การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

น.ส.ชาติยา ตรีพูนสุข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CARBON DIOXIDE ADSORPTION USING POTASSIUM CARBONATE SUPPORTED ON GAMMA ALUMINA AND SOLID SORBENT REGENERATION IN FLUIDIZED BED REACTOR

Miss Chatiya Tripoonsuk

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด
โดย	น.ส.ชาติยา ตรีพูนสุข
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ชาติยา ตรีพูนสุข : การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด. (CARBON DIOXIDE ADSORPTION USING POTASSIUM CARBONATE SUPPORTED ON GAMMA ALUMINA AND SOLID SORBENT REGENERATION IN FLUIDIZED BED REACTOR) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

ปัจจุบันโลกต้องเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่รุนแรง เนื่องจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจกออกสู่ชั้นบรรยากาศสูงขึ้น โดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงมีความสำคัญในการลดปริมาณการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งการใช้ตัวดูดซับของแข็งในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสม ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมและสร้างจลนพลศาสตร์ของการฟื้นฟูสภาพ โดยตัวแปรดำเนินการที่ทำการศึกษาได้แก่ ขนาดอนุภาค 90 109 และ 124 ไมโครเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 100 200 และ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 0.61 และ 0.88 บาร์ ผลที่ได้พบว่า ขนาดอนุภาคไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิการฟื้นฟูสภาพสูงและความดันเริ่มต้นในการฟื้นฟูสภาพต่ำ อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมีผลเชิงบวกต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเพิ่มขึ้น ความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับสูงขึ้น ส่วนความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมีผลเชิงลบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง นั่นคือเมื่อความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมีต่ำ ความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับสูงขึ้น ดังนั้น ภาวะที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพสำหรับตัวดูดซับของแข็งชนิดนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นเท่ากับ 0.35 บาร์ แบบจำลองปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับใช้อธิบายจลนพลศาสตร์ของการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งคือแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

สาขาวิชา เคมีเทคนิค		ลายมือชื่อนิสิต ....
ปีการศึกษา 2562		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม ....

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6171937523 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Carbon dioxide capture; Sorbent regeneration; Solid sorbent; Fluidized bed reactor; Kinetic model.

Chatiya Tripoonsuk : CARBON DIOXIDE ADSORPTION USING POTASSIUM CARBONATE SUPPORTED ON GAMMA ALUMINA AND SOLID SORBENT REGENERATION IN FLUIDIZED BED REACTOR. Advisor: Prof. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D.

Nowadays, the world is facing a severe climate change since large amount of green house gas, especially carbon dioxide, has been released to the environment due to human activities. Therefore, carbon dioxide (CO_2) capture process becomes an important technology for mitigating the problem and solid-sorbent CO_2 capture process is an attractive alternative. In this research study, solid-sorbent regeneration using potassium carbonate supported on gamma-alumina in a fluidized bed reactor was investigated. The effects of regeneration operating variables were studied by varying the particle sizes of 90, 109, 124 mm, regeneration temperatures of 100, 200, 300 degree Celsius and regeneration initial pressures of 0.35, 0.61, 0.88 bar. The results showed that regeneration temperature and initial pressure had positive and negative effects on the sorbent regeneration, respectively. To improve sorbent regeneration, the regeneration temperature has to increase and the initial pressure has to decrease. However, it was found that the particle size has no effect on the regeneration at this condition which were high temperature and low initial pressure. The optimal condition for sorbent regeneration was at temperature of 300 degree Celsius and initial pressures of 0.35 bar. Kinetic studies of the sorbent regeneration were also conducted and obtained a pseudo second-order model as the best-fit model.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Chemical Technology	Student's Signature ....
Academic Year:	2019	Advisor's Signature ....
		Co-advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจาก ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลืออย่างสูงจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมทั้งมอบความรู้ ความเข้าใจด้านวิชาการอย่างดียิ่งตลอดจนการแก้ไขปรับปรุง เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา และ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบ และให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาเฉพาะค่าเล่าเรียนประเภท 60/40 ระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณคณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้ และอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.สุทธิชัย บุญประสพ ที่ถ่ายทอดความรู้ และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณ สมาชิกทุกคนของห้องปฏิบัติการ Cybernetics และ Fluidization ที่ให้การสนับสนุน และคำปรึกษา ตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณพี่สาธิต อยู่สถิตย์ ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาด้านวิชาการ ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัย ให้คำแนะนำด้านต่าง ๆ และให้กำลังใจแก่ผู้ทำวิจัยเสมอมา

ชาติยา ตรีพูนสุข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

.... ค

บทคัดย่อภาษาไทย.. ค

....ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ....ง

กิตติกรรมประกาศ .... จ

สารบัญ... ฉ

สารบัญตาราง...ฎ

สารบัญรูปภาพ...ฐ

บทที่ 1 บทนำ.. 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.. 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย... 4

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย... 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ... 4

1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย.. 4

1.7 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย.. 6

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture).. 7

2.1.1 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture) 7

2.1.2 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture)... 7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.3 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture) 8

2.2 กลไกในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์........ 9

2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption) 10

2.2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) 12

2.2.3 กระบวนการแยกด้วยไครโอเจนิค (Cryogenics) 13

2.2.4 กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane) 14

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานในเบื้องต้นสำหรับกระบวนการการดูดซับ 15

2.3.1 ประเภทของการดูดซับ 16

2.3.2 กลไกการดูดซับ 18

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ........ 18

2.3.4 ตัวดูดซับ........ 19

2.4 ตัวรองรับ (Support)........ 22

2.4.1 อะลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) 22

2.4.2 ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) 23

2.4.3 คาร์บอน (Carbon)........ 23

2.4.4 ไททาเนียมออกไซด์หรือไททาเนต (TiO_2)........ 24

2.4.5 การเลือกตัวรองรับ 24

2.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ 24

2.5.1 การฝังตัวหรืออิมเพรกเนชัน (Impregnation)........ 25

2.5.2 การตกตะกอน (Precipitation) 25

2.5.3 การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)........ 26

2.5.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)........ 26

2.6 วิธีการฟื้นฟูตัวดูดซับของแข็ง........ 27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.1 กระบวนการสลับอุณหภูมิ (Temperature/Thermal Swing Adsorption, TSA).... 28

2.6.2 กระบวนการสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption, PSA)............................ 30

2.7 การก่อสภาพของไหล หรือ ฟลูอิไดเซชัน (Fluidization) 33

2.7.1 เบด (Bed)... 33

2.7.2 ประเภทของฟลูอิไดเซชัน 34

2.7.3 ช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชัน (Regime of fluidization)... 34

2.7.4 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิไดเซชัน 38

2.7.5 การประยุกต์ใช้การก่อการไหลกับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์........... 39

2.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics).. 39

2.8.1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic model)... 40

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 42

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 46

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 46

3.2 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง 47

3.2.1 สารเคมีที่ใช้ 47

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.. 47

3.3 ขั้นตอนการทดลอง 49

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ.. 49

3.3.2 ระบบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา 50

3.3.3 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 51

3.3.4 การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง.. 52

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) 55

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) 55

3.4.2 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) 56

3.4.3 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 57

3.4.4 เทคนิคการวัดการดูดซับเชิงกายภาพของแก๊สไนโตรเจน (N_2 physisorption measurement) 57

3.4.5 เทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence, XRF) 58

3.4.5 เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer, PSD) 59

3.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE) 60

3.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการฟื้นฟูสภาพ 62

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 64

4.1 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 64

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Analysis of Experiment Data) 67

4.2.1 การออกแบบการทดลองโดยใช้แฟคตอเรียลแบบ 2^k (2^k factorial design) สำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับเพื่อการเลือกตัวแปรที่มีผลกระทบ 67

4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ (Characterization of sorbents) 72

4.3.1 ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer, PSD) 72

4.3.2 ชนิดและปริมาณองค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence, XRF) 73

4.3.3 สมบัติความพรุนของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับเชิงกายภาพของแก๊สไนโตรเจน (N_2 physisorption measurement) 74

4.3.4 สมบัติเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) 77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.5 สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) 81
4.3.6 โครงสร้างหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR).... 85
4.4 การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 87
4.4.1 ผลของขนาดอนุภาคต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 89
4.4.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง..... 91
4.4.3 ผลของความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 92
4.4.4 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ..... 94
4.5 การหาภาวะที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 95
4.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 97
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 100
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 100
5.2 ข้อเสนอแนะ 101
ภาคผนวก..... 102
ภาคผนวก ก 102
ภาคผนวก ข 117
บรรณานุกรม..... 119
ประวัติผู้เขียน..... 124

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [17]............................ 17

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 52

ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 55

ตารางที่ 3.3 การทดลองทั้งหมดที่ใช้วิธีแบบแฟคทอเรียล ในการศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับ 61

ตารางที่ 3.4 สมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพที่ทำการศึกษา 63

ตารางที่ 4.1 ช่วงในการทดลองและระดับของตัวแปรดำเนินการของการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ 67

ตารางที่ 4.2 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 68

ตารางที่ 4.3 วิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจากการออกแบบการทดลองโดยใช้แฟคตอเรียลแบบ 2^k.. 70

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางเคมีกายภาพของตัวดูดซับ 72

ตารางที่ 4.5 การทดลองเพื่อศึกษาร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 88

ตารางที่ 4.6 วิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจากการออกแบบการทดลองแฟคตอเรียลเต็มรูป (Full factorial design).. 89

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ภาวะดำเนินการต่าง ๆ 98

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์............ 103

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณร้อยละการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็ง 104

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพที่ได้จากผลการทดลอง 107

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลดิบที่นำไปใช้สร้างกราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม 108

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลดิบค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม 110

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลดิบที่นำไปใช้สร้างกราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม........................... 111

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลดิบค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม 113

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลดิบที่นำไปใช้สร้างกราฟแบบจำลองอาฟรามี 114

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลดิบค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จากแบบจำลองอาฟรามี 116

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่าง ๆ [11] 9

รูปที่ 2.2 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึมโดยใช้สารละลายเอมีน [13].... 11

รูปที่ 2.3 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับ [14] 12

รูปที่ 2.4 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไครโอเจนิค [14] 13

รูปที่ 2.5 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเยื่อเลือกผ่าน [15] 15

รูปที่ 2.6 การดูดซับเชิงกายภาพและการดูดซับเชิงเคมี [16] 17

รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนวัฏภาคของอะลูมินา [20] 23

รูปที่ 2.8 กระบวนการสลับอุณหภูมิ [4] 30

รูปที่ 2.9 กระบวนการสลับความดัน [4] 32

รูปที่ 2.10 การแกว่งของความดันและอุณหภูมิในกระบวนการสลับอุณหภูมิและกระบวนการสลับความดัน [4] 32

รูปที่ 2.11 ช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชันแบบต่าง ๆ [22] 35

รูปที่ 3.1 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย 46

รูปที่ 3.2 ลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับของแข็ง $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ 49

รูปที่ 3.3 ระบบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง........ 51

รูปที่ 3.4 เครื่อง X-Ray Diffractometer ของบริษัท Bruker รุ่น D8 Discover 56

รูปที่ 3.5 เครื่อง Scanning electron microscope ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-IT-500HR........ 56

รูปที่ 3.6 เครื่อง Fourier transform infrared spectroscope ของบริษัท PerkinElmer รุ่น Spectrum One 57

รูปที่ 3.7 เครื่อง Surface area and porosity analyzer ของบริษัท Micromeritics รุ่น ASAP 2020 58

รูปที่ 3.8 เครื่อง Surface area and porosity analyzer ของบริษัท Bruker รุ่น S8 Tiger........ 59

รูปที่ 3.9 เครื่อง Particle size distribution analyzer ของบริษัท MALVERN รุ่น Mastersizer 3000 59

รูปที่ 4.1 กราฟเบรคทรูของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขนาดอนุภาค 90 μm 65

รูปที่ 4.2 กราฟเบรคทรูของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขนาดอนุภาค 109 μm 65

รูปที่ 4.3 กราฟเบรคทรูของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขนาดอนุภาค 124 μm 66

รูปที่ 4.4 แผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ 69

รูปที่ 4.5 ผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการ (A) อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (B) ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ ต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 71

รูปที่ 4.6 ไอโซเทิร์มการดูดซับ-การคายซับแก๊สไนโตรเจนของ (a) γ-Al_2O_3 (b) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh, (c) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Spent, (d) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-100 $^{\circ}$C, (e) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-200 $^{\circ}$C and (f) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-300 $^{\circ}$C. 76

รูปที่ 4.7 รูปแบบ XRD ของ (a) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh, (b) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Spent, (c) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-100 $^{\circ}$C, (d) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-200 $^{\circ}$C and (e) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-300 $^{\circ}$C. [∇, γ-Al_2O_3; ◆, K_2CO_3; ●, $KHCO_3$; ■, $KAl(CO_3)(OH)_2$] 80

รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า ของ (A) γ-Al_2O_3 (B) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 109 ไมโครเมตร และ (D) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 124 ไมโครเมตร 82

รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของ (A) γ-Al_2O_3 (B) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 109 ไมโครเมตร และ (D) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 124 ไมโครเมตร 83

รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของ (A) γ-Al_2O_3 (B) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Spent ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร และ (D) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-300 $^{\circ}$C ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร ที่ความดันเริ่มต้น 0.35 บาร์ 85

รูปที่ 4.11 สเปกตรัม FTIR ของ (a) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh, (b) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Spent, (c) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-100 $^{\circ}$C, (d) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-200 $^{\circ}$C and (e) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-300 $^{\circ}$C 86

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.12 ผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการของขนาดอนุภาคต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 91

รูปที่ 4.13 ผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการของอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 92

รูปที่ 4.14 ผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการของความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 93

รูปที่ 4.15 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรขนาดของอนุภาคกับความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง 94

รูปที่ 4.16 พื้นผิวตอบสนองระหว่างร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพและความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพแตกต่างกัน โดยใช้ขนาดอนุภาคที่ 90 μm 95

รูปที่ 4.17 พื้นผิวตอบสนองระหว่างร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพและความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพแตกต่างกัน โดยใช้ขนาดอนุภาคที่ 109 μm 96

รูปที่ 4.18 พื้นผิวตอบสนองระหว่างร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพและความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพแตกต่างกัน โดยใช้ขนาดอนุภาคที่ 124 μm 96

รูปที่ 4.19 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ต่าง ๆ ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร, อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์ 99

รูปที่ ก.1 กราฟเส้นตรงจากจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม 109

รูปที่ ก.2 กราฟเส้นตรงจากจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม 112

รูปที่ ก.3 กราฟเส้นตรงจากจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองอาฟรามี 115

รูปที่ ข.1 รูปแบบ XRF ของตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร 117

รูปที่ ข.2 รูปแบบ XRF ของตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร 117

รูปที่ ข.3 รูปแบบ XRF ของตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์ ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร 118

รูปที่ ข.4 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ของ (A) γ-Al_2O_3 (B) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Spent ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร และ (D) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-300 ^{o}C ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร ที่ความดันเริ่มต้น 0.35 บาร์ 118

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วิกฤตการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ที่รุนแรงจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases) เนื่องจากประชากรโลกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วก่อให้เกิดปัญหาความแออัดของประชากรต่อหน่วยพื้นที่ประกอบกับการขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงานและทรัพยากรธรรมชาติตามมา ส่งผลให้ปริมาณความต้องการใช้พลังงานมากขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่ได้มาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuels) เช่น ปิโตรเลียม, ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น รวมไปถึงการคมนาคม ตัดไม้ทำลายป่า ปศุสัตว์ เกษตรกรรม และการเผาหรือฝังกลบขยะ ที่เป็นส่วนสำคัญทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศเพิ่มมากขึ้น จนก่อให้เกิดเป็นภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) สาเหตุสำคัญของวิกฤตการณ์โลกร้อน เป็นแรงผลักดันให้นานาประเทศหันมาสนใจและตระหนักถึงผลกระทบและความเสียหายในด้านต่าง ๆ จึงได้มีการลงนามรับรองอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) เพื่อหาแนวทางยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและป้องกันผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์ [1] ดังนั้น กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นอีกหนึ่งวิธีการสำคัญสำหรับลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ

กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion) กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบใช้ออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิง (Oxyfuel) และกระบวนการการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมเลือกใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการนำไปใช้กับโรงไฟฟ้าที่เผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล [2] เนื่องจากกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ก่อนปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศไม่กระทบต่อการดำเนินงานในหน่วยอื่น ๆ ของกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า รวมถึงค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและซ่อมบำรุงต่ำกว่ากระบวนการอื่น ๆ การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีหลายวิธี เช่น การแยกด้วย

เยื่อเลือกผ่าน การแยกด้วยการดูดซึมโดยใช้สารละลาย และการแยกด้วยการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง เป็นต้น ในปัจจุบันการดูดซึมด้วยสารละลายเอมีนเป็นที่นิยมในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง ดำเนินการง่ายและต้นทุนต่ำ [3] แต่มักพบปัญหาจากการใช้สารละลายเอมีนที่มีความเป็นพิษสูงส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนชิ้นส่วนของหอดูดซึมทำให้เกิดความเสียหาย นอกจากนี้เมื่อถูกใช้งานไประยะหนึ่งจะเกิดการเสื่อมสภาพจำเป็นต้องเปลี่ยนสารละลายใหม่ จึงต้องใช้น้ำในปริมาณมากเนื่องด้วยหอดูดซึมสูงและมีขนาดใหญ่ อีกทั้งใช้พลังงานสูงในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึมที่เป็นสารละลายเอมีน ดังนั้น การใช้ตัวดูดซับของแข็งในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสม เนื่องจากมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง สามารถจัดเก็บและขนส่งได้ง่าย และใช้พลังงานน้อยในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ อีกทั้งสามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับได้ง่ายโดยใช้การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ/ความดัน [4] ซึ่งหลังจากการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นต่อไป ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้กระบวนการนี้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ [5, 6]

ตัวดูดซับของแข็งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โลหะกัมมันต์ (active metal) และ ตัวรองรับ (supporter) โดยโลหะกัมมันต์จะเป็นตัวทำปฏิกิริยาหลักในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนตัวรองรับจะช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะในการเกิดปฏิกิริยา ช่วยให้โลหะกัมมันต์กระจายตัวดียิ่งขึ้น รวมทั้งเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพให้กับตัวดูดซับของแข็ง [7] โดยนิยมใช้โลหะอัลคาไลน์เติมลงบนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูง โลหะอัลคาไลน์จะอยู่ในรูปของโลหะอัลคาไลน์คาร์บอเนต เช่น โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) และ โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K_2CO_3) โดยจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ (reversible exothermic reaction) และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์โลหะอัลคาไลไฮโดรเจนคาร์บอเนต (Alkali metal hydrogen carbonate) โดยตัวรองรับที่นิยมใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ ไททาเนียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาชนิดของตัวดูดซับของแข็งในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งตัวดูดซับเชิงกายภาพและตัวดูดซับเชิงเคมี พบว่า ตัวดูดซับเชิงเคมีให้ค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าตัวดูดซับเชิงกายภาพ และตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นตัวดูดซับเชิงเคมีเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ เนื่องจากมีความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เกิดการดูดซับได้ที่อุณหภูมิต่ำ (50-70 องศาเซลเซียส) และใช้อุณหภูมิในการฟื้นฟูสภาพไม่สูงมาก [8, 9]

นอกจากนี้ เครื่องปฏิกรณ์ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในปัจจุบันได้นำเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการดูดซับมากขึ้น เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคตัวดูดซับของแข็งและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง และมีการกวนผสมภายในสูง (Internal mixing) ส่งผลให้ร้อยละของผลได้ของปฏิกิริยามีค่าสูง และมีการกระจายตัวของอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้ยังสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างต่อเนื่อง (Continuous process) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed reactor) แก๊สผสมจะไหลผ่านตัวดูดซับของแข็งภายในท่อไรเซอร์ทำให้เกิดการสัมผัสกัน เมื่อความเร็วของแก๊สผสมมีค่าที่เหมาะสมอนุภาคตัวดูดซับของแข็งจะมีพฤติกรรมการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหลเกิดเป็นช่วงการไหลแบบต่าง ๆ เมื่อตัวดูดซับของแข็งเคลื่อนมาถึงด้านบนสุดของท่อไรเซอร์ จะผ่านไปยังไซโคลน เพื่อแยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊สผสม โดยแก๊สจะถูกแยกออกทางด้านบนของไซโคลน ส่วนตัวดูดซับของแข็งจะตกลงมาในท่อดาวเนอร์ เพื่อทำการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ และจะถูกป้อนกลับเข้าไปในกระบวนการใหม่ อย่างไรก็ตาม จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ายังมีข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในกระบวนการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ (Regeneration)

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด นำผลมาวิเคราะห์หาภาวะที่ดีที่สุดและสร้างจลนพลศาสตร์ของการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด
3. สร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์สำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด
2. ศึกษาผลของตัวแปรอุณหภูมิ ความดัน และขนาดของอนุภาคตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) เพื่อนำมาวิเคราะห์หาภาวะเหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด
3. สร้างสมการจลนพลศาสตร์สำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ, ตัวดูดซับของแข็ง, เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด และแบบจำลองจลนพลศาสตร์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ข้อมูลตัวแปรดำเนินการ ภาวะที่เหมาะสม และข้อมูลจลนพลศาสตร์ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด

1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง ทั้งตัวดูดซับของแข็ง ตัวรองรับ รูปแบบการไหลที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ตัวแปรที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง วิธีที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง
2. วางแผนและออกแบบการทดลองโดยใช้แฟคตอเรียลแบบ 2^k (2^k factorial design) เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ และกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไป และใช้วิธีออกแบบการทดลองแฟคตอเรียลเต็มรูป (Full factorial design) เพื่อให้ครอบคลุมผลของตัวแปรเดี่ยวและตัวแปรอันตรกิริยาทั้งหมด
3. จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาในเครื่องปฏิกรณ์

ฟลูอิไดซ์เบด โดยประกอบไปด้วยเตาปฏิกรณ์, คอลัมน์แก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.5 เซนติเมตร ความสูงของคอลัมน์ 42 เซนติเมตร, ปั๊มหมุนเวียน, ปั๊มสุญญากาศ, อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ, อุปกรณ์ควบคุมความดัน, เซนเซอร์วัดความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความดัน และอุณหภูมิ และแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้น 12% โดยปริมาตรในสมดุลแก๊สไนโตรเจน

4. เตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) ด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน (Impregnation) โดยนำโพแทสเซียมคาร์บอเนต 5 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร เมื่อได้สารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนตแล้ว จึงเติมตัวรองรับแกมมาอะลูมินา 5 กรัม นำไปเขย่าเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที จากนั้นอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบด ร่อนผ่านตะแกรงแต่ละชั้นวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค (Particle size analysis)
5. นำตัวดูดซับที่ได้จากขั้นตอนที่ 4 ปริมาณ 5 กรัม ไปดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์
6. นำตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับมาแล้วในขั้นตอนที่ 5 มาทำการฟื้นฟูในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด ตามแผนที่ได้ออกแบบไว้ โดยพิจารณาตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และขนาดของอนุภาคตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา
7. วิเคราะห์ลักษณะของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาก่อนการดูดซับ หลังการดูดซับ และหลังการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยใช้ N_2 adsorption-desorption เพื่อวิเคราะห์พื้นผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน, X-ray diffractometer (XRD) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและระบุชนิดสารประกอบที่มีอยู่ในตัวดูดซับ, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ, Scanning electron microscopy (SEM) เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ และ X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) วิเคราะห์องค์ประกอบเชิงเคมีที่มีอยู่ในตัวดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

8. ศึกษาค่าของตัวแปรดำเนินการที่เหมาะสมเพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ และสร้างจลนพลศาสตร์สำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด
9. วิเคราะห์ผล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.7 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัยประกอบด้วยเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินงานวิจัย และ ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ประเภทของเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทฤษฎีพื้นฐานในเบื้องต้นสำหรับกระบวนการการดูดซับ ตัวรองรับ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ วิธีการฟื้นฟูตัวดูดซับของแข็ง การก่อสภาพของไหล หรือฟลูอิไดเซชัน จลนพลศาสตร์การดูดซับ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนการทดลอง การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา การออกแบบการทดลอง การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการฟื้นฟูสภาพ

บทที่ 4 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง การหาภาวะที่ดีที่สุดในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง และการศึกษาจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture)

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture) เป็นเทคโนโลยีที่นำไปใช้กับโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel power station) เพื่อเป็นประโยชน์ในการลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในแก๊สเผาไหม้ (Flue gas) ก่อนปล่อยแก๊สออกสู่ชั้นบรรยากาศ อันเป็นสาเหตุของการเกิดภาวะเรือนกระจก วิธีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.1.1 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture)

เป็นเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) โดยเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไอน้ำ เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) หรือ การรีฟอร์มด้วยไอน้ำ (steam reforming) ตามลำดับ ภายในเครื่องผลิตแก๊สสังเคราะห์ (Gasifier) ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) คือ แก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดปฏิกิริยา Water gas-shift ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่างร้อยละ 15-40 และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากด้าน เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงสะอาดที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์, ใช้ทำปฏิกิริยากับอากาศเพื่อให้เกิดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าและความร้อนในกังหันแก๊สวงจรรวม (Combined cycle gas turbine) เป็นต้น [10]

2.1.2 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture)

เป็นเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของอากาศก่อนจะป้อนอากาศเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ โดยอากาศจะถูกป้อนเข้ามายังเครื่องแยกแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศ (Air separator unit, ASU) เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับ

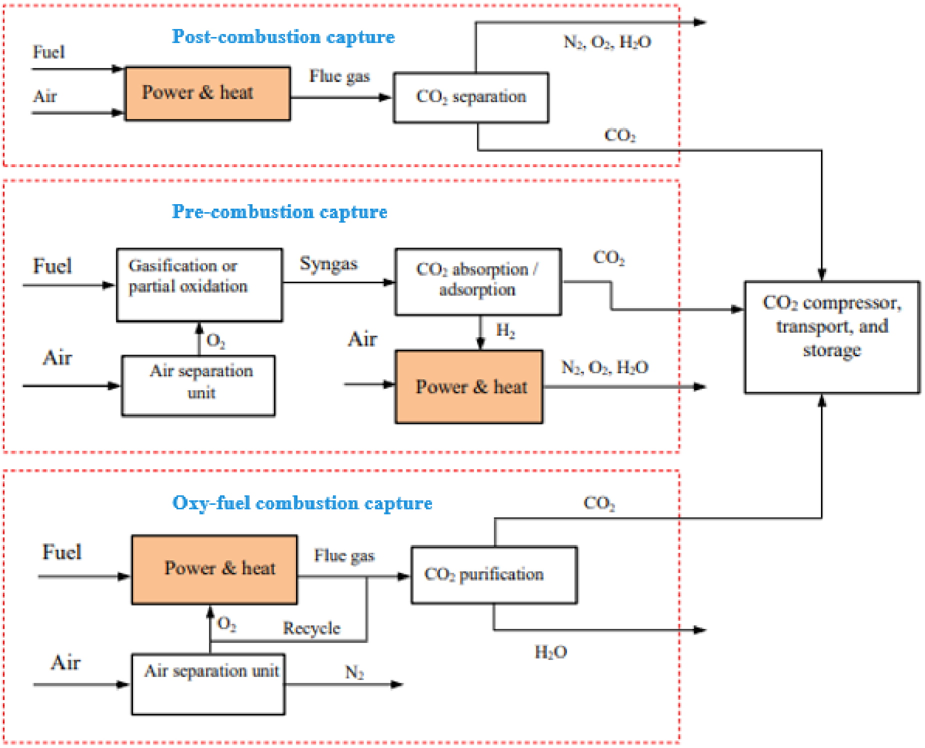
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ที่แยกได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้นี้จะประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากถึงร้อยละ 80 และไอน้ำ ซึ่งการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้จะให้อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีการป้อนแก๊สผสมขาออกกลับไปยังกระบวนการเผาไหม้อีกครั้ง เพื่อควบคุมอุณหภูมิภายในของระบบไม่ให้สูงเกินกว่าที่อุปกรณ์จะรองรับได้ จากนั้นแก๊สเผาไหม้จะถูกส่งไปยังกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากไอน้ำโดยใช้การควบแน่นไอน้ำให้กลายเป็นน้ำภายในเครื่องควบแน่น (Condenser) ก่อนที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำเข้าสู่ กระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (CO_2 purification) เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป [10]

2.1.3 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture)

เป็นเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ก่อนปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ โดยเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับอากาศทำให้ได้พลังงานและความร้อน เพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งแก๊สที่ปล่อยออกมาหลังจากกระบวนการเผาไหม้นี้ประกอบด้วย แก๊สไนโตรเจนมากถึงร้อยละ 70 ในขณะที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่เพียงร้อยละ 4-14 และองค์ประกอบอื่น ๆ อีกเล็กน้อย เช่น แก๊สออกซิเจน, ไอน้ำ เป็นต้น โดยแก๊สผสมหลังกระบวนการเผาไหม้จะมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนได้ออกไซด์และความดันที่ใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ เทคโนโลยีนี้ส่งผลให้กระบวนการยังมีความคล้ายคลึงกับกระบวนการผลิตเดิมมากที่สุด โดยจะเพิ่มหอดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นมา ซึ่งจะรับแก๊สเสียจากกระบวนการผลิตมาทำการบำบัด และใช้ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นจะปล่อยแก๊สที่ผ่านการบำบัดแล้วออกสู่ชั้นบรรยากาศต่อไป

จากเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 3 ประเภท เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีที่มีความเป็นไปได้ เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อย สามารถดำเนินการได้โดยไม่กระทบต่อการดำเนินงานในหน่วยอื่น ๆ ของกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า รวมถึงค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและซ่อมบำรุงต่ำกว่ากระบวนการอื่น ๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ จึงนิยมใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้า เป็นต้น [10] โดยรายละเอียดเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่าง ๆ [11]

2.2 กลไกในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปจะต้องคำนึงถึงการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาร่วมด้วย ซึ่งเงินลงทุนในส่วนนี้คิดเป็นร้อยละ 75 ของเงินลงทุนในการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด รวมทั้งการขนส่งและการฝังเก็บ ดังนั้นการลดต้นทุนในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ สามารถติดตั้งหน่วยแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ซึ่งการเลือกใช้กลไกในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับลักษณะของแก๊สผสมที่ปล่อยออกมา ความดันของแก๊ส ปริมาณแก๊สที่ต้องการแยก และความเร็วของแก๊สผสมในระบบ [12] เช่น สำหรับเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้มีประมาณร้อยละ 40 ที่ความดัน 20 บาร์ ในกรณีเช่นนี้ใช้เทคนิคการดูดซึมแบบกายภาพ (Physical absorption) ก็สามารถที่จะแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาได้และทำการลดความดันเพื่อปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ประหยัดพลังงานในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึม ซึ่งกลไกหรือกระบวนการในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีหลากหลายวิธี โดยจะนำเสนอ 4 กระบวนการ ดังนี้

2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption)

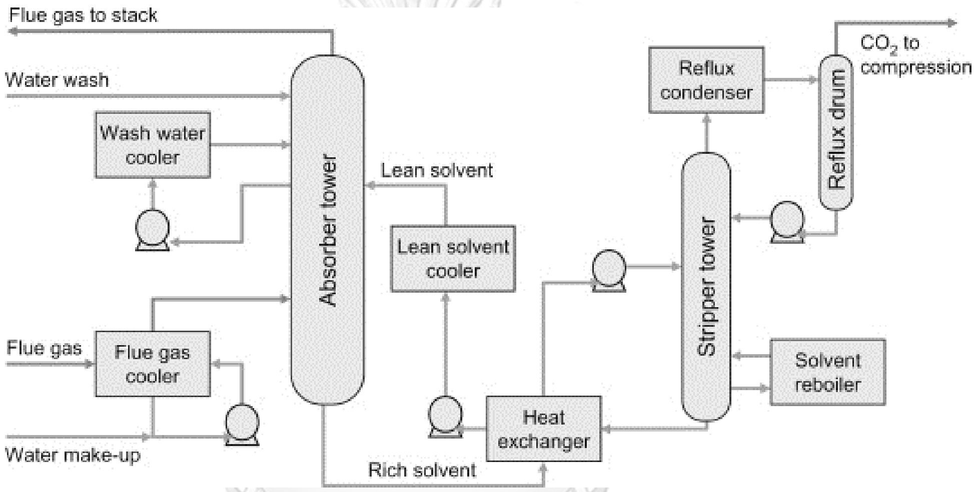
กระบวนการดูดซึมเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลที่ใช้ในกำจัดสารมลพิษที่เป็นแก๊สออกจากกระแสอากาศโดยให้สัมผัสกับของเหลว ซึ่งเกิดขึ้นจากกลไก 2 อย่าง คือ แก๊สจะถ่ายเทจากกระแสแก๊สไปยังผิวร่วมของแก๊สและของเหลว ที่มีการเคลื่อนไหวแบบปั่นป่วน (Turbulent) บริเวณใกล้ ๆ ผิวร่วมนั้น แก๊สจะผ่านเข้าไปในของเหลวด้วยกลไกเรียกว่า Molecular diffusion ซึ่งการที่โมเลกุลสามารถถ่ายเทจากสภาพแก๊สไปยังสภาพของเหลวได้เนื่องจากความเข้มข้นทั้ง 2 วัฏภาค มีความแตกต่างกันระหว่างความเข้มข้นจริงกับความเข้มข้นขณะสมดุล (Concentration gradient) ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน อีกทั้งที่ผิวของเหลวและแก๊สเป็นแรงขับ (Driving force) ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล นอกจากนี้พื้นที่ผิวสัมผัสที่สูง การเคลื่อนไหวแบบปั่นป่วน และสัมประสิทธิ์การแพร่มวลสูงจะช่วยเร่งในการเกิดกระบวนการขึ้น ในด้านของของเหลวจะแพร่โมเลกุลเข้าสู่แก๊สในลักษณะกระบวนการกลับกัน ในกระบวนการดูดซึมนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การดูดซึมทางกายภาพ (Physical absorption) และการดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption)

