

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เม็ดพุ่มซิลิกาตัดแปรด้วยแอมีนในคอลัมน์
เบดนิ่ง

นางสาวพรทิพย์ เมธาคุปต์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดวามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Adsorption of CO₂ and H₂S using amine modified fumed silica pellets in packed bed
column

Miss Pornthip Methakhup



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้
	เม็ดพูนซิลิกาตัดแปรด้วยแอมีนในคอลัมน์เบดนิ่ง
โดย	นางสาวพรทิพย์ เมธาคุปต์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร. บุญญาวัลย์ อยู่สุข

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์ชาติ)

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. บุญญาวัลย์ อยู่สุข)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรุสศิริวิชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. สมศักดิ์ สุภสิทธิ์มงคล)

พรทิพย์ เมธาคุปต์ : การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เม็ดฟุ้งซิลิกา
 กัดแปรด้วยแอมีนในคอลัมน์เบดนิ่ง (Adsorption of CO₂ and H₂S using amine
 modified fumed silica pellets in packed bed column) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
 หลัก: ศ. ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร. บุญญาวัลย์
 อยู่สุข, 114 หน้า.

ตัวดูดซับฟุ้งซิลิกาตัดแปรด้วยแอมีนชนิดพอลิเอทิลีนแอมีนมีศักยภาพในการดูดซับ
 คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเม็ดตัวดูดซับฟุ้งซิลิกาตัด
 แปรด้วยแอมีนชนิดพอลิเอทิลีนแอมีนมวลโมเลกุล 800 ซึ่งแอมีนชนิดนี้ได้ผลการทดลองมาจาก
 งานวิจัยก่อนหน้าซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพที่ดี เปรียบด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปเม็ดด้วยตัวประสานชนิด
 ต่างๆที่ปริมาณแตกต่างกัน ตัวประสานที่เลือกมาศึกษาคือ แป้งมันสำปะหลัง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์
 และดินเบนโทไนต์ ศึกษาผลของปริมาณและชนิดของตัวประสานต่อความสามารถการดูดซับ
 คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และความคงตัวเชิงกลเป็นการลดการเกิด
 ความดันลุดในระบบ ผลงานวิจัยแสดงว่าเม็ดตัวดูดซับฟุ้งซิลิกาตัดแปรด้วยแอมีนโดยใช้ดินเบนโทไนต์
 (Fsi-PEI800-40/Bentonite) มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์
 สูงที่สุด เม็ดตัวดูดซับฟุ้งซิลิกาตัดแปรด้วยแอมีนโดยใช้พอลิไวนิลแอลกอฮอล์เป็นตัวประสาน (Fsi-
 PEI800-40/PVA) มีความสามารถเชิงกลสูงที่สุด โดยมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
 และไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์
 ของ Fsi-PEI800-40/Bentonite เพียงเล็กน้อย ในระบบการดูดซับ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง (คอลัมน์
 แรกที่ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) Fsi-PEI800-40/PVA มี
 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวได้ 1.075 และ
 1.407 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่
 Breakthrough และที่อิ่มตัวได้ 0.017 และ 0.018 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ผลการ
 ทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA ซึ่งความคงตัวเชิงกลสูง (0.892
 MPa) มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ดี อีกทั้งสามารถฟื้นฟู
 สภาพตัวดูดซับและนำกลับมาใช้ใหม่ได้และมีเสถียรภาพที่ดีโดยตามวัฏจักรการดูดซับ-การคาย ดังนั้น
 Fsi-PEI800-40/PVA มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในระบบขนาดระดับใหญ่ต่อไป

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5672029023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: ADSORPTION / PELLET / CO₂ REMOVAL / H₂S REMOVAL / AMINE

PORNTHIP METHAKHUP: Adsorption of CO₂ and H₂S using amine modified fumed silica pellets in packed bed column. ADVISOR: PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, Ph.D., CO-ADVISOR: BOONYAWAN YOOSUK, Ph.D., 114 pp.

The amine modified fumed silica sorbent appears to be a promising approach to adsorb CO₂ and H₂S from biogas. In this study, the amine (Polyethyleneimine (Mw. 800) or PEI800, this amine is considered in previous research that it has a good efficiency to adsorb CO₂ and H₂S) modified fumed silica sorbent pellets were prepared by using an extrusion method with various types and amounts of binders. The three chosen binders for the study were starch, polyvinyl alcohol (PVA) and bentonite clay. The effects of variables, amounts and types of binders on CO₂ and H₂S adsorption and mechanical strength, that decrease pressure drop in the system, were investigated. The results showed that amine modified fumed silica with bentonite clay binder (Fsi-PEI800-40/Bentonite) gave the highest CO₂ and H₂S adsorption. Amine modified fumed silica with PVA binder (Fsi-PEI800-40/PVA) gave the highest mechanical strength with CO₂ and H₂S adsorption value slightly lower than amine modified fumed silica with bentonite clay and starch binder. For adsorption in 2 column in series (1st and 2nd column at 80°C and 30°C, respectively), amine modified fumed silica with PVA binder gave a CO₂ breakthrough and saturation capacity of 1.075 and 1.407 mmol/g-sorb and a H₂S breakthrough and saturation capacity of 0.017 and 0.018 mmol/g-sorb, respectively. This result indicated that the amine modified fumed silica with good mechanical strength (0.892 MPa) are effective for removing carbon dioxide and hydrogen. Moreover, amine modified fumed silica with PVA binder had good regenerability and stability with repeating adsorption – desorption cycles. Thus, this adsorbent pellet has high potential to be used as CO₂ and H₂S sorbent in large scale packed bed.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2014 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

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

งานวิจัยเรื่อง “การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้เม็ดพุ่มซิลิกาตัดแปรด้วยแอมีนในคอลัมน์เบดนิ่ง” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนการทำงานวิจัยตลอดการศึกษา ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ พี่ๆ นักวิจัย และเจ้าหน้าที่ ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (National Metal and Materials Technology center: MTEC) ที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกและความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ รวมถึงคำแนะนำและข้อคิดดีๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำงาน

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์ชาติ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย และดร. สมศักดิ์ สุภสิทธิ์มงคล กรรมการจากภายนอก ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และการสนับสนุนด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	1
สารบัญตาราง.....	5
บทที่ 1 บทนำ.....	7
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	7
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	8
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	8
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 แก๊สชีวภาพ [1, 2].....	11
2.1.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะปราศจากออกซิเจน (Anaerobic- digestion).....	11
2.1.2 การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพ [3].....	13
2.1.3 การปรับปรุงคุณภาพแก๊ส [1].....	14
2.2 กระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ.....	15
2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption) [4].....	15
2.2.2 กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น (Membrane separation) [5].....	15
2.2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) [6, 7].....	16
2.3 กระบวนการดูดซับ [6-8].....	16

2.3.1	ประเภทของแรงดูดซับ.....	17
2.4	ตัวดูดซับ [6, 11-14].....	20
2.4.1	ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [6, 8].....	21
2.4.2	ลักษณะตัวดูดซับที่ดี [15].....	23
2.5	ทฤษฎีการดูดซับ [16].....	24
2.5.1	ไอโซเทิร์มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm).....	24
2.5.2	ไอโซเทิร์มแบบฟรอยด์ลิช (Freundlich isotherm).....	25
2.5.3	ไอโซเทิร์มแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller isotherm).....	26
2.6	ปฏิกิริยาเคมีการดูดซับแก๊สกรดด้วยแอมีน [17-19].....	27
2.7	วิธีการทำให้สารดูดซับคืนกลับสภาพเดิม [4].....	28
2.8	อันตรายของแก๊สกรดต่อสุขภาพอนามัย [20].....	28
2.9	กระบวนการการขึ้นรูป [21-23].....	29
2.9.1	วิธีการขึ้นรูปแบบอัดเม็ด.....	29
2.9.2	ประโยชน์ของการขึ้นรูป.....	31
2.10	ตัวประสาน (Binder) [24-27].....	31
2.10.1	ชนิดตัวประสาน.....	32
2.10.2	การทำงานของตัวประสาน และการแตกหักของชิ้นงาน.....	32
2.11	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
บทที่ 3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	36
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	36
3.3	วิธีการทดลอง.....	37

3.3.1 การเตรียมผงตัวดูดซับ	37
3.3.2 การขึ้นรูปตัวดูดซับโดยวิธี Extrusion โดยใช้ตัวประสาน	38
3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	40
3.3.4. สมการการคำนวณ.....	47
3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	48
3.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ	49
3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของตัวดูดซับ.....	49
3.6 การศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในคอลัมน์ขนาดเล็ก (Lab-scale)	50
3.7 การศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในคอลัมน์ขนาดใหญ่ (Up-scale).....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	53
4.1 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์	53
4.2 การดูดซับแก๊สผสมในระบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง.....	58
4.3. การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ	61
4.3.1 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยเทคนิคบีอีที (Brunauer Emmett Teller: BET).....	61
4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA).....	64
4.4 ความสามารถในการคงรูปเชิงกล (Bulk crushing strength).....	65
4.4.1 ผลของกระบวนการทำให้แห้งหลังการฉีดขึ้นรูป.....	65
4.4.2 ผลของระยะเวลาการบ่ม (curing period).....	66
4.4.3 ผลของปริมาณและชนิดของตัวประสาน	67
4.5. การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดตัวดูดซับใน 2 คอลัมน์.....	68

4.5.1 ผลของระยะเวลาการบ่ม.....	68
4.5.2 ผลของชนิดและปริมาณตัวประสาน.....	69
4.6. การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบขยาย	75
4.6.1 ผลของ Pre-treatment ต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	75
4.6.2 ผลของอัตราไหลแก๊สผสมต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์	78
4.6.3 ศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ.....	79
4.6.4 ศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ.....	81
4.7 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์กับ ตัวดูดซับเชิงพาณิชย์	83
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการทดลอง	86
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
รายการอ้างอิง	89
ภาคผนวก ก การวัดความเข้มข้นแก๊สออกหลังจากการดูดซับด้วยเครื่อง Micro GC.....	94
ภาคผนวก ข การคำนวณและข้อมูลการทดลองความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์	98
ภาคผนวก ค การคำนวณความสามารถเชิงกล (Bulk crushing strength)	105
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์	107
ภาคผนวก จ สมบัติของสารต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	108
ภาคผนวก ฉ อันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับคาร์บอนไดออกไซด์และอันตรกิริยาระหว่างตัว ดูดซับกับไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	113
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	114

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ 2.1 กระบวนการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่น [5]	15
ภาพที่ 2.2 กระบวนการดูดซับแยกแก๊สกรดออกจากแก๊สผสม [6].....	16
ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกดูดซับไปยังตัวดูดซับ [9]	17
ภาพที่ 2.4 แรงทางกายภาพที่ทำให้เกิดการดูดซับ [8].....	18
ภาพที่ 2.5 ความเข้มข้นภายในตัวดูดซับ [12]	23
ภาพที่ 2.6 ลักษณะตัวดูดซับที่ดี [15].....	24
ภาพที่ 2.7 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบต่างๆของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบแก๊ส [16].....	26
ภาพที่ 2.8 กระบวนการอัดเม็ดแบบ Layering [23]	29
ภาพที่ 2.9 กระบวนการทำให้กลม (Spheronization) [23]	30
ภาพที่ 2.10 กระบวนการอัดเม็ดแบบ Direct pelletizing [23].....	30
ภาพที่ 2.11 กระบวนการอัดเม็ดแบบ Fluidized bed spray granulation [23].....	30
ภาพที่ 2.12 แบบจำลองการแตกหักภายในระบบของขึ้นงาน.....	33
ภาพที่ 2.13 แบบจำลองของอนุภาคสาร	33
ภาพที่ 3.1 ลักษณะตัวดูดซับผสมกับตัวประสานเป็นก้อนเหนียว.....	38
ภาพที่ 3.2 Extrudate หลังจากฉีดด้วยหลอดฉีดยา	38
ภาพที่ 3.3 Extrudate หลังจากทิ้งให้แห้งตัว	39
ภาพที่ 3.4 ตัวดูดซับในรูป Extrudate	39
ภาพที่ 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	41
ภาพที่ 3.6 แผนผังชุดอุปกรณ์การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ แบบคอลัมน์เดี่ยว	41
ภาพที่ 3.7 แผนผังชุดอุปกรณ์การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ แบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม	43

ภาพที่ 3.8 คอลัมน์ตัวดูดซับของระดับห้องปฏิบัติการกับระดับขยาย	44
ภาพที่ 3.9 อุปกรณ์การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมระบบขยาย 20 เท่า	46
ภาพที่ 3.10 แผนผังชุดอุปกรณ์การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมระบบขยาย 20 เท่า	46
ภาพที่ 3.11 เครื่องวัด Bulk crushing strength	48
ภาพที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40	55
ภาพที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40	57
ภาพที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วยผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 (ก) ระบบการดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม (ข) เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับแก๊สผสม ด้วยระบบการดูดซับคอลัมน์เดียวกับแบบ 2 คอลัมน์	59
ภาพที่ 4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนของตัวดูดซับ (ก) Fsi-PEI800-40 (powder), (ข) Fsi-PEI800-40/Starch 5%-5 day, (ค) Fsi-PEI800-40/PVA 5%-5 day และ (ง) Fsi-PEI800-40/Bentonite 5%-5 day	63
ภาพที่ 4.5 การสลายตัวของตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 แบบผงกับแบบเม็ด ที่ใช้ตัวประสานต่างชนิดกันที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก	64
ภาพที่ 4.6 ผลของกระบวนการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องกับที่ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ที่ใช้แป้งกับ PVA เป็นตัวประสานต่อ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ	65
ภาพที่ 4.7 ผลของระยะเวลาการบ่มของเม็ดตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ที่ใช้ (ก) แป้ง, (ข) PVA และ (ค) Bentonite clay เป็นตัวประสาน ต่อ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ	66
ภาพที่ 4.8 ผลของปริมาณและชนิดของตัวประสานต่างกันต่อ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่เวลาการบ่ม 42 วัน	67

ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 แบบผงกับเม็ดที่ใช้ตัวประสานปริมาณ 5 % โดยน้ำหนัก.....	70
ภาพที่ 4.10 ผลของชนิดและปริมาณตัวประสานต่อความสามารถการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์และ (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่ใช้แป้ง, PVA และBentonite clay เป็นตัวประสาน.....	74
ภาพที่ 4.11 ผลของ Pre-treatment ที่อัตราการไหลของไนโตรเจนและเวลาต่างกัน ต่อการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ(ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5% ในระบบขยาย	76
ภาพที่ 4.12 การคายการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยอัตราไหลไนโตรเจนต่างกัน ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5%	80
ภาพที่ 4.13 รอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5%	81
ภาพที่ 4. 14 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์	84
ภาพที่ ก.1 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตรในแก๊ส ไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ	95
ภาพที่ ก.2 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 10% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ.....	96
ภาพที่ ก.3 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ	97
ภาพที่ ข. 1การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์.....	104
ภาพที่ ค.1 น้ำหนักของผงจากเม็ดตัวดูดซับ (Fine) ที่ได้จากการทดลอง Bulk crushing strength ที่แรงกดทับขนาดต่างๆ	106
ภาพที่ ง.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A.....	107

ภาพที่ ฉ.1 ลักษณะอันตรกิริยาของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับดัดแปรด้วยพอลิ แอมีน [28].....	113
ภาพที่ ฉ.2 ลักษณะอันตรกิริยาของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับดัดแปรด้วยพอลิแ มีน.....	113



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [10].....	20
ตารางที่ 2.2 ตัวประสานอินทรีย์ และตัวประสานอนินทรีย์ [25]	32
ตารางที่ 3.1 ปริมาณของผงตัวดูดซับและตัวประสาน	40
ตารางที่ 3.2 คอลัมน์ที่ใช้ในระบบการดูดซับระดับห้องปฏิบัติการและระดับขยาย	44
ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40	55
ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40	57
ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วยผงตัวดูดซับFsi-PEI800-40 ด้วยระบบการดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม.....	60
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยผงตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ด้วยระบบการดูดซับคอลัมน์เดียวกับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม	60
ตารางที่ 4.5 BET surface area และPore volume ของตัวดูดซับที่เตรียมได้และตัวดูดซับเชิงพาณิชย์	62
ตารางที่ 4.6 ผลของปริมาณและชนิดของตัวประสานต่างกันต่อค่า Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่เวลาการบ่ม 42 วัน และ Bulk crushing strength ของMolecular sieve 5A.....	67
ตารางที่ 4.7 ผลของระยะเวลาการบ่มต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5%	68
ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับแบบผงและเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่ใช้แบ่งเป็นตัวประสานที่ปริมาณต่างกัน แบบ 2 ต่ออนุกรม..	71
ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับแบบผงและเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่ใช้ PVA เป็นตัวประสานที่ปริมาณต่างกัน แบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม	72

ตารางที่ 4.10 ความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับแบบผงและเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่ใช้ Bentonite เป็นตัวประสานที่ปริมาณต่างกันแบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง.....	73
ตารางที่ 4.11 ผลของ Pre-treatment ที่อัตราการไหลของไนโตรเจนและเวลาต่างกันต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5% ในระบบขยาย.....	77
ตารางที่ 4.12 ผลของอัตราไหลแก๊สผสมต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5% ในระบบขยาย	79
ตารางที่ 4.13 รอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5%	82
ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์	85
ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบราคาต่อความสามารถในการดูดซับ 1 มิลลิโมล ของตัวดูดซับ Molecular sieve 5A และFsi-PEI800-40/PVA5%.....	85
ตารางที่ ข.1 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาออกจากแก๊สโครมาโทแกรม	102
ตารางที่ ข.2 ผลการวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมขาออกจากแก๊สโครมาโทแกรม	103
ตารางที่ ค.1 น้ำหนักผงของเม็ดตัวดูดซับ (Fine) ที่ได้จากการทดลอง bulk crushing strength ที่แรงกดขนาดต่างๆ.....	106
ตารางที่ จ.1 สมบัติของฟลูมซิลิกา.....	108
ตารางที่ จ.2 สมบัติของ Polyethyleneimine ชนิดกิ่ง มวลโมเลกุล 800.....	109
ตารางที่ จ.3 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง.....	110
ตารางที่ จ.4 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์.....	111
ตารางที่ จ.5 สมบัติของดินเบนโทไนต์ชนิดโซเดียม.....	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการแก๊สเชื้อเพลิงมีปริมาณเพิ่มขึ้น แก๊สเชื้อเพลิงดังกล่าวมาจากกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ หรือจากกระบวนการสังเคราะห์แก๊สชีวภาพ แก๊สชีวภาพนั้นสามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนได้ แต่ในแก๊สชีวภาพมีแก๊สกรดเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่มีฤทธิ์กัดกร่อนและทำให้ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้ลดลง ส่งผลเสียต่อเครื่องจักรรวมถึงท่อส่งแก๊สและยานพาหนะ แม้ว่าจะมีในปริมาณน้อย แต่หากปล่อยแก๊สเหล่านี้เข้าสู่สิ่งแวดล้อมก็มีอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตทั้งยังก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้นกระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพจึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตแก๊สเชื้อเพลิง เทคโนโลยีการดูดซับ (Adsorption) เป็นเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดแก๊สกรดด้วยตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่มีความสามารถในการดูดซับ (Capacity) และมีสภาพการเลือก (Selectivity) กับแก๊สกรด อีกทั้งกระบวนการดูดซับมีการลงทุนและค่าใช้จ่ายที่ต่ำ

งานวิจัยนี้พัฒนาต่อเนื่องจากงานวิจัย “การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ฟิวซิลิกาตัดแปรด้วยแอมีน” ซึ่งพบว่าตัวดูดซับฟิวซิลิกา (Fumed silica, Fsi) ตัดแปรด้วยแอมีนชนิด Polyethyleneimine มวลโมเลกุล 800 (PEI800) ปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก (Fsi-PEI800-40) มีลักษณะเป็นผง มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สกรดได้ดี (เปรียบเทียบกับแอมีน 6 ชนิด คือ Polyethyleneimine มวลโมเลกุล 800 (PEI800) , Aminoethylethanolamine (AEEA), N-3-(tri methoxysilyl)propyldiethylenetriamine (TRI), Diethylenetriamine (DETA), Triethylene tetramine (TETA), Tetraethylenepentamine (TEPA) บนตัวรองรับ 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมินาแกมมันต์ แคลไซน์อะลูมินา หรือฟิวซิลิกา ในอัตราส่วน 20, 30, 40, 50 และ 60 % โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่า ตัวดูดซับฟิวซิลิกาตัดแปรด้วยแอมีนชนิด Polyethyleneimine มวลโมเลกุล 800 ในปริมาณ 40% โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ดีที่สุด ปริมาณแอมีนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการดูดซับเพิ่มขึ้นไปจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าการดูดซับเริ่มลดลง การใช้แอมีนมากเกินไปจะทำให้แอมีนจับตัวเป็นก้อนและไปบดบังรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับไม่ดี) แต่หากใช้ตัวดูดซับในรูปแบบผงทำให้เกิดความดันลดภายในระบบคอมลัมน์เบตนั้น เนื่องจากผงตัว

ดูดซับจะเกิดการอัดตัวแน่นภายในเบตและผงตัวดูดซับอาจหลุดออกจากเบตและไปอุดตันท่อในระบบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีแนวคิดในการพัฒนาตัวดูดซับให้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง โดยการขึ้นรูปตัวดูดซับด้วยวิธี Extrusion โดยใช้ตัวประสาน ทดลองหาปริมาณและชนิดตัวประสานที่เหมาะสมที่สุด และศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ในคอลัมน์เบตนิ่ง ระดับห้องทดลองและระดับขยาย 20 เท่าจากระดับห้องทดลอง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิและระบบการดูดซับต่อความสามารถการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์
2. ศึกษาการเตรียมตัวดูดซับชนิดพุ่มซิลิกาตัดแปรด้วยแอมินชนิด Polyethyleneimine ขึ้นรูปด้วยวิธี Extrusion โดยใช้ตัวประสาน
3. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดพุ่มซิลิกาตัดแปรด้วยแอมินในคอลัมน์เบตนิ่ง ระดับห้องทดลอง (Lab-scale) และระดับขยาย 20 เท่า (Up-scale) ที่สามารถบรรจุตัวดูดซับในคอลัมน์เบตนิ่งได้ประมาณ 20 เท่าของระดับห้องทดลอง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิและระบบการดูดซับ (การดูดซับในคอลัมน์เดี่ยวและ 2 คอลัมน์) ต่อความสามารถการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์
2. ทำการขึ้นรูปผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ด้วยวิธี Extrusion โดยใช้ตัวประสาน ตัวประสานที่ใช้ ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง (Tapioca starch/starch), Polyvinyl alcohol (PVA) และ Bentonite clay
3. วิเคราะห์พื้นผิว โครงสร้าง สมบัติของตัวดูดซับ
4. ทดสอบความคงรูปเชิงกล (Mechanical strength) ของเม็ดตัวดูดซับ ด้วยเครื่องทดสอบ Bulk crushing strength
5. ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วยคอลัมน์เบตนิ่งที่ความดันบรรยากาศในระดับห้องปฏิบัติการและระดับขยาย

6. เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างตัวดูดซับที่เตรียมได้กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ชนิด Molecular sieve 5A
7. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดฟุ้งซิลิกา คัดแปรด้วยแอมีนในคอลัมน์เบดนิ่งของระบบในระดับขยาย 20 เท่า

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแยกแก๊สกรดและการขึ้นรูปเม็ด
2. จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและสารเคมี
3. เตรียมตัวดูดซับแอมีนบนฟุ้งซิลิกาโดยวิธีอิมเพรกเนชัน (Impregnation) โดยหยดสารละลาย PEI800 ปริมาณ 40% โดยน้ำหนักในเมทานอลลงสารละลายฟุ้งซิลิกาในเมทานอล ให้ความร้อนสารละลายที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เพื่อไล่เมทานอล อบให้แห้งข้ามคืน จากนั้นนำมาบดให้ละเอียด
4. การขึ้นรูปตัวดูดซับด้วยวิธี Extrusion โดยใช้ตัวประสาน คือ Starch, PVA และ Bentonite clay ผสมตัวประสานและตัวดูดซับให้เป็นเนื้อเดียวกัน จนได้เป็นลักษณะก้อนเหนียว บรรจุลงหลอดฉีดยาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออก 2 มิลลิเมตร ฉีดขึ้นงานลงบนแผ่นกระดาษอลูมิเนียมฟอยล์ วางไว้ให้ขึ้นงานข้ามคืนเพื่อให้ขึ้นงานเกิดการแข็งตัว จากนั้นนำขึ้นงานมาตัดให้มีความยาวชิ้นละ 4 มิลลิเมตร
5. ทดสอบวิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับ
 - การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนบีอีที (Brunauer Emmett Teller ; BET)
 - การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis ; TGA)
6. ทดสอบความสามารถในการคงรูปเชิงกลด้วยการทดสอบ Bulk crushing strength ตามมาตรฐาน ASTM 7084-04 โดยศึกษาผลของตัวแปร
 - ชนิดตัวประสาน
 - ปริมาณตัวประสาน
 - อุณหภูมิของกระบวนการทำให้แห้งหลังจากฉีดตัวอย่าง
 - ระยะเวลาการบ่มตัวดูดซับ

7. ทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยคอลัมน์เบตนิ่ง ทั้งตัวดูดซับแบบผงและแบบเม็ด ในระบบคอลัมน์เดี่ยวและระบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่องในระดับห้องปฏิบัติการ โดยศึกษาผลของตัวแปร

- อุณหภูมิการดูดซับ
- ระบบการดูดซับแบบคอลัมน์เดี่ยว และ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง
- ชนิดตัวประสาน
- ปริมาณตัวประสาน
- ระยะเวลาการบ่มตัวดูดซับ

และระบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่องระดับขยาย โดยศึกษาผลของตัวแปร

- อัตราการไหลแก๊สไฮโดรเจนสำหรับ Pretreatment
- ระยะเวลา Pretreatment
- อัตราการไหลแก๊สผสม

8. ศึกษาการคืนสภาพและเสถียรภาพของตัวดูดซับ

9. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ตัวดูดซับที่เหมาะสมกับการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์
2. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบขยาย 20 เท่าของระดับห้องทดลอง

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก๊สชีวภาพ [1, 2]

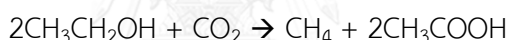
แก๊สชีวภาพ (Biogas) เกิดจากการย่อยสลายมูลสัตว์ เป็นพลังงานสะอาดที่เกิดจากการนำของเสีย เช่น มูลสัตว์ น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ขยะ และของเหลือใช้ทางการเกษตร รวมทั้งของเสีย น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตร เช่น โรงงานแปรงมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โรงงานผลไม้กระป๋อง โรงงานน้ำตาล โรงงานผลิตแอลกอฮอล์ โรงฆ่าสัตว์ และจากขยะชุมชน หรือร้านค้า ภัตตาคาร เป็นต้น มาผ่านกระบวนการหมักเพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) โดยแบคทีเรียหลายชนิด เมื่อสภาวะแวดล้อมเหมาะสมแบคทีเรียจะเจริญเติบโต และย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน จนกระทั่งในที่สุดเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊สชีวภาพ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทน (CH_4) ประมาณ 50-70% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30-40% ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สชนิดอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2), ออกซิเจน (O_2), ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S), ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ [$\text{C}_6\text{H}_{13}\text{O}_5 + \text{xH}_2\text{O} \rightarrow \text{COOH}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3 \rightarrow 4\text{CH}_4 + 2\text{CO}_2$]

แก๊สชีวภาพมีชื่ออื่นอีกคือ แก๊สหนองน้ำ และมาร์ชแก๊ส (marsh gas) ขึ้นกับแหล่งที่เกิด กระบวนการนี้เป็นที่นิยมในการเปลี่ยนของเสีย ประเภทอินทรีย์ทั้งหลายไปเป็นกระแสไฟฟ้า นอกจากกำจัดขยะได้แล้วยังทำลายเชื้อโรคได้ด้วย การใช้แก๊สชีวภาพเป็นการบริหารจัดการของเสียที่ควรได้รับการสนับสนุนเพราะไม่เป็นการเพิ่มแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศที่เป็นต้นเหตุของปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect)

2.1.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะปราศจากออกซิเจน (Anaerobic-digestion)

แก๊สชีวภาพเกิดจากการหมักของสารอินทรีย์โดยมีจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรีย เช่น จุลินทรีย์กลุ่ม สร้างมีเทน (Methane-producing bacteria) หรือเมทาโนเจน และจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acid producing bacteria) มาช่วยย่อยในภาวะไร้อากาศ ในกระบวนการย่อยในภาวะไร้อากาศเป็นการที่จุลินทรีย์ต่างๆ ทำปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์จากสิ่งมีชีวิตซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนเป็นโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยลงเป็นขั้นๆ ไป กระบวนการหมักย่อยในภาวะไร้อากาศแบ่งเป็น 4 ขั้นดังนี้

1. ไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) สารอินทรีย์ (เศษพืชผัก เนื้อสัตว์) มีองค์ประกอบสำคัญ คือ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน แบคทีเรียจะปล่อยเอนไซม์เอกซ์ตราเซลลูลาร์ (Extracellular enzyme) มาช่วยละลายโครงสร้างโมเลกุลอันซับซ้อนให้แตกลงเป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว เช่น การย่อยสลายแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส การย่อยสลายไขมันเป็นกรดไขมัน และการย่อยโปรตีนเป็นกรดอะมิโน
2. แอซิติฟิเคชัน หรือ แอซิโดเจเนซิส (Acidification/acidogenesis) การย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงเดี่ยว (Monomer) เป็นกรดระเหยง่าย (Volatile fatty acid) กรดคาร์บอนแอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และไฮโดรเจน
3. อะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis) เปลี่ยนกรดระเหยง่ายเป็นกรดอะซิติก หรือเกลืออะซิเตตซึ่งเป็นสารตั้งต้นหลักในการผลิตมีเทน
4. เมทาไนเซชัน หรือเมทาโนเจเนซิส (Methanization/Methanogenesis) กรดอะซิติกและอื่นๆจากขั้นที่ 2 รวมถึงคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนบางส่วน จะเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนเป็นมีเทนโดยเมทาโนเจน (Methanogen)



สมบัติของแก๊สชีวภาพ

ค่าความร้อน	21 เมกะจูลต่อลูกบาศก์เมตร (ที่ปริมาณมีเทน 60 %)
ความเร็วเปลวไฟ	25 เซนติเมตรต่อวินาที
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิจุดติดไฟ (CH_4)	600 องศาเซลเซียส
ค่าความจุความร้อน	1.6 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร-องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	1.15 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร-องศาเซลเซียส

2.1.2 การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพ [3]

เนื่องจากแก๊สชีวภาพที่มีสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่สูงกว่า 50% สามารถจุดติดไฟได้ดี ดังนั้นแก๊สชีวภาพที่ได้นี้สามารถนำไปใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงอื่นๆ ได้ การทำระบบแก๊สชีวภาพก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านการอนุรักษ์พลังงาน การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และการเกษตร นอกจากนี้ยังให้ผลตอบแทนในรูปแบบต่างๆ อีกมากมาย ดังต่อไปนี้

