

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ  $K_2CO_3 / Al_2O_3$  เตรียมในภาวะเบส



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CARBON DIOXIDE CAPTURE ON  $K_2CO_3 / Al_2O_3$  SORBENT PREPARED IN BASE CONDITION



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ $K_2CO_3 / Al_2O_3$ เตรียมในภาวะเบส
โดย	น.ส.จารุวรรณ เจริญชัยเพชร
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชุลธारा)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

จากรุวรรณ เจริญชัยเพชร : การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ  $K_2CO_3 / Al_2O_3$  เตรียมในภาวะเบส . ( CARBON DIOXIDE CAPTURE ON  $K_2CO_3 / Al_2O_3$  SORBENT PREPARED IN BASE CONDITION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เบญจพล เถลิ้มสิน สุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสาเหตุสำคัญที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ในปัจจุบัน กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งได้รับความสนใจจากนักวิจัย หนึ่งในวิธีการพัฒนากระบวนการดังกล่าว คือ การปรับปรุงตัวดูดซับของแข็งให้มีความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สเสียด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนแกมมา-อลูมินา มีตัวแปรในการปรับปรุงการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน ได้แก่ ชนิดเบสที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ค่าความเป็นเบสของสารละลายที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับในช่วง 8 ถึง 12 และ ระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับในช่วง 12 ถึง 24 ชั่วโมง ผลที่ได้ พบว่า การเตรียมตัวดูดซับในภาวะเบสทำให้พื้นที่ผิว ปริมาณโลหะกัมมันต์ การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนต และ ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น การเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีอิมเพรกเนชันในภาวะเบสจะให้ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าการเตรียมตัวดูดซับแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาแบบจำลองการดูดซับทั้ง 3 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และ แบบจำลองการเชื่อมสภาพ พบว่า แบบจำลองการเชื่อมสภาพเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายจลนศาสตร์ของตัวดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6072138523 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: gamma-alumina carbon dioxide capture capacity adsorbent  
potassium carbonate impregnation in base condition

Jaruwan Charoenchaipet : CARBON DIOXIDE CAPTURE ON  $K_2CO_3 / Al_2O_3$   
SORBENT PREPARED IN BASE CONDITION. Advisor: Assoc. Prof. BENJAPON  
CHALERMSINSUWAN, Ph.D. Co-advisor: Prof. PORNPOTE PIUMSOMBOON,  
Ph.D.

Carbon dioxide is a major cause of global warming. At present, the carbon dioxide capture process with a solid adsorbent is gaining attention. One of the ways to develop this process is to improve the solid adsorbent to get higher carbon dioxide capture capacity. This research objective is to improve capture capability of carbon dioxide from waste gas using the potassium carbonate adsorbent on gamma-alumina. By varying impregnation preparation parameters, the capture capability is investigated. The different base types were interested which were sodium hydroxide, calcium hydroxide, ammonium hydroxide, and sodium carbonate. Furthermore, the basic of the solution and the duration time used in preparing the adsorbent in the range from 8 to 12 and 12 to 24 hours respectively are also the studied parameters. From the results, the impregnation in the base condition bring to high surface area, large amount of active metal, better potassium carbonate distribution and high basicity on solid surface. Therefore, the impregnation in base condition gives the better solid sorbent than the conventional preparation method. In addition, in this research study, three types of kinetic model which are pseudo-first order, pseudo-second order, and deactivation kinetic model were used to fit the experimental data. From the calculation, deactivation kinetic model was best fit the suitable kinetic model.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนแกมมา-อลูมินาเตรียมในภาวะเบส สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจาก ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा และ ดร. บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณการสนับสนุนเงินทุนสำหรับการศึกษา และ การทำงานวิจัยจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) ประจำปีการศึกษา 2560

ขอขอบคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค และคณะวิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้การสนับสนุน ช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกสำหรับการดำเนินงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังและได้ให้กำลังใจ คำปรึกษา และสนับสนุนในด้านต่างๆแก่ผู้ทำวิจัยเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

จารุวรรณ เจริญชัยเพชร

## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.7 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงาน.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
2.1 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	2
2.1.1 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture).....	3
2.1.2 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture).....	3

2.1.3	กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture).....	4
2.2	เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ .....	5
2.2.1	การแยกด้วยการดูดซึม (Absorption).....	5
2.2.2	การแยกด้วยการดูดซับ (Adsorption).....	7
2.2.3	การแยกด้วยไครโอเจนิค (Cryogenics).....	9
2.2.4	การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane).....	10
2.3	การดูดซับ .....	11
2.3.1	ประเภทของการดูดซับ.....	12
2.3.2	ตัวดูดซับ.....	13
2.3.2.1	ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ .....	13
2.3.2.2	ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิปานกลาง.....	16
2.3.2.3	ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิสูง .....	16
2.4	การก่อกองการไหล.....	16
2.4.1	ประเภทของการก่อกองการไหล.....	18
2.4.2	ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน (Fluidization flow regimes).....	18
2.4.3	ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิดเซชัน.....	24
2.5	การประยุกต์ใช้การก่อกองการไหลกับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	25
2.6	การแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็ง .....	25
2.7	จลนศาสตร์ของการดูดซับ .....	27
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	30
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1	ตัวแปรที่ศึกษา.....	33
3.2	สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	34



3.2.1 สารเคมี 34	
3.2.2 แก๊ส .....	35
3.2.3 อุปกรณ์.....	35
3.3 การทดลอง.....	37
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ.....	37
3.3.2 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	38
3.3.3 การฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	39
3.4 การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	41
3.5 เครื่องมือวิเคราะห์ .....	42
3.6 การออกแบบการทดลอง .....	42
3.7 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ .....	45
3.7.1 การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม .....	45
3.7.2 การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม.....	45
3.7.3 การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของแบบจำลองการเสื่อมสภาพ.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล .....	47
4.1 ผลการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	47
4.2 ผลการหาความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ.....	51
4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ .....	54
4.3.1 ผลของชนิดเบสต่อความสามารถในการดูดซับ.....	56
4.3.2 ผลของค่าความเป็นเบสของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับ .....	57
4.3.3 ผลของตัวแปรเดียวระยะเวลาในการเขย่าต่อความสามารถในการดูดซับ .....	57
4.3.4 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร .....	59
4.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงคุณภาพ และ เชิงปริมาณของตัวดูดซับ.....	61
4.4.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน .....	62

4.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะกัมมันต์บนตัวรองรับ.....	64
4.4.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	65
4.4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวดูดซับ .....	70
4.4.5 การวิเคราะห์ค่าความเป็นเบสของตัวดูดซับ.....	72
4.5 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ.....	75
4.5.1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม.....	76
4.5.2 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม .....	79
4.5.3 แบบจำลองการเชื่อมสภาพ.....	82
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	86
5.1 ผลของตัวแปรการเตรียมตัวดูดซับ.....	86
5.2 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ.....	87
5.3 ความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ .....	87
5.4 จลนศาสตร์ในการดูดซับ.....	87
5.5 ข้อเสนอแนะ .....	88
บรรณานุกรม .....	99
ประวัติผู้เขียน .....	104

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1	กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	2
รูปที่ 2.2	กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ .....	3
รูปที่ 2.3	กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ .....	4
รูปที่ 2.4	กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ .....	4
รูปที่ 2.5	กระบวนการดูดซึมและการฟื้นฟูสภาพ .....	6
รูปที่ 2.6	กระบวนการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพ .....	8
รูปที่ 2.7	กระบวนการแยกด้วยโครโอเจนิค.....	9
รูปที่ 2.8	กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน .....	10
รูปที่ 2.9	ภาพจำลองขั้นตอนในการเกิดการดูดซับและการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	11
รูปที่ 2.10	ช่วงการไหลรูปแบบต่างๆ .....	18
รูปที่ 2.11	แผนผังการแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็งด้วยวิธี Geldart .....	26
รูปที่ 3.1	ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย .....	32
รูปที่ 3.2	เครื่องมือสำหรับดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	36
รูปที่ 4.1	ผลของชนิดเบสต่อความสามารถในการดูดซับ .....	57
รูปที่ 4.2	อิทธิพลของค่าความเป็นเบสของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับ .....	58
รูปที่ 4.3	อิทธิพลของระยะเวลาในการเขย่าต่อความสามารถในการดูดซับ .....	58
รูปที่ 4.4	อันตรกิริยาระหว่างชนิดเบสกับค่าความเป็นเบสของสารละลาย .....	59
รูปที่ 4.5	อันตรกิริยาระหว่างชนิดเบสกับระยะเวลาในการเขย่า.....	60
รูปที่ 4.6	อันตรกิริยาระหว่างค่าความเป็นเบสของสารละลายกับระยะเวลาในการเขย่า .....	60
รูปที่ 4.7	ภาพ SEM ของตัวดูดซับ .....	66
รูปที่ 4.8	ภาพ SEM ของตัวดูดซับในสารละลายเบสต่างชนิด.....	67
รูปที่ 4.9	ภาพ SEM ของตัวดูดซับที่ค่าความเป็นเบสของสารละลายต่างกัน .....	69
รูปที่ 4.10	ภาพSEM ของตัวดูดซับที่ระยะเวลาในการเขย่าต่างกัน.....	69

รูปที่ 4.11 องค์ประกอบของตัวดูดซับ .....	70
รูปที่ 4.12 องค์ประกอบของตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว .....	71
รูปที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างกัน.....	75
รูปที่ 4.14 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส .....	76
รูปที่ 4.15 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส .....	76
รูปที่ 4.16 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส .....	77
รูปที่ 4.17 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส .....	77
รูปที่ 4.18 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส .....	78
รูปที่ 4.19 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส .....	79
รูปที่ 4.20 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส.....	79
รูปที่ 4.21 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส.....	80
รูปที่ 4.22 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส.....	80
รูปที่ 4.23 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส.....	81
รูปที่ 4.24 แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส .....	82
รูปที่ 4.25 แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส .....	82
รูปที่ 4.26 แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส .....	83
รูปที่ 4.27 แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส .....	83
รูปที่ 4.28 แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส .....	84

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	ภาวะที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	39
ตารางที่ 3.2	ภาวะที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	41
ตารางที่ 3.3	ชุดการทดลองทั้งหมดที่ใช้วิธีการออกแบบแบบแฟคทอเรียล .....	44
ตารางที่ 4.1	ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ .....	47
ตารางที่ 4.2	ความสามารถในการดูดซับที่ระยะเวลาในการเขย่าต่างกัน .....	50
ตารางที่ 4.3	ความสามารถในการดูดซับที่อุณหภูมิในการดูดซับต่างกัน .....	50
ตารางที่ 4.4	ระยะเวลาในการลดความดันต่อความสามารถในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ .....	52
ตารางที่ 4.5	ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่นำกลับมาใช้งานซ้ำ .....	52
ตารางที่ 4.6	ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ [39] .....	53
ตารางที่ 4.7	ตาราง ANOVA ของตัวแปรทั้งหมดที่ทำการทดลอง .....	55
ตารางที่ 4.8	พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และ ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ .....	62
ตารางที่ 4.9	ปริมาณโลหะกัมมันต์ และ ตัวรองรับบนตัวดูดซับ .....	65
ตารางที่ 4.10	ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับ .....	73
ตารางที่ 4.11	ค่าคงที่ปฏิกิริยาของแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม .....	78
ตารางที่ 4.12	ค่าคงที่ปฏิกิริยาของแบบจำลองอันดับสองเทียม .....	81
ตารางที่ 4.13	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาแบบจำลองการเสื่อมสภาพ .....	85

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและสำคัญของปัญหา

จากปัญหาภาวะโลกร้อนอันเนื่องมาจากปริมาณแก๊สเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศมีปริมาณสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตต่างๆ ทั้งคน สัตว์ และ พืช จึงได้มีการออกข้อตกลงระหว่างประเทศ (Kyoto protocol) เกี่ยวกับการควบคุมปริมาณการปล่อยแก๊สเสียต่างๆ จากโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้น กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นอีกหนึ่งกระบวนการสำคัญที่นักวิจัยหลายๆ ท่านกำลังให้ความสนใจ กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture) กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture) และ กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture) จากกระบวนการทั้งหมด กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ เป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม เนื่องจากการติดตั้งกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้จะไม่กระทบต่อการดำเนินงานในหน่วยอื่นๆ ของกระบวนการผลิต หน่วยดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเป็นหน่วยที่รับแก๊สเสีย หรือ แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้จากส่วนต่างๆ ของโรงงานมาแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สอื่นๆ ก่อนจะปล่อยแก๊สที่ผ่านกระบวนการแล้วออกสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ กรณีที่มีการปิดซ่อมบำรุงหน่วยดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตเช่นเดียวกัน และ ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ กระบวนการนี้มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งรวมทั้งค่าซ่อมบำรุงต่ำกว่ากระบวนการอื่นๆ

สำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ โดยในปัจจุบัน สารประกอบเอมีนเป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับความนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม [1] เนื่องจาก มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง แต่เนื่องด้วย สารประกอบเอมีนเป็นสารที่ระเหยง่าย ทำให้เกิดการสูญเสียตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับเป็นจำนวนมากในระหว่างการดำเนินงาน อีกทั้งยังมีความเป็นพิษสูงจึงอาจจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้ อัตราการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารประกอบเอมีน และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าค่อนข้างต่ำ จึงต้องเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วยการเพิ่มความสูงของหอดูดซับ เพื่อเป็น

การเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างสาร 2 ชนิด กระบวนการดังกล่าวทำให้มีการสูญเสียพลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานมาก เนื่องจาก ต้องป้อนสารประกอบเอมีนขึ้นไปด้านบนหอดูดซับที่มีความสูงค่อนข้างมาก ดังนั้น จึงมีการพัฒนาตัวดูดซับของแข็งให้มีประสิทธิภาพสูงเทียบเท่าหรือมากกว่าตัวดูดซับที่เป็นสารประกอบเอมีนในรูปของเหลวโดยการเติมหมู่ฟังก์ชันของเอมีนลงไปบนตัวรองรับที่เป็นของแข็งเพื่อลดอัตราการสูญเสียตัวดูดซับและเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน [2] โดยจะเน้นการออกแบบตัวรองรับ หรือ การเลือกตัวรองรับที่สามารถเติมหมู่ฟังก์ชันของเอมีนลงไปได้มากที่สุด ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาเรื่องผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมการเตรียมตัวดูดซับโดยการเติมหมู่ฟังก์ชันเอมีนลงไปเป็นเพียงการลดปริมาณการใช้งานลงเท่านั้น แต่ก็ยังมีสารที่เป็นอันตรายอยู่ในระบบ จึงได้มีการพัฒนาตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยให้ความสำคัญกับตัวดูดซับที่เป็นสารประกอบอื่นๆ ที่มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมต่ำลง

ตัวดูดซับของแข็งสำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ โลหะกัมมันต์ (active metal) และ ตัวรองรับ (support) โดยโลหะกัมมันต์จะทำหน้าที่เป็นตัวทำปฏิกิริยาหลักในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนตัวรองรับจะทำหน้าที่ในการช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว ช่วยให้การกระจายตัวของโลหะกัมมันต์ดียิ่งขึ้น รวมทั้ง ช่วยเพิ่มความแข็งแรงทนทานให้กับตัวดูดซับ เพื่อตรวจสอบสมมุติฐานที่ว่า การมีตัวรองรับจะทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น จึงได้มีงานวิจัยที่เปรียบเทียบผลของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กรณีที่มี และ ไม่มีตัวรองรับ [3] พบว่า ประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ไม่มีตัวรองรับมีประสิทธิภาพต่ำกว่าตัวดูดซับที่มีตัวรองรับมาก ทั้งนี้เนื่องจากตัวรองรับที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะในการเกิดปฏิกิริยา

โลหะกัมมันต์ที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ โลหะแอลคาไลน์ ที่อยู่ในรูปสารประกอบคาร์บอเนต เช่น โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) เป็นต้น จากการเปรียบเทียบผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเปรียบเทียบระหว่าง โซเดียม และ โพแทสเซียมทั้งกรณีที่มีตัวรองรับ และ ไม่มีตัวรองรับ พบว่า โพแทสเซียมเป็นโลหะกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าโซเดียม ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [4] ที่ศึกษาผลของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อใช้โลหะกัมมันต์ต่างชนิดกัน คือ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และ ซีเซียม (Cs) โดยใช้แกรไฟต์ออกไซด์เป็นตัวรองรับ ผลการทดลอง พบว่า โพแทสเซียมเป็นโลหะกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากมีความเป็นเบสลิวิสสูงกว่าโซเดียม แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ

ซีเซียม พบว่า โพลีเอทิลีนเป็นโพลีเมอร์ที่มีความเป็นเบสลิวิสที่ต่ำกว่า แต่เนื่องด้วยขนาดอะตอมของซีเซียมมีขนาดใหญ่กว่าโพลีเอทิลีนทำให้พื้นที่ผิวที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง และปริมาตรรูพรุนลดลงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับต่ำกว่าโพลีเอทิลีน

จากการศึกษาการพัฒนาตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า การเตรียมตัวดูดซับเป็นขั้นตอนที่สำคัญ และ มีความละเอียดอ่อนเป็นอย่างมาก รวมถึงการเลือกชนิดของตัวรองรับ และ ชนิดของโพลีเมอร์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะให้เหมาะสมกับอุตสาหกรรมต่างๆ ยังมีข้อมูลไม่เพียงพอ ดังนั้น งานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาตัวดูดซับของแข็งโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตบนแกมมา-อลูมินาสำหรับดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการเตรียมตัวดูดซับของแข็งแบบอิมเพกเนชันในสถานะเบส และ ศึกษาผลกระทบของตัวแปรการเตรียมตัวดูดซับของแข็งแบบอิมเพกเนชันในสถานะเบสที่มีต่อความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ จะศึกษาแบบจำลองความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตบนแกมมา-อลูมินาที่ได้จากการเตรียมตัวดูดซับของแข็งแบบอิมเพกเนชันในสถานะเบส โดยแบบจำลองที่ได้จะสามารถนำไปใช้ในงานวิจัยอื่นๆ หรือ ใช้จำลองกระบวนการในโปรแกรมคำนวณต่างๆ ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาและศึกษาผลกระทบของตัวแปรการเตรียมตัวดูดซับของแข็งโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตบนแกมมา-อลูมินาสำหรับดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเตรียมตัวดูดซับของแข็งแบบอิมเพกเนชันในสถานะเบส
2. สร้างความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตบนแกมมา-อลูมินากับตัวแปรดำเนินการ จากการเตรียมตัวดูดซับของแข็งแบบอิมเพกเนชันในสถานะเบส

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตบนแกมมา-อลูมินาที่ผ่านการเตรียมแบบอิมเพกเนชันในสถานะเบส

## 1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

- **ตัวดูดซับ (adsorbent)** หมายถึง สารที่สามารถดูดซับสารอื่นไว้ที่ผิวได้ปริมาณมาก โดยส่วนใหญ่เป็นสารที่มีพื้นที่ผิวสูง หรือ เป็นสารที่มีรูพรุนภายในมาก



- **อิมเพรกเนชัน (impregnation)** หมายถึง การเตรียมตัวดูดซับ หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาใน ภาวะที่ใช้สารละลายอิมตัว
- **อัตราการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate)** หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้ง ต้นหรือสารผลิตภัณฑ์เมื่อเวลาเปลี่ยนไป ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้น และ สารผลิตภัณฑ์กับเวลา

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แนวทางในการพัฒนาตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพใน การดูดซับที่ดีขึ้น และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงอีกทั้งยังได้รูปแบบความสัมพันธ์ของอัตรา การเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

## 1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย

### 1.6.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้ง งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาการดูดซับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ และ พัฒนาตัวดูดซับของแข็ง โดย การเตรียมตัวดูดซับแบบอิมเพรกเนชันในภาวะเบส

### 1.6.2 เตรียมชุดทดลอง สารเคมี และ ออกแบบการทดลอง

ชุดทดลองที่ใช้ทำการทดลอง คือ ชุดทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยมี คอลัมน์ดูดซับเป็นคอลัมน์แก้ว และ องค์กรประกอบอื่นๆ เป็นสแตนเลส มีชุดควบคุมอุณหภูมิ และ ความดันเพื่อควบคุมภาวะในการทดลองให้คงที่ งานวิจัยนี้ใช้วิธีออกแบบการทดลองแบบ แฟคตอเรียล เพื่อให้การทดลองครอบคลุมผลของตัวแปรเดี่ยวและตัวแปรอันตรกิริยาทั้งหมด สำหรับการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1.6.2.1 การทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อ ประสิทธิภาพในการดูดซับ แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์โดยมีตัวแปรที่สนใจทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่

- ชนิดของเบส ( $\text{NaOH}$   $\text{Ca}(\text{OH})_2$   $\text{NH}_4\text{OH}$  และ  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
- ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย (8 10 และ 12)
- ระยะเวลาที่ใช้ในการอิมเพรกเนชัน (12 18 และ 24 ชั่วโมง)

1.6.2.2 การทดลองระยะเวลาที่ใช้ในการอิมเพรกเนชัน (24 30 และ 36 ชั่วโมง) เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมกับตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดจากการทดลองในข้อที่ 2.1 โดยหลังจากการวางแผนการทดลองดังกล่าว จะดำเนินการซื้อสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง จากบริษัทMerck และ ศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ สำหรับเครื่องมือวิเคราะห์ที่จะใช้มีดังนี้

- N<sub>2</sub> adsorption-desorption technique (BET) เพื่อหาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุน
- Element analysis (XRF) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวดูดซับ ใช้หาปริมาณ K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> บน Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- Scanning electron microscope (SEM) เพื่อดูภาพพื้นผิวของตัวดูดซับ
- X-ray diffraction (XRD) เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบเชิงคุณภาพของตัวดูดซับที่เกิดขึ้นทั้งก่อน และ หลังการดูดซับ
- Temperature programmed desorption (TPD) เพื่อหาค่าความเป็นเบสของตัวดูดซับ

### 1.6.3 ทดลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามแผนที่ได้ออกแบบไว้

การทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนเตรียมตัวดูดซับโดยใช้วิธีอิมเพรกเนชัน และ เปลี่ยนค่าตัวแปรดังที่ได้กล่าวไว้ในข้อที่สอง โดยขั้นที่หนึ่งจะทำการนำสารตั้งต้น คือ ตัวรองรับ โลหะกัมมันต์ และ น้ำปราศจากไอออนที่ค่าความเป็นเบสต่างกัน มาผสมและเขย่าทิ้งไว้ หลังจาก นั้นจะนำมารองดูด และ อบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ จะนำมาเผาที่อุณหภูมิคงที่ 600 องศาเซลเซียส ในระยะเวลาต่างๆ และ ขั้นที่สอง คือ การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ ตัวดูดซับของแข็งที่เตรียมได้ โดยแก๊สที่ใช้ทดลอง คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 12% ผสมกับ แก๊สไนโตรเจนโดยจะวัดค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา จนกระทั่ง ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับขาเข้า และ นำค่าที่ได้มาคำนวณหา ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป และ ศึกษาผลการฟื้นฟูสภาพของ ตัวดูดซับของแข็งที่มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด สำหรับการฟื้นฟู สภาพของตัวดูดซับของแข็งจะใช้วิธีการลดความดันของระบบในชุดทดลองการดูดซับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์เพื่อกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับของแข็งก่อนนำไปทำการ ดูดซับใหม่

#### 1.6.4 ศึกษาแบบจำลองของอัตราการเกิดปฏิกิริยา

จากผลการทดลองที่ได้จากข้อที่สามจะนำตัวดูดซับที่พัฒนาได้ และ มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด มาทำการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้การดูดซับ (40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส) เพื่อพิจารณาหาแบบจำลองของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยแบบจำลองที่นำมาพิจารณา คือแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งหรืออันดับสองเทียม (pseudo-first/second order) และ แบบจำลองการเสื่อมสภาพ (Deactivated kinetic model) โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ ) ในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมต่อของอัตราการเกิดปฏิกิริยา และสามารถนำไปใช้ได้

#### 1.6.5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ประมวลผล วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง เขียนบทความวิจัย และวิทยานิพนธ์

#### 1.7 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงาน

**บทที่ 1** ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินงานวิจัย และ ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

**บทที่ 2** กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การดูดซับ การก่อสภาพการไหล การประยุกต์ใช้ การก่อการไหลกับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็ง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**บทที่ 3** ตัวแปรที่ศึกษา สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง การทดลอง การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เครื่องมือวิเคราะห์ การออกแบบการทดลอง การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

**บทที่ 4** ผลการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการภาควิธีการในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงคุณภาพ และ เชิงปริมาณของตัวดูดซับ ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

**บทที่ 5** ผลของตัวแปรการเตรียมตัวดูดซับ อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ ความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ จลนศาสตร์ในการดูดซับ ข้อเสนอแนะ

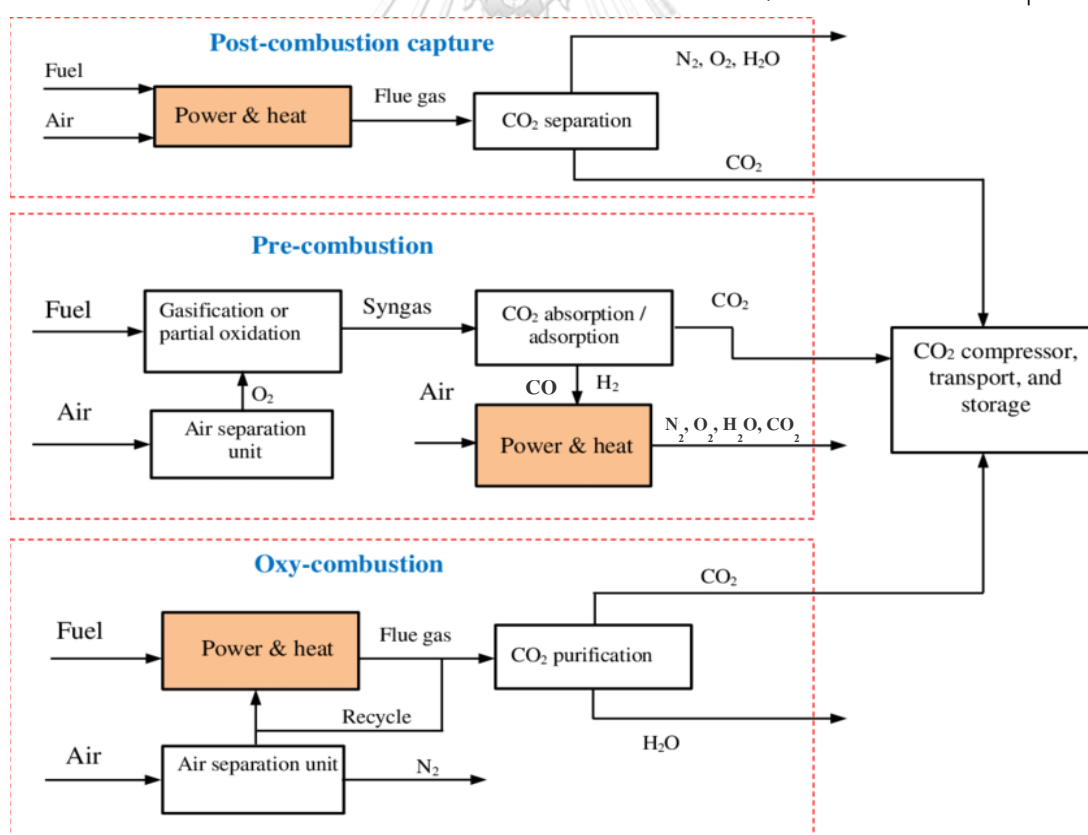
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture) เป็นกระบวนการที่สำคัญที่ส่งผลต่อการลดอัตราการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจกจากกระบวนการผลิตต่างๆ ในอุตสาหกรรม [5] โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท โดยรูปที่ 2.1 แสดงภาพรวมของกระบวนการต่างๆ ที่แตกต่างกัน

- กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture)
- กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture)
- กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture)

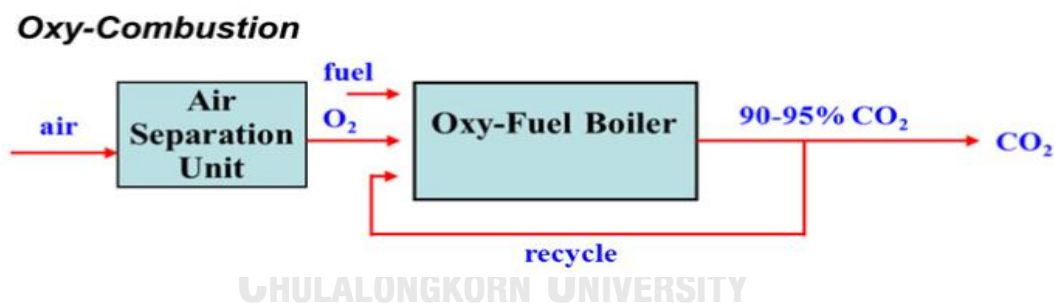


รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [6]

### 2.1.1 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์

#### (Oxy-fuel combustion capture)

กระบวนการนี้จะปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของอากาศก่อนจะป้อนอากาศเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในขั้นตอนแรก อากาศจะถูกป้อนเข้ามายังเครื่องแยกแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศ (Air separator unit) โดยแก๊สออกซิเจนที่แยกได้จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้พร้อมกับเชื้อเพลิง (Fuel) แก๊สที่ออกจากกระบวนการเผาไหม้จะประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และ แก๊สอื่นๆ โดยแก๊สเหล่านี้บางส่วนจะถูกป้อนกลับไปยังกระบวนการเผาไหม้อีกครั้งเพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในของระบบไม่ให้สูงเกินไปกว่าที่อุปกรณ์จะรองรับได้ เนื่องจากการเผาไหม้ที่ภาวะออกซิเจนจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ดีและ อุณหภูมิจะสูงกว่าการเผาโดยใช้การป้อนอากาศ และ ส่วนที่เหลือจะถูกส่งไปยังกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำออกจากกัน โดย ใช้การควบแน่นไอน้ำให้กลายเป็นน้ำภายในเครื่องควบแน่น (Condenser) ก่อนที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (CO<sub>2</sub> purification) เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป [7]

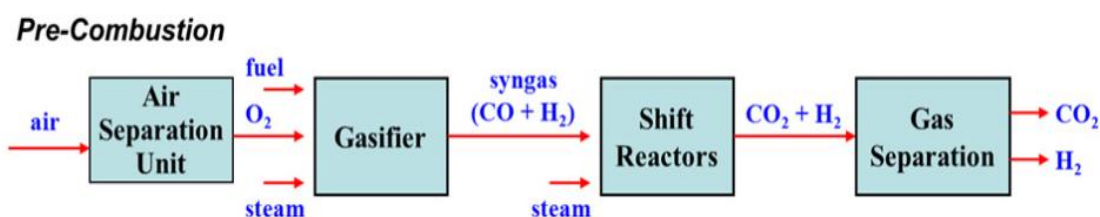


รูปที่ 2.2 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ [8]

### 2.1.2 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture)

กระบวนการนี้จะเริ่มจากการป้อนอากาศเข้าไปยังเครื่องแยกแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศ (Air separator unit) เพื่อแยกแก๊สออกซิเจนออกมาก่อนที่จะนำแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ และ เชื้อเพลิงป้อนเข้าสู่เครื่องผลิตแก๊สสังเคราะห์ (gasifier) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักที่สำคัญ ได้แก่ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ ไอน้ำ ขั้นตอนต่อมา จะป้อนแก๊สสังเคราะห์เข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนรูปจากแก๊สสังเคราะห์ให้กลายเป็น

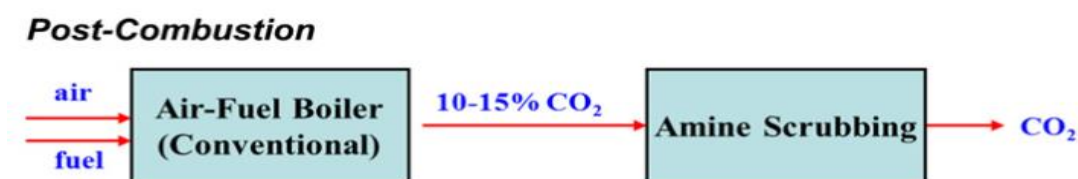
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ แก๊สไฮโดรเจน โดย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำไปยังแหล่งกักเก็บ หรือ ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นต่อไป ส่วนแก๊สไฮโดรเจนจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น นำไปใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ เป็นต้น [7] รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้



รูปที่ 2.3 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ [8]

### 2.1.3 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture)

กระบวนการนี้จะมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการผลิตเดิมมากที่สุด โดยจะเพิ่มหอดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะรับแก๊สเสียจากกระบวนการผลิตมาทำการบำบัด ซึ่งจะใช้ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เอาไว้ และ จะปล่อยแก๊สที่ผ่านการบำบัดแล้วออกสู่ชั้นบรรยากาศ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ [8]

จากกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 3 ประเภท กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดจึงส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง หรือ การซ่อมบำรุงมีค่าต่ำกว่ากระบวนการอื่นๆ โดยกระบวนการนี้จะนิยมใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้า เป็นต้น

## 2.2 เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้

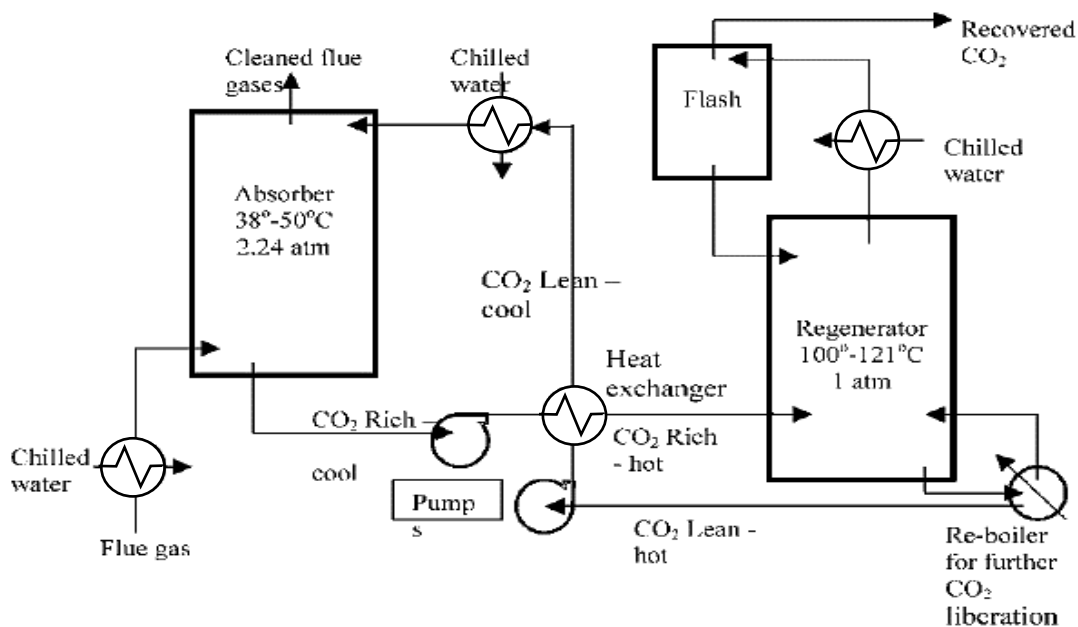
จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นกระบวนการในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งสามประเภทจะเหมาะสมกับกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน โดยกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์นิยมใช้กับการออกแบบ และ สร้างโรงงานใหม่ เนื่องจากการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีนี้จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการค่อนข้างมากจึงไม่นิยมใช้กับกระบวนการผลิตที่มีอยู่เดิม กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้เหมาะกับกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification process) ส่วนกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้เป็นกระบวนการที่จะไปต่อกับกระบวนการเดิมที่ทำให้แก๊สเสียมีความบริสุทธิ์เพิ่มสูงขึ้น และ เป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการดักจับแก๊สเสียจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน [9] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ โดยเทคโนโลยีที่นิยมใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้จะแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