การดูดซึมทางกายภาพ (Physical absorption) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซึมในตัวทำละลายโดยใช้กฎของเฮนรี (Henry’s Law) ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและความดันของระบบ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึมได้ดีที่อุณหภูมิต่ำและความดันสูง โดยที่ตัวดูดซึมสามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความดัน ทำให้ใช้พลังงานที่ไม่สูงมาก ตัวดูดซึมที่ใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น เมทานอล ไดเมทิลอีเทอร์พอลิเอทิลีนไกลคอล และโพรพิลีน คาร์บอเนต เป็นต้น

การดูดซึมทางเคมี (Chemical absorption) ในกรณีที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมมีอยู่ต่ำ ต้องใช้ตัวดูดซึมที่มีแรงทางเคมีเพื่อให้เกิดการเลือกดูดซึมเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรด ตัวดูดซึมทางเคมีที่ใช้จึงมีคุณสมบัติเป็นเบส โดยตัวดูดซึมทางเคมีสามารถทำการฟื้นฟูสภาพได้ด้วยการให้ความร้อน แต่ต้องใช้พลังงานสูงกว่า เนื่องจากต้องทำลายพันธะทางเคมี ซึ่งตัวดูดซึมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ สารละลายที่มีอนุพันธุ์ของหมู่เอมีนและสารละลายแอมโมเนีย

จากรูปที่ 2.2 แสดงกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายเอมีน โดยมีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ หอดูดซึม (Absorber) และ หอคืนสภาพ (Stripper) แก๊สเสียที่เหลือจากการเผาไหม้จะถูกป้อนเข้ามายังหอดูดซึมที่มีสารละลายเอมีน

อยู่ภายใน โดยมีทิศทางการไหลแบบสวนทางกัน สารละลายเอมีนจะป้อนเข้าด้านบน ส่วนแก๊สผสมหลังการเผาจะป้อนเข้าทางด้านล่าง สารละลายเอมีนจะดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงได้เป็นสารละลายที่อิ่มตัวไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นสารละลายจะผ่านไปยังหอคืนสภาพเพื่อฟื้นฟูสภาพสารละลายเอมีนให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยสารละลายจะไหลสวนทางกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกถ่ายโอนมายังสายของไอน้ำ จากนั้นทำการลดอุณหภูมิของสายไอน้ำลงทำให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำกลายเป็นของเหลว แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะแยกออกมาได้



รูปที่ 2.2 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึมโดยใช้สารละลายเอมีน [13]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข้อดีของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึม

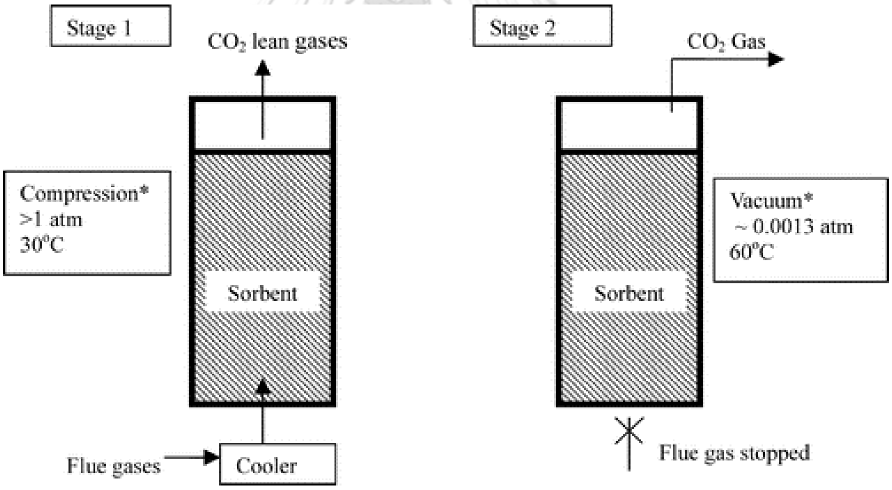
1. ความสามารถในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 95
2. สารละลายที่ใช้ในการดูดซึมสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
3. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้มีความบริสุทธิ์สูง
4. กระบวนการดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง (Continuous)

ข้อเสียของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึม

1. มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม
2. อัตราการกัดกร่อนเครื่องมือสูง
3. พลังงานที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสารละลายเอมีนสูง
4. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและซ่อมบำรุงสูง

2.2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อแยกสารที่ต้องการออกจากสารผสมในวัฏภาคของไหล (แก๊ส, ของเหลว) ในกระบวนการนี้มีองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน คือ หอดูดซับ (Adsorber) และหอคืนสภาพ (Desorber) โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกป้อนเข้าไปยังหอดูดซับ และเคลื่อนที่ผ่านตัวดูดซับของแข็งที่ถูกบรรจุไว้ในหอดูดซับ จากนั้นแก๊สที่ผ่านกระบวนการนี้แล้วจะถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ ส่วนตัวดูดซับของแข็งที่ใช้งานแล้วจะถูกนำไปฟื้นฟูสภาพในหอคืนสภาพ โดยการลดความดัน เรียกว่า Pressure Swing Adsorption (PSA) หรือ การเพิ่มอุณหภูมิเรียกว่า Temperature Swing Adsorption (TSA) ก่อนจะนำตัวดูดซับของแข็งกลับไปใช้ใหม่ แสดงดังรูป 2.3 โดยตัวดูดซับที่นิยมใช้จะเป็นอนุภาคของแข็งที่มีรูพรุนสูงที่หาได้จากธรรมชาติ เช่น ถ่าน (Coal) หรือ ตัวดูดซับที่ได้จากการสังเคราะห์ เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) โมเลกุลลาร์ซีฟ (Molecular sieves) และ ซีโอไลต์ (Zeolites) เป็นต้น



รูปที่ 2.3 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับ [14]

ข้อดีของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับ

1. กระบวนการไม่ซับซ้อน ตัวดูดซับของแข็งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
2. ตัวดูดซับของแข็งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
3. พลังงานที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่ำ
4. ตัวดูดซับเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

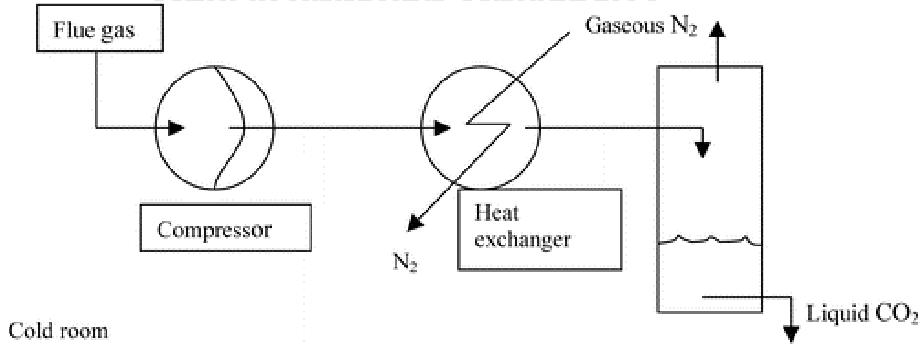
ข้อเสียของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับ

1. ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ
2. ตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous)

2.2.3 กระบวนการแยกด้วยไครโอเจนิค (Cryogenics)

การใช้ไครโอเจนิคในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเทคนิคที่เหมาะสมในกรณีที่แก๊สผสมมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 50 และพิจารณาสมบัติที่แตกต่างกันของสาร ทั้งอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการเปลี่ยน สถานะของสาร ก่อนเข้าสู่กระบวนการจะนำแก๊สเสียจากกระบวนการผลิตเพื่อกำจัด CO_x, SO_x, NO_x, แก๊สไฮโดรเจน และน้ำ ดังนั้นแก๊สที่ป้อนเข้า คือ แก๊สไนโตรเจน, แก๊สออกซิเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นนำไปลดอุณหภูมิเพื่อควบแน่นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้เปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว (อุณหภูมิต่ำกว่า -73.3 องศาเซลเซียส) เมื่อพิจารณาจุดควบแน่นพบว่า แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีจุดควบแน่นที่อุณหภูมิ 56.6 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 7.4 บรรยากาศ ซึ่งที่ภาวะดังกล่าว แก๊สไนโตรเจนจะยังคงอยู่ในสถานะแก๊สที่อุณหภูมิ -73.3 องศาเซลเซียส และจะป้อนแก๊สผสมเข้าสู่เครื่องเพิ่มความดัน (Compressor) และเครื่องถ่ายโอนความร้อน (Heat exchanger) ก่อนจะเข้าสู่หอกลั่นอย่างง่าย (Flash drum) ทำให้สามารถแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาจากแก๊สอื่น ๆ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของเหลวบริเวณด้านล่าง ส่วนแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนจะอยู่ในภาวะแก๊สและจะถูกปล่อยออกจากระบบต่อไป แสดงดังรูป 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.4 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไครโอเจนิค [14]

ข้อดีของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไครโอเจนิค

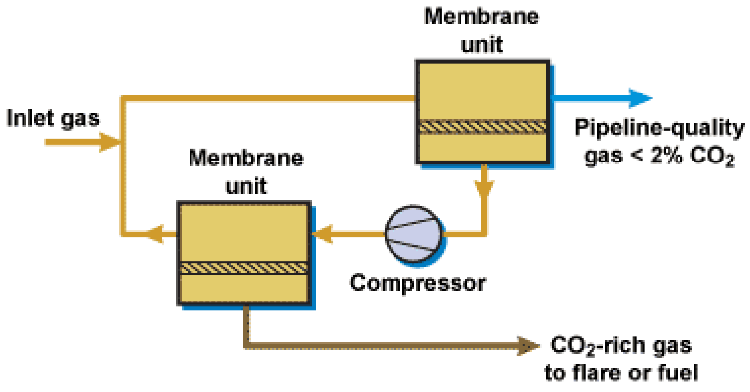
1. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกได้มีความบริสุทธิ์สูง
2. กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นเข้มข้นสูงได้
3. กระบวนการเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสียของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการไครโอเจนิค

1. มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการดำเนินการ
2. มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง
3. มีความเสี่ยงต่อการเกิดอันตรายในการดำเนินการ

2.2.4 กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane)

กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เมมเบรนทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (Selective barrier) ที่ยอมให้เฉพาะองค์ประกอบที่ต้องการแยกในแก๊สผสมซึมผ่านไปได้ ซึ่งการเลือกผ่านของเยื่อเลือกผ่านสำหรับแก๊สขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่น เช่น เมมเบรนชนิดพอลิเมอร์ (Polymeric membrane) เมมเบรนแบบมีรูพรุน (Porous membrane) เมมเบรนแบบเซรามิก (Microporous ceramic) คาร์บอน (Porous carbon) และเมมเบรนความหนาแน่นสูง (Dense membrane) ซึ่งเป็นได้ทั้งวัสดุที่มีรูพรุนและไม่มีรูพรุน โดยแก๊สผสมก่อนการแยกจะอยู่ในด้านที่เรียกว่า ด้านจ่าย (Feed หรือ Upstream side) ส่วนแก๊สที่ซึมผ่านออกมาจากเมมเบรนจะอยู่ในด้านซึมผ่าน (Permeate หรือ Downstream side) กระบวนการแพร่ (Diffusion) เกิดจากความเข้มข้นที่ต่างกันของสารละลายที่ตำแหน่ง 2 ตำแหน่ง ส่งผลให้เกิดแรงขับเคลื่อน ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายของโมเลกุล เพื่อลดความแตกต่างของความเข้มข้น, ความดันย่อย (Partial pressure), สนามไฟฟ้า (Electric field) หรืออุณหภูมิ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแรงผลัก (Driving force) ทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกเคลื่อนที่แพร่ผ่านเมมเบรนได้ แสดงดังรูป 2.5 ซึ่งเมมเบรนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมหลังการเผาไหม้ แยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สธรรมชาติ และแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สไฮโดรเจนก่อนการเผาไหม้ ในปัจจุบันมีการนำเมมเบรนไปใช้งานเชิงพาณิชย์ในอุตสาหกรรมอยู่มาก แต่ยังไม่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการใช้งานขนาดใหญ่ จึงมุ่งเป้าไปที่การศึกษาและพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนและภาวะที่ใช้ในการดำเนินการที่เหมาะสม



รูปที่ 2.5 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเยื่อเลือกผ่าน [15]

ข้อดีของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเยื่อเลือกผ่าน

1. สามารถแยกแก๊สที่มีปริมาตรแก๊สผสมเริ่มต้นน้อย
2. มีขนาดเล็กสะดวกในเคลื่อนย้าย
3. เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสียของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเยื่อเลือกผ่าน

1. เกิดการอุดตันบนผิวหน้าของเยื่อเลือกผ่านได้ง่าย
2. มีต้นทุนในการผลิตสูง
3. มีอายุในการใช้งานสั้น
4. มีความจำเพาะในการแยกแก๊สค่อนข้างต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานในเบื้องต้นสำหรับกระบวนการการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวร่วม (Interface) ระหว่างวัฏภาค (Phase) การดูดซับจะเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างสาร 2 สถานะ โดยที่มีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ เช่น แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง ซึ่งมีการสัมผัสกันโดยตรงและอาศัยการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารที่ต้องการแยก โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (Adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (Surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ

ในกระบวนการแยก สารตัวดูดซับจะถูกบรรจุอยู่ในคอลัมน์ เมื่อมีของไหลไหลผ่านตัวดูดซับจะเกิดการดูดซับ สารถูกดูดซับจะแยกออกจากของไหล และเมื่อตัวดูดซับอิ่มตัวไปด้วยสารถูกดูดซับ

จนกระทั่งไม่สามารถดูดซับต่อไปได้ ตัวดูดซับจะต้องทำการคายซับ (Desorption) ให้สารถูกดูดซับคายออกจากตัวดูดซับเพื่อสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้งานใหม่ได้ โดยตัวดูดซับจะทำหน้าที่ดูดซับและถูกนำไปคายซับเป็นวัฏจักรของการดูดซับ

2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับเกิดขึ้นด้วยแรงระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยแบ่งแรงออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงทางกายภาพและแรงทางเคมี การดูดซับจึงจำแนกออกเป็น 2 ประเภท ตามชนิดของแรงที่ดูดจับโมเลกุลของสารถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ ดังนี้

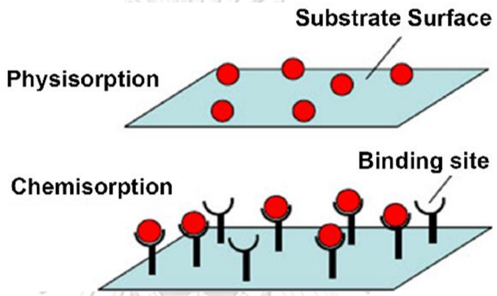
1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพอาศัยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน ๆ เรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงลอนดอน (London force) และแรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) ซึ่งแรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับตัวดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้ามาติดอยู่ที่ตัวดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพจะไม่มีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับ (Heat of adsorption) มีค่าน้อยกว่า 15-20 กิโลจูลต่อโมล ทำให้สามารถกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการ (Reversibility) ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ ทำให้สามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย การดูดซับอาจเกิดซ้อนกันได้หลายชั้น (Multilayer adsorption) โดยแต่ละชั้นโมเลกุลจะซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกดูดซับในสารละลาย ซึ่งลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิปกติ หรืออุณหภูมิบรรยากาศทั่วไป และจะเกิดได้ดีมากยิ่งขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorption)

การดูดซับทางเคมีอาศัยการเกิดพันธะเคมีหรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะ

โคเวเลนซ์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้มีการคายพลังงานความร้อนของการดูดซับออกมาสูงถึง 50-400 กิโลจูลต่อโมล จึงทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับทำได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) โดยการดูดซับประเภทนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะบนผิวของตัวดูดซับและเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer adsorption) เท่านั้น ซึ่งลักษณะสำคัญของการดูดซับประเภทนี้ คือ การดูดซับมักเกิดขึ้นได้ดีหรือได้เร็วที่อุณหภูมิสูง ๆ โดยการดูดซับเชิงกายภาพและการดูดซับเชิงเคมี แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การดูดซับเชิงกายภาพและการดูดซับเชิงเคมี [16]

ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีสรุปดังแสดงในตารางที่ 2.1 เมื่อพิจารณาจากค่าความร้อน อุณหภูมิ แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล การผันกลับของปฏิกิริยา การดูดซับบนแก๊ส–ของแข็ง พลังงานกระตุ้น และรูปแบบจำนวนชั้นของสารดูดซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [17]

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

2.3.2 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (External diffusion) เป็นขั้นตอนกลไกการเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเข้าไปถึงตัวดูดซับ โดยบนพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่แทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าไปเกาะสะสมบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

2. การแพร่ภายใน (Internal or Pore diffusion) เป็นขั้นตอนที่ตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่แทรกผ่านเข้าถึงช่องว่างภายในตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

3. ปฏิกิริยาบนพื้นผิว (Surface reaction) เป็นขั้นตอนที่เกิดการดูดซับ โดยโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะดูดติดที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากกว่าขั้นตอนการแพร่

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (Size and surface area)

อัตราของการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ทำให้ตัวดูดซับที่มีลักษณะเป็นผงมีอัตราในการดูดซับสูงกว่าสารดูดซับที่มีลักษณะเป็นเกล็ด พื้นที่ผิวของสารดูดซับส่งผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าจะให้ค่าความสามารถในการดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวต่ำกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) ขนาดของตัวถูกดูดซับบนผิวของสารดูดซับ

ตัวถูกดูดซับที่มีขนาดของอนุภาคเล็กจะถูกดูดซับได้เร็วกว่าตัวถูกดูดซับที่มีขนาดของอนุภาคใหญ่ ส่วนใหญ่การดูดซับจะเกิดภายในรูพรุนของตัวดูดซับ และจะเกิดได้ดีเมื่อตัวถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของตัวดูดซับ

3) อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ นั่นคือ อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ และจะลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction)

4) ความเร็วในการผสม (Mixing speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม Film diffusion หรือการแพร่ผ่านรูพรุน Pore diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนในระบบอันเกิดจากความเร็วในการผสมของของไหลในระบบ ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก ทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าไปหาตัวดูดซับได้ยาก ทำให้ Film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้าม ถ้าระบบมีความปั่นป่วนสูง ฟิล์มที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะไม่สะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่เข้าไปหาตัวดูดซับได้ง่ายขึ้นและเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุน ทำให้ Pore diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

5) ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะถูกดึงออกจากน้ำและไปเกาะติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งสารที่ละลายน้ำได้ หรือแตกตัวเป็นไอออนจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่น จึงยากต่อการดูดซับ ส่วนสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับได้ดี แต่ทั้งนี้ยังมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดที่เกาะติดผิวตัวดูดซับได้ยากเช่นกัน

6) ค่าพีเอช (pH)

ค่า pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของตัวถูกดูดซับเป็นไอออน หรือมีอิทธิพลต่อการละลายน้ำของตัวถูกดูดซับ ทำให้ความสามารถในดูดซับของตัวดูดซับแตกต่างกัน [18]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.4 ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับเป็นสารที่มีความสามารถในการดูดซับสารอื่นไว้บนผิวได้ และมักเป็นสารที่มีพื้นที่ผิวมาก หรือมีรูพรุนภายในมาก ในตัวดูดซับแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน การเลือตัวดูดซับที่เหมาะกับการใช้งานจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ ความสามารถในการดูดซับนอกจากจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะแล้ว ยังขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของรูพรุน (Pore size distribution) อีกด้วย ช่วงของการกระจายขนาดของรูพรุนนั้นถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ [19]

- รูพรุนขนาดใหญ่ (macropores): มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร
- รูพรุนขนาดกลาง (mesopores): มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-50 นาโนเมตร
- รูพรุนขนาดเล็ก (micropores): มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร

การดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่รูพรุนขนาดเล็กเนื่องจากการโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะอยู่ใกล้กับผนังของตัวดูดซับมาก ส่งผลให้มีแรงดึงดูดที่มากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้การที่ตัวดูดซับมีรูพรุนขนาดเล็กมาก จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก เมื่อเทียบกับรูพรุนขนาดอื่น ๆ การดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนขนาดเล็กเป็นการดูดซับที่เรียกว่า การเติมเต็มในรูพรุน (Pore filling) ส่วนรูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่จะมีผลต่อการดูดซับแก๊สน้อยมาก แต่จะมีความสำคัญถ้าหากตัวถูกดูดซับเป็นของเหลว รูพรุนขนาดกลางและรูพรุนขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นทางผ่านเพื่อนำแก๊สเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่ดีจึงต้องมีปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดที่เหมาะสม การเลือกใช้งานตัวดูดซับแต่ละชนิดจึงมีความแตกต่างกันตามจุดประสงค์ของการใช้งาน ตัวดูดซับ มีหลายชนิด อาทิ เช่น เรซินพอลิเมอร์ (Polymer resin), ตัวดูดซับประเภทแร่ดิน (Activated clay), ตัวดูดซับโลหะออแกนิคเฟรมเวิร์ค (MOF-based adsorbents), ตัวดูดซับโลหะแอลคาไลน์ในรูปสารประกอบคาร์บอเนต (Alkali metal carbonate based adsorbents), ตัวดูดซับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO-based adsorbents) และตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ (CaO-based adsorbents) เป็นต้น ตัวดูดซับที่มีการใช้งานกันมาก ได้แก่

1) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง มีความพรุนและพื้นที่ผิวมาก มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก สามารถใช้ในการดูดซับแก๊สหรือของเหลว และสามารถผลิตได้จากการเผาวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบและนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้น (Activation) ในสภาวะต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นรูพรุน ส่งผลให้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) ตัวดูดซับซีโอไลต์ (Zeolite-based adsorbents)

เป็นตัวดูดซับที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นโดยมีโครงสร้างหลายชนิด ทำให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันออกไปตามโครงสร้างของซีโอไลต์ ตัวดูดซับมีลักษณะเป็นผลึกและทนต่อความร้อนได้สูง มีความจำเพาะต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าแก๊สชนิดอื่น ๆ และสามารถดูดซับได้ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ

3) ตัวดูดซับซิลิกา (Silica-based adsorbents)

เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูง รูพรุนขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวของรูพรุนที่ดี สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ แต่ค่า

ความสามารถในการดูดซับค่อนข้างต่ำ โดยประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น และสามารถฟื้นฟูสภาพได้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นสารดูดความชื้น

4) ตัวดูดซับพอลิเมอร์ (Polymer-based adsorbents)

เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูง มีความจำเพาะต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างสูง ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ แต่ค่าความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นมาก เมื่อทำการดูดซับที่เพิ่มความดัน ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในเครื่องกรองน้ำ

5) ตัวดูดซับดินเหนียว (Clay-based adsorbents)

เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูง ราคาถูก และฟื้นฟูสภาพได้ง่าย อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับอยู่ในช่วง 75-85 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพอยู่ในช่วง 100-155 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในกระบวนการแยกสารที่เกี่ยวข้องกับน้ำมัน

6) ตัวดูดซับโลหะออแกนิคเฟรมเวิร์ค (MOF-based adsorbents)

เป็นตัวดูดซับที่มีโครงสร้างของโลหะทรานซิชัน และลิแกนของสารประกอบอินทรีย์ ทำให้มีศักยภาพในการทำงานสูง และเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่และขนาดย่อม

7) ตัวดูดซับโลหะแอลคาไลน์ในรูปสารประกอบคาร์บอเนต (Alkali metal carbonate based adsorbents)

เป็นตัวดูดซับในรูปสารประกอบของแข็งเป็นตัวดูดซับที่สามารถเกิดปฏิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ภายใต้สภาวะ ที่มีความชื้น และได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต โดยนิยมใช้โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง ราคาถูก และสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำประมาณ 50-100 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพไม่สูงมาก นอกจากนี้ อาจมีการเติมสารเติมแต่งในกระบวนการเตรียมตัวดูดซับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับ

8) ตัวดูดซับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO-based adsorbents)

เป็นตัวดูดซับที่มีสภาวะเป็นเบส ซึ่งจะทำให้สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีความเป็นกรดอ่อนได้ดี อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในช่วง 200-400 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่ำ จึงใช้พลังงานในการฟื้นฟูสภาพต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

9) ตัวดูดซับแคลเซียมออกไซด์ (CaO-based adsorbents)

เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่สูง ราคาถูก สามารถใช้ได้ทั้งกระบวนการดูดซับก่อนการเผาไหม้ และ หลังการเผาไหม้ นอกจากนี้ยังมีอัตราการเกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง จึงช่วยลดระยะเวลาในการดำเนินการได้

2.4 ตัวรองรับ (Support)

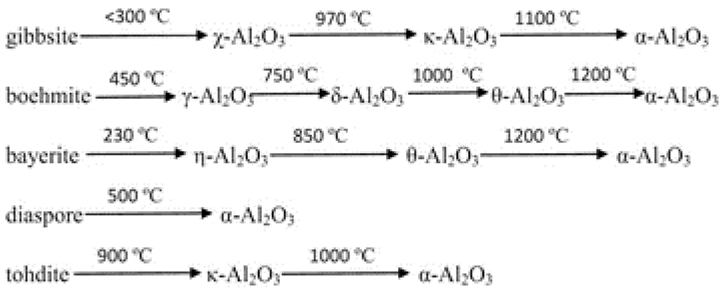
ตัวรองรับที่ใช้กันส่วนใหญ่เป็นโลหะออกไซด์หรือคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวสูง ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนเพียงพอสำหรับการเตรียมวัฏภาคกัมมันต์ (Active phase) ที่มีการกระจายตัวดี อีกทั้งยังเสริมเสถียรภาพแก่ผลึกวัฏภาคกัมมันต์ โดยตัวรองรับที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา คาร์บอน ไททาเนียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และซีโอไลต์ เป็นต้น โดยมีพื้นที่ผิวตั้งแต่ 1.5-1,500 ตารางเมตร/กรัม ขนาดรูพรุนตั้งแต่ 0.4-2,000 นาโนเมตร และปริมาตรรูพรุนอยู่ในช่วง 0.4-1.0 มิลลิลิตร/กรัม ซึ่งสมบัติของตัวรองรับส่งผลต่อการจัดเรียงโครงสร้างและขนาดผลึกของวัฏภาคกัมมันต์ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา และการเสื่อมสภาพ (Deactivation) [19]

2.4.1 อะลูมินาหรืออะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)

เป็นตัวรองรับที่มีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นผลึก (Crystalline) และอสัณฐาน (Amorphous) โดยโครงสร้างและสมบัติของอะลูมินาจะแตกต่างกันไปตามวิธีการเตรียม ความบริสุทธิ์ การกำจัดน้ำ (Dehydration) และการเผาในที่อับอากาศ (Calcination) อะลูมินาจะพบได้ในโครงสร้างแบบ แอลฟา (α) แกมมา (γ) และเบต้า (β) ในอุณหภูมิที่ไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส อะลูมินาจะอยู่ในโครงสร้างแบบแกมมา หากนำไปเผาให้อุณหภูมิสูงถึง 1,150-1,200 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนอยู่ในโครงสร้างแบบแอลฟา แต่เบต้าอะลูมินาจะอยู่ในโครงสร้างของสารประกอบโซเดียมอะลูมิเนต (Sodium aluminate) เนื่องจากสมบัติของอะลูมินาที่มีความแข็งสูง มีจุดหลอมเหลวที่สูง มีความหนาแน่นสูง มีความต้านทานต่อการขัดสีและสึกกร่อนสูง ทนต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดี และมีเสถียรภาพทางความร้อนสูง จึงสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้หลายประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น อุตสาหกรรมเครื่องขัดถู (Abrasive) อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ อุตสาหกรรมกระดาษ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

อุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นต้น ซึ่งแนวโน้มในการนำอะลูมินาไปใช้งานก็ได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนวัฏภาคของอะลูมินา [20]

2.4.2 ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)

เป็นตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูงและได้รับความนิยมในการนำไปใช้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นผลึกของแข็ง (Crystalline) ที่มีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบ แบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คือ ควอตซ์ (Quartz), ไทรดิไมท์ (Tridymite) และคริสโตบาไลท์ (Cristobalite) โดยที่รูปแบบผลึกทั้งสามชนิดสามารถเปลี่ยนไปมาได้โดยใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น และโครงสร้างอสัณฐาณ (Amorphous) ที่ไม่มีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบ มักจะอยู่ในรูปของไฮเดรต (Hydrate) และแอนไฮเดรต (Anhydrate) แบ่งออกได้ 3 ชนิด คือ ซิลิกาแก้ว (Silica glass), ซิลิกาเจล (Silica gel) และซิลิกาผง (Powder silica) แต่อย่างไรก็ตามการใช้ซิลิกาเป็นตัวรองรับยังไม่แพร่หลายเท่าอะลูมินา เนื่องจากซิลิกามีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่าในบรรยากาศต่าง ๆ และสามารถแปรสภาพเป็นไฮดรอกไซด์ที่ระเหยได้เมื่อสัมผัสกับไอน้ำที่อุณหภูมิสูง นอกจากนี้ยังขึ้นรูปเป็นเม็ดได้ยากกว่า

2.4.3 คาร์บอน (Carbon)

เป็นตัวรองรับที่ส่วนใหญ่เตรียมจากวัสดุธรรมชาติ เช่น เปลือกไม้ กะลา ถ่านหิน เป็นต้น โดยการไพโรไลซ์ (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ หรือไอน้ำ ทำให้สมบัติทางกายภาพและเคมีของคาร์บอนขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้และภาวะของไพโรไลซิส คาร์บอนที่ผลิตจากถ่านหินมีเนื้อค่อนข้างอ่อนและมีสิ่งปนเปื้อนสูง เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ เถ้าของโลหะหนัก ซึ่งส่งผลเสียต่อปฏิกิริยา ส่วนคาร์บอนที่ผลิตจากวัสดุประเภทไม้จะมีความบริสุทธิ์และทนทานต่อการกระแทกสูงกว่า กระบวนการ

ไพโรไลซ์ที่อุณหภูมิช่วง 800-1,500 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศแก๊สออกซิไดซ์ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ที่มีพื้นที่ผิวสูงถึง 1,000-1,500 ตารางเมตร/กรัม และรูพรุนขนาดเล็กในช่วง 0.5-1.0 นาโนเมตร จึงนิยมใช้สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenation) ของสารอินทรีย์ในอุตสาหกรรมไฟน์เคมิคอล (Fine chemicals) แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคาร์บอนเป็นตัวรองรับไม่สามารถทำการฟื้นฟูสภาพได้ด้วยการเผา ทำได้เพียงการล้าง (Washing) เพื่อชะเอาสารอินทรีย์ที่เกาะบนพื้นผิวออก

2.4.4 ไททาเนียมออกไซด์หรือไททาเนต (TiO_2)

เป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา มีพื้นที่ผิว 25-100 ตารางเมตร/กรัม เตรียมได้จากการตกตะกอนของสารละลายไททาเนตหรือการสลายตัวของไททาเนตอินทรีย์ (Organotitanate) หรือการใช้เทคนิคแอโรเจล (Aerogel) ไททาเนียมออกไซด์ประกอบด้วยโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบ คือ อนาเทส (Anatase), รูไทล์ (Rutile) และบรูไคต์ (Brookite) ซึ่งสามารถแปรสภาพได้เมื่อผ่านการเผา

2.4.5 การเลือกตัวรองรับ

ตัวรองรับทำหน้าที่จับยึดวัฏภาคกัมมันต์ให้กระจายตัวได้ดี เพิ่มพื้นที่ผิวกัมมันต์ในการเร่งปฏิกิริยา เพิ่มเสถียรภาพในการใช้งาน และเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการเลือกใช้งานต้องพิจารณาลักษณะเด่นของวัสดุที่ต้องการใช้งาน ได้แก่ ความเฉื่อยของปฏิกิริยา พื้นที่ผิวจำเพาะ ความพรุน สมบัติเชิงกล เสถียรภาพในภาวะดำเนินการของปฏิกิริยา การฟื้นฟูสภาพ และราคา [19]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ

วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับนั้นมีหลายวิธี แต่ละวิธีจะให้สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแตกต่างกันทั้งประสิทธิภาพ ร้อยละผลได้ และความยากง่ายของการเตรียม เป็นต้น ซึ่งวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการพอกพูนโลหะกัมมันต์บนตัวรองรับซึ่งส่งผลโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วยการฝังตัวหรืออิมเพรกเนชัน การตกตะกอน การตกตะกอนร่วม และการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายในห้องปฏิบัติการ [19]

2.5.1 การฝังตัวหรืออิมเพรกเนชัน (Impregnation)

เป็นวิธีการพื้นฐานที่ง่ายและสะดวกในการกระจายวัฏภาคกัมมันต์บนพื้นผิวของตัวรองรับ จึงนิยมใช้ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรม เหมาะสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้โลหะมีตระกูลซึ่งมีราคาแพง เริ่มจากสารตั้งต้นโลหะกัมมันต์ต้องละลายน้ำได้ดีหรือตัวทำลายอื่น ๆ ที่เหมาะสม เช่น เกลือโลหะไนเตรต และเกลือของสารอินทรีย์ เนื่องจากเมื่อนำเกลือดังกล่าวไปเผา เกลือจะสลายตัวเป็นสารประกอบโลหะออกไซด์ได้ ตัวรองรับต้องผ่านการอบหรือเผาเพื่อไล่ความชื้นหรือสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวออกก่อน จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลายโลหะลงบนตัวรองรับพร้อมกวนผสมให้สารละลายกระจายอย่างทั่วถึง เพื่อให้ตัวรองรับอิ่มตัวด้วยสารละลาย หลังจากนั้นนำไปอบแห้ง (Drying) ที่อุณหภูมิในช่วง 80-150 องศาเซลเซียส ในภาวะสุญญากาศ จะเกิดการพอกพูนสารตั้งต้นโลหะบนตัวรองรับ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้มักจะอยู่ในรูปที่เป็นผง

