

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์จากโพแทสเซียม
คาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาในฟลูอิดซ์เบดดาวเนอร์โดยผลร่วมความดันและอุณหภูมิ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION OF CARBON DIOXIDE DESORPTION
FROM POTASSIUM CARBONATE/GAMMA-ALUMINA IN FLUIDIZED BED DOWNER BY
COMBINED EFFECT OF PRESSURE AND TEMPERATURE



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 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์จากโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาในฟลูอิดซ์เบตดาวเนอร์โดยผลร่วมความดันและอุณหภูมิ
โดย	น.ส.ศศิธร อังคนาวีศัลย์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

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

..... กรรมการ
(ดร.ธีรวัฒน์ เสมา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย บำรุงศรี)

ศศิธร อังคนาวาศิษฐ์ : การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาในฟลูอิดไรซ์เบดดาวเนอร์โดยผลรวมความดันและ อุณหภูมิ. (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION OF CARBON DIOXIDE DESORPTION FROM POTASSIUM CARBONATE/GAMMA-ALUMINA IN FLUIDIZED BED DOWNER BY COMBINED EFFECT OF PRESSURE AND TEMPERATURE) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

ปัจจุบันปัญหาภาวะโลกร้อนรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกสู่บรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของแก๊สเรือนกระจกจะถูกปลดปล่อยออกมาจาก 3 แหล่งหลัก ซึ่งหนึ่งในนั้น คือ การผลิตไฟฟ้า และเนื่องจากความต้องการในการใช้พลังงานยังเพิ่มสูงขึ้นทำให้แนวโน้มในการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ยังคงเพิ่มมากขึ้น นำมาสู่การพัฒนาเทคโนโลยีในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความสนใจในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันต่อกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านการอิมเพกเนชันด้วยตัวทำละลายมอนอเอทาโนลามีน สร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์และประเมินพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับ นอกจากนี้ จะศึกษากระบวนการคายซับด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัตโดยใช้ผลรวมของความดันและอุณหภูมิ ผลที่ได้ พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับมีผลเชิงบวกต่ออัตราการคายซับของตัวดูดซับที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการคายซับเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ความดันที่ใช้ในการคายซับมีผลเชิงลบต่ออัตราการคายซับ โดยเมื่อลดความดันที่ใช้ในการคายซับ อัตราการคายซับจะเพิ่มขึ้น ซึ่งตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงในภาวะการคายซับที่ 200 °C ความดัน 1 บาร์ จะให้ค่าอัตราการคายซับสูงสุดรวมถึงใช้พลังงานในการคายซับสูงสุด และแบบจำลองอาฟรามีสามารถใช้อธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาการคายซับได้ นอกจากนี้ ในการจำลองกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ผลรวมของความดันและอุณหภูมิ พบว่า กรณีที่พิจารณาสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัตให้อัตราการคายซับต่ำกว่ากรณีที่ไม่มีพิจารณาสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่ออัตราการคายซับที่ภาวะความดันต่ำของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง พบว่า อัตราการคายซับมีปริมาณใกล้เคียงกัน

สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6270161823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Carbon dioxide capture; Desorption; Solid sorbent; Kinetic model;
Computational fluid dynamics

Sasitron Angkanawisan : COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION OF CARBON DIOXIDE DESORPTION FROM POTASSIUM CARBONATE/GAMMA-ALUMINA IN FLUIDIZED BED DOWNER BY COMBINED EFFECT OF PRESSURE AND TEMPERATURE. Advisor: Assoc. Prof. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D. Co-advisor: Prof. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D.

Nowadays, global warming is increasing more severe due to the increasing of greenhouse gas emissions. An emission of carbon dioxide (CO₂) is one of the main components of greenhouse gases that is released from three main sources, one of the main sources is power generation plants. To reduce the CO₂ emissions, CO₂ capture technology becomes an alternative solution. Solid sorbent adsorption has been receiving increased attention. In this research, effects of desorption pressure and temperature on CO₂ desorption rate of non-modified and modified potassium carbonate/gamma-alumina were investigated. Moreover, this research developed the CFD model of CO₂ desorption process by combined effects of pressure and temperature using dynamics restitution coefficient model. The results showed that the increasing of desorption temperature and the decreasing of desorption pressure enhanced CO₂ desorption rate. Furthermore, when desorption at 200 °C and 1 bar, the modified solid sorbent had the highest CO₂ desorption but required the maximum energy. The experimental data of the CO₂ desorption rate were successfully fitted with the Avrami's kinetic model. For simulation results, the CFD model of desorption process using dynamics restitution coefficient model predicted lower CO₂ desorption rate than the CFD model of desorption process using conventional restitution coefficient. Moreover, the results showed that desorption temperature did not have strong effect to CO₂ desorption rate at low desorption pressure.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์จากโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาในฟลูอิดซ์เบตดาวเนอร์โดยผลร่วมความดันและอุณหภูมิสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือและคำแนะนำต่าง ๆ จากหลายฝ่าย จึงขอขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.เบญจพล เถลิงสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา และข้อเสนอแนะ รวมทั้งมอบความรู้ทางวิชาการ ตลอดจนการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อ.ดร.ธีรวัฒน์ เสมากกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.พรชัย บำรุงศรี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ สำหรับเงินทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคุณสุชาติ กริแสง ที่มอบความรู้ ช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย และขอขอบพระคุณสมาชิกห้อง Cybernetics ทุกคนที่ให้คำปรึกษา กำลังใจและการสนับสนุนอย่างสม่ำเสมอ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจสำคัญ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ สิ่งเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัย	7
2.1 เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	7
2.1.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion)	8
2.1.2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion).....	8
2.1.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion).....	8
2.2 เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้.....	9

2.2.1	กระบวนการดูดซึม (Absorption).....	9
2.2.2	กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	11
2.2.3	กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation).....	12
2.2.4	กระบวนการแยกด้วยไครโอเจนิค (Cryogenic separation).....	13
2.3	ทฤษฎีพื้นฐานของกระบวนการดูดซับ	14
2.3.1	ประเภทการดูดซับ.....	14
2.3.2	กลไกการดูดซับ	15
2.3.3	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	16
2.4	วิธีการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	16
2.4.1	กระบวนการสลับอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption).....	17
2.4.2	กระบวนการสลับความดัน (Pressure swing adsorption).....	18
2.5	ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization).....	18
2.5.1	ประเภทของฟลูอิดิเซชัน.....	19
2.5.2	ลักษณะการไหลของฟลูอิดิเซชัน (Fluidization flow regime).....	20
2.6	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับและคายซับ (Kinetics model)	24
2.7	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics).....	27
2.7.1	วิธีการ (Methodology).....	28
2.7.2	วิธีการแบ่งช่วง (Discretization).....	28
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย	33
3.1	ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น	33
3.2	สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.2.1	สารเคมี.....	34
3.2.2	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	34

3.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับของแข็ง	34
3.2.2.2 เซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์	35
3.2.2.3 ตัวควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส	35
3.2.2.4 ตัวควบคุมตัวควบคุมอุณหภูมิ	35
3.2.2.5 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด	35
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	36
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับของแข็ง	36
3.3.2 กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง	37
3.3.3 กระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง	39
3.3.4 เครื่องมือวิเคราะห์	42
3.3.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและการคายซับ	42
3.4 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับ	44
3.4.1 การพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	44
3.4.2 การศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ผลรวมของความดันและอุณหภูมิ	46
3.4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	48
3.5 การประเมินพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์	53
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	55
4.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง	55
4.1.1 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง	55
4.1.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง	59
4.2 การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง	62
4.2.1 ความสามารถในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโดยใช้ความร้อน	63

4.2.2 ความสามารถในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโดยใช้การลด ความดัน.....	65
4.2.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง	66
4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ (Characterization of sorbents)	71
4.3.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับเชิงกายภาพของไนโตรเจน (N ₂ adsorption-desorption technique)	71
4.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับของแข็งด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier transform Infrared (FTIR) Spectroscopy) ..	73
4.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับด้วย Elemental analyzer-CHNS/O	74
4.3.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)	76
4.4 ผลการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับ	80
4.4.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	80
4.4.2 ผลการทดสอบแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของกระบวนการคายซับ	82
4.4.3 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับโดยใช้ผลร่วมของ ความดันและอุณหภูมิ.....	84
4.5 ผลการประเมินพลังงาน	87
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.1.1 การศึกษากระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง.....	92
5.1.2 การศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง	93
5.1.3 การศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโดยการจำลอง พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	94

5.1.4 การศึกษาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซัลคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง	95
5.2 ข้อเสนอแนะ	95
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก	97
ภาคผนวก ข	110
บรรณานุกรม.....	121
ประวัติผู้เขียน.....	127



สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1	ภาวะที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	39
ตารางที่ 3.2	ภาวะที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	41
ตารางที่ 4.1	ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	56
ตารางที่ 4.2	ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	60
ตารางที่ 4.3	ความสามารถในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	63
ตารางที่ 4.4	ความสามารถในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่าง ๆ.....	65
ตารางที่ 4.5	ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	67
ตารางที่ 4.6	ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับที่ความดันต่าง ๆ.....	67
ตารางที่ 4.7	สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับของแข็ง.....	71
ตารางที่ 4.8	สมบัติทางเคมีของตัวดูดซับของแข็ง.....	75
ตารางที่ 4.9	ค่าความคลาดเคลื่อนของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ย.....	81
ตารางที่ 4.10	ความสามารถในการคายซับเมื่อคูณแบบจำลองจลนพลศาสตร์ ด้วยสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ.....	83
ตารางที่ 4.11	ความสามารถในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการจำลอง พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	86
ตารางที่ 4.12	แสดงพลังงานที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ.....	87
ตารางที่ ก.1	ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณความสามารถของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	98
ตารางที่ ก.2	ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	99
ตารางที่ ก.3	ข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ..	100

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ของ แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับ.....	105
ตารางที่ ก.5 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการคายซับ.....	108



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	7
รูปที่ 2.2 กระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์.....	10
รูปที่ 2.3 กระบวนการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	11
รูปที่ 2.4 กระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้โดยใช้เยื่อเลือกผ่าน.....	12
รูปที่ 2.5 กระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโครโอเจนิค.....	13
รูปที่ 2.6 กลไกในการเกิดการดูดซับ.....	15
รูปที่ 2.7 กระบวนการดูดซับแบบสลับอลูมิเนียม.....	17
รูปที่ 2.8 กระบวนการดูดซับแบบสลัความดัน.....	18
รูปที่ 2.9 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งและของไหลในเครื่องปฏิกรณ์.....	19
รูปที่ 2.10 รูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชัน.....	20
รูปที่ 2.11 การใช้ระเบียบวิธีที่แบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ.....	29
รูปที่ 3.1 กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง.....	37
รูปที่ 3.2 โดเมนการคำนวณสองมิติของแบบจำลองการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	45
รูปที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	59
รูปที่ 4.2 ความสามารถการดูดซับที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณ จากแบบจำลองอาฟรามิของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	61
รูปที่ 4.3 ความสามารถการคายซับที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณ จากแบบจำลองอาฟรามิของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	69
รูปที่ 4.4 ความสามารถการคายซับที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณ จากแบบจำลองอาฟรามิของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ความดันต่าง ๆ.....	70

รูปที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน.....	73
รูปที่ 4.6 สเปกตรัม FTIR ของตัวดูดซับของแข็ง.....	74
รูปที่ 4.7 ดิฟแฟรกโตแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	79
รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ยของการจำลอง.....	81
รูปที่ 4.9 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์.....	86
รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม.....	101
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม.....	102
รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับของแบบจำลองอาฟรามี.....	103
รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ของจลนพลศาสตร์การคายซับของแบบจำลองอาฟรามี.....	106



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาภาวะโลกร้อนที่รุนแรงเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันถือเป็นปัญหาที่ทั่วโลกให้ความสำคัญหนึ่งในสาเหตุที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน คือ การปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการสะสมในชั้นบรรยากาศ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลักของแก๊สเรือนกระจกถูกปลดปล่อยออกมาจาก 3 แหล่งหลัก ได้แก่ การขนส่ง การผลิตไฟฟ้า และอุตสาหกรรม [1] นอกจากนี้ ความต้องการในการใช้พลังงานยังเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น จึงนำมาสู่การพัฒนาเทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ

เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำได้ 3 วิธีหลัก ได้แก่ การดักจับก่อนการเผาไหม้ การดักจับหลังการเผาไหม้ และการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน อย่างไรก็ตาม การดักจับหลังการเผาไหม้ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากไม่ต้องเปลี่ยนกระบวนการภายในโรงงาน [2] กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การดูดซึมโดยใช้สารละลายของเหลว การดูดซับโดยใช้ของแข็ง และการใช้เยื่อเลือกผ่าน เป็นต้น การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายมอโนเอทานอลามีน (Mono-ethanolamine, MEA) เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากให้ประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง อย่างไรก็ตาม สารละลายเอมีนสามารถเกิดการออกซิเดชันและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังใช้พลังงานสูงในกระบวนการคายกลับคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ของแข็งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย สามารถทำได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และการคายกลับหรือการคืนสภาพตัวดูดซับสามารถทำได้ง่ายโดยใช้อุณหภูมิหรือความดัน [3]

ตัวดูดซับของแข็งในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ โลหะกัมมันต์ (Active metal) และตัวรองรับ (Support) โดยโลหะกัมมันต์ทำหน้าที่เป็นตัวทำปฏิกิริยาในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ขณะที่ตัวรองรับทำหน้าที่ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของโลหะกัมมันต์ ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว รวมทั้งเพิ่มคุณสมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับ โลหะกัมมันต์ที่นิยมใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ คือ โลหะอัลคาไลไนในรูปแบบสารประกอบคาร์บอเนต เช่น โซเดียมคาร์บอเนต