1. ลดต้นทุนในการลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีการปล่อยแก๊สมีเทนลดลง
2. สารอาหารที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อม ได้แก่ แก๊สไนโตรเจนและฟอสฟอรัส สามารถกระจายจากแหล่งที่มีการสะสมอยู่มาก เช่น ในเขตปศุสัตว์คอก และแม่น้ำ ไปยังบริเวณอื่นๆ ได้
3. ปุ๋ยที่ได้จากการย่อยสลายชีวมวลจะมีคุณค่าดีกว่าปุ๋ยที่ได้จากวัตถุดิบโดยตรง (น้ำเสีย) และสามารถนำมาใช้ได้อย่างสะดวกในพื้นที่เกษตรกรรม
4. โรงผลิตแก๊สชีวภาพจากชีวมวลมีข้อได้เปรียบอย่างมากในการหมุนเวียนสารอาหารกลับมาใช้ใหม่ในพื้นที่การเกษตร เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกำจัดขยะรูปแบบอื่นๆ ซึ่งนับเป็นแนวทางการจัดการด้านเศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมที่ยั่งยืน
5. แก๊สชีวภาพจัดเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สามารถทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล จึงเป็นการเพิ่มเสถียรภาพด้านการจัดหาพลังงาน
6. สามารถลดค่าใช้จ่าย และเพิ่มรายได้เนื่องจากสามารถผลิตแก๊สชีวภาพแทนเชื้อเพลิงประเภทอื่น
7. สามารถลดปัญหามลภาวะทางกลิ่นรบกวน และลดปัญหาการใช้พลังงานในการกำจัดน้ำเสีย

การใช้แก๊สชีวภาพในการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้า เป็นรูปแบบการนำแก๊สชีวภาพไปใช้ประโยชน์ที่ได้รับความนิยมอย่างมากในฟาร์มเลี้ยงสุกร เนื่องจากพลังงานกล/ไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อผลิตเป็นไฟฟ้าแล้วสามารถนำไปใช้งานได้สะดวก รูปแบบการผลิตพลังงานกล/ไฟฟ้าโดยใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงกับเครื่องยนต์มีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้ใช้แก๊สชีวภาพร่วมกับน้ำมันดีเซล สามารถทดแทนการใช้ น้ำมันดีเซลได้ประมาณ 60-70% วิธีนี้จะง่ายต่อการดัดแปลงมาก และเสียค่าดัดแปลงน้อยที่สุด เพียงแต่ต่อเชื่อมแก๊สชีวภาพเข้ากับระบบท่อไอดีของเครื่องยนต์ และมีวาล์วสำหรับปรับแต่งปริมาณการป้อนแก๊สชีวภาพให้เหมาะสม แต่ต้องมีการใช้น้ำมันดีเซลอยู่ส่วนหนึ่ง

2. เครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงให้สามารถใช้แก๊สชีวภาพได้ 100% จะเป็นการดัดแปลงเครื่องยนต์ดีเซลให้มีความทำงานเหมือนเครื่องยนต์เบนซินซึ่งจะสามารถใช้แก๊สชีวภาพได้ทั้งหมด ราคาดัดแปลงค่อนข้างสูง แต่จะเหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ค่อนข้างใหญ่คือกำลังผลิตไฟฟ้ามากกว่า 30 กิโลวัตต์ ขึ้นไป
3. เครื่องยนต์เบนซินดัดแปลงให้สามารถใช้แก๊สชีวภาพได้ 100% เป็นการดัดแปลงระบบผสมอากาศกับเชื้อเพลิงให้สามารถใช้งานกับแก๊สชีวภาพได้ทั้งหมด การดัดแปลงจะเสียค่าใช้จ่ายน้อยเหมาะสมสำหรับเครื่องยนต์ขนาด 10-25 กิโลวัตต์
4. เครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สโดยเฉพาะ (เครื่องนำเข้าจากต่างประเทศ) จะเป็นเครื่องยนต์ที่สร้างมาสำหรับการใช้แก๊สชีวภาพโดยเฉพาะจะมีประสิทธิภาพสูงแต่ราคาจะสูงมาก ส่วนใหญ่จะเป็นเครื่องยนต์ขนาดใหญ่กำลังผลิตไฟฟ้ามากกว่า 200 กิโลวัตต์ ขึ้นไปโดยต่อรวมกับ Synchronous generator

เครื่องยนต์ทั้ง 4 แบบนี้สามารถต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) หรือ มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าส่งออกทางสายส่งไฟฟ้าหลักเพื่อใช้สำหรับกิจกรรมการเลี้ยงสัตว์ภายในฟาร์ม หรือใช้เป็นเครื่องยนต์ต้นกำลังแทนเครื่องต้นกำลังเดิมของฟาร์ม

2.1.3 การปรับปรุงคุณภาพแก๊ส [1]

สิ่งที่ต้องปฏิบัติก่อนนำแก๊สชีวภาพไปใช้งานมีข้อควรพิจารณาดังนี้

1. การดักน้ำในท่อส่งแก๊ส ปกติแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้มักมีความชื้นสูงเกือบถึงจุดอิ่มตัว เมื่อแก๊สชีวภาพไหลผ่านท่อส่งแก๊สที่มีอุณหภูมิต่ำจะทำให้ความชื้น (ไอน้ำ) ในแก๊สกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ และสะสมจนอุดตันทางเดินของแก๊ส ทางแก้ไขคือ ควรติดตั้งชุดดักไอน้ำเพื่อกำจัดหรือลดปริมาณน้ำในท่อส่งแก๊ส
2. การปรับลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของฝนกรด หรือไอกรดที่สามารถกัดกร่อนโลหะและอุปกรณ์ได้ ดังนั้นการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนนำไปใช้ประโยชน์จึงเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมและช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์

2.2 กระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพ

กระบวนการทำความสะอาดแก๊สชีวภาพมีอยู่ 3 วิธี คือ การดูดซึม (Absorption) การแยกด้วยเยื่อแผ่น (Membrane separation) และ การดูดซับ (Adsorption)

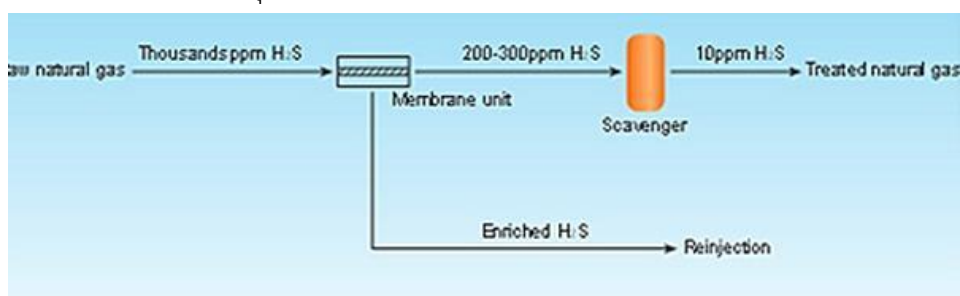
2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption) [4]

การดูดซึม หรือการดูดกลืนเป็นกระบวนการถ่ายโอนมวลซึ่งใช้กำจัดสารมลพิษที่เป็นแก๊สออกจากกระแสอากาศโดยให้สัมผัสกับของเหลว การที่โมเลกุลสามารถถ่ายโอนจากสภาพแก๊สไปยังสภาพของเหลวได้เนื่องจากทั้ง 2 เฟสนั้นมีความเข้มข้นต่างกัน (Concentration gradient) ที่ผิวของเหลวและแก๊สเป็นแรงดัน (Driving force) ให้เกิดการถ่ายโอนมวล นอกจากนี้แล้วพื้นที่ผิวสัมผัสสูง การปั่นป่วน (Turbulent) และสัมประสิทธิ์การแพร่มวลสูงจะช่วยเร่งการเกิดการดูดซึม

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

2.2.2 กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่น (Membrane separation) [5]

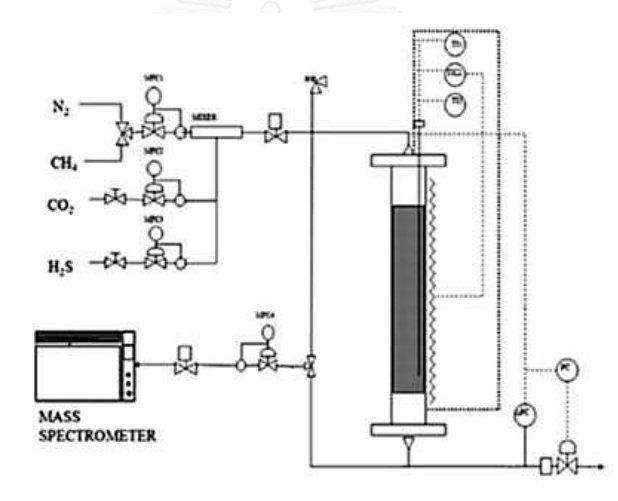
วิธีนี้สามารถแยกแก๊สได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับทางเลือกชนิดของเยื่อแผ่น สำหรับการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้น วิธีนี้สามารถแยกแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้บางส่วน พบว่ามีไฮโดรเจนซัลไฟด์ปะปนออกมา ตัวระบบเหมาะสมกับการกำจัดแก๊สเสียปริมาณน้อยๆ นอกจากนั้นกระบวนการนี้ยังพบข้อจำกัดคือ ระบบใช้พลังงานสูงเนื่องจากต้องใช้ความดันสูง ระบบติดตั้งมีราคาสูง ตัวเยื่อแผ่นมีราคาแพง กระบวนการเสี่ยงต่อการอุดตันบนเยื่อ และเกิดความเสียหายง่าย ซึ่งหากระบบเกิดความเสียหายจำเป็นต้องเปลี่ยนวัสดุเกือบทั้งระบบ



ภาพที่ 2.1 กระบวนการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากแก๊สธรรมชาติด้วยเยื่อแผ่น [5]

2.2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) [6, 7]

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณ พื้นผิว หรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 ภาวะใด ๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุล หรือ คอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่าสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) กระบวนการนี้ สามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้อย่างสมบูรณ์ด้วยคอลัมน์ดูดซับแบบเบดนิ่ง ซึ่งสามารถออกแบบระบบให้มีความเหมาะสมกับแก๊สที่ต้องการกำจัด โดยการพัฒนาตัวดูดซับให้มีความจำเพาะกับแก๊สดังกล่าว อีกทั้งยัง เกิดของเสียในกระบวนการน้อย ทำโดยการบรรจุตัวดูดซับลงในคอลัมน์ดูดซับ จากนั้นผ่านแก๊สผสม ไปยังตัวดูดซับได้แก๊สบริสุทธิ์ วิธีนี้สามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้



ภาพที่ 2.2 กระบวนการดูดซับแยกแก๊สกรดออกจากแก๊สผสม [6]

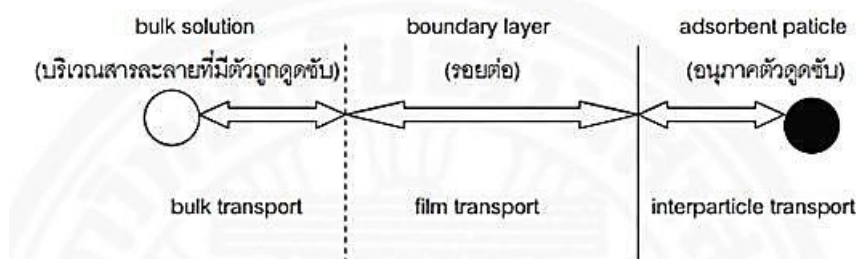
2.3 กระบวนการดูดซับ [6-8]

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะ เช่น ของเหลวกับของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุล หรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่าสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับ เรียกว่าสารดูดซับ (Adsorbent) การคายของโมเลกุลในตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ คือ การแตกออกของ พันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่ได้ตำแหน่งกัมมันต์ (Activation) กลับคืนมาจะ

เหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Dissociation) อาจหมายถึงการทำให้โมเลกุลต่างๆ ที่จับอยู่บนผิวหน้าหลุดออกไป เช่น การกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากผิวหน้าของอะลูมินา หรืออาจหมายถึงการเตรียมตำแหน่งกัมมันต์โดยปฏิกิริยาเคมี เช่น ปฏิกิริยารีดักชันเพื่อเปลี่ยนอนุภาคของโลหะออกไซด์เป็นโลหะก่อนทำปฏิกิริยา

ขั้นตอนในการดูดซับแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ [9]

1. การขนส่งอนุภาค (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกละลายแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นต้น
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรง หรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่าการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

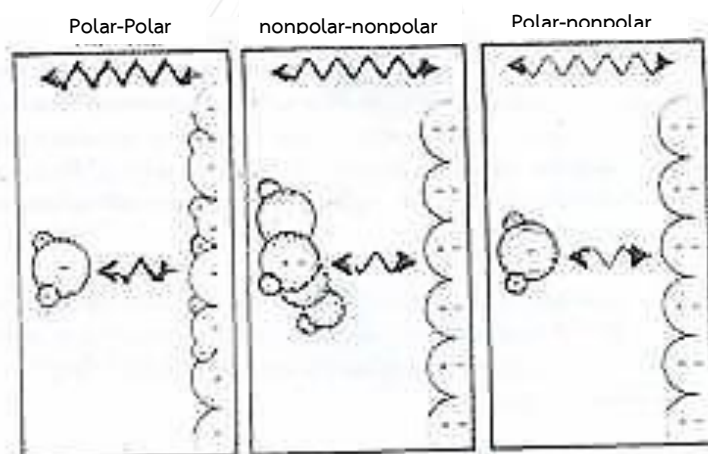


ภาพที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลตัวถูกละลายไปยังตัวดูดซับ [9]

2.3.1 ประเภทของแรงดูดซับ

ปัจจัยสำคัญในการบอกชนิดของกระบวนการดูดซับพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) เป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับ กับผิวของสารดูดซับ เรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

1. การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อนคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 25 กิโลจูลต่อโมล เป็นกระบวนการคายความร้อน ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) และไม่มีการแตกของพันธะดังนั้นจึงสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในทันทีที่โมเลกุลเดินทางมาถึงผิวหน้า แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีความพรุนสูง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้าลง เนื่องจากถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการแพร่ ปริมาณของการดูดซับแบบนี้เป็นแบบไม่เลือก กล่าวคือขึ้นอยู่กับจุดเดือดของแก๊ส แต่ไม่ขึ้นกับชนิดของพื้นผิวและชนิดของแก๊ส หลังการดูดซับแก๊สที่ผิวหน้าไม่เป็นชั้นเดียวและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วยสารที่ถูกดูดซับ สามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านั้น โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย



ภาพที่ 2.4 แรงทางกายภาพที่ทำให้เกิดการดูดซับ [8]

2. การดูดซับทางเคมี การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม หรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่าง

การดูดซับทางเคมีเป็นผลมาจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างโมเลกุลของแก๊สกับโมเลกุลของตัวดูดซับโมเลกุลของแก๊สถูกยึดติดกับผิวของตัวดูดซับโดยการเกิดพันธะทางเคมี ตัวดูดซับที่ใช้ในกระบวนการดูดซับทางเคมีอาจเป็นสารบริสุทธิ์ หรือเป็นสารเคมีที่จับเกาะอยู่บนสารเคมีเฉื่อย ยกตัวอย่าง เช่น อาจใช้เหล็กออกไซด์บริสุทธิ์ชั้นเล็กๆ เพื่อการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรืออีกตัวอย่างหนึ่ง คือ ใช้แอคทิเวตเตดคาร์บอนซึ่งดูดซึ่มกัมมะถันไว้เพื่อการดูดซับไอปรอท

กระบวนการดูดซับทุกๆ แบบเป็นกระบวนการคายความร้อนเพราะว่าในการดูดซับโมเลกุลจะเคลื่อนย้ายจากแก๊สไปที่ผิวของของแข็งการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของโมเลกุลของแก๊ส ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานจลน์ในการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของแก๊สนั้นให้แก่ตัวดูดซับในรูปของความร้อนในกระบวนการดูดซับทางเคมี

ข้อแตกต่างต่างๆ ไปนอกเหนือจากที่กล่าวแล้วข้างต้นระหว่างกระบวนการดูดซับทางกายภาพ และกระบวนการดูดซับทางเคมีซึ่งทำให้กระบวนการดูดซับทางกายภาพเป็นที่ต้องการมากกว่าในเรื่องของการควบคุมมลพิษทางอากาศ คือ

1. โมเลกุลซึ่งถูกดูดซับไว้โดยกระบวนการดูดซับทางเคมียากที่จะกำจัดออกจากเขตของของแข็งดูดซับและในบางกรณีไม่อาจกำจัดออกได้เลย แต่โมเลกุลซึ่งถูกดูดซับไว้ทางกายภาพสามารถกำจัดออกได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิปฏิบัติการขึ้น หรือโดยการลดความดันของเบตของของแข็ง
2. เพื่อให้เกิดการดูดซับทางเคมีขึ้นโมเลกุลของแก๊สต้องสามารถเกิดพันธะทางเคมีกับผิวของตัวดูดซับได้ แต่กระบวนการดูดซับทางกายภาพเกิดขึ้นภายใต้ภาวะที่เหมาะสมของระบบแก๊ส-ของแข็งส่วนใหญ่ในเชิงอุตสาหกรรมแล้วจะเลือกของแข็งดูดซับซึ่งทำให้อัตราเร็วในการดูดซับสูงขึ้น
3. กระบวนการดูดซับทางเคมีจะหยุดเมื่อตำแหน่งที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาบนผิวของตัวดูดซับทุกตำแหน่งได้เกิดปฏิกิริยาไปหมดแล้ว และทำให้เกิดชนของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับได้เพียงชั้นเดียว แต่เนื่องจากแรง Van der Waals ในการดูดซับทางกายภาพทำให้สามารถเกิดขึ้นของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้นซ้อนกัน
4. อัตราการดูดซับทางเคมีจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่สำหรับการดูดซับทางกายภาพอัตราการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [10]

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 kJ/mole	50-400 kJ/mole
2. อุณหภูมิการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนแก๊สของแข็ง	ได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

2.4 ตัวดูดซับ [6, 11-14]

การดูดซับเป็นการสะสมสารถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับซึ่งมักเป็นของแข็ง ตัวดูดซับจึงต้องมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง เพื่อให้สามารถดูดซับสารถูกดูดซับได้ปริมาณมากๆ ดังนั้นตัวดูดซับจึงมีลักษณะพรุนหรือมีรูพรุนภายในมากแต่ตัวดูดซับมีขนาดเท่าเดิม ตัวดูดซับจึงมีความหนาแน่นลดลง สามารถแบ่งสารดูดซับเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะผิวของผิว คือ ชนิดที่มีรูพรุน ได้แก่ ซีโอไลต์ (Zeolites), อะลูมินา (Porous alumina), ซิลิกา เจล (Silica gel) เป็นต้น และชนิดไม่มีรูพรุน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์, ตัวดูดซับพอลิเมอร์ (Polymer adsorbent) เป็นต้น

ซีโอไลต์ (Zeolites) เป็นสารประกอบของ Alumino silicate คือ ประกอบด้วย ซิลิกอน 1 อะตอม และออกซิเจน 4 อะตอม โดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ ชนิดที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ พบในประเทศญี่ปุ่นและประเทศไต้หวัน นิยมใช้ในการดูดซับความชื้น กลิ่น เพื่อทำให้น้ำบริสุทธิ์รวมทั้งแยกไอออนของแอมโมเนีย หรือธาตุของโลหะหนักออกจากน้ำ และ Zeolites ชนิดสังเคราะห์มีความจำเพาะในการดูดซับสูงมาก สามารถดูดซับสารที่ขนาดเล็กกว่า 4 อังสตรอม (1 อังสตรอม = 10^{-10} เมตร)

อะลูมินา หรือ อะลูมินาออกไซด์ (Alumina หรือ Aluminum oxide) สังเคราะห์ขึ้นโดยกำจัดน้ำออกจาก alumina hydrates ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) มีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 150-500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 15-60 อังสตรอม นิยมใช้เพื่อดูดซับความชื้น หรือแก๊สที่มีรูพรุนออกจากแก๊สไฮโดรคาร์บอน ซิลิกาเจล (Silica gel) สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยากำจัดน้ำออกจาก Silicic acid หรือปฏิกิริยาระหว่าง Sodium silicate กับ Sulfuric acid ในทางการค้ามี 2 แบบ คือ แบบ A มีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 650 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้น

ผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 2-3 อังสตรอม และแบบ B มีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 450 ตารางเมตรต่อกรัม และมีเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 7 อังสตรอม นิยมใช้เพื่อดูดความชื้นออกจากแก๊สต่างๆ

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) สังเคราะห์ขึ้นจากวัสดุต่างๆ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่าน ถ่านหิน กะลาตาลโตนด ฯลฯ ในทางการค้ามี 4 แบบ คือ

- 1) แบบผงมีขนาดอนุภาคประมาณ 15-25 ไมครอน ($1 \text{ ไมครอน} = 10^{-6} \text{ เมตร}$) นิยมใช้เพื่อกำจัดสีออกจากผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การผลิตน้ำตาลทรายขาว การผลิตน้ำดื่ม ฯลฯ
- 2) แบบเม็ดมีขนาดอนุภาคประมาณ 4-6 มิลลิเมตร นิยมใช้เพื่อดูดซับแก๊ส หรือของเหลวได้ เช่น ใช้ในการฟอกอากาศให้บริสุทธิ์ ใช้ในการกำจัดซัลเฟอร์ออกจากแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ ฯลฯ
- 3) แบบโมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve) มีความจำเพาะในการดูดซับสูงมากเนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กและสม่ำเสมอ ลักษณะทั่วไปอาจเป็นผง หรือเป็นเม็ดก็ได้มักใช้เพื่อดูดซับแก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศ
- 4) แบบไฟเบอร์ สังเคราะห์ขึ้นโดยเลือกสารตั้งต้นเป็น Phenolic resin, Polyacrylic resin, Viscous rayon ลักษณะทั่วไปคล้ายตาข่ายที่มีช่องว่างกว้างประมาณ 7-15 ไมครอน นิยมใช้ผลิตหน้ากาก หรือใช้ในกระบวนการนำสารละลายที่ใช้แล้วกลับใช้ใหม่

โมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve) เป็นสารดูดซับที่มีโครงสร้างเป็นผลึก ฉะนั้นจึงมีรูพรุนกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในแนวเส้นผ่านศูนย์กลางหนึ่งๆ สามารถใช้โมเลกุลาร์ซีฟเพื่อจับ หรือแยกแก๊สที่มีขนาดและรูปร่างแบบโมเลกุลออก ยกตัวอย่าง เช่น ในกระบวนการกลั่นน้ำมันบางครั้งจะใช้โมเลกุลาร์ซีฟเพื่อแยกสารพาราฟินชนิดที่มีโซ่ตรงออกจากสารประกอบที่เป็นกิ่ง และที่เป็นไซคลิก แต่การใช้ประโยชน์หลักของโมเลกุลาร์ซีฟ คือ เพื่อกำจัดไอน้ำออกจากกระแสแก๊ส

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [6, 8]

1. ขนาดของตัวดูดซับ (Adsorbent) ถ้าตัวดูดซับเป็นชนิดที่ไม่มีรูพรุน พื้นที่ที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเล็กลง ดังนั้นจึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับเป็นชนิดที่มีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ดังนั้นขนาดจึงไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดที่มีรูพรุนมาก

2. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวในการดูดซับนั้นไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการ

การดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะว่าขนาดของโมเลกุลของตัวดูดซับสามารถที่จะเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ดังนั้นการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดของโมเลกุลของตัวดูดซับไม่สามารถที่จะเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับการดูดซับก็จะต่ำลง

3. ความสามารถในการละลายของตัวดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย และไปเกาะติดที่ผิวของตัวดูดซับ เช่น ในกรณีที่สารละลายมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ตัวดูดซับที่ละลายน้ำได้ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงเป็นการยากต่อการดูดซับหลายชนิดที่มีความสามารถในการเกาะติดผิวของตัวดูดซับได้ยาก

4. น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลาย เมื่อน้ำหนักของโมเลกุลและขนาดโมเลกุลเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น

5. ความมีขั้วของโมเลกุล เมื่อโมเลกุลสภาพมีขั้ว (Polarity) มากขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง เพราะว่าการเพิ่มสภาพมีขั้วจะส่งผลทำให้ความสามารถในการละลายมากขึ้น

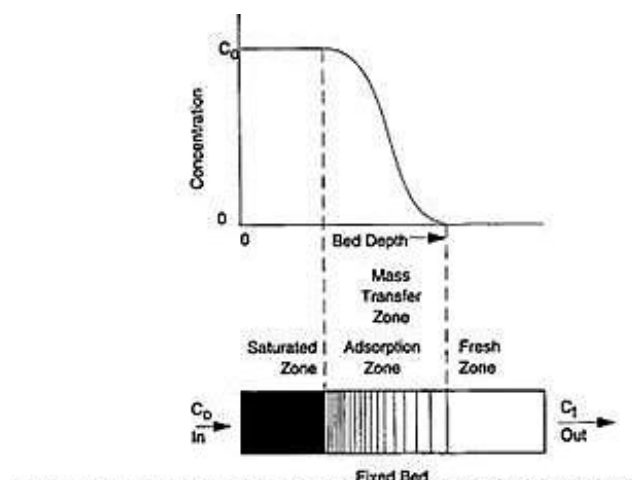
6. ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่มีผลต่อตัวดูดซับ และตัวถูกละลายทั้งตัวถูกละลาย และตัวดูดซับอาจมีลักษณะทางเคมีซึ่งได้รับผลจากความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนในสารละลาย ตัวดูดซับบางตัวมีไอออนไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีผลต่อค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายความสามารถในการละลาย และค่าความจุของการดูดซับโดยตรง สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายในระบบที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจะมีความไวต่อค่าความเป็นกรด-เบสสูง ซึ่งตัวถูกละลายจะเลือกช่วงค่าความเป็นกรด-เบส ที่เป็นกลาง และจุดที่เกิดการดูดซับได้สูงที่สุดนั้นเกิดจาก ความสามารถในการละลายที่ต่างของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นสารที่ไม่แตกตัวเป็นไอออน และสามารถเกิดการดูดซับกับตัวดูดซับที่ไม่มีขั้วได้

7. อุณหภูมิอัตราการดูดซับ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการแพร่ผ่านของโมเลกุลของสารละลายไปยังตัวดูดซับที่ค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายและความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

8. ความดัน ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความดันย่อยของไอสารที่ต้องการดูดซับไว้และความดันย่อยของไอสารที่ต้องการจะดูดซับไว้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันทั้งหมดของระบบ โมเลกุลของสารที่ต้องการดูดซับถูกอัดเข้าไว้ด้วยกันมากขึ้น จึงมีจำนวนโมเลกุลมากขึ้นมีโอกาสที่จะชนกับตำแหน่งเพื่อการดูดซับได้ ทำให้มีจำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีเพิ่มขึ้น

9. ความเร็วของแก๊ส ระยะเวลาของการสัมผัสระหว่างกระแสแก๊สกับสารดูดซับถูกกำหนดโดยความเร็วของกระแสแก๊สที่ผ่านหน่วยดูดซับไป ระยะเวลาของการสัมผัสมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไว้ โดยความเร็วของกระแสแก๊สที่มีสารพิษ ซึ่งให้ผ่านหน่วยดูดซับที่ช้าลงจะ

หมายถึงการมีโอกาสที่มากขึ้นของโมเลกุลของสารพิษที่จะชนกับตำแหน่งที่สามารถดูดซับได้ ทันทีที่โมเลกุลของสารถูกจับไว้แล้ว มันจะคงอยู่ที่ผิวนั้นจนกระทั่งสภาวะทางกายภาพของระบบเปลี่ยนไป



ภาพที่ 2.5 ความเข้มข้นภายในตัวดูดซับ [12]

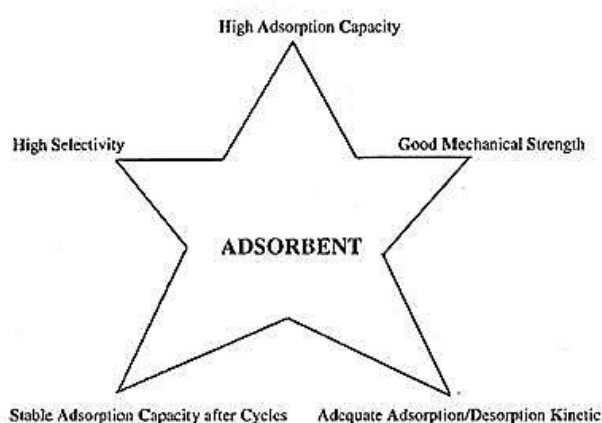
10. ความสูงของเบด การให้มีความสูงของชั้นสารดูดซับที่เพียงพอมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อให้มีการกำจัดแก๊สมลพิษออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าความสูงของเบดตัวดูดซับน้อยกว่าเขตการแลกเปลี่ยนมวล (Mass transfer zone: MTZ) จะถึงจุด Breakthrough โดยทันทีทำให้ระบบไม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับ

11. ความชื้น สำหรับสารดูดซับที่ชอบดูดซับโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วมากกว่าโมเลกุลของไอน้ำที่มีขั้ว โมเลกุลของไอน้ำในกระแสแก๊สเสียที่ต้องการบำบัดจะมีแรงดึงดูดต่อกันที่แรงกว่าแรงดึงดูดกับสารดูดซับ แต่ที่สภาวะซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์สูง คือ มากกว่า 50% จะมีจำนวนโมเลกุลของน้ำเพิ่มขึ้นจนกระทั่งโมเลกุลของน้ำเริ่มที่จะเข้าแย่งตำแหน่งเพื่อการดูดซับกับโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอน ทำให้ความสามารถและประสิทธิภาพของระบบลดลง กระแสแก๊สเสียที่ต้องการบำบัดที่มีความชื้นสูงมากกว่า 50% จึงต้องเพิ่มอุปกรณ์เพื่อกำจัดไอน้ำบางส่วนออกเช่น หน่วยทำความเย็น (Cooler) หรืออาจใช้วิธีเติมอากาศเจือจางที่มีความชื้นต่ำมาก หรือเพิ่มอุณหภูมิของกระแสแก๊สเสียขึ้นตรงเท่าที่การเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเสียไป

2.4.2 ลักษณะตัวดูดซับที่ดี [15]

1. ตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดใหญ่เพียงพอ เพื่อให้ตัวถูกดูดซับสามารถแพร่ไปยังพื้นผิวภายในรูพรุนของเม็ดตัวดูดซับนั้นได้โดยสะดวก

2. ตัวดูดซับต้องสามารถเลือกสารประกอบที่ต้องการแยกออกจากสารผสมนั้นได้มากกว่า หรือได้เร็วกว่าสารประกอบอื่นๆ ในของผสมนั้น
3. ตัวดูดซับต้องสามารถทนทานต่อการสึกกร่อนทางเคมีและทางกล ณ อุณหภูมิการดูดซับ และอุณหภูมิการปรับสภาพการดูดซับ
4. ตัวดูดซับต้องไม่เกิดปฏิกิริยากับสารประกอบใดๆ ในสารผสมนั้น ณ อุณหภูมิการดูดซับ และอุณหภูมิการปรับสภาพการดูดซับ
5. ตัวดูดซับควรมีความหนาแน่นน้อย และมีรูพรุนมาก แต่มีลักษณะแข็งไม่แตกเป็นผงง่าย
6. ตัวดูดซับควรรหาได้ง่ายและราคาไม่แพง
7. มีเสถียรภาพ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้



ภาพที่ 2.6 ลักษณะตัวดูดซับที่ดี [15]

2.5 ทฤษฎีการดูดซับ [16]

ไอโซเทอรั่มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ของปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่พื้นผิวกับความดันของแก๊ส หรือความเข้มข้นของสารละลายที่อุณหภูมิคงที่สำหรับการดูดซับ ตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบ่งออกได้เป็นดังนี้

2.5.1 ไอโซเทอรั่มแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

เออร์วิง แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอรั่มแบบง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐาน คือ 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน และมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุล

ของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุล สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายได้ดังสมการ (2.1)

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

เมื่อ q_e = ปริมาณของสารถูกดูดซับบนสารดูดซับหนักหนึ่งกรัม
 C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
 Q° = ปริมาณของสารถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว
 b = ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

