

การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้ซิลิกาดัดแปร

นางสาวแหวดาว ใจบุญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

ADSORPTION OF H<sub>2</sub>S IN BIOGAS USING MODIFIED SILICA

Miss Veawdaow Jaiboon

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

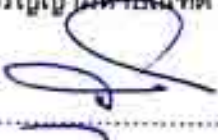
Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University


หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้ซิลิกาดัดแปร
โดย	นางสาวแววดาว ใจบุญ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. บุญญาวัฒน์ อยู่สุข

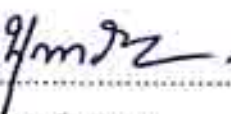
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. แก้วลี พุกษาทร)

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

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ดร. บุญญาวัฒน์ อยู่สุข)

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

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. อังคนา วงศ์ศิริวรรณ)

แนวท้าว ใจบุญ: การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้ซิลิกาดัดแปร.  
(ADSORPTION OF  $H_2S$  IN BIOGAS USING MODIFIED SILICA) อ.ที่ปรึกษา  
วิทยานิพนธ์หลัก: ศ.ดร. กัทรพรรณ ประศาลนสารกิจ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:  
ดร. บุญญาวัฒน์ อยู่สุข, 101 หน้า.

ตัวดูดซับปริมาณรูพรุนสูงถูกเตรียมสำหรับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตัวดูดซับดังกล่าวคือ ซิลิกาเฮโรเจลดัดแปรโดยการเติมเอมีน ซึ่งชนิดเอมีนที่ศึกษาได้แก่ ไตรเอมีน และพอลิเอมีนมวลโมเลกุล 800, 2,000 และ 25,000 โดยศึกษาถึงผลของลักษณะตัวดูดซับ ชนิดของเอมีนบนตัวดูดซับ ปริมาณของเอมีนบนตัวดูดซับ อุณหภูมิในการดูดซับ และอัตราไหลแก๊สต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ผลสมบัติทางความร้อน (TGA) โครงสร้างโมเลกุล (FTIR) พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (BET) เอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ (XRD) และ ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (SEM) จากการศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าตัวดูดซับ Si-PEI800-50 มีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ทั้งที่ breakthrough และที่อิ่มตัวได้ 0.449 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ และ 0.629 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับมีแนวโน้มในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ อีกทั้งสามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ที่ภาวะไม่รุนแรงโดยที่ประสิทธิภาพการดูดซับไม่เปลี่ยนแปลง

ภาควิชา เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....นางสาว ใจบุญ.....  
สาขาวิชา เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา 2554.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5372333523 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : H<sub>2</sub>S removal / silica xerogel / biogas purification / adsorption.

VAEWDAOW JAIBOON: ADSORPTION OF H<sub>2</sub>S IN BIOGAS USING MODIFIED SILICA. ADVISOR: PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, Ph.D., CO-ADVISOR : BOONYAWAN YOOSUK, Ph.D., 101 pp.

The high porous adsorbent, silica xerogel modified by addition of amine groups, Triamine and Polyethyleneimine (Mw 800, 2000 and 25000), was prepared for H<sub>2</sub>S adsorption. The effect of variables, adsorbent type, amount of amine loading, operating temperature, and gas flow rate on H<sub>2</sub>S adsorption were investigate. The adsorption of the amine groups enhanced hydrogen sulfide removal efficiency and the adsorbent has a good selectivity of acid gases. The sorbent was characterized by Thermo Gravimetic Analysis (TGA), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Brunauer Emmett Teller (BET), X-ray diffractometer (XRD) and Scanning Electron Microscope (SEM). The results showed that Si-PEI800-50 gave good breakthrough and saturation capacity of 0.449 and 0.629 mmol/g-sorb, respectively. This result indicated that the sorbents are promising for removing hydrogen sulfide. Moreover, the sorption-desorption loops showed that the Si-PEI800-50 had good regenerability and stable sorption performance.

Department : Chemical Technology

Field of Study : Chemical Technology

Academic Year : 2011

Student's Signature *Vaewdaow Jaiboon*

Advisor's Signature *P. Pattarapan*

Co-advisor's Signature *Boonyawan Yoosuk*

## กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความร่วมมือจากหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรพรรณ ประศาสน์สารกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และดร.บุญญาวัฒน์ อยู่สุข อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านได้คอยให้ความช่วยเหลือเป็นห่วงเป็นใยในทุกๆ ด้าน ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

งานวิจัยเรื่อง “การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพโดยใช้ซิลิกาดัดแปร” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (Center of Excellence on Petrochemical and Materials Technology) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ พี่ๆ นักวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (National Metal and Materials Technology Center: MTEC) ที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ รวมถึงคำแนะนำและข้อคิดดีๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พฤษชาติ ปรธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.อังคณา วงศ์ศิริวรรณ กรรมการจากภายนอก ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ รวมถึงพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการวิจัย และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

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
2    ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แก๊สชีวภาพ (Biogas).....	4
2.1.1 พื้นฐานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	5
2.1.2 การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพ (Biogas Utilization).....	6
2.1.3 กระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ.....	7
กระบวนการดูดซึม (Adsorption).....	7
กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น (Membrane Separation).....	8
กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	9
2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	10
2.2.1 ประเภทของการดูดซับ.....	10
การดูดซับทางกายภาพ.....	10
การดูดซับทางเคมี.....	12

บทที่	หน้า
2.3 ตัวดูดซับ.....	14
2.3.1 ตัวดูดซับพลาสมิกซ์.....	17
2.3.2 ตัวรองรับหรือตัวพา.....	18
2.3.3 สมดุลการดูดซับ.....	21
แบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิคงที่.....	20
ก. แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์.....	24
ข. แบบจำลองสมดุลดูดซับของปีอี่.....	26
2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	28
2.3.5 วิธีการทำให้สารดูดซับกลับสภาพเดิม.....	30
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	34
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.2 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.3 วิธีการทดลอง.....	36
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ.....	36
สังเคราะห์ตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล.....	36
ปรับปรุงพื้นผิวตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล.....	38
3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	38
ระบบการทดสอบการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	38
สมการการคำนวณ.....	40
3.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ.....	41
3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	43
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	45
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ.....	45
4.2 การดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	59
4.3 การศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ.....	68
4.4 เสถียรภาพของตัวดูดซับ.....	72
4.5 การเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์กับตัวดูดซับเชิงพลาสมิกซ์.....	74



บทที่	หน้า
5   สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
รายการอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก.....	84
ภาคผนวก ข.....	87
ภาคผนวก ค.....	94
ภาคผนวก ง.....	97
ภาคผนวก จ.....	98
ภาคผนวก ฉ.....	99
ภาคผนวก ช.....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	101

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี.....	13
2.2	สมบัติกายภาพทั่วไปของตัวดูดซับพาณิชย์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม.....	14
3.1	ปริมาณของซิลิกาเซโรเจลและไตรเอมีนหรือพอลิเอมีนที่เติม.....	37
4.1	BET Surface area, Pore volume และ Pore size ของตัวดูดซับที่เตรียม และ ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์.....	48
4.2	ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-TRI-26 ที่มีลักษณะแตกต่างกัน.....	60
4.3	ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่เตรียมได้.....	62
4.4	ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	65
4.5	ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ที่อัตราไหลแตกต่างกัน.....	67
4.6	ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50.....	73
4.7	ความสามารถของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 เปรียบเทียบกับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์.....	75
ข.1	ผลการวัดความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากแก๊สโครมาโทกราฟี.....	88

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	กระบวนการดูดซึมแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สผสม .....	8
2.2	กระบวนการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่น .....	9
2.3	กระบวนการดูดซับแยกแก๊สกรดออกจากแก๊สผสม .....	9
2.4	แรงทางกายภาพที่ทำให้เกิดการดูดซับ .....	12
2.5	ความหนาแน่นประเภทต่างๆ ของระบบดูดซับ ช่องว่างในตัวดูดซับและ ระหว่างตัวดูดซับ .....	15
2.6	ไอโซเทอร์มของการดูดซับแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน ที่ -195 องศาเซลเซียส และนอร์มัลเพนเทน ที่ 0 องศาเซลเซียส บนซิลิกา .....	22
2.7	ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 6 ชนิด ตามการจำแนกของ IUPAC .....	22
2.8	การเกิดผลกระทบบิสเทอริซิสของการดูดซับชนิดที่ 4 โดยตัวดูดซับที่มีรูปร่าง ต่างๆ .....	24
3.1	กรรมวิธีการสังเคราะห์ซิลิกาเซโรเจลที่มีพื้นที่ผิวสูง .....	36
3.2	ชุดอุปกรณ์ทดลองการเตรียมตัวดูดซับด้วยกระบวนการไฮล-เจล .....	37
3.3	เครื่องมือที่ใช้ทดลอง (ก) เครื่องปฏิกรณ์, (ข) ชุดควบคุมอัตราไหลแก๊ส และ (ค) แก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก .....	39
3.4	แผนผังชุดอุปกรณ์ทดลองการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ .....	39
3.5	เครื่องอัดเม็ดและคัดขนาดตัวดูดซับ .....	43
4.1	รูปแบบ XRD ของตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล .....	46
4.2	Pore size distribution ของตัวดูดซับ, (ก) Si, Si-TRI-30. Si-TRI-40 (ข) Si-TRI-50, Si-TRI-60 (ค) Si-PEI800-30, Si-PEI800-40, Si-PEI800-50...	49
4.3	ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวของขนาด รูพรุนของ, (ก.) Si, (ข.) Si-TRI-30, (ค.) Si-TRI-40, (ง.) Si-TRI-50, (จ.) Si-TRI-60 .....	50
4.4	ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวของขนาด รูพรุนของ, (ก) Si-PEI800-30, (ข) Si-PEI800-40 (ค.) Si-PEI800-50, (ง) Si-PEI2000-30, (จ) Si-PEI25000-30 .....	51

ภาพที่	หน้า	
4.5	<p>                     สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ PEI มวลโมเลกุล 800 บนซิลิกาเซโรเจล,                      (ก) Si, (ข) Si-PEI800-30, (ค) Si-PEI800-40, (ง) Si-PEI800-50.....                 </p>	53
4.6	<p>                     สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ TRI บนซิลิกาเซโรเจล, (ก) Si-TRI-30,                      (ข) Si-TRI-40,(ค) Si-TRI-50, (ง) Si-TRI-60.....                 </p>	54
4.7	<p>                     รูปแบบการสลายตัวของตัวดูดซับ, (ก.) รูปแบบการสลายตัวของซิลิกาเซโรเจล                      และตัวดูดซับ Si-TRI ที่มีปริมาณไตรเอมีนแตกต่างกัน, (ข.) รูปแบบการ                      สลายตัวของตัวดูดซับ Si-PEI ที่มีปริมาณพอลิเอมีนแตกต่างกัน.....                 </p>	56
4.8	<p>                     โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ, ก. โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ Si-TRI ที่มี                      ปริมาณไตรเอมีนแตกต่างกัน, ข โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ Si-PEI ที่มี                      ปริมาณพอลิเอมีนแตกต่างกัน.....                 </p>	58
4.9	<p>                     ลักษณะของตัวดูดซับที่เตรียมได้ (ก.) ตัวดูดซับ Si-TRI-26 แบบผง,                      (ข.) ตัวดูดซับ Si-TRI-26 แบบเม็ด.....                 </p>	59
4.10	<p>                     ผลของลักษณะของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วย                      ตัวดูดซับ Si-TRI-26 ภาวะ: ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊ส                      ไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหล                      แก๊ส 20 มิลลิลิตรต่อนาที.....                 </p>	60
4.11	<p>                     ผลของชนิดเอมีนต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ                      Si-TRI-30, Si-PEI800-30, Si-PEI2000-30 และ Si-PEI25000-30 ภาวะ:                      ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัว                      ดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อ                      นาที.....                 </p>	62
4.12	<p>                     ผลของปริมาณเอมีนต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูด                      ซับ (ก) Si-TRI, (ข) Si-PEI ภาวะ: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดย                      ปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศา                      เซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....                 </p>	63
4.13	<p>                     ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ                      Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊ส                      ไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....                 </p>	65

ภาพที่	หน้า	
4.14	ผลของอัตราการไหลของก๊าซต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ อัตราไหลแตกต่างกัน ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	67
4.15	การคายการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตราไหลแก๊สแตกต่างกัน ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-30 ภาวะ: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนัก ตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	70
4.16	การคายการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิการคายเริ่มต้น 30 องศา เซลเซียส ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อ นาที.....	70
4.17	การคายการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิการคายเริ่มต้น 40 องศา เซลเซียส ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อ นาที.....	71
4.18	การคายการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิการคายเริ่มต้น 50 องศา เซลเซียส ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อ นาที.....	71
4.19	รอบของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะดูดซับ: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัว ดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ภาวะการคาย: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนักตัวดูด ซับ 1.0 กรัม อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 100 นาที.....	72
4.18	ความสามารถของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 เปรียบเทียบกับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ ภาวะ: ความเข้มข้น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....	74

ภาพที่		หน้า
ก.1	โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาณ ในแก๊ส ไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่าง ๆ ที่ภาวะน้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....	84
ข.1	การดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ที่ภาวะแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาณ ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที.....	92
ค.1	ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์, (ก) Molecular sieve 5A, (ข) Molecular sieve 13X.....	94
ค.2	Pore size distribution ของตัวดูดซับ Si-TRI.....	95
ค.3	Pore size distribution ของตัวดูดซับ Si-PEI800.....	96
ค.4	Pore size distribution ของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์.....	96
ง.1	รูปแบบการสลายตัวของ N-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine....	97
ง.2	รูปแบบการสลายตัวของ Polyethylenimine มวลโมเลกุล 800.....	97
จ.1	อันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับและไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	98
ฉ.1	ลักษณะตัวดูดซับ Si-PEI800-60 ที่เติมเอมีนมากเกินไป.....	99
ช.1	สูตรโครงสร้าง N-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine.....	100
ช.2	สูตรโครงสร้าง Polyethyleneimine.....	100
ช.3	สูตรโครงสร้าง Tetraethyl orthosilicate.....	100

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลกมีความต้องการแก๊สเชื้อเพลิงในปริมาณเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็นแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ หรือจากกระบวนการสังเคราะห์แก๊สเชื้อเพลิงชีวภาพ เนื่องจากสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนต่างๆ ได้ เช่น น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ ในแก๊สชีวภาพมีไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อน และส่งผลเสียต่อเครื่องจักรรวมถึงท่อส่งแก๊สและยานพาหนะ แม้ว่าในแก๊สธรรมชาติมีไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นองค์ประกอบที่ต่ำ แต่เมื่อแก๊สนี้ถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะส่งผลเสียต่อสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังเป็นพิษต่อตัวดูดซับอีกด้วย ดังนั้นกระบวนการทำให้แก๊สชีวภาพบริสุทธิ์จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างมากต่ออุตสาหกรรมแก๊สเชื้อเพลิง

โดยทั่วไปการกำจัดแก๊สกรดนิยมใช้วิธีการทำความสะอาดทางเคมีด้วยเอมีนในวัฏภาคของเหลว (Liquid-phase chemical scrubbing with amines) ซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสารเอมีน (Amine regeneration) และมีประสิทธิภาพต่ำ เทคโนโลยีการดูดซับ (Adsorption) เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สกรดด้วยความสามารถในการดูดซับ (Capacity) มีสภาพการเลือก (Selectivity) กับแก๊สกรด อีกทั้งยังมีการลงทุนและค่าใช้จ่ายต่ำ วัสดุที่ใช้สำหรับกระบวนการดูดซับแก๊สกรดในอุตสาหกรรมเช่นถ่านกัมมันต์ และซีโอไลต์ ยังมีข้อจำกัดเพราะถ่านกัมมันต์มีสภาพการเลือกต่อแก๊สกรดต่ำและมีผลของน้ำ แนวคิดของการศึกษาตัวดูดซับแบบใหม่ เช่น ซีโอไลต์ เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นและสามารถฟื้นฟูสภาพได้ภายใต้ภาวะที่ไม่รุนแรง โดยที่ตัวดูดซับยังคงมีประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น

งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาตัวดูดซับสำหรับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และตัวดูดซับมีเสถียรภาพ โดยสังเคราะห์ซิลิกาที่มีปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง อีกทั้งดัดแปรตัวดูดซับโดยการเติมเบสลงบนวัสดุรองรับที่สังเคราะห์ขึ้น และเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวดูดซับที่สังเคราะห์กับตัวดูดซับที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการสังเคราะห์ซิลิกาที่มีปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง และดัดแปรตัวดูดซับโดยการเติมเบสลงบนซิลิกาที่มีปริมาณรูพรุนและพื้นที่ผิวสูง
2. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้ และศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมซิลิกาเซโรเจล (Silica xerogel) ที่มีพื้นที่ผิวสูง
2. ทำการดัดแปรตัวดูดซับโดยการเติมหมู่เอมีนลงบนซิลิกาเซโรเจล ซึ่งหมู่เอมีนที่เติมคือ *N*-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine และ Polyethyleneimine
3. วิเคราะห์โครงสร้างและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
4. ศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ
5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวดูดซับที่สังเคราะห์กับตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกแก๊สกรดจากแก๊สชีวภาพ
2. จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและสารเคมี
  - เตรียมชุดสังเคราะห์ซิลิกาเซโรเจล
  - เตรียมชุดทดลองการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์
3. เตรียมซิลิกาเซโรเจล และซิลิกาเซโรเจลดัดแปรด้วยการเติมหมู่เอมีน
  - หาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซิลิกาเซโรเจล
4. วิเคราะห์โครงสร้างและพื้นที่ผิวของซิลิกาเซโรเจล
  - วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer
  - วิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเครื่อง Surface area and porosity analyzer
  - วิเคราะห์อุณหภูมิสลายตัวด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer



- วิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer
5. ทำการดัดแปรตัวดูดซับโดยการเติมหมู่เอมีนลงบนซิลิกาเซโรเจล ซึ่งหมู่เอมีนที่เติมคือ *N*-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine และ Polyethyleneimine
  6. ศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ
    - ลักษณะตัวดูดซับ
    - ชนิดเอมีนบนตัวดูดซับ
    - ปริมาณเอมีนบนตัวดูดซับ
    - คุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการดูดซับ
    - อัตราไหลของแก๊สต่อการดูดซับ
  7. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับซิลิกาเซโรเจลดัดแปร
    - คุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการดูดซับ
    - อัตราไหลของแก๊สต่อการดูดซับ
  8. เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวดูดซับที่สังเคราะห์กับตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรม
  9. สรุป วิเคราะห์ผล และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าตัวดูดซับที่มีการใช้ในอุตสาหกรรม

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แก๊สชีวภาพ (Biogas) [1,2]

แก๊สชีวภาพเกิดจากการย่อยสลายมูลสัตว์ หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (anaerobic digestion) ของเสียเหล่านั้นได้แก่ ของเสียจาก สุกร โค ไก่ หรือของเสียจากภาคอุตสาหกรรมเกษตร และขยะ เช่น โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โรงงานน้ำมันปาล์ม และโรงงานเอทานอล เป็นต้น ประเทศไทยมีมูลสัตว์และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาก แก๊สชีวภาพมีองค์ประกอบ คือ มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในอัตราส่วนประมาณ 65: 33: 2 ตามลำดับ หากมีปริมาณมีเทน ร้อยละ 65 แก๊สชีวภาพมีค่าความร้อนต่ำ (LHV) 23 เมกะจูล/ลูกบาศก์เมตร ( $\text{MJ/m}^3$ ) ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ จะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญได้แก่ ชนิดของของเสียที่จะย่อยสลาย ระยะเวลาพักน้ำเสียในถังปฏิกรณ์ และอัตราสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบในแต่ละวัน รวมถึงการควบคุมสภาวะแวดล้อมภายในถังปฏิกรณ์ให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ต้องการในการย่อยสลายของเสีย โดยทั่วไปภายใต้อุณหภูมิคงที่ที่ 35 องศาเซลเซียส และความชื้นเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสม เนื่องจากแก๊สชีวภาพมีสัดส่วนของแก๊สมีเทนสูงกว่าร้อยละ 50 สามารถจุดติดไฟได้ดี จึงสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนต่างๆ ได้ เช่น การเผาไหม้เพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง ทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน เช่น เครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล เพื่อขับเคลื่อนเครื่องจักรกลต่างๆ หรือใช้กับเครื่องยนต์ผลิตพลังงานไฟฟ้า

องค์ประกอบสำคัญของแก๊สชีวภาพ คือ มีเทน เป็นแก๊สไม่มีสี ติดไฟได้ เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในแก๊สธรรมชาติ มีค่าความร้อน 50 เมกะจูลต่อกิโลกรัม คาร์บอนไดออกไซด์ ได้จากการย่อยสลายของกรดอินทรีย์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือแก๊สไข่เน่า เป็นแก๊สไม่มีสี มีกลิ่นเหม็น และเมื่อรวมกับไอน้ำในแก๊สชีวภาพ จะเกิดเป็นกรดซัลฟิวริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ซึ่งกัดกร่อนวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ที่เป็นโลหะในระบบแก๊สชีวภาพ เช่น หัวเผาแก๊ส (Burner) หรือ เครื่องยนต์สันดาปภายใน ที่ใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิง และหากได้รับเข้าสู่ร่างกายมนุษย์จะเกิดอันตรายดังนี้

- สัมผัสทางหายใจ: การหายใจเข้าไปทำให้วิงเวียนศีรษะ คลื่นไส้ ถ้าได้รับสารปริมาณมากจะทำให้หมดสติ หรือมีอาการโคม่า อาจทำให้เสียชีวิตได้
- สัมผัสทางผิวหนัง: การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง
- สัมผัสถูกตา: การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง โรคเยื่อตาอักเสบ และเยื่อตาขาวได้รับบาดเจ็บ
- ความผิดปกติอื่นๆ: สารนี้ทำลายปอด ทรวงอก ระบบหายใจ การเดินอาหาร ไต ท่อไต กระเพาะปัสสาวะและเป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์

### 2.1.1 พื้นฐานของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ [2]

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซมีเทน เมื่อของเสียอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่จำกัดอากาศ จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ (Anaerobic microorganism) ซึ่งมีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ และในของเสียนั้นจะเจริญเติบโตได้ดีกว่าจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ กลายเป็นกลุ่มเด่น (Dominant species) ซึ่งปล่อยเอนไซม์เพื่อประกอบปฏิกิริยาชีวเคมีให้เปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นแก๊สมีเทน โดยกลไกของการผลิตแก๊สมีเทนโดยแบคทีเรียสามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ซึ่งในแต่ละขั้นตอนจะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ต่างชนิดกัน โดยในขั้นแรกแบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ (ของเสียต่างๆ) ให้มีขนาดเล็กลงให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน กรดไขมัน จึงเรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้น ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) จากนั้นจุลินทรีย์จะเปลี่ยนสารอินทรีย์ละลายน้ำจากขั้นตอนนี้ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acid) ขั้นตอนนี้เรียกว่าขั้นการหมัก (Fermentation) หลังจากได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดอินทรีย์ระเหยแล้ว แบคทีเรียชนิดสร้างกรด (Acid forming bacteria) ทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยให้กลายเป็นกรดอะเซติก แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้นสร้างกรดอะเซติก (Acetogenesis) ขั้นตอนที่ท้ายแบคทีเรียชนิดสร้างแก๊สมีเทน (Methanogenesis bacteria) โดยย่อยสลายกรดอะเซติกกลายเป็นแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในที่สุด ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณการผลิตมีเทนในกระบวนการย่อยสลายได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และคุณสมบัติของสารอินทรีย์ตั้งต้นที่จะย่อยสลาย โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายควรจะคงที่อยู่ที่ระดับประมาณ 35 องศาเซลเซียส โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกินกว่า 5 องศาเซลเซียสอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรีย จนอาจทำให้ระบบการผลิตแก๊สล้มเหลวได้

### 2.1.2 การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพ ( Biogas utilization) [1,3]

แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน โดยที่แก๊สชีวภาพจะมีแก๊สมีเทน เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีข้อดีของการนำแก๊สชีวภาพมาใช้งานดังนี้

1. ต้นทุนการลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำมาก เนื่องจากมีการปล่อยแก๊สมีเทนลดลง
2. สารอาหารที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส สามารถกระจายจากแหล่งที่มีการสะสมอยู่มาก เช่น ในเขตปศุสัตว์ คอลง และแม่น้ำ ไปยังบริเวณอื่นๆ ได้
3. ปุ๋ยที่ได้จากการย่อยสลายชีวมวลจะมีคุณค่าดีกว่าปุ๋ยที่ได้จากวัตถุดิบโดยตรง (น้ำเสีย) และสามารถนำมาใช้ได้อย่างสะดวกในพื้นที่เกษตรกรรม
4. โรงงานผลิตแก๊สชีวภาพจากชีวมวลมีข้อได้เปรียบอย่างมากในการหมุนเวียนสารอาหารกลับมาใช้ใหม่ในพื้นที่การเกษตรเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการจัดขยะรูปแบบอื่นๆ ซึ่งนับเป็นแนวทางการจัดการด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน
5. แก๊สชีวภาพจัดเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สามารถทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล จึงเป็นการเพิ่มเสถียรภาพด้านการจัดหาพลังงาน
6. การนำแก๊สชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน หรือ การใช้รูปของความร้อนโดยตรง จะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง ใช้กับเครื่องกลูกสุกร ใช้ในครัวเรือน ฯลฯ อย่างไรก็ตามการนำแก๊สชีวภาพไปใช้นั้นควรคำนึงถึงวิธีการส่งลำเลียงแก๊สชีวภาพด้วย โดยปกติส่งลำเลียงแก๊สชีวภาพไปตามท่อโดยอาศัย Blower ช่วยเพิ่มแรงดันและระยะทางไม่ควรไกลจนเกินไป
7. การใช้แก๊สชีวภาพในการผลิตพลังงานกล/ ไฟฟ้า เป็นรูปแบบการนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในฟาร์มเลี้ยงสุกร เนื่องจากพลังงานกล/ ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อผลิตเป็นไฟฟ้าแล้ว สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก
  - ก. เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้แก๊สชีวภาพร่วมกับน้ำมันดีเซล สามารถทดแทนการใช้ น้ำมันดีเซลได้ประมาณ 60-70 % วิธีนี้จะง่ายต่อการดัดแปลงมากและเสียค่าดัดแปลงน้อยที่สุด เพียงแต่ต่อเชื่อมแก๊สชีวภาพเข้ากับระบบท่อไอเสียของเครื่องยนต์ และมีวาล์วสำหรับปรับแต่งปริมาณการป้อนแก๊สชีวภาพให้เหมาะสม แต่ต้องมีการใช้น้ำมันดีเซลอยู่ส่วนหนึ่ง

- ข. เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้สามารถใช้แก๊สชีวภาพได้ 100 % เป็นการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซล ให้มีการทำงานเหมือนเครื่องยนต์เบนซินซึ่งสามารถใช้แก๊สชีวภาพได้ทั้งหมด ราคาตัดแปลงค่อนข้างสูง แต่เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ค่อนข้างใหญ่ คือ กำลังผลิตไฟฟ้ามากกว่า 30 กิโลวัตต์ขึ้นไป
- ค. เครื่องยนต์เบนซินดัดแปลงให้สามารถใช้แก๊สชีวภาพได้ 100 % เป็นการดัดแปลงระบบผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้สามารถใช้งานกับแก๊สชีวภาพได้ทั้งหมด การดัดแปลงจะเสียค่าใช้จ่ายน้อย เหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ขนาด 10-25 กิโลวัตต์
- ง. เครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สโดยเฉพาะ (เครื่องนำเข้าจากต่างประเทศ) เป็นเครื่องยนต์ที่สร้างมาสำหรับการใช้แก๊สชีวภาพโดยเฉพาะ ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงแต่ราคาสูงมาก ส่วนใหญ่เป็นเครื่องยนต์ขนาดใหญ่ กำลังผลิตไฟฟ้ามากกว่า 200 กิโลวัตต์ขึ้นไป โดยต่อร่วมกับ ต่อร่วมกับ Synchronous generator

เครื่องยนต์ทั้ง 4 แบบนี้ สามารถต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction motor) ในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ส่งออกทางสายส่งไฟฟ้าหลักเพื่อใช้สำหรับกิจกรรมการเลี้ยงสัตว์ภายในฟาร์มหรือใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังแทนเครื่องต้นกำลังเดิมของฟาร์ม

8. การผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration system) เป็นการผลิตพลังงานกล ไฟฟ้าและความร้อนร่วมซึ่งเป็นระบบที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการใช้เชื้อเพลิงให้มีความสูงชันมากกว่าการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า/ ความร้อนเพียงอย่างเดียว โดยปกติมักจะเห็นภาพการใช้แก๊สชีวภาพกับเครื่องยนต์ผลิตพลังงานกล/ ไฟฟ้า ใช้ในการหุงต้ม หม้อต้มไอน้ำเพียงอย่างเดียวโดยหนึ่ง ซึ่งหากมองถึงปริมาณความร้อนทั้งหมดที่ได้จากแก๊สชีวภาพ การใช้แก๊สชีวภาพกับเครื่องยนต์ผลิตพลังงานกล/ ไฟฟ้ายังมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ

### 2.1.3 กระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ

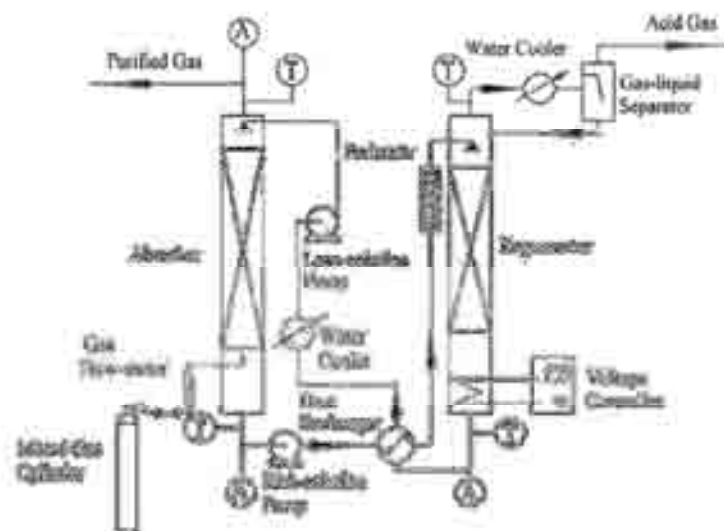
#### ก. กระบวนการดูดซึม (Absorption) [3]

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

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

#### Liquid-phase Chemical Absorption with Amines [4]

กระบวนการนี้ทำได้โดยผ่านแก๊สชีวภาพไปยังส่วนล่างของหอดูดซึม เพื่อให้สารละลายเอมีนที่ไหลผ่านเข้าไปยังส่วนบนของหอดูดซึมดูดซึมแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออก จะได้แก๊สชีวภาพที่บริสุทธิ์ออกไปยังส่วนบนของหอดูดซึม ส่วนสารผสมเอมีน-ไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกนำกลับไปยังส่วนบนของหอคืนสภาพ (Regenerator) ได้สารละลายเอมีนบริสุทธิ์ที่ส่วนล่างของหอคืนสภาพ ส่วนไฮโดรเจนซัลไฟด์จะออกทางส่วนบนของหอคืนสภาพ

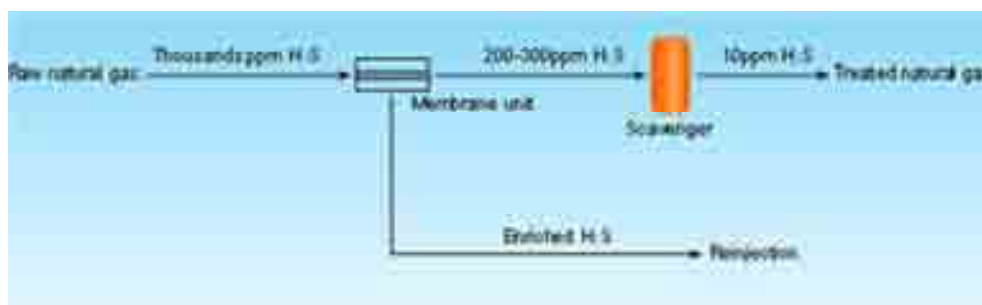


ภาพที่ 2.1 กระบวนการดูดซึมแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สผสม [4]

#### ข. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น (Membrane separation) [5]

วิธีนี้สามารถแยกแก๊สได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับการเลือกชนิดของแผ่นแยก สำหรับการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้น วิธีนี้สามารถแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้บางส่วน ซึ่งยังมีไฮโดรเจนซัลไฟด์ปะปนออกมา ตัวระบบเหมาะสมกับการกำจัดแก๊สเสียปริมาณน้อยๆ นอกจากนั้น กระบวนการนี้ยังพบข้อจำกัดคือ ระบบใช้พลังงานสูงเนื่องจากต้องใช้ความดันสูง ระบบติดตั้งมีราคาสูง ตัวเยื่อแผ่นมี