(Sodium carbonate, Na_2CO_3) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K_2CO_3) ขณะที่ตัวรองรับนิยมใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminum oxide, Al_2O_3) [4] โดยงานวิจัยนี้สนใจตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินา เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดูดซับที่อุณหภูมิต่ำ หาได้ง่าย และราคาถูก อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมาสรุปได้ว่า การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโลหะอัลคาไลน์ยังให้ค่าการดักจับที่ต่ำ เนื่องจากอัตราการดูดซับต่ำ ดังนั้น ตัวดูดซับของแข็งโลหะอัลคาไลน์ยังคงต้องได้รับการพัฒนา [5]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับพลศาสตร์ของไหลโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และความสามารถของคอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณ โดยการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่าง ๆ จะถูกคำนวณด้วยชุดสมการอนุรักษ์ทั้งหมด 3 ชุด ได้แก่ สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation) สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation) งานวิจัยที่ผ่านมาศึกษาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตโดยใช้อุณหภูมิ ซึ่งการวิเคราะห์กระบวนการนี้ใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการวิเคราะห์ จากการศึกษาพบว่า กระบวนดังกล่าวแม้ให้ประสิทธิภาพในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงแต่ต้องการพลังงานในการคายซับสูงเช่นกัน เนื่องจากต้องใช้อุณหภูมิสูง [6]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านการอิมเพรเกนชัน (Impregnation) ด้วยตัวทำละลายมอนอเอทาโนลามีนในฟลูอิดซ์เบดดาวเนอร์โดยใช้ผลรวมของความดันและอุณหภูมิ รวมถึงการประเมินพลังงานที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อหาภาวะที่ให้ประสิทธิภาพในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงแต่ใช้พลังงานต่ำในการคายซับ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาจลนพลศาสตร์การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาโดยใช้ผลร่วมของความดันและอุณหภูมิ

1.2.2 พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาในฟลูอิดส์เบดดาวเนอร์โดยใช้ผลร่วมของความดันและอุณหภูมิ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินา ($K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยตัวทำละลายเอมีน และการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ความดันและอุณหภูมิ จากนั้นนำผลการดูดซับและการคายซับมาสร้างสมการจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

1.3.2 จำลองกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยศึกษาผลร่วมของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวดูดซับของแข็งแบบจำลองจลนพลศาสตร์ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้จลนพลศาสตร์ของการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยตัวทำละลายเอมีน และภาวะที่ให้ประสิทธิภาพการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงแต่ใช้พลังงานในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ รูปแบบความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นแนวทางในการเตรียมตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยตัวทำละลายเอมีน และศึกษาเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคต์เบดสำหรับกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงการออกแบบและการจำลองกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

1.6.2 ออกแบบการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอโนเอทานอลามีน ชุดทดลองที่ใช้ทำการทดลองดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบด้วย คอลัมน์แก้วสำหรับใช้ในการดูดซับ และองค์ประกอบอื่น ๆ เป็นสแตนเลส มีชุดควบคุมอุณหภูมิและความดันเพื่อควบคุมสภาวะในการทดลองให้คงที่ และส่วนที่ 2 ศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิต่อกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอโนเอทานอลามีน โดยชุดทดลองที่ใช้ในการทดลองการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นชุดทดลองเดียวกับที่ใช้ในการดูดซับ

1.6.3 ศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับ ถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นแรกเป็นการเตรียมตัวดูดซับ โดยใช้วิธีอิมเพรกเนชันโดยนำสารตั้งต้นซึ่งประกอบด้วย โฟแทสเซียมคาร์บอเนต 5 กรัม ตัวรองรับอะลูมินา 5 กรัม และน้ำปราศจากไอออนที่มีและไม่มีสารละลายเอมีน 25 มิลลิลิตร มาผสมและเขย่าที่ความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้น นำมากรองดูดและอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ขั้นที่สองเป็นการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ นำตัวดูดซับที่เตรียมได้มาทำการดูดซับโดยเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ (40 50 60 70 และ 80 องศาเซลเซียส) ที่ความดัน 1 บาร์ แก๊สที่ใช้ทดลอง คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 12% ผสมกับแก๊สไนโตรเจน มีอัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที ซึ่งการทดลองจะวัดค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาจนกระทั่งค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับขาเข้าและนำค่าที่ได้มาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้น ทดลองการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ของแข็ง

โพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาในฟลูอิด์เบดดาวเนอร์ ตามแผนที่ได้ออกแบบที่ตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ได้แก่ ความดัน (0.2 0.4 0.6 และ 0.8 บาร์) และอุณหภูมิ (100 150 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส) และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาประสิทธิภาพในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

1.6.4 สร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์สำหรับการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยตัวทำละลายเอมีนในฟลูอิด์เบดดาวเนอร์ ได้แก่ แบบจำลอง Pseudo-first order Pseudo-second order และ Avrami's fractional-order

1.6.5 พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยตัวทำละลายเอมีน ซึ่งมีความกว้าง 2 เมตร และความสูง 3.5 เมตร ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับผลจากงานวิจัยของ Kongkitisupchai และคณะ [7] จากนั้น นำแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต (Dynamics restitution coefficient) จากงานวิจัยที่ผ่านมา และแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์จากข้อ 1.6.4 มาร่วมในการคำนวณ

1.6.6 ศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยตัวทำละลายเอมีน โดยการป้อนตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สไอเสียหลังการเผาไหม้ และศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ความดันและอุณหภูมิ

1.6.7 วิเคราะห์ ประสิทธิภาพในการคายซับและพลังงานที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยตัวทำละลายเอมีน

1.6.8 ประมวล วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานผลงานวิจัยประกอบด้วยเนื้อหาต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2 เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ ทฤษฎีพื้นฐานของกระบวนการดูดซับ วิธีการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ฟลูอิดไดเซชัน แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับและคายซับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง วิธีการทดลอง การคำนวณความสามารถในการดูดซับและคายซับ เครื่องมือวิเคราะห์ การศึกษาจลนพลศาสตร์ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับ การคำนวณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับ

บทที่ 4 ผลการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการทดลองการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงคุณภาพ และเชิงปริมาณของตัวดูดซับ ผลการสร้างแบบจำลองกระบวนการคายซับ ผลการจำลองกระบวนการคายซับ ผลการศึกษาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับ

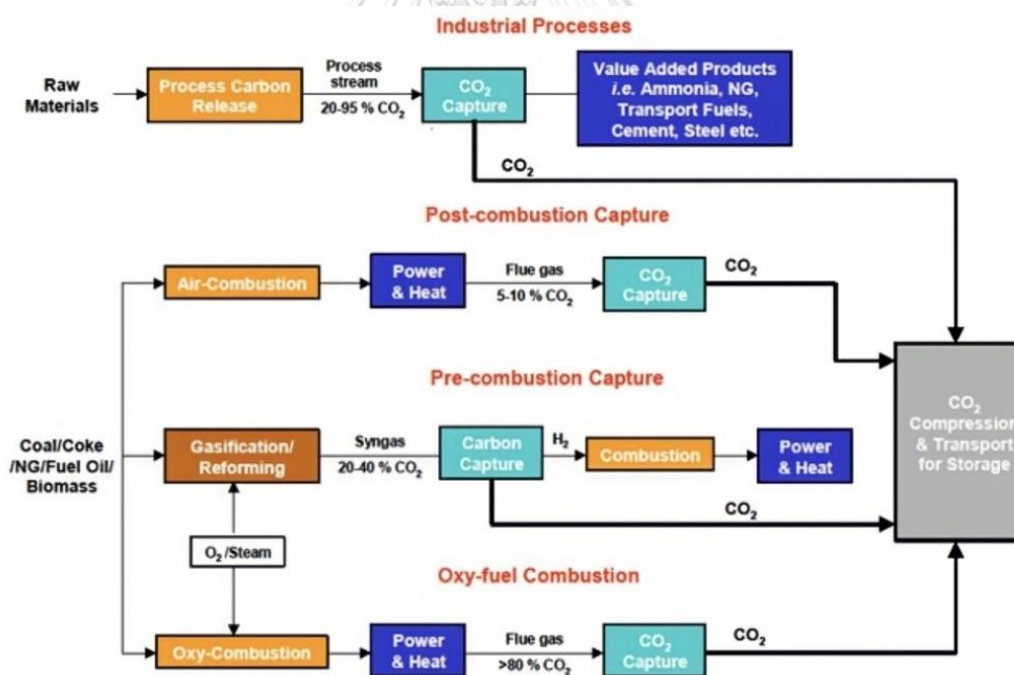
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัย

2.1 เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture technology) เป็นกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในอุตสาหกรรมเพื่อลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศ รูปที่ 2.1 แสดงเทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ การดักจับก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion) การดักจับในการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion) และการดักจับหลังการเผาไหม้ (Post-combustion)



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [8]

2.1.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าเครื่องผลิตแก๊สสังเคราะห์ (Gasifier) เพื่อผ่านกระบวนการแปรสภาพให้เป็นแก๊ส (Gasification) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) โดยแก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วย คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไฮโดรเจน (H₂) จากนั้น คาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำจะเกิดปฏิกิริยา water gas shift เปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้มีปริมาณถึงร้อยละ 15-50 [9] ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนจะถูกแยกเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต่อไป

2.1.2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion)

กระบวนการนี้จะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้แทนที่จะใช้อากาศ ทำให้ช่วยลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ (Flue gas) ซึ่งแก๊สเผาไหม้จะมีองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) จากนั้น แก๊สเผาไหม้จะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการแยกไอน้ำในเครื่องควบแน่น (Condenser) ขณะที่แก๊สเผาไหม้ที่เหลือจะผ่านกระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ (CO₂ purification) ซึ่งจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงถึงร้อยละ 80 [10] อย่างไรก็ตาม แม้กระบวนการนี้ให้คาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างบริสุทธิ์ แต่กระบวนการนี้มีปัญหาการกัดกร่อน เนื่องจากแก๊สเผาไหม้มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ นอกจากนี้ กระบวนการนี้มีค่าใช้จ่ายที่สูงเพราะใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ปริมาณมาก

2.1.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion)

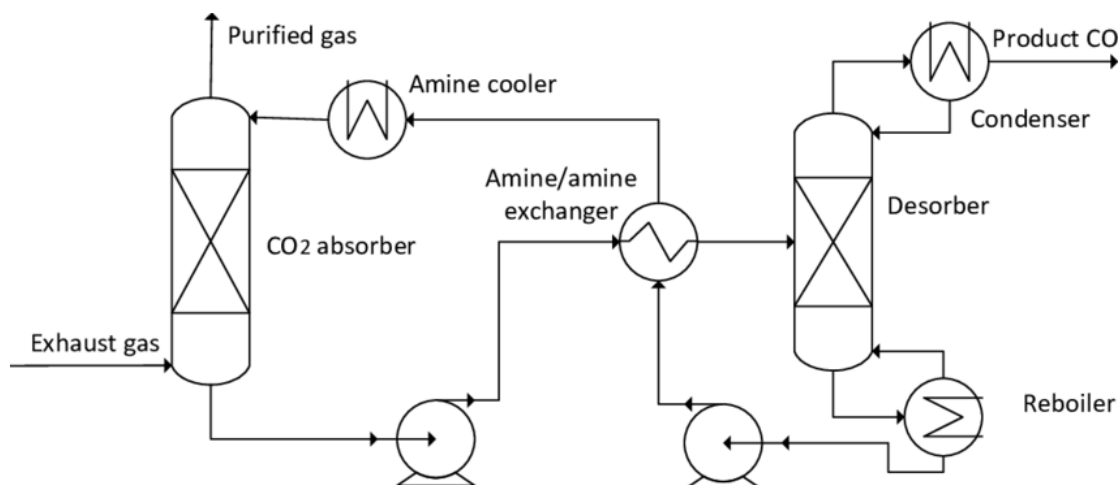
กระบวนการนี้จะดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สเผาไหม้ที่เกิดขึ้นหลังการเผาไหม้ ส่งผลให้การดักจับด้วยกระบวนการนี้ไม่รบกวนระบบตั้งต้น เพียงแค่เพิ่มส่วนดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นมา ซึ่งเป็นส่วนดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สเผาไหม้เพื่อทำการบำบัดก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ ดังนั้น กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้จึงได้รับความนิยม เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง และการซ่อมบำรุงต่ำกว่ากระบวนการอื่น ๆ [11]

2.2 เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้

จากที่กล่าวไปข้างต้น กระบวนการในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มีทั้งหมดสามประเภท ซึ่งแต่ละกระบวนการจะเหมาะสมกับระบบที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้และกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในการเผาไหม้ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์จำเป็นต้องเปลี่ยนกระบวนการตั้งต้นค่อนข้างมากจึงไม่นิยมใช้กับกระบวนการผลิตที่มีอยู่เดิม นอกจากนี้ ต้นทุนและค่าใช้จ่ายของทั้งสองกระบวนการนี้สูง ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้จากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งกระบวนการนี้สามารถทำได้หลากหลายวิธี ดังต่อไปนี้

2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption)

ในอุตสาหกรรมมีการใช้การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายอย่างกว้างขวาง ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้แยกคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในกระแสแก๊สเผาไหม้โดยใช้สารละลาย โดยสารละลายที่ใช้ในการดูดซึม เช่น สารละลายเอมีนปฐมภูมิ เอมีนทุติยภูมิ เอมีนตติยภูมิ และสารละลายอื่น ๆ องค์ประกอบหลักของกระบวนการนี้มี 2 ส่วน ได้แก่ หอดูดซึม (Absorber) และ หอคืนสภาพ (Stripper) จากรูปที่ 2.2 กระบวนการนี้จะเริ่มจากแก๊สเผาไหม้ถูกป้อนเข้ามายังด้านล่างของหอดูดซึม ขณะที่สารละลาย หรือตัวดูดซึม ถูกป้อนเข้ามายังส่วนบนของหอดูดซึม เกิดการไหลสวนทางกัน (Counter current flow) สารละลายจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์จนอิ่มตัว จากนั้น สารละลายจะถูกส่งมายังหอคืนสภาพเพื่อทำการคืนสภาพ โดยใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สารละลายสามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ขณะที่คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ [12]



รูปที่ 2.2 กระบวนการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ [13]