- การแยกด้วยการดูดซึม (Absorption)
- การแยกด้วยการดูดซับ (Adsorption)
- การแยกด้วยโครโอเจนิค (Cryogenics)
- การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane)

### 2.2.1 การแยกด้วยการดูดซึม (Absorption)

จากรูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลาย ในกระบวนการนี้จะมียอดประกอบหลัก 2 ส่วนคือ หอดูดซึม (Absorber) และ หอคืนสภาพ (Stripper) โดยกระบวนการนี้จะเริ่มจากการที่แก๊สเสียที่เหลือจากการเผาไหม้จะถูกป้อนเข้ามายังหอดูดซึม ภายในหอดูดซึมจะมีสารละลายเอมีนที่มีทิศทางการไหลสวนทางกับทิศทางการไหลของแก๊สเสีย สารละลายเอมีนจะมีความสามารถในการละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จึงเกิดเป็นสารละลายที่อิ่มตัวไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นแก๊สเสียที่ผ่านกระบวนการนี้จะถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ ในขณะที่สารละลายเอมีนที่ผ่านการใช้งานแล้ว หรือ สารละลายที่อิ่มตัวไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกส่งไปยังหอคืนสภาพเพื่อฟื้นฟูสภาพสารละลายเอมีนที่อิ่มตัวไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้สามารถนำกลับมาใช้งานใหม่ได้ โดยจะทำการลดความดันเพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกไป หรือ มีการให้ความร้อนในกระบวนการนี้

ด้วย จากนั้นจะนำสารละลายเอมีนกลับมาใช้ใหม่ได้ ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกออกมาได้ จะเข้าสู่กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ต่อไป



รูปที่ 2.5 กระบวนการดูดซึมและการฟื้นฟูสภาพ [9]

### ข้อดีของการแยกด้วยการดูดซึม (Absorption)

1. ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 95 %
2. สามารถนำสารละลายที่ใช้ในการดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ ช่วยลดต้นทุนของกระบวนการ
3. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้จากกระบวนการนี้มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากสารละลายเอมีนมีความจำเพาะเจาะจงในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และมีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ซัลเฟอร์ ( $SO_x$ ) และ ไนโตรเจน ( $NO_x$ ) ที่ต่ำ
4. กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง (Continuous)
5. ควบคุมระบบได้ง่าย



### ข้อเสียของการแยกด้วยการดูดซึม (Absorption)

1. ถ้าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเสียมีค่าสูงประสิทธิภาพของกระบวนการนี้จะลดลง โดยข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าควรมีค่าไม่เกินร้อยละ 20 โดยโมล
2. แก๊สเสียที่ปล่อยออกจากกระบวนการนี้มี  $SO_x$  และ  $NO_x$  ในปริมาณสูง
3. สารละลายเอมีนมีความเป็นพิษสูง ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม
4. อัตราในการละลายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายเอมีนเกิดขึ้นได้ช้า จึงต้องมีการเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกันระหว่าง 2 วัฏภาค โดยการเพิ่มความสูงของหอดูดซึมจึงส่งผลให้กระบวนการนี้มีค่าใช้จ่ายในการลงทุน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และ ค่าซ่อมบำรุงสูง
5. สารละลายที่ใช้เป็นสารที่ระเหยง่ายจึงเกิดการสูญเสียสารละลายในระหว่างการดำเนินการ
6. อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายเอมีนสูง

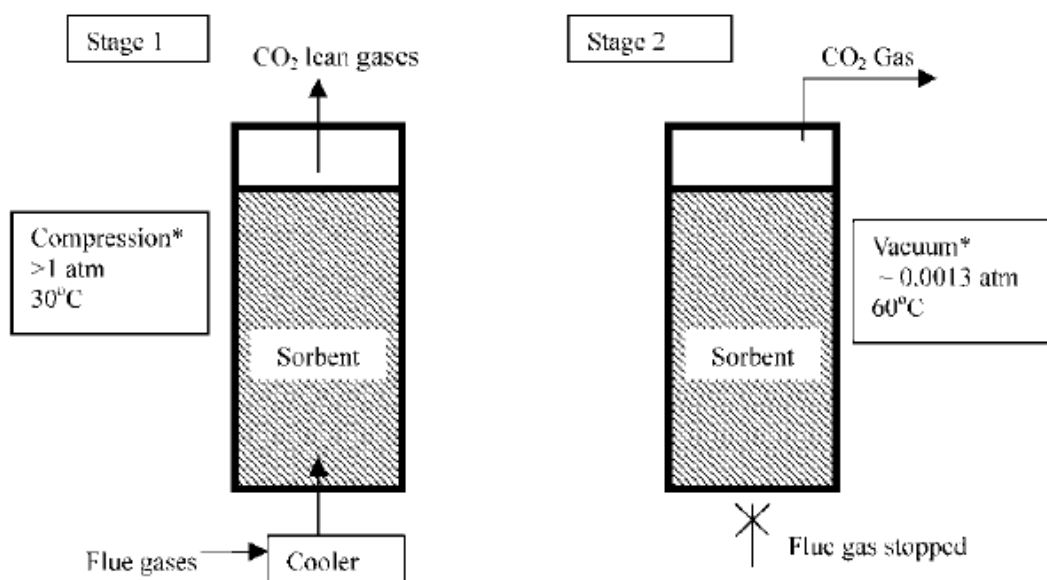
### 2.2.2 การแยกด้วยการดูดซับ (Adsorption)

จากกระบวนการแยกด้วยการดูดซึม ซึ่งสารละลายในกระบวนการนี้โดยส่วนใหญ่จะใช้สารละลายเอมีน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง แต่เนื่องจาก สารละลายเอมีนมีความเป็นพิษที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งกระบวนการนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูง ดังนั้น จึงมีการปรับเปลี่ยนตัวดูดซับที่ใช้ในกระบวนการนี้โดยใช้เป็นตัวดูดซับของแข็งแทนการใช้สารละลายเอมีน เรียกว่า การดูดซับ (adsorption) ซึ่งกระบวนการในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะคล้ายกับการดูดซึมโดยใช้สารละลายเอมีนดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 แต่จะมีการปรับเปลี่ยนการดำเนินการภายในหอดูดซับให้เหมาะกับการใช้ตัวดูดซับที่เป็นของแข็งมากยิ่งขึ้น

จากรูปที่ 2.6 กระบวนการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง โดยตัวดูดซับที่นิยมใช้จะเป็นอนุภาคของแข็งที่มีรูพรุนสูงที่หาได้จากธรรมชาติ เช่น ถ่าน (Coal) หรือ ตัวดูดซับที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) โมเลกุลลาร์ซีฟ (Molecular sieves) และ ซีโอไลต์ (Zeolites) เป็นต้น

ในกระบวนการนี้จะมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วนคือ หอดูดซับ (Adsorber) และ หอคืนสภาพ (Desorber) โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกป้อนเข้าไปยังหอดูดซับ และเคลื่อนที่ผ่านตัวดูดซับของแข็งที่ถูกบรรจุไว้ในหอดูดซับ จากนั้น แก๊สที่ผ่านกระบวนการนี้แล้วจะถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ ส่วนตัวดูดซับของแข็งที่ใช้งานแล้วจะถูกนำไปฟื้นฟูสภาพใน

หาคืนสภาพ โดยจะใช้วิธีการลดความดัน หรือ เพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการฟื้นฟูสภาพก่อนจะนำตัวดูดซับกลับไปใช้ใหม่ โดยภาวะในการดำเนินการในหอดูดซับ และ หาคืนสภาพจะแตกต่างกันไปตามชนิดของตัวดูดซับของแข็งที่นำมาใช้ในกระบวนการ



รูปที่ 2.6 กระบวนการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพ [9]

### ข้อดีของการแยกด้วยการดูดซับ (Adsorption)

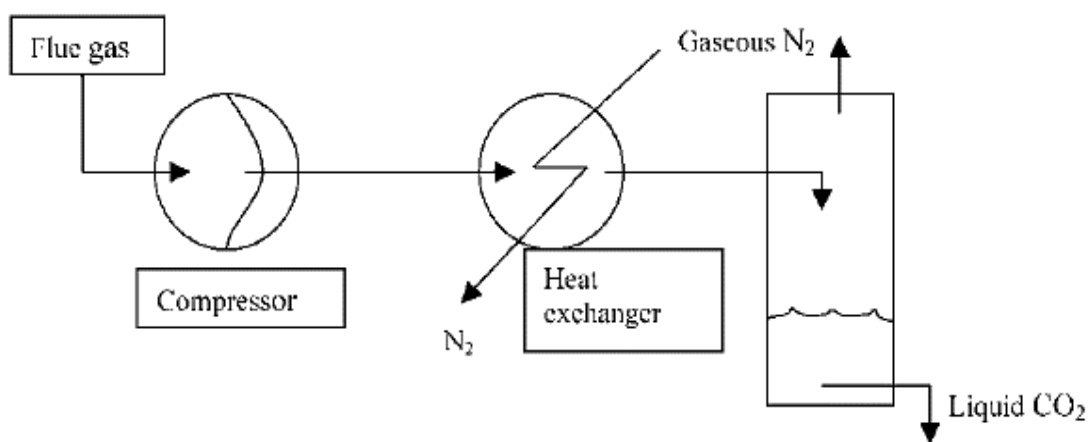
1. สามารถนำตัวดูดซับของแข็งกลับมาใช้ใหม่ได้ ช่วยลดต้นทุนของกระบวนการ
2. สามารถใช้ในกระบวนการผลิตที่ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเสียมีความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 28-34 โดยโมล
3. ความต้องการใช้พลังงานไม่สูง
4. ความดันที่ใช้ในการดำเนินการใกล้เคียงกับภาวะบรรยากาศ

### ข้อเสียของการแยกด้วยการดูดซับ (Adsorption)

1. ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ
2. มีความไม่สม่ำเสมอในกระบวนการดูดซับเนื่องจากตัวดูดซับเป็นแบบไม่เป็นเนื้อเดียว (Heterogeneous)

### 2.2.3 การแยกด้วยไครโอเจนิค (Cryogenics)

จากรูปที่ 2.7 กระบวนการแยกด้วยไครโอเจนิค กระบวนการนี้จะใช้คุณสมบัติที่แตกต่างกันของสารแต่ละตัวซึ่งจะพิจารณาจาก อุณหภูมิ และ ความดันที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารเป็นหลัก ก่อนเข้าสู่กระบวนการ แก๊สเสียจากกระบวนการผลิตจะถูกส่งไปกำจัด  $H_2$   $SO_x$   $NO_x$  และ  $H_2O$  ก่อน ดังนั้น แก๊สที่ยังเหลืออยู่ในแก๊สป้อนเข้าคือ แก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) เมื่อพิจารณาจุดควบแน่นของสารทั้ง 2 ชนิด พบว่า แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีจุดควบแน่นที่อุณหภูมิ 56.6 องศาเซลเซียส และ ความดัน 7.4 บรรยากาศ ซึ่งที่ภาวะดังกล่าว แก๊สไนโตรเจนจะยังคงอยู่ในสถานะแก๊ส ดังนั้น กระบวนการนี้จะป้อนแก๊สผสมทั้งสองชนิดเข้าสู่เครื่องเพิ่มความดัน (Compressor) และ เครื่องถ่ายโอนความร้อน (Heat exchanger) ก่อนจะเข้าสู่หอกลั่นอย่างง่าย (Flash drum) โดย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะอยู่ในรูปของเหลวบริเวณด้านล่าง และ แก๊สไนโตรเจนจะอยู่ในภาวะแก๊ส และ ถูกปล่อยออกจากระบบ



รูปที่ 2.7 กระบวนการแยกด้วยไครโอเจนิค [9]

#### ข้อดีของการแยกด้วยไครโอเจนิค (Cryogenics)

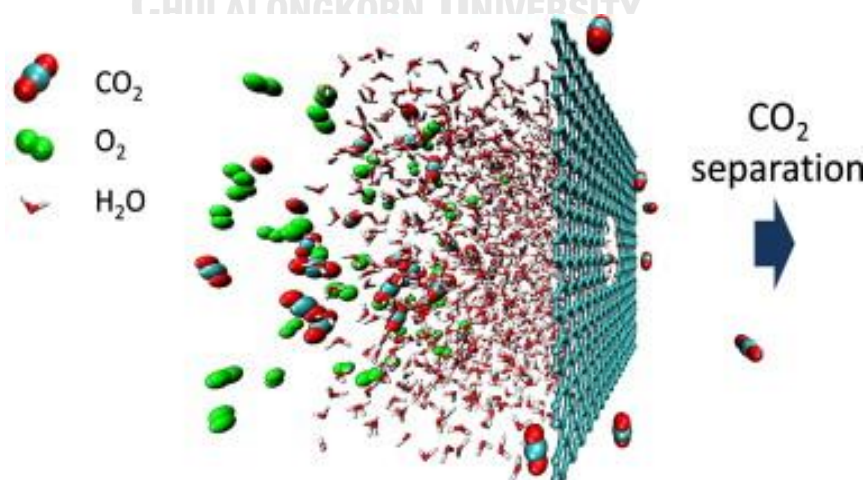
1. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้มีความบริสุทธิ์สูง
2. สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเข้มข้นสูงได้
3. ไม่มีการใช้สารเคมีในระบบจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

### ข้อเสียของการแยกด้วยโคริโอเจนิค (Cryogenics)

1. ต้องมีกระบวนการแยก  $H_2$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$  และ  $H_2O$  ก่อน ทำให้มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการดำเนินการ
2. มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง เนื่องจากอุณหภูมิ และ ความดันที่ใช้ในการดำเนินการ แตกต่างจากภาวะบรรยากาศค่อนข้างมาก
3. ระบบรักษาความปลอดภัย และการตรวจสอบอุปกรณ์มีความจำเป็น และ สำคัญมาก เนื่องจาก ภาวะในการดำเนินการเสี่ยงต่อการเกิดอันตราย

### 2.2.4 การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane)

จากรูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สชนิดอื่นๆ ด้วยเมมเบรน ซึ่งวิธีการนี้จะอาศัยเมมเบรน หรือ วัสดุที่มีความเฉพาะเจาะจงต่อชนิดของแก๊ส โดยเมมเบรนมีหลายประเภทด้วยกัน เช่น เมมเบรนชนิดพอลิเมอร์ (polymeric membrane) เมมเบรนแบบมีรูพรุน (Porous membrane) ซึ่งมีทั้งแบบเซรามิก (microporous ceramic) คาร์บอน (porous carbon) และเมมเบรนความหนาแน่นสูง (Dense membrane) ซึ่งมีทั้งแบบเซรามิก (dense ceramic) และ แบบโลหะ (dense metallic) จากการพัฒนา และ วิจัยในปัจจุบัน ประสิทธิภาพในการแยกด้วยเมมเบรนยังไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้น กระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนจึงต้องศึกษาและพัฒนาทั้งส่วนที่เป็นวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน และ ภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสม [10]



รูปที่ 2.8 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน [11]

### ข้อดีของการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane)

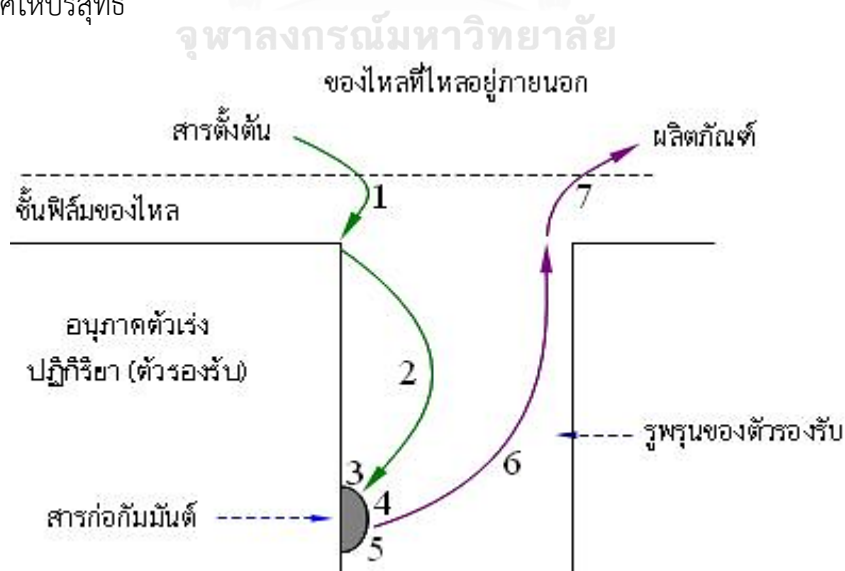
1. แก๊สที่แยกได้มีความบริสุทธิ์สูง
2. สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเข้มข้นสูงได้
3. ไม่มีการใช้สารเคมีในระบบจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
4. โครงสร้างของเครื่องง่ายต่อการติดตั้ง
5. เป็นกระบวนการแยกโดยใช้พลังงานที่ต่ำ

### ข้อเสียของการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane)

1. เกิดการอุดตันบนผิวหน้าของเมมเบรนได้ง่าย
2. ต้นทุนในการผลิตสูง
3. อายุในการใช้งานต่ำ
4. ประสิทธิภาพของเมมเบรนที่ผลิตได้ในปัจจุบันยังมีความจำเพาะในการแยกแก๊สค่อนข้างต่ำ

## 2.3 การดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อของแข็งสัมผัสกับของไหล และ สาร หรือ ธาตุมากกว่าหนึ่งชนิดสามารถฝังลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยการดูดซับนั้นถูกนำไปใช้ในกระบวนการทำให้สารมีความบริสุทธิ์เพิ่มสูงขึ้น เช่น ตัวดูดซับ (Sorbent) หรือ ตัวกรอง (Filter) สำหรับการทำน้ำหรืออากาศให้บริสุทธิ์



รูปที่ 2.9 ภาพจำลองขั้นตอนในการเกิดการดูดซับและการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา [12]

จากรูปที่ 2.9 แสดงภาพจำลองการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารตั้งต้นเข้าสู่รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา และ ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ โดยขั้นตอนในการดูดซับ และการเกิดปฏิกิริยาจะแบ่งได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

### 1. การถ่ายโอนสารตั้งต้นที่พื้นผิว

สารตั้งต้นที่อยู่ในรูปของไหลจะต้องเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์ม (gas film) ที่ล้อมอยู่ที่ผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง

### 2. การถ่ายโอนสารตั้งต้นเข้าไปยังรูพรุน

### 3. การดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งกัมมันต์

### 4. การเกิดปฏิกิริยาเคมี

### 5. การคายสารผลิตภัณฑ์ออกจากตำแหน่งกัมมันต์

### 6. การถ่ายโอนมวลสารผลิตภัณฑ์ออกจากรูพรุน

### 7. การถ่ายโอนมวลสารออกจากพื้นผิว

จากขั้นตอนในการดูดซับ และการเกิดปฏิกิริยาดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น เป็นจำนวนขั้นตอนที่มากที่สุดที่จะเป็นไปได้ในกระบวนการดูดซับ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารตั้งต้น ตัวเร่งปฏิกิริยา และ สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น โดยในบางกรณี สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ขั้นตอนในการดูดซับเกิดเพียงแค่ 4 ขั้นตอนเท่านั้น หรือ ไม่มีการคายซับของผลิตภัณฑ์ออกจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวค่อยๆเสื่อมสภาพ และ ใช้งานไม่ได้ ดังนั้น การเลือกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ตัวดูดซับจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง สำหรับขั้นตอนที่กำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ ขั้นตอนที่เกิดได้ช้าที่สุด

### 2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับเชิงกายภาพ และ การดูดซับเชิงเคมี [13]

#### ● การดูดซับเชิงกายภาพ

การดูดซับเชิงกายภาพ คือ การที่โมเลกุลของแก๊ส หรือ ของเหลวถูกดึงดูดเข้ามาให้ให้เกาะติดอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยแรงยึดเหนี่ยวอย่างอ่อน หรือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der waals) โดยระยะห่างระหว่างโมเลกุลของของไหลกับพื้นผิวของตัวดูดซับเท่ากับรัศมี

แวนเดอร์วาลส์ โดยการดูดซับเชิงกายภาพเป็นการดูดซับที่ไม่มีความจำเพาะเจาะจง และสามารถเกิดการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำ

### ● การดูดซับเชิงเคมี

การดูดซับที่มีความจำเพาะในการเลือกเกิด และ เกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับ และ ตัวถูกดูดซับทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับเชิงกายภาพ การดูดซับเชิงเคมีจะเกิดขึ้นได้ที่ อุณหภูมิที่สูงกว่าการดูดซับเชิงกายภาพ การดูดซับเชิงเคมีอาจจะทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ชนิด ใหม่ที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจากสารตั้งต้นที่ถูกดูดซับ ดังนั้น การดูดซับเชิงเคมีจึงจำเป็นต้อง ใช้พลังงานในการฟื้นฟูตัวดูดซับที่สูงกว่าการดูดซับเชิงกายภาพ

### 2.3.2 ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ (adsorbent) คือ สารที่มีความสามารถในการดูดซับสารอื่นไว้ที่ผิวได้ปริมาณ มาก และ มักเป็นสารที่มีพื้นที่ผิวมาก หรือ มีรูพรุนภายในมาก ตัวดูดซับมีหลายประเภทซึ่งมี หลักการในการจำแนกประเภทของตัวดูดซับได้หลายวิธี โดยในที่นี้จะแบ่งประเภทของตัวดูดซับ จากช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ โดยแบ่งได้ 3 ช่วง [14] ดังนี้

- ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ
- ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิปานกลาง
- ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิสูง

#### 2.3.2.1 ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ

- ตัวดูดซับของแข็งที่มีองค์ประกอบของเอมีน (Solid amine-based adsorbents)

เพื่อแก้ไขปัญหาในเรื่องของการใช้พลังงาน และ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่สูง ของกระบวนการแยกด้วยการดูดซับโดยใช้สารละลายเอมีน จึงได้มีการเตรียมตัวดูดซับของแข็ง ที่มีองค์ประกอบของสารประกอบเอมีนลงบนตัวดูดซับ ตัวรองรับที่เลือกใช้มีได้หลายชนิด เช่น ตัวดูดซับคาร์บอน ตัวดูดซับ ซีโอไลต์ และ ตัวดูดซับซิลิกา เป็นต้น โดยประสิทธิภาพ และ ภาวะ ที่ใช้ในการดำเนินการของตัวดูดซับจะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวรองรับที่เลือกใช้ด้วย

- **ตัวดูดซับคาร์บอน (Carbon-base adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้เป็นตัวดูดซับที่นักวิจัยหลายท่านให้ความสนใจเนื่องจาก ราคาถูก พื้นที่ผิวสูงมีความเป็นรูพรุนสูง และ พื้นฟูสภาพได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับชนิดนี้จะเป็นการดูดซับเชิงกายภาพเป็นส่วนใหญ่ จึงมีความเลือกจำเพาะต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ การดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับคาร์บอนสามารถดูดซับได้ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ

- **ตัวดูดซับแกรไฟต์ (Graphite/graphene-based adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้เป็นตัวดูดซับคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ทำให้มีพื้นที่ผิวสูง และ ราคาถูกในปัจจุบันมีการพัฒนาตัวดูดซับชนิดนี้ให้พื้นที่ผิวสูงขึ้นด้วยการเตรียมภายใต้ภาวะสูญญากาศที่อุณหภูมิสูง แต่กระบวนการนี้ต้องเสียพลังงานมากจึงไม่เป็นที่นิยม การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับแกรไฟต์สามารถดูดซับได้ที่อุณหภูมิห้อง และ ความดันบรรยากาศ แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตามการดูดซับจะสูงขึ้นมากเมื่อทำการดูดซับที่ความดันสูง

- **ตัวดูดซับซีโอไลต์ (Zeolite-based adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้เป็นตัวดูดซับที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมีโครงสร้างหลายชนิด ดังนั้นประสิทธิภาพก็จะแตกต่างกันออกไปตามโครงสร้างของซีโอไลต์ ตัวดูดซับชนิดนี้มีความจำเพาะต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าแก๊สชนิดอื่นๆ และ สามารถดูดซับได้ที่อุณหภูมิห้อง และ ความดันบรรยากาศ

- **ตัวดูดซับโลหะอแกนิกเฟรมเวิร์ค (MOF-based adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้มีโครงสร้างของการโลหะทรานซิชัน และ ลิแกนด์ของสารประกอบอินทรีย์ การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับสามารถดูดซับได้ที่อุณหภูมิห้อง และ ความดันบรรยากาศ แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ โดยประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงขึ้นมากเมื่อทำการดูดซับที่ความดันสูง หรือ ทำการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำมาก



- **ตัวดูดซับซิลิกา (Silica-based adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้มีพื้นที่ผิวสูง รูพรุนขนาดใหญ่ และ มีการกระจายตัวของรูพรุนที่ดี การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับได้ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ โดย ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงขึ้นมากเมื่อทำการดูดซับที่อุณหภูมิที่สูงขึ้น และ สามารถฟื้นฟูสภาพได้ที่อุณหภูมิต่ำ

- **ตัวดูดซับพอลิเมอร์ (Polymer-based adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้มีพื้นที่ผิวสูง มีความจำเพาะต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างสูง การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับสามารถดูดซับได้ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ โดย ประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงขึ้นมากเมื่อทำการดูดซับที่ความดันที่สูงขึ้น

- **ตัวดูดซับดินเหนียว (Clay-based adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูง ราคาถูก และสามารถฟื้นฟูสภาพได้ง่าย อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในช่วง 75-85 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ จะอยู่ในช่วง 100-155 องศาเซลเซียส ซึ่งตัวดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่สามารถดูดซับได้ที่อุณหภูมิต่ำ

- **ตัวดูดซับโลหะแอลคาไลน์ในรูปสารประกอบคาร์บอเนต (Alkali metal carbonate-based adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง และ ราคาถูก โดย นิยมใช้  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  เป็นตัวดูดซับหลัก ตัวดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิในช่วง 50-100 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิที่ใช้ในการ ฟื้นฟูสภาพควรจะไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ในกระบวนการเตรียมตัวดูดซับ อาจจะมีการเติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับ

### 2.3.2.2 ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิปานกลาง

- **ตัวดูดซับแอลดีเอช (LDH-based adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้มีพื้นที่ผิวสูง และมีบริเวณที่เป็นเบสซึ่งจะทำให้สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีความเป็นกรดอ่อนได้ดี อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในช่วง 200-400 องศาเซลเซียส

- **ตัวดูดซับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO-based adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้มีบริเวณที่เป็นเบสซึ่งจะทำให้สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีความเป็นกรดอ่อนได้ดี อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในช่วง 200-400 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่ำกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่สามารถดูดซับได้ที่อุณหภูมิปานกลาง ดังนั้นจึงใช้พลังงานในการฟื้นฟูสภาพที่ต่ำ

### 2.3.2.3 ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิสูง

- **ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ (CaO-based adsorbents)**

ตัวดูดซับชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง ราคาถูก สามารถใช้ได้ทั้งกระบวนการดูดซับก่อน และ หลังการเผาไหม้ ตัวดูดซับชนิดนี้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง จึงช่วยลดระยะเวลาในการดำเนินการได้

## 2.4 การก่อสร้างภากรไหล

ปัจจุบันเทคโนโลยีต่าง ๆ มีความเจริญก้าวหน้าอย่างมาก รวมทั้งการอนุรักษ์พลังงาน โดยการลดการใช้พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรม การใช้พลังงานชนิดต่าง ๆ อย่างเหมาะสมกับสภาพของโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ๆ เพื่อประหยัดพลังงาน และ ลดค่าใช้จ่ายให้สิ้นเปลืองน้อยที่สุด โดยรูปแบบการไหลที่เหมาะสมของของไหลก็เป็นปัจจัยสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณา เนื่องจากรูปแบบการไหลที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาให้สูงขึ้น โดยใช้ระยะเวลาในการดำเนินการที่ต่ำลง และ ช่วยประหยัดงบประมาณในการดำเนินการ [15]

การก่อสร้างภากรของไหล หรือ ฟลูอิดาเซชัน (fluidization) คือ การทำให้ของแข็งขนาดเล็กมีพฤติกรรมเหมือนกับของไหล โดยนำของแข็งขนาดเล็กสัมผัสกับของไหลแล้ว ของแข็งเหล่านั้นจะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่ง หรือ เคลื่อนไหวด้วยของไหลภายในหอทดลอง จะมีระดับความสูงตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับ หรือ เป็นตัวกระจายของไหลจนถึงระดับผิวหน้าของเม็ดเบด ในกระบวนการอนุภาคของแข็งจะถูกบรรจุอยู่ในหอทดลอง และ ของไหลอีกชนิดหนึ่งจะถูกป้อนเข้ามาที่ยังหอทดลองด้วยตัวกระจายของไหล (distributor) โดยของไหลที่ถูกป้อนเข้ามาอาจจะเป็นของเหลว หรือ แก๊ส จะถูกป้อนเข้ามาที่บริเวณด้านล่าง หรือ ด้านข้างของหอทดลอง เมื่ออนุภาคของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ด สัมผัสกับ ของไหลที่มีความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งจากเดิมที่อยู่นิ่งเริ่มขยับ โดยบริเวณผิวหน้าเบด (bed) จะเป็นบริเวณแรกที่อนุภาคของแข็งเริ่มขยับ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจะทำให้อนุภาคของแข็งลอยตัวเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ซึ่งพฤติกรรมของอนุภาคของแข็งภายในหอทดลองจะแตกต่างกันออกไปตามความเร็วของของไหลที่แตกต่างกัน พฤติกรรมของอนุภาคของแข็งภายในหอทดลองจะมีสมบัติคล้ายของไหล โดยสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. อนุภาคของแข็งที่ลอยตัวอยู่ที่ผิวหน้าของเบดจะเรียบสม่ำเสมอตามแนวระนาบเหมือนผิวหน้าของไหลที่ใสอยู่ในภาชนะ นอกจากนี้ ถ้ามีการจัดหอทดลองให้เอียงไปทางซ้าย หรือ ขวาผิวหน้าของเบดก็ยังคงเรียบอยู่เหมือนเดิม
2. ถ้าเจาะรูด้านข้าง หรือ ด้านบนของเบด อนุภาคของแข็งจะไหลออกทางรูนั้นได้เหมือนกับของไหล
3. ถ้านำวัตถุของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าอนุภาคเบดใส่ลงไปในห้องทดลอง วัตถุของแข็งนั้นจะลอยอยู่บนผิวหน้าของเบด
4. อนุภาคของของแข็งผสมกันได้อย่างดีและเมื่อให้ความร้อนกับระบบอนุภาคของแข็งจะสามารถรักษาอุณหภูมิให้เท่ากันได้ทั่วทั้งระบบ

### 2.4.1 ประเภทของการก่อก๊าซของไหล

ฟลูอิดเซชัน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

#### 1. การก่อก๊าซของไหลสองสถานะ (two-phase fluidization)

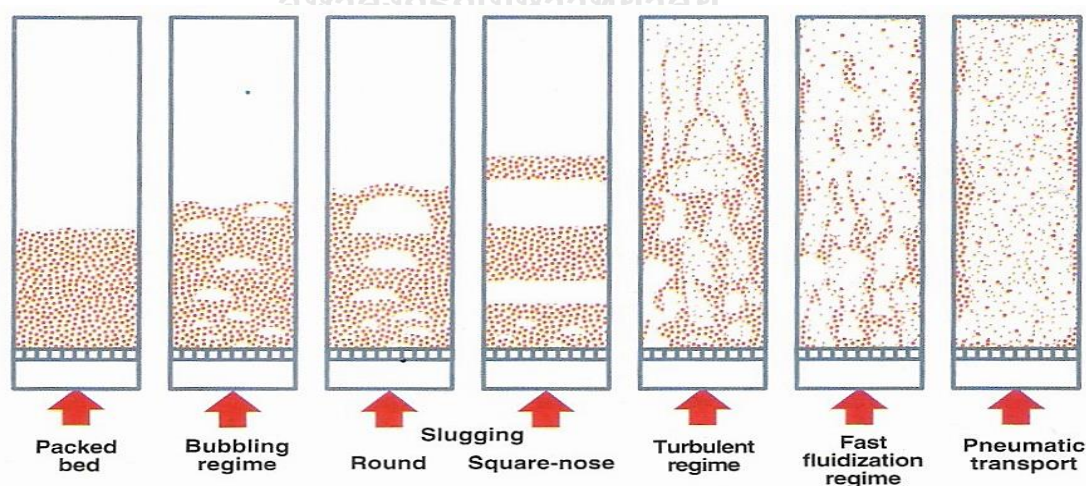
หมายความว่า ภายในหอทดลอง จะประกอบด้วยของสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยของไหลนี้อาจจะเป็นแก๊ส หรือ ของเหลวก็ได้ ดังนั้น การก่อก๊าซของไหลสองสถานะ สามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท คือ การก่อก๊าซของแก๊ส และ การก่อก๊าซของไหลของเหลว

#### 2. การก่อก๊าซของไหลสามสถานะ (three-phase fluidization)

หมายความว่า ภายในหอทดลองจะประกอบไปด้วยของสามสถานะอยู่ คือ ของแข็ง ของเหลว และ แก๊ส สำหรับการก่อก๊าซของไหลสามสถานะนี้เป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากการก่อก๊าซของของไหลสองสถานะ หอทดลองที่เป็นฟอง (bubble column) และ หอทดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (Packed bed)