ปริมาตรและความเข้มข้นของสารละลายโลหะส่งผลต่อปริมาณและการกระจายตัวของอนุภาคโลหะที่ติดบนผิวของตัวรองรับ โดยทั่วไปการเคลือบฝังตัวรองรับแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ โดยใช้ปริมาตรสารละลายเทียบกับกับปริมาตรของรูพรุนของตัวรองรับเป็นเกณฑ์ดังนี้

1) Dry impregnation เป็นวิธีการกำหนดปริมาตรของสารละลายให้น้อยกว่าปริมาตรของรูพรุนของตัวรองรับ ทำให้โลหะกัมมันต์สามารถเข้าไปในรูพรุนของตัวรองรับได้เกือบทั้งหมด ซึ่งเหมาะแก่การเติมโลหะกัมมันต์ที่มีราคาสูง เช่น แพลทินัม (Pt), แพลเลเดียม (Pd) และเงิน (Ag) เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) Incipient wetness impregnation เป็นวิธีการกำหนดปริมาตรของสารละลายที่ใช้ให้ใกล้เคียงกับปริมาตรรูพรุนของตัวรองรับเพื่อให้โลหะกัมมันต์ทั้งหมดในสารละลายเติมเต็มภายในรูพรุนพอดี

3) Wet impregnation เป็นวิธีการกำหนดปริมาตรของสารละลายให้มากกว่าปริมาตรของรูพรุนของตัวรองรับ สามารถเตรียมได้ง่าย แต่จะมีผลึกตกค้างอยู่บนผิวภาชนะที่ใช้เตรียม

2.5.2 การตกตะกอน (Precipitation)

เป็นวิธีการพอกพูนโลหะกัมมันต์ที่ละลายในตัวกลางของเหลวลงบนตัวรองรับ โดยทำให้ไอออนของโลหะกัมมันต์ตกตะกอนอยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ (Metal hydroxide) หรือ โลหะคาร์บอเนต (Metal carbonate) ตัวรองรับมีลักษณะเป็นผงหรือเม็ด นำไปผ่าน

การอบหรือเผาเพื่อไล่ความชื้นหรือสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวออก หลังจากนั้นกวนผสมกับสารละลายเกลือโลหะกัมมันต์ จะได้ของผสมแขวนลอย (Slurry) และค่อย ๆ หยดสารละลายเบสเพื่อปรับค่ากรด-เบส ดังนั้น ไอออนของโลหะที่เป็นสารตั้งต้นจะตกตะกอนภายในรูพรุนของตัวรองรับ เมื่อนำไปอบแห้งเพื่อไล่ตัวทำละลายและเผาเพื่อสลายเกลือโลหะ ตะกอนโลหะกัมมันต์จะแปรสภาพเป็นโลหะออกไซด์บนตัวรองรับ ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้ คือ สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโลหะกัมมันต์สูงถึงร้อยละ 10-50 โดยน้ำหนัก แต่ยังมีการกระจายตัวของโลหะกัมมันต์อย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังมีพื้นที่ผิวและกัมมันต์ภาพสูง

2.5.3 การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)

เป็นวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยประกอบด้วยโลหะออกไซด์มากกว่า 1 ชนิด ขึ้นไปผสมกัน หรืออยู่ในรูปโลหะออกไซด์ผสมที่เป็นสารละลายของแข็ง ซึ่งหลักการของการตกตะกอนร่วมจะคล้ายคลึงกับการตกตะกอน คือ มีการใช้สารละลายเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ทำหน้าที่เป็นตัวตกตะกอนไอออนของโลหะให้อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนต โดยสารตั้งต้นของโลหะทั้งหมดจะละลายรวมกันเป็นสารละลายโลหะผสม (Mixed metal solution) จากนั้นค่อย ๆ หยดสารละลายเบสลงในสารละลายโลหะหรือหยดพร้อม ๆ กันได้ จะทำให้เกิดตะกอนของโลหะผสม นำตะกอนไปบ่ม (Aging) เพื่อให้เกิดผลึกของสารประกอบโลหะผสม หลังจากนั้นกรองเพื่อแยกตะกอน ล้างด้วยน้ำหรือตัวทำละลาย อบแห้งและเผา ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้ คือ สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการกระจายตัวของโลหะกัมมันต์อย่างสม่ำเสมอหรือผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับโลหะชนิดอื่น

2.5.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

ตัวรองรับที่สามารถนำมาใช้ในการเตรียมโดยวิธีนี้จะต้องมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ เมื่อนำตัวรองที่มีหมู่ไฮดรอกซิลหรือโปรตอนบนพื้นผิวมาผสมกับสารละลายเกลือโลหะกัมมันต์ แคตไอออนและแอนไอออนที่อยู่ในสารละลายจะถูกดูดซับบนตำแหน่งเหล่านั้น โดยทั่วไปปริมาณการดูดซับไอออนโลหะที่เกิดขึ้นบนตัวรองรับส่วนใหญ่มีค่าไม่เกินร้อยละ 2-3 โดยน้ำหนัก การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและสะดวกในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการกระจายตัวของโลหะกัมมันต์อย่างสม่ำเสมอและยึดเหนี่ยวอย่างแข็งแรงบนผิวของตัวรองรับ ทั้งนี้เนื่องจากไอออนของโลหะจะหยุดนิ่งอยู่

บนตัวรองรับนั้น ดังนั้นปริมาณการฉาบจึงขึ้นอยู่กับปริมาณไอออนของตัวรองรับที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะได้ วิธีการนี้จึงเหมาะสำหรับการพอกพูนวัฏภาคกัมมันต์ที่เป็นโลหะมีตระกูลราคาแพง เช่น แพลทินัม และแพลเลเดียมเป็นต้น เนื่องจากใช้ปริมาณสารตั้งต้นโลหะน้อย

2.6 วิธีการฟื้นฟูตัวดูดซับของแข็ง

ในกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ประกอบด้วยขั้นตอนของการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพ เมื่อใช้ตัวดูดซับไปถึงระยะเวลาหนึ่ง ตัวดูดซับจะอิ่มตัวด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงจนไม่สามารถดูดซับได้อีก ดังนั้นการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับเพื่อรักษาสมรรถภาพของการดูดซับที่เสื่อมไปและนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ จึงเป็นบทบาทสำคัญของตัวดูดซับ

แนวทางที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่เสื่อมสภาพ สามารถแบ่งออกเป็น 4 แนวทาง ได้แก่

1. การฟื้นฟูกัมมันตภาพของตัวดูดซับเพื่อให้กลับมาใช้งานได้อีก เป็นแนวทางที่ควรทำอย่างมากที่สุดสำหรับอุตสาหกรรมที่มีการใช้ตัวดูดซับในปริมาณมากและการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ง่าย นอกจากนี้การฟื้นฟูสภาพช่วยเพิ่มความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการอีกด้วย
2. การนำไปประยุกต์ในปฏิกิริยาหรืองานด้านอื่น ๆ
3. การแยกโลหะกัมมันต์หรือองค์ประกอบที่มีราคาแพงออกเพื่อนำกลับมาใช้ซ้ำ เมื่อไม่สามารถฟื้นฟูกัมมันตภาพตัวดูดซับได้อีก
4. การทิ้งตัวดูดซับที่เสื่อมสภาพ มักเป็นทางเลือกสุดท้าย และขึ้นกับความคุ้มค่าและข้อกำหนดด้านสิ่งแวดล้อม ต้องใช้ความระมัดระวังในการกำจัดและมีค่าใช้จ่ายสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิธีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ใช้แล้ว มีหลายทางเลือกด้วยกัน ดังนี้

1. กระบวนการสลับอุณหภูมิ (Temperature/Thermal Swing Adsorption)
2. กระบวนการสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption)
3. การใช้ไอน้ำที่มีความดันต่ำ
4. การใช้อุณหภูมิสูงที่มีไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นสิ่งสำคัญต่อการฟื้นฟูสภาพ
5. การเปลี่ยนสัมพรรคภาพ (Affinity) ระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับโดยสารเคมี
6. การสกัดตัวถูกดูดซับโดยสารละลายเข้มข้น
7. การเผาในที่อับอากาศ (Calcination)

ณ ที่นี้จะขอกล่าววิธีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการสลับอุณหภูมิ (Temperature/Thermal Swing Adsorption) และกระบวนการสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption)

2.6.1 กระบวนการสลับอุณหภูมิ (Temperature/Thermal Swing Adsorption, TSA)

เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ในการดูดซับ (Adsorption) และคายซับ (Desorption) กล่าวคือ การดูดซับจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ขณะที่การคายซับหรือการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ (Regeneration) จะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลเพิ่มขึ้น เมื่อพลังงานจลน์ของโมเลกุลมีค่าสูง ส่งผลให้โมเลกุลสามารถออกจากรูพรุนของตัวดูดซับได้ง่ายขึ้น ทำให้ตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยกระบวนการจะใช้เครื่องปฏิกรณ์อย่างน้อย 2 เครื่อง ซึ่งภายในเครื่องปฏิกรณ์มีตัวดูดซับบรรจุอยู่ เริ่มต้นจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ 1 จะถูกควบคุมไว้ที่อุณหภูมิต่ำและผ่านแก๊สที่ต้องการดูดซับเข้าไป เมื่อตัวดูดซับดูดซับเต็มความสามารถแล้ว ระบบวาล์วจะเปลี่ยนแก๊สให้ไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่ 2 แทน ซึ่งจะทำให้การดูดซับดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง และในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์ที่ 2 ทำการดูดซับสารอยู่นั้น เครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่ 1 จะถูกให้ความร้อนเพื่อทำการคายซับกับสารที่ถูกดูดซับไว้ และเมื่อตัวดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่ 2 ดูดซับเต็มความสามารถ เครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่ 1 ก็พร้อมที่จะใช้เพื่อการดูดซับในรอบต่อไปโดยการลดอุณหภูมิลง ทำเช่นนี้สลับกันไปเกิดเป็นวัฏจักร ทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าสูง-ต่ำสลับกันไป

ทั้งนี้ความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์สามารถพิจารณาได้จากกราฟ Breakthrough ซึ่งแสดงสัดส่วนความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในแก๊สขาออกจากเครื่องปฏิกรณ์เทียบกับเวลาหรืออัตราการไหลของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการดูดซับ ในช่วงแรกจะไม่มีสารที่ต้องการดูดซับในแก๊สขาออกเลย เนื่องจากตัวดูดซับยังมีความสามารถเพียงพอสำหรับการดูดซับสารที่ต้องการดูดซับ แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเริ่มพบสารที่ต้องการดูดซับออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ และในที่สุดเมื่อตัวดูดซับไม่มีพื้นที่สำหรับการดูดซับเหลืออยู่หรือดูดซับเต็มความสามารถแล้ว สารที่ต้องการดูดซับทั้งหมดจะออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่วไป การดำเนินการจะไม่ปล่อยให้เกิดการดูดซับจนเต็มความสามารถ เนื่องจากจะทำให้มีสารที่ต้องการดูดซับปนเปื้อนออกไปกับแก๊สขาออก แต่จะเปลี่ยนเครื่องปฏิกรณ์เมื่อเริ่มมีสารที่ต้องการดูดซับ

ปนเปื้อนออกมาไม่เกินระดับความเข้มข้นที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน โดยเราเรียกเวลา หรือปริมาณสารที่สามารถป้อนเข้าในกระบวนการดูดซับนี้ว่า Break Point ทั้งนี้ค่า break point จะขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ อัตราการป้อนแก๊ส ความเข้มข้นของสารที่ต้องการดูดซับ และค่าความเข้มข้นจำกัดที่กำหนดไว้

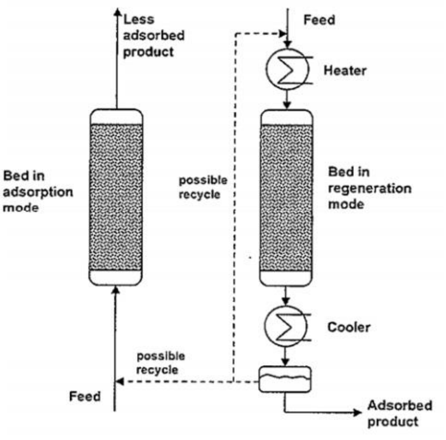
ตัวอย่างการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมของกระบวนการสลับอุณหภูมิในอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะใช้ในการดูดซับสารที่มีความเสถียรต่อความร้อน เช่น การแยกน้ำจากแก๊ส ในกระบวนการที่ใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากสามารถดูดซับน้ำได้ดีโดยไม่ดูดซับไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และยังใช้ในการดูดซับน้ำจากฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) เนื่องจากมีรูพรุนขนาดเล็กจึงไม่ดูดซับฟอร์มาลดีไฮด์ ทั้งที่เป็นสารมีขั้วเช่นกัน นอกจากนั้นกระบวนการสลับอุณหภูมิยังสามารถใช้ในการแยกน้ำจากแก๊สกรด (Acid gas) และสารละลายคลอริเนตเต็ด (Chlorinated solvent) รวมทั้งการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จากแก๊สธรรมชาติ และการแยก SO_x และ NO_x จากอากาศ

ข้อดีของกระบวนการสลับอุณหภูมิ

1. มีความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนสูงทั้งการดูดซับแบบกายภาพและการดูดซับแบบเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ
2. สามารถนำพลังงานความร้อนที่ได้จากกระบวนการดูดซับหรือพลังงานความร้อนอื่น ๆ ที่ได้จากในระบบมาใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับได้

ข้อเสียของกระบวนการสลับอุณหภูมิ

1. ใช้เวลานานกว่าจะให้อุณหภูมิถึงค่าที่กำหนดไว้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ
2. ต้องการแก๊สบริสุทธิ์จำนวนมาก
3. ค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องติดตั้งระบบทำความเย็น



รูปที่ 2.8 กระบวนการสลับอุณหภูมิ [4]

2.6.2 กระบวนการสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption, PSA)

เป็นกระบวนการแยกสารที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ให้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์สูง ซึ่งเป็นกระบวนการในลักษณะเดียวกันกับกระบวนการสลับอุณหภูมิ แต่อาศัยหลักการที่สารจะดูดซับได้ดีภายใต้สภาวะความดันสูงแต่จะคายซับหรือฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ (Regeneration) ภายใต้สภาวะความดันต่ำ ซึ่งความดันสูงที่กล่าวนี้ อาจหมายถึงความดันบรรยากาศเทียบกับสุญญากาศ (ความดันต่ำ) หรืออาจหมายถึงความดันที่ 20 atm เทียบกับความดันบรรยากาศ (ความดันสูง) ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดชองสารที่ต้องการดูดซับ โดยกระบวนการสลับความดันนี้เหมาะสมที่จะใช้กับการดูดซับสารที่มีความดันได้สูงหรือการดูดซับในสถานะแก๊สที่อุณหภูมิห้อง และสามารถใช้กับสารป้อนที่มีความเข้มข้นของสารที่ต้องการดูดซับสูง เนื่องจากการดูดซับของแก๊สที่มีความดันไอสูง มักมีความแข็งแรงของการดูดซับ (Adsorption strength) ที่ไม่ดี การคายซับจึงทำได้ง่ายกว่าการดูดซับ กล่าวคือจะใช้เวลาในการดูดซับนานกว่าการคายซับ นอกจากนี้ความดันยังมีผลต่อสภาวะสมดุลในการดูดซับสารที่เป็นของเหลวน้อยมาก

กระบวนการสลับความดัน มักประกอบด้วยถังปฏิกรณ์มากกว่า 2 เครื่องต่อกันแบบอนุกรม โดยอาจมีถังปฏิกรณ์ที่กำลังดูดซับมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่กำลังคายซับ เพื่อควบคุมให้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับและการคายซับ โดยสารที่ถูกดูดซับจะคายซับออกจากตัวดูดซับโดยการลดความดัน โดยทั้งสองขั้นตอนนี้จะทำงานสลับกัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการดูดซับจะมีความบริสุทธิ์สูง เรียกว่า ราฟฟิเนต (Raffinate) ส่วนสารที่คายออกมาจากตัวดูดซับ เรียกว่า เอกซ์แทรค (Extract)

หลักการทำงานพื้นฐานของระบบดูดซับแบบสลับความดันเป็นดังนี้

1. การเพิ่มความดันด้วยสารป้อน (Feed pressurization) คือ การเพิ่มความดันในคอลัมน์ดูดซับด้วยไอของสารป้อนหรือผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนตเพื่อปรับสภาวะของระบบ

2. การดูดซับที่ความดันสูง (High pressure adsorption) เป็นขั้นตอนที่ความดันในคอลัมน์ดูดซับมีค่าสูงและตัวดูดซับสามารถดูดซับสารได้มากที่สุด

3. การลดความดันเป่าไล่ (Low pressure purge) คือ การไล่สารออกจากคอลัมน์โดยเป่าแบบไหลทิศทางเดียวหรือสวนทางกับสารป้อน

4. การคายซับที่ความดันต่ำกว่าความดันดำเนินการ ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดความดันให้เป็นสุญญากาศ

5. การปรับความดันโดยการปล่อยความดันจากคอลัมน์ที่มีความดันสูงไปยังคอลัมน์ที่มีความดันต่ำกว่า

6. การเพิ่มความดันด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์เพื่อปรับสภาวะความดันของระบบ

ลักษณะทั่วไปของระบบดูดซับแบบสลับความดัน

1. ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ในราฟฟิเนตได้จากการดูดซับจะมีความบริสุทธิ์สูง แต่จะไม่สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์เอกซ์แทรคจากการคายซับให้มีความบริสุทธิ์สูงได้ ต้องมีการปรับปรุงวิธีการซึ่งส่งผลให้กระบวนการมีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้วิธีการดูดซับเหมาะสำหรับการผลิตราฟฟิเนตมากกว่า

2. ผลได้ (Yield) การดูดซับแบบสลับความดันโดยทั่วไปจะให้ผลได้มีต่ำกว่าการแยกสารแบบอื่น เช่น การกลั่น การดูดซึม หรือการสกัด การเพิ่มผลผลิตทำได้โดยเพิ่มคอลัมน์ดูดซับเข้าไปในวัฏจักรดำเนินการ และเพิ่มปริมาณของวัสดุดูดซับ แต่ทั้งสองอย่างนี้ทำให้ค่าติดตั้งเพิ่มขึ้น ดังนั้นระบบดูดซับแบบสลับความดันจึงเหมาะสำหรับกระบวนการที่สารป้อนมีราคาถูก

3. ต้นทุนการติดตั้งและต้นทุนการดำเนินงาน ส่วนใหญ่แล้วแปรผันตรงกับกำลังการผลิตของกระบวนการ เมื่อพิจารณาต้นทุนพบว่า มีราคาสูงกว่าการกลั่น เนื่องจากการดูดซับแบบสลับความดันนี้ใช้พลังงานกลซึ่งมีราคาสูงกว่าพลังงานความร้อน และเมื่อพิจารณาในส่วนของต้นทุนการติดตั้ง การกลั่นจะมีราคาสูงกว่าระบบดูดซับแบบสลับความดันในช่วงกำลังการผลิตต่ำ และเริ่มคงที่เมื่อกำลังการผลิตเพิ่มขึ้น ดังนั้น เมื่อพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์ระบบดูดซับแบบสลับความดันเหมาะสำหรับกระบวนการที่มีกำลังการผลิตไม่สูงมากนัก

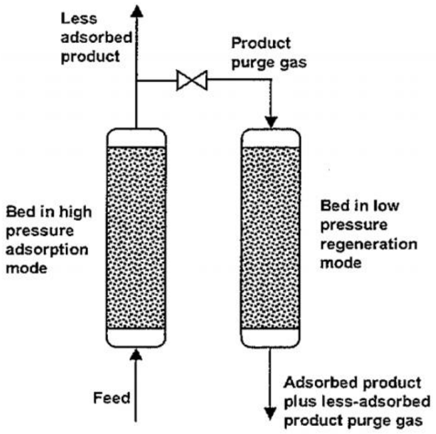
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ข้อดีของกระบวนการสลับความดัน

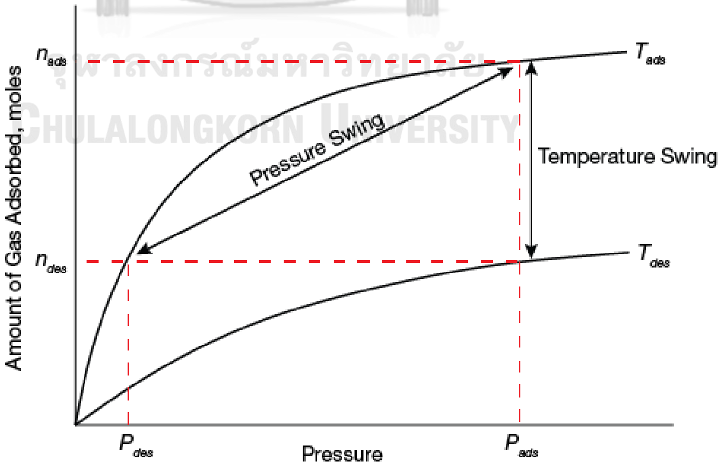
1. ตัวดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน
2. การใช้พลังงานความร้อนในระบบต่ำกว่ากระบวนการสลับอุณหภูมิ
3. ใช้ระยะเวลาในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับไม่นาน

ข้อเสียของกระบวนการสลับความดัน

1. ความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่ำเมื่อเทียบกับกระบวนการสลับอุณหภูมิ
2. ใช้พลังงานจากปั๊มสุญญากาศในการลดความดัน



รูปที่ 2.9 กระบวนการสลับความดัน [4]



รูปที่ 2.10 การแกว่งของความดันและอุณหภูมิในกระบวนการสลับอุณหภูมิและกระบวนการสลับความดัน [4]

2.7 การก่อสภาพของไหล หรือ ฟลูอิไดเซชัน (Fluidization)

ปัจจุบันเทคโนโลยีต่าง ๆ ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ ประหยัดพลังงาน และลดของเสียและค่าใช้จ่ายให้สิ้นเปลืองน้อยที่สุด โดยรูปแบบการไหลของของไหลที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา เนื่องจากจะช่วยให้บรรลุวัตถุประสงค์ อาทิ ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น มีการผสมกันของสารตั้งต้นได้ดีขึ้น โดยใช้ระยะเวลาในการดำเนินการที่ต่ำลง และช่วยประหยัดต้นทุนในการดำเนินการ

กระบวนการฟลูอิไดเซชันเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้ของแข็งมีประพฤติกรรมคล้ายกับประพฤติกรรมของของไหล โดยเกิดจากแรงลอยตัว (Buoyancy force) ที่เพิ่มขึ้นจากของไหลที่เข้าสู่ระบบซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือแก๊ส โดยกระบวนการจะบรรจุของแข็งไว้ในคอลัมน์ และทำการป้อนของไหลเข้าด้านล่างของคอลัมน์ ไหลผ่านของแข็งที่บรรจุไว้แล้วออกจากกระบวนการทางด้านบนของคอลัมน์ ในขั้นแรกเมื่อป้อนของไหลเข้าสู่ระบบที่ความเร็วต่ำ ของแข็งที่อยู่ภายในระบบจะยังไม่มีการเคลื่อนที่ เมื่อเพิ่มความเร็วในการป้อนของไหลไปจนถึงค่า ๆ หนึ่ง ของแข็งจะเริ่มเกิดการขยับตัว และลอยขึ้นอย่างอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล กล่าวคือ มีการไหลหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายในเบด (Bed) หรือภายในหอทดลอง และการสัมผัสกันระหว่างของแข็งกับของไหลแต่ละชนิดจะส่งผลต่อลักษณะของช่วงการไหลแบบต่าง ๆ [21]

2.7.1 เบด (Bed)

หมายถึง พื้นที่ภายในหอการทดลองหรือเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกครอบคลุมด้วยอนุภาคของแข็ง ซึ่งของแข็งนั้นจะหยุดนิ่ง หรือเคลื่อนที่ จะมีระดับความสูงตั้งแต่แผ่นตะแกรงรองรับหรือแผ่นกระจายของไหล (Distributor) ไปจนถึงระดับสูงสุดที่ผิวหน้าของอนุภาค ในกระบวนการจะบรรจุอนุภาคของแข็งในหอทดลอง และป้อนของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลอง โดยของไหลที่ถูกป้อนอาจเป็นของเหลว หรือแก๊ส เมื่ออนุภาคของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดสัมผัสกับของไหลที่มีความเร็วเพิ่มขึ้น จะทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มขยับ โดยบริเวณผิวหน้าเบด จะเป็นบริเวณแรกที่อนุภาคของแข็งเริ่มขยับ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้อนุภาคของแข็งลอยตัวเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน และเมื่อเพิ่มความเร็วของไหล จนเม็ดของแข็งจะหลุดลอยออกจากหอทดลองไป ซึ่งในลักษณะนี้จะใช้เป็นการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ สามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ การขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatics transport) เช่น การลำเลียงผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ และการขนส่งด้วยของเหลว (Hydraulics transport) เช่น การขนส่งเม็ดแร่ [21]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.7.2 ประเภทของฟลูอิไดเซชัน

1) ฟลูอิไดเซชันแบบสองวัฏภาค (Two-phase fluidization)

เป็นการก่อสภาพของไหลที่เกิดในกระบวนการที่ประกอบด้วยวัฏภาค 2 วัฏภาค คือ ของแข็งและของไหล โดยของไหลอาจเป็นของเหลวหรือแก๊ส และสามารถแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท คือ ฟลูอิไดเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid-solids fluidization) และ ฟลูอิไดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง (Gas-solids fluidization)

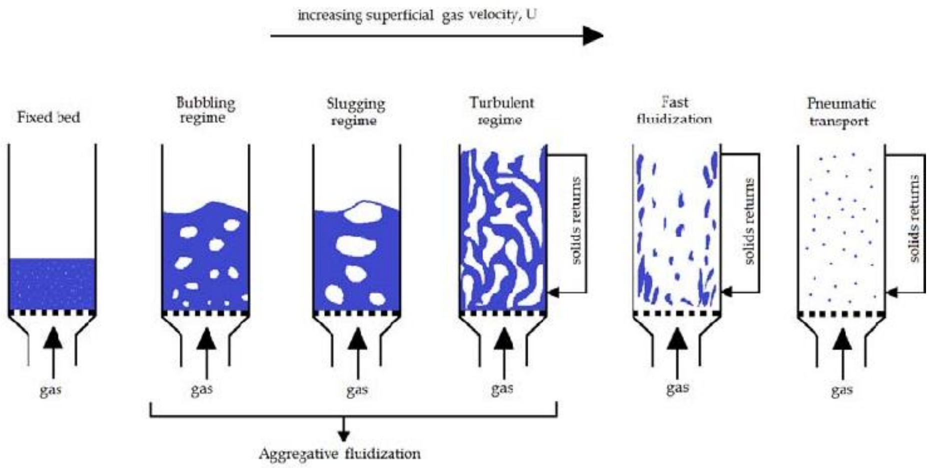
เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของของแข็งระหว่างกระบวนการฟลูอิไดเซชันแบบของเหลวของแข็งและฟลูอิไดเซชันแบบแก๊ส-ของแข็ง พบว่า กระบวนการที่ของไหลเป็นของเหลว การขยายตัวของอนุภาคของแข็งจะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous fluidization) การลอยตัวและการเคลื่อนที่จะเป็นไปอย่างช้า ๆ เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนกระบวนการที่ของไหลเป็นแก๊ส แก๊สจะทำให้อนุภาคของแข็งเกิดการลอยตัว และรวมตัวกันเกิดเป็นฟองแก๊สขึ้นภายในระบบ การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งจึงเป็นไปอย่างไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous fluidization) พฤติกรรมการไหลที่แตกต่างกันนี้ เกิดขึ้นจากสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน คือ ความหนืด (Viscosity) และความหนาแน่น (Density) ของของไหล

2) ฟลูอิไดเซชันแบบสามวัฏภาค (Three-phase fluidization)

เป็นการก่อสภาพของไหลที่เกิดในกระบวนการที่ประกอบด้วยวัฏภาค 3 วัฏภาค ได้แก่ ของแข็ง, ของเหลว และแก๊ส ซึ่งเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิไดเซชันแบบสองวัฏภาค หอทดลองที่เป็นฟอง (Bubble column) และหอทดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (Packed bed) โดยที่ระบบฟลูอิไดเซชันแบบสามวัฏภาคมักจะเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคของแข็ง เนื่องจากในระบบมีของเหลวอยู่ ส่งผลให้กระบวนการฟลูอิไดเซชันเกิดไม่สมบูรณ์

2.7.3 ช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชัน (Regime of fluidization)

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลจะส่งผลต่อลักษณะการเกิดฟลูอิไดเซชัน ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชันแบบต่าง ๆ [22]

1) เบดนิ่ง (Fixed bed)

ความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ยังไม่เพียงพอที่ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มขยับตัวหรือเคลื่อนที่ และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งแต่ละอนุภาคมาก ดังนั้น การดำเนินการในภาวะเบดนิ่งจะทำให้ความดันลดในระบบที่เกิดขึ้นมีค่าสูง เนื่องจากการป้อนของไหลเข้าไปในระบบที่มีอนุภาคของแข็งหนาแน่น ทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองวัฏภาคน้อยจึงส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ ซึ่งลักษณะการไหลรูปแบบนี้ยังไม่ถือว่าเป็นช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed)

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลรูปแบบนี้เริ่มถือว่าเป็นช่วงการไหลของฟลูอิไดเซชัน เมื่อความเร็วของของไหลในระบบเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งที่ทำให้อนุภาคของแข็งหรือผิวหน้าเบดเริ่มขยับ จะเรียกความเร็วจุดนี้ว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) และเรียกเบด ณ จุดนี้ว่า Minimum Fluidized Bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวคล้ายของไหล โดยเมื่อความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดฟองแก๊สขนาดเล็กจำนวนมากทางด้านล่างของเบด เรียกเบดที่สภาวะดังกล่าวว่าเบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling bed) และเรียกความเร็วนี้ว่า ความเร็วเริ่มต้นของการเกิดฟอง (Minimum bubbling velocity, U_{mb}) ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟองขึ้นกับสมบัติของอนุภาคของแข็ง โดยอนุภาคของแข็งชนิด Geldart กลุ่ม A จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิด

ฟองแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน ส่วนอนุภาคของแข็งชนิด Geldart กลุ่ม B และ D ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน เนื่องจากขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นทำให้แรงระหว่างอนุภาคลดลง ส่วนอนุภาคของแข็งชนิด Geldart กลุ่ม C จะไม่เกิดฟองแก๊ส (Bubble-free fluidization) เนื่องจากขนาดอนุภาคเล็กลงทำให้แรงระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วงการไหลนี้จะทำให้เกิดฟองแก๊สภายในระบบ จึงแบ่งลักษณะการเคลื่อนไหวภายในเบดได้ 2 ส่วน ส่วนแรก คือ Bubble phase เป็นฟองแก๊สที่อาจมีอนุภาคของแข็งปนอยู่บ้าง จึงเป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นของของไหลสูง และความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งต่ำ ส่วนที่สอง คือ Emulsion phase เป็นส่วนที่ไม่ใช่ฟองแก๊สหรือส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น โดยขนาดของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคของแข็ง และความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้า ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกระหว่างอนุภาคของแข็งขึ้นไป และเกิดการรวมตัวกันผ่าน Emulsion phase ภายในฟองแก๊สอาจจะมีอนุภาคของแข็งปนอยู่ด้วย หรือมีอนุภาคของแข็งบางส่วนที่เคลื่อนที่ตามฟองแก๊สขึ้นไปบริเวณเหนือผิวหน้าเบด ฟองแก๊สที่เคลื่อนที่ไปด้านบนจะแตกออกทำให้ของแข็งที่ติดไปหลุดออก และกระจายอยู่บริเวณหน้าเบด โดยบริเวณดังกล่าวซึ่งเป็นบริเวณที่อนุภาคของแข็งแตกกระจายอยู่หน้าเบด จะเรียกว่า บริเวณอิสระ (Freeboard) ขนาดฟองแก๊สที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อความเร็วในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน โดยฟองแก๊สขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ และฟองแก๊สขนาดใหญ่ขึ้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้น โดยฟองแก๊สขนาดเล็กที่ลอยขึ้นมาจะมีโอกาสในการที่จะรวมกันจนเป็นฟองแก๊สที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3) ฟลูอิไดซ์เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของของแข็งกับแก๊สซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความเร็วที่สูงขึ้นจนดูคล้ายกับไม่มีฟองแก๊สในกระบวนการ เรียกว่า เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent bed) โดยลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์จะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่ชัดเจน คือ Dense phase ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่นที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และ Dilute phase ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางที่บริเวณ ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ โดยช่วงในการเปลี่ยนจากเบดแบบฟองแก๊สเป็นเบดแบบปั่นป่วนไม่ได้เกิดขึ้นทันทีทันใดที่

ความเร็วแก๊สค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงความเร็วแก๊สในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่าอยู่ระหว่างความเร็ว 2 ค่า คือ ความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งในกระบวนการมีค่าสูงที่สุดและความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งมีค่าต่ำที่สุดจนเข้าสู่ภาวะคงตัว

4) ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟลูอิไดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed)

เมื่อความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะทำให้เบดจะมีการขยายตัวจนไม่สามารถระบุพื้นที่ผิวหน้าของเบดได้ ลักษณะการไหลแบบนี้เกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีมากกว่าความเร็วขนส่ง (Transport velocity) โดยเป็นช่วงการไหลที่อยู่ระหว่างช่วงการไหลฟลูอิไดซ์เบดแบบปั่นป่วนและฟลูอิไดซ์เบดแบบเบาบาง ที่บริเวณกลางของเครื่องปฏิกรณ์จะมีอนุภาคของของแข็งอยู่เบาบาง และมีทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นในแนวเดียวกับทิศทางการไหลของของไหล แต่บริเวณผนังของเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอย่างหนาแน่น โดยจะมีการเคลื่อนที่ในทิศลงที่สวนทางกับการเคลื่อนที่ของของไหล รวมเรียกลักษณะการไหลเฉพาะแบบนี้ว่า การไหลแบบแกนในวงนอก (Core-annulus flow) การดำเนินการในช่วงการไหลนี้อาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วน หลุดออกไปทางด้านบนของหอทดลอง ในกรณีที่มีการนำอนุภาคที่หลุดออกไปป้อนกลับเข้ามา ในระบบจะเรียกกระบวนการแบบนี้ว่า ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed; CFB)