ข้อดีของกระบวนการดูดซึม

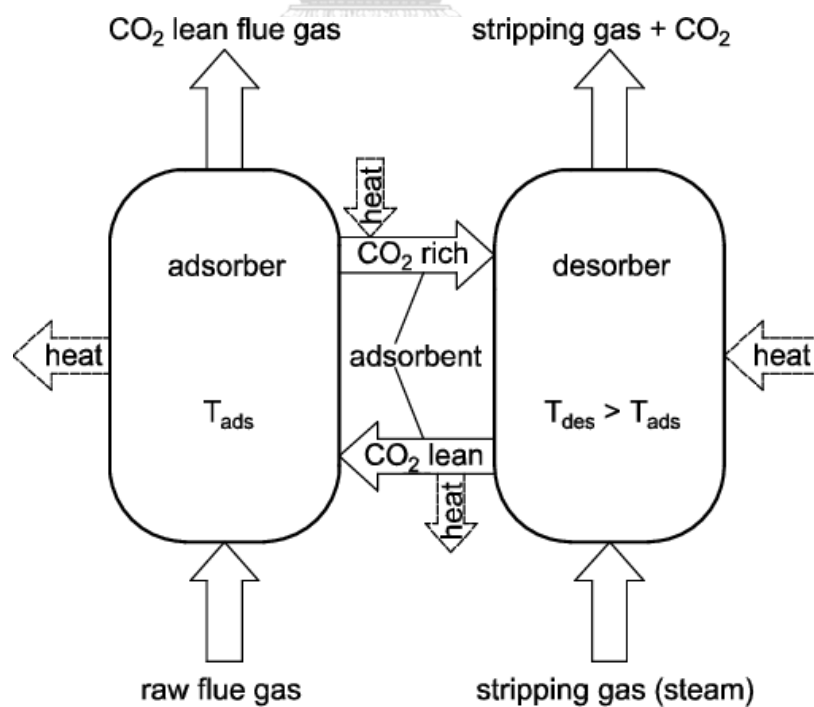
- (1) ประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 95
- (2) คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง เนื่องจากสารละลายเอมีนที่ใช้มีความจำเพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์
- (3) สารละลายที่ใช้ในการดูดซึมสามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้ต้นทุนของกระบวนการลดลง
- (4) กระบวนการดักจับนี้ควบคุมได้ง่าย และสามารถดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง (Continuous)

ข้อเสียของกระบวนการดูดซึม

- (1) สารละลายที่ใช้มีความเป็นพิษ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถกัดกร่อนอุปกรณ์ได้
- (2) ต้องการพลังงานที่ใช้ในการคืนสภาพสารละลายเอมีนสูง
- (3) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง เนื่องจากอัตราการละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายเกิดขึ้นได้ช้า ทำให้ต้องมีการเพิ่มความสูงของหอดูดซึม เพื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสของทั้ง 2 วัฏภาค

2.2.2 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการนี้ใช้ตัวดูดซับของแข็งในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวดูดซับของแข็งที่ใช้จะมีคุณสมบัติ คือ มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะได้ยาก โดยการดูดซับจะมีทั้งการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี โดยตัวดูดซับทางกายภาพจะนิยมใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุนมาก เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซีโอไลท์ (Zeolite) ซิลิกาเจล (Silica gel) และโมเลกุลาร์ซีฟ (Molecular sieve) เป็นต้น ขณะที่ตัวดูดซับทางเคมีจะนิยมใช้โลหะอัลคาไลน์ในรูปสารประกอบคาร์บอเนต เช่น โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate) และโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) เป็นต้น รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการดูดซับและการคายซับ หรือการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับของแข็ง โดยจะเริ่มจาก ตัวดูดซับถูกบรรจุในหอดูดซับ (Adsorber) ขณะที่แก๊สเผาไหม้จะถูกป้อนเข้าด้านล่างของหอดูดซับ เกิดการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับของแข็งและแก๊สเผาไหม้ คาร์บอนไดออกไซด์จะยึดติดกับพื้นผิวของตัวดูดซับของแข็ง จากนั้นแก๊สสะอาดจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศ ขณะที่ตัวดูดซับของแข็งที่อิ่มตัวไปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกส่งไปยังหอคายซับ หรือหอคืนสภาพ (Desorber) โดยใช้วิธีการลดความดัน หรือเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อนำตัวดูดซับของแข็งกลับมาใช้ใหม่ [14]



รูปที่ 2.3 กระบวนการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ [15]

ข้อดีของกระบวนการดูดซับ

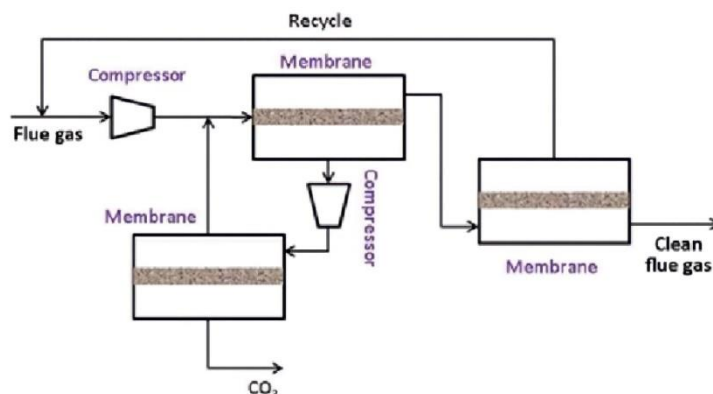
- (1) กระบวนการนี้สามารถทำได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง และความดันที่ใช้ในการดำเนินการใกล้เคียงกับความดันบรรยากาศ
- (2) ตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้ลดต้นทุนของกระบวนการ
- (3) กระบวนการนี้ต้องการพลังงานไม่สูงมาก

ข้อเสียของกระบวนการดูดซับ

- (1) ประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ

2.2.3 กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation)

การแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเยื่อเลือกผ่านอาศัยหลักการซึมผ่าน (Permeability) และการเลือก (Selectivity) ขององค์ประกอบในแก๊สผสม โดยเยื่อเลือกผ่านที่ยอมให้เฉพาะองค์ประกอบที่ต้องการแยกในแก๊สผสมซึมผ่าน ซึ่งกระบวนการนี้คาร์บอนไดออกไซด์จะเคลื่อนที่จากที่หนึ่งสู่อีกที่หนึ่งโดยใช้ความแตกต่างของความเข้มข้นของ 2 ตำแหน่ง โดยเยื่อเลือกผ่านมีหลายประเภท เช่น เยื่อเลือกผ่านพอลิเมอร์ (Polymeric membrane) เยื่อเลือกผ่านแบบมีรูพรุน (Porous membrane) และเยื่อเลือกผ่านความหนาแน่นสูง (Dense membrane) ปัจจุบัน การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่านยังไม่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากประสิทธิภาพในการแยกยังไม่สูงมาก จึงยังต้องมีการพัฒนาและศึกษาทั้งส่วนวัสดุที่ใช้ในการทำเยื่อเลือกผ่าน รวมทั้งภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ [16] รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้โดยใช้เยื่อเลือกผ่าน



รูปที่ 2.4 กระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้โดยใช้เยื่อเลือกผ่าน [17]

ข้อดีของกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน

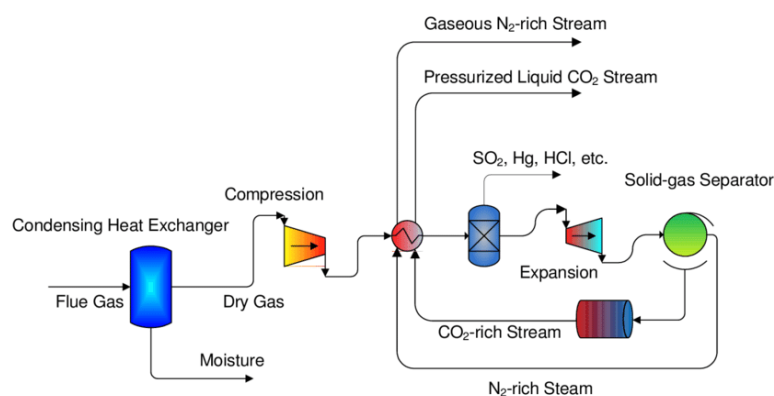
- (1) เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากไม่มีการใช้สารเคมี
- (2) โครงสร้างของระบบง่ายต่อการติดตั้งและเคลื่อนย้าย
- (3) สามารถแยกแก๊สที่มีปริมาณน้อย
- (4) สามารถแยกแก๊สเผาไหม้ที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงได้ และแก๊สที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง

ข้อเสียของกระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน

- (1) ต้นทุนในการผลิตสูง อายุในการใช้งานต่ำ
- (2) เกิดการอุดตันบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนได้ง่าย
- (3) ประสิทธิภาพในการแยกของเมมเบรนมีความจำเพาะในการแยกแก๊สค่อนข้างต่ำ

2.2.4 กระบวนการแยกด้วยโครีโอเจนิค (Cryogenic separation)

รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโครีโอเจนิค ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการแยกทางกายภาพเท่านั้น ไม่มีการใช้สารเคมี โดยอาศัยคุณสมบัติที่แตกต่างกันของสารแต่ละชนิด โดยเริ่มจาก แก๊สเผาไหม้จะถูกส่งไปกำจัดออกไซด์ของคาร์บอน ออกไซด์ของซัลเฟอร์ ออกไซด์ของไนโตรเจน และไฮโดรเจน จากนั้น แก๊สที่เหลือซึ่งมีองค์ประกอบของไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกนำมาลดอุณหภูมิ (ต่ำกว่า -80 องศาเซลเซียส) และถูกกดอัดที่ความดันสูงประมาณ 100 บาร์ เพื่อให้คาร์บอนไดออกไซด์เกิดการควบแน่นเป็นของเหลว และถูกแยกออกมาจัดเก็บ ขณะที่ไนโตรเจนซึ่งอยู่ในสถานะแก๊สจะปลดปล่อยสู่บรรยากาศ คาร์บอนไดออกไซด์ที่แยกโดยกระบวนการโครีโอเจนิคมีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 95 [18]



รูปที่ 2.5 กระบวนการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโครีโอเจนิค [18]

ข้อดีของกระบวนการแยกด้วยโครโอเจนิค

- (1) คาร์บอนไดออกไซด์มีความบริสุทธิ์สูง
- (2) ไม่มีการใช้สารเคมีในกระบวนการ

ข้อเสียของกระบวนการแยกด้วยโครโอเจนิค

- (1) ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบความปลอดภัย เนื่องจากภาวะที่ไ้แตกต่างจากสภาวะที่บรรยากาศค่อนข้างมาก
- (2) ต้องมีระบบในการกำจัดออกไซด์ของคาร์บอน ออกไซด์ของซัลเฟอร์ ออกไซด์ของไนโตรเจน และไฮโดรเจน ทำให้มีความยุ่งยากในการดำเนินการ

2.3 ทฤษฎีพื้นฐานของกระบวนการดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นวิธีที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการดูดซับสารบนพื้นผิวของวัสดุ หรือบริเวณพื้นผิวร่วม (Interphase) ระหว่างวัฏภาค โดยการดูดซับจะเกิดจากการถ่ายโอนมวลของสารที่อยู่ในรูปของเหลว หรือแก๊สมายังบริเวณพื้นผิวของของแข็ง โดยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) ขณะที่โมเลกุลที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate)

2.3.1 ประเภทการดูดซับ

การดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption หรือ Chemisorption)

- การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่อาศัยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) ซึ่งแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับสารดูดซับมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดซับในของไหลกับของไหล ทำให้สารถูกดูดซับสามารถยึดติดบนพื้นผิวของสารดูดซับได้ ซึ่งการดูดซับทางกายภาพจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีของทั้งสารดูดซับและสารถูกดูดซับ นอกจากนี้ การคายซับ หรือการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากไม่มีพลังงานกระตุ้น (Activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ทำให้มีการคายพลังงานความร้อนต่ำ สามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ

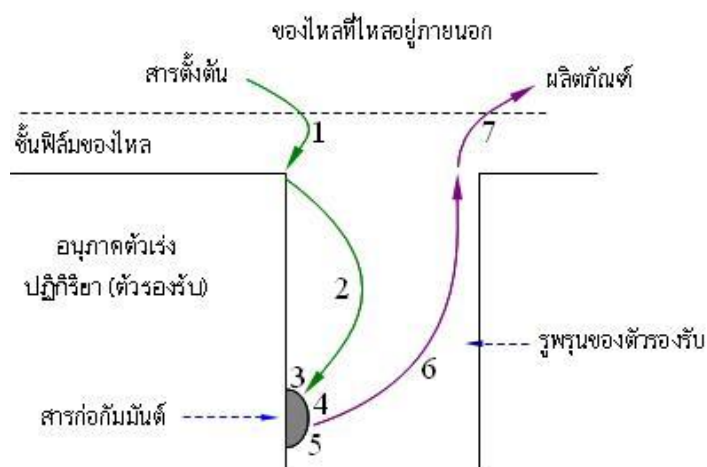
- การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่มีการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมใหม่ เกิดเปลี่ยนสารประกอบใหม่ที่มีพันธะเคมีที่แข็งแรง ในการดูดซับทางเคมีจะมีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่งผลให้มีการคายพลังงานความร้อนสูง ทำให้การคายซับ หรือการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับทำได้ยาก นอกจากนี้ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ

2.3.2 กลไกการดูดซับ

รูปที่ 2.6 แสดงกลไกในการเกิดการดูดซับ หรือการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีทั้งหมด 7 ขั้นตอน ดังนี้

- สารตั้งต้นที่อยู่ในวัฏภาคของไหลแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมายังพื้นผิวด้านนอกของตัวดูดซับของแข็ง
- การถ่ายโอนสารตั้งต้นจากพื้นผิวด้านนอกของตัวดูดซับของแข็งเข้าไปยังรูพรุน
- การดูดซับบนตำแหน่งกัมมันต์ (Active sites)
- การเกิดปฏิกิริยาดูดซับของสารตั้งต้นบนตำแหน่งกัมมันต์
- การคายผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกจากตำแหน่งกัมมันต์
- การถ่ายโอนผลิตภัณฑ์จากภายในรูพรุนมายังพื้นผิวด้านนอกของตัวดูดซับของแข็ง
- การถ่ายโอนผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวด้านนอกของตัวดูดซับของแข็งผ่านชั้นฟิล์มกลับไปยังของไหล



รูปที่ 2.6 กลไกในการเกิดการดูดซับ หรือการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