### 2.4.2 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน (Fluidization flow regimes)

จากที่ได้กล่าวไปแล้วในเบื้องต้นว่า ความเร็วของของไหลจะส่งผลต่อลักษณะการเกิดฟลูอิดเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยช่วงการไหลของฟลูอิดเซชันสามารถแบ่งได้เป็น 6 ระดับตามลักษณะการเคลื่อนไหวของเบดเมื่อเพิ่มอัตราการไหล



รูปที่ 2.10 ช่วงการไหลรูปแบบต่างๆ [16]

- **เบตนิ่ง (Fixed bed)**

ภาวะที่อนุภาคของแข็งภายในหอตลอดงไม่มีการเคลื่อนที่ หมายความว่า อัตราการไหลของของไหลที่ถูกป้อนเข้าสู่หอตลอดงยังไม่เพียงพอให้อนุภาคของแข็งเกิดการเคลื่อนที่ และมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งแต่ละอนุภาคมาก ดังนั้น การดำเนินการในภาวะเบตนิ่ง จะทำให้ความดันลดที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าสูง เนื่องจาก การป้อนของไหลเข้าไปในระบบที่มีอนุภาคของแข็งหนาแน่นจะทำให้เกิดแรงต้านที่มีทิศตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลกทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมาก อีกทั้ง การดำเนินการในภาวะเบตนิ่งจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองวัฏภาคมีค่าน้อยจึงอาจส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา หรือ ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้ อย่างไรก็ตาม การดำเนินการในภาวะเบตนิ่งจะสามารถทำได้ง่ายกว่าการดำเนินการในภาวะอื่นๆ

- **ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidization)**

จากรูปที่ 2.10 เมื่อความเร็วของของไหลในระบบเพิ่มสูงขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่งที่ทำให้ผิวหน้าของอนุภาคของแข็ง หรือ ผิวหน้าเบตเริ่มขยับ จะเรียกความเร็วที่ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มขยับว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity,  $U_{mf}$ ) และ เรียกเบต ณ จุดนี้ว่า Minimum Fluidized Bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวคล้ายของไหล ลักษณะเด่นของช่วงการไหลนี้ คือ จะเกิดฟองแก๊สขึ้นภายในหอตลอดง โดยสามารถคำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้จากสมการที่ 2.1-2.3 โดยจะพิจารณาที่ค่าเรย์โนลด์ที่แตกต่างกัน ( $Re_{mf}$ )

สำหรับ  $Re_{mf} < 20$

$$u_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)g}{\mu_g} \cdot \left( \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right) \quad (2.1)$$

สำหรับ  $20 \leq Re_{mf} \leq 100$

$$u_{mf} = \frac{\sqrt{\frac{\phi_s d_p (\rho_s - \rho_g) g \epsilon_{mf}^3}{1.75 \rho_g} + \frac{(\phi_s d_p)^2 (\rho_s - \rho_g) g}{150 \mu_g} \left( \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right)}}{2} \quad (2.2)$$

สำหรับ  $Re_{mf} > 100$

$$u_{mf} = \sqrt{\frac{\phi_s d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g) g \varepsilon^3_{mf}}{\rho_g}} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\varepsilon_{mf}$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคแก๊สที่สภาวะต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (-)

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$d_p$  คือ ขนาดอนุภาคของวัฏภาคของแข็ง (เมตร)

$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

$\phi_s$  คือ ความเป็นทรงกลมของอนุภาคของแข็ง (-)

$\mu_g$  คือ ความหนืดรวมของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อเมตร วินาที)

$u_g$  คือ ความเร็วของวัฏภาคแก๊ส (เมตรต่อวินาที)

ช่วงการไหลฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊สจะมีลักษณะเฉพาะตัวคือ มีฟองแก๊สเกิดขึ้น ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของการผสมกันระหว่างวัฏภาคของแก๊ส และ ของแข็ง อีกทั้งยังส่งผลต่อการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมี สำหรับอนุภาคที่มีขนาดต่างกัน ลักษณะการเกิดช่วงการไหลก็จะมี ความแตกต่างกัน กล่าวคือ สำหรับอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กมากจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคที่สูงจึงทำให้เกิดการประทุติดัวแบบของไหล หรือ เกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก และ ไม่มีฟองแก๊สเกิดขึ้นในระบบ ดังนั้น จึงไม่เกิดช่วงการไหลฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊สสำหรับกลุ่มอนุภาคนี้ [17] ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของอนุภาคของแข็ง Geldart C สำหรับของแข็งที่มีขนาดเล็ก เมื่อความเร็วของของไหลมีค่าเท่ากับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน จะพบว่าภายในหอทดลองจะมีเพียงการขยายตัวของเบตเท่านั้น แต่จะไม่เกิดฟองทันที เนื่องจากแรงระหว่างอนุภาคของแข็งมีค่ามากกว่าแรงกระทำอันเนื่องมาจากความเร็วของของไหล แต่เมื่อความเร็วของของไหลมากกว่าค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันจะเริ่มเกิดฟองแก๊สภายในหอทดลอง [18] โดยพฤติกรรมดังกล่าวเป็นลักษณะเฉพาะของอนุภาค Geldart A ซึ่งนิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่ หรือ อนุภาคของแข็ง Geldart B และ D จะมีฟองแก๊สเกิดขึ้นภายในหอทดลองทันที เมื่อความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีค่าเท่ากับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน [19]

จากเนื้อหาในข้างต้น พบว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน อาจจะไม่ใช่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก เช่น อนุภาคของแข็ง Geldart A และ C ดังนั้น Abrahamsen และ Geldart [20] ได้ทำการศึกษาและเสนอวิธีคำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองแก๊ส ( $U_{mb}$ ) ไว้ดังแสดงต่อไปนี้

$$u_{mb} = 33d_p \left( \frac{\rho_g}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $U_{mb}$  คือ ความเร็วที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดฟอง (เมตรต่อวินาที)

เนื่องจากช่วงการไหลนี้จะทำให้เกิดฟองแก๊สภายในระบบ ดังนั้น จึงแบ่งลักษณะการเคลื่อนที่ภายในเบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

### 1. Bubble phase

คือ ส่วนที่เป็นฟองแก๊ส ซึ่งในส่วนนี้อาจมีอนุภาคของแข็งปนอยู่บ้าง จึงเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นของของไหลสูง และ ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งต่ำ

### 2. Emulsion phase

คือ ส่วนที่ไม่ใช่ฟองแก๊สหรือส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น โดยขนาดของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์อยู่กับขนาดของอนุภาคของแข็ง และ ความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้า กระบวนการซึ่งจะอธิบายในลำดับถัดไป

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกระหว่างอนุภาคของแข็งขึ้นไป และ เกิดการรวมตัวกันผ่าน Emulsion phase ภายในฟองแก๊สอาจจะมีอนุภาคของแข็งปนอยู่ด้วย หรือ มีอนุภาคของแข็งบางส่วนที่เคลื่อนที่ตามฟองแก๊สขึ้นไปบริเวณเหนือผิวหน้าเบด ฟองแก๊สที่เคลื่อนที่ไปด้านบนจะแตกออกทำให้ของแข็งที่ติดไปด้วยหลุดออก และกระจายอยู่บริเวณหน้าเบด โดยบริเวณดังกล่าวซึ่งเป็นบริเวณที่อนุภาคของแข็งแตกกระจายอยู่หน้าเบด จะเรียกว่า บริเวณอิสระ (Freeboard)

ขนาดฟองแก๊สที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน โดยฟองแก๊สขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ และ ฟองแก๊สขนาดใหญ่ขึ้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นด้วย โดยฟองแก๊สขนาดเล็กที่ลอยขึ้นมาจะมีโอกาสในการที่จะรวมกันจนเป็นฟองแก๊สที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

- ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidization)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่ไหลผ่านช่วงการไหลแบบฟองแก๊สมีค่ามากกว่าค่า  $U_{mb}$  อนุภาคของเบตจะเริ่มเกิดการขยายตัว และ เมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการขยายตัวของเบต มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัว และ แยกออกจากกันอย่างรวดเร็วจนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส ซึ่งหมายความว่า ได้มี การเปลี่ยนแปลงไปสู่ช่วงการไหลใหม่ที่เรียกว่า ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidization) [21-23] ช่วงการไหลนี้จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของของไหลปั่นป่วนเข้ามีความเร็วอยู่ระหว่างความเร็ว 2 ค่า คือ ความเร็วที่ทำให้เกิดขนาดของความดันกวดแกว่งในกระบวนการที่มีค่าสูงสุด (Transition velocity,  $U_c$ ) และ ความเร็วที่ทำให้ขนาดความดันกวดแกว่งมีขนาดต่ำที่สุดจนเข้าสู่ภาวะคงตัว (Critical velocity,  $U_k$ ) ลักษณะการเคลื่อนไหวภายในเบตแบบปั่นป่วนจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

1. Dense phase คือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น จะอยู่ด้านล่างของหอตดลอง
2. Dilute phase คือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง จะอยู่ด้านบนของหอตดลอง

ความเร็วที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะอยู่ในช่วงระหว่าง  $U_c$  และ  $U_k$  โดยสามารถหาค่าได้ตามสมการดังต่อไปนี้ [24, 25]

$$U_c = \frac{0.565 \mu_g Ar^{0.461}}{\rho_g d_p} \quad (2.5)$$

$$U_k = \frac{1.310 \mu_g Ar^{0.450}}{\rho_g d_p} \quad (2.6)$$

$$\text{เมื่อ } Ar = \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g d_p^3}{\mu_g^2} \quad (2.7)$$

$U_c$  คือ ความเร็วที่ทำให้เกิดความดันกวดแกว่งที่มีค่าสูงสุด (เมตรต่อวินาที)

$U_k$  คือ ความเร็วที่ทำให้เกิดความดันกวดแกว่งที่มีค่าต่ำที่สุด (เมตรต่อวินาที)

การดำเนินการในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนอาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วนที่ลอยหลุดติดไปกับวัฏภาคแก๊ส โดยจะพิจารณาว่า อนุภาคของแข็งที่สูญหายออกจากระบบมีอัตราสม่ำเสมอ โดย อัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งในช่วงนี้เรียกว่า Elutriation rate และ



ความเร็วที่ทำให้อนุภาคของแข็งหลุดลอยออกจากกระบวนเรียกว่า ความเร็วปลาย (Terminal velocity;  $U_t$ ) โดย ค่าคงที่  $Ar$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$U_t = \frac{\mu_g \left(\frac{Ar}{7.5}\right)^{0.666}}{\rho_g d_p} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $U_t$  คือ ความเร็วปลาย (เมตรต่อวินาที)

- **ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization)**

เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะทำให้เบดจะมีการขยายตัวจนไม่สามารถระบุพื้นที่ผิวหน้าของเบดได้ ที่บริเวณกลางของหอตลอดจะมีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง และมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวเดียวกับทิศทางการไหลของของไหล แต่จะมีอนุภาคของแข็งอย่างหนาแน่นบริเวณผนังของหอตลอด โดยจะมีการเคลื่อนที่ในทิศที่สวนทางกับการเคลื่อนที่ของของไหล การดำเนินการในช่วงการไหลนี้อาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วนหลุดออกไปทางด้านบนของหอตลอด ในกรณีที่มีการนำอนุภาคที่หลุดออกไปป้อนกลับเข้ามาในระบบจะเรียกกระบวนการแบบนี้ว่า ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed; CFB) ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (Transport velocity ;  $U_{tr}$ ) ถูกเสนอโดย Monazam และคณะ [26] ดังนี้ และ โดยค่าคงที่  $Ar$  คำนวณได้จากสมการที่ 2.7

$$U_{tr} = \frac{2.28 \mu_g Ar^{0.419}}{\rho_g d_p} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $U_{tr}$  คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (เมตรต่อวินาที)

- **ฟลูอิดเซชันแบบเบาบาง (Pneumatic transport fluidization)**

เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลจากช่วงการไหลแบบความเร็วสูงส่งผลให้ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งภายในหอตลอดเบาบางมาก โดยอนุภาคของแข็งจะถูกพาขึ้นไปพร้อมกับของไหล และ กระจายตัวในวัฏภาคแก๊ส ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลนี้คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบเบาบาง (Minimum pneumatic transport velocity:  $U_{mp}$ ) โดย Bi และ Fan [27] เสนอรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้

$$u_{mp} = 10.1(gd_p)^{0.347} \left(\frac{G_s}{\rho g}\right)^{0.310} \left(\frac{d_p}{D}\right)^{-0.139} Ar^{-0.021} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $U_{mp}$  คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบเบาบาง (เมตรต่อวินาที)

$G_s$  คือ ปริมาณของแข็งที่ป้อนเข้า (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหอตกลง (เมตร)

### 2.4.3 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิดไอเซน

#### ● ข้อดีของกระบวนการฟลูอิดไอเซน

1. พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง และ ของไหลสูง อีกทั้งมีการกวนผสมภายในสูง
2. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งที่เป็นรูปแบบเฉพาะ กล่าวคือ อนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงจะอยู่บริเวณด้านล่างของหอตกลง และ อนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นต่ำจะอยู่บริเวณด้านบนของหอตกลง
3. สามารถแยกอนุภาคของแข็งออกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้โดยไม่ต้องหยุดการดำเนินการ
4. นิยมใช้ในกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous)
5. ทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อน และ การถ่ายโอนมวลที่สูงกว่าการดำเนินการในภาวะเบตนิ่ง
6. เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานในการดำเนินการที่ต่ำ
7. เป็นกระบวนการที่มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง มีช่วงความเร็วของอัตราการป้อนของไหลที่กว้างจึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย [28]

#### ● ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิดไอเซน

1. ระยะเวลาที่อนุภาคของแข็งอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์สั้น จึงอาจจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบได้แต่สามารถแก้ไขปัญหาได้โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ลำดับขั้น
2. เกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ หรือ การรวมกันระหว่างฟองแก๊ส ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและ ของเหลวลดลง
3. เกิดการผสมที่ดีในทิศทางตามแนวแกน (Vertical) มากกว่าการผสมในทิศทางตามแนวนอน (Horizontal) จึงอาจจะส่งผลกระทบต่อความไม่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ที่ได้
4. อนุภาคของแข็งภายในกระบวนการมีขนาดไม่สม่ำเสมอ หรือ มีขนาดเล็กกลง เนื่องจาก การชนกันของอนุภาคของแข็ง หรือ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์

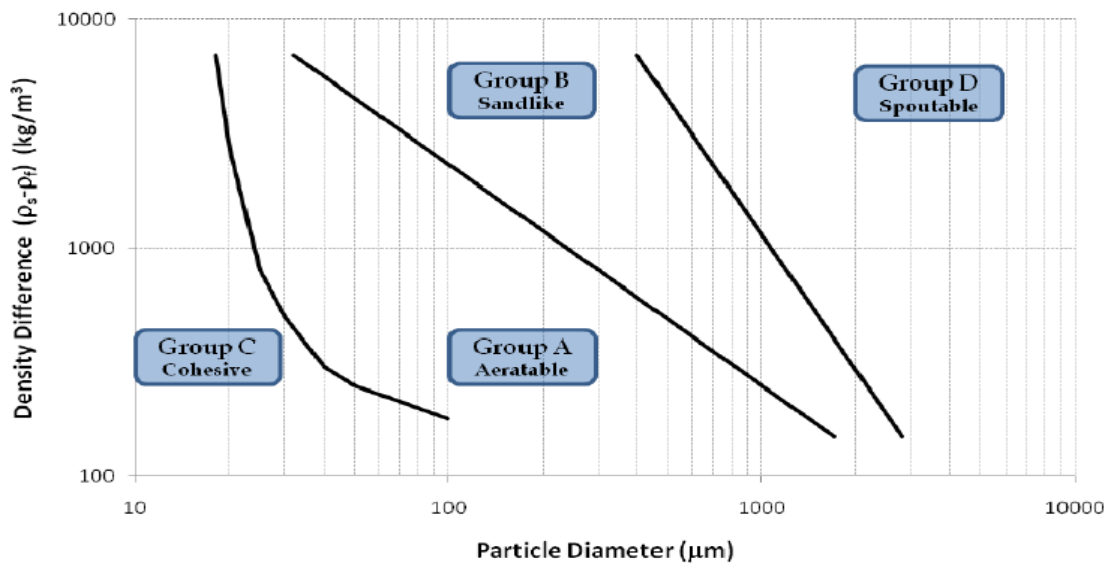
5. เกิดการสึกกร่อนของเครื่องปฏิกรณ์เนื่องจากการชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนังของเครื่องทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง
6. ไม่สามารถใช้กับอนุภาคของแข็งที่เปียก หรือ เหนียว เนื่องจากอนุภาคของแข็งเหล่านั้นจะรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่
7. ในระหว่างการดำเนินการอาจมีของแข็งบางส่วนหลุดออกมาจากระบบ จึงต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อกักเก็บอนุภาคเหล่านั้น [28]

## 2.5 การประยุกต์ใช้การก่อการไหลกับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากงานวิจัยของ Jongarklang และ คณะ [29] ได้ศึกษาผลของรูปแบบการไหลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต และ โซเดียมคาร์บอเนต โดยทำการศึกษารูปแบบการไหลทั้งหมด 5 แบบ ได้แก่ เบนนิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊ส ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน และ ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง จากผลการทดลอง พบว่าการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยดำเนินการในภาวะเบนนิ่งจะมีเวลาในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นานที่สุด เมื่อพิจารณาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเท่ากัน สำหรับการดำเนินการในรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊สฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เรียงจากน้อยไปมากตามลำดับ แม้ว่า ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่งฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนจะให้ผลของระยะเวลาในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระยะเวลาใกล้เคียงกัน แต่ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนจะก่อให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคของแข็ง การผสมภายในที่สูงกว่าฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง สำหรับรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูงเป็นรูปแบบการไหลเดียวที่ใช้ตัวดูดซับมากกว่ารูปแบบการไหลอื่น เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านระบบสูงกว่ารูปแบบการไหลอื่น จึงทำให้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับสั้นเกิดไปจึงเกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดี

## 2.6 การแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็ง

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้นว่าขนาดของอนุภาคของแข็งส่งผลต่อลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการฟลูอิดเซชัน และ วิธีที่ใช้ในการจำแนกประเภทของอนุภาคของแข็งที่นิยมใช้คือ วิธีการของ Geldart ซึ่งจำแนกอนุภาคของแข็งได้เป็น 4 กลุ่ม [28] ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนผังการแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็งด้วยวิธี Geldart [30]

- การแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็ง Geldart A

อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดไลเซชันได้ดี โดยจะเกิดการขยายตัวของเบด เมื่อความเร็วของของไหลมีค่าเท่ากับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไลเซชัน และ เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้นจะเริ่มสังเกตเห็นฟองแก๊สในระบบได้ อนุภาคของแข็งประเภทนี้นิยมใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี (FCC)

- การแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็ง Geldart B

อนุภาคของแข็งชนิดนี้จะเกิดการฟลูอิดไลเซชันได้ดีมาก โดยจะสังเกตเห็นฟองแก๊สทันทีที่ความเร็วของของไหลป้อนเข้ามีค่าเท่ากับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการฟลูอิดไลเซชัน โดยอนุภาคในกลุ่มนี้นิยมใช้ในกระบวนการเผาไหม้ หรือ การผลิตแก๊ส เช่น ทราย โดยจะใช้ทรายช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ภายในเครื่องปฏิกรณ์

- การแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็ง Geldart C

อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้มีขนาดเล็กมากทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมีค่าสูง จึงเกิดการฟลูอิดไลเซชันได้ยากมาก เช่น แป้ง และ ผงแก้ว ดังนั้น การนำอนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการจึงค่อนข้างยาก

- การแบ่งประเภทของอนุภาคของแข็ง Geldart D

อนุภาคของแข็งจะมีขนาดใหญ่ และ มีความหนาแน่นมาก สำหรับกลุ่มนี้ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นได้ช้ากว่ากลุ่มอื่นและเกิดช่องว่างที่สามารถทำให้แก๊สของไหลพุ่งผ่านขึ้นมาได้ง่าย ส่วนมากอนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้จะนำมาประยุกต์ใช้กับการอบแห้ง เช่น ข้าว หรือ เมล็ดกาแฟ เป็นต้น

## 2.7 จลนศาสตร์ของการดูดซับ

สำหรับกระบวนการต่างๆที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจำเป็นที่จะต้องพิจารณาทั้งในประสิทธิภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ และ อัตราการเกิดปฏิกิริยาควบคู่กันไป เนื่องจากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์จะพิจารณาปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ หรือ ความสามารถในการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ ส่วนสมการจลนศาสตร์การดูดซับจะพิจารณาอัตราการเกิดปฏิกิริยา หรือ ระยะเวลาของกระบวนการที่เกิด ดังนั้นในการออกแบบ หรือ สังเคราะห์ตัวดูดซับชนิดใหม่ การหาสมการจลนศาสตร์การดูดซับจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

งานวิจัยนี้พิจารณารูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และ แบบจำลองการเสื่อมสภาพ

- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

สมการจลนศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order) จากสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ เนื่องจาก การดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับ [31]



- เมื่อ  $A$  คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)  
 $S$  คือ ตัวดูดซับ (Adsorbate)  
 $A * S$  คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound)

สามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.12)$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.13)$$

- เมื่อ  $k_1$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที่<sup>-1</sup>)  
 $q_t$  คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  
 $q_e$  คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับเมื่อ เวลา  $\rightarrow \infty$  (มิลลิกรัมต่อกรัม)

#### - แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second order) เป็นอีกหนึ่งสมการจลนศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับบนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และ เป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ [32]



- เมื่อ  $A$  คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)  
 $S$  คือ ตัวดูดซับ (Adsorbate)  
 $A * S_2$  คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound)

สามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียมอันดับสองได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.15)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e} \quad (2.16)$$

- เมื่อ  $k_2$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที่ต่อมิลลิกรัม)  
 $q_t$  คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$q_e$  คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับเมื่อ เวลา  $\rightarrow \infty$  (มิลลิกรัมต่อกรัม)

- **แบบจำลองการเสื่อมสภาพ**

ในขณะที่เกิดปฏิกิริยาจะมีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวอาจจะปกคลุมอยู่บนผิวของตัวดูดซับ หรือ อยู่ในรูพรุนของตัวดูดซับ ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวดูดซับ และ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดต่ำลง ดังนั้น การปกคลุมของผลิตภัณฑ์บนผิวของตัวดูดซับ ส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาลดลง แบบจำลองการเสื่อมสภาพจึงได้เพิ่มพจน์ในการพิจารณาผลของการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับในรูปของความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็ง [29] โดยอยู่ภายใต้สมมุติฐานดังต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยาเกิดที่ภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal)
2. ไม่มีการถ่ายโอนมวลภายนอก
3. ระบบอยู่ในภาวะเสมือนคงตัว (Pseudo-steady state)
4. การเสื่อมสภาพของตัวดูดซับจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน
  - ปฏิกิริยาอันดับ 1 ( $n = 1$ ) เนื่องจาก ตำแหน่งที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา (active site) ถูกปกคลุมด้วยสารผลิตภัณฑ์
  - ปฏิกิริยาอันดับ 0 ( $m = 0$ ) เนื่องจาก ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดซับ

สมการแบบจำลองการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ พิจารณาที่ ( $m=0, n=1$ )

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(\frac{-k_0 W}{Q_0} * \exp(-k_d t)\right) \quad (2.17)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{C}{C_0}\right)\right) = \ln\left(\frac{k_0 W}{Q_0}\right) - k_d t \quad (2.18)$$

เมื่อ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (%)

$C$  คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก (%)

$k_0$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล นาที)

$k_d$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการเสื่อมสภาพ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล นาที)

$Q_0$  คือ อัตราการไหลของแก๊สป้อนเข้า (ลูกบาศก์เมตรต่อนาที)

$W$  คือ น้ำหนักของตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัม)

$t$  คือ เวลา (นาที)

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang และ คณะ [33] สังเคราะห์ออลูมินาที่มีขนาดรูพรุนปานกลางซึ่งมีพื้นที่ผิวสูง โดยใช้วิธีการตกตะกอนร่วม จากการศึกษาค่าความเป็นกรด-เบส พบว่า เมื่อค่าความเป็นกรด-เบสเพิ่มขึ้น จาก 8 เป็น 9.5 จะทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่ที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 10 จะทำให้พื้นที่ผิวลดลง ดังนั้น ค่าความเป็นกรด-เบสที่เหมาะสม คือ 9.5 ส่วนผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิว และ ปริมาตรรูพรุนลดลง แต่ขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาก็จะส่งผลต่อเฟสของออลูมินา ดังนั้น การเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับ การนำออลูมินาไปประยุกต์ใช้งาน

Guo และ คณะ [34] ทดลองใช้โพแทสเซียมเฟลด์สปาร์เป็นตัวรองรับ เนื่องจากมีองค์ประกอบของสารหลายตัวที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ และ ใช้วิธีอิมเพรกเนชันในการเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงไปบนตัวรองรับดังกล่าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้โดยที่ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงน้อยมาก แต่ความสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ยังไม่เป็นที่น่าพอใจเนื่องจากตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นยังมีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ

Hwang และ คณะ [35] ทดลองใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตอิมเพรกลงบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ และ เติมตัวสนับสนุน คือ โพแทสเซียมไนเตรต และ โซเดียมไนเตรต จาก การทดลอง พบว่า เมื่อความดันสูงขึ้นทำให้การดูดซับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น อีกทั้ง การเติมตัวสนับสนุนลงไปจะช่วยให้แมกนีเซียมออกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยเปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนต ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ตัวดูดซับนี้ไม่เหมาะกับการนำกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับในครั้งที่สองต่ำลงมาก และ การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับต้องทำให้อุณหภูมิสูงจึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเป็นอย่างมาก



Lee และ คณะ [36] สังเคราะห์ตัวดูดซับของแข็งโดยใช้วิธีการเตรียมตัวดูดซับแบบตกตะกอนโดยเติมโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ลงไปในอัตราส่วนต่างๆ และใส่แมกนีเซียมในรูปสารประกอบไนเตรดลงไป ผลการเตรียมดังกล่าวทำให้ได้ตัวดูดซับของแข็งที่ได้มีองค์ประกอบของโพแทสเซียมไนเตรดซึ่งเป็นผลจากการรวมตัวกัน หลังกระบวนการเตรียมตัวดูดซับทำให้ตัวดูดซับของแข็งที่ได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับอื่นๆ ที่ทดลองที่สภาวะเดียวกัน อีกทั้งเมื่อนำตัวดูดซับของแข็งกลับมาใช้ใหม่ยังมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดีอีกด้วย

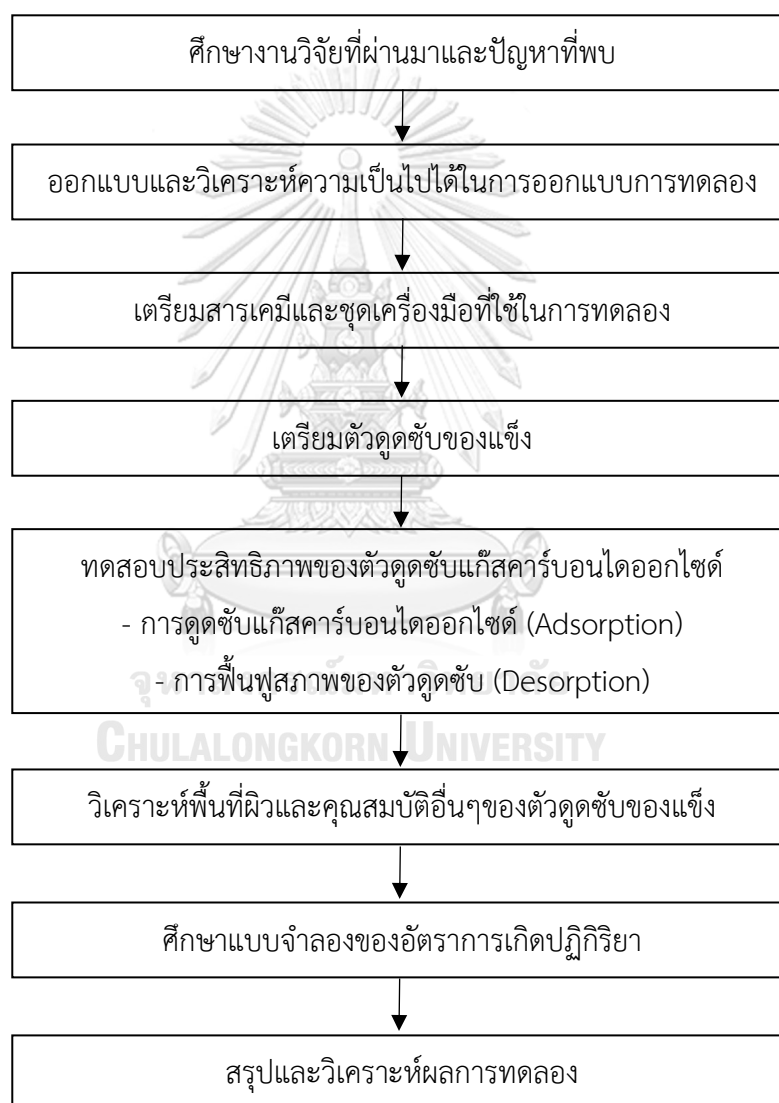
Guo และ คณะ [37] ศึกษา รูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับจากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลองจริง เมื่อทำการทดลองโดยให้ปริมาณไอน้ำขาเข้า 1 เปอร์เซ็นต์ รูปแบบความสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับกระบวนการ คือ รูปแบบที่พิจารณาการถ่ายโอนมวลเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาในแนวเส้นตรง (linear driving force mass transfer model(LDF)) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำขาเข้าเป็น 2 เปอร์เซ็นต์ พบว่า รูปแบบความสัมพันธ์ที่เหมาะสม คือ รูปแบบแกนในหดตัว (shrinking core model) จึงสรุปได้ว่ารูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับที่เหมาะสมอาจเปลี่ยนไปได้เมื่อทำการทดสอบที่สภาวะต่างกันจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษารูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาควบคู่ไปกับการพัฒนาตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Jongartklang และ คณะ [29] สังเคราะห์ตัวดูดซับโดยใช้วิธีอิมเพกโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงบนตัวรองรับอลูมินา โดยเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลจากการสร้างรูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ พบว่า รูปแบบความสัมพันธ์การพิจารณาผลของการลดลงของการดูดซับ (Deactivated kinetic model) ให้รูปแบบสมการที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากที่สุดจากการพิจารณาทุกตัวแปร (ความเร็วของแก๊สขาเข้า อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ และ ปริมาณไอน้ำในกระบวนการดูดซับ เพราะรูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวพิจารณาผลของการลดลงของการดูดซับเนื่องจากการเกิดผลิตภัณฑ์ที่เกาะอยู่บนผิวของตัวดูดซับซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับต่ำลงเมื่อเวลาผ่านไป

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง ดังนั้น ขั้นตอนในการศึกษาจึงครอบคลุมตั้งแต่กระบวนการเตรียมตัวดูดซับของแข็ง การทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับ รวมทั้งการศึกษาแบบจำลองความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตัวดูดซับของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 ตัวแปรที่ศึกษา

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า กระบวนการนี้มีต้นทุนในการผลิต หรือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ กระบวนการที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้กระบวนการนี้ยังไม่แพร่หลาย หรือ ถูกนำไปใช้จริงเพียงแค่โรงงานขนาดใหญ่เท่านั้น จากปัญหาดังกล่าวจึงทำให้ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงปัญหาทางด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จึงเลือกใช้ตัวรองรับ โลหะกัมมันต์ รวมทั้งสารเคมีอื่น ๆ ที่มีราคาถูก รวมทั้ง กระบวนการที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ก็เป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนมาก เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ง่ายขึ้น

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เนื่องจากวิธีนี้นิยมใช้ในการออกแบบการทดลองที่ต้องการศึกษาหลายตัวแปร และ ศึกษาอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร การออกแบบทดลองแบบนี้เป็นการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการอธิบายอิทธิพลของหลายตัวแปร โดย ตัวแปรที่จะศึกษาทั้งหมด แบ่งได้เป็น 3 ตัวแปร ดังนี้

- สารละลายเบสที่แตกต่างกัน โดยเรียงจากเบสแก่ไปสู่เบสอ่อน

สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )

สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )

สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )

- ค่าความเป็นเบสของสารละลายที่แตกต่างกัน

pH = 8

pH = 10

pH = 12

- ระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน

ระยะเวลาในการเขย่า = 12 ชั่วโมง

ระยะเวลาในการเขย่า = 18 ชั่วโมง

ระยะเวลาในการเขย่า = 24 ชั่วโมง

จากการใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลในการศึกษาผลของตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปรข้างต้น เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อได้ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงที่สุดแล้ว งานวิจัยนี้จะทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุด ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียมได้ โดยจะพิจารณา 2 ตัวแปร ดังนี้

- **ระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่าที่แตกต่างกัน**

จากเดิมที่ศึกษาระยะเวลาในการเขย่า 3 ค่า จึงศึกษาเพิ่มเติม 2 ค่า คือ

ระยะเวลาในการเขย่า เท่ากับ 30 ชั่วโมง

ระยะเวลาในการเขย่า เท่ากับ 36 ชั่วโมง

- **อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ**

อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับ 60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับ 70 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาผลของค่า pH ในการเตรียมสารละลายเบสที่แตกต่างกันเพิ่มเติม เนื่องจากข้อจำกัดในการวัดค่าความเป็นเบสของเครื่อง pH meter ที่สามารถวัดค่าความเป็นเบสได้อย่างแม่นยำที่ค่าสูงสุดเท่ากับ pH =12

### 3.2 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 สารเคมี

- แกมมา-อลูมิน่า ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 101.90 กรัมต่อโมล (AR grade, Merck)
- โพแทสเซียมคาร์บอเนตปราศจากน้ำ ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 138.21 กรัมต่อโมล (AR grade, Sigma-Aldrich)

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 39.98 กรัมต่อโมล (AR grade, ศึกษารัณศาสตร์พาณิชย์)
- แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 35.04 กรัมต่อโมล (AR grade, ศึกษารัณศาสตร์พาณิชย์)
- แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 74.09 กรัมต่อโมล (AR grade, ศึกษารัณศาสตร์พาณิชย์)
- โซเดียมคาร์บอเนตปราศจากน้ำ (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 105.98 กรัมต่อโมล (AR grade, Sigma-Aldrich)

