดในมีเทนได้ดีในระบบที่มีความชื้นปะปนอยู่ และตัวดูดซับสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยไม่เลือกดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากการศึกษาค้นสภาพในภาวะสุญญากาศ อุณหภูมิ 348 เคลวิน พบว่าตัวดูดซับสามารถคืนสภาพได้หลายครั้ง

Maghsoudi และคณะ [19] ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับและสภาพการเลือกของไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สมีเทนด้วยตัวดูดซับซีโอไลต์ชนิด Si-CHA เปรียบเทียบกับซีโอไลต์ชนิด Silica DD3R จากการศึกษาค้นคว้าไอโซเทอร์มการดูดซับพบว่า Si-CHA เป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบที่ 1 ตามทฤษฎีของ Brunauer และจากการศึกษาสภาพ

การเลือกของไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สมีเทนพบว่า Si-CHA มีสภาพการเลือกต่อการดูดซับกับแก๊สกรดในมีเทนได้ดีกว่า Silica DD3R เนื่องจาก Si-CHA มีลักษณะแบบ three dimensional channels จึงสามารถกำจัดแก๊สกรดในมีเทนได้ดี

Shama และคณะ [20] ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ (MCM-41 และ MCM-48) ดัดแปรด้วย Polyethyleneimine (PEI) โดยวิธีการอิมเพกเนชัน จากการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้อุณหภูมิการดูดซับ 40, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุด จากนั้นศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ปริมาณ Polyethyleneimine ที่แตกต่างกันบนตัวดูดซับ MCM-41 และ MCM-48 พบว่า 50 wt%PEI-MCM-48-PEI มีค่าการดูดซับที่สูงและมากกว่า MCM-41 และทำการศึกษการเปรียบเทียบชนิดของเอมีน Polyethyleneimine (PEI) กับ Monoethanolamine (MEA) พบว่า PEI มีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า MEA

Herm และคณะ [21] ศึกษาการดูดซับและการแยกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนโดยใช้ตัวดูดซับโครงข่ายอินทรีย์โลหะที่มีแมกนีเซียมในโครงสร้างชนิด MOF74 ที่อุณหภูมิ 313 เคลวิน ความดัน 1-50 บรรยากาศ พบว่า โครงข่ายอินทรีย์โลหะที่มีแมกนีเซียมในโครงสร้างชนิด MOF74 สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่ามีเทนและไฮโดรเจน ตามลำดับ และที่ภาวะความดัน 35 บรรยากาศสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงที่สุด สำหรับการดูดซับ CO_2/CH_4 , CH_4/H_2 และ $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ โครงข่ายอินทรีย์โลหะที่มีแมกนีเซียมในโครงสร้างชนิด MOF74 มีสภาพการเลือก (selectivity) ของ $\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ สูงกว่า CO_2/CH_4 และ CH_4/H_2 ตามลำดับ แสดงว่าโครงข่ายอินทรีย์โลหะที่มีแมกนีเซียมในโครงสร้างชนิด MOF74 มีประสิทธิภาพในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สไฮโดรเจนและมีเทนได้ดี

Plaza และคณะ [22] พัฒนาตัวดูดซับที่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในอิมเพกเนชันเอมีน ปริมาณเอมีนที่ใช้และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ที่ความดันบรรยากาศ พบว่าอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสที่ใช้ในอิมเพกเนชันนั้นทำให้เอมีนเกิดการเคลือบติดอยู่บนพื้นผิวตัวรองรับได้มากที่สุด ส่งผลให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น และพบว่าที่อุณหภูมิการดูดซับสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง

Wang และคณะ [23] ศึกษาการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สผสมโดยใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดนาโนที่ดัดแปรพื้นผิวด้วย Polyethyleneimine (PEI) ด้วยวิธีการอิมเพกเนชันโดยตัวรองรับที่ใช้คือ SBA-15 จากการวิเคราะห์ลักษณะตัวดูดซับพบว่า PEI มีการกระจายตัวเข้าไปในรูพรุนได้ดีและไม่ทำให้สูญเสียโครงสร้างของ SBA-15 จากการศึกษาคู่ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมพบว่าการดูดซับแสดงลักษณะของไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์และการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จะมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อมีความชื้นอยู่ในระบบ อีกทั้งตัวดูดซับสามารถคืนสภาพได้และมีเสถียรภาพการใช้งานที่ดี

Chen และคณะ [24] ทำการพัฒนาตัวดูดซับ PEI บน Hierarchical porous silica monolith เพื่อดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิต่ำ โดยศึกษาคู่ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับที่มีปริมาณ PEI แตกต่างกัน อุณหภูมิการดูดซับ และระดับพอลิเมอไรเซชันของ PEI บนตัวรองรับ (PEI polymerization degree) พบว่า ตัวดูดซับที่มี PEI มวลโมเลกุล 600 ปริมาณ 65% โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าการดูดซับเท่ากับ 1.27 มิลลิโมลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อกรัมตัวดูดซับ และพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์มี 2 ปัจจัย คือ ปริมาณของ PEI บนตัวดูดซับ และ อันตรกิริยาระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์กับหมู่ฟังก์ชันเอมีนของ PEI จากการศึกษาคคืนสภาพพบว่าตัวดูดซับสามารถคืนสภาพได้ง่ายที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และมีเสถียรภาพที่ดีต่อการนำมาใช้ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมตัวดูดซับชนิดใหม่ที่ได้ดัดแปรด้วยเอมีนเพื่อใช้ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ตัวดูดซับที่มีเอมีนชนิดต่างๆบนตัวรองรับทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 10% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที ทดลองดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที งานวิจัยนี้ทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ วัดความเข้มข้นแก๊สขาออกด้วย Micro gas chromatography

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

Chemicals	Grade	Company
Activated Alumina	Commercial	SUMITOMO CHEMICALS
Calcined Alumina	Commercial	NIC INTERCHEM
Fumed Silica	Commercial	Concrete composite
Methanol	Commercial	Carlo Erba
Polyethyleneimine Mw 800 (PEI800)	Branched	Sigma Aldrich
Aminoethylethanolamine (AEEA)		Sigma Aldrich
N- 3-(trimethoxysilyl)-propyldiethylene triamine (TRI)		Sigma Aldrich
Diethylenetriamine (DETA)	ReagentPlus	Sigma Aldrich
Triethylenetetramine (TETA)	Technical grade	Sigma Aldrich
Tetraethylenepentamine (TEPA)	Technical grade	Sigma Aldrich
Molecular sieve 5A	Pallets, 1.6 mm.	PRAXAIR
CO ₂	10% balance in N ₂	TIG
H ₂ S	10% balance in N ₂	TIG
Mixed gas	75% CH ₄ , 20% CO ₂ , 0.35% H ₂ S balance in N ₂	PRAXAIR
N ₂	99.999%	

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารเคมี (Hot plate and stirrer) รุ่น IKA-RCT basic ของ IKA พร้อมอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ
2. ชุดเครื่องแก้ว
3. โกร่งบดสาร ยี่ห้อ IKEA
4. เตาอบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert
5. ชุดการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์
6. แก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก (Micro gas chromatograph) รุ่น 490-GC จากบริษัท Varian
7. ตู้ดูดความชื้น (Desciccator)
8. เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ (Fourier transform infrared spectroscopy: FT-IR) รุ่น System 2000 ยี่ห้อ Perkin Elmer
9. เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน, ไนโตรเจน และออกซิเจน (CHN Analyzer) รุ่น Truespec 628 ยี่ห้อ LEGO
10. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยวิธีบีอีที (Surface area and porosity analyzer) รุ่น Autosorb-1 ยี่ห้อ Quantachrome
11. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer: TGA) รุ่น Pyris Diamond ยี่ห้อ Perkin Elmer
12. เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Scanning electron microscope: SEM) รุ่น S-3400N ยี่ห้อ Hitachi

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ

ตัวดูดซับเตรียมได้โดยวิธีการฝังตัว (Impregnation Method) ของเอมีน 6 ชนิด คือ Polyethyleneimine มวลโมเลกุล 800 (PEI800) , Aminoethylethanolamine (AEEA), N- 3-(tri methoxysilyl)propyldiethylenetriamine (TRI), Diethylenetriamine (DETA), Triethylene tetramine (TETA), Tetraethylenepentamine (TEPA) บนตัวรองรับ ในอัตราส่วน 20, 30, 40, 50 และ 60 %โดยน้ำหนัก ได้ตัวดูดซับดังตารางที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. เติมตัวรองรับ (อะลูมินากัมมันต์ แคลไซต์อะลูมินา หรือฟูมซิลิกา) 5 กรัมลงในเมทานอล 150 มิลลิลิตร เพื่อให้ตัวรองรับกระจายตัวได้ดีในเมทานอลโดยทำการกวนผสมตลอดเวลา
2. ละลายเอมีน (PEI, AEEA, TRI, DETA, TETA หรือ TEPA) ตามความเข้มข้นที่ต้องการ ลงในเมทานอล 50 มิลลิลิตร กวนสารให้เป็นเนื้อเดียวกัน
3. ทำการหยดสารละลายเอมีนที่เตรียมได้ลงไปในส่วนละลายเมทานอลที่มีตัวรองรับกระจายตัวอยู่
4. กวนผสมสารละลายเอมีนและตัวรองรับดังกล่าวที่อุณหภูมิห้องจนสารผสมกันได้ดี
5. ให้ความร้อนแก่สารผสมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนแห้ง
6. อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
7. บดตัวดูดซับที่เตรียมได้จนเป็นผงละเอียด จะได้ตัวดูดซับตามต้องการ

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของตัวดูดซับและเอมีนชนิดต่างๆที่เติมลงไป

Sample code	Adsorbent (wt.%)	Amine (wt.%)
Act-Al ₂ O ₃ -PEI800-20	80	20
Cal-Al ₂ O ₃ -PEI800-20	80	20
FSi-PEI800-20	80	20
FSi-AEEA-20	80	20
FSi-TRI-20	80	20
FSi-DETA-20	80	20
FSi-TETA-20	80	20
FSi-TEPA-20	80	20
FSi-PEI800-30	70	30
FSi-PEI800-40	60	40
FSi-PEI800-50	50	50
FSi-PEI800-60	40	60

3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ และการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม

1. ระบบการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ และการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม

ชุดทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ และการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมประกอบด้วย เครื่องวัดอัตราการไหลอัตโนมัติที่ทนต่อการกัดกร่อนของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ยี่ห้อ Sierra คอลัมน์บรรจุด้วยตัวดูดซับแบบคอกซ์วอดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 9 มิลลิเมตร ยาว 470 มิลลิเมตร เตาให้ความร้อนและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 3.1 ชุดควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller) และชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) สำหรับเบดหนึ่งตัวดูดซับ

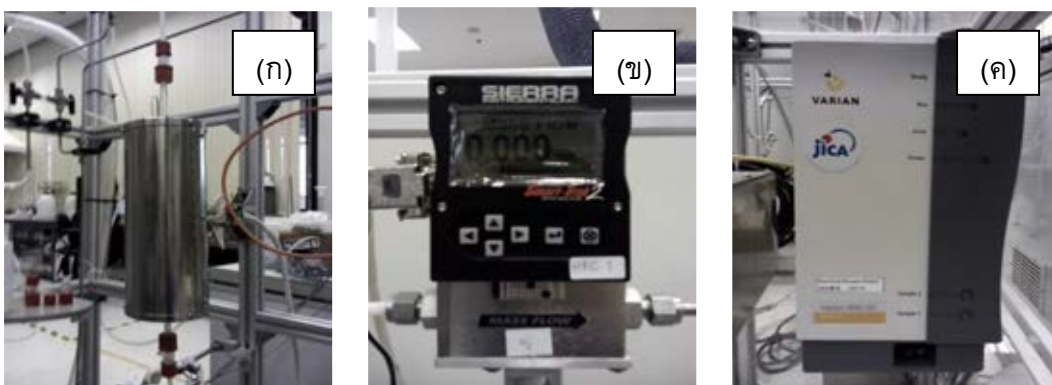
สำหรับการวัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากกระบวนการดูดซับ

- 1) ต่อแก๊สออนไลน์ไปยังแก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก (Micro gas chromatograph) ใช้คอลัมน์ PPU (Poraplot Q)

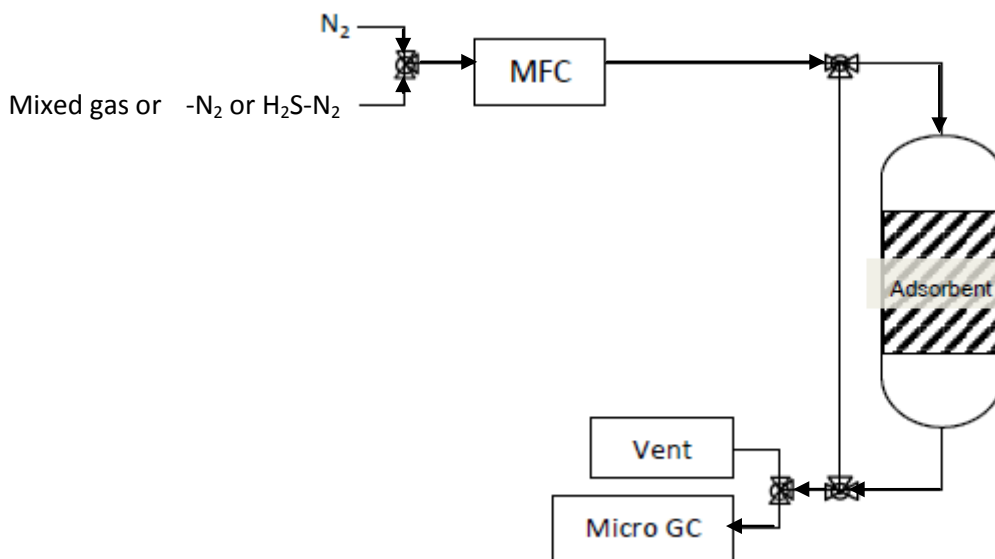
- 2) เก็บตัวอย่างทุกๆ 3 นาที จนได้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากกระบวนการดูดซับเท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์นั้นตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปในแก๊สโครมาโทกราฟมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 80 องศาเซลเซียส ส่วนไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปในแก๊สโครมาโทกราฟมีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 100 องศาเซลเซียส และสำหรับแก๊สผสมนั้นตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปในแก๊สโครมาโทกราฟมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 80 องศาเซลเซียส

การทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในเบตหนึ่งดังนี้

- บรรจุตัวดูดซับน้ำหนัก 1 กรัม ลงในคอลัมน์ โดยทำการ pre-treatment ตัวดูดซับโดยผ่านแก๊สไนโตรเจนอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 60-100 องศาเซลเซียส โดยขึ้นกับชนิดของเอมีนบนตัวรองรับ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ปรับอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผ่านแก๊สดังกล่าวอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ไปยังตัวดูดซับ ส่วนการทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จะปรับอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดสอบการดูดซับแก๊สดังกล่าวโดยผ่านแก๊สดังกล่าวอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ไปยังตัวดูดซับ และการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมจะทำการทดสอบ 2 ภาวะ โดยภาวะการทดลองแรกจะปรับอุณหภูมิที่ 80 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดสอบการดูดซับแก๊สดังกล่าวโดยผ่านแก๊สดังกล่าวอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที และภาวะการทดลองที่สองจะปรับอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดสอบการดูดซับแก๊สดังกล่าวโดยผ่านแก๊สดังกล่าวอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ไปยังตัวดูดซับ
- วัดความเข้มข้นแก๊สที่เหลือจากการดูดซับโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก



ภาพที่ 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (ก) คอลัมน์ดูดซับ, (ข) ชุดควบคุมอัตราการไหลแก๊ส และ (ค) แก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก

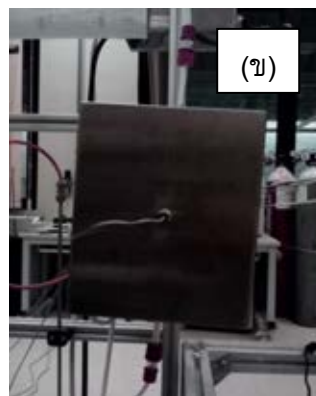
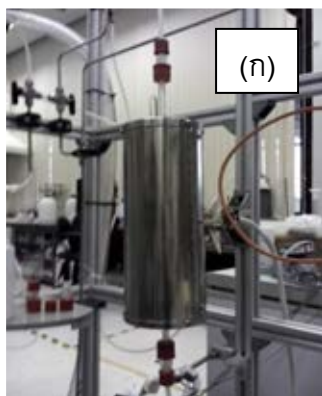


ภาพที่ 3.2 แผนผังชุดอุปกรณ์ทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

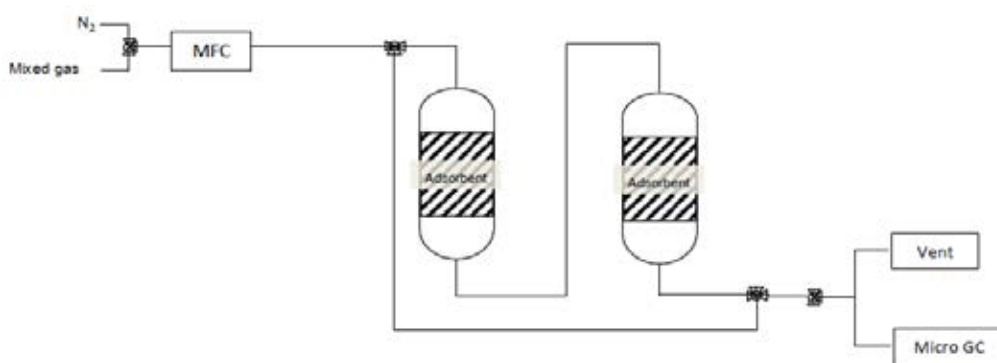
2. ระบบการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมแบบ 2 คอลัมน์

ชุดทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมจะใช้อุปกรณ์เหมือนกับระบบการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ แต่จะใช้เตาให้ความร้อนและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) จำนวน 2 เตา ดังแสดงในภาพที่ 3.3 แก๊สผสมที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน 75 % โดยปริมาตร คาร์บอนไดออกไซด์ 20 % โดยปริมาตร ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35 % โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ทำการทดลองด้วยคอลัมน์เบดหนึ่งที่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.4 ซึ่งคล้ายกับระบบการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์และต่อออนไลน์กับแก๊สโครมาโทกราฟ เก็บตัวอย่างทุกๆ 3 นาที จนได้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากกระบวนการดูดซับเท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า โดยแก๊สผสมนั้นตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปในแก๊สโครมาโทกราฟมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 80 องศาเซลเซียส สำหรับชุดควบคุมอัตราการไหลต่อเข้ากับแก๊สสองชนิดคือ แก๊สไนโตรเจน สำหรับใช้ในการทำความสะอาดตัวดูดซับก่อน และแก๊สผสม โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- บรรจุตัวดูดซับน้ำหนัก 1 กรัม ลงในคอลัมน์ pre-treatment ตัวดูดซับโดยผ่านแก๊สไนโตรเจนอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ปรับเตาให้ความร้อนที่ 1 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และเตาให้ความร้อนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมโดยผ่านแก๊สดังกล่าวอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ไปยังตัวดูดซับ
- วัดปริมาณแก๊สที่เหลือจากการดูดซับโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก



ภาพที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง (ก) คอลัมน์ที่ 1 และ (ข) คอลัมน์ที่ 2



ภาพที่ 3.4 แผนผังชุดอุปกรณ์ทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม

1. สมการการคำนวณ

การคำนวณของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

1. การคำนวณอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์

$$FR_{CO_2} = (FR \times C) / 100$$

2. การคำนวณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับ

$$C_t = (C_0 \times A) / A_{STD}$$

3. การคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ที่ Breakthrough capacity; $Cap(BT) = (BT \times FR_{CO_2}) / (V_{mol} \times W_{sorb})$

ที่ Saturation capacity; $Cap(S) = (FR_{CO_2} \times \int_0^t (C_0 - C_t) dt) / (V_{mol} \times W_{sorb})$

4. การคำนวณประสิทธิภาพของเอมีน

ที่ Breakthrough capacity; Efficiency of amine = $(Cap(BT) \times 2) / mmol_N$

ที่ Saturation capacity; Efficiency of amine = $(Cap(SAT) \times 2) / mmol_N$

ที่ C = ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซับ (%V)

C_0 = ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซับ (ppm)

C_t = ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับ (ppm)

A_{STD} = พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์ที่ Saturation

A = พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซับ

Cap(BT) = ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่ Breakthrough (มิลลิโมลต่อกับตัวดูดซับ)

Cap(SAT) = ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่อิ่มตัว (มิลลิโมลต่อกับตัวดูดซับ)

BT = เวลาที่ Breakthrough (นาที)

FR = อัตราการไหลแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที)

FR_{CO_2} = อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิลิตรต่อนาที)

V_{mol} = ปริมาตรโมลาร์ของแก๊สอุดมคติที่ภาวะมาตรฐาน

W_{sorb} = น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)

$mmol_N$ = จำนวนโมลของหมู่อะมิโนในโมเลกุลเอมีน (มิลลิโมล)

การคำนวณของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

5. การคำนวณอัตราการไหลของไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$FR_{H_2S} = (FR \times C) / 100$$

6. การคำนวณความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ

$$C_t = (C_0 \times A) / A_{STD}$$

7. การคำนวณความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\text{ที่ Breakthrough capacity; } Cap(BT) = (BT \times FR_{H_2S}) / (V_{mol} \times W_{sorb})$$

$$\text{ที่ Saturation capacity; } Cap(S) = (FR_{H_2S} \times \int_0^t (C_0 - C_t) dt) / (V_{mol} \times W_{sorb})$$

8. การคำนวณประสิทธิภาพของเอมีน

$$\text{ที่ Breakthrough capacity; Efficiency of amine} = (Cap(BT) \times 2) / mmol_N$$

$$\text{ที่ Saturation capacity; Efficiency of amine} = (Cap(SAT) \times 2) / mmol_N$$

ที่ C = ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ (%V)

C₀ = ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ (ppm)

C_t = ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ (ppm)

A_{STD} = พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Saturation

A = พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ

Cap(BT) = ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่ Breakthrough (มิลลิโมลต่อกับตัวดูดซับ)

Cap(SAT) = ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่อิ่มตัว (มิลลิโมลต่อกับตัวดูดซับ)

BT = เวลาที่ Breakthrough (นาที)

FR = อัตราการไหลแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที)

FR_{H₂S} = อัตราการไหลไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มิลลิลิตรต่อนาที)

V_{mol} = ปริมาตรโมลาร์ของแก๊สอุดมคติที่ภาวะมาตรฐาน

W_{sorb} = น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)

mmol_N = จำนวนโมลของหมู่อะมิโนในโมเลกุลเอมีน (มิลลิโมล)