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

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน C_e/q_e เป็น $1/bQ^{\circ}$ และมีความชันเท่ากับ $1/Q^{\circ}$

2.5.2 ไอโซเทิร์มแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

นักฟิสิกส์-เคมีชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ปริมาณของสารถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังสมการ (2.3)

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

เมื่อ C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่สมดุล
 X/m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ
 k_f และ n = ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการฟรอนด์ลิช เมื่อใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

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

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกนสามารถนำมาหาค่า k_f ได้ และความชันของกราฟเป็น $1/n$ บางกรณีทีพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$

กับ $\log C_e$ แล้วไม่ได้เส้นตรง แสดงว่าเกิดการเบี่ยงเบนไปจากสมการของฟรอยด์ลิช เช่น การดูดซับสารละลายที่ไม่ได้วัดจากน้ำหนักจริงของสารดูดซับ แต่ค่าจากสารถูกดูดซับในตัวทำละลายปริมาณมาก ทำให้สารถูกดูดซับที่เหลือที่ความเข้มข้นสูงจึงมีปริมาณลดลง

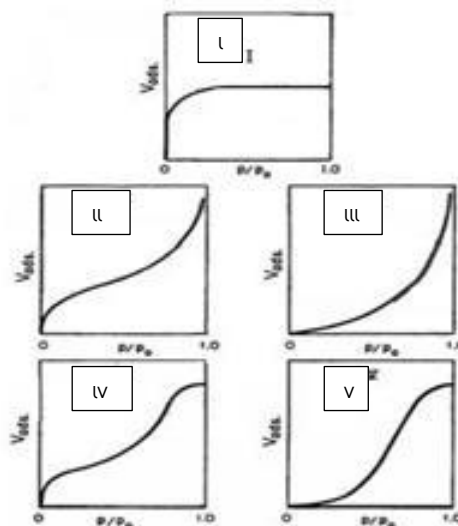
2.5.3 ไอโซเทิร์มแบบบรูเนาเออร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller isotherm)

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

$$\frac{PP_0}{V(P_0-P)} = \frac{1}{V_0k} + \frac{P}{P_0} \quad (2.5)$$

เมื่อ	P	= ความดันสมดุลของสารถูกดูดซับ
	V	= ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน
	V_0	= ปริมาตรที่ถูกดูดซับเพื่อให้เกิดเป็นชั้นเดียว
	P_0	= ความดันไออิ่มตัวของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ
	k	= ค่าคงที่

Brunauer-Emmett-Teller ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอรัมออกเป็น 5 แบบ ดังภาพที่ 2.7 ซึ่งอธิบายการดูดซับแต่ละแบบดังนี้



ภาพที่ 2.7 ไอโซเทอรัมของการดูดซับแบบต่างๆของ Brunauer-Emmett-Teller ในระบบแก๊ส [16]

แบบ I เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่ตัวดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กของตัวดูดซับนี้อย่างสมบูรณ์ และมีการอึดตัวที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว

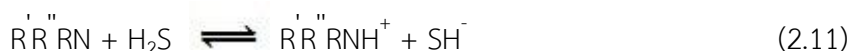
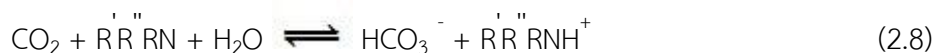
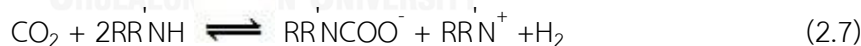
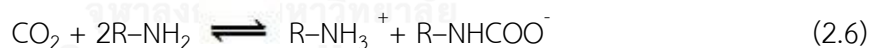
แบบ II และ III เป็นไอโซเทอร์มที่ตัวดูดซับที่การกระจายขนาดรูพรุนในช่วงกว้างในระบบนี้เกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียวจนถึงโมเลกุลหลายชั้น โดยในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II

แบบ IV เป็นไอโซเทอร์มของการดูดซับที่มีรูพรุนใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมากจึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (Bilayer)

แบบ V เป็นไอโซเทอร์มที่เกิดขึ้น เมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีความแรงมากขึ้น

2.6 ปฏิกริยาเคมีการดูดซับแก๊สกรดด้วยแอมีน [17-19]

แก๊สกรดที่มีปริมาณความเข้มข้นที่อยู่ในระดับต่ำอาจกำจัดออกได้โดยการดูดซับ (Adsorption) ระบบดูดซับด้วยตัวดูดซับที่เคลือบด้วยสารเคมีบางชนิด เช่น แอมีน หรือสารเคมีที่มีความเป็นกรด หรือต่างอย่างใดอย่างหนึ่ง เพื่อให้ความสามารถในการดูดซับมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็นหลายเท่าตัวของตัวดูดซับธรรมดา โดยทั่วไปนิยมใช้แอมีนในการดูดซับแก๊สกรด ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซับเป็นดังนี้



เมื่อ R คือ หมู่แอลคิล

เมื่อแอมีนเกิดปฏิกิริยาเคมีกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือคาร์บาเมต [17] และปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกรดกับแอมีนจะเกิดสารประกอบซัลเฟอร์ซัน โดยตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการบำบัดสารที่ดูดซับไว้และทำการปรับสภาพใหม่

2.7 วิธีการทำให้สารดูดซับคืนกลับสภาพเดิม [4]

การเปลี่ยนเบตสารดูดซับใหม่ หรือการทำให้เบตสารดูดซับที่อิ่มตัวแล้วคืนกลับสภาพเดิมเป็นระยะๆ เป็นสิ่งที่ควรกระทำอย่างยิ่งเมื่อมีความเข้มข้นของสารมลพิษสูงและ/หรือมีระยะเวลาที่ใช้งานได้สั้น (น้อยกว่า 12 ชั่วโมง) วิธีการเปลี่ยนเบตสารดูดซับใหม่จะไม่คุ้ม ควรเลือกวิธีการทำให้คืนกลับสภาพเดิมจะเหมาะสมกว่า ในเชิงพาณิชย์มีวิธีการทำให้คืนกลับสภาพเดิม 4 วิธี คือ

1. การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption) เมื่อเบตร้อนขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงโมเลกุลของแก๊สซึ่งถูกดูดซับไว้จะออกจากผิวของสารดูดซับ และจะถูกกำจัดออกจากภาชนะ โดยการเป่าไล่ด้วยแก๊สเฉื่อยต้องมีการระบายความร้อนออกก่อนที่จะเริ่มให้มีการดูดซับต่อไป
2. การเปลี่ยนแปลงของความดัน (Pressure swing adsorption) ความดันจะถูกลดต่ำลงที่อุณหภูมิที่คงที่เพื่อลดความสามารถของสารดูดซับ
3. การเป่าไล่ด้วยแก๊สเฉื่อย (Degassing) การไล่โมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับไว้จะออกเกิดขึ้นเนื่องจากแก๊สเฉื่อยจะไปลดความดันย่อยของสารมลพิษในเฟสแก๊ส ทำให้เกิดการพลิกกลับของแกรเดียนท์ ความเข้มข้นโมเลกุลของแก๊สมลพิษจึงหลุดออกจากผิวของตัวดูดซับเข้าไปในกระแสแก๊ส
4. การแทนที่ (Solvent displacement) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไว้ถูกแทนที่ด้วยสารซึ่งสามารถดูดซับไว้ได้บางชนิด วิธีนี้จะใช้ต่อเมื่อสารซึ่งถูกดูดซับไว้เมื่อครั้งแรกนั้นมีคุณค่าและไวต่อความร้อนและไม่อาจใช้วิธีลดความดัน

2.8 อันตรายของแก๊สกรดต่อสุขภาพอนามัย [20]

2.8.1 คาร์บอนไดออกไซด์

สัมผัสทางหายใจ	: การหายใจเข้าไปทำให้เกิดคลื่นไส้ หัวใจเต้นผิดปกติ ปวดศีรษะ มึนงง รบกวนการมองเห็น หายใจไม่ออก มีอาการชัก อาการโคม่า
สัมผัสทางผิวหนัง	: การสัมผัสถูกผิวหนังจะเป็นแผลพอง เหมือนน้ำแข็งกัด
กิน หรือกลืนเข้าไป	: การกลืน หรือกินเข้าไป มีอาการเหมือนน้ำแข็งกัดบริเวณริมฝีปาก ปาก และเยื่อเมือกจะมีผลทำลายตับ
สัมผัสถูกตา	: การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง การมองเห็นไม่ชัดเจน
ความผิดปกติ, อื่นๆ	: สารนี้เป็นสารก่อมะเร็งตาม OSHA, NTP, IARC

2.8.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์

สัมผัสทางหายใจ	: การหายใจเข้าไปทำให้วงเวียนศีรษะ คลื่นไส้ ถ้าได้รับสารปริมาณมากจะทำให้หมดสติ หรือมีอาการโคม่า อาจทำให้เสียชีวิตได้
สัมผัสทางผิวหนัง	: การสัมผัสผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง
สัมผัสสูดดม	: การสัมผัสสูดดมจะก่อให้เกิดการระคายเคือง โรคเยื่อปอดอักเสบ และเยื่อตาขาวได้รับบาดเจ็บ
ความผิดปกติ, อื่นๆ	: สารนี้ทำลายปอด ทรวงอก ระบบหายใจ การเดินอาหาร ไต ท่อไต กระเพาะปัสสาวะ เป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์

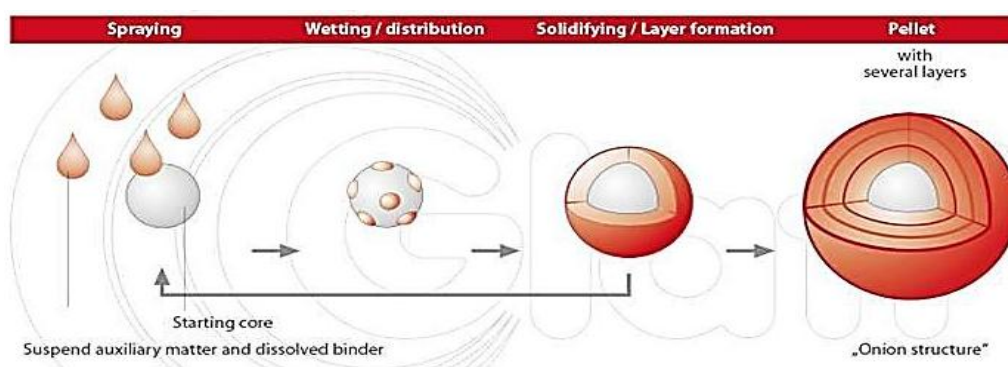
2.9 กระบวนการการขึ้นรูป [21-23]

การขึ้นรูป (Pelletization process) คือ การรวมสารผสมเข้าด้วยกันด้วยกระบวนการทางกล สารที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นเม็ดแล้วจะง่ายต่อการนำมาใช้งาน และการขนส่งมากกว่าสารที่ยังไม่ได้ผ่านการขึ้นรูป การขึ้นรูปเม็ดสารนั้นสามารถทำเป็นรูปทรงต่างๆ ได้ขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน เช่น ทรงกระบอก ลูกบาศก์

2.9.1 วิธีการขึ้นรูปแบบอัดเม็ด

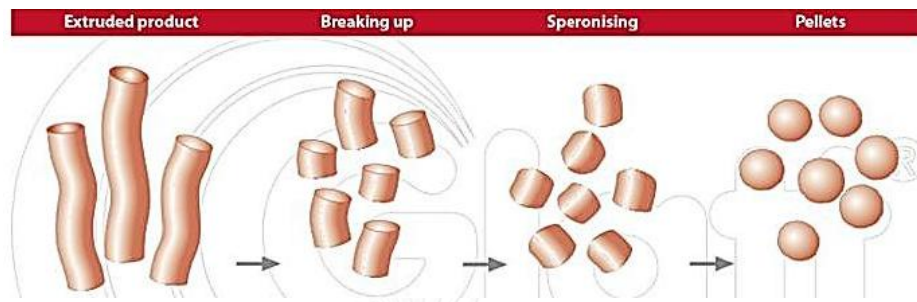
วิธีการขึ้นรูปแบบอัดเม็ดมี 5 ชนิด คือ

1. Layering: กระบวนการนี้มีลักษณะคล้ายกับกระบวนการเคลือบด้วยฟิล์ม (Film coating)



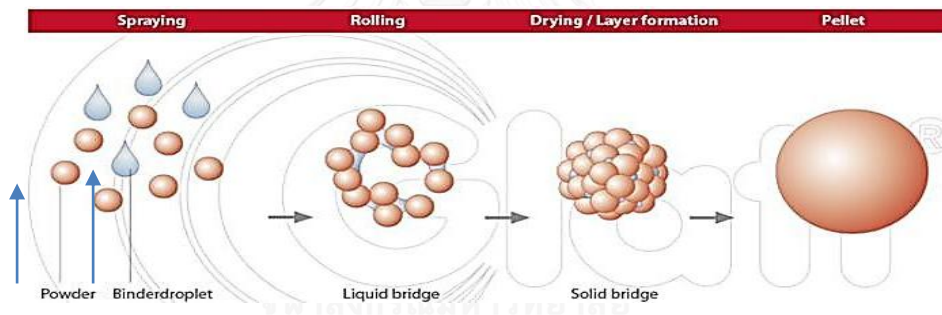
ภาพที่ 2.8 กระบวนการอัดเม็ดแบบ Layering [23]

2. Extrusion-Spheronization: วิธีนี้ประกอบด้วยขั้นตอนย่อย 2 ขั้นตอน คือ การอัดฉีดชิ้นงาน (Extrude) ซึ่งได้จากการผสมสารหลักเข้ากับตัวประสานกลายเป็นมวลเปียก (Wet mass) จากนั้นนำไปผ่านเครื่องอัดฉีด (Extruder) ได้เป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ เรียกว่า Extrudate จากนั้นนำไปทำให้กลม (Spheronize) ด้วยแรงเหวี่ยงจนชิ้นงานมีรูปร่างกลม



ภาพที่ 2.9 กระบวนการทำให้กลม (Spheronization) [23]

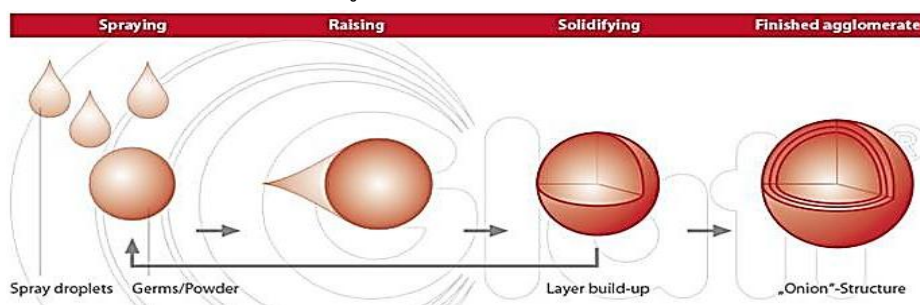
3. Direct pelletizing: กระบวนการนี้ขึ้นรูปเม็ดโดยตรงจากผงของสาร



ภาพที่ 2.10 กระบวนการอัดเม็ดแบบ Direct pelletizing [23]

4. Compression: กระบวนการกดอัดผงสารภายใต้แรงดัน

5. Fluidized bed spray granulation: กระบวนการนี้ทำในระบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยการพ่นสารละลายตัวประสานเข้าไปในระบบฟลูอิดไคซ์เบดที่มีผงของสาร ทำให้เกิดการยึดเกาะกันของผงสาร



ภาพที่ 2.11 กระบวนการอัดเม็ดแบบ Fluidized bed spray granulation [23]

2.9.2 ประโยชน์ของการขึ้นรูป

1. ปรับปรุงรูปร่างของผลิตภัณฑ์
2. ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปแบบเดียวกัน และรูปร่างใกล้เคียงกัน
3. ปรับปรุงประสิทธิภาพของส่วนประกอบที่ว่องไว
4. ลดความเสี่ยงในการจัดการ และช่วยให้การขนส่งง่ายขึ้น
5. ลดความสามารถการดูดความชื้นในอากาศ (Hygroscopicity)
6. เพิ่มความหนาแน่นรวม (Bulk density)
7. ลดปัญหาฝุ่นผงจากสารป้อนเข้าสู่เครื่อง

2.10 ตัวประสาน (Binder) [24-27]

ตัวประสาน (Binder) คือ สารที่ใช้ในการยึดสารต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน ตัวประสานที่ดีควรมีคุณลักษณะดังนี้

1. มีองค์ประกอบของเถ้าต่ำ
2. ง่ายต่อการเผาออก (Burn-out)
3. สามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของชิ้นงานได้ ทำให้ชิ้นงานมีความทนทานต่อแรงกระแทก การกดทับ และการกัดกร่อน
4. ไม่กัดกร่อน
5. ไม่เหนียวติดกับแม่พิมพ์
6. กระจายตัวได้ดี
7. ไม่มีความเป็นพิษ ปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม
8. ราคาถูก

2.10.1 ชนิดตัวประสาน

ตัวประสานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ตัวประสานอินทรีย์ และตัวประสานอนินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 2.2

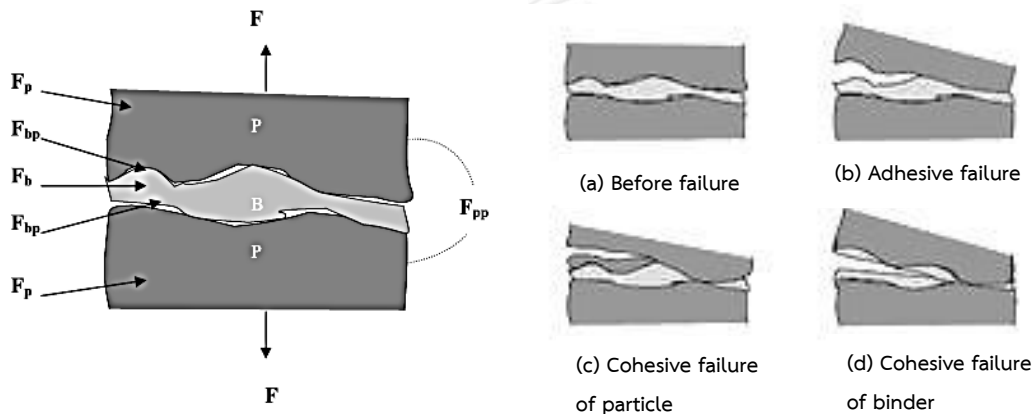
ตารางที่ 2.2 ตัวประสานอินทรีย์ และตัวประสานอนินทรีย์ [25]

Organic binder	Inorganic binder
Microcrystalline cellulose	Kaolin, Ball clay, Bentonite
Natural gums: Xanthan gum, gum Arabic	Soluble silicates: Sodium silicate, Organic silicates, Ethyl Silicate
Polysaccharides: Refined starch, dextrin	Soluble phosphates: Alkali phosphates
Lignin extracts: Paper waste liquor	Soluble aluminates: Sodium aluminate
Refined alginate: Na, NH ₄ alginate	
Cellulose ethers: Methyl cellulose, hydroxyethyl cellulose, sodium carboxymethyl cellulose	
Polymerized alcohols: Polyvinyl alcohol	
Polymerized butyral: Polyvinyl butyral	
Acrylic resins: Polymethyl methacrylate	
Glycols: Polyethylene glycol	
Waxes: Paraffin, wax emulsions, microcrystalline wax	

2.10.2 การทำงานของตัวประสาน และการแตกหักของชิ้นงาน

ภาพที่ 2.8 แสดงแบบจำลองของอนุภาคสาร และตัวประสานภายในเม็ดชิ้นงาน ภายในระบบประกอบด้วย 2 วัฏภาค และ 1 พื้นที่ผิวร่วมระหว่าง 2 วัฏภาค (Interface) กำหนดให้ B คือ ตัวประสาน อนุภาค คือ P ตำแหน่งของพื้นที่ผิวที่สัมผัสกันระหว่างตัวประสานกับอนุภาค คือ BP ภายในระบบมีอันตรกิริยา 4 ชนิด แสดงดังรูปที่ 2.12

1. แรงยึดของตัวประสาน (Binder cohesive force, F_b) คือ แรงรวมของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลภายในตัวประสาน เป็นแรงที่แสดงถึงสมบัติเชิงกลของตัวประสาน
2. แรงยึดของอนุภาค (Particle cohesive force, F_p) คือ แรงรวมของอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลภายในตัวอนุภาค เป็นแรงที่แสดงถึงสมบัติเชิงกลของอนุภาค
3. แรงยึดติดที่ตำแหน่งของพื้นผิวที่สัมผัสกัน (Adhesive force at the interface, F_{bp}) แรงรวมของแรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไฟฟ้าสถิตย์ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonding) พันธะเคมีเคมีต่างๆ และแรงความหนืด (Viscous force) ระหว่างอนุภาคกับตัวประสาน
4. แรงอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค (Interaction force between particles, F_{pp}) แรงรวมของแรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไฟฟ้าสถิตย์ และแรงดึงแคพพิลลารี (capillary force)



ภาพที่ 2.13 แบบจำลองของอนุภาคสาร และตัวประสานภายในเม็ดขึ้นงาน [24]

ภาพที่ 2.12 แบบจำลองการแตกหักภายในระบบของขึ้นงาน [24]

ถ้าแรง F_{bp} น้อยกว่า F_b , F_p และ F จะเกิดการหลุดจากกันที่บริเวณผิวระหว่างอนุภาค และตัวประสาน แสดงดังภาพที่ 2.13 (b) เรียกว่า Adhesive failure

ถ้าแรง F_p น้อยกว่า F_b , F_{bp} และ F จะเกิดการแตกหักภายในส่วนของอนุภาค แสดงในภาพที่ 2.13 (c) เรียกว่า Cohesive failure of particle

ถ้าแรง F_b น้อยกว่า F_p , F_{bp} และ F จะเกิดการแตกหักภายในส่วนของตัวประสาน แสดงในภาพที่ 2.13 (d) เรียกว่า Cohesive failure of binder

Cohesive failure และ Adhesive failure สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ ถ้าหากแรง F_b กับ F_{bp} มีขนาดเทียบเท่ากันโดยสมมูล

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ma และคณะ [28] ศึกษาการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมหลายชนิดโดยใช้ตัวดูดซับ Molecular basket (SBA-15) ที่ผ่านการเติมด้วย Polyethyleneimine (PEI) จากการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับพบว่า PEI มีการกระจายตัวที่ดีภายในรูพรุนของ Molecular basket โดยที่โครงสร้างของ Molecular basket ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จากการศึกษาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์พบว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และจากการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ใน 2 คอลัมน์เกิดการดูดซับได้ดีกว่าการดูดซับใน 1 คอลัมน์ งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แตกต่างกัน โดยคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูง ไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ จึงควรแยกคอลัมน์ในการดูดซับ โดยให้แต่ละคอลัมน์มีอุณหภูมิการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ตามลำดับ

Shama และคณะ [29] ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ MCM-41 และ MCM-48 ดัดแปรด้วย Polyethyleneimine (PEI) โดยวิธีการอิมเพกเนชัน จากการศึกษาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้อุณหภูมิการดูดซับ 40, 60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุด จากนั้นศึกษาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ปริมาณ Polyethyleneimine ที่แตกต่างกันบนตัวดูดซับ MCM-41 และ MCM-48 พบว่า 50 wt%PEI-MCM-48-PEI มีค่าการดูดซับที่สูงมากกว่า MCM-41 และทำการศึกษการเปรียบเทียบชนิดของแอมีน Polyethyleneimine (PEI) กับ Monoethanolamine (MEA) พบว่า PEI มีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า MEA งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือ 80 องศาเซลเซียส

Hui และคณะ [30] ศึกษาผลจากการใช้ดิน (Clay) เป็นตัวประสานของตัวดูดซับชนิดออกไซด์เหล็ก (iron oxide) ในการกำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิสูง โดยดินที่ใช้มี 4 ชนิด คือ Kaolinite, Diatomite, Bentonite และ Brick clay ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ดินเป็นตัวประสานต่างชนิดกันจะทำให้ได้ค่า breakthrough ต่างกัน และพบว่าปริมาตรรูพรุนที่ใหญ่กว่า 200 นาโนเมตร เพิ่มความสามารถในการบรรจุซัลเฟอร์เนื่องจากขนาดรูพรุนที่ใหญ่ทำให้เกิดการแพร่ได้ดี และเป็นการยับยั้งผลกระทบจากความร้อนได้ แต่อย่างไรก็ตามหากมีปริมาณรูพรุนที่มีขนาดใหญ่มากเกินไปทำให้ตัวดูดซับไม่คงทนและทำให้ความหนาแน่นรวมน้อย งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ดินเป็นตัวประสานช่วยปรับปรุงโครงสร้างขณะทำแคลซิเนชัน (Calcination)

Ching และคณะ [31] ศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ Ca/Al carbonate โดยใช้ TiO_2 เป็นตัวประสาน ($\text{Ca-Al-CO}_3/\text{TiO}_2$) ใช้ตัวประสานต่อตัวดูดซับในอัตราส่วนที่ต่างกัน พบว่า TiO_2 ช่วยปรับปรุงพื้นที่ผิว และความเสถียรของตัวดูดซับ โดยพบว่าแบบเม็ดมีการพื้นผิวอย่างน้อย 80% เมื่อเทียบกับแบบผง หรือแบบไม่ใช้ TiO_2 (Ca-Al-CO_3) จะมีการพื้นผิวเพียง 35% งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการเพิ่มปริมาณตัวประสานจะทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สลดลง

Worasaung และคณะ [32] ศึกษาการผลจากการใช้สารละลายพอลิอัลลิลแอมีน (polyallylamine , PAA) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวประสานในการขึ้นรูปตัวดูดซับ ชนิดแอมีนชนิด 3-aminopropyltriethoxysilane (APS) บนพื้นผิวตัวรองรับ MCM-41 ด้วยวิธี Post-modification และ Direct synthesis และ แอมีนชนิด Polyethylenimine (PEI) บนพื้นผิวตัวรองรับ MCM-41 ด้วยวิธี Impregnation โดยเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และสมบัติเชิงกลของตัวดูดซับที่ใช้ตัวประสานอัตราส่วนต่างกัน พบว่าสารละลายตัวประสานในอัตราส่วน 3% ของ PAA กับ 2% ของ NaOH มีความเหมาะสมมากที่สุด คือ มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และค่าสมบัติเชิงกล งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าอัตราส่วนการใช้ตัวประสานที่แตกต่างกันส่งผลต่อ Mechanical strength โดยการใส่ตัวประสานในปริมาณที่มากจะทำให้ Mechanical strength ของตัวดูดซับสูงขึ้น แต่ทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สลดลง

Changlei และคณะ [33] ได้ศึกษาผลของชนิดสารดัดแปรต่อสมบัติเชิงกลและความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ชนิดของสารดัดแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ตัวรองรับ คือ อะลูมินาแกมมันต์ (Al_2O_3) และตัวประสาน คือ CaAl_2O_4 , Fly ash, Kaolinite clay และ Portland cement เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของตัวดูดซับด้วยการทดสอบ Compressive strength พบว่าตัวดูดซับ Kaolinite clay ให้ค่า Compressive strength สูงสุด คือ 25 MPa ตัวดูดซับ Kaolinite clay มีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 41 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ในช่วงเริ่มต้นและสามารถดูดซับได้ดีขึ้นเมื่อผ่านรอบการดูดซับ พบว่าในรอบที่ 10 ตัวดูดซับ Kaolinite clay มีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 59.4 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ และสามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 63 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับที่รอบที่ 30 งานวิจัยนี้สรุปได้ว่า การใช้ตัวประสานต่างชนิดกันส่งผลต่อ Mechanical strength ของตัวดูดซับ

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมเม็ดตัวดูดซับฟลูมซิลิกาตัดแปรด้วยแอมินเพื่อใช้ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยใช้ตัวประสานชนิดแตกต่างกัน สำหรับการขึ้นรูปผงตัวดูดซับ งานวิจัยนี้ทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม (ความเข้มข้น 75% CH₄, 20% CO₂, 0.35% H₂S balance in N₂ ซึ่งมีสัดส่วนความเข้มข้นใกล้เคียงกับแก๊สชีวภาพของจริง) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ความดันบรรยากาศ วัดความเข้มข้นแก๊สขาออกด้วย Micro gas chromatography

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

Chemical	Grade	Company
Fumed Silica	Commercial	Concrete composite
Polyethyleneimine Mw 800 (PEI800)	Branched	Sigma Aldrich
Methanol	AR	Quality reagent chemical (QRc)
Starch	Food	Market
Polyvinyl alcohol (PVA)	Commercial	Sigma Aldrich
Bentonite clay (Sodium type)	Commercial	NIC INTERCHEM LTD
Molecular sieve 5A	AR	Sigma Aldrich
CO ₂	10% balance in N ₂	TIG
H ₂ S	1% balance in N ₂	TIG
Mixed gas	75% CH ₄ , 20% CO ₂ , 0.35% H ₂ S balance in N ₂	PRAXAIR
He		PRAXAIR
N ₂	99.999%.	PRAXAIR

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องให้ความร้อนและกวนสารเคมี (Hot plate and stirrer) รุ่น MR Hei-Tec ยี่ห้อ Heidolph
2. ชุดเครื่องแก้ว

3. โกร่งบดสาร
4. เตาอบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert
5. ชุดการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์
6. แก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก (Micro gas chromatograph) รุ่น 490-GC จากบริษัท Varian
7. ตู้ดูดความชื้น (Desciccator)
8. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยวิธีบีบีที (Surface area and porosity analyzer) รุ่น Autosorb iQ Station 1 ยี่ห้อ Quantachrome
9. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analyzer: TGA) รุ่น Pyris Diamond ยี่ห้อ Perkin Elmer
10. เครื่องวัด Bulk crushing strength ยี่ห้อ VINCI Technologies

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมผงตัวดูดซับ

ผงตัวดูดซับเตรียมโดยวิธีการฝังตัว (Impregnation method) ของแอมีนชนิด Polyethyleneimine มวลโมเลกุล 800 (PEI800) บนตัวรองรับฟุมซิลิกาในอัตราส่วน 40% โดยน้ำหนัก มีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. เติมตัวรองรับฟุมซิลิกา 12 กรัม ลงในเมทานอล 360 มิลลิลิตร เพื่อให้ฟุมซิลิกากระจายตัวได้ดีในเมทานอล กวนสารที่ 250 รอบต่อนาที
2. ละลายแอมีน PEI800 8 กรัม ลงในเมทานอล 80 มิลลิลิตร กวนสารให้เป็นเนื้อเดียวกัน
3. หยดสารละลายแอมีนที่เตรียมได้ลงไปนในสารละลายเมทานอลที่มีตัวรองรับฟุมซิลิกากระจายตัวอยู่
4. กวนผสมสารละลายแอมีนและตัวรองรับดังกล่าวที่อุณหภูมิห้อง จนสารผสมกันได้ดี
5. ให้ความร้อนแก่สารผสมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนแห้ง
6. อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาข้ามคืน
7. บดตัวดูดซับที่เตรียมได้จนเป็นผงละเอียด จะได้ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ตามต้องการ

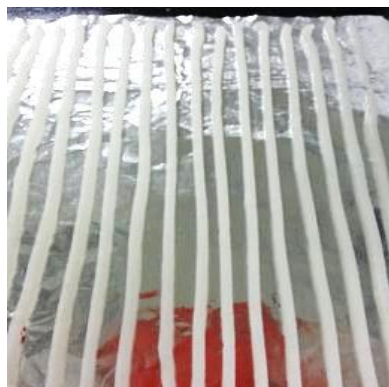
3.3.2 การขึ้นรูปตัวดูดซับโดยวิธี Extrusion โดยใช้ตัวประสาน