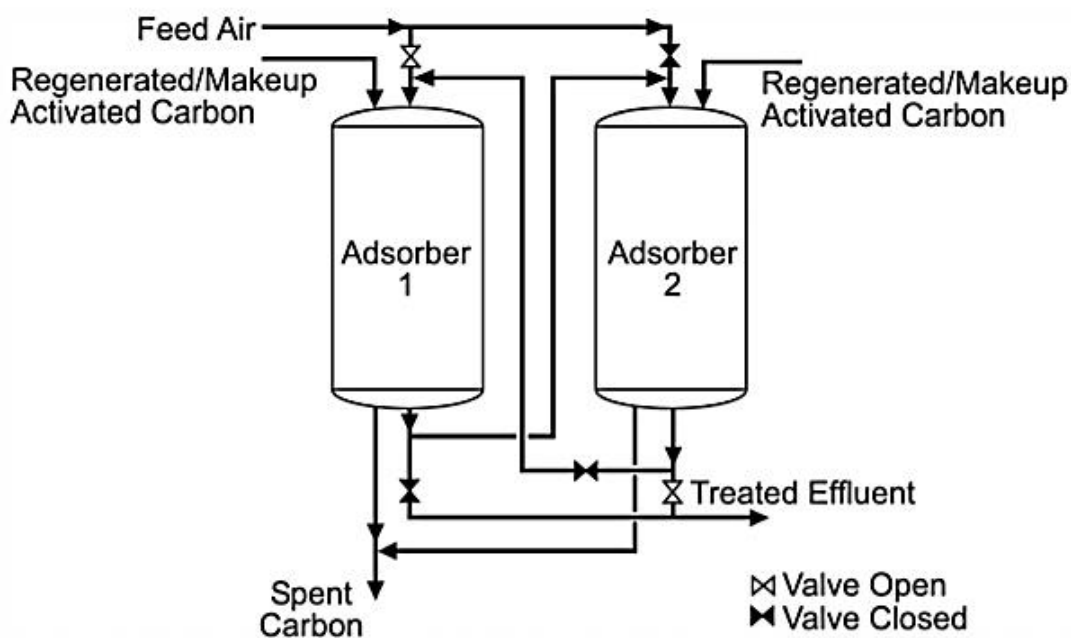
- **ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ**
พื้นที่ผิวของสารดูดซับเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญต่ออัตราการดูดซับ โดยสารดูดซับที่มีอนุภาคขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าสารดูดซับที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าสารดูดซับที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากอัตราในการดูดซับสูงกว่า
- **ลักษณะของสารดูดซับ**
อนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราในการดูดซับเร็วกว่า และประสิทธิภาพในการดูดซับจะสูงกว่าสารดูดซับที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากการดูดซับส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในรูพรุน อนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าจะเข้าไปยังรูพรุนของตัวดูดซับได้ ขณะที่อนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนได้
- **อุณหภูมิ**
อัตราในการเกิดการดูดซับและประสิทธิภาพของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ โดยจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง อย่างไรก็ตาม การดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิดจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับที่แตกต่างกัน เนื่องจาก การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ทำให้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงเกินขีดความสามารถในการดูดซับจะส่งผลให้อัตราการดูดซับลดลง
- **ความเป็นกรด-เบส**
ความเป็นกรด-เบสของสารจะส่งผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนของทั้งสารดูดซับและสารถูกดูดซับ และส่งผลต่อการละลายน้ำของสารถูกดูดซับ ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

2.4 วิธีการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้การดูดซับของของแข็งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในหอดูดซับ และการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในหอคืนสภาพ การคายซับ หรือการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับเป็นหนึ่งในกระบวนการที่สำคัญของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยของแข็ง ซึ่งการคายซับจะเกิดขึ้นหลังจากตัวดูดซับอิ่มตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ไม่สามารถดูดซับได้อีก การคายซับสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการสลับอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption) และกระบวนการสลับความดัน (Pressure swing adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการดั้งเดิมที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

2.4.1 กระบวนการสลับอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption)

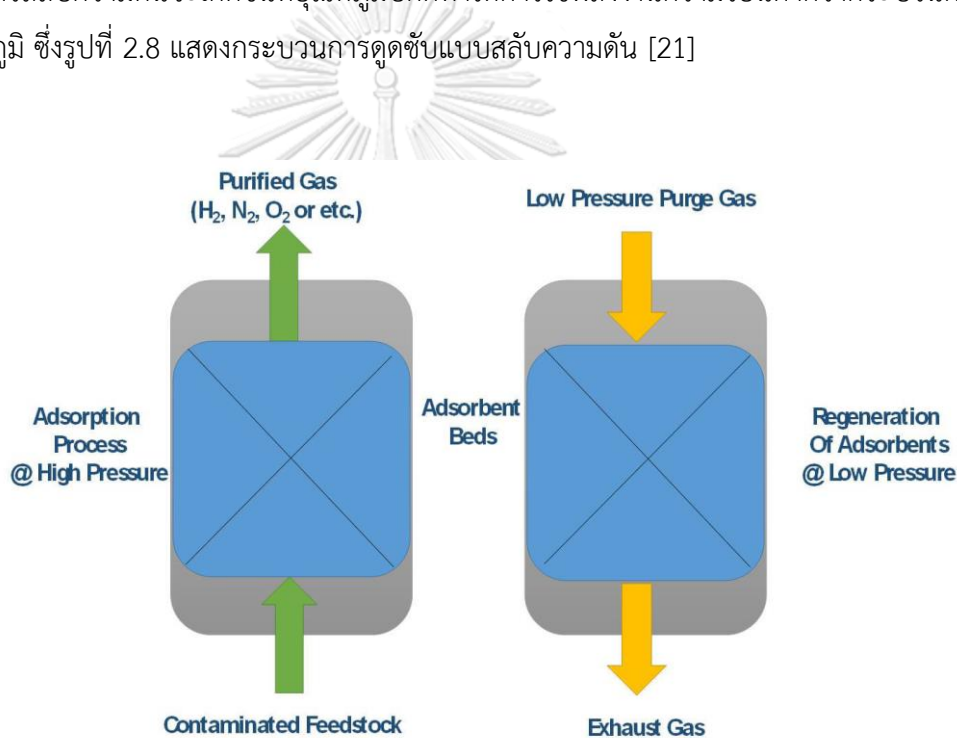
กระบวนการนี้จะใช้หลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics) ของการดูดซับและคายซับ เนื่องจากความแตกต่างของช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ ขณะที่การคายซับจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้พลังงานจลน์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้คาร์บอนไดออกไซด์สามารถออกจากรูพรุนของตัวดูดซับได้ง่ายขึ้น รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการดูดซับแบบสลับอุณหภูมิ ซึ่งกระบวนการนี้ต้องการเครื่องปฏิกรณ์อย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเริ่มจาก คาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ถูกดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์แรกที่มีการบรรจุตัวดูดซับ และถูกควบคุมไว้ที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้น เมื่อตัวดูดซับอิ่มตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์จนไม่สามารถดูดซับได้อีก แก๊สเผาไหม้จะถูกสลับให้ผ่านเครื่องปฏิกรณ์ที่ 2 และเกิดการดูดซับแทน ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์ที่ 1 จะถูกให้ความร้อนเพื่อเกิดการคายซับ คาร์บอนไดออกไซด์ จนกระทั่ง ตัวดูดซับอิ่มตัวในเครื่องปฏิกรณ์ที่ 2 และตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ที่ 1 พร้อมเกิดการดูดซับอีกครั้ง เครื่องปฏิกรณ์ที่ 2 จะถูกเพิ่มอุณหภูมิเพื่อทำการคายซับ และเครื่องปฏิกรณ์ที่ 1 จะถูกลดอุณหภูมิเพื่อทำการดูดซับอีกครั้ง ทำเช่นนี้สลับกันเกิดเป็นวัฏจักร ปัจจุบัน กระบวนการสลับอุณหภูมิถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การแยกน้ำในกระบวนการดูดซับด้วยซีโอไลต์ และการแยกไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จากแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น [19]



รูปที่ 2.7 กระบวนการดูดซับแบบสลับอุณหภูมิ [20]

2.4.2 กระบวนการสลับความดัน (Pressure swing adsorption)

กระบวนการดูดซับแบบสลับความดันอาศัยหลักการที่การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่ภาวะความดันสูง และการคายซับเกิดขึ้นได้ดีที่ภาวะความดันต่ำ โดยทั่วไปการดูดซับของกระบวนการนี้จะอยู่ภายใต้ความดันบรรยากาศ (ความดันสูง) ขณะที่การคายซับจะอยู่ภายใต้ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ หรือภายใต้สุญญากาศ (ความดันต่ำ) กระบวนการนี้จะคล้ายคลึงกับกระบวนการสลับอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์มากกว่า 2 เครื่อง สลับความดันไปมาเกิดเป็นวัฏจักร ซึ่งการปรับความดันสามารถทำได้ทั้งการใช้แก๊สป้อนเข้า หรือแก๊สเฉื่อย นอกจากนี้อาจจะมีเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดการดูดซับมากกว่าหนึ่งเครื่อง เพื่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อทั้งการดูดซับและการคายซับ กระบวนการสลับความดันจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิปกติทำให้การใช้พลังงานความร้อนต่ำกว่ากระบวนการสลับอุณหภูมิ ซึ่งรูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน [21]

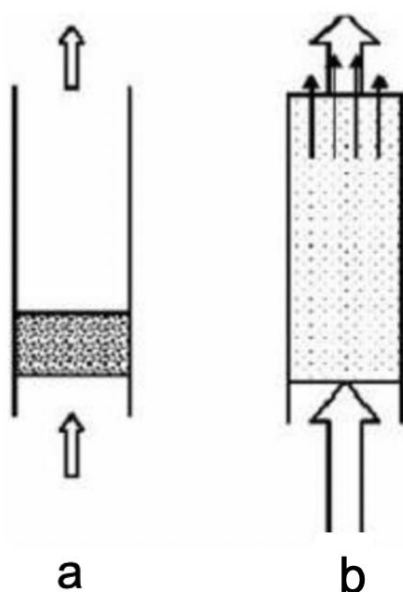


รูปที่ 2.8 กระบวนการดูดซับแบบสลับความดัน [22]

2.5 ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization)

การก่อกองของไหล หรือฟลูอิดิเซชันเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่จะมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ของแข็ง เนื่องจากฟลูอิดิเซชันจะช่วยเพิ่มการสัมผัสระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ อีกทั้งยังเพิ่มการถ่ายโอนมวลและความร้อนของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

ฟลูอิดเซชัน คือ การที่ทำให้อนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายของไหล ซึ่งเกิดจากการสัมผัสกันระหว่างของแข็งและของไหล โดยอนุภาคของแข็งจะถูกบรรจุในท่อที่มีรูเพื่อให้ของไหลสามารถไหลผ่านจากท่อด้านล่างแล้วออกจากท่อทางด้านบน ซึ่งในช่วงแรกอนุภาคของแข็งจะยังนิ่ง ไม่มีการขยับ จากนั้นอนุภาคของแข็งเริ่มมีการขยับตัว และเกิดการเคลื่อนที่คล้ายของไหลเมื่อความเร็วของไหลถึงค่าความเร็วที่เหมาะสม แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งและของไหลในเครื่องปฏิกรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY
(a) เบตนิ่ง และ (b) ฟลูอิดเซชันเบต [23]

เบต คือ อาณาเขตภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกครอบคลุมไปด้วยของแข็ง ซึ่งของแข็งอาจจะอยู่นิ่ง หรือมีการเคลื่อนที่ เนื่องจากการไหลของของไหล โดยระดับความสูงจะเริ่มตั้งแต่วิวฐานของของแข็งไปจนถึงระดับสูงสุดที่ผิวหน้าของอนุภาคของแข็ง

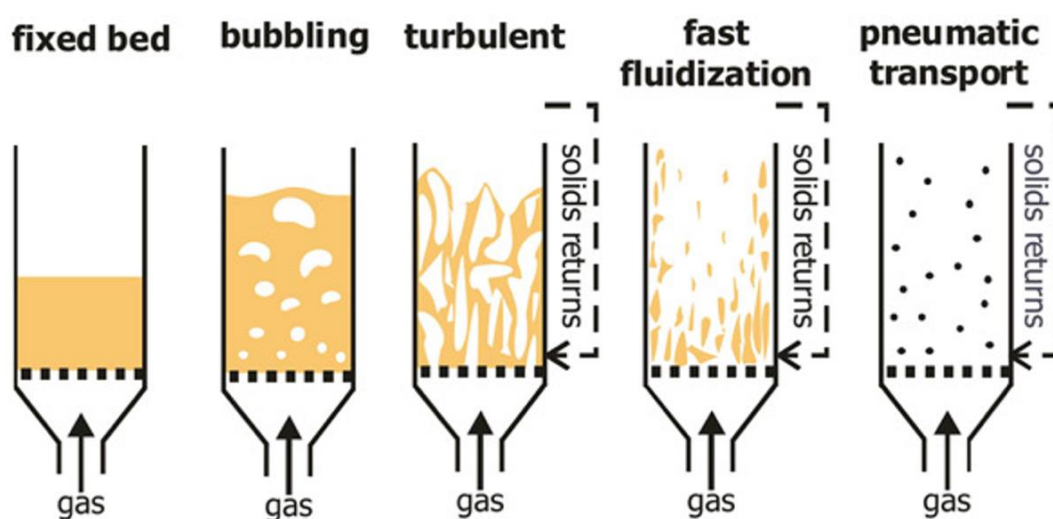
2.5.1 ประเภทของฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาค (Two-phase fluidization) และฟลูอิดเซชันแบบสามวัฏภาค (Three-phase fluidization)

- ฟลูอิดิเซชันแบบสองวัฏภาค (Two-phase fluidization)
เป็นกระบวนการที่ประกอบด้วย 2 วัฏภาค คือ ของแข็งและของไหล ซึ่งของไหลอาจจะ
เป็นได้ทั้งของเหลวหรือแก๊ส ดังนั้น สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 ประเภท คือ
ฟลูอิดิเซชันแบบของแข็งและของเหลว (Liquid-solid fluidization) และฟลูอิดิเซชัน
แบบของแข็งและแก๊ส (Gas-solid fluidization)
- ฟลูอิดิเซชันแบบสามวัฏภาค (Three-phase fluidization)
เป็นกระบวนการฟลูอิดิเซชันที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งประกอบด้วยทั้งหมด 3 วัฏภาค
คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยพัฒนามาจากกระบวนการฟลูอิดิเซชันแบบ
สองวัฏภาค