3.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

1. เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) รุ่น System 2000 ยี่ห้อ Perkin Elmer ด้วยการใส่ KBr เป็นสารอ้างอิง ทำการทดสอบด้วยการชั่งน้ำหนัก KBr 100 มิลลิกรัม ผสมกับสารตัวอย่าง 1-2 มิลลิกรัม จากนั้นทำการบดผสมสารทั้งสองชนิดให้เข้ากัน นำสารที่ได้ไปอัดเป็นแผ่นบางๆ เพื่อให้แสงผ่านไปได้ ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกความดัน 10 ตัน เป็นเวลาประมาณ 1 นาที เนื่องจากเทคนิค FTIR ใช้หลักการผ่านของลำแสง นำสารตัวอย่างที่อัดเป็นแผ่นบางบรรจุลงในเครื่องวิเคราะห์ วัดค่าในช่วงคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ทำการสแกน 16 รอบต่อหนึ่งตัวอย่าง
2. เครื่องวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน, ไนโตรเจน และออกซิเจน (CHN Analyzer) รุ่น Truespec 628 ยี่ห้อ LEGO โดยอาศัยหลักการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (flash combustion) เพื่อเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างไปเป็นแก๊สที่สัมพันธ์กับธาตุนั้นๆ อย่างมีสัดส่วนที่แน่นอน ทำการชั่งสารตัวอย่างน้ำหนัก 0.15 กรัม จากนั้นห่อด้วยแคปซูลที่ทำจากดีบุก ใส่อากาศออกจากแคปซูลให้หมด นำแคปซูลที่ได้บรรจุลงในเครื่องวิเคราะห์ วัดค่าในช่วงอุณหภูมิ 950-1000 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 4 นาทีต่อสารตัวอย่าง
3. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยวิธีบีอีที (Surface area and porosity analyzer) รุ่น Autosorb-1 ยี่ห้อ Quantachrome ทำการทดสอบด้วยการใช้แก๊สฮีเลียมเป็นตัวพา นำตัวดูดซับ 0.2 กรัม บรรจุในหลอดแก้ว แทนที่ด้วยแก๊สไนโตรเจน (degas) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เมื่อแทนที่แก๊สเสร็จแล้ว นำหลอดบรรจุตัวดูดซับภายในที่ผ่านการไล่แก๊สแล้วไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาน้ำหนักที่แท้จริง จากนั้นนำหลอดบรรจุพร้อมตัวดูดซับต่อเข้ากับส่วนวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวขนาดรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวดูดซับ วัดค่าไอโซเทอร์มที่ -196 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง
4. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer: TGA) รุ่น Pyris Diamond ยี่ห้อ Perkin Elmer เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุ โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุ เมื่อได้รับความร้อนภายใต้ภาวะที่กำหนด การวิเคราะห์จะทำในระบบปิด เครื่องประกอบด้วยเตาเผา (Furnace) ที่มี

โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ (Temperature) ควบคุมบรรยากาศ ความดัน และมีระบบซึ่งนำหนักเข้ามาประกอบ การทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถทดสอบได้ถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบด้วยการนำตัวดูดซับหนัก 5 มิลลิกรัม บรรจุลงในภาตพลาสติกนิ่ม การวิเคราะห์ทำในภาวะที่อุณหภูมิ 30-800 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ 30-400 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ 400-800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนในการทดสอบซึ่งมีอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

5. เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น S-3400N ยี่ห้อ Hitachi ทดสอบตัวอย่างโดยการโรยตัวดูดซับลงบนแผ่นคาร์บอน จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมไปวิเคราะห์สัณฐานวิทยา โดยการบรรจุตัวอย่างลงในส่วนวิเคราะห์ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบโดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า

3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

1. ผลของชนิดตัวรองรับ

เพื่อศึกษาผลของชนิดตัวรองรับและเพื่อเลือกตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทดสอบตัวดูดซับดังนี้ Act-Al₂O₃-PEI800-20, Cal-Al₂O₃-PEI800-20 และ FSi-PEI800-20 ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที และทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

2. ผลของชนิดเอมีน

เพื่อศึกษาผลของชนิดเอมีนและเพื่อเลือกชนิดเอมีนที่ดีที่สุดและมีอายุการใช้งานยาวนานในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ชนิดเอมีนที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ PEI มวลโมเลกุล 800, AEEA, TRI, DETA, TETA และ TEPA บนตัวดูดซับฟูมิซิลิกา ทดสอบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที และทดสอบดูด

ซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

3. ผลของปริมาณเอมีนบนตัวดูดซับ

เพื่อเลือกตัวดูดซับที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยการเติมปริมาณเอมีน คือ 20, 30, 40, 50 และ 60 % โดยน้ำหนัก บนตัวดูดซับฟูมซิลิกา ได้ตัวดูดซับดังตาราง 3.1 ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

4. เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้กับตัวดูดซับในเชิงพาณิชย์

ทำการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมได้คือ FSi-PEI800-40 เปรียบเทียบกับตัวดูดซับในเชิงพาณิชย์คือ Molecular sieve 5A

5. ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในคอลัมน์เดี่ยว

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ทดลองโดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมได้คือ FSi-PEI800-40 ในภาวะแรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที และภาวะที่สองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความดันบรรยากาศ

6. ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

ทำการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความดันบรรยากาศ โดยต่อคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน โดยให้อุณหภูมิคอลัมน์

แรก 80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิคอลัมน์ที่สอง 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมได้คือ FSi-PEI800-40

7. ศึกษาการคืนสภาพของตัวดูดซับในระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

ทำการทดลองให้ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 คายสารดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยการป้อนแก๊สไนโตรเจนไล่ ภาวะที่ใช้ในการทดลองคือ อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิการคืนสภาพที่ 90 องศาเซลเซียส

8. ศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับในระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

ทำการทดลองการดูดซับและคายสารดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ที่ความดันบรรยากาศ โดยภาวะการดูดซับที่ใช้คือ ภาวะที่ได้กล่าวแล้วในการศึกษาการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมและภาวะการคายคือภาวะที่ได้กล่าวแล้วในการศึกษาการคืนสภาพของตัวดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ซึ่งจะทำการดูดซับและคายการดูดซับสลับกันไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยการพัฒนาตัวดูดซับใหม่ คือ ตัวดูดซับดัดแปรด้วยเอมีนบนตัวรองรับอะลูมินาและฟุ่มซิลิกา ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้แก่ ชนิดของตัวรองรับ ชนิดเอมีน ปริมาณเอมีนบนตัวรองรับ ศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ และ ศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน, ไนโตรเจน และออกซิเจน (CHN Analyzer) การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยเทคนิคบีอีที (Brunauer Emmett Teller: BET) การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยวิธีทีจีเอ (Thermogravimetric Analysis: TGA) และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscope: SEM) เพื่ออธิบายลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับและการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR)

การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับด้วยเทคนิค FT-IR ภาพที่ 4.1 แสดงหมู่ฟังก์ชันของตัวรองรับ $\text{Act-Al}_2\text{O}_3$ และตัวดูดซับ $\text{Act-Al}_2\text{O}_3\text{-PEI800-20}$ ที่มีปริมาณเอมีน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับตัวรองรับ $\text{Act-Al}_2\text{O}_3$ ที่จำนวนคลื่น 1095 cm^{-1} แสดงองค์ประกอบ O-H เนื่องจากอะลูมินากัมมันต์เกิดการดูดความชื้นเข้าไปในโครงสร้าง ตัวดูดซับ $\text{Act-Al}_2\text{O}_3\text{-PEI800-20}$ แสดงหมู่ C-H ในช่วง จำนวนคลื่น 1484 cm^{-1} เมื่อเติมพอลิเอมีนลงบนแอคทีเวทอะลูมินา พบว่า หมู่ของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิปรากฏที่ จำนวนคลื่น 1598 cm^{-1} และตามลำดับ ผลที่ได้เป็นไปได้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Moreira และคณะ [25] ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับสีย้อมจากน้ำเสียของการย้อมผ้าด้วยตัวดูดซับอะลูมินากัมมันต์พบว่า ผล

การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับด้วยเทคนิค FT-IR ของตัวดูดซับอะลูมินาแกมมันต์มีจำนวนคลื่นในบริเวณเดียวกันกับตัวดูดซับอะลูมินาแกมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

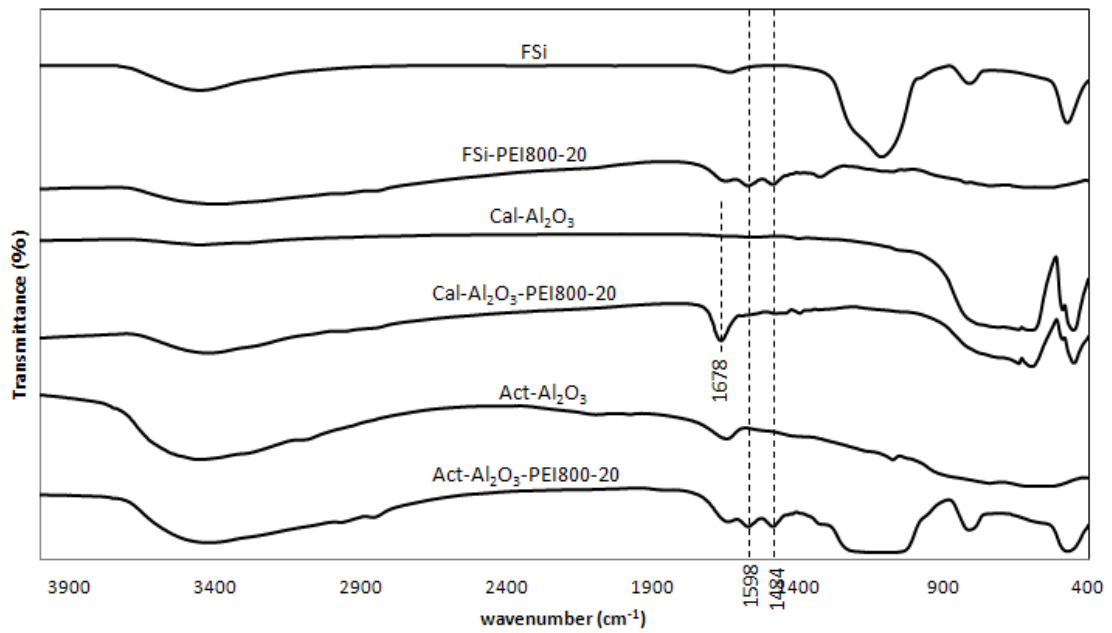
ตัวรองรับ $\text{CaI-Al}_2\text{O}_3$ ที่บริเวณจำนวนคลื่น 750-570 และ 460 cm^{-1} แสดงองค์ประกอบของหมู่ Al-O สำหรับตัวดูดซับ และตัวดูดซับ $\text{CaI-Al}_2\text{O}_3\text{-PEI800-20}$ ที่มีปริมาณเอมีน 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก แสดงหมู่ N-H ที่ จำนวนคลื่น 1678 cm^{-1} เมื่อเติมพอลิเอมีนลงบนแคลไซต์อะลูมินา แสดงหมู่ของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิ Hernández และคณะ [26] ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของแคลไซต์อะลูมินาที่อุณหภูมิแคลไซต์ต่างกันพบว่า มีจำนวนคลื่นในบริเวณเดียวกันกับตัวดูดซับแคลไซต์อะลูมินาที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตัวรองรับฟลูมซิลิกา (FSi) ที่จำนวนคลื่น 1110, 805 และ 475 cm^{-1} แสดงองค์ประกอบของหมู่ Si-O-Si และตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 ที่มีปริมาณเอมีน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงหมู่ C-H ในช่วงจำนวนคลื่น 1484 cm^{-1} เมื่อเติมพอลิเอมีนลงบนฟลูมซิลิกาพบหมู่ของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิปรากฏที่จำนวนคลื่น 1598 cm^{-1} เช่นเดียวกับกรณีที่เติมเอมีนลงในแอคทิเวทอะลูมินา ผลการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลที่ได้มีจำนวนคลื่นบริเวณเดียวกันกับงานวิจัยของ Xu และคณะ [27] ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของฟลูมซิลิกา

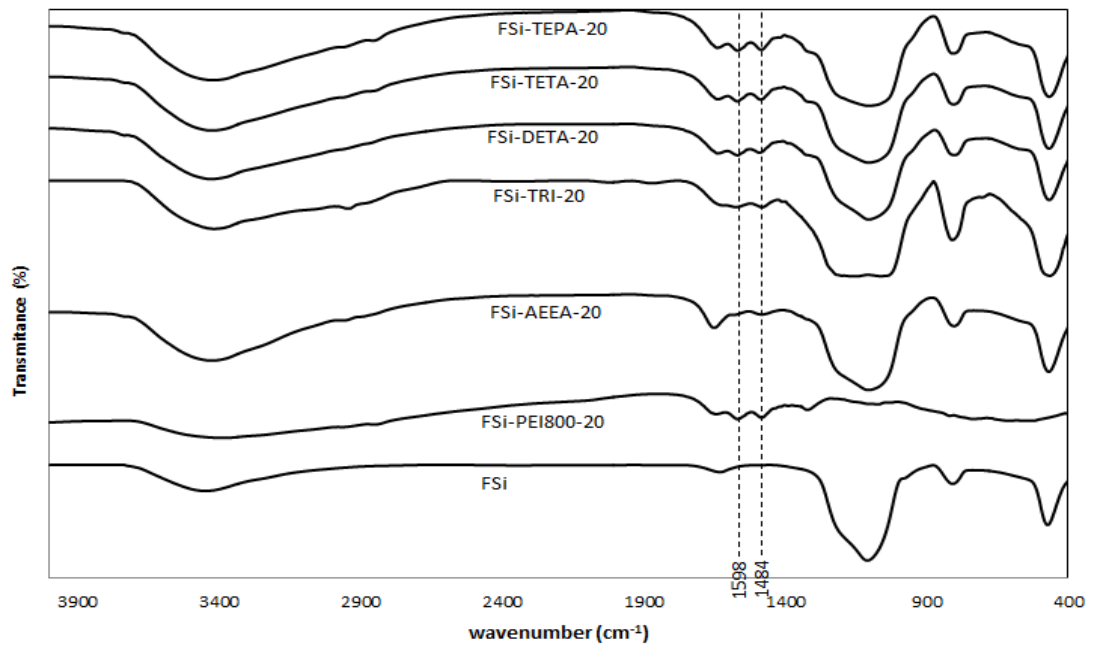
ภาพที่ 4.2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับมีเอมีนต่างชนิดกันปริมาณเอมีน 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับฟลูมซิลิกา ได้แก่ ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-AEEA-20, FSi-TRI-20, FSi-DETA-20, FSi-TETA-20 และ FSi-TEPA-20 ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่พบเหมือนกัน แสดงลักษณะของหมู่ C-H ที่ จำนวนคลื่น 1484 cm^{-1} เมื่อเติมลงเอมีนบนฟลูมซิลิกาพบหมู่ของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิปรากฏที่จำนวนคลื่น 1598 cm^{-1}

ภาพที่ 4.3 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับที่มีปริมาณพอลิเอมีนต่างกัน (PEI800 = 20-60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) บนตัวรองรับฟลูมซิลิกา ได้แก่ ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-PEI800-30, FSi-PEI800-40, FSi-PEI800-50 และ FSi-PEI800-60 ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่พบเหมือนกัน แสดงลักษณะของหมู่ C-H ที่จำนวนคลื่น 1484 cm^{-1} เมื่อเติมพอลิเอมีน (PEI) บนฟลูมซิลิกาพบหมู่ของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิขึ้นที่จำนวนคลื่น 1598 cm^{-1} และจำนวนคลื่นประมาณ 3400 cm^{-1} ซึ่งแสดงลักษณะของหมู่ Si-OH เมื่อปริมาณของพอลิเอมีนเพิ่มขึ้นจะเกิดการบดบังหมู่ไฮดรอกซิลทำให้ความสูงของแถบที่บริเวณ 3400 cm^{-1} ลดลง

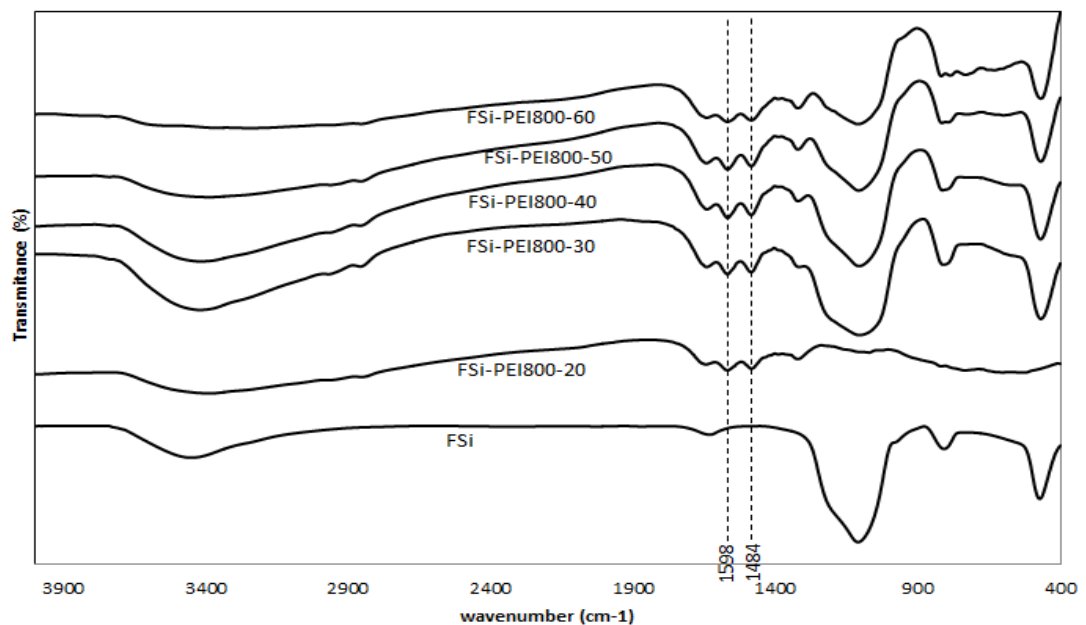
จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับที่ดัดแปรด้วยเอมีน บริเวณเอมีนที่พบจะมีบริเวณใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลพอลิเอมีนของ Yudovin-Farber และคณะ [28]



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ Act-Al₂O₃-PEI800-20 Cal-Al₂O₃-PEI800-20 และ FSi-PEI800-20 ที่มีปริมาณพอลิเอมีน (PEI) ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.2 โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-AEEA-20, FSi-TRI-20, FSi-DETA-20, FSi-TETA-20 และ FSi-TEPA-20 ที่มีปริมาณเอมีนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.3 โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-PEI800-30, FSi-PEI800-40, FSi-PEI800-50 และ FSi-PEI800-60 ที่มีปริมาณพอลิเอมีน (PEI) ร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

4.1.2 การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN Analyzer)

ผลจากการวิเคราะห์ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยวิธีการอิมเพกเนชัน โดยการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เพื่อศึกษาองค์ประกอบและปริมาณของธาตุองค์ประกอบของเอมีนบนตัวรองรับ โดยอาศัยหลักการการเผาไหม้อย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 950-1000 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยการฝังตัวของเอมีนความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่คำนวณตามทฤษฎี (แสดงในภาคผนวก ง.) และมีปริมาณเอมีนที่มีอยู่จริงใกล้เคียงกับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดย FSi-DETA-20 มีองค์ประกอบของไนโตรเจนสูงที่สุดคือ ร้อยละ 8.40 การมีองค์ประกอบของไนโตรเจนสูงจะช่วยให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากขึ้น

ผลจากการวิเคราะห์ตัวดูดซับ FSi-PEI800 ที่มีปริมาณเอมีนแตกต่างกัน พบว่าปริมาณเอมีนที่มีอยู่จริงใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ตามทฤษฎี และการเพิ่มปริมาณเอมีนจะทำให้มีไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเอมีนบนตัวรองรับ

Samples	Ultimate analysis/mass%		
	C	H	N
Act-Al ₂ O ₃ -PEI800-20	10.95	3.00	6.53
Cal-Al ₂ O ₃ -PEI800-20	9.35	1.87	4.99
FSi-PEI800-20	10.53	2.65	6.34
FSi-AEEA-20	10.94	2.95	6.07
FSi-TRI-20	6.68	1.80	3.24
FSi-DETA-20	10.70	3.12	8.40
FSi-TETA-20	10.26	2.82	7.07
FSi-TEPA-20	10.59	2.78	6.73
FSi-PEI800-30	14.96	3.50	9.04
FSi-PEI800-40	19.75	4.63	11.78
FSi-PEI800-50	25.27	5.99	15.47
FSi-PEI800-60	29.88	7.07	18.54

4.1.3 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยเทคนิคบีอีที (Brunauer Emmett Teller: BET)

การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยการวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวรองรับ และ ตัวดูดซับเอมีนบนตัวรองรับที่มีชนิดและปริมาณเอมีนที่แตกต่างกัน โดยการวัดการดูดซับทางกายภาพด้วยแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า ตัวรองรับอะลูมินากัมมันต์มีพื้นที่ผิว 119.2 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.258 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 3.935 นาโนเมตร (หน้า 94) เมื่อมีการเติมพอลิเอมีนมวลโมเลกุล 800 ลงในตัวรองรับแอคทิเวทอะลูมินา พอลิเอมีนไปเคลือบบนพื้นผิวของอะลูมินากัมมันต์เกิดการไปปิดบังรูพรุน อาจเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ระหว่างอนุภาค (interparticle pore) ทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้ด้วยเทคนิค BET

สำหรับตัวรองรับแคลไซต์อะลูมินามีค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิว 3.453 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.047 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 23.84 นาโนเมตร จาก Pore size distribution (ภาคผนวก ค.) พบว่าแคลไซต์อะลูมินาไม่มีรูพรุนในอนุภาค เมื่อมีการเติมพอลิเอมีนมวลโมเลกุล 800 ลงในตัวรองรับแคลไซต์อะลูมินา พอลิเอมีนที่อยู่บนพื้นผิวของอะลูมินากัมมันต์เกิดการไปเคลือบบนพื้นผิวของแคลไซต์อะลูมินาทำให้ไม่สามารถวัดค่าได้ด้วยเทคนิค BET

ตัวรองรับฟุ่มซิลิกาเมื่อทำการเติมพอลิเอมีนมวลโมเลกุล 800 ลงไป (ร้อยละ 20-60 โดยน้ำหนัก) มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 4.23-91.31 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนอยู่ในช่วง 0.222-1.831 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ในช่วง 1.179-1.347 นาโนเมตร ขึ้นกับปริมาณของ PEI ที่เติม เมื่อเปรียบเทียบกับฟุ่มซิลิกาที่ไม่เติมเอมีน พบว่า ฟุ่มซิลิกามีค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิว 202.80 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 1.860 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนตัวดูดซับ 1.192 นาโนเมตร จาก Pore size distribution (ภาคผนวก ค.) พบว่าฟุ่มซิลิกาไม่มีรูพรุนในตัวเอง เมื่อเติมเอมีนลงไปบนตัวรองรับส่งผลให้พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนลดลง และขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น เนื่องจากฟุ่มซิลิกามีโครงสร้างรูพรุนที่เกิดระหว่างอนุภาคของฟุ่มซิลิกามา (interparticle pore) แต่ฟุ่มซิลิกานั้นมีอนุภาคที่เล็กกว่าอะลูมินากัมมันต์และแคลไซต์อะลูมินาทำให้ตัวดูดซับเกิดรูพรุนระหว่างอนุภาคที่สามารถวัดค่าได้ด้วยเทคนิค BET ผลที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการวิจัยของ Goepfert และคณะ [29]

ภาพที่ 4.4 แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ FSi-PEI ที่มีปริมาณเอมีนร้อยละ 20-60 โดยน้ำหนัก จากภาพจะเห็นว่า การเติมเอมีนเพิ่มขึ้นไม่มีผลให้โครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับเปลี่ยนแปลง เนื่องจากตัวดูดซับยังแสดงลักษณะของรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 10-2000 อังสตรอม

จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจน ซึ่งใช้ยืนยันขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ของตัวดูดซับที่ศึกษา ลักษณะของตัวดูดซับนั้นสามารถสังเกตได้จากรูปร่างของไอโซเทอร์ม ภาพที่ 4.5 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนตัวดูดซับ FSi-PEI800 พบว่าไอโซเทอร์มของตัวดูดซับทุกตัวแสดงไอโซเทอร์มแบบบีอีทีชนิดที่ 3 ซึ่งแสดงลักษณะกราฟคล้ายกระจกเงา ซึ่งให้เห็นว่าขนาดรูพรุนมีการกระจายตัวในช่วงกว้าง โดยไอโซเทอร์มชนิดนี้เป็นไอโซเทอร์มที่สารดูดซับในระบบเกิดการดูดซับอย่างต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียวจนถึงโมเลกุลหลายชั้น การที่ตัวดูดซับมีการกระจายตัวของรูพรุนในช่วงกว้างเหมาะสำหรับการกระจายตัวของเอมีน โดยที่ไม่ทำให้โครงสร้างของรูพรุนเปลี่ยนแปลง [9] สอดคล้องกับภาพที่ 4.4

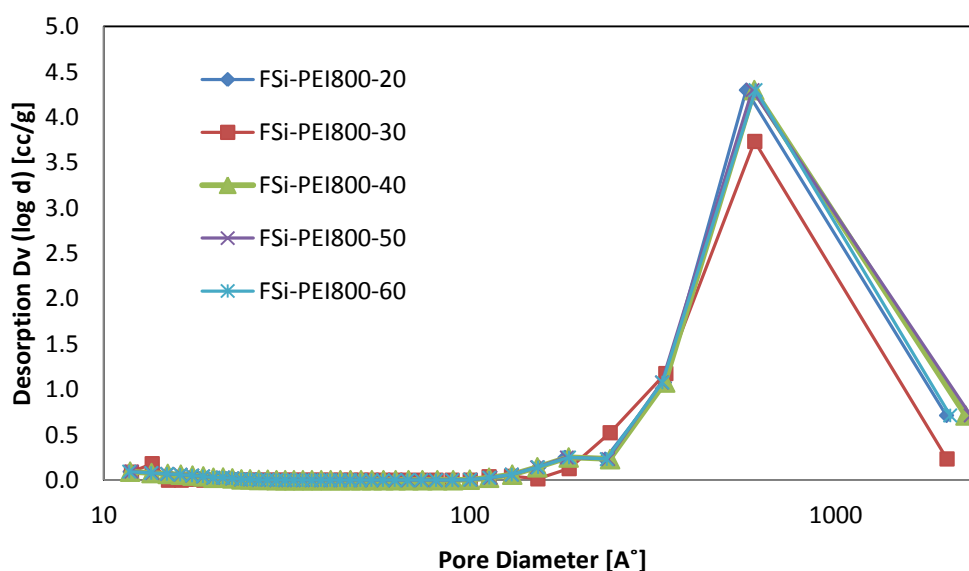
จากการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular Sieve 5A (ภาคผนวก ค.) จากไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุน พบว่าตัวดูดซับดังกล่าวแสดงลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบบีอีทีชนิด 1 ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ไอโซเทอร์มแบบนี้มักจะพบในวัสดุที่มีความพรุนสูงมากแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวนอกต่ำ ทำให้การดูดซับเกิดการขึ้นเร็วในตอนต้นและเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่ ซึ่งอาจเกิดได้กับตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก [30]

ตารางที่ 4.2 BET surface area, Pore volume และ Pore size ของตัวดูดซับที่เตรียมได้และ
ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

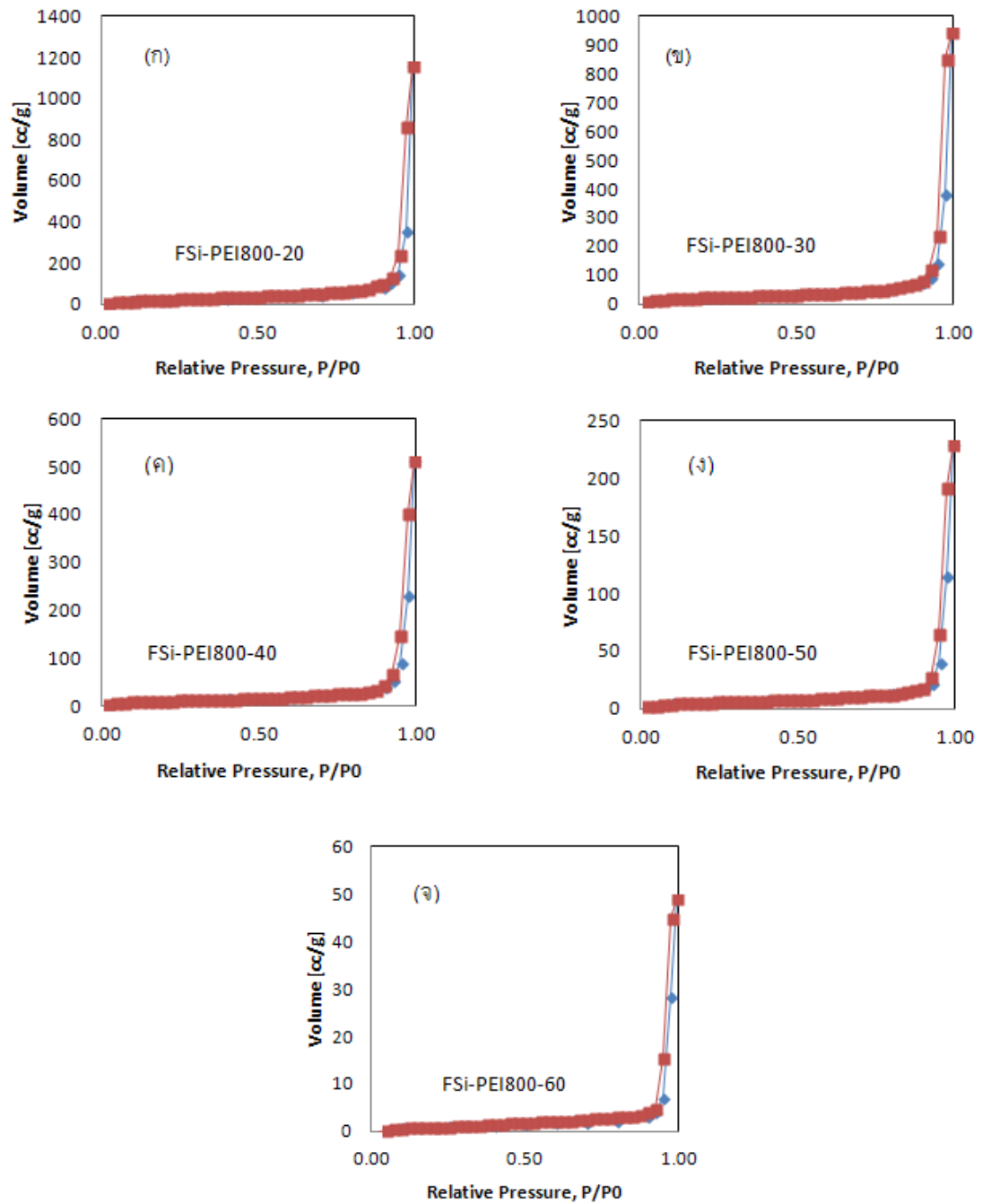
Sample	BET surface area (m ² /g)	Pore volume (cm ³ /g)	Pore size* (nm)
Act-Al ₂ O ₃	119.2	0.258	3.935
Cal-Al ₂ O ₃	3.453	0.047	23.840
FSi	202.8	1.860	1.192
Act-Al ₂ O ₃ -PEI800-20	NA**	NA**	NA**
Cal-Al ₂ O ₃ -PEI800-20	NA**	NA**	NA**
FSi-PEI800-20	91.31	1.831	1.179
FSi-PEI800-30	81.18	1.510	1.356
FSi-PEI800-40	43.51	0.820	1.350
FSi-PEI800-50	20.33	0.368	1.356
FSi-PEI800-60	4.226	0.082	1.347
Molecular sieve 5A	334.9	0.222	2.660

*จากค่าเฉลี่ยของ Average pore size

NA** = วัดค่าไม่ได้



ภาพที่ 4.4 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ FSi-PEI ที่มีปริมาณเอมีนแตกต่างกัน



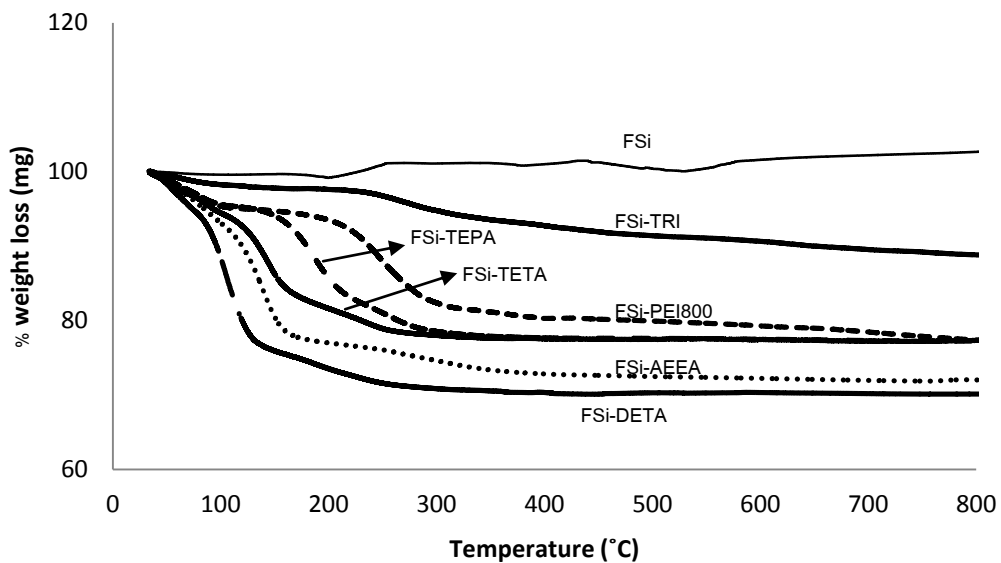
ภาพที่ 4.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจน (ก) FSi-PEI800-20, (ข) FSi-PEI800-30, (ค) FSi-PEI800-40, (ง) FSi-PEI800-50 และ (จ) FSi-PEI800-60

4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA)

ภาพที่ 4.6 แสดงรูปแบบการสลายตัวของตัวรองรับฟุ่มซิลิกาและตัวดูดซับฟุ่มซิลิกาที่มีชนิดเอมีนแตกต่างกัน จากกราฟตัวรองรับ FSi (ไม่มีเอมีน) ไม่มีการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 30-800 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบกับตัวดูดซับฟุ่มซิลิกาที่มีเอมีนชนิดต่างๆ ตัวดูดซับ FSi-TRI-20 สามารถแบ่งช่วงการสลายตัวของ FSi-TRI-20 คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส เป็นช่วงสลายตัวของหมู่ไซลานอลและไตรเอมีน และช่วงอุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส เป็นส่วนที่ไม่สลายตัวของฟุ่มซิลิกา สำหรับตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 สามารถแบ่งช่วงการสลายตัวของ FSi-PEI800-20 คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียส เป็นช่วงสลายตัวของหมู่ไซลานอลและพอลิเอมีน และช่วงอุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส เป็นส่วนที่ไม่สลายตัวของฟุ่มซิลิกา

สำหรับตัวดูดซับ FSi-TEPA-20, FSi-TETA และ FSi-AEEA-20 สามารถแบ่งช่วงการสลายตัว คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียส เป็นช่วงสลายตัวของหมู่ไซลานอลและเอมีน และช่วงอุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส เป็นส่วนที่ไม่สลายตัวของฟุ่มซิลิกา

และตัวดูดซับ FSi-DETA-20 สามารถแบ่งช่วงการสลายตัวของ FSi-DETA-20 คือ ช่วงอุณหภูมิ 80-400 องศาเซลเซียส เป็นช่วงการสูญเสียน้ำ การสลายตัวของหมู่ไซลานอลและไดเอทิลีนไตรเอมีน และช่วงอุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส เป็นส่วนที่ไม่สลายตัวของฟุ่มซิลิกา จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวดูดซับที่ดัดแปรด้วยเอมีนชนิดต่างๆ นั้น DETA เป็นเอมีนที่เกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเอมีนชนิดอื่นๆ แสดงว่า DETA มีความเสถียรทางความร้อนได้น้อยที่สุด ซึ่งผลที่ได้คล้ายคลึงกับการวิจัยของ Plaza และคณะ [31]

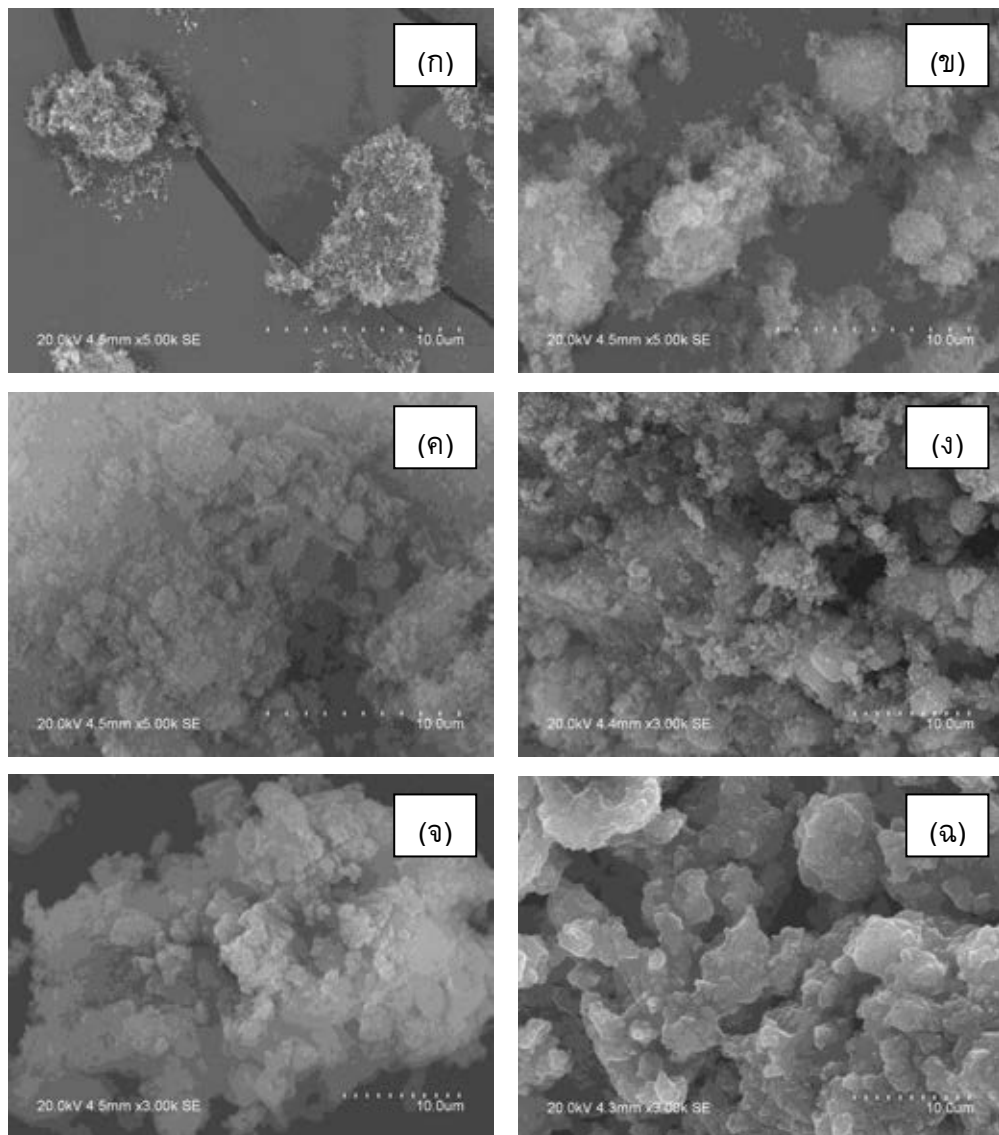


ภาพที่ 4.6 รูปการสลายตัวของตัวรองรับ FSi และตัวดูดซับ FSi ที่มีชนิดเอมีนที่แตกต่างกัน

4.1.5 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscope: SEM)

จากการวิเคราะห์ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยวิธีการฝังตัว โดยใช้เทคนิคเอสอีเอ็ม เพื่อศึกษา ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับก่อนและหลังการเติมเอมีน พิจารณาการกระจายตัวของ เอมีนบนตัวรองรับฟูมซิลิกา ภาพที่ 4.7 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวรองรับ FSi และ ตัวดูดซับ FSi-PEI800 พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัวดูดซับมีปริมาณของพอลิเอมีนเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณเอมีนต่ำ FSi-PEI800-20 พบว่าพอลิเอมีนมีการกระจายตัวอยู่บนตัวรองรับฟูมซิลิกาได้ดี ขณะที่ปริมาณพอลิเอมีนเพิ่มขึ้น FSi-PEI800-30 และ FSi-PEI800-40 พอลิเอมีนกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอ และที่พอลิเอมีนมาก FSi-PEI800-50 และ FSi-PEI800-60 พอลิเอมีนเกาะกลุ่มกันเองเป็นก้อน

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับที่เตรียมได้ พบว่าเอมีนกระจายตัวบนฟูมซิลิกาได้ดี แต่เมื่อเติมเอมีนลงไปไนปริมาณที่สูงขึ้น เอมีนจะบดบังรูพรุน บางส่วนของฟูมซิลิกา ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Shama และคณะ [20]



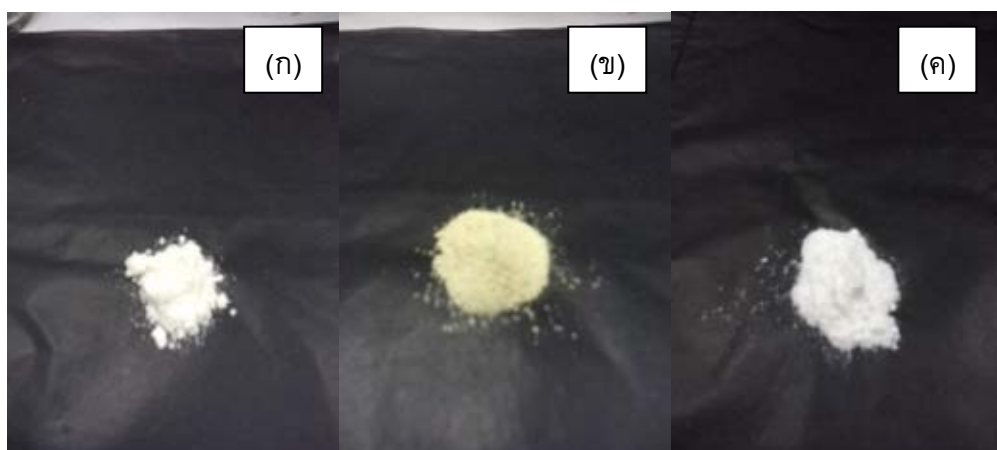
ภาพที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ PEI มวลโมเลกุล 800 บนฟลูมซิลิกา (ก) FSi, (ข) FSi-PEI800-20, (ค) FSi-PEI800-30, (ง) FSi-PEI800-40, (จ) FSi-PEI800-50 และ (ฉ) FSi-PEI800-60

4.2 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

4.2.1 ผลของชนิดของตัวรองรับ

ในการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ภาวะทดลองที่ใช้คือ 80 องศาเซลเซียส จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า คาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิ 75-80 องศาเซลเซียส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และในการศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ภาวะทดลองที่ใช้คือ 30 องศาเซลเซียส จากงานวิจัยของแวนดาว [30] ได้ศึกษาภาวะการดูดซับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ซิลิกาตัดแปรด้วยเอมีนพบว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเกิดการดูดซับได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในการทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

เพื่อเปรียบเทียบชนิดของตัวรองรับในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับ Act-Al₂O₃-PEI800-20, Cal-Al₂O₃-PEI800-20 และ FSi-PEI800-20 ภาพที่ 4.8 แสดงลักษณะของตัวดูดซับแต่ละชนิดที่เตรียมได้

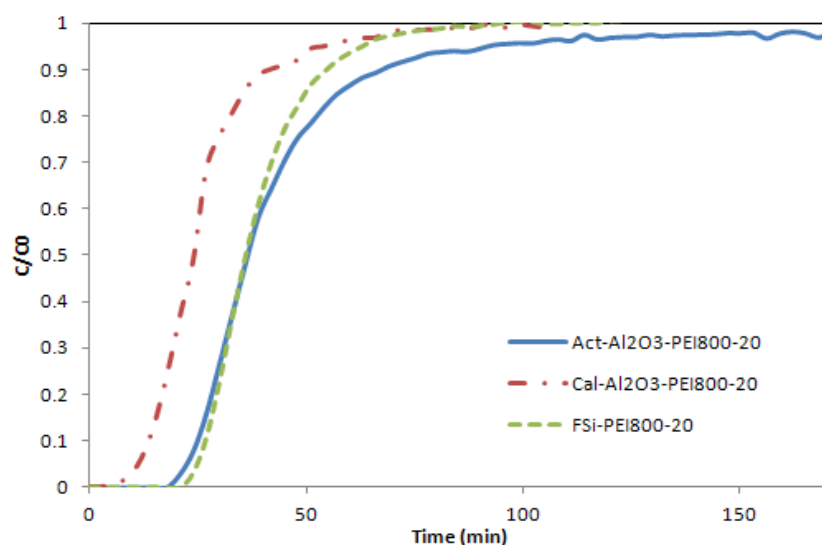


ภาพที่ 4.8 ลักษณะของตัวดูดซับที่เตรียมได้ (ก) ตัวดูดซับ Act-Al₂O₃-PEI800-20, (ข) Cal-Al₂O₃-PEI800-20 และ (ค) FSi-PEI800-20

ภาพที่ 4.9 และ ตารางที่ 4.3 แสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของตัวดูดซับ Act-Al₂O₃-PEI800-20, Cal-Al₂O₃-PEI800-20 และ FSi-PEI800-20 พบว่าตัวดูดซับทั้งสามชนิดสามารถ

ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยค่าความดันลด (ΔP) เกิดขึ้นในระบบมีค่าน้อยมาก ที่อัตราไหลแก๊สคงที่ค่าเดียวกัน ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 21 นาที ความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough คือ 0.469 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อิมมัตว 0.868 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ จะเห็นว่าตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าตัวดูดซับ Act-Al₂O₃-PEI800-20 และ Cal-Al₂O₃-PEI800-20 ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเอมีนบนตัวรองรับ FSi-PEI800-20 มีค่าสูงสุด (Eff(BT) = 0.202)) จึงเลือกใช้ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 ในการทดลองต่อไป การอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ 1.) คาร์บอนอะตอม 1 อะตอม ในคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุลเกิดอันตรกิริยากับไนโตรเจน 1 อะตอม ในพอลิเอมีน และ 2.) คาร์บอนอะตอม 1 อะตอมในคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมเลกุล เกิดอันตรกิริยากับไนโตรเจน 2 อะตอม ในพอลิเอมีน 2 กลุ่ม (แสดงในภาคผนวก ซ.)

ภาพที่ 4.10 และ ตารางที่ 4.4 แสดงความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสของตัวดูดซับ Act-Al₂O₃-PEI800-20, Cal-Al₂O₃-PEI800-20 และ FSi-PEI800-20 พบว่าตัวดูดซับทั้งสามชนิดสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ โดยค่าความดันลด (ΔP) เกิดขึ้นในระบบมีค่าน้อยมาก ที่อัตราไหลแก๊สคงที่ค่าเดียวกัน ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 132 นาที ความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough คือ 0.592 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์อิมมัตว 0.627 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ จะเห็นว่าตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าตัวดูดซับ Act-Al₂O₃-PEI800-20 และ Cal-Al₂O₃-PEI800-20 ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของเอมีนบนตัวรองรับ FSi-PEI800-20 มีค่าสูงสุด (Eff(BT) = 0.255)) ซึ่งให้ผลที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเลือกใช้ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 ในการทดลองต่อไป การอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งอันตรกิริยาระหว่างเอมีนและไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ 1.) ไฮโดรเจนอะตอม 2 อะตอม ในไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 โมเลกุลเกิดอันตรกิริยากับไนโตรเจน 1 อะตอม ในพอลิเอมีน และ 2.) ไฮโดรเจนอะตอม 2 อะตอมในไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 โมเลกุล เกิดอันตรกิริยากับไนโตรเจน 2 อะตอม ในพอลิเอมีน 2 กลุ่ม (แสดงในภาคผนวก ซ.)



