

เส้นโค้งสมดุลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตในฟลูอิด์เบด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EQUILIBRIUM CURVE OF CARBON DIOXIDE SORPTION USING POTASSIUM CARBONATE  
IN FLUIDIZED BED



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	เส้นโค้งสมมูลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย
	โพแทสเซียมคาร์บอเนตในฟลูอิดิซ์เบด
โดย	น.ส.นิธิตี อินทร์มณี
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คุณชลาธารา)

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

นิธิตี อินทร์มณี : เส้นโค้งสมดุลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตในฟลูอิดิซ์เบด. ( EQUILIBRIUM CURVE OF CARBON DIOXIDE SORPTION USING POTASSIUM CARBONATE IN FLUIDIZED BED) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

ปัจจุบันปัญหาภาวะโลกร้อนส่งผลกระทบต่อโลกในหลายๆ ด้าน เช่น อุณหภูมิบรรยากาศที่สูงขึ้น ปัญหาพายุ และปัญหาภัยแล้ง โดยสาเหตุหลักมาจากการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศในปริมาณมาก ดังนั้น การดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนปลดปล่อยสู่บรรยากาศจึงมีความสำคัญ สำหรับการออกแบบและการจำลองกระบวนการแยกสาร ข้อมูลสมดุลการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับถือเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีความสำคัญและจำเป็น ในการพัฒนาและหาแบบจำลองที่บ่งบอกธรรมชาติของการดูดซับนั้นๆ ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมดุลการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 45, 60 ,75 และ 90 องศาเซลเซียส ความดันช่วง 0-1 บาร์ ข้อมูลที่ได้จะนำมาสร้างความสัมพันธ์กับแบบจำลอง จากผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองของซิปส์เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายสมดุลการดูดซับ การดูดซับเกิดขึ้นบนตัวดูดซับที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยการอิมเพกบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา และแบบจำลองของอาพรามี เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการอธิบายจลนศาสตร์การดูดซับที่สุด บ่งบอกว่ากระบวนการดูดซับมีความซับซ้อน กล่าวคือเกิดการดูดซับเชิงกายภาพรวมกับการดูดซับเชิงเคมี และมีกลไกการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไก นอกจากนี้ยัง พบว่า ภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือที่ ความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5971997623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Adsorption equilibrium Adsorption kinetic Carbon dioxide capture  
Fluidization

Nithiwadee Inmanee : EQUILIBRIUM CURVE OF CARBON DIOXIDE SORPTION  
USING POTASSIUM CARBONATE IN FLUIDIZED BED. Advisor: Prof.  
PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. BENJAPON  
CHALERMSINSUWAN, Ph.D.

At present, global warming has a direct impact on the world in many ways, such as rising atmospheric temperatures, storms and drought. The main cause is the release of large amounts of carbon dioxide into the atmosphere. Thus, CO<sub>2</sub> capture becomes an importance. For the design and simulation of separation processes, the equilibrium adsorption is essential basic information. In this study, the equilibrium adsorption isotherms and kinetic adsorption of CO<sub>2</sub> on K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were measured using a static volumetric method. The CO<sub>2</sub> adsorption measurements were performed at different temperatures (45, 60, 75 and 90 °C) and pressures (0-1 bar). The obtained data were used to plot relationship with the model. From the result, it was found that Sips isotherm was the suitable model to explain this adsorption process. CO<sub>2</sub> adsorption occurs on a heterogeneous surface of sorbent due to the improvement of the adsorbent by impregnation on the gamma alumina support. Kinetic studies were also presented, Avrami's model was the best fit model of this adsorption. It indicated that the adsorption process was complex, depending on physical adsorption, chemical adsorption and many mechanisms of adsorption. In addition, it was found that the optimal condition for CO<sub>2</sub> adsorption was at pressure of 1 bar and temperature of 60 degrees Celsius.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature .....

Academic Year: 2018

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เส้นโค้งสมดุของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพลีเอทิลีนคาร์บอเนต

ในฟลูอิดเบดฉบับนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะ ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุงเพื่อให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระปรมินทรมหาภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุ 72 พรรษา, ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช และทุนผู้ช่วยวิจัยระดับปริญญาโท ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT)

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมทั้งบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ น้อง รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่ทำให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นิธิวดี อินทร์มณี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ .....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐาน .....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	4
1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย .....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 เทคโนโลยีกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	6
2.1.1 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion process).....	6
2.1.2 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion process).....	6

2.1.3 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน (Oxy-fuel combustion process).....	6
2.2 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้.....	7
2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption process).....	7
2.2.2 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation).....	9
2.2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process).....	10
2.3 การแยกด้วยกระบวนการดูดซับ .....	11
2.3.1 ประเภทของการดูดซับ .....	11
2.3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) .....	11
2.3.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption).....	11
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ.....	12
2.3.2.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ .....	12
2.3.2.2 ขนาดของสารถูกดูดซับ.....	13
2.3.2.3 อุณหภูมิ.....	13
2.3.2.4 ความดัน.....	13
2.3.3 ตัวดูดซับของแข็งที่มีพื้นฐานจากโลหะแอลคาไล .....	13
2.3.4 วิธีการฟื้นฟูตัวดูดซับของแข็ง.....	14
2.3.4.1 การฟื้นฟูตัวดูดซับด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ (Temperature swing).....	14
2.3.4.2 การฟื้นฟูตัวดูดซับด้วยการลดความดัน (Pressure swing) .....	15
2.3.5 คุณสมบัติของตัวดูดซับที่ดี .....	16
2.4 สมดุลการดูดซับ [15].....	17
2.4.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับ.....	17
2.4.2 แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ .....	20
2.4.2.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm).....	20



2.4.2.2	แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich isotherm)	21
2.4.2.3	แบบจำลองสมดุลการดูดซับของซิปส์ (Sips isotherm)	21
2.4.2.4	แบบจำลองสมดุลการดูดซับของทอธ (Toth isotherm)	22
2.5	จลนศาสตร์ของการดูดซับ [15]	22
2.5.1	ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลสารในระบบดูดซับ	22
2.5.1.1	การถ่ายโอนมวลสารภายนอกอนุภาค	23
2.5.1.2	การถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาค	23
2.5.1.3	การถ่ายโอนมวลภายในอนุภาค	23
2.5.1.4	ขั้นตอนการดูดซับ (Adsorption)	24
2.5.2	แบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ	24
2.5.2.1	แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order)	24
2.5.2.2	แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order)	25
2.5.2.3	แบบจำลองอาฟรามมี (Avrami's model)	25
2.6	ฟลูอิดเซชัน [24]	26
2.6.1	ประเภทของฟลูอิดเซชัน	26
2.6.1.1	ฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาค (Two-phase fluidization)	26
2.6.1.2	ฟลูอิดเซชันแบบสามวัฏภาค (Three-phase fluidization)	27
2.6.2	ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน	27
2.6.2.1	เบตนิ่ง (Fixed bed)	27
2.6.2.2	ฟลูอิดซ์เบตแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed)	27
2.6.2.3	ฟลูอิดซ์เบตแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed)	27
2.6.2.4	ฟลูอิดซ์เบตแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed)	27

2.6.2.5 ฟลูอิด์เบดแบบบางเบา (Dilute หรือ Pneumatic transport fluidized bed).....	28
2.6.3 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิด์เซชัน [24] .....	28
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	34
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	34
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	34
3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	35
3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	35
3.2.1 วิธีการเตรียมตัวดูดซับ.....	35
3.2.2 อุปกรณ์การทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	36
3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	37
3.2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ.....	38
3.2.4.1 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน (N <sub>2</sub> physisorption measurement).....	38
3.2.4.2 การวิเคราะห์หาชนิดธาตุของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Energy dispersive X – ray spectrometry (EDX) .....	38
3.2.4.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD) .....	39
3.2.4.4 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนไมโครสโคปี (Scanning electron microscopy: SEM).....	39
3.2.4.5 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณองค์ประกอบของธาตุของตัวดูดซับด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence: XRF).....	39
3.3 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ .....	39
3.3.1. การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับ .....	39

3.3.2. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ.....	41
3.3.3. การศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	45
4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ.....	45
4.1.1. การหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน (N <sub>2</sub> physisorption measurement).....	45
4.1.2. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนไมโครสโกปี (Scanning electron microscopy: SEM) .....	47
4.1.3. การวิเคราะห์หาชนิดธาตุของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Energy dispersive X-ray spectrometry (EDX).....	49
4.1.4 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณองค์ประกอบของธาตุของตัวดูดซับ ด้วยเทคนิค เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence: XRF) .....	50
4.1.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD).....	51
4.2 สมดุลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	55
4.3 การศึกษาแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ .....	57
4.4 การหาภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะสมดุล .....	62
4. 5 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ .....	63
4.6 การศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ .....	65
4.7 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของการดูดซับและคายซับ .....	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	76
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	77
ภาคผนวก ก.....	78
บรรณานุกรม.....	83

ประวัติผู้เขียน..... 89



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [10] .....	12
ตารางที่ 3.1 สมการแบบจำลองไอโซเทอรั่มการดูดซับที่ทำการศึกษา.....	40
ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองสมดุลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ .....	41
ตารางที่ 3.3 สมการแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่ทำการศึกษา .....	42
ตารางที่ 3.4 สภาวะการทดลองจลนศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ .....	43
ตารางที่ 3.5 สภาวะการทดลองการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	44
ตารางที่ 4.1 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน .....	46
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลองค์ประกอบธาตุที่พบในตัวดูดซับด้วยการเทคนิค EDX.....	50
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองไอโซเทอรั่มการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ .....	59
ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ.....	67

## สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่างๆ [5].....	7
รูปที่ 2.2 แผนภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้สารละลายเอมีน [7]	8
รูปที่ 2.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการใช้เมมเบรน [9].....	9
รูปที่ 2.4 กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูตัวดูดซับ [11].....	10
รูปที่ 2.5 การดูดซับเชิงกายภาพและการดูดซับเชิงเคมี [12] .....	12
รูปที่ 2.6 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้ด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นฐานจากโลหะแอลคาไล [13] .....	14
รูปที่ 2.7 การฟื้นฟูตัวดูดซับด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ [14].....	15
รูปที่ 2.8 การฟื้นฟูตัวดูดซับด้วยการลดความดัน [15].....	15
รูปที่ 2.9 ลักษณะไอโซเทิร์มการดูดซับรูปแบบต่างๆ [16].....	20
รูปที่ 2.10 ช่วงการไหลฟลูอิดไอเซนแบบต่างๆ [25].....	28
รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) ด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน .....	36
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ระบบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	37
รูปที่ 4.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ $\gamma-Al_2O_3$ และ $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ .....	45
รูปที่ 4.2 ภาพ SEM (ก) $\gamma-Al_2O_3$ กำลังขยาย 300 เท่า (ข) $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ กำลังขยาย 300 เท่า (ค) $\gamma-Al_2O_3$ กำลังขยาย 3000 เท่า (ง) $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ กำลังขยาย 3000 เท่า และ (จ) $K_2CO_3$ กำลังขยาย 3000 เท่า .....	48
รูปที่ 4.3 รูปแบบ EDX ของตัวดูดซับ (ก) $\gamma-Al_2O_3$ (ข) $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ .....	49
รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRF ของตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ .....	51

รูปที่ 4.5 XRD Pattern ก่อนและหลังกระบวนการดูดซับของตัวดูดซับต่างๆ (ก) $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ (ข) $\text{K}_2\text{CO}_3$ (ค) $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ โดยกำหนดสัญลักษณ์ต่างๆ แทนองค์ประกอบของสารแต่ละชนิด ดังต่อไปนี้ .....	54
รูปที่ 4.6 ไอโซเทิร์มการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวดูดซับ (ก) $\text{K}_2\text{CO}_3$ และ (ข) $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ .....	56
รูปที่ 4.7 แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่ได้จากการทดลองที่ความดันต่างๆ เทียบกับค่าจากแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ (ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส, (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, (ค) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ (ง) อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส .....	61
รูปที่ 4.8 แสดงพื้นผิวตอบสนองของความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล เมื่อความดันและอุณหภูมิในระบบต่างกัน .....	62
รูปที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่เวลาต่างๆ .....	64
รูปที่ 4.10 ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่เวลาต่างๆ .....	64
รูปที่ 4.11 แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่ได้จากการทดลองที่เวลาต่างๆ เทียบกับค่าจากแบบจำลองจลนศาสตร์ที่อุณหภูมิต่างๆ (ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส, (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, (ค) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ (ง) อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส .....	69
รูปที่ 4.12 ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวดูดซับ (ก) $\text{K}_2\text{CO}_3$ และ (ข) $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ .....	73
รูปที่ 4.13 ผล TPD ของตัวดูดซับ $\text{KHCO}_3$ และตัวดูดซับ $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส [44] .....	73
รูปที่ 4.14 ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวดูดซับ $\text{K}_2\text{CO}_3$ และ $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ในขั้นตอน (ก) การดูดซับ และ (ข) การคายซับ .....	75

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประชากรโลกมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การบริโภคที่เพิ่มขึ้นของมนุษย์และเทคโนโลยีใหม่ๆ เข้ามามีบทบาทกับภาคอุตสาหกรรมมากขึ้น ส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้าปริมาณมากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่ได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน, แก๊สธรรมชาติ หรือปิโตรเลียม โดยถ่านหินเป็นแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ก่อให้เกิดมลพิษสูงที่สุดและมีการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดเมื่อเทียบกับโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิลอื่นๆ จากการวัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศทั่วโลกโดย Mauna Loa ในฮาวาย พบว่า ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 396 ppm เป็น 406 ppm จากปี 2014 จนถึงปี 2018 [1] ดังนั้นการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าถ่านหินก่อนปลดปล่อยสู่บรรยากาศจึงมีความสำคัญ

กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ดังนี้

1. กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion process) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จะมีความดันสูงประมาณ 2-7 เมกะปาสคัล และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจะมีความเข้มข้นสูง 15-60%
2. กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ โดยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจะมีความเข้มข้นประมาณ 3-15% มีความดันใกล้เคียงความดันบรรยากาศ และ
3. กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน (Oxy-fuel) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินด้วยการใช้ออกซิเจนแทนการใช้อากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ถ่านหินและเป็นการลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ จากเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล่าวไปข้างต้น เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีที่มีความน่าจะเป็นไปได้ และมีความคุ้มค่ามากที่สุด เนื่องจากสามารถทำได้โดยไม่กระทบกับกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยวิธีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้มีหลากหลายวิธี เช่น การแยกด้วยการดูดซึมโดยใช้สารละลาย การแยกด้วยเมมเบรน และการแยกด้วยการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง ในปัจจุบัน วิธีที่ใช้กันทั่วไปคือการใช้สารละลายเอมีน แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า วิธีนี้มีข้อเสีย เนื่องจาก สารละลายเอมีนมีความเป็นพิษก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ใช้พลังงานในการฟื้นฟูสูง และต้องใช้งบประมาณจำนวน



มากในการสร้างหอดูดซับ ดังนั้น การใช้ตัวดูดซับของแข็งเป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสม เนื่องจากตัวดูดซับของแข็งมีราคาถูก หาได้ง่าย และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้กระบวนการนี้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาชนิดของตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์หลายชนิดทั้งตัวดูดซับเชิงกายภาพ เช่น ซีโอไลต์ [2] ถ่านกัมมันต์ [3] และตัวดูดซับเชิงเคมี เช่น โพแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต [4] พบว่า การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับเชิงเคมี ให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าตัวดูดซับเชิงกายภาพมาก ในงานวิจัยนี้จึงสนใจตัวดูดซับเชิงเคมี โดยจากงานวิจัยของ Diana และคณะ [4] พบว่า ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตถือเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ เนื่องจากสามารถเกิดการดูดซับได้ที่อุณหภูมิต่ำ และอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวดูดซับไม่สูงมาก

ในกระบวนการดูดซับสามารถเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์ได้หลากหลายชนิด จากการศึกษาในงานวิจัยพบว่าในงานวิจัยส่วนใหญ่จะศึกษาการดูดซับด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) ตัวดูดซับอยู่นิ่ง ไม่มีการเคลื่อนที่ของตัวดูดซับ (Packed bed) ซึ่งในระบบนี้ เมื่อตัวดูดซับของแข็งดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จนเต็มความสามารถในการดูดซับแล้วจะต้องหยุดการดำเนินการเพื่อป้อนตัวดูดซับใหม่ และนำตัวดูดซับเดิมไปทำการฟื้นฟู ต่อมาได้มีการนำเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด (Fluidized bed reactor) มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดซับมากขึ้น เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ให้อัตราการผสมที่สูง ทำให้ตัวดูดซับของแข็งและคาร์บอนไดออกไซด์มีโอกาสสัมผัสกันได้สูงจึงเกิดการดูดซับได้ดีขึ้น และมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้ยังสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ต่อเนื่อง (Continuous process) กล่าวคือ ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed reactor) ตัวดูดซับจะถูกบรรจุในท่อไรเซอร์ แก๊สผสมที่ต้องการแยกจะป้อนเข้าระบบทางด้านล่างของท่อไรเซอร์ เมื่อตัวดูดซับของแข็งสัมผัสกับแก๊สผสมที่ต้องการแยกจะเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งไรเซอร์ เมื่อความเร็วของแก๊สผสมที่ป้อนเข้าระบบเพิ่มมากขึ้นจนถึงค่าที่เหมาะสม อนุภาคตัวดูดซับของแข็งจะมีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายของไหลเกิดเป็นช่วงการไหลแบบต่างๆ เมื่อตัวดูดซับของแข็งเคลื่อนที่ถึงด้านบนของท่อไรเซอร์ จะผ่านไซโคลนเพื่อแยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊ส โดยแก๊สจะถูกแยกออกทางด้านบนของไซโคลน และตัวดูดซับของแข็งจะตกลงมาบริเวณท่อดาวเนอร์ เพื่อทำการฟื้นฟูตัวดูดซับ ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านการฟื้นฟูแล้วจะเข้าสู่ท่อป้อนกลับและถูกป้อนเข้ามาทำการดูดซับใหม่อีกครั้งที่ตำแหน่งไรเซอร์ อย่างไรก็ตาม พบว่า งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการศึกษาสมดุลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย

ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตภายใต้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบและจำลองกระบวนการดูดซับ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่ทำการศึกษามอดูลการดูดซับของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินาภายใต้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่อุณหภูมิ 45, 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส ศึกษาแบบจำลองไอโซเทิร์มของการดูดซับ ศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ และหาภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาสมมูลการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์พร้อมทั้งหาแบบจำลองไอโซเทิร์มและแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่เหมาะสมกับการทดลอง
2. หาภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

## 1.3 สมมติฐาน

ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แตกต่างกันที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

## 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตภายใต้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed reactor) เพื่อศึกษาสมมูลของการดูดซับ
2. พิจารณาผลของตัวแปรดำเนินการจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
3. เปรียบเทียบหาแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับที่เหมาะสม โดยแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับที่นำมาเปรียบเทียบมี 4 แบบจำลอง ดังนี้ แบบจำลองแลงเมียร์, แบบจำลองฟรุนดิช, แบบจำลองชิปส์ และแบบจำลองทอช
4. เปรียบเทียบแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่เหมาะสม โดยแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่นำมาเปรียบเทียบมี 3 แบบจำลอง ดังนี้ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม, แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และแบบจำลองของอาฟรามี่

## 1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

สมมูลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์, แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ, แบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ, เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด และกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลสมมูลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินาที่ความดันและอุณหภูมิค่าต่างๆ
2. ได้แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับที่เหมาะสมกับการทดลอง
3. ได้แบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่เหมาะสมกับการทดลอง
4. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูตัวดูดซับ
5. ได้ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ

## 1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต
2. ออกแบบชุดการทดลอง โดยให้ชุดการทดลองเป็นระบบปิด เนื่องจากต้องมีการนำคาร์บอนไดออกไซด์หมวนวนในระบบจนกว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าสู่สภาวะคงตัว
3. จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและสารเคมี อุปกรณ์หลักในการทดลองจะประกอบไปด้วยเตาปฏิกรณ์, คอลัมน์ฟลูอิดซ์เบดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.5 เซนติเมตร ความสูงของคอลัมน์ 42 เซนติเมตร, บัมรีดสายยาง, บัมสุญญากาศ, แฉบความร้อน, เซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ และเกจวัดความดัน ส่วนสารเคมีที่ใช้ในการทดลองจะใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนต, แกมมาอลูมินา, ก๊าซไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง 99.99 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และก๊าซผสมคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรในสมดุลก๊าซไนโตรเจน
4. เตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต โดยนำ โพแทสเซียมคาร์บอเนตไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และเตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินาด้วยวิธีอิมเพกเนชัน โดยการนำโพแทสเซียมคาร์บอเนต 5 กรัม และแกมมาอลูมินา 5 กรัม มาผสมกัน และนำมาละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารละลายมากรองดูด แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวดูดซับที่ได้มาบดให้เป็นผงแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ในแต่ละการทดลองจะใช้ในปริมาณ 5 กรัม
5. วิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับที่ได้ด้วยเทคนิค  $N_2$  physisorption measurement, Energy dispersive X-ray spectrometry (EDX), Scanning electron microscopy (SEM), X-ray fluorescence (XRF) และเทคนิค X-ray diffraction (XRD)

6. สร้างกราฟสมมูลของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต และตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชด์เบด
7. เปรียบเทียบแบบจำลองการดูดซับรูปแบบต่างๆ หาแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับที่เหมาะสมกับผลการทดลองที่สุด พร้อมทั้งหาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่เหมาะสมกับผลการทดลองที่สุด
8. พิจารณาค่าของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่เหมาะสม ที่มีต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology) เพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
9. วิเคราะห์ผล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัยประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 เสนอความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์งานวิจัย สมมติฐานงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีการดำเนินงานวิจัย และลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

บทที่ 2 เทคโนโลยีกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้ การแยกด้วยกระบวนการดูดซับ สมดุลการดูดซับ จลนศาสตร์ของการดูดซับ ฟลูอิดเซชัน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการเตรียมตัวดูดซับ อุปกรณ์การทดลอง การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนการทดลอง การพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวดูดซับ การศึกษาแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ การศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ และการศึกษาพฤติกรรมดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 4 การศึกษาและพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับด้วยเทคนิคต่างๆ การศึกษาสมดุลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ การศึกษาแบบจำลองสมดุลการดูดซับ การหาภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะสมดุล การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ การศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ และการศึกษาพฤติกรรมดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เทคโนโลยีกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

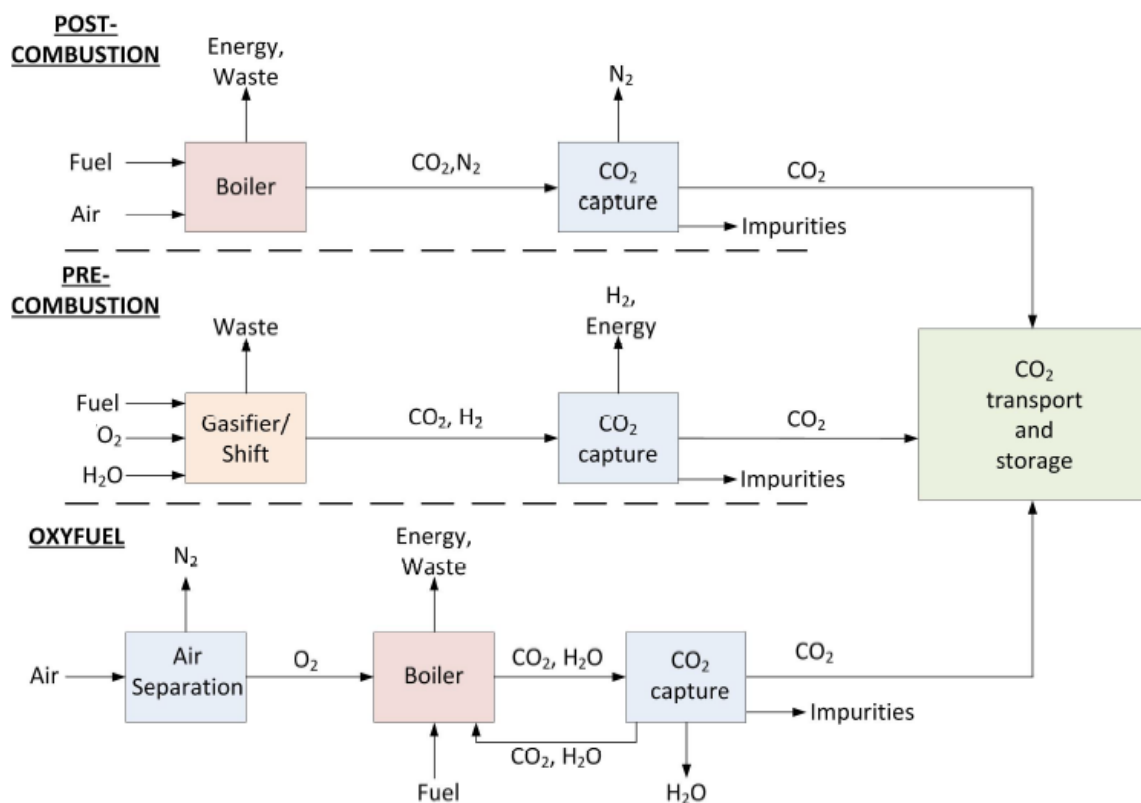
เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ แบ่งออกเป็น 3 เทคโนโลยีหลักๆ ดังนี้

2.1.1 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion process) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) แก๊สสังเคราะห์ (แก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์) ที่ได้จะมีความดันสูงประมาณ 2-7 เมกะปาสคัล และ คาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจะมีความเข้มข้นสูง 15-60 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อทำการแยกคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว แก๊สไฮโดรเจนจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป

2.1.2 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion process) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ แก๊สหลังกระบวนการเผาไหม้ประกอบด้วย ไนโตรเจนประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ และ คาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 3-15% นอกจากนี้ ยังพบองค์ประกอบอื่นๆ อีกเล็กน้อย เช่น ออกซิเจน, ไอน้ำ เป็นต้น โดยแก๊สผสมหลังกระบวนการเผาไหม้มีความดันใกล้เคียงความดันบรรยากาศ และ คาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจะมีความเข้มข้นประมาณ 3-15 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเป็นเทคโนโลยีที่มีความน่าจะเป็นไปได้ และ มีความคุ้มค่ามากที่สุด เนื่องจากสามารถทำได้โดยไม่กระทบกับกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า

2.1.3 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน (Oxy-fuel combustion process) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินด้วยการใช้ออกซิเจนแทนการใช้อากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ถ่านหิน แก๊สผสมหลังกระบวนการเผาไหม้จะมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นแก๊สผสมหลังการเผาไหม้ด้วยการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนจึงไม่ต้องผ่านกระบวนการแยกเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ เพียงแต่แยกสารเจือปนเพื่อให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อไปใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป

โดยรายละเอียดเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.1 [5]



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่างๆ [5]