### 3.2.2 แก๊ส

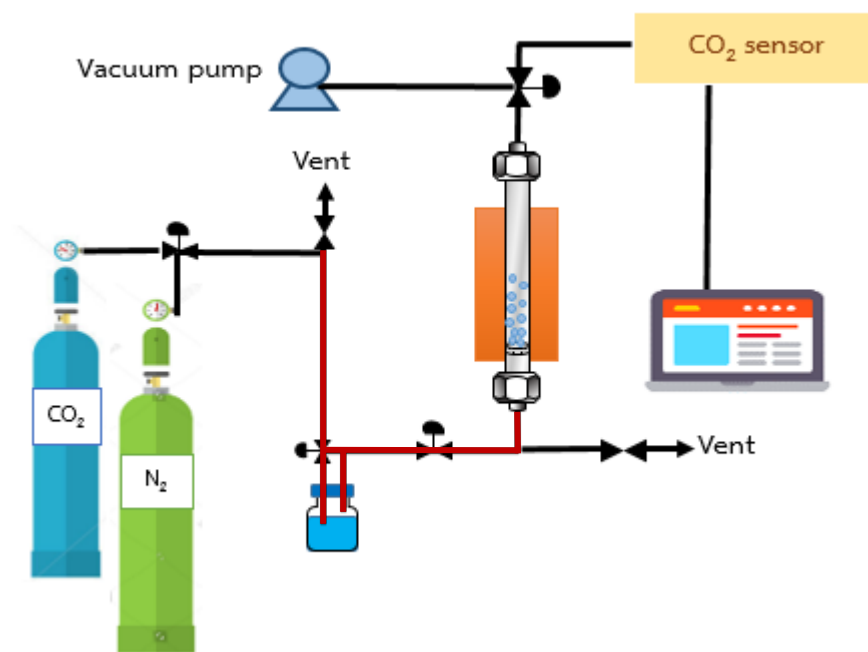
- แก๊สไนโตรเจน 99.99% (ไทย เจแปน แก๊ส จำกัด)
- แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 12% แก๊สไนโตรเจน 88% (ไทย เจแปน แก๊ส จำกัด)

### 3.2.3 อุปกรณ์

- **ตัวควบคุมการไหลของแก๊ส**  
ตัวควบคุมอัตราการไหล รุ่น K-1013 ช่วงการไหล 1-10 ลิตรต่อนาที  
ตัวควบคุมการไหล รุ่น K-1014 ช่วงการไหล 2-20 ลิตรต่อนาที
- **เซนเซอร์วัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์**  
CO<sub>2</sub> มิเตอร์ รุ่น K33-BLG ช่วงความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้ 0-30%
- **ตัวควบคุมอุณหภูมิ**  
ตัวควบคุมอุณหภูมิรุ่น TCL ช่วงอุณหภูมิ 0-300 องศาเซลเซียส
- **แผ่นให้ความร้อน**  
แผ่นให้ความร้อนใยแก้ว อุณหภูมิสูงสุด 250 องศาเซลเซียส
- **ท่อ ข้อต่อ และ วาล์ว**  
ชุดเครื่องมือจาก Swagelok
- **เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด**  
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดทำจากแก้วทนความร้อนสูง 650 องศาเซลเซียส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา 2 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่กว้างที่สุด 5 เซนติเมตร และ ความสูง 80 เซนติเมตร

- เครื่องมือวัดค่าความเป็นเบส (pH meter)

pH meter รุ่น S210, Kit



รูปที่ 3.2 เครื่องมือสำหรับดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ระบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดสำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ คือ ส่วนป้อนแก๊สเข้า ส่วนคอลัมน์ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ ส่วนบันทึกผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ส่วนป้อนแก๊สเข้าประกอบไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน และ ขวดบรรจุน้ำสำหรับผลิตไอน้ำที่จะใช้ในระบบ ส่วนคอลัมน์ดูดซับจะใช้คอลัมน์แก้ว เพื่อให้เห็นการไหลเวียนของตัวดูดซับได้ และ มีชุดให้ความร้อนที่มีฉนวนหุ้มอยู่เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลองดังแสดงในเส้นสีแดงจากรูปที่ 3.2 โดยตัวเครื่องจะมีการติดตั้งวาล์วนิรภัยเพื่อป้องกันกรณีมีแก๊สในระบบเกินไปจะทำให้ความดันในระบบสูงขึ้นอย่างรวดเร็วอันจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อส่วนคอลัมน์ดูดซับ ในการควบคุมระบบขณะทำการทดลองจะควบคุมการเปิดปิดวาล์วผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปโดยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้มีเปอร์เซ็นต์การเปิด-ปิดวาล์วตามที่ต้องการ รวมทั้ง มีอัตราการไหลของแก๊สที่เข้าสู่ระบบคงที่ และมีความแม่นยำในทุกๆ ชุดการทดลอง นอกจากนี้ ส่วนของคอลัมน์ดูดซับจะเชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศเพื่อปรับความดันภายในระบบ และ ช่วยดูดอากาศออกจากคอลัมน์ก่อนการทดลองเพื่อให้ในระบบไม่มีแก๊สอื่น ๆ ปนเปื้อน ส่วนบันทึกผลการทดลอง คือ บริเวณ

ที่เชื่อมต่อแก๊สขาออกจากคอลัมน์เข้าไปยังอุปกรณ์วัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ถ้าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าเท่ากับขาออกแล้ว แสดงว่า ตัวดูดซับไม่สามารถดูดซับได้อีกดังนั้น ตัวดูดซับที่ใช้งานแล้วจะถูกนำออกจากคอลัมน์แล้วนำไปผ่านกระบวนการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่ต่อไป

### 3.3 การทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ

ในงานวิจัยนี้จะเตรียมตัวดูดซับโดยเลือกใช้วิธีการเตรียมแบบอิมเพรกเนชัน ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมที่นิยมใช้เตรียมตัวดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมคือ แกมมา-อลูมินาแบบผงเป็นตัวรองรับ และ โพลเทสเซียมคาร์บอเนตเป็นโลหะกัมมันต์ โดยงานวิจัยนี้จะเตรียมตัวดูดซับของแข็งในภาวะที่แตกต่างกัน ดังนี้

- การเตรียมตัวดูดซับแบบอิมเพรกเนชัน
- การเตรียมตัวดูดซับแบบอิมเพรกเนชันในภาวะเบส

ขั้นตอนในการเตรียมตัวดูดซับแบบอิมเพรกเนชัน จะแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การทำความสะอาดแกมมา-อลูมินา ทำโดยนำแกมมา-อลูมินาไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำและสิ่งเจือปนในสารตั้งต้น

ขั้นตอนที่ 2 การอิมเพรกเนชัน ทำโดยนำแกมมา-อลูมินาแบบผง และ โพลเทสเซียมคาร์บอเนต อย่างละ 5 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และ นำไปเขย่าในเครื่องเขย่าอัตโนมัติตามระยะเวลาที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 3 การกรองดูดตัวดูดซับที่ผ่านการอิมเพรกเนชันมาแล้ว จะนำมากรองดูด จะได้ตัวดูดซับเปียก

ขั้นตอนที่ 4 การอบแห้งตัวดูดซับ เนื่องจากในกระบวนการอิมเพรกเนชัน และ การกรองดูดมีน้ำเป็นองค์ประกอบในกระบวนการ จึงต้องมีการนำตัวดูดซับที่เตรียมได้มากำจัดความชื้นออก โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 5 การเผาตัวดูดซับ เป็นการกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเจือปนมาในกระบวนการเตรียม และ เป็นการเปลี่ยนวัฏภาคของสารตั้งต้นให้อยู่ในรูปที่พร้อมนำไปใช้งาน โดยทำการเผาที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้ภาวะบรรยากาศ

- **ขั้นตอนในการเตรียมตัวดูดซับแบบอิมเพรกเนชันในภาวะเบส** จะแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 1 การทำความสะอาดแกมมา-อลูมินา ทำโดยนำแกมมา-อลูมินาไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำและสิ่งเจือปนในสารตั้งต้น

ขั้นตอนที่ 2 การอิมเพรกเนชัน ทำโดยนำแกมมา-อลูมินาแบบผง และ โฟแทสเซียมคาร์บอเนต อย่างละ 5 กรัม เติมสารละลายเบสที่ค่าความเป็นเบสต่างๆ ปริมาตร 25 มิลลิลิตร และ นำไป เขย่าในเครื่องเขย่าอัตโนมัติตามระยะเวลาที่แตกต่างกันไปตามตัวแปรต้น

ขั้นตอนที่ 3 การกรองดูดตัวดูดซับที่ผ่านการอิมเพรกเนชันมาแล้วจะนำมากรองดูด และ ล้าง ด้วยน้ำปราศจากไอออนให้สะอาด โดยจะล้างจนกว่าค่า pH ของน้ำที่ใช้ล้างมีค่าเท่ากับ 7 เพื่อ กำจัดสารละลายเบสที่ใส่ลงไปในการบวนการเตรียมไม่ให้หลงเหลืออยู่บนตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 การอบแห้งตัวดูดซับ เนื่องจากในกระบวนการอิมเพรกเนชัน และ การกรองดูดมี น้ำเป็นองค์ประกอบในกระบวนการ จึงต้องมีการนำตัวดูดซับที่เตรียมได้มากำจัดความชื้นออก โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

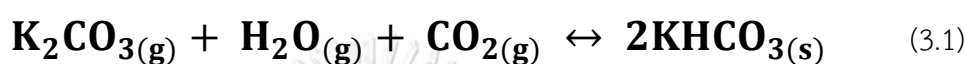
ขั้นตอนที่ 5 การเผาตัวดูดซับ เป็นการกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเจือปนมาในกระบวนการเตรียม และ เป็นการเปลี่ยนวัฏภาคของสารตั้งต้นให้อยู่ในรูปที่พร้อมนำไปใช้งาน โดยทำการเผาที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้ภาวะบรรยากาศ

### 3.3.2 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นการดูดซับในระบบปิด โดยมีการป้อน แก๊ส 2 ชนิดในกระบวนการ คือ แก๊สไนโตรเจน 99.99% และ แก๊สผสมระหว่างไนโตรเจน และ คาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์ 12.00% ก่อนจะเริ่มกระบวนการดูดซับจะต้องมี การทำความสะอาดระบบโดยป้อนแก๊สไนโตรเจนแห้งเข้าไปเพื่อให้ภายในระบบไม่มีแก๊สชนิดอื่น เจือปน จากนั้น จะทำการบรรจุตัวดูดซับปริมาณ 5 กรัมไว้ในคอลัมน์แก้ว และ ดูดอากาศ ในคอลัมน์แก้วออกจนหมดโดยใช้ปั๊มสุญญากาศที่ติดตั้งไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.2 จากนั้น จะป้อน



แก๊สไนโตรเจนเปียกเพื่อทำให้ตัวดูดซับชื้นตามสมการดูดซับ ดังแสดงไว้ในสมการที่ 3.1 เนื่องจากปฏิกิริยานี้จำเป็นต้องใช้น้ำในการทำปฏิกิริยา หลังจากเตรียมตัวดูดซับชื้นแล้ว จะป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปียกเข้าไปในคอลัมน์ และ วัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนไปตามเวลา บันทึกค่าที่อ่านได้ สำหรับปริมาณไอน้ำในระบบขึ้นอยู่กับภาวะในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดัน และ ความชื้น จากข้อมูลที่บันทึกได้จะนำค่าที่ได้มาทำการคำนวณหาปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ 3.1



ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ภาวะการทดลอง	การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
อุณหภูมิ (K)	333
ความดัน (atm)	1
อัตราการไหลของแก๊ส (ลิตรต่อนาที)	5
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	5
ปริมาณไอน้ำในระบบ (%Vol)	11
รูปแบบการไหล	ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน

### 3.3.3 การฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่นิยมเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ตัวดูดซับที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ หรือ สามารถฟื้นฟูสภาพได้ เพื่อเป็นการลดต้นทุนของกระบวนการ รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียจากอุตสาหกรรมอีกด้วย ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด โดยวิธีในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับนั้นมีหลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้ได้แก่ การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยการให้ความร้อน และ การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยการลดความดันของระบบ

- การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการให้ความร้อน

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ตัวดูดซับที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดย จะให้ความร้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อเผาสารผลิตภัณฑ์ หรือ สิ่งเจือปนอื่นๆ ในระหว่างการดำเนินการออกจากตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ตัวดูดซับ ก่อนจะนำกลับไปใช้ในกระบวนการต่างๆ อีกครั้ง วิธีการนี้สามารถกำจัดสารผลิตภัณฑ์ หรือ สิ่งเจือปนได้ค่อนข้างดี แต่มีความต้องการใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูง และ อุณหภูมิที่เลือกใช้ในขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพก็จะแตกต่างกันไปตามชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ตัวดูดซับ รวมทั้งระยะเวลาในการใช้งานอีกด้วย จึงจำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ หรือ ผู้มีประสบการณ์ในการพิจารณาหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

- การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการลดความดันของระบบ

วิธีการนี้เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่นิยมใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ตัวดูดซับที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม แต่ได้รับความนิยมน้อยกว่าการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการให้ความร้อน เนื่องจาก วิธีการนี้สามารถกำจัดกำจัดสารผลิตภัณฑ์ หรือ สิ่งเจือปนที่เกาะอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วได้ต่ำกว่า เนื่องจาก ในการเกิดปฏิกิริยาสารผลิตภัณฑ์บางตัวมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับที่สูง หรือ เกิดการดูดซับเชิงเคมี ดังนั้น จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูงในการทำลายแรงยึดเหนี่ยวดังกล่าว เพื่อกำจัดผลิตภัณฑ์ออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ การฟื้นฟูสภาพโดยการลดความดันของระบบจะใช้หลักของสมดุลเคมีในการฟื้นฟูสภาพ โดยการลดความดันของระบบ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับ และ มีการปลดปล่อยแก๊สที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวออกมาได้ ซึ่งข้อดีของกระบวนการนี้คือ มีอัตราการใช้พลังงานต่ำกว่า แต่ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพจะเป็นอย่างไรก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ ตัวดูดซับด้วย

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการลดความดันของระบบ เนื่องจาก วิธีนี้เป็นวิธีที่มีความต้องการใช้พลังงานที่ต่ำ อีกทั้ง วิธีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการลดความดันของระบบนี้เป็นวิธีที่ยังไม่มีการศึกษาว่าเหมาะสมกับตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ในงานวิจัยนี้หรือไม่ โดยจะลดความดันของระบบจนถึง 0.5 ความดันบรรยากาศซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่สามารถลดความดันของระบบได้ และ ภาวะการดำเนินการอื่นๆ แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ภาวะการทดลอง	การฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
อุณหภูมิ (เคลวิน)	333
ความดัน (บรรยากาศ)	0.5
อัตราการไหลของแก๊ส (ลิตรต่อนาที)	-
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	5
ปริมาณไอน้ำในระบบ (%)	-
รูปแบบการไหล	-

### 3.4 การคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากค่าที่บันทึกได้จากอุปกรณ์วัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาสามารถนำมาคำนวณความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามสมการที่ 3.2

$$q = \frac{1}{m} \int_0^t Q(C_{in} - C_{out}) dt \quad (3.2)$$

เมื่อ  $q$  คือ ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ)

$m$  คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

$C_{in}$  คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ขาเข้า (% มวล) (-)

$C_{out}$  คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ขาออก (% มวล) (-)

$Q$  คือ อัตราการไหลของแก๊สโดยมวล (กรัมต่อวินาที)

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (วินาที)

### 3.5 เครื่องมือวิเคราะห์

- **เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน ( $N_2$  adsorption-desorption technique, BET)**  
เครื่องรุ่น Micromeritics ASAP 2020 จากศูนย์วิจัยเชื้อเพลิงฯ จุฬาฯ สระบุรี  
ใช้วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และ ปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ
- **เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะกัมมันต์บนตัวรองรับ (X-ray fluorescence spectrometer, XRF)**  
เครื่องรุ่น S8 Tiger Bruker จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ใช้วิเคราะห์หาปริมาณ โฟสเฟสซีเมนต์คาร์บอนที่ถูกล้อมเพรกกลงบนแกมมา-อลูมินา
- **เครื่องวิเคราะห์สัณฐานวิทยา (Scanning electron microscope, SEM)**  
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-IT300 InTouchScope™ จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ใช้หาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับของแข็งที่กำลังขยาย 3,000 เท่า
- **เครื่องวิเคราะห์ค่าความเป็นเบสของตัวดูดซับ (Temperature Program Desorption,  $CO_2$ -TPD)**  
เครื่องรุ่น Micromeritics AutoChem II 2920 จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ใช้วิเคราะห์หาค่าความเป็นเบสบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
- **เทคนิคเอกเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD)**  
เครื่องรุ่น Bruker D8 Advanced diffractometer จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ใช้ตรวจสอบองค์ประกอบเชิงคุณภาพของตัวดูดซับทั้งก่อน และ หลังการดูดซับ

### 3.6 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistic Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีทางสถิติ [38] สำหรับขั้นตอนในการออกแบบการทดลองจะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนในการดำเนินการดังแสดงต่อไปนี้

### 3.6.1 ทำความเข้าใจปัญหา

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หรือ จากผู้เชี่ยวชาญในด้านที่เราสนใจศึกษา และ การหาแนวทางในการพัฒนา หรือ การแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น โดยกำหนดเป็น วัตถุประสงค์ของการทดลอง

### 3.6.2 เลือกตัวแปรต้น ระดับ และ ขอบเขต

จากการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะศึกษาระหว่างการทำ การทดลอง กำหนดขอบเขตในการศึกษา และ กำหนดระดับที่จะศึกษา โดยต้องพิจารณาด้วยว่า จะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ได้อย่างไร รวมทั้งดูความเหมาะสมของเครื่องมือที่ใช้ สำหรับการทดลอง ที่มีจุดประสงค์เพื่อที่จะศึกษาผลของปัจจัยควรมีขอบเขตที่สนใจศึกษาให้กว้างมากๆ และ เมื่อจะ ศึกษาเพิ่มเติมว่าระดับใดดีที่สุด จึงค่อยลดขอบเขตในการศึกษาให้แคบลง

### 3.6.3 เลือกตัวแปรตาม

การเลือกตัวแปรตาม ผู้ทดลองจำเป็นต้องแน่ใจว่า ตัวแปรดังกล่าวสามารถให้ข้อมูล ที่เกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาได้ รวมทั้ง อุปกรณ์ที่ใช้มีความเหมาะสม มีความแม่นยำ ในการบันทึกผล

### 3.6.4 เลือกวิธีการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นหลัก โดย การออกแบบการทดลองเป็นการใช้เทคนิคทางสถิติขั้นสูง ในการปรับตั้งค่าภาวะของกระบวนการ ให้เป็นไปตามที่เราต้องการ ซึ่งสามารถเห็นข้อแตกต่างได้ชัดเจนระหว่างวิธีการทดลองโดยทั่วไป กับ เทคนิคของการออกแบบการทดลอง สำหรับวิธีการทดลองโดยทั่วไปมักเป็นการศึกษา แบบลองผิดลองถูก หรือ ใช้การปรับตั้งค่าของกระบวนการทีละค่า (one factor at A time) เช่น ตัวแปรที่สนใจมีทั้งหมด 2 ตัว คือ อุณหภูมิ และ ความดัน ในการทดลองจะเริ่มจากการ กำหนดให้ค่าความดันคงที่ที่ค่าใดค่าหนึ่ง และ ศึกษาอุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากนั้นเมื่อได้ ค่าอุณหภูมิที่ดีที่สุดจึงนำค่าอุณหภูมินั้นเป็นค่าคงที่ และศึกษาความดันที่แตกต่างกัน ซึ่ง การทดลองแบบนี้อาจจะเป็นการทำทดลองแบบซ้ำไปมาเรื่อยๆ กว่าจะได้ผลการทดลอง ที่บรรลุเป้าหมายนั้นค่อนข้างช้า สิ้นเปลืองทรัพยากร และ ไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการ ที่มีผลของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษา (Interaction effect) สำหรับการออกแบบ การทดลองที่นิยมใช้คือ การออกแบบการทดลองแบบเฟคทอเรียล (Full factorial) เนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธีนี้ เป็นวิธีที่สามารถอธิบายผลของตัวแปรต้นต่อตัวแปรตาม

ที่สนใจศึกษาได้อย่างครบถ้วน อีกทั้งยังสามารถอธิบายผลของอัตราการระหว่างตัวแปรต้นได้ ซึ่งสามารถแก้ไขข้อบกพร่องที่สำคัญของการทดลองโดยวิธีทั่วไป (one factor at A time) [38]

ตารางที่ 3.3 ชุดการทดลองทั้งหมดที่ใช้วิธีการออกแบบแบบแฟคทอเรียล

ลำดับ	ชนิดเบส	pH	เวลา (ชม.)	ลำดับ	ชนิดเบส	pH	เวลา (ชม.)
1	NaOH	8	12	19	NH <sub>4</sub> OH	8	12
2	NaOH	8	18	20	NH <sub>4</sub> OH	8	18
3	NaOH	8	24	21	NH <sub>4</sub> OH	8	24
4	NaOH	10	12	22	NH <sub>4</sub> OH	10	12
5	NaOH	10	18	23	NH <sub>4</sub> OH	10	18
6	NaOH	10	24	24	NH <sub>4</sub> OH	10	24
7	NaOH	12	12	25	NH <sub>4</sub> OH	12	12
8	NaOH	12	18	26	NH <sub>4</sub> OH	12	18
9	NaOH	12	24	27	NH <sub>4</sub> OH	12	24
10	Ca(OH) <sub>2</sub>	8	12	28	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8	12
11	Ca(OH) <sub>2</sub>	8	18	29	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8	18
12	Ca(OH) <sub>2</sub>	8	24	30	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8	24
13	Ca(OH) <sub>2</sub>	10	12	31	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	12
14	Ca(OH) <sub>2</sub>	10	18	32	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	18
15	Ca(OH) <sub>2</sub>	10	24	33	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	24
16	Ca(OH) <sub>2</sub>	12	12	34	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12	12
17	Ca(OH) <sub>2</sub>	12	18	35	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12	18
18	Ca(OH) <sub>2</sub>	12	24	36	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12	24

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Full factorial) โดยตัวแปรต้นที่ศึกษามีทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ สารละลายเบสที่แตกต่างกัน, ค่าความเป็นเบสที่แตกต่างกัน, ระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน สำหรับตัวแปรตามที่น่าสนใจ คือ ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ โดยจากตัวแปรข้างต้นจะสามารถออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 36 ชุดการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3

### 3.7 การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

ข้อมูลพื้นฐานที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระยะเวลาต่างๆ ดังนั้น ค่าที่ถูกบันทึกจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เตรียมด้วยวิธีอิมเพรกเนชันในภาวะเบส

#### 3.7.1 การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

จากสมการที่ 2.13 จะนำข้อมูลที่บันทึกได้มาพล็อตกราฟระหว่าง  $\ln(q_e - q_t)$  และ ระยะเวลา (t) จะสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา ( $K_1$ ) ได้จากค่าความชันของกราฟ (slope)

#### 3.7.2 การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

จากสมการที่ 2.15 จะนำข้อมูลที่บันทึกได้มาพล็อตกราฟระหว่าง  $1/q_t$  และ ระยะเวลา (t) จะสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา ( $K_2$ ) ได้จากการคำนวณโดยใช้จุดตัดแกนตั้ง (intercept) และ ค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อ เวลา  $\rightarrow \infty$

#### 3.7.3 การหาค่าคงที่ของปฏิกิริยาของแบบจำลองการเสื่อมสภาพ

จากสมการที่ 2.18 จะนำข้อมูลที่บันทึกได้มาพล็อตกราฟระหว่าง  $\ln(\ln(c_0/c))$  และ ระยะเวลา (t) จะสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา ( $K_d$ ) ได้จากค่าความชันของกราฟ (slope) และ จะสามารถหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา ( $K_0$ ) ได้จากการคำนวณโดยใช้จุดตัดแกนตั้ง (intercept) อัตราการไหลของแก๊สป้อนเข้า และ น้ำหนักของตัวดูดซับของแข็ง

จากหัวข้อที่ 3.7.1 – 3.7.3 จะนำค่าคงที่ของปฏิกิริยาที่ได้จากการคำนวณ และ เวลา มาแทนค่ากลับในสมการ เพื่อหาค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณ จากนั้นจะเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณ และ

ค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บันทึกได้จากเซนเซอร์วัดความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะพิจารณาความน่าเชื่อถือของค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination,  $R^2$ )





## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปรายผล

#### 4.1 ผลการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเตรียมตัวรองรับในภาวะที่เป็นเบส โดยใช้วิธีการเตรียมแบบตตะกอนร่วมจะทำให้ได้ตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าการเตรียมตัวรองรับในภาวะที่เป็นกลาง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเตรียมตัวดูดซับในภาวะเบส แต่ปรับเปลี่ยนกระบวนการเตรียมตัวดูดซับของแข็งเป็นกระบวนการเตรียมตัวดูดซับแบบอิมเพกเนชัน เนื่องจาก การเตรียมตัวดูดซับแบบนี้ใช้ระยะเวลาในการเตรียมต่ำกว่าการเตรียมตัวดูดซับแบบตตะกอนร่วม อีกทั้งขั้นตอนในการเตรียมไม่ซับซ้อน จึงง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

งานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียมในภาวะที่เป็นกลาง หรือ การเตรียมตัวดูดซับแบบดั้งเดิม (Conventional) และ การเตรียมตัวดูดซับที่ถูกออกแบบขึ้นมาใหม่จากการใช้วิธีเชิงแพททอเรียลในการออกแบบการทดลอง เพื่อให้ได้ชุดการทดลองที่สามารถอธิบายผลของตัวแปรต้น และ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต้นได้อย่างครอบคลุมชุดการทดลองของงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 36 ชุดการทดลอง และ ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเป็นตัวแปรตามที่สำคัญของงานวิจัยนี้ โดยผลการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียมในภาวะที่แตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ลำดับ	สารละลาย	ค่าความเป็นเบส	เวลาเขย่า (ชม.)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม CO <sub>2</sub> ต่อกรัมของตัวดูดซับ)
0	DI water	7	24	35.89
1	NaOH	8	12	28.71
2	NaOH	8	18	29.83
3	NaOH	8	24	43.68
4	NaOH	10	12	31.47
5	NaOH	10	18	32.06
6	NaOH	10	24	47.43

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ต่อ)

ลำดับ	สารละลาย	ค่าความเป็นเบส	เวลาเขย่า (ชม.)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม CO <sub>2</sub> ต่อกรัมของตัวดูดซับ)
7	NaOH	12	12	32.03
8	NaOH	12	18	37.37
9	NaOH	12	24	51.88
10	Ca(OH) <sub>2</sub>	8	12	21.65
11	Ca(OH) <sub>2</sub>	8	18	25.57
12	Ca(OH) <sub>2</sub>	8	24	34.69
13	Ca(OH) <sub>2</sub>	10	12	26.74
14	Ca(OH) <sub>2</sub>	10	18	33.24
15	Ca(OH) <sub>2</sub>	10	24	39.72
16	Ca(OH) <sub>2</sub>	12	12	30.72
17	Ca(OH) <sub>2</sub>	12	18	37.16
18	Ca(OH) <sub>2</sub>	12	24	43.39
19	NH <sub>4</sub> OH	8	12	23.53
20	NH <sub>4</sub> OH	8	18	32.97
21	NH <sub>4</sub> OH	8	24	35.91
22	NH <sub>4</sub> OH	10	12	28.65
23	NH <sub>4</sub> OH	10	18	34.88
24	NH <sub>4</sub> OH	10	24	38.03
25	NH <sub>4</sub> OH	12	12	29.79
26	NH <sub>4</sub> OH	12	18	38.17
27	NH <sub>4</sub> OH	12	24	43.62
28	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8	12	26.05

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ต่อ)

ลำดับ	สารละลาย	ค่าความเป็นเบส	เวลาเขย่า (ชม.)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม CO <sub>2</sub> ต่อกรัมของตัวดูดซับ)
29	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8	18	33.15
30	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	8	24	38.52
31	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	12	31.45
32	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	18	38.65
33	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10	24	41.21
34	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12	12	37.93
35	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12	18	40.81
36	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	12	24	45.62

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยของความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง พบว่า ชุดการทดลองที่ 9 เป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจาก ตัวดูดซับที่เตรียมได้มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด แต่เมื่อพิจารณาภาวะในการเตรียมตัวดูดซับของชุดการทดลองที่ 9 เป็นการเตรียมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระยะเวลาในการเขย่า 24 ชม. และ ค่าความเป็นเบสของสารละลายเท่ากับ 12 ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าสูงที่สุดในการออกแบบการทดลอง เนื่องจาก ภาวะที่ดีที่สุดที่ได้จากการออกแบบการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 อาจจะไม่ใช่วะที่ดีที่สุดในการเตรียมตัวดูดซับ ผู้ทดลองจึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติม โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือการหาภาวะในการเตรียมที่เหมาะสม และ ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนแกมมา-อลูมินา สำหรับการทดลองเพิ่มเติมจะพิจารณา 2 ตัวแปรที่สำคัญ โดยจะพิจารณาตัวแปรที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเตรียมตัวดูดซับ และ ตัวแปรที่เหมาะสมต่อขั้นตอนในการดำเนินการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ คือ

- ระยะเวลาในการเขย่า (30 และ 36 ชั่วโมง)
- อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 4.2 ความสามารถในการดูดซับที่ระยะเวลาในการเขย่าต่างกัน

ลำดับ	เวลาเขย่า (ชม.)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม CO <sub>2</sub> ต่อกรัมของตัวดูดซับ)
1	24	51.88
2	30	45.25
3	36	32.77

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการดูดซับที่อุณหภูมิในการดูดซับต่างกัน

ลำดับ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม CO <sub>2</sub> ต่อกรัมของตัวดูดซับ)
1	40	40.49
2	50	43.95
3	60	51.88
4	70	38.53
5	80	32.68

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 พบว่า การเพิ่มขึ้นของระยะเวลาในการเขย่าทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำลง ดังนั้น ระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่าความเป็นเบสของสารละลายเท่ากับ 12 คือ ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง

จากการคำนวณความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดจากความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.1 ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีค่าเท่ากับ 66.86 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ และเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะที่ดีที่สุดของงานวิจัยนี้พบว่า ตัวดูดซับที่เตรียมได้มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 76.43 ของความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.3 พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดที่เตรียมได้

จากงานวิจัยนี้ คือ อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากปฏิกิริยาหลักที่เกิดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งปฏิกิริยานี้สามารถผันกลับได้ ถ้าอุณหภูมิมีค่าสูงเกินไปอาจจะทำให้เกิดการคายซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้สามารถดูดซับได้ลดลง แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้ไม่สามารถเกิดที่อุณหภูมิต่ำที่สุดได้ เนื่องจากผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่มีผลของอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดจึงเป็นอุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่ากลางระหว่างผลของเทอร์โมไดนามิกส์ และ อัตราการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ การที่อุณหภูมิในการดูดซับต่างกันย่อมส่งผลต่อปริมาณไอน้ำในระบบด้วย เนื่องจากปริมาณไอน้ำในระบบแปรผันตามอุณหภูมิของระบบ ดังนั้น จึงควรศึกษาผลของปริมาณไอน้ำในระบบเพิ่มเติม เพื่อที่จะอธิบายผลได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นว่า การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆที่ปริมาณไอน้ำในระบบมีค่าเท่ากันส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากน้อยเพียงใด

#### 4.2 ผลการหาความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ

การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยใช้ความร้อน และ การฟื้นฟูสภาพโดยการลดความดันของระบบ โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีการฟื้นฟูสภาพ โดยการลดความดัน เนื่องจาก เป็นวิธีที่ใช้พลังงานในกระบวนการที่ต่ำ และสามารถทำได้ง่ายภายในเครื่องปฏิกรณ์เพียงเครื่องเดียว เพียงแต่ต้องมีการเพิ่มปั๊มดูดอากาศออกจากเครื่องปฏิกรณ์ในระหว่างกระบวนการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 ทำให้ได้ตัวดูดซับที่มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่าสูงที่สุด ซึ่งเตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีค่าความเป็นเบสเท่ากับ 12 และ ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยจะนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วมาผ่านกระบวนการฟื้นฟูตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการลดความดันภายในหอทดลองจาก 1 ความดันบรรยากาศ เหลือ 0.5 ความดันบรรยากาศ โดย ขั้นตอนแรกได้ทำการศึกษาหาระยะเวลาในการลดความดันที่เหมาะสมทั้งหมด 3 ค่า คือ 2, 4, และ 6 นาที โดย ผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับที่ผ่านการใช้ซ้ำในครั้งแรก ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ระยะเวลาในการลดความดันต่อความสามารถในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

ระยะเวลาในการลดความดัน (นาทีก)	ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัม CO <sub>2</sub> ต่อกรัมของตัวดูดซับ)
2	21.73
4	39.94
6	40.17

จากตารางที่ 4.4 พบว่า เมื่อระยะเวลาในการลดความดันเพิ่มสูงขึ้นทำให้การฟื้นฟูสภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น แต่จากผลการเพิ่มระยะเวลาจาก 4 นาที เป็น 6 นาที พบว่า ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้น ผู้ทดลองจึงเลือกที่จะใช้ระยะเวลาในการลดความดันเท่ากับ 4 นาที ซึ่งเพียงพอต่อการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับแล้ว อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ และ ใช้พลังงานในการฟื้นฟูสภาพที่ต่ำกว่าการฟื้นฟูสภาพโดยการลดความดันเป็นระยะเวลา 6 นาที

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่นำกลับมาใช้งานซ้ำ

การใช้ซ้ำ (รอบ)	ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัม CO <sub>2</sub> ต่อกรัมของตัวดูดซับ)	ประสิทธิภาพ การฟื้นฟูสภาพ (%)
1	51.88	100.00
2	39.94	76.98
3	35.72	68.84
4	33.97	65.47
5	30.67	59.11
6	28.71	55.33
7	27.59	53.17
8	27.91	53.80
9	27.59	53.18
10	27.63	53.26

จากตารางที่ 4.5 แสดงความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว พบว่า ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เตรียมได้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ และ เมื่อผ่านการใช้ซ้ำจนถึงรอบที่ 7 ความสามารถในการดูดซับเริ่มคงที่ และ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจเกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น ความไม่แน่นอนเดียวกันของแก๊สในถัง หรือ ความผิดพลาดที่เกิดจากตัวของผู้ทดลองเอง (ระยะเวลาในการเปิด-ปิดวาล์วอาจมีความคลาดเคลื่อน)

การฟื้นฟูสภาพโดยการลดความดันของระบบและทำให้ความสามารถในการดูดซับคงที่ที่ร้อยละการคืนสภาพเท่ากับ 53 เนื่องจากในกระบวนการดูดซับเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ คือ ดาวนโซไนซ์ ( $\text{KAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ) จึงส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับที่ต่ำลง โดยสามารถดองค้ประกอบของตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วได้จากการวิเคราะห์โดยใช้ XRD

ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ [39]

การใช้ซ้ำ (รอบ)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม $\text{CO}_2$ ต่อกรัมของตัวดูดซับ)	ประสิทธิภาพ การฟื้นฟูสภาพ (%)
1	25.5	100.00
2	24.3	95.29
3	19.2	75.29
4	17.4	68.24
5	15.6	61.18
6	14.7	57.65

การฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับที่ใช้วิธีการฟื้นฟูสภาพโดยใช้ความร้อนมีโอกาที่จะมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพที่สูงกว่าการฟื้นฟูสภาพโดยการลดความดันของระบบ แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับนั้นก็ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับด้วย จากการศึกษา งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนอลูมิน่า [39] โดยในกระบวนการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะทำที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และ วัดค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 4 นาที โดยกระบวนการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะเสร็จสิ้นก็ต่อเมื่อค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้มีค่าคงที่

กล่าวคือ ไม่มีการคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับแล้ว โดยประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับดังกล่าวแสดงไว้ในตารางที่ 4.6

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้ของงานวิจัยนี้ และ ตัวดูดซับที่เตรียมได้จากงานวิจัยก่อนหน้า [39] ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ พบว่า ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของงานวิจัยนี้มีค่าต่ำกว่าของงานวิจัยก่อนหน้า เมื่อพิจารณาที่รอบการใช้ซ้ำเท่ากับ 6 รอบเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาความแตกต่างของประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับแล้ว พบว่า ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกันมาก อีกทั้ง ผลการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับในรอบการใช้ซ้ำเท่ากับ 6 ค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ยังไม่คงที่ ดังนั้น ถ้าพิจารณาจากแนวโน้มของค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะมีแนวโน้มที่ลดลงได้อีก จึงอาจจะส่งผลให้ความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกันกับความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับที่เตรียมได้จากงานวิจัยก่อนหน้า กล่าวได้ว่า ตัวดูดซับที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ โดยใช้วิธีการฟื้นฟูสภาพแบบการลดความดันของระบบมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ใกล้เคียงกับการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับโดยวิธีการฟื้นฟูสภาพโดยการใช้ความร้อน อีกทั้งการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับด้วยวิธีการลดความดันของระบบยังเป็นวิธีที่มีความต้องการใช้พลังงานที่ต่ำกว่าอีกด้วย

#### 4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ

จากผลการทดลองความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1 จึงได้นำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ เพื่อศึกษาว่าตัวแปรตัวใดบ้างที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งศึกษาอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร การวิเคราะห์ผลการทดลองแบบ ANOVA แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 โดย ตัวแปร A คือ ชนิดของเบสที่แตกต่างกัน ตัวแปร B คือ ค่าความเป็นเบสของสารละลายที่แตกต่างกัน ตัวแปร C คือ ระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน ตัวแปร AB คือ อันตรกิริยาระหว่างชนิดเบสกับค่าความเป็นเบสของสารละลายที่แตกต่างกัน ตัวแปร AC คือ อันตรกิริยาระหว่างชนิดเบสกับระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน ตัวแปร BC คือ อันตรกิริยาระหว่างค่าความเป็นเบสของสารละลายกับระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน และ ตัวแปร ABC คือ อันตรกิริยาระหว่างชนิดเบส ค่าความเป็นเบสของสารละลาย และ ระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน



ตารางที่ 4.7 ตาราง ANOVA ของตัวแปรทั้งหมดที่ทำการทดลอง

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	Prob > F
Model	5023.05	35	143.52	273.12	< 0.0001
A	417.15	3	139.05	264.62	< 0.0001
B	1109.56	2	554.78	1055.77	< 0.0001
C	2920.66	2	1460.33	2779.07	< 0.0001
AB	48.57	6	8.10	15.41	< 0.0001
AC	361.94	6	60.32	114.80	< 0.0001
BC	10.85	4	2.71	5.16	0.0010
ABC	76.81	12	6.40	12.18	< 0.0001
Pure Error	37.83	72	0.53		
Cor Total	5060.88	107			

การวิเคราะห์ ANOVA เป็นการพิจารณาผลของตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยพิจารณาผลจากค่าของ P-Value ถ้าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรนั้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ การทดลองต้องความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 95 จึงจะสามารถยอมรับได้ สำหรับตัวแปรที่มีค่าของ P-Value มากกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรนั้นส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพียงเล็กน้อย หรือไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เลย

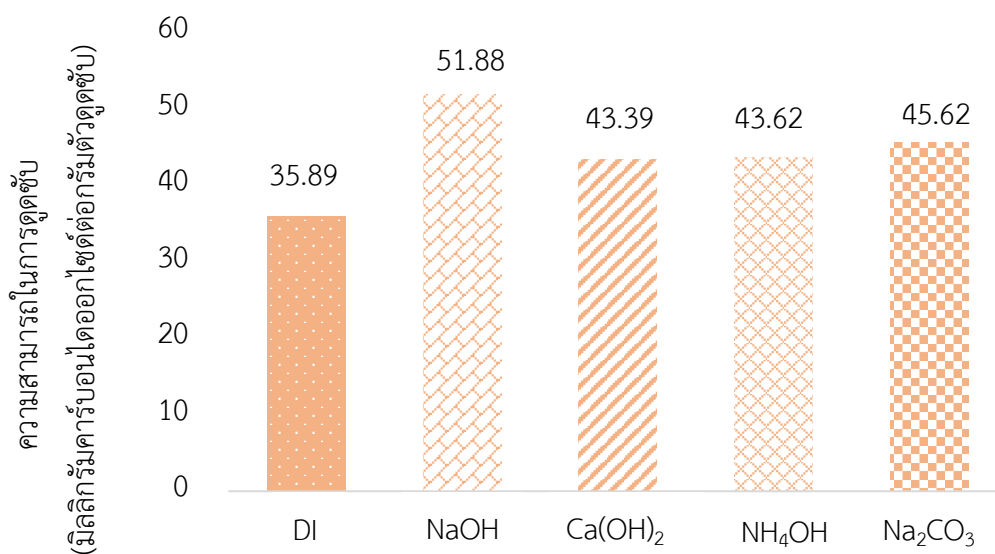
จากตารางที่ 4.7 พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ คือ ชนิดของเบสที่แตกต่างกัน (A) ค่าความเป็นเบสของสารละลายที่แตกต่างกัน (B) ระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน (C) อันตรกิริยาระหว่างชนิดเบสกับค่าความเป็นเบสของสารละลายที่แตกต่างกัน (AB) อันตรกิริยาระหว่างค่าความเป็นเบสของสารละลายกับระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน (BC) อันตรกิริยาระหว่างชนิดเบสกับระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน (AC) และ อันตรกิริยาระหว่างชนิดเบส ค่าความเป็นเบสของสารละลาย และ ระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน (ABC) แต่อย่างไรก็ตาม ตารางที่ 4.7 สามารถบอกได้ว่า ตัวแปรต้นตัวใดที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตามแต่ไม่สามารถบอกการส่งผลในเชิงบวก หรือ การส่งผลในเชิงลบต่อตัวแปรตามได้

ดังนั้น จึงต้องสร้างกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรต้น และ ความสัมพันธ์ระหว่างอันตรกิริยาของ แต่ตัวแปร เพื่อให้สามารถบอกผลของตัวแปรต้นว่าส่งผลเชิงบวก หรือ ผลเชิงลบต่อตัวแปรตาม ที่สนใจ

#### 4.3.1 ผลของชนิดเบสต่อความสามารถในการดูดซับ

รูปที่ 4.1 แสดงค่าเฉลี่ยความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ที่เตรียมในสารละลายที่ต่างชนิดกัน พบว่า การเตรียมตัวดูดซับในสารละลายเบสทำให้ ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ที่เตรียมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต มีความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาชุดการทดลองที่ 9 และ 36 ในตาราง ที่ 4.1 ซึ่งเป็นภาวะในการเตรียมตัวดูดซับที่ดีที่สุด โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ตามลำดับ พบว่า ความสามารถในการดูดซับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียมได้ใน 2 ภาวะ ดังที่กล่าวไปข้างต้น มีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงเป็นสารละลายที่ดีที่สุดในการเตรียม ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ การเตรียมตัวดูดซับโดยใช้น้ำปราศจากประจุเป็นภาวะที่ ทำให้ได้ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ต่ำที่สุด

การเตรียมตัวดูดซับในภาวะเบสจะส่งผลต่อพื้นที่ผิว ลักษณะผลึก และ ขนาดผลึกของ โพลีเอทิลีนคาร์บอเนต การกระจายตัวของโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินา ปริมาณโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินา และ ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัว ดูดซับ ซึ่งสิ่งต่างๆเหล่านี้ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะ แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อของการวิเคราะห์สัญญาณวิทยาของตัวดูดซับ



รูปที่ 4.1 ผลของชนิดเบสต่อความสามารถในการดูดซับ

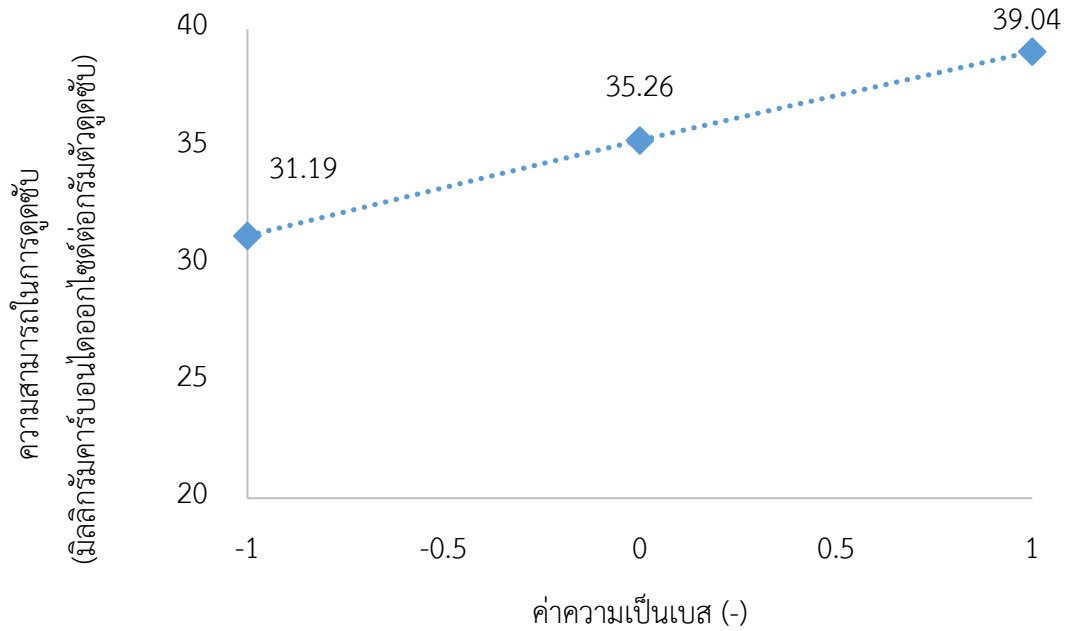
#### 4.3.2 ผลของค่าความเป็นเบสของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อค่าความเป็นเบสเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเดียวกันกับการเตรียมตัวดูดซับในสารละลายเบสทุกชนิด จากรูปที่ 4.2 แสดงอิทธิพลเดี่ยวของตัวแปรค่าความเป็นเบสต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ค่าความเป็นเบสมีผลเชิงบวกกับความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ เมื่อค่าความเป็นเบสเพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นด้วย

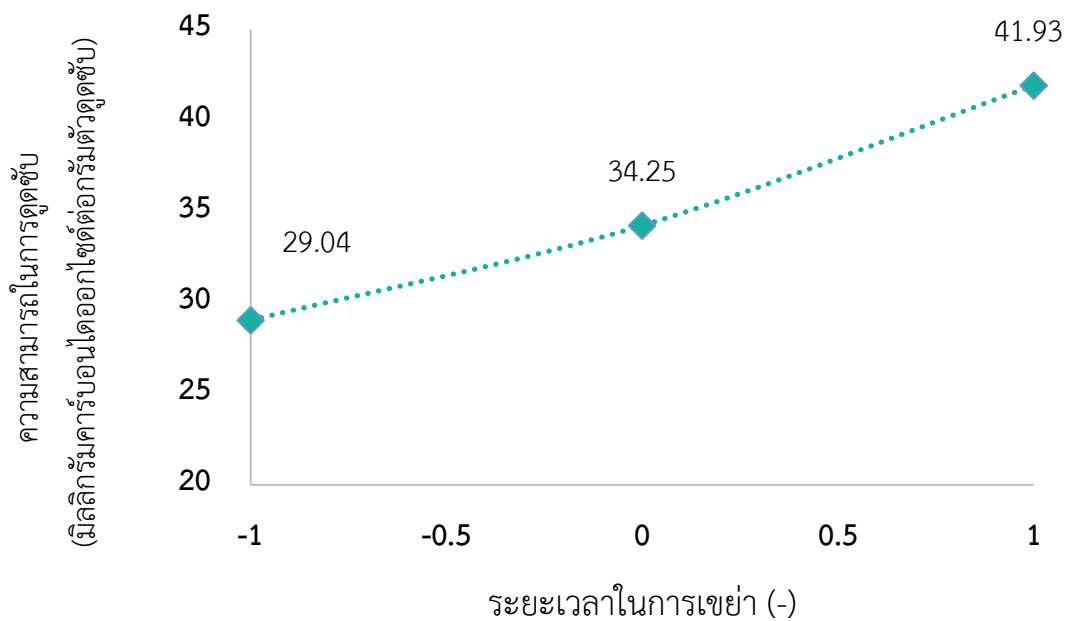
#### 4.3.3 ผลของตัวแปรเดียวระยะเวลาในการเขย่าต่อความสามารถในการดูดซับ

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.1 พบว่า เมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มเดียวกันกับการเตรียมตัวดูดซับในสารละลายเบสทุกชนิด และ ที่ค่าความเป็นเบสของสารละลายทุกค่า จากรูปที่ 4.3 แสดงอิทธิพลเดี่ยวของตัวแปรระยะเวลาในการเขย่าต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ระยะเวลาในการเขย่ามีผลเชิงบวกกับความสามารถ

ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ เมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.2 อิทธิพลของค่าความเป็นเบสของสารละลายต่อความสามารถในการดูดซับ

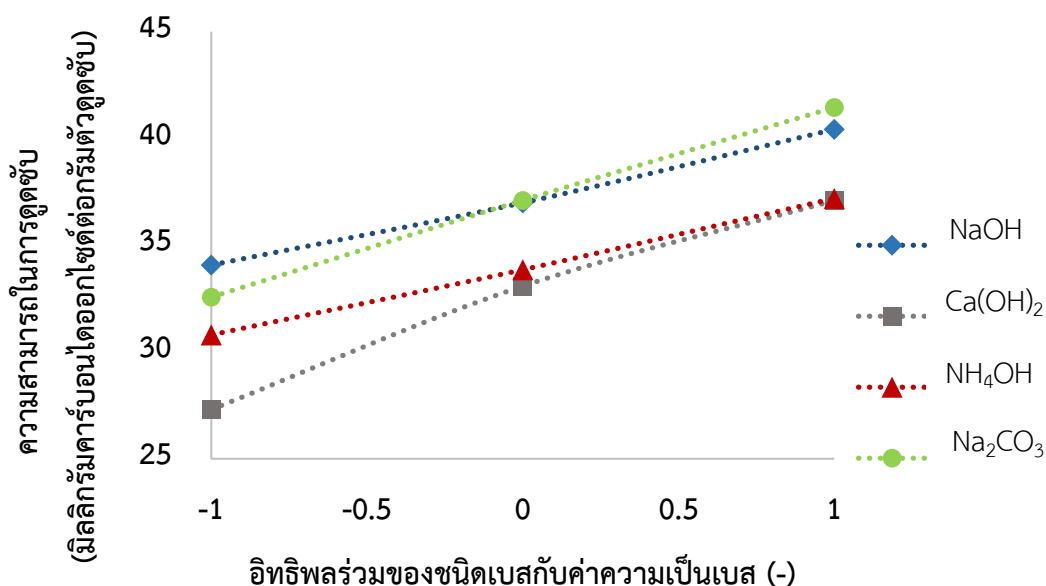


รูปที่ 4.3 อิทธิพลของระยะเวลาในการเขย่าต่อความสามารถในการดูดซับ

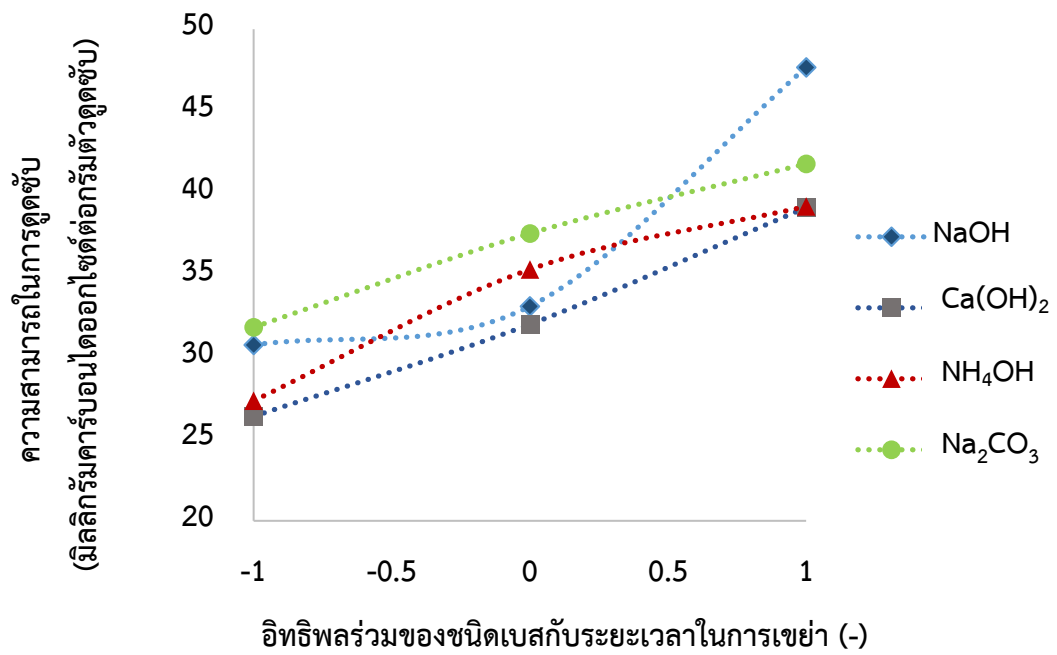
#### 4.3.4 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร

กราฟแสดงความสัมพันธ์ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรสามารถสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้จากรูปแบบของกราฟ ถ้าเส้นกราฟมีลักษณะที่ขนานกัน เมื่อลากเส้นเชื่อมต่อไปมีแนวโน้มที่จะตัดกัน แสดงว่า ตัวแปรทั้งสองตัวที่ศึกษามีอันตรกิริยาระหว่างกันแบบอ่อน แต่ถ้าลักษณะกราฟตัดกันอย่างเห็นได้ชัดเจน แสดงว่า ตัวแปรทั้งสองตัวที่ศึกษาอันตรกิริยาระหว่างกันอย่างมา

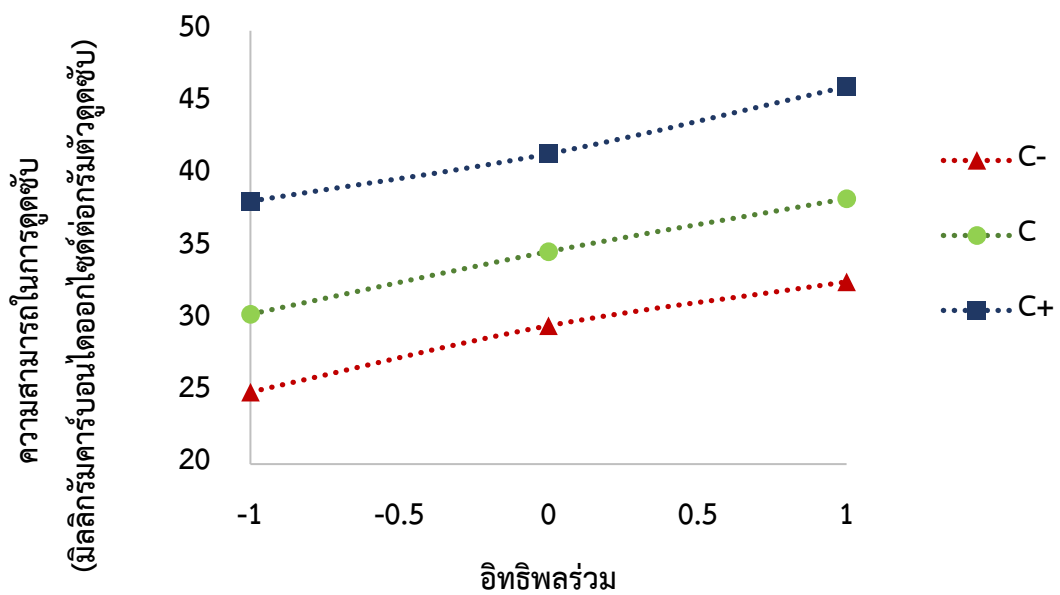
รูปที่ 4.4 แสดงอันตรกิริยาระหว่างชนิดเบสกับค่าความเป็นเบส จากกราฟ พบว่าเส้นกราฟบางเส้นตัดกันอย่างเห็นได้ชัด โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มอย่างชัดเจน คือ กราฟระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต และ กราฟระหว่างสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นอันตรกิริยาร่วมกันอย่างสูงสำหรับ เส้นกราฟเส้นที่ไม่ตัดกันถ้าต่อเส้นกราฟให้ยาวออกไปจะพบว่าเส้นกราฟมีโอกาสที่จะตัดกัน ดังนั้น ตัวแปรชนิดเบสที่แตกต่างกัน และ ค่าความเป็นเบสของสารละลายที่แตกต่างกัน มีผลเสริมกัน และ เป็นอันตรกิริยาร่วมกันอย่างอ่อน



รูปที่ 4.4 อันตรกิริยาระหว่างชนิดเบสกับค่าความเป็นเบสของสารละลาย



รูปที่ 4.5 อันตรกิริยาระหว่างชนิดเบสกับระยะเวลาในการเขย่า



รูปที่ 4.6 อันตรกิริยาระหว่างค่าความเป็นเบสของสารละลายกับระยะเวลาในการเขย่า

จากรูปที่ 4.5 ตัวแปรชนิดเบสที่แตกต่างกับระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน พบว่า มีการตัดกันของกราฟทุกเส้น ดังนั้น จึงมีอันตรกิริยาร่วมกันอย่างสูง ยกเว้นกราฟระหว่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์ และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งไม่มีแนวโน้มที่กราฟจะตัดกัน

จากรูปที่ 4.6 ตัวแปรค่าความเป็นเบสของสารละลายกับระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่าง กัน พบว่า ไม่มีการตัดกันของกราฟเลย ดังนั้น จึงมีอันตรกิริยาร่วมกันอย่างอ่อน

#### 4.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงคุณภาพ และ เชิงปริมาณของตัวดูดซับ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ ตัวดูดซับที่เตรียมได้จากวิธีการเตรียมแบบอิมเพรกเนชันในภาวะเบส ดังนั้น หลังจากกระบวนการ เตรียมตัวดูดซับ การวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ เนื่องจาก จะช่วยให้ทราบ องค์ประกอบ ลักษณะพื้นผิว การเปลี่ยนแปลงต่างๆของตัวดูดซับหลังการนำไปใช้งาน รวมทั้ง คุณสมบัติเฉพาะของตัวดูดซับที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากการวางแผนการทดลอง โดยมีตัวแปรต้นที่ศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ชนิดเบส ค่าความเป็นเบสของสารละลาย และ ระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน ดังนั้น การวิเคราะห์ คุณสมบัติของตัวดูดซับจะแบ่งการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อให้สามารถศึกษาผลของตัวแปรต้นทั้ง 3 ตัวแปรได้อย่างครอบคลุม โดยจะเลือกวิเคราะห์ตัวอย่างทั้งหมด 9 ตัวอย่าง ดังนี้

1. DI-pH7-24hrs
2. NaOH-pH12-24hrs
3. Ca(OH)<sub>2</sub>-pH12-24hrs
4. NH<sub>4</sub>OH-pH12-24hrs
5. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-pH12-24hrs
6. NaOH-pH8-24hrs
7. NaOH-pH10-24hrs
8. NaOH-pH12-12hrs
9. NaOH-pH12-36hrs

จากชื่อของตัวอย่างทั้ง 9 ตัวอย่างแสดงถึงภาวะในการเตรียมที่แตกต่างกัน โดยมีความหมาย ดังตัวอย่างต่อไปนี้ NaOH-pH12-24hrs ตัวดูดซับชนิดนี้เป็นตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้สารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ค่าความเป็นเบสของสารละลายเท่ากับ 12 และ ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง จากตัวอย่างที่ 1-5 จะใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายต่างชนิดกัน ตัวอย่างที่ 2, 6 และ 7 เป็นตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารละลายที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมตัวดูดซับ และ ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของค่าความเป็นเบสที่แตกต่างกัน และ ตัวอย่างที่ 2, 8 และ 9 เป็นตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารละลายที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมตัวดูดซับที่จะใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน

#### 4.4.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะใช้เทคนิคการดูดซับ และ การคายซับของแก๊สไนโตรเจน ( $N_2$  adsorption-desorption technique, BET) ในกระบวนการวิเคราะห์จะป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะกัมมันต์ และ ตัวรองรับของตัวดูดซับ หลังจากนั้นจะลดความดันของระบบเพื่อให้เกิดการคายซับของแก๊สไนโตรเจน โดยแก๊สไนโตรเจนที่คายออกมาจะถูกบันทึกปริมาตร และ นำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และ ปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ

ตารางที่ 4.8 พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และ ขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ

ลำดับ	ตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (ตร.ม.ต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ม.ต่อกรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
1	DI-pH7-24hrs	102.00	0.8944	78.79
2	NaOH-pH12-24hrs	118.30	0.8887	71.99
3	Ca(OH) <sub>2</sub> -pH12-24hrs	118.49	0.8880	69.96
4	NH <sub>4</sub> OH-pH12-24hrs	93.30	0.8896	74.43
5	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -pH12-24hrs	119.46	0.8893	69.67
6	NaOH-pH8-24hrs	107.65	0.8965	77.31
7	NaOH-pH10-24hrs	111.22	0.8888	67.83
8	NaOH-pH12-12hrs	114.04	0.8929	77.14
9	NaOH-pH12-36hrs	125.36	0.8881	68.65



จากตารางที่ 4.8 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ พบว่า เมื่อเติมสารละลายเบสทั้ง 3 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต ค่าความเป็นเบสของสารละลายเพิ่มสูงขึ้น และ ระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มสูงขึ้นทำให้ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ปริมาตรรูพรุน และ ขนาดรูพรุน มีขนาดที่แตกต่างกันบ้างเพียงเล็กน้อย ดังนั้น การเตรียมตัวดูดซับโดยใช้วิธีอิมเพกเนชันในภาวะเบสสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้สอดคล้องกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ โดยการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะส่งผลให้การกระจายตัวของโลหะกัมมันต์ หรือ โพลีแซลเนียมคาร์บอเนตนั้นสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม การเตรียมตัวดูดซับในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ทำให้พื้นที่ผิวที่วิเคราะห์ได้มีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นผลอันเนื่องมาจากการเกาะกลุ่มกันของโพลีแซลเนียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินา ซึ่งจะแสดงผลอย่างละเอียดในลำดับถัดไป โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับงานวิจัยของ Jo และ คณะ [40] ที่เตรียมตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวรองรับเป็นแมกนีเซียม-เซอร์โคเนียมออกไซด์ ซึ่งสังเคราะห์ตัวดูดซับด้วยวิธีตกตะกอนร่วม โดยเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของสารละลายเบส 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โดยตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าการเตรียมตัวดูดซับโดยใช้สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สำหรับผลของค่าความเป็นเบสในสารละลายที่เพิ่มขึ้นทำให้ได้ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูงขึ้น ทั้งนี้ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lee และ คณะ [36] ที่ได้ศึกษาผลของค่าความเป็นเบสที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการเตรียมตัวดูดซับโพลีแซลเนียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่า เมื่อความเป็นเบสในกระบวนการเตรียมแบบตกตะกอนร่วมเพิ่มสูงขึ้นทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้น สำหรับการศึกษาผลของระยะเวลาในการเขย่าพบว่า ระยะเวลาในการเขย่าที่นานขึ้น ส่งผลต่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาในการเตรียมตัวดูดซับแบบอิมเพกเนชันในภาวะเบสยังไม่ค่อยเป็นที่นิยมในการศึกษา เนื่องจาก งานวิจัยส่วนใหญ่จะเตรียมตัวดูดซับโดยใช้ระยะเวลาในการเตรียมที่มากเกินไป คือ 48 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการอิมเพกเนชันได้มากที่สุด แต่จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้พบว่า ระยะเวลาที่นานเกินไปไม่ใช่ระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับ

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะกัมมันต์บนตัวรองรับ

ในกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ องค์กรประกอบธาตุ หรือ สัดส่วนของโลหะกัมมันต์ (โพแทสเซียมคาร์บอเนต) ต่อ สัดส่วนของตัวรองรับ (แกมมา-อลูมินา) มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจาก สัดส่วนดังกล่าวส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรสโกปี ( X-ray fluorescence spectroscopy, XRF) ในการวิเคราะห์รังสีเอกซ์จะถูกยิงออกจากแหล่งกำเนิดไปยังสารตัวอย่างทำให้ไอเล็กตรอนชั้นในของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลุดออกมา และตัวบ่งชี้ค่าจะบันทึกค่าสัญญาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไว้ ผลการวิเคราะห์จะนำมาวิเคราะห์เป็นธาตุเดี่ยวทีละธาตุ หรือ หลายธาตุพร้อมกันก็ได้ โดยข้อดีของการวิเคราะห์แบบนี้คือ ไม่ทำลายตัวอย่าง แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ต้องใช้สารตัวอย่างในการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างมาก

จากตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินา พบว่า การเตรียมตัวดูดซับโดยวิธีอิมเพกเนชันในภาวะเบสจะช่วยให้มีปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อศึกษาที่ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 24 ชั่วโมงเท่ากัน แต่เบสที่ต่างชนิดกันก็ทำให้ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับมีปริมาณที่ไม่เท่ากัน เนื่องจาก ลักษณะการกระจายตัว หรือ รูปร่างผลึกของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่แตกต่างกัน ก็ส่งผลต่อปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินาด้วย การเตรียมตัวดูดซับในภาวะที่ความเป็นเบสของสารละลายมีค่าสูงทำให้พื้นที่ผิวของตัวรองรับเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนต และ แกมมา-อลูมินาเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่อิมเพกเนชัน ดังนั้น ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ และ ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนแกมมา-อลูมินาจึงมีแนวโน้มเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความเป็นเบสของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นทำให้พื้นที่ผิวของตัวรองรับแกมมา-อลูมินาเพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินาที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.9 สำหรับ ผลของระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อระยะเวลาในการเขย่าที่ค่าต่ำสุด เท่ากับ 12 ชั่วโมง ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินามีค่าต่ำที่สุด เนื่องจากระยะเวลาในการเขย่าแปรผันตรงกับปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับ เมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้นเป็น 24 ชั่วโมง ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีค่าต่ำลง เมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้นเป็น 36 ชั่วโมง แม้ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น

เนื่องจาก ผลของลักษณะการกระจายตัว หรือ รูปร่างผลึกของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่เปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 4.9 ปริมาณโลหะกัมมันต์ และ ตัวรองรับบนตัวดูดซับ

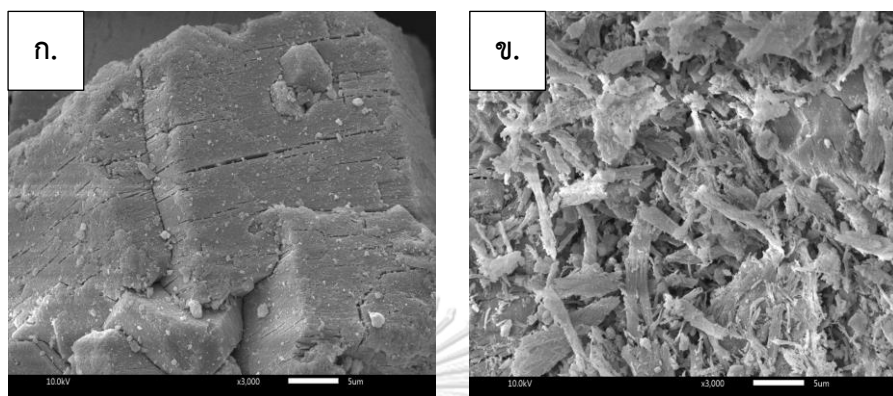
ลำดับ	สารตัวอย่าง	ร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบ	
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
1	DI-pH7-24hrs	86.30	13.70
2	NaOH-pH12-24hrs	78.90	21.10
3	Ca(OH) <sub>2</sub> -pH12-24hrs	82.70	17.30
4	NH <sub>4</sub> OH-pH12-24hrs	72.90	27.10
5	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -pH12-24hrs	84.00	16.00
6	NaOH-pH8-24hrs	83.90	16.10
7	NaOH-pH10-24hrs	80.30	19.70
8	NaOH-pH12-12hrs	86.50	13.50
9	NaOH-pH12-36hrs	83.00	17.00

#### 4.4.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยามีความสัมพันธ์กับสมบัติเชิงโครงสร้าง และ สมบัติทางกายภาพ ซึ่งจะช่วยทำให้ทราบถึงรูปทรง ขนาด การกระจายตัวของผลึก หรือ อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการสร้างภาพสามมิติของพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยการส่องกราดลำอิเล็กตรอนลงบนพื้นผิวของตัวอย่าง ทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนชั้นนอก เกิดเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยจะมีเครื่องรับสัญญาณตรวจจับอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า หรือ สัญญาณภาพ เทคนิคนี้นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง เนื่องจากใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อย และ เห็นพื้นผิวของตัวดูดซับ หรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และ การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะทำลายตัวอย่างด้วย

จากรูปที่ 4.7.ก. แสดงให้เห็นว่า พื้นผิวของแกมมา-อลูมินามีลักษณะค่อนข้างเรียบ และมีเหลี่ยม หรือ มุมบ้าง ส่วนรูปที่ 4.7.ข. แสดงลักษณะของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูก

อิมเพรกลองบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินาที่เตรียม โดยวิธีอิมเพรกเนชันแบบดั้งเดิม ซึ่งจะใช้น้ำปราศจากประจุในกระบวนการเตรียม พบว่า มีการกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ค่อนข้างดี จนแทบไม่เห็นพื้นผิวของตัวรองรับแกมมา-อลูมินา