ภาพที่ 4.9 ผลของชนิดของตัวรองรับต่อประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ Act-Al₂O₃-PEI800-20, Cal-Al₂O₃-PEI800-20 และ FSi-PEI800-20 ภาวะ : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ไนแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

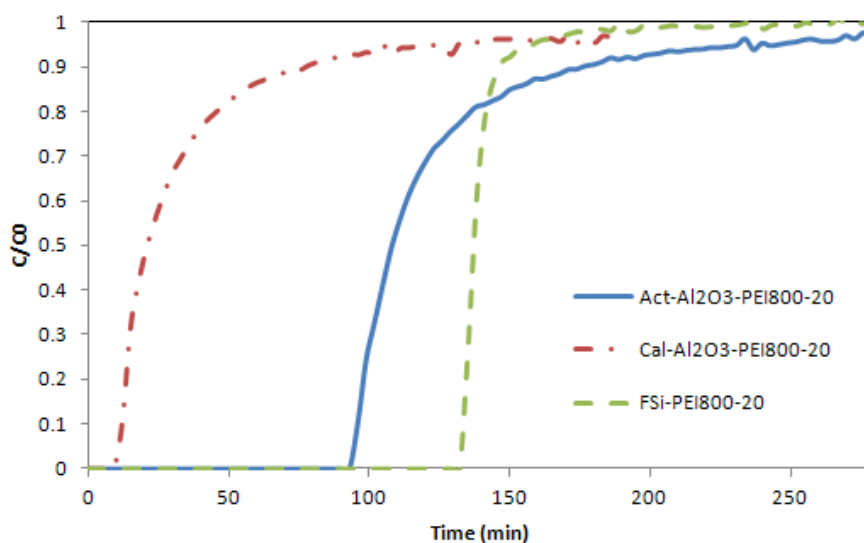
ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับที่ใช้ตัวรองรับต่างชนิดกัน

Sample	BT	S	Cap(BT) ^{***}	Cap(S) ^{****}	Efficiency of Amine	
	Time* (min)	Time** (min)	(mmol/ g-sorb)	(mmol/ g-sorb)	Eff(BT)	Eff(S)
Act-Al ₂ O ₃ -PEI800-20	18	43.87	0.402	0.979	0.173	0.421
Cal-Al ₂ O ₃ -PEI800-20	3	26.50	0.067	0.591	0.029	0.254
FSi-PEI800-20	21	38.90	0.469	0.868	0.202	0.373

ภาวะการทดลอง : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ไนแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity



ภาพที่ 4.10 ผลของชนิดของตัวรองรับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Act-Al₂O₃-PEI800-20, Cal-Al₂O₃-PEI800-20 และ FSi-PEI800-20 ภาวะ : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับที่ใช้ตัวรองรับต่างชนิดกัน

Sample	BT	S	Cap(BT) ^{***}	Cap(S) ^{****}	Efficiency of Amine	
	Time* (min)	Time** (min)	(mmol/ g-sorb)	(mmol/ g-sorb)	Eff(BT)	Eff(S)
Act-Al ₂ O ₃ -PEI800-20	93	125.18	0.417	0.559	0.179	0.240
Cal-Al ₂ O ₃ -PEI800-20	9	35.62	0.040	0.159	0.017	0.068
FSi-PEI800-20	132	140.48	0.592	0.627	0.255	0.270

ภาวะการทดลอง : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

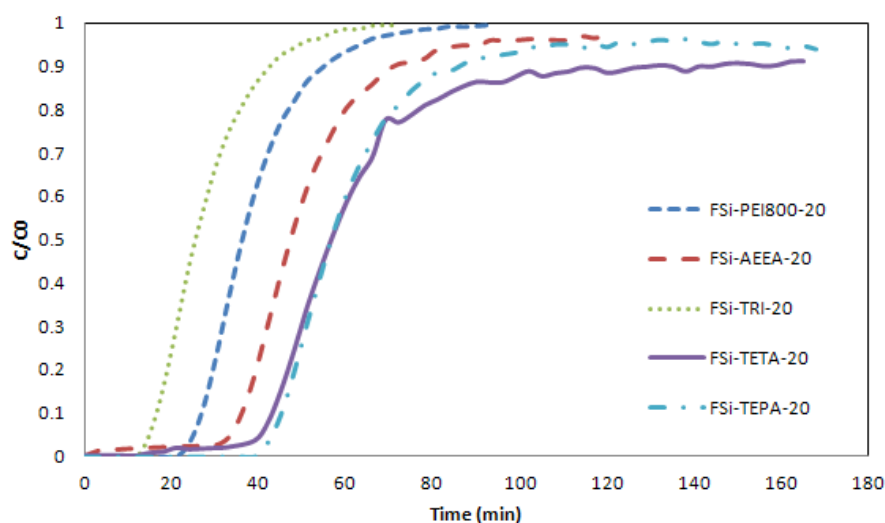
** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity

4.2.2 ผลของชนิดของเอมีน

ภาพที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.5 แสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวดูดซับที่มีชนิดของเอมีนที่แตกต่างกัน ที่ภาวะความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 10% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที ภาพที่ 4.11 ตัวดูดซับ FSi-TETA-20 มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough คือ 0.925 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อิ่มตัว 1.255 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ในขณะที่ตัวดูดซับ FSi-TEPA-20, FSi-AEEA-20, FSi-PEI800-20 และ FSi-TRI-20 มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough คือ 0.871, 0.785, 0.469 และ 0.237 ตามลำดับ เนื่องจากเอมีนแต่ละชนิดมีมวลโมเลกุลที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีปริมาณของจำนวนโมลเอมีนที่แตกต่างกันออกไป (แสดงในภาคผนวก จ.) ส่งผลให้ตัวดูดซับที่มีจำนวนโมลของเอมีนที่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้น (ส่วน TETA มีโมลของเอมีนสูงสุด = 5.47 โมล) ส่วน FSi-DETA-20 ไม่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะการทดลองนี้ได้ เนื่องจากเกิดการหลอมละลายของไดเอทิลีนไตรเอมีน ซึ่งเอมีนแต่ละชนิดจะเกิดการหลอมละลายที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันออกไป (แสดงในภาคผนวก ฉ.) เนื่องจากพอลิเอมีนเป็นเอมีนชนิดที่สามารถทนความร้อนได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเอมีนชนิดอื่นๆ อีกทั้งมีความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเลือกใช้ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 ในการทดลองต่อไป

ภาพที่ 4.12 และ ตารางที่ 4.6 แสดงความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยตัวดูดซับที่มีชนิดของเอมีนที่แตกต่างกัน ที่ภาวะความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที ภาพที่ 4.12 ตัวดูดซับ FSi-DETA-20 มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough คือ 0.790 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์อิ่มตัว 0.816 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ในขณะที่ตัวดูดซับ FSi-TETA-20, FSi-PEI800-20, FSi-TEPA-20 , FSi-AEEA-20 และ FSi-TRI-20 มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough คือ 0.629, 0.589, 0.522, 0.442 และ 0.147 ตามลำดับ เนื่องจากเอมีนต่างชนิดกันมีมวลโมเลกุลที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีปริมาณของจำนวนโมลเอมีนที่แตกต่างกันออกไป (แสดงในภาคผนวก จ.) ส่งผลให้ตัวดูดซับที่มีจำนวนโมลของเอ

มีนที่สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เพิ่มขึ้น (ส่วน DETA มีโมลของเอมีนสูงสุด = 5.82 โมล) เนื่องจากพอลิเอมีนเป็นเอมีนชนิดที่สามารถทนความร้อนได้ที่อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงกว่าเอมีนชนิดอื่นๆ อีกทั้งมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงเลือกใช้ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 ในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 4.11 ผลของชนิดของเอมีนต่อประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-AEEA-20, FSi-TRI-20, FSi-TEPA-20 และ FSi-TETA-20
ภาวะ : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

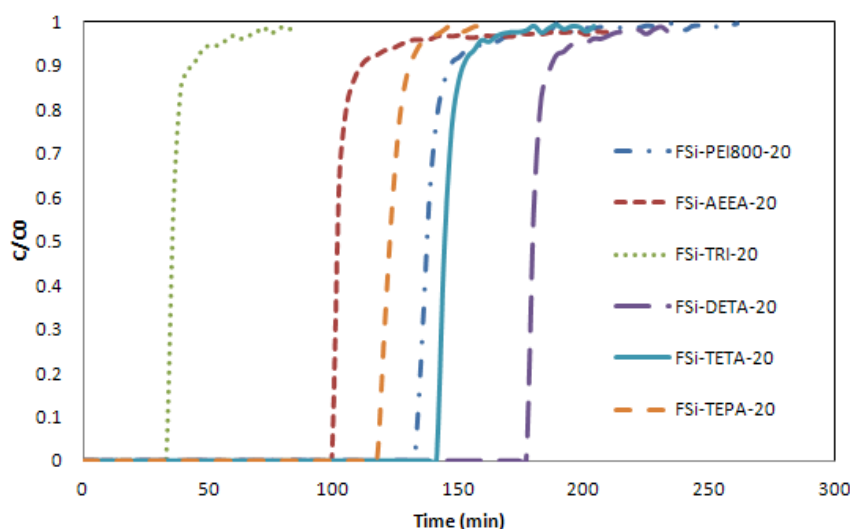
ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับฟิวนิลิกที่มีเอมีนต่างชนิดกัน

Sample	Mole Amine	BT	S	Cap(BT) ^{***}	Cap(S) ^{****}	Efficiency of Amine	
		Time* (min)	Time** (min)	(mmol/g-sorb)	(mmol/g-sorb)	Eff(BT)	Eff(S)
FSi-PEI800-20	4.65	21	38.90	0.469	0.868	0.202	0.373
FSi-AEEA-20	3.84	35.15	51.46	0.785	1.149	0.409	0.598
FSi-TRI-20	2.26	12	27.89	0.268	0.623	0.237	0.551
FSi-TETA-20	5.47	41.45	56.23	0.925	1.255	0.338	0.459
FSi-TEPA-20	5.29	39	63.99	0.871	1.428	0.329	0.540

ภาวะการทดลอง : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity



ภาพที่ 4.12 ผลของชนิดของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-AEEA-20, FSi-TRI-20, FSi-TEPA-20 และ FSi-TEPA-20 ภาวะ : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับพิวมิลิทิกาที่มีเอมีนต่างชนิดกัน

Sample	Mole Amine	BT	S	Cap(BT) ^{***}	Cap(S) ^{****}	Efficiency of Amine	
		Time* (min)	Time** (min)	(mmol/g-sorb)	(mmol/g-sorb)	Eff(BT)	Eff(S)
FSi-PEI800-20	4.65	132	140.48	0.592	0.627	0.255	0.270
FSi-AEEA-20	3.84	99	106.35	0.442	0.475	0.230	0.247
FSi-TRI-20	2.26	33	38.06	0.147	0.170	0.130	0.150
FSi-DETA-20	5.82	177	182.71	0.790	0.816	0.272	0.281
FSi-TETA-20	5.47	141	146.77	0.629	0.655	0.230	0.240
FSi-TEPA-20	5.29	117	123.69	0.522	0.552	0.198	0.209

ภาวะการทดลอง : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

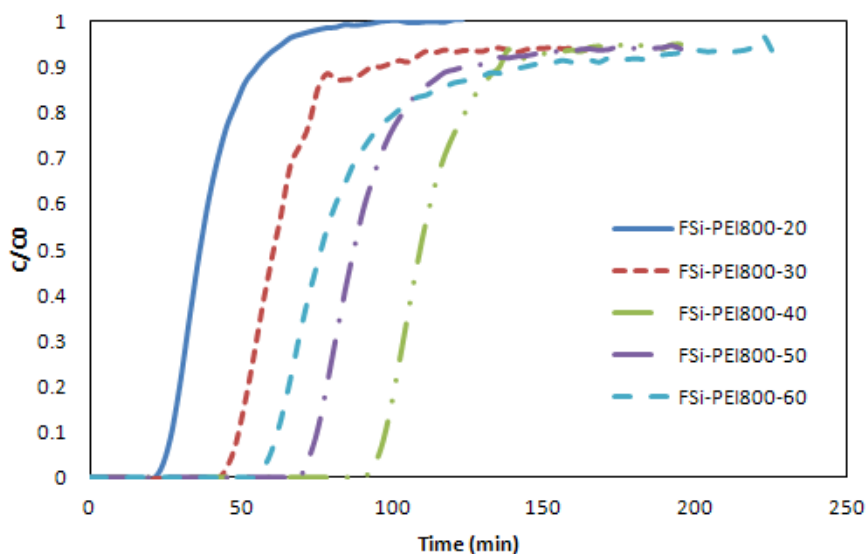
** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity

4.2.3 ผลของปริมาณของเอมีน

ภาพที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.7 แสดงความสามารถของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 10% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที ภาพที่ 4.13 แสดงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ FSi-PEI800 ปริมาณพอลิเอมีนที่เติม คือ 20, 30, 40, 50 และ 60 %โดยมวล ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough คือ 0.469, 0.893, 2.009, 1.540 และ 1.205 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ ความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อิ่มตัว 0.868, 1.433, 2.571, 2.144 และ 2.039 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ จากผลการดูดซับที่ได้พบว่า ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณเอมีนเพิ่มขึ้นจนถึง 40%โดยมวล (FSi-PEI800-40) แล้วความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ก็ลดลง (แสดงในภาคผนวก ข.) ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Meth และคณะ [32] ได้อธิบายได้ว่า ที่สภาวะการทดลองนี้เหมาะสมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ FSi-PEI800-40 และ ที่ปริมาณเอมีน 40%โดยมวลนี้ไม่เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของเอมีนจึงทำให้เอมีนมีประสิทธิภาพดีกว่าปริมาณเอมีนอื่นๆในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเลือกใช้ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ในการทดลองต่อไป

ภาพที่ 4.14 และ ตารางที่ 4.8 แสดงความสามารถของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที ภาพที่ 4.14 แสดงความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับ FSi-PEI800 ปริมาณพอลิเอมีนที่เติม คือ 20, 30, 40, 50 และ 60 %โดยมวล ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough คือ 0.592, 0.826, 1.359, 1.386 และ 1.670 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ ความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์อิ่มตัว 0.627, 0.870, 1.414, 1.567 และ 1.978 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ จากผลการดูดซับที่ได้พบว่า ตัวดูดซับมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นทั้งที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ตามปริมาณเอมีนบนตัวรองรับที่เพิ่มขึ้น (แสดงในภาคผนวก ข.) ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [33] ซึ่งได้อธิบายไว้ว่า ปริมาณเอมีนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นไปจนกระทั่งถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าการดูดซับเริ่มลดลง สาเหตุที่ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณ

เอมีนบนตัวดูดซับในช่วงนั้นมีการกระจายตัวรูพรุนได้ดีทำให้เอมีนมีประสิทธิภาพในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีเช่นกัน เนื่องจาก FSi-PEI800-40 สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดี (Eff(BT) สูงสุด = 0.292) ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหลังจากเกิดการดูดซับและมีค่าประสิทธิภาพของเอมีนสูงที่สุด จึงเลือกใช้ FSi-PEI800-40 ในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 4.13 ผลของชนิดของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-PEI800-30, FSi-PEI800-40, FSi-PEI800-50 และ FSi-PEI800-60 ภาวะ : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

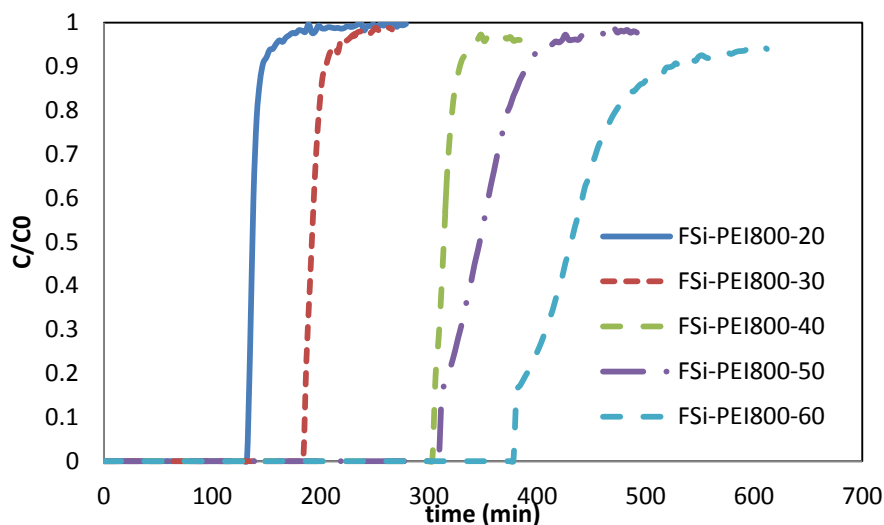
ตารางที่ 4.7 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับฟิวซิลิก้าที่มีปริมาณเอมีนต่างกัน

Sample	BT Time* (min)	S Time** (min)	Cap(BT)*** (mmol/g-sorb)	Cap(S)**** (mmol/g-sorb)	Efficiency of Amine	
					Eff(BT)	Eff(S)
FSi-PEI800-20	21	38.90	0.469	0.868	0.202	0.373
FSi- PEI800-30	40	64.23	0.893	1.433	0.256	0.411
FSi- PEI800-40	90	115.17	2.009	2.571	0.432	0.553
FSi- PEI800-50	69	96.06	1.540	2.144	0.265	0.369
FSi- PEI800-60	54	91.37	1.205	2.039	0.173	0.292

ภาวะการทดลอง : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity



ภาพที่ 4.14 ผลของชนิดของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-20, FSi-PEI800-30, FSi-PEI800-40, FSi-PEI800-50 และ FSi-PEI800-60 ภาวะ : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับพูนซิติกที่มีปริมาณเอมีนต่างกัน

Sample	BT Time* (min)	S Time** (min)	Cap(BT)*** (mmol/g-sorb)	Cap(S)**** (mmol/g-sorb)	Efficiency of Amine	
					Eff(BT)	Eff(S)
FSi-PEI800-20	132	140.48	0.592	0.627	0.255	0.270
FSi- PEI800-30	184	194.86	0.826	0.870	0.237	0.249
FSi- PEI800-40	303	316.79	1.359	1.414	0.292	0.304
FSi- PEI800-50	309	350.95	1.386	1.567	0.239	0.270
FSi- PEI800-60	378	443.14	1.696	1.978	0.243	0.284

ภาวะการทดลอง : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

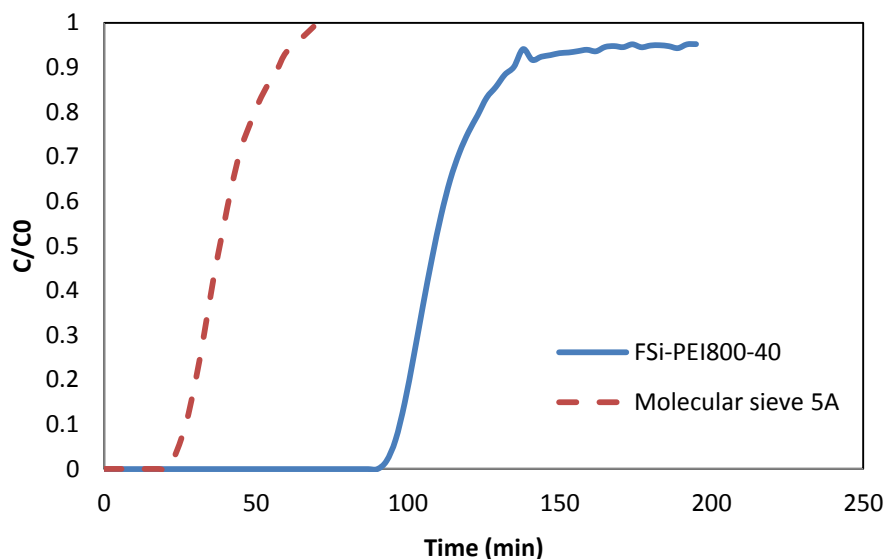
* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity

4.2.4 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

การเปรียบเทียบตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Molecular sieve 5A ที่ภาวะความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังภาพที่ 4.15 และตารางที่ 4.9 พบว่า FSi-PEI800-40 มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough คือ 2.009 มิลลิโมลต่อกรัม ขณะที่ Molecular sieve 5A มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough คือ 0.469 มิลลิโมลต่อกรัม แสดงว่า FSi-PEI800-40 มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า Molecular sieve 5A เนื่องจาก Molecular sieve 5A มีแรงดูดซับทางกายภาพที่ต่ำมาก จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ

การเปรียบเทียบตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Molecular sieve 5A ที่ภาวะความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังภาพที่ 4.16 และตารางที่ 4.10 พบว่า FSi-PEI800-40 มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough คือ 1.359 มิลลิโมลต่อกรัม ขณะที่ Molecular sieve 5A มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough คือ 0.743 มิลลิโมลต่อกรัม [28] แสดงว่า FSi-PEI800-40 มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่า Molecular sieve 5A ซึ่งผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์



ภาพที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 เปรียบเทียบกับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular Sieve 5A ภาวะ : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

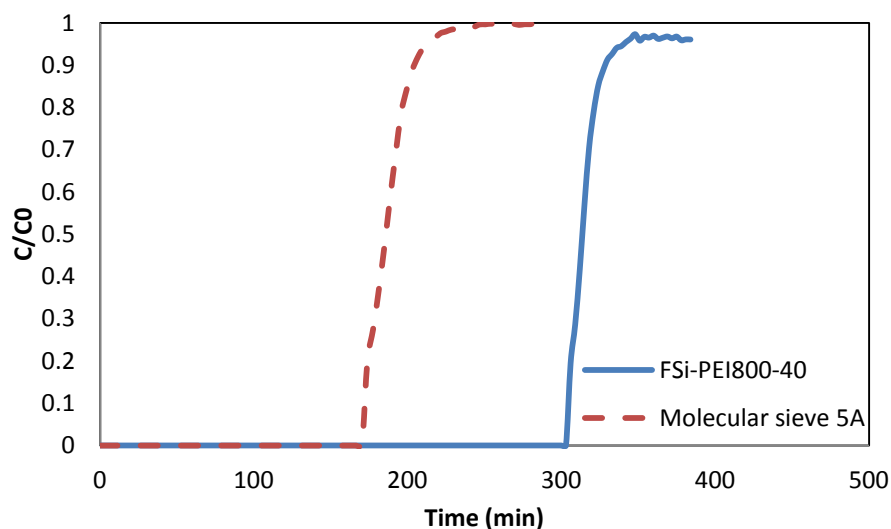
ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 เทียบกับ Molecular sieve 5A

Sample	BT	S	Cap(BT) ^{***}	Cap(S) ^{****}	Efficiency of Amine	
	Time* (min)	Time** (min)	(mmol/ g-sorb)	(mmol/ g-sorb)	Eff(BT)	Eff(S)
FSi- PEI800-40	90	115.17	2.009	2.571	0.432	0.553
Molecular sieve 5A	21	40	0.469	0.8895	-	-

ภาวะการทดลอง : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity



ภาพที่ 4.16 ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 เปรียบเทียบกับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular Sieve 5A ภาวะ : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 เทียบกับ Molecular sieve 5A

Sample	BT Time* (min)	S Time** (min)	Cap(BT)** (mmol/ g-sorb)	Cap(S)** (mmol/ g-sorb)	Efficiency of Amine	
					Eff(BT)	Eff(S)
FSi- PEI800-40	303	316.79	1.359	1.414	0.292	0.304
Molecular sieve 5A	166	290	0.743	0.743	-	-