2.5.2 ลักษณะการไหลของฟลูอิดิเซชัน (Fluidization flow regime)

ลักษณะการไหลของอนุภาคของแข็งจะขึ้นอยู่กับความเร็วของของไหลที่ถูกป้อนเข้ามาใน
เครื่องปฏิกรณ์ โดยสามารถออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ เบนนิ่ง (Fixed bed) ฟลูอิดิเซชันแบบ
ฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) ฟลูอิดิเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed)
ฟลูอิดิเซชันแบบฟลูอิดิเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed) และฟลูอิดิเซชัน
แบบเบาบาง (Pneumatic transport fluidized bed) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบการไหลของฟลูอิดิเซชัน [24]

- เบทนิ่ง (Fixed bed)

เป็นภาวะที่อนุภาคของแข็งยังไม่มีการขยับ เนื่องจากความเร็วของของไหลที่ถูกป้อนเข้ายังเครื่องปฏิกรณ์ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้ของแข็งเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์มีผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งมาก ซึ่งการดำเนินการภายใต้เบตนิ่งจะมีความดันลดในระบบสูง เนื่องจากการป้อนเข้าของของไหลในระบบที่มีอนุภาคของแข็งบรรจุอย่างหนาแน่น และเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ ส่งผลให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างสองวัฏภาคมีค่าน้อย ซึ่งอาจกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา หรือประสิทธิภาพของระบบได้ โดยลักษณะการไหลรูปแบบนี้ถือว่ายังไม่ใช่ฟลูอิดเซชัน

- ฟลูอิดซ์เบตแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบตแบบฟองแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อผิวหน้าของอนุภาคของแข็งเริ่มมีการขยับตัว เนื่องจากความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) และจุดแรกที่อนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายของไหล จะเรียกว่า Minimum fluidization โดยฟลูอิดเซชันในช่วงการไหลนี้จะมีลักษณะเด่น คือ มีฟองแก๊สเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งขนาดฟองแก๊สจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคของแข็งและความเร็วของของไหล ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นส่งผลต่อการสัมผัส หรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างของแข็งและของไหล อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็ก จะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคมาก ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ยากกว่าอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถแบ่งอนุภาคของแข็งได้ทั้งหมด 4 ชนิด โดยอนุภาคของแข็งชนิด Geldart A จะเริ่มเกิดฟองแก๊สเมื่อความเร็วของของไหลสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ขณะที่อนุภาคของแข็ง Geldart B และ D จะเกิดฟองแก๊สทันทีเมื่อของไหลป้อนเข้ามีความเร็วสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน และอนุภาค Geldart C จะไม่มีฟองแก๊สเกิดขึ้นภายในระบบ ซึ่งการคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสามารถคำนวณได้โดยพิจารณาจากค่าเรย์โนลด์ (Re_{mf}) ที่แตกต่างกัน แสดงดังสมการต่อไปนี้ [25]

$$Re_{mf} < 20$$

$$U_{mf} = \frac{d_p g (\rho_s - \rho_f)}{150 \mu_f} \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) \quad 2.1$$

$$Re_{mf} > 1000$$

$$U_{mf} = \sqrt{\frac{d_p g (\rho_s - \rho_f)}{1.75 \rho_f} \varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \quad 2.2$$

โดยที่	ϵ_{mf}	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคแก๊สที่ภาวะต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน
	ρ_f	คือ	ความหนาแน่นของวัฏภาคของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	ρ_s	คือ	ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	d_p	คือ	ขนาดอนุภาคของวัฏภาคของแข็ง (เมตร)
	μ_f	คือ	ความหนืดของวัฏภาคของไหล (กิโลกรัมต่อวินาที)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที ²)
	ϕ_s	คือ	ความเป็นทรงกลมของอนุภาคของแข็ง

- ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเร็วของของไหล ซึ่งมากกว่าความเร็วในช่วงการไหลแบบฟองแก๊สจนก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการไหลภายในระบบ โดยภาวะนี้ฟองแก๊สจะรวมตัวและแตกตัวอย่างรวดเร็วเพราะความเร็วที่สูงขึ้น ส่งผลให้ฟลูอิดเซชันในช่วงการไหลนี้ไม่พบฟองแก๊ส ซึ่งภายในเครื่องปฏิกรณ์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์ บริเวณนี้จะมีอนุภาคของแข็งอยู่บางเบา (Dilute phase) ขณะที่ส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์จะมีอนุภาคของแข็งเรียงตัวอย่างหนาแน่น (Dense phase) โดยความเร็วของของไหลในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะอยู่ระหว่างความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวดแกว่งสูงสุด (Transition velocity, U_c) และความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวดแกว่งต่ำสุด (Critical velocity, U_k) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Bi และคณะ [26] แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$U_c = \frac{0.936\mu_f Ar^{0.472}}{d_p \rho_f} \quad 2.3$$

$$U_k = \frac{1.46\mu_f Ar^{0.472}}{d_p \rho_f} \quad 2.4$$

เมื่อ
$$Ar = \frac{g\rho_f(\rho_p - \rho_f)d_p^3}{\mu_f^2}$$

U_c คือ ความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวดแกว่งสูงสุด (เมตรต่อวินาที)

U_k คือ ความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวดแกว่งต่ำสุด (เมตรต่อวินาที)

- ฟลูอิดิเซชันแบบฟลูอิดิเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed)
ฟลูอิดิเซชันแบบความเร็วสูงจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลมีค่าเพิ่มขึ้นจากช่วงฟลูอิดิเซชันแบบปั่นป่วน ซึ่งมีค่ามากกว่าความเร็วขนส่ง (Transport velocity, U_{tr}) ส่งผลให้เบดเกิดการขยายตัวจนไม่สามารถระบุงพื้นที่ผิวหน้าของเบดได้ โดยบริเวณตรงกลางเครื่องปฏิกรณ์จะมีอนุภาคของแข็งอยู่อย่างเบาบาง และมีทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวเดียวกับการไหลของของไหล ขณะที่บริเวณผนังของเครื่องปฏิกรณ์จะมีอนุภาคของแข็งอยู่อย่างหนาแน่น ซึ่งมีทิศทางการเคลื่อนที่สวนทางกับการไหลของของไหล อย่างไรก็ตาม การดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิเซชันแบบฟลูอิดิเซชันแบบความเร็วสูงอาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วนหลุดออกมาจากด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ได้ การคำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบความเร็วสูงถูกนำเสนอโดย Perales และคณะ [27] ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.5

$$U_{tr} = \frac{1.45\mu_f Ar^{0.484}}{d_p \rho_f} \quad 2.5$$

- ฟลูอิดิเซชันแบบฟลูอิดิเซชันแบบบางเบา (Pneumatic fluidized bed)
ฟลูอิดิเซชันแบบบางเบาเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลจนสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งล้ม (Minimum pneumatic transport velocity, U_{mp}) ซึ่งความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์เบาบางมาก เนื่องจากอนุภาคของแข็งลอยสู่ด้านบนเครื่องปฏิกรณ์ และถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งล้มถูกนำเสนอโดย Bi และ Fan [28] ดังสมการที่ 2.6

$$U_{mp} = 10.1(d_p \rho_f)^{0.347} (G_s / \rho_f)^{0.310} (d_p / D)^{-0.139} Ar^{-0.021} \quad 2.6$$

เมื่อ G_s คือ ปริมาณของแก๊สป้อนเข้า (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)

2.6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับและคายซับ (Kinetics model)

ในอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีการพิจารณาทั้งประสิทธิภาพในการดูดซับ และอัตราการดูดซับ หรือระยะเวลาในการดูดซับ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพทั้งทางอัตราการเกิดปฏิกิริยา และทางเทอร์โมไดนามิกส์ เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบกระบวนการ หรือการสังเคราะห์ตัวดูดซับชนิดใหม่ ซึ่งแบบจำลองจลนพลศาสตร์ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) รวมถึงกลไกในการปฏิกิริยา (Mechanism) โดยแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายอัตราการเกิดดูดซับ ได้แก่ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order model) และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order model) นอกจากนี้มีการใช้แบบจำลองอื่น ๆ ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ เช่น แบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's fractional-order model) และแบบจำลองเชิงถดถอย (Deactivation model) เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองอาฟรามิในการอธิบายการดูดซับเพิ่มเติม

- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order model)

แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมถูกพัฒนาโดยใช้สมมติฐานที่ว่า การดูดซับของตัวถูกดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) และอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับขึ้นอยู่กับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยา (Active site) เพียงตัวแปรเดียว โดยค่าคงที่อัตราการดูดซับ (k_1) แปรผันตรงกับความเข้มข้นของตัวดูดซับ ซึ่งในการคำนวณอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับจะใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับ Lagergren [29]



โดยที่ A	คือ	ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)
S	คือ	ตัวดูดซับ (Adsorbent)
A * S	คือ	สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาดูดซับ (Adsorbed compound)

สามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad 2.8$$

โดยที่ q_t	คือ	ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
q_e	คือ	ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
k_1	คือ	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (นาที ⁻¹)
t	คือ	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.8 ตั้งแต่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และค่าตั้งแต่ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะได้

$$\ln \frac{q_e}{q_e - q_t} = k_1 t \quad 2.9$$

- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order model)

การอธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมถูกพัฒนาภายใต้สมมติฐานการดูดซับที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างไฟฟ้า และอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับขึ้นอยู่กับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยากำลังสอง โดยขั้นกำหนดปฏิกิริยา คือ ขั้นตอนที่เกิดการดูดซับทางเคมีซึ่งเกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ [29]



โดยที่ A	คือ	ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate)
S	คือ	ตัวดูดซับ (Adsorbent)
$A * S$	คือ	สารประกอบที่เกิดจากปฏิกิริยาดูดซับ (Adsorbed compound)

สามารถเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad 2.11$$

โดยที่ q_t	คือ	ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
--------------	-----	--

q_e	คือ	ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
k_2	คือ	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ•นาที) ⁻¹
t	คือ	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.11 ตั้งแต่ $t = 0$ ถึง $t = t$ และค่าตั้งแต่ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ จะได้

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad 2.12$$

- แบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's fractional-order model)

แบบจำลองอาฟรามิสามารถใช้อธิบายการดูดซับที่มีความซับซ้อน และมีกลไกในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไกได้ การอธิบายจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโดยใช้แบบจำลองนี้ถูกพัฒนาจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์อาฟรามิที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การเปลี่ยนวัฏภาคและการเติบโตของผลึก ซึ่งแบบจำลองนี้มีความคล้ายคลึงกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม โดยเพิ่มเทอมเลขชี้กำลังอาฟรามิ (Avrami exponent) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 4 [29] แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$q_t = q_e [1 - \exp(-(k_A t))^{n_A}] \quad 2.13$$

โดยที่	q_t	คือ	ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	q_e	คือ	ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
	k_A	คือ	ค่าคงที่อาฟรามิ (นาที ⁻¹)
	n_A	คือ	เลขชี้กำลังอาฟรามิ (-)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

นอกจากนี้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำแบบจำลองอาฟรามิมาใช้เพื่ออธิบายการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง เนื่องจากกระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของสารประกอบ [29] ซึ่งสามารถคำนวณได้ตั้งสมการที่ 2.14

$$y = 1 - \exp(-(k_D t))^{n_D} \quad 2.14$$

โดยที่ y	คือ	สัดส่วนของการคายซึบที่เวลาใด ๆ ต่อค่าการคายซึบที่เวลา t
k_D	คือ	ค่าคงที่อาฟรามิของการคายซึบ (นาที ⁻¹)
n_D	คือ	เลขชี้กำลังอาฟรามิของการคายซึบ (-)
t	คือ	เวลาที่ใช้ในการคายซึบ (นาที)

2.7 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) คือ เทคนิคที่ใช้ในการอธิบายและแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับพลศาสตร์ของไหล โดยนำวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ร่วมกับความสามารถของคอมพิวเตอร์มาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ต่าง ๆ จะถูกคำนวณด้วยชุดสมการอนุรักษ์ ซึ่งได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation) และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation) ปัจจุบันมีการนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการแก้ปัญหาเชิงวิศวกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีการที่ช่วยลดเวลา ลดค่าใช้จ่ายในการศึกษา และสามารถจำลองกระบวนการที่สามารถดำเนินการได้ยาก

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (Partial differential equation) โดยอาจจะมีบางปรากฏการณ์ที่นำระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical analysis) มาใช้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate solution) เนื่องจากบางกรณีมีความซับซ้อนซึ่งยากต่อการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) [30]

2.7.1 วิธีการ (Methodology)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีวิธีการพื้นฐานในการคำนวณ ดังต่อไปนี้

- สร้างรูปทรงหรือเรขาคณิตของกระบวนการที่จะศึกษา (ขอบเขตทางกายภาพ)
- แบ่งปริมาตรของไหลในกระบวนการเป็นเซลล์การคำนวณเล็ก ๆ (Grid)
- กำหนดสมการที่ใช้ในการคำนวณ เช่น สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์พลังงาน และสมการอนุรักษ์โมเมนตัม เป็นต้น
- กำหนดเงื่อนไขของขอบเขต (Boundary condition) ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของของไหล ณ ขอบเขตที่ใช้ในการศึกษา
- แก้สมการโดยอาศัยระเบียบวิธีทำซ้ำ (Iteration) เพื่อให้ได้ผลเฉลย
- วิเคราะห์และสรุปผล

2.7.2 วิธีการแบ่งช่วง (Discretization)