5) ฟลูอิไดซ์เบดแบบบางเบา (Dilute หรือ Pneumatic transport fluidized bed)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลจากช่วงการไหลแบบความเร็วสูงส่งผลให้ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์เบาบางมาก จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม (Minimum pneumatic transport velocity) สำหรับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในช่วงนี้ พบว่า อนุภาคของแข็งจะถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยจะเคลื่อนที่แยกจากกันเป็นอนุภาคของแข็งเดี่ยวกระจายตัวอยู่ในกระแสของไหล ซึ่งสัดส่วนระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลอยู่ที่ประมาณ 1 ต่อ 20 หรือมีปริมาณของไหล ในเครื่องปฏิกรณ์อยู่สูงมาก ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลนี้ คือ ความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบเบาบาง (Minimum pneumatic transport velocity: U_{mp})

2.7.4 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิไดเซชัน

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการฟลูอิไดเซชัน (เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบด) กับกระบวนการอื่น (เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง) กระบวนการฟลูอิไดเซชันมีข้อดี-ข้อเสีย ดังนี้ [23]

ข้อดีของกระบวนการฟลูอิไดเซชัน

1. มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็ง และของไหลสูง รวมทั้งมีการกวนผสมภายในสูง (Internal mixing)

2. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งที่เป็นรูปแบบเฉพาะ โดยอนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงจะอยู่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และอนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นต่ำจะอยู่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์

3. สามารถแยกอนุภาคของแข็งออกจากเครื่องปฏิกรณ์โดยที่ไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์

4. เป็นตัวกลางการถ่ายโอนความร้อนและถ่ายโอนมวลที่ดี มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิและมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูง

5. เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานในการดำเนินการที่ต่ำ

6. เป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous) และดำเนินการได้ง่าย

7. เป็นกระบวนการที่มีความยืดหยุ่นในการดำเนินงานสูง มีช่วงความเร็วของอัตราการป้อนของไหลกว้าง และสามารถใช้งานได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิด

ข้อเสียของกระบวนการฟลูอิไดเซชัน

1. ระยะเวลาที่อนุภาคของแข็งอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์สั้น โดยสามารถปรับปรุงได้โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ลำดับขั้น

2. เกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ หรือการรวมกันระหว่างฟองแก๊สในบางช่วงการไหล ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลลดลง

3. การผสมเกิดได้ดีในทิศทางตามแนวแกน (Vertical) มากกว่าการผสมในทิศทางตามแนวนอน (Horizontal) ทำให้มีความไม่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ

4. อนุภาคของแข็งหลุดออกจากกระบวนการเมื่อความเร็วของไหลป้อนเข้าสูง แก้ไขได้โดยติดตั้งอุปกรณ์ดักจับและป้อนอนุภาคของแข็งที่หลุดออกไปกลับเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

5. อนุภาคของแข็งมีขนาดไม่สม่ำเสมอ มีขนาดเล็กลง เนื่องจากเกิดการชนกันของอนุภาคของแข็ง หรือปฏิกิริยาเคมีภายในกระบวนการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

6. เกิดการสึกกร่อนของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากการชนกันของอนุภาคของแข็งกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์
7. ไม่สามารถใช้กับอนุภาคของแข็งที่เปียกหรือเหนียวได้ เนื่องจากอนุภาคเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่

2.7.5 การประยุกต์ใช้การก่อการไหลกับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากงานวิจัยของ Jongarklang และ คณะ [24] ทำการศึกษาผลของรูปแบบการไหลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต โดยศึกษารูปแบบการไหล 5 แบบ ได้แก่ เบดนิ่ง ฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส ฟลูอิไดเซชันแบบสลักกิ้ง ฟลูอิไดเซชันแบบปั่นป่วน และฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูง จากผลการทดลอง พบว่า ภาวะเบดนิ่งจะใช้เวลาในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นานที่สุด เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้น ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากัน พบว่า รูปแบบการไหลฟลูอิไดเซชันแบบปั่นป่วน มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตามด้วยฟลูอิไดเซชันแบบสลักกิ้ง และฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊สตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ฟลูอิไดเซชันแบบสลักกิ้งและฟลูอิไดเซชันแบบปั่นป่วนจะให้ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกัน แต่ฟลูอิไดเซชันแบบปั่นป่วนจะเกิดการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งและมีการผสมภายในที่สูงกว่าฟลูอิไดเซชันแบบสลักกิ้ง ส่วนรูปแบบการไหลฟลูอิไดเซชันแบบความเร็วสูงเป็นรูปแบบการไหลที่ใช้ปริมาณของตัวดูดซับมากกว่ารูปแบบการไหลอื่น เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์สูงกว่ารูปแบบการไหลอื่น จึงทำให้มีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแก๊สกับตัวดูดซับสั้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้น้อย

2.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ (Adsorption kinetics)

จลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นกระบวนการดูดซับสารต่าง ๆ จากสารละลาย ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้
(1) ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของตัวถูกดูดซับด้วยกระบวนการแพร่ (Diffusion) โดยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับในสารละลายจะเคลื่อนย้ายเข้าสู่บริเวณตัวดูดซับ (Boundary layer)
(2) ขั้นตอนการแพร่ผ่านฟิล์มบาง (Film diffusion) เป็นการแพร่ของโมเลกุล ซึ่งเวลาและระยะทางสำหรับการเคลื่อนที่ขึ้นกับชนิดของสารละลายที่ไหลผ่านตัวดูดซับ หรือขึ้นกับการปั่นป่วน และชั้น

ฟิล์มจะมีความหนาหรือบาง ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและความปั่นป่วน โดยชั้นฟิล์มจะมีความหนาลดลง เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น และมีการปั่นป่วนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้ดี
(3) ขั้นตอนการแพร่ผ่านช่องว่างภายในตัวดูดซับ (Pore diffusion) เป็นขั้นตอนที่เกิดการถ่ายโอนมวลสารโดยกลไกการแพร่ของตัวถูกดูดซับจากพื้นผิวด้านนอกของอนุภาคตัวดูดซับเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (Intraparticle transport) โดยทั่วไปการแพร่จะมี 2 กลไก คือ การแพร่ไปตามช่องว่างของรูพรุนภายใน และการแพร่ไปตามพื้นผิวของรูพรุน
(4) ขั้นตอนการดูดซับ (Adsorption) จะสร้างพันธะขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ อัตราเร็วของการดูดซับจะถูกควบคุมโดยความต้านทานการแพร่ทั้งภายในและภายนอกของอนุภาคตัวดูดซับ ซึ่งหากเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) ขั้นตอนนี้จะเกิดอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption) กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นช้ากว่า ดังนั้น ขั้นตอนนี้จึงเป็นขั้นตอนที่กำหนดกระบวนการดูดซับ

2.8.1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ (Kinetic model)

สมการจลนพลศาสตร์ เป็นสมการที่ใช้ในการอธิบายเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยา ระยะเวลาของกระบวนการที่เกิดขึ้น และเพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ โดยจะพิจารณาทั้งความสามารถในการดูดซับที่สูง อัตราการดูดซับเกิดขึ้นได้รวดเร็ว และการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น หรือการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบกระบวนการดูดซับ หรือ สังเคราะห์ตัวดูดซับชนิดใหม่ในอุตสาหกรรม โดยแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) นอกจากนี้ในงานวิจัยยังเลือกศึกษาแบบจำลองอาฟรามี (Avrami’s model) เพิ่มเติมด้วย

1) แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model)

เป็นแบบจำลองที่ตั้งจากสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับ เนื่องจากการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี และอัตราการดูดซับจะขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาเพียงตัวแปรเดียว โดยความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับจะคงที่ตลอดการดูดซับ และค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_1) จะแปรผันตรงตามความเข้มข้นเริ่มต้นของตัว

ดูดซับ ทำให้สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับ [25]

$$A + S \leftrightarrow A * S$$

เมื่อ A คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)

S คือ ตัวดูดซับ (Adsorbate)

A * S คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound)

สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \qquad (2.1)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.1) โดยกำหนดขอบเขตตั้งแต่ t = 0 ถึง t = t และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะได้สมการดังนี้

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \qquad (2.2)$$

เมื่อ q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับเมื่อ เวลา $\longrightarrow \infty$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที$^{-1}$)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

2) แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model)

สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียมเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้สำหรับอธิบายการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับบนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความสามารถในการดูดซับบนตัวดูดซับ ขั้นกำหนดอัตรา คือ ขั้นตอนการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ [25]

$$A + 2S \leftrightarrow A * S_2$$

เมื่อ A คือ ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)

S คือ ตัวดูดซับ (Adsorbate)

A * S_2 คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (Adsorbed compound)

สามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \qquad (2.3)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.3) โดยกำหนดขอบเขตตั้งแต่ t = 0 ถึง t = t และ q_t = 0 ถึง q_t = q_t จะได้สมการดังนี้

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e} \tag{2.4}$$

เมื่อ q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับเมื่อ เวลา ⟶ ∞ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (มิลลิกรัมต่อกรัม.นาที$^{-1}$)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

3) แบบจำลองอาฟรามี (Avrami's model)

เป็นแบบจำลองที่มีการดัดแปลงจากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ด้วยการเพิ่มค่าคงที่ของอาฟรามี (n_{AV}) โดยปกติค่าคงที่ของอาฟรามีจะอยู่ในช่วง 1 - 4 ซึ่งแบบจำลองนี้ใช้ในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่มีความซับซ้อน มีกลไกการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไก [26] โดยแสดงสมการดังสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6)

$$q_t = q_e\{1 - \exp[-(K_{AV}t)]^{n_{AV}}\} \tag{2.5}$$

$$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = n_{AV}K_{AV} + n_{AV}\ \ln t \tag{2.6}$$

เมื่อ q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับเมื่อ เวลา ⟶ ∞ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_{AV} คือ ค่าคงที่ของอาฟรามี (นาที$^{-1}$)

n_{AV} คือ เลขชี้กำลังของเวลาที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงกลไกการดูดซับ

α คือ อัตราส่วนระหว่างค่าการดูดซับของตัวดูดซับเมื่อ เวลา ⟶ ∞ ต่อค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhao และคณะ [27] ทำการศึกษาพฤติกรรมการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา (K_2CO_3/Al_2O_3) และศึกษาภาวะที่ใช้ในการดำเนินการซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration temperature) องค์ประกอบของแก๊ส และอัตราการให้ความร้อน ซึ่งกระบวนการฟื้นฟูสภาพประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การเพิ่มอุณหภูมิเพื่อทำให้โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต ($KHCO_3$) สลายตัว จากนั้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า

180 องศาเซลเซียส สารมัธยันตร์จากปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (Carbonation) ของ K_2CO_3/Al_2O_3 เกิดการสลายตัว และที่อุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส ดาวน์โซไนต์ ($KAl(CO_3)_2(OH)_2$) เกิดการสลายตัว โดยพบว่าการฟื้นฟูสภาพจะสมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของแก๊สไม่ส่งผลต่อกระบวนการฟื้นฟูสภาพอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาอัตราการให้ความร้อน พบว่าเมื่ออัตราความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็น 80 องศาเซลเซียสต่อนาที จะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของการฟื้นฟูสภาพลดลงจาก 100% เป็น 92.8% และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลงจาก 72 นาที เป็น 6.5 นาที ดังนั้นการเพิ่มอัตราความร้อนในค่าที่เหมาะสมจึงเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางหนึ่งของการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ

Zhao และคณะ [28] ทำการศึกษาพฤติกรรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา (K_2CO_3/Al_2O_3) ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊ส และศึกษาภาวะที่ใช้ในการดำเนินการซึ่งประกอบด้วยความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นของไอน้ำ และปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) จะพบว่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญเมื่อความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10-30% แต่เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของไอน้ำ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของไอน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณ K_2CO_3 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณ K_2CO_3 จาก 12.8% เป็น 36.8% จะส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าเพิ่มปริมาณ K_2CO_3 เป็น 45.1% พบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของ K_2CO_3 ส่วนการเปลี่ยนแปลงของคาร์บอเนชันลดลงจาก 91 % เป็น 79.6% ของตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานไป 80 รอบ โดยที่พื้นที่ผิวจำเพาะของรูพรุน ปริมาตรของรูพรุน มีค่าคงที่และการกระจายตัวของขนาดรูพรุนไม่เปลี่ยนแปลง และการฟื้นฟูสภาพจะสมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

Sengupta และคณะ [29] ทำการปรับปรุงคุณสมบัติในการฟื้นฟูสภาพและเสถียรภาพของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ระหว่างการศึกษาหลายรอบ และศึกษาปัจจัยวัฏภาคของตัวรองรับอะลูมินา (Al_2O_3) ที่ทำการปรับสภาพด้วยความร้อน และปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) พบว่า แกมมาอะลูมินา (γ-Al_2O_3) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน มากกว่า แอลฟาอะลูมินา (α-Al_2O_3) จึงเลือก γ-Al_2O_3 เป็นตัวรองรับและได้ทำการปรับสภาพด้วยความร้อนที่ 700, 900 และ 950 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงจะส่งผลให้การเกิดของผลิตภัณฑ์ดาวน์โซไนต์ ($KAl(CO_3)(OH)_2H_2O$) น้อยลง และเมื่อเพิ่มปริมาณ K_2CO_3 จาก 31% เป็น 35% ส่งผลให้ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าเพิ่มเป็น 46% พบว่าเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ลดลง ดังนั้นตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต 35% โดยน้ำหนักบนตัวรองรับอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อน 950 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 2.1 มิลลิโมลต่อกรัม หลังจากทำการทดสอบผ่านไป 11 รอบ โดยใช้อุณหภูมิดูดซับและคายซับที่ 55 และ 130 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Sengupta และคณะ [30] ศึกษากระบวนการฟลูอิไดซ์เบดสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา (K_2CO_3/Al_2O_3) 35% โดยน้ำหนัก ในระดับนำร่อง และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิในการดูดซับและคายซับ ความเร็วแก๊ส ปริมาณไอน้ำขาเข้า วิธีการฉีดไอน้ำเข้าหอดูดซับ แบบของอัตราการป้อนแก๊สต่อประสิทธิภาพการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำการทดสอบในระบบฟลูอิไดซ์เบดไม่หมุนเวียนและระบบฟลูอิไดซ์เบดหมุนเวียน พบว่า ความสามารถในการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดแบบไม่หมุนเวียน คือ 71% วิธีในการฉีดไอน้ำเข้าหอดูดซับส่งผลกระทบโดยตรงต่อการดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออก เมื่อใช้การฉีดไอน้ำด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออกดีกว่าการฉีดไอน้ำโดยตรง เนื่องจากลดการควบแน่นของไอน้ำ ส่วนการเพิ่มขึ้นของปริมาณไอน้ำในแก๊สไอเสียและความเร็วแก๊สที่ลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดึงคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้อัตราการป้อนแก๊สเป็นไนโตรเจนจะสามารถดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออกได้ 76.3% แต่เมื่อเป็นคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเป็น 50.7% และผลต่างของอุณหภูมิระหว่างการดูดซับและคายซับ 50-70 องศาเซลเซียส จะช่วยในการลดพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการได้

Guo และคณะ [31] ศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และจลนพลศาสตร์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวองรับถ่านกัมมันต์ (K_2CO_3/Activated Carbon) ในอุณหภูมิต่ำภายใต้ปัจจัยของปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3), ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, ความเข้มข้นของน้ำ, อุณหภูมิในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และการปรับสภาพไอน้ำ พบว่า ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการเปลี่ยนแปลงคาร์บอเนชันของ K_2CO_3/AC ลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนโมลของความเข้มข้นของน้ำที่มากกว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนการปรับสภาพไอน้ำอย่างเพียงพอจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง จลนพลศาสตร์ของคาร์บอเนชันถูกตรวจสอบได้ด้วยความสัมพันธ์ของแบบจำลองแกนหดตัว (Shrinking core model) กับข้อมูลที่ได้การทดลอง นอกจากนี้ K_2CO_3/AC ได้รับการพิสูจน์ว่าสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้และมีความเสถียรในช่วง 20 รอบ ระหว่างการทดลองดูดซับและคายซับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

คาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นจึงถือได้ว่าเป็นตัวเลือกใหม่สำหรับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่จำกัด

Boonprasop และคณะ [32] ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) ที่เตรียมด้วยวิธีการฝังตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ (Impregnation) ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดภายใต้รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed regime) คือ ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration temperature) ที่ 200-300 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (regeneration time) ที่ 2-20 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ จะส่งผลให้ค่าความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามความชื้นที่ยังเหลืออยู่ในตัวดูดซับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญด้วย และภาวะที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จะทำให้ค่าความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากถึง 90.7% ของตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ แต่ภาวะที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จะให้ค่าความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 57.2% แต่ใช้พลังงานในการฟื้นฟูสภาพน้อยกว่า

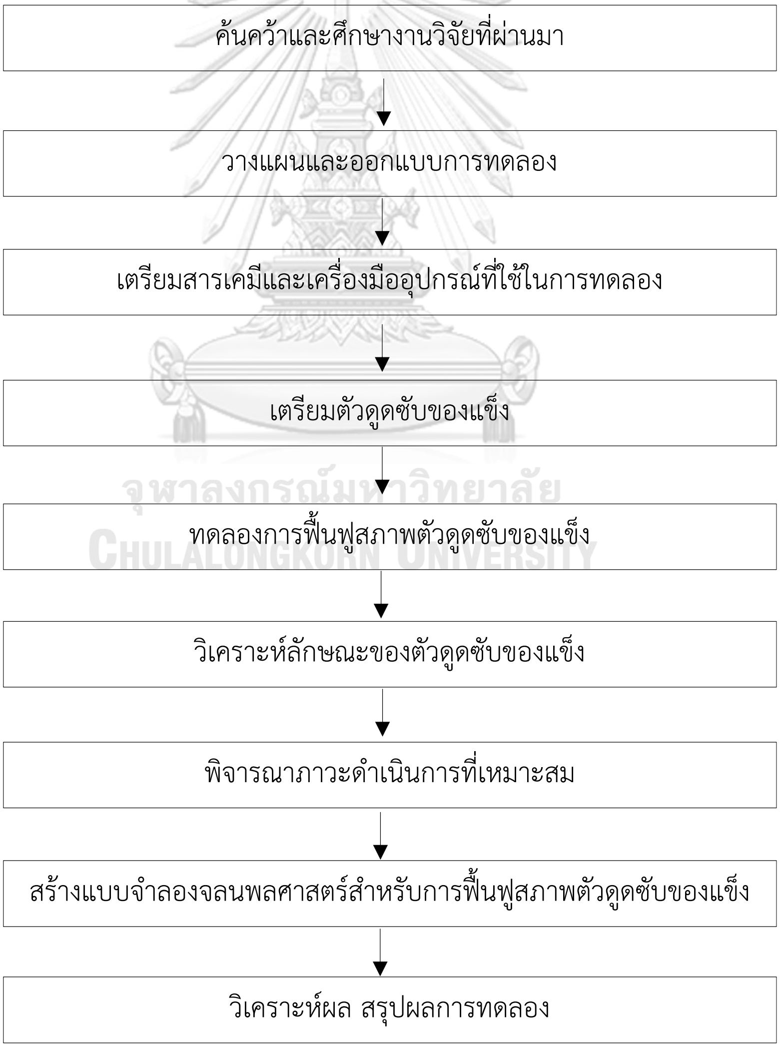
Boonprasop และคณะ [33] ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต 17% โดยน้ำหนักบนตัวรองรับอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) ที่เตรียมด้วยวิธีการฝังตัวเร่งปฏิกิริยาบนตัวรองรับ (Impregnation) ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดภายใต้รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed regime) คือ ผลของความดันที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration pressure) ที่ 0.8 หรือ 0.2 บรรยากาศ เวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration time) ที่ 2 หรือ 20 นาที และจำนวนรอบในการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration cycles) 1-3 รอบ พบว่า เวลาและจำนวนรอบในการฟื้นฟูสภาพไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับอย่างมีนัยสำคัญ แต่ขึ้นกับความดัน โดยที่ความดัน 0.2 บรรยากาศ จะให้ผลที่ดีกว่าความดันที่ 0.8 บรรยากาศ อีกทั้งไม่พบการเกิดของผลิตภัณฑ์ดาวน์โซไนต์ ($KAl(CO_3)(OH)_2H_2O$) แต่อย่างไรก็ตามน้ำที่ผิวของตัวดูดซับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ และภาวะที่ความดัน 0.2 บรรยากาศ เป็นเวลา 2 นาที จะทำให้ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่ามากถึง 95% ของตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ อีกทั้งวิธีการฟื้นฟูสภาพผ่านการลดความดันและใช้เวลาในการฟื้นฟูสภาพที่น้อยค่อนข้างสะดวกและใช้พลังงานน้อยกว่าการฟื้นฟูสภาพแบบใช้ความร้อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ หาภาวะที่เหมาะสมและสร้างจลนพลศาสตร์สำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง ดังนั้น ขั้นตอนในการศึกษาจึงครอบคลุมตั้งแต่การเตรียมตัวดูดซับของแข็ง การทดลองการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ วิเคราะห์ตัวดูดซับ รวมทั้งการศึกษาภาวะที่เหมาะสมและการสร้างสมการจลนพลศาสตร์สำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 สารเคมีที่ใช้

1. โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate: K_2CO_3) น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 138.21 กรัมต่อโมล (AR grade, QREC)

2. แกมมาอะลูมินา (Gamma alumina: γ-Al_2O_3) น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 101.90 กรัมต่อโมล (AR grade, Merck)

3. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)

4. อะซิโตน (Acetone, AR grade, 99%, NT Chemical)

5. แก๊สไนโตรเจน (Nitrogen: N_2, 99.99%, Thai-Japan Gas Co., Ltd)

6. แก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้น 12 % ในสมดุลแก๊สไนโตรเจน (Thai-Japan Gas Co., Ltd)

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดรูปชมพู่ 250 มิลลิลิตร (Erlenmayer flask)
2. บีกเกอร์ 500 มิลลิลิตร (Beaker)
3. ปิเปตแบบปริมาตร 25 มิลลิลิตร (Volumetric pipette)
4. ลูกยางปิเปต (Pipette Bulb)
5. ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
6. โกร่งบดสาร (Mortar and pestle)
7. ช้อนตักสาร (Spatula)
8. กระดาษกรอง (Filter paper)
9. ชุดกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel filtration)
10. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum filter)
11. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance)
12. เครื่องเขย่าอัตโนมัติ (Shaker) รุ่น SK3 จากบริษัท CTL Orbital Shaker
13. ตู้อบ (Oven) รุ่น ED 115 จากบริษัท Binder
14. โถดูดความชื้น (Desiccator)
15. เตาเผาสาร (Furnace) รุ่น CWF 13 จากบริษัท Carbolite

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

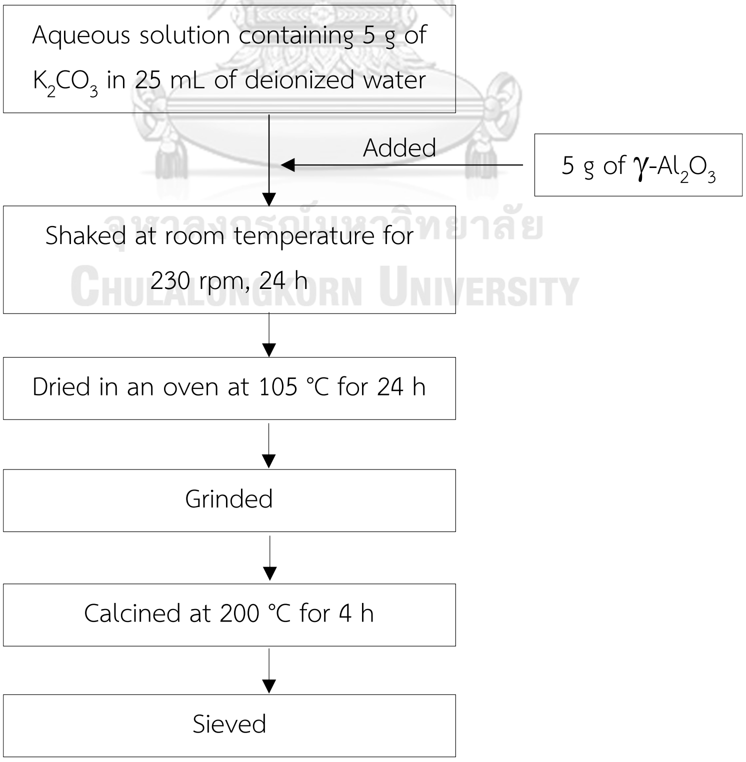
16. อุปกรณ์ใช้วัดการไหล (Rotameter) รุ่น K-2014 จากบริษัท Nitto
17. เครื่องควบคุมอัตราการไหล (Mass flow controller) จากบริษัท Bronkhorst
18. เกจวัดความดัน (Pressure gauge) จากบริษัท swagelok
19. ท่อสแตนเลส 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.25 นิ้ว
20. ข้อต่อและวาล์ว จากบริษัท Swagelok
21. คอลัมน์แก้วฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed column) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.025 เมตร สูง 42 เซนติเมตร ติดตั้งฟิลเตอร์แก้วเบอร์ 0 ที่ตำแหน่งความสูง 20 เซนติเมตร
22. แถบเพิ่มความร้อน (Heating tape)
23. เทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิชนิด K (Sheath thermocouple) เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ความยาว 0.2 เมตร
24. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Heat controller) รุ่น E5AN-H จากบริษัท OMRON
25. เตาปฏิกรณ์ (Reactor furnace)
26.เซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 sensor) รุ่น SprintIR6S-100 จากบริษัท CO_2 Meter
27.เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor) รุ่น 1140_1B จากบริษัท Phidgets
28.เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature sensor) รุ่น TMP 1101_0 จากบริษัท Phidgets
29. ปั๊มรีดสายยาง (Peristaltic pump) รุ่น BT 600-2J จากบริษัท Longer Pump
30. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) รุ่น IM125D จากบริษัท IM-TECH

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ

ในงานวิจัยนี้จะเตรียมตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ($K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$) โดยใช้วิธีการเตรียมแบบอิมเพรกเนชัน (Impregnation) เริ่มจากการนำโพแทสเซียมคาร์บอเนต 5 กรัม มาละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นเติมแกมมาอะลูมินา 5 กรัม ที่เผาด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนลงไปในสารละลายโพแทสเซียมคาร์บอเนต จากนั้นนำไปเขย่าในเครื่องเขย่าอัตโนมัติที่ความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวดูดซับมาบดให้เป็นผง แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปร่อนผ่านตะแกรงแต่ละชั้นเพื่อแยกขนาดของอนุภาค (Particle size analysis) และนำไปทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ และอัตราการไหลของแก๊ส 0.8 ลิตรต่อนาที โดยแสดงลำดับการเตรียมตัวดูดซับไว้ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับของแข็ง $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$

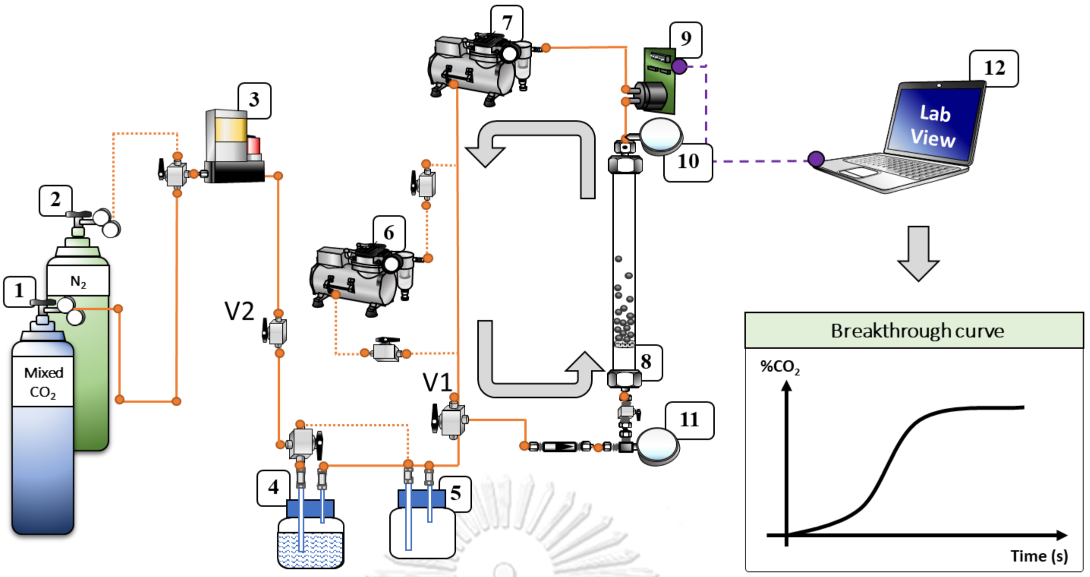
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3.2 ระบบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา

ระบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดสำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา แสดงดังรูปที่ 3.3 มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1. ถังแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์เข้มข้น 12 เปอร์เซ็นต์ ในสมดุลแก๊สไนโตรเจน
2. ถังแก๊สไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูง 99.99 เปอร์เซ็นต์
3. เครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส (Mass flow controller) ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วอัตโนมัติที่มีความแม่นยำสูง
4. ขวดบรรจุน้ำสำหรับผลิตไอน้ำที่ใช้ในระบบ (Steamer)
5. ถังกักเก็บแก๊ส (Vessel)
6. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) เพื่อใช้ในการดูดแก๊สที่คงค้างในระบบออกก่อนทำการทดลองและปรับความดันให้ต่ำกว่าบรรยากาศ
7. ปั๊มหมุนเวียน (Circulating pump) เพื่อใช้ในการหมุนเวียนแก๊สในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง
8. คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.5 เซนติเมตร สูง 42 เซนติเมตร และติดตั้งฟิลเตอร์แก้วที่ความสูง 22 เซนติเมตร ที่ส่วนนี้จะมีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) อยู่ภายในคอลัมน์แก้ว และด้านนอกจะมีการให้ความร้อนด้วยเตาปฏิกรณ์พร้อมทั้งควบคุมอุณหภูมิด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Heat controller)
9. เซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 sensor)
10. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Temperature sensor)
11. เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor)
12. คอมพิวเตอร์ เพื่อบันทึกข้อมูลความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิและความดันผ่านซอฟแวร์ของ Labview

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.3 ระบบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

3.3.3 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะดำเนินการในระบบเปิด ก่อนเริ่มการดูดซับต้องทำความสะอาดทั้งระบบ เพื่อกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอื่น ๆ ที่คงค้างภายในระบบ โดยการป้อนแก๊สไนโตรเจนผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล ที่อัตราการไหล 1000 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งเซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ตรวจไม่พบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ทำการปรับเทียบ (Calibrate) ผ่านซอฟต์แวร์ของ GasLab เพื่อการกำหนดค่าและการบันทึกข้อมูล โดยให้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 0 โดยปริมาตร หลังจากนั้นบรรจุตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาปริมาณ 5 กรัม ลงในคอลัมน์แก้ว ปรับอุณหภูมิผ่านเครื่องควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 60 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิคงที่แล้ว ป้อนแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหล 800 มิลลิลิตรต่อนาที ผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล และป้อนเข้าสู่ขวดบรรจุน้ำสำหรับผลิตไอน้ำที่ใช้ในระบบ จะได้แก๊สชื้นเข้าสู่คอลัมน์แก้ว รอจนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุล โดยพิจารณาได้จากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์หลังดูดซับจะคงที่ ใช้เวลา 20 นาที จากนั้นนำข้อมูลความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ มาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$q = \frac{MW_{CO_2} P_T F}{RTm_{adsorbent}} \int_0^t \%CO_2 \, dt \qquad (3.1)$$

เมื่อ q คือ ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ)

MW_{CO_2} คือ มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัมต่อโมล)

P_T คือ ความดันรวมทั้งระบบ

F คือ อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)

$\%CO_2$ คือ ร้อยละของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยปริมาตร

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (ลิตร.ความดันบรรยากาศ ต่อ เคลวิน.โมล)

T คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (เคลวิน)

$m_{adsorbent}$ คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ภาวะการทดลอง	การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ชนิดของตัวดูดซับ	K_2CO_3/γ-Al_2O_3
อุณหภูมิ (เคลวิน)	333
ความดัน (บาร์)	1
อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	0.8
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.4 การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

การฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับเพื่อให้กลับมาใช้งานได้อีก เป็นแนวทางที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่ใช้ตัวดูดซับในปริมาณมากและการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นได้ง่าย เพื่อเป็นการลดต้นทุนของกระบวนการ รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียจากอุตสาหกรรม และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการให้ความร้อน และการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการลดความดัน

1) การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการให้ความร้อน

เป็นวิธีการที่มีการออกแบบมาจากกระบวนการสลับอุณหภูมิ นิยมใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยการให้ความร้อนกับตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งาน

แล้ว เพื่อเผาสารผลิตภัณฑ์ หรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ ในระหว่างการดำเนินการออกจากตัวดูดซับ ก่อนจะนำกลับไปใช้ในกระบวนการอีกครั้ง เนื่องจากปรากฏการณ์ทางกายภาพ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้พลังงานจลน์ในโมเลกุลของแก๊สเพิ่มขึ้น และเมื่อพลังงานจลน์สูงมากพอที่จะทำให้สารผลิตภัณฑ์ หรือสิ่งเจือปนที่อยู่ภายในรูพรุนออกไปได้โดยง่าย จะทำให้ตัวดูดซับกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกครั้ง วิธีการนี้สามารถกำจัดสารผลิตภัณฑ์ หรือสิ่งเจือปนได้ค่อนข้างดี แต่มีความต้องการใช้พลังงานที่ค่อนข้างสูง และอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการฟื้นฟูสภาพก็จะแตกต่างกันไปตามอุณหภูมิการสลายตัวของชนิดตัวดูดซับ รวมทั้งต้องใช้ระยะเวลานานในการใช้งาน

2) การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการลดความดัน

เป็นวิธีการที่มีการออกแบบมาจากกระบวนการสลับความดัน เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม แต่ได้รับความนิยมน้อยกว่าการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการให้ความร้อน โดยการลดความดันให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อกำจัดสารผลิตภัณฑ์ หรือสิ่งเจือปนออกจากตัวดูดซับ เนื่องจากสมดุลเคมี เมื่อลดความดันจะทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับ ทำให้ผลิตภัณฑ์เปลี่ยนกลับไปเป็นสารตั้งต้น นั่นคือ โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และโมลของน้ำเพิ่มขึ้น รวมถึงสารตั้งต้นโพแทสเซียมคาร์บอเนต และมีการปลดปล่อยแก๊สที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวออกมาได้ จึงทำให้ตัวดูดซับกลับมาใช้งานใหม่ได้อีกครั้ง ดังแสดงในสมการที่ 3.2 วิธีการนี้สามารถกำจัดสารผลิตภัณฑ์ หรือสิ่งเจือปนได้ที่เกาะอยู่บนผิวของตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้วได้ต่ำกว่าการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการให้ความร้อน เนื่องจากในการเกิดปฏิกิริยา สารผลิตภัณฑ์บางตัวมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับที่สูง หรือเกิดการดูดซับเชิงเคมี จึงจำเป็นต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูงในการทำลายแรงยึดเหนี่ยว แต่มีอัตราการใช้พลังงานต่ำกว่า ใช้ระยะเวลาในการฟื้นฟูสภาพเร็ว

$$K_2CO_{3(g)} + CO_{2(g)} + H_2O_{(g)} \leftrightarrow 2KHCO_{3(s)} + \Delta H \qquad (3.2)$$

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการให้ความร้อน และการลดความดัน เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ และหาภาวะที่ดีที่สุดในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

สำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาจะดำเนินการในระบบปิด ก่อนเริ่มการฟื้นฟูสภาพต้องทำความสะอาดทั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ระบบ เพื่อกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอื่น ๆ ที่คงค้างภายในระบบ โดยการป้อนแก๊สไนโตรเจนผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล ที่อัตราการไหล 1000 มิลลิลิตรต่อนาที จนกระทั่งเซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ตรวจไม่พบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นทำการปรับเทียบ (Calibrate) ผ่านซอฟต์แวร์ของ GasLab เพื่อการกำหนดค่าและการบันทึกข้อมูล โดยให้ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 0 โดยปริมาตร หลังจากนั้นบรรจุตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณ 5 กรัม ลงในคอลัมน์แก้ว ป้อนแก๊สไนโตรเจนผ่านเครื่องควบคุมอัตราการไหลเชิงมวล ที่อัตราการไหล 500 มิลลิลิตรต่อนาที เพื่อปรับความดันเริ่มต้นในระบบให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศผ่านปั๊มสุญญากาศ เมื่อความดันถึงค่าที่ต้องการแล้ว ปิดวาล์วสายป้อนแก๊สไนโตรเจน เปิดปั๊มหมุนเวียนเพื่อใช้ในการหมุนเวียนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา เปิดระบบลมเพื่อควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไป ค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิผ่านเครื่องควบคุมอุณหภูมิจนถึงค่าที่ต้องการ รอจนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุล โดยพิจารณาได้จากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์หลังการฟื้นฟูสภาพจะคงที่ใช้เวลา 5 ชั่วโมง และบันทึกข้อมูลความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิและความดันผ่านซอฟต์แวร์ของ Labview จากนั้นนำข้อมูลความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ มาคำนวณร้อยละการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็ง (% Sorbent regeneration) ดังแสดงในสมการที่ 3.3

$$\%\text{Sorbent regeneration} = \frac{m_{\text{released}\ CO_2}}{m_{\text{adsorbed}\ CO_2}} \times 100 \qquad (3.3)$$

เมื่อ $m_{\text{adsorbed}\ CO_2}$ คือ มวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับ (กรัมต่อโมล)

$m_{\text{released}\ CO_2}$ คือ มวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายซับ (กรัมต่อโมล)

ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

ภาวะการทดลอง	การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ
ชนิดของตัวดูดซับ	K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
อุณหภูมิ (เคลวิน)	373, 473 และ 573
ความดันเริ่มต้น (บาร์)	0.35, 0.61 และ 0.88
อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	2.2
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	5

3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3)

3.4.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ หรือ X-ray diffraction เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างหรือวัฏภาคผลึกของวัสดุแบบไม่ทำลายตัวอย่าง เครื่อง XRD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ของบริษัท Bruker รุ่น D8 Discover ที่มุมตกกระทบ (2θ) ในช่วง 5 ถึง 80 องศา การวิเคราะห์เริ่มจากนำตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) ก่อนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ ประมาณ 0.5 ถึง 1 กรัม บนภาชนะรองรับตัวอย่าง (Sample holder) โดยเกลี่ยให้ผิวของตัวอย่างเรียบเสมอกับขอบของภาชนะรองรับตัวอย่าง จากนั้นนำไปประกอบบนแท่นวางตัวอย่างของเครื่อง ผลการวิเคราะห์แสดงเป็นรูปแบบ XRD (XRD pattern) ซึ่งพลอตระหว่างมุม 2θ และ สัญญาณการตรวจนับ (Count per second, cps) สำหรับงานวิจัยนี้ข้อมูลที่ได้สามารถระบุวัฏภาคของแกมมาอะลูมินา (γ-Al_2O_3), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3), โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต ($KHCO_3$) และโพแทสเซียมดาวน์โซไนต์ ($KAl(CO_3)_2(OH)_2$)

รูปที่ 3.4 เครื่อง X-Ray Diffractometer ของบริษัท Bruker รุ่น D8 Discover

3.4.2 เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

Scanning electron microscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) เพื่อศึกษาลักษณะรูปทรง ขนาดอนุภาค การกระจายตัว รวมทั้งให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของวัสดุ เช่น การจัดเรียงตัวและการกระจายตัวของอนุภาค เครื่อง SEM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-IT-500HR การเตรียมตัวอย่างใช้วิธีโรยผงตัวอย่างประมาณ 0.5 ถึง 1 มิลลิกรัม บนเทปคาร์บอนที่ติดบนภาชนะทองเหลืองเป็นตัวรองรับ แล้วนำไปเคลือบผิวด้วยทองคำ จากนั้นนำไปประกอบบนแท่นวางตัวอย่างของเครื่อง ผลการวิเคราะห์แสดงเป็นรูปภาพสามมิติของพื้นผิวตัวอย่างในบริเวณที่ต้องการในช่วงกำลังขยาย 300 ถึง 5000 เท่า สำหรับงานวิจัยนี้ข้อมูลที่ได้นำมาใช้ระบุขนาด รูปทรง พื้นผิว และการกระจายตัวของอนุภาค K_2CO_3

รูปที่ 3.5 เครื่อง Scanning electron microscope ของบริษัท JEOL รุ่น JSM-IT-500HR

3.4.3 เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

Fourier transform infrared spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว และองค์ประกอบของวัสดุ โดยสังเกตการปรากฏแถบการดูดกลืน (Absorption band) รังสีอินฟราเรดของพันธะชนิดต่าง ๆ ในตัวอย่างที่เกิดจากการกระตุ้นและการสั่นของโมเลกุล ด้วยรังสีอินฟราเรด เครื่อง FTIR ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ของบริษัท PerkinElmer รุ่น Spectrum One ใช้โหมดแบบ Attenuated Total Reflectance (ATR-FTIR) ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วงเลขคลื่น (Wavenumber) 400 ถึง 4000 เซนติเมตร$^{-1}$ การวิเคราะห์เริ่มจากการเตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) ก่อนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ ประมาณ 10 มิลลิกรัม ใส่ในภาชนะรองรับตัวอย่าง จากนั้นนำไปวางบนแท่นวางตัวอย่างของเครื่อง ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปสเปกตรัม FTIR ของร้อยละการส่องผ่าน (% transmittance) ในช่วงเลขคลื่น (wavenumber) 400 ถึง 4000 เซนติเมตร$^{-1}$ สำหรับงานวิจัยนี้ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของวัสดุ K_2CO_3/γ-Al_2O_3

รูปที่ 3.6 เครื่อง Fourier transform infrared spectroscope ของบริษัท PerkinElmer รุ่น Spectrum One

3.4.4 เทคนิคการวัดการดูดซับเชิงกายภาพของแก๊สไนโตรเจน (N_2 physisorption measurement)

การวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และการกระจายขนาดรูพรุนของวัสดุ อาศัยเทคนิคการวัดการดูดซับและคายซับของแก๊สไนโตรเจนบนพื้นที่ผิวของวัสดุ (N_2 adsorption-desorption measurement) ที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส โดยใช้เครื่อง

Surface area and porosity analyzer ของบริษัท Micromeritics รุ่น ASAP 2020 การวิเคราะห์เริ่มจากเตรียมพื้นผิวตัวอย่างแกมมาอะลูมินา (γ-Al_2O_3), โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) ประมาณ 10 มิลลิกรัม โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้น และสิ่งปนเปื้อนที่ดูดซับบนผิวตัวอย่างออกไป ป้อนแก๊สไนโตรเจน ทำการวัดปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับและความดันย่อยที่เปลี่ยนแปลงไป ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปของไอโซเทิร์มการดูดซับและการคายซับ (Adsorption-desorption isotherm) ในช่วงความดันสัมพัทธ์ (Relative pressure, P/P_0) 0.01 ถึง 1 ข้อมูลที่ได้สามารถนำมาคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET specific surface area; S_{BET}) ด้วยวิธีของบรูนัวร์-เอมเมทท์-เทลเลอร์ (Brunauer-Emmett-Teller, BET) ปริมาตรรูพรุนทั้งหมด (Total pore volume; V_t) สามารถหาได้จากปริมาณการดูดซับไนโตรเจนที่ความดันสัมพัทธ์ และการกระจายตัวของขนาดรูพรุน (Pore diameter; D_p) ใช้สมการของบาร์เรต-จอยเนอร์-เฮเลนดา (Barret-Joyner-Halenda, BJH)

รูปที่ 3.7 เครื่อง Surface area and porosity analyzer ของบริษัท Micromeritics รุ่น ASAP 2020

3.4.5 เทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence, XRF)

X-ray Fluorescence เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง ใช้หลักการวัดแบบกระจายความยาวคลื่นของการเรืองรังสีเอ็กซ์ (Wavelength Dispersive Xray Fluorescence) และแบบการวัดพลังงานคลื่นของการเรืองรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-ray Fluorescence) สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ

เครื่อง XRF ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ของบริษัท Bruker รุ่น S8 Tiger เตรียมตัวอย่างประมาณ 1 มิลลิกรัม บรรจุในภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง จากนั้นปิดกระดาษกาวให้เรียบร้อย นำไปวางบนแท่นวางตัวอย่างของเครื่อง ข้อมูลที่ได้แสดงผลการวัดเป็นแถบพลังงาน หรือสเปกตรัมของรังสีเอกซ์

รูปที่ 3.8 เครื่อง Surface area and porosity analyzer ของบริษัท Bruker รุ่น S8 Tiger

3.4.5 เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer, PSD)

Laser particle size distribution analyzer เทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่าง โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของแสง (Laser diffraction) ด้วยการกระจายตัวอย่างในสารตัวกลางที่ไม่ทำละลายตัวอย่าง (Dispersant) สามารถเลือกตัวกลางเป็นของเหลว หรือ ตัวกลางเป็นอากาศ เครื่อง PSD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ยี่ห้อ MALVERN รุ่น Mastersizer 3000 เตรียมตัวอย่างประมาณ 1 กรัม สำหรับวัดแบบตัวกลางเป็นของเหลว ใส่ตัวอย่างลงในภาชนะที่บรจุตัวกลางของเหลวไว้ จากนั้นนำไปใส่ในช่องตัวอย่างของเครื่อง ข้อมูลที่ได้ทำให้ทราบขนาดอนุภาคของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ($K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$) ที่ขนาดแตกต่างกัน

รูปที่ 3.9 เครื่อง Particle size distribution analyzer ของบริษัท MALVERN รุ่น Mastersizer 3000

3.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

ในการออกแบบการทดลองเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง จะต้องทำการวางแผนและมีการควบคุมการดำเนินการอย่างเป็นระบบ ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ต่อด้วยวิธีการสถิติ โดยมีจุดประสงค์ในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระนั่นคือ ปัจจัย (Factors) จากนั้นพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ซึ่งเป็นตัวแปรตอบสนอง (Response) โดยพิจารณาจากปัจจัยที่ใส่เข้าไปในกระบวนการผลิต (Input) หรืออิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction) ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการ (Output) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันในกรองปัจจัยที่มีอิทธิพล โดยการออกแบบจะต้องทำการทดลองตามรูปแบบที่ได้ถูกออกแบบไว้โดยใช้วิธีสุ่ม เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ แล้วจึงนำมาสร้างขึ้นเป็นสมการทางสถิติ โดยทั่วไปจะเป็นตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพตัวแปรในกระบวนการ (Process variable) ตัวแปรของผลิตภัณฑ์ (Product variable) ซึ่งประโยชน์ของการออกแบบการทดลองสามารถนำไปปรับใช้ในกระบวนการ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่วางเป้าหมายไว้ [34] สำหรับขั้นตอนในการออกแบบการทดลองจะแบ่งออกเป็น 7 ขั้นตอน ในการดำเนินการ แสดงดังต่อไปนี้

1. กำหนดหัวข้อปัญหา และทำความเข้าใจปัญหา โดยศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พร้อมหาแนวทางในการพัฒนา หรือการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งกำหนดเป็น วัตถุประสงค์ของการทดลอง
2. การเลือกปัจจัย การกำหนดระดับ และการกำหนดขอบเขต จำเป็นที่จะต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง ซึ่งสามารถเลือกจากกรรมวิธีคัดกรองโดยเครื่องมือทางสถิติ
3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง จะต้องเน้นตัวแปรที่สามารถวัดได้ ทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดและวัดด้วยกระบวนการวัดอื่น ๆ
4. การเลือกวิธีการออกแบบการทดลอง จะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นหลัก สำหรับการออกแบบการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบการทดลองแบบเฟคทอเรียล (Factorial design) เนื่องจาก เป็นวิธีที่สามารถอธิบายผลของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจศึกษาได้อย่างครบถ้วน อีกทั้งยังสามารถอธิบายผลของอันตรกิริยาทั้งหมดได้
5. ดำเนินการทดลองให้เป็นไปตามแผนการ ทั้งวิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลอง และเก็บผลการทดลอง
6. การวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งสามารถวิเคราะห์ความแตกต่างของประชากรได้พร้อมกันมากกว่า 2 ประชากร วิเคราะห์ได้มากกว่า 1 ปัจจัย และวิเคราะห์เพื่อให้เห็นผลกระทบซึ่งกันและกันของปัจจัยต่าง ๆ
7. สรุปผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Full factorial) โดยตัวแปรต้นที่ศึกษามีทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน, อุณหภูมิที่แตกต่างกัน และความดันเริ่มต้นที่แตกต่างกัน สำหรับตัวแปรตอบสนอง คือ ร้อยละการฟื้นฟูสภาวะของตัวดูดซับ โดยจากตัวแปรข้างต้นจะสามารถออกแบบการทดลองได้ทั้งหมด 27 ชุดการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การทดลองทั้งหมดที่ใช้วิธีแบบแฟคทอเรียล ในการศึกษาการฟื้นฟูตัวดูดซับ

Order	Particle size (μm)	Regeneration temperature (^{o}C)	Regeneration initial pressure (bar)
1	90	100	0.35
2	90	100	0.61
3	90	100	0.88
4	90	200	0.35
5	90	200	0.61
6	90	200	0.88
7	90	300	0.35
8	90	300	0.61
9	90	300	0.88
10	109	100	0.35
11	109	100	0.61
12	109	100	0.88
13	109	200	0.35
14	109	200	0.61
15	109	200	0.88
16	109	300	0.35
17	109	300	0.61
18	109	300	0.88
19	124	100	0.35
20	124	100	0.61
21	124	100	0.88
22	124	200	0.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Order	Particle size (μm)	Regeneration temperature (^{o}C)	Regeneration initial pressure (bar)
23	124	200	0.61
24	124	200	0.88
25	124	300	0.35
26	124	300	0.61
27	124	300	0.88

3.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการฟื้นฟูสภาพ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (K_2CO_3/γ-Al_2O_3) ในงานวิจัยนี้ศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ 3 แบบจำลอง คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model), แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) และแบบจำลองอาฟรามี (Avrami's model) ข้อมูลสมการแต่ละแบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 3.4 โดยพิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสมกับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ จากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (%Error) เป็นเครื่องชี้วัดความใกล้เคียงกันระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง โดยจากสมการที่ 2.2 แสดงสมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม จะนำข้อมูลที่บันทึกได้มาสร้างกราฟระหว่าง $\ln(q_e$-$q_t)$ และ ระยะเวลา (t) จากสมการที่ 2.4 แสดงสมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม จะนำข้อมูลที่บันทึกได้มาสร้างกราฟระหว่าง t/q_t และระยะเวลา (t) และจากสมการที่ 2.6 แสดงสมการของแบบจำลองอาฟรามี จะนำข้อมูลที่บันทึกได้มาสร้างกราฟระหว่าง $\ln(\ln(q_e/q_e$-$q_t))$ และ lnt

ตารางที่ 3.4 สมการแบบจำลองจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพที่ทำการศึกษา

แบบจำลองจลนพลศาสตร์	สมการ
แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม	$\ln(q_e - qt) = \ln q_e - k_1 t$
แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม	$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e}$
แบบจำลองอาฟรามี	$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = n_{AV}K_{AV} + n_{AV} \ln t$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะแบ่งออกเป็น 6 ส่วน ดังนี้ การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับของแข็ง การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง การหาภาวะที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง และการศึกษาจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

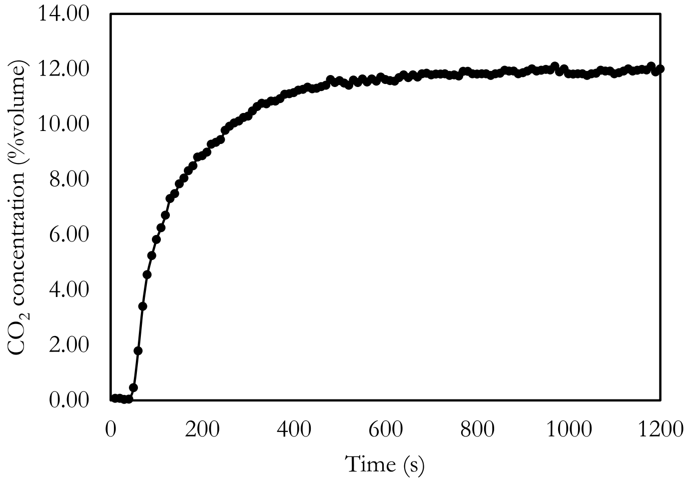
4.1 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากผลการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ที่ภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิ 333 เคลวิน, ความดัน 1 บาร์, อัตราการไหล 0.8 ลิตรต่อนาที และปริมาณตัวดูดซับ 5 กรัม ซึ่งเป็นภาวะดำเนินการที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Boonprasop และคณะ [35] จะพบว่า เมื่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับที่อยู่กับที่ การดูดซับจะเริ่มเกิดขึ้นจนกระทั่งความสามารถในการดูดซับเริ่มหมดไป เรียกว่า จุดเริ่มอิ่มตัวในการดูดซับ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการดูดซับตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งความสามารถในการดูดซับเริ่มหมดไป เรียกว่า เวลาเบรคทรู (Breakthrough time) หาค่าได้จากกราฟเบรคทรู (Breakthrough curve) โดยทั่วไปกราฟมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) หลังจากจุดเริ่มอิ่มตัวในการดูดซับ กราฟจะเป็นเส้นโค้งยกตัวสูงขึ้นและคงที่ ซึ่งเกิดจากการดูดซับค่อย ๆ ลดลง จนไม่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้อีก (Exhaustion point) หรือการดูดซับเต็มความสามารถแล้ว โดยในการทดลองนี้ ระยะเวลาที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้เวลาไปถึงเซนเซอร์ (Delay time) ประมาณ 10 วินาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับเวลา (วินาที) ที่ขนาดอนุภาค 90 μm จะพบว่า เวลาที่เกิดการดูดซับสมบูรณ์เริ่มต้นจนกระทั่งเวลาผ่านไปประมาณ 500 วินาที จากนั้นจะเห็นว่าค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ดังแสดงโดยกราฟที่เป็นเส้นโค้งยกตัวสูงขึ้นและคงที่ ซึ่งเกิดจากตัวดูดซับค่อย ๆ หมดความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากตัวดูดซับถูกใช้หมดไป หรือเกิดการดูดซับเต็มความสามารถแล้ว จากการวัดพบว่าตัวดูดซับสามารถดูดซับแก๊ส

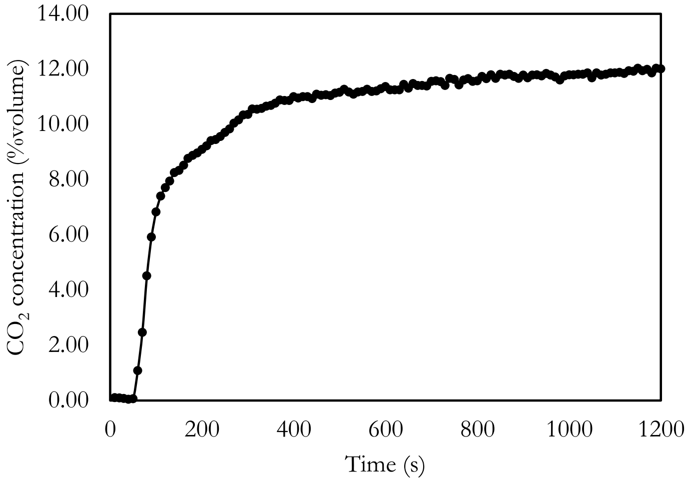
คาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 90.46 มิลลิกรัม CO_2 ต่อกรัมของตัวดูดซับ ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 3.1



รูปที่ 4.1 กราฟเบรคทรูของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขนาดอนุภาค 90 μm

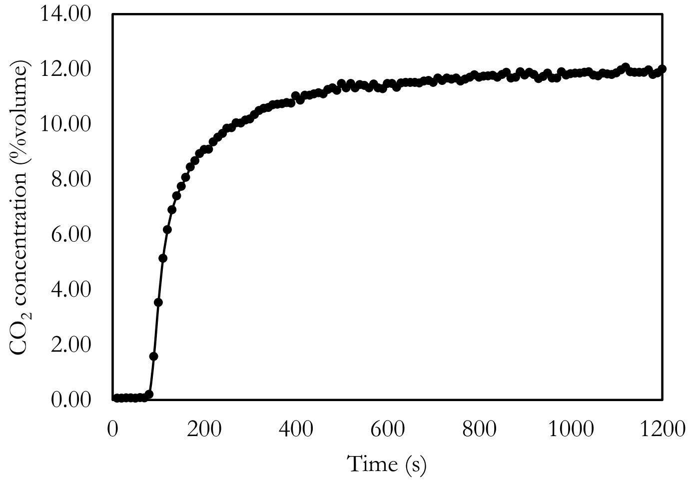
รูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับเวลา (วินาที) สำหรับตัวดูดซับขนาดอนุภาค 109 μm จะมีลักษณะการตอบสนองแบบเดียวกับรูปที่ 4.1 เวลา 500 วินาทีแรก เป็นช่วงการดูดซับสมบูรณ์ หลังจากนั้นค่าความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นดังแสดงในกราฟ โดยค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 83.33 มิลลิกรัม CO_2 ต่อกรัมของตัวดูดซับ ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 3.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 กราฟเบรคทรูของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขนาดอนุภาค 109 μm

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับเวลา (วินาที) สำหรับตัวดูดซับขนาดอนุภาค 124 μm กราฟมีลักษณะเหมือนกับรูป 4.1 และ 4.2 เวลาชองการดูดซับสมบูรณ์ คือช่วง 500 วินาทีแรก หลังจากนั้นความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อยเพิ่มขึ้นดังแสดงในกราฟ ค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยเท่ากับ 80.32 มิลลิกรัม CO_2 ต่อกรัมของตัวดูดซับ คำนวณมาจากสมการที่ 3.1



รูปที่ 4.3 กราฟเบรคทรูของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขนาดอนุภาค 124 μm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของขนาดอนุภาคที่ 90, 109 และ 124 μm มีค่า 90.46, 83.33 และ 80.32 มิลลิกรัม CO_2 ต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ จากการทดลอง พบว่า อนุภาคขนาด 90 μm มีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด ทั้งนี้ เนื่องจาก พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับเชิงกายภาพของแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 มีค่ามากกว่าอนุภาคที่มีขนาด 109 และ 124 μm ซึ่งปัจจัยทั้งสองนี้น่าจะส่งผลต่อการดูดซับเชิงกายภาพ (Physisorption) โดยการดูดซับเชิงกายภาพจะมีบทบาทน้อยกว่าการดูดซับเชิงเคมีกันเกิดจากปริมาณและการกระจายตัวของโลหะกัมมันต์โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ ปริมาณของ K_2CO_3 ในตัวดูดซับที่ได้ในตัวดูดซับขนาดต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งมีผลต่อการดูดซับเชิงเคมี (Chemisorption)

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Analysis of Experiment Data)

4.2.1 การออกแบบการทดลองโดยใช้แฟคตอเรียลแบบ 2^k (2^k factorial design) สำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับเพื่อการเลือกตัวแปรที่มีผลกระทบ

การออกแบบการทดลองโดยใช้แฟคตอเรียลแบบ 2^k เป็นการศึกษาเพื่อคัดเลือกตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา หรือเพื่อกรองเอาปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลออกไป การออกแบบการทดลองแบบนี้ พิจารณาตัวแปรหรือปัจจัยที่จะศึกษา k ปัจจัย ค่าที่ใช้ในการศึกษาของแต่ละปัจจัยจำแนกเป็น 2 ระดับ คือ ค่าระดับสูงแสดงเครื่องหมาย “ + ” และค่าระดับต่ำแสดงเครื่องหมาย “ - ” ซึ่งค่าของปัจจัยจะเป็นได้ทั้งข้อมูลเชิงปริมาณหรือเชิงคุณภาพที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาใน 3 ปัจจัย คือ ขนาดอนุภาค, อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ โดยกำหนดให้ ตัวแปร A คือ ขนาดของอนุภาค (μm) , ตัวแปร B คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (^{o}C) และตัวแปร C คือ ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (bar) และใช้สัญลักษณ์แทนระดับสูงและต่ำเป็น 1 และ -1 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ช่วงในการทดลองและระดับของตัวแปรดำเนินการของการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

Operating parameter	Symbol	Unit	Code of level	
			-1	1
Particle size	A	mm	90	124
Regeneration temperature	B	^{o}C	100	300
Regeneration initial pressure	C	bar	0.35	0.88

ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา จะแสดงเป็นร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวแปรที่ศึกษามี 3 ปัจจัย จำนวนการทดลองเท่ากับ 8 การทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.2 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

Order	A	B	C	Sorbent regeneration (%)
1	-1	-1	-1	75.20
2	1	-1	-1	69.10
3	-1	1	-1	97.73
4	1	1	-1	96.17
5	-1	-1	1	9.04
6	1	-1	1	19.89
7	-1	1	1	25.11
8	1	1	1	29.41

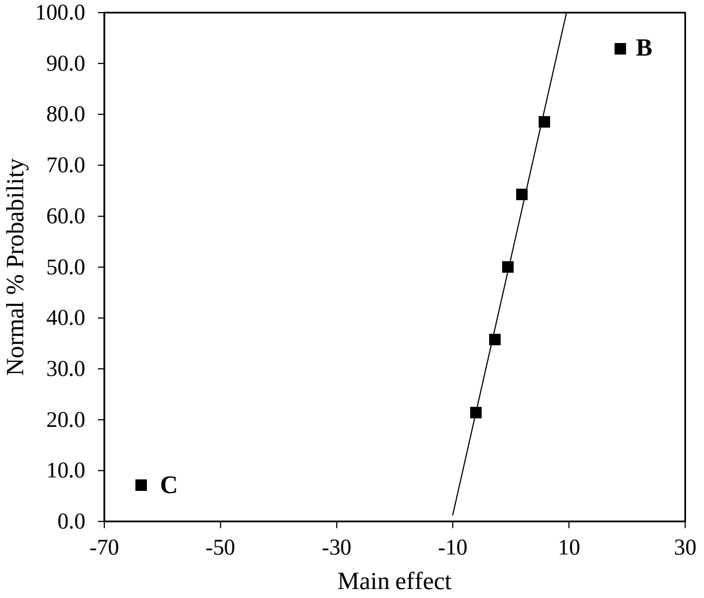
จากตารางที่ 4.2 ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาสูงสุด มีค่าเท่ากับ 97.73% จากการทดลองที่ 3 ในภาวะดำเนินการที่อนุภาคขนาด 90 ไมโครเมตร, อุณหภูมิใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์ ในขณะที่ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 9.04% จากการทดลองที่ 5 ในภาวะดำเนินการที่อนุภาคขนาด 90 ไมโครเมตร, อุณหภูมิใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 100 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.88 บาร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากแผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability plot) ในรูปที่ 4.2 ใช้ในการคัดกรองตัวแปรดำเนินการและอันตรกิริยาที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา จากรูปจะเห็นได้ว่า ตัวแปร B และตัวแปร C ซึ่งก็คือ อุณหภูมิ และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ ตามลำดับ เบี่ยงเบนออกจากแนวเส้นปกติ จึงเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการฟื้นฟูสภาพอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ ตัวแปร A คือ ขนาดของอนุภาคและอันตรกิริยาของตัวแปรไม่ส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียม

คาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา อย่างไรก็ตามผลกระทบของตัวแปร B และ C เป็นไปทิศทางที่ตรงข้ามกัน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลองที่ได้มาจากการออกแบบการทดลองโดยใช้แฟคตอเรียลแบบ 2^3 ถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาผลของตัวแปรดำเนินการแต่ละตัวและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าตัวแปร B คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และตัวแปร C คือ ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากแผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยพิจารณาผลจากค่าของ P-Value ที่น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรนั้นมีผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา กล่าวคือ ผลจากการทดลองต้องมีระดับความมั่นใจตั้งแต่ร้อยละ 95 ขึ้นไปจึงจะสามารถยอมรับได้ ดังนั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพจึงมีอิทธิพลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.4 แผนภาพความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 วิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจากการออกแบบการทดลองโดยใช้แฟคตอเรียลแบบ 2^k

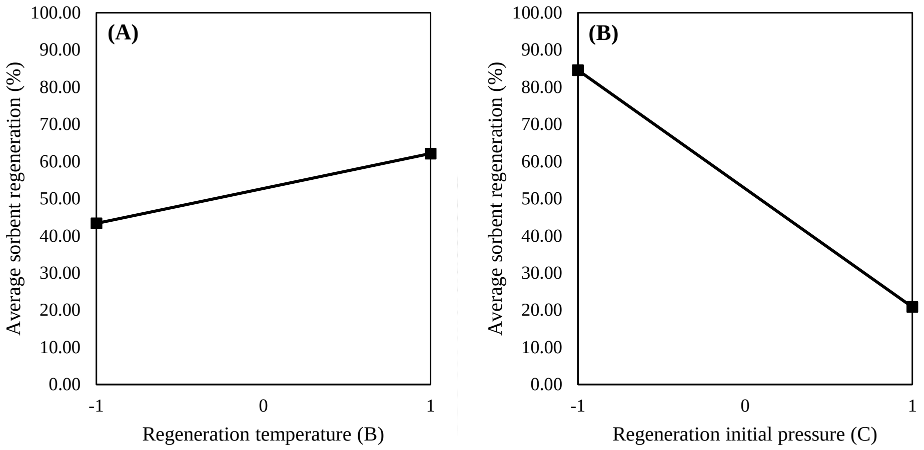
Sources	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-value	P-value	F_{table}
Model	8818.89	2	4409.44	165.37	< 0.0000	5.14
B	706.69	1	706.69	26.50	< 0.0001	5.99
C	8112.20	1	8112.20	304.23	< 0.0001	5.99
Error	159.99	6	26.66			
Total	8978.88	8				

ตารางที่ 4.3 สามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการใดที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่ยังไม่สามารถบอกว่าตัวแปรนั้น ๆ ส่งผลในเชิงบวก หรือในเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนองได้ ดังนั้น จึงต้องสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบหลักของตัวแปรเดี่ยวแต่ละตัวกับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา เพื่อให้สามารถบอกผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลในเชิงบวกหรือผลในเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจได้

รูปที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของผลกระทบตัวแปรเดี่ยวที่มีต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ในรูปที่ 4.5A จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพกับค่าเฉลี่ยของร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเพิ่มขึ้นจาก 100 องศาเซลเซียส เป็น 300 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยของร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นจาก 43.31% เป็น 62.11% เนื่องจากการสลายตัวของผลิตภัณฑ์โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต ($KHCO_3$) ได้ง่ายขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้น และที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส สารประกอบเชิงซ้อนโพแทสเซียมดาวน์โซไนต์ ($KAl(CO_3)_2(OH)_2$) จะเกิดการสลายตัว ซึ่งมีอิทธิพลเชิงบวกต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับตัวดูดซับของแข็ง

รูปที่ 4.5B แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพกับค่าเฉลี่ยของร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ เมื่อความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพลดลงจาก 0.88 บาร์ เป็น 0.35 บาร์ ค่าเฉลี่ยของร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้นจาก

20.86% เป็น 84.55% เนื่องจากปฏิกิริยาผันกลับได้ทางเคมี เมื่อความดันลดลงจะทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับ เพื่อเพิ่มโมลของ CO_2 และ H_2O ทำให้ผลิตภัณฑ์โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต ($KHCO_3$) เปลี่ยนกลับไปเป็นสารตั้งต้นโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และมีการปลดปล่อยแก๊สที่ถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวออกมาได้ ซึ่งมีอิทธิพลเชิงลบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง



รูปที่ 4.5 ผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการ (A) อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (B) ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ ต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ (Characterization of sorbents)

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางเคมีกายภาพของตัวดูดซับ

Sample	S_{BET} [a] (m^2/g)	V_t [b] (cm^3/g)	D_p [c] (nm)	S_{ext} [d] (m^2/g)	K_2CO_3 loading [e] (wt%)	Particle size [f] (μm)
K_2CO_3	2.5	0.001	2.0	n.d.*	100	n.d.*
γ-Al_2O_3	122.2	0.225	7.4	45.8	n.d.*	n.d.*
K_2CO_3/γ-Al_2O_3-90-Fresh	41.5	0.092	6.4	40.2	40.83	90
K_2CO_3/γ-Al_2O_3-109-Fresh	29.9	0.067	6.2	29.3	42.88	109
K_2CO_3/γ-Al_2O_3-124-Fresh	24.8	0.058	6.0	24.4	43.12	124
K_2CO_3/γ-Al_2O_3-90-Spent	37.1	0.085	6.4	35.9	40.41	90
K_2CO_3/γ-Al_2O_3-90-Regen-100 ^oC	38.0	0.086	6.5	36.4	39.56	90
K_2CO_3/γ-Al_2O_3-90-Regen-200 ^oC	37.8	0.085	6.4	36.3	38.54	90
K_2CO_3/γ-Al_2O_3-90-Regen-300 ^oC	38.7	0.087	6.5	37.4	38.19	90

*n.d. = Not determined

[a] BET surface area

[b] Total pore volume

[c] Pore diameter calculated using the BJH method

[d] External surface area determined from t-plot curves

[e] X-ray Fluorescence

[f] Particle size distribution analyzer

4.3.1 ขนาดและการกระจายตัวของตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size distribution analyzer, PSD)

การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดอนุภาค เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านลำแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ จะเกิดการเลี้ยวเบนของแสงขึ้นในมุมต่าง ๆ ตามลักษณะขนาดของอนุภาคที่แสงเลเซอร์ตกกระทบ โดยมุมของการเลี้ยวเบนของแสงจะแปรผกผันกับขนาดของอนุภาค ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ มุม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ของการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์จะแคบ แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็ก มุมของการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์จะกว้าง ซึ่งความเข้มแสงที่เกิดจากการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ที่มุมต่าง ๆ จะถูกตรวจวัดด้วยหัวตรวจวัดของเครื่องวัดขนาดอนุภาค และถูกคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์และค่าของขนาดอนุภาคนั้น ๆ รวมทั้งสามารถคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยขนาดอนุภาคต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ซึ่งในขั้นตอนของการเตรียมตัวดูดซับจะนำตัวดูดซับที่ได้ไปร่อนผ่านตะแกรงแต่ละชั้นเพื่อแยกขนาดของอนุภาค จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์อนุภาคของตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่มีขนาดของอนุภาคตัวดูดซับเท่ากับ 90, 109 และ 124 ไมโครเมตร ตามลำดับ

4.3.2 ชนิดและปริมาณองค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence, XRF)

ในกระบวนการการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา องค์ประกอบธาตุหรือสัดส่วนของโลหะกัมมันต์ (โพแทสเซียมคาร์บอเนต) ต่อสัดส่วนของตัวรองรับ (แกมมาอะลูมินา) มีความสำคัญ เนื่องจาก สัดส่วนดังกล่าวส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์สเปกโทรสโกปี (X-ray fluorescence, XRF) เพื่อระบุธาตุในสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ เทคนิคดังกล่าวเป็นการวัดอัตราการเรืองของรังสีเอกซ์ที่เป็นลักษณะเฉพาะของธาตุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณองค์ประกอบของธาตุในตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ด้วยเทคนิค XRF ผลที่ได้รับแสดงในรูปของสเปคตรัม โดย XRF ตรวจพบอะตอมของธาตุโพแทสเซียม (K) และอะลูมิเนียม (Al) เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ ยังตรวจพบธาตุอื่น ๆ (Ca, Cl, Si) เจือปนอยู่เล็กน้อย จากชนิดและปริมาณธาตุ องค์ประกอบที่ได้นี้ สามารถคำนวณปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ที่อยู่ในตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 โดยคำนวณจากน้ำหนักของ K_2CO_3 ส่วนด้วยน้ำหนักทั้งหมด จากตารางที่ 4.1 จะพบว่าตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่มีขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตรและยังไม่ผ่านการใช้งาน มีน้ำหนักของ K_2CO_3 ในตัวดูดซับ คิดเป็นร้อยละ 40.83 สำหรับตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่มี

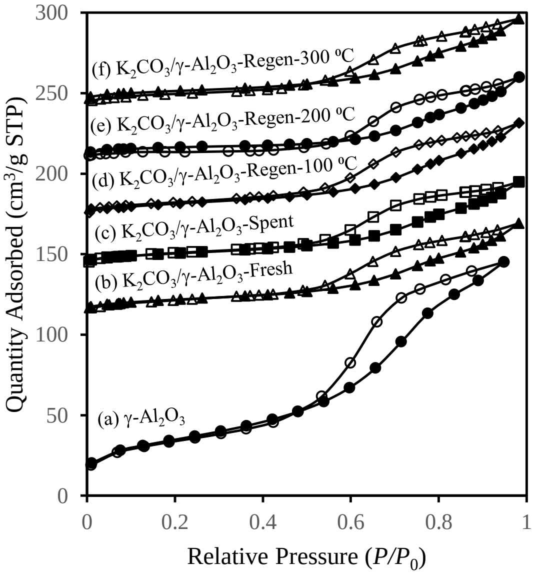
ขนาดอนุภาค 109 และ 124 ไมโครเมตรและยังไม่ผ่านการใช้งาน มีน้ำหนักของ K_2CO_3 ในตัวดูดซับ คิดเป็นร้อยละ 42.88 และ 43.12 ตามลำดับ สังเกตได้ว่า ร้อยละโดยน้ำหนักของ K_2CO_3 ในตัวดูดซับ ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการเตรียมตัวดูดซับทำในครั้งเดียวกันและนำไปผ่านตะแกรงร่อนเพื่อแยกขนาดอนุภาค

ในส่วนของตัวดูดซับ K_2CO_3 / γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว สำหรับตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร ร้อยละโดยน้ำหนักของ K_2CO_3 ในตัวดูดซับ เท่ากับ 40.41 จะสังเกตเห็นว่า ค่าที่ได้ไม่แตกต่างกับตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเมื่อตัวดูดซับมีขนาดเดียวกัน เนื่องจากเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุด้วย XRF มีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) น้อยกว่า 11 ได้ (H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne และ Na) ดังนั้น ผลที่ได้จากสเปคตรัมของ XRF จึงไม่พบพีคของอะตอมคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) สำหรับตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตรที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียสและความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0.35 บาร์ จะได้ร้อยละโดยน้ำหนักของ K_2CO_3 ในตัวดูดซับ เท่ากับ 39.56, 38.54 และ 38.19 ตามลำดับ จากผลการทดลองที่ได้ ร้อยละโดยน้ำหนักของ K_2CO_3 ในตัวดูดซับ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดเดียวกัน บ่งบอกว่า ปริมาณของ K_2CO_3 ในตัวดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพไม่ได้ถูกชะล้าง (Leaching) หรือหลุดหายไปจากระบบ

4.3.3 สมบัติความพรุนของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับเชิงกายภาพของแก๊สไนโตรเจน (N_2 physisorption measurement)

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับเชิงกายภาพของแก๊สไนโตรเจน (N_2 physisorption measurement) โดยกระบวนการวิเคราะห์จะป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับ-คายซับของตัวดูดซับแต่ละชนิด ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะกัมมันต์และตัวรองรับของตัวดูดซับ หลังจากนั้นจะลดความดันของระบบเพื่อให้เกิดการคายซับของแก๊สไนโตรเจน โดยแก๊สไนโตรเจนที่คายออกมาจะถูกบันทึกปริมาตร และนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และ ปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณารูปแบบไอโซเทิร์มการดูดซับ-การคายซับแก๊สไนโตรเจนของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา, ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน, ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว และตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่มีขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร ซึ่งผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์ พบว่ารูปแบบรูพรุนของตัวดูดซับทั้งหมดเป็นรูพรุนแบบ Type IV ตามการแบ่งประเภทของไอโซเทิร์มตามการจำแนกของ International Union of Pure and Applied Chemist (IUPAC) ซึ่งแสดงลักษณะการเกิดวงฮีสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ของรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) มีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการควบแน่นของตัวดูดซับภายในรูพรุนของวัสดุซึ่งมีลักษณะเหมือนการควบแน่นในหลอดแคปิลารี (Capillary condensation) เมื่อความดันสัมพัทธ์มีค่ามากกว่าความดันสัมพัทธ์ ณ จุดที่เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว รูปร่างของวงฮีสเทอรีซิสจะมีความสัมพันธ์กับรูปทรงของรูพรุนในวัสดุ และเมื่อพิจารณาวงฮีสเทอรีซิสที่เกิดขึ้น พบว่าเป็นประเภท H3 ตามการจำแนกรูปทรงรูพรุนตามลักษณะของวงฮีสเทอรีซิสของ IUPAC ซึ่งแสดงถึงรูพรุนที่มีลักษณะเหมือนร่องเป็นแนวยาว (Slit-shaped pores) นอกจากนี้ เส้นโค้งการคายของฮีสเทอรีซิส H3 ยังมีความลาดชัน เนื่องจากปรากฏการณ์ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength effect) โดยเส้นด้านล่างแสดงถึงการดูดซับ ส่วนเส้นด้านบนแสดงถึงการคายซับของไนโตรเจนออกจากรูพรุน การดูดซับและการคายซับของสารส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณความดันสัมพัทธ์เท่ากับ 0.5 บ่งบอกว่ารูพรุนมีลักษณะคล้ายหลอดแคปิลารีปลายเปิดทั้งสองด้าน มีรัศมีรูพรุนหลายขนาดแต่รัศมีทางเข้ารูพรุนมีขนาดเท่ากัน [36]



รูปที่ 4.6 ไอโซเทิร์มการดูดซับ-การคายซับแก๊สไนโตรเจนของ (a) γ-Al_2O_3 (b) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh, (c) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Spent, (d) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-100 °C, (e) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-200 °C and (f) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-300 °C.

จากตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของโพแทสเซียมคาร์บอเนต, ตัวรองรับแกมมาอะลูมินา, ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 90, 109 และ 124 ไมโครเมตร ตามลำดับ, ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร และผ่านการใช้งานแล้ว และตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตรเมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์ ตามลำดับ พบว่า โพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ทำหน้าที่เป็นโลหะกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนต่ำ เมื่อเทียบกับตัวรองรับแกมมาอะลูมินาที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 122.2 ตารางเมตรต่อกรัม, ปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.225 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุนเท่ากับ 7.4 นาโนเมตร จึงทำการฝังตัวหรืออิมเพรกเนชันโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา สังเกตได้ว่า ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 90, 109 และ 124 ไมโครเมตร จะมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อเทียบกับตัวรองรับแกมมาอะลูมินา เนื่องจากตัวรองรับแกมมาอะลูมินาเป็นเมทริกซ์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็น

รูพรุนสูง เมื่อทำการฝังตัวโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงไป จะทำให้รูพรุนที่เกิดจากการรวมตัวกันของอนุภาค (Interparticle void) โพแทสเซียมคาร์บอเนตและตัวรองรับแกมมาอะลูมินาจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) [9] จากนั้นนำไปดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบกันที่อนุภาค 90 ไมโครเมตร พบว่า ตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนลดลงเล็กน้อย เนื่องจากโมเลกุลของน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าไปปกคลุมบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับ และสารตั้งต้นโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) จะทำปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต ($KHCO_3$) แต่จะไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ เพราะโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ และเมื่อนำตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว มาทำการการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์ จะพบว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย หรือใกล้เคียงกับตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เนื่องจากการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ จะทำให้สารผลิตภัณฑ์, น้ำ และสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่ปกคลุมบริเวณผิวหรือภายในรูพรุนออกไป

4.3.4 สมบัติเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ เนื่องจากสามารถวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็ว และ ไม่ทำลายตัวอย่าง อีกทั้งยังสามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับหน่วยเซลล์ของผลึกและวัฏภาคที่เปลี่ยนไปได้ จึงนิยมใช้ในการพิสูจน์โครงสร้างของสาร รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของสารประกอบ เมื่อผ่านกระบวนการต่าง ๆ ตัวดูดซับที่เตรียมได้ มีองค์ประกอบ 2 ชนิด คือ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และ แกมมาอะลูมินา ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 3.2 การทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และ น้ำ จะได้สารผลิตภัณฑ์เป็นโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต แต่อย่างไรก็ตามใน กระบวนการเตรียมตัวดูดซับและการดูดซับ

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเกิดขึ้นได้ ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับตัวดูดซับของแข็ง

รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบ XRD ของ (a) K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน, (b) K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว, (c) K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความดันเริ่มต้น 0.35 บาร์, (d) K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ความดันเริ่มต้น 0.35 บาร์ และ (e) K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่ความดันเริ่มต้น 0.35 บาร์ ตามลำดับ จากการทดลอง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปแบบ XRD ของวัสดุแต่ละตัว พบว่า วัฏภาคของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (γ-Al_2O_3) (JCPDS No.10-0425) [37] ปรากฏตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นในตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด คือ ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 20.06, 38.36, 45.45, 61.21 และ 67.01 ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.57, 38.88, 46.01, 61.25 และ 67.52 ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.35 บาร์ ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 18.68, 38.89, 45.71, 61.32 และ 67.57 ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.35 บาร์ ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 18.99, 39.12, 45.53, 61.90 และ 67.55 และตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.35 บาร์ ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 19.51, 39.27, 45.67, 62.06 และ 67.27 ซึ่งจากผลที่ได้ γ-Al_2O_3 ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับ เนื่องจาก γ-Al_2O_3 ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ และไม่ทำปฏิกิริยาในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ทำให้ตำแหน่งพีคที่เกิดขึ้นอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน

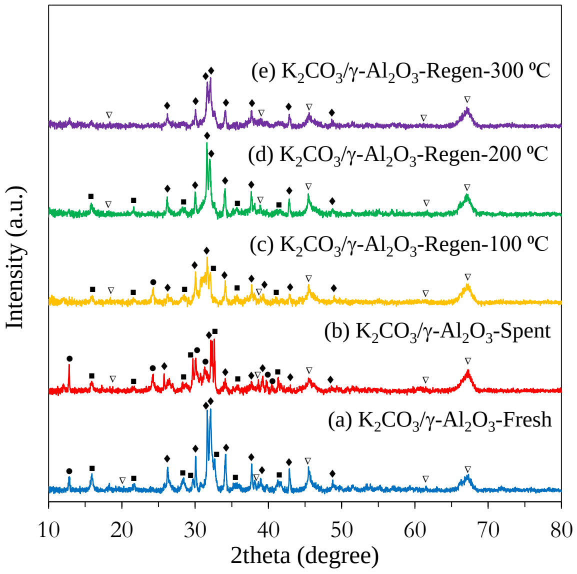
เมื่อพิจารณารูปแบบ XRD ของตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งานและตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว พบว่า ตำแหน่งพีคเกิดขึ้นที่ตำแหน่งแตกต่างกัน คือ ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.19, 30.04, 31.99, 34.06, 37.67, 38.74, 42.75 และ 48.59 ซึ่งเป็นตำแหน่งของวัฏภาค K_2CO_3 (JCPDS No. 71-1466) [38] และตำแหน่งของวัฏภาคสารประกอบ

เชิงซ้อนโพแทสเซียมดาวน์โซไนต์ ($KAl(CO_3)_2(OH)_2$) (JCPDS No.21-0979) [41] ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 16.07, 21.88, 28.01, 36.17 และ 41.86 ส่วนตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.15, 32.13, 34.00, 37.89, 39.12, 43.46 และ 49.05 ซึ่งเป็นตำแหน่งของวัฏภาค K_2CO_3 (JCPDS No. 71-1466) [38] ตำแหน่งของวัฏภาค $KAl(CO_3)_2(OH)_2$ (JCPDS No.21-0979) [41] ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 16.57, 21.57, 28.02, 36.28 และ 41.45 และที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 12.84, 24.07, 30.17, 31.77 และ 39.92 ซึ่งเป็นตำแหน่งของวัฏภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนต ($KHCO_3$) (JCPDS No. 70-0095) [40] เนื่องจากการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตในภาวะที่มีน้ำจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งได้ $KHCO_3$ เป็นสารผลิตภัณฑ์ จึงพบวัฏภาคของ $KHCO_3$ ในตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ในส่วนของวัฏภาค $KAl(CO_3)_2(OH)_2$ จะพบทั้งในตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว เนื่องจาก $KAl(CO_3)_2(OH)_2$ เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการตอนเตรียมตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ($KAlO_2$) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) โดยประกอบด้วยธาตุโพแทสเซียม (K), อะลูมิเนียม (Al), คาร์บอน (C), ออกซิเจน (O) และไฮโดรเจน (H) อีกทั้งยังเกิดในระหว่างการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย [37]

เมื่อพิจารณารูปแบบ XRD ของตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว และ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส จะปรากฏพีคที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ประกอบด้วยวัฏภาคของ K_2CO_3, $KAl(CO_3)_2(OH)_2$ และ $\gamma\text{-}Al_2O_3$ ส่วนตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ประกอบด้วยวัฏภาคของ K_2CO_3, $KAl(CO_3)_2(OH)_2$, $KHCO_3$ และ $\gamma\text{-}Al_2O_3$ เมื่อพิจารณารูปแบบ XRD ของตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จะปรากฏตำแหน่งของพีคที่เกิดขึ้นในตำแหน่งเดียวกัน คือ ตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.62, 29.99, 34.26, 37.64, 39.49, 43.10 และ 49.46 ซึ่งเป็นตำแหน่งของวัฏภาค K_2CO_3 (JCPDS No.71-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1466) [38] และที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 16.45, 21.89, 28.16, 36.11 และ 41.78 เป็นตำแหน่งของวัฏภาค $KAl(CO_3)_2(OH)_2$ (JCPDS No.21-0979) [41] ส่วน K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.17, 29.96, 31.93, 33.96, 37.68, 42.89 และ 49.09 ซึ่งเป็นตำแหน่งของวัฏภาค K_2CO_3 (JCPDS No. 71-1466) [38] และที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 16.37, 22.18, 28.24, 36.38 และ 41.31 เป็นตำแหน่งของวัฏภาค $KAl(CO_3)_2(OH)_2$ (JCPDS No.21-0979) [41] สังเกตได้ว่าจะไม่ปรากฏวัฏภาคของ $KHCO_3$ เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของ $KHCO_3$ เท่ากับ 91 องศาเซลเซียส และผลิตภัณฑ์ $KHCO_3$ จะเปลี่ยนวัฏภาคกลับไปเป็นวัฏภาคสารตั้งต้นของ K_2CO_3 โดยสมบูรณ์ [38] และสำหรับตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะปรากฏตำแหน่งของพีคที่ 2θ เท่ากับ 26.28, 30.13, 31.99, 32.01, 34.20, 37.74, 42.99 และ 48.97 ซึ่งเป็นตำแหน่งของวัฏภาค K_2CO_3 จะไม่ปรากฏวัฏภาคของ $KHCO_3$ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ $KHCO_3$ จะเปลี่ยนวัฏภาคกลับไปเป็นวัฏภาคสารตั้งต้นของ K_2CO_3 โดยสมบูรณ์ และจะไม่ปรากฏวัฏภาคของ $KAl(CO_3)_2(OH)_2$ เนื่องจากอุณหภูมิการสลายตัวของ $KAl(CO_3)_2(OH)_2$ อยู่ในช่วง 270-350 องศาเซลเซียส [8]

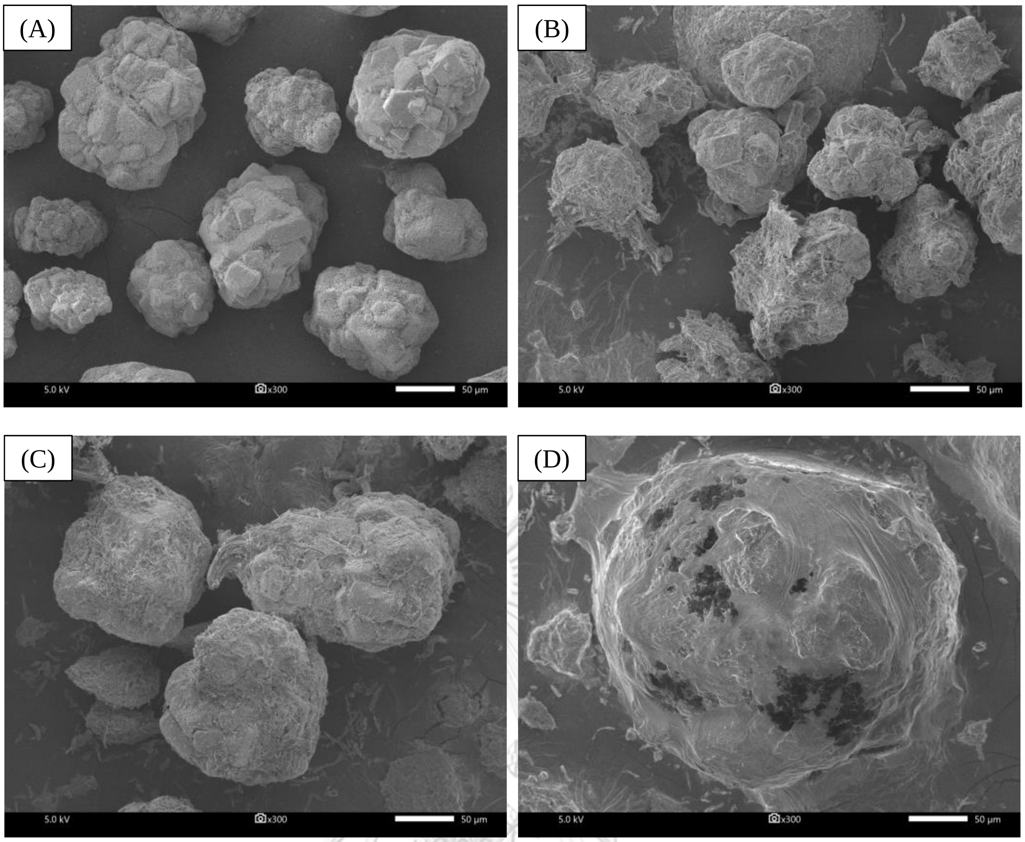


รูปที่ 4.7 รูปแบบ XRD ของ (a) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh, (b) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Spent, (c) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-100 °C, (d) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-200 °C and (e) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-300 °C. [∇, γ-Al_2O_3; ♦, K_2CO_3; ●, $KHCO_3$; ■, $KAl(CO_3)(OH)_2$]

4.3.5 สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์กับสมบัติเชิงโครงสร้าง และสมบัติทางกายภาพ ซึ่งจะช่วยให้ทราบถึงรูปทรง ขนาด การกระจายตัวของผลึก โดยงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการสร้างภาพสามมิติของพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยการส่องกราดลำอิเล็กตรอนลงบนพื้นผิวของตัวอย่าง ทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนชั้นนอก เกิดเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ โดยจะมีเครื่องรับสัญญาณตรวจจับอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ เทคนิคนี้นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง เนื่องจากใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อย และเห็นพื้นผิวของตัวดูดซับ

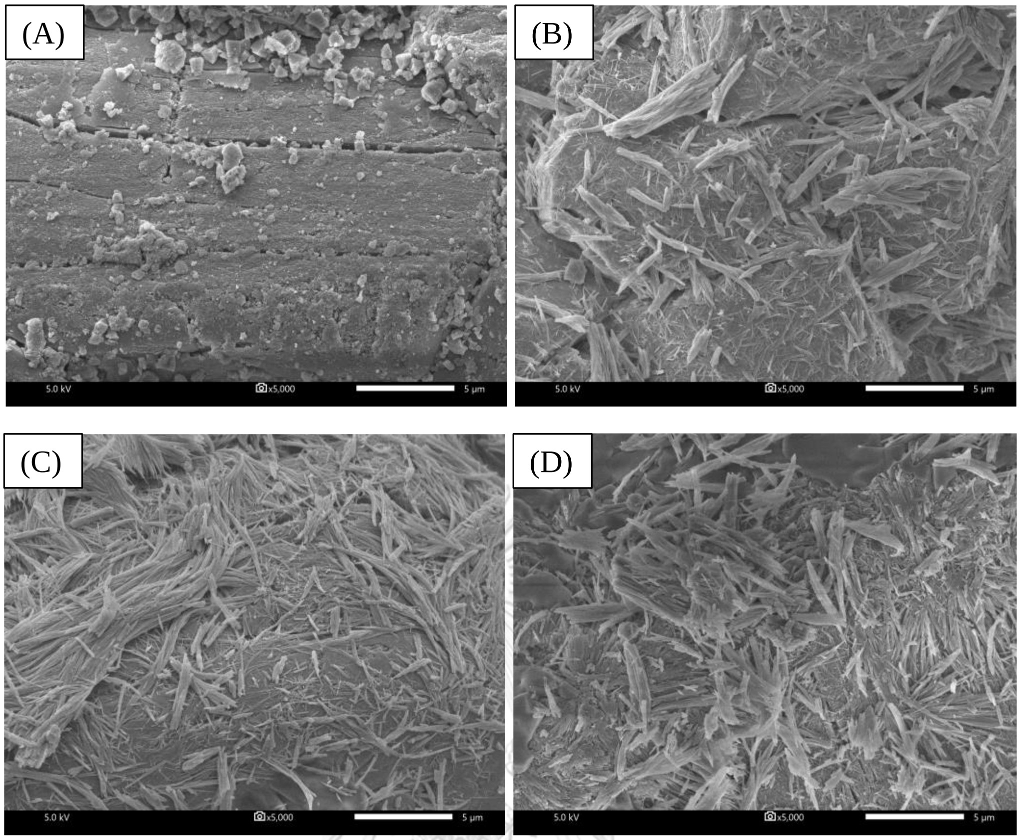
จากรูปที่ 4.8 แสดงสัณฐานวิทยาจากภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า ของ (A) ตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (B) ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 109 ไมโครเมตร และ (D) ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 124 ไมโครเมตร แสดงให้เห็นว่า พื้นที่ผิวของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา มีลักษณะผิวค่อนข้างเรียบ มีความคมของเหลี่ยมและมุมอย่างชัดเจน จากรูปที่ 4.8B พบว่า ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร มีลักษณะผิวขรุขระ มีผลึกรูปแท่งยาวมาปกคลุมที่ผิว และกระจายตัวอยู่รอบ ๆ ผิวของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ซึ่งเป็นอนุภาคของโพแทสเซียมคาร์บอเนต ทำให้ความคมของเหลี่ยมและมุมของแกมมาอะลูมินามีความคมน้อยลง เนื่องจากการชนกันของอนุภาคระหว่างขั้นตอนการเขย่าในการเตรียมตัวดูดซับ ส่วนตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ขนาดอนุภาค 109 และ 124 ไมโครเมตร จะมีลักษณะเดียวกับกับตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร แต่ขนาดอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของ PSD ที่ทำการวิเคราะห์ขนาดของตัวดูดซับ เนื่องจากเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของโพแทสเซียมคาร์บอเนต ทำให้เชื่อมกันเป็นก้อนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 300 เท่า ของ (A) γ-Al_2O_3 (B) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 109 ไมโครเมตร และ (D) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 124 ไมโครเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูปที่ 4.9 แสดงสัณฐานวิทยาจากภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของ (A) ตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (B) ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 109 ไมโครเมตร และ (D) ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 124 ไมโครเมตร แสดงให้เห็นว่า ที่กำลังขยายสูงขึ้น รูปที่ 4.9B มีผลึกรูปแท่งของ K_2CO_3 มาเกาะบริเวณผิวหน้าของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา รูปที่ 4.9C ผลึกรูปแท่งของ K_2CO_3 กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบริเวณผิวหน้าของตัวรองรับแกมมาอะลูมินามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.9B และรูปที่ 4.9D ผลึกรูปแท่งของ K_2CO_3 ปกคลุมผิวหน้าของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา แต่เกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของ K_2CO_3

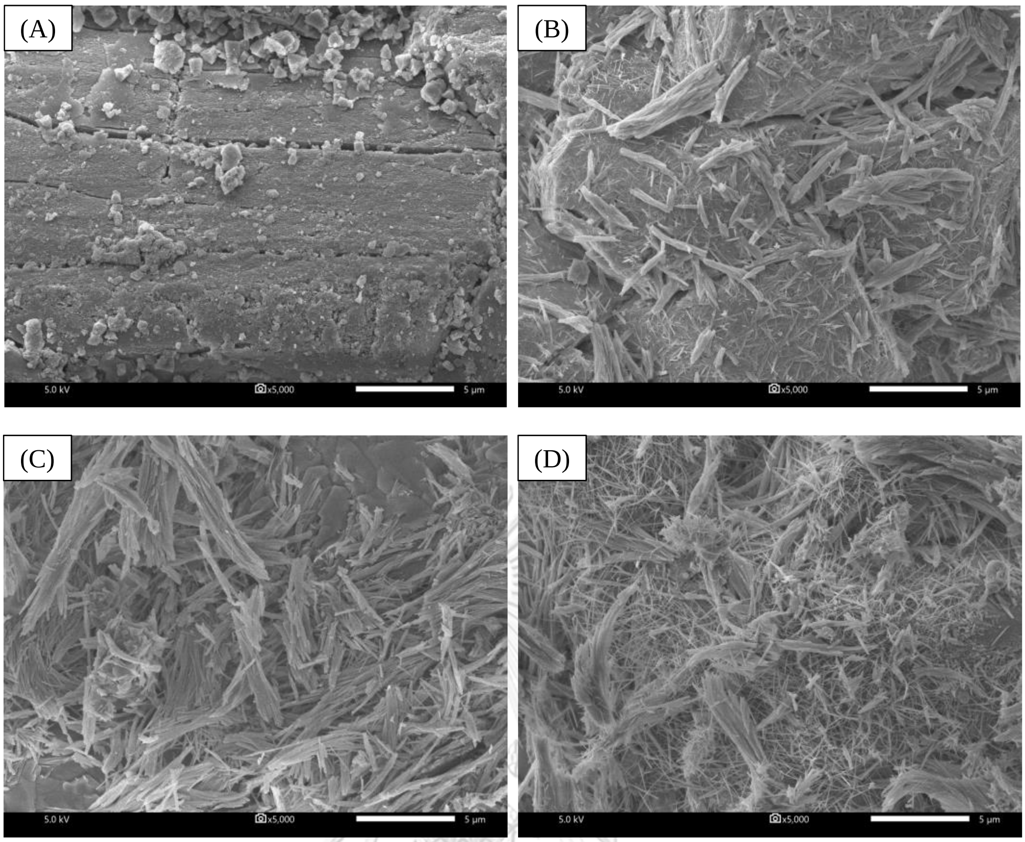


รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของ (A) γ-Al_2O_3 (B) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 109 ไมโครเมตร และ (D) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 124 ไมโครเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.10 แสดงสัณฐานวิทยาจากภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของ (A) ตัวรองรับแกมมาอะลูมินา (B) ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร ที่ผ่านการใช้งานแล้ว และ (D) ตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์ จากรูปที่ 4.10A แสดงให้เห็นว่า ผิวของตัวรองรับแกมมาอะลูมินาที่กำลังขยายสูงขึ้น มีลักษณะผิวหน้าเรียบ อาจจะมีอนุภาคขนาดเล็กปะปนอยู่บ้าง และเห็นถึงแนวของรูพรุนที่กระจายอยู่ทั่วตัวรองรับแกมมาอะลูมินา จากรูปที่ 4.10B ในส่วนของตัวดูดซับ K_2CO_3/ γ-Al_2O_3 ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่กำลังขยายสูงขึ้น พบว่า มีผลึกรูปแท่งยาวกระจายตัวอยู่บนผิวของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา เมื่อนำตัวดูดซับที่ยังไม่

ผ่านการใช้งานไปดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะได้ตัวดูดซับดังรูปที่ 4.10C จะพบว่า ผลึกรูปแท่งยาวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาคเดียวกัน เนื่องจากอนุภาคของโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารตั้งต้นได้ทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทำให้เปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต ผลึกรูปแท่งยาวจึงมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Zhao และคณะ [28] ยังพบว่า ลักษณะของผลึกโพแทสเซียม แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ผลึกรูปทรงไม่สมมาตร (Bulk structure) และผลึกรูปแท่ง (Rod structure) โดยผลึกรูปแท่งจะมีความว่องไวในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าผลึกรูปทรงไม่สมมาตร เนื่องจากมีขนาดผลึกที่เล็กกว่าทำให้เกิดปฏิกิริยาในการดูดซับได้ดี โดยรูปร่างของผลึกขึ้นอยู่กับกระบวนการเตรียมตัวดูดซับและปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ถูกฝังตัวลงบนตัวรองรับด้วย ถ้าปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับมีมากเกินไป จะเกิดการจับตัวตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของผลึก ส่งผลให้ไม่เกิดผลึกรูปแท่ง และจากรูปที่ 4.10D แสดงถึงตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร ซึ่งผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบว่า ผลึกรูปแท่งมีขนาดเล็กลงและละเอียดมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ที่ขนาดอนุภาคเดียวกัน นอกจากนี้ยังกระจายตัวปกคลุม จนแทบมองไม่เห็นผิวของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา เนื่องจากตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ จะเกิดการเปลี่ยนจากสารผลิตภัณฑ์โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต กลับไปเป็นสารตั้งต้นโพแทสเซียมคาร์บอเนต และที่ภาวะอุณหภูมิสูงและความดันต่ำ ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นอย่างสารประกอบเชิงซ้อนโพแทสเซียมดาวน์โซไนต์จะเกิดการสลายตัว ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก XRD ส่งผลให้ผลึกรูปแท่งมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด

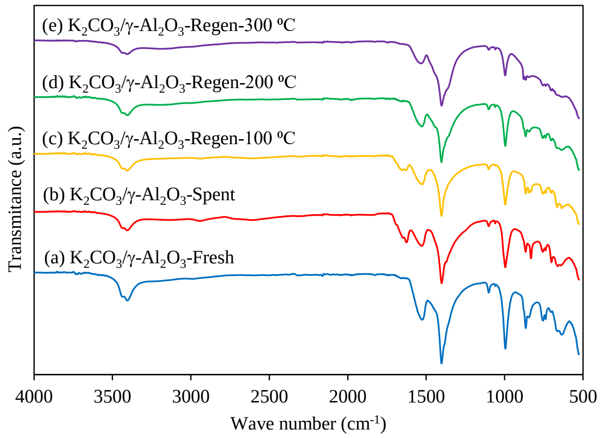


รูปที่ 4.10 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ของ (A) γ-Al_2O_3 (B) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Spent ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร และ (D) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-300 ^{o}C ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร ที่ความดันเริ่มต้น 0.35 บาร์

4.3.6 โครงสร้างหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัม FTIR ของ (a) K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน, (b) K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว, (c) K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ความดันเริ่มต้น 0.35 บาร์, (d) K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ความดันเริ่มต้น 0.35 บาร์ และ (e) K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่ความดันเริ่มต้น 0.35 บาร์ ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า วัสดุทุกชนิดแสดงแถบ (Band) ที่ตำแหน่ง 3404 เป็นพันธะ O-H ของโมเลกุลน้ำ ที่ตำแหน่ง 1300 และ 1060 cm^{-1} เป็นพันธะของ C=O และในช่วง 400-1500 cm^{-1} เป็นช่วงที่เรียกว่า Fingerprint region ซึ่งจะมีลักษณะของ

สเปคตรัมที่เฉพาะเจาะจงของสารแต่ละตัว ในตำแหน่งที่ 525 cm^{-1} เป็นพันธะ Al-O ของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ที่ตำแหน่ง 995 cm^{-1} เป็นพันธะ Al–OH tension ของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา และในตำแหน่งที่ 637, 756, 865 และ 1101 cm^{-1} เป็นกลุ่มของคาร์บอเนตไอออนของสารตั้งต้นโพแทสเซียมคาร์บอเนต การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ 300 องศาเซลเซียส จะสังเกตได้ว่า ที่ตำแหน่ง 1652 cm^{-1} เป็นพันธะ O-H ซึ่งอาจจะเป็นของสารตั้งต้นโพแทสเซียมคาร์บอเนต, ผลิตภัณฑ์โพแทสเซียมคาร์บอเนต และผลิตภัณฑ์สารประกอบโพแทสเซียมดาวน์โซไนต์ ($KAl(CO_3)_2(OH)_2$) โดยจะไม่ปรากฏเหมือนตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เนื่องจากสารประกอบโพแทสเซียมดาวน์โซไนต์สลายตัวที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้กลายเป็นสารตั้งต้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จาก XRD สำหรับตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะไม่พบวัฏภาคของสารประกอบโพแทสเซียมดาวน์โซไนต์ และในส่วนของ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการใช้งานแล้ว, $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จะยังปรากฏหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบเชิงซ้อนโพแทสเซียมดาวน์โซไนต์ [39]



รูปที่ 4.11 สเปกตรัม FTIR ของ (a) $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$-Fresh, (b) $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$-Spent, (c) $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$-Regen-100 °C, (d) $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$-Regen-200 °C and (e) $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$-Regen-300 °C

4.4 การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา 3 ปัจจัย คือ ขนาดอนุภาค, อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ โดยมีการปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัยที่แตกต่างกัน 3 ระดับ จึงเลือกใช้การออกแบบการทดลองแฟคตอเรียลเต็มรูป (Full factorial design) เพื่อให้ได้ชุดการทดลองที่สามารถอธิบายผลกระทบของปัจจัยเดี่ยว และผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรได้อย่างครอบคลุม โดยการทดลองจะจัดลำดับการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) เพื่อลดความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้และลดความเอนเอียงของผู้ทำการทดลอง จำนวนการทดลองทั้งหมด มีค่าเท่ากับ a^k โดยที่ a คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา และ k คือ จำนวนปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้จะได้ชุดการทดลองทั้งหมด 27 ชุดการทดลอง โดยมีร้อยละของการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับเป็นตัวแปรตอบสนองที่สำคัญของงานวิจัยนี้ ซึ่งผลการทดลองการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็งในภาวะที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4.5

จากผลการทดลองการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็ง จึงได้นำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ผลเชิงสถิติ เพื่อศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็ง รวมทั้งศึกษาอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 โดยตัวแปร A คือ ขนาดของอนุภาค (μm) , ตัวแปร B คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (^{o}C) ตัวแปร C คือ ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (bar) ตัวแปร AB คือ อันตรกิริยาระหว่างขนาดของอนุภาคกับอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ ตัวแปร AC คือ อันตรกิริยาระหว่างขนาดของอนุภาคกับความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ ตัวแปร BC คือ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ กับความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และ ตัวแปร ABC คือ อันตรกิริยาระหว่างขนาดของอนุภาค, อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ

ตารางที่ 4.5 การทดลองเพื่อศึกษาร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

Order	Particle size (mm)	Regeneration temperature (^{o}C)	Regeneration initial pressure (bar)	Sorbent regeneration (%)
1	90	100	0.35	75.20
2	90	100	0.61	18.94
3	90	100	0.88	9.04
4	90	200	0.35	79.63
5	90	200	0.61	31.08
6	90	200	0.88	16.02
7	90	300	0.35	97.73
8	90	300	0.61	52.33
9	90	300	0.88	25.11
10	109	100	0.35	71.78
11	109	100	0.61	47.35
12	109	100	0.88	25.11
13	109	200	0.35	86.72
14	109	200	0.61	78.18
15	109	200	0.88	67.48
16	109	300	0.35	96.46
17	109	300	0.61	76.30
18	109	300	0.88	76.30
19	124	100	0.35	69.10
20	124	100	0.61	58.74
21	124	100	0.88	19.89
22	124	200	0.35	76.86
23	124	200	0.61	59.95
24	124	200	0.88	18.32
25	124	300	0.35	96.17
26	124	300	0.61	61.17
27	124	300	0.88	29.41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลองที่ได้มาจากการออกแบบการทดลองแฟคตอเรียลเต็มรูป (Full factorial design) ซึ่งถูกนำมาใช้เพื่อพิจารณาผลของตัวแปรดำเนินการเดี่ยวและอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง พบว่า ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งอย่างมีนัยสำคัญ คือ ขนาดของอนุภาค (A), อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (B), ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (C) และ อันตรกิริยาระหว่างขนาดของอนุภาคกับความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ (AC) โดยผลที่ได้จากการทดลองมีระดับความมั่นใจตั้งแต่ร้อยละ 95 ขึ้นไป จึงสามารถยอมรับได้ และพิจารณาผลจากค่าของ P-Value ที่น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ตัวแปรนั้นมีผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

ตารางที่ 4.6 วิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจากการออกแบบการทดลองแฟคตอเรียลเต็มรูป (Full factorial design)

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	Contribution	F-Value	P-Value
A	2757	2	1378.63	13.49%	17.56	< 0.001
B	2601	2	1300.56	12.72%	16.57	< 0.001
C	11993	2	5996.62	58.66%	76.40	< 0.001
AC	1838	4	459.62	8.99%	5.86	0.004
Error	1256	16	78.49	6.14%		
Total	20446	26		100.00%		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

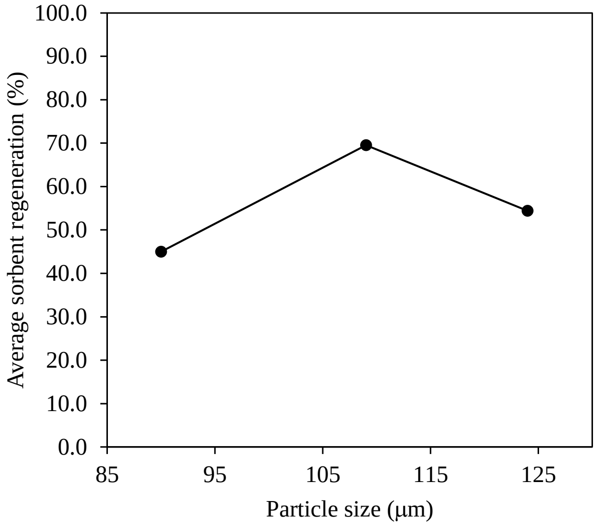
4.4.1 ผลของขนาดอนุภาคต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

รูปที่ 4.12 ผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการขนาดอนุภาคต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง พบว่า สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเท่ากับ 90, 109 และ 124 ไมโครเมตร ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 45.01, 69.54 และ 54.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สังเกตได้ว่า อนุภาคขนาด 109 ไมโครเมตร ส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งมากกว่าอนุภาคขนาด 90 และ 124 ไมโครเมตร เนื่องจากเมื่ออนุภาคมีขนาดแตกต่างกัน พื้นที่ผิวภายนอก (External surface area) ของตัวดูดซับจะแตกต่างกันด้วย จากตารางที่ 4.4 อนุภาคที่ขนาดเล็ก จะมีพื้นที่ผิวภายนอกมาก รองลงมา คือ อนุภาคที่

ขนาดกลางและอนุภาคที่ขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อยกว่า อนุภาคขนาด 90 ไมโครเมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด เท่ากับ 90.46 มิลลิกรัม CO_2 ต่อกรัมของตัวดูดซับ เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่ขนาด 109 และ 124 ไมโครเมตร มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 83.33 และ 80.32 มิลลิกรัม CO_2 ต่อกรัมของตัวดูดซับ ตามลำดับ

จากข้อมูลการวิเคราะห์อาจจะอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ว่า ตัวดูดซับที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร จัดเป็นอนุภาคของแข็งกลุ่ม A (Geldart group A) จากความสัมพันธ์ของผลต่างความหนาแน่นอนุภาคของแข็งและของไหลและขนาดอนุภาคของแข็ง ซึ่งที่ภาวะดำเนินการขณะที่อยู่ภายในคอลัมน์ฟลูอิไดซ์เบด ตัวดูดซับที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร จะเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อน เมื่อผ่านการฟื้นฟูสภาพด้วยการใช้ความร้อนและลดความดัน ในขณะที่ตัวดูดซับที่ขนาดอนุภาค 109 และ 124 ไมโครเมตร จัดเป็นอนุภาคของแข็งกลุ่ม B (Geldart group B) ซึ่งอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดการฟลูอิไดซ์ได้ดี ส่งผลให้ตัวดูดซับที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร มีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ขนาดอนุภาค 109 และ 124 ไมโครเมตร ในส่วนของอนุภาคขนาด 124 ไมโครเมตร ซึ่งมีพื้นที่ผิวภายนอกต่ำ ดังนั้นโลหะกัมมันต์ K_2CO_3 จึงมีสะสมอยู่บริเวณพื้นผิวข้างนอกค่อนข้างมาก สังเกตได้จาก รูปที่ 4.9D ผลึกรูปแท่งของ K_2CO_3 ปกคลุมพื้นที่ผิวของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา รวมถึงโลหะกัมมันต์ K_2CO_3 ปริมาณหนึ่งน่าจะเข้าไปอยู่ภายในรูพรุนอีกด้วยเนื่องจากปริมาณ K_2CO_3 ในตัวดูดซับมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งภายในรูพรุนจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ยากกว่าแล้วและยังต้องมีแรงขับเคลื่อนเพียงพอที่จะเคลื่อนตัวออกผ่านจากกลุ่มก้อนของ K_2CO_3 ที่ปกคลุมพื้นผิวตัวรองรับอีกด้วย ซึ่งขัดขวางการแพร่ออกของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากรูพรุน ส่งผลให้การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งต่ำ ในขณะอนุภาคขนาด 109 ไมโครเมตร โลหะกัมมันต์ K_2CO_3 จะเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวข้างนอกและอยู่ภายในรูพรุน สังเกตได้จาก รูปที่ 4.9C ที่ผลึกรูปแท่งของ K_2CO_3 มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของตัวรองรับแกมมาอะลูมินา และการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนของ K_2CO_3 น้อยกว่าที่ขนาดอนุภาค 124 ไมโครเมตร จึงส่งผลให้การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

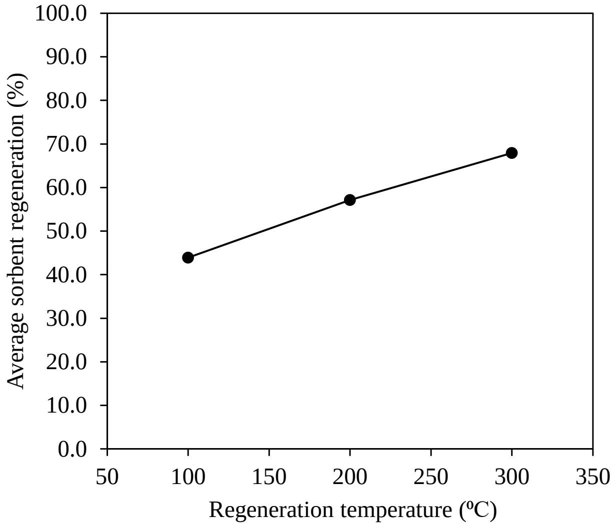


รูปที่ 4.12 ผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการของขนาดอนุภาคต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

4.4.2 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

รูปที่ 4.13 แสดงผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง พบว่า ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 43.91 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 57.14 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 67.91 เปอร์เซ็นต์ สังเกตได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมีผลเชิงบวกกับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา กล่าวคือ ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสูงขึ้น เนื่องจากปรากฏการณ์ทางกายภาพ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้น้ำที่อยู่บริเวณพื้นผิวถูกกำจัดออก และจะเพิ่มพลังงานจลน์ของโมเลกุลแก๊ส เมื่อโมเลกุลแก๊สมีพลังงานจลน์สูงขึ้น จะทำให้น้ำ, สิ่งเจือปน หรือผลิตภัณฑ์ ที่อยู่ภายในโครงสร้างของรูพรุนสามารถออกจากรูพรุนของตัวดูดซับได้อย่างง่าย ประกอบกับการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ $KHCO_3$ ไปเป็นสารตั้งต้น K_2CO_3 จากนั้นตัวดูดซับที่ใช้งานแล้วจะกลับมาทำงานได้ใหม่อีกครั้ง และที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส ได้ค่าร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

เฉลี่ยที่มากกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 100 และ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ข้างเคียง $KAl(CO_3)_2(OH)_2$ ที่อุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโพแทสเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ($KAlO_2$) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ที่มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง จึงต้องการพลังงานในการสลายตัวมากกว่าการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์กลับไปเป็นสารตั้งต้น [37]



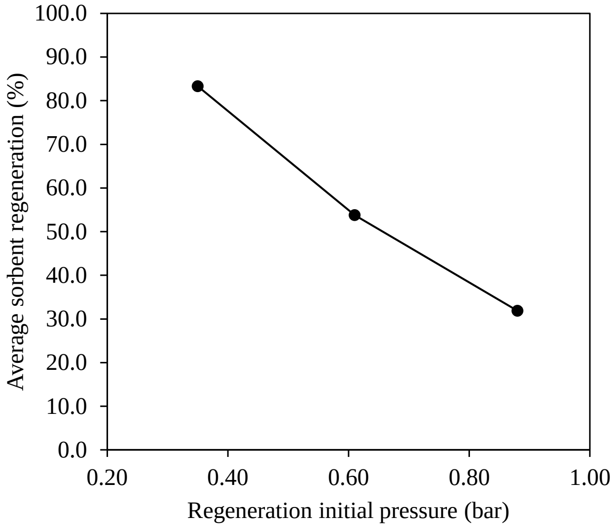
รูปที่ 4.13 ผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการของอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

4.4.3 ผลของความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

Chulalongkorn University

รูปที่ 4.14 แสดงผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง พบว่า ที่ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0.35 บาร์ ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 83.29 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0.61 บาร์ ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 53.80 เปอร์เซ็นต์ และที่ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0.88 บาร์ ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 31.85 เปอร์เซ็นต์ สังเกตได้ว่า ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมีผลเชิงลบกับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา กล่าวคือ ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพลดลง เนื่องจาก ปฏิกิริยาเคมีผันกลับได้ตามสมการที่ 3.2 โมลของวัฏภาคแก๊สระหว่างสารตั้งต้น

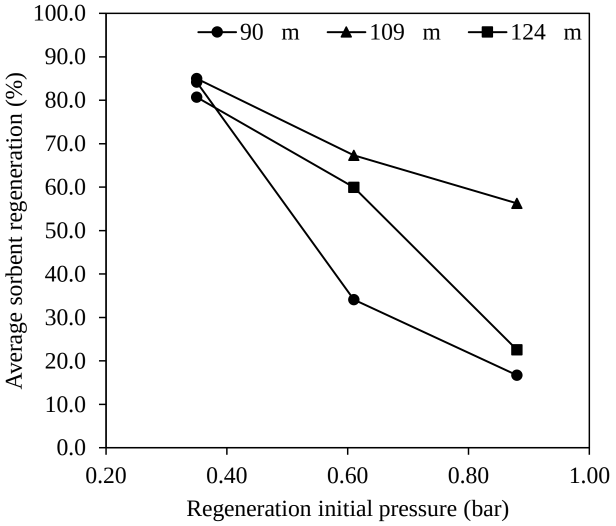
และผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน เมื่อลดความดันลง ทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับ เพื่อเพิ่มโมลของ CO_2 และ H_2O ทำให้ผลิตภัณฑ์ $KHCO_3$ เปลี่ยนกลับไปเป็นสารตั้งต้น K_2CO_3 ซึ่งการลดความดันในขั้นต้นจะทำให้เกิดการไล่ระดับความดันระหว่างด้านในและด้านนอกของรูพรุนตัวดูดซับ โดยความดันภายนอกน้อยกว่าความดันภายในรูพรุน ส่งผลให้เกิดการผลักออกของแก๊สบางส่วน รวมถึงน้ำบริเวณพื้นผิวที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา เมื่อความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0.35 บาร์ ผลต่างของความดันภายนอกและภายในแตกต่างกันมากกว่าที่ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0.88 บาร์ จะทำให้เกิดการผลักออกของน้ำ, แก๊ส หรือผลิตภัณฑ์ จากภายในรูพรุนที่มากกว่า ส่งผลให้ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งเฉลี่ยที่ได้มีค่ามากกว่า ในขณะที่ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0.88 บาร์ ปริมาณน้ำที่น้อยกว่าเคลื่อนที่กลับเข้าไปในรูพรุน ทำให้ปริมาตรของรูพรุนเพิ่มขึ้น แต่เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนลดลง ซึ่งเกิดจากการสะสมของน้ำรอบ ๆ รูพรุนทางเข้า ทำให้น้ำ, แก๊ส หรือผลิตภัณฑ์ ที่อยู่ภายในรูพรุนออกมาได้น้อย จึงส่งผลให้ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งเฉลี่ยน้อยกว่าที่ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0.35 และ 0.61 บาร์ [33]



รูปที่ 4.14 ผลกระทบหลักของตัวแปรดำเนินการของความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

4.4.4 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ

รูปที่ 4.15 แสดงผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรขนาดของอนุภาคกับความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งจะเห็นว่า ที่ความดันต่ำ ผลการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับไม่ขึ้นกับขนาดอนุภาค แต่เมื่อความดันสูง ขนาดของอนุภาคมีผลต่อการฟื้นฟูตัวดูดซับ โดยอนุภาคขนาดกลางให้ผลการฟื้นฟูที่ดีที่สุด ทั้งนี้ อาจจะอธิบายได้จากการถ่ายโอนมวลระหว่างของแข็งกับแก๊ส จะมีลักษณะการเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางที่บริเวณผิวนอกของตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งพื้นที่ในการถ่ายโอนมวลจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวภายนอก (External surface area) ของแต่ละขนาดอนุภาค และความแตกต่างของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในตอนเริ่มต้นที่ไม่เท่ากัน นอกจากนี้ความดันยังทำหน้าที่เป็นแรงขับเคลื่อน (Driving force) ในการถ่ายโอนมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรขนาดของอนุภาคกับความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ จึงส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

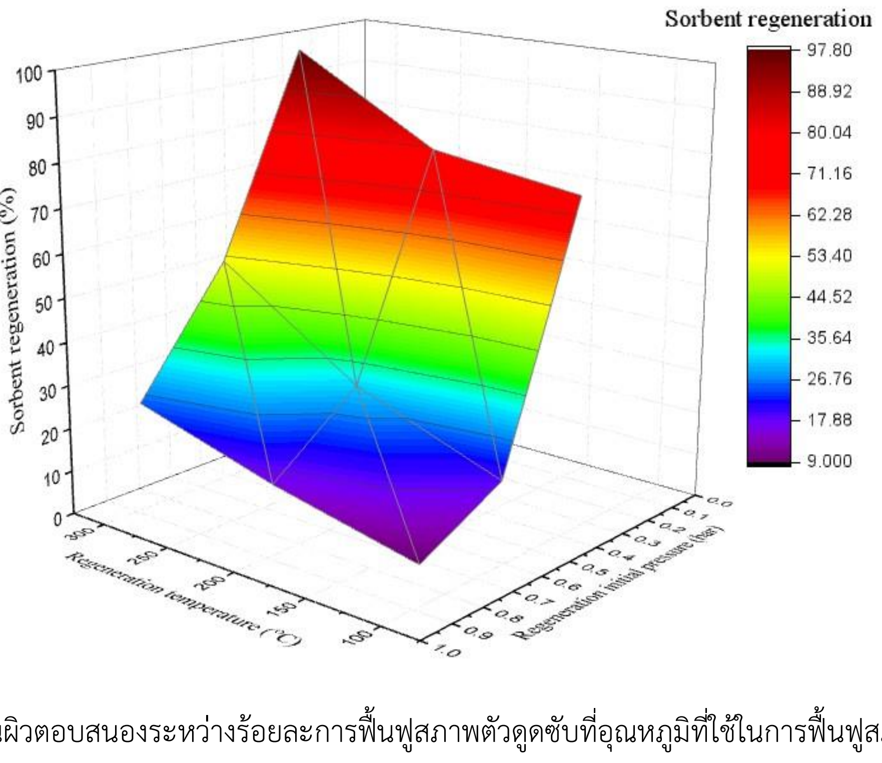


รูปที่ 4.15 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรขนาดของอนุภาคกับความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

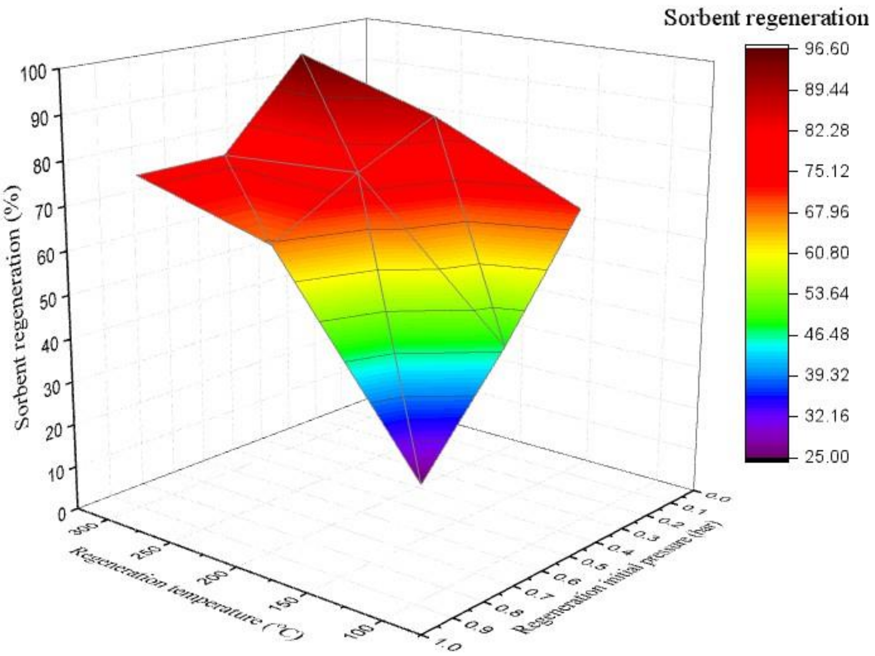
4.5 การหาภาวะที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

การวิเคราะห์ตัวแปรผิวตอบสนอง (Response surface methodology) เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimal condition) ของระบบหรือกระบวนการผลิต โดยอาศัยการสร้างแบบจำลอง (Mathematical model) และการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีอยู่ของผลตอบสนอง (Response) ของปัญหา ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ หรือฟังก์ชันกับปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ โดยมีเป้าหมายเพื่อหาระดับของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ผลตอบสนองมีค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรผิวตอบสนองจะสร้างเส้นระดับที่มีค่าผลตอบสนอง (Contour) ของพื้นผิวสะท้อน กับปัจจัยหรือตัวแปรอิสระลงในระนาบ x_1 และ x_2 โดยแต่ละเส้นระดับจะสอดคล้องกับความสูงพื้นผิวผลสะท้อน

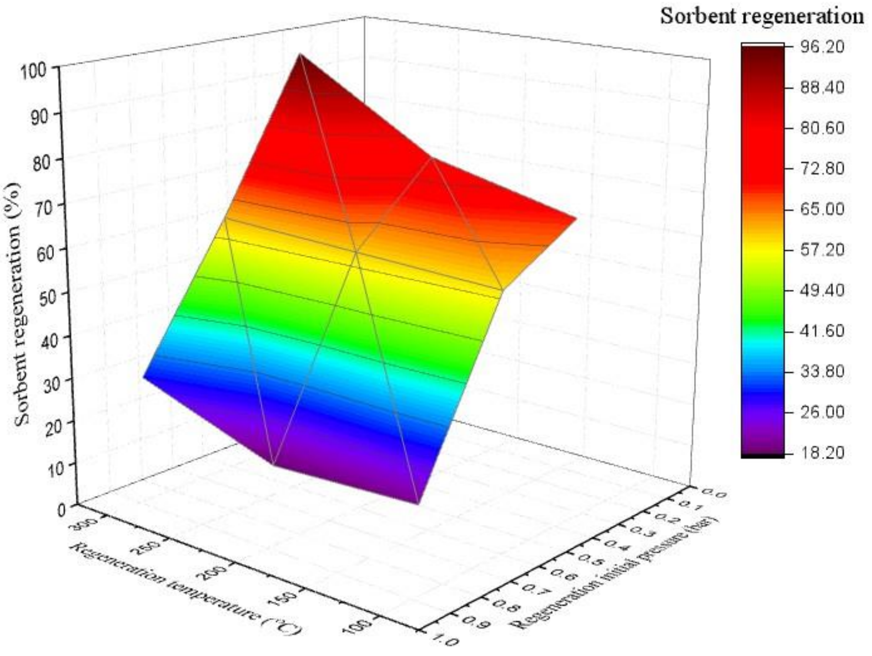
จากตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับที่ภาวะดำเนินการที่ขนาดอนุภาค, อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพแตกต่างกัน ซึ่งนำข้อมูลที่ได้จากการทำทดลองจริงมาคำนวณในสมการ ที่ 3.1 เพื่อสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) แสดงดังรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.16 พื้นผิวตอบสนองระหว่างร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพและความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพแตกต่างกัน โดยใช้ขนาดอนุภาคที่ 90 μm



รูปที่ 4.17 พื้นผิวตอบสนองระหว่างร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพและความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพแตกต่างกัน โดยใช้ขนาดอนุภาคที่ 109 μm



รูปที่ 4.18 พื้นผิวตอบสนองระหว่างร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพและความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพแตกต่างกัน โดยใช้ขนาดอนุภาคที่ 124 μm

จากรูปที่ 4.16, 4.17 และ 4.18 พบว่า ในช่วงของการทดลอง ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาสูงสุด เมื่อความโค้งของพื้นผิวการตอบสนอง ดำเนินการที่ภาวะอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสูง และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่ำ เนื่องจากการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) ที่ดูดพลังงานเข้าไปเพื่อสลายพันธะ โดยในปฏิกิริยาดูดความร้อนนี้สารตั้งต้นจะมีพลังงานต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสูงขึ้น โมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์สูงขึ้น จะทำให้น้ำหรือสิ่งเจือปนที่อยู่ภายในโครงสร้างของรูพรุนสามารถออกจากรูพรุนของตัวดูดซับได้ง่ายขึ้น และเกิดการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ $KHCO_3$ ไปเป็นสารตั้งต้น K_2CO_3 และการลดความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ ทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับ เพื่อเพิ่มจำนวนโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, น้ำ และสารตั้งต้นโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ซึ่งการฟื้นฟูสภาพโดยการใช้ความร้อนและลดความดันอาจเป็นทางเลือกที่เป็นประโยชน์ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ เนื่องจากการฟื้นฟูสภาพโดยการใช้ความร้อนจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งเจือปนสูงทั้งทางกายภาพและทางเคมี และสามารถนำพลังงานความร้อนที่ได้จากในระบบมาใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ส่วนการฟื้นฟูสภาพโดยการลดความดันจะทำให้ตัวดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน และใช้พลังงานความร้อนในระบบต่ำกว่า จึงได้นำข้อดีของการฟื้นฟูสภาพทั้ง 2 วิธีมาประยุกต์ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาในงานวิจัยนี้

4.6 การศึกษาจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

การศึกษาจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาโดยใช้ 3 แบบจำลอง คือ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo first order model), แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo second order model) และแบบจำลองอาฟรามี (Avrami’s model) ซึ่งสามารถใช้ในการอธิบายเกี่ยวกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาระยะเวลาของกระบวนการที่เกิดขึ้น และเพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวล โดยจะพิจารณาทั้งความสามารถในการฟื้นฟูสภาพที่สูง อัตราการฟื้นฟูสภาพเกิดขึ้นได้รวดเร็ว และการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ หรือการเพิ่มขึ้นของสารตั้งต้น ซึ่งจะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบกระบวนการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยข้อมูลการทดลองที่จะนำมาหาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสม คือ ภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ

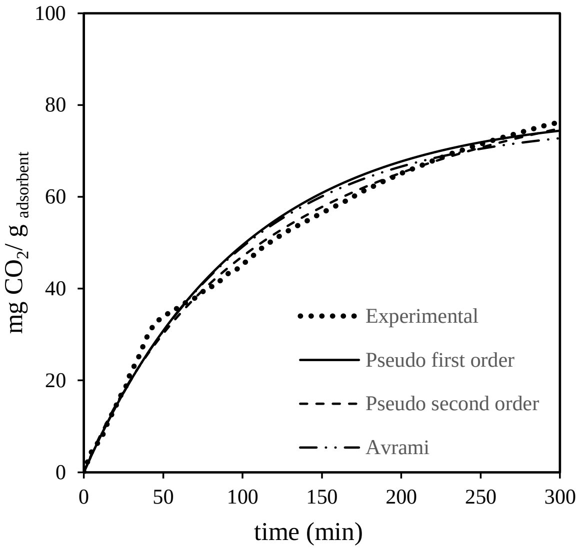
300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0.35 บาร์ ซึ่งเป็นภาวะที่ดีที่สุดในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ จากผลของการวิเคราะห์ด้วยตัวแปรผิวตอบสนอง

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ภาวะดำเนินการต่าง ๆ

Particle size (μm)	Regeneration temperature (^oC)	Regeneration initial pressure (bar)	$q_{e,exp}$ (mg_{CO2}/g_{ads})
90	300	0.35	76.10
Pseudo-first order model			
q_e	k_1 (min^{-1})	R^2	Err (%)
74.38	0.009600	0.9813	2.26
Pseudo-second order model			
q_e	k_2 (mg_{CO2}/g_{ads} min^{-1})	R^2	Err (%)
74.89	0.000075	0.9911	1.60
Avrami's model			
q_e	k_{AV} (min^{-1})	R^2	Err (%)
72.74	0.010225	0.9606	4.41

จากรูปที่ 4.19 แสดงแบบจำลองจลนพลศาสตร์ต่าง ๆ ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์ ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 300 องศาเซลเซียส ซึ่งจะพิจารณาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมได้จากค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 4.7 โดยจะพิจารณาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) และค่า ความคลาดเคลื่อน (Error) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดในการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมกับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับในแต่ละแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดเท่ากับ 0.9813 และค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 2.26 ส่วนแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดเท่ากับ 0.9911 และค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 1.60 และแบบจำลองอาฟรามี มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดเท่ากับ 0.9606 และค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 4.41 จากข้อมูลที่ได้พบว่า แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีความสอดคล้องกับการทดลองมากที่สุด เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดมีค่าใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด และค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด กล่าวคือ

ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดลองจริง ส่วนค่าคงที่ k_2 ในแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมสามารถบอกถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate constant) และสมการจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมตั้งบนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า และเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (Active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับความสามารถในการดูดซับบนตัวดูดซับ ขั้นกำหนดอัตรา คือ ขั้นตอนการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ [25] ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้แสดงในสมการที่ 3.2



รูปที่ 4.19 แบบจำลองจลนพลศาสตร์ต่าง ๆ ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร, อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ขนาดอนุภาค อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาที่ผ่านการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำมาหาภาวะที่ดีที่สุดในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง และนำมาสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์สำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ จากผลการศึกษาวิจัยสามารถสรุปผลได้ดังนี้

ในการศึกษาผลกระทบตัวแปรดำเนินการสำหรับขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน ต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง ที่ขนาดอนุภาค 90, 109 และ 124 ไมโครเมตร พบว่า ขนาดอนุภาคไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง ในภาวะดำเนินการที่เหมาะสมที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพสูง และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพต่ำ แต่ขนาดอนุภาคส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งที่ภาวะดำเนินการอื่น ๆ

ในการศึกษาผลกระทบตัวแปรดำเนินการสำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพที่แตกต่างกันต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 100, 200 และ 300 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมีผลเชิงบวกกับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับแข็ง กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ควรใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการสำหรับความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพที่แตกต่างกันต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง ที่ความดันเริ่มต้นที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.35, 0.61 และ 0.88 บาร์ พบว่า ความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพมีผลเชิงลบกับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับแข็ง กล่าวคือ เมื่อความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพลดลง ส่งผลให้ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ควรใช้ความดันเริ่มต้นต่ำ ๆ