ภาวะการทดลอง : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity

4.3 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม

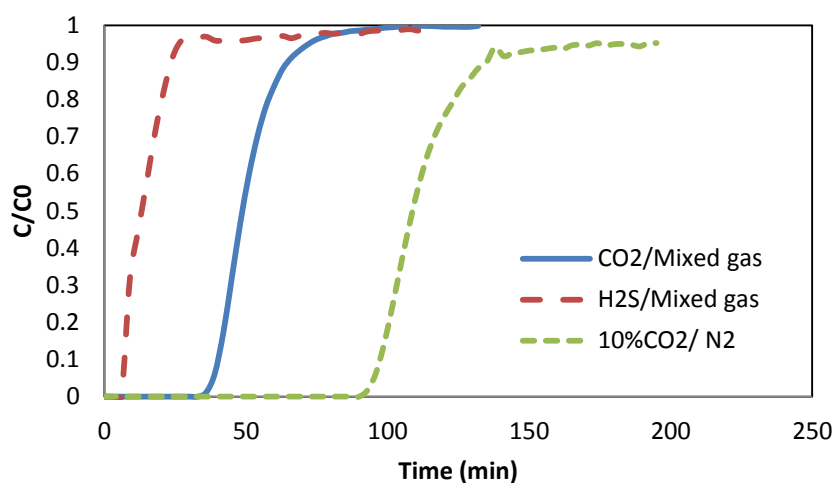
เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ จึงได้จำลองแก๊สชีวภาพโดยการผสมแก๊สมีเทน 75% คาร์บอนไดออกไซด์ 20% และไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน 4.65% โดยการทดสอบการดูดซับในภาวะของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีอุณหภูมิดูดซับเหมาะสมที่ 80 องศาเซลเซียสและภาวะของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งมีอุณหภูมิดูดซับเหมาะสมที่ 30 องศาเซลเซียส

4.3.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ภาวะของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (80 องศาเซลเซียส)

ภาพที่ 4.17 และตารางที่ 4.11 แสดงความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที จากภาพ 4.17 พบว่าตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนในแก๊สผสม ณ เวลาที่ Breakthrough ได้เป็น 33 และ 6 นาที ตามลำดับ และมีความสามารถในการดูดซับที่ Breakthrough เป็น 1.478 และ 0.005 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ขณะที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 10% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจนได้เป็นเวลา 90 นาที มีความสามารถในการดูดซับที่ Breakthrough เป็น 2.009 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ (ตารางที่ 4.11) ในการทดสอบการดูดซับแก๊สกรดในแก๊สผสมนั้นจะมีความสามารถในการดูดซับรวมเป็น 1.483 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ เนื่องจากในการดูดซับแก๊สกรดในแก๊สผสมจะมีการยึดเหนี่ยวระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ ผสมกับการยึดเหนี่ยวระหว่างเอมีนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในขณะที่การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 10% โดยปริมาตร ในไนโตรเจนจะเป็นเพียงการยึดเหนี่ยวระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ เท่านั้น และจะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมจะมีค่าน้อยมาก เนื่องจากทดสอบการดูดซับด้วยอุณหภูมิสูงถึง 80 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นภาวะเหมาะสมของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ไม่เหมาะกับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ แม้ว่าจะสามารถดูดซับได้บางส่วนก็ตาม เพราะที่อุณหภูมิดังกล่าวทำให้เกิดภาวะของการคืนสภาพตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการทำลายอันตรกิริยาระหว่างเอมีนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้หลุดออกจากกัน ดังนั้นการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสของการดูดซับในระบบแก๊สผสม จึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

4.3.2 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในภาวะของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ (30 องศาเซลเซียส)

ภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.12 แสดงความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที จากภาพ 4.18 สังเกตได้ว่าตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ Breakthrough ได้เป็นเวลา 21 และ 24 นาที ตามลำดับ ขณะที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจนได้เป็นเวลา 303 นาที มีความสามารถของการดูดซับที่ Breakthrough เป็น 1.359 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ (ตารางที่ 4.12) เมื่อพิจารณาความสามารถของการดูดซับแก๊สที่ Breakthrough จะเห็นว่า ในการทดสอบการดูดซับแก๊สกรดในแก๊สผสมนั้นจะมีความสามารถการดูดซับรวมเป็น 2.184 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ เนื่องจากในการดูดซับแก๊สผสมจะมีการยึดเหนี่ยวระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ผสมกับการยึดเหนี่ยวระหว่างเอมีนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในขณะที่การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในไนโตรเจนจะเป็นเพียงการยึดเหนี่ยวระหว่างเอมีนและไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่านั้น และจะเห็นได้ว่าตัวดูดซับเกิดการดูดซับได้ดีกับคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีความแรงของกรดที่มากกว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำให้ดูดซับได้ดีด้วยเอมีนซึ่งมีความเป็นเบส [18]



ภาพที่ 4.17 ความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ภาวะ: ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊ส ไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม และ คาร์บอนไดออกไซด์ 10% โดยปริมาตรในไนโตรเจนด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40

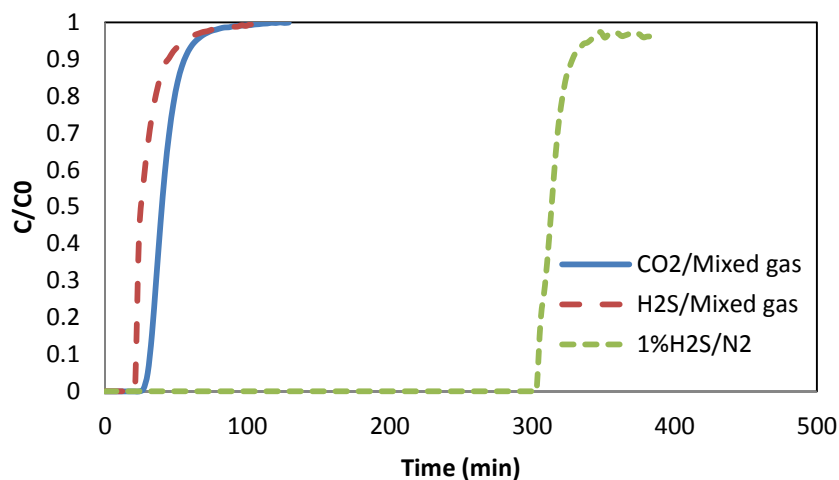
Sample	BT	S	Cap(BT) ^{***}	Cap(S) ^{****}	Efficiency of Amine	
	Time* (min)	Time** (min)	(mmol/ g-sorb)	(mmol/ g-sorb)	Eff(BT)	Eff(S)
CO ₂ /Mixed gas	33	51.26	1.478	2.297	0.319	0.497
H ₂ S/Mixed gas	6	16.50	0.005	0.013		
10%CO ₂ /N ₂	90	115.17	2.009	2.571	0.432	0.553

ภาวะทดลอง: สำหรับแก๊สผสม; ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์; ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 10% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity



ภาพที่ 4.18 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วยตัวดูดซับ FSI-PEI800-40 ภาวะ: ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตรในไนโตรเจนด้วยตัวดูดซับ FSI-PEI800-40

Sample	BT	S	Cap(BT) ^{***}	Cap(S) ^{****}	Efficiency of Amine	
	Time* (min)	Time** (min)	(mmol/ g-sorb)	(mmol/ g-sorb)	Eff(BT)	Eff(S)
CO ₂ /Mixed gas	24	44.11	2.150	3.952	0.470	0.861
H ₂ S/Mixed gas	21	32.12	0.034	0.052		
1%H ₂ S/N ₂	303	316.79	1.359	1.414	0.292	0.304

ภาวะทดลอง: สำหรับแก๊สผสม; ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์; ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 10% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

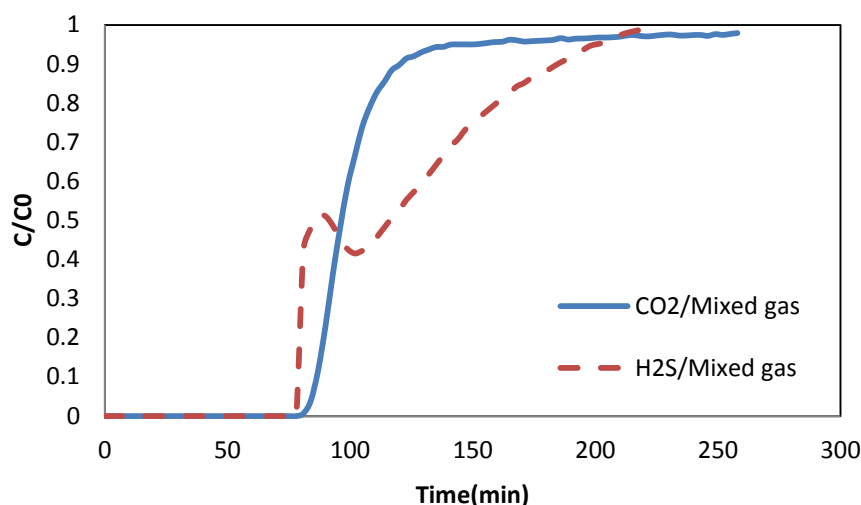
* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity

4.3.3 การดูดซับแก๊สผสมในระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.19 และ ตาราง 4.13 พบว่า สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สผสมได้ และการดูดซับแก๊สผสมในคอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวได้มาก ($Cap(BT) = 3.494 \text{ mmol/g-sorb}$ และ $Cap(S) = 4.673 \text{ mmol/g-sorb}$) สำหรับการดูดซับในคอลัมน์สองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวได้มาก ($Cap(BT) = 0.063 \text{ mmol/g-sorb}$ และ $Cap(S) = 0.097 \text{ mmol/g-sorb}$) และเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของเอมีนและโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์มีความว่องไวมากกว่าอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของเอมีนและโมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์เพราะคาร์บอนไดออกไซด์มีความแรงของสมบัติการเป็นกรดที่มากกว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์

ดังนั้นการศึกษากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม โดยการกำหนดให้แก๊สผสมผ่านคอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงผ่านแก๊สต่อไปยังคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ให้ขัดขวางการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ส่งผลให้การดูดซับมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.19 และ ตาราง 4.13 พบว่า ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 มีความสามารถของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough คือ 3.494 และ 0.063 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับแก๊สผสมในภาวะของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และภาวะของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบคอลัมน์เดี่ยว ($Cap(BT)_{CO_2} = 1.478 \text{ mmol/g-sorb}$ และ $Cap(BT)_{H_2S} = 0.005 \text{ mmol/g-sorb}$ ตารางที่ 4.11 และ $Cap(BT)_{CO_2} = 2.150 \text{ mmol/g-sorb}$ และ $Cap(BT)_{H_2S} = 0.034 \text{ mmol/g-sorb}$ ตารางที่ 4.12) พบว่า ระบบการดูดซับแบบต่อเนื่องมีความสามารถของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากกว่า



ภาพที่ 4.19 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ด้วยระบบต่อเนื่อง ภาวะ: มีเทน 75%, ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 1) และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 2)

ตารางที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40

Sample	BT Time* (min)	S Time** (min)	Cap(BT)***(mmol/ g-sorb)	Cap(S)***(mmol/ g-sorb)	Efficiency of Amine	
					Eff(BT)	Eff(S)
CO ₂ /Mixed gas	78	104.30	3.494	4.673	0.751	1.000
H ₂ S/Mixed gas	78	119.48	0.063	0.097	0.014	0.020

ภาวะทดลอง: สำหรับแก๊สผสม; ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 1) และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 2)

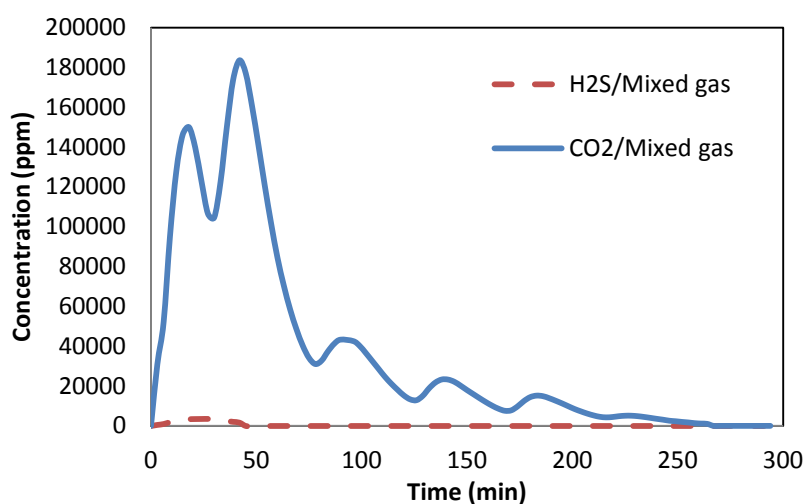
* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity

4.4 การศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับในระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

จากการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (หัวข้อ 4.3.3) ทำให้ตัวดูดซับมีความอิ่มตัวไม่สามารถดูดซับต่อไปได้ ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการคืนสภาพ (Regeneration) ของตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 โดยใช้แก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิสูง

ภาพที่ 4.20 แสดงการคายการดูดซับแก๊สผสม โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเข้มข้น 99.999% โดยปริมาตร ไล่คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ใน 2 คอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาทีและอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส พบว่า ตัวดูดซับสามารถคืนสภาพได้ดีในคอลัมน์แรกคืนสภาพในเวลา 267 นาทีและคอลัมน์ที่สองคืนสภาพในเวลา 45 นาที เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเกิดการคายได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งในแก๊สผสมมีองค์ประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่น้อยมากจึงส่งผลให้การคายตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์ใช้เวลาน้อยกว่า ดังนั้นตัวดูดซับสามารถคืนสภาพได้อย่างสมบูรณ์และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งจะได้ทำการทดสอบเสถียรภาพของตัวดูดซับโดยการดูดซับและการคายเป็นวัฏจักรในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 4.20 การคายการดูดซับแก๊สผสมของตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเข้มข้น 99.999% โดยปริมาตร อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

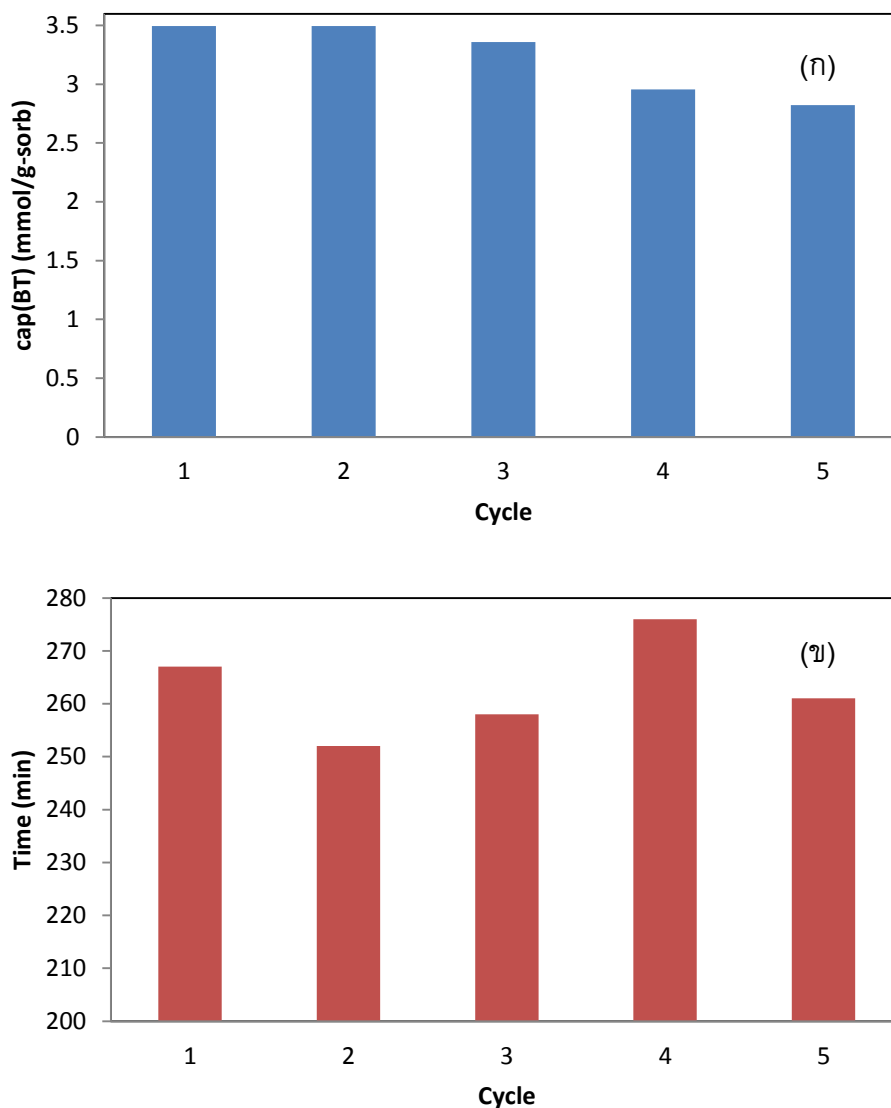
4.5 เสถียรภาพของตัวดูดซับต่อการดูดซับแก๊สผสมในระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

การศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ด้วยระบบการดูดซับแบบสองคอลัมน์ต่ออนุกรม ทดสอบการดูดซับและการคายการดูดซับจำนวน 5 รอบ แต่ละรอบการดูดซับโดยผ่านแก๊สผสมไปยังคอลัมน์ดูดซับที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ 1) ต่อเนื่องไปที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ 2) อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที และแต่ละรอบการคืนสภาพ (การคาย) ตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทั้งสองคอลัมน์ อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 10 มิลลิลิตรต่อนาที (การคาย CO₂ เวลา 252-276 นาที และ H₂S เวลา 45-48 นาที) ผลการทดสอบการดูดซับแสดงดังภาพ 4.21, 4.22 และ ตาราง 4.14

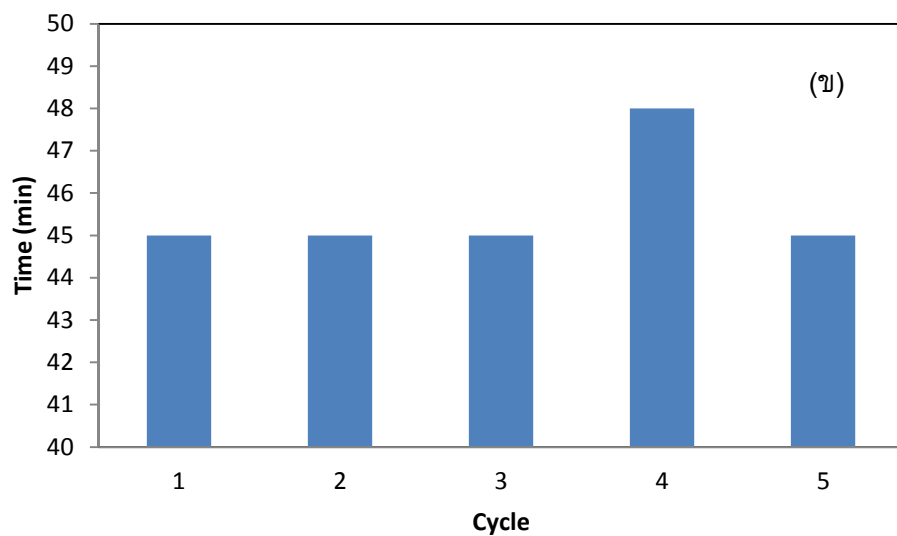
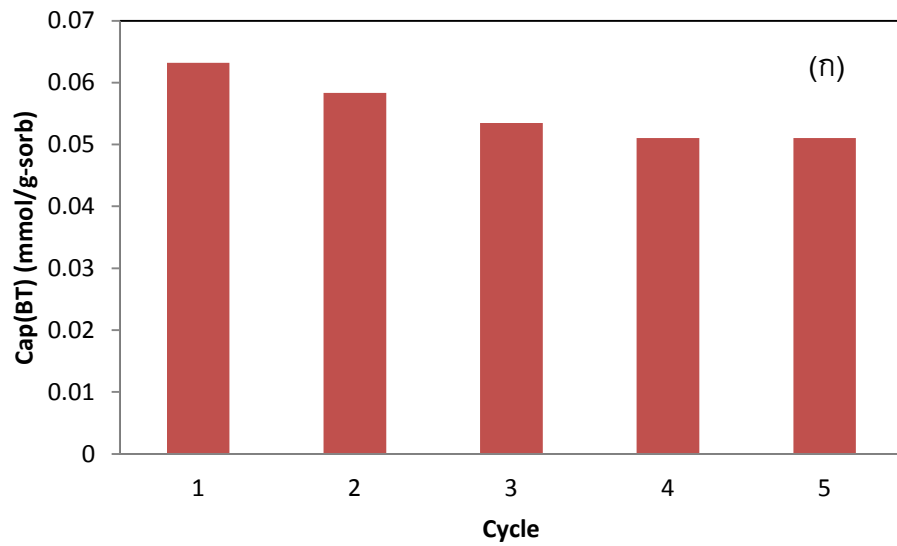
สำหรับเสถียรภาพของตัวดูดซับต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม ภาพที่ 4.21 และ ตาราง 4.14(ก) ผลการทดสอบพบว่า ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในรอบที่ 1, 2, และ 3 ($cap(BT) = 3.360-3.494 \text{ mmol/g-sorb}$) มีค่าคงที่ และในรอบที่ 4 และ 5 ($cap(BT) = 2.822-2.957 \text{ mmol/g-sorb}$) มีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากการคืนสภาพตัวดูดซับยังไม่สมบูรณ์ ทำให้มีคาร์บอนไดออกไซด์ตกค้างอยู่ในตัวดูดซับสะสม ส่งผลให้ความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์รอบต่อมามีค่าลดลง

สำหรับเสถียรภาพของตัวดูดซับต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ภาพที่ 4.22 และ ตาราง 4.14(ข) ผลการทดสอบพบว่า ความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในรอบที่ 1, 2, และ 3 ($cap(BT) = 0.053-0.063 \text{ mmol/g-sorb}$) มีค่าลดลง และในรอบที่ 4 และ 5 ($cap(BT) = 0.051 \text{ mmol/g-sorb}$) มีค่าคงที่ อาจเนื่องมาจากการคืนสภาพตัวดูดซับยังไม่สมบูรณ์ ทำให้มีคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ตกค้างอยู่ในตัวดูดซับสะสม

จากผลการทดสอบเสถียรภาพของตัวดูดซับต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม พบว่า ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมและสามารถคืนสภาพตัวดูดซับให้กลับมาใช้ใหม่ได้



ภาพที่ 4.21 รอบของการดูดซับ (ก) และเวลาของการคาย (ข) คาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สผสม ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40
 ภาวะดูดซับ: แก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 1) และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 2)
 ภาวะการคาย: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.22 รอบของการดูดซับ (ก) และเวลาของการคาย (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในแก๊สผสม ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40
 ภาวะดูดซับ: แก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 1) และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 2)
 ภาวะการคาย: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.14 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (ก) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ข) ในแก๊สผสมด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40

(ก) Cycle of CO ₂	BT Time* (min)	S Time** (min)	Cap(BT)*** (mmol/ g-sorb)	Cap(S)**** (mmol/ g-sorb)	Regene ration Time (min)	Efficiency of Amine	
						Eff(BT)	Eff(S)
1	78	104.30	3.494	4.672	267	0.751	1.000
2	78	96.57	3.494	4.326	252	0.751	0.930
3	75	92.41	3.360	4.140	258	0.723	0.890
4	66	86.19	2.957	3.861	276	0.636	0.830
5	63	81.35	2.822	3.644	261	0.607	0.784