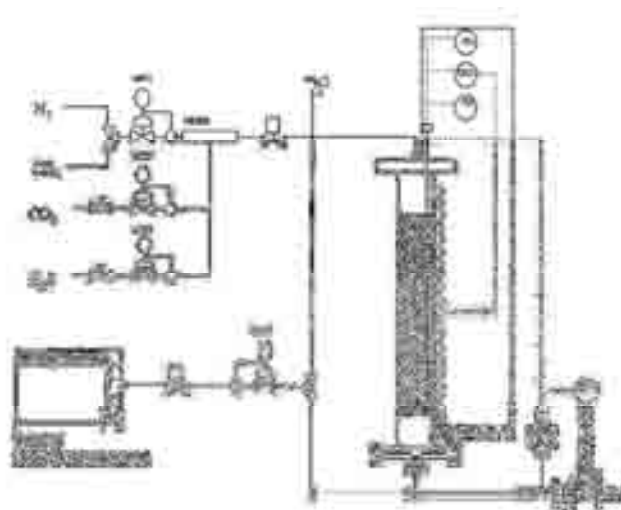
ราคาแพง กระบวนการเสี่ยงต่อการอุดตันบนเยื่อ และเกิดความเสียหายง่าย ซึ่งหากระบบเกิดความเสียหายจำเป็นต้องเปลี่ยนวัสดุเกือบทั้งระบบ



ภาพที่ 2.2 กระบวนการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่น [6]

#### ค. กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการนี้สามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างสมบูรณ์ด้วยคอลัมน์ดูดซับ (Adsorber) แบบเบดนิ่ง ซึ่งสามารถออกแบบระบบให้มีความเหมาะสมกับแก๊สที่ต้องการกำจัด โดยการพัฒนาตัวดูดซับให้มีความจำเพาะกับแก๊สดังกล่าว อีกทั้งยังเกิดของเสียในกระบวนการน้อย ทำโดยการบรรจุตัวดูดซับลงในคอลัมน์ดูดซับ จากนั้นผ่านแก๊สผสมไปยังตัวดูดซับ ได้แก๊สบริสุทธิ์ วิธีนี้สามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้



ภาพที่ 2.3 กระบวนการดูดซับแยกแก๊สกรดออกจากแก๊สผสม [7]

## 2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) [8]

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร การกักตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใดๆ เช่นแก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ (Colloid) ที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับผิวนี้อาจเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว แก๊ส และ ของแข็ง ซึ่งมีได้ทั้งแบบ แก๊ส-ของแข็ง และ ของเหลว-ของแข็ง

### 2.2.1 ประเภทของการดูดซับ [3,9]

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) เป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

#### 1. การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับแบบกายภาพ คือ การดูดหรือดึงสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงกายภาพชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิดร่วมกัน แรงกายภาพของการดูดซับประเภทนี้ได้แก่

- แรงดึงดูดระหว่างขั้วของสารถูกดูดซับกับขั้วบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับความชื้นด้วยสารดูดความชื้น ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วลบบนผิวสารดูดความชื้น หรือแรงดึงดูดระหว่างขั้วลบของโมเลกุลไอน้ำกับขั้วบวกบนผิวสารดูดความชื้น เป็นต้น
- แรงดึงดูดระหว่างประจุของสารถูกดูดซับชนิดไอออนกับประจุบนผิวตัวดูดซับ เช่น การดูดซับไอออนแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และไอออนแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ในน้ำกระด้างด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนบนผิวตัวดูดซับชนิดพอลิเมอร์ เป็นต้น
- แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ เช่น การดูดซับกลิ่นซึ่งมักเป็นไอระเหยของสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดต่างๆ ด้วยถ่านดูดซับ หรือการดูดซับไอสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยถ่านดูดซับ เป็นต้น

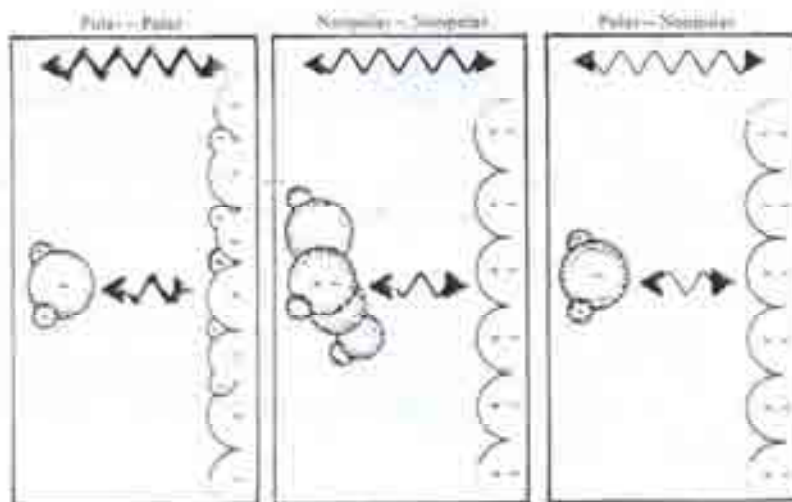


ลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิปกติ หรือ ที่อุณหภูมิบรรยากาศ และเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าบรรยากาศ เช่น การดูดซับกลิ่นต่างๆ ในตู้เย็นและในห้องโดยสารปรับอากาศ เป็นต้น สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งบนผิวของตัวดูดซับโดยตรง และเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับแล้ว โดยไม่จำกัดจำนวน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับที่ซ้อนทับกัน จึงเรียกรวมการดูดซับลักษณะนี้ว่า การดูดซับหลายชั้น (Multilayer adsorption)

ความร้อนของการดูดซับทางกายภาพมักมีค่าประมาณ 2-3 เท่าของความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารที่ถูกดูดซับชนิดนั้นๆ ณ อุณหภูมิเดียวกัน ความร้อนของการดูดซับแปรผันโดยตรงกับแรงของการดูดซับ นั่นคือ แรงของการดูดซับมีค่ามาก มีผลให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง เช่น แรงดึงดูดระหว่างขั้วมักมีค่าสูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ความร้อนของการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างขั้ว จึงมีค่าสูงกว่าความร้อนของการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

การดูดซับทางกายภาพหรือการดูดซับ Van der Waals เกิดขึ้นได้เนื่องจากผล 3 ประการ ดังนี้ คือ ผลของการจัดเรียงตัว (Orientation effect) , ผลของการแพร่กระจาย (Dispersion effect) หรือผลของการเหนี่ยวนำ (Induction effect) ดังภาพที่ 2.4 แรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับทางกายภาพเป็นแรงไฟฟ้าสถิตย์ ผลของไฟฟ้าสถิตย์ที่ทำให้เกิดแรงดึงดูดขึ้นอยู่กับความมีขั้วของทั้งโมเลกุลของแก๊สและโมเลกุลของของแข็ง สำหรับโมเลกุลที่มีขั้ว การดึงดูดกันและกันเกิดขึ้นได้เนื่องจากผลของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลที่มีขั้ว 2 โมเลกุลโดยบริเวณที่มีประจุเป็นลบของโมเลกุลหนึ่งจะพยายามวิ่งเข้าหาบริเวณที่มีประจุเป็นบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง

การดูดซับระหว่างโมเลกุลของแก๊สที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วเกิดขึ้นเนื่องจากผลของการเหนี่ยวนำ โมเลกุลที่มีขั้วสามารถเหนี่ยวนำหรือทำให้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วเกิดมีขั้วขึ้นเมื่อใกล้กัน อย่างไรก็ตามแรงเหนี่ยวนำนี้น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลของการจัดเรียงตัวและผลของการแพร่กระจาย ฉะนั้นระบบดูดซับที่มีประสิทธิภาพจะอยู่ในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง คือ ใช้ตัวดูดซับที่มีขั้วเพื่อกำจัดสารมลพิษที่มีขั้ว และ ใช้ตัวดูดซับที่ไม่มีขั้วเพื่อกำจัดสารมลพิษชนิดที่ไม่มีขั้ว



ภาพที่ 2.4 แรงแรงกายภาพที่ทำให้เกิดการดูดซับ [3]

## 2. การดูดซับทางเคมี

การดูดซับแบบเคมี คือ การเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ในลักษณะเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับประเภทนี้จึงต้องการพลังงานกระตุ้นเช่นเดียวกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั่วไป ดังนั้น การดูดซับมักเกิดขึ้นได้ดีหรือเกิดขึ้นได้เร็ว ณ อุณหภูมิสูง และการดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับเท่านั้น นั่นคือ การดูดซับแบบเคมีนี้จะไม่เกิดบนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่สะสมบนผิวของตัวดูดซับเช่นเดียวกับการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับแบบเคมีนี้จึงเกิดขึ้นได้เพียงชั้นเดียวเท่านั้นและมักเรียกการดูดซับประเภทนี้ว่า การดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) ความร้อนของการดูดซับประเภทนี้จึงมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพ หรือมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนแฝงของการควบแน่นไอสารถูกดูดซับชนิดนั้นๆ ไม่น้อยกว่า 3 เท่า หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible)

กระบวนการดูดซับทุกๆ แบบเป็นกระบวนการคายความร้อนเพราะว่าในการดูดซับโมเลกุลจะเคลื่อนย้ายจากแก๊สไปที่ผิวของของแข็ง การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของโมเลกุลของแก๊สทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สนั้นให้แก่ตัวดูดซับในรูปของความร้อน ข้อแตกต่างต่างๆ ไปนอกเหนือจากที่กล่าวแล้วข้างต้นระหว่างกระบวนการดูดซับทางกายภาพและกระบวนการดูดซับทางเคมี ซึ่งทำให้กระบวนการดูดซับทางกายภาพเป็นที่ต้องการมากกว่าในเรื่องของการควบคุมมลพิษทางอากาศ คือ

1. โมเลกุลซึ่งถูกดูดซับไว้โดยกระบวนการดูดซับทางเคมี ยากที่จะกำจัดออกจากตัวดูดซับ และในบางกรณีไม่อาจกำจัดออกได้เลย แต่โมเลกุลซึ่งถูกดูดซับไว้ทางกายภาพสามารถกำจัดออกได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิปฏิบัติการขึ้น หรือ โดยการลดความดันตัวดูดซับ
2. เพื่อให้เกิดการดูดซับทางเคมีขึ้น โมเลกุลของแก๊สต้องสามารถเกิดพันธะทางเคมีกับผิวของตัวดูดซับได้ แต่กระบวนการดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของระบบแก๊ส-ของแข็งส่วนใหญ่ ในเชิงอุตสาหกรรมแล้วจะเลือกของแข็งดูดซับซึ่งทำให้อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้น
3. กระบวนการดูดซับทางเคมีจะหยุด เมื่อตำแหน่งที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาบนผิวของตัวดูดซับทุกตำแหน่งได้เกิดปฏิกิริยาไปหมดแล้ว และทำให้เกิดชั้นของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียว แต่เนื่องจากแรง Van der waals ในการดูดซับทางกายภาพทำให้สามารถเกิดชั้นของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้นซ้อนกัน
4. อัตราการดูดซับทางเคมีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่สำหรับการดูดซับทางกายภาพอัตราการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่างดังตารางที่ 2.1

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
7. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

### 2.3 ตัวดูดซับ (Adsorbent) [9]

การดูดซับเป็นการสะสมสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับซึ่งมักเป็นของแข็ง ตัวดูดซับจึงต้องมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เพื่อให้สามารถดูดซับสารที่ถูกดูดซับได้ปริมาณมากๆ ดังนั้นตัวดูดซับจึงมีลักษณะพรุนหรือมีรูพรุนภายในเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะให้มากขึ้นโดยมีขนาดเท่าเดิม เมื่อตัวดูดซับมีรูพรุนภายในมาก แต่ตัวดูดซับมีขนาดเท่าเดิม ตัวดูดซับจึงมีความหนาแน่นลดลง สมบัติกายภาพของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอย่างแพร่หลาย สรุปไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติกายภาพทั่วไปของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ชนิดต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม [9]

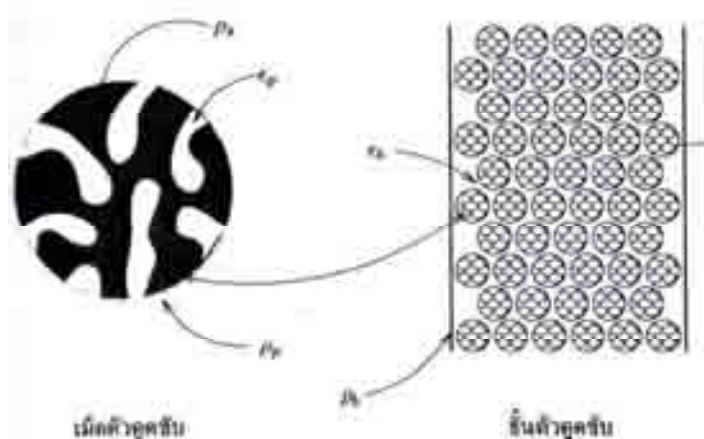
ตัวดูดซับ	ซิลิกาดูดความชื้น (Silica Gel)	ผลึกอะลูมินาดูดความชื้น (Activated Alumina)	ผลึกคัตโมเลกุล (Molecular Sieves)	ถ่านดูดซับ (Activated Carbons)
ขนาดเม็ด (มิลลิเมตร)	1-5	2-10	1-5	3-10
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)				
วัสดุตัวดูดซับ ( $\rho_s$ )	2,200	3,000	2,600	2,00-2,200
เม็ดตัวดูดซับ ( $\rho_p$ )	1,100	1,200	1,100-1,500	600-800
ชั้นเม็ดตัวดูดซับ ( $\rho_b$ )	400-800	700-850	600-900	300-500
ปริมาตรรูพรุนจำเพาะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)				
รูพรุนเล็ก ( $V_{p,s}$ )	0.30-0.45	0.40	0.25-0.30	0.20-0.40
รูพรุนใหญ่ ( $V_{p,l}$ )	< 0.25	0.10	0.30-0.40	0.20-0.50
พื้นที่ผิวจำเพาะ ( $S_p$ ), (ตารางเมตร/กรัม)	250-850	100-400	500-1,000	1,000-1,800

หน่วยดูดซับทั่วไปมีลักษณะเป็นทรงกระบอกแนวตั้ง และบรรจุตัวดูดซับที่มีรูพรุนอยู่ภายในตัวดูดซับเหล่านั้น ความหนาแน่นของหน่วยดูดซับจำแนกเป็นความหนาแน่นของวัสดุตัวดูดซับ (Solid density,  $\rho_s$ ) ความหนาแน่นของตัวดูดซับ (Adsorbent density,  $\rho_p$ ) และความหนาแน่นของชั้นตัวดูดซับ (Bulk density,  $\rho_b$ ) ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ความหนาแน่นทั้งสามประเภทของหน่วยดูดซับนิยามไว้ดังนี้

**ความหนาแน่นของวัสดุตัวดูดซับ ( $\rho_s$ )** เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของตัวดูดซับ และวัสดุเหล่านั้นมักไม่มีรูพรุน

**ความหนาแน่นของตัวดูดซับ ( $\rho_p$ )** คือ ความหนาแน่นของตัวดูดซับซึ่งประกอบด้วยวัสดุของแข็งที่มีรูพรุนอยู่ในวัสดุนั้น เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับให้สูงขึ้นจากพื้นผิวจำเพาะเดิม (วัสดุของแข็งที่ไม่มีรูพรุน)

**ความหนาแน่นของชั้นตัวดูดซับ ( $\rho_b$ )** คือ ความหนาแน่นของชั้นตัวดูดซับที่บรรจุอยู่ในหน่วยดูดซับ และเกิดช่องว่างระหว่างตัวดูดซับที่บรรจุไว้ในชั้นตัวดูดซับนั้น ตัวดูดซับดังกล่าวอาจเป็นชนิดที่มีปริมาตรรูพรุนจำเพาะมากๆ มีปริมาตรรูพรุนจำเพาะน้อยๆ หรือไม่มีรูพรุน



ภาพที่ 2.5 ความหนาแน่นประเภทต่างๆ ของระบบดูดซับ ช่องว่างภายในและระหว่างตัวดูดซับ [8]

ความหนาแน่นของตัวดูดซับแปรผกผันกับปริมาตรรูพรุนจำเพาะของตัวดูดซับ นั่นคือ เมื่อตัวดูดซับมีอัตราส่วนปริมาตรรูพรุนต่อปริมาตรตัวดูดซับ หรือความพรุนของตัวดูดซับเท่ากับ ( $\epsilon_p$ ) ความหนาแน่นของวัสดุตัวดูดซับ ความหนาแน่นของตัวดูดซับ และสัดส่วนรูพรุนของตัวดูดซับจึงสัมพันธ์ต่อกันดังนี้

$$\rho_p = (1 - \epsilon_p)\rho_s \quad (1)$$

เมื่อบรรจุตัวดูดซับในหน่วยดูดซับจะเกิดช่องว่างระหว่างของตัวดูดซับ ความหนาแน่นของชั้นตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับดังกล่าวจึงแปรเปลี่ยนตามขนาดของตัวดูดซับ หรือแปรผันตามอัตราส่วนปริมาตรช่องว่างระหว่างตัวดูดซับกับปริมาตรของชั้นตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับนั้น เรียกว่า ความพรุนของชั้นตัวดูดซับ ( $\epsilon_b$ ) สมการความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของตัวดูดซับและความหนาแน่นของชั้นตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับนั้นกับความพรุนของชั้นตัวดูดซับ คือ

$$\rho_b = (1 - \epsilon_b)\rho_p \quad (2)$$

ความพรุนรวมของชั้นตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับ ( $\epsilon_t$ ) คือ ผลรวมของความพรุนของชั้นตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับ ( $\epsilon_b$ ) กับความพรุนของตัวดูดซับ ( $\epsilon_p$ ) ที่บรรจุอยู่ในหน่วยดูดซับดังกล่าว ความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนทั้งสอง คือ

$$\epsilon_t = \epsilon_b + (1 - \epsilon_b)\epsilon_p \quad (3)$$

เมื่อพิจารณารูพรุนทั้งหมดของตัวดูดซับให้มีลักษณะคล้ายท่อทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย  $d_{po}$  และรูพรุนทั้งหมดของตัวดูดซับดังกล่าวมีความลึกรวมเท่ากับ  $l_{po}$  ในขณะที่เม็ดตัวดูดซับนั้นมีปริมาตรรูพรุนจำเพาะ  $V_p$  ดังนั้น ปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับดังกล่าวที่มีมวล  $M_p$  คือ

$$V_p M_p = \frac{\pi d_{po}^2 l_{po}}{4} \quad (4)$$

ในขณะเดียวกันปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับดังกล่าวที่มีมวล  $M_p$  คำนวณได้จากความพรุนของตัวดูดซับนั้น ( $\epsilon_p$ ) และความหนาแน่นของตัวดูดซับ ( $\rho_p$ ) เดียวกันดังนี้

$$V_p M_p = \frac{\epsilon_p M_p}{\rho_p} \quad (5)$$

ดังนั้น ปริมาตรรูพรุนจำเพาะของตัวดูดซับจึงสัมพันธ์กับขนาดรูพรุนเฉลี่ย ( $d_{po}$ ) ดังนี้

$$V_p = \frac{\epsilon_p}{\rho_p} = \frac{\pi d_{po}^2 l_{po}}{4 M_p} \quad (6)$$

ตัวดูดซับที่มีมวล  $M_p$  ดังกล่าวจึงมีพื้นผิวของรูพรุนในตัวดูดซับเป็น  $\pi d_{po} l_{po}$  และพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับ  $S_p$  สัมพันธ์กับความพรุนของตัวดูดซับ ( $\epsilon_p$ ) ความหนาแน่นของตัวดูดซับ ( $\rho_p$ ) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย ( $d_{po}$ ) ดังนี้

$$S_p = \frac{\pi d_{po} l_{po}}{M_p} = \frac{4 \epsilon_p}{\rho_p d_{po}} \quad (7)$$

### 2.3.1 ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ [9]

การแยกสารประกอบชนิดหนึ่งออกจากของผสมเอกพันธ์ด้วยการดูดซับ ตัวดูดซับในหน่วยดูดซับต้องมีสมบัติดูดซับสารประกอบชนิดนั้นเป็นสำคัญ สมบัติดูดซับที่สำคัญของระบบดูดซับ ได้แก่ ปริมาณสมดุลดูดซับสารประกอบนั้นจำเพาะ อัตราการดูดซับสารประกอบ และการเลือกดูดซับสารประกอบ ส่วนสมบัติกายภาพของตัวดูดซับ ได้แก่ พื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ ความพรุนของตัวดูดซับ ความหนาแน่นของตัวดูดซับ และความหนาแน่นของชั้นตัวดูดซับที่บรรจุในหน่วยดูดซับนั้นเป็นปัจจัยเสริมของระบบดูดซับ การคัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิต จึงต้องพิจารณาเปรียบเทียบสมบัติสำคัญต่างๆ ของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์แต่ละชนิด โดยจำแนกออกเป็น สมบัติทางกายภาพ สมบัติดูดซับ สมบัติเชิงกล สมบัติทางเคมี และสมบัติทางเศรษฐศาสตร์ดังนี้

1. ตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดใหญ่เพียงพอ เพื่อให้สารประกอบที่ต้องการดูดซับไว้ สามารถแพร่ไปยังพื้นผิวภายในรูพรุนของเม็ดตัวดูดซับนั้นได้โดยสะดวก หรือเพื่อให้ของเหลวผสมที่มีสารประกอบที่ต้องการดูดซับไว้ สามารถแทรกเข้าสู่รูพรุนได้อย่างสะดวก
2. ตัวดูดซับต้องสามารถเลือกสารประกอบที่ต้องการแยกออกจากของผสมนั้นได้มากกว่า หรือได้เร็วกว่าการดูดซับสารประกอบอื่นๆ ในของผสมนั้น
3. ตัวดูดซับต้องสามารถทนทานต่อการสึกกร่อนทางเคมีและทางกล ณ คุณสมบัติของการดูดซับและคุณสมบัติของการปรับสภาพตัวดูดซับ
4. ตัวดูดซับต้องไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบใดๆ ในของผสม ณ คุณสมบัติของการดูดซับและคุณสมบัติของการปรับสภาพตัวดูดซับ
5. ตัวดูดซับควรมีความหนาแน่นน้อยและมีความพรุนมาก แต่มีลักษณะแข็ง ไม่แตกเป็นผงง่าย
6. ตัวดูดซับควรรหาได้ง่ายและมีราคาไม่แพง

ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม จำแนกตามธาตุองค์ประกอบหลักของตัวดูดซับออกเป็น 2 กลุ่ม

1. ตัวดูดซับอนินทรีย์ คือ ตัวดูดซับที่มีธาตุกลุ่มโลหะชนิดต่างๆ เป็นองค์ประกอบหลัก ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่จำแนกย่อยตามลักษณะการเกิดของตัวดูดซับออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่
  - ก. ตัวดูดซับอนินทรีย์ธรรมชาติ คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น ดินเหนียวดูดซับ (Activated clay) เป็นของแข็งผสมที่ประกอบด้วยสารประกอบออกไซด์ของซิลิคอน ( $\text{SiO}_2$ ) สารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และ

สารประกอบออกไซด์ของเหล็ก ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เป็นองค์ประกอบสำคัญ และอาจมีสารประกอบออกไซด์ของโลหะอื่นๆ เช่น สารประกอบออกไซด์ของโลหะโซเดียม สารประกอบออกไซด์ของแคลเซียม สารประกอบออกไซด์ของโพแทสเซียม และสารประกอบออกไซด์ของแมกนีเซียม เป็นต้น หรือสารประกอบออกไซด์ของธาตุโลหะ เช่น สารประกอบออกไซด์ของฟอสฟอรัส เป็นต้น

ข. ตัวดูดซับอนินทรีย์สังเคราะห์ คือ ตัวดูดซับอนินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นเลียนแบบสารประกอบที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ได้แก่ ซิลิกาดูดความชื้น (Silica gel) ผลึกอะลูมินาดูดความชื้น (Activated alumina) และ Molecular sieves ซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ของซิลิคอน ผลึกสารประกอบออกไซด์ของอะลูมิเนียม และสารประกอบออกไซด์ร่วมของซิลิคอนและอะลูมิเนียม ตามลำดับ

2. ถ่านดูดซับ คือ ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากวัสดุสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ถ่านดูดซับนี้จำแนกย่อยตามขนาดปากรูพรุนของเม็ดถ่านดูดซับออกเป็น Activated carbon, Molecular sieve carbon หรือ Carbon molecular sieves โดย Activated carbon มีรูพรุนขนาดต่างๆ มากมาย แต่รูพรุนมักมีขนาดใหญ่กว่า 1 นาโนเมตร Molecular sieve carbon จะมีขนาดปากรูพรุนของเม็ดตัวดูดซับเล็กกว่า 1 นาโนเมตร ถ่านดูดซับจึงมีคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุองค์ประกอบสำคัญของสารประกอบอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลัก ถ่านดูดซับเชิงพาณิชย์ต่างๆ จึงผลิตจากวัสดุสารประกอบอินทรีย์หรือสารชีวมวลชนิดต่างๆ เช่น ถ่านหิน เศษไม้ และกะลามะพร้าว เป็นต้น

### 2.3.2 ตัวรองรับหรือตัวพา [10]

ความคิดเริ่มต้นของตัวรองรับ คือ เป็นสารเฉื่อยที่ใช้สำหรับการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง เช่น โลหะแพลทินัม สำหรับการใช้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด คือ ปรับปรุงสมบัติด้านเชิงกลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อ่อนแอ แต่อย่างไรก็ตามตัวรองรับอาจแสดงความไวต่อการเร่งปฏิกิริยาอีกด้วยขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และภาวะของปฏิกิริยา และอาจทำให้ปฏิกิริยาบางส่วนกับสารประกอบอื่นๆ ของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการผลิต เช่นเดียวกับตัวรองรับสามารถทำให้โครงสร้างที่ไวต่อการเร่งปฏิกิริยามีความเฉื่อย

การเลือกตัวรองรับพิจารณาจากกรณีลักษณะที่ต้องการของตัวรองรับ รวมถึงผลทางด้านเคมี และสมบัติกายภาพก็มีความสำคัญ ซึ่งประกอบไปด้วย

- เฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
- มีสมบัติเชิงกลที่ต้องการ ทนต่อแรงกด มีความแข็ง ทนต่อการขัดสี



- เสถียรภายใต้ภาวะของปฏิกิริยา และภาวะที่ใช้ในการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
- พื้นที่ผิวสูงและมีความพรุน แต่ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานด้วย การมีความพรุน รวมถึงขนาดของรูพรุนและการกระจายของรูพรุนเหมาะสม การมีพื้นที่ผิวสูงหมายถึงมีรูพรุนที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้ารูพรุนเล็กเกินไปจะทำให้เกิดการอุดตันได้
- ราคาถูก ซึ่งช่วยให้ต้นทุนในการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าต่ำ นำไปสู่การประยุกต์เป็นกระบวนการที่ไม่แพง

### 2.3.3 สมดุลการดูดซับ [9]

สมดุลการดูดซับเป็นภาวะที่จำนวนโมเลกุลที่มาจากผิวหน้าของตัวดูดซับเท่ากับจำนวนโมเลกุลที่ออกจากผิวหน้าของตัวดูดซับ ที่ภาวะนี้กล่าวได้ว่าตัวดูดซับ “อิ่มตัวด้วยไอ” และไม่สามารถกำจัดไอออกจากกระแสแก๊สได้อีก สภาพสมดุลจะเป็นตัวกำหนดปริมาณไอสูงสุด ซึ่งจะถูกดูดซับไว้ได้ ณ ภาวะปฏิบัติการที่กำหนดให้ ถึงแม้ว่าจะมีตัวแปรหลายตัวที่มีผลต่อการดูดซับ แต่มีตัวแปรที่สำคัญที่สุดอยู่ 2 ตัวแปรในการกำหนดสภาพสมดุลสำหรับระบบที่กำหนดให้ นั่นคือ อุณหภูมิและความดัน สมดุลดูดซับแปรตามชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของสารถูกดูดซับ ความเข้มข้นหรือความดันของสารถูกดูดซับ และอุณหภูมิของระบบดูดซับ สมดุลดูดซับจำเพาะของสารถูกดูดซับชนิดใดๆ ด้วยตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่กำหนดไว้ จึงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $q_i$ ) ของตัวดูดซับที่เลือกไว้ ความเข้มข้นสมดุล ( $C_i$ ) ของสารถูกดูดซับชนิดนั้น หรือความดันสมดุล ( $P_i$ ) ของสารถูกดูดซับชนิดนั้น และอุณหภูมิสมดุล ( $T$ ) ของระบบดูดซับนั้น แบบจำลองสมดุลการดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ตามชนิดตัวแปรที่ควบคุมให้คงที่ดังนี้

1. แบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm) เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $q_i$ ) ของตัวดูดซับที่กำหนด กับความดันสมดุล ( $P_i$ ) ของแก๊สหรือไอของสารถูกดูดซับนั้น หรือความเข้มข้นสมดุล ( $C_i$ ) ของสารถูกดูดซับในของเหลวผสม ณ อุณหภูมิของระบบดูดซับ ( $T$ ) ที่กำหนดไว้
2. แบบจำลองสมดุลดูดซับความดันคงที่ (Adsorption isobar) หรือประเภทความเข้มข้นคงที่ เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $q_i$ ) ของตัวดูดซับที่กำหนดไว้ กับอุณหภูมิสมดุล ( $T$ ) ของระบบดูดซับ ณ ความดันสมดุล ( $P_i$ ) ของสารถูกดูดซับที่กำหนด หรือความเข้มข้นสมดุล ( $C_i$ ) ของสารถูกดูดซับในของเหลวผสมที่กำหนดไว้

3. แบบจำลองสมดุลดูดซับปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะคงที่ (Adsorption isostere) คงที่ เป็นแบบจำลองคณิตศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสมดุล ( $P_i$ ) ของสารดูดซับ หรือความเข้มข้นสมดุล ( $C_i$ ) ของสารดูดซับในของเหลวผสม กับ อุณหภูมิสมดุล ( $T$ ) ของระบบดูดซับ ณ ปริมาณสมดุลดูดซับสารดูดซับจำเพาะ ( $q_i$ ) ของตัวดูดซับที่กำหนดไว้

แม้ว่าการดูดซับเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน ความร้อนของการดูดซับทั่วไปมักมีค่าน้อยกว่าความร้อนของปฏิกิริยาเคมีมาก และสามารถระบายออกจากระบบดูดซับได้โดยง่าย อุณหภูมิของระบบดูดซับจึงเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย จึงนิยมวัดสมดุลดูดซับ ณ อุณหภูมิคงที่ที่กำหนดไว้ นั่นคือ สมดุลดูดซับสารดูดซับชนิดใดชนิดหนึ่งของตัวดูดซับที่เลือกไว้ ควรวัด ณ อุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิดำเนินการปกติของหน่วยดูดซับนั้นๆ นอกจากนี้สมดุลดูดซับของระบบดูดซับแก๊สหรือไอน้ำก็มีลักษณะแตกต่างจากสมดุลดูดซับของระบบดูดซับของเหลว แบบจำลองสมดุลดูดซับจำแนกตามระบบดูดซับดังต่อไปนี้

#### แบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิคงที่ (Adsorption isotherm) [10,11]

แบบจำลองสมดุลดูดซับอุณหภูมิคงที่ หรือ ไอโซเทอร์มของการดูดซับคือความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยของตัวดูดซับ โดยมักใช้ค่าความดันสัมพัทธ์  $P/P_0$  กับปริมาณที่ดูดซับที่สมดุลเมื่ออุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอร์มของการดูดซับมีค่าเริ่มจากศูนย์เมื่อ  $P/P_0 = 0$  จนถึง อนันต์ เมื่อ  $P/P_0 = 1$  ซึ่งเป็นจุดที่ผิวหน้าเกิดการควบแน่นของไอของโมเลกุลที่มาดูดซับ