## 2.2 เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้

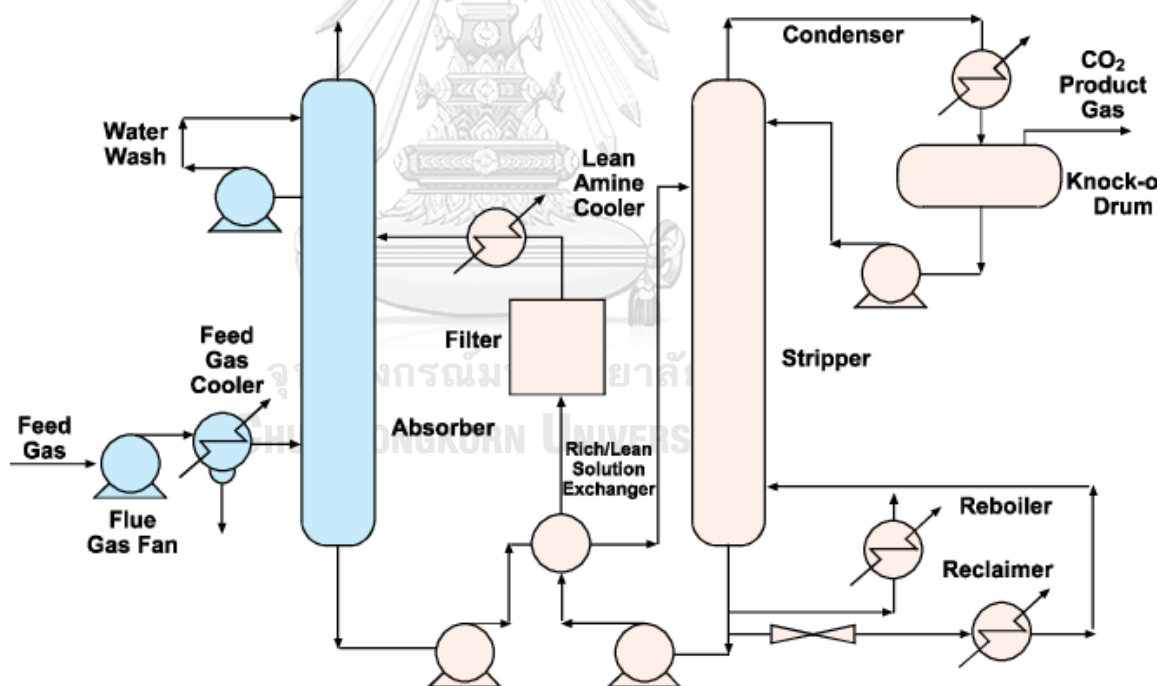
การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้ ถือเป็นวิธีที่มีความน่าจะเป็นไปได้ และมีความคุ้มค่ามากที่สุด เนื่องจากสามารถทำได้โดยไม่กระทบกับกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยวิธีที่ใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้ มีหลากหลายวิธี โดยจะนำเสนอทั้งหมด 3 วิธีหลักๆ ดังนี้

### 2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption process)

กระบวนการดูดซึมเป็นปรากฏการณ์หรือกระบวนการทางเคมีหรือฟิสิกส์ ที่อะตอม, โมเลกุล หรือไอออนเข้าไปในส่วนที่เป็นเนื้อในของวัสดุที่เป็นแก๊ส, ของเหลวหรือของแข็ง การดูดซึมนั้นเป็นกระบวนการที่แตกต่างจากการดูดซับ (adsorption) เพราะในการดูดซึม โมเลกุลที่ถูกดูดซึมจะไปอยู่ในปริมาตรของวัสดุ ส่วนการดูดซับ โมเลกุลที่ถูกดูดซับจะไปอยู่ที่ผิวของวัสดุ

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึม แสดงดังรูปที่ 2.2 อาจเกิดได้ทั้งการดูดซึมทางกายภาพ (Physical absorption) และการดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption) โดยทั่วไป

ระบบการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึม จะใช้สารละลายเอมีนในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยป้อนแก๊สและสารละลายเอมีนเข้าคอลัมน์แบบสวนทางกัน สารละลายที่ใช้จะป้อนเข้าด้านบนคอลัมน์ดูดซึม และแก๊สผสมหลังการเผาไหม้จะป้อนเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ดูดซึม แก๊สผสมที่ผ่านการดูดซึมแล้วจะมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำและถูกปล่อยออกทางด้านบนของคอลัมน์ดูดซึม ส่วนสารละลายเอมีนที่ดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์แล้วจะนำไปทำการฟื้นฟูโดยใช้ความร้อนที่คอลัมน์ฟื้นฟูเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ สารละลายเอมีนที่ผ่านการฟื้นฟูแล้วจะต้องนำมาลดอุณหภูมิก่อนนำไปใช้งาน การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึมเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีความสามารถในการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง และสารละลายที่ใช้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังคงมีข้อเสียหลายประการ เช่น สารละลายเอมีนมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม, สามารถเกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์, ใช้พลังงานในการฟื้นฟูสารละลายสูง และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่สูง [6]



รูปที่ 2.2 แผนภาพการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึมโดยใช้สารละลายเอมีน [7]

## 2.2.2 กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation)

กระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรน สามารถทำได้โดยใช้เมมเบรนทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (Selective barrier) ที่ยอมให้เฉพาะองค์ประกอบที่ต้องการแยกในแก๊สผสมซึมผ่านไป (Perm selectivity) โดยแก๊สผสมก่อนการแยกจะอยู่ในด้านที่เรียกว่าด้านจ่าย (Feed หรือ upstream side) ส่วนแก๊สที่ซึมผ่านออกมาจากเมมเบรนจะอยู่ในด้านซึมผ่าน (Permeate หรือ downstream side) กระบวนการแพร่ (Diffusion) จะเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้น (Concentration), ความดันย่อย (Partial pressure), สนามไฟฟ้า (Electric field) หรือ อุณหภูมิ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแรงผลักดัน (Driving force) ทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกเคลื่อนที่แพร่ผ่านเมมเบรนได้

กระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเมมเบรน แสดงดังรูปที่ 2.3 เป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถแยกแก๊สได้แม้ว่าปริมาณแก๊สผสมเริ่มต้นจะมีปริมาณน้อยและสามารถออกแบบระบบให้มีขนาดเล็กเพื่อให้สะดวกในเคลื่อนย้าย อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเมมเบรน ยังเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่ ต้องมีการพัฒนาและศึกษาชนิดวัสดุเมมเบรนที่เหมาะสม, วิธีการขึ้นรูป, การติดตั้งเมมเบรน และการออกแบบระบบในการแยกแก๊ส เพื่อให้สามารถนำเมมเบรนไปใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8]



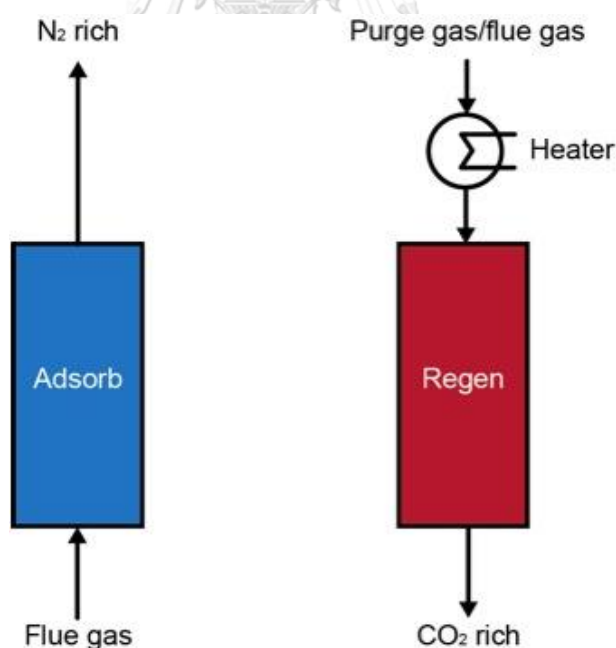
รูปที่ 2.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการใช้เมมเบรน [9]



### 2.2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption process)

กระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการที่ใช้แยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคของไหล (แก๊ส, ของเหลว) โดยอาศัยการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารที่ต้องการแยก โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับเกิดขึ้นได้จากแรงกระทำ (Interaction forces) ระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ โดยอาจเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนที่เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งจัดเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) หรืออาจเกิดจากการสร้างพันธะเคมีที่มีความแข็งแรงกว่า ซึ่งจัดเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) [10]

การแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.4 เป็นกระบวนการที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ตัวดูดซับของแข็งมีราคาถูก จัดหาได้ง่าย และสามารถนำมาฟื้นฟูเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยตัวดูดซับของแข็งที่นำมาใช้ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีหลากหลายชนิดทั้งตัวดูดซับเชิงกายภาพ เช่น ถ่านกัมมันต์, ซีโอไลต์, ท่อนาโนคาร์บอน เป็นต้น และตัวดูดซับเชิงเคมี เช่น โซเดียมคาร์บอเนต, โพแทสเซียมคาร์บอเนต, ถ่านกัมมันต์ที่มีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันด้วยเอมีน เป็นต้น



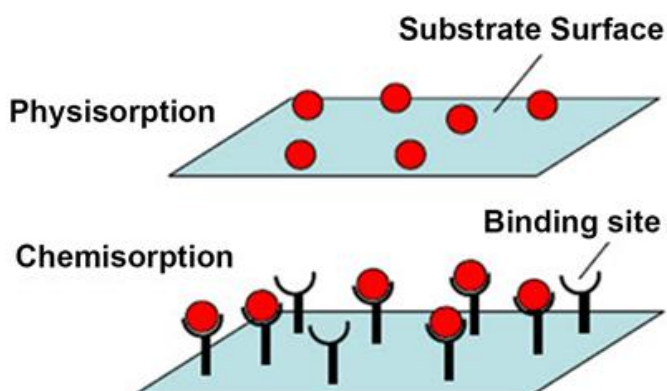
รูปที่ 2.4 กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูตัวดูดซับ [11]

## 2.3 การแยกด้วยกระบวนการดูดซับ

### 2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

2.3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) คือ การที่โมเลกุลของแก๊สถูกดึงดูดให้เข้ามาเกาะติดกันพื้นผิวของตัวดูดซับที่เป็นของแข็งด้วยแรงอย่างอ่อน หรือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเท่ากับรัศมีแวนเดอร์วาลส์ของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ไม่จำเพาะกับโมเลกุลของแก๊ส เกิดการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำ และมีค่าความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption) น้อยกว่า 15-20 กิโลจูลต่อโมล โดยการดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย ตัวถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย การผันกลับ (Reversibility) ของการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ [10]

2.3.1.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) เป็นกระบวนการดูดซับที่มีความจำเพาะในการเลือกเกิด และมีพันธะเคมีเกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับเชิงกายภาพ โดยการดูดซับเชิงเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าการดูดซับเชิงกายภาพ และมีความร้อนของการเกิดการดูดซับเชิงเคมี 50-300 กิโลจูลต่อโมล [10] ซึ่งการเกิดพันธะเคมีหมายความว่า การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีมีข้อแตกต่างกันหลายอย่างดังตารางที่ 2.1 โดยการดูดซับเชิงกายภาพและการดูดซับเชิงเคมีแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การดูดซับเชิงกายภาพและการดูดซับเชิงเคมี [12]

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [10]

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

### 2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

2.3.2.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ : อัตราเร็วในการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ทำให้สารดูดซับที่มีลักษณะเป็นผงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าสารดูดซับที่มีลักษณะเป็นเกล็ด ส่วนพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากกว่าจะให้ค่าความสามารถในการดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับชนิดเดียวกันที่มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

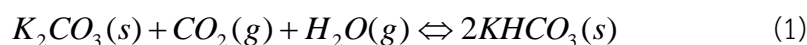
2.3.2.2 ขนาดของสารถูกดูดซับ : ขนาดของตัวถูกดูดซับมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดการดูดซับภายในรูพรุนของตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัวดูดซับ

2.3.2.3 อุณหภูมิ : การดูดซับโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แต่อัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

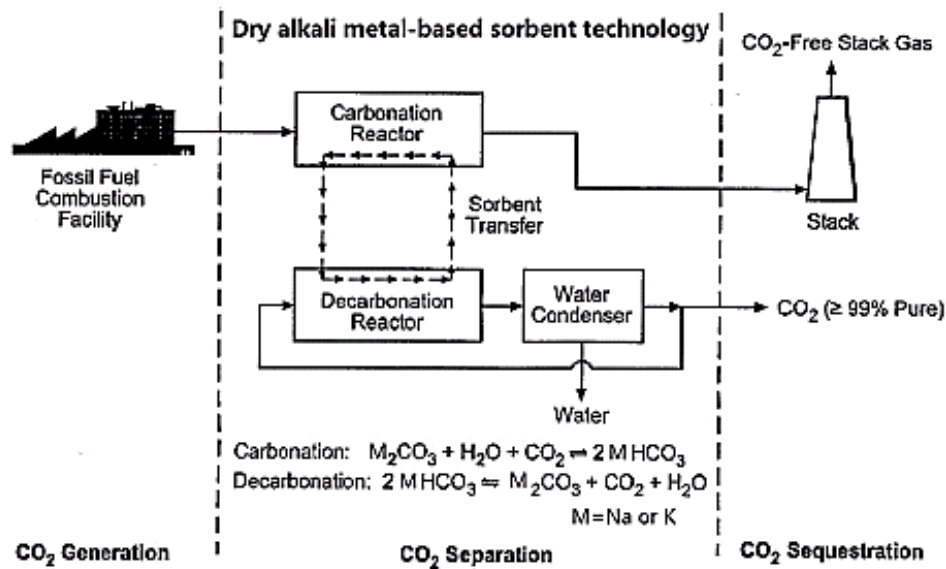
2.3.2.4 ความดัน : เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นในระบบที่มีความดัน จะทำให้ตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

### 2.3.3 ตัวดูดซับของแข็งที่มีพื้นฐานจากโลหะแอลคาไล

ตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีหลากหลายชนิดทั้งตัวดูดซับทางกายภาพซึ่งเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่แข็งแรงมาก และตัวดูดซับทางเคมีซึ่งมีการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับจึงมีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกว่าในงานวิจัยนี้สนใจนำตัวดูดซับทางเคมีมาใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเลือกใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต และตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา เนื่องจากสามารถเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยแรงยึดเหนี่ยวที่สูงกว่า มีความจำเพาะเจาะจงในการเลือกเกิดของการดูดซับ อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูตัวดูดซับไม่สูงมาก และมีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าตัวดูดซับทางกายภาพ นอกจากนี้การมีไอน้ำเป็นสิ่งเจือปนในระบบยังไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลจะต้องใช้ไอน้ำเป็นสารตั้งต้น โดยสมการปฏิกิริยาเคมีแสดงดังสมการที่ 1



การนำตัวดูดซับที่มีพื้นฐานจากโลหะแอลคาไลมาใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้มีขั้นตอนหลักดังแสดงในรูปที่ 2.6 แก๊สเชื้อเพลิงหลังการเผาไหม้จากโรงไฟฟ้าถ่านหินซึ่งมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง นำมาผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับของแข็งที่มีโลหะแอลคาไลเป็นพื้นฐาน จากนั้นแก๊สผสมที่มีความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำลงจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และเมื่อตัวดูดซับโลหะแอลคาไลดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จนเต็มความสามารถในการดูดซับ ตัวดูดซับนั้นจะถูกส่งไปทำการฟื้นฟูที่เครื่องปฏิกรณ์ฟื้นฟูสภาพ เพื่อนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ และแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป

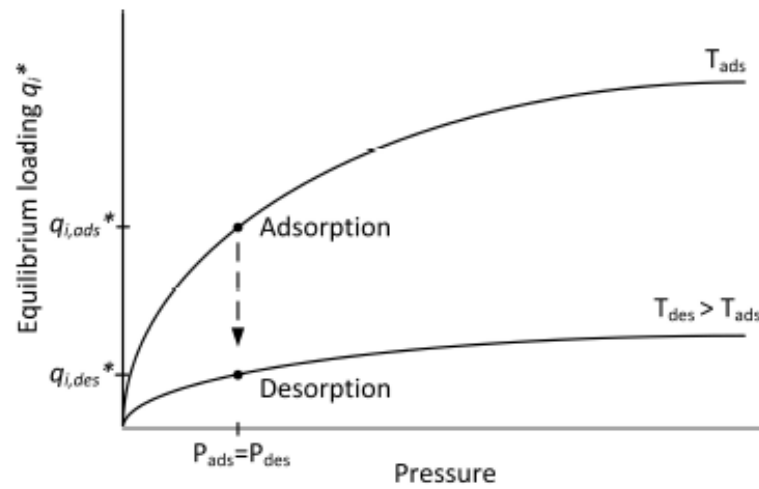


รูปที่ 2.6 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้ด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นฐานจากโลหะแอลคาไล [13]

#### 2.3.4 วิธีการฟื้นฟูตัวดูดซับของแข็ง

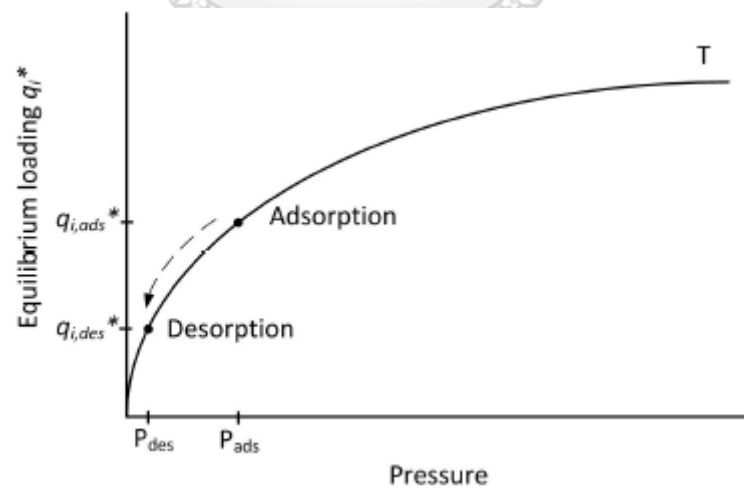
ในกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อใช้ตัวดูดซับเป็นระยะเวลาเวลานาน ตัวดูดซับจะอิ่มตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ จึงไม่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีก ดังนั้นต้องทำการฟื้นฟูตัวดูดซับเพื่อนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งวิธีการฟื้นฟูตัวดูดซับมีด้วยกัน 2 วิธี ดังนี้

2.3.4.1 การฟื้นฟูตัวดูดซับด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ (Temperature swing) แสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในระบบจะทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์จะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น จึงสามารถเกิดการคายซับ (Desorption) และแพร่ออกมาจากตัวดูดซับ วิธีนี้มีข้อดีคือสามารถนำพลังงานความร้อนที่ได้จากกระบวนการดูดซับหรือพลังงานความร้อนอื่นๆ ในระบบมาใช้ในการฟื้นฟูตัวดูดซับได้



รูปที่ 2.7 การฟื้นฟูตัวดูดซับด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ [14]

2.3.4.2 การฟื้นฟูตัวดูดซับด้วยการลดความดัน (Pressure swing) แสดงในรูปที่ 2.8 วิธีนี้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการฟื้นฟูตัวดูดซับ เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการฟื้นฟูไม่นาน และตัวดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูด้วยวิธีนี้จะมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีการใช้พลังงานจากปั๊มสุญญากาศในการลดความดันซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ



รูปที่ 2.8 การฟื้นฟูตัวดูดซับด้วยการลดความดัน [15]

### 2.3.5 คุณสมบัติของตัวดูดซับที่ดี

การเลือกตัวดูดซับเพื่อนำมาใช้ในระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยปกติจะพิจารณา ค่าความสามารถในการดูดซับเป็นหลัก แต่ยังมีคุณลักษณะอื่นๆ ที่ควรพิจารณาอีก ซึ่งคุณลักษณะที่ดีของตัวดูดซับมีดังนี้

1. มีความสามารถในการดูดซับสูง : คุณลักษณะนี้เป็นสมบัติที่สำคัญของการเลือกใช้งานตัวดูดซับ เมื่อตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับที่สูงตัวดูดซับนั้นจะสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าตัวดูดซับที่ให้ความสามารถในการดูดซับต่ำ

2. มีความทนทานต่อสิ่งเจือปนในระบบ : ในแก๊สผสมหลังกระบวนการเผาไหม้จะมีองค์ประกอบของแก๊สชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น แก๊สออกซิเจน, แก๊สไนโตรเจน, ไอ้ น้ำ, สารประกอบซัลเฟอร์ออกไซด์ และสารประกอบไนโตรเจนออกไซด์ เป็นต้น สิ่งเจือปนอื่นๆ ในระบบอาจส่งผลทำให้ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับมีค่าลดลง เนื่องจากแก๊สชนิดอื่นสามารถเกิดการดูดซับได้เช่นเดียวกับกับคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ตัวดูดซับบางชนิดอาจสูญเสียหมู่ฟังก์ชันของการดูดซับเมื่อสัมผัสกับสิ่งเจือปนบางชนิดในระบบ

3. มีอัตราการดูดซับและการคายซับที่รวดเร็ว : อัตราการดูดซับที่เร็วจะช่วยให้ค่าความสามารถในการดูดซับเข้าสู่ค่าความสามารถในการดูดซับที่สมดุลในระยะเวลานั้น สำหรับการดูดซับในระบบเบตนิ่ง อัตราการดูดซับจะช้ากว่าในระบบฟลูอิดซ์เบต เนื่องจากโอกาสการสัมผัสกันระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และตัวดูดซับมีน้อย นอกจากนี้อัตราการคายซับที่เร็วจะช่วยให้ไม่ใช้เวลานานเกินไปในการฟื้นฟูตัวดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้งานใหม่

4. มีค่าความร้อนการดูดซับที่เหมาะสม : ค่าความร้อนของการดูดซับจะบ่งบอกความแข็งแรงของพันธะระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ การดูดซับที่มีความแข็งแรงระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมากจะทำให้การฟื้นฟูตัวดูดซับทำได้ยาก ใช้พลังงานในการฟื้นฟูตัวดูดซับมาก แต่อย่างไรก็ตามหากความแข็งแรงระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับต่ำเกินไปจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าต่ำ

5. มีความสามารถในการเลือกสรรคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง : ในแก๊สผสมที่นำมาผ่านกระบวนการดูดซับประกอบด้วยแก๊สหลายชนิด ถ้าตัวดูดซับที่นำมาใช้มีความสามารถในการเลือกสรร

คาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงจะส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าแก๊สชนิดอื่นๆ ที่เจือปนอยู่ในระบบ

6. มีความคงทนและมีเสถียรภาพในการดูดซับ : ในกระบวนการดูดซับที่เป็นระบบ ฟลูอิดเบตตัวดูดซับจะต้องมีความแข็งแรงเชิงกลเพื่อที่จะคงทนต่อการขัดถูซึ่งเกิดขึ้นเมื่อใช้งานได้ นอกจากนี้การฟื้นฟูตัวดูดซับเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ จะต้องให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่ใกล้เคียงเดิมแม้จะทำการฟื้นฟูจำนวนหลายรอบ

7. มีราคาถูก : ราคาตัวดูดซับควรมีค่าไม่สูงมาก เนื่องจากจะช่วยลดต้นทุนในการดำเนินงาน

## 2.4 สมดุลการดูดซับ [15]

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยของตัวถูกดูดซับและปริมาณที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารจะถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับอ่อนลง เนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้ โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่งและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น โดยสมดุลการดูดซับจะแปรตามชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของสารถูกดูดซับ ความเข้มข้นหรือความดันของสารถูกดูดซับ และอุณหภูมิของระบบดูดซับ ดังนั้นสมดุลดูดซับจึงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสมดุลดูดซับสารถูกดูดซับจำเพาะ ( $q_i$ ) ของตัวดูดซับที่เลือกไว้ ความเข้มข้นสมดุล ( $C_i$ ) ของสารถูกดูดซับชนิดนั้น หรือความดันสมดุล ( $P_i$ ) ของสารถูกดูดซับชนิดนั้น และอุณหภูมิสมดุล ( $T$ ) ของระบบดูดซับนั้น สมดุลการดูดซับเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่บอกให้ทราบถึงความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล จึงเป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นอย่างมากในการศึกษา และทำความเข้าใจถึงปรากฏการณ์การดูดซับโดยรวม โดยข้อมูลสมดุลการดูดซับจะแสดงในรูปแบบไอโซเทิร์มการดูดซับ

### 2.4.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับ

ไอโซเทิร์มการดูดซับ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับและความเข้มข้นของสารดูดซับในวัฏภาคของไหล ในสภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ ซึ่งปริมาณ



การดูดซับที่สมดุลของระบบการดูดซับแก๊สจะขึ้นอยู่กับ ความดัน, อุณหภูมิ, ชนิดสารดูดซับ และชนิดของสารถูกดูดซับ

ลักษณะส่วนใหญ่ของไอโซเทิร์มการดูดซับของระบบดูดซับแก๊สสามารถแบ่งออกได้เป็น 6 แบบ ตามการจำแนกของ IUPAC

#### แบบที่ 1 (Type I isotherm)

ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงการดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำๆ จากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อความดันของการดูดซับมีค่าสูงขึ้น เส้นไอโซเทิร์มแบบนี้พบได้ในสารดูดซับที่มีลักษณะดังนี้

- สารดูดซับที่ไม่มีความพรุน ที่แสดงลักษณะการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
- สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเรียกว่า การเติมรูพรุน (pore filling) เนื่องจากโมเลกุลของสารถูกดูดซับมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของรูพรุน ดังนั้นเมื่อการดูดซับเกิดขึ้นจนเต็มปริมาตรของรูพรุนแล้วปริมาณการดูดซับจึงเข้าสู่ค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความดันสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ช่วงของค่าความดันก่อนที่ปริมาณการดูดซับจะเข้าสู่ค่าคงที่ยังบ่งชี้ถึงช่วงการกระจายตัวของรูพรุนขนาดเล็กได้อีกด้วย
- สารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดเดียว การดูดซับจะเกิดขึ้นจากโมเลกุลของสารถูกดูดซับที่มีขนาดใกล้เคียงกับรูพรุนแพร่ผ่านรูพรุนและถูกดูดซับไว้ ดังนั้นกราฟไอโซเทิร์มจะเพิ่มตามการเพิ่มความดันและเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อสารถูกดูดซับบรรจุจนเต็มปริมาตรของช่องว่างภายใน

#### แบบที่ 2 (Type II isotherm)

ลักษณะของไอโซเทิร์มแบบนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ในช่วงแรกไอโซเทิร์มจะมีการเพิ่มของปริมาณการดูดซับในลักษณะโค้งคว่ำเข้าหาแกนของความดันสัมพัทธ์ จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ที่เพิ่มขึ้นในลักษณะเกือบเป็นเส้นตรง โดยจุดเปลี่ยนระหว่างช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 เกิดขึ้นที่จุด B และช่วงสุดท้าย ปริมาณการดูดซับจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ไอโซเทิร์มรูปแบบนี้เป็นลักษณะการดูดซับแบบหลายชั้น โดยจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวก่อนแล้วสิ้นสุดที่จุด B ต่อจากนั้นจำนวนชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามความดัน ลักษณะของไอโซเทิร์มแบบนี้พบได้ในสารดูดซับที่ไม่มีความพรุน (nonporous adsorbent) หรือในสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลางและขนาดใหญ่ (mesoporous and macroporous adsorbents) ที่มีการกระจายขนาดรูพรุนที่สามารถรองรับการดูดซับแบบหลายชั้นได้

### แบบที่ 3 (Type III isotherm)

ไอโซเทิร์มแบบนี้มีลักษณะโค้งหงายเข้าหาแกนความดันสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นผลจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารดูดซับมีค่าน้อยกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับ ทำให้ที่ความดันต่ำๆ ปริมาณการดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับเกิดได้น้อย แต่เมื่อความดันสูงถึงค่าหนึ่ง แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสารดูดซับมีค่าน้อยลง ทำให้ปริมาณการดูดซับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