(ข) Cycle of H ₂ S	BT Time* (min)	S Time** (min)	Cap(BT)*** (mmol/ g-sorb)	Cap(S)**** (mmol/ g-sorb)	Regene ration Time (min)	Efficiency of Amine	
						Eff(BT)	Eff(S)
1	78	119.48	0.063	0.097	45	0.014	0.021
2	72	89.26	0.058	0.072	45	0.013	0.016
3	66	81.64	0.053	0.066	45	0.011	0.014
4	63	78.87	0.051	0.064	48	0.011	0.014
5	63	75.04	0.051	0.061	45	0.011	0.013

ภาวะทดลอง: ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 1) และอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (คอลัมน์ที่ 2)

ภาวะการคาย: ความเข้มข้นแก๊สไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที

* BT Time คือ Breakthrough time, *** Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

** S Time คือ Saturation time, **** Cap(S) คือ Saturation capacity

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับดัดแปรด้วยเอมีน งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ชนิดของตัวรองรับ ชนิดของเอมีนบนตัวดูดซับ ปริมาณของเอมีนบนตัวดูดซับ การคืนสภาพตัวดูดซับ เสถียรภาพตัวดูดซับ และการเปรียบเทียบตัวดูดซับที่เตรียมได้กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการดูดซับแก๊สผสมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล (Fourier Transform InfraRed Spectroscopy: FR-IR) การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน, ไนโตรเจน และออกซิเจน (CHN Analyzer) การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยวิธีบีเอที (Brunauer Emmett Teller: BET) การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA) และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscope: SEM)

1. ผลของชนิดของตัวดูดซับ

ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ FSi-PEI800-20 มีความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough 0.469 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับซึ่งมากกว่า Act-Al₂O₃-PEI800-20 และ Cal-Al₂O₃-PEI800-20 ตามลำดับ (0.402 และ 0.067 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ) สำหรับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ FSi-PEI800-20 มีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough 0.592 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับซึ่งมากกว่า Act-Al₂O₃-PEI800-20 และ Cal-Al₂O₃-PEI800-20 ตามลำดับ (0.417 และ 0.040 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ)

2. ผลของชนิดของเอมีนบนตัวดูดซับฟูมซิลิกา

ในการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ FSi-TETA-20 มีความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough 0.925 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับซึ่งมากกว่า FSi-TEPA-20 FSi-AEEA-20 FSi-PEI800-20 และ FSi-TRI-20

ตามลำดับ (0.871 0.785 0.469 และ 0.268 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ) สำหรับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ FSi-DETA-20 มีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough 0.790 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับซึ่งมากกว่า FSi-TETA-20 FSi-PEI800-20 FSi-TEPA-20 FSi-AEEA-20 และ FSi-TRI-20 ตามลำดับ (0.629 0.592 0.522 0.442 และ 0.147 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ) แม้ว่า FSi-TETA-20 และ FSi-DETA-20 มีค่าสูง ในการใช้งานจริงนั้นจำเป็นต้องเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีอายุการใช้งานยาวนานและไม่เสื่อมสภาพจากผลของ TGA ดังนั้นงานวิจัยนี้เลือกใช้ FSi-PEI800-20 เนื่องจากสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่าเอมีนชนิดอื่นๆ

3. ผลของปริมาณเอมีนบนตัวดูดซับฟุ่มซิลิกา

ปริมาณเอมีนบนตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเอมีนที่เหมาะสมบนตัวดูดซับคือ 40% โดยมวล และผลการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นก็เช่นเดียวกันกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งปริมาณเอมีนที่เหมาะสมคือ 40% โดยมวล

4. การเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้และตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 มีความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ทั้งที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวสูงกว่าตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A

5. การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบแก๊สผสมในระบบคอลัมน์เดี่ยวและระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

ภาวะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที และภาวะการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์

สำหรับในระบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 มีความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่าการดูดซับในระบบคอลัมน์เดี่ยว

6. การคืนสภาพของตัวดูดซับและเสถียรภาพตัวดูดซับในระบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง
ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 สามารถคืนสภาพได้ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อัตรา
การไหลแก๊สไนโตรเจน 10 มิลลิลิตรต่อนาที
ตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และ
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ สามารถคืนสภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการขึ้นรูปตัวดูดซับในรูปแบบต่างๆ
2. ศึกษาการเติมสารเติมแต่งที่ช่วยให้ตัวดูดซับมีความเสถียรทางความร้อนที่ดีขึ้น
3. ศึกษาภาวะคืนสภาพตัวดูดซับที่มีความเหมาะสมกับตัวดูดซับ

รายการอ้างอิง

- [1] สำนักงานปศุสัตว์เขต 6. ไบโอแก๊ส. [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://www.dld.go.th> [2556, สิงหาคม 12].
- [2] กรมโรงงานอุตสาหกรรม. การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมแก๊ส. [ออนไลน์]. 2535. แหล่งที่มา: <http://www.diw.go.th> [2556, สิงหาคม 13].
- [3] Lu, J. G. Zheng, Y. F. and He, D.L. Selective absorption of H₂S from gas mixtures into aqueous solutions of blended amines of methyldiethanolamine and 2-tertiarybutylamino-2-ethoxyethanol in a packed column. Separation and Purification Technology, 56 (2006): 209-217.
- [4] Prosep. Treat Natural Gas to Pipeline CO₂ and H₂S Separations with a MEMBRANE/HIGH-EFFICIENCY SCAVENGER HYBRID SYSTEM. [Online]. 2011. Available from: www.prosep.com [12 September 2013]
- [5] Eurofilm. H₂S Removal. [Online]. 2009. Available from: <http://www.eurofilm.com>. [12 September 2013]
- [6] Alonso-Vicario, A., Ocha-Gomez, J.R., Gil-Rio, S., Gomez-Jimenez-Aberasturi, O., Ramirez-Lopez, C.A., Torrecilla-Soria, and J., Dominguez, A., Purification and upgrading of biogas by pressure swing adsorption on synthetic and natural zeolites. Microporous and Mesoporous Materials. 134 (2010): 100-107.
- [7] เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. ครั้งที่พิมพ์ 1. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [8] Pradthana's Weblog. กระบวนการดูดซับ. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process> [12 กันยายน 2556]
- [9] ห้องสมุดมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. ฐานข้อมูลวิทยานิพนธ์อิเล็กทรอนิกส์ (e-Theses). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://archive.lib.cmu.ac.th> [2556, สิงหาคม 12]
- [10] สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วท.). ตัวดูดซับ. [ออนไลน์]. 2544. แหล่งที่มา: <http://www.tistr.or.th> [2556, สิงหาคม 12].

- [11] กัญจนนา บุญยเกียรติ, ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย. เทคโนโลยีแก๊สธรรมชาติ. ครั้งที่พิมพ์ 1. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [12] กรมควบคุมมลพิษ. ระบบดูดซับ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th> [2556, สิงหาคม 13].
- [13] Ferdich, R.B., Mozeleski, E., Siskin, M., and Wang, F.C., Alkylamino alkyloxy (alcohol) monoalkyl ether for acid gas scrubbing process. W.O. Pat. 2,007,021,462; 2007.
- [14] Bishop, A.R., Elia, C.N., Katritzky, A.R., Kirichenko, K.M., and Siskin, M., Synthesis of Sterically Hindered Secondary Aminoether Alcohols. U.S. Pat. 2,007,0219,400; 2007.
- [15] ศูนย์ข้อมูลวัตถุอันตรายและเคมีภัณฑ์. เอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (MSDS). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.msds.pcd.go.th> [2556, กันยายน 28].
- [16] วิวัฒน์ เอกบุรณะวัฒน์, สุทธิพัฒน์ วงศ์วิทย์วิโชติ. พิษวิทยาอาชีพ. ชลบุรี: สัมมาอาชีพะ, 2554.
- [17] Ma, X., Wang, X., and Song, C., Molecular Basket Sorbents for Separation of CO₂ and H₂S from Various Gas Streams. Journal of the American Chemical Society 131 (2009): 5777-5783.
- [18] Belmabkhout, Y., Weireld, G.D. and Sayari, A. Amine-Bearing Mesoporous Silica for CO₂ and H₂S Removal from Natural Gas and Biogas. Langmuir 25 (2009): 13275-13278.
- [19] Maghsoudi, H., Soltanieh, M., Bozorgzadeh, H., and Mohamadalizadeh, A., Adsorption Isotherms and Ideal Selectivities of Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide Over Methane for The Si-CHA Zeolite: Comparison of Carbon Dioxide and Methane Adsorption with The All-silica DD3R Zeolite. Springer. (2013) doi: 10.1007/s10450-013-9528-1.
- [20] Shama, P., Baek, I., Park, Y., Nam, S., Park, J., Park, S., and Park, S., Adsorptive Separation of Carbon Dioxide by Polyethyleneimine Modified Adsorbents. Korean J. Chem. Eng. 29 (2012): 249-262.

- [21] Herm, Z.R., Krishna, R., and Long, J.R., CO₂/CH₄, CH₄/H₂ and CO₂/CH₄/H₂ Separations at High Pressures Using Mg₂(dobdc). Microporous and Mesoporous Materials 151 (2012): 481-487.
- [22] Plaza, M.G., Pevida, C., Arias, B., Feroso, J., Casal, M.D., Martín, C.F., Rubiera, F., and Pis, J.J.,. Development of Low-cost Biomass-based Adsorbents for Postcombustion. Fuel 88 (2009): 2442-2447.
- [23] Wang, X., Ma, X., Sun, L., and Song, C., A Nanoporous Polymeric Sorbent for Deep Removal of H₂S from Gas Mixtures for Hydrogen Purification. Green Chemistry 9 (2007): 695-702.
- [24] Chen, Q., Fan, F., Long, D., Liu, X., Liang, X., Qiao, W., and Ling, L., Poly(ethyleneimine)-Loaded Silica Monolith with a Hierarchical Pore Structure for H₂S Adsorptive Removal. Industrial Engineering Chemical Research 49 (2010): 11408-11414.
- [25] Moreira, R.F.P.M., Peruch, M.G., and Kuhnen, N.C., Adsorption of Textile Dyes on Alumina. Equilibrium Studies and Contact Time Effects. Brazilian Journal of Chemical Engineering 15 (1998): doi:10.1590/S0104-66321998000100002.
- [26] Hernández, M.T., and González, M., Synthesis of Resins as Alpha-alumina Precursors by the Pechini Method Using Microwave and Infrared Heating. Journal of the European Ceramic Society 22 (2002): 2861–2868.
- [27] Xu, X., Li, S., Jia, F., and Liu, P., Synthesis and Antimicrobial Activity of Nano-fumed Silica Derivative with N , N-dimethyl-n-hexadecylamine. Life Science Journal, 3 (2006): 59-62.
- [28] Yudovin-Farber, I., Golenser, J., Beyth, N., Weiss E. I., and Abraham, D.J., Quaternary Ammonium Polyethyleneimine:Antibacterial Activity. Journal of Nanomaterials 2010 (2010): doi:10.1155/2010/826343.
- [29] Goeppert, A., Czaun, M., May, R.B., Prakash G. K. S., Olah G. A. , and Narayanan S. R., Carbon Dioxide Capture from the Air Using a Polyamine Based Regenerable Solid Adsorbent. Journal of the American Chemical Society 133 (2011): 20164-20167.

- [30] แหวดดาว ใจบุญ. การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้ซิลิกาตัดแปร.
กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2554.
- [31] Plaza, M.G., Pevida, C., Arias, B., Feroso, J., Arenillas, A., Rubiera, F., and Pis
J. J., Application of Thermogravimetric Analysis to the Evaluation of Aminated
Solid Sorbents for CO₂ Capture. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry
92 (2008): 601-606.
- [32] Meth, S., Goepfert, A., Prakash, G. K. S., and Olah, G. A., Silica Nanoparticles
as Supports for Regenerable CO₂ Sorbents. Energy & Fuels 26 (2012): 3082-
3090.
- [33] Wang, X., Ma, X., Xu, X., Sun, L., and Song, C., Mesoporous-molecular-sieve-
supported Polymer Sorbents for Removing H₂S from Hydrogen Gas Streams.
Topics in Catalysis 49 (2008): 108-117.

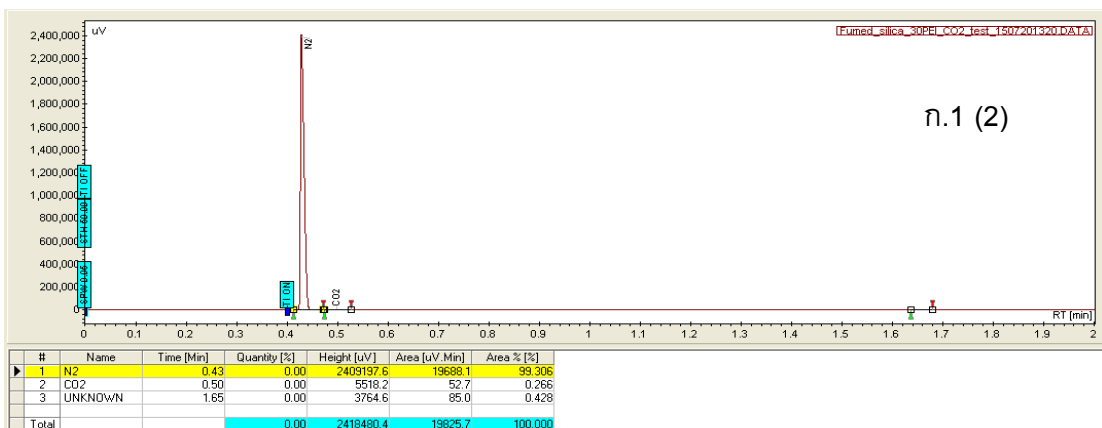
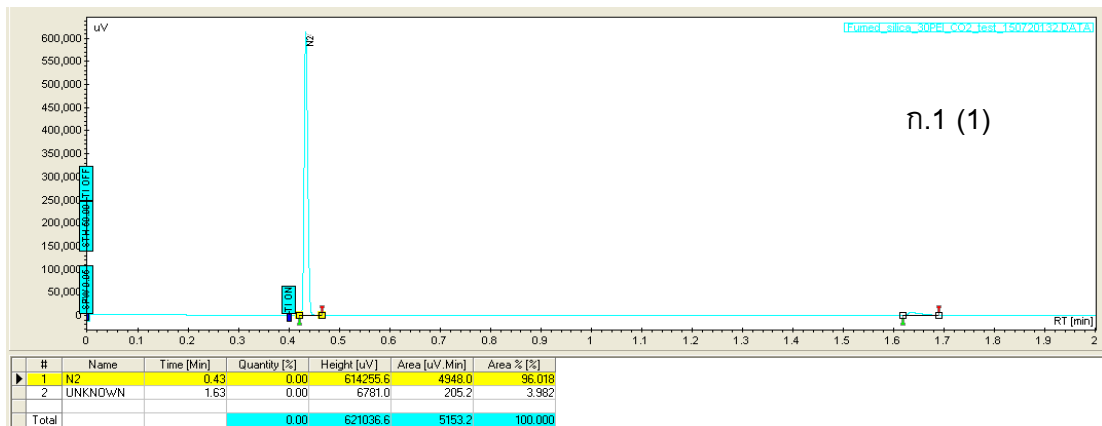
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

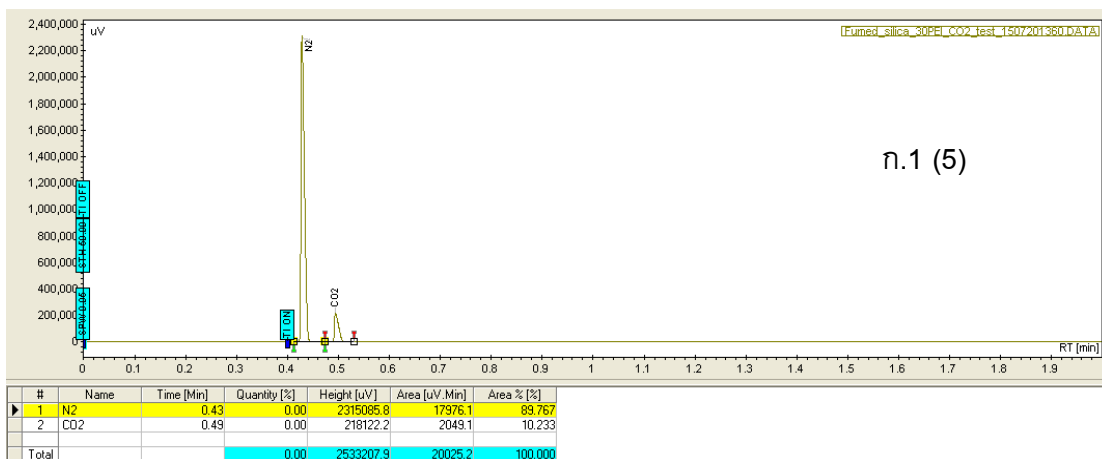
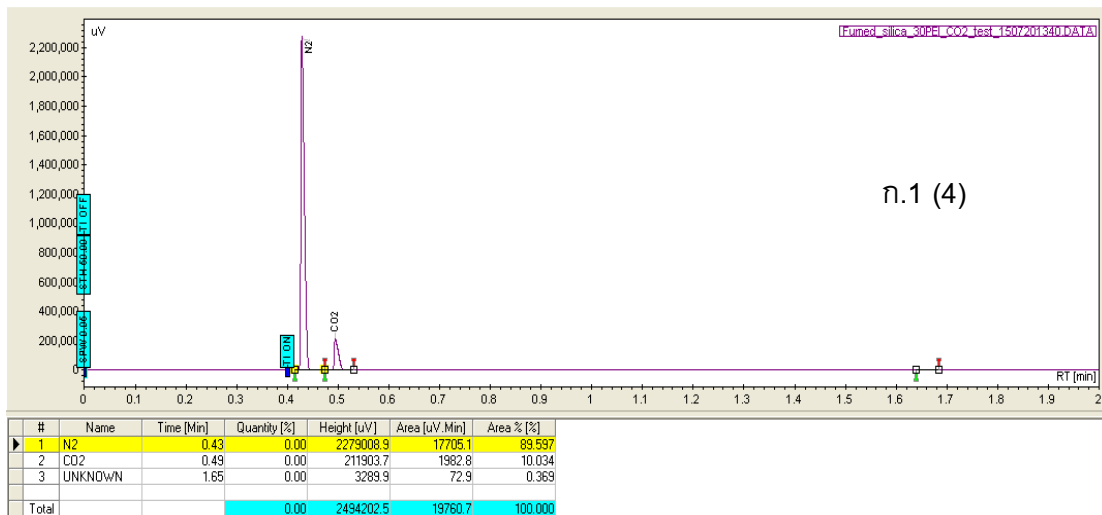
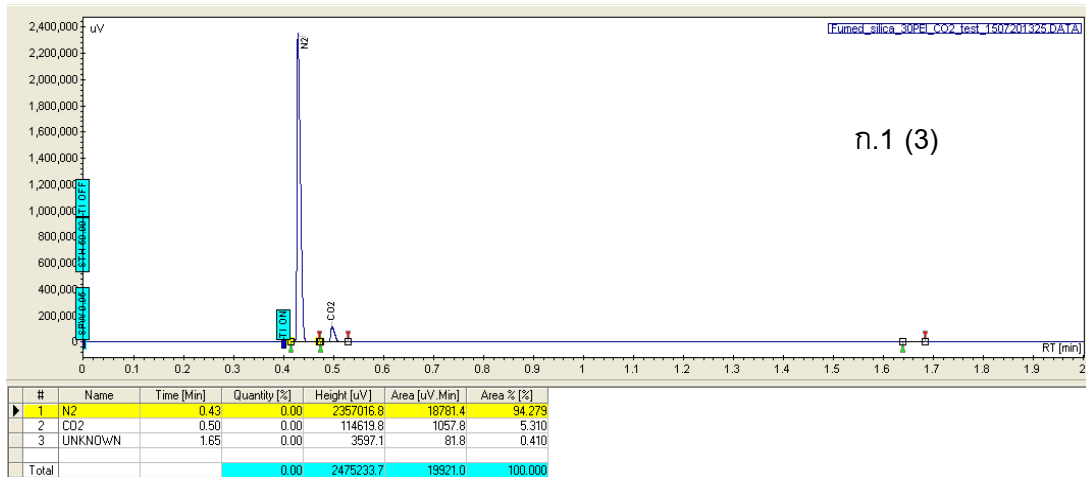
การวัดความเข้มข้นแก๊สขาออกหลังจากการดูดซับด้วยเครื่อง Micro GC

การวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก จากข้อมูลการวัดความเข้มข้นแก๊สขาออกจากการดูดซับด้วยวิธีออนไลน์ จะได้ข้อมูลดังแสดงในภาพ ก.1 นำข้อมูลดังกล่าวเขียนกราฟแสดงการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดังภาพที่ ข.1 ภาคผนวก ข.