1. ชั่งตัวประสานในอัตราส่วน 1 , 3 , 5 ,7 และ 10 โดยน้ำหนัก ลงน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ให้ ความร้อนที่ 55 องศาเซลเซียส พร้อมกวนอย่างต่อเนื่อง
2. เติมผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ลงในสารละลายตัวประสาน ได้ตัวดูดซับดังตารางที่ 3.1 พร้อมกวนอย่างต่อเนื่อง แล้วจึงให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส จนได้ลักษณะเป็นก้อนเหนียวดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ลักษณะตัวดูดซับผสมกับตัวประสานเป็นก้อนเหนียว

3. นำก้อนเหนียวมาบรรจุลงหลอดฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออก 2 มิลลิเมตร
4. ฉีดตัวดูดซับลงบนแผ่นกระดาษอะลูมิเนียมฟอยด์ โดยต้องฉีดให้มีความยาวอย่างต่อเนื่อง ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 Extrudate หลังจากฉีดด้วยหลอดฉีดยา

5. นำตัวดูดซับที่ถูกฉีดแล้ว (Extrudate) ผ่านกระบวนการทำให้แห้งข้ามคืนเพื่อให้เกิดการแข็งตัว ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 Extrudate หลังจากทิ้งให้แห้งตัว

6. หลังจาก Extrudate เกิดการแข็งตัว นำมาตัดให้มีความยาวขึ้นละ 4 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ตัวดูดซับในรูป Extrudate

ตารางที่ 3.1 ปริมาณของผงตัวดูดซับและตัวประสาน

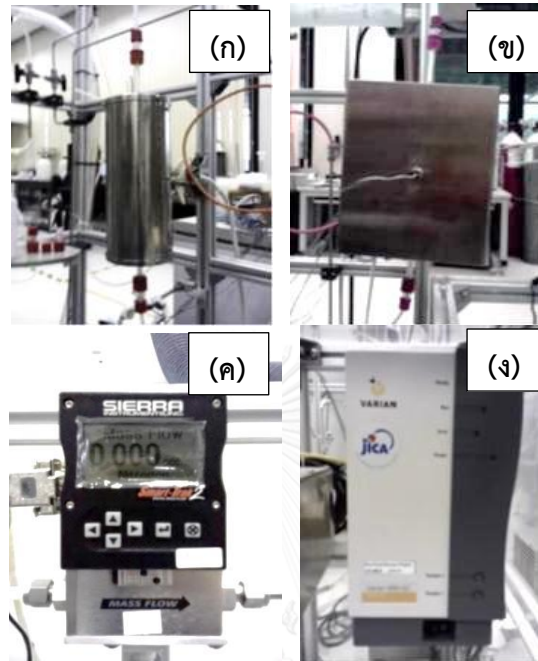
Sample code	Fsi-PEI800-40 (wt%)	Binder (wt%)
Fsi-PEI800-40 (powder)	100	0
Fsi-PEI800-40 /starch 1%	99	1
Fsi-PEI800-40 /starch 3%	97	3
Fsi-PEI800-40 /starch 5%	95	5
Fsi-PEI800-40 /starch 7%	93	7
Fsi-PEI800-40 /starch 10%	90	10
Fsi-PEI800-40 /PVA 1%	99	1
Fsi-PEI800-40 /PVA 3%	97	3
Fsi-PEI800-40 /PVA 5%	95	5
Fsi-PEI800-40 /PVA 7%	93	7
Fsi-PEI800-40 /PVA 10%	90	10
Fsi-PEI800-40 /Bentonite 1%	99	1
Fsi-PEI800-40 /Bentonite 3%	97	3
Fsi-PEI800-40 /Bentonite 5%	95	5
Fsi-PEI800-40 /Bentonite 7%	93	7
Fsi-PEI800-40 /Bentonite 10%	90	10

3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์

1. ระบบการทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในคอลัมน์เดี่ยว

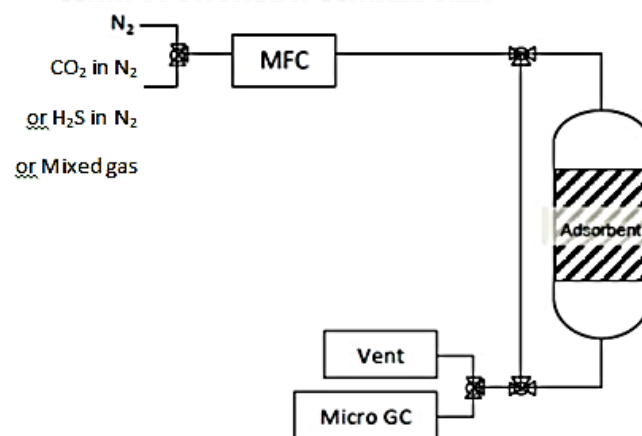
ชุดทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ประกอบด้วย เครื่องวัดอัตราการไหลอัตโนมัติที่ทนต่อการกัดกร่อนของคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ยี่ห้อ Sierra คอลัมน์บรรจุตัวดูดซับแบบคอกขวดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 9 มิลลิเมตร ยาว 470 มิลลิเมตร เตาให้ความร้อน และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ประกอบด้วย

เทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส ชุดควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller) และชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

(ก) คอลัมน์ดูดซับที่ 1 (ข) คอลัมน์ดูดซับที่ 2 (ค) ชุดควบคุมอัตราการไหลแก๊ส (ง) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก



ภาพที่ 3.6 แผนผังชุดอุปกรณ์การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบคอลัมน์เดี่ยว

สำหรับเบตนิ่งตัวดูดซับ ศึกษาการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตรในไนโตรเจน การดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตรในไนโตรเจน สำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน 75% คาร์บอนไดออกไซด์ 20% และไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน การวัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากกระบวนการดูดซับต่อแก๊สออนไลน์ไปยังเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก (Micro gas chromatograph) ใช้คอลัมน์ PPU (Poraplot Q) อุปกรณ์การทดสอบด้วยคอลัมน์เบตนิ่งที่ติดตั้งดังภาพที่ 3.6 เก็บตัวอย่างทุกๆ 3 นาที จนได้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากกระบวนการดูดซับเท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า

สถานะที่ใช้สำหรับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟในการทดสอบการวัดการดูดซับแก๊ส ในการวัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 80 องศาเซลเซียส ส่วนการวัดความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้น ตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟมีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 100 องศาเซลเซียส สำหรับการวัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม นั้นตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 80 องศาเซลเซียส

การทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในคอลัมน์เดี่ยว

1) บรรจุตัวดูดซับน้ำหนัก 1 กรัม ลงในคอลัมน์ โดยทำการ Pre-treatment ตัวดูดซับโดยผ่านแก๊สไนโตรเจนอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่ออนาที ความดัน 1 บาร์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2) ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทดสอบอุณหภูมิที่ 30, 45, 65 และ 80 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านแก๊สดังกล่าวอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่ออนาที ความดัน 1 บาร์ ไปยังตัวดูดซับ ส่วนการทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำการทดสอบการดูดซับแก๊สโดยผ่านแก๊สดังกล่าวอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่ออนาที ความดัน 1 บาร์ ไปยังตัวดูดซับ และการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมทำการทดสอบที่ 2 อุณหภูมิคือ ที่ 30 และ 80 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดสอบการดูดซับแก๊สโดยผ่านแก๊สดังกล่าวอัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่ออนาที และความดัน 1 บาร์ ไปยังตัวดูดซับ

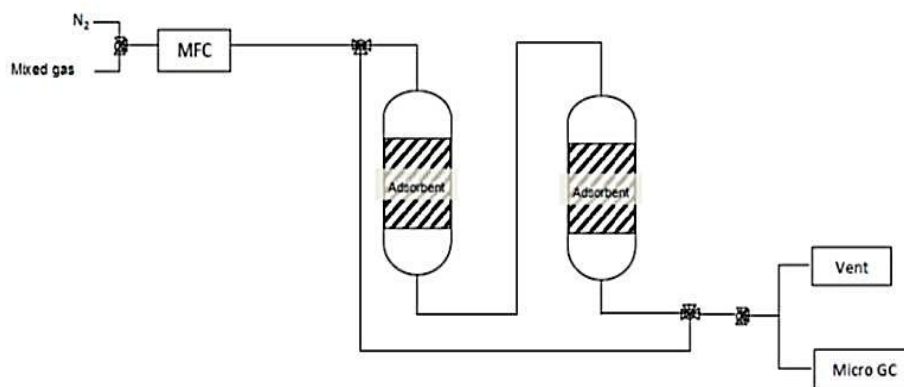
- 3) วัดความเข้มข้นแก๊สที่เหลือจากการดูดซับโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก
- 4) การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ค.

2. ระบบการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

ชุดทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ใช้เตาให้ความร้อนและอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) จำนวน 2 เตา ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ซึ่งคล้ายกับระบบการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบคอลัมน์เดี่ยว แก๊สไหลจากคอลัมน์ที่ 1 ต่อเนื่องไปยังคอลัมน์ที่ 2 และต่อออนไลน์กับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ เก็บตัวอย่างทุกๆ 3 นาที จนได้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาออกจากกระบวนการดูดซับเท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ขาเข้า โดยแก๊สผสมนั้นตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปในแก๊สโครมาโทกราฟมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 80 องศาเซลเซียส

การทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในเบดนิ่ง 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมดังนี้

- 1) บรรจุตัวดูดซับ ลงในคอลัมน์ คอลัมน์ละ 1 กรัม โดย Pre-treatment ตัวดูดซับโดย ผ่านแก๊สไนโตรเจนอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส คอลัมน์ละ 1 ชั่วโมง
- 2) ปรับอุณหภูมิเตาที่ 1 ที่ 80 องศาเซลเซียส ปรับอุณหภูมิที่เตาที่ 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดสอบการดูดซับแก๊สผสมโดยผ่านแก๊สผสม อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ไปยังตัวดูดซับ
- 3) วัดความเข้มข้นแก๊สที่เหลือจากการดูดซับโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟขนาดเล็ก
- 4) การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ค.



ภาพที่ 3.7 แผนผังชุดอุปกรณ์การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

3. ระบบการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแบบ 2 คอลัมน์
ต่ออนุกรม ในระบบขยาย 20 เท่าจากระดับห้องทดลอง

ระบบการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมในระบบขยาย 20 เท่า ประกอบด้วย เครื่องวัดอัตราการไหลอัตโนมัติที่ทนต่อการกัดกร่อนของคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ยี่ห้อ Sierra คอลัมน์สำหรับบรรจุตัวดูดซับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 28 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 33 มิลลิเมตร ความสูงของคอลัมน์ 510 และ 700 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3.8 และตารางที่ 3.2



ภาพที่ 3.8 คอลัมน์ตัวดูดซับของระดับห้องปฏิบัติการกับระดับขยาย

ตารางที่ 3.2 คอลัมน์ที่ใช้ในระบบการดูดซับระดับห้องปฏิบัติการและระดับขยาย

Scale	Material	Ø Inner (mm)	Ø Outer (mm)	Length (mm)	Adsorbent/column (g)
Lab	Glass	8	9	470	1
Up	Steel	28	33	1 st column=510 2 nd column=700	20.83

ทำการให้ความร้อนแก่วัตถุตั้งสองผ่านเตาจำนวน 2 เตา แสดงดังภาพที่ 3.9 ซึ่งแต่ละเตามีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส แผนผังอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 3.10 ระบบการดูดซับแบบขยายสามารถทำงานได้ในช่วงอัตราการไหลแก๊สระหว่าง 100-400 มิลลิลิตรต่อนาที (144-576 ลิตรต่อวัน) แก๊สผสมที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน 75 % คาร์บอนไดออกไซด์ 20 % และไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35 % โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน

การวัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำออกจากกระบวนการดูดซับต่อแก๊สออนไลน์ไปยังเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีขนาดเล็ก (micro gas chromatograph) ใช้คอลัมน์ PPU (Poraplot Q) เก็บตัวอย่างทุกๆ 3 นาที จนได้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ทำออกจากกระบวนการดูดซับเท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้า

แก๊สผสมนั้นตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปในเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 80 องศาเซลเซียส การทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในเบตนิ่ง 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมในระดับขยาย ดังนี้

1) บรรจุตัวดูดซับ ลงในคอลัมน์ คอลัมน์ละ 20.83 กรัม โดยทำการ Pre-treatment ตัวดูดซับโดยผ่านแก๊สไนโตรเจนอัตราการไหล 50-100 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ควบคุมอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส คอลัมน์ละ 3-4 ชั่วโมง

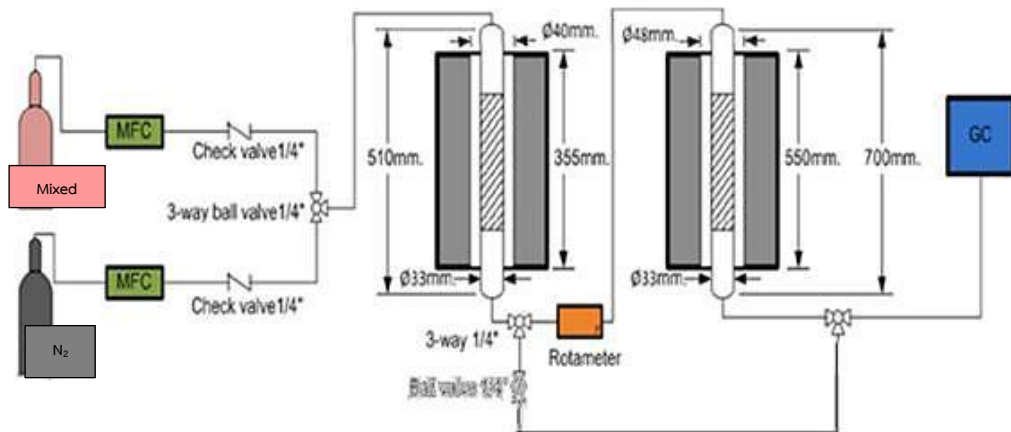
2) ปรับอุณหภูมิเตาที่ 1 ที่ 80 องศาเซลเซียส ปรับอุณหภูมิที่เตาที่ 2 ที่ 30 องศาเซลเซียส แล้วทำการทดสอบการดูดซับแก๊สผสมโดยผ่านแก๊สผสมอัตราการไหล 80-150 มิลลิลิตรต่อนาที ความดัน 1 บาร์ ไปยังตัวดูดซับ

3) วัดความเข้มข้นแก๊สที่เหลือจากการดูดซับโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีขนาดเล็ก

4) การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ค.



ภาพที่ 3.9 อุปกรณ์การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ 2 คอลัมน์ ต่ออนุกรมระบบขยาย 20 เท่า



ภาพที่ 3.10 แผนผังชุดอุปกรณ์การทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์แบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมระบบขยาย 20 เท่า

3.3.4. สมการการคำนวณ

- 1) การคำนวณอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$FR_{CO_2 \text{ หรือ } H_2S} = (FR \times C) / 100$$

- 2) การคำนวณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ

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

- 3) การคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\text{ที่ Breakthrough capacity; } Cap(BT) = (FR_{CO_2 \text{ หรือ } H_2S} \times BT) / (V_{mol} \times W_{sorb})$$

$$\text{ที่ Saturation capacity; } Cap(S) = (FR_{CO_2 \text{ หรือ } H_2S} \times \int_0^t (C_0 - C_t) dt) / (V_{mol} \times W_{sorb})$$

- 4) การคำนวณประสิทธิภาพของแอมีน

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

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

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

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

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

$$A_{STD} = \text{พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ Saturation}$$

$$A = \text{พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ หลังการดูดซับ}$$

$$Cap(BT) = \text{ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่ Breakthrough (มิลลิโมลต่อ} \\ \text{กรัมตัวดูดซับ)}$$

$$Cap(SAT) = \text{ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่อิ่มตัว (มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูด} \\ \text{ซับ)}$$

$$BT = \text{เวลาที่ Breakthrough (นาที)}$$

$$FR = \text{อัตราการไหลแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที)}$$

$$FR_{CO_2 \text{ หรือ } H_2S} = \text{อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์} \\ \text{(มิลลิลิตรต่อนาที)}$$

$$V_{mol} = \text{ปริมาตรโมลาร์ของแก๊สอุดมคติที่ภาวะมาตรฐาน}$$

$$W_{sorb} = \text{น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)}$$

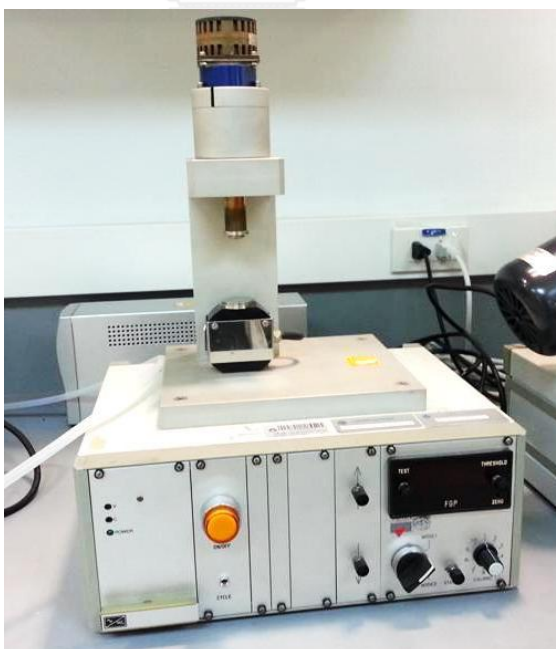
$$mmol_N = \text{จำนวนโมลของหมู่อะมิโนในโมเลกุลแอมีน (มิลลิโมล)} \\ = (\text{ร้อยละการเติมแอมีนโดยมวล} \times N \times 10) / MW_{amine}$$

$$N = \text{จำนวนไนโตรเจนในโมเลกุลแอมีน}$$

3.3.5 การทดสอบสมบัติเชิงกล

เนื่องจากตัวดูดซับมีลักษณะทางกายภาพเป็นผงละเอียด จึงมักมีปัญหาการเกิด Pressure drop ในระบบ จึงทำให้ต้องทำการขึ้นรูปตัวดูดซับให้เป็นรูปทรงเพื่อลดปัญหาดังกล่าว และเนื่องจากการทดสอบเป็นระบบแบบ Fixed bed จึงมีการกดทับและการเสียดสีของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่ดีควรมีความแข็งแรงทนทานต่อสภาวะต่างๆ ได้ โดยทำการวัดสมบัติ Bulk crushing strength ซึ่งเป็นสมบัติที่บ่งบอกความสามารถในการคงรูปเชิงกล โดยค่า Crushing strength ที่สูงหมายถึงวัสดุมีความทนทานต่อแรงกดทับได้ดี

การทดสอบสมบัติ Bulk crushing strength วัดดำเนินการตาม ASTM 7084-04 บรรจุเม็ดตัวดูดซับลงภาชนะเหล็กทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตร ใส่ลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3-6 มิลลิเมตร กระจายให้ทั่วบนผิวบนของตัวดูดซับที่บรรจุในภาชนะทรงกระบอก วางภาชนะทรงกระบอกลงบนแท่นกดทับของเครื่องทดสอบ Bulk crushing strength ที่มีขนาดแรงกด 0-200 เดกะนิวตัน (daN) ลูกสูบของเครื่องทดสอบจะกดทับลงมาด้วยแรงขนาดต่างๆที่ได้ถูกเลือกไว้เป็นเวลา 3 นาที หลังจากการทดสอบ นำตัวดูดซับทดสอบหาขนาดมวลคละ (Sieve analysis) โดยใช้ตะแกรงขนาด 425 ไมครอน จะได้ผงของตัวดูดซับ เรียกว่า Fines นำมาคำนวณค่า Bulk crushing strength การคำนวณค่า Bulk crushing strength ดูจากภาคผนวก ค.



ภาพที่ 3.11 เครื่องวัด Bulk crushing strength

3.4 การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

1. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยวิธีบีบอัด (Surface area and porosity analyzer) รุ่น Autosorb iQ Station 1 ยี่ห้อ Quantachrome ทำการทดสอบด้วยการใช้แก๊สฮีเลียมเป็นตัวพานำตัวดูดซับ 0.2 กรัม บรรจุในหลอดแก้ว แทนที่ด้วยแก๊สไนโตรเจน (Degas) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เมื่อแทนที่แก๊สเสร็จแล้ว นำหลอดบรรจุตัวดูดซับภายในที่ผ่านการไล่แก๊สแล้วไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่แท้จริง จากนั้นนำหลอดบรรจุพร้อมตัวดูดซับต่อเข้ากับส่วนวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ วัดค่าไอโซเทอร์มที่ -196 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง

2. เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analyzer: TGA) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบวัสดุ โดยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุ เมื่อได้รับความร้อนภายใต้ภาวะที่กำหนด การวิเคราะห์ทำในระบบปิด เครื่องประกอบด้วยเตาเผา (Furnace) ที่มีโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิ (Temperature) ควบคุมบรรยากาศ ความดัน และมีระบบชั่งน้ำหนักเข้ามาประกอบ การทดสอบด้วยวิธีนี้สามารถทดสอบได้ถึงอุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบด้วยการนำตัวดูดซับหนัก 5 มิลลิกรัม บรรจุลงในถาดแพลตทินัม การวิเคราะห์ทำในภาวะที่อุณหภูมิ 30-800 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ 30-400 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ 400-800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนในการทดสอบซึ่งมีอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

3.5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของตัวดูดซับ

1. ผลของชนิดตัวประสาน

ศึกษาผลของชนิดตัวประสานและเพื่อเลือกตัวประสานที่ทำให้ตัวดูดซับมีสมบัติเชิงกลที่ดี ชนิดตัวประสานที่เลือกมาทดสอบ คือ แป้งมันสำปะหลัง, PVA และ Bentonite clay

2. ผลของปริมาณตัวประสาน

ศึกษาผลของปริมาณตัวประสานที่ทำให้ตัวดูดซับมีสมบัติเชิงกลที่ดี โดยศึกษาปริมาณที่ใช้ตัวประสาน คือ 1, 3, 5, 7 และ 10% โดยน้ำหนัก

3. อุณหภูมิกระบวนการทำให้แห้งหลังจากฉีดตัวดูดซับ

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิกระบวนการทำให้แห้งหลังจากฉีดตัวดูดซับที่ทำให้ตัวดูดซับมีสมบัติเชิงกลที่ดี ทดลองอุณหภูมิกระบวนการทำให้แห้งหลังจากฉีดตัวดูดซับโดยวางตัวอย่างหลังจากฉีดไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาข้ามคืนกับอบตัวดูดซับหลังจากฉีดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาข้ามคืน

4. ระยะการบ่มตัวดูดซับ

เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มตัวดูดซับที่ทำให้ตัวดูดซับมีสมบัติเชิงกลที่ดี ทดลองที่ระยะเวลาการเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 วันกับ 42 วัน

3.6 การศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในคอลัมน์ขนาดเล็ก (Lab-scale)

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิในระบบคอลัมน์เดี่ยว

เพื่อศึกษาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 30, 45, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 30, 45, 60 และ 80 องศาเซลเซียสและดูดซับแก๊สผสมที่อุณหภูมิ 30 และ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ทดสอบที่ความดันบรรยากาศ ในการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ใช้อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที ในการทดสอบการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ใช้อัตราไหลแก๊ส 50 มิลลิลิตรต่อนาที ในการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมใช้อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

2. ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในระบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง

ก. ผลของการดูดซับในระบบ 2 คอลัมน์

ทำการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ความดันบรรยากาศ โดยต่อคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ต่อเนื่องกัน ใช้ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 โดยให้คอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

ข. ผลของชนิดตัวประสาน

เพื่อศึกษาผลของชนิดตัวประสานและเพื่อเลือกตัวประสานที่ทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ดี ชนิดตัวประสานที่เลือกมาทดสอบ คือ แป้ง, PVA และ Bentonite clay ทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ความดันบรรยากาศ โดยต่อคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ต่อเนื่องกัน ใช้ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 โดยให้คอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

ค. ผลของปริมาณตัวประสาน

เพื่อศึกษาผลของปริมาณตัวประสาน และเลือกปริมาณตัวประสานที่ทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ดี โดยปริมาณที่ใช้ตัวประสาน คือ 1, 3, 5, 7 และ 10% โดยน้ำหนัก ทดสอบสมบัติเชิงกลของตัวดูดซับทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ความดันบรรยากาศโดยต่อคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน ใช้ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 โดยให้คอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

ง. ผลของระยะเวลาการเก็บหลังจากฉีดตัวอย่าง

เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาหลังจากฉีดตัวอย่างต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทดลองที่ระยะเวลาการเก็บเป็นเวลา 5 วัน กับ 42 วัน ทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ความดันบรรยากาศ โดยต่อคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน ใช้ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% โดยให้คอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที

3.7 การศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในคอลัมน์ขนาดใหญ่ (Up-scale)

1. ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนสำหรับ Pretreatment

เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนสำหรับ Pretreatment ต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้ทำการทดลองอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนสำหรับ Pretreatment ที่อัตราการไหล 50, 75 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิทั้ง 2 คอลัมน์เป็น 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา Pretreatment 3 ชั่วโมงต่อคอลัมน์ ใช้ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% ในการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ความดันบรรยากาศ โดยต่อคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน โดยให้คอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 80 มิลลิลิตรต่อนาที

2. ผลของระยะเวลา Pre-treatment

เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการ Pre-treatment ต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้ทำการทดลองระยะเวลาในการ Pre-treatment ที่เวลา 3 และ 4 ชั่วโมงต่อคอลัมน์ ที่อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิทั้ง 2 คอลัมน์เป็น 90 องศา

เซลเซียส ใช้ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% ในการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ความดันบรรยากาศ โดยต่อคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน โดยให้คอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 80 มิลลิลิตรต่อนาที

3. ผลของอัตราการไหลแก๊สผสม

เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาในการ Pre-treatment ต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ได้ทำการทดลองอัตราการไหลแก๊สผสมที่ 80, 104 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที โดยในการ Pre-treatment ตัวดูดซับ ใช้อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ต่อคอลัมน์ ที่อุณหภูมิทั้ง 2 คอลัมน์เป็น 90 องศาเซลเซียส ใช้ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% ในการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ความดันบรรยากาศ โดยต่อคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน โดยให้คอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

4. ศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ

เพื่อศึกษาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการคืนสภาพตัวดูดซับ ได้ทำการทดลองอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการคืนสภาพตัวดูดซับที่อัตรา 50, 75 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีที่อุณหภูมิทั้ง 2 คอลัมน์เป็น 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการ Pretreatment 3 ชั่วโมงต่อคอลัมน์ ใช้ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ความดันบรรยากาศ โดยต่อคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน โดยให้คอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 104 มิลลิลิตรต่อนาที

5. เสถียรภาพตัวดูดซับ

ทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ความดันบรรยากาศ ใช้ดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% โดยต่อคอลัมน์ดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรมกัน โดยให้คอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊ส 104 มิลลิลิตรต่อนาที และการคืนสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการดูดซับสลับกันไป

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยการพัฒนาการขึ้นรูปตัวดูดซับ คือ ตัวดูดซับดัดแปรด้วยแอมินชนิด Polyethyleneimine บนตัวรองรับพุ่มซิลิกา ในการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระดับเล็กและระดับขยาย ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ และความสามารถในการคงรูปเชิงกล ได้แก่ อุณหภูมิการดูดซับ กระบวนการทำให้แห้งหลังการฉีดขึ้นรูป ระยะเวลาการบ่ม ชนิด และปริมาณของตัวประสาน ศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ และศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ

4.1 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

ภาพที่ 4.1 ก และตารางที่ 4.1 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 (ผง) ที่อุณหภูมิ 30, 45, 65 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ภาวะคงที่ คือน้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัม ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที (ตัวอย่างภาพโครมาโตแกรมแสดงดังภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.) พบว่าที่อุณหภูมิการดูดซับที่แตกต่างกันส่งผลต่อความสามารถการดูดซับแก๊ส แสดงว่าอุณหภูมามีความสำคัญต่อการดูดซับ โดยการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้นานที่สุด ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว คือ 93 และ 112.8 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 2.076 และ 2.519 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 30, 45 และ 65 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายถึงคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิสูง ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma และคณะ [28] และ Klinthong และคณะ [32] ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับคือ SBA-15 ที่ผ่านการเติมด้วย PEI และตัวดูดซับ MCM-41 ที่ผ่านการเติมด้วย PEI ขึ้นรูปโดยใช้สารละลาย PAA และ NaOH เป็นตัวประสานตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือ 75 และ 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูง

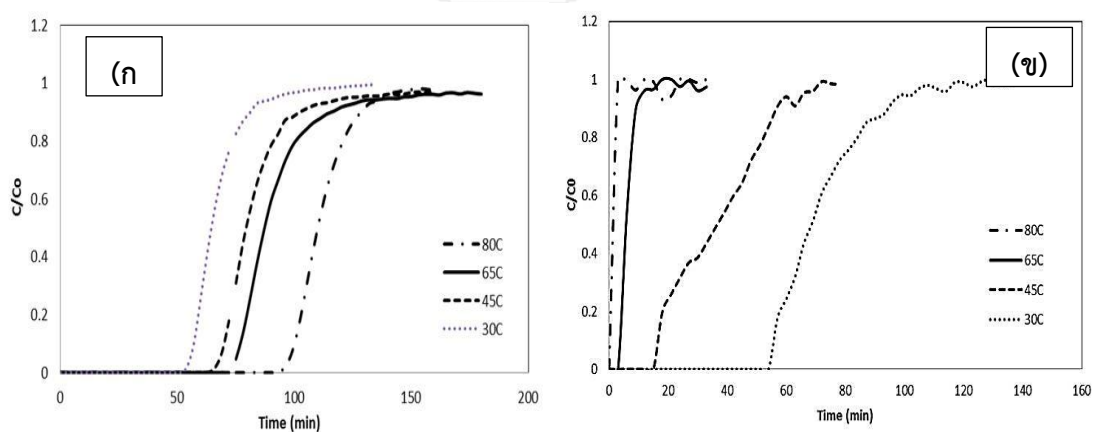
ภาพที่ 4.1 ข และตารางที่ 4.1 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 (ผง) ที่อุณหภูมิ 30, 45, 65 และ 80 องศาเซลเซียส ที่ภาวะคงที่คือ น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัม ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลแก๊ส 50 มิลลิลิตรต่อนาที (ตัวอย่างภาพโครมาโตแกรมแสดงดังภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.) พบว่าที่อุณหภูมิการดูดซับที่แตกต่างกันส่งผลต่อความสามารถการดูดซับแก๊ส แสดงว่าอุณหภูมิจึงมีความสำคัญต่อการดูดซับ โดยการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวลดลง

การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้นานที่สุด ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวคือ 54 และ 72.2 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 1.205 และ 1.612 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการดูดซับที่อุณหภูมิ 45, 65 และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งหมายถึงไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma และคณะ [28], Wang และคณะ [34] และ Chen และคณะ [35] ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ตัวดูดซับคือ SBA-15 ที่ผ่านการเติมด้วย PEI, ตัวดูดซับ Molecular sieve ที่ผ่านการเติม PEI และตัวดูดซับ Hierarchical porous silica monolith ที่ผ่านการเติม PEI ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิต่ำที่สุดในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์คือ 22 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำ

ตารางที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40

Temperature (°C)	BT time (min)	S time (min)	Cap(BT) (mmol/g)	Cap(S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
					Eff(BT)	EFF(S)
CO₂ adsorption						
80	93	112.8	2.076	2.519	0.223	0.271
65	72	93.8	1.607	2.094	0.173	0.225
45	63	84.7	1.406	1.890	0.151	0.203
30	51	67.8	1.138	1.513	0.122	0.163
H₂S adsorption						
80	0	2.1	0.000	0.046	0.000	0.005
65	3	7.5	0.067	0.167	0.007	0.018
45	15	36.9	0.335	0.824	0.036	0.089
30	54	72.2	1.205	1.612	0.130	0.173

ภาวะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ : ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที ภาวะการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ : ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลแก๊ส 50 มิลลิลิตรต่อนาที ภาวะคงที่ : น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัม



ภาพที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40

ภาวะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ : ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ 10 % โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที ภาวะการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ : ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1 % โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราการไหลแก๊ส 50 มิลลิลิตรต่อนาที ภาวะคงที่ : น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัม

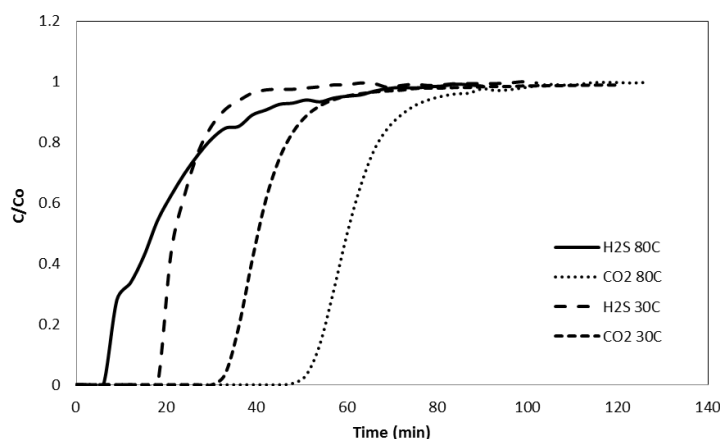
ภาพที่ 4.2 และตารางที่ 4.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ด้วยตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 (ผง) ที่อุณหภูมิ 80 และ 30 องศาเซลเซียส ที่ภาวะคงที่คือ น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัม ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที (ตัวอย่างภาพโครมาโตแกรมแสดงดังภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.) การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว คือ 45 และ 62.3 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 2.016 และ 2.792 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว คือ 6 และ 21.3 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว คือ 0.00486 และ 0.0172 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ

เนื่องจากในการดูดซับแก๊สกรดในแก๊สผสมมีการยึดเหนี่ยวระหว่างแอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ ร่วมกับการยึดเหนี่ยวระหว่างแอมีนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าการดูดซับในแก๊สเดี่ยวคาร์บอนไดออกไซด์ 10% โดยปริมาตรในไนโตรเจนที่เป็นเพียงการยึดเหนี่ยวระหว่างแอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น และจะเห็นว่าความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมจะมีค่าน้อยมากเนื่องจากทดสอบการดูดซับด้วยอุณหภูมิสูงถึง 80 องศาเซลเซียส ไม่เหมาะกับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ เพราะที่อุณหภูมิดังกล่าวทำให้เกิดภาวะของการคืนสภาพตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการทำลายอันตรกิริยาระหว่างแอมีนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้หลุดออกจากกัน ดังนั้นการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ของการดูดซับจึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

การดูดซับแก๊สผสมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมได้ ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ได้เป็น 30 และ 43 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 1.344 และ 1.928 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมได้ ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ได้เป็น 18 และ 24.7 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 0.015 และ 0.020 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ

เนื่องจากในการดูดซับแก๊สกรดในแก๊สผสมมีการยึดเหนี่ยวระหว่างแอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับการยึดเหนี่ยวระหว่างแอมีนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทำให้มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้น้อยกว่าการดูดซับในแก๊สเดี่ยวไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1% โดยปริมาตรใน

ไนโตรเจนที่เป็นเพียงการยึดเหนี่ยวระหว่างแอมีนและไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่านั้น แม้ว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ พบว่ายังเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีความแรงของกรดที่มากกว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($pK_{a_{CO_2}} = 6.35$ และ $pK_{a_{H_2S}} = 7$) ทำให้ดูดซับได้ดีด้วยแอมีนซึ่งมีความเป็นเบส [36]



ภาพที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40

ภาวะการดูดซับ: น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัม ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อความสามารถการดูดซับแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40

Temperature (°C)	Sample	BT time (min)	S time (min)	Cap(BT) (mmol/g)	Cap(S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
						Eff(BT)	EFF(S)
80	H ₂ S/mixed	6	21.3	0.005	0.017	0.001	0.002
	CO ₂ /mixed	45	62.3	2.016	2.792	0.217	0.300
30	CO ₂ /mixed	30	43.0	1.344	1.928	0.145	0.207
	H ₂ S/mixed	18	24.7	0.015	0.020	0.002	0.002

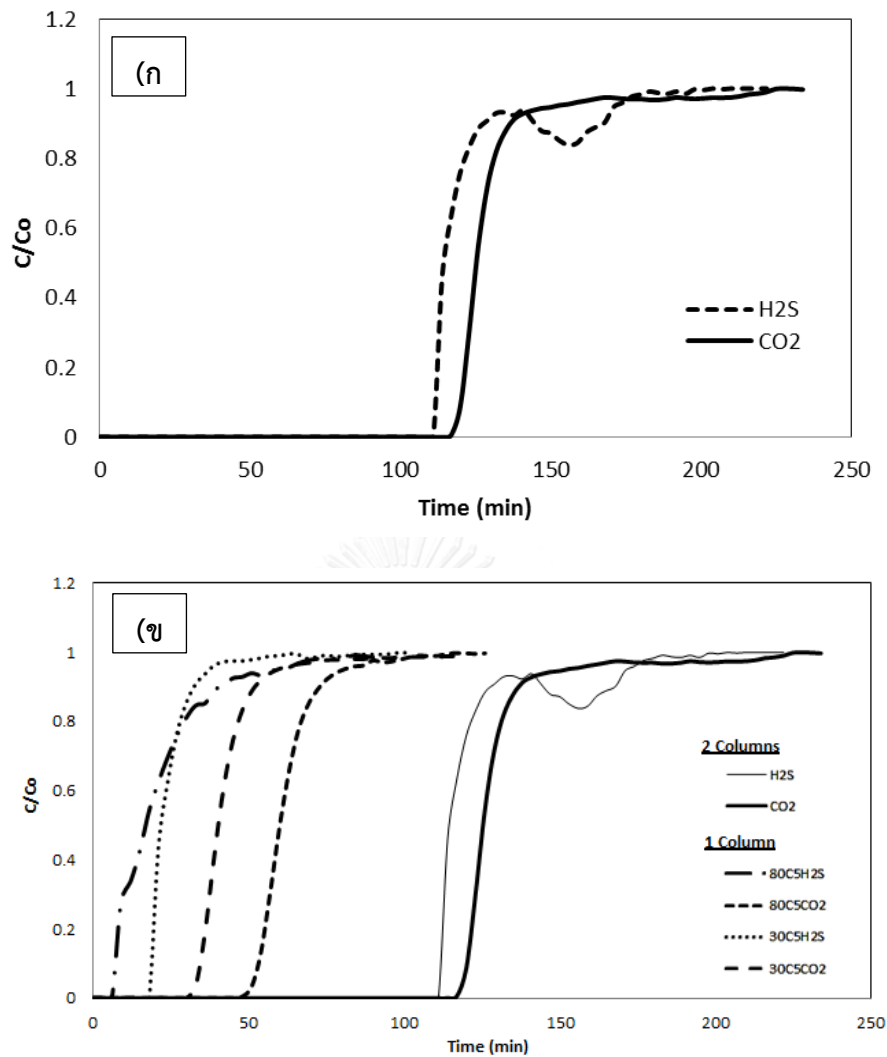
ภาวะการดูดซับ : น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัม ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที

4.2 การดูดซับแก๊สผสมในระบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง

จากการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นแตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเกิดการดูดซับด้วยแอมีนได้ดีกว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ เพื่อเป็นการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ให้ขัดขวางการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ ดังนั้น จึงให้คอลัมน์แรกมีอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือ ที่ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ตัวอย่างภาพโครมาโตแกรมแสดงดังภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.)

ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.3 และตารางที่ 4.3 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว คือ 114 และ นาที 129.5 ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 2.6 และ 2.9 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ได้เป็น 111 และ 121.9 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 0.04 และ 0.05 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบการดูดซับแก๊สผสมในระบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่องกับการดูดซับในระบบคอลัมน์เดี่ยว แสดงดังภาพที่ 4.4 และตารางที่ 4.4 พบว่า ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่องมีความสามารถของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่าระบบการดูดซับแบบคอลัมน์เดี่ยว เนื่องจากในระบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง จะเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนที่คอลัมน์แรก แล้วจึงเกิดการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่คอลัมน์ที่ 2 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ และทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ไม่แย่งที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในการจับกับแอมีน ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ma และคณะ [28] ซึ่งได้ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยใช้ตัวดูดซับคือ SBA-15 ที่ผ่านการเติมด้วย PEI โดยเปรียบเทียบระบบการดูดซับแบบคอลัมน์เดี่ยวกับระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์แรกที่มีอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส พบว่า การดูดซับในระบบ 2 คอลัมน์ มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ดีกว่าการดูดซับในระบบคอลัมน์เดี่ยว ดังนั้นจึงเลือกระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง คอลัมน์แรกอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่สองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในการทดลองต่อไป



ภาพที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วยผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 (ก) ระบบการดูดซับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม (ข) เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับแก๊สผสม ด้วยระบบการดูดซับคอลัมน์เดียวกับแบบ 2 คอลัมน์

ภาวะ: ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วยผงตัวดูดซับFsi-PEI800-40 ด้วยระบบการดูดซับ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง

Sample	BT time (min)	S time (min)	Cap(BT) (mmol/g)	Cap(S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
					Eff(BT)	EFF(S)
H ₂ S	111	121.9	0.045	0.049	0.005	0.005
CO ₂	114	129.5	2.554	2.900	0.275	0.312

ภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหล่แก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง คอลัมน์แรกใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยผงตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ด้วยระบบการดูดซับคอลัมน์เดียวกับแบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง

Condition		Sample	BT time (min)	S time (min)	Cap(BT) (mmol/g)	Cap(S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
Column	Temperature(°C)						Eff(BT)	EFF(S)
2 column in series	1 st column = 80	H ₂ S/mixed	111	121.9	0.045	0.049	0.005	0.005
	2 nd column = 30	CO ₂ /mixed	114	129.5	2.554	2.900	0.275	0.312
Single	80	H ₂ S/mixed	6	21.3	0.005	0.017	0.001	0.002
		CO ₂ /mixed	45	62.3	2.016	2.792	0.217	0.300
		CO ₂ /N ₂	93	112.8	2.076	2.519	0.223	0.271
Single	30	H ₂ S/mixed	18	24.7	0.015	0.020	0.002	0.002
		CO ₂ /mixed	30	43.0	1.344	1.928	0.145	0.207
		H ₂ S/N ₂	54	72.2	1.205	1.612	0.130	0.173

4.3. การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

4.3.1 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนโดยเทคนิคบีอีที (Brunauer Emmett Teller: BET)

การศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับฟุ่มซิลิกาตัดแปรด้วย PEI800 ด้วยการวัดพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับแบบผง และแบบเม็ดที่ชนิด และระยะเวลาการบ่ม 5 และ 42 วัน โดยการวัดการดูดซับทางกายภาพด้วยแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าตัวดูดซับแบบผงมีพื้นที่ผิว 116.7 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.9 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน 3.8 นาโนเมตร เมื่อผ่านการขึ้นรูปพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนมีค่าลดลง เม็ดตัวดูดซับที่ใช้แบ่งเป็นตัวอย่างประสาณมีพื้นที่ผิว 44.7 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เม็ดตัวดูดซับใช้ PVA เป็นตัวอย่างประสาณมีพื้นที่ผิว 55.1 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เม็ดตัวดูดซับใช้ Bentonite เป็นตัวอย่างประสาณมีพื้นที่ผิว 47.5 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Klinthong และคณะ [32] ซึ่งศึกษาการขึ้นรูปตัวดูดซับชนิดแอมินชนิด 3-aminopropyltriethoxysilane (APS) บนพื้นผิวตัวรองรับ MCM-41 และ แอมินชนิด Polyethylenimine (PEI) บนพื้นผิวตัวรองรับ MCM-41 โดยใช้สารละลาย PAA และ NaOH เป็นตัวอย่างประสาณ พบว่าเมื่อขึ้นรูปตัวดูดซับ พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน ตัวดูดซับมีค่าลดลง

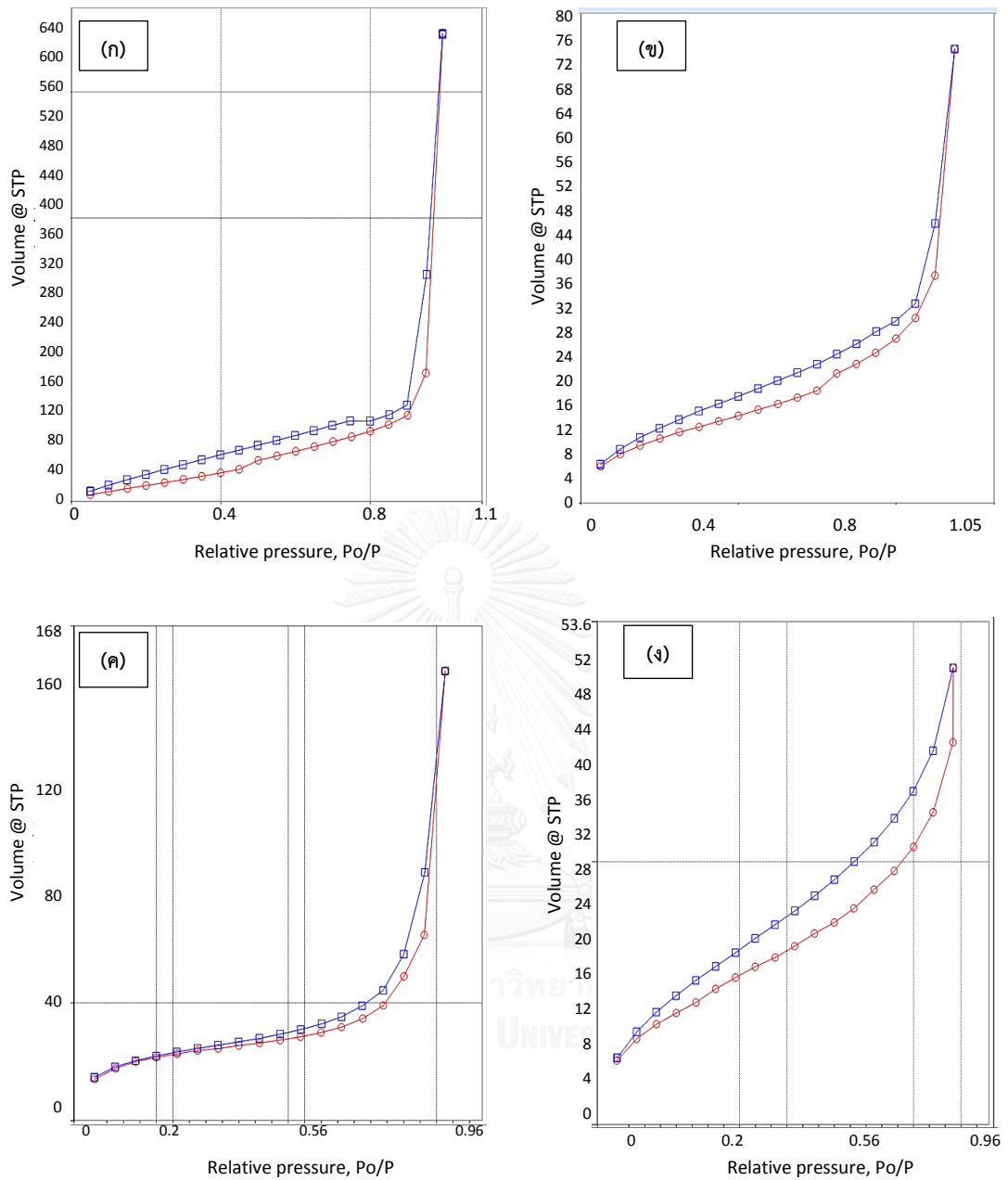
จากการวิเคราะห์ไอโซเทอร์มการดูดซับ และการคายของไนโตรเจน ซึ่งใช้ยืนยันขนาดของรูพรุนขนาดใหญ่ของตัวดูดซับที่ศึกษา ลักษณะของตัวดูดซับนั้นสามารถสังเกตได้จากรูปร่างของไอโซเทอร์ม ภาพที่ 4.4 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับ และการคายไนโตรเจนของตัวดูดซับ พบว่าไอโซเทอร์มของตัวดูดซับทุกตัวแสดงไอโซเทอร์มแบบบีอีทีชนิดที่ III ซึ่งแสดงลักษณะกราฟคล้ายกระจกแก้วชี้ให้เห็นว่าขนาดรูพรุนมีการกระจายตัวในช่วงกว้าง โดยไอโซเทอร์มชนิดนี้เป็นไอโซเทอร์มที่สารดูดซับในระบบเกิดการดูดซับอย่างต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียวจนถึงโมเลกุลหลายชั้น

จากการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular Sieve 5A (ภาคผนวก ก.) จากไอโซเทอร์มการดูดซับ การคายของไนโตรเจน และการกระจายตัวของขนาดรูพรุน พบว่าตัวดูดซับดังกล่าวแสดงลักษณะไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบบีอีทีชนิด I ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ไอโซเทอร์มแบบนี้มักพบในวัสดุที่มีความพรุนสูงมากแต่ผิวหน้ามีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ ทำให้การดูดซับเกิดการขึ้นเร็วในตอนต้นและเกิดการอิ่มตัวอย่างรวดเร็วทำให้ค่าการดูดซับคงที่ ซึ่งอาจเกิดได้กับตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาก

ตารางที่ 4.5 BET surface area และPore volume ของตัวดูดซับที่เตรียมได้และตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

Sample	BET surface area (m ² /g)	Pore volume (cc/g)
Fsi-PEI800-40 (Powder)	116.7	0.9
Fsi-PEI800-40 / Starch 5 % - 5 day	44.7	0.1
Fsi-PEI800-40 / Starch 5 % - 42 day	39.5	0.1
Fsi-PEI800-40 / PVA 5 % - 5 day	55.1	0.2
Fsi-PEI800-40 / PVA 5 % - 42 day	42.3	0.1
Fsi-PEI800-40 / Bentonite 5 % - 5 day	47.5	0.5
Fsi-PEI800-40 / Bentonite 5 % - 42 day	43.9	0.4
Molecular sieve 5A	334.9	0.2



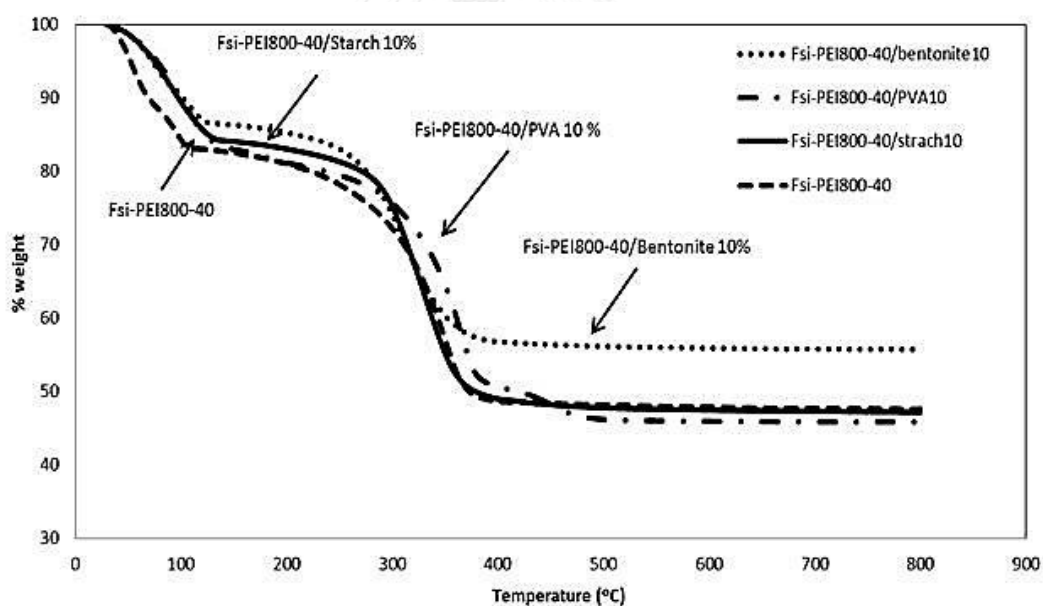


ภาพที่ 4.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนของตัวดูดซับ (ก) Fsi-PEI800-40 (powder), (ข) Fsi-PEI800-40/Starch 5%-5 day, (ค) Fsi-PEI800-40/PVA 5%-5 day และ (ง) Fsi-PEI800-40/Bentonite 5%-5 day

4.3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA)

ภาพที่ 4.5 แสดงการสลายตัวของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 แบบผงกับแบบเม็ดที่ใช้ตัวประสานต่างชนิดกันที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก ตัวดูดซับแบ่งช่วงการสลายตัวได้ คือ ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส เป็นการสูญเสียน้ำ ช่วงอุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของขงหมู่ไซลานอลและพอลิเอมีน และช่วงอุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส เป็นส่วนที่ไม่สลายตัวของซิลิกา

จากการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวดูดซับที่ขึ้นรูปด้วยตัวประสานชนิดต่างๆ นั้น พบว่าการใส่ตัวประสานส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อสมบัติทางความร้อนของตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับที่ใช้ Bentonite clay เป็นตัวประสานมีการสลายตัวที่น้อยกว่าการใช้ตัวประสานชนิดอื่นๆ Bentonite clay ไม่สลายตัวที่อุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส เนื่องจาก Bentonite เป็นสารจำพวกแร่ธาตุ จึงมีการสลายตัวที่อุณหภูมิที่สูงกว่าพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์และแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรต อย่างไรก็ตาม ในการทดสอบการดูดซับใช้อุณหภูมิไม่เกิน 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากหากใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้จะเกิดการหลอมของเอมีนส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

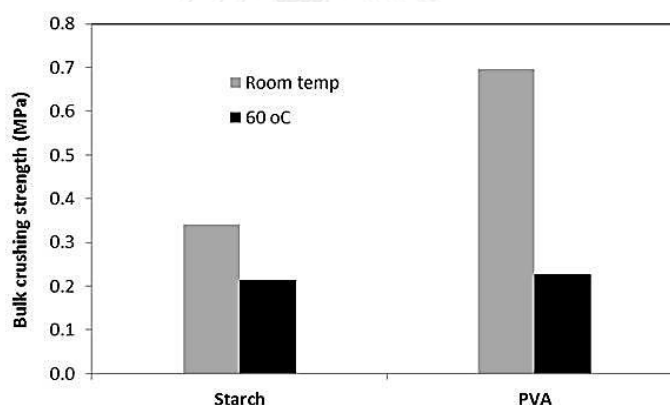


ภาพที่ 4.5 การสลายตัวของตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 แบบผงกับแบบเม็ด ที่ใช้ตัวประสานต่างชนิดกันที่ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก

4.4 ความสามารถในการคงรูปเชิงกล (Bulk crushing strength)

4.4.1 ผลของกระบวนการทำให้แห้งหลังการฉีดขึ้นรูป

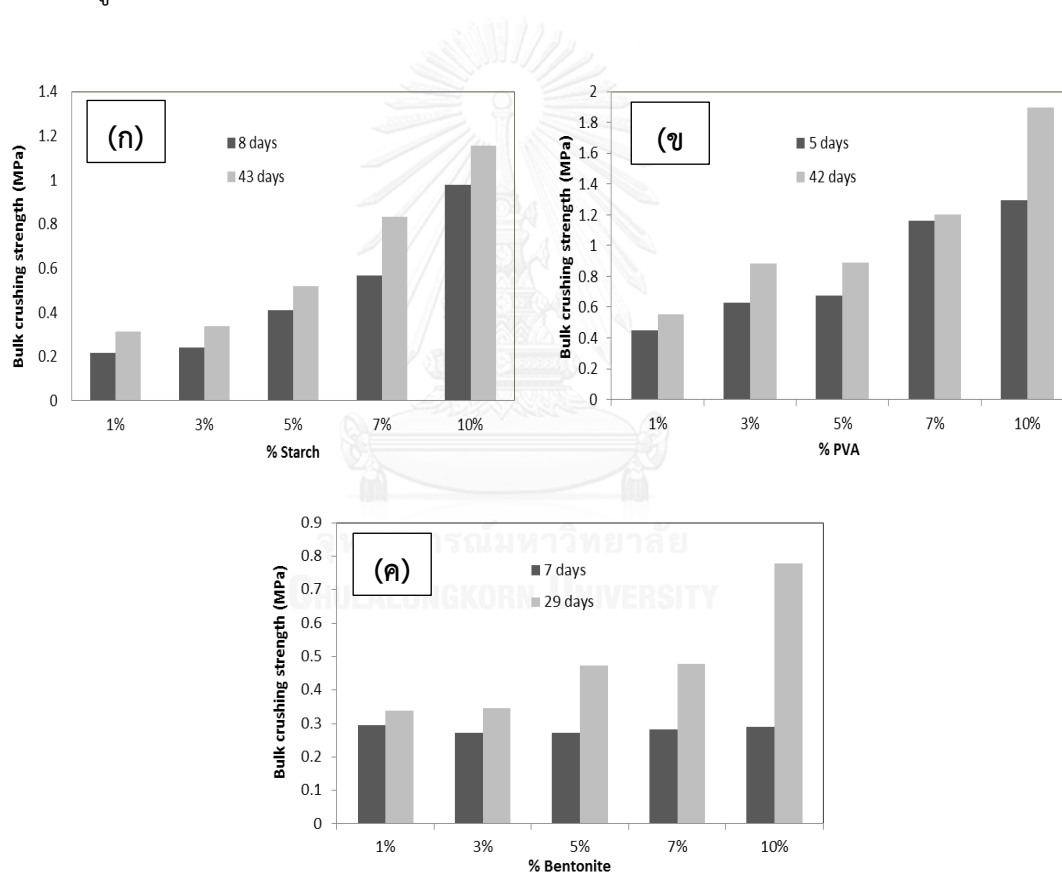
ภาพที่ 4.6 แสดงถึงผลของกระบวนการทำให้แห้งหลังการฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องกับอบแห้งที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาข้ามคืนของเม็ดตัวดูดซับที่ใช้เปรียบกับ PVA เป็นตัวประสาน (ตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ค.) จะเห็นว่ากระบวนการทำให้แห้งที่ต่างกันส่งผลต่อค่า Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ โดยการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องส่งผลให้ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับทั้งที่ใช้แป้ง และ PVA เป็นตัวประสาน สูงกว่าการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากการทำให้แห้งด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสทำให้ความชื้นหลุดออกจากตัวดูดซับเร็วเกินไป จึงเกิดรูพรุน และส่งผลให้ Bulk crushing strength ต่ำ แต่การทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องนั้นเป็นการให้ความชื้นค่อยๆ ออกไปอย่างช้าๆ ทำให้รูพรุนเหล่านั้นสามารถที่จะประสานเข้าหากันได้ จึงส่งผลให้ Bulk crushing strength สูงกว่าการทำให้แห้งด้วยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ตามวิธีที่จะทำต่อไปจึงเลือกใช้วิธีการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 4.6 ผลของกระบวนการทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้องกับที่ 60 องศาเซลเซียส ของเม็ดตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ที่ใช้เปรียบกับ PVA เป็นตัวประสานต่อ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ

4.4.2 ผลของระยะเวลาการบ่ม (curing period)

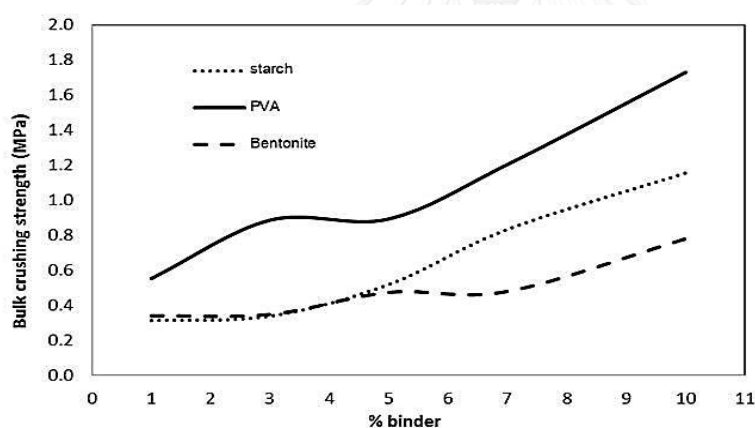
ภาพที่ 4.7 แสดงผลของระยะเวลาการบ่มของเม็ดตัวดูดซับที่ใช้แป้ง, PVA และ Bentonite clay เป็นตัวประสาน ที่ระยะเวลาการบ่มที่ประมาณ 1 สัปดาห์กับ 1 เดือน (ตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ค.) จะเห็นว่าเมื่อระยะเวลาการบ่มมากขึ้นจะทำให้ค่า Bulk crushing strength สูงขึ้น เนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปความชื้นที่อยู่ภายในรูพรุนตัวดูดซับจะหายไป ทำให้เนื้อตัวดูดซับสามารถประสานเข้าหากัน ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Akinwumi และคณะ [37] ศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มของคอนกรีตที่ 3, 7, 14, 28 และ 90 วัน ที่ภาวะการบ่มแตกต่างกัน พบว่าเวลาการบ่มที่มากขึ้นของทุกๆ ภาวะของการบ่มทำให้ค่า Compressive strength ของคอนกรีตสูงขึ้น



ภาพที่ 4.7 ผลของระยะเวลาการบ่มของเม็ดตัวดูดซับ FSi-PEI800-40 ที่ใช้ (ก) แป้ง, (ข) PVA และ (ค) Bentonite clay เป็นตัวประสาน ต่อ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ

4.4.3 ผลของปริมาณและชนิดของตัวประสาน

การขึ้นรูปโดยใช้ตัวประสานในปริมาณที่ต่างกัน (1-10% โดยน้ำหนัก) และต่างชนิดกันส่งผลให้ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับแตกต่างกัน แสดงผลดังภาพที่ 4.8 และตารางที่ 4.6 (ตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ค.) เมื่อเพิ่มปริมาณตัวประสานมากขึ้นค่า Bulk crushing strength สูงขึ้น เนื่องจากการมีที่มีตัวประสานในปริมาณมากจะทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างผงตัวดูดซับได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Klinthong และคณะ [32] ซึ่งศึกษาตัวดูดซับ MCM-41 ที่ผ่านการเติมด้วย PEI ขึ้นรูปโดยใช้สารละลาย PAA และ NaOH เป็นตัวประสาน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ PAA ที่ปริมาณ NaOH คงที่ หรือการเพิ่มปริมาณ NaOH ที่ปริมาณ PAA คงที่ ความคงตัวเชิงกลของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น โดยเม็ดตัวดูดซับที่ใช้ PVA เป็นตัวประสานจะมีค่า Bulk crushing strength สูงกว่าการใช้แป้งและ Bentonite clay เป็นตัวประสาน เนื่องจาก PVA เป็นพอลิเมอร์ ซึ่งมีมวลโมเลกุลที่สูงกว่ามวลโมเลกุลของแป้งที่และ Bentonite เมื่อมีแรงภายนอกมากกระทำ โครงสร้างภายในของสารที่มีมวลโมเลกุลสูง หรือมีโมเลกุลขนาดใหญ่จะเกิดความยุ่งเหยิง ทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวของโมเลกุลได้ดี



ภาพที่ 4.8 ผลของปริมาณและชนิดของตัวประสานต่างกันต่อ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่เวลาการบ่ม 42 วัน

ตารางที่ 4.6 ผลของปริมาณและชนิดของตัวประสานต่างกันต่อค่า Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่เวลาการบ่ม 42 วัน และ Bulk crushing strength ของ Molecular sieve 5A

Types of binder	Bulk crushing strength (MPa)				
	Amount of binder (%)				
	1	3	5	7	10
Starch	0.3	0.3	0.5	0.8	1.2
PVA	0.6	0.9	0.9	1.2	1.7
Bentonite	0.3	0.3	0.5	0.5	0.8
Molecular sieve 5A	1.7				

4.5. การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดตัวดูดซับใน 2 คอลัมน์

4.5.1 ผลของระยะเวลาการบ่ม

ผลการทดสอบความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับแบบเม็ด Fsi-PEI800-40 / PVA 5% ที่ระยะเวลาการบ่มต่างกัน (1 วัน และ 1 เดือน) ที่ภาวะความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์ (ตัวอย่างภาพโครมาโตแกรมแสดงดังภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.) พบว่า ความสามารถของตัวดูดซับที่ใช้เวลาหลังจากฉีดตัวอย่าง 1 วันกับ 1 เดือน มีค่าไม่ต่างกันมากนัก แสดงผลดังตารางที่ 4.7 ดังนั้นในการทดสอบการดูดซับแก๊สจึงสามารถละตัวแปรนี้ได้

ตารางที่ 4.7 ผลของระยะเวลาการบ่มต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5%

Aging time	BT (min)	S Time (min)	Cap(BT) <input type="checkbox"/> mmol/g	Cap(S) mmol/g	Efficiency of amine	
					Eff(BT)	Eff(S)
CO₂ adsorption						
1 day	48	62.813	1.075	1.407	0.116	0.151
1 month	51	64.958	1.142	1.455	0.123	0.156
H₂S adsorption						
1 day	42	44.884	0.017	0.018	0.002	0.002
1 month	42	45.300	0.017	0.018	0.002	0.002

ภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

4.5.2 ผลของชนิดและปริมาณตัวประสาน

ผลการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับฟุ้งซิลิกาตัดแปรด้วยแอมินที่ใช้ตัวประสานต่างชนิดกัน คือ แป้ง, PVA และ Bentonite clay ที่ภาวะ ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊ส ไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง ปริมาตรคอลัมน์แรกที่ถูกหนุมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์ ของการใช้ชนิดและปริมาณตัวประสานที่แตกต่างกัน (ตัวอย่างภาพโครมาโตแกรม แสดงดังภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.)