### แบบที่ 4 (Type IV isotherm)

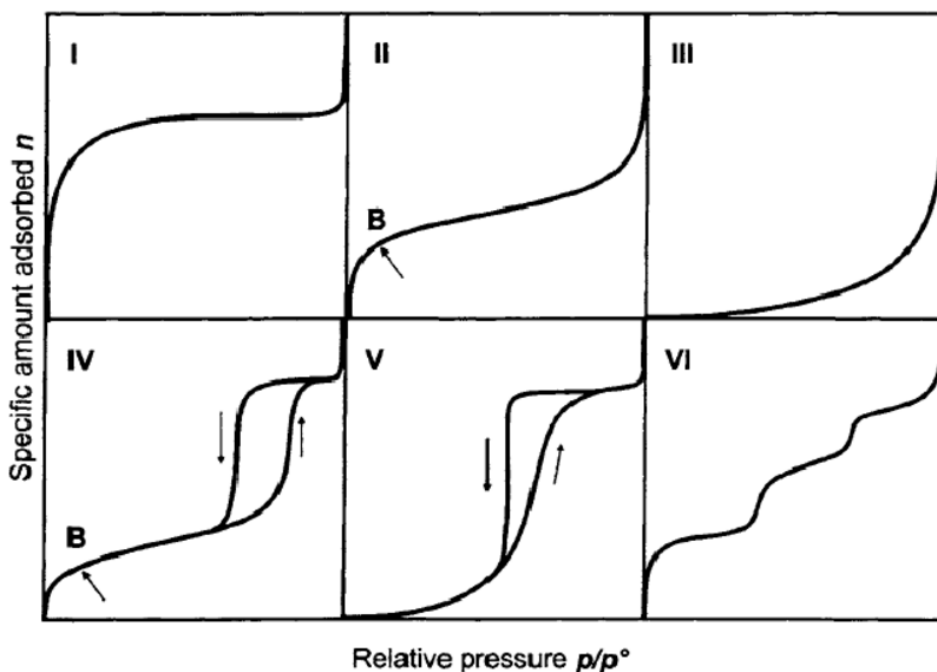
ไอโซเทิร์มแบบนี้มีลักษณะคล้ายกับแบบที่ 2 ในช่วงต้นของกราฟ แต่เมื่อความดันสัมพัทธ์เพิ่มถึงจุดหนึ่ง เส้นไอโซเทิร์มจะเบี่ยงขึ้น จนกระทั่งความดันเพิ่มมากขึ้นความชันของกราฟจะค่อยๆ ลดลง ในช่วงความดันสัมพัทธ์เข้าใกล้ 1 ค่าการดูดซับจะค่อนข้างคงที่ ลักษณะเฉพาะของไอโซเทิร์มแบบที่ 4 คือการเกิดวงฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop) คือเส้นไอโซเทิร์มช่วงลดความดันจะอยู่สูงกว่าช่วงเพิ่มความดัน โดยขนาด และรูปร่างของวงฮีสเทอรีซิสจะขึ้นกับระบบของสารดูดซับและสารดูดซับ ไอโซเทิร์มแบบนี้จะพบในสารดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง การเกิดวงฮีสเทอรีซิสจะเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ควบแน่นในหลอดรูเล็ก (capillary condensation)

### แบบที่ 5 (Type V isotherm)

ไอโซเทิร์มแบบนี้มีลักษณะคล้ายกับแบบที่ 3 และมีวงฮีสเทอรีซิสเกิดขึ้นด้วย โดยเส้นไอโซเทิร์มที่ความดันสัมพัทธ์สูงอาจมีลักษณะคงที่หรือเพิ่มขึ้นก็ได้ ไอโซเทิร์มแบบนี้พบในสารดูดซับที่ประกอบด้วยรูพรุนขนาดกลางหรือรูพรุนขนาดเล็ก

### แบบที่ 6 (Type VI isotherm)

ไอโซเทิร์มแบบที่ 6 หรือไอโซเทิร์มแบบขั้น (stepped isotherm) เป็นการดูดซับแบบขั้นต่อขั้นของสารดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับของแข็งที่มีความสม่ำเสมอของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและสารดูดซับ บันไดแต่ละขั้นแสดงลักษณะการดูดซับของแต่ละชั้น



รูปที่ 2.9 ลักษณะไอโซเทิร์มการดูดซับรูปแบบต่างๆ [16]

#### 2.4.2 แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ

แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงปริมาณหรือปริมาณของสารที่ถูกดูดซับเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้นของสารที่อุณหภูมิคงที่ แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับได้จากการดูดซับเชิงกายภาพหรือเชิงเคมีจนถึงสภาวะสมดุล โดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้และไม่ทำให้ตัวถูกดูดซับเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะอยู่ในช่วงการดูดซับหรือการคายซับ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับมาศึกษาทั้งหมด 4 แบบจำลอง คือ แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm), แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich isotherm), แบบจำลองสมดุลการดูดซับของชิปส์ (Sips isotherm) และแบบจำลองสมดุลการดูดซับของทอธ (Toth isotherm) ซึ่งแต่ละแบบจำลองมีรายละเอียด ดังนี้

##### 2.4.2.1 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

แบบจำลองแลงเมียร์ สามารถใช้อธิบายระบบที่มีสมมติฐานของการดูดซับว่า พื้นผิวของตัวดูดซับมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous surface) การดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) พลังงานมีการกระจายตัวสม่ำเสมอและมีค่าเท่ากันในทุกตำแหน่งของการดูดซับ [17] โดยสมการของแบบจำลองแลงเมียร์แสดงในสมการที่ (2)

$$q = \frac{q_m(BP)}{1 + (BP)} \quad (2)$$

เมื่อ  $q$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [โมล/กิโลกรัม]

$q_m$  = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [โมล/กิโลกรัม]

$B$  = ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทิร์ม [บาร์<sup>-1</sup>]

$P$  = ความดันที่สมดุล [บาร์]

#### 2.4.2.2 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรูนดิช (Freundlich isotherm)

แบบจำลองของฟรูนดิช มีสมมติฐานของการดูดซับว่า พื้นผิวของตัวดูดซับมีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) พื้นที่ผิวและพลังงานมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) [18] แสดงสมการฟรูนดิชในสมการที่ (3)

$$q = K_F P^{1/n} \quad (3)$$

เมื่อ  $q$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล [โมล/กิโลกรัม]

$K_F$  = ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทิร์ม [โมล กิโลกรัม<sup>-1</sup> บาร์<sup>1/n</sup>]

$P$  = ความดันที่สมดุล [บาร์]

$n$  = ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทิร์ม [-]

#### 2.4.2.3 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของชิปส์ (Sips isotherm)

แบบจำลองชิปส์เป็นแบบจำลองที่มีการรวมกันของแบบจำลองแลงก์เมียร์และแบบจำลองฟรูนดิชเข้าด้วยกัน โดยมีการเพิ่มค่าพารามิเตอร์  $n$  เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของแบบจำลองฟรูนดิชที่เมื่อใช้ในระบบความดันสูงค่าความสามารถในการดูดซับจะไม่เข้าสู่ค่าคงที่ [19] โดยสมการแบบจำลองชิปส์จะแสดงในสมการที่ (4)

$$q = \frac{q_m(BP)^{1/n}}{1 + (BP)^{1/n}} \quad (4)$$

เมื่อ  $q$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [โมล/กิโลกรัม]

$q_m$  = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [โมล/กิโลกรัม]

$B$  = ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทิร์ม [บาร์<sup>-1</sup>]

$P$  = ความดันที่สมดุล [บาร์]

$n$  = ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทิร์ม [-]

#### 2.4.2.4 แบบจำลองสมดุลการดูดซับของทอธ (Toth isotherm)

แบบจำลองทอธเป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลองของแลงก์เมียร์ โดยการเพิ่มค่าคงที่  $n$  โดยค่าทั่วไปค่า  $n$  จะอยู่ในช่วง 0-1 และเมื่อค่า  $n$  มีค่าเท่ากับ 1 แบบจำลองนี้จะลดรูปกลายเป็นแบบจำลองของแลงก์เมียร์ แบบจำลองทอธสามารถใช้อธิบายการดูดซับในตัวดูดซับที่มีพื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ยังสามารถใช้อธิบายได้ทั้งในระบบที่มีความดันต่ำและความดันสูง [20] สมการแบบจำลองทอธจะแสดงในสมการ (5)

$$q = \frac{q_m BP}{(1 + (BP)^n)^{1/n}} \quad (5)$$

เมื่อ  $q$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [โมล/กิโลกรัม]

$q_m$  = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [โมล/กิโลกรัม]

$B$  = ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทิร์ม [บาร์<sup>-1</sup>]

$P$  = ความดันที่สมดุล [บาร์]

$n$  = ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทิร์ม [-]

## 2.5 จลนศาสตร์ของการดูดซับ [15]

การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับเป็นการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลที่มีความสำคัญและจำเป็นในการเลือกใช้งานตัวดูดซับ โดยจะต้องพิจารณาทั้งความสามารถในการดูดซับที่สูง และอัตราการดูดซับเกิดขึ้นได้รวดเร็ว โดยทั่วไปการวิเคราะห์อัตราการดูดซับมักศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น หรือการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์

### 2.5.1 ขั้นตอนการถ่ายโอนมวลสารในระบบดูดซับ

การทำงานของระบบดูดซับสาร ซึ่งอาศัยการสัมผัสระหว่างวัฏภาคของไหลและอนุภาคของสารดูดซับ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจากวัฏภาคของไหลไปยังตำแหน่งของการดูดซับซึ่งอยู่ภายในโครงสร้างรูพรุนของตัวดูดซับ นอกจากนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการดูดซับสารแล้ว ปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวลสารยังมี

ความสำคัญต่อการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมและทำนายประสิทธิภาพของระบบดูดซับ

#### 2.5.1.1. การถ่ายโอนมวลสารภายนอกอนุภาค

เป็นขั้นตอนแรกที่เกี่ยวข้องกับกลไกการพามวล (Convection) การแพร่ (Diffusion) และการผสม (Mixing) ของตัวถูกละลาย ซึ่งไหลอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาค โดยขั้นตอนนี้มีความสำคัญสำหรับระบบดูดซับที่เกิดความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างของไหลและอนุภาคของตัวดูดซับ เช่น ระบบดูดซับแบบเบตนิ่ง (Fixed bed) และแบบฟลูอิดไรซ์เบต (Fluidized bed) เป็นต้น

การแพร่และการผสมของสารถูกละลายในของไหลเป็นผลมาจากการเกิดเกรเดียนต์ของความเข้มข้นของสารในวัฏภาคของไหล และความไม่สม่ำเสมอของการไหลที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคของไหลในทิศทางหลักของการไหลไปตามความยาวของเครื่องดูดซับ ซึ่งลักษณะการไหลแบบนี้เรียกว่าการกระจายตัว หรือการผสมตามแนวแกน (Axial dispersion) และยังเกิดการกระจายตัวในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางไหลเกิดร่วมด้วย ซึ่งเรียกว่าการกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial dispersion) ถึงแม้ว่าการกระจายตัวตามแนวแกนจะไม่เป็นที่พึงประสงค์ เนื่องจากทำให้แรงขับของการถ่ายโอนมวลลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกสารลดต่ำลง แต่การผสมและการถ่ายโอนมวลในแนวรัศมีก็มีประโยชน์ในการช่วยให้ความเข้มข้นของอนุภาคของไหลที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวแกนเดียวกันมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ทำให้ผลของการกระจายตัวในแนวแกนมีแนวโน้มลดลงบ้าง

#### 2.5.1.2. การถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาค

เป็นขั้นตอนต่อจากการถ่ายโอนมวลสารภายนอกอนุภาค โดยเกิดการถ่ายโอนของสารถูกละลายจากวัฏภาคของไหลไปยังบริเวณพื้นผิวภายนอกของอนุภาคของไหลโดยกลไกการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มบางของของไหลที่อยู่ติดกับอนุภาคของสารดูดซับ

#### 2.5.1.3. การถ่ายโอนมวลภายในอนุภาค

เป็นขั้นตอนที่เกิดการถ่ายโอนมวลสารโดยกลไกการแพร่ของสารถูกละลายจากพื้นผิวด้านนอกของอนุภาคสารดูดซับเข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งโดยทั่วไปการแพร่จะมีสองกลไก ได้แก่ การแพร่ไปตามช่องว่างของรูพรุนภายใน (Pore diffusion) และการแพร่ไปตามพื้นผิวของรูพรุน (Surface diffusion)

#### 2.5.1.4. ขั้นตอนการดูดซับ (Adsorption)

เป็นขั้นตอนที่เกิดการดูดซับบนพื้นผิวภายในอนุภาค ซึ่งโดยปกติจะเป็นขั้นตอนที่เกิดได้รวดเร็วกว่าขั้นตอนที่ 2 และ 3 ดังนั้น อัตราเร็วของการดูดซับส่วนใหญ่จะถูกควบคุมโดยความต้านทานการแพร่ทั้งภายในและภายนอกอนุภาคดูดซับ

#### 2.5.2 แบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ

แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ เป็นการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงอัตราการดูดซับ กลไกการดูดซับ ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยแบบจำลองจลนศาสตร์ที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order), แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) และแบบจำลองอาฟรามี่ (Avrami's model)

##### 2.5.2.1. แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order)

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมเป็นแบบจำลองที่ตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและคายซับเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (Pseudo chemical reaction) และอัตราการดูดซับจะขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาเพียงตัวแปรเดียว เนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับจะคงที่ตลอดการดูดซับ และค่าคงที่อัตราการดูดซับ ( $k_1$ ) จะแปรผันตรงตามความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวดูดซับ โดยใช้สมการจลนศาสตร์การดูดซับของ Lagergren [21] แสดงดังสมการที่ (6)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (6)$$

อินทิเกรตสมการที่ โดยที่  $t = 0$  ถึง  $t = t$  และ  $q_t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$  จะได้สมการที่ (7) ซึ่งแสดงดังนี้

$$q_t = q_e(1 - \exp(-k_1 t)) \quad (7)$$

เมื่อ  $q_e$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล [โมล/กิโลกรัม]

$q_t$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ [โมล/กิโลกรัม]

$k_1$  = ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม [1/นาทึ]

$t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ [นาทึ]

### 2.5.2.2. แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order)

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายอัตราของปฏิกิริยาอันดับสอง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความสามารถในการดูดซับบนตัวดูดซับ ขึ้นกำหนดอัตราคือขั้นตอนการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ [22] สมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมแสดงดังสมการที่ (8)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (8)$$

อินทิเกรตสมการที่ โดยที่  $t = 0$  ถึง  $t = t$  และ  $q_t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$  จะได้สมการที่ (9) ซึ่งแสดงดังนี้

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (9)$$

เมื่อ  $q_e$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล [โมล/กิโลกรัม]

$q_t$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ [โมล/กิโลกรัม]

$k_2$  = ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม [กิโลกรัม/โมล-นาที]

$t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ [นาที]

### 2.5.2.3. แบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's model)

แบบจำลองของอาฟรามิ เป็นแบบจำลองที่มีการดัดแปลงจากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ด้วยการเพิ่มค่าคงที่ของอาฟรามิ ( $n_a$ ) โดยปกติค่า  $n_a$  จะอยู่ในช่วง 1-4 แบบจำลองนี้ใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่มีความซับซ้อน มีกลไกการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไก [23] โดยสมการแสดงดัง สมการที่ (10)

$$q_t = q_e (1 - \exp(-k_a t)^{n_a}) \quad (10)$$

เมื่อ  $q_e$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล [โมล/กิโลกรัม]

$q_t$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ [โมล/กิโลกรัม]

$k_a$  = ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม [1/นาที]



$n_a$  = ค่าคงที่ของอาฟรามี่

$t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ [นาทึ]

## 2.6 ฟลูอิดเซชัน [24]

ฟลูอิดเซชัน เป็นกระบวนการที่ของแข็งแสดงพฤติกรรมคล้ายของไหล ซึ่งของไหลที่ใช้อาจเป็นของเหลวหรือแก๊ส โดยจะบรรจุของแข็งไว้ในคอลัมน์และทำการป้อนของไหลเข้าด้านล่างของคอลัมน์แล้วผ่านของแข็งที่บรรจุไว้ ออกสู่ด้านบนของคอลัมน์ เมื่อเพิ่มความเร็วในการป้อนของไหลของแข็งที่บรรจุในคอลัมน์จะเริ่มเกิดการขยับตัว และลอยขึ้นอย่างอิสระ การเคลื่อนที่ของของแข็งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหล ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบต่างๆ ดังนี้ เบตนิ่ง, ฟลูอิดซ์เบตแบบฟองแก๊ส, ฟลูอิดซ์เบตแบบปั่นป่วน, ฟลูอิดซ์เบตแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง และฟลูอิดซ์เบตแบบบางเบา แสดงในรูปที่ 2.10

### 2.6.1 ประเภทของฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาค และฟลูอิดเซชันแบบสามวัฏภาค ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.6.1.1 ฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาค (Two-phase fluidization) เป็นฟลูอิดเซชันที่เกิดในกระบวนการที่ประกอบด้วยวัฏภาค 2 วัฏภาค คือของแข็งและของไหล โดยของไหลอาจเป็นของเหลวหรือแก๊ส ดังนั้นฟลูอิดเซชันแบบ 2 วัฏภาคสามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท คือ

- ฟลูอิดเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid-solids fluidization)
- ฟลูอิดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง (Gas-solids fluidization)

เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของของแข็งระหว่างกระบวนการฟลูอิดเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง และฟลูอิดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง พบว่า กระบวนการที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของอนุภาคของแข็งจะสม่ำเสมอ (Homogeneous fluidization) การลอยตัวและการเคลื่อนที่จะเป็นไปอย่างช้าๆ เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนกระบวนการที่ของไหลเป็นแก๊ส แก๊สจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งจะทำให้อนุภาคของแข็งเกิดการลอยตัว และอีกส่วนหนึ่งจะรวมตัวกันเกิดเป็นฟองแก๊สขึ้นภายในระบบ การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งจึงเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ (Heterogeneous fluidization) พฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกันนี้ เกิดขึ้นจากสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของของไหลทั้ง 2 ประเภท โดยความหนืด (Viscosity) และความหนาแน่น (Density) เป็นสมบัติทางกายภาพหลักที่ทำให้เกิดพฤติกรรมดังกล่าว

2.6.1.2 ฟลูอิดิเซชันแบบสามวัฏภาค (Three-phase fluidization) เป็นฟลูอิดิเซชันที่เกิดในกระบวนการที่ประกอบด้วยวัฏภาค 3 วัฏภาค คือ ของแข็ง, ของเหลว และแก๊ส ระบบฟลูอิดิเซชันแบบสามวัฏภาคมักจะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคของแข็ง เนื่องจากในระบบมีของเหลวอยู่ ส่งผลให้กระบวนการฟลูอิดิเซชันเกิดไม่สมบูรณ์

## 2.6.2 ช่วงการไหลของฟลูอิดิเซชัน

2.6.2.1 เบดนิ่ง (Fixed bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้ยังไม่ถือว่าเป็นรูปแบบการไหลของฟลูอิดิเซชัน ความเร็วของของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ยังไม่เพียงพอที่ทำให้อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัว หรือมีลักษณะเด่น คือ อนุภาคของแข็งในกระบวนการจะไม่มีการเคลื่อนที่

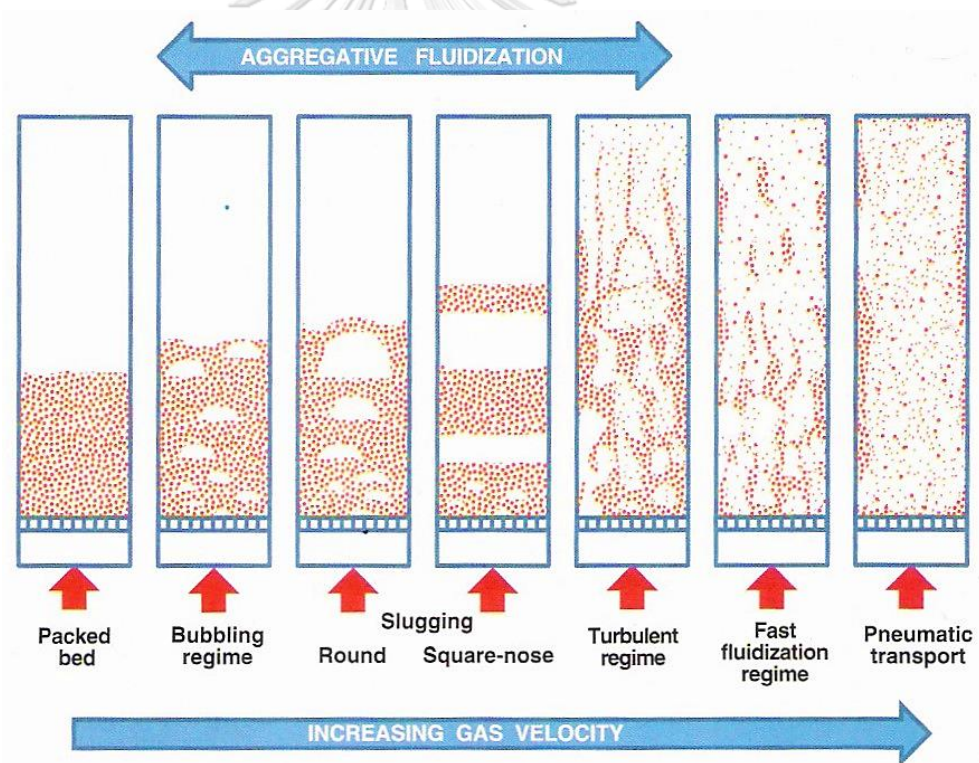
2.6.2.2 ฟลูอิดิเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้เริ่มถือว่าเป็นรูปแบบการไหลของฟลูอิดิเซชัน ความเร็วเริ่มต้นที่อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัว เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชัน (Incipiently fluidized bed, Onset of fluidization, Fluidization point หรือ Bed at minimum fluidization) มีลักษณะเด่น คือ จะเริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้น อย่างไรก็ตาม ลักษณะการเกิดฟองแก๊สจะแตกต่างกันไปตามขนาดของอนุภาคของแข็ง

2.6.2.3 ฟลูอิดิเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่าอยู่ระหว่างความเร็วสองค่า ซึ่งคือ ความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งในกระบวนการมีค่าสูงที่สุดและความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งมีค่าต่ำที่สุดจนเข้าสู่ภาวะคงตัว มีลักษณะเด่น คือ ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะแตกอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความเร็วที่สูงขึ้นจนคล้ายกับไม่มีฟองแก๊สในกระบวนการ โดยลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์จะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่ชัดเจน คือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่นที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางที่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์

2.6.2.4 ฟลูอิดิเซชันแบบฟลูอิดิเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้เกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีมากกว่าความเร็วขนส่ง (Transport velocity) โดยเป็นช่วงการไหลที่อยู่ระหว่างช่วงการไหลฟลูอิดิเซชันแบบปั่นป่วนและฟลูอิดิเซชันแบบเบาบาง ที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางและเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของของไหล แต่ที่บริเวณผนังของ

เครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่นและเคลื่อนที่ลงสวนทิศทางการไหลของของไหล รวมเรียกลักษณะการไหลเฉพาะแบบนี้ว่า การไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annulus flow)

2.6.2.5 ฟลูอิดิเซชันแบบบางเบา (Dilute หรือ Pneumatic transport fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้ จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม (Minimum pneumatic transport-velocity) สำหรับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะพบว่า อนุภาคของแข็งทั้งหมดจะถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์โดยจะเคลื่อนที่แยกจากกันเป็นอนุภาคของแข็งเดี่ยวกระจายตัวอยู่ในกระแสของไหล ซึ่งสัดส่วนระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลอยู่ที่ประมาณ 1 ต่อ 20 หรือมีปริมาณของไหลในเครื่องปฏิกรณ์อยู่สูงมาก



รูปที่ 2.10 ช่วงการไหลฟลูอิดิเซชันแบบต่างๆ [25]

### 2.6.3 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิดิเซชัน [24]

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการฟลูอิดิเซชัน (เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิเซชันแบบ) กับกระบวนการอื่น (เครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง) กระบวนการฟลูอิดิเซชันมีข้อดี ข้อเสีย ดังนี้

#### ข้อดีของกระบวนการฟลูอิดเซชัน

1. มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลและของแข็งสูง และมีการกวนผสมภายในสูง
2. มีการจัดเรียงตัวอนุภาคของแข็งที่เฉพาะ โดยอนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงจะอยู่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และอนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นต่ำจะอยู่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์
3. สามารถแยกอนุภาคของแข็งที่ใช้งานแล้วออกได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์
4. เป็นตัวกลางการถ่ายโอนความร้อนที่ดี มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูง
5. ใช้พลังงานในการดำเนินการที่ต่ำ เพราะมีแรงต้านทานภายในต่ำ
6. เป็นกระบวนการต่อเนื่อง และการดำเนินการทำได้ง่าย
7. เป็นกระบวนการที่มีช่วงความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการกว้าง จึงสามารถใช้งานได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิด

#### ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิดเซชัน

1. อนุภาคของแข็งมีระยะเวลาอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์สั้น ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ลำดับขั้น
2. เกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ในบางช่วงการไหล ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลลดลง
3. การผสมเกิดได้ดีในทิศทางตามแนวแกน (Vertical) มากกว่าการผสมในทิศทางตามแนวนอน (Horizontal) ทำให้อาจมีความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ในกระบวนการ
4. อนุภาคของแข็งอาจหลุดออกจากกระบวนการที่ความเร็วของไหลป้อนเข้าสูง ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยติดตั้งอุปกรณ์ดักจับและป้อนอนุภาคของแข็งที่หลุดออกไปกลับเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์
5. อนุภาคของแข็งมีขนาดเล็กกลวงเรื่อยๆ เนื่องจากเกิดการชนกันของอนุภาคของแข็งหรือปฏิกิริยาเคมีภายในกระบวนการ
6. เครื่องปฏิกรณ์จะเกิดการสั่นและสึกกร่อน เนื่องจากการชนกันของอนุภาคของแข็งกับผนังเครื่องปฏิกรณ์

7. ไม่สามารถใช้งานกับอนุภาคของแข็งที่เปียกหรือเหนียวได้ เพราะจะเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Boonprasop และคณะ [26] ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration temperature) เวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (regeneration time) และจำนวนรอบของการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration cycle) ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดภายใต้รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed regime) โดยพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ ส่งผลต่อความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเชิงบวก กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาผลของจำนวนรอบของการฟื้นฟูสภาพ พบว่าไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญกับความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ และภาวะที่ดีที่สุดในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ คือ อุณหภูมิเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งมีค่าความสามารถในการดักจับมากถึง 90.7% ของตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ

Guo และคณะ [27] ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับคอมโพสิตระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) และพอลิเอทิลีนอิมมิมิน (PEI) บนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ (AC) เพื่อใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซที่ถูกปล่อยออกหลังกระบวนการเผาไหม้ โดยจะทดสอบในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดรูปแบบการไหลแบบเบดนิ่ง เมื่อพิจารณาผลของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับคอมโพสิต PEI- $K_2CO_3$ /AC พบว่า ตัวดูดซับคอมโพสิตมีความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าตัวดูดซับ  $K_2CO_3$ /AC และตัวดูดซับ PEI/AC เนื่องจากตัวดูดซับคอมโพสิตประกอบไปด้วย  $K_2CO_3$  และ PEI ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ทั้งคู่ นอกจากนี้ ยังพบว่าตัวดูดซับคอมโพสิต PEI- $K_2CO_3$ /AC มีความเสถียรในการดูดซับที่ดีแม้ผ่านการฟื้นฟูสภาพจำนวนหลายรอบ