โครมาโทแกรมแสดงผลการแยกแก๊ส



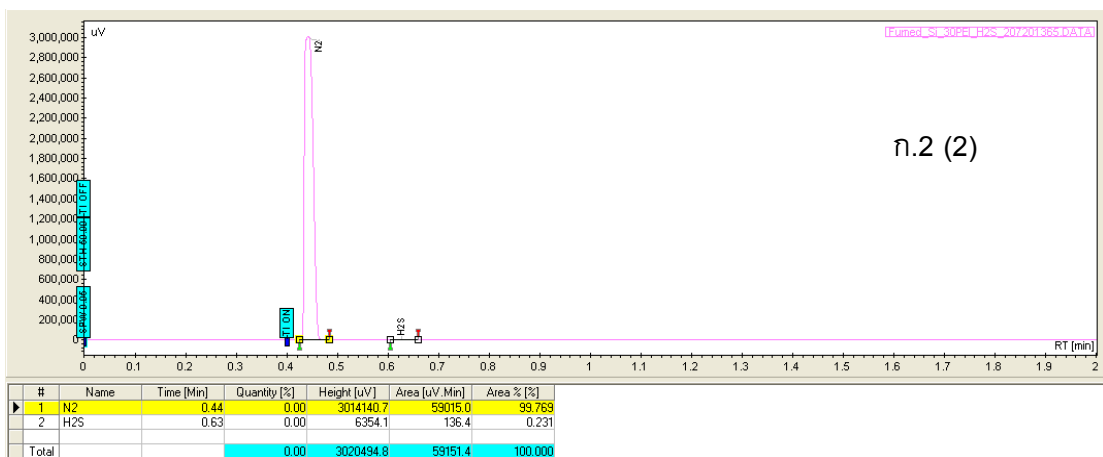
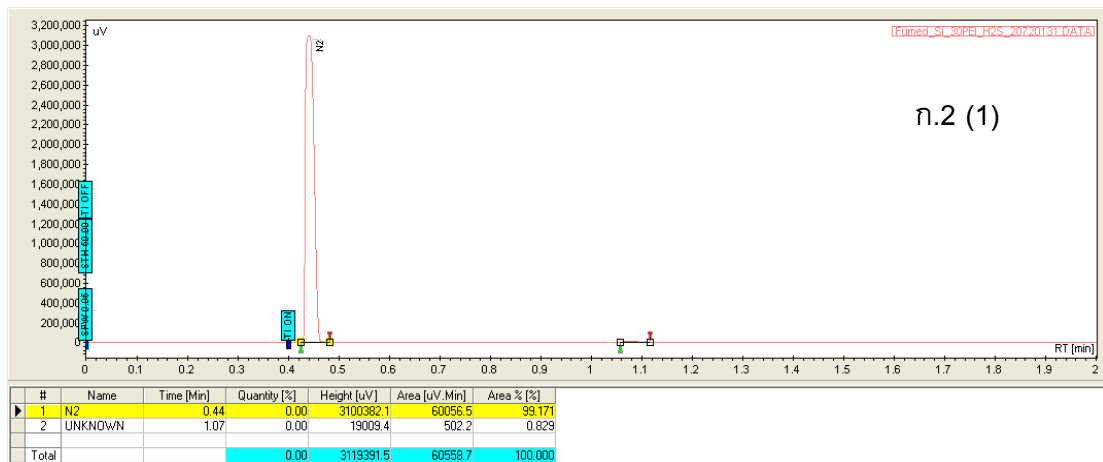
ภาพที่ ก.1 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ ภาวะการดูดซับ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที (1) นาทีที่ 3, (2) นาทีที่ 60, (3) นาทีที่ 75, (4) นาทีที่ 120 และ(5) นาทีที่ 180



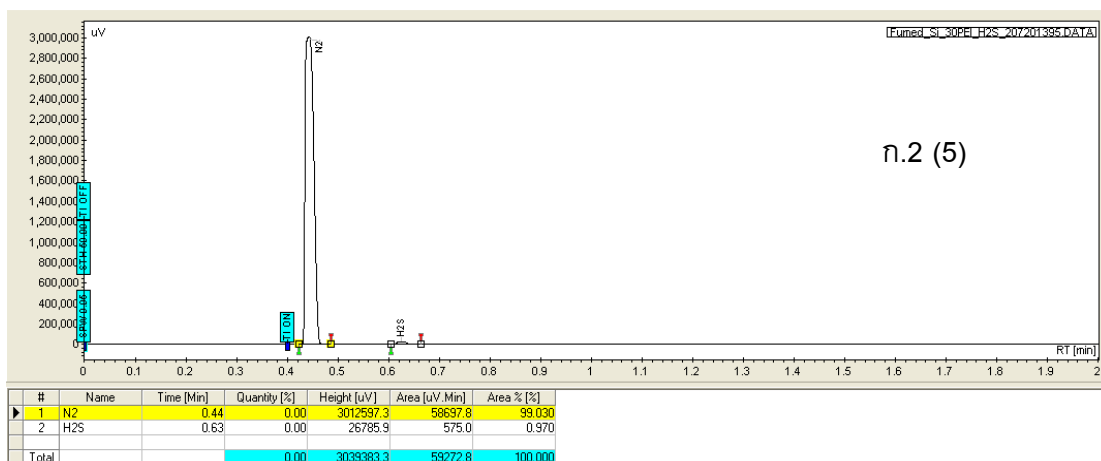
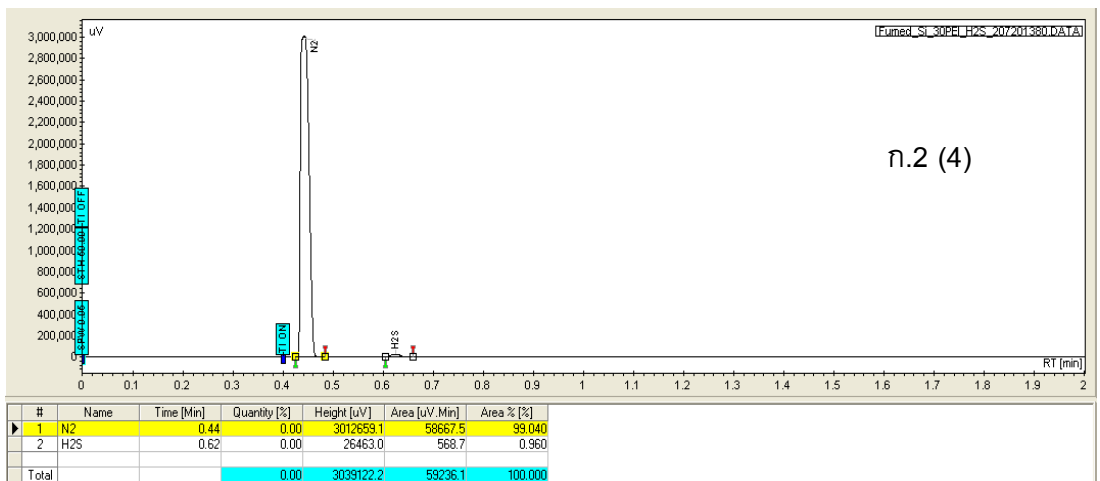
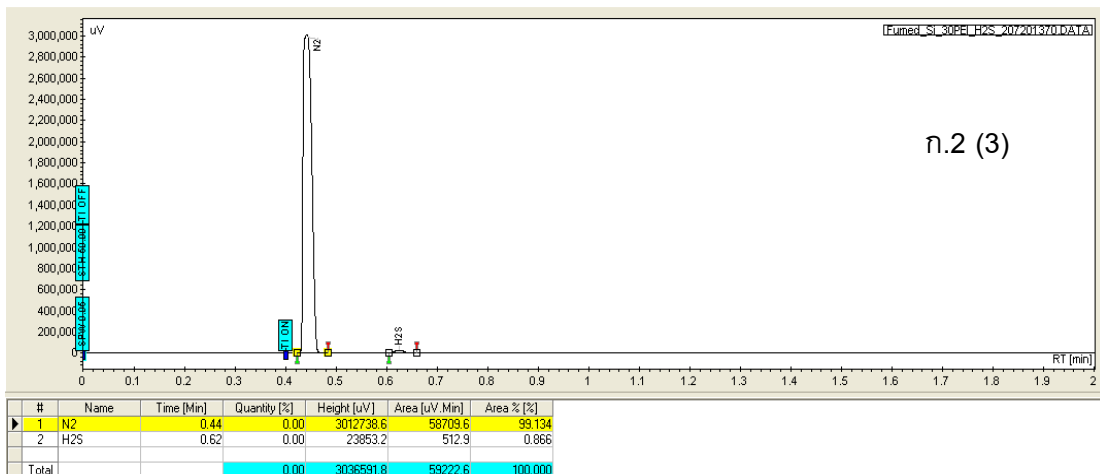
ภาพที่ ก.1 (ต่อ)

การวัดความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออก จากข้อมูลการวัดความเข้มข้นแก๊สขาออก จากการดูดซับด้วยวิธีออนไลน์ จะได้ข้อมูลดังแสดงในภาพ ก.1 นำข้อมูลดังกล่าวเขียนกราฟ แสดงการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ดังภาพที่ ข.2 ภาคผนวก ข.

โครมาโทแกรมแสดงผลการแยกแก๊ส



ภาพที่ ก.2 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1 % โดยปริมาตร ใน แก๊สไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ ภาวะอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตรา การไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที (1) นาทีที่ 3, (2) นาทีที่ 195, (3) นาทีที่ 210, (4) นาทีที่ 240 และ (5) นาทีที่ 285



ภาพที่ ก.2 (ต่อ)

ภาคผนวก ข

การคำนวณและข้อมูลการทดลอง

1. การคำนวณปริมาณการเติมเอมีนบนหัวรองรับ

$$\text{ร้อยละการเติมเอมีน (โดยมวล)} = (W_a / (W_a + W_s)) \times 100$$

$$W_a = \text{น้ำหนักของเอมีนที่เติมลงไป}$$

$$W_s = \text{น้ำหนักของหัวรองรับ}$$

2. การคำนวณปริมาณโมลของไนโตรเจนในเอมีน

$$\text{mmol}_N = (\text{ร้อยละการเติมเอมีน (โดยมวล)} \times N \times 10^{-3}) / MW_{\text{amine}}$$

$$\text{mmol}_N = \text{จำนวนโมลของไนโตรเจนในโมเลกุลเอมีน (มิลลิโมล)}$$

$$N = \text{จำนวนไนโตรเจนในโมเลกุลเอมีน}$$

$$MW_{\text{amine}} = \text{มวลโมเลกุลของเอมีน}$$

3. การคำนวณของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การคำนวณอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์

$$FR_{CO_2} = (FR \times C) / 100$$

การคำนวณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับ

$$C_t = (C_0 \times A) / A_{STD}$$

การคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

$$\text{ที่ Breakthrough capacity; } Cap(BT) = (BT \times FR_{CO_2}) / (V_{mol} \times W_{sorb})$$

$$\text{ที่ Saturation capacity; } Cap(S) = (FR_{CO_2} \times \int_0^t (C_0 - C_t) dt) / (V_{mol} \times W_{sorb})$$

การคำนวณประสิทธิภาพของเอมีน

$$\text{ที่ Breakthrough capacity; Efficiency of amine} = (Cap(BT) \times 2) / \text{mmol}_N$$

$$\text{ที่ Saturation capacity; Efficiency of amine} = (Cap(SAT) \times 2) / \text{mmol}_N$$

$$\text{ที่ } C = \text{ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซับ (\%V)}$$

$$C_0 = \text{ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซับ (ppm)}$$

$$C_t = \text{ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับ (ppm)}$$

$$A_{STD} = \text{พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์ที่ Saturation}$$

$$A = \text{พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซับ}$$

Cap(BT)	=	ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่ Breakthrough (มิลลิโมลต่อกับตัวดูดซับ)
Cap(SAT)	=	ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่อิ่มตัว (มิลลิโมลต่อกับตัวดูดซับ)
BT	=	เวลาที่ Breakthrough (นาที)
FR	=	อัตราการไหลแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที)
FR _{CO2}	=	อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิลิตรต่อนาที)
V _{mol}	=	ปริมาตรโมลาร์ของแก๊สอุดมคติที่ภาวะมาตรฐาน
W _{sorb}	=	น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)
mmol _N	=	จำนวนโมลของไนโตรเจนในโมเลกุลเอมีน (มิลลิโมล)

ตัวอย่างที่ ข1 การทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ FS-PEI800-30

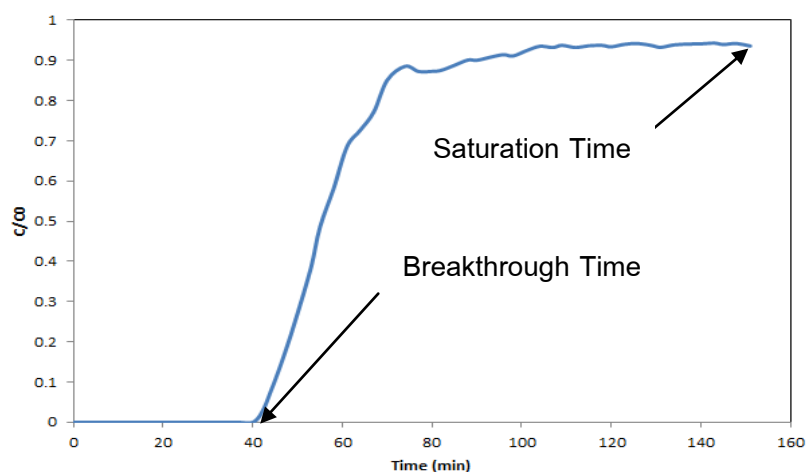
ภาวะการทดลอง: คาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 10% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน
น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

ตาราง ข.1 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกจากแก๊สโครมาโทกราฟ

Run no.	Start Time	End Time	Time (min)	Area CO ₂ (uV.min)	C (ppm)	C/C ₀
1	11.30	11.33	3	0	0	0
2	11.33	11.36	6	0	0	0
3	11.36	11.39	9	0	0	0
4	11.39	11.41	12	0	0	0
5	11.41	11.44	15	0	0	0
6	11.44	11.47	18	0	0	0
7	11.47	11.49	20	0	0	0
8	11.49	11.52	23	0	0	0
9	11.52	11.55	26	0	0	0
10	11.55	11.58	29	0	0	0
11	11.58	12.00	31	0	0	0
12	12.00	12.03	34	0	0	0
13	12.03	12.06	37	0	0	0

Run no.	Start Time	End Time	Time (min)	Area CO ₂ (uV.min)	C (ppm)	C/C ₀
14	12.06	12.09	40	0	0	0
15	12.09	12.12	43	52.7	2420.76	0.024
16	12.12	12.14	45	167.4	7689.48	0.077
17	12.14	12.17	48	363.8	16701.88	0.167
18	12.17	12.2	51	591.4	27165.82	0.272
19	12.2	12.23	54	838.9	38534.68	0.385
20	12.23	12.25	56	1057.8	48589.8	0.486
21	12.25	12.28	59	1262.5	57992.65	0.58
22	12.28	12.31	62	1419.2	68497.93	0.685
23	12.31	12.34	65	1581.6	72650.44	0.727
24	12.34	12.37	68	1679.9	77165.82	0.772
25	12.37	12.4	71	1852.8	85107.95	0.851
26	12.4	12.44	75	1927.3	88530.09	0.885
27	12.44	12.47	78	1899.2	87239.2	0.872
28	12.47	12.5	81	1899.8	87266.88	0.873
29	12.5	12.52	83	1905.3	87519.52	0.875
30	12.52	12.55	86	1932.7	88778.14	0.888
31	12.55	12.58	89	1961.3	90091.87	0.901
32	12.58	13	81	1959.9	90027.56	0.9
33	13	13.03	94	1976.4	90785.48	0.908
34	13.03	13.06	97	1990.3	91423.98	0.914
35	13.06	13.08	99	1982.8	91079.47	0.911
36	13.08	13.11	102	2011.1	92379.42	0.924
37	13.11	13.14	105	2035.4	93495.64	0.935
38	13.14	13.17	108	2029	93201.65	0.932
39	13.17	13.19	110	2040.8	93743.68	0.937
40	13.19	13.22	113	2029.3	93215.43	0.932

Run no.	Start Time	End Time	Time (min)	Area CO ₂ (uV.min)	C (ppm)	C/C ₀
41	13.22	13.25	116	2038.4	93633.44	0.936
42	13.25	13.28	119	2040.2	93716.12	0.937
42	13.28	13.33	121	2032.7	93371.61	0.934
44	13.30	13.33	124	2046.5	94005.51	0.940
45	13.33	13.36	127	2050.5	94189.25	0.942
46	13.36	13.39	130	2039.7	93693.16	0.937
47	13.39	13.41	132	2030.1	93252.18	0.933
48	13.41	13.44	135	2043.2	93853.93	0.939
49	13.44	13.47	138	2047.5	94051.45	0.941
50	13.47	13.50	141	2048.6	94101.98	0.941
51	13.50	13.52	143	2052.8	94294.90	0.943
52	13.53	13.55	145	2045.7	93968.76	0.940
53	13.55	13.58	148	2050.6	94193.84	0.942
54	13.58	14.01	151	2037.0	93569.13	0.936
55	14.01	14.03	153	2049.1	94124.94	0.941



ภาพที่ ข.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ FS-PEI800-30 ที่ภาวะคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 10% โดยปริมาตร ไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที

ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะการทดลอง: คาร์บอนไดออกไซด์ 10% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน
 น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตร
 ต่อนาที

Breakthrough Time	=	37	นาที
Saturation Time	=	151	นาที
อัตราการไหลแก๊ส	=	5	มิลลิลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นขาเข้าคาร์บอนไดออกไซด์	=	10000	ppm
น้ำหนักตัวดูดซับ	=	1	กรัม

1. การคำนวณปริมาณการเติมเอมีน

$$FS-PEI800-30 = (30 \times 100)/100 = 30$$

2. การคำนวณปริมาณโมลของไนโตรเจนในเอมีน

$$mmol_N = (\text{ร้อยละการเติมเอมีน (โดยมวล)} \times N \times 10^{-3}) / MW_{\text{amine}}$$

3. การคำนวณของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การคำนวณอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์

$$FR_{CO_2} = (5 \times 10) / 100 = 0.5 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$$

การคำนวณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับ

ยกตัวอย่างจากการวัดการดูดซับครั้งที่ 15 นาทีที่ 40

$$\text{พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับ} = 52.7$$

$$\text{พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า} = 2177$$

$$C = (100000 \times 52.7)/2177$$

$$C = 2420.76 \text{ ppm}$$

สัดส่วนความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์

$$C/C_0 = 2420.76/100000 = 0.024$$

การคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

$$\begin{aligned} \text{ที่ Breakthrough capacity; Cap(BT)} &= (40 \times 0.5) / (22.4 \times 1) \\ &= 0.893 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ Saturation capacity; Cap(S)} &= (0.5 \times 64.2) / (22.4 \times 1) \\ &= 1.434 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม} \end{aligned}$$

4. การคำนวณประสิทธิภาพของเอมีน

$$\begin{aligned} \text{ที่ Breakthrough capacity; Efficiency of amine} &= (0.893 \times 2) / 6.975 \\ &= 0.256 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ Saturation capacity; Efficiency of amine} &= (1.434 \times 2) / 6.975 \\ &= 0.411 \end{aligned}$$

4. การคำนวณของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

การคำนวณอัตราการไหลของไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$FR_{H_2S} = (FR \times C) / 100$$

การคำนวณความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ

$$C_t = (C_0 \times A) / A_{STD}$$

การคำนวณความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

ที่ Breakthrough capacity; $Cap(BT) = (BT \times FR_{H_2S}) / (V_{mol} \times W_{sorb})$

ที่ Saturation capacity; $Cap(S) = (FR_{H_2S} \times \int_0^t (C_0 - C_t) dt) / (V_{mol} \times W_{sorb})$

การคำนวณประสิทธิภาพของเอมีน

ที่ Breakthrough capacity; Efficiency of amine = $(Cap(BT) \times 2) / mmol_N$

ที่ Saturation capacity; Efficiency of amine = $(Cap(SAT) \times 2) / mmol_N$

ที่ C = ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ (%V)

C_0 = ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ (ppm)

C_t = ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ (ppm)

A_{STD} = พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ

A = พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ

Cap(BT) = ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่ Breakthrough (มิลลิโมลต่อกับตัวดูดซับ)

Cap(SAT) = ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่อิ่มตัว (มิลลิโมลต่อกับตัวดูดซับ)

BT = เวลาที่ Breakthrough (นาที)

FR = อัตราการไหลแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที)

FR_{H_2S} = อัตราการไหลไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มิลลิลิตรต่อนาที)

V_{mol} = ปริมาตรโมลาร์ของแก๊สอุดมคติที่ภาวะมาตรฐาน

W_{sorb} = น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)

$mmol_N$ = จำนวนโมลของไนโตรเจนในโมเลกุลเอมีน (มิลลิโมล)

ตัวอย่างที่ ข2 การทดลองการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ FS-PEI800-30

ภาวะการทดลอง: ไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน

น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

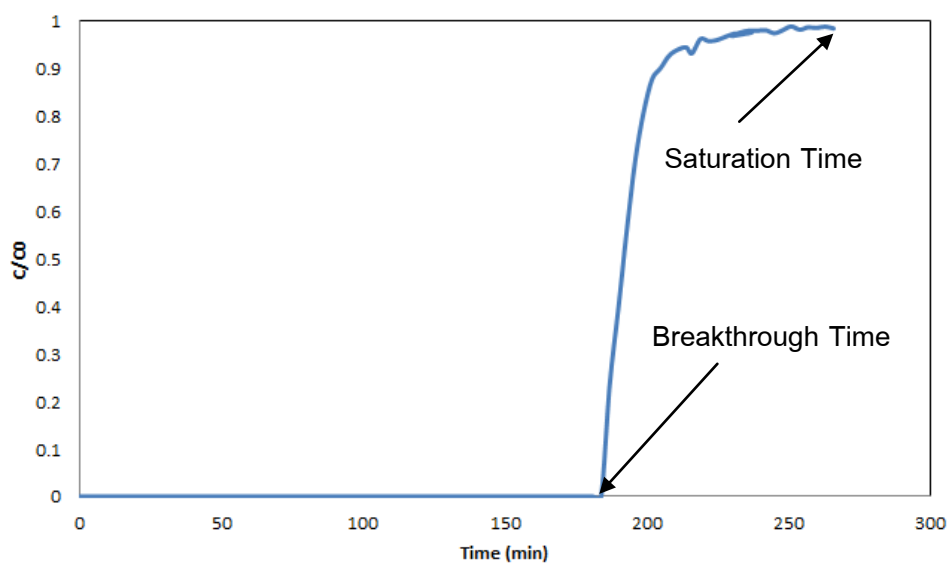
ตาราง ข.2 ผลการวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากแก๊สโครมาโทกราฟ

Run no.	Start Time	End Time	Time (min)	Area H ₂ S (uV.min)	C (ppm)	C/C ₀
1	12.27	12.30	3	0	0	0
2	12.30	12.33	6	0	0	0
3	12.33	12.36	9	0	0	0
4	12.36	12.39	12	0	0	0
5	12.39	12.42	15	0	0	0
6	12.42	12.45	18	0	0	0
7	12.45	12.48	21	0	0	0
8	12.48	12.51	24	0	0	0
9	12.51	12.54	27	0	0	0
10	12.54	12.57	30	0	0	0
11	12.57	13.00	33	0	0	0
12	13.00	13.03	36	0	0	0
13	13.03	13.06	39	0	0	0
14	13.06	13.09	42	0	0	0
15	13.09	13.12	45	0	0	0
16	13.12	13.15	48	0	0	0
17	13.15	13.18	51	0	0	0
18	13.18	13.21	54	0	0	0
19	13.21	13.24	57	0	0	0
20	13.24	13.27	60	0	0	0
21	13.27	13.30	63	0	0	0
22	13.30	13.33	66	0	0	0
23	13.33	13.36	69	0	0	0
24	13.36	13.39	72	0	0	0
25	13.39	13.42	75	0	0	0

Run no.	Start Time	End Time	Time (min)	Area H2S (uV.min)	C (ppm)	C/C ₀
26	13.42	13.45	78	0	0	0
27	13.45	13.48	81	0	0	0
28	13.48	13.51	84	0	0	0
29	13.51	13.54	87	0	0	0
30	13.54	13.57	90	0	0	0
31	13.57	14.00	93	0	0	0
32	14.00	14.03	96	0	0	0
33	14.03	14.06	99	0	0	0
34	14.06	14.09	102	0	0	0
35	14.09	14.12	105	0	0	0
36	14.12	14.15	108	0	0	0
37	14.15	14.18	111	0	0	0
38	14.18	14.21	114	0	0	0
39	14.21	12.24	117	0	0	0
40	14.24	14.27	120	0	0	0
41	14.27	14.30	123	0	0	0
42	14.30	14.33	126	0	0	0
43	14.33	14.36	129	0	0	0
44	14.36	14.39	132	0	0	0
45	14.39	14.42	135	0	0	0
46	14.42	14.45	138	0	0	0
47	14.45	14.48	141	0	0	0
48	14.48	14.51	144	0	0	0
49	14.51	14.54	147	0	0	0
50	14.54	14.57	150	0	0	0
51	14.57	15.00	153	0	0	0
52	15.00	15.03	156	0	0	0
53	15.03	15.06	159	0	0	0
54	15.06	15.09	162	0	0	0
55	15.09	15.12	165	0	0	0

Run no.	Start Time	End Time	Time (min)	Area H2S (uV.min)	C (ppm)	C/C ₀
56	15.12	15.15	168	0	0	0
57	15.15	15.18	171	0	0	0
58	15.18	15.20	173	0	0	0
59	15.20	15.23	175	0	0	0
60	15.24	14.27	178	0	0	0
61	15.27	15.30	181	0	0	0
62	15.30	15.33	184	0	0	0
63	15.33	15.36	187	136.4	2348.1	0.234
64	15.36	15.39	190	229	3942.2	0.392
65	15.39	15.42	193	325.7	5606.9	0.558
66	15.42	15.45	196	411.9	7090.8	0.706
67	15.45	15.48	199	472.7	8137.4	0.810
68	15.48	15.51	202	512.9	8829.5	0.879
69	15.51	15.54	205	526.5	9063.6	0.902
70	15.54	15.57	208	541.8	9327	0.928
71	15.57	16.00	211	548.9	9449.2	0.940
72	16.00	16.03	214	551.7	9497.4	0.945
73	16.03	16.05	216	544.4	9371.7	0.932
74	16.06	16.09	219	562	9674.7	0.963
75	16.09	16.11	222	559.4	9630	0.958
76	16.11	16.14	225	561	9657.5	0.961
77	16.14	16.17	228	565.1	9728.1	0.968
78	16.17	16.20	231	568.7	9790.1	0.974
79	16.20	16.23	234	568.2	9781.4	0.973
80	16.23	16.26	237	570	9812.4	0.976
81	16.26	16.29	230	565.8	9850.3	0.969
82	16.29	16.32	233	570	9740.1	0.976
83	16.32	16.35	236	572.3	9812.4	0.980
84	16.35	16.38	239	572.2	9852	0.980