รูปร่างของไอโซเทอร์มขึ้นอยู่กับธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ วัสดุที่มีความพรุนซึ่งมีขนาดรูพรุน 5-50 นาโนเมตร ให้กราฟการดูดซับและการคายของอาร์กอน และไนโตรเจนที่ -195 องศาเซลเซียส และของนอร์มัลเพนเทน ที่ 0 องศาเซลเซียส มีลักษณะของ ฮิสเทอรีซิสลูป (Hysteresis loop) คือเส้นกราฟสองเส้นไม่ทับกันในบางช่วง เนื่องจากการควบแน่นในรูขนาดเล็ก (Capillary condensation) ดังแสดงในภาพที่ 2.6 เส้นล่างคือการคายของโมเลกุลและเส้นบนคือการดูดซับ กระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ก็ต่อเมื่อปลายทั้งสองข้างของเส้นกราฟทั้งสองทับกัน ส่วนที่มีความชันมากของเส้นกราฟของการคายโมเลกุล ขึ้นกับชนิดของโมเลกุลตัวถูกดูดซับ และไม่ขึ้นอยู่กับการธรรมชาติของตัวดูดซับ สำหรับไนโตรเจนที่จุดเดือดของมัน จุดที่มีความชันมากที่สุดคือที่ตำแหน่งที่มีค่า  $P/P_0 = 0.4$  สำหรับซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดเล็ก เส้นกราฟจะถึงตำแหน่งที่การดูดซับมีค่าคงที่เมื่อ  $P/P_0$  มีค่าน้อยกว่า 1.0 เนื่องจากรูพรุนนั้นถูกบรรจุเต็มไปด้วยไอของสารที่ควบแน่น เมื่อเพิ่มค่า  $P/P_0$  ปริมาณที่ดูดซับเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่

อยู่ในรูพรุน การเกิดการควบแน่นในรูพรุนขนาดเล็กแบบกะปิลารีนี้เกิดขึ้นได้ในรูพรุนขนาดเล็กเมื่อมีค่า  $P/P_0$  น้อยกว่า 1

ไอโซเทอร์มของการดูดซับทางกายภาพมีความหลากหลาย ขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ในปี ค.ศ. 1945 Brunauer ได้จำแนกชนิดของไอโซเทอร์มเป็น 5 ชนิด คือชนิดที่ 1-5 ดังแสดงในภาพที่ 2.7 ซึ่งชื่อที่เรียกเป็นไปตาม IUPAC ส่วนไอโซเทอร์มแบบที่ 6 เป็นแบบที่ค้นพบใหม่

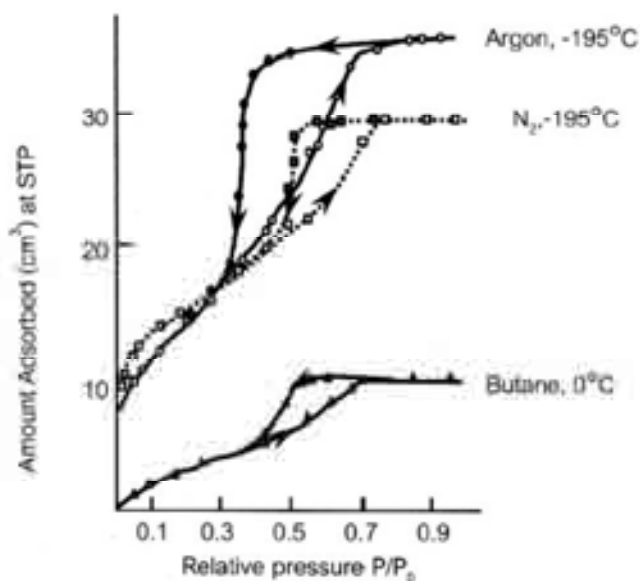
ชนิดที่ 1 (Type I) เรียกว่าไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) สำหรับการดูดซับที่ถือว่าเป็นชั้นเดียว ตามสมการของแลงเมียร์ (Langmuir equation) ไอโซเทอร์มแบบนี้พบในวัสดุที่มีความพรุนแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่ กรณีเช่นนี้ปริมาตรของรูพรุนมีค่ามากกว่าปริมาตรที่ทำให้เกิดการดูดซับชั้นเดียวมาก

ชนิดที่ 2 (Type II) บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือไอโซเทอร์มรูปตัวเอส (S-Shaped isotherm) เกิดกับวัสดุที่ไม่มีควมพรุน หรือมีพรุนขนาดใหญ่ (Macroporous) ตำแหน่ง B เป็นตำแหน่งที่เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว หลังจากนั้นจึงเริ่มการดูดซับแบบหลายชั้น ดังนั้นปริมาตรการดูดซับที่จุด B สามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ เกิดการดูดซับแบบย้อนกลับได้

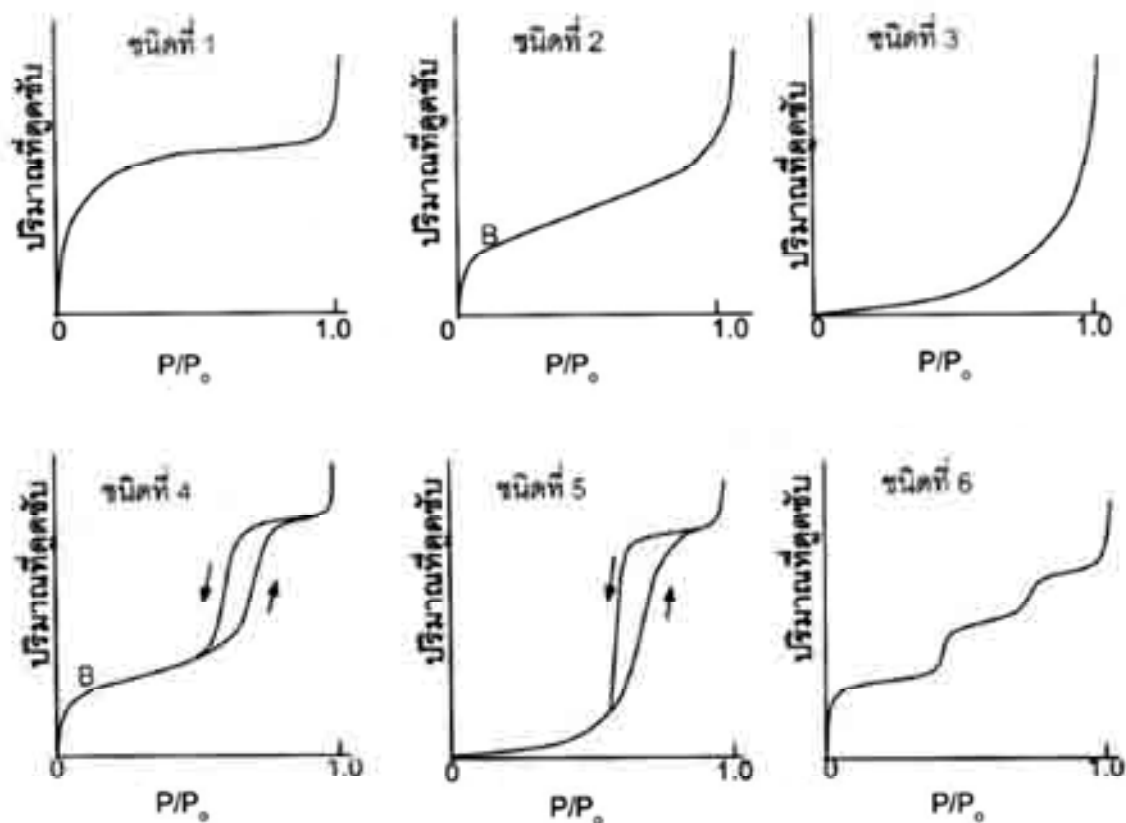
ชนิดที่ 3 (Type III) มีรูปร่างเหมือนกระจกเงา ไอโซเทอร์มแบบนี้ไม่ค่อยพบบ่อย เกิดการดูดซับที่อ่อน เกิดเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับที่มีค่าต่ำ เช่น การดูดซับของสารที่มีขั้วบนวัสดุที่ไม่มีขั้ว หลังจากผิวหน้าถูกคลุมหมดแล้ว การดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว แสดงถึงแรงดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกันเองมีสูง ตัวอย่างการดูดซับแบบนี้ได้แก่ การดูดซับของไอน้ำบนแกรไฟต์

ชนิดที่ 4 (Type IV) พบบนวัสดุที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesopore) คือมีขนาดรูพรุนระหว่าง 2 ถึง 50 นาโนเมตร การดูดซับในช่วงแรกซึ่งมีค่า  $P/P_0$  ต่ำ เหมือนกับไอโซเทอร์มชนิดที่ 2 หลังจากนั้นค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อค่า  $P/P_0$  มาก ซึ่งเกิดการควบแน่นในรูพรุนขนาดเล็กแบบกะปิลารี ทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส จากเส้นกราฟของการดูดซับและการคายไม่ทับกัน เพราะการคายเกิดได้ยากกว่าเนื่องจากต้องเอาชนะแรงกะปิลารี ขนาดของการเกิดการควบแน่นบนรูพรุนขนาดเล็กสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายของขนาดรูพรุน (Pore size distribution) ได้

ชนิดที่ 5 (Type V) เหมือนกับชนิดที่ 4 ต่างกันเพียงการควบแน่นในรูพรุน กรณีนี้เกิดขึ้นเมื่อค่า  $P/P_0$  สูง เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่าต่ำ ส่วนฮิสเทอรีซิสจากการดูดซับและการคาย เกิดจากการเอาชนะแรงกะปิลารีในการดึงตัวถูกดูดซับออกมา ไอโซเทอร์มชนิดนี้พบบ่อยนัก



ภาพที่ 2.6 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแก๊สอาร์กอนและไนโตรเจน ที่  $-195$  องศาเซลเซียส และ นอร์มัลเพนเทน ที่  $0$  องศาเซลเซียส บนซิลิกา จากเส้นกราฟสัญลักษณ์โปร่งคือ การดูดซับ และเส้นกราฟที่ปิดคือการคายของโมเลกุลจากผิวหน้า [10]

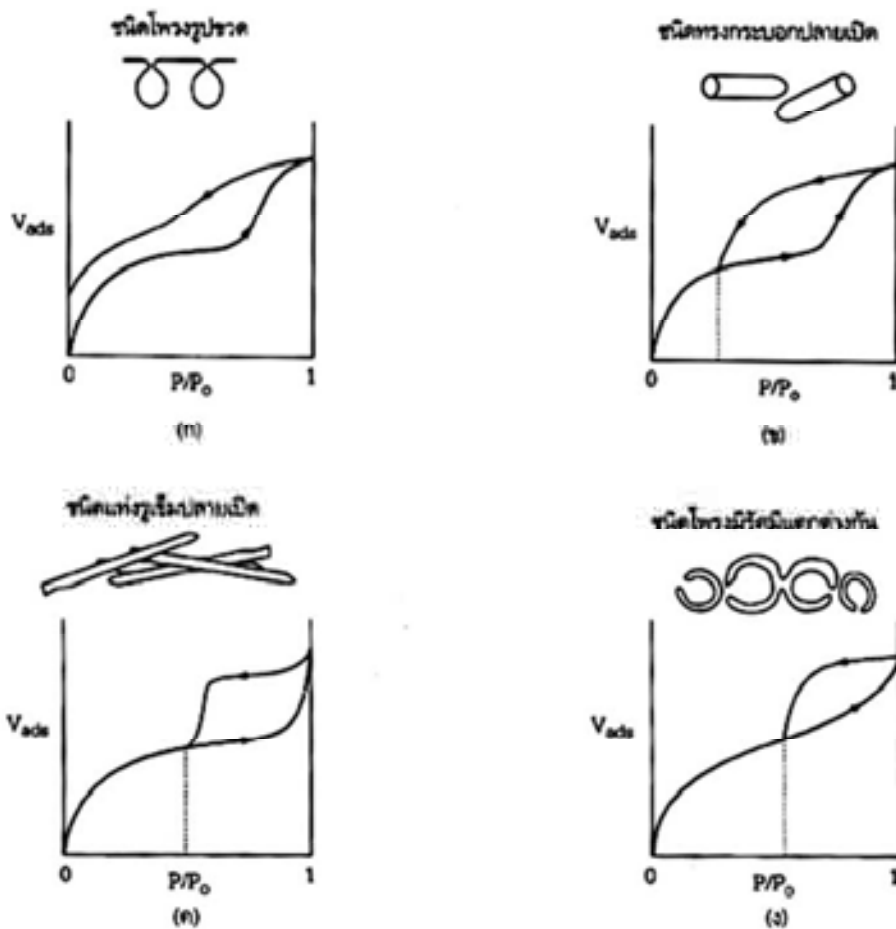


ภาพที่ 2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับ 6 ชนิด ตามการจำแนกของ IUPAC [10]

ชนิดที่ 6 (Type VI) เรียกว่าเป็นไอโซเทอร์มแบบขั้นบันได (Stepped isotherm) ซึ่งพบได้ไม่บ่อยนัก เกิดจากการดูดซับที่ละชั้นบนผิวหน้าที่มีหลายชั้นและความเป็นระเบียบสูง ความชันของกราฟจะขึ้นกับอุณหภูมิ

ผลของอิทธิพลของการดูดซับชนิดที่ 4 เกิดขึ้นโดยตัวดูดซับชนิดโพรงที่มีรูปร่างต่างๆ ดังภาพที่ 2.8 ผลกระทบเกิดเนื่องจาก (ก) ชนิดโพรงรูปขวด (Bottled hold) (ข) ชนิดทรงกระบอกปลายเปิด (ค) ชนิดแท่งรูปเข็มปลายเปิด และ (ง) ชนิดโพรงรัศมีแตกต่างกัน

- อิทธิพล (ก) เป็นผลกระทบที่ทำให้กราฟแสดงปริมาตรแก๊สที่ถูกดูดซับของ ความดันแก๊สลดลงไม่ทับกับกราฟหาเพิ่มความดันของการดูดซับชนิดที่ 4 ทำให้ปริมาตร การดูดซับแก๊สมีค่าสูงขึ้นไม่ทับเส้นกราฟหาเพิ่มความดัน ดังนั้นกราฟหา ลดและหาเพิ่มความดันจึงไม่บรรจบกัน (No loop)
- อิทธิพล (ข) และ (ค) เป็นกราฟของตัวดูดซับที่เป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ ณ ความดันต่ำๆ ส่วน ณ ความดันสูงๆ หาเพิ่มความดันและหาลดความดันให้กราฟค่า การดูดซับที่ทับกัน ดังนั้นกราฟจึงบรรจบกัน (Loop) ณ ความดันค่อนข้างต่ำ (จุดตัด กับเส้นประ) กราฟ (ข) และ (ค) เกิดจากการกลั่นตัวและการระเหยตัวของแก๊สในรู พอร์ที่มีลักษณะเป็นแท่งยาวซึ่งมีความกว้างของปลายเปิดต่างกัน
- อิทธิพล (ง) เป็นกราฟของการดูดซับแบบแลงเมียร์ ณ ความดันต่ำ ส่วน ณ ความดันสูง หาเพิ่มความดันและหาลดความดันให้กราฟค่าการดูดซับที่ไม่ทับกัน แต่ ลักษณะการดูดซับแก๊สเกิดจากการกลั่นตัวของแก๊สเหลวในรูพอร์ที่ไม่ซับซ้อน เหมือนกับชนิด (ข) และ (ค)



ภาพที่ 2.8 การเกิดผลกระทบฮิสเทอรีซิสของการดูดซับชนิดที่ 4 โดยตัวดูดซับที่มีรูปร่างต่างๆ [11]

ก. แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์

แลงเมียร์ (Langmuir) ได้เสนอแนวความคิดการเกิดสมดุลดูดซับแก๊สหรือไอ ในลักษณะเลียนแบบการเกิดสมดุลปฏิกิริยาเคมีที่มีสารตั้งต้นสองชนิด ดังนั้น อัตราการดูดซับจึงขึ้นอยู่กับความดันของสารที่ถูกดูดซับกับสัดส่วนพื้นผิวว่างของตัวดูดซับ ส่วนอัตราการคายสารที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับปริมาณดูดซับสารที่ถูกดูดซับจำเพาะหรือสัดส่วนพื้นที่ผิวตัวดูดซับที่ดูดซับสารที่ถูกดูดซับไว้แล้ว ระบบสมดุลดูดซับจึงเกิดขึ้น เมื่ออัตราการดูดซับสารที่ถูกดูดซับเท่ากับอัตราการคายสารที่ถูกดูดซับ ณ อุณหภูมิที่กำหนด นั่นคือ เมื่อให้ S แทนพื้นผิวว่างของตัวดูดซับ ให้ G แทนโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับ และให้ GS แทนพื้นผิวของตัวดูดซับที่ได้ดูดซับสารที่ถูกดูดซับไว้แล้ว ปรัชญาการดูดซับตามแบบจำลองของการดูดซับของแลงเมียร์จึงมีลักษณะเลียนแบบปรากฏการณ์ของปฏิกิริยาเคมีแบบผันกลับได้ระหว่างพื้นผิวว่างของตัวดูดซับกับโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับแบบผันกลับได้ดังนี้



ดังนั้น เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นเต็มพื้นผิวของตัวดูดซับในระบบแล้ว หรือไม่มีพื้นผิวว่างของตัวดูดซับเหลือ ตัวดูดซับดังกล่าวไม่สามารถดูดซับสารถูกดูดซับนั้นได้อีก ณ อุณหภูมิที่กำหนดไว้ ลักษณะการดูดซับดังกล่าว จึงเรียกว่า “การดูดซับอิ่มตัว” พื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับจึงสัมพันธ์กับปริมาณดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุด ( $q_{mx}$ ) ของตัวดูดซับนั้น แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ จึงประกอบด้วยพารามิเตอร์กำหนดลักษณะของระบบสมดุลดูดซับจำนวน 2 พารามิเตอร์ คือ ค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงเมียร์ ( $K_L$ ) และปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุด ( $q_{mx}$ ) ดังนี้

$$q = \frac{q_{mx}K_L P}{1 + K_L P} \quad (8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $q$ ) กับความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ ( $P$ ) ของแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ มีลักษณะโค้งว่า นั่นคือ ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะเพิ่มขึ้นน้อยกว่าการเพิ่มความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ และปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะจะเข้าสู่ปริมาณสมดุลดูดซับจำเพาะสูงสุด ( $q_{mx}$ ) เมื่อความดันของสารถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้นมากๆ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $q$ ) กับความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ ( $P$ ) ตามสมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ สามารถแปลงให้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $1/q$ ) กับส่วนกลับของความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ ( $1/P$ ) ดังสมการ

$$\frac{1}{q} = \left( \frac{1}{q_{mx}K_L} \right) \frac{1}{P} + \frac{1}{q_{mx}} \quad (9)$$

สมการ 9 เป็นสมการเส้นตรง ปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะสูงสุด ( $q_{mx}$ ) คือ ส่วนกลับของค่าจุดตัดแกนตั้งของสมการ 9 และค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงเมียร์ ( $K_L$ ) คำนวณได้จากความชันของเส้นตรง ดังกล่าว

เมื่อความดันของสารถูกดูดซับในระบบดูดซับดังกล่าวลดต่ำลงมากๆ ปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะลดน้อยลงสมนัยกับความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ ระบบดูดซับดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับระบบดูดซับสารเจือจาง แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ของระบบดูดซับนั้นจึงเปลี่ยนเป็นแบบจำลองสมดุลดูดซับของเฮนรีดังนี้

$$\lim_{P \rightarrow 0} q = \lim_{P \rightarrow 0} \left( \frac{q_{mx}K_L P}{1 + K_L P} \right) = q_{mx}K_L P = K_H P \quad 10$$

ดังนั้น ค่าคงที่สมดุลดูดซับของเฮนรี ( $K_H$ ) เท่ากับผลคูณของปริมาณสมดุลดูดซับสารดูดซับจำเพาะสูงสุดกับค่าคงที่สมดุลดูดซับของแลงเมียร์ ( $q_{mx}K_L$ )

แบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์เป็นแบบจำลองของการดูดซับสารดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยตรงเท่านั้น หรือเป็นแบบจำลองของระบบดูดซับชั้นเดียว (Monolayer adsorption) พื้นผิวดูดซับสารดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับดังกล่าวจึงคำนวณได้จากปริมาณสมดุลดูดซับสารดูดซับจำเพาะสูงสุด ( $q_{mx}$ ) และขนาดของโมเลกุลสารดูดซับที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับนั้น ณ อุณหภูมิของระบบดูดซับ ตามสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$S_{ad} = \frac{6.022 \times 10^{23} q_{mx} S_x}{\omega} \quad 11$$

เมื่อ  $S_x$  คือ พื้นที่เงาของโมเลกุลสารดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ พื้นที่เงาของโมเลกุลสารดูดซับดังกล่าวแปรเปลี่ยนตามชนิดและรูปร่างของโมเลกุลสารดูดซับ (ที่มีมวลโมเลกุล  $\omega$ ) และอุณหภูมิของระบบดูดซับนั้น ดังนั้น พื้นผิวดูดซับสารดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับชนิดหนึ่งจึงเปลี่ยนแปลงตามชนิดของสารดูดซับ ณ อุณหภูมิเดียวกัน และพื้นผิวดูดซับสารดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับนั้นแปรผันกับอุณหภูมิของระบบดูดซับ

#### ข. แบบจำลองสมดุลดูดซับของปียีที

เป็นแบบจำลองสมดุลดูดซับหลายชั้น โดยกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมจากแบบจำลองสมดุลดูดซับของแลงเมียร์ ให้การดูดซับสารดูดซับชนิดใดชนิดหนึ่ง สามารถเกิดบนพื้นผิวของตัวดูดซับโดยตรง หรือเกิดบนชั้นของสารดูดซับที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับแล้ว หรือบนพื้นผิวของวัฏภาคดูดซับนั่นเอง ลักษณะการดูดซับหลายชั้นนี้ อาจเทียบได้กับการต่อโมเลกุลของสารดูดซับในลักษณะเดียวกับการต่อโมเลกุลมอนอเมอร์เป็นสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ ดังนั้น เมื่อกำหนดให้  $S$  แทนพื้นผิวของตัวดูดซับหรือบนวัฏภาคดูดซับ ให้  $G$  แทนโมเลกุลของสารดูดซับ และ  $G_n S$  แทนการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับหรือบนวัฏภาคดูดซับ การดูดซับจึงสามารถแสดงด้วยสมการเคมีชนิดผันกลับได้ดังนี้





ดังนั้น ปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะของตัวดูดซับชนิดหนึ่งจึงเพิ่มขึ้นอย่างไร  
 ชาติจำกัด เมื่อความดันของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ลักษณะการดูดซับสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของ  
 วัสดุถูกดูดซับดังกล่าวนี้มีลักษณะคล้ายการควบแน่นไอบนพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจุด  
 น้ำค้าง ณ ความดันที่กำหนด พารามิเตอร์สำคัญที่ใช้กำหนดลักษณะเฉพาะของแบบจำลองสมดุล  
 ดูดซับของบีอีทีนี้จึงประกอบด้วยค่าคงที่สมดุลดูดซับของบีอีที ( $K_{BET}$ ) และปริมาณสมดุลดูดซับสาร  
 ถูกดูดซับจำเพาะเต็มพื้นผิวของตัวดูดซับชั้นเดียว ( $q_m$ ) สมการแบบจำลองสมดุลดูดซับของบีอีที จึง  
 มีลักษณะดังสมการ

$$q = \frac{q_m K_{BET} P_r}{(1 - P_r)(1 - P_r + K_{BET} P_r)} \quad (12)$$

เมื่อ  $P_r$  คือ อัตราส่วนความดันสมดุลของสารถูกดูดซับต่อความดันไอ ( $P/P_0$ ) ณ อุณหภูมิของระบบ  
 ดูดซับที่กำหนด ในลักษณะเดียวกับการคำนวณค่าพารามิเตอร์สำคัญทั้งสองของแบบจำลองสมดุล  
 ดูดซับของแลงเมียร์ ปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะเต็มพื้นผิวชั้นเดียว ( $q_m$ ) และค่าคงที่  
 สมดุลดูดซับของบีอีที คำนวณได้จากความสำคัญเชิงเส้นของปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับ  
 จำเพาะและความดันสมดุลของสารถูกดูดซับดังสมการ

$$\frac{1}{q(1 - P_r)} = \left( \frac{1}{q_m K_{BET}} \right) \frac{1 - P_r}{P_r} + \frac{1}{q_m} \quad (13)$$

$$\frac{P_r}{q(1 - P_r)} = \left( \frac{K_{BET} - 1}{q_m K_{BET}} \right) P_r + \frac{1}{q_m K_{BET}} \quad (14)$$

การคำนวณค่าพารามิเตอร์สำคัญทั้งสองของแบบจำลองสมดุลดูดซับของบีอีทีอย่าง  
 เหมาะสม ควรเลือกใช้ข้อมูลสมดุลดูดซับที่อัตราส่วนความดัน  $P_r$  มีค่าระหว่าง 0.05 ถึง 0.35  
 ความสัมพันธ์ตามสมการ 13 หรือสมการ 14 จึงมีลักษณะเป็นเส้นตรง นอกจากนี้แบบจำลอง  
 สมดุลดูดซับของบีอีทีนี้นิยมใช้เพื่อประมาณพื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับเป็นวัตถุประสงค์หลัก แต่  
 ไม่นิยมใช้เพื่อการออกแบบหน่วยแยกแก๊สผสม  $q_{mx}$  ด้วยตัวแปร  $q_m$  ที่คำนวณได้จากสมการ 13  
 หรือ 14 ในปัจจุบันนี้ พื้นผิวจำเพาะของตัวดูดซับเป็นผลลัพธ์ของการทดสอบสมดุลดูดซับแก๊ส  
 ไนโตรเจน ณ อุณหภูมิจุดเดือดปกติ

### 2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [3]

#### 1. อุณหภูมิ

สำหรับกระบวนการดูดซับทางกายภาพ ความสามารถของสารดูดซับขณะลดอุณหภูมิของระบบสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความดันไอของสารที่จะถูกดูดซับที่ต้องการดูดซับไว้นั้นมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูด Van der Waals ได้และย้ายกลับสู่เฟสแก๊ส ส่วนโมเลกุลที่อยู่ในเฟสแก๊สเรียบร้อยแล้วจะยังคงอยู่ ณ เฟสแก๊สนั้นเนื่องจากการที่มันมีความดันไอสูง ดังนั้นจึงเป็นกฎโดยทั่วไปว่า ควรใช้อุณหภูมิของหน่วยดูดซับต่ำกว่า 55 องศาเซลเซียส โดยการระบายความร้อนให้แก่กระแสแก๊สที่ต้องการบำบัดแก่เบตสารดูดซับการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน โดยมีปริมาณความร้อนคายออก เพื่อกำหนดอุณหภูมิทางกายภาพประมาณเท่ากับความร้อนของการควบแน่น ที่ระดับความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ (ต่ำกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน) ความร้อนที่คายออกจะต่ำสุดและแผ่กระจายออกอย่างรวดเร็วโดยการไหลของกระแสอากาศผ่านเบตไป แต่ที่ความเข้มข้นสูง (ประมาณ 5000 ส่วนในล้านส่วน) สามารถทำให้การแผ่กระจายความร้อนออกจากส่วนภายในของเบตช้าลง

#### 2. ความดัน

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันย่อยของไอสารที่ต้องการดูดซับไว้และความดันย่อยของไอสารที่ต้องการดูดซับไว้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันทั้งหมดของระบบ ฉะนั้นการเพิ่มความดันของระบบจะเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับของระบบ การที่มีความสามารถเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลง Mean freepath ของไอสารที่ต้องการดูดซับไว้ที่ความดันที่สูงขึ้น กล่าวอย่างง่าย คือ โมเลกุลของสารที่ต้องการดูดซับไว้ถูกอัดเข้าด้วยกันมากขึ้น จึงมีโมเลกุลจำนวนมากขึ้นมีโอกาสที่จะชนกับตำแหน่งเพื่อการดูดซับได้ ทำให้มีจำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้สูงขึ้น

#### 3. ความเร็วของแก๊ส

ระยะเวลาของการสัมผัสระหว่างกระแสแก๊สที่มีสารมลพิษกับสารดูดซับ ถูกกำหนดโดยความเร็วของกระแสแก๊สที่ผ่านหน่วยดูดซับไป ระยะเวลาของการสัมผัสมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไว้ โดยที่ความเร็วของกระแสแก๊สที่มีสารมลพิษ ซึ่งให้ผ่านหน่วยดูดซับ ที่ช้าลงจะหมายถึง การมีโอกาสที่มากขึ้นของโมเลกุลของสารมลพิษจะชนกับตำแหน่งที่สามารถดูดซับได้ ทั้งนี้ที่โมเลกุลของสารมลพิษถูกจับไว้แล้ว มันจะคงอยู่ที่ผิวนั้นจนกระทั่งสภาวะทางกายภาพของระบบถูกเปลี่ยนไป เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่า 90% การใช้อัตราเร็วต่ำจะช่วยหลีกเลี่ยงปัญหาในเรื่องการกระจายของกระแสแก๊สกล่าวคือ ป้องกันมิให้เกิดการไหลเป็นทางขึ้นความเร็วของกระแสแก๊สผ่านหน่วยดูดซับ เป็นฟังก์ชันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน่วยดูด

ซ้ำสำหรับปริมาณของแก๊สมลพิษที่กำหนดให้ปริมาณหนึ่ง อัตราการไหลของกระแสแก๊สผ่านหน่วยดูดซับยังมีผลต่อความดันลดอีกด้วย การเพิ่มอัตราการไหลจะหมายถึงการเพิ่มความดันลด ภายในค่าพิสัยขออัตราการไหลสูงสุดและต่ำสุด ค่าความดันลดที่ยอมรับได้โดยปกติแล้วจะบอกถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน่วย และอัตราการไหลที่ต้องการ ความดันลดที่เกิดขึ้นที่เบดสารดูดซับยังขึ้นอยู่กับความสูงของสารดูดซับอีกด้วย

#### 4. ความสูงของเบด

การให้มีความสูงของชั้นสารดูดซับที่เพียงพอ มีความสำคัญอย่างมาก เพื่อให้มีการกำจัดแก๊สมลพิษออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าความสูงของเบดสารดูดซับน้อยกว่าเขตการแลกเปลี่ยนมวล (Mass transfer zone: MTZ) จะถึงจุด breakthrough โดยทันทีทำให้ระบบไม่มีประสิทธิผลในการดูดซับ

#### 5. ความชื้น

สำหรับสารดูดซับที่ชอบดูดซับโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วมากกว่าโมเลกุลของไอน้ำที่มีขั้วโมเลกุลของไอน้ำในกระแสแก๊สเสียที่ ต้องการบำบัดจะมีแรงดึงดูดต่อกันที่แรงกว่าแรงดึงดูดกับสารดูดซับแต่ที่สภาวะซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์สูง คือ มากกว่า 50% จะมีจำนวนโมเลกุลของน้ำเพิ่มขึ้นมากจนกระทั่งโมเลกุลของน้ำเริ่มที่จะเข้าแย่งตำแหน่งเพื่อการดูดซับกับโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอน ทำให้ความสามารถและประสิทธิภาพของระบบดูดซับลดลง กระแสแก๊สเสียที่ ต้องการบำบัดที่มีความชื้นสูงมากกว่า 50% จึงต้องเพิ่มอุปกรณ์เพื่อกำจัดไอน้ำบางส่วนออก เช่น ใช้หน่วยทำความเย็น (Cooler) หรืออาจใช้วิธีเติมอากาศเฉื่อยที่มีความชื้นต่ำมาก หรือเพิ่มอุณหภูมิของกระแสแก๊สเสียขึ้นตรงเท่าที่การเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเสียไป

#### 6. ชนิดของสารมลพิษ

การมีอนุภาคของฝุ่น หยดของเหลวและสารประกอบอินทรีย์ซึ่งมีจุดเดือดสูงสามารถทำให้ประสิทธิภาพของหน่วยดูดซับลดลงไปได้ เพราะว่า อนุภาคที่มีขนาดเล็ก ระดับไมครอนสามารถปกคลุมพื้นผิวของสารดูดซับ ทำให้มีพื้นที่ผิวเพื่อการดูดซับโมเลกุลของแก๊สน้อยลง การปกคลุมพื้นที่ผิวเพื่อการดูดซับด้วยสารเฉื่อย เรียกว่า เกิดการตันของเบดหรือเกิด Deactivation เพื่อหลีกเลี่ยงสภาพเช่นนี้ระบบดูดซับในเชิงอุตสาหกรรมควรจะต้องติดตั้งอุปกรณ์กำจัดอนุภาคของฝุ่นไว้ด้วย

### 2.2.7 วิธีการทำให้สารดูดซับคืนกลับสภาพเดิม [3]

การเปลี่ยนเบตสารดูดซับใหม่ หรือการทำให้เบตสารดูดซับที่อิ่มตัวแล้วคืนกลับสภาพเดิม เป็นระยะๆ เป็นสิ่งที่ควรกระทำอย่างยิ่ง เมื่อมีความเข้มข้นของสารมลพิษสูงหรือมีระยะเวลาที่ใช้ งานได้สั้น (น้อยกว่า 12 ชั่วโมง) วิธีการเปลี่ยนเบตสารดูดซับใหม่จะไม่คุ้ม ควรเลือกวิธีการทำให้คืน กลับสภาพเดิมจะเหมาะสมกว่า ในเชิงพาณิชย์มีวิธีการทำให้คืนกลับสภาพเดิม 4 วิธี คือ

- การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่อเบตร้อนขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับไว้จะออกจากผิวของสารดูดซับ และจะถูกกำจัดออกจาก ภาชนะโดยการเป่าไล่ด้วยแก๊สเฉื่อย ต้องมีการระบายความร้อนออกก่อนที่จะเริ่มให้มี การดูดซับต่อไป
- การเปลี่ยนแปลงของความดัน ความดันจะถูกลดต่ำลงที่อุณหภูมิที่คงที่เพื่อลด ความสามารถของสารดูดซับ
- การเป่าไล่ด้วยแก๊สเฉื่อย การไล่โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับไว้ออกเกิดขึ้นเนื่องจาก แก๊สเฉื่อย ซึ่งจะปลดความดันย่อยของสารมลพิษในเฟสแก๊ส ทำให้เกิดการพลิกกลับ ของแกรเดียนต์ความเข้มข้น โมเลกุลของแก๊สมลพิษจึงหลุดออกจากผิวเข้าไปใน กระแสแก๊ส
- การแทนที่ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้ถูกแทนที่ด้วยสารซึ่งสามารถดูดซับไว้ได้บาง ชนิด วิธีนี้จะใช้ต่อเมื่อสารซึ่งถูกดูดซับไว้เมื่อครั้งแรกนั้นมีคุณค่าและไวต่อความร้อน และไม่อาจใช้วิธีลดความดัน

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Song และคณะ [12] ศึกษาการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สผสมโดยใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดนาโน คือ PEI บนตัวรองรับ SBA-15 โดยการเติมสาร Polyethyleneimine (PEI) ด้วยวิธีอิมเพกนชันลงบน Mesoporous Molecular Sieve SBA-15 ซึ่งสังเคราะห์จากวิธี Hydrothermal จากการวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับพบว่า PEI มีการกระจายตัวที่ดีภายในรูพรุนของ SBA-15 โดยที่โครงสร้าง SBA-15 ไม่เปลี่ยนแปลง จากการศึกษาค่าการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าตัวดูดซับที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นแสดงลักษณะของ Langmuir Adsorption Isotherm และการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์มีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีความชื้นปะปน แต่การที่มีความชื้นปะปนทำให้การฟื้นฟูตัวดูดซับลดลง

Sayari และคณะ [13] ศึกษาการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สธรรมชาติและแก๊สชีวภาพด้วยหมู่เอมีนบนซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง หมู่เอมีนที่ศึกษาคือ Triamine ซึ่งเติมลงบนตัวรองรับ MCM-41 จากการศึกษาค่าประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่า TRI-PE-MCM-41 มีสภาพการเลือกต่อการดูดซับแก๊สกรดในมีเทนได้อย่างดี ในระบบที่มีความชื้นปะปนอยู่ และยังพบว่า TRI-PE-MCM-41 สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยไม่เลือกดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งต่างจากซีโอไลต์และถ่านกัมมันต์ ดังนั้นการดูดซับขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารป้อนคือคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์อาจถูกดูดซับด้วย TRI-PE-MCM-41 ไปพร้อม ๆ กันหรือต่อเนื่องกัน

Vinek และ คณะ [14] ได้พัฒนาตัวดูดซับและตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีพื้นที่ผิวสูง เนื่องจากที่ผิวนั้นมีการยึดติดกับส่วนที่ไวต่อปฏิกิริยา (Active site) ซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous Silica) เป็นตัวรองรับที่เป็นวัสดุอุดมคติสำหรับส่วนที่ไวต่อปฏิกิริยาเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงและมีโครงสร้างที่เหมาะสม ที่สำคัญคือมีหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวสูงซึ่งช่วยให้เกิดการดูดซับแก๊สและการดัดแปรพื้นที่ผิว เนื่องจากที่พื้นผิวมีความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิล (Silanol Group) สูง ซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดกลางเช่น MCM-41 และ MCM-48 จึงเป็นวัสดุที่ถูกใช้เพื่อการดัดแปรพื้นผิวอย่างกว้างขวาง เช่น การกราฟต์หมู่ฟังก์ชันบนผนังรูพรุนของซิลิกาโดยปฏิกิริยา Silylation ระหว่างพื้นผิวของซิลิกาและสารกราฟต์

Yang และคณะ [15] ได้พัฒนาตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สกรด (คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์) จากแก๊สธรรมชาติ ตัวดูดซับที่สังเคราะห์โดยการเติมหมู่เอมีนบนซิลิกา เซโรเจลและ MCM-48 พบว่าจากการที่มีหมู่เอมีนจำนวนมากบนพื้นผิว ทำให้ตัวดูดซับดังกล่าว สามารถเลือกดูดซับแก๊สกรดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง อีกทั้งตัวดูดซับยังสามารถดูดซับและฟื้นฟูสภาพได้ที่สภาวะไม่รุนแรง เช่น ภาวะความดันกวดแกว่ง (Pressure Swing) หรือ อุณหภูมิ กวดแกว่ง (Temperature swing) อีกทั้งยังพบว่าน้ำไม่มีผลต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

Song และคณะ [16] ศึกษาตัวดูดซับชนิดใหม่ Molecular Basket Sorbents (MBS) ซึ่งมี รูพรุนขนาดนาโน เพื่อเพิ่มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากฟลูแก๊ส และสำหรับการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สสังเคราะห์ แก๊สธรรมชาติ และ แก๊สชีวภาพ เมื่อ ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับพบว่าตัวดูดซับที่สังเคราะห์ใหม่นี้มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับ ตัวดูดซับชนิดอื่น นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ของ MBS ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้น MBS ถือเป็นตัวดูดซับนวัตกรรมใหม่ที่ สามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สจำลองได้

Vicario และคณะ [17] ศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์และปรับปรุงคุณภาพของแก๊ส ชีวภาพด้วยวิธีการดูดซับภาวะความดันกวดแกว่ง (Pressure Swing Adsorption) และฟื้นฟูสภาพ ด้วยความร้อน ตัวดูดซับที่ศึกษาคือ Molecular Sieves 5A, 3A ที่สังเคราะห์ขึ้น และ ซีโอไลต์ พบว่าซีโอไลต์เป็นวัสดุที่ดีที่สุดสำหรับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้แก๊สชีวภาพบริสุทธิ์ได้ และ จากสามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับได้โดยสามารถดูดซับและฟื้นฟูการดูดซับได้หลายครั้ง อีกทั้งยังมี ต้นทุนการผลิตต่ำ

Wang และคณะ [18] ได้เตรียมตัวดูดซับ PEI บนตัวรองรับ molecular sieve ได้แก่ MCM-41, MCM-48 และ SBA-15 เพื่อกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สตัวอย่างประกอบไปด้วย แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.40 % โดยปริมาตร และแก๊สไฮโดรเจน 20% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ทำการทดลองในคอลัมน์แบบเบดนิ่ง อุณหภูมิดูดซับช่วง 22-75 องศาเซลเซียส ช่วง Gas Hour Space Velocity (GHSV) 33-1,011 h<sup>-1</sup> ที่ความดันบรรยากาศ โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ อุณหภูมิ GHSV ปริมาณของ PEI บนตัวรองรับที่แตกต่างกัน การลดลงของอุณหภูมิและ GHSV ทำให้ ประสิทธิภาพการดูดซับดีขึ้น ตัวดูดซับที่มี PEI 50% โดยมวล บนตัวรองรับ SBA-15 ให้ค่า Breakthrough capacity ดีที่สุด ขณะที่ตัวดูดซับ PEI 65% โดยมวล บนตัวรองรับ SBA-15 ให้ค่า

Saturation capacity สูงที่สุด นอกจากนั้น ตัวดูดซับยังสามารถถูกทำให้คืนสภาพได้ง่ายที่ภาวะไม่รุนแรง (อุณหภูมิ 75-100 องศาเซลเซียส) อีกทั้งมีความสามารถในการคืนสภาพและมีเสถียรภาพดีเยี่ยม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับพอลิเมอร์ PEI บนตัวรองรับ Molecular sieve ที่มีรูพรุนขนาดกลาง สามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์จากแก๊สไฮโดรเจนได้

Chen และคณะ [19] ได้พัฒนาตัวดูดซับ PEI บน Hierarchical porous silica monolith เพื่อดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิต่ำ ตัวดูดซับถูกวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะด้วยวิธีการดูดซับด้วยไนโตรเจน การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน โครงสร้างโมเลกุล และ วัดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในการทดลองได้ศึกษาถึง ผลของปริมาณ PEI ที่เติมลงบนตัวรองรับ อุณหภูมิ และ ระดับพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of polymerization) ของ PEI ต่อการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับที่มี PEI มากกว่า 60% โดยมวล บนตัวรองรับ SBA-15 หรือ MCM-41 สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ด้วย Breakthrough capacity สูงถึง 1.27 มิลลิโมล ของไฮโดรเจนซัลไฟด์ต่อกรัมตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ PEI มวลโมเลกุล 600 ที่มีปริมาณ 65% โดยมวล การลดลงของอุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ 2 ปัจจัย คือ ปริมาณของ PEI ในตัวดูดซับ และ อันตรกิริยาระหว่างไฮโดรเจนซัลไฟด์กับหมู่ฟังก์ชันเอมีนของ PEI นอกจากนั้น ตัวดูดซับยังสามารถถูกทำให้คืนสภาพได้ง่ายที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส มีเสถียรภาพและการนำกลับมาใช้ใหม่ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับ PEI บนตัวรองรับซิลิกาชนิด hierarchical สามารถกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้

### บทที่ 3

#### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมตัวดูดซับชนิดใหม่เพื่อใช้ในการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ตัวดูดซับชนิดเอมีนบนตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล ทดลองดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ทำการทดลองการดูดซับด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30-80 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10-60 มิลลิลิตรต่อนาที และวัดความเข้มข้นแก๊สขาออกด้วย Micro Gas Chromatography

#### 3.1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

Chemicals	Grade	Company
Ammonia	AR	Pan Innovation LTD.
2-Propanol	AR, 99.8%	Fisher Scientific
Hydrochloric acid	37% GR.	Merck
Tetraethyl orthosilicate	AR	Sigma Aldrich
Polyethylenimine (Mw 800)	Branched	Sigma Aldrich
Polyethylenimine solution 50% in water (Mw 2000)	Branched	Sigma Aldrich
Polyethylenimine (Mw 25000)	Branched	Sigma Aldrich
N-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine		Sigma Aldrich
Molecular sieve 5A	Pellets, 1.6 mm.	Sigma Aldrich
Molecular sieve 13X	Pellets, 1.6 mm.	Sigma Aldrich
Deionized water	-	-
H <sub>2</sub> S	1% balance in N <sub>2</sub>	Prexair
N <sub>2</sub>	99.999%	Prexair



### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

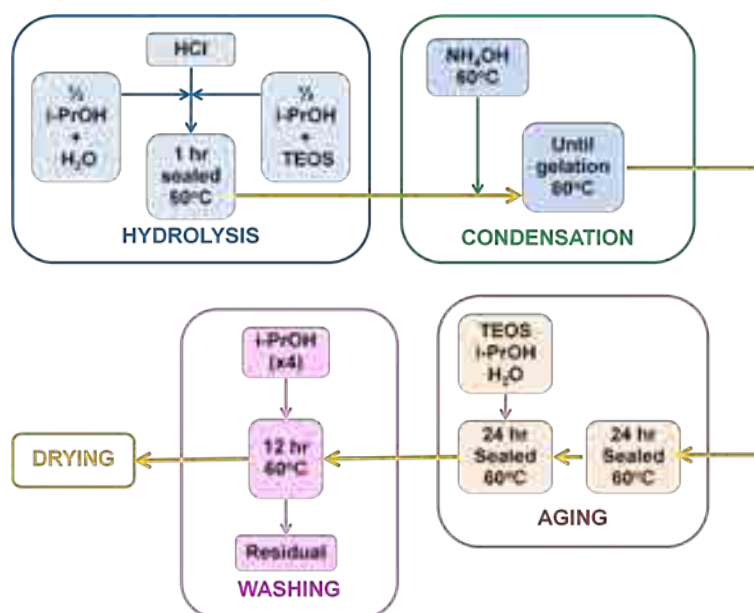
1. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารเคมี (Hot plate and stirrer) รุ่น IKA-1 3810000 ของ IKA พร้อมอ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ
2. ชุดเครื่องแก้วพร้อมคอลัมน์ของบริษัท เอ็น เค ซัพพลาย
3. เตาอบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert
4. เครื่องอัดเม็ดไฮดรอลิก ยี่ห้อ Carver
5. ตะแกรงร่อนขนาด 1.6 มิลลิเมตร
6. ชุดทดลองการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์
7. แก๊สโครมาโทกราฟีขนาดเล็ก (Micro Gas Chromatograph) รุ่น 490-GC จากบริษัท Varian
8. ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
9. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer: TGA) รุ่น Pyris Diamond ยี่ห้อ Perkin Elmer
10. เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR)
11. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยวิธีบีบีที (Surface area and porosity analyzer) รุ่น Autosorb-1 ยี่ห้อ Quantachrome
12. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) รุ่น D8 Discover ยี่ห้อ Bruker
13. เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น S-3400N ยี่ห้อ HITACHI

### 3.3 วิธีการทดลอง

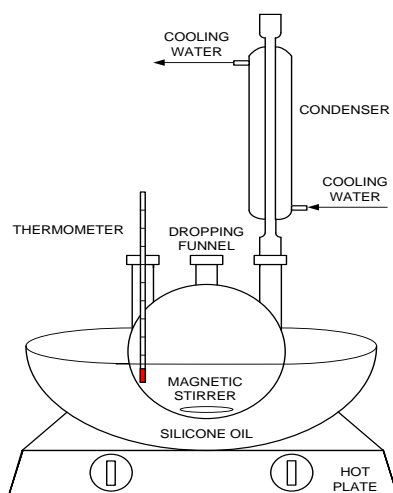
#### 3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ

ส่วนที่ 1: การเตรียมตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล

1. เตรียมตัวรองรับซิลิกาเซโรเจลด้วยกระบวนการไฮโดร-เจล ตามขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 3.1 โดยการผสมเตทตระแอสท์ออกซิไซเลน (TEOS) ไอโซโพรพานอล (i-PrOH) กรดไฮโดรคลอริกและน้ำ ในสัดส่วน TEOS/H<sub>2</sub>O/i-PrOH/HCl : 1/4/9.2/0.009 โดยโมล กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ในการทำปฏิกิริยาได้ติดตั้งอุปกรณ์ตามภาพที่ 3.2
2. เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) ในสัดส่วน NH<sub>4</sub>OH/HCl : 1/1 โดยโมล กวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ปล่อยให้สารละลายให้กลายเป็นเจล
3. เมื่อได้เจลแล้ว aging เจลข้ามคืนโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส
4. เติมสารผสมของ TEOS, i-PrOH และน้ำ ในสัดส่วนเดียวกันกับขั้นตอนที่ 1 จากนั้น aging ข้ามคืนโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส
5. เติม i-PrOH ปริมาณ 4 เท่า เพื่อล้างเจลทิ้งไว้ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
6. อบเจลที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลงและบดเจลแข็งให้เป็นผงจะได้ผงซิลิกาเซโรเจล



ภาพที่ 3.1 กรรมวิธีการสังเคราะห์ซิลิกาเซโรเจลที่มีพื้นที่ผิวสูง



ภาพที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์ทดลองการเตรียมตัวดูดซับด้วยกระบวนการซิล-เจล

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของซิลิกาเซโรเจลและไตรเอมีนหรือพอลิเอมีนที่เติม

Sample code	Silica xerogel (%wt.)	Amine (%wt.)
Si (silica xerogel)	100	0
Si-TRI-30	70	30
Si-TRI-40	60	40
Si-TRI-50	50	50
Si-TRI-60	40	60
Si-PEI800-30	70	30
Si-PEI800-40	60	40
Si-PEI800-50	50	50
Si-PEI800-60	40	60
Si-PEI2000-30	70	30
Si-PEI25000-30	70	30

ส่วนที่ 2: การปรับปรุงพื้นผิวโดยการเติมเอมีนบนตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล

ตัวดูดซับเตรียมโดยวิธีการฝังตัว (Impregnation Method) ของเอมีน 2 ชนิดคือ TRI [(N-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine)] และ PEI [Polyethylenimine] มวลโมเลกุล 800, 2000 และ 25,000 บนตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล ในอัตราส่วน 0, 30, 40, 50 และ 60 % โดยมวล ได้ตัวดูดซับดังตารางที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

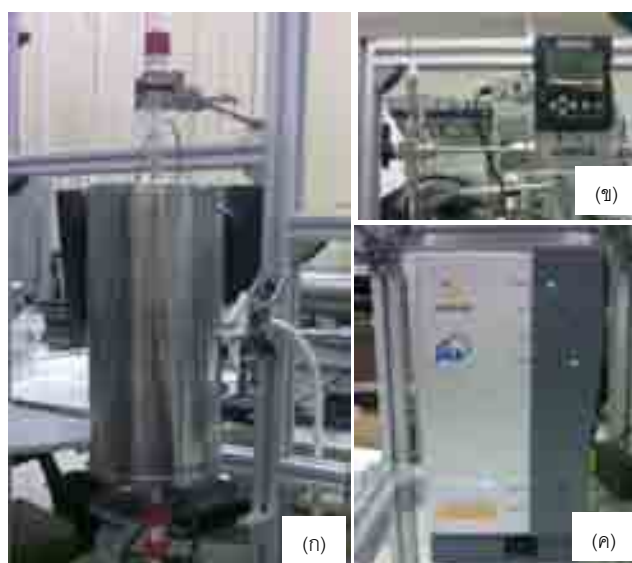
1. ละลายเอมีนลงใน i-PrOH กวนสารให้เป็นเนื้อเดียวกัน
2. เติมผงเซโรเจลลงไป
3. กวนสารผสมดังกล่าวที่อุณหภูมิห้องจนแห้ง จะได้ตัวดูดซับตามต้องการ

### 3.3.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

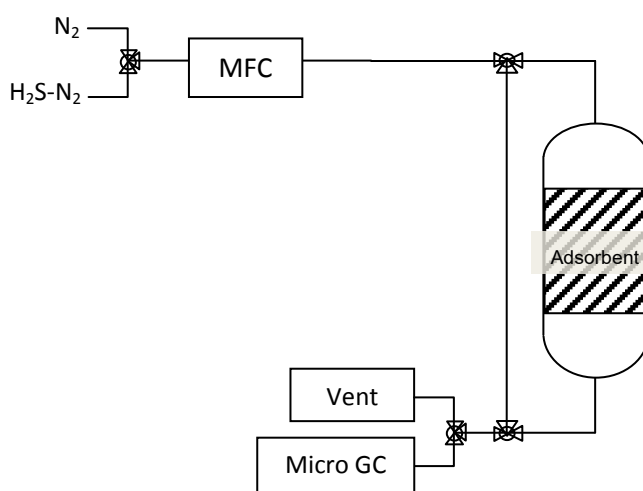
#### 1. ระบบการทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

ชุดทดลองการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ประกอบด้วย เครื่องวัดอัตราไหลอัตโนมัติที่ทนต่อการกัดกร่อนของไฮโดรเจนซัลไฟด์ยี่ห้อ Sierra คอลัมน์บรรจุตัวดูดซับแบบคอกซ์วอดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 11.5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 12.5 มิลลิเมตร ยาว 450 มิลลิเมตร เตาให้ความร้อนและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 3.3 แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้น 1% โดยปริมาตร ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในไนโตรเจน ทำการทดลองด้วยคอลัมน์เบดนิ่งที่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.4 ประกอบด้วย ชุดควบคุมอัตราไหล (Mass flow controller), คอลัมน์ และ ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) สำหรับตัวดูดซับหนึ่งเบด และต่อแก๊สออนไลน์ไปยังแก๊สโครมาโทกราฟีขนาดเล็ก (Micro Gas Chromatograph) ใช้คอลัมน์ PPU (Poraplot Q) สำหรับใช้วัดความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากกระบวนการดูดซับ โดยการต่อท่อแก๊สออนไลน์เข้ากับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี เก็บตัวอย่างแก๊สทุกๆ 3 นาที จนได้ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากกระบวนการดูดซับเท่ากับความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า ตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปมีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส 2 นาที โดยมีแก๊สฮีเลียมเป็นตัวพาด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิลิตรต่อนาที สำหรับชุดควบคุมอัตราไหลต่อเข้ากับแก๊สสองชนิดคือ แก๊สไนโตรเจน สำหรับใช้ในการทำความสะอาดตัวดูดซับก่อนและ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- บรรจุตัวดูดซับหนัก 1 กรัม ลงในคอลัมน์ ก่อนเริ่มการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำการ pre-treatment ตัวดูดซับโดยผ่านแก๊สไนโตรเจนอัตราไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- ปรับอุณหภูมิที่ 30-80 องศาเซลเซียส แล้วทดลองการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยผ่านแก๊สดังกล่าวอัตราไหล 10-60 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ไปยังตัวดูดซับ
- วัดปริมาณแก๊สที่เหลือจากการดูดซับโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก



ภาพที่ 3.3 เครื่องมือที่ใช้ทดลอง (ก) เครื่องปฏิกรณ์, (ข) ชุดควบคุมอัตราไหลแก๊ส และ (ค) แก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก



ภาพที่ 3.4 แผนผังชุดอุปกรณ์ทดลองการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

## 2. สมการการคำนวณ

1. การคำนวณอัตราไหลของไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$FR_H = (FR \times 1) / 100$$

2. การคำนวณความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ

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

3. การคำนวณความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

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

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

ที่	$C_o$	=	ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ (ppm)
	$C_t$	=	ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ (ppm)
	$A_{STD}$	=	พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ
	$A$	=	พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ
	$Cap(BT)$	=	ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่ breakthrough (มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ)
	$Cap(S)$	=	ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่อิ่มตัว (มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ)
	$BT$	=	เวลาที่ breakthrough (นาที)
	$FR$	=	อัตราไหลแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที)
	$FR_H$	=	อัตราไหลไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มิลลิลิตรต่อนาที)
	$V_{mol}$	=	ปริมาตรโมลาร์ของแก๊สอุดมคติที่ภาวะมาตรฐาน
	$W_{sorb}$	=	น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

### 3.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

1. เครื่องวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักโดยใช้ความร้อน (Thermogravimetric Analyzer: TGA) รุ่น Pyris Diamond ยี่ห้อ PerkinElmer เครื่อง TGA วัดน้ำหนักของสารตัวอย่าง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงอุณหภูมิ การวิเคราะห์ทำในระบบปิด เครื่องจะประกอบด้วยเตาเผา (Furnace) ที่มีโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Programmer) ควบคุมบรรยากาศ ความดัน และมีระบบการชั่งน้ำหนักเข้ามาประกอบ โดยทั่วไปการทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถทดสอบได้ถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส วัดน้ำหนักของสารตัวอย่างเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทุกช่วงอุณหภูมิ ทดสอบโดยการนำตัวดูดซับหนัก 10-20 มิลลิกรัม บรรจุลงในถาดแพตทินัม การวิเคราะห์ทำในภาวะที่มีอุณหภูมิ 40-1,000 องศาเซลเซียส อัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนในการทดสอบซึ่งมีอัตราการไหล 40 มิลลิเมตรต่อนาที
2. เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR) โดยใช้ KBr เป็นสารอ้างอิง ทดสอบโดยการชั่งน้ำหนัก KBr 100 กรัม ผสมกับสารตัวอย่าง 1-2 มิลลิกรัม บดผสมสารทั้งสองให้เข้ากัน นำสารตัวอย่างไปอัดเป็นแผ่นบาง ๆ ด้วยเครื่องไฮดรอลิกความดัน 10 ตัน เป็นเวลา 1 นาที ได้แผ่นตัวอย่าง ในขั้นตอนนี้ควรเตรียมแผ่นตัวอย่างให้บาง เนื่องจากเทคนิค FTIR ใช้หลักการผ่านของลำแสง หากตัวอย่างที่เตรียมหนาจนเกินไป แสงไม่สามารถผ่านไปได้ ทำให้การวิเคราะห์คลาดเคลื่อน นำแผ่นตัวอย่างบรรจุลงเครื่องวิเคราะห์ วัดค่าที่ช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ทำการสแกน 16 รอบต่อหนึ่งตัวอย่าง
3. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนบีอีที (Surface area and porosity analyzer) รุ่น Autosorb-1 ยี่ห้อ Quantachrome ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นตัวพา ทดสอบโดยการนำตัวดูดซับ 0.2 กรัม บรรจุในหลอดแก้ว ไล่แก๊สด้วยแก๊สไนโตรเจน ความร้อนอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เมื่อไล่แก๊สเสร็จ นำหลอดบรรจุตัวดูดซับพร้อมตัวดูดซับภายในที่ผ่านการไล่แก๊สแล้วไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาน้ำหนักที่แท้จริง จากนั้นนำหลอดบรรจุตัวดูดซับพร้อมตัวดูดซับต่อเข้ากับส่วนวิเคราะห์ วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวดูดซับ วัดค่าไอโซเทอร์มที่ -196 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

4. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray Diffractometer: XRD) รุ่น D8 Discover ยี่ห้อ Bruker โดยมีขั้นตอนการทดสอบตัวอย่างคือ เปิดระบบหล่อเย็นของเครื่อง XRD อุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส รอไฟที่เครื่อง XRD แสดง stand by กดสวิทช์ power รอจนที่มุม  $\theta$  และ  $2\theta$  มีตัวเลขบอกตำแหน่งของมุม เปิดกุญแจของหลอด X-ray ไฟแสดงการทำงานของหลอดแสดง ค่าของกระแสและความต่างศักย์แสดงเป็น 5 มิลลิแอมแปร์ และ 15 กิโลโวลต์ ตามลำดับ นำตัวดูดซับหนัก 5 กรัม ใส่ลงบนแผ่นซิลิโคน ทำการวิเคราะห์ในภาวะอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ ใช้ทองแดง (Cu) เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ที่ความยาวคลื่น 1.54 มุม  $2\theta = 5-80$  องศา ความเร็วสแกน 2 องศาต่อนาที ก่อนปิดเครื่อง ลดค่าความต่างศักย์และค่าของกระแสให้ต่ำสุดคือ 15 กิโลโวลต์ และ 5 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ ไว้ประมาณ 15 นาที เพื่อเป็นการหล่อเย็นหลอดรังสีเอ็กซ์
5. เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscope: SEM) รุ่น S-3400N ยี่ห้อ HITACHI ทดสอบตัวอย่างโดยการโรยตัวดูดซับลงบนแผ่นคาร์บอน แล้วนำไปเคลือบทองเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้พื้นผิวมีสมบัตินำไฟฟ้า โดยใช้เครื่องมือฉาบผิว sputter coater โดยตัวอย่างถูกวางที่ขั้วแอโนด โลหะที่ใช้ฉาบวางที่ขั้วแคโทด ฉาบที่ภาวะสุญญากาศ 0.1 ทอร์ ให้กระแสไฟฟ้าและแก๊สอาร์กอน อาร์กอนเคลื่อนที่ไปขั้วแคโทด และชนแผ่นทองคำให้แตกตัวเป็นโมเลกุล แล้วค่อยๆ เคลือบลงบนตัวดูดซับ ความหนาของผิวฉาบควรอยู่ระหว่าง 10–20 นาโนเมตร จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมไปวิเคราะห์สัณฐานวิทยา โดยการบรรจุตัวอย่างลงในส่วนวิเคราะห์ ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงาน ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปแสดงผลบนจอโทรทัศน์ โดยมีกำลังขยายสูงสุด 5 ไมโครเมตร



### 3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

#### 1. ผลของลักษณะของตัวดูดซับ

เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของตัวดูดซับต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่มีลักษณะแบบผงและแบบเม็ด โดยนำตัวดูดซับที่เตรียมได้ไปขึ้นรูปให้ได้ขนาด 1.6 มิลลิเมตร ด้วยเครื่องอัดเม็ดความดัน 6 ตัน ได้เม็ดตัวดูดซับดังแสดงในภาพที่ 3.5 นำตัวดูดซับทั้งสองไปทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ภาวะ ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 20 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 3.5 เครื่องอัดเม็ดและคัดขนาดตัวดูดซับ

#### 2. ผลของชนิดเอมีน

เพื่อศึกษาผลของชนิดเอมีนและเพื่อเลือกตัวดูดซับที่ดีที่สุดต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงได้เลือกชนิดของเอมีน คือ TRI และ PEI มวลโมเลกุล 800, 2,000 และ 25,000 ทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 3. ผลของปริมาณเอมีนในตัวดูดซับ

เพื่อเลือกตัวดูดซับที่สามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่สุด จึงได้เติมเอมีนปริมาณแตกต่างกันลงบนซิลิกาเซโรเจล โดยปริมาณเอมีนที่เติมคือ 0, 30, 40, 50 และ 60 % โดยมวล ได้ตัวดูดซับดังแสดงตามตาราง 3.1 ทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4. ผลของอุณหภูมิ

เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้ทดลองดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 30, 45, 65 และ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ทดสอบที่ความดันบรรยากาศ อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 5. ผลของอัตราไหลแก๊ส

เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่อัตราไหลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10, 20, 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ทดสอบที่ภาวะความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

#### 6. ศึกษาการคืนสภาพของตัวดูดซับ

ทำการทดลองโดยการป้อนแก๊สไนโตรเจนไปยังตัวดูดซับ ความคุมอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน และอุณหภูมิต่อการคืนสภาพตัวดูดซับ ภาวะที่ใช้ทดลองคือ อัตราไหลแก๊ส 10, 20, 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 30, 45, 65 และ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวดูดซับ Si-PEI800-50

#### 7. เสถียรภาพของตัวดูดซับ

ทำการทดลองที่ภาวะ ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ตัวดูดซับ Si-PEI800-50

#### 8. เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้กับตัวดูดซับในเชิงพาณิชย์

ทำการทดลองที่ภาวะ ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที โดยใช้ตัวดูดซับที่เตรียมได้คือ Si-PEI800-50 และตัวดูดซับในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Molecular sieve 13X, Molecular sieve 5A

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

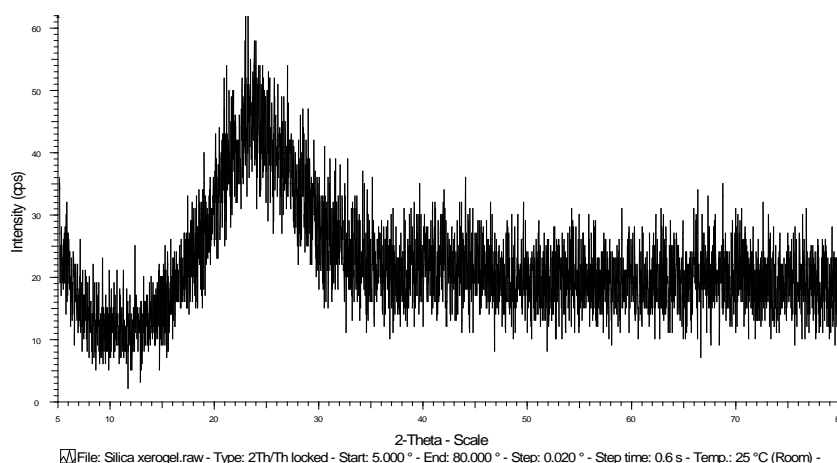
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยการพัฒนาตัวดูดซับใหม่ คือ เอมีนบนซิลิกาเซโรเจล ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้แก่ ลักษณะตัวดูดซับ ปริมาณเอมีนบนตัวรองรับ ชนิดเอมีน อุณหภูมิ อัตราไหลแก๊ส สภาพแวดล้อมเหมาะสมของการดูดซับ ศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ และ ศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมกับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

#### 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

ในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD) การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยวิธีบีอีที (Brunauer Emmett Teller: BET) การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscope: SEM) การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคทีจีเอ (Thermogravimetric Analysis: TGA) และ การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล (Fourier Transform InfraRed Spectroscopy: FT-IR) เพื่ออธิบายลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับและการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

##### 4.1.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

รูปแบบ XRD ของตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล แสดงดังภาพที่ 4.1 พบว่าตัวรองรับซิลิกาที่เตรียมได้มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน ซึ่งพิจารณาจากลักษณะของรูปแบบที่ไม่แสดงพีคของการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ที่ชัดเจน เนื่องจากทำการวิเคราะห์ที่มุม  $2\theta$  ที่สูง ดังนั้นในการวิเคราะห์รูปแบบของซิลิกาเซโรเจลควรทำที่มุม  $2\theta$  ต่ำด้วย เพื่อพิจารณาถึงความเป็นไปได้ของการเกิดรูพรุนขนาดกลาง