Jaiboon และคณะ [28] ศึกษาผลของรูปแบบการไหลของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา ( $K_2CO_3/Al_2O_3$ ) ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดที่มีต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการศึกษารูปแบบการไหลต่างๆ กัน 5 รูปแบบ คือ เบดนิ่ง ฟลูอิดไชน์เบดแบบฟองแก๊ส ฟลูอิดไชน์เบดแบบสลัก ฟลูอิดไชน์เบดแบบปั่นป่วน และฟลูอิดไชน์เบด

แบบฟลูอิดไอเซชันความเร็วสูง ซึ่งรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความเร็วของสารขาเข้า โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส จากผลการทดลอง พบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่ามากที่สุดในรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบปั่นป่วน เนื่องมาจากในรูปแบบการไหลนี้ทำให้เกิดการผสมย้อนกลับระหว่างตัวดูดซับของแข็ง และคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้มีการสัมผัสกันระหว่างตัวดูดซับและก๊าซมากขึ้นจึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูง และค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่ามากในรูปแบบการไหลแบบฟลูอิดไอเซชันแบบพองแก๊ส ฟลูอิดไอเซชันแบบฟลูอิดไอเซชันความเร็วสูง ฟลูอิดไอเซชันแบบสลัก และเบตนิ่ง ตามลำดับ

Lee และคณะ [29] ทำการศึกษาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง และการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ในภาวะที่อุณหภูมิต่ำ (อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส) โดยทำการศึกษานิดของตัวดูดซับของแข็ง และปริมาณน้ำที่ใช้ในกระบวนการ pre-treatment ตัวดูดซับของแข็งที่นำมาศึกษาคือ ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ ( $K_2CO_3/AC$ ) ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา ( $K_2CO_3/Al_2O_3$ ) ตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ ( $Na_2CO_3/AC$ ) และตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา ( $Na_2CO_3/Al_2O_3$ ) จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับ  $K_2CO_3/Al_2O_3$  มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Capture capacity) มากที่สุด และสามารถฟื้นฟูสภาพได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อมีการให้ความร้อนกับตัวดูดซับ อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับ  $K_2CO_3/Al_2O_3$  จะมีความสามารถในการดูดซับที่ลดลงเมื่อผ่านการดูดซับและฟื้นฟูสภาพหลายๆ รอบ เนื่องมาจากมีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน  $KAl(CO_3)_2(OH)_2$  ในระหว่างกระบวนการดูดซับ ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงกลับมาเป็น  $K_2CO_3$  ได้ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ยังพบว่ากระบวนการ pretreatment ตัวดูดซับด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย

Yi และคณะ [30] ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติการฟื้นฟูสภาพ (regeneration properties) ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา ( $K_2CO_3/Al_2O_3$ ) ที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\alpha-Al_2O_3$  จะมีสมบัติการฟื้นฟูสภาพที่ดีกว่าตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  โดยสามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำเพียง 130 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากในกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ

$K_2CO_3/\alpha-Al_2O_3$  ไม่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ร่วม  $KAl(CO_3)(OH)_2$  ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง  $K_2CO_3$  กับ  $Al_2O_3$  ที่ยากต่อการฟื้นฟูสภาพให้กลับมาเป็น  $K_2CO_3$  ที่อุณหภูมิต่ำ โดยการไม่เกิด  $KAl(CO_3)(OH)_2$  ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\alpha-Al_2O_3$  เป็นผลมาจากโครงสร้างที่แตกต่างกันของ  $\alpha-Al_2O_3$  และ  $\gamma-Al_2O_3$

Zhao และคณะ [31] ทำการศึกษาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นของไอน้ำ และปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) ในตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา ( $K_2CO_3/Al_2O_3$ ) ที่ส่งผลต่อความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด จากผลการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญเมื่อความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10-30% แต่เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของไอน้ำ พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอน้ำมากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น เนื่องจากไอน้ำจะมีส่วนช่วยในกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง  $K_2CO_3/Al_2O_3$  และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณ  $K_2CO_3$  พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ  $K_2CO_3$  จาก 12.8% เป็น 36.8% ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณตัวดูดซับมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มปริมาณ  $K_2CO_3$  เป็น 45.1% พบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง เนื่องจากเกิดการรวมกลุ่มกันของ  $K_2CO_3$

Prajapati และคณะ [32] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ ( $K_2CO_3/AC$ ) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด โดยศึกษาผลของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (10, 20, 40, 70 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร), ความเร็วของฟลูอิดเซชัน (1.5, 3, 5 และ 7 เท่าของความเร็วเริ่มต้นการเกิดฟลูอิดเซชัน), อุณหภูมิการดูดซับ (60, 80 และ 100 องศาเซลเซียส), ขนาดอนุภาคตัวดูดซับ (0.600–0.710 มิลลิเมตร) และความสูงของตัวดูดซับ (ค่าอัตราส่วน  $L/D$  เท่ากับ 1, 2 และ 4) จากผลการทดลอง พบว่าอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์, ความเร็วของฟลูอิดเซชัน, อุณหภูมิในการดูดซับ และความสูงของตัวดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการดูดซับจะลดลง เมื่อเพิ่มขนาดของอนุภาคตัวดูดซับ

Jongartklang และคณะ [33] ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา ( $K_2CO_3/Al_2O_3$ ) ซึ่งทำการศึกษา 3 พารามิเตอร์ คือ ความเร็วของ

แก๊สขาเข้า, อุณหภูมิการดูดซับ และปริมาณไอน้ำ โดยทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองเข้ากับแบบจำลองการเสื่อมสภาพ (Deactivation model) เพื่อหาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น ( $k_0$ ) และค่าคงที่อัตราการเสื่อมสภาพ ( $k_d$ ) จากการทดลองพบว่า แบบจำลองการเสื่อมสภาพที่มีตำแหน่งวงไวยของตัวดูดซับของแข็ง ( $m$ ) เท่ากับ 1 และความเข้มข้นของสารตั้งต้น ( $n$ ) เท่ากับ 1 ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด เมื่อพิจารณาผลของความเร็วของแก๊สขาเข้า พบว่าการเพิ่มความเร็วก๊าซขาเข้าจะได้รูปแบบการไหลต่างๆ กัน 5 รูปแบบ คือ เบดนิ่ง ฟลูอิดไรซ์เบดแบบพองแก๊ส ฟลูอิดไรซ์เบดแบบปั่นป่วน และฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟลูอิดไรซ์ความเร็วสูง โดยฟลูอิดไรซ์เบดแบบปั่นป่วนเป็นรูปแบบการไหลที่มีการต้านทานการถ่ายโอนมวลต่ำ สามารถเกิดการดูดซับได้รวดเร็ว และเกิดการผสมย้อนกลับระหว่างตัวดูดซับของแข็ง และคาร์บอนไดออกไซด์ ผลของอุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เหมาะสมกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดและค่า  $k_0$  และ  $k_d$  สอดคล้องกับรูปแบบอาร์เรเนียส (Arrhenius's form) นอกจากนี้ยังพบว่าค่า  $k_0$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น แต่ค่า  $k_d$  จะลดลงเมื่อปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึง อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย วิธีการเตรียมตัวดูดซับ อุปกรณ์ การทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนการทดลอง การพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวดูดซับ การศึกษาแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ การศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ และ การศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ เช่น ปีกเกอร์ แท่งแก้วคนสาร ปิเปต ขวดวัดปริมาตร ถ้วยเซรามิก เป็นต้น
- เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance)
- เครื่องเขย่าอัตโนมัติ (Shaker) รุ่น SHO-2D จากบริษัท WiseShake
- เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filter)
- ตู้อบ (Oven) รุ่น ED 115 จากบริษัท Binder
- ครกบดสาร (Mortar and pestle)
- เตาเผาสาร (Furnace) รุ่น CWF 13 จากบริษัท Carbolite
- เครื่องโรตารีเตอร์ (Rotameter) รุ่น K-2014 จากบริษัท Nitto
- เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller) จากบริษัท Bronkhorst
- เซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> sensor) รุ่น K-33 BLG จากบริษัท CO<sub>2</sub> Meter
- ท่อสแตนเลส 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.25 นิ้ว, ข้อต่อ และวาล์ว จากบริษัท swagelok
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) รุ่น E5AN-H จากบริษัท OMRON
- เตาปฏิกรณ์ (Reactor furnace)
- ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
- เทอร์โมคัปเปิล (Sheath thermocouple) ชนิด K เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ความยาว 0.2 เมตร จากห้างหุ้นส่วนจำกัดสวนหลวง เอ็นจิเนียริง
- แถบเพิ่มความร้อน (Heating tape)

- เกจวัดความดัน (Presser gauge) จากบริษัท swagelok
- คอลัมน์แก้วฟลูอิดิซ์เบด (Fluidized bed column) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.025 เมตร สูง 42 เซนติเมตร ติดตั้งฟิลเตอร์แก้วเบอร์ 0 ที่ตำแหน่งความสูง 20 เซนติเมตร
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) รุ่น IM125D จากบริษัท IM-TECH
- เครื่องปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump) รุ่น BT 600-2J จากบริษัท Longer Pump

### 3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 138.21 กรัมต่อโมล จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
- แกมมาอะลูมินา ( $\gamma-Al_2O_3$ ) น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 101.90 กรัมต่อโมล จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
- น้ำปราศจากไอออน (DI water)
- อะซิโตนเกรดความบริสุทธิ์สูง 99.99 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท NT Chemical จำกัด
- แก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์ ในสมดุลแก๊สไนโตรเจน จากบริษัท ไทย-เจแปน แก๊ส จำกัด
- แก๊สไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง 99.99 เปอร์เซ็นต์ จากบริษัท ไทย-เจแปน แก๊ส จำกัด

### 3.2 วิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.2.1 วิธีการเตรียมตัวดูดซับ

ในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) และตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) โดยใช้วิธีอิมเพรกเนชันในการเตรียมตัวดูดซับ ซึ่งทำได้โดยนำโพแทสเซียมคาร์บอเนต (บริษัท Merck ผลิตที่ประเทศเยอรมัน) และ แกมมาอะลูมินา (บริษัท Merck ผลิตที่ประเทศเยอรมัน) ปริมาณอย่างละ 5 กรัม มาละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (DI water) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปเขย่าในเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำสารละลายมากรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตัวดูดซับที่ผ่านการอบมาบดให้เป็นผงแล้วนำไปเผาเพื่อเปลี่ยนวัฏภาคของสารตั้งต้นให้อยู่ในรูปที่พร้อมนำไปใช้งาน โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ

600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงภายใต้สภาวะบรรยากาศ นำตัวดูดซับที่สังเคราะห์เรียบร้อยแล้ว แล้วบรรจุใส่ภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิดแล้วนำไปเก็บรักษาไว้ในตู้ดูดความชื้น เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ โดยจะแสดงลำดับวิธีการเตรียมตัวดูดซับไว้ในรูปที่ 3.1

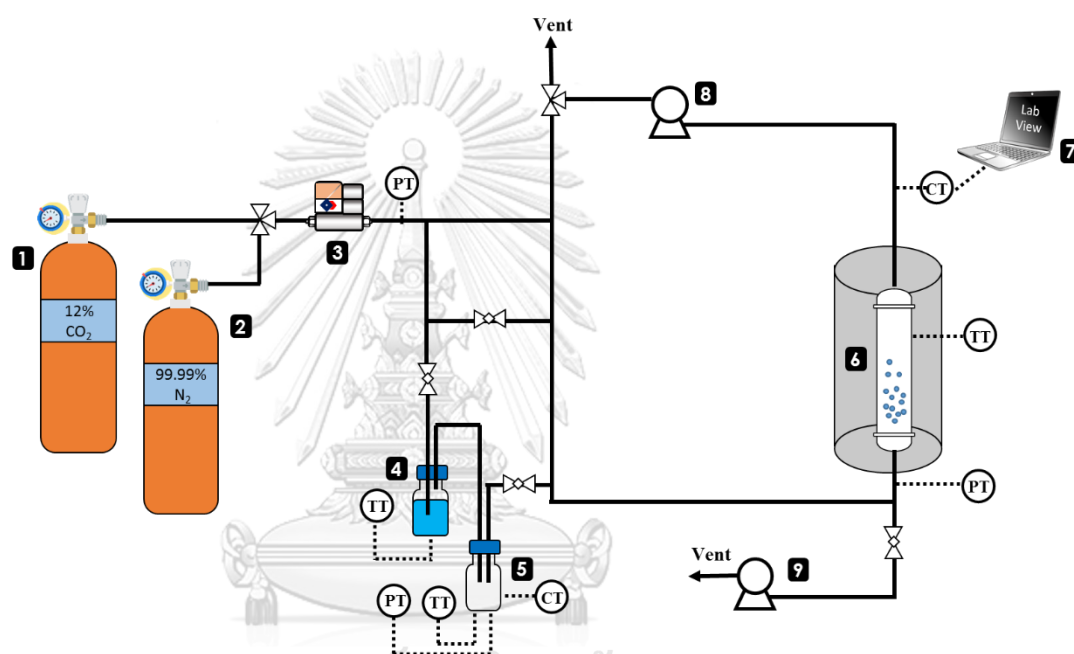


รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) ด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน

### 3.2.2 อุปกรณ์การทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ในงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาการดูดซับและสมดุลการดูดซับของคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 3.2 การดูดซับจะดำเนินการในระบบปิด อุปกรณ์ที่ใช้มีส่วนประกอบต่างๆ ประกอบไปด้วย 1. ถังแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์ ในสมดุลแก๊สไนโตรเจน 2. ถังแก๊สไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง 99.99 เปอร์เซ็นต์ 3. เครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส (Mass flow controller) ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วอัตโนมัติ ที่มีความแม่นยำสูง 4. หน่วยสร้างไอน้ำให้ระบบ ในส่วนนี้จะมีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส เพื่อสร้างไอน้ำ 5. ถังกักเก็บแก๊สก่อนดูดซับในส่วนนี้จะมีการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส 6. คอลัมน์ดูดซับ เป็นคอลัมน์ฟลูอิดเบดที่ทำจากแก้วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.5

เซนติเมตร และสูง 42 เซนติเมตร มีการติดตั้งฟิลเตอร์แก้วที่ความสูง 22 เซนติเมตร ที่ส่วนนี้จะมีการให้ความร้อนด้วยเตาปฏิกรณ์และมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ 7. คอมพิวเตอร์ เพื่อบันทึกข้อมูลอุณหภูมิและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านซอฟต์แวร์ของ Labview ข้อมูลความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิจะถูกบันทึกทุกๆ 1 วินาที 8. ปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump) เพื่อใช้ในการหมุนเวียนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการดูดซับให้เข้ามาดูดซับใหม่จนกว่าระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุล และ 9. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อใช้ในการดูดแก๊สคงค้างในระบบออกก่อนทำการทดลองและหลังทำการทดลอง



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ระบบดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์เบด ช่วงการไหลฟลูอิดิซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. ก่อนทำการทดสอบต้องทำการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่คงค้างในระบบด้วยการป้อนแก๊สไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง 99.99 เปอร์เซ็นต์ เข้ามาในระบบผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหล ที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตร/นาที จนกระทั่งเซนเซอร์ตรวจไม่พบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์
2. นำตัวดูดซับปริมาณ 5 กรัม บรรจุลงในคอลัมน์ฟลูอิดิซ์เบด และปั๊มแก๊สไนโตรเจนออกให้เป็นสุญญากาศด้วยปั๊มสุญญากาศ
3. ป้อนแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ระบบที่อัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/นาที ผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล และป้อนเข้าสู่หน่วยสร้างไอน้ำที่ควบคุม

อุณหภูมิไว้ที่ 100 องศาเซลเซียส และนำแก๊สขึ้นเข้ามาพักที่ส่วนเก็บแก๊สขึ้นตามความดันที่ต้องการ พร้อมทั้งปรับอุณหภูมิคอลัมน์ดูดซับตามที่ต้องการ และ 4. ป้อนแก๊สขึ้นเข้าสู่คอลัมน์ดูดซับและเปิดปั๊มให้หมุนเวียนแก๊สในระบบ โดยควบคุมอัตราการไหลของปั๊มไว้ที่ 2.2 ลิตร/นาที รอจนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุล พิจารณาได้จากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์หลังดูดซับจะคงที่ จากนั้นนำข้อมูลความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่างๆ มาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ดังแสดงในสมการที่ 15

$$q = \frac{1}{m} \int_0^t Q (C_{in} - C_{out}) dt \quad (15)$$

เมื่อ  $q$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [มิลลิกรัม/กรัม]

$m$  = มวลของโลหะกัมมันต์ (Active-site) บนตัวดูดซับ [กรัม]

$C_{in}$  = ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ขาเข้า (% มวล) [-]

$C_{out}$  = ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ขาออก (% มวล) [-]

$Q$  = อัตราการไหลของแก๊สโดยมวล [กรัมต่อวินาที]

$t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ [วินาที]

### 3.2.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ

#### 3.2.4.1 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน ( $N_2$ physisorption measurement)

นำตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ประมาณตัวอย่างละ 0.1 กรัม มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาวิเคราะห์ เพื่อป้องกันการดูดซับไอน้ำและแก๊สเจือปนอื่น ๆ โดยใช้เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความพรุน (Surface area and porosity analyzer, BET) ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP2020

#### 3.2.4.2 การวิเคราะห์หาชนิดธาตุของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Energy dispersive X – ray spectrometry (EDX)

นำตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต และโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ประมาณตัวอย่างละ 1 กรัม นำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วจึง

นำไปวิเคราะห์หาชนิดธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Quantitative analysis) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้านเอกซ์เรย์

3.2.4.3 การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD)

นำตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินาก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับ ประมาณตัวอย่างละ 1 กรัม มาวิเคราะห์ สำหรับตัวดูดซับก่อนการดูดซับจะถูกนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปทำการวิเคราะห์ เพื่อป้องกันการดูดซับไอน้ำและแก๊สเจือปนอื่นๆ เพื่อนำมาศึกษาโครงสร้างผลึกหรือวัฏภาคของตัวดูดซับในระดับอะตอมด้วยเครื่อง Bruker รุ่น D8 Advance ที่มีมุม  $2\theta$  เท่ากับ 5 ถึง 80

3.2.4.4 การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนไมโครสโกปี (Scanning electron microscopy: SEM)

นำตัวดูดซับแกมมาอลูมินา, โพแทสเซียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ประมาณตัวอย่างละ 1 กรัม มาศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับที่แตกต่างกัน การศึกษาสัณฐานวิทยาเป็นการพิสูจน์ทราบรูปร่าง ขนาด และการกระจายตัวของผลึกหรืออนุภาคตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 50 นาโนเมตร โดยพิจารณาสัณฐานวิทยาจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่มีกำลังขยาย 300 เท่า, 2500 เท่า, 3000 เท่า, 3500 เท่า และ 4000 เท่า

3.2.4.5 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณองค์ประกอบของธาตุของตัวดูดซับด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence: XRF)

นำตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ประมาณ 1 กรัม มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) และเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

3.3 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

3.3.1. การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) จะทำการศึกษาที่ความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 บาร์ ที่อุณหภูมิการ

ดูดซับที่แตกต่างกันตั้งแต่ 45, 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส โดยข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับที่ได้จะนำมาคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับที่สนใจศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ 4 แบบจำลอง ดังนี้ แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm), แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich isotherm), แบบจำลองสมดุลการดูดซับของซิปส์ (Sips isotherm) และแบบจำลองสมดุลการดูดซับของทอธ (Toth isotherm) ซึ่งรายละเอียดสมการสมดุลการดูดซับของแต่ละแบบจำลองจะแสดงดังตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองต่างๆ เพื่อพิจารณาเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมกับกระบวนการดูดซับ จะใช้ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ตามสมการที่ 16 และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ( $R^2$ ) ตามสมการที่ 17 เป็นเครื่องชี้วัดความใกล้เคียงกันระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง โดยกำหนดสภาวะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 สมการแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับที่ทำการศึกษา

แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ	สมการ
แบบจำลองสมดุลการดูดซับแลงเมียร์	$q = \frac{q_m (BP)}{1 + (BP)}$
แบบจำลองสมดุลการดูดซับฟรุนดลิช	$q = K_F P^{1/n}$
แบบจำลองสมดุลการดูดซับของซิปส์	$q = \frac{q_m (BP)^{1/n}}{1 + (BP)^{1/n}}$
แบบจำลองสมดุลการดูดซับของทอธ	$q = \frac{q_m BP}{(1 + (BP)^n)^{1/n}}$

- โดยที่  $q$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [โมล/กิโลกรัม]  
 $q_m$  = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ [โมล/กิโลกรัม]  
 $P$  = ความดันที่สมดุล [บาร์]  
 $B$  = ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทิร์มซิปส์และทอธ [บาร์<sup>-1</sup>]  
 $K_F$  = ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทิร์มฟรุนดลิช [โมล กิโลกรัม<sup>-1</sup> บาร์<sup>1/n</sup>]  
 $n$  = ค่าพารามิเตอร์ของไอโซเทิร์มฟรุนดลิช, ซิปส์ และทอธ [-]

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองสมดุผลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

สภาวะการทดลอง	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
ชนิดของตัวดูดซับ	$K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$
อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (องศาเซลเซียส)	45, 60, 75 และ 90
ความดันที่สมดุลของระบบ (บาร์)	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1
รูปแบบการไหล	ฟลูอิดไคซ์เซชันแบบฟองแก๊ส
อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	2.2
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	5
ส่วนประกอบแก๊ส	$CO_2 : 12\%$ , $H_2O : 18\%$ balance $N_2$

### 3.3.2. การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) จะทำการศึกษาที่ความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าคงที่ 1 บาร์ ที่อุณหภูมิการดูดซับที่แตกต่างกันตั้งแต่ 45, 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส ในงานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ 3 แบบจำลอง ดังนี้ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order), แบบจำลองแรงขับเชิงเส้น (Linear driving force model) และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's model) ข้อมูลสมการแต่ละแบบจำลองจะแสดงดังตารางที่ 3.3 นอกจากนี้การพิจารณาเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมกับกระบวนการดูดซับ จะพิจารณาจากค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (%Error) ตามสมการที่ 16 และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ( $R^2$ ) ตามสมการที่ 17 เป็นเครื่องชี้วัดความใกล้เคียงกันระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองเช่นเดียวกับการศึกษาแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ โดยกำหนดสภาวะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดังตารางที่ 3.4



ตารางที่ 3.3 สมการแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่ทำการศึกษา

แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ	สมการ
แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม	$q_t = q_e (1 - \exp(-k_1 t))$
แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม	$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t}$
แบบจำลองอาฟรามี	$q_t = q_e (1 - \exp(-k_a t)^{n_a})$

โดยที่  $q_e$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล [โมล/กิโลกรัม]

$q_t$  = ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาใดๆ [โมล/กิโลกรัม]

$k_1$  = ค่าคงที่ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม [1/นาที]

$k_2$  = ค่าคงที่ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม [กิโลกรัม/โมล·นาที]

$k_a$  = ค่าคงที่ของแบบจำลองอาฟรามี [1/นาที]

$n_a$  = ค่าคงที่อาฟรามี

$t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ [นาที]

ตารางที่ 3.4 สภาวะการทดลองจลนศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

สภาวะการทดลอง	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
ชนิดของตัวดูดซับ	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> /γ-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (องศาเซลเซียส)	45, 60, 75 และ 90
ความดันที่สมดุลของระบบ (บาร์)	1
รูปแบบการไหล	ฟลูอิดไชน์เซชันแบบพองแก๊ส
อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	2.2
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	5
ส่วนประกอบแก๊ส	CO <sub>2</sub> : 12% , H <sub>2</sub> O : 18% balance N <sub>2</sub>

ตัวชี้วัดความสอดคล้องกันระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดลอง จะพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อน (Error) และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination : R<sup>2</sup>) ซึ่งแสดงการคำนวณไว้ดังสมการที่ 16 และ 17 ตามลำดับ

$$\text{Error (\%)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{(q_{\text{exp}} - q_{\text{cal}}) / q_{\text{exp}}}{n - 1} \right]^2} \times 100 \quad (16)$$

โดยที่  $q_{\text{exp}}$  = ค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลอง [โมล/กิโลกรัม]

$q_{\text{cal}}$  = ค่าความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการคำนวณ [โมล/กิโลกรัม]

$n$  = จำนวนข้อมูล [-]

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (17)$$

โดยที่  $R^2$  = ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด [-]

$\bar{y}$  = ค่าผลได้เฉลี่ยจากการทดลอง [โมล/กิโลกรัม]

$\hat{y}$  = ค่าผลได้จากการคำนวณ [โมล/กิโลกรัม]

$y_i$  = ค่าผลได้จากการทดลอง [โมล/กิโลกรัม]

### 3.3.3. การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต และตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแก้วมอลูมินา จะทำการศึกษาที่ความดันเริ่มต้น 1 บาร์ อุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 45–300 องศาเซลเซียส เพื่อพิจารณารูปแบบการดูดซับและคายซับของตัวดูดซับ นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงการดูดซับและคายซับขององค์ประกอบต่างๆ ในตัวดูดซับ โดยสภาวะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สภาวะการทดลองการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

สภาวะการทดลอง	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
ชนิดของตัวดูดซับ	$K_2CO_3$ , $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$
อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (องศาเซลเซียส)	45 - 300
ความดันที่สมดุลของระบบ (บาร์)	1
รูปแบบการไหล	ฟลูอิด์เซชันแบบฟองแก๊ส
อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	2.2
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	5
ส่วนประกอบแก๊ส	$CO_2$ : 12% , $H_2O$ : 18% balance $N_2$

## บทที่ 4

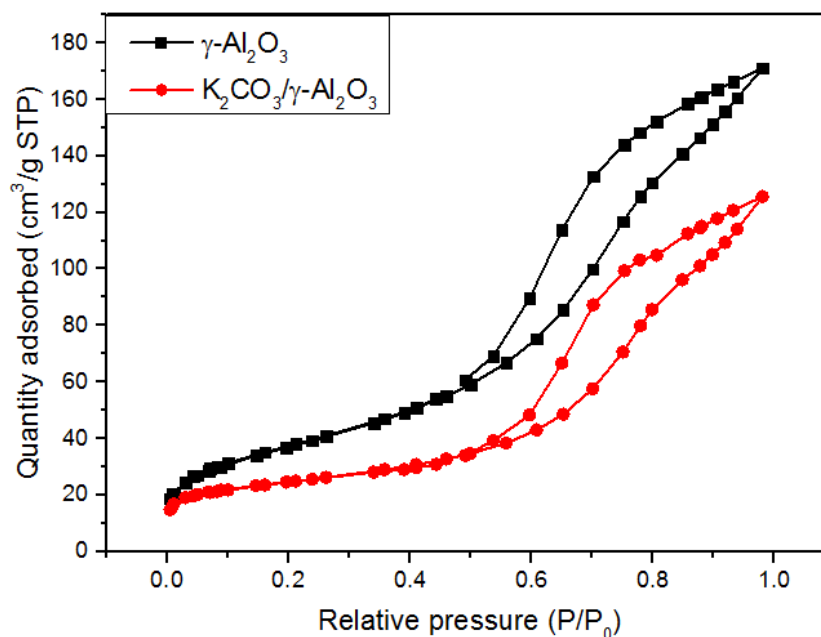
### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้ การศึกษาและพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับด้วยเทคนิคต่างๆ การศึกษาสมดุลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ การศึกษาแบบจำลองสมดุลการดูดซับ การหาภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะสมดุล การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ การศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ และการศึกษาพฤติกรรมกรรมการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