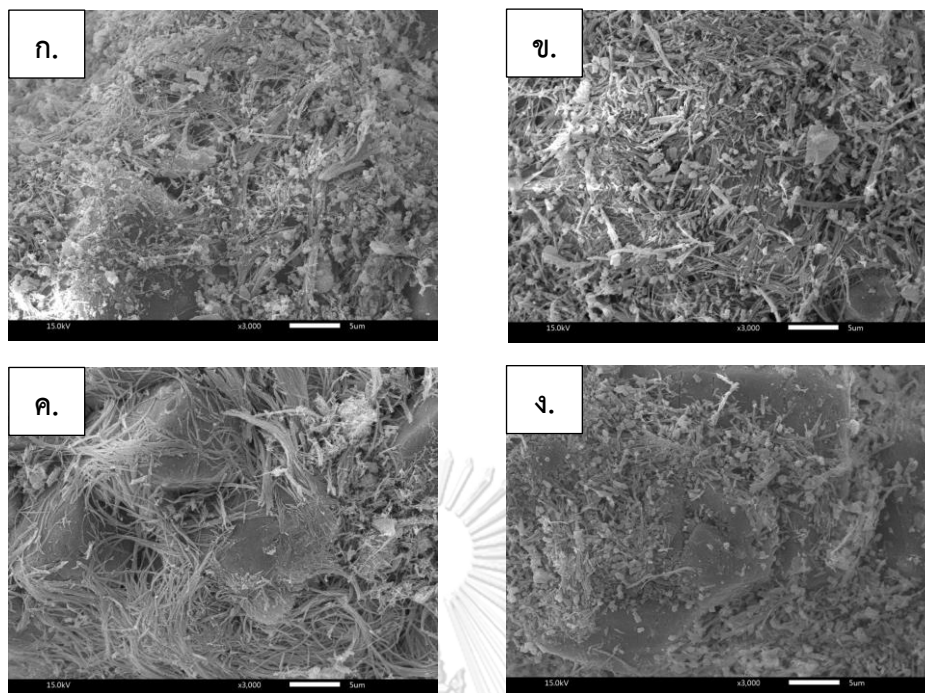
รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ของตัวดูดซับ

รูป ก. พื้นผิวของแกมมา-อลูมินา

รูป ข. DI-pH7-24hrs

จากการศึกษาทางวิจัยของ Jo และ คณะ [41] ซึ่งศึกษาความสามารถในการดูดซับ และการฟื้นฟูสภาพได้ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนอลูมินา พบว่า ขนาด และ ลักษณะผลึกของโพแทสเซียมคาร์บอเนตส่งผลอย่างมากต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยลักษณะของผลึกโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่พบในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผลึกรูปทรงไม่สมมาตร (Bulk structure) และ ผลึกรูปแท่ง (Rod structure) โดยผลึกรูปแท่งเป็นโครงสร้างของผลึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าผลึกรูปทรงไม่สมมาตร เนื่องจาก มีขนาดผลึกที่เล็กกว่าทำให้เกิดปฏิกิริยาในการดูดซับได้ดี โดยรูปร่างของผลึกขึ้นอยู่กับกระบวนการ และ ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกอิมเพรกลองบนตัวรองรับด้วย ถ้าปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับมีมากเกินไปจะเกิดการรวมตัวกันของผลึก และ ไม่เกิดผลึกรูปแท่ง

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะผลึกของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมในภาวะที่เป็นกลาง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ การเตรียมตัวดูดซับในภาวะที่เป็นเบสโดยใช้สารละลายเบสต่างชนิดกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า ขนาดผลึกของโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีขนาด และ โครงสร้างที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การเตรียมตัวดูดซับในภาวะที่เป็นกลางจะได้ผลึกโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่มีรูปทรงไม่สมมาตร และ มีขนาดใหญ่ ในขณะที่การเตรียมตัวดูดซับในภาวะที่เป็นเบสจะให้ผลึกรูปแท่งขนาดเล็กของโพแทสเซียมคาร์บอเนต



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ของตัวดูดซับในสารละลายเบสต่างชนิด

รูป ก. NaOH-pH12-24hrs      รูป ข. Ca(OH)<sub>2</sub>-pH12-24hrs

รูป ค. NH<sub>4</sub>OH-pH12-24hrs      รูป ง. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-pH12-24hrs

จากรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อเตรียมตัวดูดซับโดยใช้สารละลายเบสต่างชนิดกันจะได้ลักษณะของผลึกที่แตกต่างกัน โดยจะสังเกตเห็นได้ว่า รูปที่ 4.8.ก. เป็นตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงผลึกรูปแท่งที่มีขนาดเล็ก มีลักษณะเป็นเหมือนเส้นใยกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนตัวรองรับ รูปที่ 4.8.ข. เป็นตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แสดงผลึกรูปแท่งที่มีขนาดเล็กที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอ และมีผลึกรูปทรงไม่สมมาตรกระจายตัวอยู่บ้าง รูปที่ 4.8.ค. เป็นตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ แสดงผลึกรูปแท่งที่มีขนาดใหญ่ มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ รูปที่ 4.8.ง. เป็นตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต แสดงผลึกรูปแท่งที่มีขนาดเล็ก มีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และมีผลึกรูปทรงไม่สมมาตรลักษณะคล้ายทรงกลมมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ

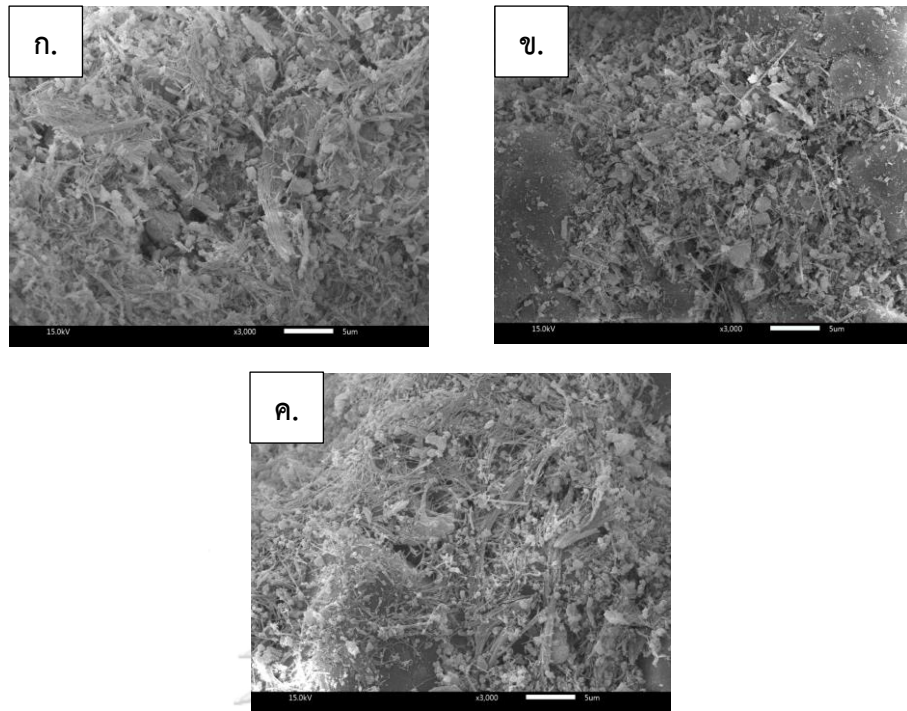
ดังนั้น จากแนวโน้มของโครงสร้างผลึก และ การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินา การเตรียมตัวดูดซับโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของโพแทสเซียม

คาร์บอนบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินา และ ได้ผลึกรูปแท่ง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ช่วยให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น

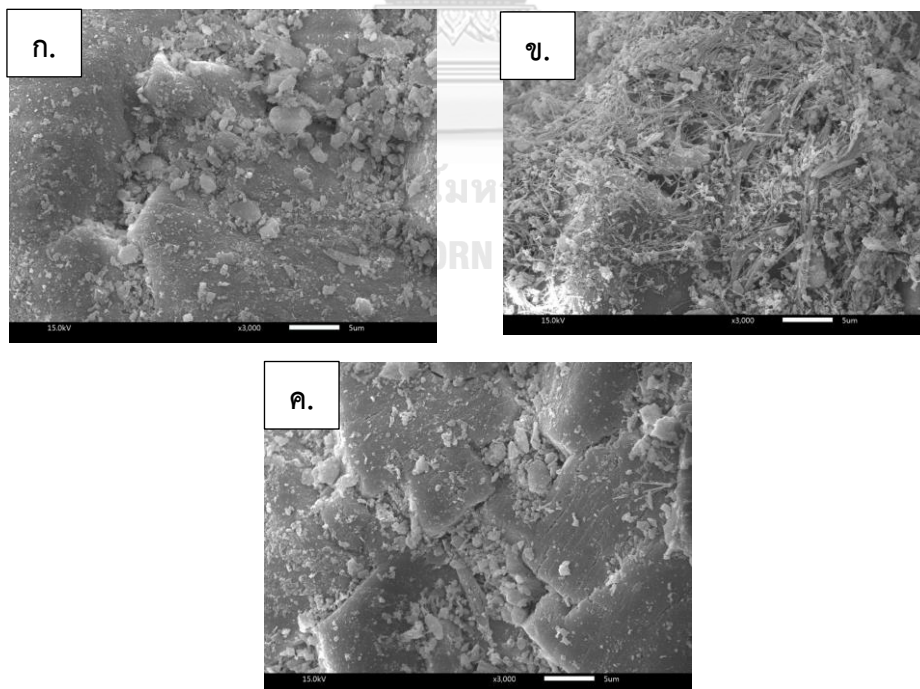
จากรูปที่ 4.9 แสดงผลึกของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกอิมเพกกลงบนแกมมา-อลูมินา ที่ผ่านการเตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าความเป็นเบสแตกต่างกัน พบว่า เมื่อค่าความเป็นเบสของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ผลึกโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีขนาดเล็กลง และมีรูปแท่ง ซึ่งเหมาะต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปริมาณของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่แสดงในรูปที่ 4.9 มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะกัมมันต์บนตัวรองรับดังแสดงในตารางที่ 4.9

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลึกของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกอิมเพกกลงบนแกมมา-อลูมินา ที่ผ่านการเตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน พบว่า เมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้นจาก 12 ชั่วโมงเป็น 24 ชั่วโมง เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งปริมาณ และ ลักษณะผลึกโพแทสเซียมคาร์บอเนต โดยระยะเวลาที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้มีปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนผิวตัวรองรับแกมมา-อลูมินาสูงขึ้น และมีผลึกเป็นรูปแท่ง แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มจาก 24 ชั่วโมงเป็น 36 ชั่วโมง พบว่า ผลึกรูปแท่งของโพแทสเซียมคาร์บอเนตแทบไม่หลงเหลืออยู่เลย รวมทั้งปริมาณของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกอิมเพกกลงบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินาลดลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งจากภาพ SEM และ ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะกัมมันต์

จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์ลักษณะผลึก และ การกระจายตัวของผลึกโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมในภาวะที่เป็นกลาง และ การเตรียมในภาวะเบส โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Wang และ คณะ [14] พบว่า การเตรียมตัวดูดซับแบบดั้งเดิม หรือ การเตรียมในภาวะที่เป็นกลาง โพแทสเซียมคาร์บอเนตจะมีโอกาสเกาะได้ทุกตำแหน่งบนตัวรองรับ แต่ในสารละลายเบส จะมีการแตกตัวของหมู่ไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งหมู่ไฮดรอกไซด์เหล่านี้จะไปเกาะอยู่รอบๆตัวรองรับ และจะขัดขวางการเกาะของโพแทสเซียมคาร์บอเนต ทำให้โพแทสเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถรวมตัวกันเป็นผลึกขนาดใหญ่บนตัวรองรับได้ ส่งผลให้ผลึกมีขนาดเล็ก อีกทั้งยังก่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดีของผลึกโพแทสเซียมคาร์บอเนตอีกด้วย ดังนั้น จึงเป็นเหตุผลที่สำคัญที่ทำให้ตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายเบสแก่ และ เตรียมในสารละลายที่มีค่าความเป็นเบสสูง มีหมู่ไฮดรอกไซด์ค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้เกิดผลึกที่มีขนาดเล็ก และ มีการกระจายตัวของผลึกโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ดีขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น



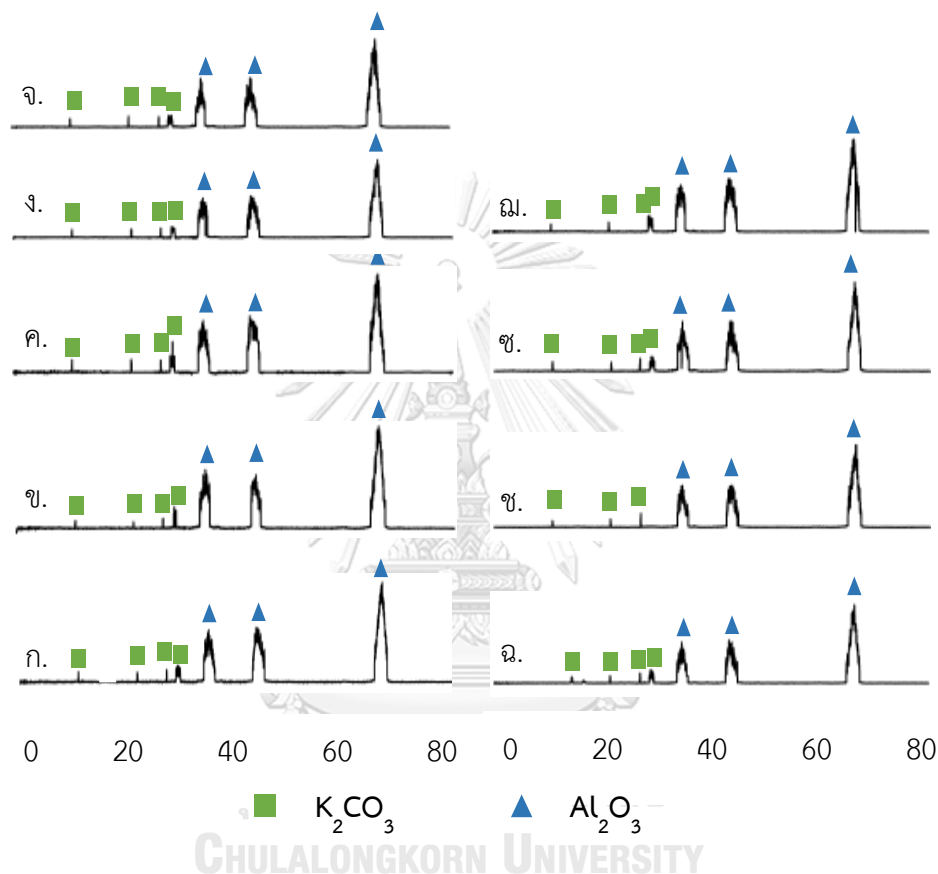
รูปที่ 4.9 ภาพ SEM ของตัวดูดซับที่ค่าความเป็นเบสของสารละลายต่างกัน  
รูป ก. NaOH-pH8-24hrs    รูป ข. NaOH-pH10-24hrs    รูป ค. NaOH-pH12-24hrs



รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ของตัวดูดซับที่ระยะเวลาในการเขย่าต่างกัน  
รูป ก. NaOH-pH12-12hrs    รูป ข. NaOH-pH12-24hrs    รูป ค. NaOH-pH12-36hrs

#### 4.4.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวดูดซับ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว และไม่ทำลายตัวอย่าง อีกทั้งยังสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับเซลล์หน่วยของผลึกได้อีกด้วย เทคนิคนี้นิยมใช้ในการพิสูจน์โครงสร้างของสารรวมทั้ง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารประกอบเมื่อผ่านกระบวนการต่างๆ



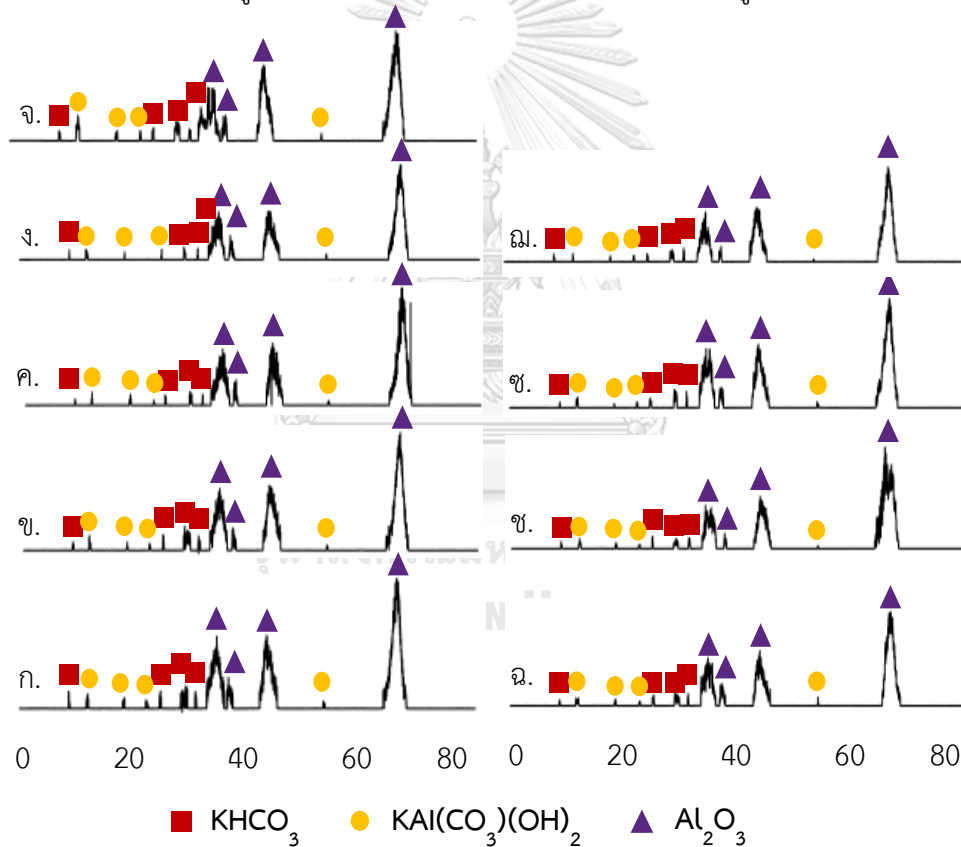
รูปที่ 4.11 องค์ประกอบของตัวดูดซับ

รูป ก. DI-pH7-24hrs	รูป ข. NaOH-pH12-24hrs	รูป ค. Ca(OH) <sub>2</sub> -pH12-24hrs
รูป ง. NH <sub>4</sub> OH-pH12-24hrs	รูป จ. Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -pH12-24hrs	รูป ฉ. NaOH-pH8-24hrs
รูป ช. NaOH-pH10-24hrs	รูป ซ. NaOH-pH12-12hrs	รูป ฌ. NaOH-pH12-36hrs

จากผลการวิเคราะห์ แม้ว่าจะเตรียมตัวดูดซับในสถานะที่แตกต่างกันแต่องค์ประกอบของตัวดูดซับที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงผลเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ตัวดูดซับที่เตรียมได้มีองค์ประกอบ 2 ชนิด คือ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และ แกมมา-อลูมินา ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวสามารถทำให้เราเข้าใจถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระหว่าง



การดูดซับ คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และ น้ำ และได้สารผลิตภัณฑ์เป็นโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต ดังแสดงในสมการที่ 3.1 แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะมีผลิตภัณฑ์พลอยได้เกิดขึ้นได้ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว เพื่อพิสูจน์ว่าหลังการดูดซับเกิดผลิตภัณฑ์ และผลิตภัณฑ์พลอยได้หรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าเกิดสารประกอบใหม่ 2 ชนิด คือ โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาการดูดซับ และ ดาวันโซไนซ์  $KAl(CO_3)(OH)_2$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาจึงอาจจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อนำตัวดูดซับไปใช้ซ้ำ



รูปที่ 4.12 องค์ประกอบของตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว

รูป ก. DI-pH7-24hrs	รูป ข. NaOH-pH12-24hrs	รูป ค. Ca(OH) <sub>2</sub> -pH12-24hrs
รูป ง. NH <sub>4</sub> OH-pH12-24hrs	รูป จ. Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -pH12-24hrs	รูป ฉ. NaOH-pH8-24hrs
รูป ช. NaOH-pH10-24hrs	รูป ซ. NaOH-pH12-12hrs	รูป ฌ. NaOH-pH12-36hr

ในกระบวนการเตรียมตัวดูดซับโดยใช้สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารที่มีความคล้ายคลึงกับโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นโลหะกัมมันต์ ดังนั้น ในเบื้องต้น จึงได้สันนิษฐานว่า น่าจะพบโซเดียมคาร์บอเนตที่หลงเหลืออยู่บนตัวรองรับแกมมา-อลูมินาบ้าง แต่จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวดูดซับดังแสดงในรูป จ ของรูปที่ 4.11 และ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษางานวิจัยของ Jongartklang และ คณะ [29] พบว่าตำแหน่งที่พบพีคของโซเดียมคาร์บอเนต และ โพแทสเซียมคาร์บอเนตมีการซ้อนทับกัน ประกอบกับข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะกัมมันต์บนตัวรองรับโดยใช้เทคนิค XRF ไม่พบโซเดียมคาร์บอเนตอยู่บนตัวรองรับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนต และ โพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ใส่ลงไปในการเตรียม พบว่าโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีปริมาณที่มากกว่าโซเดียมคาร์บอเนต ดังนั้นจึงส่งผลให้โอกาสที่โซเดียมคาร์บอเนตจะถูกอิมเพกกลงบนพื้นผิวของตัวรองรับมีค่าต่ำมากๆ หรือ อีกนัยหนึ่งคือ ปริมาณของโซเดียมคาร์บอเนตมีค่าน้อยมากๆ จนเครื่องมือวิเคราะห์ไม่สามารถตรวจวัดได้

#### 4.4.5 การวิเคราะห์ค่าความเป็นเบสของตัวดูดซับ

การคายซับของแก๊สจากตัวเร่งปฏิกิริยาตามอุณหภูมิที่โปรแกรมเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการหา ปริมาณ และ ตำแหน่งของกรด หรือ เบสบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาหาตำแหน่งเบสบนตัวดูดซับ เนื่องจาก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรดลิวอิส จึงสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับตัวดูดซับที่มีค่าความเป็นเบสสูง ในการวิเคราะห์หาค่าความเป็นเบสของตัวดูดซับของงานวิจัยนี้จะใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ โดยจะปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกเจือจางด้วยแก๊สเฉื่อยเข้าไปในระบบที่มีการบรรจุสารตัวอย่างไว้ และปล่อยให้เกิดการดูดซับจนอิ่มตัวที่อุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นจะกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่ถูกดูดซับ หรือ เกิดการดูดซับเชิงกายภาพให้หลุดออกไป ก่อนที่จะปล่อยแก๊สเฉื่อยเข้าไปภายในระบบเพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับไว้ค่อยๆ คายซับออกมาจากตำแหน่งเบส และตรวจจับสัญญาณที่ปล่อยออกมาก่อนจะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาปริมาณของเบสบนตัวดูดซับ หรือ อีกนัยหนึ่ง คือ การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้เป็นการพิจารณาหาปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินาได้อีกด้วย เนื่องจาก ในการวิเคราะห์จะใช้การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวดูดซับ พบว่าโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเพียงตัวเดียวของตัวดูดซับชนิดนี้ที่จะสามารถเกิดการดูดซับเชิงเคมีกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ดังนั้น การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะเป็นการพิสูจน์ผลของ

ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับได้อีกด้วย ซึ่งจะแปรผันตรงกับ ปริมาณโลหะกัมมันต์บนตัวรองรับ

ตารางที่ 4.10 ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับ

ลำดับ	ตัวอย่าง	ความเป็นเบสบนผิวตัวดูดซับ (มิลลิโมลต่อกรัม)			
		เบสอ่อน 50-200	เบสกลาง 200-300	เบสแก่ <300	ทั้งหมด
1	DI-pH7-24hrs	0.253	0.000	0.000	0.253
2	NaOH-pH12-24hrs	0.431	0.504	0.000	0.935
3	Ca(OH) <sub>2</sub> -pH12-24hrs	0.484	0.399	0.000	0.883
4	NH <sub>4</sub> OH-pH12-24hrs	0.168	0.160	0.000	0.328
5	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -pH12-24hrs	0.699	0.163	0.000	0.862
6	NaOH-pH8-24hrs	0.280	0.348	0.000	0.628
7	NaOH-pH10-24hrs	0.313	0.559	0.000	0.872
8	NaOH-pH12-12hrs	0.097	0.313	0.000	0.409
9	NaOH-pH12-36hrs	0.194	0.222	0.000	0.415

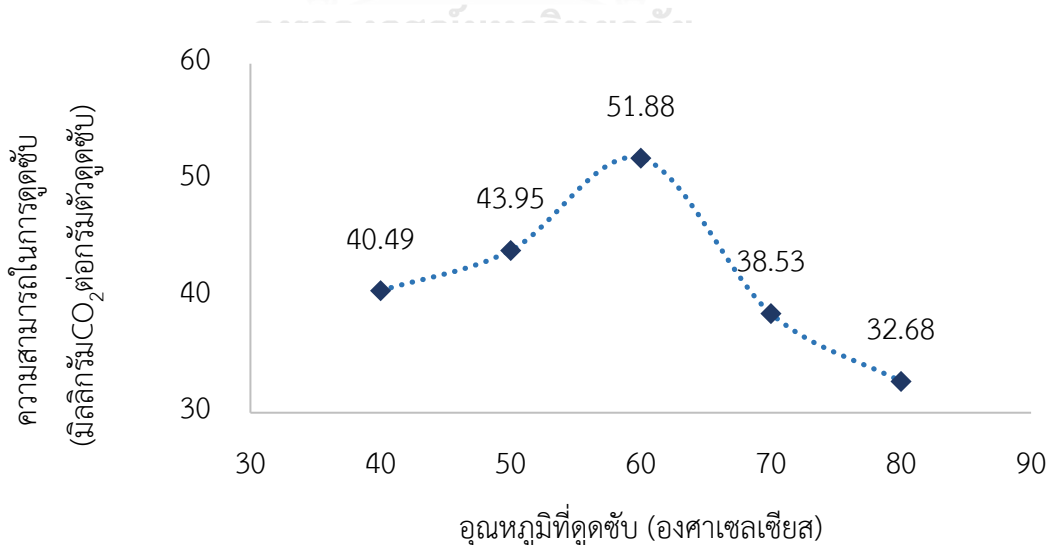
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะแบ่งความแรงของกรด หรือ เบสได้จากอุณหภูมิที่เกิด การคายซับแก๊สออกจากตัวดูดซับ ถ้ามีการคายซับอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 50-200 องศาเซลเซียส จะเป็นกรด หรือ เบสอ่อน ถ้ามีการคายซับอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส จะเป็นกรด หรือ เบสกลาง และ ถ้ามีการคายซับที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสจะเป็น เบสแก่ จากตารางที่ 4.10 พบว่า การเตรียมตัวดูดซับในสารละลายเบสจะทำให้ค่าความเป็นเบส บนผิวของตัวดูดซับเพิ่มสูงขึ้นกว่าการเตรียมตัวดูดซับในน้ำปราศจากประจุ ดังนั้น ค่าความเป็นเบสของสารละลายที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาผลของค่าความเป็นเบสในสารละลาย พบว่า เมื่อค่าความเป็นเบสในสารละลายเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับ เพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีแนวโน้มเดียวกันกับ ค่าความเป็นเบสของสารละลายที่สูงขึ้น สำหรับผลของระยะเวลาในการเขย่า พบว่า ถ้าระยะเวลา ในการเขย่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 12 ชั่วโมงเป็น 24 ชั่วโมง ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับจะเพิ่ม

สูงขึ้น แต่ถ้าระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 24 ชั่วโมงเป็น 36 ชั่วโมง ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับกลับมีค่าต่ำลง

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิว ปริมาณโลหะกัมมันต์บนตัวรองรับ ภาพ SEM ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และ ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับ พบว่า เมื่อพื้นที่ผิวมีค่ามากจะเป็นการเพิ่มโอกาสให้การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับ และ ค่าความเป็นเบสที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งแนวโน้มดังกล่าวเป็นลักษณะของตัวดูดซับที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งลักษณะดังกล่าวพบได้ในตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สำหรับ ตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูง แต่ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีค่าน้อย เนื่องจาก การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินาไม่สม่ำเสมอ และ บริเวณที่สามารถอิมเพกโพแทสเซียมคาร์บอเนตได้มีน้อย เมื่อเทียบกับตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ พบว่า พื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีค่าต่ำ ในขณะที่ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีปริมาณสูงที่สุด และ การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวดูดซับมีค่าต่ำ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์นั้นมีความขัดแย้งกัน ดังนั้น ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับที่ได้จึงเป็นข้อมูลที่สำคัญในการวิเคราะห์ผลของตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ กล่าวคือ ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับที่วัดได้มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆที่เตรียมในสารละลายเบส ทั้งนี้ เนื่องจาก ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนผิวของตัวรองรับมีค่ามากเกินไปจึงทำให้เกิดการจับตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นผลึกขนาดใหญ่เพียงแคบบางบริเวณเท่านั้น และ ขนาดผลึกที่ใหญ่เกินไปจะไปบดบังพื้นที่ผิวของตัวรองรับทำให้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวมีค่าต่ำลงรวมทั้งขนาดที่ใหญ่เกินไปนี้ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ ผลึกโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีค่าต่ำลงจึงส่งผลให้ค่าความเป็นเบสบนตัวรองรับนั้นมีค่าต่ำลง ดังนั้น นอกจากโครงสร้างผลึกที่เหมาะสมแล้ว ขนาดของผลึกยังส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมาก

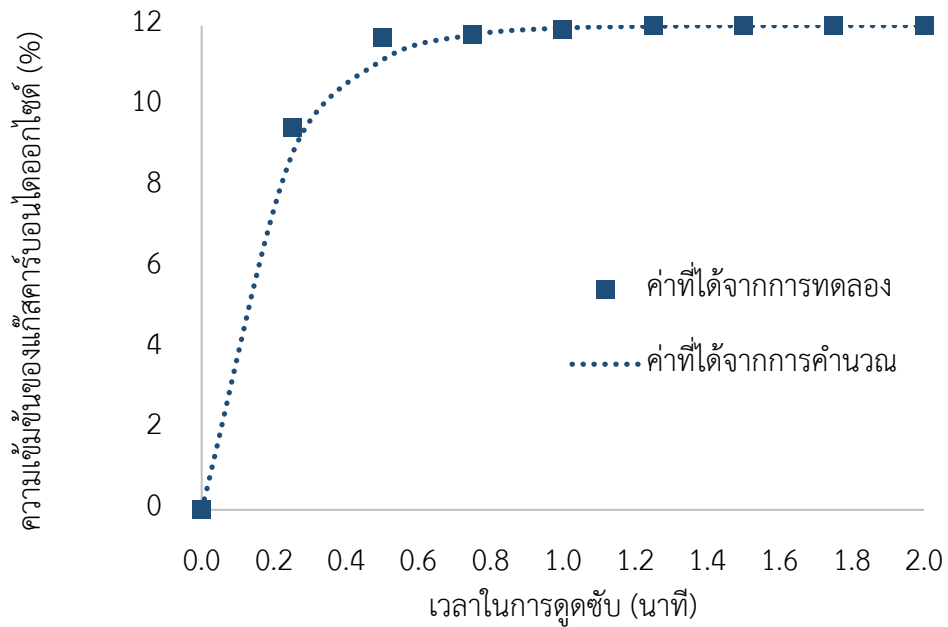
#### 4.5 ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ

ตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้น แบบจำลองที่เหมาะสมกับตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะมีเฉพาะเจาะจงกับตัวดูดซับแต่ละชนิด งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาจลนศาสตร์ของตัวดูดซับที่ต่างกัน 3 รูปแบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และ แบบจำลองการเสื่อมสภาพ เพื่อที่จะหาแบบจำลองที่เหมาะสมกับตัวดูดซับที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่ในงานวิจัยนี้ สำหรับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม เป็นแบบจำลองที่นักวิจัยศึกษากันมาก เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกับตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลายชนิด ในขณะที่แบบจำลองการเสื่อมสภาพยังไม่ค่อยเป็นที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้กับตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีความซับซ้อนในการคำนวณมากกว่า แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองการเสื่อมสภาพได้มีการพิจารณาผลของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับซึ่งอาจจะส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับได้ โดยข้อมูลที่น่ามาการหาแบบจำลองที่เหมาะสมคือ ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ค่าความเป็นเบสของสารละลายเท่ากับ 12 และระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยจะปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับที่แตกต่างกัน 5 ค่า ดังแสดงในรูปที่ 4.13

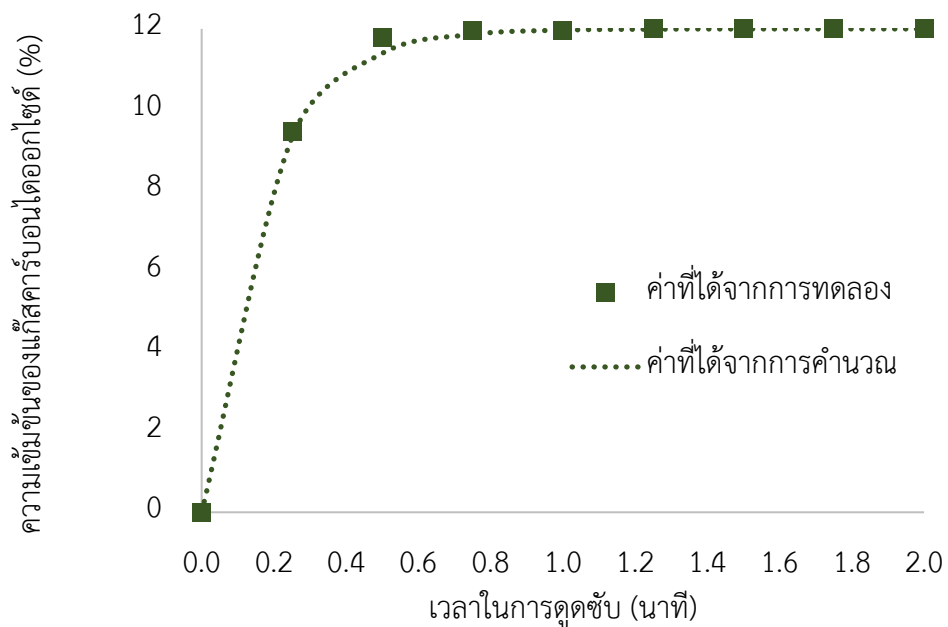


รูปที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างกัน

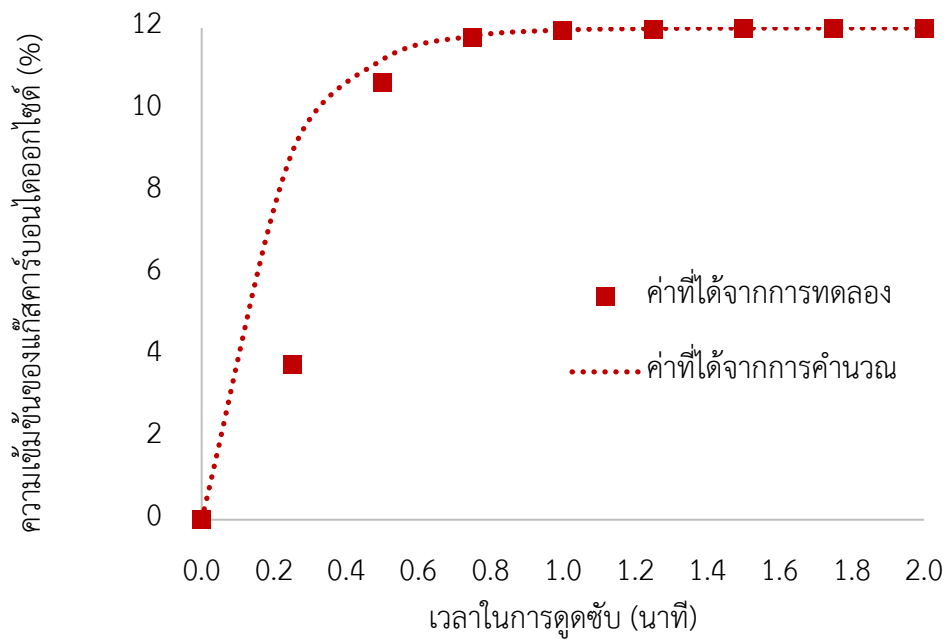
#### 4.5.1 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม



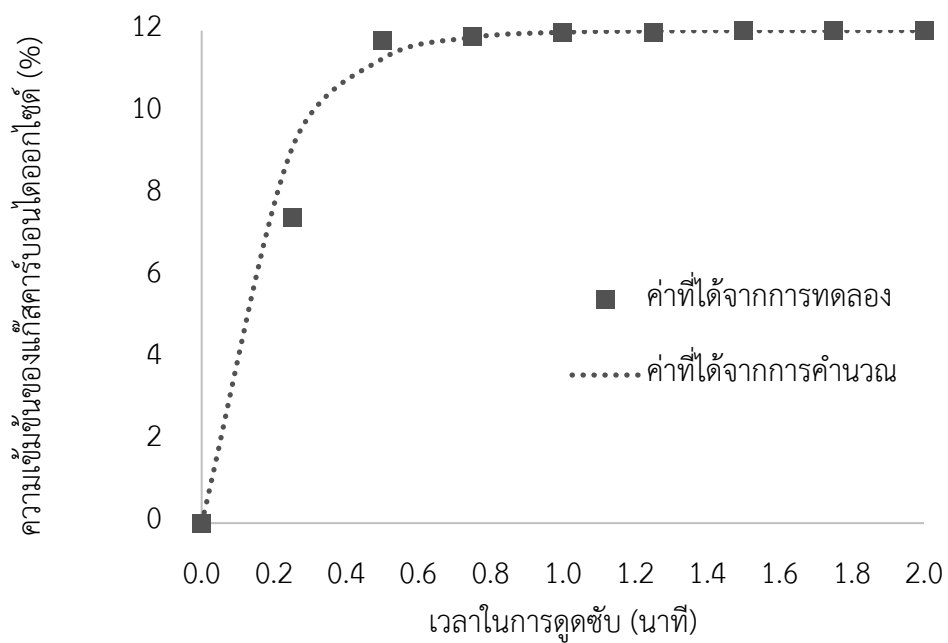
รูปที่ 4.14 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส



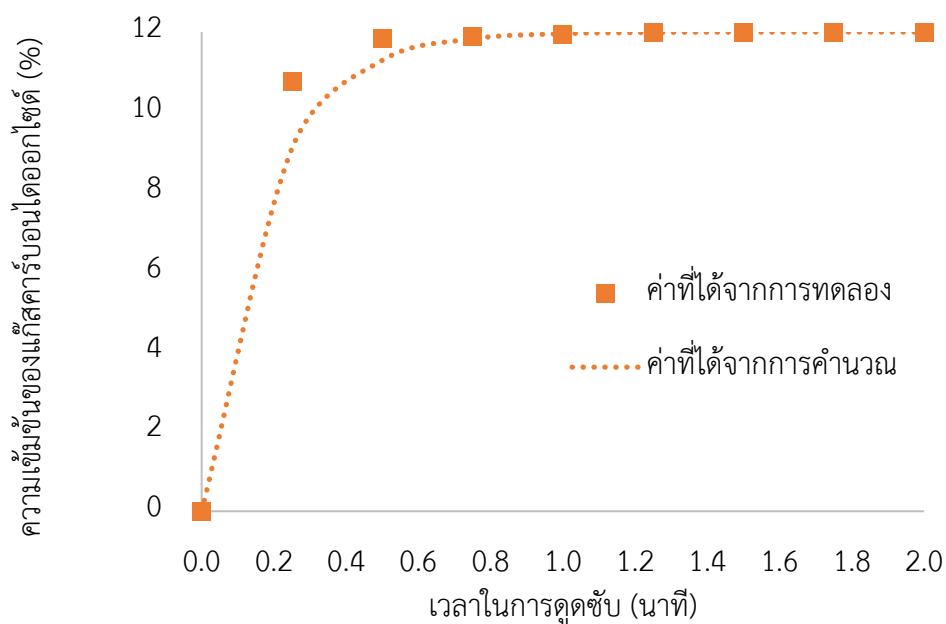
รูปที่ 4.15 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.17 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.18 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียบกับอุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.13)$$

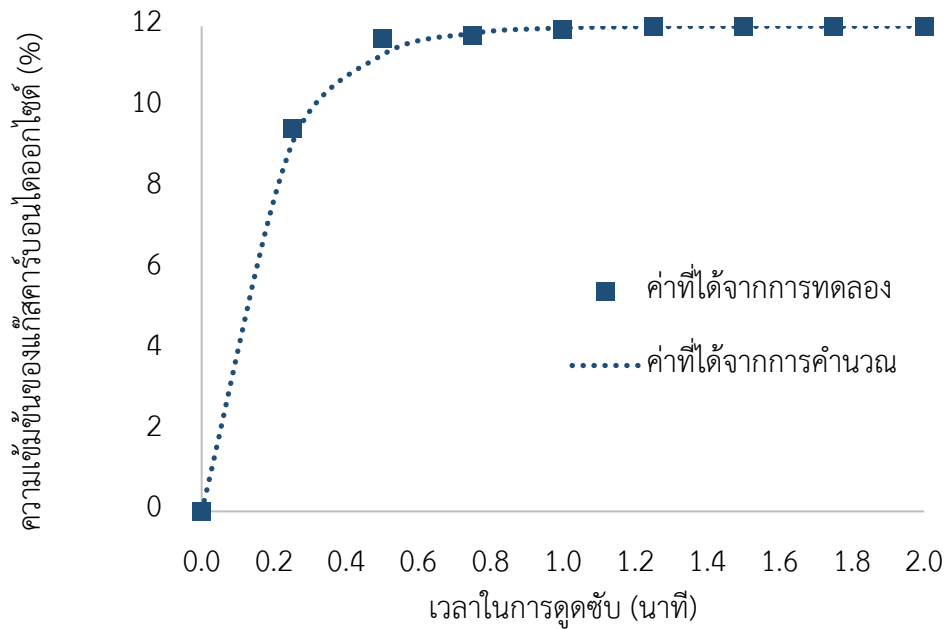
ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาสร้างความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.13 และ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจดังแสดงในตารางที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง หมายความว่า แบบจำลองนี้สามารถอธิบายจลนศาสตร์ของตัวดูดซับได้ แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะของกราฟ และ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.16 มีค่าต่ำกว่ากรณีอื่นๆ ดังนั้น แบบจำลองนี้อาจจะไม่ใช่แบบจำลองที่เหมาะสมกับตัวดูดซับที่ถูกพัฒนาขึ้นมาใหม่มากที่สุด

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่ปฏิกิริยาของแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม

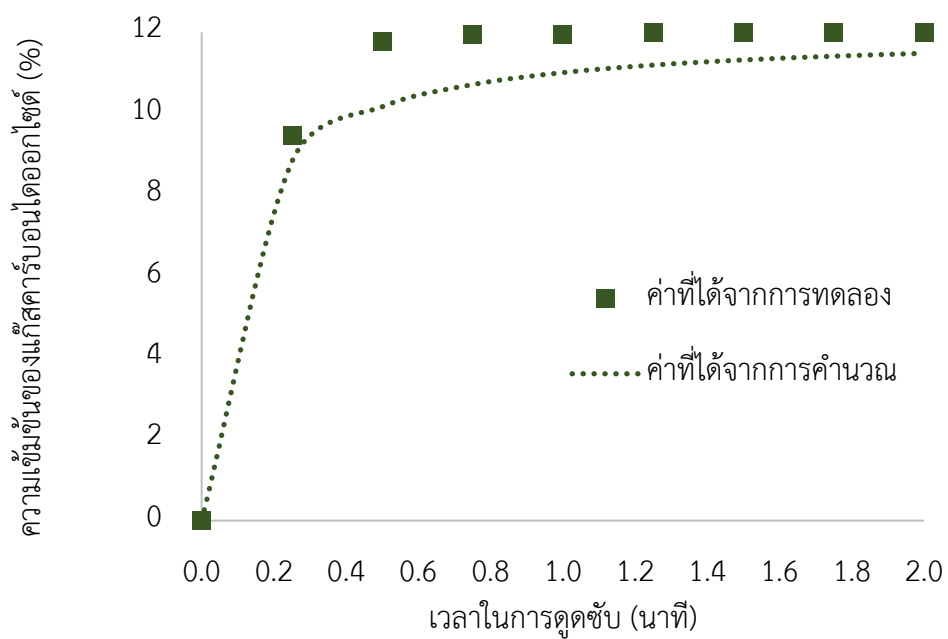
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่งเทียม ( $k_1$ ) (1/นาที)	$R^2$
40	5.28	0.9988
50	5.97	0.9997
60	5.48	0.9687
70	5.72	0.9956
80	5.66	0.9949



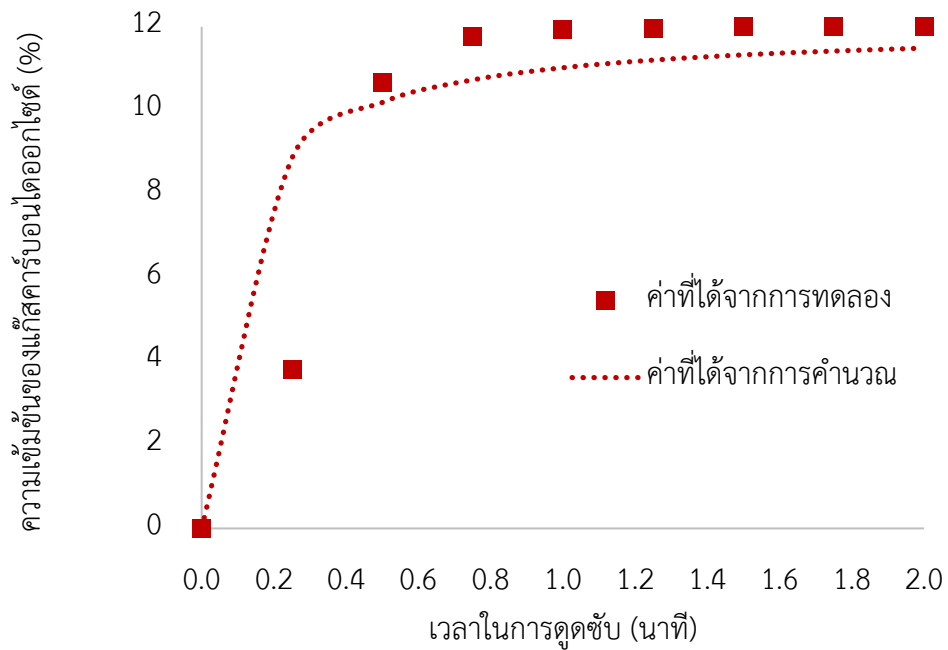
#### 4.5.2 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม



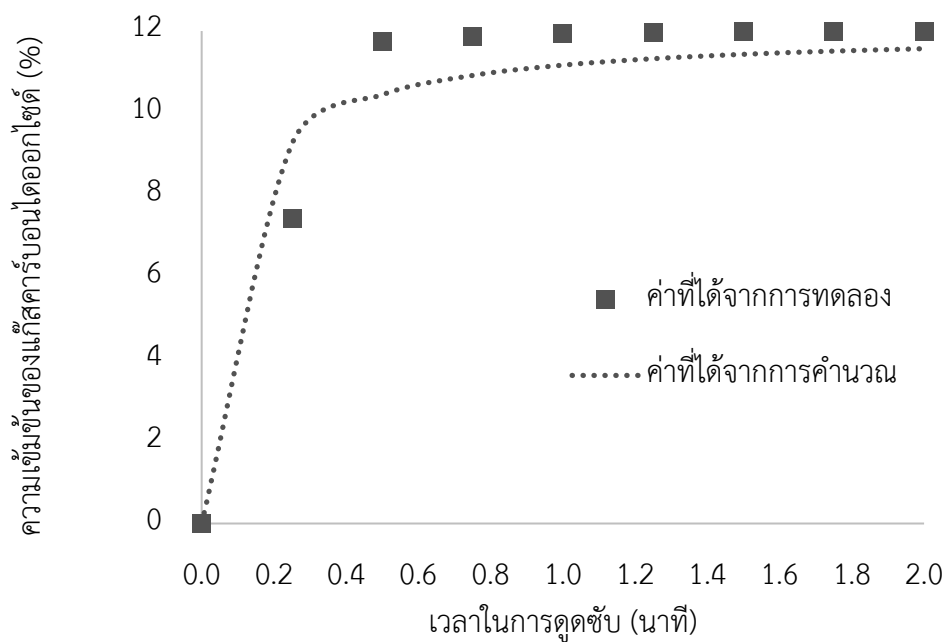
รูปที่ 4.19 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส



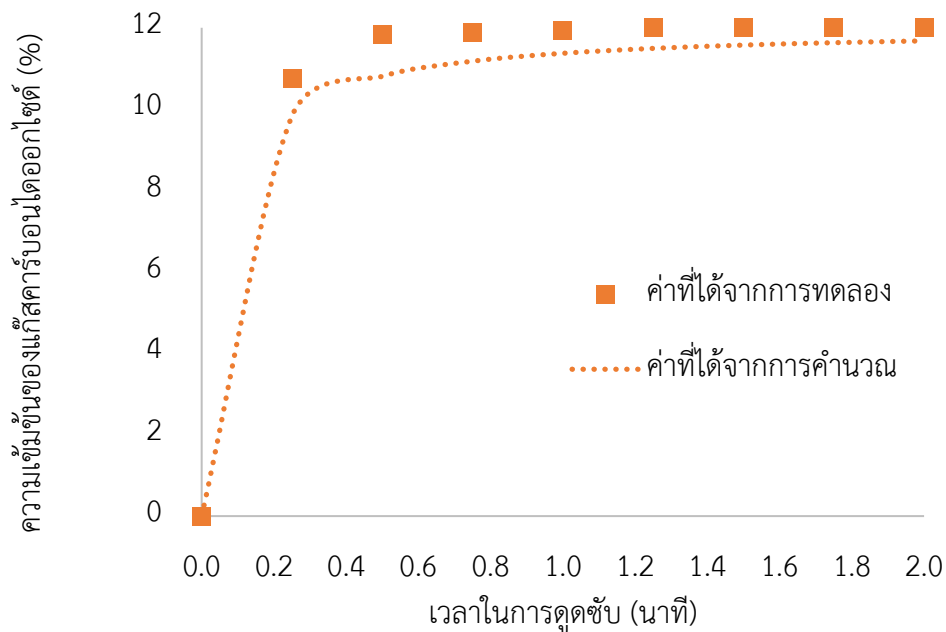
รูปที่ 4.20 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.21 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.22 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

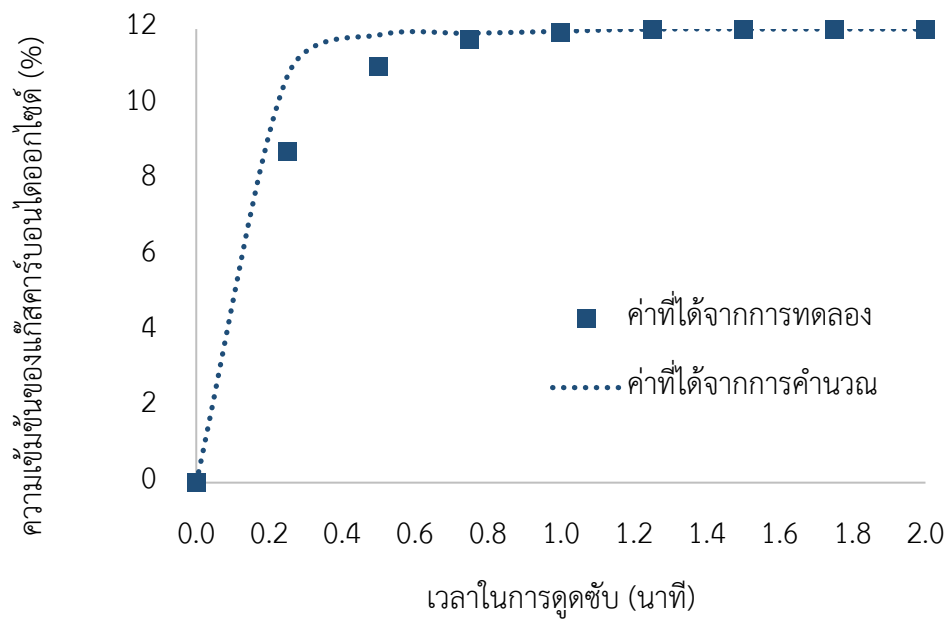
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e} \quad (2.16)$$

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาสร้างความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.16 และ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจที่มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แต่เมื่อพิจารณารูปที่ 4.19-4.23 พบว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดลองจริง แต่การลู่เข้าของค่าที่ได้จากการคำนวณนั้นช้ากว่าค่าที่ได้จากผลการทดลองจริง จึงทำให้ผลการทดลองในช่วงแรกๆ ไม่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

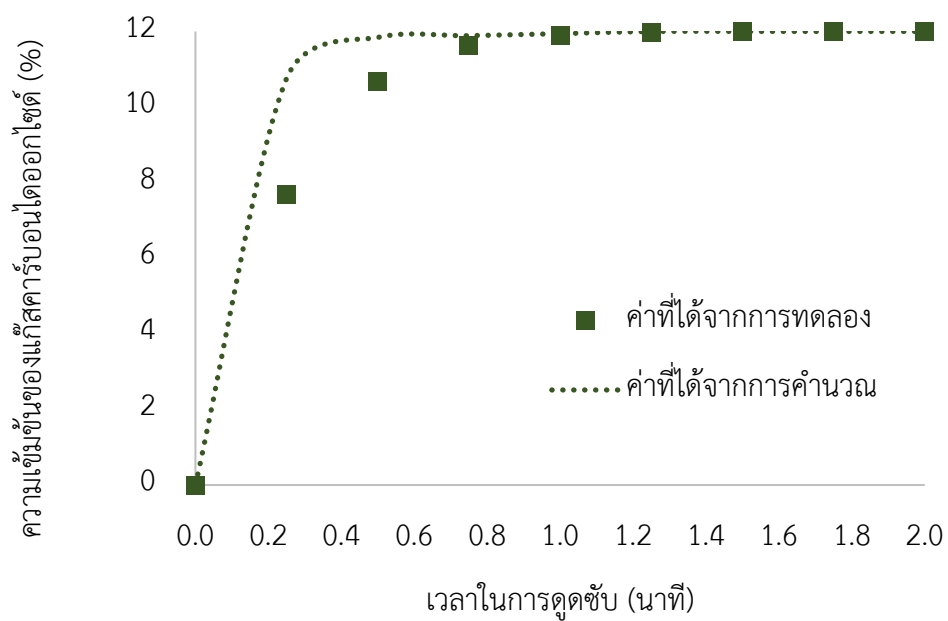
ตารางที่ 4.12 ค่าคงที่ปฏิกิริยาของแบบจำลองอันดับสองเทียม

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่ปฏิกิริยาเทียมอันดับสองเทียม ( $k_2$ ) (นาทื/มิลลิกรัม)	$R^2$
40	13.02	0.9974
50	11.11	0.9961
60	11.26	0.9925
70	13.44	0.9986
80	18.12	0.9999

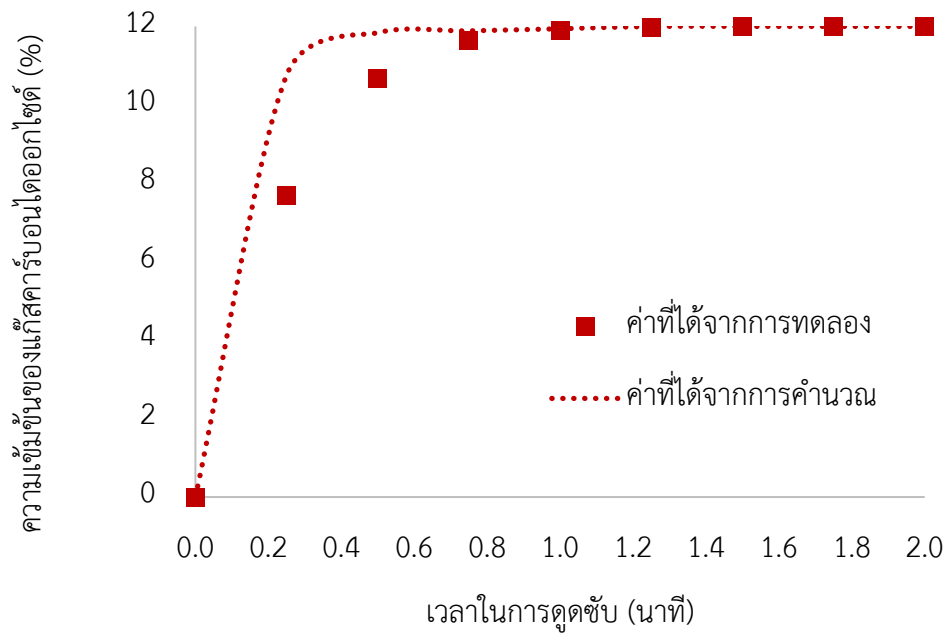
### 4.5.3 แบบจำลองการเสื่อมสภาพ



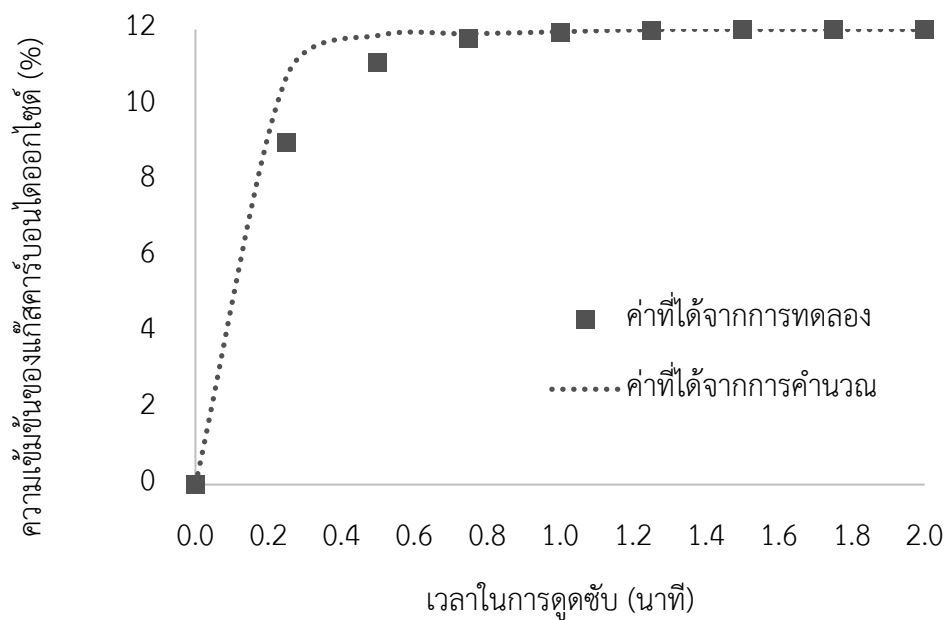
รูปที่ 4.24 แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส



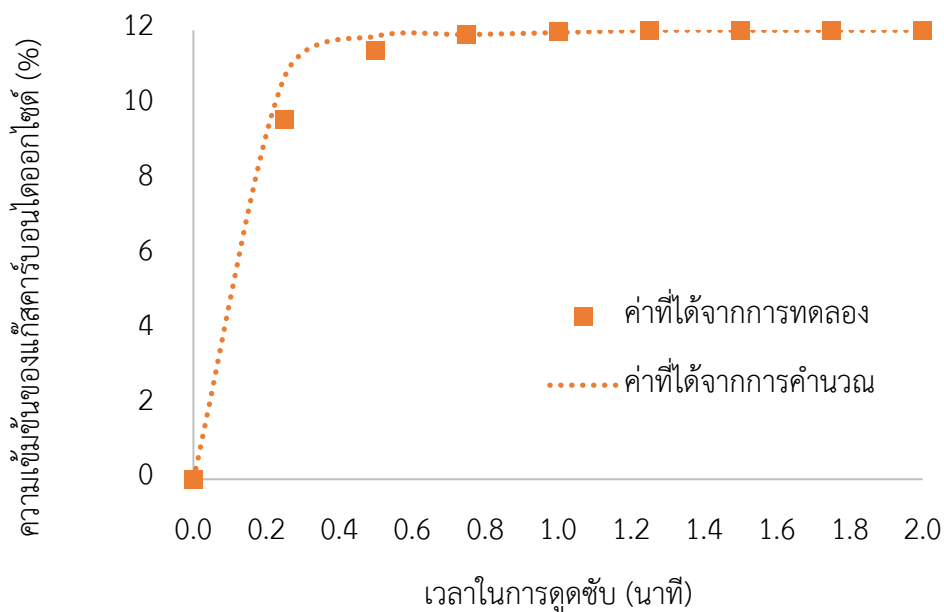
รูปที่ 4.25 แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.26 แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.27 แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.28 แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิในการดูดซับเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส

สำหรับแบบจำลองการเสื่อมสภาพจะมีการพิจารณาค่าคงที่ของปฏิกิริยา 2 ตัว คือ ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ ( $k_o$ ) และ ค่าคงที่ของอัตราการเสื่อมสภาพ ( $k_d$ ) โดยเมื่อพิจารณาตามสมมุติฐานของแบบจำลองการเสื่อมสภาพแล้ว การพิจารณาค่าคงที่ของอัตราการเสื่อมสภาพในแบบจำลองนี้ ทำให้แบบจำลองมีความเสมือนกับการดูดซับที่เกิดขึ้นจริงมากยิ่งขึ้น

$$\ln \left( \ln \left( \frac{c}{c_o} \right) \right) = \ln \left( \frac{k_o W}{Q_o} \right) - k_d t \quad (2.18)$$

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลมาสร้างความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.16 และ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แสดงว่า แบบจำลองนี้สามารถอธิบายจลนศาสตร์ของตัวดูดซับที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ได้ โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.24-4.28 และ ค่าที่ได้จากการคำนวณในแต่ละแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองการเสื่อมสภาพมีความเหมาะสมกับตัวดูดซับที่ถูกพัฒนาขึ้นมากที่สุด ทั้งนี้ ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jongartklang และ คณะ [29] ที่ทำการศึกษาแบบจำลองการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ โดยพิจารณาที่รูปแบบการไหลต่างๆกัน โดยพบว่า แบบจำลองการเสื่อมสภาพมีความเหมาะสมกับตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินา

ตารางที่ 4.13 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาแบบจำลองการเสื่อมสภาพ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าคงที่อัตราการดูดซับ ( $k_o$ ) (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล นาที)	ค่าคงที่อัตราการเสื่อมสภาพ ( $k_d$ ) (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล นาที)	$R^2$
40	1.14	5.17	0.9991
50	3.02	7.82	0.9979
60	1.70	5.36	0.9979
70	1.07	5.31	0.9993
80	1.07	6.29	0.9997



## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 ผลของตัวแปรการเตรียมตัวดูดซับ

- ชนิดของสารละลายเบส

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของสารละลายเบสทั้ง 4 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และ สารละลายโซเดียมคาร์บอเนต พบว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารละลายที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการเตรียมตัวดูดซับแบบอิมเพกชันในภาวะเบส เนื่องจาก ตัวดูดซับที่ผ่านการเตรียมโดยใช้สารละลายชนิดนี้ มีพื้นที่ผิวสูงส่งผลให้การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินาดีขึ้น เกิดผลึกรูปแท่งซึ่งเป็นโครงสร้างผลึกที่เหมาะสมต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับยังมีค่าสูง ปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้ตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีดั้งเดิม หรือ การเตรียมตัวดูดซับในน้ำปราศจากประจุ

- ค่าความเป็นเบสของสารละลาย

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าความเป็นเบสของสารละลาย 3 ค่า คือ ค่าความเป็นเบสเท่ากับ 8 10 และ 12 พบว่า ค่าความเป็นเบสที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้พื้นที่ผิว การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินา และ ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แปรผันตามค่าความเป็นเบส กล่าวคือ เมื่อค่าความเป็นเบสเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น

- ระยะเวลาในการเขย่า

งานวิจัยนี้ศึกษาระยะเวลาในการเขย่าที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ ระยะเวลาในการเขย่า 12 18 และ 24 ชั่วโมง พบว่า เมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น ทำให้พื้นที่ผิว การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินา และ ค่าความเป็นเบสบนผิวของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ ระยะเวลาเท่ากับ 24 ชั่วโมง เป็นค่าสูงสุดในการออกแบบการทดลอง ดังนั้น จึงได้มีการทำการทดลองเพิ่มเติม 2 ชุดการทดลองที่ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 30 และ 36 ชั่วโมง เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมตัวดูดซับ พบว่า เมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้นจาก 24 ชั่วโมง



ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับกลับลดลง เนื่องจาก ระยะเวลาในการเขย่าที่นานเกินไปทำลายผลึกรูปร่างของโพแทสเซียมคาร์บอเนตทำให้ ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต และ ค่าความเป็นเบสลดต่ำลง

จากการศึกษาตัวแปรทั้งหมด พบว่า ภาวะที่ดีที่สุดในการเตรียมตัวดูดซับ คือ การเตรียมตัวดูดซับในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ค่าความเป็นเบสของสารละลายเท่ากับ 12 และ ระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

## 5.2 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ

งานวิจัยนี้ศึกษาอุณหภูมิในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่างกัน 5 ค่า คือ 40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 60 องศาเซลเซียส เนื่องจาก อัตราในการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ปฏิกิริยาในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ถ้าอุณหภูมิในการดูดซับสูงเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับซึ่งเป็นการคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ

## 5.3 ความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ

จากการทดลองดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ โดยจะนำตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วมาฟื้นฟูสภาพด้วยวิธีการลดความดันของระบบเพื่อให้ตัวดูดซับคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ก่อนจะนำไปใช้งานใหม่ โดยจะทำการทดลองซ้ำจนกระทั่งความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าคงที่ พบว่า เมื่อทำการทดลองการใช้ซ้ำจนถึงครั้งที่ 7 ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าคงที่ และ ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับร้อยละ 53 การเสื่อมสภาพของตัวดูดซับที่เกิดขึ้น เนื่องจาก การเกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ดาวนโซโนสในขณะทำปฏิกิริยาทำให้โพแทสเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีค่าต่ำลง

## 5.4 จลนศาสตร์ในการดูดซับ

จากการนำข้อมูลในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ มาสร้างความสัมพันธ์เพื่อหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา และ การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณ และ ค่าที่ได้จากการทดลองจริง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของแบบจำลองทั้ง 3 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และ แบบจำลองการเสื่อมสภาพ

มีค่าใกล้เคียง 1 หมายความว่า แบบจำลองทั้ง 3 แบบสามารถเป็นแบบจำลองที่อธิบายจลนศาสตร์ของตัวดูดซับที่ถูกพัฒนาในงานวิจัยนี้ได้ แต่เมื่อพิจารณาถึงการลู่อัดระหว่างข้อมูลสองชุด คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณ และ ค่าที่ได้จากผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองการเสื่อมสภาพเป็นแบบจำลองที่ให้ผลการคำนวณที่มีการลู่อัดค่าที่ได้จากการทดลองเร็วที่สุด ดังนั้น แบบจำลองการเสื่อมสภาพจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ในการอธิบายจลนศาสตร์ของตัวดูดซับที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

### 5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาค่าความเป็นเบสที่สูงกว่า 12 ซึ่งอาจจะเป็นค่าที่เหมาะสมในการเตรียมตัวดูดซับ
2. ควรศึกษาผลของปริมาณไอน้ำในกระบวนการดูดซับ
3. ควรศึกษาผลของความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าที่แตกต่างกัน





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณสารที่ค่าความเป็นเบสของสารละลาย

$$\text{จากสมการ} \quad K_w = [H_3O^+][OH^-] \quad (\text{ก.1})$$

$$[H_3O^+] = \frac{K_w}{[OH^-]} \quad (\text{ก.2})$$

$$pH = -\log[H_3O^+] \quad (\text{ก.3})$$

$K_w$  : ค่าคงที่ ( $1 \times 10^{-14}$ )

$[H_3O^+]$  : ไฮโดรเนียมไอออน

$[OH^-]$  : ไฮดรอกไซด์ไอออน

pH : ค่าความเป็นเบสของสารละลาย

- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH) ค่าความเป็นเบสเท่ากับ 12 (pH =12)

มวลโมเลกุล : 39.997 กรัมต่อโมล      ความหนาแน่น : 2.1 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากสมการที่ ก.3 จะมีค่า pH = 12 ก็ต่อเมื่อ มีไฮโดรเนียมไอออน  $[H_3O^+]$  เท่ากับ  $1 \times 10^{-12}$  และ ไฮดรอกไซด์ไอออน  $[OH^-]$  เท่ากับ  $1 \times 10^{-2}$  โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แยกตัวได้ 1 ครั้ง ดังนั้น เมื่อพิจารณาที่ปริมาณน้ำเท่ากับ 1 ลิตรจะได้ว่า มีความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนเท่ากับ  $1 \times 10^{-2}$  โมลต่อลิตร

$$\text{NaOH (กรัมต่อลิตร)} = \frac{1 \times 10^{-2} \text{ โมล}}{1 \text{ ลิตร}} \times \frac{39.997 \text{ กรัม}}{1 \text{ โมล}}$$

ดังนั้นจากการคำนวณดังกล่าวจะได้ว่า เมื่อต้องการเตรียมสารละลายที่มีค่าความเป็นเบสเท่ากับ 12 ในน้ำ 1 ลิตรจะต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.4 กรัม

- ค่าความเป็นเบสของสารละลายเท่ากับ 10 (pH =10)