ภาพที่ 4.1 รูปแบบ XRD ของตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล

#### 4.1.2 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนบีอีที (Brunauer Emmett Teller: BET)

การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยกวาดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล และ ตัวดูดซับเอมีนบนซิลิกาเซโรเจลที่มีปริมาณ และชนิดเอมีนที่แตกต่างกัน โดยการวัดการดูดซับทางกายภาพด้วยแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ซิลิกาเซโรเจล (Si) ที่เตรียมได้การกระบวนการโซลเจล มีพื้นที่ผิวสูงถึง 966 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อมีการเติมเอมีนลงในตัวรองรับเพิ่มขึ้น ส่งผลให้พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับเปลี่ยนแปลง ตัวดูดซับซิลิกาเซโรเจลเติมด้วย *N*-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine (Si-TRI) มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 25–139 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนอยู่ในช่วง 0.036–0.258 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนตัวดูดซับอยู่ในช่วง 5.11–7.41 นาโนเมตร และตัวดูดซับซิลิกาเซโรเจลเติมด้วย Polyethylenimine มวลโมเลกุล 800 (Si-PEI-800) มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 83.2–17.3 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุนอยู่ในช่วง 0.41–0.23 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม และ เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 7.66–11.09 นาโนเมตร สังเกตได้ว่าเพื่อเติมเอมีนลงบนตัวรองรับเพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนมีค่าลดลง เนื่องจากเอมีนเข้าไปบดบังรูพรุนของตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล ส่วน Si-PEI800-40 ที่มีพื้นที่ผิวต่ำกว่า Si-PEI800-50 อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการเตรียมตัวรองรับด้วยวิธีการฝังตัว พอลิเอมีนกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ จึงเกิดการเกาะกลุ่มกัน เมื่อพิจารณาที่ชนิดของเอมีนต่างกันแต่เติมเอมีนลงบนซิลิกาเซโรเจลเท่ากัน พบว่า ตัวดูดซับ Si-PEI มีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนต่ำกว่าตัวดูดซับ Si-TRI เนื่องจากระดับพอลิเมอร์โซลชันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สายของเอมีนบดบังพื้นที่ผิวของซิลิกาเซโรเจล

จากผลการวิเคราะห์พื้นผิว ปริมาตรรูพรุน และ ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับที่เตรียมได้ พบว่า ผลที่ได้คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [18] ศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับพอลิเมอร์บนโมเลกุลาริฟ และ Chen และคณะ [19] ศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับพอลิเอทีลีนเอมีนบนตัวรองรับซิลิกา นอกจากนี้พบว่าเมื่อเติมเอมีนลงในตัวรองรับ ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจากตัวรองรับที่ไม่มีการเติมเอมีน เนื่องจากเอมีนที่เติมลงไปเกิดการเกาะกลุ่มกันเอง ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับที่วัดได้จึงน่าจะเป็นขนาดรูพรุนของเอมีนที่เกาะกลุ่มกัน

ภาพที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของขนาดรูพรุนขนาดกลาง ภาพที่ 4.2ก. แสดงขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ Si-TRI ที่มีปริมาณเอมีนแตกต่างกัน จากภาพจะเห็นว่า การเติมเอมีนเพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับเปลี่ยนแปลง เนื่องจากตัวดูดซับยังแสดงลักษณะของรูพรุนขนาดกลาง ภาพที่ 4.2ข. แสดงขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ Si-PEI ที่มีปริมาณเอมีนแตกต่างกัน ผลที่ได้เช่นเดียวกับภาพ 4.2ก. แต่ตัวดูดซับ Si-PEI มีรูพรุนขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ Si-TRI เมื่อพิจารณาที่ปริมาณเอมีนที่เท่ากัน เนื่องจาก PEI มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ ส่งผลให้ขนาดรูพรุนเล็กกว่าตัวดูดซับ Si-TRI โดยทั้งตัวดูดซับ Si-TRI และ Si-PEI แสดงลักษณะขนาดรูพรุนในช่วง 20–100 อังสตรอม ซึ่งเป็นช่วงของรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous: 20–500 อังสตรอม)

จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจน ซึ่งใช้ยืนยันขนาดของรูพรุนขนาดกลางของตัวดูดซับที่ศึกษา ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับนั้นสามารถสังเกตได้จากรูปร่างของไอโซเทอร์ม ภาพที่ 4.3 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ Si-TRI และภาพที่ 4.4 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ Si-PEI พบว่าไอโซเทอร์มของตัวดูดซับทุกตัว แสดงไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบบีอีทีชนิดที่ 4 ซึ่งแสดงลักษณะของฮิสเทอรีซิส ซึ่งให้เห็นถึงการมีรูพรุนขนาดกลาง โดยไอโซเทอร์มชนิดนี้เป็นารดูดซับแก๊สที่เกิดปรากฏการณ์การกลั่นตัวและการระเหยของแก๊สที่กลั่นตัวบนตัวดูดซับ ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดผลฮิสเทอรีซิส (Hysteresis effect) การที่ตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดกลางนี้เหมาะสำหรับการกระจายตัวของเอมีน โดยที่ไม่ทำให้โครงสร้างของรูพรุนเปลี่ยนแปลง [11] สอดคล้องกับภาพที่ 4.2 อีกทั้งขนาดของฮิสเทอรีซิสของไอโซเทอร์มสามารถบอกปริมาตรของรูพรุนได้ พบว่า ไอโซเทอร์มที่มีขนาดของฮิสเทอรีซิสมาก ปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับก็มากด้วย ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับตารางที่ 4.1

ผลการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของตัวดูดซับที่เตรียม แตกต่างกับไอโซเทอร์มของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ (ภาคผนวก ค. ภาพที่ ค.1) จากไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ พบว่าตัวดูดซับดังกล่าวแสดงลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบบีอีทีชนิด I ซึ่งเป็นการดูดซับแบบขั้นเดียวตาม ไอโซเทอร์มแบบนี้

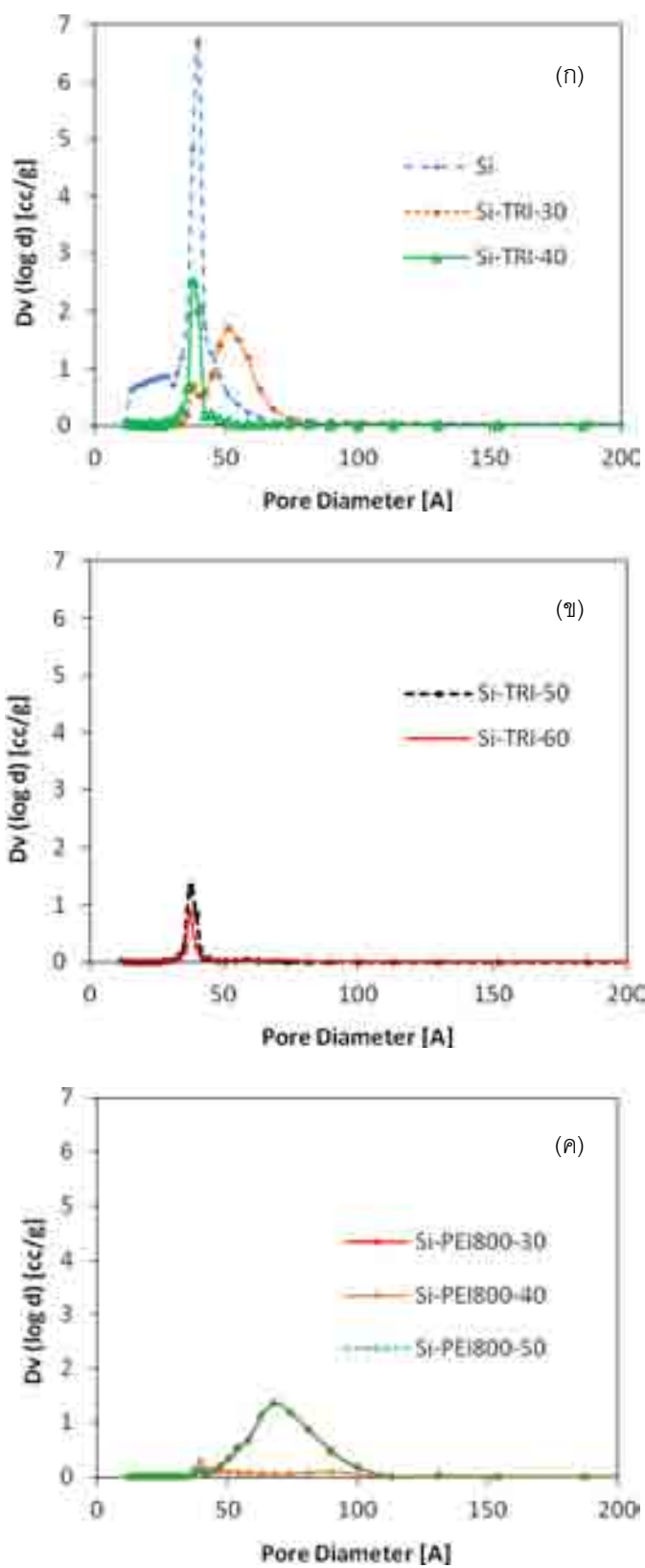
มักจะพบในวัสดุที่มีความพรุนแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ ทำให้การดูดซับเกิดขึ้นเร็วในตอนต้น และเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่ ซึ่งอาจเกิดได้กับตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก

**ตารางที่ 4.1** BET surface area, Pore volume และ Pore size ของตัวดูดซับเซโรเจลที่เตรียมและ ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

Sample	BET surface Area (m <sup>2</sup> /g)	Pore Volume (cm <sup>3</sup> /g)	Pore size* (nm)
Si	966.0	0.832	3.44
Si-TRI-30	139.0	0.258	7.41
Si-TRI-40	123.0	0.144	5.11
Si-TRI-50	48.8	0.067	5.45
Si-TRI-60	25.0	0.036	5.79
Si-PEI800-30	83.2	0.231	11.09
Si-PEI800-40	17.3	0.046	10.72
Si-PEI800-50	21.6	0.041	7.66
Si-PEI2000-30	143.2	0.399	1.11
Si-PEI25000-30	298.9	0.422	5.65
**Molecular sieve 5A	334.9	0.222	2.66
**Molecular sieve 13X	454.3	0.344	3.03

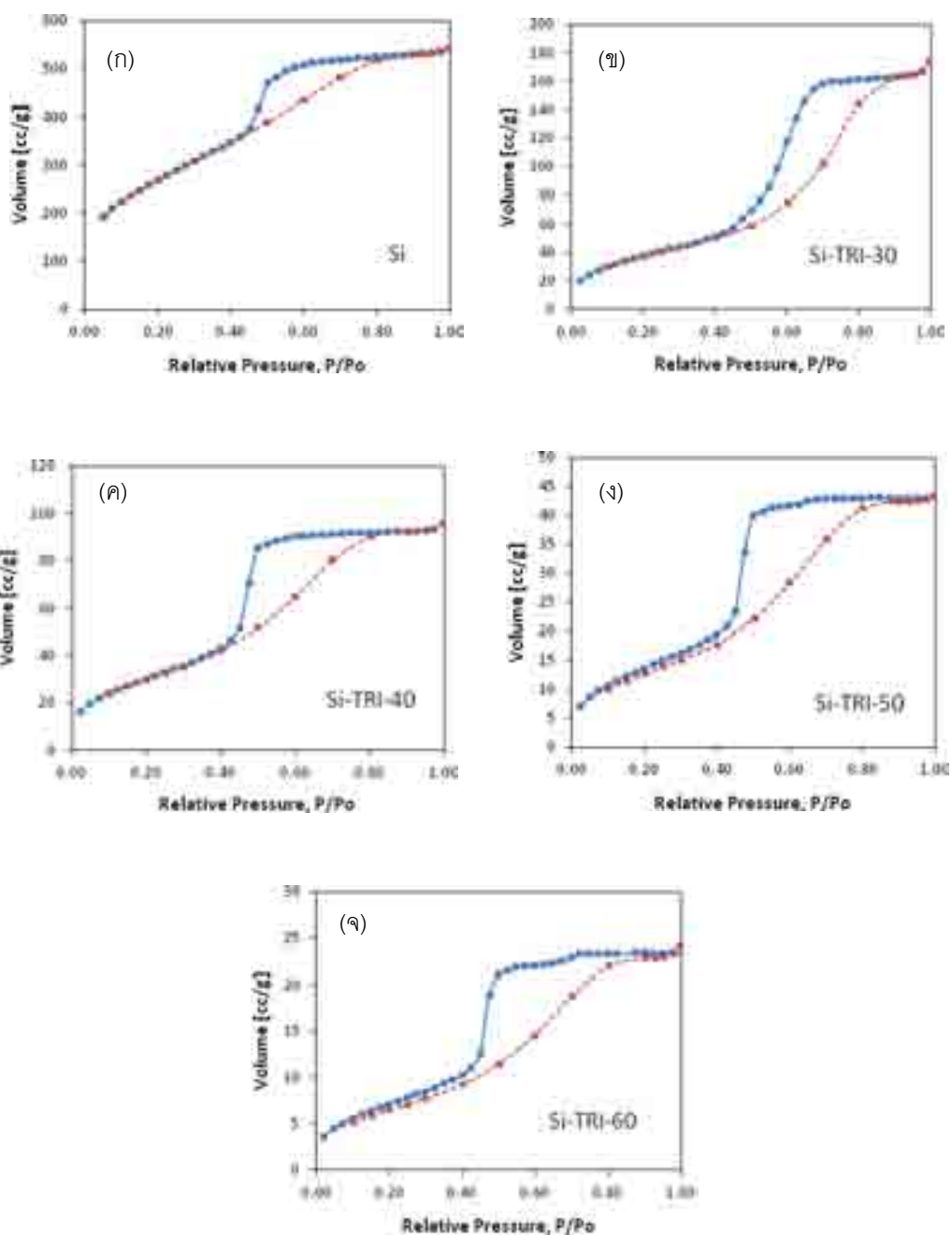
\*จากค่าเฉลี่ยของ Pore size distribution

\*\* Molecular sieve 5A และ Molecular sieve 13X เป็นตัวดูดซับเชิงพาณิชย์



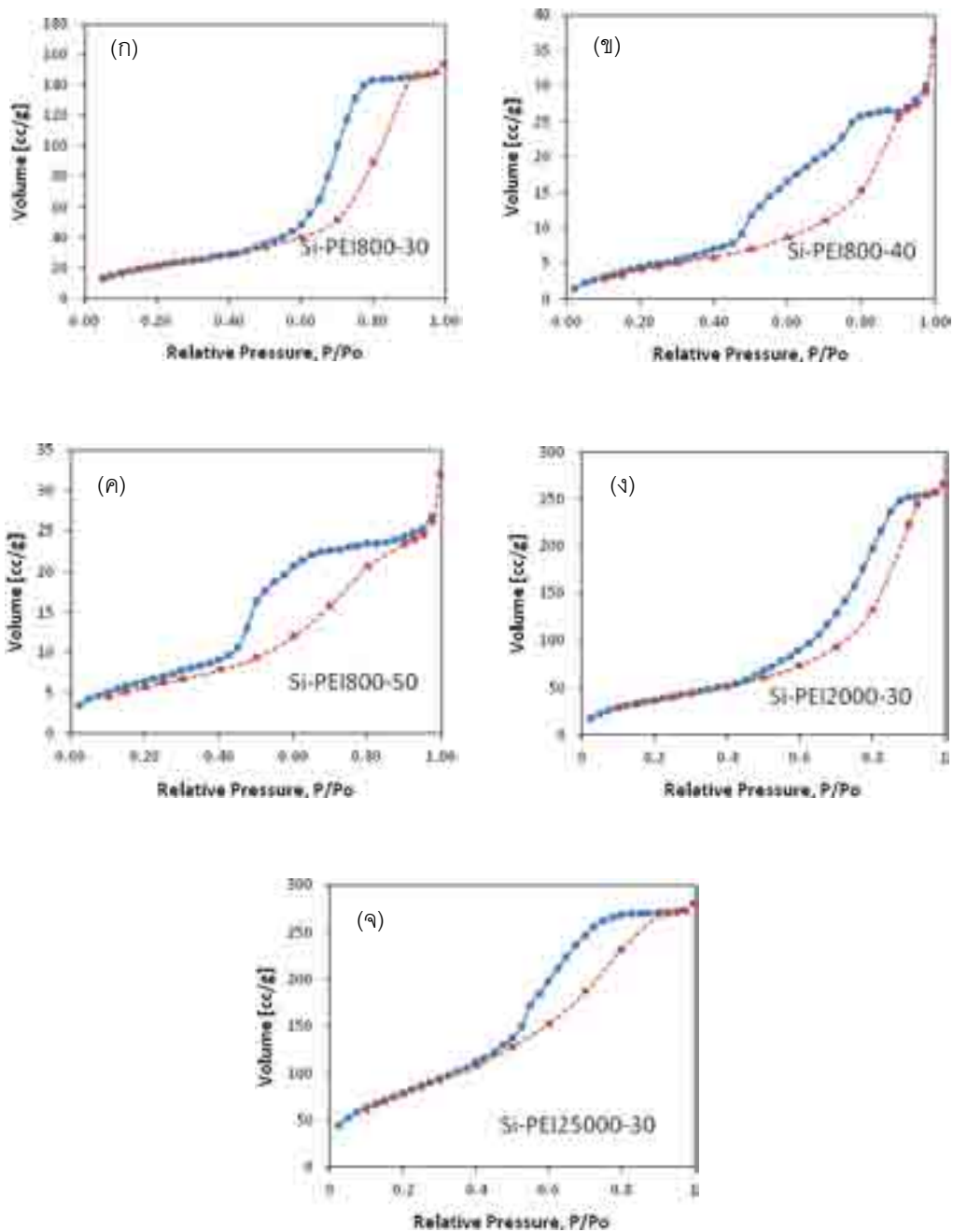
ภาพที่ 4.2 Pore size distribution ของตัวดูดซับ, (ก) Si, Si-TRI-30, Si-TRI-40

(ข) Si-TRI-50, Si-TRI-60 (ค) Si-PEI800-30, Si-PEI800-40, Si-PEI800-50



ภาพที่ 4.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ, (ก) Si, (ข) Si-TRI-30, (ค) Si-TRI-40, (ง) Si-TRI-50, (จ) Si-TRI-60.





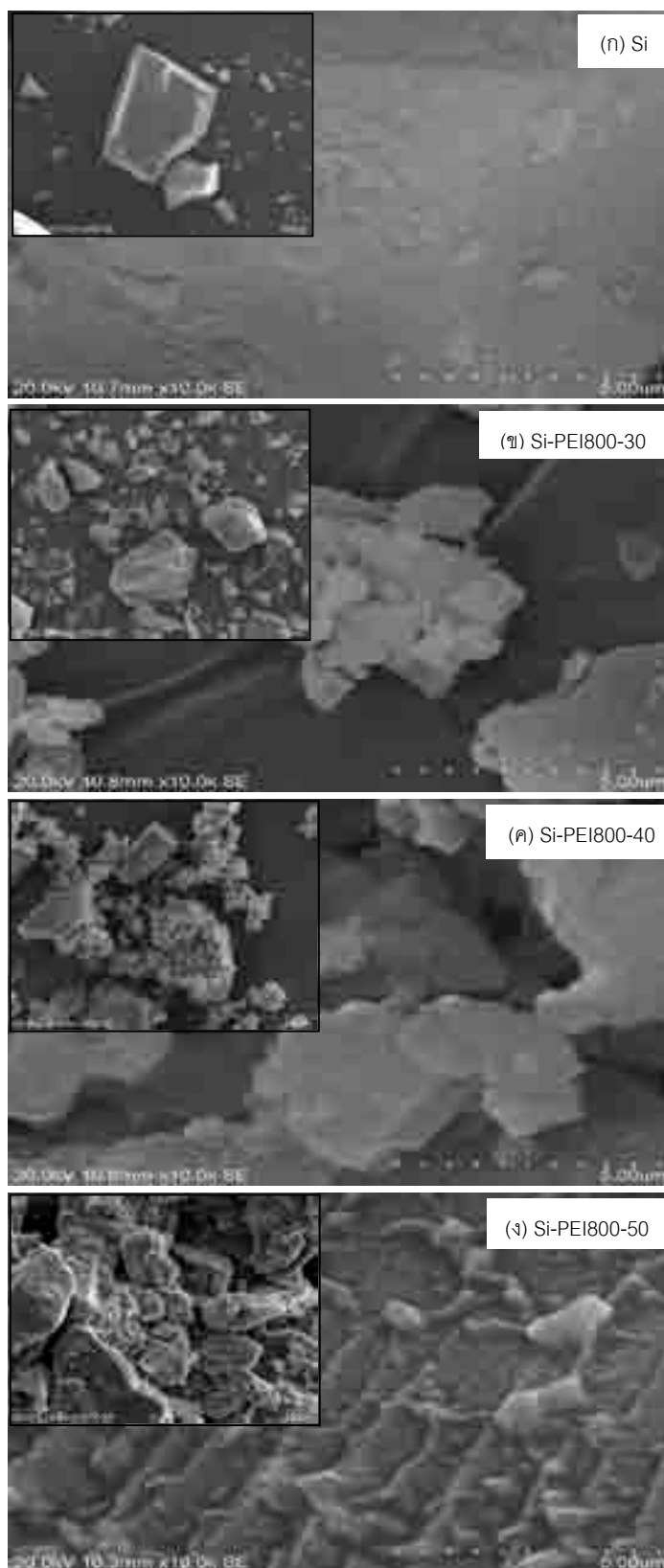
ภาพที่ 4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ, (ก) Si-PEI800-30, (ข) Si-PEI800-40 (ค) Si-PEI800-50, (ง) Si-PEI2000-30, (จ) Si-PEI25000-30

#### 4.1.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscope: SEM)

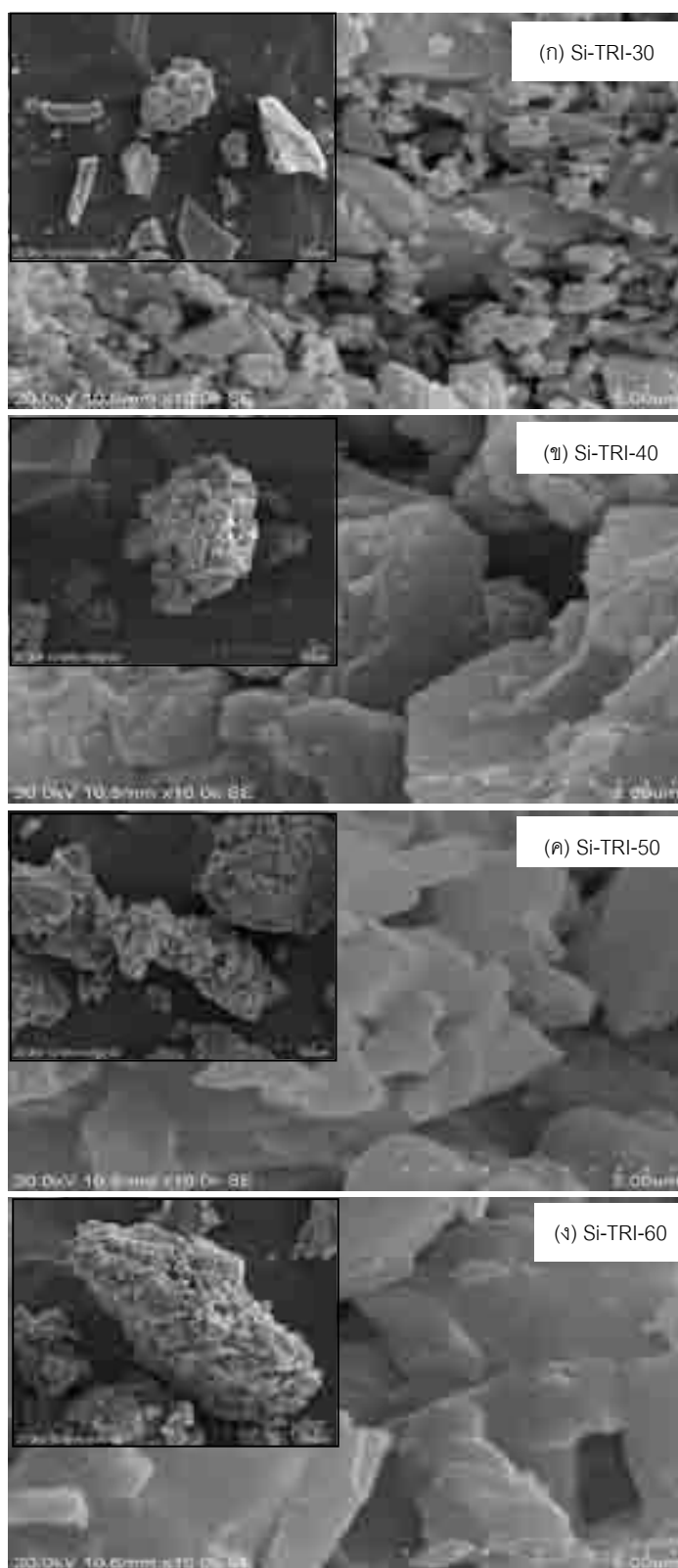
ผลจากการวิเคราะห์ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยวิธีการฝังตัว โดยใช้เทคนิคเอสอีเอ็ม เพื่อศึกษา ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับก่อนและหลังการเติมเอมีน พิจารณาการกระจายตัวของ เอมีนบนตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล ภาพที่ 4.5 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ Si และ Si-PEI พบว่าลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับเปลี่ยนแปลงไปเมื่อตัวดูดซับมีปริมาณของพอลิ เอมีนเพิ่มขึ้น ที่ปริมาณของพอลิเอมีนต่ำ Si-PEI800-30 พบว่าพอลิเอมีนกระจายตัวอยู่บนตัว รองรับ ซิลิกาเซโรเจลได้ดี ขณะที่ปริมาณพอลิเอมีนเพิ่มขึ้น Si-PEI800-40 พอลิเอมีนกระจายตัวกัน อย่างสม่ำเสมอ และที่พอลิเอมีนมาก Si-PEI800-50 พอลิเอมีนเกาะกลุ่มกันเองเป็นก้อน

ภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ Si-TRI พบว่าลักษณะที่ได้เป็นไป ในทางเดียวกันกับตัวดูดซับ Si-PEI คือที่ตัวดูดซับมีปริมาณเอมีนต่ำ Si-TRI-30 พบว่าเอมีน กระจายตัวได้ดีบนซิลิกาเซโรเจล และเมื่อเติมเอมีนลงไปเพิ่มขึ้น Si-TRI-40 พบว่าเอมีนกระจายตัว สม่ำเสมอบนตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล และการเติมเอมีนลงไปมาก Si-TRI-50 และ Si-TRI-60 จาก ภาพที่ 4.6ค. และ 4.6ง. สังเกตได้ว่าเอมีนเข้าไปเคลือบซิลิกาเซโรเจลและเอมีนบดบังรูพรุน ทำให้ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับที่เตรียมได้ พบว่าเอมีนกระจาย ตัวบนซิลิกาเซโรเจลได้ดี แต่เมื่อเติมเอมีนลงไปปริมาณที่สูงขึ้น เอมีนจะบดบังรูพรุนบางส่วนของ ซิลิกา ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [12] และ Chen และคณะ [19]



ภาพที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ PEI มวลโมเลกุล 800 บนซิลิกาเซโรเจล, (ก) Si, (ข) Si-PEI800-30, (ค) Si-PEI800-40, (ง) Si-PEI800-50.



ภาพที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ TRI บนซิลิกาเฮโรเจล, (ก) Si-TRI-30, (ข) Si-TRI-40, (ค) Si-TRI-50, (ง) Si-TRI-60.

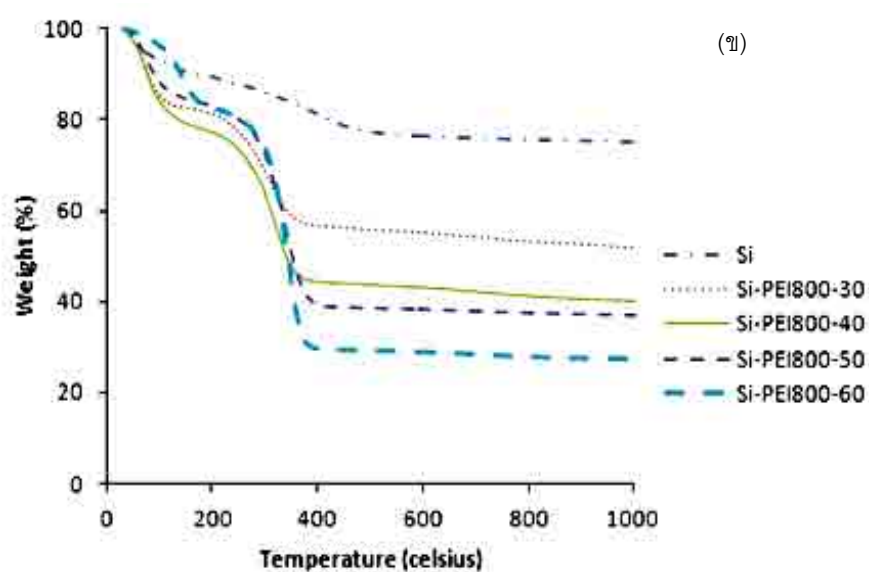
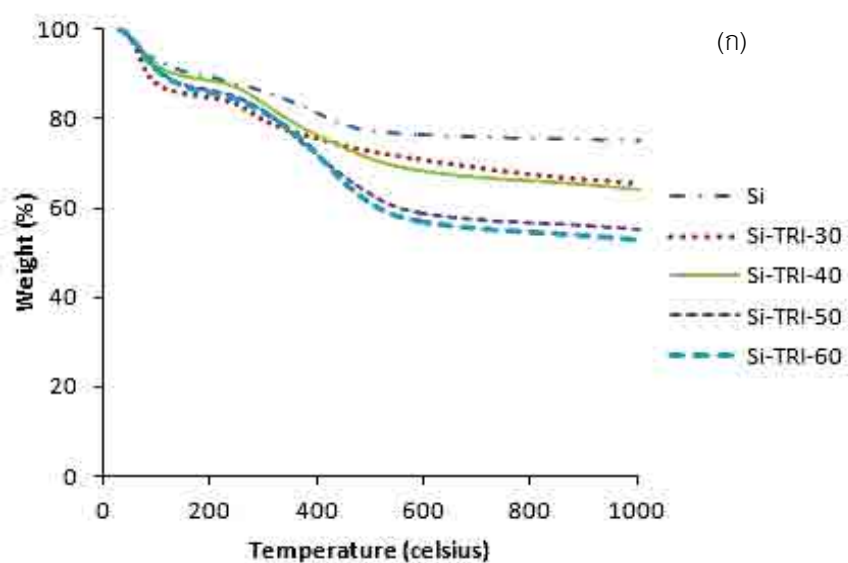
#### 4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA)

ภาพที่ 4.7ก. แสดงรูปแบบการสลายตัวของซิลิกาเซโรเจลและตัวดูดซับ Si-TRI ที่มีปริมาณเอมีนแตกต่างกัน จากกราฟตัวดูดซับ Si (ไม่มีเอมีน) มีการสลายตัวออกเป็น 3 ช่วงคือ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นช่วงการสลายตัวของน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 100-450 องศาเซลเซียส เป็นช่วงการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิลบนซิลิกาเซโรเจล ที่สลายตัวลงอย่างช้า ๆ ถึงที่อุณหภูมิมากกว่า 450 องศาเซลเซียส เป็นส่วนของซิลิกาที่ไม่สลายตัวอีก สำหรับตัวดูดซับ Si-TRI ได้วิเคราะห์เปรียบเทียบการสลายตัวกับเอมีนที่ไม่ผสมซิลิกาเซโรเจล (TRI-100) (ภาคผนวก ง. ภาพที่ ง.1) สามารถแบ่งช่วงการสลายตัวของ Si-TRI ได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียของน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 110-500 องศาเซลเซียส เป็นช่วงการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิลและไตรเอมีน และช่วงอุณหภูมิมากกว่า 500 องศาเซลเซียส เป็นส่วนที่ไม่สลายตัวของซิลิกาเซโรเจล

ภาพที่ 4.7ข. แสดงรูปแบบการสลายตัวของตัวดูดซับ Si-PEI ที่มีปริมาณแตกต่างกัน วิเคราะห์เปรียบเทียบการสลายตัวกับพอลิเอมีนที่ไม่ผสมซิลิกาเซโรเจล (PEI-100) (ภาคผนวก ง. ภาพที่ ง.2) สามารถแบ่งช่วงการสูญเสียของ Si-PEI ได้คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นช่วงการสลายตัวของน้ำ ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียส เป็นช่วงสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิลและพอลิเอมีน และช่วงอุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส เป็นส่วนที่ไม่สลายตัวของซิลิกาเซโรเจล