การใช้ตัวประสานต่างชนิดกันในการขึ้นรูปตัวดูดซับส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ แสดงการเปรียบเทียบดังภาพที่ 4.9 เม็ดตัวดูดซับที่ใช้ Bentonite เป็นตัวประสานสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่สุด เนื่องจาก Bentonite สามารถช่วยกระจายตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาของตัวดูดซับ (Active site) โดยการเพิ่มปริมาณรูพรุนขนาดใหญ่บนพื้นผิวตัวดูดซับ (เม็ดตัวดูดซับที่ใช้แป้งเป็นตัวประสานมี ปริมาตรรูพรุน 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เม็ดตัวดูดซับใช้ PVA เป็นตัวประสานมีปริมาตรรูพรุน 0.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เม็ดตัวดูดซับใช้ Bentonite เป็นตัวประสานมีปริมาตรรูพรุน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม) จึงทำให้เม็ดตัวดูดซับที่ใช้ Bentonite เป็นตัวประสานมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าตัวดูดซับที่ใช้ตัวประสานชนิดอื่นในการขึ้นรูปเม็ด

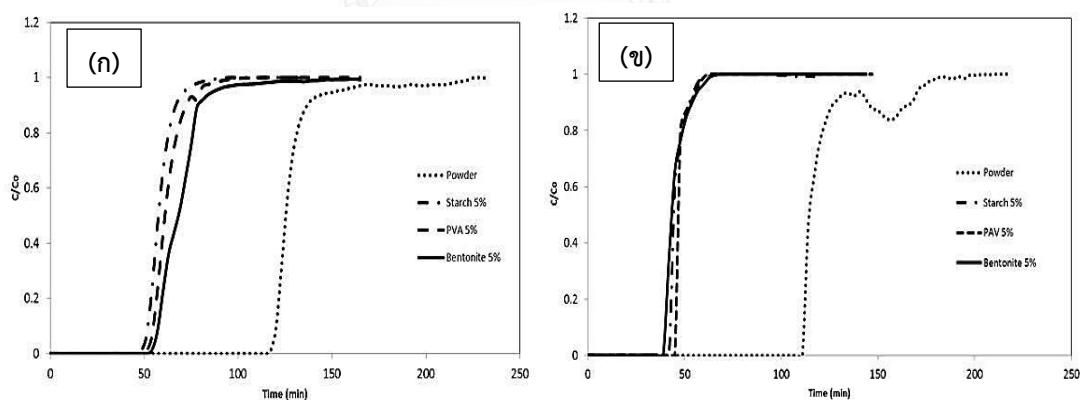
อย่างไรก็ตามการที่ตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นจำนวนมากส่งผลให้โครงสร้างของตัวดูดซับไม่แข็งแรงและเปราะ จากหัวข้อที่ 4.4.3 จะเห็นได้ว่า Bulk crushing strength ของตัวดูดซับที่ใช้ Bentonite เป็นตัวประสานจะมีค่าต่ำ [30] การที่ตัวดูดซับมีความเปราะจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊ส เนื่องจากตัวดูดซับที่เปราะจะไม่สามารถคงรูปได้ ทำให้เกิดการอัดตัวแน่นภายในคอลัมน์ จึงมีพื้นที่ในการดูดซับลดลง

ผลการทดสอบความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับแบบเม็ดและแบบผง พบว่า ตัวดูดซับแบบเม็ดมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์น้อยกว่าตัวดูดซับแบบผง แสดงผลดังภาพที่ 4.9 และตารางที่ 4.8 ถึง 4.10 พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับที่ขึ้นรูปเป็นเม็ดลดลง (ตัวดูดซับแบบผงมีพื้นที่ผิว 116.7 ตารางเมตรต่อกรัม เม็ดตัวดูดซับที่ใช้แป้งเป็นตัวประสานมีพื้นที่ผิว 44.7 ตารางเมตรต่อกรัม เม็ดตัวดูดซับใช้ PVA เป็นตัวประสานมีพื้นที่ผิว 55.1 ตารางเมตรต่อกรัม เม็ดตัวดูดซับใช้ Bentonite เป็น

ตัวประสานมีพื้นที่ผิว 47.5 ตารางเมตรต่อกรัม) การขึ้นรูปเม็ดทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผงตัวดูดซับกับตัวประสานและตัวประสานซึ่งจะไปบดบังตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาของตัวดูดซับ

ผลของการขึ้นรูปด้วยตัวประสานปริมาณต่างๆ (1-10% โดยน้ำหนัก) ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ภาพที่ 4.10 และตารางที่ 4.8 ถึง 4.10 พบว่าที่ปริมาณตัวประสานมากขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สลดลงในการใช้ตัวประสานทุกชนิด การเพิ่มปริมาณตัวประสานทำให้ภายในตัวดูดซับมีตัวที่ช่วยยึดเกาะ จึงทำให้ตัวดูดซับเกิดการเกาะตัวแน่นและเป็นการเพิ่มส่วนของตัวประสาน ทำให้อัตราส่วนของตำแหน่งที่ว่องไวของตัวดูดซับลดลง ส่งผลให้พื้นที่ผิวลดลง สอดคล้องกับผลของ Ching และคณะ [31] และ Worasaung และคณะ [32] ซึ่งศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ Ca/Al carbonate โดยใช้ TiO_2 เป็นตัวประสาน ($\text{Ca-Al-CO}_3/\text{TiO}_2$) และ ศึกษาตัวดูดซับ MCM-41 ที่ผ่านการเติมด้วย PEI ขึ้นรูปโดยใช้สารละลาย PAA และ NaOH เป็นตัวประสาน ตามลำดับ โดยใช้ตัวประสานต่อตัวดูดซับในอัตราส่วนที่ต่างกัน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณตัวประสานทำให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

จากการทดสอบประสิทธิภาพความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์และ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ การขึ้นรูปเม็ดโดยใช้ PVA ปริมาณ 5 % โดยน้ำหนัก (Fsi-PEI800-40 / PVA 5%) มีความเหมาะสมในการนำไปทดสอบในระบบขยาย 20 เท่าของระดับห้องทดลองต่อไป



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบความสามารถการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 แบบผงกับเม็ดที่ใช้ตัวประสานปริมาณ 5 % โดยน้ำหนัก

ภาวะการดูดซับ: ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊ส 5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

ตารางที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับแบบผง และเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่ใช้แบ่งเป็นตัวอย่างที่ปริมาณต่างกัน แบบ 2 ต่ออนุกรม

% Starch	BT time (min)	S time (min)	Cap (BT) (mmol/g)	Cap (S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
					Eff (BT)	Eff (S)
CO₂ adsorption						
Powder	114	129.5	2.554	2.900	0.275	0.312
1	51	67.7	1.142	1.517	0.123	0.163
3	45	59.9	1.008	1.341	0.108	0.144
5	45	58.8	1.008	1.318	0.108	0.142
7	42	58.1	0.941	1.301	0.101	0.140
10	39	54.7	0.874	1.226	0.094	0.132
H₂S adsorption						
Powder	111	121.9	0.045	0.049	0.005	0.005
1	48	52.6	0.019	0.021	0.002	0.002
3	42	46.6	0.017	0.019	0.002	0.002
5	42	46.3	0.017	0.019	0.002	0.002
7	39	45.3	0.016	0.018	0.002	0.002
10	39	44.4	0.016	0.018	0.002	0.002

ภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสน้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

ตารางที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับแบบผง และเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่ใช้ PVA เป็นตัวประสานที่ปริมาณต่างกัน แบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

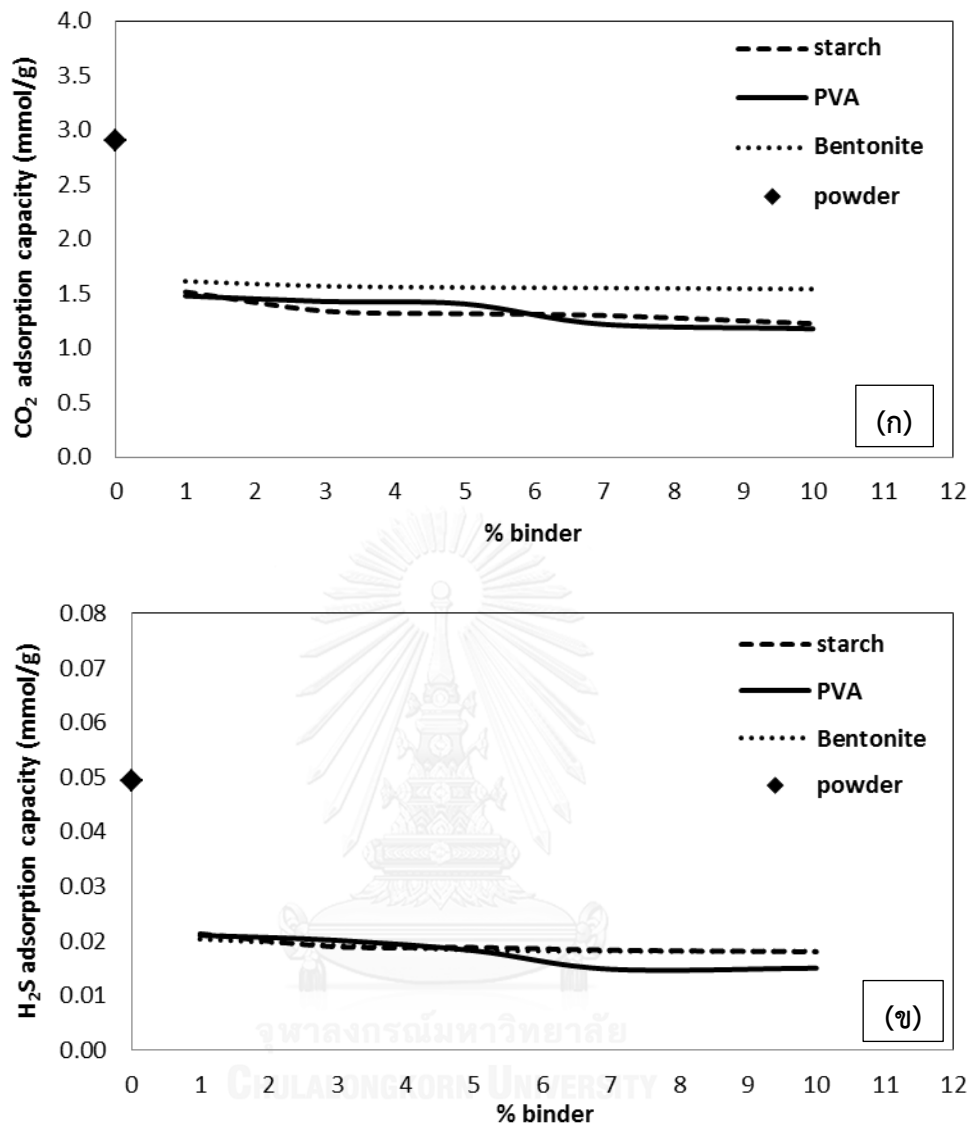
% PVA	BT time (min)	S time (min)	Cap (BT) (mmol/g)	Cap (S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
					Eff (BT)	Eff (S)
CO₂ adsorption						
Powder	114	129.5	2.554	2.900	0.275	0.312
1	54	66.1	1.210	1.480	0.130	0.159
3	51	63.8	1.142	1.429	0.123	0.154
5	48	62.8	1.075	1.407	0.116	0.151
7	42	54.5	0.941	1.220	0.101	0.131
10	39	52.6	0.874	1.179	0.094	0.127
H₂S adsorption						
Powder	111	121.9	0.045	0.049	0.005	0.005
1	48	51.8	0.019	0.021	0.002	0.002
3	45	49.7	0.018	0.020	0.002	0.002
5	42	44.9	0.017	0.018	0.002	0.002
7	33	36.5	0.013	0.015	0.001	0.002
10	30	37.1	0.012	0.015	0.001	0.002

ภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสน้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับแบบผง และเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่ใช้ Bentonite เป็นตัวประสานที่ปริมาณต่างกันแบบ 2 คอลัมน์ ต่ออนุกรม

% Bentonite	BT time (min)	S time (min)	Cap (BT) (mmol/g)	Cap (S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
					Eff (BT)	Eff (S)
CO₂ adsorption						
Powder	114	129.5	2.554	2.900	0.275	0.312
1	57	72.1	1.277	1.614	0.137	0.174
3	54	70.0	1.210	1.569	0.130	0.169
5	51	69.6	1.142	1.558	0.123	0.168
7	51	69.3	1.142	1.553	0.123	0.167
10	51	68.9	1.142	1.543	0.123	0.166
H₂S adsorption						
Powder	111	121.9	0.045	0.049	0.005	0.005
1	45	50.2	0.018	0.020	0.002	0.002
3	42	47.4	0.017	0.019	0.002	0.002
5	39	45.3	0.016	0.018	0.002	0.002
7	39	44.7	0.016	0.018	0.002	0.002
10	39	44.6	0.016	0.018	0.002	0.002

ภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสน้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์



ภาพที่ 4.10 ผลของชนิดและปริมาณตัวประสานต่อความสามารถการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 ที่ใช้แป้ง, PVA และBentonite clay เป็นตัวประสาน

4.6. การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบขยาย

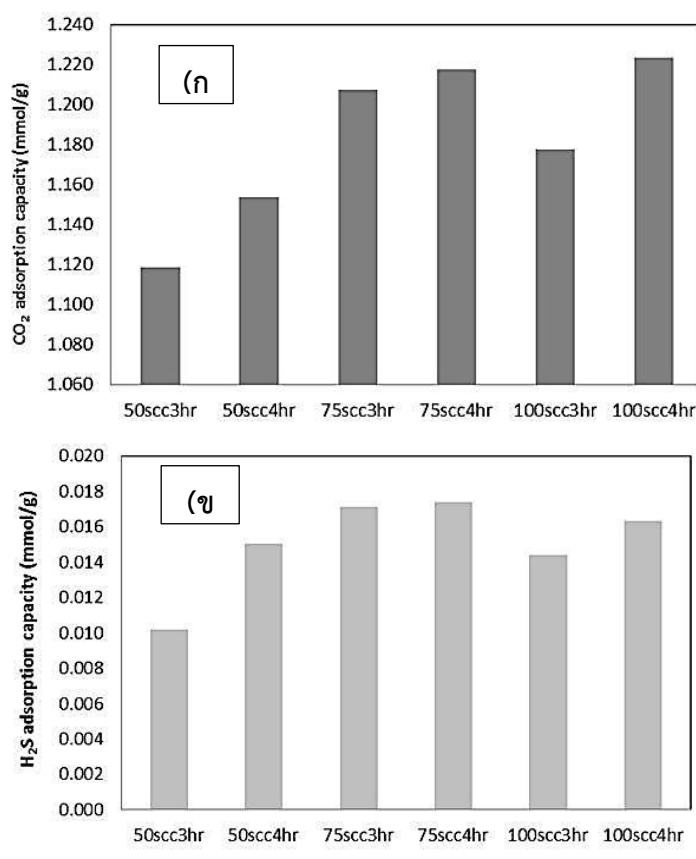
4.6.1 ผลของ Pre-treatment ต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

ผลการทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% Pre-treatment ที่อัตราการไหลของไนโตรเจนและเวลาต่างกัน ที่ภาวะความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน Pre-treatment ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊สผสม 80 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เม็ดตัวดูด น้ำหนักตัวดูดซับ 21 กรัมต่อ 1 คอลัมน์ พบว่า Pre-treatment ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ตัวอย่างภาพโครมาโตแกรมแสดงดังภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.) แสดงดังภาพที่ 4.11 และตารางที่ 4.11

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดได้ดีที่สุดที่ Pre-treatment ด้วยอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 75 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมได้ ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ได้เป็น 57 และ 71.3 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 0.973 และ 1.217 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมได้ ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ได้เป็น 48 และ 56.3 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 0.0148 และ 0.0174 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ

เนื่องจากอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 50 มิลลิลิตรต่อนาที ไม่เพียงพอต่อการ pre-treatment ตัวดูดซับปริมาณมากจึงทำให้ยังคงมีความชื้นและสิ่งเจือปนหลงเหลืออยู่ในตัวดูดซับ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ส่วน Pre-treatment ด้วยอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลที่มากเกินไปส่งผลให้เกิดความดันลดภายในระบบเนื่องจากเม็ดตัวดูดซับจะถูกบีบอัดแน่นส่งผลให้พื้นที่การดูดซับลดลง ประสิทธิภาพการดูดซับจึงลดลง แต่เนื่องจากความสามารถการดูดซับจาก Pre-treatment ตัวดูดซับ ด้วยอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 75 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 กับ 4 ชั่วโมง ใกล้เคียงกันมาก (Pre-treatment ตัวดูดซับด้วยอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 75 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมได้ ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ได้เป็น 54 และ 70.7 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 0.922 และ 1.207 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมได้ ณ เวลาที่ Breakthrough และที่

อิมตัว ได้เป็น 48 และ 55.5 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ Breakthrough และที่อิมตัว 0.0148 และ 0.0171 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ) ดังนั้นจึงได้เลือกใช้การ Pre-treatment ตัวดูดซับด้วยอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 75 มิลลิลิตรต่อ นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในการทดสอบต่อไป



ภาพที่ 4.11 ผลของ Pre-treatment ที่อัตราการไหลของไนโตรเจนและเวลาต่างกัน ต่อการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ(ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5% ในระบบขยาย

ภาวะ Pre-treatment : อุณหภูมิ Pre-treatment 90 องศาเซลเซียส

ภาวะการดูดซับ: ความเข้มข้นแก๊สมิเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 80 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เม็ดตัวดูด น้ำหนักตัวดูดซับ 21 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

ตารางที่ 4.11 ผลของ Pre-treatment ที่อัตราการไหลของไนโตรเจนและเวลาต่างกันต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5% ในระบบขยาย

Pre-treatment		BT time (min)	S time (min)	Cap(BT) (mmol/g)	Cap(S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
Flow N2 (scc/min)	Time (hr)					Eff(BT)	Eff(S)
CO₂ adsorption							
50	3	45	65.5	0.768	1.119	0.083	0.120
50	4	48	67.6	0.819	1.154	0.088	0.124
75	3	54	70.7	0.922	1.207	0.099	0.130
75	4	57	71.3	0.973	1.217	0.105	0.131
100	3	45	69.0	0.768	1.178	0.083	0.127
100	4	51	71.7	0.870	1.223	0.094	0.132
H₂S adsorption							
50	3	30	32.9	0.009	0.010	0.001	0.001
50	4	42	48.7	0.013	0.015	0.001	0.002
75	3	48	55.5	0.015	0.017	0.002	0.002
75	4	48	56.3	0.015	0.017	0.002	0.002
100	3	36	46.7	0.011	0.014	0.001	0.002
100	4	36	53.0	0.011	0.016	0.001	0.002

ภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน Pre-treatment ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อัตราไหลแก๊สผสม 80 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เม็ดตัวดูด น้ำหนักตัวดูดซับ 21 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

4.6.2 ผลของอัตราไหลแก๊สผสมต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

ตารางที่ 4.12 แสดงผลของอัตราไหลแก๊สผสมต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5% ที่อัตราไหลของแก๊สผสมที่ 80, 104 และ 150 มิลลิลิตรต่อนาที (ตัวอย่างภาพโครมาโตแกรมแสดงดังภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.) พบว่าอัตราการไหลแก๊สผสมที่ 80 มิลลิลิตรต่อนาทีสามารถเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough ได้นานที่สุดเป็นเวลา 57 และ 48 นาที ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการไหลแก๊สผสมที่ 104 สามารถเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough เป็นเวลา 45 และ 33 นาที ตามลำดับ และที่อัตราไหลแก๊สผสม 150 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough เป็นเวลา 24 และ 15 นาที ตามลำดับ การที่อัตราไหลแก๊สต่ำเป็นการเพิ่มเวลาการสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับตัวดูดซับ และมี Retention time อยู่ในตัวดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อแก๊สสัมผัสกับพื้นผิวของตัวดูดซับ จะเกิดการดูดซับไว้นานกว่าภาวะทางกายภาพของตัวดูดซับจะเปลี่ยน แก๊สจึงเคลื่อนที่ต่อมายังตัวดูดซับที่อยู่ถัดลงมา

อย่างไรก็ตาม จากการคำนวณความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตราการไหลแก๊สผสมต่างๆ พบว่าที่อัตราไหลแก๊สผสมที่ 104 มิลลิลิตรต่อนาทีมีความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough มากที่สุดคือ 0.998 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ขณะที่อัตราไหลแก๊สผสมที่ 80 มิลลิลิตรต่อนาที มีความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough คือ 0.973 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ แต่ความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตราไหล 104 มิลลิลิตรต่อนาทีจะน้อยกว่าอัตราไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที (ความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough ที่อัตราไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาทีคือ 0.0148 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough ที่อัตราไหล 104 มิลลิลิตรต่อนาทีคือ 0.0132 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ) เนื่องจากที่อัตราไหลสูงทำให้แก๊สเคลื่อนผ่านตัวดูดซับไปเร็วกว่าที่อัตราไหลต่ำ

แม้ว่าการที่อัตราการไหลแก๊สผสมสูงจะเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ดีกว่าที่อัตราไหลแก๊สผสมต่ำ แต่เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมมีความเข้มข้นต่ำอีกทั้งไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความจำเพาะกับตัวดูดซับน้อยกว่าคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้เมื่อเพิ่มอัตราไหลสูงขึ้น แก๊สจะไหลผ่านตัวดูดซับเร็วเกินไป ความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงต่ำลง อย่างไรก็ตามค่าความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อัตราการไหลแก๊สผสมที่แตกต่างกันจะต่างกันเพียงเล็กน้อย จึงยึดผลการดูดซับของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก ดังนั้น อัตราไหลที่เหมาะสมต่อการดูดซับคือที่อัตราไหล 104 มิลลิลิตรต่อนาที

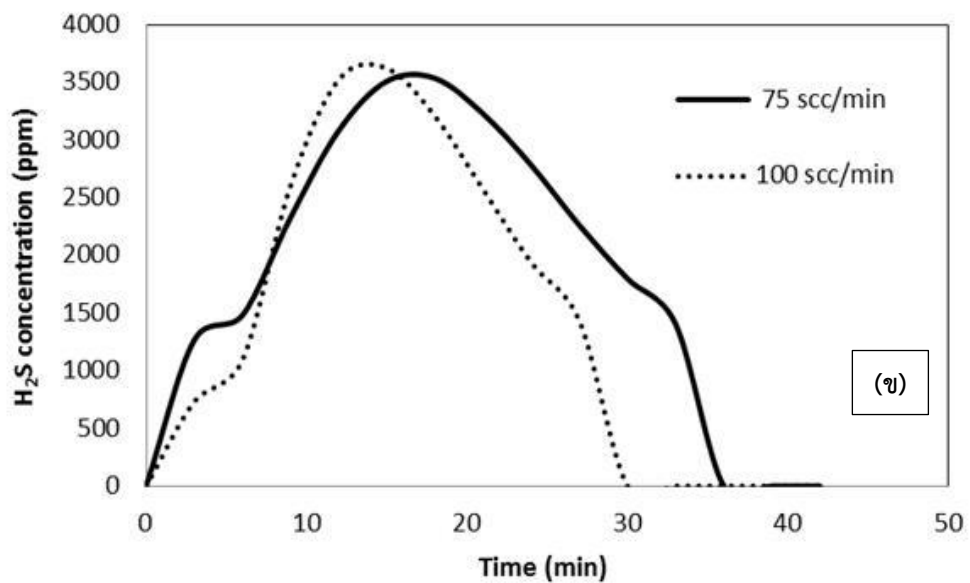
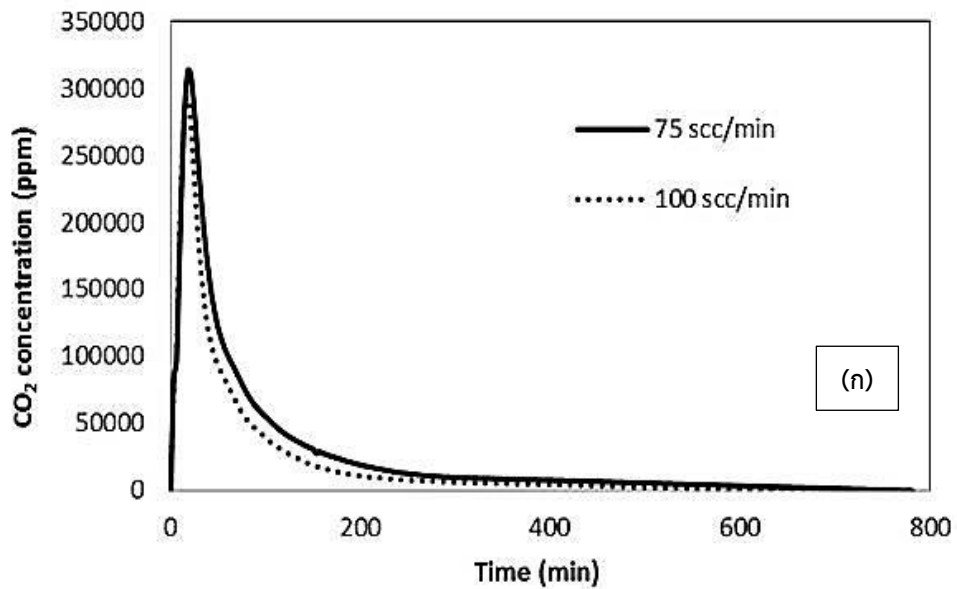
ตารางที่ 4.12 ผลของอัตราไหลแก๊สผสมต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของ เม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5% ในระบบขยาย

Flow mixed gas (scc/min)	BT time (min)	S time (min)	Cap(BT) (mmol/g)	Cap(S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
					Eff(BT)	Eff(S)
CO₂ adsorption						
80	57	71.3	0.973	1.217	0.105	0.131
104	45	65.9	0.998	1.462	0.107	0.157
150	24	50.8	0.768	1.625	0.083	0.175
H₂S adsorption						
80	48	56.3	0.015	0.017	0.002	0.002
104	33	37.1	0.013	0.015	0.001	0.002
150	15	19.3	0.009	0.011	0.001	0.001

ภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน Pre-treatment ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 75 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เม็ดตัวดูด น้ำหนักตัวดูดซับ 21 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

4.6.3 ศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ

ผลของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนสำหรับการคายคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ออกจากเม็ดตัวดูดซับด้วยอัตราไหลต่างกันที่ 75 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.12 ที่อัตราไหล 75 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาที ตัวดูดซับสามารถคืนสภาพในคอลัมน์แรก หรือการคายคาร์บอนไดออกไซด์ได้หมดในเวลา 780 และ 642 นาที ตามลำดับ และคืนสภาพในคอลัมน์ที่สอง หรือการคายไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้หมดเวลา 36 และ 30 นาที ตามลำดับ เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์จะเกิดการคายได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งในแก๊สผสมมีองค์ประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่น้อยมากจึงส่งผลให้การคายตัวของไฮโดรเจนซัลไฟด์ใช้เวลา น้อยกว่าการคายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ เวลาที่ใช้ในการคืนสภาพตัวดูดซับที่อัตราไหล 75 และ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีต่างกันเล็กน้อยและเพื่อเป็นการไม่ให้เกิดความดันลดเนื่องจากการอัดตัวของเม็ดตัวดูดซับจากการไหลของแก๊ส ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราไหลไนโตรเจนที่ 75 มิลลิลิตรต่อนาที ในการคืนสภาพสำหรับทดสอบเสถียรภาพของตัวดูดซับโดยการดูดซับและการคายเป็นวัฏจักรในการทดลองต่อไป



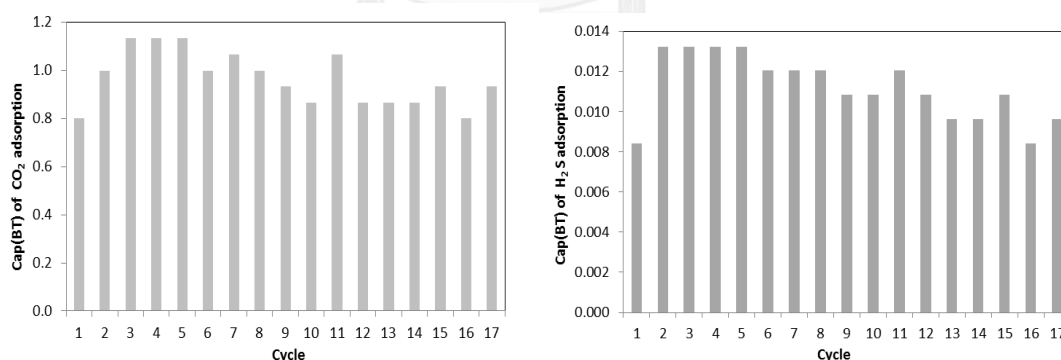
ภาพที่ 4.12 การคายการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ด้วยอัตราไหล ไนโตรเจนต่างกัน ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5%

ภาวะ : ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% น้ำหนักตัวดูดซับ 21 กรัมต่อ 1 คอลัมน์อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

4.6.4 ศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ

การศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/ PVA 5% ต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ด้วยระบบการดูดซับแบบสองคอลัมน์ต่ออนุกรม ทดสอบการดูดซับและการคายการดูดซับจำนวน 17 รอบ ภาวะการดูดซับที่ ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน Pre-treatment ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อัตราแก๊สผสม 80 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เม็ดตัวดูด น้ำหนักตัวดูดซับ 21 กรัม ต่อ 1 คอลัมน์ ภาวะคืนสภาพหรือการคายที่ ความเข้มข้นไนโตรเจน 99.999% อัตราไหลไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส (ตัวอย่างภาพโครมาโตแกรมแสดงดังภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.)