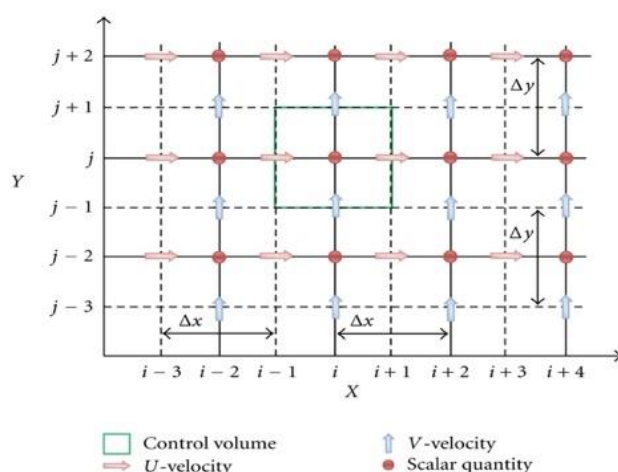
การเลือกใช้วิธีในการแบ่งช่วงเป็นอีกหนึ่งขั้นที่สำคัญในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method) ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ (Finite element method) ระเบียบวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรน (Finite difference method) และระเบียบวิธีอีลีเมนต์ขอบเขต (Boundary element method) ซึ่ง ณ ที่นี้จะขอกกล่าวถึงการแบ่งช่วงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

- ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method)

เป็นระเบียบวิธีที่แบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ (Control volume) ดังรูปที่ 2.11 จากนั้นจึงใช้วิธีการอินทิเกรต สมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณเมื่อมีการไหลของของไหล คือ ของไหลไหลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุม ที่เกิดการแพร่ (Diffusion) ซึ่งไม่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของตัวกลาง นอกจากนี้มีพจน์ของการพา (Convection) ซึ่งจะมีเมื่อมีตัวกลางในการเคลื่อนที่ [30] โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad 2.15$$

โดย ϕ คือ การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั่วไปตามเวลา เช่น อุณหภูมิ เอนทัลปี และความเข้มข้น เป็นต้น เมื่อพิจารณาฝั่งซ้ายมือของสมการ พจน์แรกแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นต่อเวลา และพจน์ที่สองแสดงถึงการพา ขณะที่ฝั่งขวามือของสมการ พจน์แรกจะเป็นพจน์ของการแพร่ และพจน์ที่สองแสดงถึงปริมาณที่ได้มาจากแหล่งอื่น (Source term) จากนั้นทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.15 บนปริมาตรควบคุม เพื่อแก้ปัญหาที่สนใจต่อไป [30]



รูปที่ 2.11 การใช้ระเบียบวิธีที่แบ่งขอบเขตของปัญหาออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ [31]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Liu และคณะ [32] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยท่อนาโนคาร์บอนที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธีอิมเพรกเนชันด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง โดยการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและการคายซับจะศึกษาจากแบบจำลองทั้งหมด 4 แบบจำลอง ได้แก่ Pseudo-first order Pseudo-second order Avrami's fractional-order และ Fractional-order จากการศึกษาพบว่าแบบจำลอง Avrami's fractional-order เหมาะสมที่จะใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของการศึกษานี้ นอกจากนี้ พลังงานก่อกัมมันต์ของการดูดซับและการคายซับสามารถคำนวณได้จากสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) จากการคำนวณพบว่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการดูดซับลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งหมายถึง เมื่อเพิ่มความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้น

Kongkitisupchai และคณะ [7] ศึกษาการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการลดความดันของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต ซึ่งวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อแสดงระบบดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของของแข็งโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาช่วยในการคำนวณ ระบบที่ศึกษาประกอบด้วย หอดูดซับและหอคายซับแบบฟลูอิดไคต์เบต ซึ่งการจำลองใช้แบบจำลองออยเลอร์ (Euler model) ช่วยวิเคราะห์ฝั่งดูดซับและฝั่งคายซับ จากการศึกษาพบว่า ร้อยละ 60 ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นที่ส่วนบนของหอดูดซับที่สูง 7 เมตร นอกจากนี้ ยังพบว่า การเลือกใช้การป้อนเข้าหลายทางของหอดูดซับและตัวดูดซับที่มีขนาดใหญ่ จะช่วยกำจัดการไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annular flow) ทำให้ความสูงของหอดูดซับลดลงได้ อย่างไรก็ตาม การไหลแบบแกนใน-วงนอกที่เกิดขึ้นในฝั่งคายซับไม่ส่งผลกระทบต่อเชิงลบกับการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แต่ช่วยเพิ่มเวลาในการเกิดการคายซับ

Verougstraete และคณะ [33] ศึกษาการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบสลับอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption) โดยใช้คาร์บอนมอนอไลต์เป็นตัวดูดซับ ซึ่งศึกษาผลของเวลาในการคายซับ ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในระบบ และวิธีการคายซับซึ่งใช้ความร้อนจากไอน้ำ จากการศึกษาพบว่า เวลาที่ควรใช้ในการคายซับของตัวดูดซับต้องมากกว่า 15 วินาที จึงจะคายซับหมด ขณะที่ผลของปริมาณไอน้ำ พบว่า ปริมาณไอน้ำในระบบไม่ได้ส่งผลกระทบต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่หากมีปริมาณไอน้ำสูงจำเป็นต้องใช้เวลาในการคายซับมากขึ้น ดังนั้น จึงสามารถใช้ไอน้ำมาช่วยในการคายซับได้ เนื่องจากการแยกไอน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ทำได้ง่ายและสูญเสียพลังงานน้อย แต่วิธีนี้จำเป็นต้องมีขั้นตอนการอบแห้งหลังการคายซับเพื่อให้ไอน้ำเกิดการควบแน่น โดยหากใช้แก๊สร้อนในการอบแห้งตัวดูดซับก่อนเริ่มการดูดซับจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของระบบและลดเวลาในการคายซับได้

Dietrich และคณะ [15] ศึกษาการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบสลับอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคต์เบต โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิในการดูดซับ ความเร็วของแก๊สป้อนเข้า และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สป้อนเข้า จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับจะทำให้พลศาสตร์ของตัวดูดซับลดลงและลดพลังงานที่ใช้ในการคายซับ ขณะที่เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สป้อนเข้าส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการระบายความร้อนของระบบลดลง และเมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สป้อนเข้าเป็น 0.87 เมตรต่อวินาที จะได้ค่าอัตราส่วน Turndown เท่ากับ

2.7 อย่างไรก็ตาม หากเพิ่มความเร็วของแก๊สป้อนเข้าเกิน 0.69 เมตรต่อวินาที จะส่งผลให้พลศาสตร์ของตัวดูดซับลดลง เนื่องจากเกิดฟองอากาศขนาดใหญ่ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สป้อนเข้า พบว่า เมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราในการดูดซับและพลศาสตร์ของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่มความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเข้าเท่ากับร้อยละ 12 โดยปริมาตรจะได้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 64 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อวัน

Dhoke และคณะ [34] ศึกษาการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบสลับอุณหภูมิและความดันในระบบ Swing adsorption reactor cluster (SARC) โดยมีวัตถุประสงค์ คือเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ตัวดูดซับที่ศึกษาทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ พอลิเอทิลีน พอลิเอทิลีนอิมินบนซิลิกา โพลีสเตียมบนเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ และโซเดียมบนเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ จากการทดลองพบว่า การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของพอลิเอทิลีนทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพมากกว่าของโพลีสเตียมบนเซอร์โคเนียมไดออกไซด์และโซเดียมบนเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ เนื่องจากตัวดูดซับพอลิเอทิลีนมีช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ-คายซับที่แคบ ส่งผลให้ในกระบวนการนี้ ตัวดูดซับพอลิเอทิลีนมีประสิทธิภาพของการดูดซับและคายซับที่สูงกว่า นอกจากนี้ ผลของการป้อนเข้าร่วมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำไม่ส่งผลต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

Qasem และคณะ [35] ศึกษาการจำลองกระบวนการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบสลับความดันของตัวดูดซับของแข็ง Mg-MOF-74 ซึ่งแก๊สป้อนเข้าเป็นแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน โดยการจำลองกระบวนการจะใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสองมิติและสามมิติ การตรวจสอบรูปแบบของการจำลองกระบวนการคายซับทำโดยใช้ข้อมูลจากการทดลองจริง จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองสองมิติและสามมิติให้ผลที่ใกล้เคียงกันแต่แบบจำลองสองมิติเหมาะสมในการทำนายมากกว่า เนื่องจากสอดคล้องกับโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์จริง จากการศึกษา ได้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ร้อยละ 98.3 ร้อยละการนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนเท่ากับ 95.7 และอัตราการไหลเชิงมวลของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.731 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อชั่วโมง เป็นภาวะที่เหมาะสมในการคายซับ

คาร์บอนไดออกไซด์ของของแข็ง Mg-MOF-74 ซึ่งพลังงานที่ใช้ในภาวะนี้เท่ากับ 63.89 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตันคาร์บอนไดออกไซด์

Shen และคณะ [36] ศึกษาการจำลองกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนต/อะลูมินาเป็นตัวดูดซับด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ระบบดูดซับเป็นระบบฟลูอิดไชน์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized-bed carbonator) และระบบคายซับเป็นระบบฟลูอิดไชน์เบดแบบขนส่งด้วยลม (Pneumatic transport fluidized-bed regenerator) สำหรับการจำลองกระบวนการใช้แบบจำลองสองมิติออยเลอร์-ออยเลอร์ (Two-dimensional Eulerian-Eulerian model) ในการจำลอง และตรวจสอบโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง เมื่อทำการเปรียบเทียบผลจากการจำลองและผลจากการทดลอง พบว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง และจากการศึกษาพบว่า แก๊สเสียที่เข้ามาในระบบจะทำให้อัตราการหมุนเวียนของของแข็งเกิดความแปรปรวนส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง นอกจากนี้ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนเวียนของตัวดูดซับของแข็งและความเข้มข้นไอน้ำในแก๊สเผาไหม้จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น

ในการศึกษาประสิทธิภาพและพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ผลรวมของความดันและอุณหภูมิของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ซึ่งแสดงดังต่อไปนี้

- ศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน และสร้างความสัมพันธ์ทางจลนพลศาสตร์โดยใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order model) แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order model) และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's fractional-order model)
- ศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิต่ออัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน และสร้างความสัมพันธ์ทางจลนพลศาสตร์โดยใช้แบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's fractional-order model)
- พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ และศึกษาประสิทธิภาพการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนโดยใช้ผลรวมของความดันและอุณหภูมิ
- วิเคราะห์พลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับ

3.2 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 สารเคมี

- โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium carbonate, K_2CO_3) น้ำหนักโมเลกุล 138.21 กรัมต่อโมล (AR grade, Sigma-Aldrich)
- แกมมา-อะลูมินา (Gamma-alumina, $\gamma-Al_2O_3$) น้ำหนักโมเลกุล 101.90 กรัมต่อโมล (AR grade, Merck)
- มอนอเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA) น้ำหนักโมเลกุล 138.21 กรัมต่อโมล (AR grade, Sigma-Aldrich)
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
- เมทานอล (Methanol) น้ำหนักโมเลกุล 32.04 กรัมต่อโมล (AR grade, Sigma-Aldrich)
- ไนโตรเจนร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร (ไทย-เจแปน แก๊ส จำกัด)
- คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 ผสมแก๊สไนโตรเจนร้อยละ 88 โดยปริมาตร (ไทย-เจแปน แก๊ส จำกัด)

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมตัวดูดซับของแข็ง

- ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
- บีกเกอร์ (Beaker)
- ปิเปต (Pipette)
- ช้อนตักสาร (Spatula)
- กระดาษชั่งสาร (Weight paper)
- กระดาษกรอง (Filter paper)
- ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
- เครื่องชั่งสาร (Analytical balance)
- เครื่องเขย่า (Shaker)

- ชุดกรองบุชเนอร์ (Buchner funnel filtration) ประกอบด้วยกรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) และขวดบุชเนอร์ (Buchner flask)
- เครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum pump)
- ตู้อบ (Oven)
- โกร่งบดสาร (Mortar and pestle)

3.2.2.2 เซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์

เซนเซอร์วัดคาร์บอนไดออกไซด์ รุ่น K33-BLG ช่วงความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้ ร้อยละ 0-30 โดยปริมาตร

3.2.2.3 ตัวควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส

- ตัวควบคุมอัตราการไหล รุ่น K-1013 ช่วงอัตราการไหล 1-10 ลิตรต่อนาที
- ตัวควบคุมอัตราการไหล รุ่น K-1014 ช่วงอัตราการไหล 2-20 ลิตรต่อนาที

3.2.2.4 ตัวควบคุมตัวควบคุมอุณหภูมิ

ตัวควบคุมอุณหภูมิรุ่น TCL ช่วงอุณหภูมิ 0-300 องศาเซลเซียส

3.2.2.5 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดทำจากแก้วที่สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 650 องศาเซลเซียส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุด 5 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา 2 เซนติเมตร และความสูง 80 เซนติเมตร

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

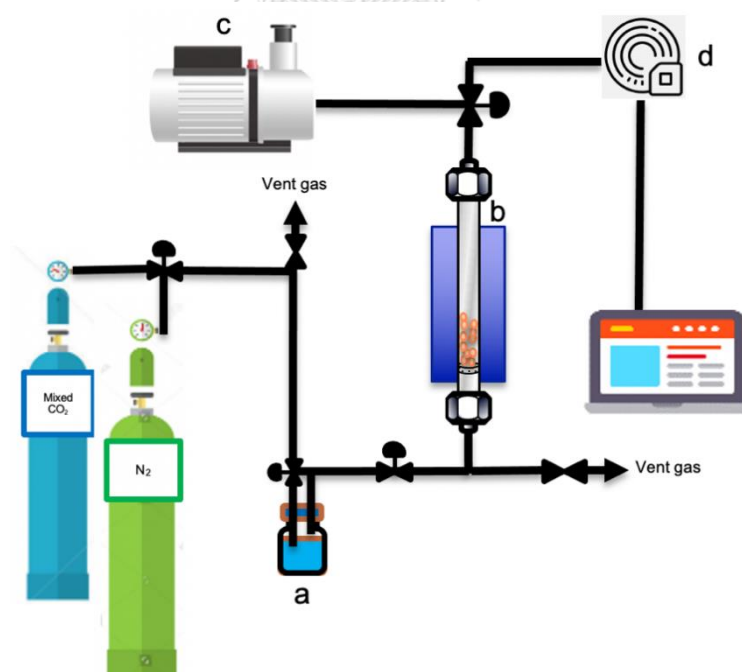
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับของแข็ง

การเตรียมตัวดูดซับของแข็งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีอิมเพรกเนชัน (Impregnation) เนื่องจากเป็นวิธีการที่ดำเนินการได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้การเตรียมตัวดูดซับของแข็งแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การเตรียมตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินา และการเตรียมตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน

- ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินา
 - (1) นำโพแทสเซียมคาร์บอเนต 5 ± 0.01 กรัม และแกมมา-อะลูมินา 5 ± 0.01 กรัม มาละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่
 - (2) นำสารมาเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ระยะเวลา 24 ชั่วโมง
 - (3) นำสารที่ผ่านการเขย่ามากรองโดยใช้การกรองสุญญากาศ
 - (4) นำสารที่ผ่านการกรองมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
 - (5) บดตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กในโถรงบดสาร
- ขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน
 - (1) เตรียมสารละลายมอนอเอทาโนลามีนร้อยละ 15 โดยปริมาตร (มอนอเอทาโนลามีน 15 มิลลิลิตร เมทานอล 47.5 มิลลิลิตร น้ำปราศจากไอออน 47.5 มิลลิลิตร)
 - (2) นำโพแทสเซียมคาร์บอเนต 5 ± 0.01 กรัม และแกมมา-อะลูมินา 5 ± 0.01 กรัม มาละลายด้วยสารละลายมอนอเอทาโนลามีน 25 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่
 - (3) นำสารมาเขย่าโดยใช้เครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 230 รอบต่อนาที ระยะเวลา 24 ชั่วโมง
 - (4) นำสารที่ผ่านการเขย่ามากรองโดยใช้การกรองสุญญากาศ
 - (5) นำสารที่ผ่านการกรองมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
 - (6) บดตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กในโถรงบดสาร

3.3.2 กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

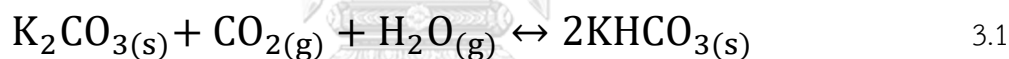
รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแก๊สป้อนเข้า ส่วนคอลัมน์ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และส่วนบันทึกข้อมูล โดยส่วนแก๊สป้อนเข้าจะประกอบด้วย ไนโตรเจนร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร (ดูลด้วยไนโตรเจน) และเครื่องผลิตไอน้ำ ส่วนคอลัมน์ที่ใช้ในการดูดซับ ประกอบด้วย คอลัมน์แก้วที่ใช้ในการดูดซับ เครื่องให้ความร้อนซึ่งมีฉนวนหุ้มเพื่อควบคุมอุณหภูมิในระบบให้คงที่ ตลอดการทดลอง และปั๊มสุญญากาศที่เชื่อมต่อกับคอลัมน์เพื่อดูดอากาศภายในคอลัมน์ และใช้ปรับความดันภายในระบบ ขณะที่ส่วนบันทึกข้อมูลจะเป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับขาออกของคอลัมน์ ซึ่งเป็นส่วนที่วัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาออก นอกจากนี้ ในระบบมีการติดตั้ง วาล์วนิรภัยเพื่อป้องกันการเกิดความดันภายในระบบสูงเกินไป และการควบคุมอัตราการไหลภายในระบบจะถูกควบคุมผ่านโปรแกรมสำเร็จรูปในคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ภายในระบบมีอัตราการไหลคงที่ และแม่นยำในทุก ๆ ชุดการทดลอง



รูปที่ 3.1 กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

(a) เครื่องผลิตไอน้ำ (b) คอลัมน์ดูดซับ (c) ปั๊มสุญญากาศ และ (d) เซนเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งจะเป็นการดูดซับในระบบปิด ซึ่งเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบปั่นป่วน โดยมีการป้อนไนโตรเจนร้อยละ 99.99 โดยปริมาตร และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร (คูณด้วยแก๊สไนโตรเจน) เข้าในเครื่องปฏิกรณ์ กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งจะเริ่มจากทำความสะอาดระบบด้วยไนโตรเจนเพื่อให้ในระบบไม่มีแก๊สชนิดอื่นเจือปน จากนั้น บรรจุตัวดูดซับ ปริมาณ 5 กรัมลงในคอลัมน์ และทำการดูดอากาศภายในคอลัมน์ออกโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีน้ำเป็นหนึ่งในสารตั้งต้น ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.1 ดังนั้น ก่อนเริ่มการดูดซับจะทำการเตรียมตัวดูดซับภายในคอลัมน์ให้เปียกโดยการป้อนไนโตรเจนเปียกเข้าคอลัมน์ ซึ่งการเตรียมไนโตรเจนเปียกสามารถทำได้โดยป้อนไนโตรเจน เครื่องผลิตไอน้ำ ก่อนเข้าสู่คอลัมน์ หลังจากเตรียมตัวดูดซับให้ชื้นแล้ว ทำการป้อนคาร์บอนไดออกไซด์เปียกเข้าไปยังคอลัมน์ และวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดยเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า แสดงว่าตัวดูดซับอิ่มตัว ไม่สามารถดูดซับได้อีก



เมื่อได้ข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนไปตามเวลาจะถูกนำมาคำนวณหาความสามารถของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.2 และตารางที่ 3.1 แสดงภาวะที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

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

เมื่อ q คือ ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง (มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ)

m คือ มวลของตัวดูดซับ (กรัม)

C_{in}	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
C_{out}	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Q	คือ	อัตราการไหลของแก๊สโดยมวล (กรัมต่อวินาที)
t	คือ	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (วินาที)

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ภาวะที่ใช้ในการทดลอง	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
อัตราการไหลของแก๊ส (ลิตรต่อนาที)	5
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	5
ความดัน (บาร์)	1
ชนิดของตัวดูดซับ	$K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ที่ผ่านการปรับปรุงด้วย MEA
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	40-80

3.3.3 กระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

โดยทั่วไป การเลือกตัวดูดซับเพื่อใช้ในดักจับคาร์บอนไดออกไซด์นิยมเลือกใช้ตัวดูดซับที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เพื่อลดต้นทุนของกระบวนการ รวมถึงลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสียจากกระบวนการ ดังนั้น การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นอีกหนึ่งขั้นตอนที่สำคัญในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการให้ความร้อน และการลดความดันภายในระบบ เนื่องจากสามารถดำเนินการได้ง่าย และให้ประสิทธิภาพในการคายซับสูง

- การคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์โดยการให้ความร้อน
วิธีนี้ได้รับความนิยมในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับการพัฒนาจากกระบวนการดูดซึบแบบสลับอุณหภูมิ โดยการให้ความร้อนกับตัวดูดซึบที่ผ่านการใช้งาน เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน หรือเผาผลิภัณฑ์และสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดูดซึบก่อนจะนำตัวดูดซึบกลับมาใช้ในการดูดซึบอีกครั้ง การคายซึบโดยใช้ความร้อนนี้สามารถกำจัดผลิภัณฑ์และสิ่งเจือปนได้ดี อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีความต้องการในการใช้พลังงานที่มาก เนื่องจากต้องการอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซึบสูง ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซึบจะแตกต่างกันไปตามชนิดตัวดูดซึบ [37]
- การคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์โดยการลดความดัน
วิธีนี้เป็นการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับการพัฒนาจากกระบวนการดูดซึบแบบสลับความดัน โดยทำการลดความดันภายในระบบให้ต่ำกว่าความดันบรรยากาศ เพื่อกำจัดผลิภัณฑ์ หรือสิ่งเจือปนต่าง ๆ เนื่องจากการลดความดันจะทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผลิภัณฑ์ หรือสิ่งเจือปนต่าง ๆ กับพื้นผิวของตัวดูดซึบ นอกจากนี้ เมื่อลดความดันจะทำให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับ ซึ่งมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในผลิภัณฑ์ การคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์โดยการลดความดันจะใช้พลังงานต่ำกว่าการใช้ความร้อน อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการคายซึบวิธีนี้ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า เนื่องจากผลิภัณฑ์บางชนิดมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซึบที่แข็งแรง [37]

ในการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งการให้ความร้อนและการลดความดันในระบบนิยมดำเนินการภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ซึ่งจำเป็นต้องมีกระบวนการแยกไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายหลัง ดังนั้น งานวิจัยนี้เลือกใช้การคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์โดยการให้ความร้อน และลดความดันในระบบ ซึ่งดำเนินการภายใต้บรรยากาศไอน้ำ เนื่องจากการแยกไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์สามารถดำเนินการได้ง่าย [33]

กระบวนการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์ เริ่มจาก ป้อนไนโตรเจนเข้าระบบเพื่อทำความสะอาดระบบ จากนั้น ให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิภายในระบบให้ถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซึบ ซึ่งระหว่างนี้ เปิดเครื่องผลิตไอน้ำเพื่อเตรียมไอน้ำอิมตัว เมื่ออุณหภูมิภายในระบบถึงอุณหภูมิที่ต้องการ บรรจุตัวดูดซึบลงในคอลัมน์ และทำการดูดแก๊สภายในคอลัมน์ ทำการปรับความดันในระบบให้ถึง

ความดันที่ใช้ในการคายซับโดยใช้ป้อนสุญญากาศ จากนั้น เปิดไอน้ำเข้าสู่คอลัมน์ และวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนไปตามเวลา และนำข้อมูลความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปมาคำนวณอัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.3 และภาวะที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังตารางที่ 3.2

$$\text{CO}_2 \text{ desorption rate} = \frac{m_{\text{released CO}_2}}{t} \quad 3.3$$

เมื่อ m คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดการคายซับ (มิลลิกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการคายซับ (นาที)

ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

ภาวะ	การคายซับโดยให้ความร้อน	การคายซับโดยลดความดัน
ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	5	5
ความดัน (บาร์)	1	0.2-0.8
ชนิดของตัวดูดซับ	$\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่ผ่านการ ปรับปรุงด้วย MEA	$\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ที่ผ่านการ ปรับปรุงด้วย MEA
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	100-300	100

3.3.4 เครื่องมือวิเคราะห์

- **เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (N_2 adsorption-desorption technique, BET)**
เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน รุ่น Micromeritics ASAP 2020 จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ใช้วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ
- **เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ (Fourier transform infrared spectrophotometer, FTIR)**
เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ รุ่น PERKIN ELMER Spectrum One จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ใช้วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนตัวดูดซับ
- **เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (Elemental analyzer-CHNS/O)**
เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ รุ่น THERMO FLASH 2000 CHNS/O (THERMO) จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ใช้วิเคราะห์ปริมาณธาตุ C H N และ S ในตัวดูดซับของแข็ง
- **เครื่องวิเคราะห์วัฏภาคผลึกของตัวดูดซับ (X-ray diffraction, XRD)**
เครื่องวิเคราะห์วัฏภาคผลึกของตัวดูดซับ รุ่น Bruker D8 Discover จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ใช้ระบุวัฏภาคของสารในตัวดูดซับของแข็ง

3.3.5 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและการคายซับ

งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และแบบจำลองอาฟราไมเพื่อใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน ขณะที่การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนจะเลือกแบบจำลองอาฟราไมมาใช้ในการอธิบายจลนพลศาสตร์ โดยนำค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งคำนวณจากค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่าง ๆ มาสร้างกราฟเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง การพิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสมกับการดูดซับและคายซับจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2)

- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad 3.4$$

จากสมการที่ 3.4 แสดงสมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k_1) จะสามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ และ t

- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e^2 k_2} + \frac{t}{q_e} \quad 3.5$$

จากสมการที่ 3.5 แสดงสมการของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k_2) จะสามารถหาได้จากจุดตัดแกนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ และ t

- แบบจำลองอาฟรามี

$$\ln(\ln(1 - \frac{q_t}{q_e})) = n_A \ln k_A + n_A \ln t \quad 3.6$$

จากสมการที่ 3.6 แสดงสมการของแบบจำลองอาฟรามี ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k_A) และเลขชี้กำลังอาฟรามี (n_A) จะสามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกนของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\ln(1 - \frac{q_t}{q_e}))$ และ $\ln t$

- แบบจำลองอาฟรามีของการคายซับ

$$\ln(\ln(1 - y)) = n_D \ln k_D + n_D \ln t \quad 3.7$$

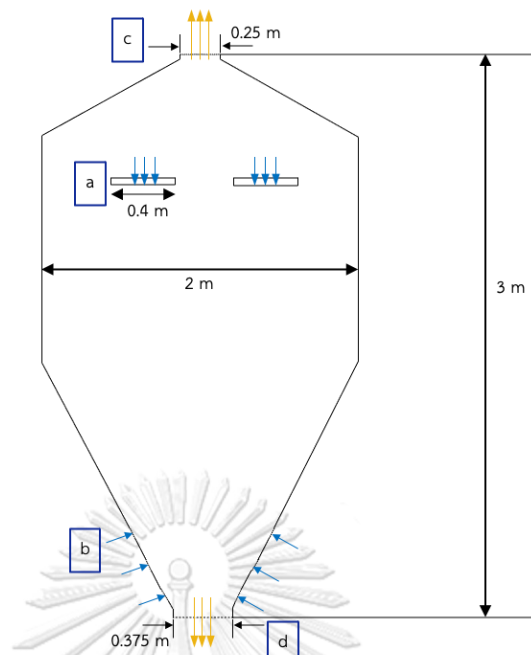
จากสมการที่ 3.7 แสดงสมการของแบบจำลองอาฟรามี่ ในการหาค่าคงที่ของปฏิกิริยา (k_D) และเลขชี้กำลังอาฟรามี่ (n_D) จะสามารถหาได้จากความชันและจุดตัดแกนของ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\ln(1 - y))$ และ $\ln t$

3.4 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับ

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วย สารละลายเอมีนแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ และการศึกษากระบวนการคายซับ คาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ผลรวมของความดันและอุณหภูมิ

3.4.1 การพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ส่วนนี้จะเป็นการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับกระบวนการ คายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งในฟลูอิดิซ์เบดโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent 2020 R2 โดยเริ่มจากการสร้างรูปร่างพื้นที่การไหลสองมิติ ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัย ของ Kongkitisupchai และคณะ [7] โดยใช้โปรแกรม Workbench 2020 R2 จากนั้น แบ่ง โดเมนการคำนวณออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ จำนวน 8,000 เซลล์ รูปที่ 3.2 แสดงรูปร่างพื้นที่ ของไหลสองมิติ โดยมีความกว้าง 2 เมตร และความสูง 3.5 เมตร ซึ่งประกอบด้วย ทางเข้าของ ตัวดูดซับของแข็ง 2 ทาง ทางเข้าของแก๊ส 6 ทาง ทางออกด้านบนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ 1 ทาง และทางออกด้านล่างของตัวดูดซับของแข็ง 1 ทาง