#### 4.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ

4.1.1. การหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน ( $N_2$  physisorption measurement)

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน ลักษณะรูพรุนของตัวดูดซับจะอธิบายได้ด้วยผลลักษณะไอโซเทิร์มการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจนแสดงในรูปที่ 4.1 นอกจากนี้ ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) และขนาดรูพรุน (Pore size) ซึ่งเป็นข้อมูลที่บ่งบอกความพรุนของตัวดูดซับจะแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ไอโซเทิร์มการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

ตารางที่ 4.1 ผลการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวดูดซับด้วยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน

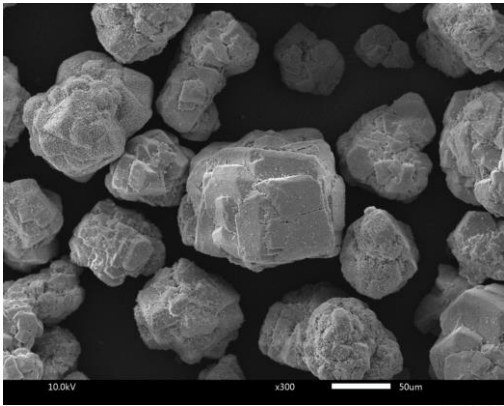
ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิวตัวดูดซับ (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม)	ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)
$K_2CO_3$	3.7403	0.002194	21.670
$\gamma-Al_2O_3$	135.9215	0.264569	77.8595
$K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$	84.4798	0.194216	91.9585

เมื่อพิจารณารูปแบบไอโซเทิร์มการดูดซับไนโตรเจนของตัวดูดซับ  $\gamma-Al_2O_3$  และตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  จากรูปที่ 4.1 พบว่ารูปแบบรูพรุนของตัวดูดซับทั้งสองเป็นรูพรุนแบบ Type IV ซึ่งเป็นลักษณะรูพรุนแบบ Mesoporous (ขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร) และเมื่อพิจารณากราฟฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ที่เกิดขึ้น พบว่าตัวดูดซับทั้งสองมีวงฮิสเทอรีซิสรูปแบบ E กล่าวคือ วงฮิสเทอรีซิสมีเส้นการดูดซับ (เส้นล่าง) ที่ชัน แต่มีเส้นการคายซับ (เส้นบน) ไนโตรเจนออกจากรูพรุนที่ชันมากกว่า การดูดซับและการคายซับของสารส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณความดันสัมพัทธ์เท่ากับ 0.5 บ่งบอกว่ารูพรุนมีลักษณะคล้ายหลอดแคปิลารีปลายเปิดทั้งสองด้าน มีรัศมีรูพรุนหลายขนาดแต่รัศมีทางเข้ารูพรุนมีขนาดเท่ากัน [34]

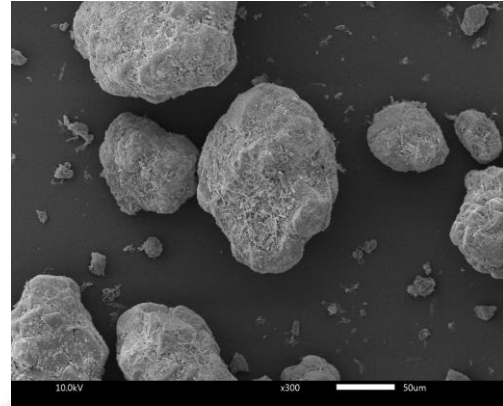
จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพื้นที่ผิวตัวดูดซับ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$ , ตัวดูดซับ  $\gamma-Al_2O_3$  และตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  พบว่า การอิมเพรกโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา จะช่วยให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น มีความเป็นรูพรุนที่สูงขึ้น พิจารณาจากค่าปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เกิดขึ้นเนื่องมาจากตัวรองรับแกมมาอลูมินาเป็นเมทริกซ์ที่มีพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนสูง เมื่อทำการอิมเพรกอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นโลหะกัมมันต์ลงไป ทำให้เกิดการกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงบนตัวรองรับ ส่งผลให้ตัวดูดซับที่มีตัวรองรับ มีพื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนที่สูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่มีตัวรองรับ นอกจากนี้ การเพิ่มตัวรองรับจะช่วยให้ตัวดูดซับมีความคงทนต่อการขัดถู (Abrasion resistance) ในการใช้งานภายใต้เครื่องปฏิกรณ์พลูอิไดซ์เบดเพิ่มขึ้นอีกด้วย [35]

#### 4.1.2. การศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนไมโครสโกปี (Scanning electron microscopy: SEM)

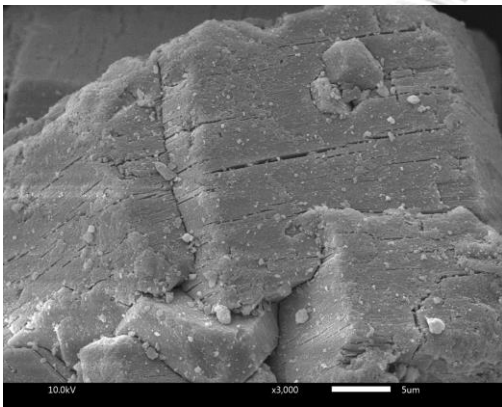
เมื่อนำตัวดูดซับ  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ก่อนการดูดซับมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยรูป 4.2 (ก) และ 4.2 (ข) แสดงภาพ SEM ของตัวดูดซับ  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่กำลังขยาย 300 เท่า และรูป 4.2 (ค), 4.2 (ง) และ 4.2 (จ) แสดงภาพ SEM ของตัวดูดซับ  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ที่กำลังขยาย 3000 เท่า ตามลำดับ เมื่อพิจารณาภาพ SEM ของตัวดูดซับ  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  เทียบกับ ตัวดูดซับ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  พบว่า มีอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตเกาะติดบนพื้นผิวของแกมมาอลูมินาจริง โดยสังเกตจากที่กำลังขยายต่ำ (รูป 4.2 (ก)) อนุภาคแกมมาอลูมินาจะมีความคมของเหลี่ยมและมุม และที่กำลังขยายสูง (รูป 4.2 (ค)) พื้นผิวของแกมมาอลูมินามีความเรียบ แต่เมื่อทำการอิมเพรกออนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงไป ภาพ SEM ที่กำลังขยายต่ำ (รูป 4.2 (ข)) พบว่า อนุภาค แกมมาอลูมินามีเหลี่ยมและมุมที่มีความคมน้อยลง เนื่องจากการชนกันของอนุภาคระหว่างขั้นตอนการเขย่าในการเตรียมตัวดูดซับ และที่กำลังขยายสูง (รูป 4.2 (ง)) จะสังเกตเห็นอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตยึดติดอยู่บนตัวรองรับแกมมาอลูมินาได้ชัดเจน สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Boonprasop และคณะ [26] จากในรูปจะพบว่าอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่เกาะบนตัวรองรับนั้นจะมีการรวมกลุ่มกันเล็กน้อย ไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด โดยอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตจะสังเกตได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 4.2 (จ) ซึ่งอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีลักษณะเป็นผลึกเส้นใยและอนุภาคแบบผลึกกลม เช่นเดียวกับกับงานวิจัยของ Zhao และคณะ [36] นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Zhao และคณะ ยังพบว่าผลึกโพแทสเซียมคาร์บอเนตแบบเส้นใยจะมีความว่องไวในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าอนุภาคผลึกกลม



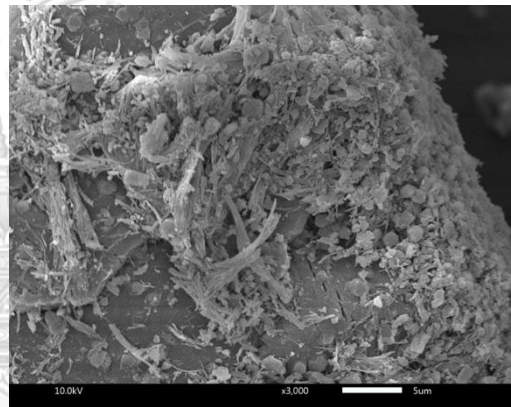
(ก)



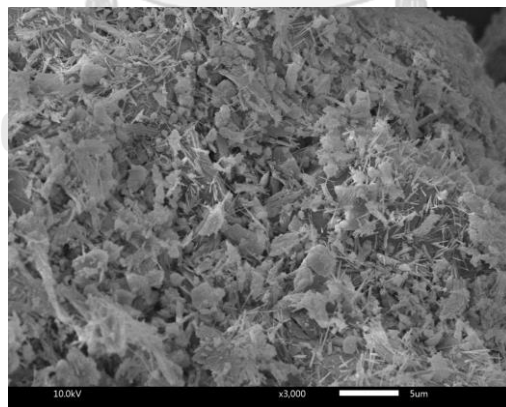
(ข)



(ค)



(ง)

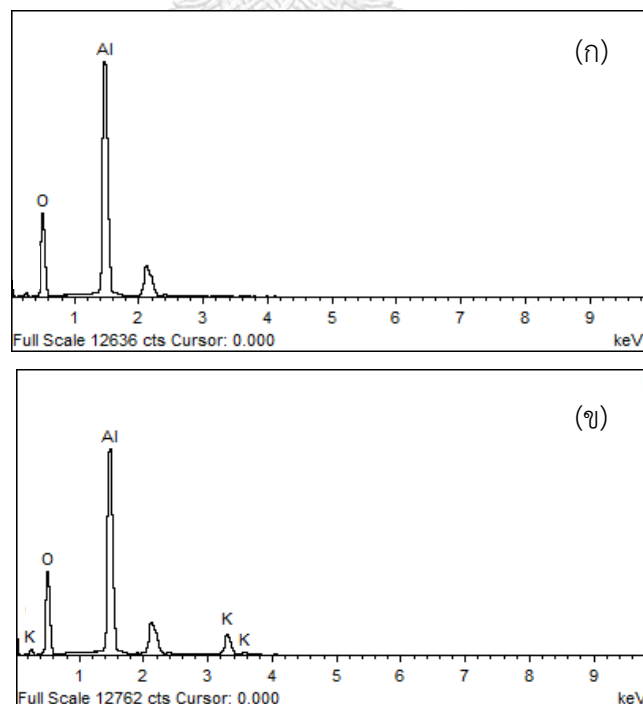


(จ)

รูปที่ 4.2 ภาพ SEM (ก)  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  กำลังขยาย 300 เท่า (ข)  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  กำลังขยาย 300 เท่า (ค)  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  กำลังขยาย 3000 เท่า (ง)  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  กำลังขยาย 3000 เท่า และ (จ)  $\text{K}_2\text{CO}_3$  กำลังขยาย 3000 เท่า

#### 4.1.3. การวิเคราะห์หาชนิดธาตุของตัวดูดซับด้วยเทคนิค Energy dispersive X-ray spectrometry (EDX)

จากการพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวดูดซับด้วยเทคนิค EDX เพื่อหาชนิดองค์ประกอบของธาตุแต่ละชนิดในตัวดูดซับ เพื่อเป็นการยืนยันว่าอนุภาคของโพแทสเซียมคาร์บอเนตเกาะติดบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาจริง ผล EDX จะแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยรูป 4.3 (ก) แสดงผลของตัวดูดซับ  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  และรูป 4.3 (ข) แสดงผลของตัวดูดซับ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  เมื่อพิจารณารูป 4.3 (ก) เทียบกับ 4.3 (ข) พบว่า ในสเปกตรัม EDX ของตัวดูดซับ  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  มีเพียงตำแหน่งพีคของธาตุอลูมิเนียมและออกซิเจน แต่ในสเปกตรัม EDX ของตัวดูดซับ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  นอกจากจะพบพีคธาตุอลูมิเนียมและออกซิเจนแล้วยังตรวจพบตำแหน่งพีคของธาตุโพแทสเซียมในตัวดูดซับอีกด้วย และในขั้นตอนการวิเคราะห์มีการใช้เทปคาร์บอนในการยึดสารตัวอย่างก่อนนำไปวิเคราะห์ ทำให้ปริมาณธาตุคาร์บอนที่ตรวจพบไม่ใช่เพียงธาตุคาร์บอนที่มาจากตัวดูดซับ ดังนั้นจึงไม่สามารถวัดปริมาณธาตุคาร์บอนที่แท้จริงที่มีในตัวดูดซับได้ จากข้อมูลดังกล่าวเป็นผลการวิเคราะห์เชิงคุณภาพที่สามารถยืนยันได้ว่ามีอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตติดอยู่บนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาจริง โดยปริมาณองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่พบในตัวดูดซับจะแสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 รูปแบบ EDX ของตัวดูดซับ (ก)  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (ข)  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$

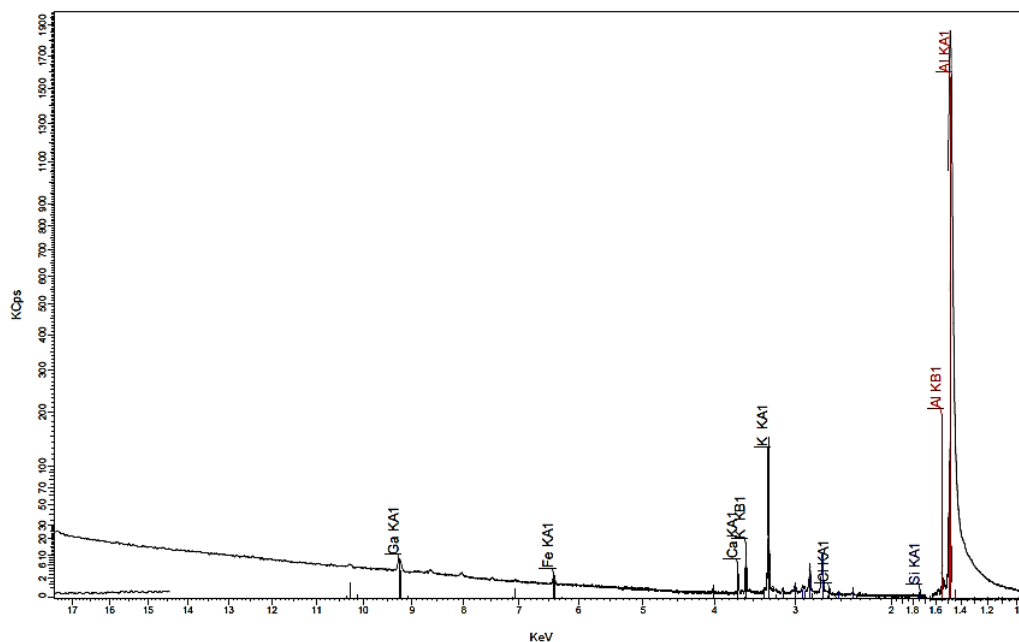


ตารางที่ 4.2 ข้อมูลองค์ประกอบธาตุที่พบในตัวดูดซับด้วยการเทคนิค EDX

ชนิดตัวดูดซับ	ชนิดธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละปริมาณธาตุ โดยน้ำหนัก (%)	ร้อยละปริมาณธาตุโดย จำนวนอะตอม (%)
$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O	48.80	56.19
	Al	51.20	43.81
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K	12.30	9.56
	Al	40.33	31.76
	O	47.37	58.68

#### 4.1.4 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณองค์ประกอบของธาตุของตัวดูดซับ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence: XRF)

จากการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณองค์ประกอบของธาตุในตัวดูดซับ K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ด้วยเทคนิค XRF จะแสดงผลสเปกตรัม XRF ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากผลสเปกตรัมของตัวดูดซับ K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ตรวจพบอะตอมของธาตุโพแทสเซียม (K) และ อลูมิเนียม (Al) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ ยังตรวจพบธาตุอื่นๆ (Ca, Fe, Si) เจือปนอยู่เล็กน้อย เนื่องจากเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ มีข้อจำกัดคือไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) น้อยกว่า 11 ได้ (H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne และ Na) ) ดังนั้นในผลสเปกตรัม XRF จึงตรวจไม่พบพีคของอะตอมคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) จากผลชนิดและปริมาณธาตุองค์ประกอบที่ได้ สามารถคำนวณปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อิมเพกกลงบนตัวดูดซับได้ปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRF ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$

#### 4.1.5 การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction: XRD)

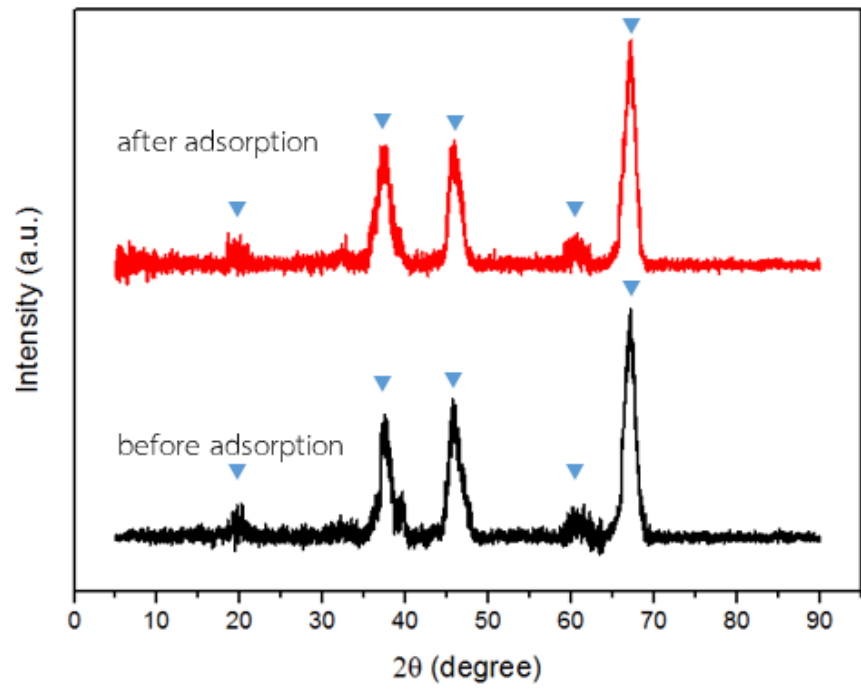
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับ ก่อนนำไปใช้งานและหลังใช้งานจะศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับ  $\gamma-Al_2O_3$ ,  $K_2CO_3$  และ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  แสดงด้วยสเปกตรัม XRD ดังรูปที่ 4.5 โดยรูป 4.5 (ก) แสดงผล XRD ของ  $\gamma-Al_2O_3$ , รูป 4.5 (ข) แสดงผล XRD ของ  $K_2CO_3$  และรูปที่ 4.5 (ค) แสดงผล XRD ของ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.5 (ก) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบสเปกตรัม XRD ของตัวดูดซับ  $\gamma-Al_2O_3$  ก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับจะพบว่า ตำแหน่งพีคที่เกิดขึ้นเกิดในตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด คือตัวดูดซับก่อนการใช้งานเกิดพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 19.9, 37.1, 45.9, 61.5 และ 67.2 และตัวดูดซับหลังการใช้งานเกิดพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 20.4, 37.3, 45.8, 60.7 และ 67.1 ซึ่งตำแหน่งพีคดังกล่าวเป็นตำแหน่งของวัฏภาค  $\gamma-Al_2O_3$  (JCPDS No.10-0425) [37] ดังนั้นจากผล XRD สามารถกล่าวได้ว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ  $\gamma-Al_2O_3$  ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของตัว

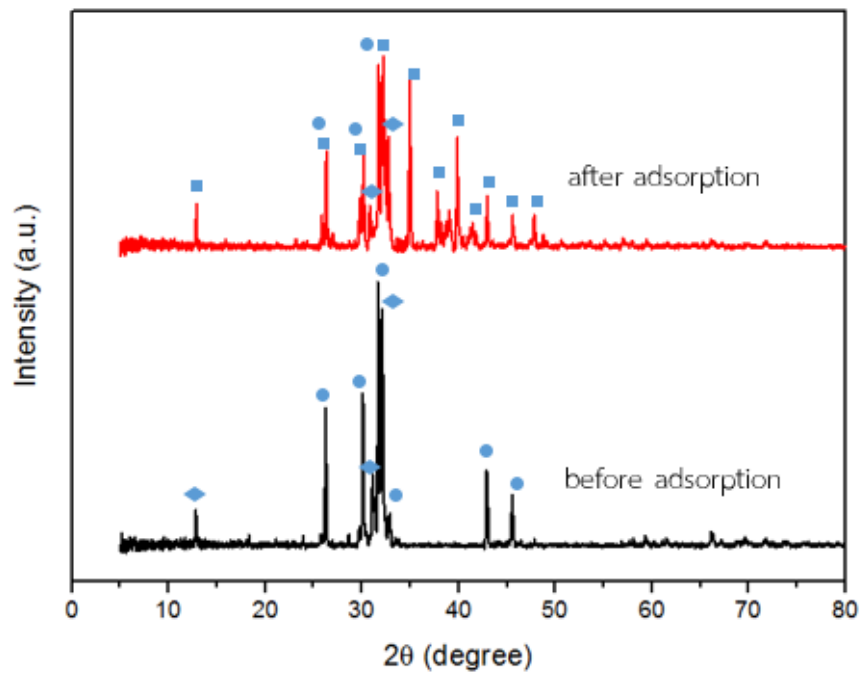
ดูดซับ เนื่องจาก  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นเพียงการดูดซับเชิงกายภาพด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ เท่านั้น

เมื่อพิจารณาผล XRD รูปที่ 4.5 (ข) แสดงสเปกตรัม XRD ของตัวดูดซับ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  ก่อนการดูดซับและหลังการดูดซับจะพบว่า ตำแหน่งพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน คือตัวดูดซับก่อนการใช้งานเกิดพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 12.8, 26.3, 30.2, 31.6, 32, 33, 43.1 และ 45.6 ซึ่งตำแหน่งพีคดังกล่าวเป็นตำแหน่งของวัฏภาค  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (JCPDS No. 71-1466) [38] และ  $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  (JCPDS No. 13-0470) [39] และตัวดูดซับหลังการใช้งานเกิดพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 12.8, 26.4, 30.8, 31, 32.1, 34.8, 37.8, 39, 40, 41.7, 43.1, 45.6 และ 47.8 ซึ่งตำแหน่งพีคดังกล่าวเป็นตำแหน่งของวัฏภาค  $\text{KHCO}_3$  (JCPDS No. 70-0095) [40],  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (JCPDS No. 71-1466) [38] และ  $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  (JCPDS No. 13-0470) [39] เนื่องจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตในภาวะที่มีน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งได้  $\text{KHCO}_3$  เป็นสารผลิตภัณฑ์จึงพบวัฏภาคของ  $\text{KHCO}_3$  ในตัวดูดซับหลังการใช้งาน

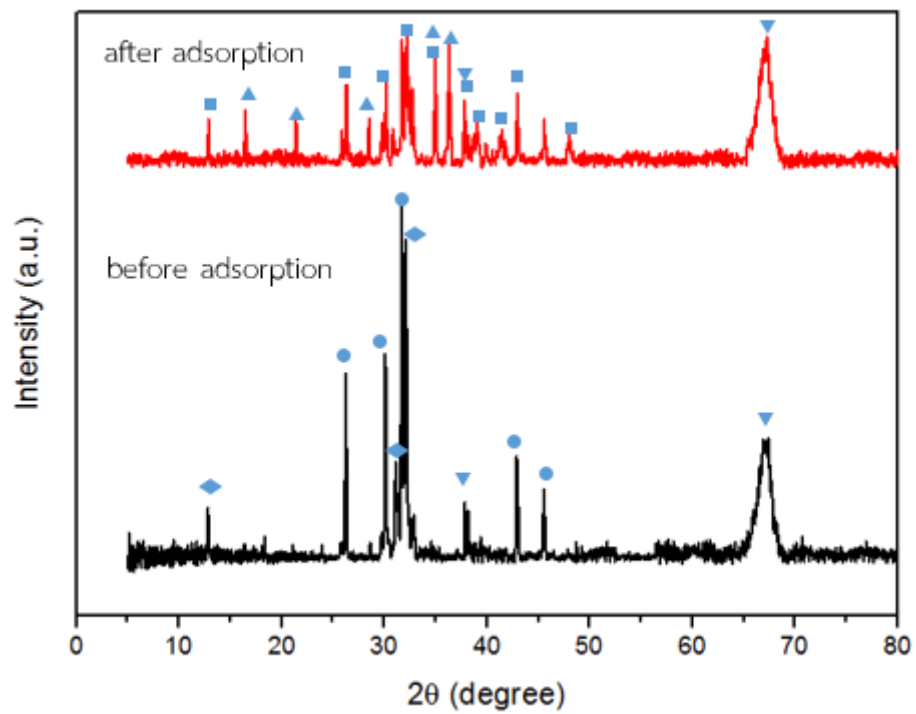
พิจารณาผล XRD ของตัวดูดซับ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  ในรูปที่ 4.5 (ค) พบว่าตัวดูดซับก่อนนำไปใช้งานและหลังใช้งานให้ตำแหน่งพีคที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับก่อนการใช้งานประกอบด้วย 3 วัฏภาค คือ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (JCPDS No. 71-1466) [38],  $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  (JCPDS No. 13-0470) [39] และ  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (JCPDS No.10-0425) [37] ซึ่งเกิดพีคที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 12.8, 26.1, 30, 31.1, 31.6, 32.1, 32.9, 38.2, 42.9, 45.6 และ 67.3 และตัวดูดซับหลังการใช้งานมี 3 วัฏภาค คือ  $\text{KHCO}_3$  (JCPDS No. 70-0095) [40] ซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต,  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (JCPDS No.10-0425) [37] และ  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  (JCPDS No.21-0979) [41] ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวรองรับแกมมาอลูมินาและโพแทสเซียมคาร์บอเนตในระหว่างการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์



(n)



(v)



(ค)

รูปที่ 4.5 XRD Pattern ก่อนและหลังกระบวนการดูดซับของตัวดูดซับต่างๆ (ก)  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ข)  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (ค)  $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยกำหนดสัญลักษณ์ต่างๆ แทนองค์ประกอบของสารแต่ละชนิด ดังต่อไปนี้

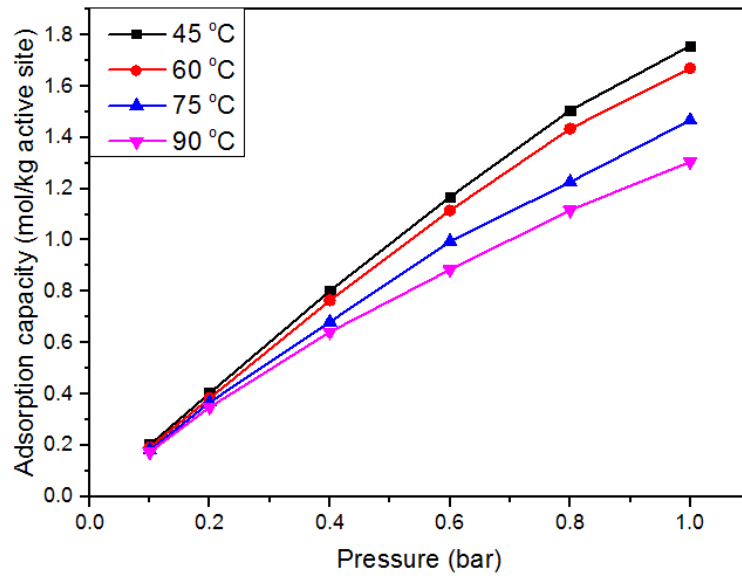
( ▼  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  , ●  $\text{K}_2\text{CO}_3$  , ◆  $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  , ■  $\text{KHCO}_3$  , ▲  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  )