ผลการทดสอบการดูดซับแสดงดัง ภาพที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.13 ค่าที่แกว่งขึ้นลงเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของเม็ดตัวดูดซับ ซึ่งมีการเรียงตัวแบบสุ่ม รอบที่เม็ดตัวดูดซับมีการอัดตัวแน่นจะมีค่าการดูดซับที่ต่ำ จากผลการทดสอบเสถียรภาพของตัวดูดซับต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม พบว่า ตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/ PVA 5% สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมและสามารถคืนสภาพตัวดูดซับให้กลับมาใช้ใหม่ได้



ภาพที่ 4.13 รอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5%

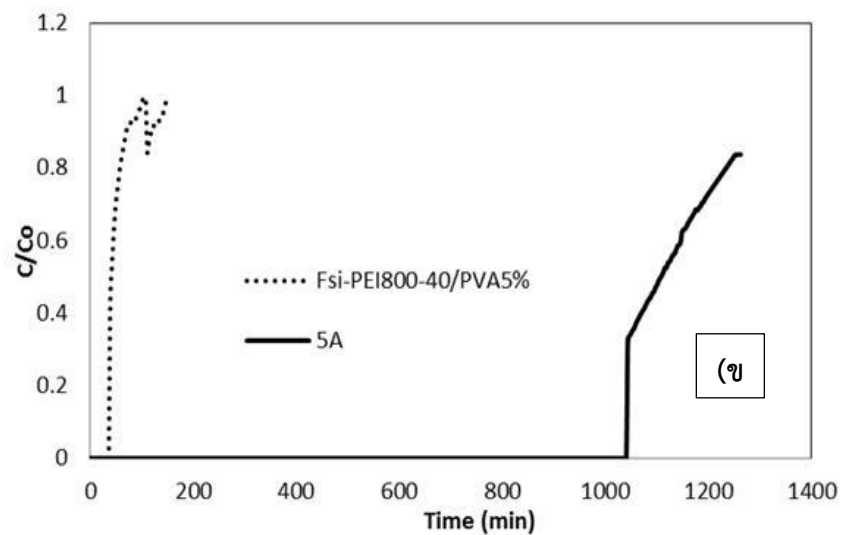
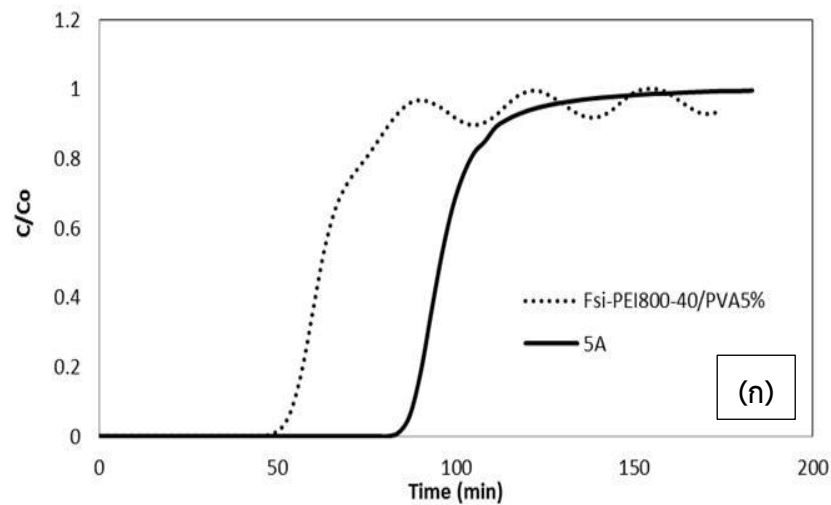
ตารางที่ 4.13 รอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5%

Cycle	BT time (min)	S time (min)	Cap(BT) (mmol/g)	Cap(S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
					Eff(BT)	Eff(S)
CO ₂ adsorption						
1	36	56.8	0.799	1.261	0.086	0.136
2	45	63.7	0.998	1.414	0.107	0.152
3	51	65.6	1.131	1.455	0.122	0.156
4	51	65.0	1.131	1.442	0.122	0.155
5	51	66.9	1.131	1.485	0.122	0.160
6	45	64.2	0.998	1.424	0.107	0.153
7	48	63.1	1.065	1.400	0.115	0.151
8	45	62.1	0.998	1.378	0.107	0.148
9	42	59.5	0.932	1.321	0.100	0.142
10	39	57.5	0.865	1.276	0.093	0.137
11	48	62.9	1.065	1.395	0.115	0.150
12	39	59.7	0.865	1.324	0.093	0.142
13	39	54.8	0.865	1.216	0.093	0.131
14	39	58.4	0.865	1.295	0.093	0.139
15	42	59.2	0.932	1.314	0.100	0.141
16	36	55.2	0.799	1.224	0.086	0.132
17	42	57.7	0.932	1.279	0.100	0.138
H ₂ S adsorption						
1	21	25.5	0.008	0.010	0.001	0.001
2	33	44.7	0.013	0.018	0.001	0.002
3	33	40.8	0.013	0.016	0.001	0.002
4	33	40.6	0.013	0.016	0.001	0.002
5	33	41.4	0.013	0.017	0.001	0.002
6	30	42.4	0.012	0.017	0.001	0.002
7	30	38.1	0.012	0.015	0.001	0.002
8	30	36.3	0.012	0.015	0.001	0.002
9	27	36.9	0.011	0.015	0.001	0.002
10	27	33.4	0.011	0.013	0.001	0.001
11	30	37.6	0.012	0.015	0.001	0.002
12	27	34.8	0.011	0.014	0.001	0.002
13	24	30.5	0.010	0.012	0.001	0.001
14	24	31.2	0.010	0.013	0.001	0.001
15	27	34.3	0.011	0.014	0.001	0.001
16	21	31.4	0.008	0.013	0.001	0.001
17	24	34.7	0.010	0.014	0.001	0.001

4.7 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% ในไนโตรเจน โดยปริมาตรของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A โดยการทดสอบการดูดซับของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% ทำที่ภาวะ การ Pretreatment ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการดูดซับแก๊สผสมคอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส คอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ 20.83 กรัม ด้วยอัตราไหลแก๊สผสม 104 มิลลิลิตรต่อนาที และการทดสอบการดูดซับของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A ทำที่ภาวะ Pretreatment ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการดูดซับแก๊สผสมคอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส คอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส (ภาวะการทดลองการดูดซับของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A จากข้อบ่งใช้ของ Sigma aldrich [38] และงานวิจัยของ Saeed [39] และคณะ และ Masoud และคณะ [40] อุณหภูมิที่เหมาะสมการดูดซับของตัวดูดซับ Molecular sieve 5A คือ 30 องศาเซลเซียส) น้ำหนักตัวดูดซับ 20.83 กรัม ด้วยอัตราไหลแก๊สผสม 104 มิลลิลิตรต่อนาที (ตัวอย่างภาพโครมาโตแกรมแสดงดังภาคผนวก ก. และตัวอย่างการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข.)

จากภาพที่ 4.14 และตารางที่ 4.14 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวของตัวดูดซับ Molecular sieve 5A มีค่า 1.797 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ และ 2.198 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ขณะที่ Fsi-PEI800-40/PVA 5% มีความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวเป็น 0.998 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ และ 1.535 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวของตัวดูดซับ Molecular sieve 5A มีค่า 0.418 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ และ 0.452 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ขณะที่ Fsi-PEI800-40/PVA 5% มีความสามารถการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัวเป็น 0.014 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ และ 0.021 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ จะเห็นว่าตัวดูดซับ Molecular sieve 5A มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5%



ภาพที่ 4. 14 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ (ก) คาร์บอนไดออกไซด์ และ (ข)

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

ภาวะ: แก๊สผสมความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% ในไนโตรเจนโดยปริมาตรโดยการทดสอบการดูดซับของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% ทำที่ภาวะ Pretreatment ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการดูดซับแก๊สผสมคอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส คอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ 20.83 กรัม ด้วยอัตราไหลแก๊สผสม 104 มิลลิลิตรต่อนาที และการทดสอบการดูดซับของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A ทำที่ภาวะ Pretreatment ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราไหลแก๊สไนโตรเจน 75 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการดูดซับแก๊สผสมคอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส คอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.14 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% กับตัวดูดซับเชิงพาณิชย์

Adsorbent	BT time (min)	S time (min)	Cap(BT) (mmol/g)	Cap(S) (mmol/g)	Efficiency of amine	
					Eff(BT)	Eff(S)
CO ₂ adsorption						
5A	81	99.1	1.797	2.198	0.193	0.236
Fsi-PEI800-40/ PVA5%	45	69.2	0.998	1.535	0.107	0.165
H ₂ S adsorption						
5A	1041	1128.0	0.418	0.452	0.045	0.049
Fsi-PEI800-40/ PVA5%	36	51.8	0.014	0.021	0.002	0.002

อย่างไรก็ตามแม้ว่าประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับ Molecular sieve 5A ดีกว่าตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% แต่เมื่อเทียบราคาต่อประสิทธิภาพการดูดซับดังตารางที่ 4.15 พบว่าราคาต่อความสามารถในการดูดซับ 1 มิลลิโมล (บาท/มิลลิโมล) ของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% ถูกกว่าความสามารถในการดูดซับ 1 มิลลิโมล ของตัวดูดซับ Molecular sieve 5A

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบราคาต่อความสามารถในการดูดซับ 1 มิลลิโมล ของตัวดูดซับ Molecular sieve 5A และ Fsi-PEI800-40/PVA5%

5A	Fsi-PEI800-40/PVA5%
THB/mmol	THB/mmol
CO ₂ adsorption	
3.037	0.054
H ₂ S adsorption	
13.070	3.711

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์โดยการพัฒนาการขึ้นรูปตัวดูดซับคือตัวดูดซับดัดแปรด้วย Polyethyleneimine บนตัวรองรับพุ่มซิลิกา และตัวประสาน การทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระดับเล็ก และระดับขยาย ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ และความสามารถในการคงรูปเชิงกล ได้แก่ อุณหภูมิการดูดซับ กระบวนการทำให้แห้งหลังการฉีกขึ้นรูป ระยะเวลาการบ่ม ชนิดและปริมาณของตัวประสาน ศึกษาการคืนสภาพตัวดูดซับ และศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับ

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง คือ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ได้นานที่สุด ณ เวลา Breakthrough และที่อิ่มตัว ได้เป็น 93 และ 112.8 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 1.205 และ 1.612 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ คือ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้นานที่สุด ณ เวลา Breakthrough และที่อิ่มตัว ได้เป็น 54 และ 72.2 นาที มีความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 1.205 และ 1.612 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ

2. เปรียบเทียบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมในระบบ 1 คอลัมน์กับ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม

ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง (คอลัมน์ที่ 1 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส คอลัมน์ที่ 2 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส) มีความสามารถของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่าระบบการดูดซับแบบคอลัมน์เดี่ยว การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมได้ ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ได้เป็น 114 และ นาที 129.5 ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 2.554 และ 2.900 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ การดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมได้ ณ เวลาที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว ได้เป็น 111 และ 121.9 นาที ตามลำดับ มีความสามารถในการดูดซับ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 0.045 และ 0.049 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ

3. ความสามารถในการคงรูปเชิงกล

ก. ผลของกระบวนการทำให้แห้งหลังการฉีดขึ้นรูป

การทำให้แห้งหลังฉีดตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องส่งผลให้ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับสูงกว่าการทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

ข. ผลของระยะเวลาการบ่ม

ระยะเวลาการบ่มมากขึ้นทำให้ค่า Bulk crushing strength สูงขึ้น

ค. ผลของปริมาณและชนิดของตัวประสาน

เมื่อเพิ่มปริมาณตัวประสานค่า Bulk crushing strength สูงขึ้น และเม็ดตัวดูดซับที่ใช้ PVA เป็นตัวประสานจะมีค่า Bulk crushing strength สูงที่สุด

4. การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของเม็ดตัวดูดซับ

ก. ผลของระยะเวลาการบ่ม

ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ของตัวดูดซับที่ใช้เวลาการบ่ม 1 วันกับ 1 เดือน มีค่าไม่ต่างกันมาก ดังนั้นในการทดสอบการดูดซับจึงไม่ต้องคำนึงถึงตัวแปรนี้

ข. ผลของปริมาณตัวประสาน

ความสามารถในการดูดซับแก๊สลดลงเมื่อปริมาณตัวประสานมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถการดูดซับลดลงอย่างชัดเจนที่ปริมาณ PVA มากกว่า 5% ขึ้นไป

ค. ผลของชนิดตัวประสาน

เม็ดตัวดูดซับที่ใช้ Bentonite เป็นตัวประสาน สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีที่สุด

พิจารณาการทดสอบประสิทธิภาพความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์และ Bulk crushing strength ของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/PVA 5% (ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 1.075 และ 1.407 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมที่ Breakthrough และที่อิ่มตัว 0.017 และ 0.018 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ และ มีค่า Bulk crushing strength 0.892 MPa) มีความเหมาะสมในการนำไปทดสอบในระบบขยาย 20 เท่าต่อไป

5. การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบขยาย

- ก. ผล Pre-treatment ต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์
อัตราไหลของไนโตรเจนและเวลาในการ pre-treatment ที่เหมาะสมตัวดูดซับคือ อัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 75 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- ข. ผลของอัตราไหลแก๊สผสมต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์
อัตราไหลแก๊สผสมที่เหมาะสมต่อการดูดซับคือที่อัตราไหล 104 มิลลิลิตรต่อนาที
- ค. ศึกษาการคืนสภาพและเสถียรภาพตัวดูดซับ
อัตราไหลของไนโตรเจนและเวลาในการคืนสภาพที่เหมาะสมคืออัตราการไหลของ ไนโตรเจนที่ 75 มิลลิลิตรต่อนาที และจากการทดสอบการดูดคายของตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40/ PVA 5% สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมและสามารถคืนสภาพตัวดูดซับให้กลับมาใช้ใหม่ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาวิธีการขึ้นรูปเม็ดที่สามารถเพิ่มความคงตัวเชิงกลของเม็ดตัวดูดซับ
2. ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบที่มีความชื้น
3. ศึกษากระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบที่ใหญ่ขึ้น

รายการอ้างอิง

1. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, การเกิดแก๊สชีวภาพ.
2. กระทรวงพลังงาน, ก. การผลิตแก๊สชีวภาพ. [cited 2558 22 เมษายน]; Available from: <http://www2.dede.go.th>.
3. กระทรวงพลังงาน, ส., การใช้ประโยชน์แก๊สชีวภาพ.
4. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมแก๊ส.
5. Eurofilm, *H2S Removal*.
6. Alonso-Vicario, A., et al., *Purification and upgrading of biogas by pressure swing adsorption on synthetic and natural zeolites*. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2010. **134**(1): p. 100-107.
7. อวิรุทธ์ ภู่มื่นไวย, ณ.ท., การศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่ปรับปรุง, in *ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ 2553*, มหาวิทยาลัยขอนแก่น: ขอนแก่น.
8. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. การดูดซับ *adsorption*. [cited 2558 22 เมษายน]; Available from: <http://www2.diw.go.th>.
9. ทองเสียน, ไ. ความสามารถในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของดินต่อระบบการปลูกมันสำปะหลังอินทรีย์.
10. Weblog, P.s. กระบวนการดูดซับ. 2551 [cited 2558 22 เมษายน]; Available from: <http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process>.
11. (วท.), ส. ตัวดูดซับ. [cited 2558 22 เมษายน]; Available from: <http://www.tistr.or.th>.
12. กรมควบคุมมลพิษ. ระบบดูดซับ. [cited 2558 22 เมษายน]; Available from: <http://www.pcd.go.th>.
13. กัญญา บุญเกียรติ, ช.ง., *เทคโนโลยีแก๊สธรรมชาติ*. 1 ed. 2551, กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
14. ฉัตรศิริเวช, ., *กระบวนการดูดซับ*. 1 ed. 2552, กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

15. Yong, Z., V. Mata, and A.R.E. Rodrigues, *Adsorption of carbon dioxide at high temperature—a review*. Separation and Purification Technology, 2002. **26**(2): p. 195-205.
16. ห้องสมุดมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ทฤษฎีการดูดซับ.
17. Littel, R., W. Van Swaij, and G. Versteeg, *Kinetics of carbon dioxide with tertiary amines in aqueous solution*. AIChE journal, 1990. **36**(11): p. 1633-1640.
18. Ostwal, M., et al., *3-Aminopropyltriethoxysilane functionalized inorganic membranes for high temperature CO₂/N₂ separation*. Journal of Membrane Science, 2011. **369**(1): p. 139-147.
19. Sutar, P.N., et al., *Secondary amines for CO₂ capture: a kinetic investigation using N-ethylmonoethanolamine*. Chemical Engineering Journal, 2012. **207**: p. 718-724.
20. กรมควบคุมมลพิษ. ศูนย์วัตถุข้อมูลอันตรายและเคมีภัณฑ์. [cited 2558 22 เมษายน]; Available from: <http://msds.pcd.go.th/>.
21. Co, C.P.M. *The Pelletizing Process—CPM*. [cited 2015 26 May]; Available from: <http://www.cpm.net>.
22. Vats, T., N. Shah, and S. Shah, *Pelletization Techniques: A Review*.
23. worldwide, G. *Extrusion-Spheronization*. [cited 2015 11 June]; Available from: www.glatt.com.
24. Qiu, G., et al., *Functions and molecular structure of organic binders for iron ore pelletization*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2003. **224**(1): p. 11-22.
25. Reed, J.S., *Principles of Ceramics Processing*. 2 ed. 1995, New York Wiley.
26. Shibani, D., *Study of decomposition behavior of binders and the effect of binder type on strength and density of alumina samples*, in *Department of Ceramic Engineering*. 2011, National Institute of Technology Rourkela.
27. Software, I.C.C. *Characteristics of Binders*. [cited 2015 10 June]; Available from: www.digitalfire.com.
28. Ma, X., X. Wang, and C. Song, *“Molecular basket” sorbents for separation of CO₂ and H₂S from various gas streams*. Journal of the American Chemical Society, 2009. **131**(16): p. 5777-5783.

29. Sharma, P., et al., *Adsorptive separation of carbon dioxide by polyethyleneimine modified adsorbents*. Korean Journal of Chemical Engineering, 2012. **29**(2): p. 249-262.
30. Fan, H.-L., et al., *A comparative study of the effect of clay binders on iron oxide sorbent in the high-temperature removal of hydrogen sulfide*. Process Safety and Environmental Protection, 2013. **91**(3): p. 235-243.
31. Yu, C.-T. and W.-C. Chen, *Preparation, characterization of Ca/Al carbonate pellets with TiO₂ binder and CO₂ sorption at elevated-temperature conditions*. Powder Technology, 2013. **239**: p. 492-498.
32. Klinthong, W., C.-H. Huang, and C.-S. Tan, *Polyallylamine and NaOH as a novel binder to pelletize amine-functionalized mesoporous silicas for CO₂ capture*. Microporous and Mesoporous Materials, 2014. **197**: p. 278-287.
33. Qin, C., et al., *Effect of support material on the performance of K₂CO₃-based pellets for cyclic CO₂ capture*. Applied Energy, 2014. **136**: p. 280-288.
34. Wang, X., et al., *Mesoporous-molecular-sieve-supported polymer sorbents for removing H₂S from hydrogen gas streams*. Topics in Catalysis, 2008. **49**(1-2): p. 108-117.
35. Chen, Q., et al., *Poly (ethyleneimine)-loaded silica monolith with a hierarchical pore structure for H₂S adsorptive removal*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010. **49**(22): p. 11408-11414.
36. Belmabkhout, Y., G. De Weireld, and A. Sayari, *Amine-bearing mesoporous silica for CO₂ and H₂S removal from natural gas and biogas*. Langmuir, 2009. **25**(23): p. 13275-13278.
37. Akinwumi, I. and Z. Gbadamosi, *Effects of curing condition and curing period on the compressive strength development of plain concrete*. International Journal of Civil and Environmental Research, 2014. **1**(2): p. 83-99.
38. Aldrich, S. *Molecular sieve 5A*. 2015 [cited 2015 13 March]; Available from: <http://www.sigmaaldrich.com>.
39. Pakseresht, S., M. Kazemeini, and M.M. Akbarnejad, *Equilibrium isotherms for CO, CO₂, CH₄ and C₂H₄ on the 5A molecular sieve by a simple*

- volumetric apparatus*. Separation and purification technology, 2002. **28**(1): p. 53-60.
40. Mofarahi, M. and F. Gholipour, *Gas adsorption separation of CO₂/CH₄ system using zeolite 5A*. Microporous and Mesoporous Materials, 2014. **200**: p. 1-10.





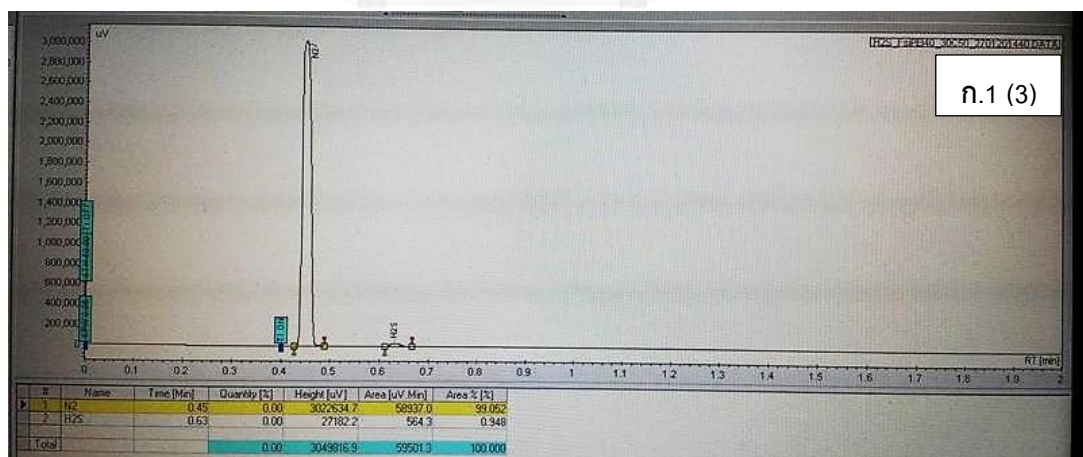
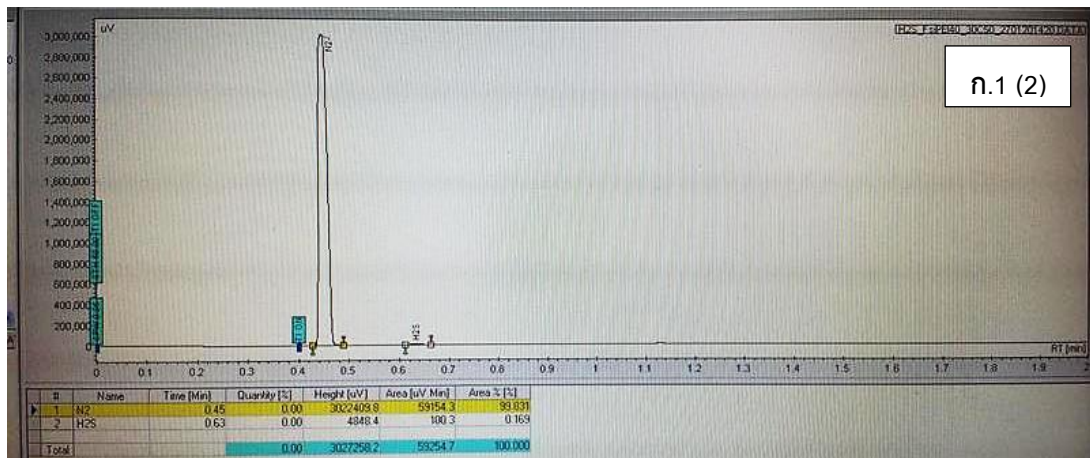
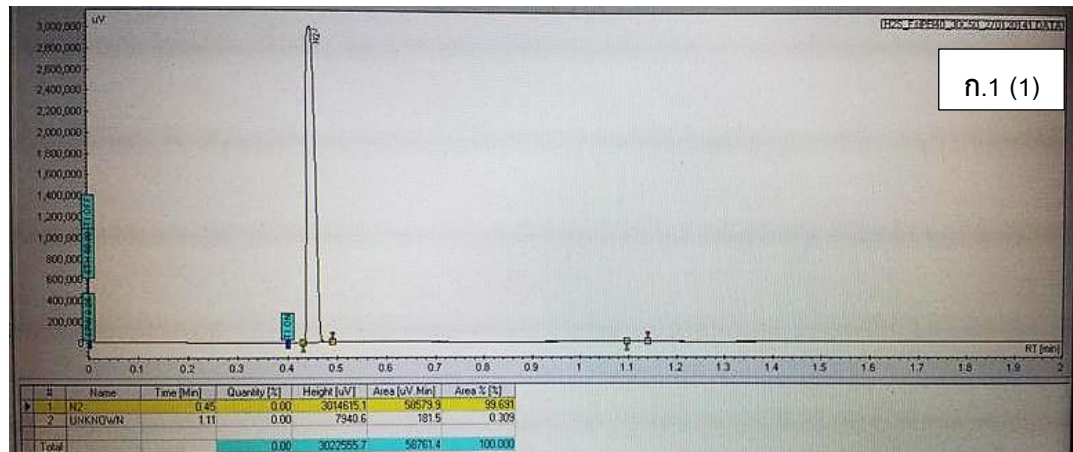
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

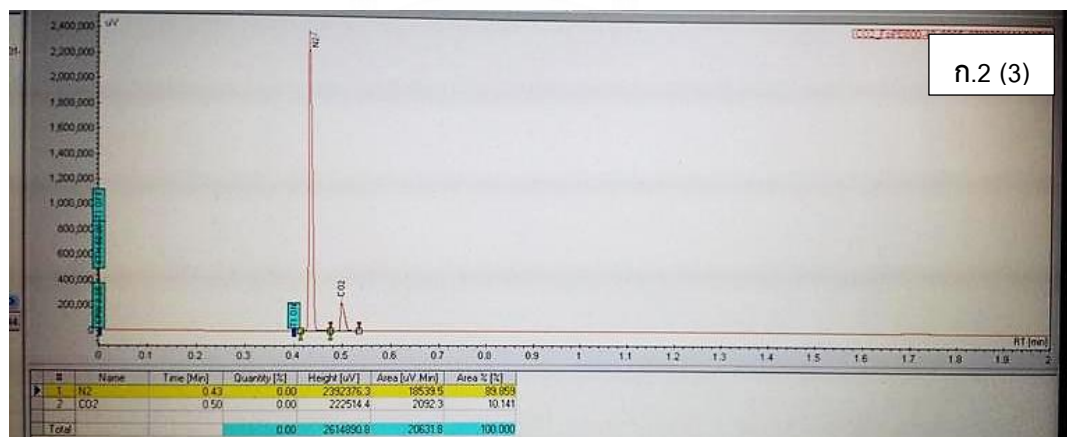
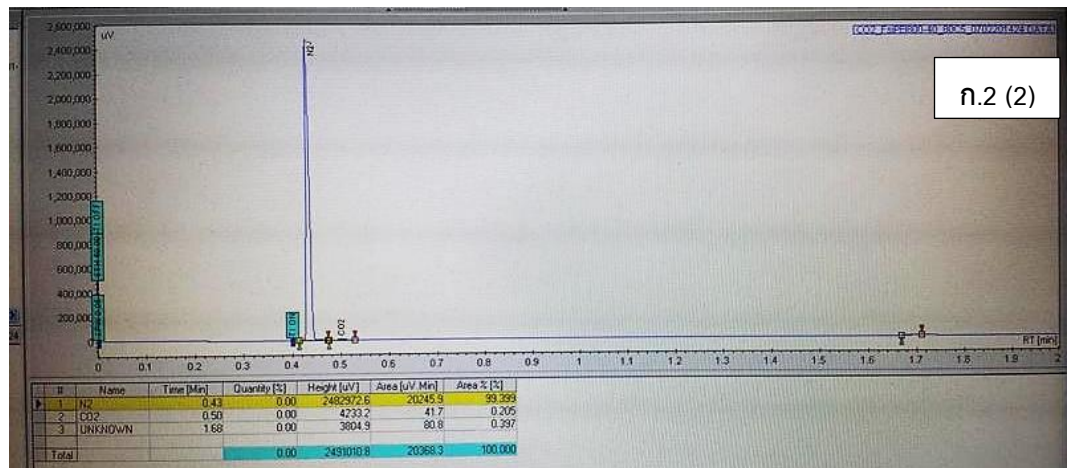
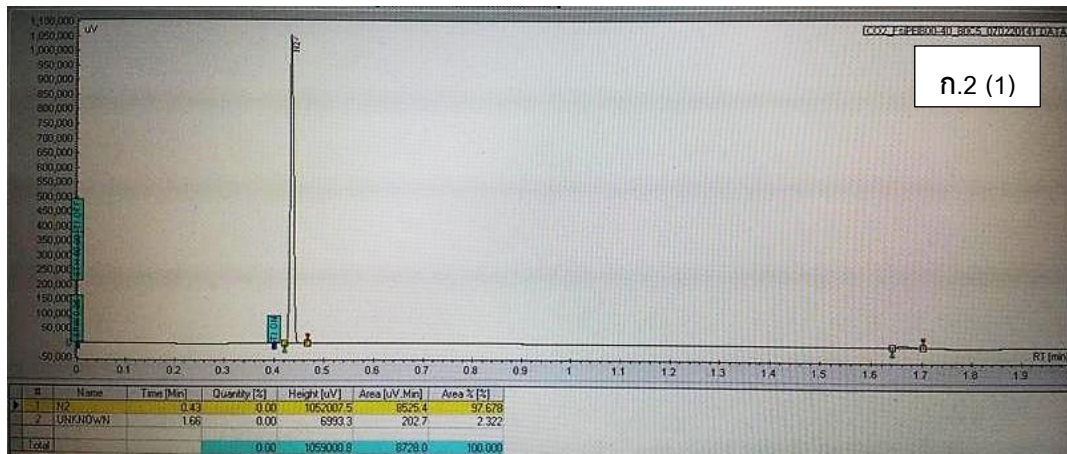
ภาคผนวก ก

การวัดความเข้มข้นแก๊สขาออกหลังจากการดูดซับด้วยเครื่อง Micro GC

การวัดความเข้มข้นแก๊สขาออกจากกระบวนการดูดซับ โดยการต่อท่อแก๊สออนไลน์เข้ากับเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ เก็บตัวอย่างทุก 3 นาที จนกว่าจะได้ความเข้มข้นแก๊สขาออกจากกระบวนการดูดซับเท่ากับความเข้มข้นแก๊สขาเข้า การวัดความเข้มข้นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ความเข้มข้น 1% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปมีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 100 องศาเซลเซียส และการวัดความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้น 10% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 80 องศาเซลเซียส และการวัดความเข้มข้นแก๊สผสม ตำแหน่งที่แก๊สถูกฉีดเข้าไปมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเตาอบ 80 องศาเซลเซียส โดยมีแก๊สฮีเลียมเป็นตัวพา ได้ข้อมูลการวัดความเข้มข้นแก๊สขาออกจากการดูดซับ แสดงดังภาพ ก.1 ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ นำข้อมูลดังกล่าวเขียนกราฟแสดงการดูดซับแก๊สดังภาพที่ ข.1 ข.2 และ ข.3 ตามลำดับ ในภาคผนวก ข.