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวดูดซับที่เตรียมได้ พบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wittoon และคณะ ศึกษาการเตรียมซิลิกาเซโรเจลให้มีองค์ประกอบของหมู่ไฮดรอกซิลสูงจากโซเดียมซิลิเกต โดยใช้เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [20] และ Huang และคณะ ศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาต่อซิลิกาเซโรเจล [21]

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน เป็นเหตุผลหนึ่งของการเลือกอุณหภูมิในการคืนสภาพตัวดูดซับ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสลายตัวของตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับไม่สามารถกลับมาดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อีก ดังนั้นควรใช้อุณหภูมิในการคืนสภาพไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส และเนื่องจากมีความชื้นสะสมอยู่ในตัวดูดซับจำเป็นต้องถูกกำจัดออกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



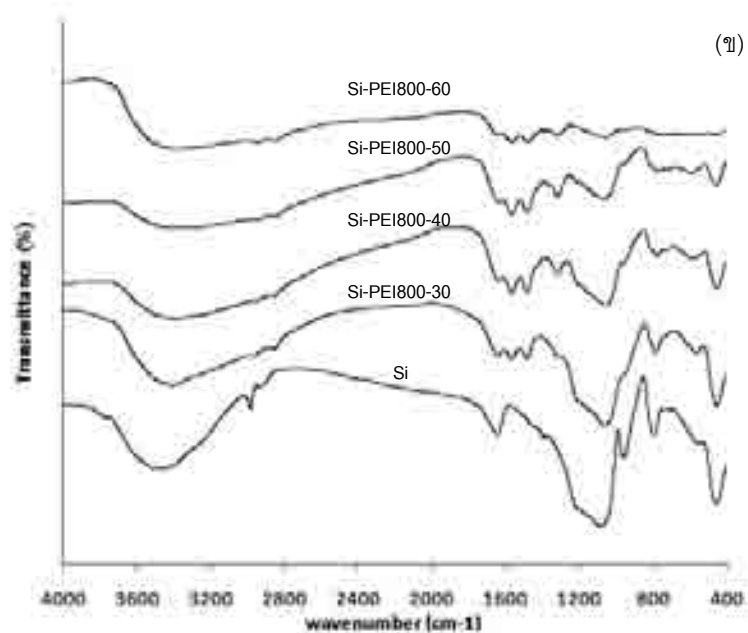
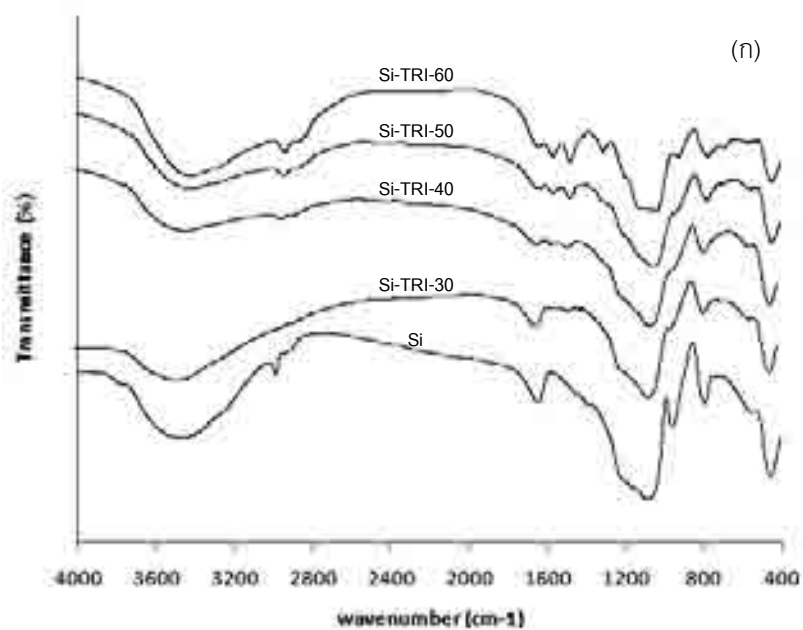
ภาพที่ 4.7 รูปแบบการสลายตัวของตัวดูดซับ, (ก) รูปแบบการสลายตัวของซิลิกาเซโรเจล และตัวดูดซับ Si-TRI ที่มีปริมาณไตรเอมีนแตกต่างกัน, (ข) รูปแบบการสลายตัวของตัวดูดซับ Si-PEI ที่มีปริมาณพอลิเอมีนแตกต่างกัน

#### 4.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล (Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FT-IR)

การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุลของสารด้วยเทคนิค FT-IR ภาพที่ 4.8ก แสดงโครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ Si-TRI ที่มีปริมาณเอมีนแตกต่างกัน สำหรับตัวดูดซับ Si พบว่าบริเวณ wave number  $1640\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะของวงประกอบของน้ำ  $940\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะของหมู่ไฮดรอกซิล ช่วง wavenumber  $1200, 800$  และ  $400\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะของพันธะไฮดรอกซิล (Si-O-Si) ที่ wavenumber  $2900\text{ cm}^{-1}$  แสดงลักษณะของ  $-\text{CH}_2$  เมื่อเติมเอมีนลงบนซิลิกาเซโรเจลพบว่าหมู่ไฮดรอกซิลหายไป และปรากฏหมู่ของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิขึ้นที่ wavenumber  $1600$  และ  $1500\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ

ภาพที่ 4.8ข. แสดงโครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ Si-PEI800 ที่มีปริมาณพอลิเอมีนแตกต่างกัน ลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่พบเป็นเช่นเดียวกับตัวดูดซับ Si-TRI จากภาพที่ 4.8ก. สำหรับตัวดูดซับ Si-PEI800 พบปริมาณหมู่เอมีนที่ wave number  $1600$  และ  $1500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงลักษณะของเอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิ ตามลำดับ ชัดเจนกว่าตัวดูดซับ Si-TRI เพราะพอลิเอมีนมีปริมาณของเอมีนในโมเลกุลมากกว่า TRI

จากการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับที่เตรียมได้ พบว่าผลที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [12], Huang และคณะ [15] และ Chen และคณะ [19]



ภาพที่ 4.8 โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ, (ก) โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ Si-TRI ที่มีปริมาณไตรเอมีนแตกต่างกัน, (ข) โครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับ Si-PEI ที่มีปริมาณพอลิเอมีนแตกต่างกัน



## 4.2 การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

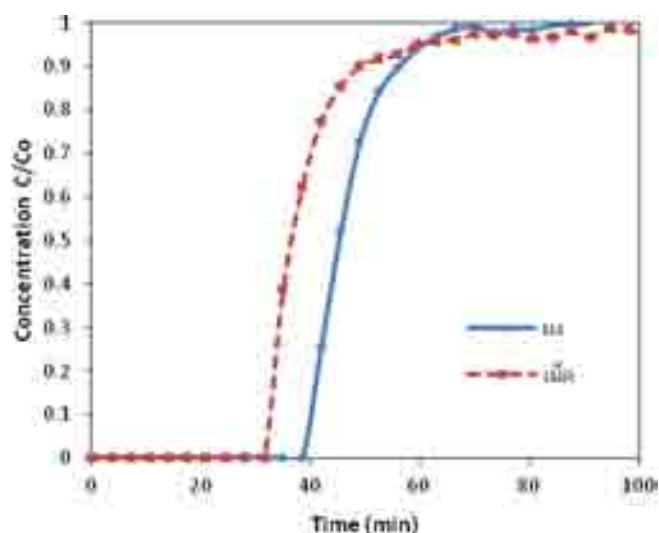
### 4.2.1 ผลของลักษณะตัวดูดซับ

เพื่อเปรียบเทียบลักษณะของตัวดูดซับต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่มีลักษณะแบบเม็ดและแบบผง ภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะของตัวดูดซับ Si-TRI-26 แบบผงและแบบเม็ดที่เตรียมได้



ภาพที่ 4.9 ลักษณะของตัวดูดซับที่เตรียมได้ (ก) ตัวดูดซับ Si-TRI-26 แบบผง, (ข) ตัวดูดซับ Si-TRI-26 แบบเม็ด

ภาพที่ 4.10 และ ตารางที่ 4.2 แสดงความสามารถของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตราไหลแก๊ส 20 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ของตัวดูดซับ Si-TRI-26 แบบผงและเม็ด (1.6 มิลลิเมตร) พบว่าตัวดูดซับทั้งสองลักษณะสามารถดูดซับไฮโดรเจนได้ โดยไม่มีความดันลดเกิดขึ้นในระบบ ที่อัตราไหลแก๊สคงที่ค่าเดียวกัน ตัวดูดซับแบบผงสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างสมบูรณ์เป็นเวลา 38.5 นาที ความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough คือ 0.344 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์อิ่มตัว 0.408 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ในขณะที่ตัวดูดซับแบบเม็ดดูดซับสมบูรณ์ได้ในเวลา 28 นาที ความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough คือ 0.272 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์อิ่มตัว 0.328 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ จะเห็นว่าตัวดูดซับแบบผงมีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าตัวดูดซับแบบเม็ด เนื่องจากในการเตรียมตัวดูดซับแบบเม็ดมีการใช้ความดันสูง (4000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) อัดให้ตัวดูดซับเป็นเม็ด ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวดูดซับลดลง จากตัวดูดซับผง 288.38 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นตัวดูดซับแบบเม็ดที่มีพื้นที่เพียง 111.96 ตารางเมตรต่อกรัม ดังนั้นในการทดลองระบบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ จึงเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีลักษณะผงในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ ทั้งนี้เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงผลกระทบจากการขึ้นรูปตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับในการศึกษาชนิดของตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์



ภาพที่ 4.10 ผลของลักษณะของตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-TRI-26 ภาวะ: ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ไนแกสไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 20 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-TRI-26 ที่มีลักษณะแตกต่างกัน

Sample	Breakthrough Time (min)	Saturation Time (min)	Cap(BT)* (mmol/g-sorb)	Cap(S)** (mmol/g-sorb)
Powder	38.5	112.0	0.344	0.408
Grain	28.0	91.0	0.272	0.328

ภาวะทดลอง: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ไนแกสไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 20 มิลลิลิตรต่อนาที

\* Cap (BT) คือ Breakthrough capacity

\*\* Cap (S) คือ Saturation capacity

#### 4.2.2 ผลของชนิดของเอมีน

ภาพที่ 4.11 และตารางที่ 4.3 แสดงความสามารถของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยตัวดูดซับที่มีชนิดของเอมีนที่แตกต่างกัน ที่ภาวะความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตร ต่อนาที ภาพที่ 4.11 เมื่อพอลิเอมีนมีมวลโมเลกุล หรือ ระดับพอลิเมอไรเซชัน (Degree of polymerization) มากขึ้น ตัวดูดซับสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เป็นเวลานานขึ้น โดยตัวดูดซับที่มีพอลิเอมีนมวลโมเลกุลสูง Si-PEI25000-30 มีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough 0.248 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ และมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อิ่มตัว 0.326 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ในขณะที่ตัวดูดซับ Si-TRI-30, Si-PEI800-30 และ Si-PEI2000-30 มีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough 0.116, 0.145 และ 0.099 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ เนื่องจากระดับพอลิเมอไรเซชันที่สูงขึ้นของพอลิเอมีน ส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เพิ่มขึ้น เพราะอันตรกิริยาระหว่างเอมีนและไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ 1.) ไฮโดรเจนอะตอม 2 อะตอม ในไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 โมเลกุล เกิดอันตรกิริยากับไนโตรเจน 1 อะตอม ในพอลิเอมีน และ 2.) ไฮโดรเจนอะตอม 2 อะตอม ในไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 โมเลกุล เกิดอันตรกิริยากับไนโตรเจน 2 อะตอม ในพอลิเอมีน 2 กลุ่ม (แสดงในภาคผนวก จ.)

#### 4.2.3 ผลของปริมาณของเอมีนในตัวดูดซับ

ภาพที่ 4.12 และตารางที่ 4.3 แสดงความสามารถของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที ภาพที่ 4.12ก. แสดงความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับ Si-TRI ปริมาณไตรเอมีน ที่เติมคือ 0, 30, 40, 50 และ 60 % โดยมวล มีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough ได้ 0.004, 0.116, 0.116, 0.212 และ 0.145 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ และมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อิ่มตัวคือ 0.01, 0.12, 0.136, 0.291 และ 0.271 ตามลำดับ จากผลการดูดซับที่ได้พบว่า ตัวดูดซับซิลิกาเซโรเจลที่ไม่มีเอมีน (Si) ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ต่ำมาก เนื่องจากมีแรงดูดซับทางกายภาพที่ต่ำมาก [19] สำหรับการเติม TRI 30–50 % โดยมวล ตัวดูดซับมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นทั้งที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ตามปริมาณเอมีนบนตัวรองรับเพิ่มขึ้น ที่การเติม TRI 60% โดยมวล (Si-TRI-60) มีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough และความสามารถที่อิ่มตัวต่ำกว่าการเติม TRI 50% โดยมวล (Si-TRI-50)

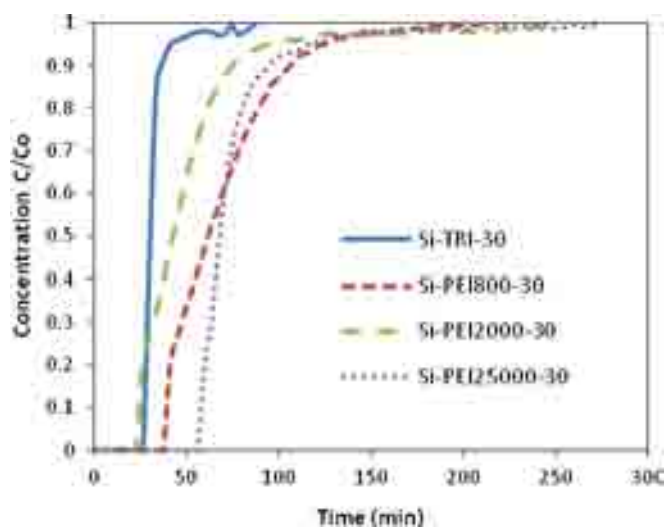
ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่เตรียมได้

Sample	Breakthrough Time (min)	Saturation Time (min)	Cap(BT)* (mmol/g-sorb)	Cap(S)** (mmol/g-sorb)
Si	1.5	48.2	0.004	0.010
Si-TRI-30	26.0	92.6	0.116	0.120
Si-TRI-40	26.0	96.6	0.116	0.136
Si-TRI-50	55.6	162.6	0.212	0.291
Si-TRI-60	32.5	287.6	0.145	0.271
Si-PEI800-30	32.5	214.2	0.145	0.257
Si-PEI800-40	53.5	440.2	0.234	0.385
Si-PEI800-50	100.5	538.2	0.449	0.629
Si-PEI2000-30	22.2	247.2	0.099	0.200
Si-PEI25000-30	55.6	276.4	0.248	0.326

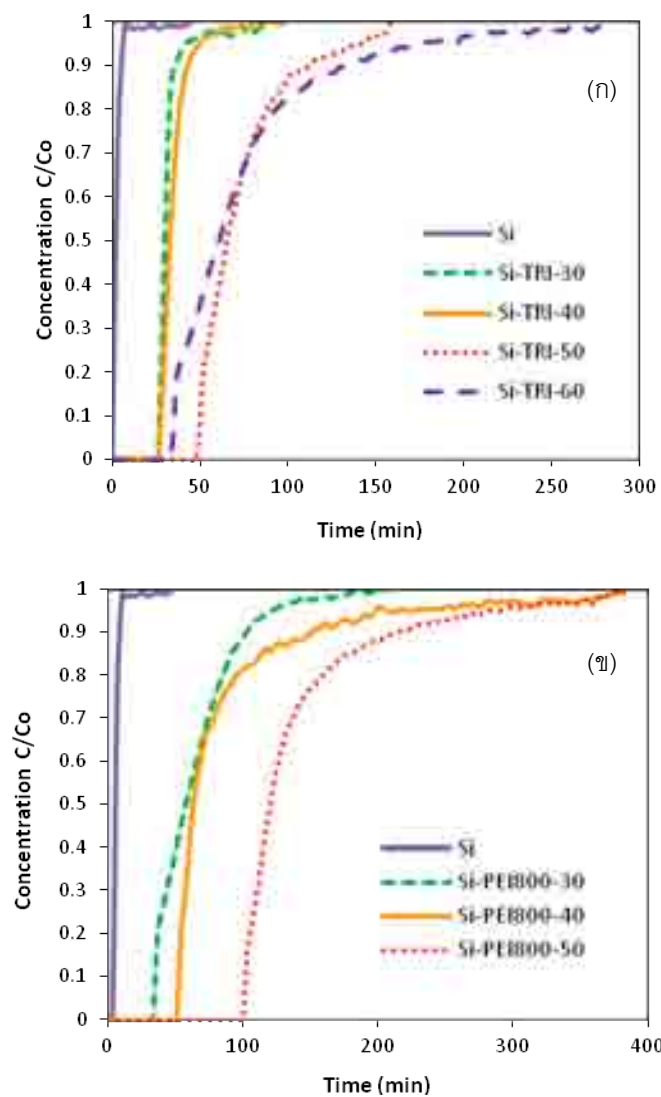
ภาวะทดลอง: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

\* Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

\*\* Cap(S) คือ Saturation capacity



ภาพที่ 4.11 ผลของชนิดเอมีนต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-TRI-30, Si-PEI800-30, Si-PEI2000-30 และ Si-PEI25000-30 ภาวะ: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที



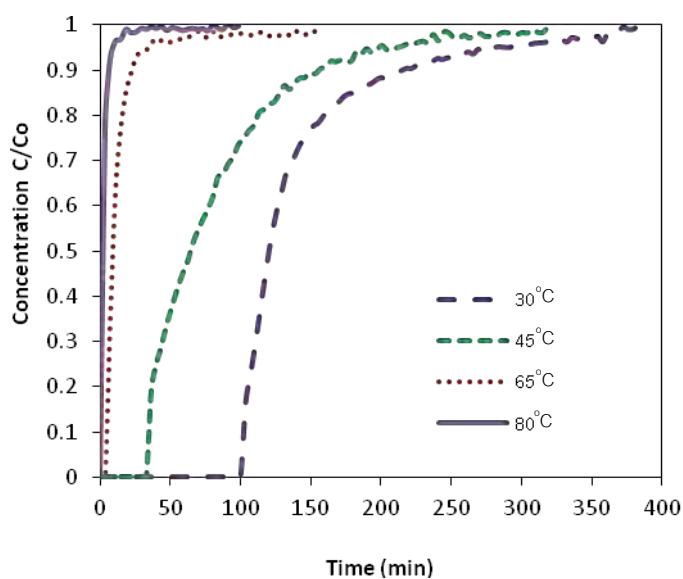
ภาพที่ 4.12 ผลของปริมาณเอมีนต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ (ก) Si-TRI, (ข) Si-PEI ภาวะ: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊ส ไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะได้อธิบายไว้ว่า เอมีนที่เติมลงไปกระจายตัวได้ดีบนตัวรองรับซิลิกาเซโรเจล ซึ่งสามารถเติมเอมีนได้มากที่สุดที่ 50% โดยมวล แต่เมื่อเติมเอมีนลงไปเพิ่ม (TRI 60% โดยมวล) เอมีนจะเข้าไปบดบังรูพรุนของตัวรองรับซิลิกา

ภาพที่ 4.12ข. แสดงความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับ Si-PEI800 ปริมาณพอลิเอมีนที่เติมคือ 30, 40 และ 50 % โดยมวล ตัวดูดซับมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough ได้ 0.145, 0.234 และ 0.449 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ และมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อิ่มตัวได้ 0.257, 0.385 และ 0.629 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ที่การเติม PEI 30–50 % โดยมวล ตัวดูดซับมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เพิ่มขึ้นทั้งที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ตามปริมาณเอมีนบนตัวรองรับเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลการดูดซับด้วยตัวดูดซับ Si-TRI โดยตัวดูดซับ Si-PEI800 ที่สามารถเติมพอลิเอมีนลงไปได้สูงสุดคือ Si-PEI800-50 เนื่องจากตัวดูดซับที่เติม PEI 60% โดยมวล (Si-PEI800-60) ไม่สามารถทำการทดลองการดูดซับได้ เพราะเมื่อเติมพอลิเอมีนมากเกินไปที่ซิลิกาเซโรเจลรับได้ เกิดการเสียสภาพลักษณะของ Si-PEI800-60 แสดงดังภาคผนวก ข. ภาพที่ ข.1 จากการทดลองในส่วนนี้สามารถเลือกตัวดูดซับที่สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากที่สุดคือ Si-PEI800-50

#### 4.2.4 ผลของอุณหภูมิ

ภาพที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.4 แสดงความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 30, 45, 65 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ภาวะความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 30-80 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ทั้งที่ความสามารถการดูดซับที่ Breakthrough และความสามารถการดูดซับอิ่มตัวลดลง แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิจึงมีความสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์อย่างมาก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์นานที่สุดเป็นเวลา 100 นาที มีความสามารถดูดซับที่ Breakthrough และความสามารถดูดซับอิ่มตัว 0.449 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ และ 0.629 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าความสามารถดูดซับที่ 80 องศาเซลเซียส 200 เท่า ซึ่งผลการทดลองใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [18] และ Chen และ คณะ [19] เนื่องจากกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการคายความร้อน



ภาพที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50

Temperature (°C)	Breakthrough Time (min)	Saturation Time (min)	Cap(BT)* (mmol/g-sorb)	Cap(S)** (mmol/g-sorb)
30	100.5	538.2	0.449	0.629
45	34.5	326.1	0.154	0.344
65	4.5	158.8	0.020	0.059
80	0.5	83.9	0.002	0.033

ภาวะทดลอง: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

\* Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

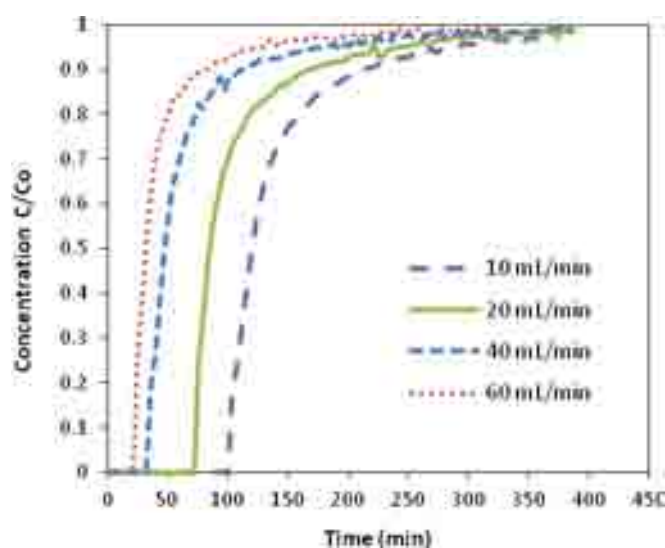
\*\* Cap(S) คือ Saturation capacity

#### 4.2.5 ผลของอัตราไหลแก๊ส

ภาพที่ 4.14 และตาราง 4.5 แสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ที่อัตราไหลแตกต่างกัน ได้แก่ 10, 20, 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ภาวะความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อัตราไหลแก๊สต่ำ 10 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวดูดซับ Si-PEI800-50 มีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough ได้นานที่สุดเป็นเวลา 101 นาที ในขณะที่อัตราไหลสูง 60 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวดูดซับมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough ได้เป็นเวลา 25 นาที แสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราไหลแก๊สลดลงตัวดูดซับสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อัตราไหลต่ำจะเป็นการเพิ่มเวลาให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์แพร่เข้าไปภายในและมี Retention Time อยู่ในตัวดูดซับได้นานขึ้น ดังนั้นระยะเวลาของการสัมผัสมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไว้ โดยที่ความเร็วของไฮโดรเจนซัลไฟด์ผ่านหน่วยดูดซับช้าลงหมายถึง การมีโอกาสที่มากขึ้นของโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ชนกับตำแหน่งที่สามารถดูดซับได้ (High Probability) ทันทีที่โมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกจับไว้ แก๊สจะคงอยู่ที่ผิวผนังจนกระทั่งภาวะทางกายภาพของระบบถูกเปลี่ยนไปเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการดูดซับมากกว่า 90%

อย่างไรก็ตามจากการคำนวณความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่าที่อัตราไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวดูดซับ Si-PEI800-50 มีความสามารถการดูดซับทั้งที่ Breakthrough และความสามารถที่อิ่มตัวมากที่สุดคือ 0.665 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ และ 0.975 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ขณะที่อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที มีความสามารถการดูดซับที่ Breakthrough และความสามารถที่อิ่มตัว 0.449 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ และ 0.629 มิลลิโมลต่อกรัมของตัวดูดซับ ซึ่งต่ำกว่าที่อัตราไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ดังนั้นอัตราไหลที่เหมาะสมต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 คือ 20 มิลลิลิตรต่อนาที





ภาพที่ 4.14 ผลของอัตราการไหลแก๊สต่อประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตราไหลแตกต่างกัน ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ที่อัตราไหลแตกต่างกัน

Flow rate (mL/min)	Breakthrough Time (min)	Saturation Time (min)	Cap(BT)* (mmol/g-sorb)	Cap(S)** (mmol/g-sorb)
10	100.5	538.5	0.449	0.629
20	75.5	391.9	0.665	0.975
40	34.0	391.9	0.607	1.167
60	25	342.0	0.549	1.215

ภาวะทดลอง: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

\* Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

\*\* Cap(S) คือ Saturation capacity

### 4.3 การศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ

#### 4.3.1 ผลของอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนต่อการคืนสภาพตัวดูดซับ

ภาพที่ 4.15 แสดงการคายการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเข้มข้น 99.999 % โดยปริมาตร ไกลไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจนแตกต่างกันคือ 10, 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ที่อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ไฮโดรเจนซัลไฟด์คาย (Desorption) ออกจากตัวดูดซับปริมาณมาก ขณะที่อัตราไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที ไฮโดรเจนซัลไฟด์คายออกมาได้น้อยกว่า เมื่อพิจารณาภาพรวม พบว่าเมื่อ ณ เวลาเดียวกัน ในช่วง 10 นาทีแรกของการคายการดูดซับ อัตราไหลแก๊สไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ตัวดูดซับสามารถคายไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้หลุดออกจากตัวดูดซับได้น้อยลง และมีอัตราการคายการดูดซับสูง (Rate of Adsorption) หลังจากช่วงดังกล่าว คือ 10-30 นาที แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์คายออกจากตัวดูดซับอย่างช้า ๆ ด้วยอัตราการคายต่ำ เนื่องจากแก๊สเฉื่อยเข้าไปลดความดันย่อยของไฮโดรเจนซัลไฟด์ โมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงหลุดออกจากผิวเข้าไปในกระแสวิกฤต โดยแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่คายออกในช่วงแรกเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแก๊สกับแก๊ส ขณะที่แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่คายออกในช่วงหลังเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแก๊สกับตัวดูดซับ ซึ่งจำเป็นต้องให้ความร้อนช่วยในส่วนนี้

#### 4.3.2 อุณหภูมิต่อการคืนสภาพตัวดูดซับ

ภาพที่ 4.16-4.18 แสดงการคายการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเข้มข้น 99.999 % โดยปริมาตร ไกลไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 10 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิการคายเริ่มต้นแตกต่างกันคือ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส

การคืนสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิการคายเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.16) มีการเปลี่ยนอุณหภูมิ 4 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก ที่อุณหภูมิการคาย 30 องศาเซลเซียส จะเห็นว่า ในช่วงแรกไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกขับออกจากตัวดูดซับอย่างช้า ๆ ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์คายได้น้อย จากที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ 10000 ppm ลดลงจนถึง 5575 ppm เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขั้นตอนที่สอง การเพิ่มอุณหภูมิการคายเป็น 50 องศาเซลเซียส พบว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์หลุดออกจากตัวดูดซับสูงถึง 63303 ppm แล้วถูกขับออกจากตัวดูดซับอย่างรวดเร็วจนไฮโดรเจนซัลไฟด์หมดจากตัวดูดซับวัดค่าได้ 0 ppm ที่นาทีที่ 137 ขั้นตอนที่สาม เพิ่มอุณหภูมิเป็น 65 องศาเซลเซียส

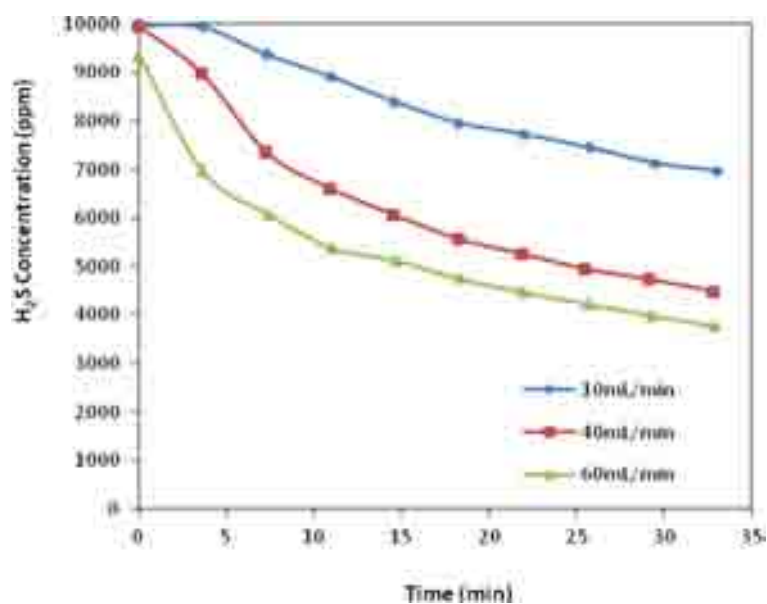
สามารถวัดปริมาณของไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 7130 ppm ปล่อยไนโตรเจนผ่านตัวดูดซับเป็นเวลา 20 นาที วัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เป็น 0 ppm ตามด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส วัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 2339 ppm ปล่อยไนโตรเจนจนกระทั่งวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เป็น 0 ppm ใช้เวลาในการคืนสภาพตัวดูดซับทั้งหมด 165 นาที

การคืนสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิการคายเริ่มต้น 40 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.17) มีการเปลี่ยนอุณหภูมิ 4 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส สามารถวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้สูงถึง 50668 ppm เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง วัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 8062 ppm ขั้นตอนที่สอง การเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50 องศาเซลเซียส สามารถวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้สูงถึง 26687 ppm จนถึงนาที่ที่ 119 วัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 1768 ppm ขั้นตอนที่สาม เพิ่มอุณหภูมิเป็น 65 องศาเซลเซียส ที่นาที่ที่ 122 วัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 6188 ppm ปล่อยไนโตรเจนผ่านตัวดูดซับ 12 นาที วัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 0 ppm ตามด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส ที่นาที่ที่ 140 วัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 2841 ppm จนกระทั่งวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 0 ppm ใช้เวลาในการคืนสภาพตัวดูดซับ 140 นาที

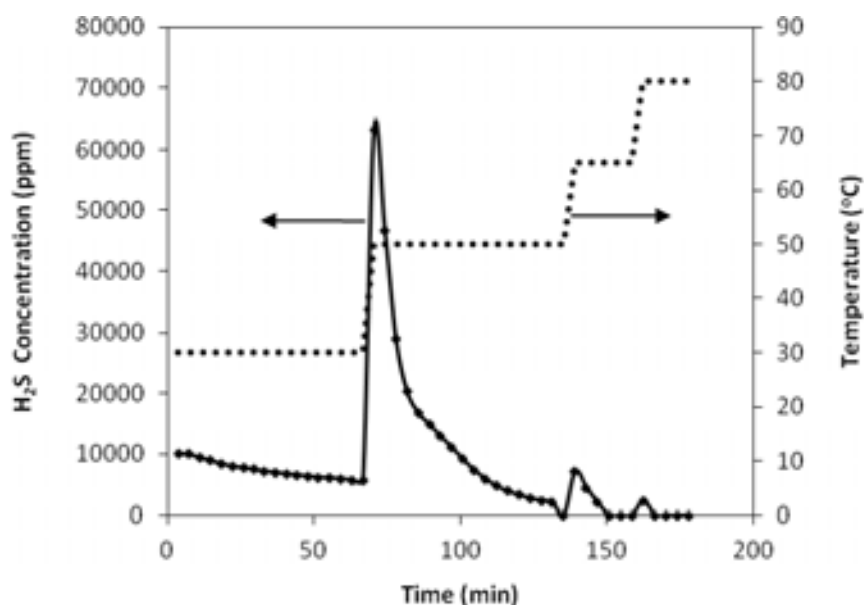
การคืนสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิการคายเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 4.18) มีการเปลี่ยนอุณหภูมิ 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรก ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส สามารถวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ออกจากตัวดูดซับได้สูงถึง 73081 ppm จนกระทั่งวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เป็น 0 ppm ตามด้วยการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 80 องศาเซลเซียส นาที่ที่ 89 วัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 1638 ppm จนกระทั่งวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ 0 ppm รวมเวลาที่ใช้ในการคืนสภาพเป็น 95 นาที

อุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการคืนสภาพตัวดูดซับ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความดันไอของสารที่ต้องการดูดซับไว้นั้นมีพลังงานเพียงพอที่จะเอาชนะแรงดึงดูด Van der Waals ได้และย้ายกลับสู่เฟสแก๊ส ส่วนโมเลกุลที่อยู่ในเฟสแก๊สเรียบร้อยแล้วจะยังคงอยู่ ณ เฟสแก๊สนั้น ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในแต่ละขั้นตอน จึงสามารถวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เรื่อย ๆ จนกว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกขับออกจากตัวดูดซับหมด

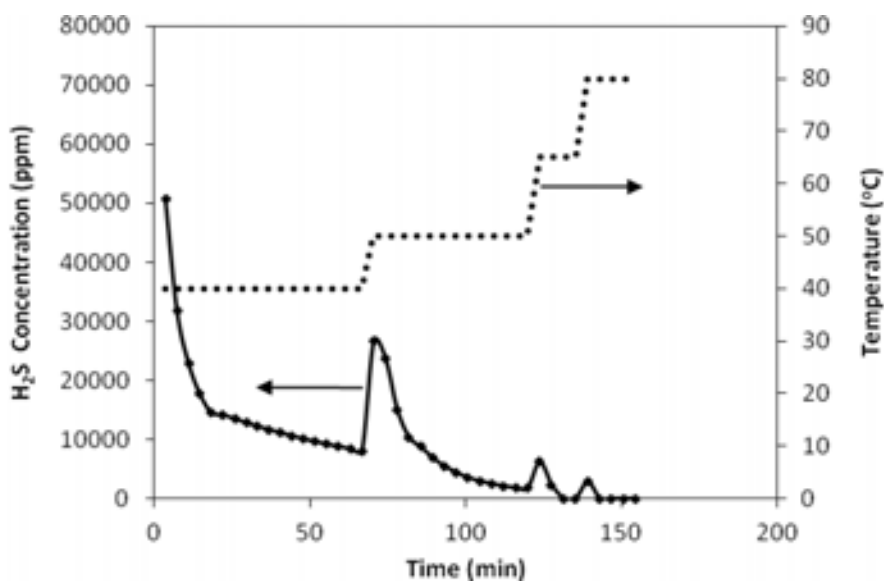
จากการศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ พบว่า ตัวดูดซับ Si-PEI800-50 สามารถคืนสภาพตัวดูดซับได้ โดยภาวะในการคืนสภาพได้คือ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 10 มิลลิลิตรต่อนาที



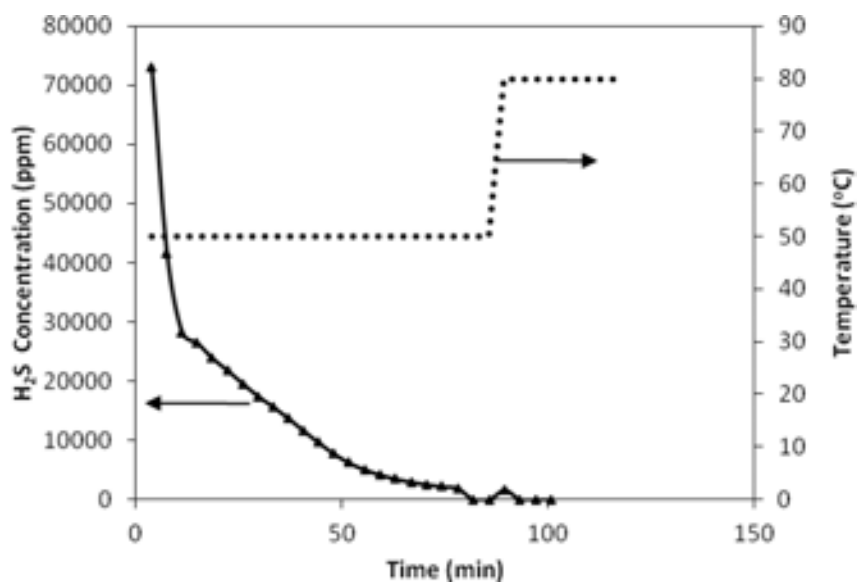
ภาพที่ 4.15 การคายการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตราไหลแก๊สแตกต่างกัน ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.16 การคายการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิการคายเริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่ออนาที



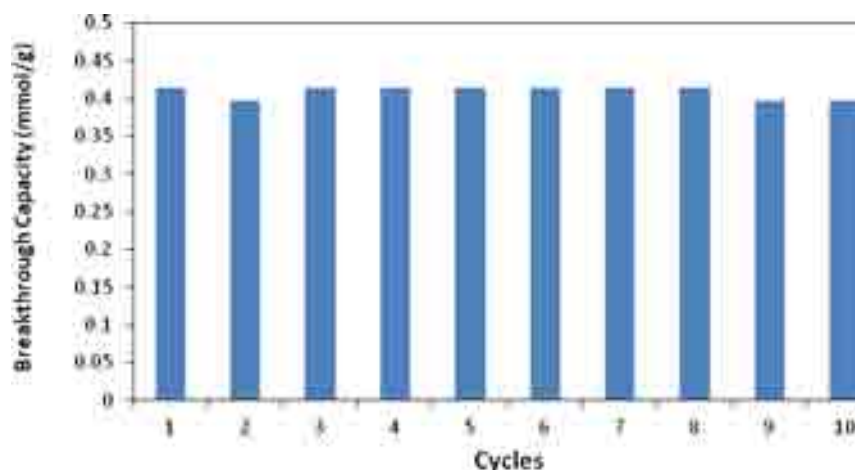
ภาพที่ 4.17 การคายการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิการคายเริ่มต้น 40 องศาเซลเซียส ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่ออนาที



ภาพที่ 4.18 การคายการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิการคายเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่ออนาที

#### 4.4 เสถียรภาพของตัวดูดซับ

การนำตัวดูดซับกลับมาใช้ได้ใหม่ถือเป็นการใช้วัสดุให้คุ้มค่า ในงานวิจัยได้ศึกษาถึงเสถียรภาพของตัวดูดซับ โดยนำตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ทดสอบรอบของการดูดซับจำนวน 10 รอบ และตัวดูดซับที่คืนสภาพแต่ละรอบด้วยไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 นาที แสดงดังภาพที่ 4.19 จะเห็นว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้โดยที่ประสิทธิภาพไม่เปลี่ยนแปลงใน 8 รอบแรก โดยมีความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough 0.413 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ และความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 0.600 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ส่วนในสองรอบสุดท้าย พบว่า ตัวดูดซับมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough 0.397 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ และมีความสามารถดูดซับที่อิ่มตัวประมาณ 0.600 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ เช่นเดียวกับ 8 รอบแรก จากการทดลอง พบว่า ในรอบที่ 8 และ 9 ตัวดูดซับสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ลดลง อาจเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิในการคืนสภาพตัวดูดซับต่ำ ทำให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ไม่สามารถหลุดออกจากตัวดูดซับได้หมด ทำให้การดูดซับในรอบต่อมา (รอบที่ 8) ไม่สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้เท่ากับการดูดซับในรอบก่อน ประสิทธิภาพการดูดซับจึงลดต่ำลงเล็กน้อย จากการทดลองในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับ Si-PEI800-50 สามารถคืนสภาพตัวดูดซับได้ และนำกลับมาดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ใหม่อย่างมีเสถียรภาพ



**ภาพที่ 4.19** รอบของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะดูดซับ: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที ภาวะการคาย: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 100 นาที

**ตารางที่ 4.6** ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50

Cycle	Breakthrough Time (min)	Saturation Time (min)	Cap(BT)* (mmol/g-sorb)	Cap(S)** (mmol/g-sorb)
1	92.6	522.6	0.413	0.600
2	88.8	548.6	0.397	0.592
3	92.6	530.2	0.413	0.594
4	92.6	515.4	0.413	0.613
5	92.6	515.4	0.413	0.594
6	92.6	434.7	0.413	0.583
7	92.6	541.2	0.413	0.604
8	92.6	508.0	0.413	0.605
9	88.8	456.7	0.397	0.600
10	88.8	522.7	0.397	0.579

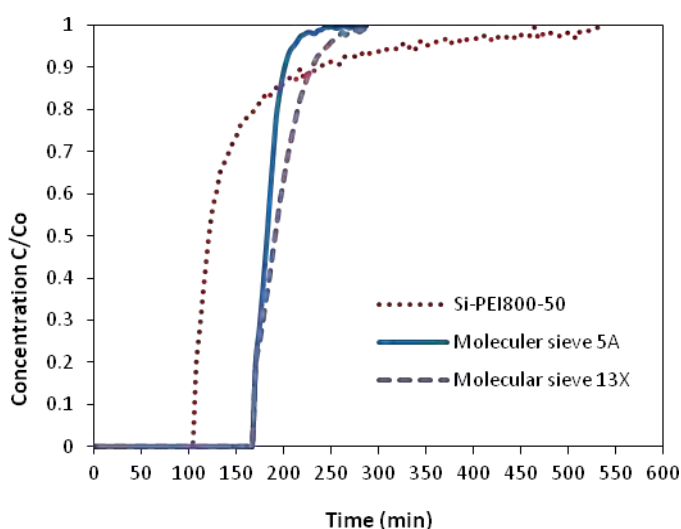
ภาวะดูดซับ: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม  
 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที  
 ภาวะการคาย: ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% โดยปริมาตร น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อัตราไหล 10 มิลลิลิตร  
 ต่อนาที เป็นเวลา 100 นาที

\* Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

\*\* Cap(S) คือ Saturation capacity

#### 4.5 การเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

การเปรียบเทียบตัวดูดซับ Si-PEI800-50 กับตัวดูดซับในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ Molecular sieve 5A และ Molecular sieve 13X ที่ภาวะความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังภาพที่ 4.18 และตารางที่ 4.7 พบว่า ตัวดูดซับ Molecular sieve 5A และ Molecular sieve 13X มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough มากที่สุดคือ 0.743 มิลลิโมลต่อกรัม ขณะที่ตัวดูดซับ Si-PEI800-50 มีประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์คือ 0.449 มิลลิโมลต่อกรัม อาจเนื่องมาจาก Molecular sieves มีตำแหน่งดูดซับ (Adsorption site) มากกว่าตัวดูดซับที่เตรียมได้



**ภาพที่ 4.18** ความสามารถของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 เปรียบเทียบกับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ ภาวะ: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที



**ตารางที่ 4.7** ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50  
เปรียบเทียบกับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

Sample	Breakthrough Time (min)	Saturation Time (min)	Cap(BT)* (mmol/g-sorb)	Cap(S)** (mmol/g-sorb)
Si-PEI800-50	100.5	538.5	0.449	0.629
Molecular sieve 5A	166	290	0.743	0.743
Molecular sieve 13X	166	298	0.743	0.815

ภาวะทดลอง: ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม  
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที

\* Cap(BT) คือ Breakthrough capacity

\*\* Cap(S) คือ Saturation capacity

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ซิลิกาดัดแปร การทดลองได้เตรียมตัวดูดซับเอมีนบนซิลิกาเซโรเจล หมู่เอมีนที่ได้ศึกษาคือ Triamine และ Polyethyleneimine (มวลโมเลกุล 800, 2,000 และ 25,000) โดยได้ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ลักษณะของตัวดูดซับแบบผงและอัดเม็ด ชนิดของเอมีนบนซิลิกาเซโรเจล ปริมาณของเอมีนบนซิลิกาเซโรเจล 30-60% โดยมวล คุณสมบัติการดูดซับ 30-80 องศาเซลเซียส และ อัตราไหลแก๊ส 10-60 มิลลิลิตรต่อนาที นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ เสถียรภาพ และเปรียบเทียบความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ วิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD) การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยวิธีบีเอที (Brunauer Emmett Teller: BET) การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Scanning Electron Microscope: SEM) การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิคทีจีเอ (Thermogravimetric Analysis: TGA) และ การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล (Fourier Transform InfraRed Spectroscopy: FT-IR)

##### 1. ผลของลักษณะของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับแบบผงมีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ที่ Breakthrough 0.362 มิลลิโมลต่อกรัมต่อดูดซับ ซึ่งมากกว่าตัวดูดซับแบบอัดเม็ด (0.272 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ) โดยตัวดูดซับทั้งสองลักษณะไม่ทำให้เกิดความดันลดต่อระบบ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวดูดซับแบบผงในการทดลอง

##### 2. ผลของชนิดของเอมีนบนซิลิกาเซโรเจล Si-PEI

พอลิเอมีนที่มีมวลโมเลกุลมากขึ้น ส่งผลให้ตัวดูดซับดูดซับไฮโดรซัลไฟด์ได้มากขึ้น

##### 3. ผลของปริมาณเอมีนบนซิลิกาเซโรเจล Si-TRI และ Si-PEI

ตัวดูดซับที่มีปริมาณเอมีนมากขึ้น ส่งผลให้ตัวดูดซับดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากขึ้น ซึ่งปริมาณเอมีนเหมาะสมคือ 50% โดยมวล คือ Si-PEI800-50

4. ผลของอุณหภูมิ  
ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ตัวดูดซับสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ลดลง อุณหภูมิเหมาะสมที่ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้มากคือ 30 องศาเซลเซียส
5. ผลของอัตราไหลแก๊ส  
ที่อัตราไหลเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกดูดซับลดลง โดยที่อัตราไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough ได้นานที่สุด
6. การคืนสภาพตัวดูดซับ  
การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์คายออกจากตัวดูดซับได้มากขึ้น และเพื่อป้องกันตัวดูดซับสลายตัวไป ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมต่อการคืนสภาพคือ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 10 มิลลิลิตรต่อนาที
7. เสถียรภาพตัวดูดซับ  
ตัวดูดซับ Si-PEI800-50 มีความสามารถต่อการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ สามารถคืนสภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
8. การเปรียบเทียบความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้ และตัวดูดซับเชิงพาณิชย์  
ตัวดูดซับ Si-PEI800-50 มีความสามารถดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ทั้งที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวต่ำกว่าตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สชีวภาพ ด้วยกระบวนการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง
2. ศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้นต่างๆ ด้วยกระบวนการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง
3. ศึกษาการดูดซับแก๊สผสมไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยกระบวนการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง
4. ศึกษาการคายการดูดซับโดยใช้อากาศ ด้วยกระบวนการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง

## รายการอ้างอิง

- [1] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน. โครงการส่งเสริมเทคโนโลยีแก๊สชีวภาพ. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://biogas.erd.or.th/biography.php> [20 มิถุนายน 2554]
- [2] ฤกษ์ฤทธิ เคนหาราช. การผลิตพลังงานจากชีวมวล การผลิตก๊าซชีวภาพจาก น้ำเสียโรงเลื่อยสัตว์. [ออนไลน์]. 2548. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th> [11 มีนาคม 2555]
- [3] โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมแก๊ส. [ออนไลน์]. 2535. แหล่งที่มา: [www2.diw.go.th](http://www2.diw.go.th). [18 กรกฎาคม 2554]
- [4] Lu, J. G. Zheng, Y. F. and He, D. L. Selective absorption of H<sub>2</sub>S 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.
- [5] Prosep. Treat Natural Gas to Pipeline CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Specifications with a MEMBRANE/HIGH-EFFICIENCY SCAVENGER HYBRID SYSTEM. [Online]. 2011. Available from: [www.prosep.com](http://www.prosep.com) [24 June 2011]
- [6] Eurofilm. H<sub>2</sub>S Removal. [Online]. 2009. Available from: <http://www.eurofilm.com>. [24 June 2011]
- [7] Alonso-Vicario A. and others. Purification and upgrading of biogas by pressure swing adsorption on synthetic and natural zeolites. Microporous and Mesoporous Materials. 134 (2010): 100–107.
- [8] Pradthana's Weblog. กระบวนการดูดซับ. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process> [22 มิถุนายน 2554]
- [9] เดชา ฉัตรศิริเวช. กระบวนการดูดซับ. ครั้งที่พิมพ์ 1 .กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [10] จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษฏานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.

- [11] วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. ปฏิกิริยาเร่ง เคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- [12] Wang, X. Ma, X. Sun, L. and Song, C. S. A Nanoporous Polymeric Sorbent for Deep Removal of H<sub>2</sub>S from Gas Mixtures for Hydrogen Purification. Green Chemistry 9 (2007): 695-702.
- [13] Belmabkhout, Y. Weireld, G. D. and Sayari, A. Amine-Bearing Mesoporous Silica for CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S Removal from Natural Gas and Biogas. Langmuir 25 (2009): 13275-13278.
- [14] Jentys, A. Kleestorfer, K. and Vinek, H. Concentration of Surface Hydroxyl Groups on MCM-41. Microporous, Mesoporous and Mater 27 (1999): 321.
- [15] Huang, H. Y. and Yang, R. T. Amine-Grafted MCM-48 and Silica Xerogel as Superior Sorbents for Acidic Gas Removal from Natural Gas. Ind Eng Chem Res 42 (2003): 2427-2433.
- [16] Ma, X. Wang, X. and Song, C. S. Molecular Basket Sorbents for Separation of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S from Various Gas Streams. Journal of the American Chemical Society. 131 (2009): 5777-5783.
- [17] Alonso-Vicario, A. and others. Purification and Upgrading of Biogas by Pressure Swing Adsorption on Synthetic and Natural Zeolites. Microporous and Mesoporous Materials. 134 (2010): 100-107.
- [18] Wang, X. Ma, X. Sun, L. and Song, C. S. Mesoporous-molecular-sieve-supported Polymer Sorbents for Removing H<sub>2</sub>S from Hydrogen Gas Streams. Top. Catal. 49 (2008): 108-117.
- [19] Chen, Q.J. Fan, F. Long, D. Liang, X. Qiao, W. and Ling, L. Poly(ethyleneimine)-Loaded Silica Monolith with a Hierarchical Pore Structure for H<sub>2</sub>S Adsorptive Removal. Ind. Eng. Chem. Res. 49 (2010): 11408–11414.
- [20] Witoon, T. Tatan, N. Rattanavichian, P. and Chareonpanich, M. Preparation of Silica Xerogel with High Silanol Content from Sodium Silicate and its Application as CO<sub>2</sub> adsorbent. Ceramics International. 37 (2011) 2297-2303.

- [21] Huang, W. L. Liang, K. M. and Gu, S. R. Influence of Calcining Temperature on the Fractal Dimension of Silica Xerogel. Journal of Materials Science Letters. 19 (2000):1681-1683.
- [22] Ruthven, D. M. Principles of Adsorption and Adsorption Processes. John Wiley & Sons, (1984): 29-30.
- [23] Mantell, C. L. Adsorption, Chapter Dehydration of Air and Gases. McGraw-Hill, (1951): 373-380.
- [24] Ruthven, D. M. Principles of Adsorption and Adsorption Processes, Chapter Adsorption Separation Processes. John Wiley & Sons, (1984): 361-375.
- [25] Yang, R. T. Gas Separation By Adsorption Processes, Chapter Pressure-Swing Adsorption: Principles and Processes. Butterworths, (1987): 253-272.
- [26] Mantell, C. L. Adsorption, Chapter Gas-Adsorbent Carbons. McGraw-Hill, (1951:) 163-165.
- [27] Capone, S. V. Air Pollution Engineering Manual, Chapter Dry Cleaning. Van Nostrand Reinhold, (1992): 323-330.
- [28] Turner, M. B. and Crume R. V. Air Pollution Engineering Manual, Chapter Organic Solvent Cleaning. Van Nostrand Reinhold, (1992): 345-360.
- [29] Gas Processors Association. GPSA Engineering Data Book, Chapter Hydrocarbon Treating. Gas Processors Suppliers Association, 11 edition, 21 (1998): 21.16-21.22.
- [30] Gas Processors Association. GPSA Engineering Data Book, Chapter Dehydration. Gas Processors Suppliers Association, 11 edition, 21(1998): 20.38-20.44.
- [31] Ruthven, D. M. Principles of Adsorption and Adsorption Processes, Chapter Adsorption at Low Coverage. John Wiley & Sons, (1984): 43-44.
- [32] Bond, G. C. Heterogeneous Catalysis, Chapter Adsorption on Solid Surfaces. Oxford University Press, 2 edition, (1987): 15-18.
- [33] Ruthven, D. M. Principles of Adsorption and Adsorption Processes, Chapter Monolayer and Multilayer Adsorption. John Wiley & Sons, (1984): 52-55.

- [34] สมชัย อัครทิวา. ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมของปฏิกิริยาเชิงเร่ง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป, 2546.
- [35] ธรรมชาติ มงคลศรี. หลักมูลทางวิศวกรรมปฏิกิริยาตัวเร่ง. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [36] Alvin B. S. and Theadore A. K. Catalyst Manufacture. 2 nd ed. New York : Marcell Dekker, 1995.
- [37] ควบคุมมลพิษ, กรม. เทคโนโลยีด้านการใช้ประโยชน์ของเสีย. [ออนไลน์]. 2547. แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th> [10 มีนาคม 2553].
- [38] นายวุฒิสักดิ์ ประชามอญ. คู่มือการใช้งานเครื่อง XRD. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://www.phys.sci.ubu.ac.th> [10 มกราคม 2554]
- [39] มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม. การฉาบผิว. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: <http://www.elecnet.chandra.ac.th> [10 มกราคม 2554]
- [40] พูลศักดิ์ เทียนสว่าง. การดูดซึมก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้วยสารดูดซึมที่มีเก้าลอยลิกไนต์เป็นองค์ประกอบ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
- [41] ธวัชชัย ตันเจริญทรัพย์. การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับที่มีเก้าลอยเป็นองค์ประกอบ. รายงานโครงการวิจัยปริญญาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [42] มั่นสิน ตันทุลเวศม์. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [43] Fidalgo, A. Rosa, M. E. and Ilharco, L. M. Chemical Control of Highly Porous Silica Xerogels: Physical Properties and Morphology. Chem. Mater. 15 (2003): 2186-2192.
- [44] Fidalgo, A. and Ilharco, L. M. Correlation between physical properties and structure of silica xerogels. Journal of Non-Crystalline Solids. 347 (2004) 128-137.
- [45] Belmabkhout, Y. Serna, S. G and Sayari, A. Adsorption of CO<sub>2</sub>-Containing Gas Mixtures over Amine-Bearing Pore-Expanded MCM-41 Silica: Application for Gas Purification. Ind. Eng. Chem. Res. 49 (2010): 359-365.

- [46] Hong, J. K. Yang, H. S. Jo, M. H. Park, H. H and Choi, S. Y. Preparation and characterization of porous silica xerogel film for low dielectric application. Thin Solid Films. 308-309 (1997): 495-500.
- [47] Belmabkhout, Y. Heymans, N. Weireld, G. D. and Sayari, A. Simultaneous Adsorption of H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> on Triamine-Grafted Pore-Expanded Mesoporous MCM-41 silica. Energy Fuels. 25 (2011): 1310-1315.
- [48] Serna-Guerrero, R. Belmabkhout, Y. and Sayari, A. Future investigations of CO<sub>2</sub> capture using triamine-grafted pore-expanded mesoporous silica. Chemical Engineering Journal. 158 (2010): 513-519.
- [49] Goeppert, A. Czaun, M. May, R. B. Surya Prakash, G. K. 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.



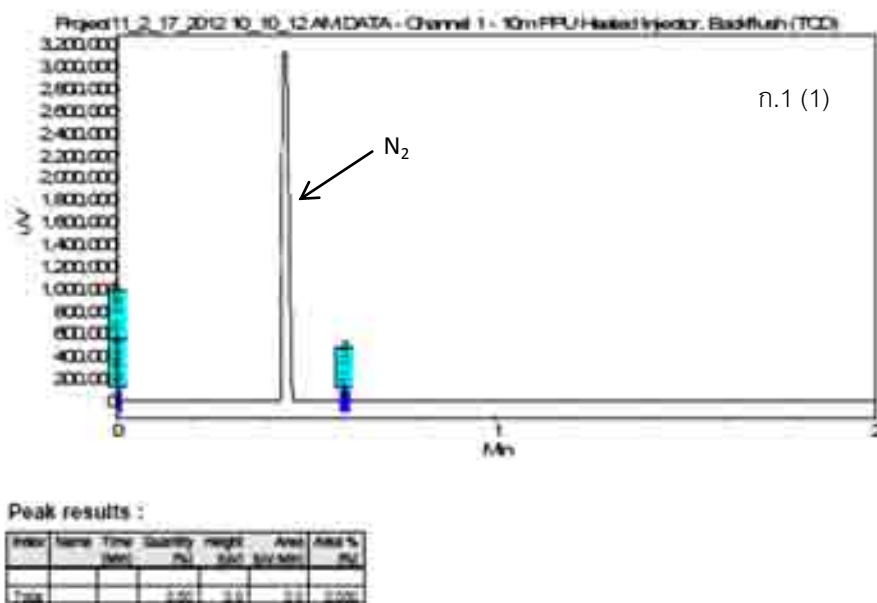
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

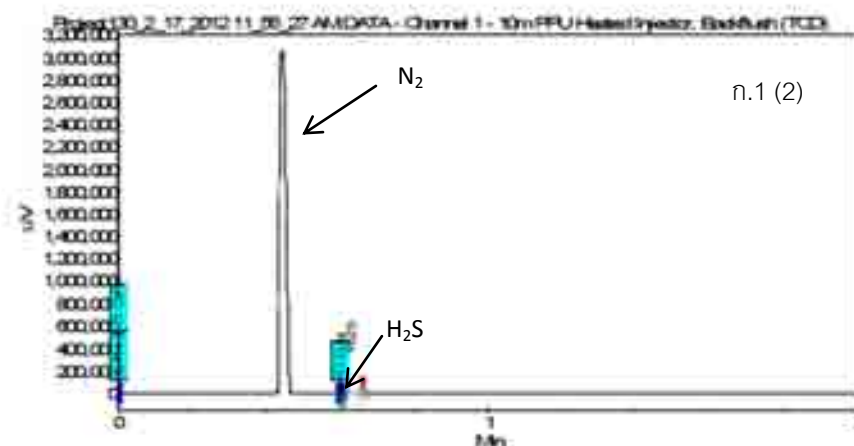
### การวัดความเข้มข้นแก๊สขาออกจากการดูดซับด้วย Micro GC

การวัดความเข้มข้นแก๊สขาออกจากระบบการดูดซับ โดยการต่อท่อแก๊สออนไลน์เข้ากับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ เก็บตัวอย่างทุกๆ 3 นาที จนกว่าจะได้ความเข้มข้นของแก๊สขาออกจากระบบการดูดซับเท่ากับความเข้มข้นแก๊สขาเข้า ตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปมีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลาวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊ส 2 นาที โดยมีแก๊สฮีเลียมเป็นตัวพาด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิลิตรต่อนาที จากข้อมูลการวัดความเข้มข้นแก๊สขาออกจากการดูดซับ ด้วยวิธีออนไลน์ จะได้ข้อมูลดังแสดงในภาพ ก.1 นำข้อมูลดังกล่าวเขียนกราฟแสดงการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ดังภาพที่ ข.1 ภาคผนวก ข.

#### โครมาโทแกรมแสดงผลการแยกแก๊ส

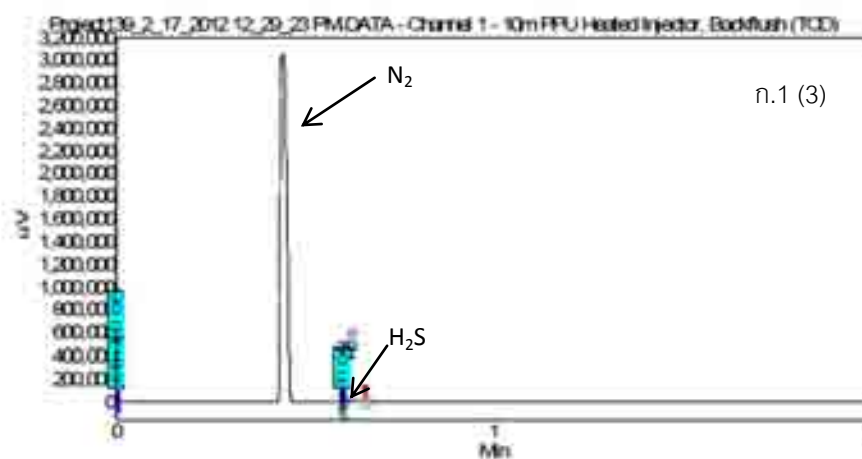


ภาพที่ ก.1 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของแก๊สแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ, (1) นาทีที่ 3 ที่ภาวะน้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที



Peak results :

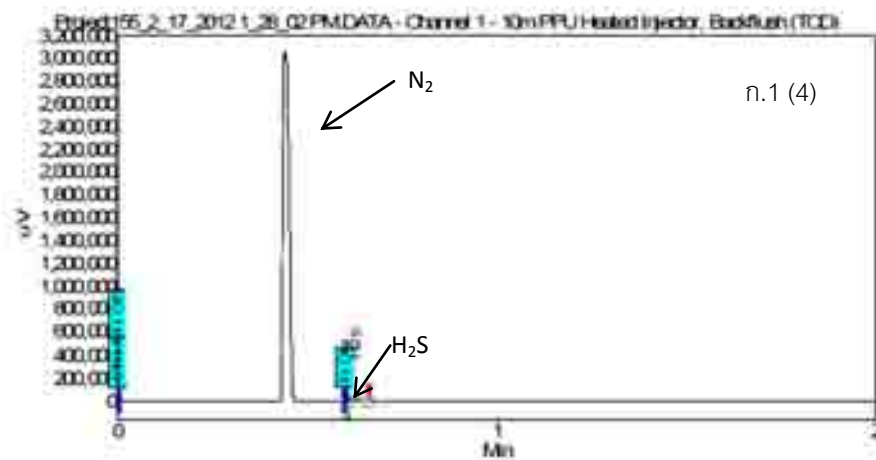
Order	Name	Time (Min)	Quantity (%)	Height (uV)	Area (uV/Min)	Area (%)
1	N2	0.21	99.78	3181.3	112.3	100.000
	H2S	0.22	0.22	134.3	112.3	100.000



Peak results :

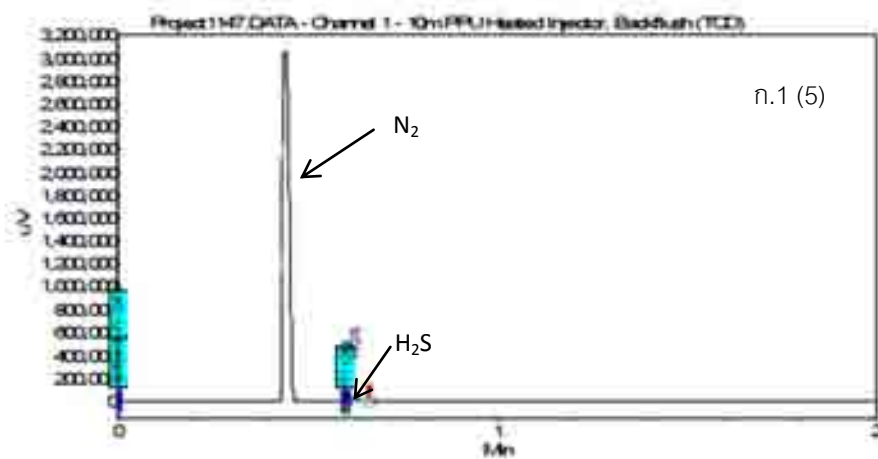
Order	Name	Time (Min)	Quantity (%)	Height (uV)	Area (uV/Min)	Area (%)
1	N2	0.21	99.78	3189.3	454.8	100.000
	H2S	0.22	0.22	134.3	454.8	100.000

ภาพที่ ก.1 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของแก๊สแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ (ต่อ), (2) นาทีที่ 107, (3) นาทีที่ 140 ที่ภาวะน้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที



Peak results :

Index	Name	Time (Min)	Quantity (%)	Height (uV)	Area (uV Min)	Area (%)
1	N2	0.51	1.17	2800000.1	508.8	100.000
	H2S	0.71	1.17	2800000.1	508.8	100.000
Total						



Peak results :

Index	Name	Time (Min)	Quantity (%)	Height (uV)	Area (uV Min)	Area (%)
1	N2	0.52	1.20	2800000.1	508.8	100.000
	H2S	0.71	1.20	2800000.1	508.8	100.000
Total						

ภาพที่ ก.1 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของแก๊สแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ (ต่อ), (4) นาทีที่ 200, (5) นาทีที่ 538 ที่ภาชนะน้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณและข้อมูลการทดลอง

1. การคำนวณปริมาณสารในการเตรียมซิลิกาเซโรเจล

$$g = \text{mol} \times M_w$$

2. การคำนวณปริมาณการเติมเอมีนบนซิลิกา

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

3. การคำนวณอัตราไหลของไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$FR_H = (FR \times 1) / 100$$

4. การคำนวณความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ

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

5. การคำนวณความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\text{ที่ Breakthrough capacity: } Cap(BT) = (BT \times FR_H) / (V_{mol} \times W_{sorb})$$

$$\text{ที่ Saturation capacity: } Cap(S) = (FR_H \times \int_0^t (C_o - C_t) dt) / (V_{mol} \times W_{sorb})$$

ที่	$C_o$	=	ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ (ppm)
	$C_t$	=	ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ (ppm)
	$A_{STD}$	=	พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ
	$A$	=	พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ
	$Cap(BT)$	=	ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่ breakthrough (มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ)
	$Cap(S)$	=	ความสามารถในการดูดซับแก๊สอิ่มตัว (มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ)
	$BT$	=	เวลาที่ breakthrough (นาที)
	$FR$	=	อัตราไหลแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที)
	$FR_H$	=	อัตราไหลไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มิลลิลิตรต่อนาที)
	$V_{mol}$	=	ปริมาตรโมลาร์ของแก๊สอุดมคติที่ภาวะมาตรฐาน
	$W_{sorb}$	=	น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)
	$W_a$	=	น้ำหนักงานเอมีน (กรัม)
	$W_s$	=	น้ำหนักของซิลิกาเซโรเจล (กรัม)

ยกตัวอย่างการทดลองการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50

ภาวะของการทดลอง: แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน  
น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากแก๊สโครมาโทกราฟี

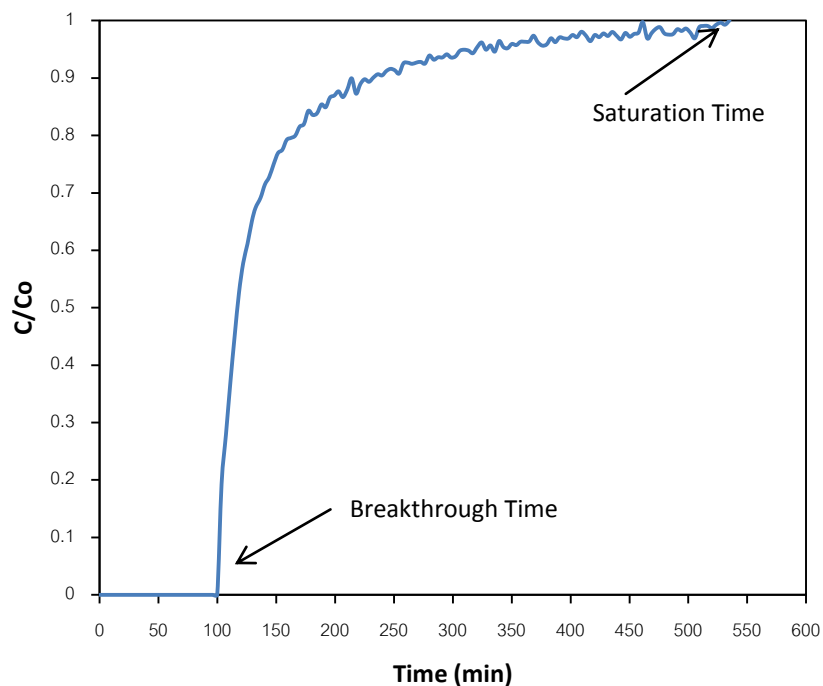
Run no.	Start Time	End Time	Time (min.)	Area H <sub>2</sub> S (uV.min)	C (ppm)	C/Co
1	10:02	10:05	0	0	0.00	0
2	10:05	10:09	3.61	0	0.00	0
3	10:09	10:13	7.43	0	0.00	0
4	10:13	10:16	11.18	0	0.00	0
5	10:16	10:20	14.93	0	0.00	0
6	10:20	10:24	18.60	0	0.00	0
7	10:24	10:27	22.16	0	0.00	0
8	10:27	10:30	25.85	0	0.00	0
9	10:30	10:34	29.10	0	0.00	0
10	10:34	10:38	32.76	0	0.00	0
11	10:38	10:41	36.43	0	0.00	0
12	10:41	10:45	40.08	0	0.00	0
13	10:45	10:49	43.80	0	0.00	0
14	10:49	10:53	47.55	0	0.00	0
15	10:53	10:56	51.30	0	0.00	0
16	10:56	11:00	55.05	0	0.00	0
17	11:00	11:04	58.81	0	0.00	0
18	11:04	11:07	62.48	0	0.00	0
19	11:07	11:11	66.23	0	0.00	0
20	11:11	11:15	69.86	0	0.00	0
21	11:15	11:19	73.55	0	0.00	0
22	11:19	11:22	77.31	0	0.00	0
23	11:22	11:26	81.03	0	0.00	0
24	11:26	11:30	84.71	0	0.00	0
25	11:30	11:33	88.46	0	0.00	0
26	11:33	11:37	92.21	0	0.00	0
27	11:37	11:41	95.96	0	0.00	0
28	11:41	11:45	99.55	0	0.00	0
29	11:45	11:48	103.21	0	0.00	0
30	11:48	11:52	106.85	112.9	1928.60	0.193
31	11:52	11:56	110.56	163.2	2787.84	0.279
32	11:56	11:59	114.28	216.1	3691.49	0.369
33	11:59	12:03	117.91	264.4	4516.57	0.452

Run no.	Start Time	End Time	Time (min.)	Area H <sub>2</sub> S (uV.min)	C (ppm)	C/Co
34	12:03	12:07	121.70	307.8	5257.94	0.526
35	12:07	12:10	125.36	338.2	5777.25	0.578
36	12:10	12:14	129.03	357.8	6112.06	0.611
37	12:14	12:18	132.73	381.1	6510.08	0.651
38	12:18	12:21	136.45	394.3	6735.57	0.673
39	12:21	12:25	140.18	404.8	6914.93	0.691
40	12:25	12:29	143.90	418.2	7143.83	0.714
41	12:29	12:33	147.53	425.8	7273.66	0.727
42	12:33	12:36	151.11	438.8	7495.73	0.749
43	12:36	12:40	154.78	450.2	7690.47	0.769
44	12:40	12:44	158.53	453.6	7748.55	0.774
45	12:44	12:47	161.53	463.7	7921.08	0.792
46	12:47	12:51	165.88	465.7	7955.24	0.795
47	12:51	12:55	169.53	468.1	7996.24	0.799
48	12:55	12:58	173.18	477.3	8153.40	0.815
49	12:58	13:02	176.95	479.7	8194.40	0.819
50	13:02	13:06	180.61	493.3	8426.72	0.842
51	13:06	13:09	184.36	489.1	8354.97	0.835
52	13:09	13:13	188.03	490.8	8384.01	0.838
53	13:13	13:17	191.70	499.8	8537.75	0.853
54	13:17	13:20	195.36	497.0	8489.92	0.848
55	13:20	13:24	199.11	506.8	8657.33	0.865
56	13:24	13:28	202.68	508.9	8693.20	0.869
57	13:28	13:31	206.41	513.2	8766.66	0.876
58	13:31	13:35	210.16	507.3	8665.87	0.866
59	13:35	13:39	213.81	515.1	8799.11	0.879
60	13:39	13:43	217.58	526.5	8993.85	0.899
61	13:43	13:46	221.21	510.8	8725.66	0.872
62	13:46	13:50	224.76	520.5	8891.36	0.889
63	13:50	13:53	228.48	525.5	8976.77	0.897
64	13:53	13:57	232.11	522.9	8932.35	0.893
65	13:57	14:01	235.80	527.2	9005.81	0.900
66	14:01	14:05	239.55	530.6	9063.89	0.906
67	14:05	14:08	243.26	529.4	9043.39	0.904
68	14:08	14:12	246.95	533.9	9120.26	0.912
69	14:12	14:16	250.58	536.1	9157.84	0.915
70	14:16	14:19	254.23	534.7	9133.93	0.913
71	14:19	14:23	258.00	531.3	9075.85	0.907
72	14:23	14:27	261.66	541.8	9255.21	0.925
73	14:27	14:30	265.41	542.4	9265.46	0.926

Run no.	Start Time	End Time	Time (min.)	Area H <sub>2</sub> S (uV.min)	C (ppm)	C/Co
74	14:30	14:34	269.08	541.2	9244.96	0.924
75	14:34	14:38	272.71	542.5	9267.17	0.926
76	14:38	14:41	276.30	543.2	9279.13	0.927
77	14:41	14:45	279.85	541.4	9248.38	0.924
78	14:45	14:48	283.48	549.7	9390.16	0.939
79	14:48	14:52	287.21	545.4	9316.71	0.931
80	14:52	14:56	290.85	547.9	9359.41	0.935
81	14:56	15:00	294.60	547.7	9356.00	0.935
82	15:00	15:03	298.25	550.9	9410.66	0.941
83	15:03	15:07	301.88	547.6	9354.29	0.935
84	15:07	15:10	305.51	548.8	9374.79	0.937
85	15:10	15:14	309.26	554.5	9472.16	0.947
86	15:14	15:18	313.03	555.6	9490.95	0.949
87	15:18	15:22	316.70	554.7	9475.57	0.947
88	15:22	15:25	320.35	552.0	9429.45	0.942
89	15:25	15:29	324.06	558.3	9537.07	0.953
90	15:29	15:33	327.70	563.0	9617.36	0.961
91	15:33	15:36	331.45	555.6	9490.95	0.949
92	15:36	15:40	335.11	560.0	9566.11	0.956
93	15:40	15:44	338.76	553.6	9456.78	0.945
94	15:44	15:47	342.51	564.5	9642.98	0.964
95	15:47	15:51	346.18	558.3	9537.07	0.953
96	15:51	15:55	349.93	557.1	9516.57	0.951
97	15:55	15:59	353.68	561.5	9591.73	0.959
98	15:59	16:02	357.35	560.3	9571.23	0.957
99	16:02	16:06	361.10	563.7	9629.31	0.962
100	16:06	16:10	364.76	563.7	9629.31	0.962
101	16:10	16:13	368.51	564.0	9634.44	0.963
102	16:13	16:17	372.11	569.9	9735.22	0.973
103	16:17	16:21	375.66	563.2	9620.77	0.962
104	16:21	16:24	379.36	559.8	9562.69	0.956
105	16:24	16:28	383.08	561.0	9583.19	0.958
106	16:28	16:32	386.71	567.3	9690.81	0.969
107	16:32	16:35	390.40	563.3	9622.48	0.962
108	16:35	16:39	394.11	568.2	9706.18	0.970
109	16:39	16:43	397.71	567.2	9689.10	0.968
110	16:43	16:46	401.38	567.0	9685.69	0.968
111	16:46	16:50	405.13	570.6	9747.18	0.975
112	16:50	16:54	408.88	568.4	9709.60	0.970
113	16:54	16:58	412.60	573.9	9803.55	0.980



Run no.	Start Time	End Time	Time (min.)	Area H <sub>2</sub> S (uV.min)	C (ppm)	C/Co
114	16:58	17:01	416.15	570.1	9738.64	0.973
115	17:01	17:05	419.83	564.3	9639.56	0.964
116	17:05	17:08	423.46	570.6	9747.18	0.974
117	17:08	17:12	427.25	568.4	9709.60	0.971
118	17:12	17:16	430.96	572.2	9774.51	0.977
119	17:16	17:20	434.60	569.6	9730.10	0.973
120	17:20	17:23	438.38	573.7	9800.14	0.980
121	17:23	17:27	442.11	569.7	9731.81	0.973
122	17:27	17:31	445.98	566.1	9670.31	0.967
123	17:31	17:35	449.75	572.7	9783.05	0.978
124	17:35	17:38	453.50	568.8	9716.43	0.972
125	17:38	17:42	457.15	571.7	9765.97	0.976
126	17:42	17:46	460.90	573.0	9788.18	0.978
127	17:46	17:50	464.65	583.8	9972.67	0.997
128	17:50	17:53	468.40	567.1	9687.39	0.968
129	17:53	17:57	472.06	572.4	9777.93	0.977
130	17:57	18:01	475.73	576.8	9853.09	0.985
131	18:01	18:04	479.26	578.5	9882.13	0.988
132	18:04	18:08	482.76	572.2	9774.51	0.977
133	18:08	18:11	486.51	571.0	9754.01	0.975
134	18:11	18:15	490.11	571.5	9762.56	0.976
135	18:15	18:19	493.66	576.5	9847.97	0.984
136	18:19	18:22	497.36	574.7	9817.22	0.981
137	18:22	18:26	501.08	577.2	9859.92	0.985
138	18:26	18:30	504.71	573.0	9788.18	0.978
139	18:30	18:33	508.40	567.2	9689.10	0.968
140	18:33	18:37	512.11	578.5	9882.13	0.988
141	18:37	18:41	515.71	579.8	9904.34	0.990
142	18:41	18:44	519.38	579.8	9904.34	0.990
143	18:44	18:48	523.13	577.7	9868.47	0.986
144	18:48	18:52	526.88	581.2	9928.25	0.992
145	18:52	18:56	530.60	583.2	9962.42	0.996
146	18:56	18:59	534.15	581.1	9926.55	0.992
147	18:59	19:03	537.83	585.4	10000.00	1



**ภาพที่ ข.1** การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Si-PEI800-50 ภาวะ: แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

#### ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะของการทดลอง: แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน น้ำหนักตัวดูดซับ 1.0 กรัม อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊ส 10 มิลลิลิตรต่อนาที

Breakthrough Time	=	103.21 นาที
Saturation Time	=	537.83 นาที
อัตราไหลแก๊ส	=	10 มิลลิลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นขาเข้าแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์	=	10000 ppm
น้ำหนักตัวดูดซับ	=	1.0 กรัม

#### 1. การคำนวณปริมาณสารในการเตรียมซิลิกาเซโรเจล

สัดส่วนโดยโมลของสารในการเตรียม

TEOS/ H<sub>2</sub>O/ i-PrOH/ HCl/ NH<sub>3</sub> : 1/ 4/ 9.2/ 0.009/ 0.009

สัดส่วนโดยมวลของสารในการเตรียมเป็น

TEOS/ H<sub>2</sub>O/ i-PrOH/ HCl/ NH<sub>3</sub> : 208.33/724/ 552.92/ 0.328/ 0.153

## 2. การคำนวณปริมาณการเติมเอมีน

$$\text{Si-PEI800-50} = (50 \times 100) / 100$$

$$\text{Cap(BT)} = (\text{BT} \times \text{FR}_H) / (V_{\text{mol}} \times W_{\text{sorb}})$$

$$\text{Cap(S)} = (\text{FR}_H \times \int_0^t (C_0 - C_t) dt) / (V_{\text{mol}} \times W_{\text{sorb}})$$

## 3. การคำนวณอัตราไหลของไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\text{FR}_H = (10 \times 1) / 100 = 0.1 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$$

## 4. ความเข้มข้นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ

ยกตัวอย่างจากการวัดการดูดซับครั้งที่ 30 นาทีที่ 106.85

$$\text{พื้นที่แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ} = 112.9$$

$$\text{พื้นที่แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า} = 585.4$$

$$C = (10000 \times 112.9) / 585.4$$

$$C = 1928.59 \text{ ppm}$$

## 5. สัดส่วนความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ C/Co

$$C/Co = 1928.59 / 10000 = 0.193$$

## 6. ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

Breakthrough capacity

$$\text{Cap(BT)} = (103.63 \times 0.1) / (22.4 \times 1)$$

$$\text{Cap (BT)} = 0.449 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม}$$

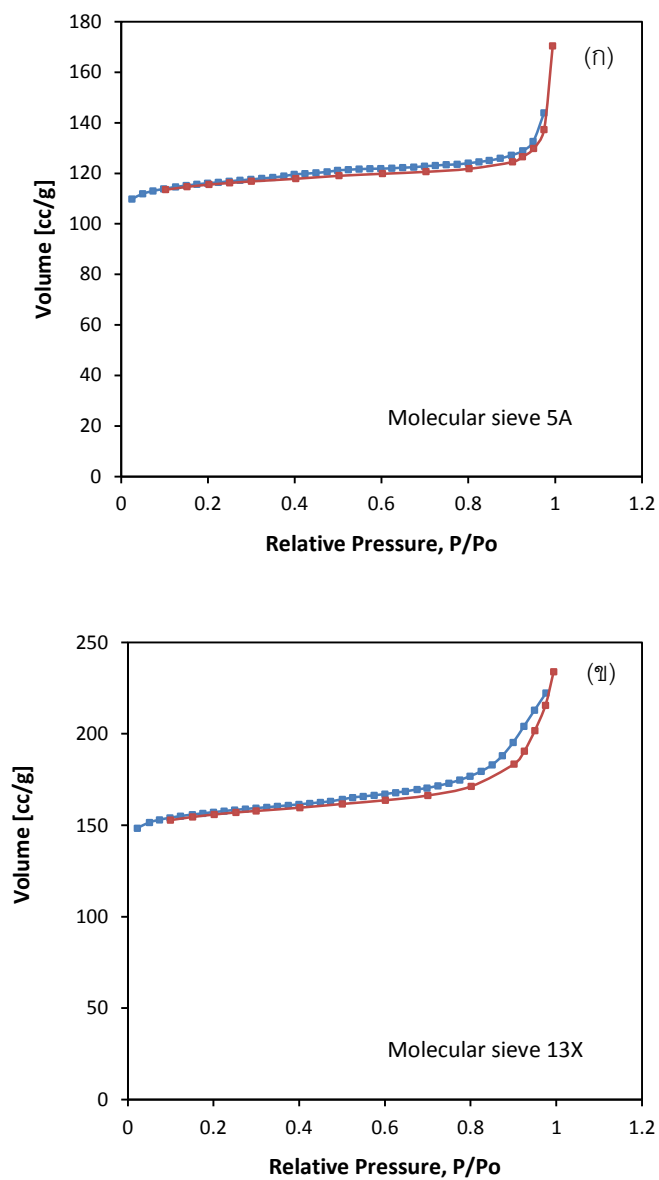
Saturation capacity

$$\text{Cap(S)} = (0.1 \times 156.82) / (22.4 \times 1)$$

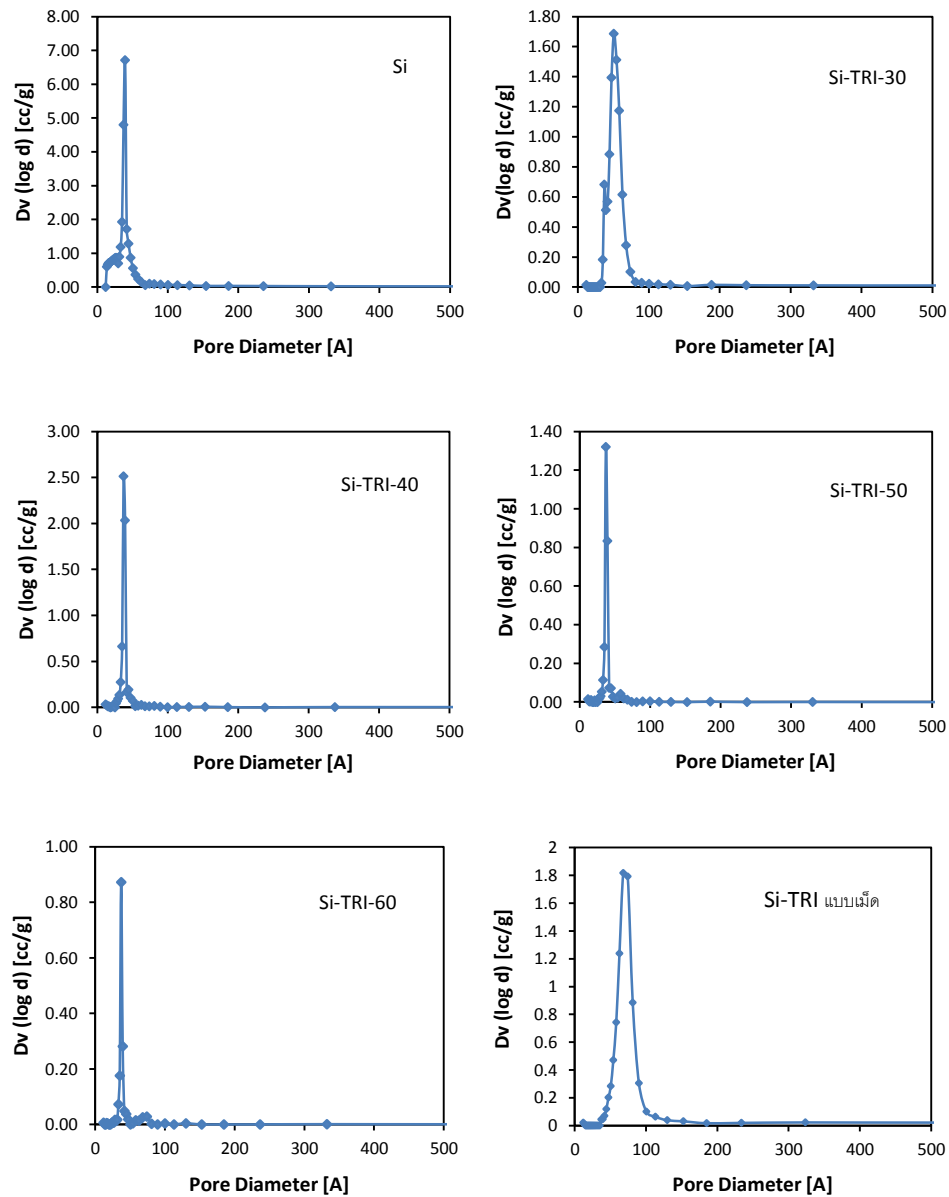
$$\text{Cap(S)} = 0.700 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม}$$

## ภาคผนวก ค

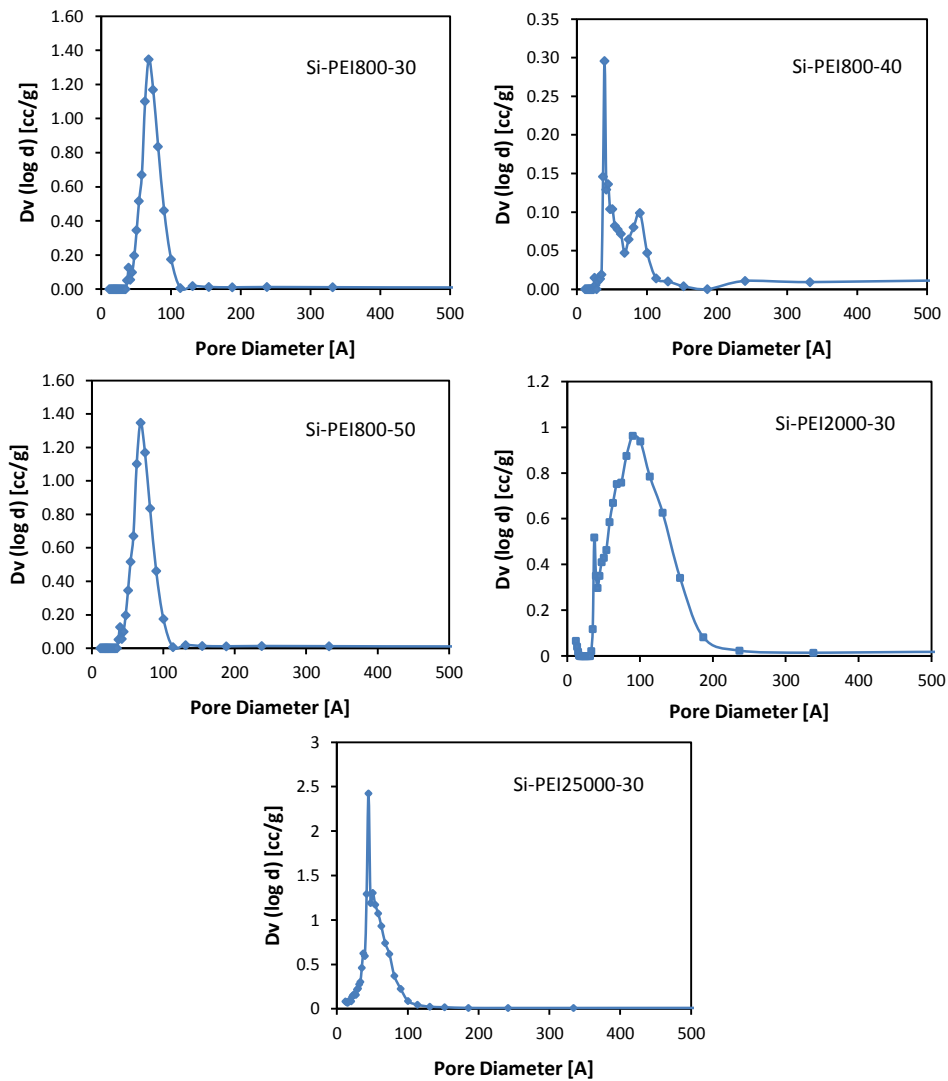
## การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ



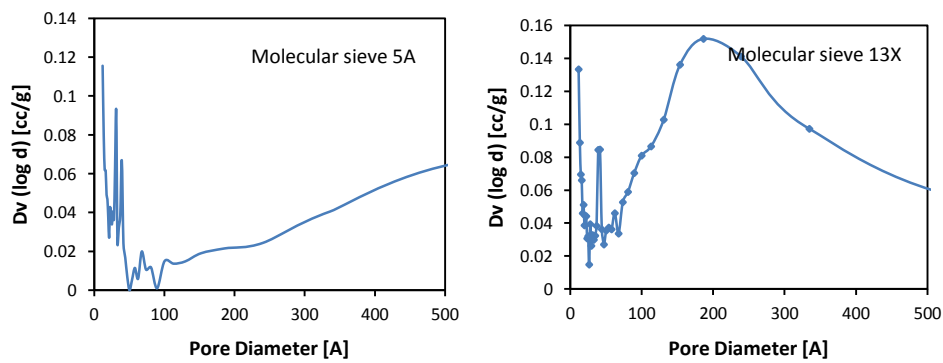
ภาพที่ ค.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์, (ก) Molecular sieve 5A, (ข) Molecular sieve 13X,



ภาพที่ ค.2 Pore size distribution ของตัวดูดซับ Si-TRI



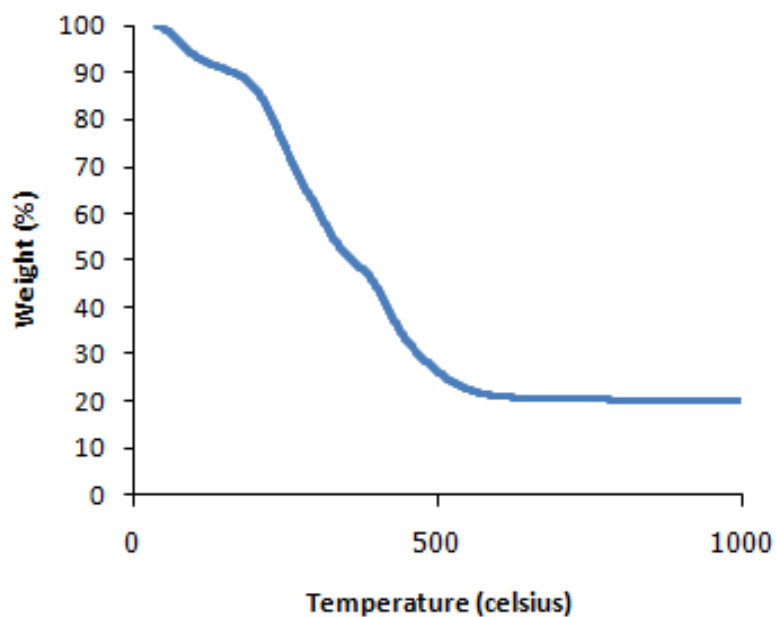
ภาพที่ ค.3 Pore size distribution ของตัวดูดซับ Si-PEI



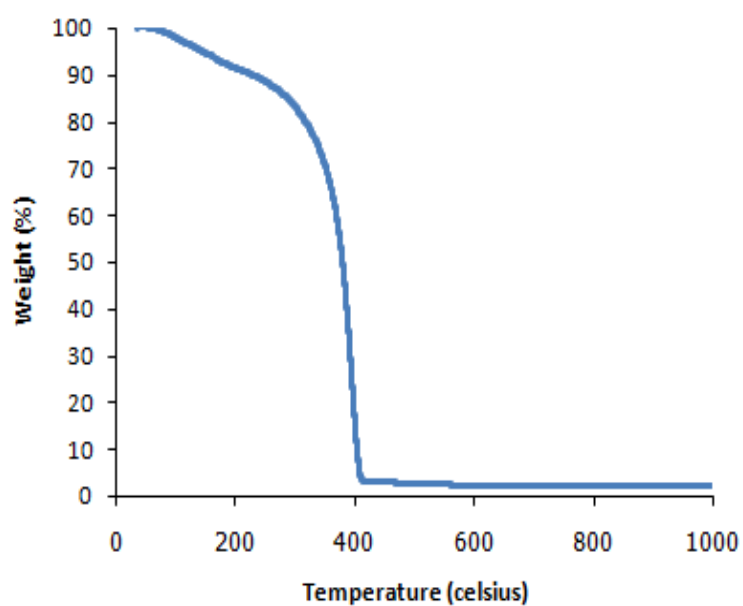
ภาพที่ ค.4 Pore size distribution ของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

## ภาคผนวก ง

รูปแบบการสลายตัวของ *N*-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine และ Polyethylenimine



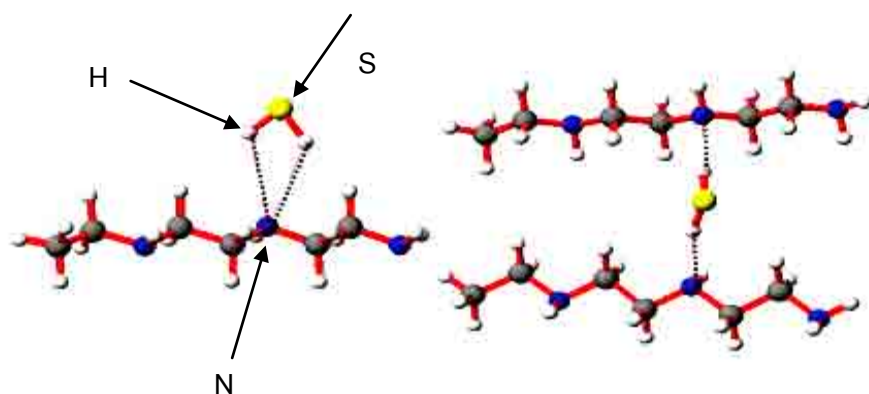
ภาพที่ ง.1 รูปแบบการสลายตัวของ *N*-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine



ภาพที่ ง.2 รูปแบบการสลายตัวของ Polyethylenimine มวลโมเลกุล 800

## ภาคผนวก จ

## อันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับและไฮโดรเจนซัลไฟด์



ภาพที่ จ.1 ลักษณะอันตรกิริยาของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับพอลิเอมีนบนซิลิกา [17]



## ภาคผนวก จ

### ลักษณะตัวดูดซับที่เติมเอมีนมาก

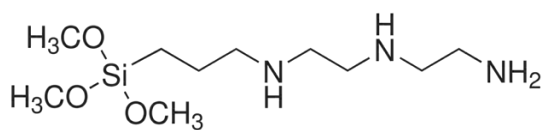


ภาพที่ จ.1 ลักษณะตัวดูดซับ Si-PEI800-60 ที่เติมเอมีนมากเกินไป

## ภาคผนวก ข

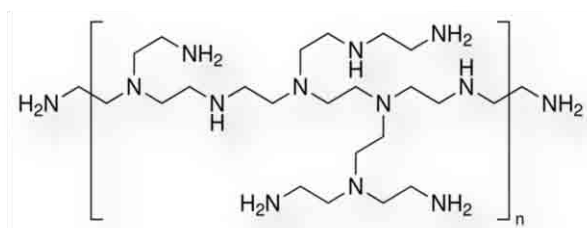
## สูตรโครงสร้างโมเลกุล

*N*-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine (TRI)



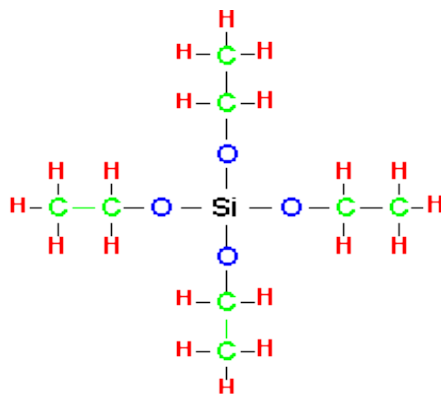
ภาพที่ ข.1 สูตรโครงสร้าง *N*-(3-Trimethoxysilypropyl)diethylenetriamine

Polyethyleneimine (PEI)



ภาพที่ ข.2 สูตรโครงสร้าง Polyethyleneimine

Tetraethyl orthosilicate: TEOS



ภาพที่ ข.3 สูตรโครงสร้าง Tetraethyl orthosilicate

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวแหวดดาว ใจบุญ เกิดวันที่ 24 มกราคม 2531 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2553