#### 4.2 สมดุลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

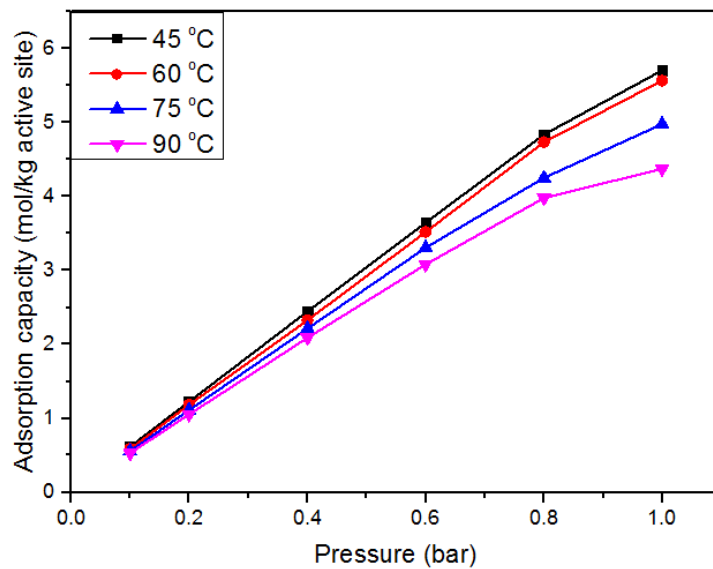
การศึกษาสมดุลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบและจำลองกระบวนการดูดซับ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาสมดุลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด รูปแบบการไหลเป็นแบบฟองแก๊ส ที่อุณหภูมิ 45, 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 บาร์ โดยเส้นไอโซเทิร์มการดูดซับจะเขียนขึ้นระหว่าง ค่าความสามารถในการดูดซับ และความดันที่สมดุล ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดย รูป 4.6 (ก) และ 4.6 (ข) ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปสมดุลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  (รูปที่ 4.6) พบว่าเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิการดูดซับเดียวกัน ค่าความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความดันเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่าความสามารถในการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณโมลของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มมากขึ้นตัวดูดซับจึงสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  พบว่าตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  จะสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงกว่าตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  โดยค่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  (ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์) มีค่าเท่ากับ 1.76 โมลต่อกิโลกรัมตัวดูดซับ และ 5.70 โมลต่อกิโลกรัมโพแทสเซียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากการอิมเพกต์ของโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงไปบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ทำให้ตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวและมีความพรุนที่สูง ซึ่งช่วยกระจายอนุภาคของโพแทสเซียมคาร์บอเนตไม่ให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน จึงเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ตัวรองรับแกมมาอลูมินายังมีค่าความสามารถในการกักเก็บน้ำ (Water retention capacity) ที่สูง จึงช่วยให้เกิดการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตจำเป็นต้องมีน้ำในการทำปฏิกิริยา [42] และเมื่อพิจารณาที่ความดันคงที่ พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยในตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ที่ความดันคงที่ 1 บาร์ อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการดูดซับมีค่าสูงมากที่สุดและมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปฏิกิริยาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิช่วง 50-60 องศาเซลเซียส แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิดูดซับเป็น 75 และ 90 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงอย่างชัดเจน ที่เป็นเช่นนี้

เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจึงเกิดการดูดซับได้น้อยลง [43]



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.6 ไอโซเทิร์มการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวดูดซับ (ก)  $K_2CO_3$  และ (ข)  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$

#### 4.3 การศึกษาแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ

ข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับเป็นข้อมูลที่ใช้ในการทำนายการดูดซับ ซึ่งมีความสำคัญและจำเป็นในกระบวนการออกแบบการดูดซับ ในงานวิจัยนี้ ศึกษาแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ 4 แบบจำลอง คือ แบบจำลองสมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm), แบบจำลองสมดุลการดูดซับของฟรุนดิช (Freundlich isotherm), แบบจำลองสมดุลการดูดซับของชิปส์ (Sips isotherm) และแบบจำลองสมดุลการดูดซับของทอธ (Toth isotherm) โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 30, 45, 60 และ 90 องศาเซลเซียส ความดัน 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 บาร์ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละไอโซเทิร์ม จะแสดงดังตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ( $R^2$ ) และค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมกับกระบวนการดูดซับในแต่ละแบบจำลอง พบว่า ข้อมูลสมดุลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองสมดุลการดูดซับของชิปส์มากที่สุด (ค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.9128-0.9916 และค่า Error ไม่เกิน 2.09 เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือ แบบจำลองของทอธ (ค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.8827-0.9341 และค่า Error ไม่เกิน 3.32 เปอร์เซ็นต์), ฟรุนดิช (ค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.9447-0.9832 และค่า Error ไม่เกิน 4.92 เปอร์เซ็นต์) และแบบจำลองของแลงเมียร์ (ค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.9173-0.9806 และค่า Error ไม่เกิน 5.16 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ แต่ละแบบจำลองมีสมมติฐานและมีคำอธิบายพฤติกรรมดูดซับที่แตกต่างกัน โดยแบบจำลองแลงเมียร์ อธิบายว่าการดูดซับที่พื้นผิวตัวดูดซับมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous surface) การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) และพลังงานหรือความร้อนในการดูดซับมีค่าคงที่ เท่ากันทุกตำแหน่งของการดูดซับที่อุณหภูมิกงที่ [17] ในขณะที่แบบจำลองฟรุนดิชใช้อธิบายการดูดซับที่เกิดบนตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวการดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption) และค่าความร้อนการดูดซับมีค่าไม่คงที่ในแต่ละตำแหน่งการดูดซับ [18] แบบจำลองชิปส์เป็นแบบจำลองลูกผสมโดยรวมแบบจำลองแลงเมียร์และแบบจำลองฟรุนดิชเข้าด้วยกัน กำหนดให้ค่า  $n$  จะอยู่ในช่วง  $0 < n < 1$  สำหรับแบบจำลองที่  $n$  มีค่าเท่ากับ 1 จะกลายเป็นแบบจำลองแลงเมียร์ [19] และแบบจำลองทอธเป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากแบบจำลองของแลงเมียร์ และสามารถใช้ได้ทั้งในระบบที่มีความดันต่ำและความดันสูง [20] จากข้อมูลในงานวิจัยนี้ พบว่าค่า  $n$  ในงานวิจัยอยู่ในช่วง 0.87-0.97 สำหรับค่า  $n$  ที่ได้จากแบบจำลองชิปส์ต่ำกว่า 1 บ่งบอกว่า ระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ  $K_2CO_3/V-Al_2O_3$  เกิดขึ้นในตัวดูดซับที่มีพื้นผิวแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากจากการอิมเพรก

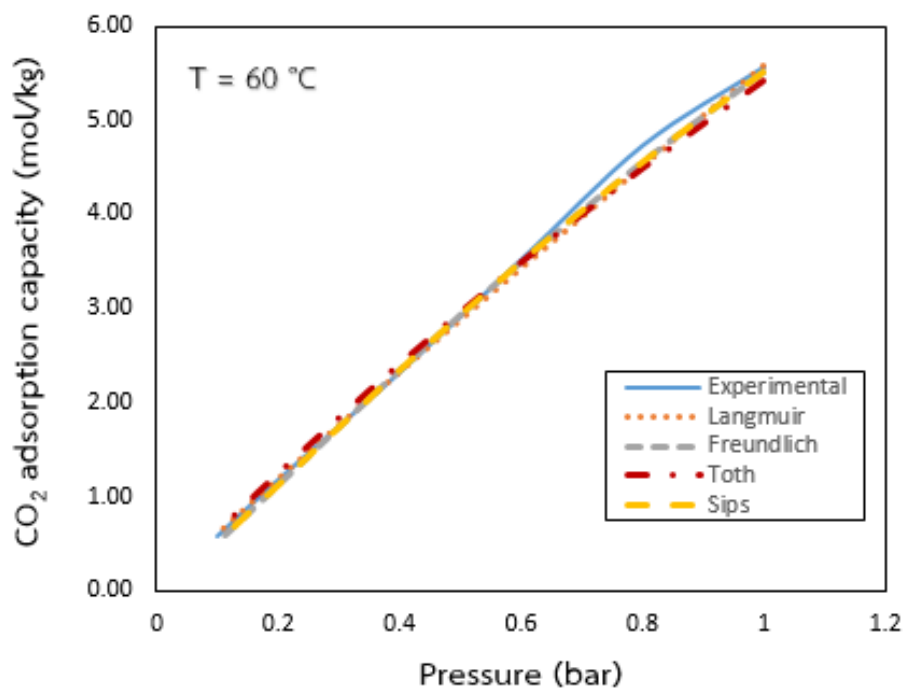
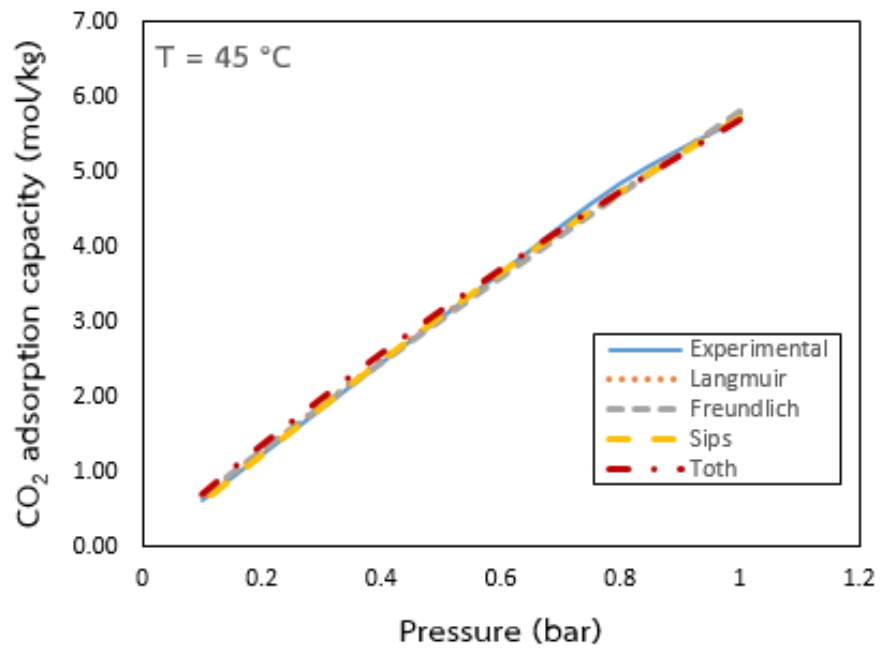


โลหะกัมมันต์  $K_2CO_3$  ลงบนตัวรองรับ  $\gamma-Al_2O_3$  นอกจากนี้ การที่เกิดการดูดซับทั้งสองแบบบนพื้นผิวที่แตกต่างกันโดยเกิดการดูดซับเชิงเคมีในพื้นที่ผิวบริเวณที่มีตำแหน่งของโลหะกัมมันต์  $K_2CO_3$  และเกิดการดูดซับเชิงกายภาพบนพื้นผิวส่วนที่เป็นตัวรองรับ  $\gamma-Al_2O_3$  ซึ่งระบบการดูดซับแบบนี้จะไม่สอดคล้องและไม่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของแลงก์เมียร์ แต่พฤติกรรมการดูดซับแบบนี้สามารถอธิบายได้อย่างแม่นยำด้วยแบบจำลองของซิปส์ โดยแสดงกราฟข้อมูลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลจากแบบจำลองในรูปที่ 4.7

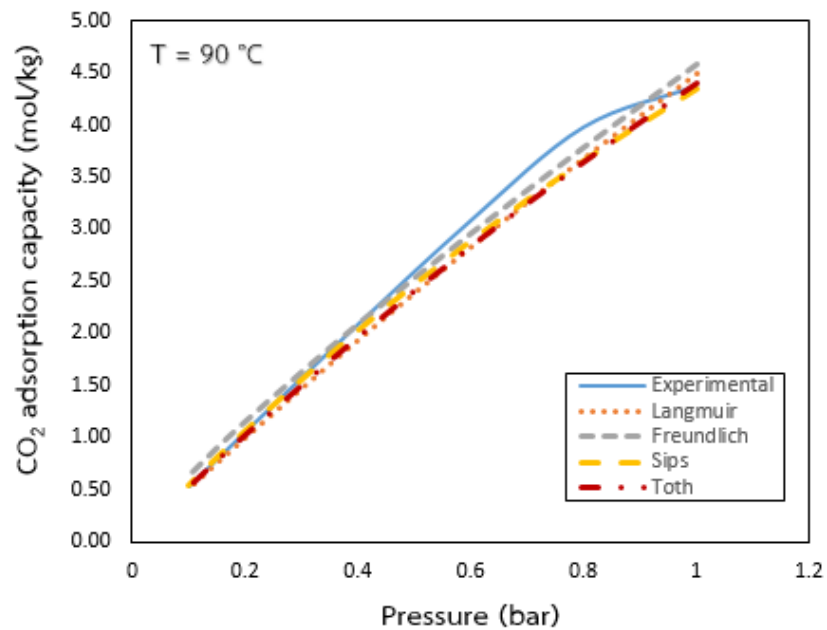
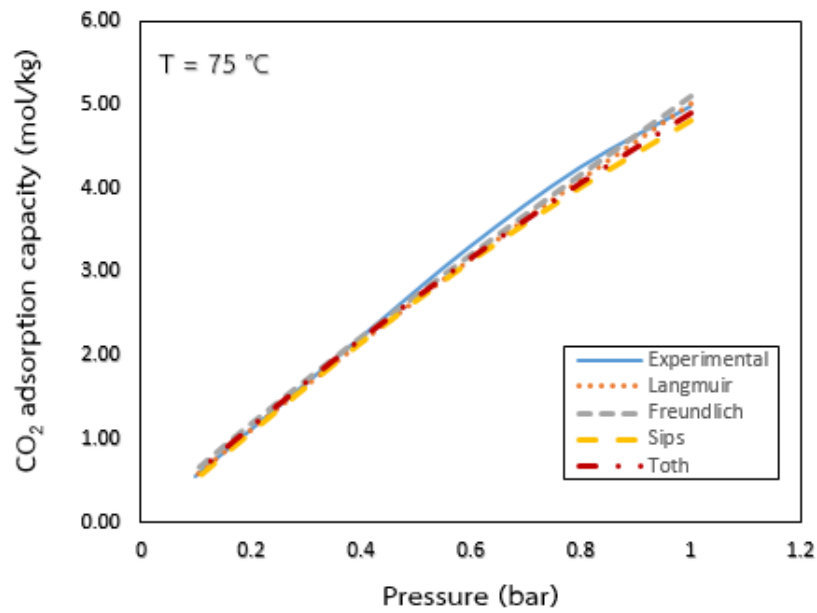


ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากแบบจำลองไอโซเทอรั่มการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	45	60	75	90
Langmuir				
$q_m$ (mol kg <sup>-1</sup> )	49.82	45.66	41.32	37.75
B (bar <sup>-1</sup> )	0.131	0.140	0.137	0.128
R <sup>2</sup>	0.9806	0.9775	0.9748	0.9173
Err (%)	1.32	2.14	1.34	5.16
Freundlich				
$K_F$ (mol kg <sup>-1</sup> bar <sup>-1/n</sup> )	5.81	5.57	5.09	4.58
n	1.06	1.05	1.10	1.17
R <sup>2</sup>	0.9832	0.9447	0.9742	0.9525
Err (%)	1.81	1.67	2.90	4.92
Sips				
$q_m$ (mol kg <sup>-1</sup> )	21.99	19.67	17.11	16.14
B (bar <sup>-1</sup> )	0.390	0.445	0.423	0.381
n	0.90	0.87	0.92	0.97
R <sup>2</sup>	0.9909	0.9916	0.9193	0.9128
Err (%)	1.40	2.01	1.87	2.09
Toth				
$q_m$ (mol kg <sup>-1</sup> )	33.81	33.43	27.83	26.83
B (bar <sup>-1</sup> )	0.210	0.196	0.215	0.198
n	0.94	0.97	0.99	0.98
R <sup>2</sup>	0.9341	0.8828	0.9208	0.9201
Err (%)	3.32	2.68	1.70	3.20



(8)

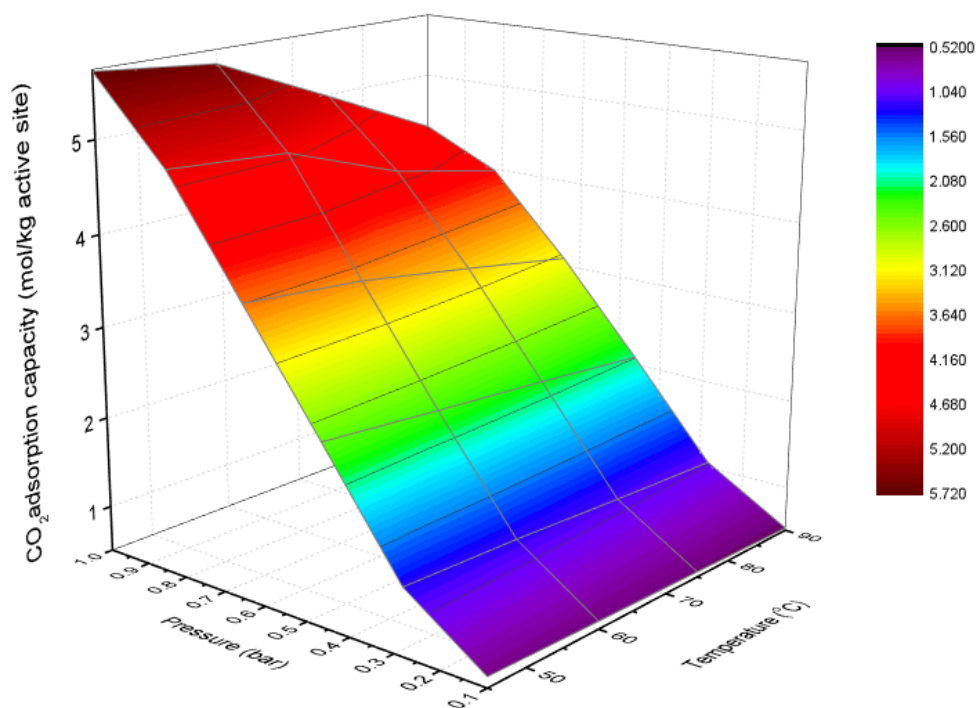


(ง)

รูปที่ 4.7 แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ที่ได้จากการทดลองที่ความดันต่างๆ เทียบกับค่าจากแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ (ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส, (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, (ค) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และ (ง) อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

#### 4.4 การหาภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะสมดุล

เมื่อนำสมการแบบจำลองของชิปส์มาใช้ในการคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ซึ่งแสดงพื้นผิวตอบสนองของความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ความดันและอุณหภูมิในระบบต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.8 จากรูปพบว่า เมื่อต้องการให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง ๆ จะต้องดำเนินการในระบบที่ความดันสูง และอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่ความดันสูง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีจำนวนโมลที่สูงขึ้นจึงเกิดการดูดซับได้ดี และกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อนจึงเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ยังพบข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการฟื้นฟูตัวดูดซับด้วยการลดความดันโดยทั่วไปเมื่อทำการฟื้นฟูตัวดูดซับที่ความดันปกติ (ความดันบรรยากาศ) การฟื้นฟูตัวดูดซับจะต้องใช้อุณหภูมิที่สูง โดยในตัวดูดซับ  $K_2CO_3/V-Al_2O_3$  จะต้องใช้อุณหภูมิฟื้นฟูสูงถึง 300-350 องศาเซลเซียส แต่การทำการฟื้นฟูตัวดูดซับในระบบที่มีความดันสุญญากาศจะสามารถฟื้นฟูตัวดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิต่ำลง โดยใช้อุณหภูมิในการฟื้นฟูเพียงแค่ 45-90 องศาเซลเซียส

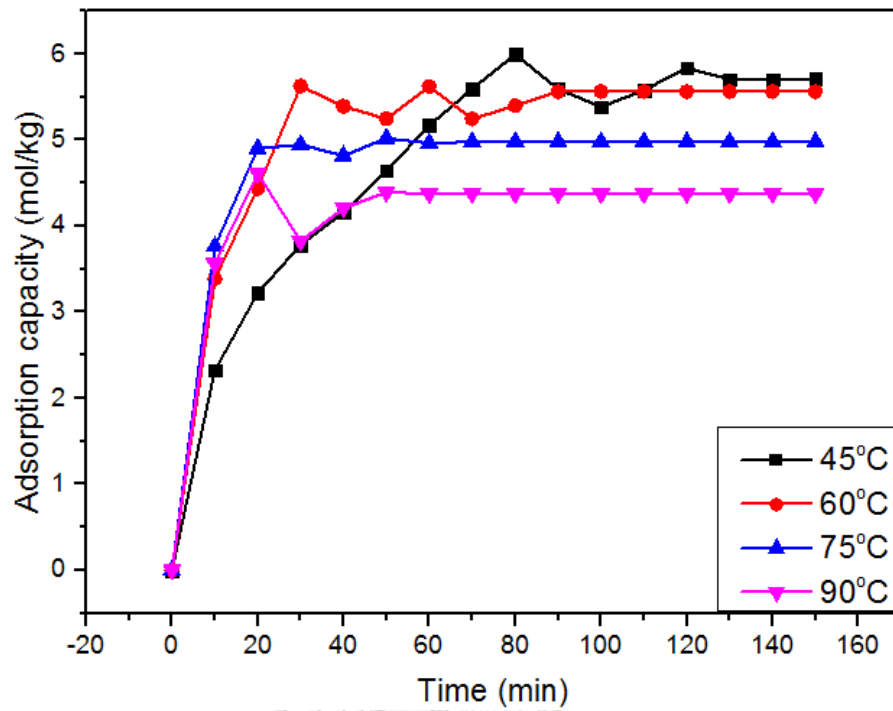


รูปที่ 4.8 แสดงพื้นผิวตอบสนองของความสามารถในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุล เมื่อความดันและอุณหภูมิในระบบต่างกัน

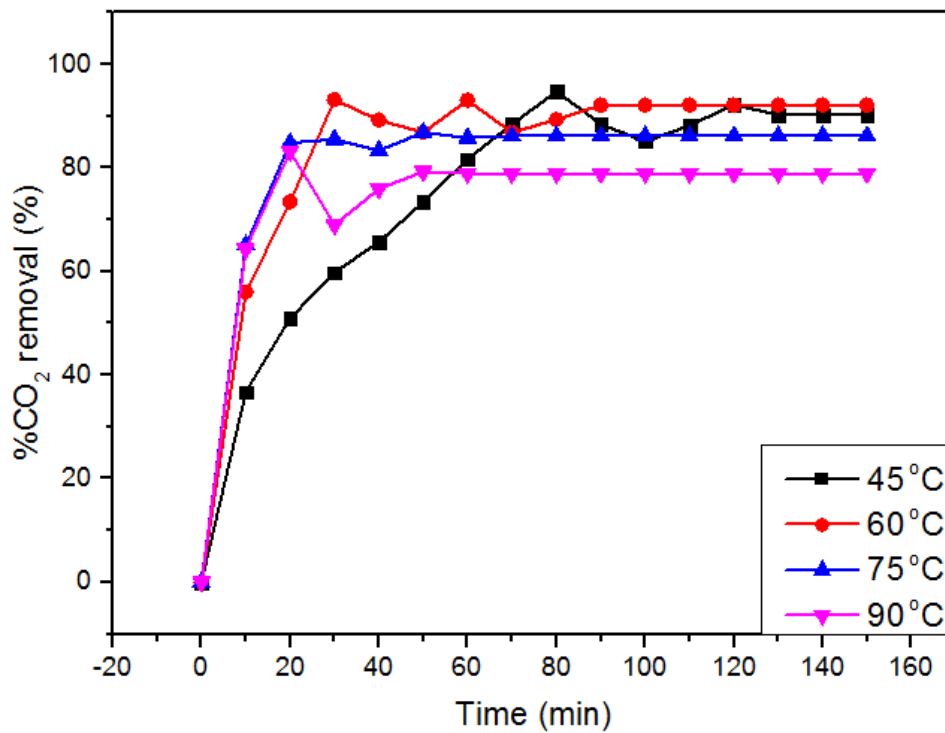
#### 4. 5 การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับ  $K_2CO_3/V-Al_2O_3$  ทำการศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ดำเนินการภายใต้รูปแบบการไหลแบบพองแก๊ส ที่อุณหภูมิ 45, 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 1 บาร์ โดยจะแสดงข้อมูลความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ และร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (%  $CO_2$  removal) ที่เวลาต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และ ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่างๆ (รูปที่ 4.9 และ 4.10) พบว่าค่าความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นในทุกๆ อุณหภูมิ จนกระทั่งเข้าสู่สมมูลค่าความสามารถในการดูดซับจึงคงที่ แต่ในทางตรงกันข้าม ค่าความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการดูดซับเพิ่มมากขึ้น โดยค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถกำจัดได้ถึงประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ภายในเวลา 150 และ 90 นาที เมื่อใช้อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 45 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับเป็น 75 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดต่ำลงเหลือเพียง 85 และ 78 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 70 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ การลดลงของค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน และปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ ดังนั้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้สมดุลปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนทิศทางเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีพลังงานจลน์สูงขึ้นและเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น ทำให้มีโอกาสที่โมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะสัมผัสกับอนุภาคตัวดูดซับมากขึ้น จึงเกิดการดูดซับได้อย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากความชันของกราฟความสามารถในการดูดซับที่เวลาต่าง ๆ (รูปที่ 4.9) และกราฟร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ (รูปที่ 4.10) ที่อุณหภูมิสูงกราฟจะมีความชันมากกว่า บ่งบอกว่าเกิดการดูดซับที่รวดเร็วกว่า โดยการดูดซับที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส จะเข้าสู่สมมูลที่เวลา 150 นาที, และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 60, 75 และ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการเข้าสู่สมมูลจะรวดเร็วขึ้นเป็น 90 นาที, 70 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3/V-Al_2O_3$  ที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 4.10 ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3/V-Al_2O_3$  ที่เวลาต่างๆ

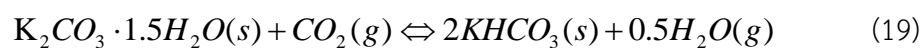
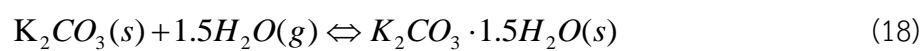
#### 4.6 การศึกษาแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับ

ข้อมูลจลนศาสตร์การดูดซับ เป็นข้อมูลที่ทำให้ทราบถึงอัตราการดูดซับ กลไกการดูดซับ ซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยแบบจำลองจลนศาสตร์ที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้มี 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order), แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami model) โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 30, 45, 60 และ 90 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ, ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ( $R^2$ ) และค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของแต่ละแบบจำลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าคงที่ทางจลนศาสตร์ของแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิการดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้คือค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate constant) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะค่า  $k$  เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ( $R^2$ ) และค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมกับกระบวนการดูดซับในแต่ละแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองของอาฟรามิให้ค่า  $R^2$  ที่สูงที่สุด Error ที่ต่ำที่สุด (ค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.9709-0.9934 และค่า Error ไม่เกิน 2.58 เปอร์เซ็นต์) บ่งบอกว่าข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองอาฟรามิ มีความสอดคล้องกับการทดลองมากที่สุด รองลงมาคือแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (ค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.9651-0.9872 และค่า Error ไม่เกิน 2.70 เปอร์เซ็นต์) และ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (ค่า  $R^2$  อยู่ในช่วง 0.8950-0.9946 และค่า Error ไม่เกิน 3.00 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ ในแต่ละแบบจำลองจะมีสมมติฐานการดูดซับและวิธีอธิบายกลไกการดูดซับที่แตกต่างกัน โดยในแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม จะมีขั้นตอนการแพร่ของแก๊สเข้าไปในตัวดูดซับหรือเป็นการเกิดการดูดซับเชิงกายภาพ [21] เป็นขั้นตอนการกำหนดปฏิกิริยา (Rate limiting step) แต่สำหรับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมจะมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนการกำหนดอัตรา ซึ่งเป็นการบ่งบอกกระบวนการดูดซับเชิงเคมี [22] และในแบบจำลองของอาฟรามิจะใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่มีความซับซ้อนซึ่งอาจเกิดจากระบบที่เกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไกหรือเกิดปฏิกิริยาหลายขั้นตอน [23] โดยอธิบายได้จากค่าคงที่ของอาฟรามิ  $n_a$  โดยปกติค่าคงที่อาฟรามิจะมีค่าอยู่ในช่วง 1-4 ซึ่งในงานวิจัยนี้ พบว่าค่าคงที่อาฟรามิ มีค่ามากกว่า 1 ในทุก ๆ อุณหภูมิ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นในการทดลองนี้มีความซับซ้อนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยานอกจากนี้ยังเกิดการดูดซับเชิงกายภาพและเชิงเคมีไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาการ

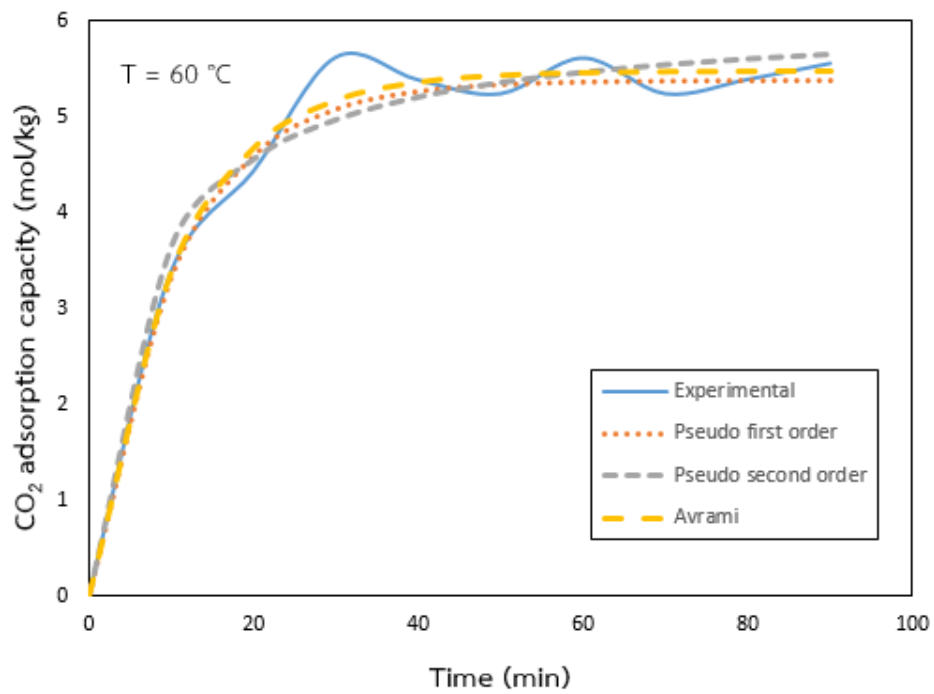
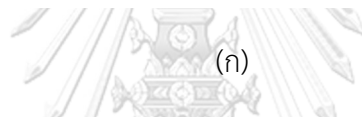
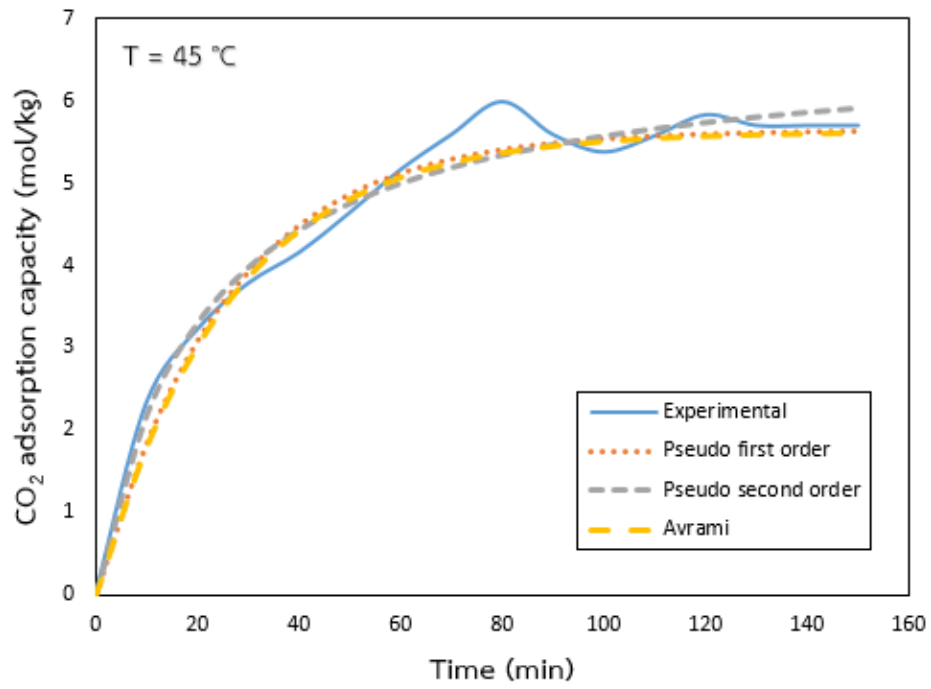


จุดซึบคาร์บอนไดออกไซด์จะแสดงในสมการที่ 18 และ 19 นอกจากนี้กราฟข้อมูลที่ได้จากการทดลอง และข้อมูลจากแบบจำลองแสดงในรูปที่ 4.11

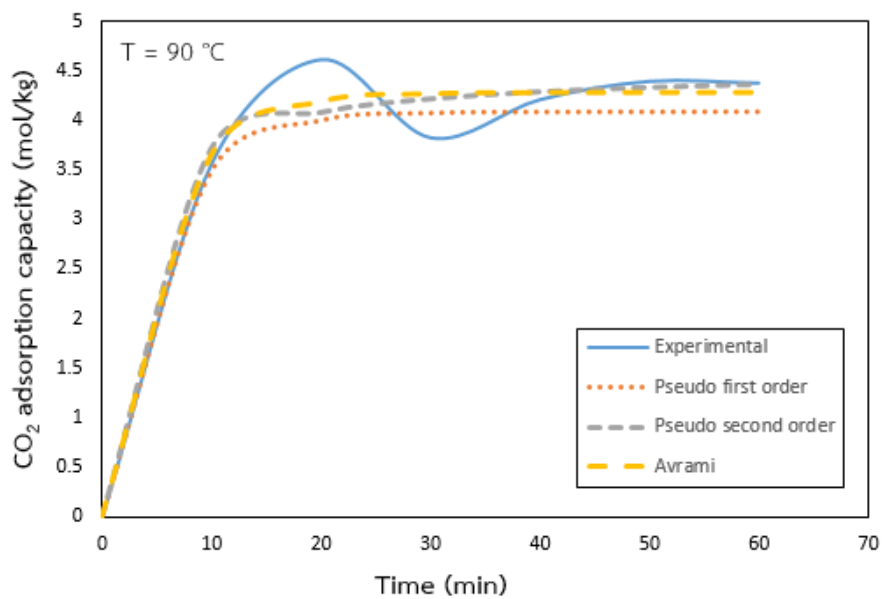
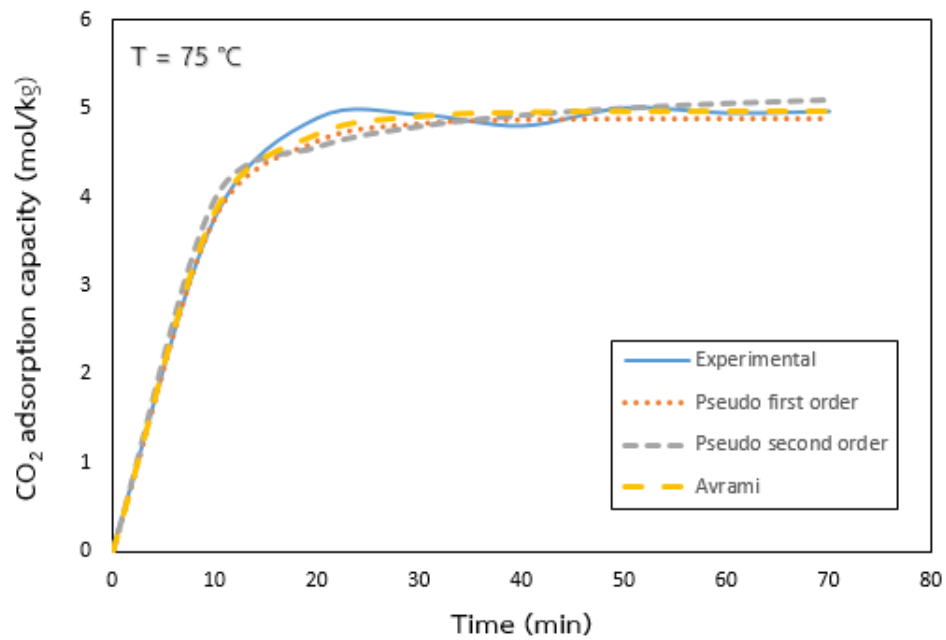


ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากแบบจำลองจลนศาสตร์การดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	45	60	75	90
$q_{e,exp}$	5.71	5.56	4.98	4.38
Pseudo first order				
$q_e$ (mol.kg <sup>-1</sup> )	5.65	5.38	4.88	4.09
$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	0.040	0.096	0.147	0.192
$R^2$	0.9946	0.9491	0.9565	0.8950
Err (%)	1.76	1.39	1.04	3.00
Pseudo second order				
$q_e$ (mol.kg <sup>-1</sup> )	6.75	6.06	5.34	4.51
$k_2$ (kg.mol <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> )	0.007	0.025	0.055	0.103
$R^2$	0.9786	0.9651	0.9872	0.9691
Err (%)	1.24	1.85	2.80	2.70
Avrami				
$q_e$ (mol.kg <sup>-1</sup> )	5.60	5.48	4.98	4.29
$k_a$ (min <sup>-1</sup> )	0.022	0.038	0.090	0.150
$n_a$	1.72	2.54	1.63	1.29
$R^2$	0.9892	0.9821	0.9934	0.9709
Err (%)	1.86	1.31	0.77	2.58



(9)



(ง)

รูปที่ 4.11 แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ที่

ได้จากการทดลองที่เวลาต่างๆ เทียบกับค่าจากแบบจำลองจลนศาสตร์ที่อุณหภูมิต่างๆ

(ก) อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส, (ข) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส, (ค) อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

และ (ง) อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

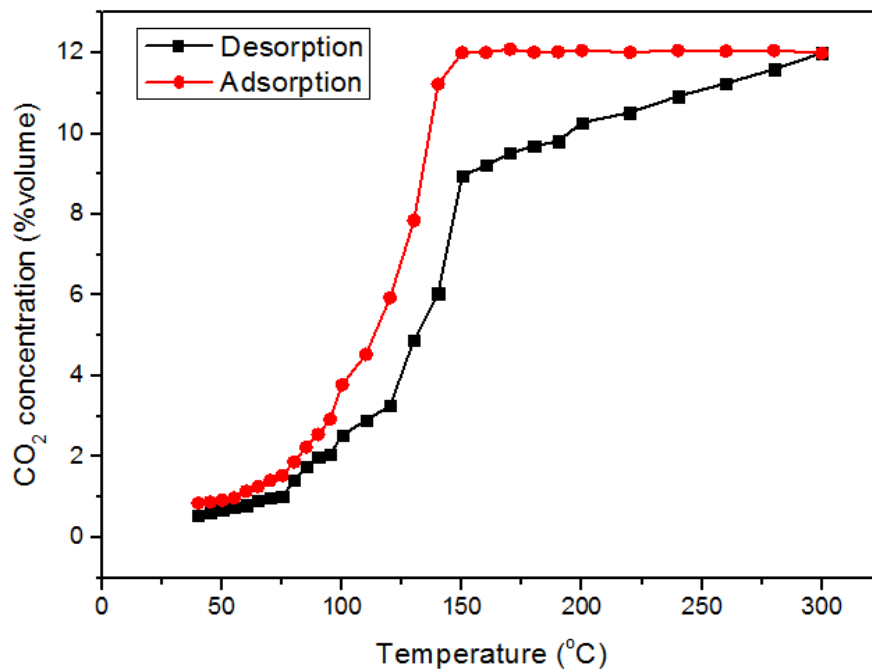
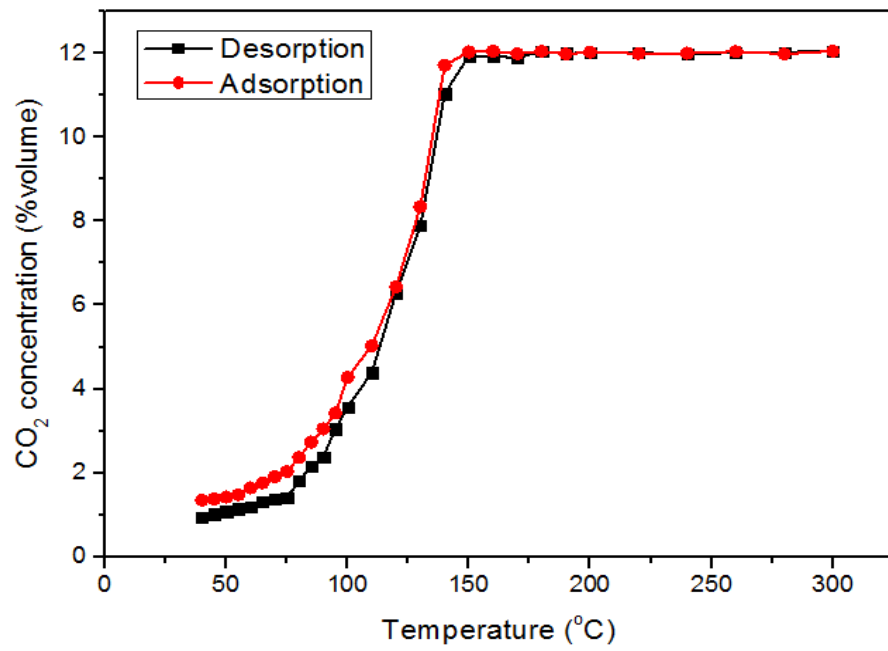
#### 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมการดูดซับและคายซับ

การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 45-300 องศาเซลเซียส ในภาวะสมดุลของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และ  $K_2CO_3/V-Al_2O_3$  ภายใต้รูปแบบการไหล ฟลูอิดไอเซนแบบพองแก๊ส ความดันเริ่มต้น 1 บาร์ ของแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ 12 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร, ไอน้ำ 18 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในสมดุลแก๊สไนโตรเจน แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยรูป 4.12 (ก) แสดงการดูดซับและการคายซับของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และ 4.12 (ข) แสดงการดูดซับและการคายซับของตัวดูดซับ  $K_2CO_3/V-Al_2O_3$  ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.12 (ก) แสดงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อตัวดูดซับคือ  $K_2CO_3$  จากกราฟเมื่อพิจารณาเส้นกราฟการคายซับ (เพิ่มอุณหภูมิจาก 45-300 องศาเซลเซียส) พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบจะเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง กล่าวคือ ในช่วงแรก อุณหภูมิเท่ากับ 45-90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นจาก 1.02 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็น 2.38 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจึงเกิดขึ้นได้น้อยลง เมื่อพิจารณาในช่วงที่สอง อุณหภูมิเท่ากับ 100-150 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจนถึง 12 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งเป็นความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือตัวดูดซับเกิดการคายซับโดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส องค์ประกอบในตัวดูดซับที่สลายตัวออกมาเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ คือ ไอน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับเฟสที่พบในการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ในหัวข้อที่ 4.1.5 และในช่วงสุดท้าย ตั้งแต่อุณหภูมิ 160-300 องศาเซลเซียส ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าคงที่ เนื่องจากตัวดูดซับเกิดการคายซับอย่างสมบูรณ์แล้วจึงไม่มีองค์ประกอบใดสลายตัวออกมา เมื่อพิจารณาเส้นกราฟการดูดซับ (การลดอุณหภูมิจาก 300-45 องศาเซลเซียส) พบว่า ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบจะคงที่ เท่ากับ 12 เปอร์เซ็นต์ จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงประมาณ 130 องศาเซลเซียส จึงเริ่มเกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้ง โดยการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นได้สูงเมื่ออุณหภูมิต่ำลง

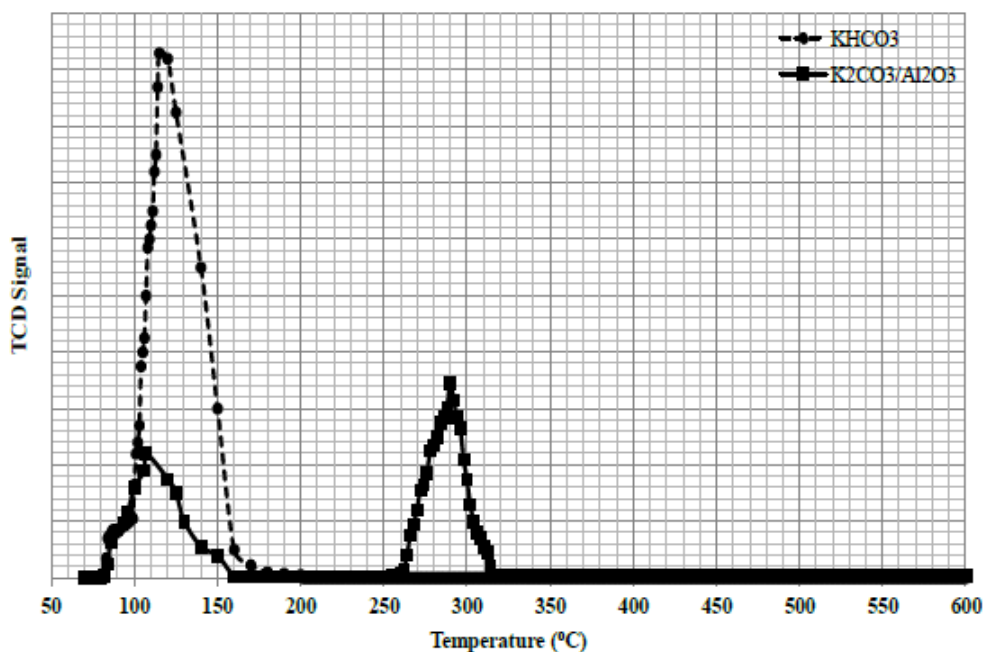
รูปที่ 4.12 (ข) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  จากกราฟเมื่อพิจารณาเส้นกราฟการคายซับ (เพิ่มอุณหภูมิจาก 45-300 องศาเซลเซียส) พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบจะเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์จะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้ ในช่วงแรก อุณหภูมิเท่ากับ 45-90 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นจาก 0.62 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็น 1.99 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจึงเกิดขึ้นได้น้อยลง เมื่อพิจารณาในช่วงที่สอง อุณหภูมิเท่ากับ 100-150 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 2.54 ถึง 9.21 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ช่วงนี้เกิดจากการสลายตัวของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดในกระบวนการดูดซับ กล่าวคือในช่วงนี้จะเกิดการปลดปล่อยของไอน้ำบริเวณผิวหน้า รูพรุน คาร์บอนไดออกไซด์ และโพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ตามลำดับ และในช่วงสุดท้าย ตั้งแต่อุณหภูมิ 160-300 องศาเซลเซียส ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึง 12 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยในช่วงอุณหภูมิประมาณ 160-220 องศาเซลเซียส แสดงถึงการปลดปล่อยของไอน้ำที่เกาะอยู่ในรูพรุนของตัวรองรับ และที่อุณหภูมิประมาณ 280-300 องศาเซลเซียส แสดงการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อน  $KAl(CO_3)_2(OH)_2$  สารดังกล่าวเป็นสารผลิตภัณฑ์ร่วมที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวรองรับ  $\gamma-Al_2O_3$  กับ  $K_2CO_3$  ในกระบวนการดูดซับ โดยสารนี้จะสลายตัวที่อุณหภูมิสูง ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับเฟสที่พบในการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRD ในหัวข้อที่ 4.1.5

นอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ ตัวดูดซับ  $KHCO_3$  และตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ที่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ด้วยเทคนิค Temperature Programmed Desorption (TPD) ในงานวิจัยของ Jaiboon และคณะ [44] (แสดงในรูปที่ 4.13) พบว่า การสลายตัวของโพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตจะเกิดขึ้น ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 80-150 องศาเซลเซียส และในตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  พบการสลายตัวสองช่วง โดยในช่วงแรกที่อุณหภูมิ 80-150 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนต และที่อุณหภูมิสูง 250-320 องศาเซลเซียสเป็นการสลายตัวของสารประกอบเชิงซ้อน  $KAl(CO_3)_2(OH)_2$



(b)

รูปที่ 4.12 ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวดูดซับ (ก)  $K_2CO_3$  และ (ข)  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$



รูปที่ 4.13 ผล TPD ของตัวดูดซับ  $KHCO_3$  และตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ที่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส [44]

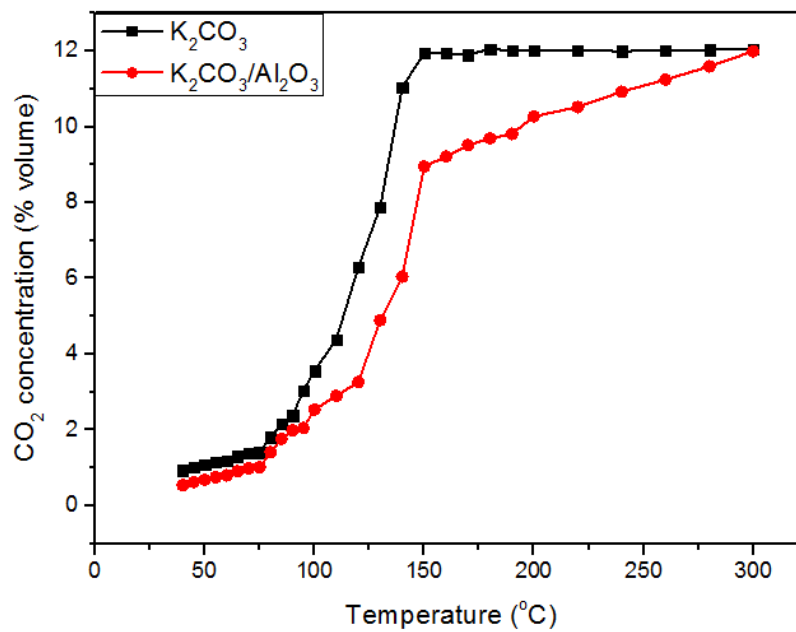
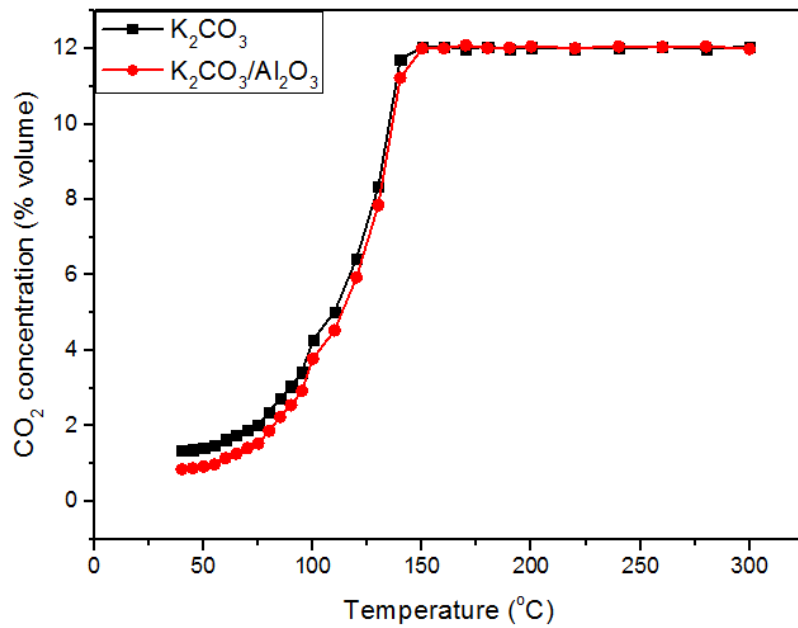
เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ภายใต้รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊ส ความดันเริ่มต้น 1 บาร์ ของแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ 12 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร, ไอน้ำ 18 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในสมดุลไนโตรเจน แสดงดังรูปที่ 4.14 โดย รูป 4.14 (ก) แสดงพฤติกรรมการดูดซับ และ 4.14 (ข) แสดงพฤติกรรมการคายซับของตัวดูดซับ

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  (ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ก)) พิจารณากราฟจากที่อุณหภูมิสูงมาอุณหภูมิต่ำ พบว่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเดียวกันทั้งสองตัวดูดซับ กล่าวคือ การดูดซับจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  เกิดการดูดซับได้ดีกว่า มีความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  (สังเกตจากค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบมีค่าต่ำกว่า) เนื่องจาก



การอิมเพรก  $K_2CO_3$  ลงบนตัวรองรับ  $\gamma-Al_2O_3$  ความพรุนของตัวรองรับจะช่วยให้มีการกระจายตัวของตำแหน่งกัมมันต์ ลดการรวมตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนต ซึ่งจะทำให้สูญเสียตำแหน่งกัมมันต์ในการทำปฏิกิริยา นอกจากนี้ตัวรองรับแกมมาอลูมินายังสามารถกักเก็บน้ำได้ดี จึงช่วยให้เกิดการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.14 (ข) แสดงการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  พบว่า การคายซับของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  จะเกิดอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  เนื่องจากการพ่นฟูตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  เกิดการสลายตัวของ ไอ่น้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์ และโพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต เท่านั้น ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้เกิดการสลายตัวโดยสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส แต่กรณีของการพ่นฟูตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่มีตัวรองรับอลูมินาก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน  $KAl(CO_3)_2(OH)_2$  [44] ซึ่งเป็นที่สารค่อนข้างเสถียร สลายตัวยาก และต้องใช้อุณหภูมิการสลายตัวที่สูงขึ้นนอกจากนี้การเพิ่มตัวรองรับทำให้น้ำที่อยู่ในรูพรุนของตัวรองรับแกมมาอลูมินา จะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่าน้ำที่อยู่บนพื้นผิวตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ไม่มีความพรุน



(ข)