Run no.	Start Time	End Time	Time (min)	Area H ₂ S (uV.min)	C (ppm)	C/C ₀
85	16.38	16.41	242	573	9850.3	0.982
86	16.41	16.44	245	569.2	9864.1	0.975
87	16.44	16.47	248	572.8	9798.7	0.981
88	16.47	16.50	251	577.6	9860.6	0.989
89	16.50	16.53	254	573.6	9943.3	0.983
90	16.53	16.56	257	576.5	9874.4	0.987
91	16.56	16.59	260	575.7	9924.3	0.986
92	16.59	17.02	263	577.3	9910.6	0.989
93	17.02	17.05	266	575.0	9898.5	0.985



ภาพที่ ข.2 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ FS-PEI800-30 ที่ภาวะไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะการทดลอง: ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน
น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตร
ต่อนาที

Breakthrough Time	=	184	นาที
Saturation Time	=	575	นาที
อัตราการไหลแก๊ส	=	10	มิลลิลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นขาเข้าไฮโดรเจนซัลไฟด์	=	10000	ppm
น้ำหนักตัวดูดซับ	=	1	กรัม

1. การคำนวณปริมาณการเติมเอมีน

$$FS-PEI800-30 = (30 \times 100) / 100 = 30$$

2. การคำนวณปริมาณโมลของไนโตรเจนในเอมีน

$$mmol_N = (\text{ร้อยละการเติมเอมีน (โดยมวล)} \times N \times 10^{-3}) / MW_{\text{amine}}$$

3. การคำนวณของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

การคำนวณอัตราการไหลของไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$FR_{H_2S} = (10 \times 1) / 100 = 0.1 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$$

การคำนวณความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ

ยกตัวอย่างจากการวัดการดูดซับครั้งที่ 62 นาทีที่ 184

$$\text{พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ} = 136.4$$

$$\text{พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า} = 583.8$$

$$C = (10000 \times 136.4) / 583.8$$

$$C = 2348.1$$

สัดส่วนความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$C/C_0 = 0.234$$

การคำนวณความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\begin{aligned} \text{ที่ Breakthrough capacity; Cap(BT)} &= (184 \times 0.1) / (22.4 \times 1) \\ &= 0.826 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ Saturation capacity; Cap(S)} &= (0.1 \times 194.9) / (V_{\text{mol}} \times W_{\text{sorb}}) \\ &= 0.870 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม} \end{aligned}$$

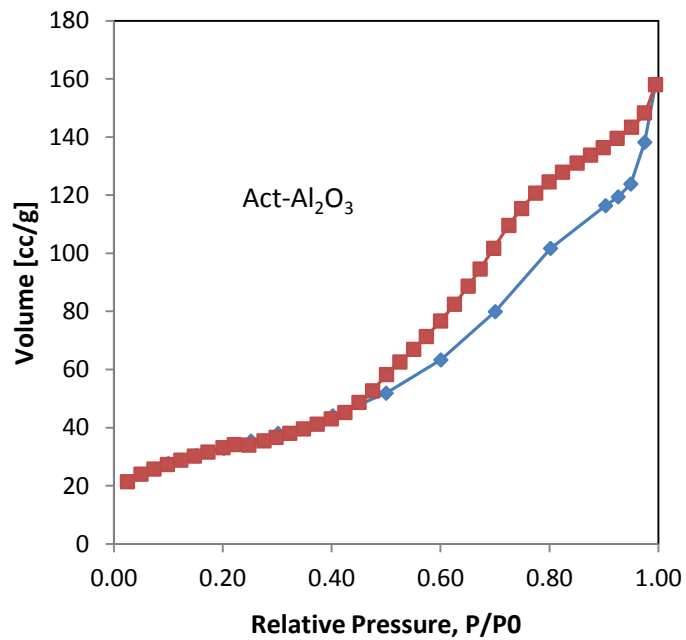
4. การคำนวณประสิทธิภาพของเอมีน

$$\begin{aligned} \text{ที่ Breakthrough capacity; Efficiency of amine} &= (0.826 \times 2) / 6.975 \\ &= 0.237 \end{aligned}$$

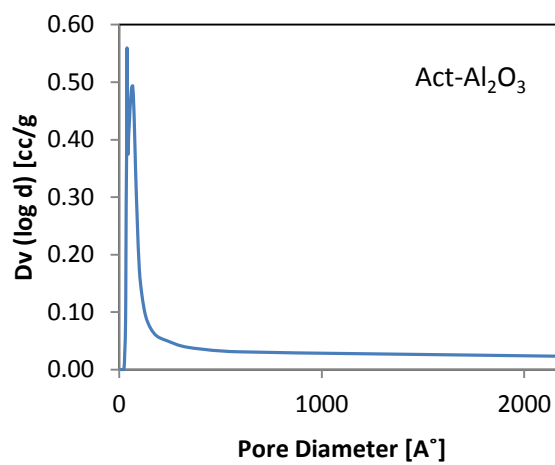
$$\begin{aligned} \text{ที่ Saturation capacity; Efficiency of amine} &= (0.870 \times 2) / 6.975 \\ &= 0.249 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ค

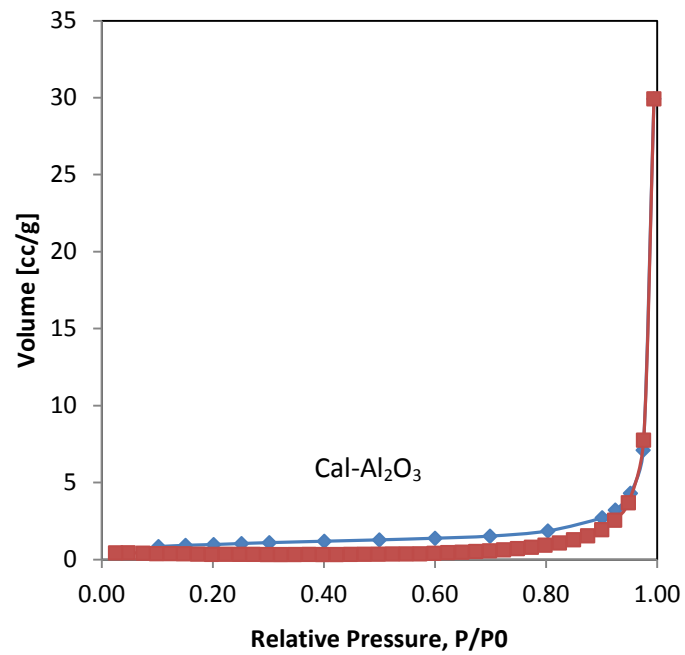
การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มและขนาดรูพรุนของตัวรองรับและตัวดูดซับเชิงพาณิชย์



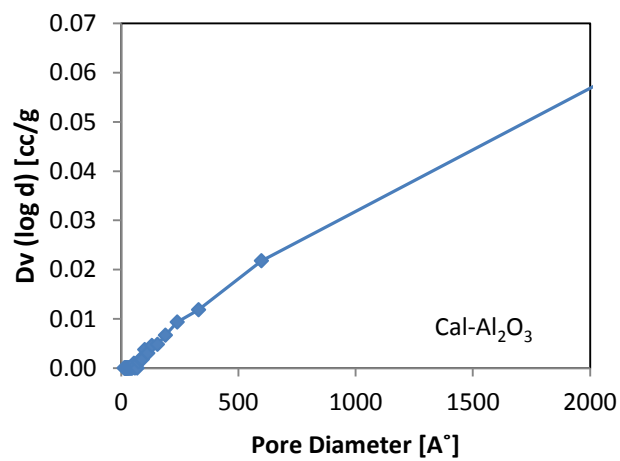
ภาพที่ ค.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวรองรับแอคทีเวทอะลูมินา ($\text{Act-Al}_2\text{O}_3$)



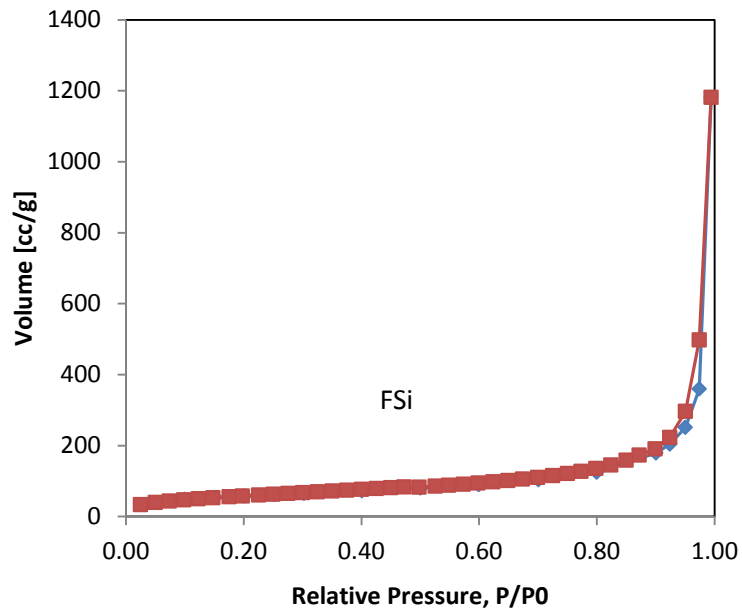
ภาพที่ ค.2 Pore size distribution ของตัวรองรับแอคทีเวทอะลูมินา ($\text{Act-Al}_2\text{O}_3$)



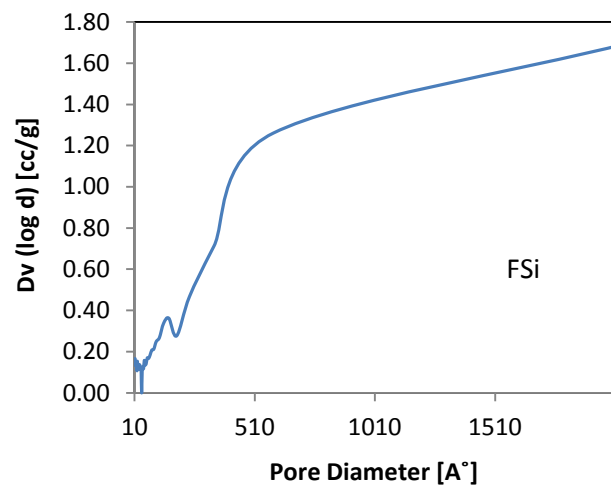
ภาพที่ ค.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวรองรับแคลเซียมอะลูมินา (Cal-Al₂O₃)



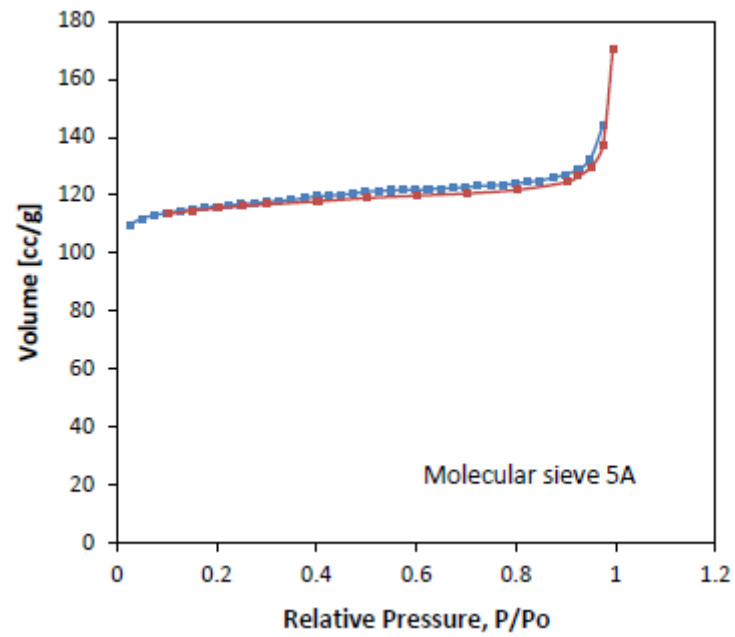
ภาพที่ ค.4 Pore size distribution ของตัวรองรับแคลเซียมอะลูมินา (Cal-Al₂O₃)



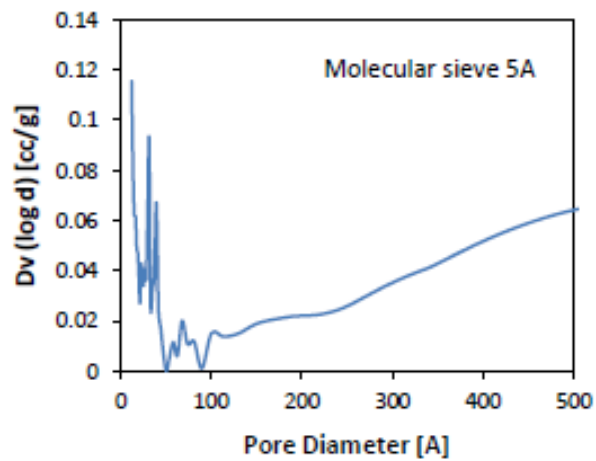
ภาพที่ ค.5 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวรองรับฟลูมซิลิกา (FSi)



ภาพที่ ค.6 Pore size distribution ของตัวรองรับฟลูมซิลิกา (FSi)



ภาพที่ ค.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A [28]



ภาพที่ ค.8 Pore size distribution ของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A [28]

ภาคผนวก ง

การคำนวณองค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอื่น ๆ

ตารางที่ ง.1 จำนวนคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และอื่น ๆ ในเอมีนตามทฤษฎี

Amine type	MW _{amine} (g/ mol)	% amine loading	Ultimate analysis of amine/mass%				
			C	H	N	O	Si
Polyethyleneimine	800	20	11.2	2.3	6.5	-	-
		30	16.7	3.5	9.8	-	-
		40	22.3	4.6	13.1	-	-
		50	27.9	5.8	16.4	-	-
		60	33.4	7.0	19.6	-	-
Aminoethylethanolamine	104.15	20	9.2	2.3	5.4	3.1	-
N- 3-(trimethoxysilyl)- propyldiethylenetriamine	265.43	20	9.0	2.0	3.2	3.6	2.1
Diethylenetriamine	103.17	20	9.3	2.5	8.2	-	-
Triethylenetetramine	146.23	20	9.8	2.5	7.7	-	-
Tetraethylenepentamin	189	20	10.2	2.2	7.5	-	-

ตัวอย่างการคำนวณ

Polyethyleneimine มวลโมเลกุล 800 (PEI800)

คำนวณจากมอนอเมอร์ 1 หน่วย

จำนวนคาร์บอน (C) = 22 อะตอม มีมวลโมเลกุล = 264 g/mol

จำนวนไฮโดรเจน (H) = 55 อะตอม มีมวลโมเลกุล = 55 g/mol

จำนวนไนโตรเจน (N) = 11 อะตอม มีมวลโมเลกุล = 155.1 g/mol

มวลโมเลกุลรวม = 474.1 g/mol

คำนวณจากสายพอลิเมอร์ทั้งหมดที่มีมวลโมเลกุล 800 g/mol

ประกอบด้วยคาร์บอน (C) มวลโมเลกุล = 445.5 g/mol คิดเป็น 55.7 %

ไฮโดรเจน (H) มวลโมเลกุล = 92.8 g/mol คิดเป็น 11.6 %

ไนโตรเจน (N) มวลโมเลกุล = 261.7 g/mol คิดเป็น 32.7 %

ตัวดูดซับ FSi-PEI800-20 ที่มีเอมีนอยู่ 20% โดยน้ำหนัก

ประกอบด้วยคาร์บอน (C) คิดเป็น 11.2 %

ไฮโดรเจน (H) คิดเป็น 2.3 %

ไนโตรเจน (N) คิดเป็น 6.5 %

ภาคผนวก จ

การคำนวณจำนวนโมลของไนโตรเจนในเอมีน

การคำนวณจำนวนโมลของไนโตรเจนในเอมีน

$$\begin{aligned} \text{mmol}_N &= (\text{ร้อยละการเติมเอมีน (โดยมวล)} \times N \times 10^{-3}) / MW_{\text{amine}} \\ \text{mmol}_N &= \text{จำนวนโมลของไนโตรเจนในโมเลกุลเอมีน (มิลลิโมล)} \\ N &= \text{จำนวนไนโตรเจนในโมเลกุลเอมีน} \\ MW_{\text{amine}} &= \text{มวลโมเลกุลของเอมีน (กรัมต่อโมล)} \end{aligned}$$

ตารางที่ จ.1 จำนวนโมลของไนโตรเจนในเอมีนต่างชนิดกันที่เติมลงบนตัวรองรับในปริมาณต่าง ๆ

Amine type	MW _{amine} (g/ mol)	N	% amine loading	mmol _N (mmol)
Polyethyleneimine	800	18.6	20	4.65
			30	6.98
			40	9.30
			50	11.63
			60	13.95
Aminoethylethanolamine	104.15	2	20	3.84
N- 3-(trimethoxysilyl)-propyl diethylenetriamine	265.43	3	20	2.26
Diethylenetriamine	103.17	4	20	5.82
Triethylenetetramine	146.23	5	20	5.47
Tetraethylenepentamin	189	6	20	5.29

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวดูดซับดัดแปรด้วยพอลิเอมีนร้อยละ 20

การคำนวณจำนวนโมลของไนโตรเจนในเอมีน

$$\begin{aligned} \text{mmol}_N &= (\text{ร้อยละการเติมเอมีน (โดยมวล)} \times N \times 10^{-3}) / MW_{\text{amine}} \\ \text{mmol}_N &= (0.2 \times 18.6 \times 10^{-3}) / 800 = 4.65 \text{ mmol} \end{aligned}$$

ภาคผนวก จ

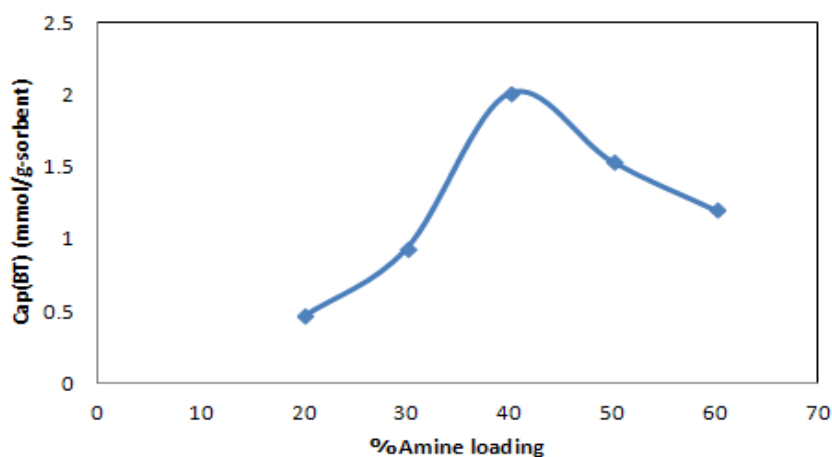
อุณหภูมิกการหลอมละลายของเอมีน

ตารางที่ จ.1 อุณหภูมิและลักษณะการหลอมละลายของเอมีนชนิดต่างๆ

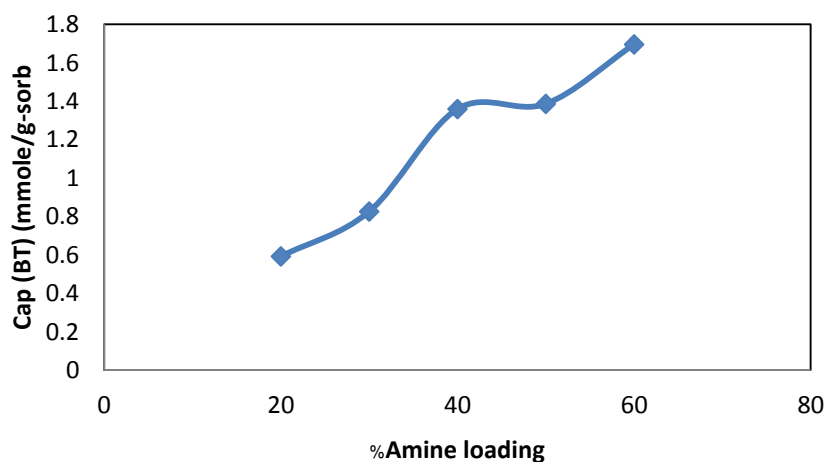
Amine types	Degradation temperature (°C)	Stability of the amine on fumed silica support
Polyethyleneimine	100	หลอมละลายเล็กน้อย
Aminoethylethanolamine	80	หลอมละลายเล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง
N- 3-(trimethoxysilyl)-propyl diethylenetriamine	>100	ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
Diethylenetriamine	80	หลอมละลายโดยทันที
Triethylenetetramine	80	หลอมละลายเล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง
Tetraethylenepentamin	>80	หลอมละลายเล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง

ภาคผนวก ข

แนวโน้มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์
ที่ปริมาณเอมีนต่างกัน



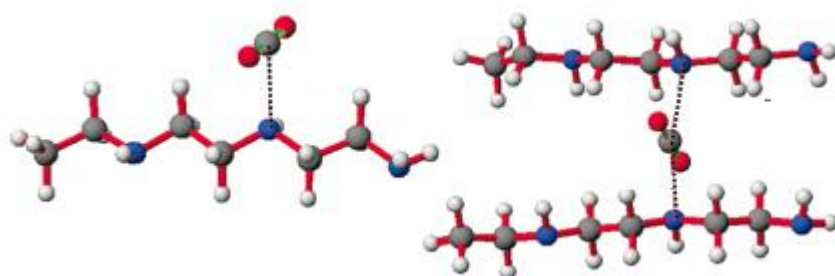
ภาพที่ ข.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับฟุ่มซิลิกาที่มีปริมาณเอมีนต่างกัน ภาวะ : คาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที



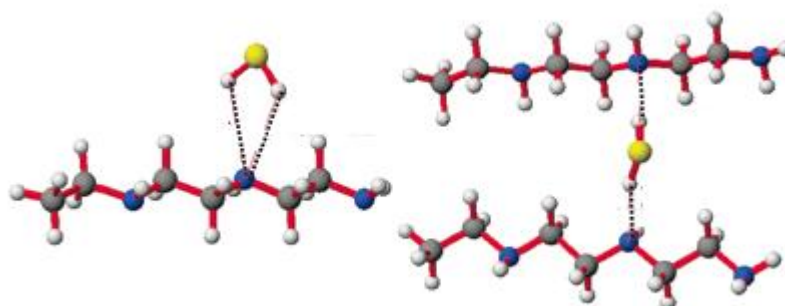
ภาพที่ ข.2 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์บนตัวดูดซับฟุ่มซิลิกาที่มีปริมาณเอมีนต่างกัน ภาวะ : ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ภาคผนวก ข

อันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับคาร์บอนไดออกไซด์และอันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับ
กับไฮโดรเจนซัลไฟด์



ภาพที่ ข.1 ลักษณะอันตรกิริยาของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับดัดแปรด้วยพอลิเอมีน [10]



ภาพที่ ข.2 ลักษณะอันตรกิริยาของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับดัดแปรด้วยพอลิเอมีน [10]

ภาคผนวก ฅ

การเติมเอมีนที่มากเกินไปด้วยวิธีการอิมเพรก



ภาพที่ ฅ.1 การเติมเอมีนที่มากเกินไปหลังจากนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวทิพย์รัตน์ วงษ์สง่า เกิดวันที่ 13 พฤษภาคม 2532 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาคเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554