สำหรับการเตรียมสารละลายที่มีค่า pH ต่ำกว่า นิยมจะใช้สารตั้งต้นเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าเอามาเจือจาง ดังแสดงในสมการที่ ก.4

$$N_1 V_1 = N_2 V_2 \quad (4)$$

$N_1$  : ความเข้มข้นของสาร 1

$N_2$  : ความเข้มข้นของสาร 2

$V_1$  : ปริมาตรของสาร 1

$V_2$  : ปริมาตรของสาร 2

ค่า  $\text{pH} = 10$  ก็ต่อเมื่อ มีไฮโดรเนียมไอออน  $[\text{H}_3\text{O}^+]$  เท่ากับ  $1 \times 10^{-10}$  และ ไฮดรอกไซด์ไอออน  $[\text{OH}^-]$  เท่ากับ  $1 \times 10^{-4}$  ดังนั้น ความเข้มข้นของสารละลาย 2 (สารละลายที่มี  $\text{pH} = 10$ ) เท่ากับ  $1 \times 10^{-4}$  โมลต่อลิตร จากนั้นแทนข้อมูลในสมการที่ ก.4 คือ

$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

$$(10^{-2})V_1 = (10^{-4})(1\text{ลิตร})$$

จากการคำนวณ พบว่าปริมาณสารละลายที่มีค่าความเป็นเบสเท่ากับ 12 สามารถนำมาใช้ในการเจือจางให้กลายเป็นสารละลายที่มีค่าความเป็นเบสสองระดับสำหรับการคำนวณค่าความเป็นเบสของสารละลายที่ค่าความเป็นเบสเท่ากับ 8 สามารถเตรียมได้โดยการคำนวณเช่นเดียวกันกับสารละลายที่มีค่าความเป็นเบสเท่ากับ 10



## ภาคผนวก ข

### การคำนวณความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามทฤษฎี

มวลโมเลกุลของ  $K_2CO_3$  : 138 กรัมต่อโมล      มวลโมเลกุลของ  $H_2O$  : 18 กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของ  $CO_2$  : 44 กรัมต่อโมล      มวลโมเลกุลของ  $2KHCO_3$  : 110 กรัมต่อโมล

ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกอิมเพรกได้ร้อยละ 21.1 โดยน้ำหนัก



ตัวอย่างการคำนวณความสามารถในการดูดซับ

$$\text{Capture capacity} \left( \frac{\text{mg } CO_2}{\text{g sorbent}} \right) = \frac{44000 \text{ mg}}{138 \text{ g}} \times 0.211$$

ดังนั้น ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่เป็นไปได้ของตัวดูดซับที่เตรียมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีค่าความเป็นเบสของสารละลายเท่ากับ 12 ระยะเวลาในการเขย่า เท่ากับ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 67.28 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ

## ภาคผนวก ค

### 1. การคำนวณความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากข้อมูลการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม CO<sub>2</sub> Analyzer จะได้รับรายละเอียดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เซนเซอร์สามารถวัดได้ตลอดเวลา เมื่อนำข้อมูลสองชุดนี้มาวาดกราฟจะได้กราฟ Breakthrough Curve ในทางทฤษฎี พื้นที่กราฟหาได้จากสมการที่ ค.1

$$q = \frac{1}{m} \int_0^t Q(C_{in} - C_{out})dt \quad (\text{ค.1})$$

เมื่อ  $q$  คือ ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ)

$m$  คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

$C_{in}$  คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ขาเข้า (% มวล) (-)

$C_{out}$  คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ขาออก (% มวล) (-)

$Q$  คือ อัตราการไหลของแก๊สโดยมวล (กรัมต่อวินาที)

$t$  คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (วินาที)

งานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Excel ในการคำนวณความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการ ดังนี้

$$\text{Volume CO}_{2,\text{out}} = \frac{\text{Gas flow rate} \times \% \text{CO}_2}{100} \quad (\text{ค.2})$$

$$\text{Volume CO}_{2,\text{add}} = \frac{\text{Gas flow rate} \times \% \text{CO}_{2,\text{final}}}{100} - \frac{\text{Gas flow rate} \times \% \text{CO}_2}{100} \quad (\text{ค.3})$$

$$\text{Mass CO}_{2,\text{add}} = \frac{44 \times \text{Volume CO}_{2,\text{add}}}{0.082 \times (273 + T(^{\circ}\text{C}))} \quad (\text{ค.4})$$

$$\text{Strip area} = \text{Mass CO}_{2,\text{add}} \times (\text{Time2} - \text{Time1}) \quad (\text{ค.5})$$

$$\text{Area} = \text{Sum of strip area} \quad (\text{ค.6})$$

$$\text{Capacity} = \frac{\text{Area} \times 1,000}{\text{initial sorbent loading}} \quad (\text{ค.7})$$

### ตัวอย่างการคำนวณ

จากข้อมูล CO<sub>2</sub> Analyzer

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลการทดลอง

(Overall)	
Flow rate gas	5 L/min
Initial sorbent loading	5 g
Time 0.016667 – 0.033333 min	
%CO <sub>2,t</sub> = 0.016667	0.096 min
%CO <sub>2,t</sub> = 0.033333	0.096 min
%CO <sub>2,final</sub>	12.00
Temperature	60 °C

$$\text{Volume CO}_2 \text{ out} = (5 \times 0.096) / 100 = 0.0048$$

$$\text{Volume CO}_2 \text{ add} = (12.00 \times 5 / 100) - (5 \times 0.096 / 100) = 0.5952$$

$$\text{Mass CO}_2 \text{ add} = (44 \times 0.5952) / (0.082 \times (273 + 60)) = 0.9591 \text{ g}$$

$$\text{Strip area} = 0.9591 \times (0.033333 - 0.016667)$$

เมื่อคิดผลรวมของ Strip area จะได้ว่า Total Area = 0.2879

$$\text{Capacity} = 0.2880 \times 1000 / 5 = \mathbf{57.58 \text{ mg CO}_2 / \text{g sorbent}}$$

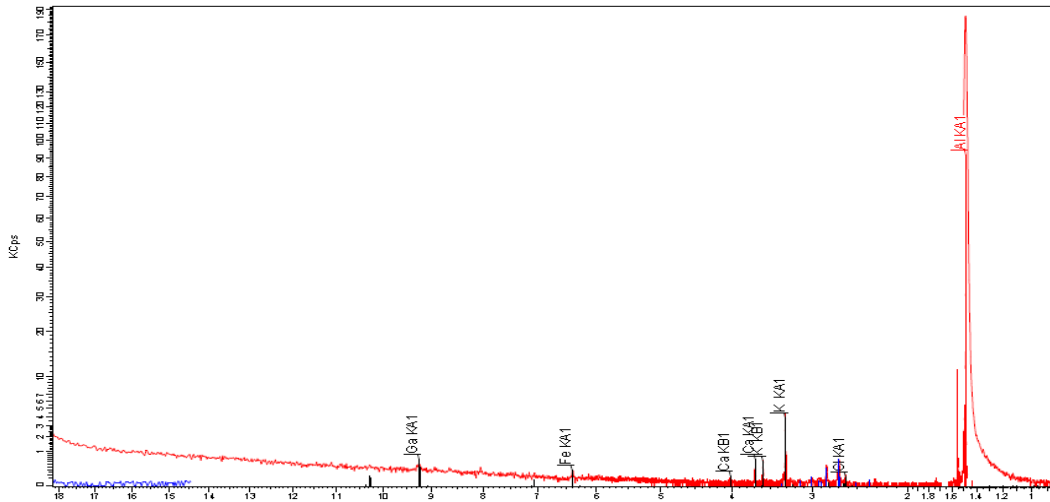


ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ XRF

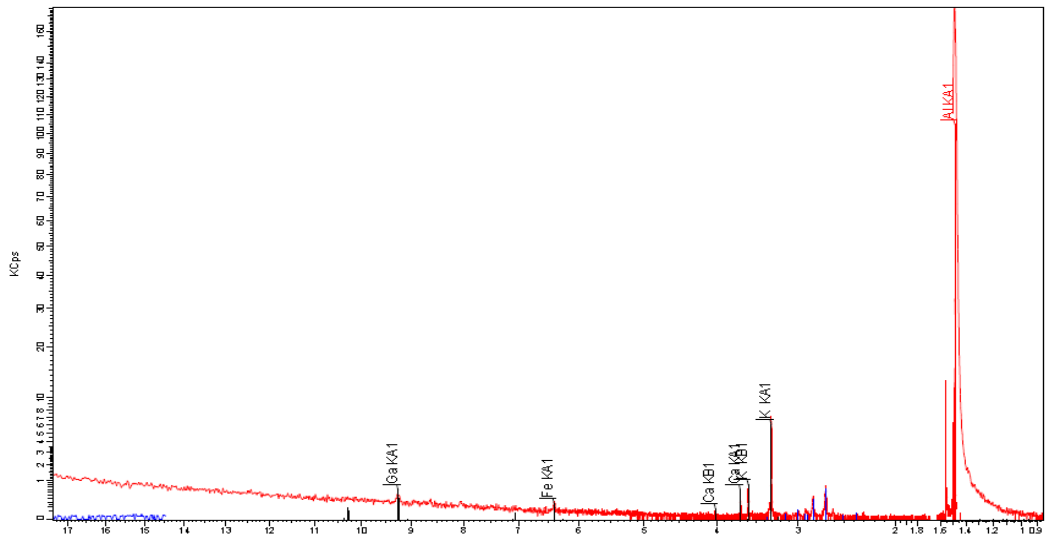
ตัวอย่าง DI-pH7-24hrs

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Cl	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	CuO	BaO
56.6 KCps	4.5 KCps	0.2 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps	0.0 KCps
66.3 %	3.36 %	0.176 %	727 PPM	200 PPM	60.9 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM



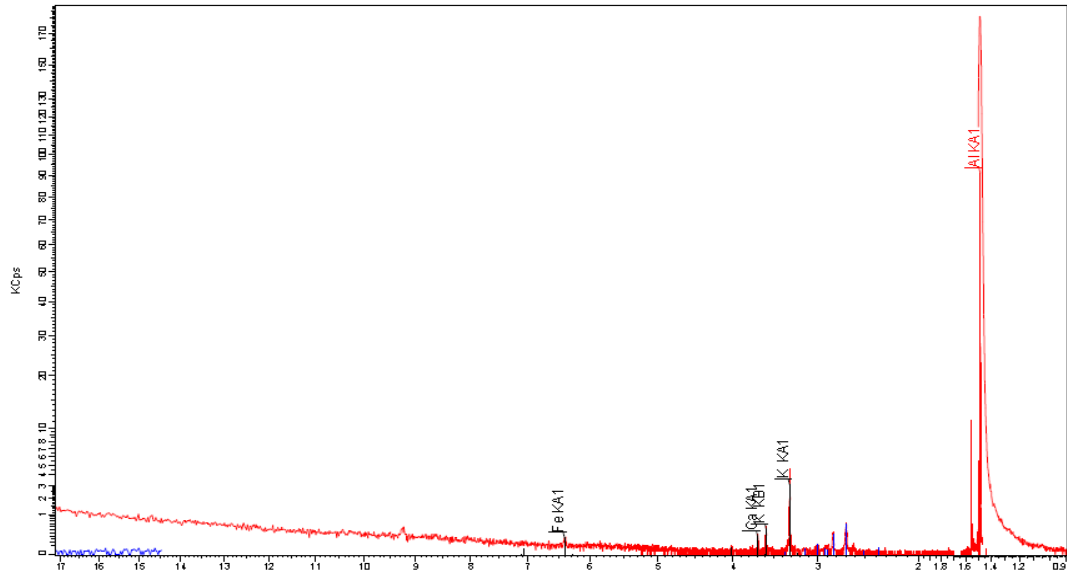
ตัวอย่าง NaOH-pH12-24hrs

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO
52.2 KCps	7.0 KCps	0.2 KCps	0.1 KCps	0.2 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps
78.9 %	5.21 %	0.196 %	218 PPM	82.3 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM



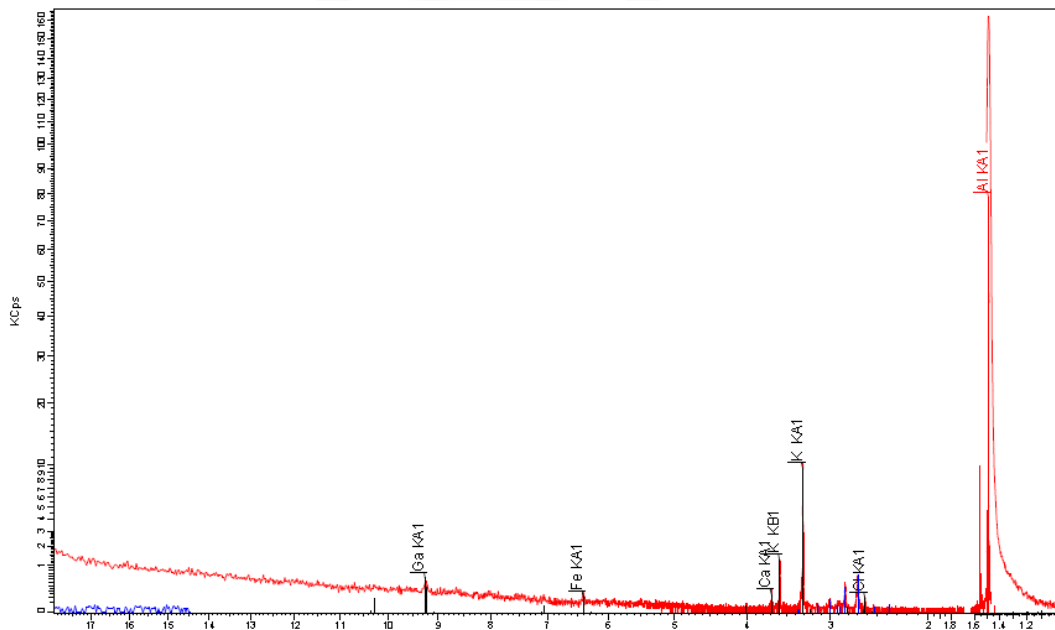
### ตัวอย่าง Ca(OH)<sub>2</sub>-pH12-24hrs

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	CuO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
54.7 KCps	4.4 KCps	0.2 KCps	0.1 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps	0.0 KCps	0.2 KCps
82.7 %	3.26 %	0.193 %	160 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM



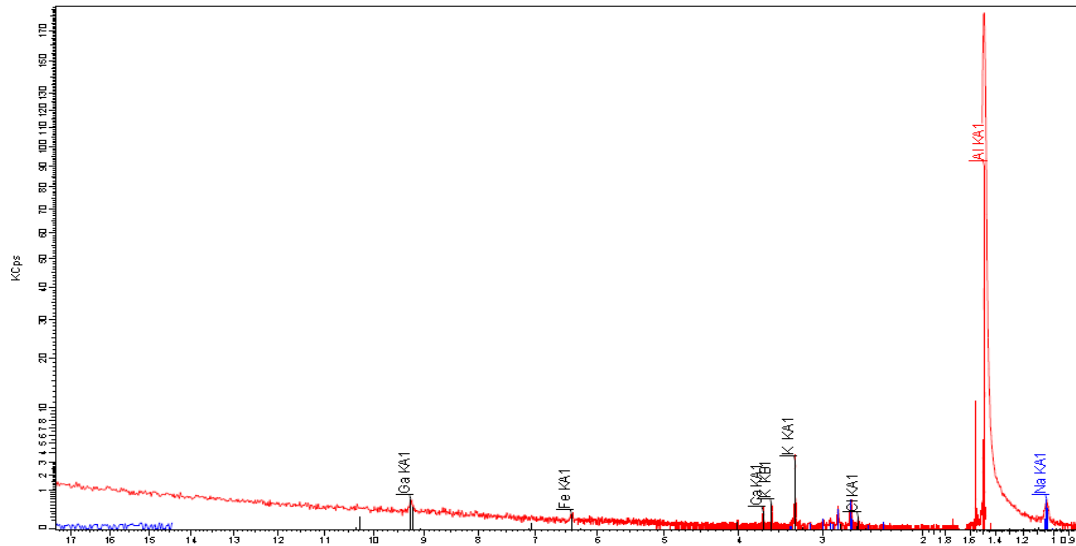
### ตัวอย่าง NH<sub>4</sub>OH-pH12-24hrs

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Cl	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>
48.5 KCps	10.1 KCps	0.2 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.2 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.2 KCps
72.9 %	7.45 %	0.164 %	678 PPM	185 PPM	96.7 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM



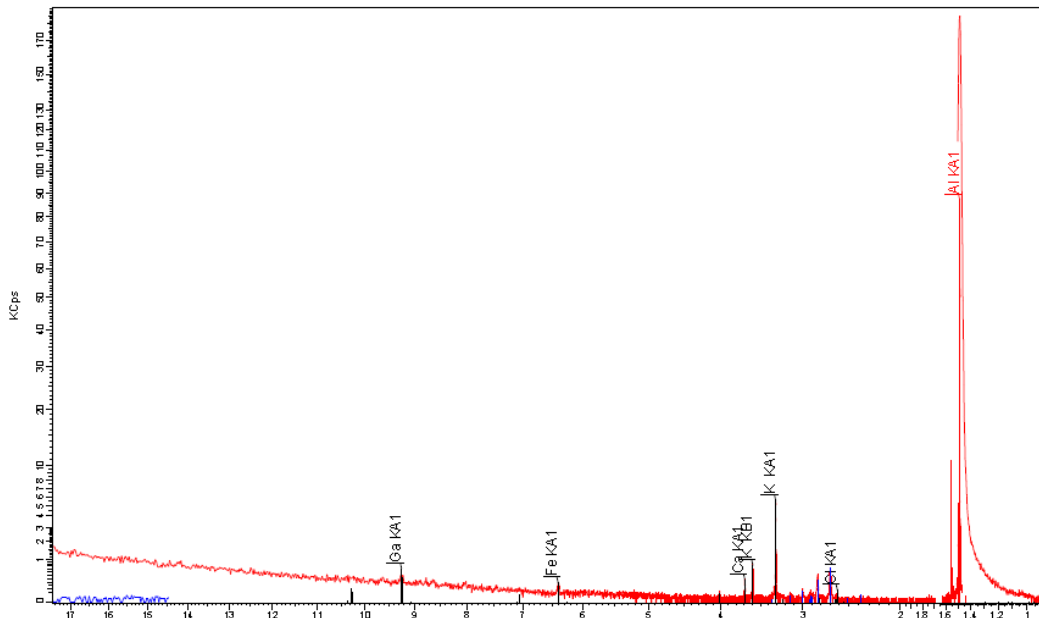
### ตัวอย่าง $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -pH12-24hrs

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>	Cl	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	NiO	CuO
54.6 KCps	3.5 KCps	0.4 KCps	0.3 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps	0.3 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps
84.0 %	2.58 %	1.12 %	0.216 %	0.118 %	692 PPM	108 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM



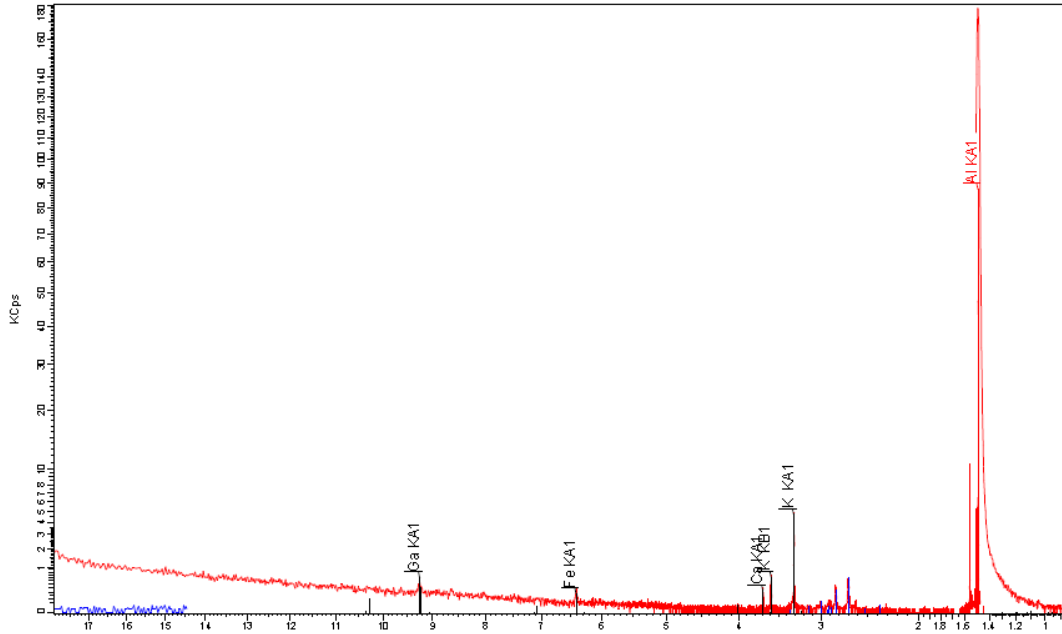
### ตัวอย่าง NaOH-pH8-24hrs

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Cl	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	SrO	MoO <sub>3</sub>
55.1 KCps	5.7 KCps	0.2 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.2 KCps	0.2 KCps
83.9 %	4.22 %	0.183 %	463 PPM	230 PPM	56.6 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM



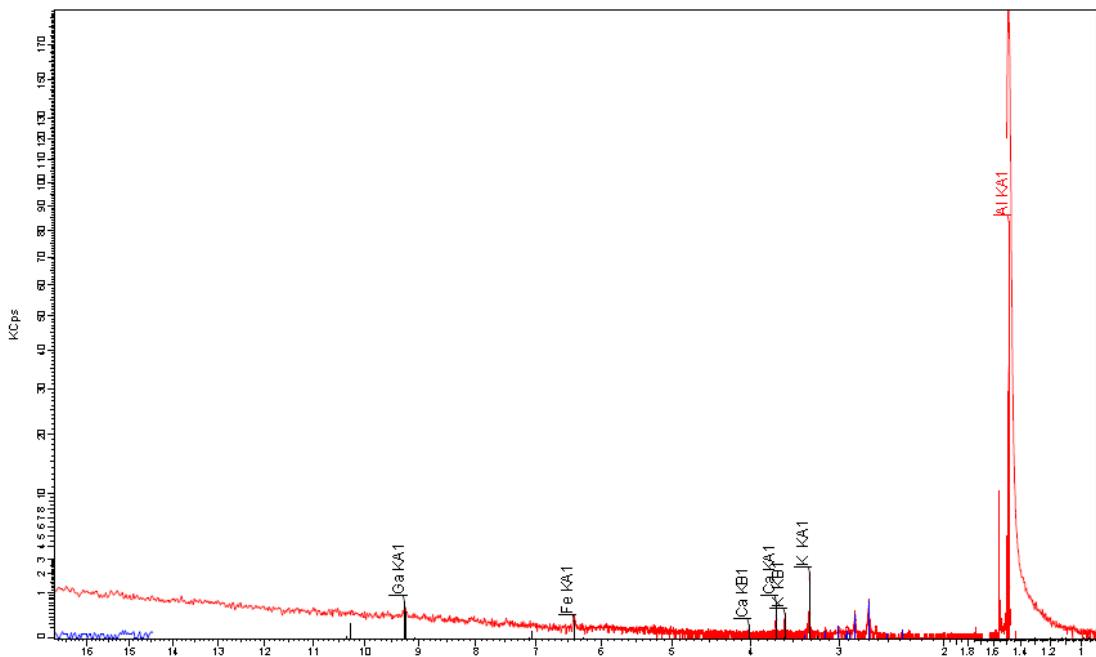
ตัวอย่าง NaOH-pH10-24hrs

Al2O3	K2O	CaO	Fe2O3	Ga2O3	Na2O	SiO2	P2O5	SO3	Cl	Sc2O3
53.3 KCps	4.9 KCps	0.3 KCps	0.2 KCps	0.2 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps	0.0 KCps
80.3 %	3.62 %	0.210 %	276 PPM	76.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM



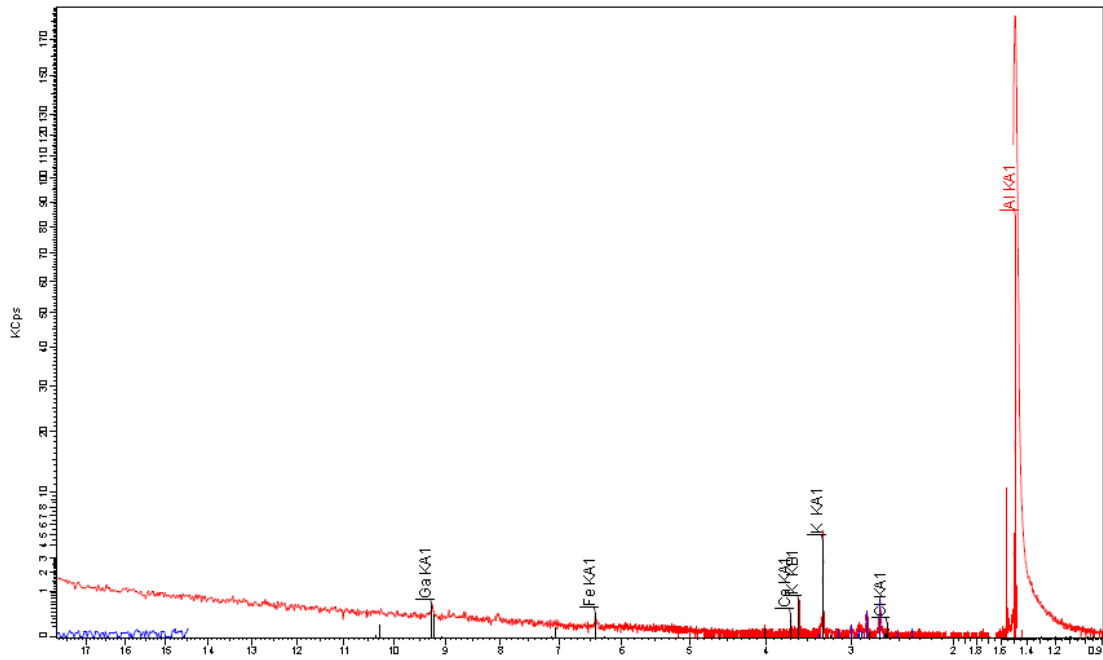
ตัวอย่าง NaOH-pH12-12hrs

Al2O3	K2O	CaO	Fe2O3	Ga2O3	SiO2	P2O5	SO3	Cl	TiO2	NiO
57.1 KCps	2.0 KCps	0.3 KCps	0.2 KCps	0.2 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps	0.0 KCps	0.1 KCps
86.5 %	1.49 %	0.212 %	242 PPM	77.1 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM



### ตัวอย่าง NaOH-pH12-36hrs

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Cl	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
54.7 KCps	5.4 KCps	0.3 KCps	0.1 KCps	0.1 KCps	0.2 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps	0.0 KCps
83.0 %	4.00 %	0.217 %	763 PPM	214 PPM	85.3 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM	0.0 PPM



## บรรณานุกรม

1. Knudsen, J., et al., Experience with CO<sub>2</sub> capture from coal flue gas in pilot-scale: Testing of different amine solvents. *Energy Procedia*, 2009. **1**(1): p. 783–790.
2. Qi, G., et al., High efficiency nanocomposite sorbents for CO<sub>2</sub> capture based on amine-functionalized mesoporous capsules. *Energy Environ. Sci.*, 2011. **4**(2): p. 444-452.
3. Niels N. A. H. Meis, J.H.B., and Krijn P. de Jong, On the influence and role of alkali metals on supported and unsupported activated hydrotalcites for CO<sub>2</sub> Sorption. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2010. **49**: p. 8086–8093.
4. Iruretagoyena, D., et al., Influence of Alkali Metals (Na, K, and Cs) on CO<sub>2</sub> Adsorption by Layered Double Oxides Supported on Graphene Oxide. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015. **54**(46): p. 11610–11618.
5. Carbon capture & storage association. 2011; Available from: <http://www.ccsassociation.org/what-is-ccs/capture>.
6. González Díaz, A., Sequential supplementary firing in natural gas combined cycle plants with carbon capture for enhanced oil recovery. 2016, School of engineering university of Edinburgh: <https://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/22935>.
7. DOE to provide "\$1B in cost-shared funding to FutureGen; Oxy-combustion of coal with carbon capture and storage. 2014; Available from: <https://www.greencarcongress.com/2014/01/20140116-futuregen.html>.
8. Coal use and carbon capture technology. 2012; Available from: <https://crf.sandia.gov/coal-use-and-carbon-capture-technologies/>.
9. Aaron, D. and C. Tsouris, Separation of CO<sub>2</sub> from Flue Gas: A Review. *Separation Science and Technology*. *Separation Science and Technology*, 2011. **40**: p. 321–348.
10. วรินทร์ บัญชาพัฒนศักดิ์ and มาลี สันติคุณากรณ์, การแยกแก๊สไฮโดรเจนจากแก๊สผสมด้วยเมมเบรนพอลิเอทิลีน, in *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 2560. p. 350–360.
11. Lee, J. and N.R. Aluru, Water-solubility-driven separation of gases using graphene membrane. *Journal of membrane science* 2013. **428**: p. 546–553.
12. การดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ 2011; Available from: <http://tamagozilla.blogspot.com/2012/02/mo-memoir-monday-13-february-2555.html>
13. นพิตา หิณชิระนันท์ and ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย, เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา. 2556: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
14. Wang, J., et al., Recent advances in solid sorbents for CO<sub>2</sub> capture and new development trends. *Energy Environment Science*, 2014. **7** p. 3478–3518.
15. Fluidization. 2010; Available from: <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc53/content/nstkc53-065.html>
16. Fluidized Bed Reactor 1998; Available from: <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/Reactors/FBR/FBR.html>.
17. P, B. Bed-to-wall heat transfer in a fluidized bed coal combustor. in *AIChE Symposium*

- 1978.
18. Ye, M., M.A. van der Hoef, and J.A.M. Kuipers, The effects of particle and gas properties on the fluidization of Geldart A particles. *Chemical Engineering Science* 2011. **60(16)**: p. 4567–4580.
  19. Flow of a fluid—solid mixture between flat plates *Chemical Engineering Science* 1991. **46(7)** p. 1713–1723.
  20. Geldart, D. and A.R. Abrahamsen, Homogeneous fluidization of fine powders using various gases and pressures. *Powder Technology* 1978. **19(1)** p. 133–136.
  21. Berruti, F., et al., Hydrodynamics of circulating fluidized bed risers: a review *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1995. **73(5)**: p. 579–602.
  22. Rhodes, M., What is turbulent fluidization? . *Powder technology* 1996. **88(1)** p. 3–14.
  23. Jiradilok, V., D. Gidaspow, and R.W. Breault, Computation of gas and solid dispersion coefficients in turbulent risers and bubbling beds. *Chemical Engineering Science* 2007. **62(13)** p. 3397–3409.
  24. Tsukada, M., D. Nakanishi, and M. Horio, The effect of pressure on the phase transition from bubbling to turbulent fluidization. *International journal of multiphase flow* 1993. **19(1)** p. 27–34.
  25. Bi, H.T. and J.R. Grace, Flow regime diagrams for gas-solid fluidization and upward transport. *International Journal of Multiphase Flow* 1995. **21(6)** p. 1229–1236.
  26. Monazam, E.R., et al., Identification and characteristics of different flow regimes in a circulating fluidized bed. *Powder Technology* 2005. **155(1)** p. 17–25.
  27. Jiang, P., et al., Baffle effects on performance of catalytic circulating fluidized bed reactor. *AIChE journal*, 1991. **37(9)** p. 1392–1400.
  28. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, พลูอิโดเชชั่น. 2560: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
  29. Jongartklang, N., et al., Correlations of kinetic parameters with various system operating conditions for CO<sub>2</sub> sorption using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solid sorbent in a fluidized bed reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016. **4**: p. 1938–1947.
  30. Optimization of Spouted Bed Scale-Up by Square-Based Multiple Unit Design. 2012.
  31. Plazinski, W., W. Rudzinski, and A. Plazinska, Theoretical models of sorption kinetics including a surface reaction mechanism: A review *Advances in Colloid and Interface Science* 2009. **152**: p. 2–13. .
  32. Liu Q., S.J., Zheng S., Tao M., He Y., Shi Y. , Kinetics studies of CO<sub>2</sub> adsorption/desorption on amine-functionalized multiwalled carbon nanotubes *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2014. **53** p. 11677–11683.
  33. Zhang, L., et al., Synthesis and characterization of mesoporous alumina with high specific area via coprecipitation method *Vacuum*, 2016. **133** p. 1–6.
  34. Guo, Y., et al., K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> modified potassium feldspar for CO<sub>2</sub> capture from postcombustion Flue Gas. *Energy Fuels*, 2015. **29**: p. 8151–8156.
  35. Hwang, W.B., et al., CO<sub>2</sub> capture and regeneration properties of MgO-based sorbents promoted with alkali metal nitrates at high pressure for the sorption enhanced water gas shift process. *Process Safety and Environmental Protection*, 2018. **116**: p. 219–227.
  36. Lee, H.C., et al., Effect of pH-controlled synthesis on the physical properties and intermediate-temperature CO<sub>2</sub> sorption behaviors of K–Mg double salt-based sorbents. *Chemical Engineering Journal*, 2016. **294**: p. 439–446.
  37. Guo, Y., et al., CO<sub>2</sub> sorption and reaction kinetic performance of K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/AC in low temperature and CO<sub>2</sub> concentration. *Chemical Engineering Journal* 2015. **260**: p. 596–604.

38. วิวัฒน์ ยิ่งสุทธิพันธ์, การวิเคราะห์ค่าตัวแปรที่มีผลต่อค่าความผันแปรของความต้านทานในกระบวนการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ. 2556, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี: <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/bitstream/123456789/4784/2/Fulltext.pdf>.
39. Lee, S.C., et al., CO<sub>2</sub> absorption and regeneration of alkali metal-based solid sorbents. *Catalysis Today* 2006. **111**: p. 385–390.
40. Jiao, X., et al., Influence of preparation parameters on the structural properties and the CO<sub>2</sub> capture performance of Mg–Zr solid sorbent. *Materials Research Bulletin* 2015. **64** p. 163–170.
41. Jo, S.B., et al., Regenerable potassium-based alumina sorbents prepared by CO<sub>2</sub> thermal treatment for post-combustion carbon dioxide capture. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2016. **33(11)** p. 3207-3215.







จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	จารุวรรณ เจริญชัยเพชร
วัน เดือน ปี เกิด	27 มิถุนายน 2537
สถานที่เกิด	ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รางวัลที่ได้รับ	-6th International Conference on Power and Energy System Engineering (CPESE), Japan (2019) -36th The International Conference on Advanced and Applied Petroleum, Petrochemicals and Polymers (ICAPPP), Thailand (2018) -28th National Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry (TIChE) Conference, Thailand (2018) -The best presenter award in the topic of Development of Carbon dioxide capture capacity by using impregnation method in base condition for potassium carbonate on alumina. (TIChE, 2018) - PETROMAT scholarship (2017) - The 3rd runner- up from freshly debating competition of Chulalongkorn University (2013)