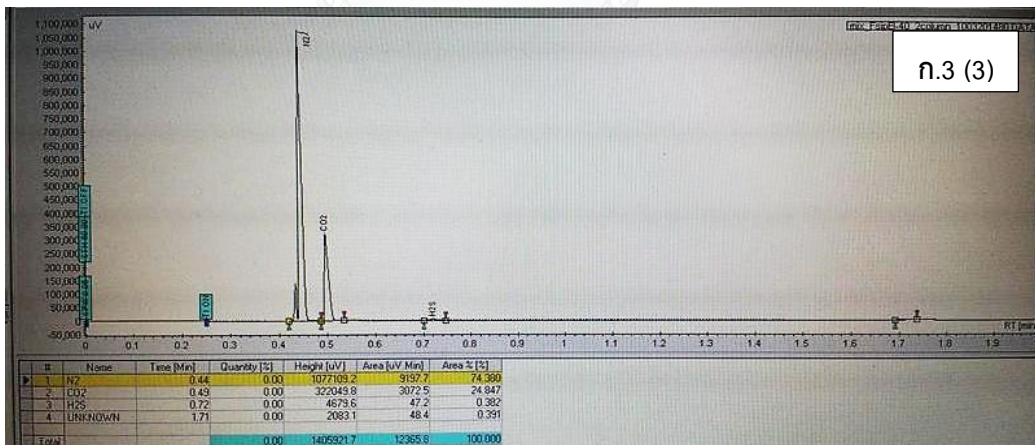
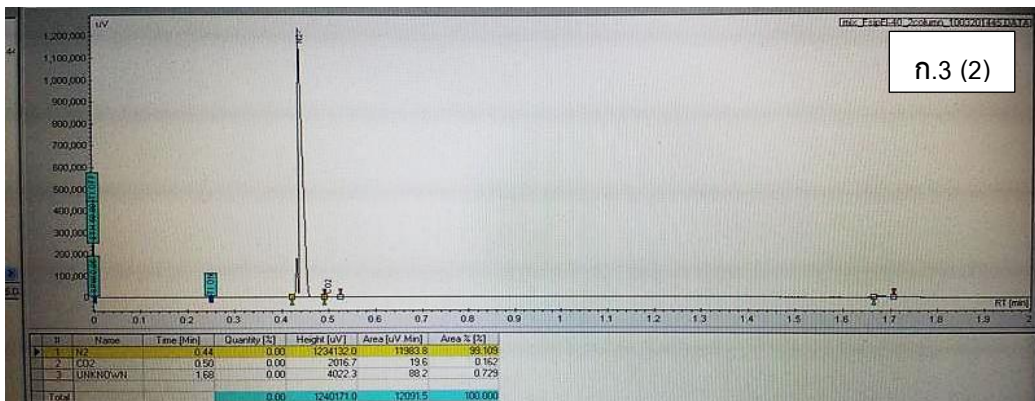
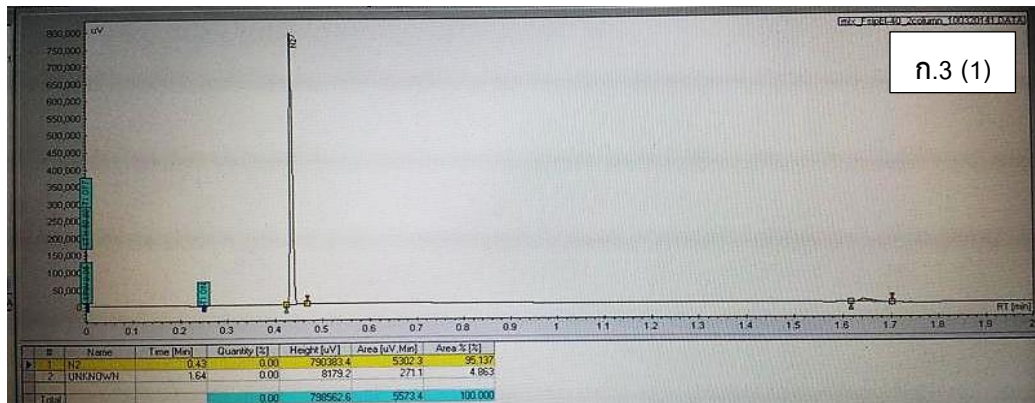


ภาพที่ ก.1 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์เข้มข้น 1% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ
 ภาวะการดูดซับในคอลัมน์เดี่ยวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 50 มิลลิตรต่อนาที
 ก.1(1) นาทีที่ 3, ก.1(2) นาทีที่ 60, ก.1(3) นาทีที่ 120



ภาพที่ ก.2 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 10% โดยปริมาตรในแก๊สไนโตรเจน ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ

ภาวะการดูดซับในคอลัมน์เดี่ยวที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 5 มิลลิตรต่อนาที ก.2(1) นาทีที่ 3, ก.2(2) นาทีที่ 72, ก.2(3) นาทีที่ 132



ภาพที่ ก.3 โครมาโทแกรมแยกองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสม ณ เวลาเก็บข้อมูลต่างๆ

ภาวะการดูดซับใน 2 คอลัมน์ คอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส คอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 5 มิลลิตรต่อนาที ก.2(1) นาทีที่ 3, ก.2(2) นาทีที่ 135, ก.2(3) นาทีที่

ภาคผนวก ข

การคำนวณและข้อมูลการทดลองความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

1. การคำนวณปริมาณการเติมแอมีนบนตัวรองรับ

$$\text{ร้อยละการเติมแอมีนโดยมวล} = \frac{W_a}{W_a + W_s} \times 100$$

W_a = น้ำหนักของแอมีนที่เติมลงไป (กรัม)

W_s = น้ำหนักของตัวรองรับ (กรัม)

2. การคำนวณโมลของไนโตรเจนในแอมีน

$$\text{mmol}_N = (\text{ร้อยละการเติมแอมีนโดยมวล} \times N \times 10) / MW_{\text{amine}}$$

mmol_N = จำนวนโมลของไนโตรเจนในโมเลกุลแอมีน (มิลลิโมล)

N = จำนวนไนโตรเจนในโมเลกุลแอมีน

MW_{amine} = มวลโมเลกุลของแอมีน

3. การคำนวณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

- 1) การคำนวณอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$FR_{\text{CO}_2 \text{ หรือ } \text{H}_2\text{S}} = (FR \times C) / 100$$

- 2) การคำนวณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ

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

- 3) การคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์

ที่ Breakthrough capacity; $\text{Cap}(\text{BT}) = (FR_{\text{CO}_2 \text{ หรือ } \text{H}_2\text{S}} \times \text{BT}) / (V_{\text{mol}} \times W_{\text{sorb}})$

ที่ Saturation capacity; $\text{Cap}(\text{S}) = (FR_{\text{CO}_2 \text{ หรือ } \text{H}_2\text{S}} \times \int_0^t (C_0 - C_t) dt) / (V_{\text{mol}} \times W_{\text{sorb}})$

- 4) การคำนวณประสิทธิภาพของแอมีน

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

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

C = ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซับ (%V)

C_0 = ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซับ (ppm)

C_t = ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับ (ppm)

A_{STD}	= พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ Saturation
A	= พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังการดูดซับ
$Cap(BT)$	= ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่ Breakthrough (มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ)
$Cap(SAT)$	= ความสามารถในการดูดซับแก๊สที่อิ่มตัว (มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ)
BT	= เวลาที่ Breakthrough (นาที)
FR	= อัตราการไหลแก๊ส (มิลลิลิตรต่อนาที)
FR_{CO_2} หรือ H_2S	= อัตราการไหลคาร์บอนไดออกไซด์ หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ (มิลลิลิตรต่อนาที)
V_{mol}	= ปริมาตรโมลาร์ของแก๊สอุดมคติที่ภาวะมาตรฐาน
W_{sorb}	= น้ำหนักตัวดูดซับ (กรัม)
$mmol_N$	= จำนวนโมลของหมู่อะมิโนในโมเลกุลแอมีน (มิลลิโมล)

ตัวอย่างที่ ข 1 การทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมด้วยตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 /PVA 5%

ภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตรต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่ออนุกรม คอลัมน์แรกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

1.การคำนวณปริมาณการเติมแอมีนบนตัวรองรับ

$$\text{ร้อยละการเติมแอมีนโดยมวล} = \frac{W_a}{W_a + W_s} \times 100$$

$$0.4 = \frac{W_a}{W_a + 12}$$

$$W_a = 8 \text{ กรัม}$$

2. การคำนวณโมลไนโตรเจนในแอมีน

$$N = 18.6, MW_{\text{amine}} = 800$$

$$\begin{aligned} \text{mmol}_N &= (40 \times 18.6 \times 10) / 800 \\ &= 9.3 \end{aligned}$$

3. การคำนวณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Breakthrough time	= 48 นาที
Saturation time	= 62.813 นาที
อัตราการไหล (FR)	= 5 มิลลิลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการดูดซับ (C_0)	= 200700 ppm
น้ำหนักตัวดูดซับ	= 2 กรัม

การคำนวณอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์

$$FR_{\text{CO}_2} = (5 \times 20.07) / 100 = 1.004 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$$

การคำนวณความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับ

ยกตัวอย่าง จากการวัดการดูดซับนาที่ที่ 54

$$\text{พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับ (A)} = 186.2$$

$$\text{พื้นที่คาร์บอนไดออกไซด์ที่ Saturation (A}_{\text{STD}}) = 3071.2$$

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับ : } C_t &= (200700 \times 186.2) / 3071.2 \\ &= 12167.993 \text{ ppm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สัดส่วนความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ : } C_t / C_0 &= 12167.993 / 200700 \\ &= 0.061 \end{aligned}$$

การคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

$$\text{ที่ Breakthrough capacity; Cap(BT)} = (1.004 \times 48) / (22.4 \times 2) = 1.075 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม}$$

$$\text{ที่ Saturation capacity; Cap(S)} = (1.004 \times 62.813) / (22.4 \times 2) = 1.407 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม}$$

การคำนวณประสิทธิภาพของแอมีน

$$\text{ที่ Breakthrough capacity; Efficiency of amine} = 1.075 / 9.3 = 0.116$$

$$\text{ที่ Saturation capacity; Efficiency of amine} = 1.407 / 9.3 = 0.151$$

4. การคำนวณการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

Breakthrough time	= 42 นาที
Saturation time	= 44.884 นาที
อัตราการไหล (FR)	= 5 มิลลิลิตรต่อนาที
ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ก่อนการดูดซับ (C_0)	= 3629 ppm
น้ำหนักตัวดูดซับ	= 2 กรัม

การคำนวณอัตราการไหลของไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$FR_{H_2S} = (5 \times 0.35) / 100 = 0.0181 \text{ มิลลิลิตรต่อนาที}$$

การคำนวณความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ หลังการดูดซับ

ยกตัวอย่าง จากการวัดการดูดซับนาฬิกาที่ 48

$$\text{พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ หลังการดูดซับ (A)} = 40.5$$

$$\text{พื้นที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ Saturation (A}_{STD}) = 46.4$$

$$\begin{aligned} \text{ความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ หลังการดูดซับ : } C_t &= (3629 \times 40.5) / 46.4 \\ &= 3167.554 \text{ ppm} \end{aligned}$$

$$\text{สัดส่วนความเข้มข้นไฮโดรเจนซัลไฟด์ : } C_t / C_0 = 3167.554 / 3629 = 0.873$$

การคำนวณความสามารถในการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์

$$\begin{aligned} \text{ที่ Breakthrough capacity; Cap(BT)} &= (0.0181 \times 42) / (22.4 \times 2) \\ &= 0.017 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ที่ Saturation capacity; Cap(S)} &= (0.0181 \times 44.884) / (22.4 \times 2) \\ &= 0.018 \text{ มิลลิโมลต่อกรัม} \end{aligned}$$

การคำนวณประสิทธิภาพของแอมีน

$$\text{ที่ Breakthrough capacity; Efficiency of amine} = 0.017 / 9.3 = 0.002$$

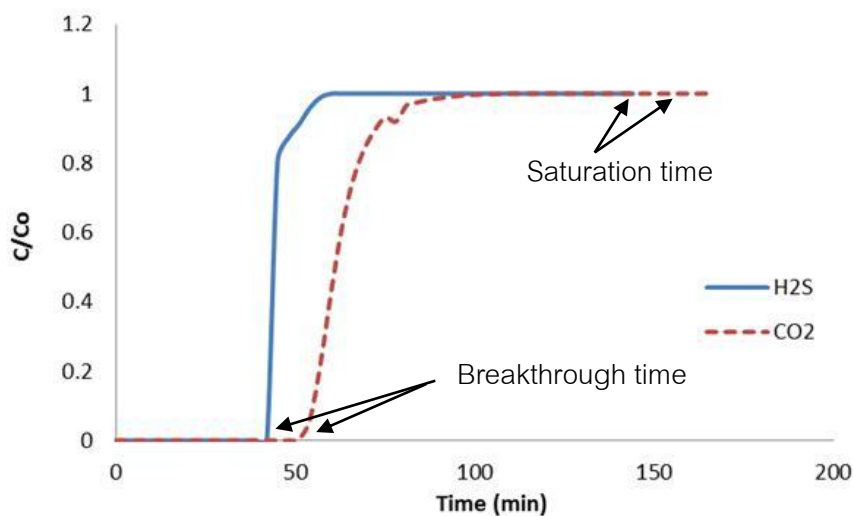
$$\text{ที่ Saturation capacity; Efficiency of amine} = 0.018 / 9.3 = 0.002$$

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาออกจากแก๊สโครมาโทแกรม

Run No.	Time (min)	Area(uV/min)	Conc.CO ₂ (ppmv)	C/C ₀
0	0	0	0	0
1	3	0	0	0
2	6	0	0	0
3	9	0	0	0
4	12	0	0	0
5	15	0	0	0
6	18	0	0	0
7	21	0	0	0
8	24	0	0	0
9	27	0	0	0
10	30	0	0	0
11	33	0	0	0
12	36	0	0	0
13	39	0	0	0
14	42	0	0	0
15	45	37.4	2925.099	0.806
16	48	40.5	3167.554	0.873
17	51	42.3	3308.334	0.912
18	54	44.5	3480.399	0.959
19	57	45.9	3589.894	0.989
20	60	47.1	3683.748	1.000
21	63	47.4	3707.211	1.000
22	66	47.4	3707.211	1.000
23	69	47.9	3746.317	1.000
24	72	48	3754.138	1.000
25	75	48.3	3777.601	1.000
26	78	48.1	3761.959	1.000
27	81	47.7	3730.675	1.000
28	84	47.6	3722.853	1.000
29	87	47.7	3730.675	1.000
30	90	47.4	3707.211	1.000
31	93	47.5	3715.032	1.000
32	96	47.5	3715.032	1.000
33	99	47.2	3691.569	1.000
34	102	47.3	3699.390	1.000
35	105	47.2	3691.569	1.000
36	108	47.1	3683.748	1.000
37	111	47.7	3730.675	1.000
38	114	47.4	3707.211	1.000
39	117	47	3675.927	1.000
40	120	47.4	3707.211	1.000
41	123	48	3754.138	1.000
42	126	47.7	3730.675	1.000
43	129	47.9	3746.317	1.000
44	132	47.5	3715.032	1.000
45	135	47.5	3715.032	1.000
46	138	47.3	3699.390	1.000
47	141	47.3	3699.390	1.000
48	144	48.7	3808.886	1.000

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สผสมขาออกจากแก๊สโครมาโทแกรม

Run No.	Time (min)	Area(uV/min)	Conc.CO ₂ (ppmv)	C/C ₀
0	0	0	0	0
1	3	0	0	0
2	6	0	0	0
3	9	0	0	0
4	12	0	0	0
5	15	0	0	0
6	18	0	0	0
7	21	0	0	0
8	24	0	0	0
9	27	0	0	0
10	30	0	0	0
11	33	0	0	0
12	36	0	0	0
13	39	0	0	0
14	42	0	0	0
15	45	0	0	0
16	48	0	0	0
17	51	16.2	1058.655	0.005
18	54	186.2	12167.993	0.061
19	57	692.1	45228.077	0.225
20	60	1334.2	87188.701	0.434
21	63	1901	124228.543	0.619
22	66	2302.4	150459.651	0.750
23	69	2570.1	167953.591	0.837
24	72	2743.7	179298.186	0.893
25	75	2859	186832.932	0.931
26	78	2825.4	184637.204	0.920
27	81	2969.3	194040.932	0.967
28	84	2993.8	195641.984	0.975
29	87	3016.2	197105.802	0.982
30	90	3029.6	197981.480	0.986
31	93	3043.5	198889.831	0.991
32	96	3052.4	199471.438	0.994
33	99	3059.7	199948.486	0.996
34	102	3064	200229.487	0.998
35	105	3066	200360.185	0.998
36	108	3072.2	200765.349	1.000
37	111	3070.2	200634.651	1.000
38	114	3080.5	201307.746	1.000
39	117	3087.7	201778.259	1.000
40	120	3089.7	201908.957	1.000
41	123	3089.1	201869.748	1.000
42	126	3095	202255.307	1.000
43	129	3097.8	202438.285	1.000
44	132	3105.5	202941.472	1.000
45	135	3108.3	203124.450	1.000
46	138	3109.3	203189.799	1.000
47	141	3115.7	203608.033	1.000
48	144	3121.5	203987.057	1.000
49	147	3116.6	203666.847	1.000
50	150	3111.3	203320.497	1.000
51	153	3114.8	203549.219	1.000
52	156	3101.3	202667.006	1.000
53	159	3112.1	203372.776	1.000
54	162	3115.5	203594.963	1.000
55	165	3117.7	203738.731	1.000



ภาพที่ ข. 1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์

ภาวะการทดลอง : ความเข้มข้นแก๊สมีเทน 75%, คาร์บอนไดออกไซด์ 20%, ไฮโดรเจนซัลไฟด์ 0.35% โดยปริมาตร ในแก๊สไนโตรเจน อัตราไหลแก๊สผสม 5 มิลลิลิตร ต่อนาที ระบบการดูดซับแบบ 2 คอลัมน์ต่อเนื่อง คอลัมน์แรกที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และคอลัมน์ที่ 2 ที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ 1 กรัมต่อ 1 คอลัมน์

ภาคผนวก ค

การคำนวณความสามารถเชิงกล (Bulk crushing strength)

1. การคำนวณการเติมตัวประสาน

$$\text{ร้อยละการเติมตัวประสานโดยมวล} = \frac{W_b}{W_b + W_{ad}} \times 100$$

$$W_b = \text{น้ำหนักของตัวประสาน (กรัม)}$$

$$W_{ad} = \text{น้ำหนักของผงตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 (กรัม)}$$

2. การคำนวณค่าความสามารถเชิงกล

$$W_i = \text{น้ำหนักเริ่มต้นของเม็ดตัวดูดซับในการทดสอบ Bulk crushing strength (กรัม)}$$

$$W_{0.5} = \text{น้ำหนัก 0.5\% ของน้ำหนักเริ่มต้น (กรัม)}$$

$$= \frac{W_i}{200}$$

$$F_d = \text{แรงที่ใช้กดทับเม็ดตัวดูดซับ (daN)}$$

$$F_M = \text{ค่าความสามารถเชิงกล, Bulk crushing strength (MPa)}$$

$$= \frac{F_d \times 10}{600}$$

ตัวอย่าง ค การคำนวณความสามารถเชิงกลของเม็ดตัวดูดซับ Fsi-PEI800-40 / PVA 5%

(เวลา 1 เดือน)

1. การคำนวณการเติมตัวประสาน

$$\text{ร้อยละการเติมตัวประสานโดยมวล} = \frac{W_b}{W_b + W_{ad}} \times 100$$

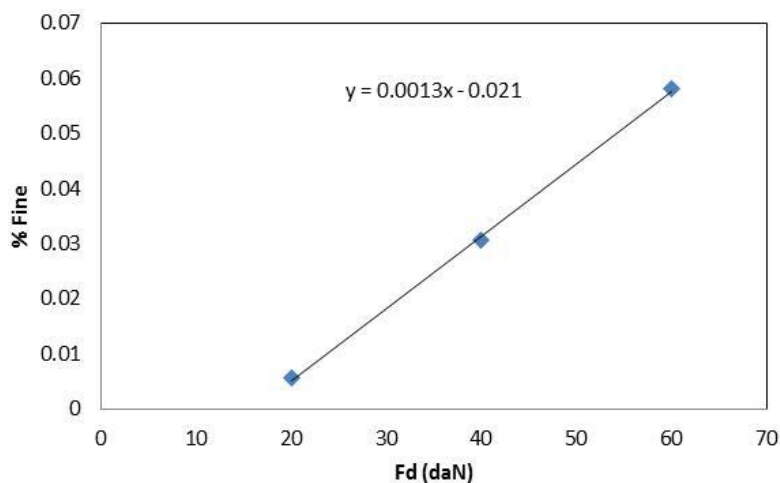
$$0.05 = \frac{W_b}{10}$$

$$W_b = 0.5 \text{ กรัม}$$

2. การคำนวณค่าความสามารถเชิงกล

ตารางที่ ค.1 น้ำหนักของผงจากเม็ดตัวดูดซับ (Fine) ที่ได้จากการทดลอง bulk crushing strength ที่แรงกดขนาดต่างๆ

F_d (daN)	Fine
20	0.0056
40	0.0307
60	0.0581



ภาพที่ ค.1 น้ำหนักของผงจากเม็ดตัวดูดซับ (Fine) ที่ได้จากการทดลอง Bulk crushing strength ที่แรงกดทับขนาดต่างๆ

$$W_i = 9.713 \text{ กรัม}$$

$$W_{0.5} = 9.713 / 200 = 0.0486 \text{ กรัม}$$

จากสมการที่ได้จากกราฟ $y = 0.0013x - 0.021$

โดย $y =$ ค่าของ % Fine และ

$x =$ ขนาดของแรงที่ใช้กดทับ (F_d)

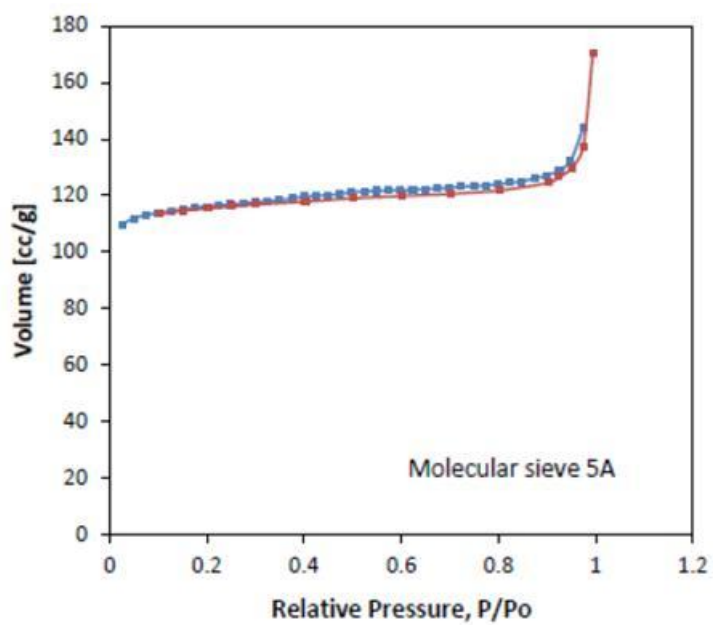
ดังนั้นขนาดของแรงที่ทำให้ได้ % Fine ปริมาณ 0.5% ของน้ำหนักเริ่มต้น (W_i) คือ

$$0.0486 = 0.013x - 0.021$$

$$x = 53.51 \text{ daN}$$

$$F_M = 53.51 \times 10 / 600 = 0.892 \text{ MPa}$$


ภาคผนวก ง
การวิเคราะห์ไอโซเทอร์มของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์



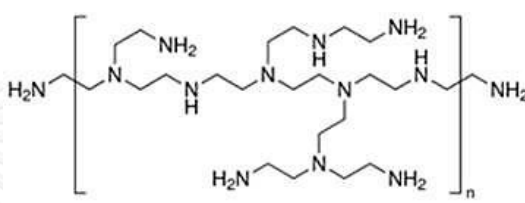
ภาพที่ ง.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับและการคายของไนโตรเจนและการกระจายตัวขนาดรูพรุนของตัวดูดซับเชิงพาณิชย์ Molecular sieve 5A

ภาคผนวก จ
สมบัติของสารต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

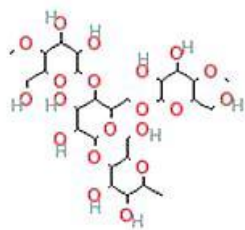
ตารางที่ จ.1 สมบัติของฟุ้งซิลิกา

สมบัติ	
Common name	Fumed silica
IUPAC name	Silicon dioxide
สูตรเคมี	SiO ₂
สูตรโครงสร้างโมเลกุล	
มวลโมเลกุล	60.08
ลักษณะทางกายภาพ	ผงละเอียด สีขาว
ความหนาแน่น (g/cm ³)	2.2
จุดหลอมเหลว (°C)	1600
การละลาย	ไม่ละลายในน้ำ สามารถละลายได้ในเมทานอล

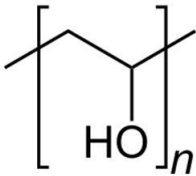
ตารางที่ จ.2 สมบัติของ Polyethyleneimine ชนิดกิ่ง มวลโมเลกุล 800

สมบัติ	
Common name	Polyethyleneimine (Branch) MW 800 (PEI800)
IUPAC name	Poly (iminoethylene)
สูตรเคมี	$(C_2H_5N)_n$
สูตรโครงสร้างโมเลกุล	
มวลโมเลกุล	800
ลักษณะทางกายภาพ	ของเหลว ไม่มีสี
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.05
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	100
การละลาย	สามารถละลายได้ในน้ำและเมทานอล

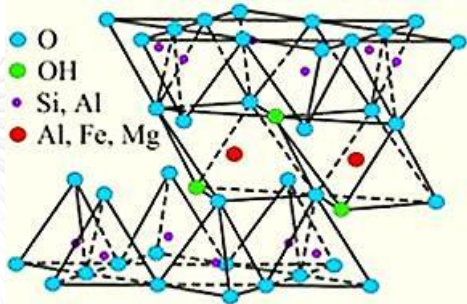
ตารางที่ จ.3 สมบัติของแป้งมันสำปะหลัง

สมบัติ	
Common name	Tapioca starch / Cassava starch
IUPAC name	5-[3,4-dihydroxy-6-(hydroxymethyl)-5-methoxyoxan-2-yl]oxy-6-[[3,4-dihydroxy-6-(hydroxymethyl)-5-methoxyoxan-2-yl]oxymethyl]-2-[4,5-dihydroxy-2-(hydroxymethyl)-6-methyloxan-3-yl]oxyoxane-3,4-diol
สูตรเคมี	$C_{27}H_{48}O_{20}$
สูตรโครงสร้างโมเลกุล	 <p>The image shows the chemical structure of the repeating unit of tapioca starch. It consists of a central glucose ring (C2-C6) linked via oxygen atoms to three other glucose rings. One ring is attached at the C3 position, another at the C4 position, and a third at the C6 position. Each of these three rings has a hydroxyl group (-OH) at the C2 position and a methoxy group (-OCH3) at the C5 position. The central ring has hydroxyl groups at the C2 and C6 positions. The entire structure is shown in a ball-and-stick model with carbon atoms in grey, oxygen in red, and hydrogen in white.</p>
มวลโมเลกุล	692
ลักษณะทางกายภาพ	ผงสีขาว
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.4
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	310
การละลาย	สามารถละลายได้ในน้ำร้อน

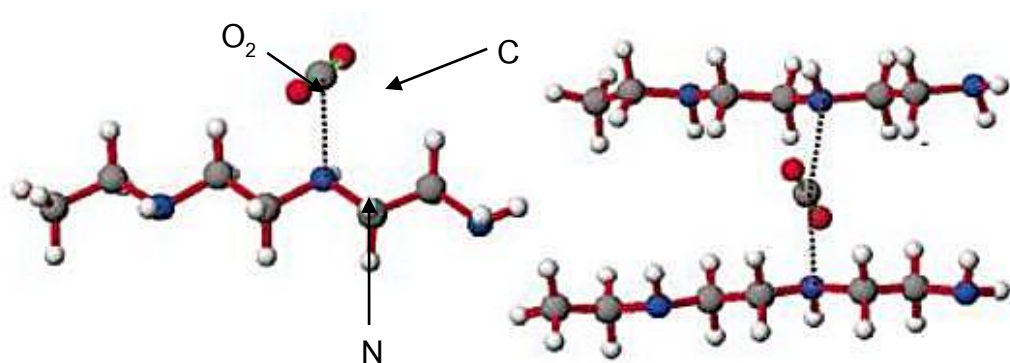
ตารางที่ จ.4 สมบัติของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

สมบัติ	
Common name	Polyvinyl alcohol
IUPAC name	Poly (vinyl alcohol)
สูตรเคมี	$(\text{CH}_2\text{CHOH})_n$
สูตรโครงสร้างโมเลกุล	
มวลโมเลกุล	35000
ลักษณะทางกายภาพ	ของแข็ง สีขาวใส
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.19-1.31
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	200
การละลาย	สามารถละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน

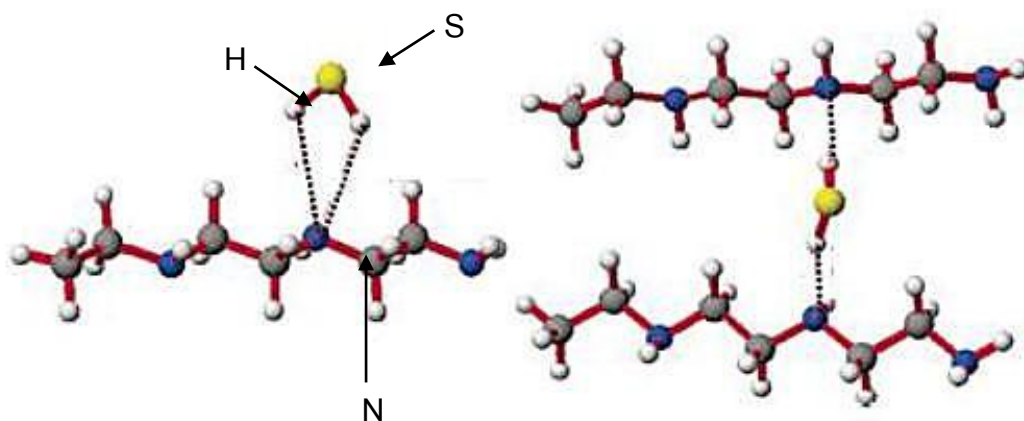
ตารางที่ จ.5 สมบัติของดินเบนโทไนต์ชนิดโซเดียม

สมบัติ	
Common name	Bentonite clay (Sodium type)
IUPAC name	Dioxosilane;oxo(oxoalumanyloxy)alumane ;hydrate
สูตรเคมี	$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$
สูตรโครงสร้างโมเลกุล	
มวลโมเลกุล	360.31
ลักษณะทางกายภาพ	ผงละเอียด สีน้ำตาลอ่อน
ความหนาแน่น (g/cm^3)	2.6
จุดหลอมเหลว ($^{\circ}C$)	1200
การละลาย	ละลายได้ทั้งในน้ำเย็นและน้ำร้อน ไม่ละลายในเมทานอล

ภาคผนวก ฉ
 อันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับคาร์บอนไดออกไซด์และอันตรกิริยาระหว่างตัวดูดซับกับ
 ไฮโดรเจนซัลไฟด์



ภาพที่ ฉ.1 ลักษณะอันตรกิริยาของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับดัดแปรด้วยพอลิเอมีน [28]



ภาพที่ ฉ.2 ลักษณะอันตรกิริยาของการดูดซับไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วยตัวดูดซับดัดแปรด้วยพอลิเอมีน [28]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว พรทิพย์ เมธาคุปต์ เกิดวันที่ 11 กันยายน 2534 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555 เข้าร่วมงานประชุมวิชาการ The 6th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology and The 21th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers เมื่อวันที่ 21 เมษายน 2558