จากผลการทดลองที่ได้รายงานไว้ข้างต้น งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับควรใช้ทั้งการให้ความร้อนและการลดความดัน ซึ่งการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับเพื่อให้กลับมาใช้งานได้อีกเป็นแนวทางที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เนื่องจากเป็นการลดต้นทุนของกระบวนการ รวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียจากอุตสาหกรรม และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การหาภาวะที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งโดยใช้การวิเคราะห์ด้วยตัวแปรผิวตอบสนอง จากการศึกษาผลกระทบตัวแปรดำเนินการ จึงเลือกผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ มาสร้างพื้นผิวตอบสนองของการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง พบว่า ภาวะดำเนินการที่อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพเท่ากับ 0.35 บาร์ เป็นภาวะที่เหมาะในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งในช่วงของการทดลองที่ได้ทำการศึกษา เนื่องจากได้ร้อยละการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งสูงสุด

การศึกษาจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง จะทำการศึกษาโดยใช้ 3 แบบจำลอง คือ คือ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม, แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และแบบจำลองอาฟรามี พบว่า แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีความสอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดมีค่าใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด และ ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดลองจริง นอกจากนี้ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมสามารถบ่งบอกกลไกการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดจากโมเลกุลของแก๊สทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของของแข็ง โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นกับขั้นตอนการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งจะสัมพันธ์กับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับด้วยปฏิกิริยาผันกลับได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

นำตัวดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพไปใช้ซ้ำเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง และพัฒนากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งที่มีกระบวนการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งอยู่ในระบบเดียวกันเพื่อให้ระบบดำเนินการได้ครบวงจร

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

1. การคำนวณความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

นำข้อมูลที่บันทึกค่าได้จากเซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ มาสร้างกราฟเบรคทรูของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขนาดอนุภาค 90, 109 และ 124 ไมโครเมตร

หน่วยความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์: mg CO_2/ g $_{adsorbent}$

จากสมการภาวะของแก๊สอุดมคติ:

$$n = \frac{PV}{RT}$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{P}{RT}\left(\frac{dV}{dt}\right)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{PF}{RT}$$

$$\frac{dn_{CO_2}}{dt} = \%CO_2 \frac{P_TF}{RT}$$

$$dn_{CO_2} = \left(\frac{P_TF}{RT}\right) \%CO_2 dt$$

$$n_{CO_2} = \left(\frac{P_TF}{RT}\right) \int \%CO_2 dt$$

$$q = \frac{MW_{CO_2}P_TF}{RTm_{adsorbent}} \int_0^t \%CO_2\, dt$$

$$q = \frac{MW_{CO_2}P_TF}{RTm_{adsorbent}} (area\ \%CO_2)$$

เมื่อ	q	คือ ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (มิลลิกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ)
	MW_{CO_2}	คือ มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัมต่อโมล)
	P_T	คือ ความดันรวมทั้งระบบ
	F	คือ อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)
	$\%CO_2$	คือ ร้อยละของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยปริมาตร
	t	คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (ลิตร.ความดันบรรยากาศ ต่อ เคลวิน.โมล)
T	คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (เคลวิน)
$m_{adsorbent}$	คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Condition	
MW CO_2 (g/mol)	44
P_T (atm)	1
F (L/min)	0.8
CO_2 (%)	12
t (s)	1200
R (atm.L/mol.K)	0.0821
T (K)	333
$m_{adsorbent}$ (g)	5

การคำนวณหาค่า area %CO_2

จาก Σ(%CO_2 * delta t) เมื่อเก็บค่าทุก ๆ 10 วินาที

จะได้ %CO_2 * delta t = (%CO_2 final - %CO_2 initial) * $\frac{10}{60}$

= (12.00-0.06) * $\frac{10}{60}$

= 1.99

และคำนวณไปจนครบที่เวลา 1200 วินาที โดยทำการเปลี่ยนค่า %CO_2 initial ที่ได้ในแต่ละเวลา

เมื่อคิดผลรวม %CO_2 * delta t จะได้เป็น area %CO_2 = 35.09 %

การความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จาก q = $\frac{MW_{CO2}P_TF}{RTm_{adsorbent}}$ (area %CO_2)

= $\frac{44*1*0.8}{0.082*333*5} * \frac{35.09}{100} * 1000$

(เมื่อคูณ 1000 เพื่อเปลี่ยนหน่วย จาก g เป็น mg)

= 90.46 mg CO_2/ g $_{adsorbent}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. การคำนวณร้อยละการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็ง

จาก $\%\text{Sorbent regeneration} = \frac{m_{\text{released } CO_2}}{m_{\text{adsorbed } CO_2}} \times 100$

เมื่อ $m_{\text{adsorbed } CO_2}$ คือ มวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับ

(มิลลิกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ)

$m_{\text{released } CO_2}$ คือ มวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายซับ

(มิลลิกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ)

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณร้อยละการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็ง

Condition	
Volume of reactor (L)	1.764
R (atm.L/mol.K)	0.0821
T (K)	573
$P_{initial}$ (bar)	0.35
$m_{adsorbent}$ (g)	5

การคำนวณหาค่า $m_{\text{released } CO_2}$

หาโมลทั้งหมดจากโมลของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

จากสมการภาวะของแก๊สอุดมคติ: $n = \frac{PV}{RT}$

mol_{total} (CO_2 + H_2O) = $\frac{(\text{P final} - \text{P initial}) * \text{Volume of Reactor}}{RT}$

= 0.0202 กรัมต่อโมล

เมื่อหาร *2* เนื่องจากสมการที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 3.2 มีโมลของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในอัตราส่วน 1:1

mol CO_2 = $\frac{mol_{total}}{2}$

= $\frac{0.0202}{2}$

= 0.0101 กรัมต่อโมล

$m_{released\ CO_2}$ = $n_{total} * \frac{MW_{CO2}}{m_{adsorbent}}$

= $0.0101 * \frac{44}{5} * 1000$

(เมื่อคูณ 1000 เพื่อเปลี่ยนหน่วย จาก g เป็น mg)

= 88.4066 mg CO_2/ g $_{adsorbent}$

ดังนั้น ร้อยละการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็ง

$$\%\text{Sorbent regeneration} = \frac{m_{released\ CO_2}}{m_{adsorbed\ CO_2}} \times 100$$

= $\frac{88.41}{90.46}$ x 100

= 97.73 %

3. การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของ K_2CO_3 ในตัวดูดซับ

จากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ XRF คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุ K และ Al โดยที่ K = 19.4% และ Al = 26.3%

โดยน้ำหนักโมเลกุลของ : K = 39.10

Al = 26.98

K_2CO_3 = 138.21

Al_2O_3 = 101.96

หาน้ำหนักของ K_2CO_3

จาก $\frac{\%wt_K * MW_{K_2CO_3}}{2\ MW_K}$ = $\frac{19.4 * 138.21}{2 * 39.10}$

= 34.29

หาน้ำหนักของ Al_2O_3

จาก $\frac{\%wt_{Al} * MW_{Al_2O_3}}{2\ MW_{Al}}$ = $\frac{26.3 * 101.96}{2 * 26.93}$

= 49.69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ดังนั้น ร้อยละโดยน้ำหนักของ K_2CO_3 ในตัวดูดซับ

K_2CO_3 loading (wt%) $= \frac{wt_{K_2CO_3}}{wt_{K_2CO_3} + wt_{Al_2O_3}} \text{ x } 100$

$= \frac{34.29}{34.29 + 49.69} x\, 100$

$=$ 40.83 %

4. การหาจลนพลศาสตร์การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็งที่เหมาะสม

จากการคำนวณ mol_{total} (CO_2 + H_2O) $= \frac{(\text{P final} - \text{P initial}) * \text{Volume of Reactor}}{\text{RT}}$

ดังที่กล่าวในภาคผนวกการคำนวณร้อยละการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็ง

นำมาคำนวณค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพ (mg CO_2/ g $_{adsorbent}$)

$q_e = \frac{mol_{total} * 44 * 1000}{5}$

(เมื่อคูณ 1000 เพื่อเปลี่ยนหน่วย จาก g เป็น mg, คูณ 44 เพื่อเปลี่ยนเป็น mg ของ CO_2 และหาร 5 g ของตัวดูดซับ)

เพื่อนำไปสร้างกราฟด้วยสมการจลนพลศาสตร์ทั้ง 3 แบบจำลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพที่ได้จากผลการทดลอง

Time (min)	$q_{e,exp}$(mg CO_2/g $_{ads}$)	Time (min)	$q_{e,exp}$(mg CO_2/g $_{ads}$)
0	0.0000	.	.
1	1.0661	.	.
2	2.0157	.	.
3	2.8477	290	75.4674
4	3.8278	291	75.5584
5	4.6267	292	75.6088
6	5.1625	293	75.7171
7	5.7355	294	75.8317
8	6.1023	295	75.9023
9	6.5054	296	75.9553
10	6.9871	297	76.0263
.	.	298	76.0575
.	.	299	76.0835
.	.	300	76.1026

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

จากสมการ $\ln(q_e - qt) = \ln q_e - k_1 t$

เมื่อ q_e คือ ค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับเมื่อ เวลา $\longrightarrow \infty$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที$^{-1}$)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลดิบที่นำไปใช้สร้างกราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

time	$\ln(q_e\text{-}q_t)$	time	$\ln(q_e\text{-}q_t)$
0	4.3321	.	.
1	4.3180	.	.
2	4.3052	.	.
3	4.2939	290	-0.4537
4	4.2805	291	-0.6084
5	4.2694	292	-0.7056
6	4.2618	293	-0.953
7	4.2537	294	-1.3057
8	4.2485	295	-1.6077
9	4.2427	296	-1.9148
10	4.2358	297	-2.5729
.	.	298	-
.	.	299	-
.	.	300	-

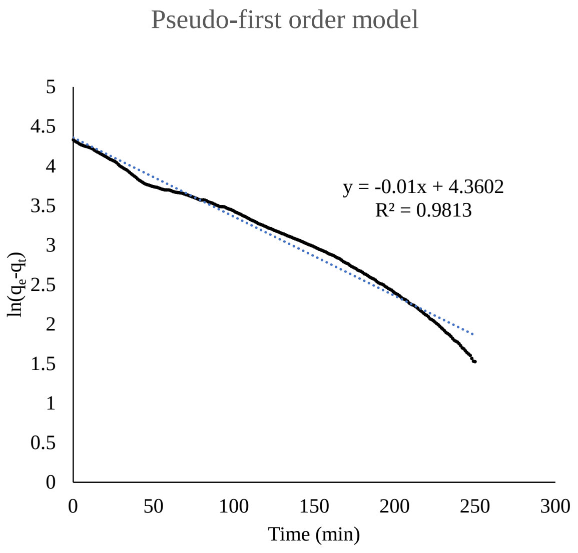
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ ก.4 จะนำข้อมูลมาสร้างกราฟ

โดยที่ แกน x เป็น เวลา (นาที) : 0-300 นาที

แกน y เป็น $\ln(q_e - q_t)$

ที่เวลา 1 นาที : ln(76.10-1) = 4.3180 และจะทำไปจนถึงนาทีที่ 300 เพื่อนำไปสร้างกราฟ ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กราฟเส้นตรงจากจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

จากรูปที่ ก.1 จะได้

จุดตัดแกน y = $\ln q_e$ = 4.3602

ความชัน = k = 0.0096

R^2 = 0.9813

จากนั้นหาค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (q_t)

จาก $q_{t,model} = q_e(1 - e^{-k_1 t})$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลดิบค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

time	$q_{t,model}$	time	$q_{t,model}$
0	0	.	.
1	0.77883	.	.
2	1.54991	.	.
3	2.31331	290	73.966
4	3.06912	291	74.0088
5	3.81741	292	74.0512
6	4.55825	293	74.0933
7	5.29172	294	74.1348
8	6.0179	295	74.176
9	6.73685	296	74.2168
10	7.44864	297	74.2571
.	.	298	74.2971
.	.	299	74.3366
.	.	300	74.3758

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

จากสมการ

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e}$$

เมื่อ q_e คือ ค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับเมื่อ เวลา $\longrightarrow \infty$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (มิลลิกรัมต่อกรัม.นาที$^{-1}$)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลดิบที่นำไปใช้สร้างกราฟแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

time	t/q_t	time	t/q_t
0	-	.	.
1	0.93804	.	.
2	0.99222	.	.
3	1.05347	290	3.84272
4	1.04499	291	3.85132
5	1.08068	292	3.86198
6	1.16222	293	3.86967
7	1.22046	294	3.87701
8	1.31097	295	3.88658
9	1.38346	296	3.89703
10	1.43122	297	3.90654
.	.	298	3.91576
.	.	299	3.9289
.	.	300	3.94204

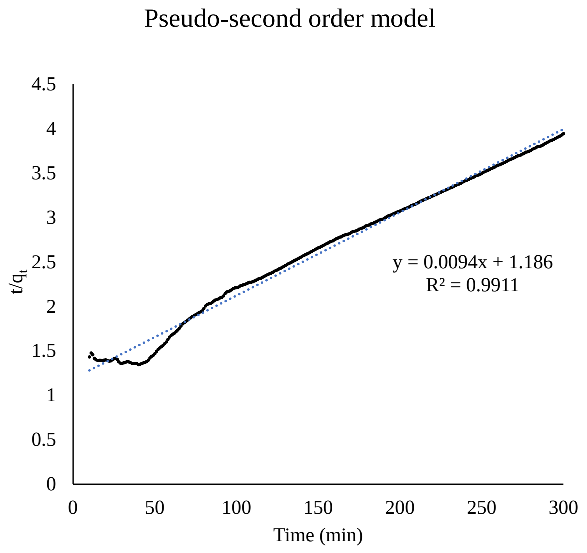
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ ก.6 จะนำข้อมูลมาสร้างกราฟ

โดยที่ แกน x เป็น เวลา (นาที) : 0-300 นาที

แกน y เป็น $\frac{t}{q_t}$

ที่เวลา 1 นาที : $\frac{t}{q_t} = \frac{1}{1.066}$ = 0.9380 และจะทำไปจนถึงนาทีที่ 300 เพื่อนำไปสร้างกราฟ ดังแสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 กราฟเส้นตรงจากจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

จากรูปที่ ก.2 จะได้

จุดตัดแกน y $= \frac{1}{k_2 q_e^2}$ = 1.186

ความชัน $= \frac{1}{q_e}$ = 0.0094

R^2 = 0.9911

จากนั้นหาค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (q_t)

จาก $q_{t,model} = \frac{k_2 q_e^2 t}{1+(k_2 q_e t)}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลดิบค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จากแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

time	$q_{t,model}$	time	$q_{t,model}$
0	0	.	.
1	0.83654	.	.
2	1.66003	.	.
3	2.47076	290	74.1309
4	3.26904	291	74.2082
5	4.05515	292	74.2851
6	4.82936	293	74.3617
7	5.59195	294	74.4379
8	6.34317	295	74.5138
9	7.08327	296	74.5893
10	7.8125	297	74.6644
.	.	298	74.7392
.	.	299	74.8136
.	.	300	74.8877

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- แบบจำลองอาฟรามี

จากสมการ $\ln[-\ln(1-\alpha)] = n_{AV}K_{AV} + n_{AV}\ln t$

เมื่อ q_e คือ ค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับเมื่อ เวลา $\longrightarrow \infty$ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t คือ ค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

k_{AV} คือ ค่าคงที่ของอาฟรามี (นาที$^{-1}$)

n_{AV} คือ เลขชี้กำลังของเวลาที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงกลไกการฟื้นฟูสภาพ

α คือ อัตราส่วนระหว่างค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับเมื่อ เวลา $\longrightarrow \infty$ ต่อค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

ตารางที่ ก.8 ข้อมูลดิบที่นำไปใช้สร้างกราฟแบบจำลองอาฟรามี

time	ln(t)	time	ln(t)
0	-	.	.
1	0	.	.
2	0.69315	.	.
3	1.09861	290	5.66988
4	1.38629	291	5.67332
5	1.60944	292	5.67675
6	1.79176	293	5.68017
7	1.94591	294	5.68358
8	2.07944	295	5.68698
9	2.19722	296	5.69036
10	2.30259	297	5.69373
.	.	298	5.69709
.	.	299	5.70044
.	.	300	5.70378

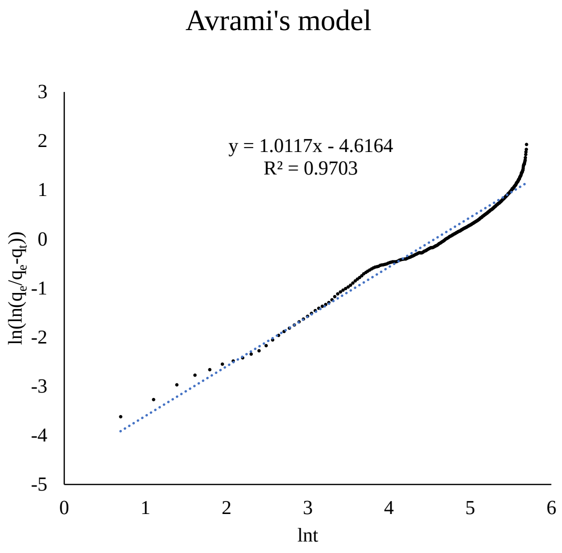
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากตารางที่ ก.8 จะนำข้อมูลมาสร้างกราฟ

โดยที่ แกน x เป็น ln(t) : 0-300 นาที

แกน y เป็น $\ln(\ln(q_e(q_e - q_t))$

ที่เวลา 1 นาที : ln(ln(76.10(76.10 – 1.066)) = -4.2611 และจะทำไปจนถึงนาทีที่ 300 เพื่อนำไปสร้างกราฟ ดังแสดงในรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 กราฟเส้นตรงจากจลนพลศาสตร์ของแบบจำลองอาฟรามี

จากรูปที่ ก.3 จะได้

จุดตัดแกน y = $\ln K_{AV}$ = -4.5829

ความชัน = k_{AV} = 1.003

R^2 = 0.9606

จากนั้นหาค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (q_t)

จาก $q_{t,model} = q_{e,exp}(1 - e^{-k_{AV}t^{n_{AV}}})$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.9 ข้อมูลดิบค่าความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ จากแบบจำลองอาฟรามี

time	$q_{t,model}$	time	$q_{t,model}$
0	0	.	.
1	0.7742	.	.
2	1.5437	.	.
3	2.30653	290	72.3745
4	3.06231	291	72.4132
5	3.81093	292	72.4515
6	4.55231	293	72.4894
7	5.28646	294	72.5269
8	6.01339	295	72.564
9	6.73312	296	72.6007
10	7.4457	297	72.6371
.	.	298	72.673
.	.	299	72.7086
.	.	300	72.7438

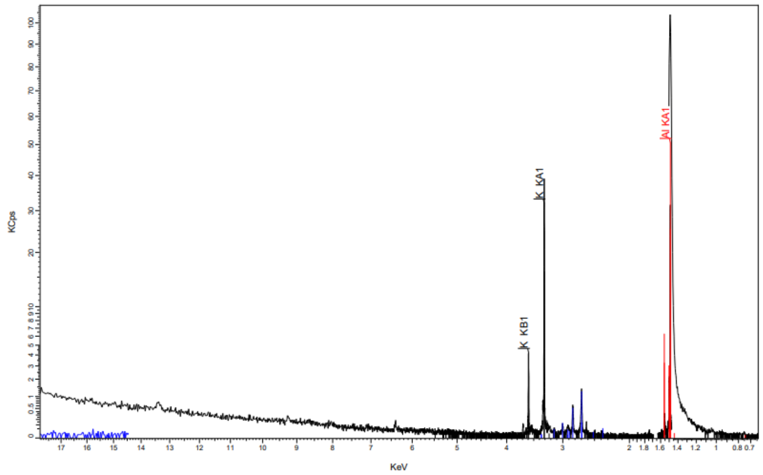
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

และนำข้อมูลจากตารางที่ ก.5, ก.7 และ ก.9 ไปสร้างกราฟเทียบกับข้อมูลที่ได้การทดลองจริงตามตารางที่ ก.3 จะได้ แบบจำลองจลนพลศาสตร์ต่าง ๆ ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร, อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.17

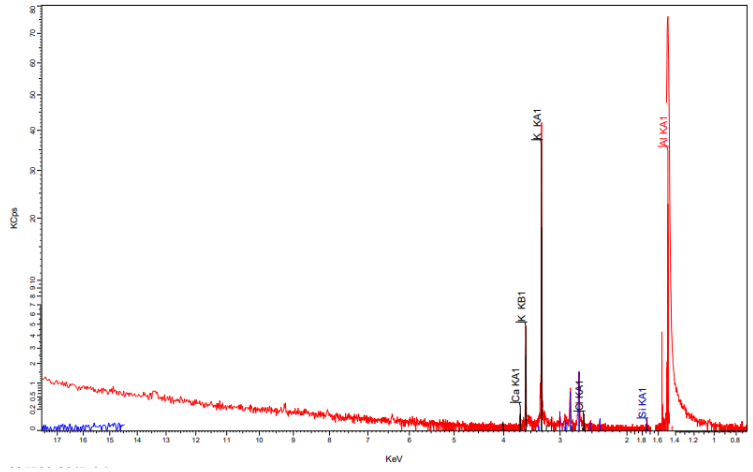
ภาคผนวก ข

การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ

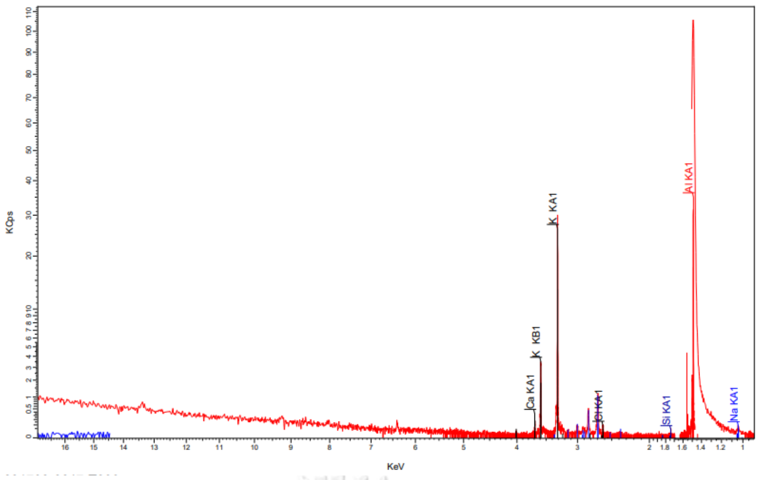
1. **เทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-ray Fluorescence, XRF)**



รูปที่ ข.1 รูปแบบ XRF ของตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร

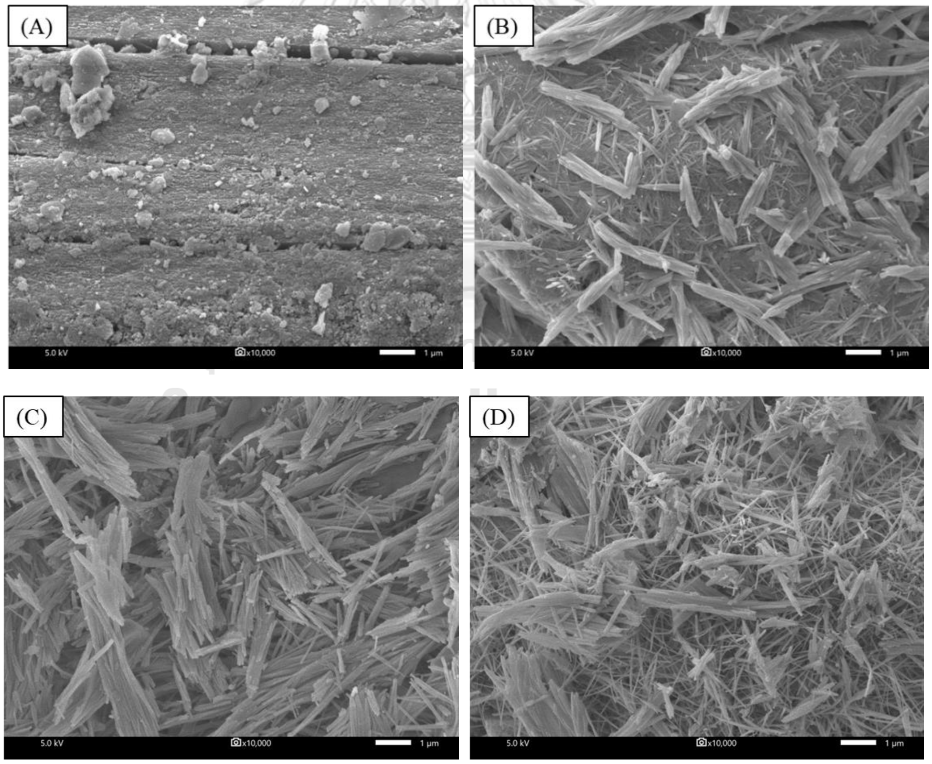


รูปที่ ข.2 รูปแบบ XRF ของตัวดูดซับ $K_2CO_3/\gamma\text{-}Al_2O_3$ ที่ผ่านการใช้งาน ที่ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร



รูปที่ ข.3 รูปแบบ XRF ของตัวดูดซับ K_2CO_3/γ-Al_2O_3 ที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และความดันเริ่มต้นที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพ 0.35 บาร์ ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร

2. เทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)



รูปที่ ข.4 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 10000 เท่า ของ (A) γ-Al_2O_3 (B) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Fresh ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร (C) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Spent ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร และ (D) K_2CO_3/γ-Al_2O_3-Regen-300 $^{\circ}C$ ขนาดอนุภาค 90 ไมโครเมตร ที่ความดันเริ่มต้น 0.35 บาร์

บรรณานุกรม

[1] Metz, B., et al., *IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage.* Policy Stud., 2005.

[2] Samanta, A., et al., *Post–Combustion CO_2 Capture Using Solid Sorbents: A Review.* Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011. **51**(4): p. 1438–1463.

[3] Hasib-ur-Rahman, M., M. Siaj, and F. Larachi, *Ionic liquids for CO_2 capture–Development and progress.* Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2010. **49**(4): p. 313–322.

[4] Broom, D., *Characterizing adsorbents for gas separations.* Chemical Engineering Progress, 2018. **114**: p. 30–37.

[5] Nelson, T.O., et al., *The dry carbonate process: Carbon dioxide recovery from power plant flue gas.* Energy Procedia, 2009. **1**(1): p. 1305–1311.

[6] Abunowara, M. and M. Elgarni, *Carbon Dioxide Capture from Flue Gases by Solid Sorbents.* Energy Procedia, 2013. **37**: p. 16–24.

[7] Qin, C., et al., *Effect of support material on the performance of K_2CO_3–based pellets for cyclic CO_2 capture.* Applied Energy, 2014. **136**: p. 280–288.

[8] Veselovskaya, J.V., et al., *Direct CO_2 capture from ambient air using K_2CO_3/Al_2O_3 composite sorbent.* International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013. **17**: p. 332–340.

[9] Jo, S.B., et al., *Regenerable potassium–based alumina sorbents prepared by CO_2 thermal treatment for post-combustion carbon dioxide capture.* Korean Journal of Chemical Engineering, 2016. **33**(11): p. 3207–3215.

[10] Younas, M., et al., *Erratum to: Feasibility of CO_2 adsorption by solid adsorbents: a review on low–temperature systems.* International Journal of Environmental Science and Technology, 2016. **13**(10): p. 2533–2533.

[11] Leung, D.Y.C., G. Caramanna, and M.M. Maroto-Valer, *An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **39**: p. 426–443.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

[12] White, C.M., et al., *Separation and capture of CO_2 from large stationary sources and sequestration in geological formations—coalbeds and deep saline aquifers.* J Air Waste Manag Assoc, 2003. **53**(6): p. 645—715.

[13] Rackley, S.A., *Chapter 6 — Absorption Capture Systems*, in *Carbon Capture and Storage*, S.A. Rackley, Editor. 2010, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 103—131.

[14] Aaron, D. and C. Tsouris, *Separation of CO_2 from Flue Gas: A Review.* Separation Science and Technology, 2005. **40**(1-3): p. 321—348.

[15] Research, M.T.a. *CO_2 Removal from natural gas*. CO_2 Removal 2018 [cited 2020 May 30]; Available from: https://www.mtrinc.com/our-business/natural-gas/co2-removal-from-natural-gas/.

[16] Kennedy, K.K., K.J. Maseka, and M. Mbulo, *Selected Adsorbents for Removal of Contaminants from Wastewater: Towards Engineering Clay Minerals.* Open Journal of Applied Sciences, 2018. **08**(08): p. 355—369.

[17] Pradthana, P., กระบวนการดูดซับ (*Adsorption Process)*, in *Pradthana's Weblog*. 2008, March 19.

[18] มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, วิศวกรรมการประปา. Vol. 2. 1999, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 321.

[19] นพิดา หิญชีระนันทน์, ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย, เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา *Catalyst Technology*. 2013, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 364.

[20] Xie, Y., et al., *The Effect of Novel Synthetic Methods and Parameters Control on Morphology of Nano-alumina Particles.* Nanoscale Res Lett, 2016. **11**(1): p. 259.

[21] เชาวเลข ชยวัฒนางกูร, การก่อสภาพของไหล (*Fluidization)*. 2010 [cited 2020 May 30]; Available from: http://www0.tint.or.th/nkc/nkc53/content/nstkc53-065.html.

[22] Prieto Jiménez, N., O. Fabio, and G. Silva, *Fluid Dynamics of Gas - Solid Fluidized Beds*. 2012.

[23] เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, ฟลูอิไดเซชัน *Fluidization*. 2017, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 308.

[24] Jongartklang, N., et al., *Correlations of kinetic parameters with various system operating conditions for CO_2 sorption using K_2CO_3/Al_2O_3 solid sorbent in a fixed/fluidized bed reactor.* Journal of Environmental Chemical Engineering,

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2016. **4**(2): p. 1938–1947.

[25] Serna-Guerrero, R. and A. Sayari, *Modeling adsorption of CO_2 on amine–functionalized mesoporous silica. 2: Kinetics and breakthrough curves.* Chemical Engineering Journal, 2010. **161**(1-2): p. 182–190.

[26] Inyinbor, A.A., F.A. Adekola, and G.A. Olatunji, *Kinetics, isotherms and thermodynamic modeling of liquid phase adsorption of Rhodamine B dye onto Raphia hookerie fruit epicarp.* Water Resources and Industry, 2016. **15**: p. 14–27.

[27] Zhao, C., X. Chen, and C. Zhao, *K_2CO_3/Al_2O_3 for Capturing CO_2 in Flue Gas from Power Plants. Part 2: Regeneration Behaviors of K_2CO_3/Al_2O_3.* Energy & Fuels, 2012. **26**(2): p. 1406–1411.

[28] Zhao, C., et al., *K_2CO_3/Al_2O_3 for Capturing CO_2 in Flue Gas from Power Plants. Part 3: CO_2 Capture Behaviors of K_2CO_3/Al_2O_3 in a Bubbling Fluidized-Bed Reactor.* Energy & Fuels, 2012. **26**(5): p. 3062–3068.

[29] Sengupta, S., et al., *Improvement in Regeneration Properties and Multicycle Stability for K_2CO_3/Al_2O_3 Adsorbents for CO_2 Removal from Flue Gas.* Energy & Fuels, 2014. **28**(8): p. 5354–5362.

[30] Sengupta, S., et al., *Circulating Fluid-Bed Studies for CO_2 Capture from Flue Gas using K_2CO_3/Al_2O_3 Adsorbent.* Energy & Fuels, 2018. **32**(8): p. 8594–8604.

[31] Guo, Y., et al., *CO_2 sorption and reaction kinetic performance of K_2CO_3/AC in low temperature and CO_2 concentration.* Chemical Engineering Journal, 2015. **260**: p. 596–604.

[32] Boonprasop, S., B. Chalermsinsuwan, and P. Piumsomboon, *Effect of the operating parameters on the CO_2 capture capacity of potassium carbonate supported on gamma alumina (K_2CO_3/γ–Al_2O_3) using conventional heat regeneration.* Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017. **78**: p. 282–289.

[33] Boonprasop, S., B. Chalermsinsuwan, and P. Piumsomboon, *Effect of operating parameters of potassium carbonate supported on gamma alumina (K_2CO_3/γ–Al_2O_3) on CO_2 capture capacity using depressurized regeneration.*

Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2018. **88**: p. 215–225.

[34] ฉลอง สีแก้วสิ่ว, *Design of Experiment* 2009 [cited 2020 May 30]; Available from: http://www.geocities.ws/chalong_sri/why_DOE.

[35] Boonprasop, S., et al., *Optimum operating parameters of CO_2 sorption in turbulent fluidized bed regime using potassium carbonate supported on gamma alumina solid sorbent.* RSC Advances, 2018. **8**(69): p. 39678–39690.

[36] Kumar, P., et al., *Metal–organic frameworks for the control and management of air quality: advances and future direction.* Journal of Materials Chemistry A, 2016. **4**(2): p. 345–361.

[37] Martin, O., et al., *Design of hydrothermally-stable dawsonite-based sorbents in technical form for CO2capture.* Energy Environ. Sci., 2014. **7**(11): p. 3640–3650.

[38] Hartman, M., et al., *Decomposition of Potassium Hydrogen Carbonate: Thermochemistry, Kinetics, and Textural Changes in Solids.* Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019. **58**(8): p. 2868–2881.

[39] Fernández-Carrasco, L., et al., *Synthesis and crystal structure solution of potassium dawsonite: An intermediate compound in the alkaline hydrolysis of calcium aluminate cements.* Cement and Concrete Research, 2005. **35**(4): p. 641–646.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวชาติยา ตรีพูนสุข
วัน เดือน ปี เกิด	13 มีนาคม 2539
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสุไหงโก-ลก จังหวัดนราธิวาส ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	119/200 ซอยนวมินทร์101 ถนนนวมินทร์ แขวงนวมินทร์ เขตบึงกุ่ม จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10240
รางวัลที่ได้รับ	Best oral presentation in the topic of Potassium Carbonate Supported on Gamma-Alumina Sorbent Regeneration in Fluidized Bed Reactor for Carbon Dioxide Capture Technology (TIChE2020)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University