รูปที่ 4.14 ค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวดูดซับ K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> และ K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ในขั้นตอน (ก) การดูดซับ และ (ข) การคายซับ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาสมดุลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ตัวดูดซับ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  และตัวดูดซับ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  พบว่าตัวดูดซับ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  มีศักยภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่สุดเนื่องจากการอิมเพรอกนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นส่วนที่่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมีลงบนตัวรองรับที่มีความพรุนสูงอย่างแกมมาอลูมินาจะช่วยให้อนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนต กระจายตัวได้ดี ไม่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน จึงเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ตัวรองรับแกมมาอลูมินามีความสามารถในการกักเก็บน้ำจึงช่วยให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้ดีขึ้น ค่าความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะว่าการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจึงเกิดการดูดซับได้น้อยลง ค่าความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปริมาตรมีค่าเพิ่มมากขึ้นตัวดูดซับจึงสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้น สำหรับภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  คือที่ความดัน 1 บาร์ อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับและจลนศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  จากการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับโดยใช้แบบจำลองสมดุลการดูดซับ 4 แบบจำลอง คือ แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir isotherm), แบบจำลองฟรุนดิช (Freundlich isotherm), แบบจำลองซิปส์ (Sips isotherm) และแบบจำลองทอธ (Toth isotherm) พบว่า แบบจำลองของซิปส์มีความสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด ซึ่งแบบจำลองซิปส์อธิบายถึงกระบวนการดูดซับที่การดูดซับเกิดบนตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวการดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous surface) กล่าวคือ เกิดการดูดซับทั้งสองแบบบนพื้นผิวตัวดูดซับที่แตกต่างกันโดยเกิดการดูดซับเชิงเคมี (Chemisorption) ในพื้นที่ผิวบริเวณที่มีตำแหน่งของโลหะกัมมันต์  $\text{K}_2\text{CO}_3$  และเกิดการดูดซับเชิงกายภาพ (Physisorption) บนพื้นผิวส่วนที่เป็นตัวรองรับ  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  การศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้แบบจำลอง 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order), แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order) และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's model) พบว่า แบบจำลองของ

อาฟรามีเป็นแบบจำลองที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด โดยแบบจำลองของอาฟรามือธิบายกลไกการดูดซับที่มีความซับซ้อนอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีที่มีมากกว่า 1 ขั้นตอน รวมถึงระบบการดูดซับที่มีทั้งการดูดซับเชิงกายภาพ และการดูดซับเชิงเคมี ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับ

การศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับและการคายซับของตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  พบว่า ตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  มีรูปแบบพฤติกรรมของการดูดซับและการคายซับที่แตกต่างกัน โดยในกระบวนการดูดซับทั้งตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  สามารถเกิดการดูดซับได้ดีที่อุณหภูมิ 45-90 องศาเซลเซียส และจะเกิดการดูดซับได้ลดลงที่อุณหภูมิสูงขึ้น และในกระบวนการฟื้นฟูสภาพ พบว่าตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  และตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  เกิดช่วงการสลายตัวที่แตกต่างกันเนื่องจากองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันและความแตกต่างทางสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ โดยในตัวดูดซับ  $K_2CO_3$  เกิดการสลายตัวเพียงช่วงเดียวที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 150 องศาเซลเซียส มีการสลายตัวของไอน้ำ, คาร์บอนไดออกไซด์ และโพแทสเซียมคาร์บอเนต และในตัวดูดซับ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  เกิดการสลายตัวสองช่วง กล่าวคือ ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 150 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้จะเกิดการปลดปล่อยของไอน้ำบริเวณผิวหน้ารูพรุนตัวดูดซับ, คาร์บอนไดออกไซด์ และโพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และในช่วงที่สอง คือที่อุณหภูมิ 160-300 องศาเซลเซียส มีการปลดปล่อยของไอน้ำที่เกาะอยู่ในรูพรุนของตัวรองรับแก้วมาอลูมินา และสารประกอบเชิงซ้อน  $KAl(CO_3)_2(OH)_2$  ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างตัวรองรับ  $\gamma-Al_2O_3$  กับ  $K_2CO_3$  ในระหว่างกระบวนการดูดซับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ตั้งสมมติฐานว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น พิจารณาระบบเป็นเพียง Single phase กล่าวคือไอน้ำจะเข้าทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับเกิดเป็นเฟสที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา  $K_2CO_3 \cdot 1.5H_2O$  จึงพิจารณาไอโซเทิร์มการดูดซับแบบเฟสเดียว ดังนั้นควรติดตั้งเซนเซอร์ที่สามารถวัดความเข้มข้นของไอน้ำแล้วนำมาคำนวณไอโซเทิร์มให้เป็น Binary phase เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความแม่นยำของแบบจำลองให้มากขึ้น

2. ควรศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเร็วแก๊สเข้าแตกต่างกันเพิ่มเติม

## ภาคผนวก ก

### 1. การคำนวณร้อยละการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สูตรการคำนวณร้อยละการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

$$\%CO_2\text{ removal} = \frac{n_0 - n_t}{n_0} \times 100$$

เมื่อ  $\%CO_2\text{ removal}$  = ร้อยละของการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [%]

$n_0$  = ปริมาณโมลเริ่มต้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [โมล]

$n_t$  = ปริมาณโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใดๆ [โมล]

ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะการทดลองของตัวอย่าง

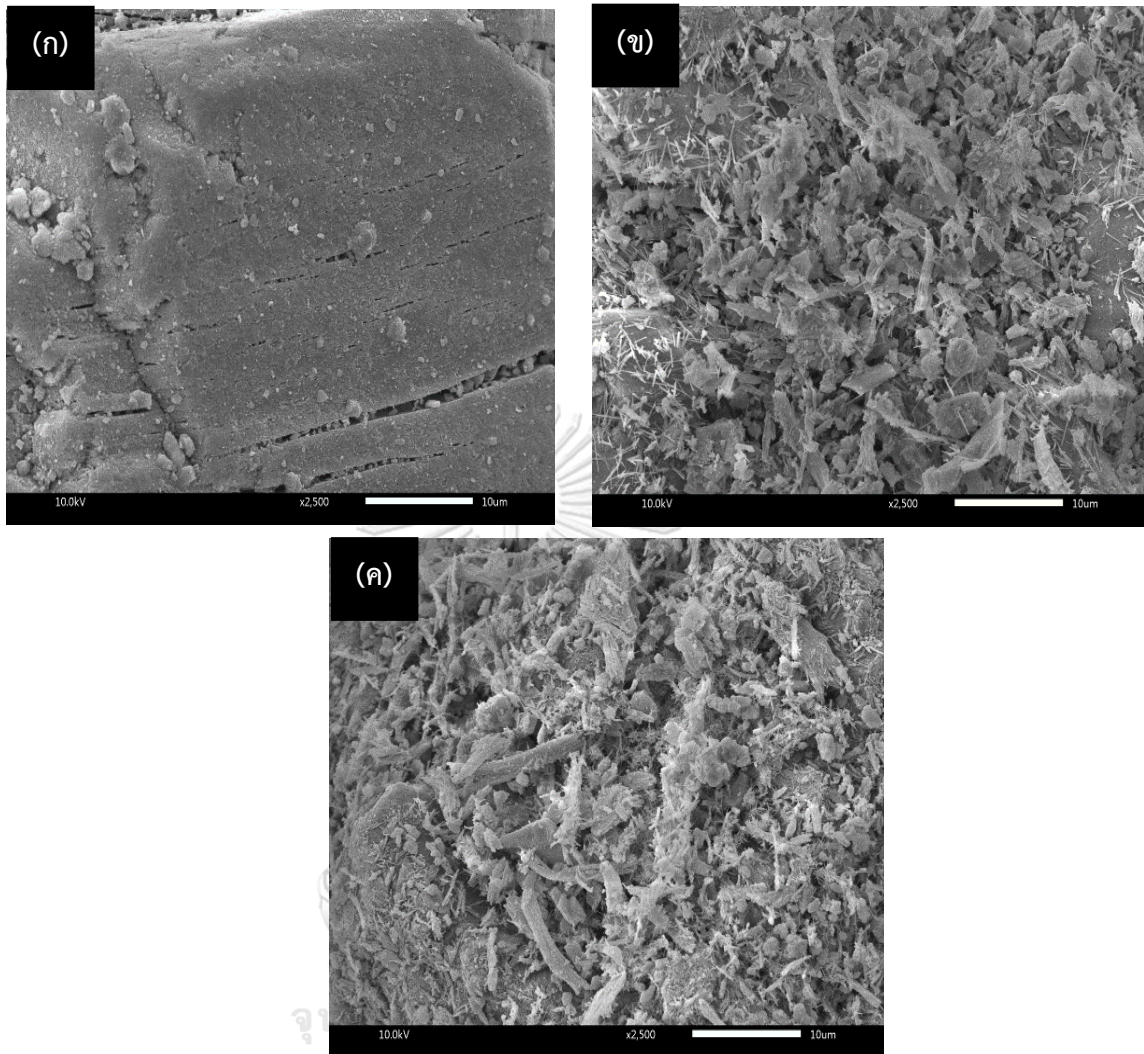
ชนิดของตัวดูดซับ	: $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$
อุณหภูมิการดูดซับ	: 60 องศาเซลเซียส
ระยะเวลาในการดูดซับ	: 10 นาที
ปริมาณโมลเริ่มต้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	: 0.0097 โมล
ปริมาณโมลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลา 10 นาที	: 0.0043 โมล

$$\%CO_2\text{ removal} = \frac{0.0096 - 0.0043}{0.0096} \times 100 = 55.67\%$$

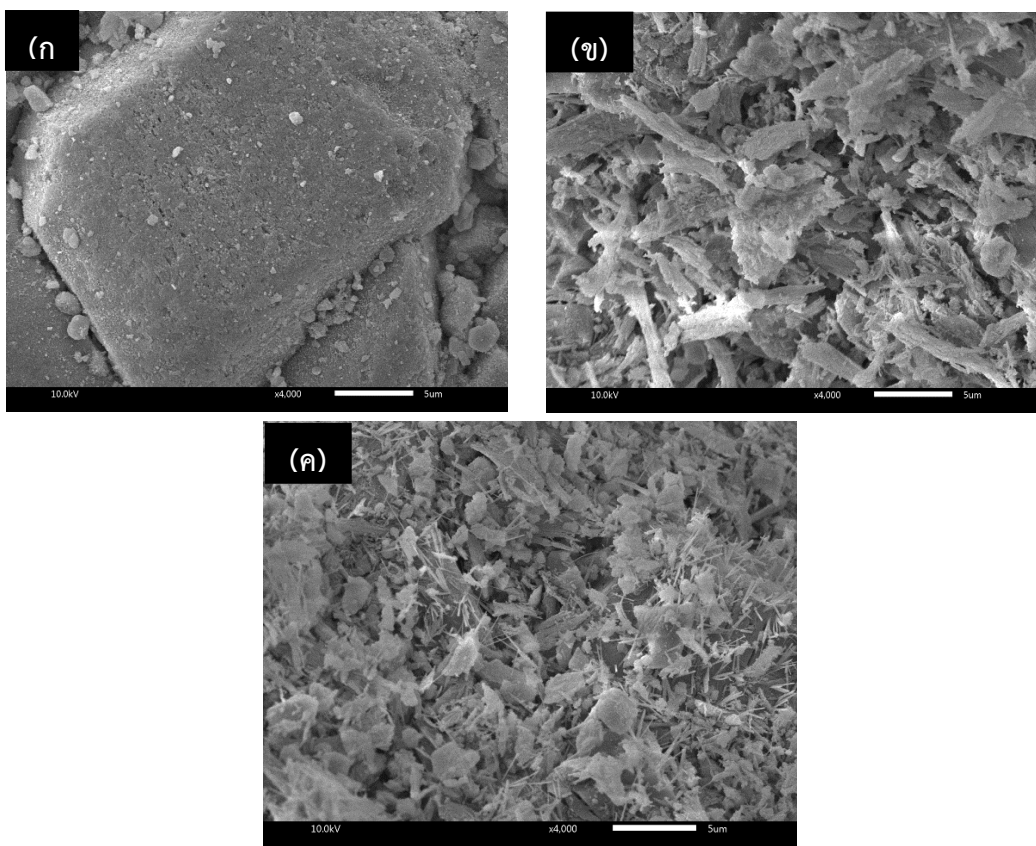
### 2. การพิสูจน์เอกลักษณ์ตัวดูดซับด้วยเทคนิคต่างๆ

2.1 ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับด้วยเทคนิคอิเล็กตรอนไมโครสโกปี (Scanning electron microscopy: SEM)

รูปที่ ก1 และ ก2 แสดงภาพถ่ายเพิ่มเติมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านที่มีกำลังขยาย 2500 เท่า และ 4000 เท่า ของตัวดูดซับแกมมาอลูมินา, โพลีเอทิลีนคาร์บอเนตและ โพลีเอทิลีนคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน



รูปที่ ก1 ภาพ SEM กำลังขยาย 2500 เท่า (ก)  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (ข)  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (ค)  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$



รูปที่ ก2 ภาพ SEM กำลังขยาย 4000 เท่า (ก)  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ข)  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ค)  $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$

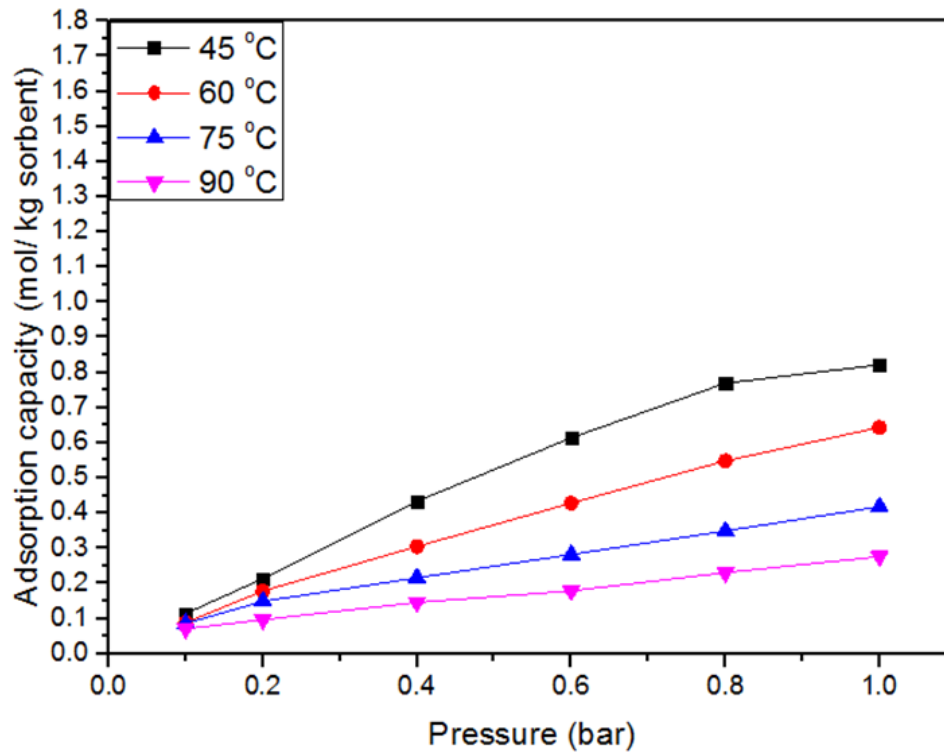
2.2 การวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณองค์ประกอบของธาตุของตัวดูดซับด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence: XRF)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ปริมาณองค์ประกอบออกไซด์ของธาตุที่พบในการพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค XRF ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา

ชนิดตัวดูดซับ	ชนิดและปริมาณธาตุ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)		
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$
โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา	68.10	5.10	0.133

3. ข้อมูลไอโซเทิร์มการดูดซับของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ )



รูปที่ ก3 ไอโซเทิร์มการดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ ของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา



#### 4. ข้อมูลดิบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) ที่ความดันสมดุระบบ 1 บาร์ อุณหภูมิการดูดซับ 60 องศาเซลเซียส

เวลา	%CO <sub>2</sub>	อุณหภูมิดูดซับ	V <sub>CO2</sub>	mole <sub>CO2</sub>
นาที	%vol	°C	L	mol
0	12	-	0.188	0.0097
5	5.926	59.6	0.093	0.0048
10	5.281	60.8	0.083	0.0043
15	4.291	60.5	0.067	0.0035
20	3.193	59.7	0.050	0.0026
25	1.830	60.1	0.029	0.0015
30	0.826	59.8	0.013	0.0007
35	0.926	60.4	0.014	0.0007
40	1.294	60.8	0.020	0.0010
45	1.936	59.7	0.030	0.0016
50	1.582	59.8	0.025	0.0013
55	0.782	60.2	0.012	0.0006
60	0.842	60.3	0.013	0.0007
65	1.284	60.7	0.020	0.0010
70	1.581	60.8	0.025	0.0013
75	1.489	59.7	0.023	0.0012
80	1.284	59.4	0.020	0.0010
85	1.007	60.5	0.016	0.0008
90	0.953	60.1	0.015	0.0007

## บรรณานุกรม

1. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): Earth System Research Laboratory (ESRL), Mauna Loa hourly temperature data for 1 January 2014 to 7 February 2018. Available from: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>.
2. Garshasbi, V., Jahangiri, M., Anbia, M., *Equilibrium CO<sub>2</sub> adsorption on zeolite 13X prepared from natural clays*. Applied Surface Science, 2017. **393**: p. 225–233.
3. Shafeeyan, M.S., Shamiri, S., Aghamohammadi, N., *Adsorption equilibrium of carbon dioxide on ammonia-modified activated carbon*. Chemical Engineering Research and Design, 2015. **104**: p. 42-52.
4. Diana, I., Xiaowen, H., Milo, S. P. S., David, C., *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**: p. 11610–11618.
5. Figueroa, J.D., Fout, T., Plasynski, S., McIlvried, H., and Srivastava, R. D., *Advances in CO<sub>2</sub> capture technology-the US department of energy's carbon sequestration program*. International Journal of Greenhouse Gas Control 2008. **2(1)** p. 9-20.
6. Mangalapally, H.P., Notz, R., Asprion, N., Sieder, G., Garcia, H., Hasse, H., *Pilot plant study of four new solvents for post-combustion carbon dioxide capture by reactive absorption and comparison to MEA*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012. **8(0)**: p. 205-216.
7. Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M., Meyer, L., *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press for the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2005.
8. Zhao, L., et al., *A parametric study of CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> gas separation membrane processes for post-combustion capture*. Journal of Membrane Science, 2008. **325**: p. 284-94.
9. *CO<sub>2</sub> CRC building a low emission future: The Australian Government's Cooperative Research Centre Program CO<sub>2</sub> Capture/Separation Technologies: CO<sub>2</sub> membrane separation*. Available from: <http://www.co2crc.com.au>

10. Weblog., P.s. *Adsorption process*. 2009; Available from: <http://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process>
11. *CO<sub>2</sub> CRC building a low emission future: The Australian Government's Cooperative Research Centre Program CO<sub>2</sub> Capture/Separation Technologies: Adsorption*. 2002; Available from: <http://www.co2crc.com.au>.
12. *Selected Adsorbents for Removal of Contaminants from Wastewater: Towards Engineering Clay Minerals-Scientific Figure on Research Gate*. 2010; Available from: [https://www.researchgate.net/figure/a-Depiction-of-physisorption-and-chemisorption-interaction-between-the-substrate\\_fig1\\_327315818](https://www.researchgate.net/figure/a-Depiction-of-physisorption-and-chemisorption-interaction-between-the-substrate_fig1_327315818).
13. Liang, Y., *Carbon dioxide capture from flue gas using regenerable sodium-based sorbents*. 2003, A thesis. Louisiana State: Louisiana State University.
14. Meghani, B., *Moving bed temperature swing adsorption processes for post-combustion CO<sub>2</sub> capture*. 2015: A thesis. University of Nottingham.
15. Tangsatitkul, C., *Adsorption process*. 2011, Suranaree University of Technology, Thailand.
16. *A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials – Scientific Figure on Research Gate* 2009; Available from: [https://www.researchgate.net/figure/The-IUPAC-classification-of-adsorption-isotherms-showing-both-the-adsorption-and\\_fig2\\_258684354](https://www.researchgate.net/figure/The-IUPAC-classification-of-adsorption-isotherms-showing-both-the-adsorption-and_fig2_258684354)
17. Gunay, A., Arslankaya, E., Tosun, I., *Lead removal from aqueous solution by natural and pretreated clinoptilolite: adsorption equilibrium and kinetics*. *Journal of Hazardous Materials*, 2001. **146**: p. 362–371.
18. Ayawei, N., Ekubo, A.T., Wankasi, D., Dikio, E.D., *Adsorption of congo red by Ni/Al-CO<sub>3</sub>: equilibrium, thermodynamic and kinetic studies*. *Oriental Journal of Chemistry*, 2015. **31**: p. 1307–1318.
19. Chen, C., *Evaluation of equilibrium sorption isotherm equations*. *Open Chemical Engineering Journal*, 2012. **7**: p. 24–44.
20. Benzaoui, T., Selatnia, A., Djabali, D., *Adsorption of copper (II) ions from aqueous solution using bottom ash of expired drugs incineration*. *Adsorption Science and Technology*, 2017. **3**: p. 1–16.

21. Shokrollahi, A., Alizadeh, A., Malekhosseini, Z., Ranjbar, M., *Removal of bromocresol green from aqueous solution via adsorption on ziziphus nummularia as a new, natural, and low-cost adsorbent: Kinetic and thermodynamic study of removal process*. Journal of Chemical Engineering, 2011. **56(10)**: p. 3738–3746.
22. Borah, J.M., Sarma, J., Mahiuddin, S., *Adsorption comparison at the  $\alpha$ -alumina/water interface: 3,4-Dihydroxybenzoic acid vs. catechol*. Colloids Surf., 2011. **387(1–3)**: p. 50–56.
23. Serna-Guerrero, R., Sayari, A., *Modeling adsorption of CO<sub>2</sub> on amine functionalized mesoporous silica. 2: Kinetics and breakthrough curves*. Journal of Chemical Engineering, 2010. **161(1-2)**: p. 182-190.
24. Chalermssinsuwan, B., *Fluidization*. 2017, Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.
25. *Visual Encyclopedia Chemical Engineering: College of Chemical Engineering of Michigan: Fluidized Bed Reactors*. 2010; Available from: <http://encyclopedia.che.engin.umich.edu/Pages/Reactors/FBR/FBR.html>
26. Boonprasop, S., Chalermssinsuwan, B., Piumsomboon, P., *Effect of the operating parameters on the CO<sub>2</sub> capture capacity of potassium carbonate supported on gamma alumina (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) using conventional heat regeneration*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017. **78**: p. 282-289.
27. Guo, Y., Zhao, C., Li, C., Lu, S., *Application of PEI-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/AC for capturing CO<sub>2</sub> from flue gas after combustion*. Applied Energy, 2014. **129**: p. 17-24.
28. Jaiboon, O.-A., Chalermssinsuwan, B., Mekasut, L., Piumsomboon, P., *Effect of flow patterns/regimes on CO<sub>2</sub> capture using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> solid sorbent in fluidized bed/circulating fluidized bed*. Chemical Engineering Journal 2013. **219**: p. 262-272.
29. Lee, S.C., Choi, B.Y., Ryu, C.K., Ahn, Y.S., Lee, T.J., Kim, J.C., *The effect of water on the activation and the CO<sub>2</sub> capture capacities of alkali metal-based sorbents*. Korean Journal Chemical Engineering 2006. **23(3)**: p. 374-379.
30. Yi, C., Kwon, Y.M., Chae, H.J., Jung, S.Y., Lee, J.B., Ryu, C.K., Lee, S.C., Kim, J.C.,

- Improving regeneration properties of potassium-based alumina sorbents for carbon dioxide capture from flue gas.* Fuel, 2013. **104**: p. 882-885.
31. Zhao, C., Chen, X., Zhao, C., Wu, Y., Dong, W., *K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for capturing CO<sub>2</sub> in flue gas from power plants. Part 3: CO<sub>2</sub> capture behaviors of K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in a bubbling fluidized-bed.* Energy & Fuels 2012. **26**: p. 3062-3068.
32. Prajapati, A., Renganathan, T., Krishnaiah, K., *Kinetic studies of CO<sub>2</sub> capture using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Activated carbon in fluidized bed reactor.* Energy Fuels 2016. **30**: p. 10758-10769.
33. Jongartklang, N., Chalermssinsuwan, B., Piumsomboon, P. *Correlation of kinetic parameter for CO<sub>2</sub> sorption using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solid sorbents with various fluidization flow regimes.* in *The 3rd TICHE International Conference*. 2013. Khon Kaen, Thailand.
34. Hinchiranan, N., Ngamcharussrivichai, C., *Catalyst Technology*. 2014, Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.
35. Dong, W., Chen, X., Wu, Y., *Regenerable potassium-based alumina sorbents prepared by CO<sub>2</sub> thermal treatment.* Korean J. Chem. Eng., 2016. **33(11)**: p. 3207-3215.
36. Zhao, C., Chen, X., Wu, Y., Dong, W., *K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for Capturing CO<sub>2</sub> in Flue Gas from Power Plants. Part 3: CO<sub>2</sub> Capture Behaviors of K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in a Bubbling Fluidized-Bed Reactor.* Energy Fuels, 2012. **26**: p. 3062-3068.
37. Karunakaran, C., Anilkumar, P., Gomathi, P., *Photo production of iodine with Nano particulate semiconductors and insulators.* Chemistry Central journal, 2011. **5(1)**: p. 1-9.
38. al., L.e., *Improving regeneration properties of potassium-based alumina sorbents for carbon dioxide capture from flue gas.* Fuel, 2013. **104**: p. 882-885.
39. Lee, S.C., Choi, B.Y., Ryu, C.K., Ahn, Y.S., Lee, T.J., Kim, J.C., *The effect of water on the activation and the CO<sub>2</sub> capture capacities of alkali metal-based sorbents.* Korean Journal Chemical Engineering 2006. **23(3)**: p. 374-379.
40. Lee, S.C., Kwon, Y.M., Ryu, C.Y., Chae, H.J., *Development of new alumina-modified sorbents for CO<sub>2</sub> sorption and regeneration at temperatures below 200 °C.* Energy Fuels, 2011. **90**: 1465.

41. Lee, S.C., Choi, B.Y., Ryu, C.K., Ahn, Y.S., *CO<sub>2</sub> absorption and regeneration of alkali metal-based solid sorbents*. *Catalysis Today*, 2006. **111**: p. 385-390.
42. Lee, J.B., Ryu, C.K., Baek, J., Lee, J.H., Eom, T.H., Kim, S.H., *Sodium based dry regenerable sorbent for carbon dioxide capture from power plant flue gas*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008. **47**: p. 4465–4472.
43. Maroto, V., Tang, Z., Zhang, Y., *CO<sub>2</sub> capture by activated and impregnated anthracites*. *Fuel Process Technology*, 2010. **86**: p. 1487-1502.
44. Jaiboon, O.-A., *Effect of flow patterns/regimes on CO<sub>2</sub> capture using K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> solid sorbent in fluidized bed/circulating fluidized bed*. 2013, A thesis. Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวนิรวิติ อินทร์มณี
วัน เดือน ปี เกิด	29 มกราคม 2537
สถานที่เกิด	สุพรรณบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุ พอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 267 หมู่ 17 ตำบลบ่อสุพรรณ อำเภอสองพี่น้อง จังหวัด สุพรรณบุรี รหัสไปรษณีย์ 72190
ผลงานตีพิมพ์	บทความวิจัย. (ผู้บรรยาย). (8-9 พฤศจิกายน 2561). เส้นโค้งสมดุลดการดูด ซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโฟแทสซีเมคาร์บอนเนตในฟลูอิด์เบด. ใน การ ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 (หน้า 198-211). ชลบุรี: โรงแรมเอ-วัน เดอะรอยัล ครุส พัทยา
รางวัลที่ได้รับ	-