รูปที่ 3.2 โดเมนการคำนวณสองมิติของแบบจำลองการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

(a) ทางเข้าของตัวดูดซับของแข็ง (b) ทางเข้าของแก๊ส

(c) ทางออกด้านบนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ และ (d) ทางออกด้านล่างของตัวดูดซับของแข็ง

หลังจากทำการสร้างพื้นที่การไหลสองมิติ และแบ่งโดเมนในการคำนวณ เพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องแม่นยำ จะทำการตรวจสอบแบบจำลองโดยเทียบกับผลการจำลองกระบวนการคายซับของ Kongkitisupchai และคณะ [7] โดยมีภาวะดำเนินการ และภาวะขอบเขต ดังนี้

- แรงโน้มถ่วง (Gravity force) -9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (ในทิศแกน y)
- อุณหภูมิอ้างอิง (Reference temperature) 298.15 เคลวิน
- ความดันอ้างอิง (Reference pressure) $101,325$ ปาสคาล
- อัตราการป้อนเข้าตัวดูดซับของแข็ง 48 กิโลกรัมต่อวินาที
- สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง (Solid volume fraction) 0.6
- ความดันขาออกของทางออกด้านบน 1000 ปาสคาล

- ความดันขาออกของทางออกด้านล่าง 3000 ปาสคาล
- สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็ง (Restitution coefficient) 0.9
- No slip condition at wall

รูปแบบการจำลอง

- Eulerian-Eulerian approach
- Laminar model
- Maximum packing limit 0.63
- Time step size 0.001

3.4.2 การศึกษากระบวนการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ผลรวมของความดันและอุณหภูมิ

การศึกษาการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซึบของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนโดยใช้ผลรวมของความดันและอุณหภูมิ ร่วมกับแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์ที่คำนวณจากหัวข้อ 3.3.5 และแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต (Dynamics restitution coefficient) จากงานวิจัยของ Gollwitzer และคณะ [38] ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.8

$$e_{wet} = \left(e - \frac{3\rho_f \delta}{2\rho_p d_{pe}} \right) \left(1 - \frac{14}{St} \right) \quad 3.8$$

$$St = \frac{\rho_f d_p U_i}{9\mu_f} \quad 3.9$$

$$U_i = \frac{3}{2} \sqrt{\pi \theta_s} \quad 3.10$$

เมื่อ ρ_f คือ ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
d_p	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับของแข็ง (เมตร)
μ_f	คือ	ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตร•วินาที)
U_i	คือ	ความเร็วเฉลี่ยของการกระแทก (เมตรต่อวินาที)
Θ_s	คือ	อุณหภูมิแกรนูลาร์ (เมตรต่อวินาที) ²
e_{wet}	คือ	สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็งเปียก (-)
e	คือ	สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็ง (-)

ในการศึกษาการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน ตัวแปรที่ใช้ศึกษา ได้แก่ ความดันและอุณหภูมิ โดยกระบวนการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับปรุงที่เลือกศึกษา คือ กระบวนการคายซับที่อุณหภูมิ 100 และ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1000 ปาสคาล และกระบวนการคายซับที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 3500 ปาสคาล ซึ่งใช้สมการทางคณิตศาสตร์ ในหัวข้อ 3.4.2.1 มาช่วยในการศึกษาผลรวมของความดันและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง นอกจากนี้ ในการวิเคราะห์กระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนจะดำเนินภายใต้สมมติฐาน สารละลายเอมีนช่วยปรับปรุงพื้นผิวและเพิ่มการกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวของแกมมา-อะลูมินา [39] โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11 [40]

$$\Gamma_{bw} = k_{bw}\epsilon_s \left(\frac{1}{[CO_2]^{0.15}} \right) \left(\frac{1}{[H_2O]^{0.15}} \right) \quad 3.11$$

เมื่อ Γ_{bw} คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการคายซับ (โมลต่อลูกบาศก์เมตร•วินาที)

k_{bw}	คือ	ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (วินาที) ⁻¹
ϵ_s	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคของแข็ง (-)
$[CO_2]$	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)
$[H_2O]$	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

3.4.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

- สมการอนุรักษ์มวล (Conservation of mass)

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g) = 0 \quad 3.12$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s) = 0 \quad 3.13$$

เมื่อ	ϵ_g	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคแก๊ส (-)
	ρ_g	คือ	ความหนาแน่นของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	ρ_s	คือ	ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	\mathbf{v}_g	คือ	ความเร็วของวัฏภาคแก๊ส (เมตรต่อวินาที)
	\mathbf{v}_s	คือ	ความเร็วของวัฏภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที)
	t	คือ	เวลา (วินาที)

- สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum)

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g \mathbf{v}_g) = -\epsilon_g \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_g + \epsilon_g \rho_g \mathbf{g} - \beta_{gs} (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s) \quad 3.14$$

วิฤภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_s \rho_s v_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s v_s v_s) = -\epsilon_s \nabla p + \nabla \cdot \tau_s + \epsilon_s \rho_s g + \beta_{gs} (v_g - v_s) \quad 3.15$$

เมื่อ	τ_g	คือ	ความเค้นเทนเซอร์ของแก๊ส (ปาสคาล)
	τ_s	คือ	ความเค้นเทนเซอร์ของของแข็ง (ปาสคาล)
	p	คือ	ความดัน (ปาสคาล)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาที ²)
	β_{gs}	คือ	แบบจำลองความต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่าง วิฤภาคแก๊ส-ของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร•วินาที)

- สมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of energy)

วิฤภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_g \rho_g h_g) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g v_g h_g) = -\epsilon_g \frac{\partial p_g}{\partial t} + \tau_g : \nabla v_g + S_g + Q_{gs} \quad 3.16$$

วิฤภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_s \rho_s h_s) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s v_s h_s) = -\epsilon_s \frac{\partial p_s}{\partial t} + \tau_s : \nabla v_s + S_s + Q_{gs} \quad 3.17$$

เมื่อ	h_g	คือ	เอนทัลปีของวิฤภาคแก๊ส (จูลต่อเคลวิน)
	h_s	คือ	เอนทัลปีของวิฤภาคของแข็ง (จูลต่อเคลวิน)
	p_g	คือ	ความดันของวิฤภาคแก๊ส (ปาสคาล)
	p_s	คือ	ความดันของวิฤภาคของแข็ง (ปาสคาล)
	S_g	คือ	ปริมาณความร้อนจากแหล่งอื่น ๆ ในวิฤภาคแก๊ส (จูลต่อลูกบาศก์เมตร•วินาที)

- S_s คือ ปริมาณความร้อนจากแหล่งอื่น ๆ ในวัฏภาคของแข็ง
(จุดต่อลูกบาศก์เมตร•วินาที)
- Q_{gs} คือ ความเข้มข้นในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวัฏภาค
(จุดต่อลูกบาศก์เมตร•วินาที)

- สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวดแกว่ง (Conservation of solid fluctuating energy)

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_s \rho_s \theta) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \theta \mathbf{v}_s) \right] = (-\nabla p_s I + \tau_s) : \nabla \mathbf{v}_s + \nabla \cdot (\kappa_s \nabla \theta_s) - \gamma_s \quad 3.18$$

เมื่อ θ_s คือ พลังงานจลน์เนื่องจากการกวดแกว่งของอนุภาค
(ตารางเมตรต่อวินาที²)

I คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์ (-)

κ_s คือ พลังงานกวดแกว่งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตร•วินาที)

γ_s คือ พลังงานจลน์จากการกวดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชน
แบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตร•วินาที³)

- สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ (Conservation of species)

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_g \rho_g y_i) + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \mathbf{v}_g y_i) = -\nabla \epsilon_g J_i + r \quad 3.19$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_s \rho_s y_i) + \nabla \cdot (\epsilon_s \rho_s \mathbf{v}_s y_i) = -\nabla \epsilon_s J_i + r \quad 3.20$$

เมื่อ y_i	คือ	สัดส่วนโดยโมลขององค์ประกอบ (-)
J_i	คือ	ฟลักซ์การแพร่ขององค์ประกอบ (กิโลกรัมต่อตารางเมตร•วินาที)
r	คือ	อัตราการเกิดปฏิกิริยา (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร•วินาที)

- สมการเพิ่มเติมที่ใช้ในการจำลอง

— ความเค้นเทนเซอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.21-3.22

วัฏภาคแก๊ส

$$\tau_g = \epsilon_g \mu_g (\nabla v_g + (\nabla v_g)^T) - \frac{2}{3} \epsilon_g \mu_g (\nabla \cdot v_g) I \quad 3.21$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\tau_s = \epsilon_s \mu_s (\nabla v_s + (\nabla v_s)^T) - \epsilon_s (\xi_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla \cdot v_s I \quad 3.22$$

เมื่อ μ_g คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้นของวัฏภาคแก๊ส
(กิโลกรัมต่อเมตร•วินาที)

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้นของวัฏภาคของแข็ง
(กิโลกรัมต่อเมตร•วินาที)

ξ_s คือ ความหนืดรวม (กิโลกรัมต่อเมตร•วินาที)

— ความดันของอนุภาค (Solid pressure)

$$p_s = \epsilon_s \rho_s \theta_s [1 + 2g_0 \epsilon_s (1 + e)] \quad 3.23$$

$$g_0 = [1 - (\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{s,max}})^{\frac{1}{3}}]^{-1} \quad 3.24$$

เมื่อ g_0 คือ การกระจายของอนุภาคของแข็งในแนวรัศมี (-)

- ความหนืดแนวเฉือนของวัฏภาคของแข็ง (Solid phase shear viscosity)

$$\mu_s = \frac{10\rho_s d_p \sqrt{\pi\theta_s}}{96g_0 \varepsilon_s (1+e)} \left[1 + \frac{4}{5} g_0 \varepsilon_s (1+e) \right]^2 + \frac{4}{5} \rho_s d_p g_0 \varepsilon_s (1+e) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad 3.25$$

- ความหนืดรวมของวัฏภาคของแข็ง (Solid phase bulk viscosity)

$$\xi_s = \frac{4}{3} \rho_s d_p g_0 \varepsilon_s (1+e) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad 3.26$$

- พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (Conductivity of fluctuating energy)

$$\kappa_s = \frac{150\rho_s d_p \sqrt{\pi\theta_s}}{384g_0 (1+e)} \left[1 + \frac{6}{5} g_0 \varepsilon_s (1+e) \right]^2 + 2\rho_s \varepsilon_s^2 d_p g_0 \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad 3.27$$

- พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Collisional energy dissipation)

$$\gamma_s = \frac{12(1-e^2)g_0}{d_p \sqrt{\pi}} \rho_s \varepsilon_s^2 \theta_s^{\frac{3}{2}} \quad 3.28$$

เมื่อ γ_s คือ พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตร·วินาที³)

- สมการเพิ่มเติมของการจำลองร่วมกับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต

- ความดันของอนุภาค (Solid pressure)

$$p_s = \varepsilon_s \rho_s \theta_s [1 + 2g_0 \varepsilon_s (1 + e_{wet})] \quad 3.29$$

- ความหนืดแนวเฉือนของวัฏภาคของแข็ง (Solid phase shear viscosity)

$$\mu_s = \frac{10\rho_s d_p \sqrt{\pi\theta_s}}{96g_0 \varepsilon_s (1+e_{wet})} \left[1 + \frac{4}{5} g_0 \varepsilon_s (1 + e_{wet}) \right]^2 + \frac{4}{5} \rho_s d_p g_0 \varepsilon_s (e_{wet} - e) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad 3.30$$

— ความหนืดรวมของวัฏภาคของแข็ง (Solid phase bulk viscosity)

$$\xi_s = \frac{4}{3} \rho_s d_p g_0 \varepsilon_s (1 + e_{wet}) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad 3.31$$

— พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (Conductivity of fluctuating energy)

$$\kappa_s = \frac{150\rho_s d_p \sqrt{\pi\theta_s}}{384g_0 (1+e_{wet})} \left[1 + \frac{6}{5} g_0 \varepsilon_s (1 + e_{wet}) \right]^2 + 2\rho_s \varepsilon_s^2 d_p g_0 \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad 3.32$$

— พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Collisional energy dissipation)

$$\gamma_s = \frac{12(1-e^2)g_0}{d_p \sqrt{\pi}} \rho_s \varepsilon_s^2 \theta_s^{\frac{3}{2}} - \frac{12(1-e_{wet}^2)g_0}{d_p \sqrt{\pi}} \rho_s \varepsilon_s^2 \theta_s^{\frac{3}{2}} \quad 3.33$$

3.5 การประเมินพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

พลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.34 ซึ่งเป็นผลรวมของพลังงานที่ใช้เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไปยังอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับ พลังงานที่ใช้ในการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดูดซับ รวมถึงพลังงานที่ใช้ในปั๊มสุญญากาศ [41]

$$H_D = \int_{T_{\text{ambient}}}^{T_D} c_{p,s} m_s dT + Q_D + W_{\text{pump}} \quad 3.34$$

เมื่อ H_D คือ พลังงานที่ใช้ในการคายซับ (จูล)

$c_{p,s}$ คือ ความจุความร้อนของตัวดูดซับแข็ง (จูลต่อกิโลกรัม•เคลวิน)

m_s	คือ	ปริมาณตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัม)
Q_D	คือ	เอนทัลปีของปฏิกิริยาการคายซับ (จูล)
W_{pump}	คือ	พลังงานที่ใช้ของปั๊ม (จูล)
T_D	คือ	อุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับ (เคลวิน)
T_{ambient}	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (เคลวิน)



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรก คือ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ รวมทั้งการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ ส่วนที่สอง คือ การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ และการหาพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ของการคายซับ ส่วนที่ 3 คือ การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน ส่วนที่ 4 คือ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนโดยใช้ผลร่วมความดันและอุณหภูมิ และส่วนสุดท้าย คือ การประเมินพลังงานของกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

4.1 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

4.1.1 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทาโนลามีน พบว่า ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทาโนลามีน [42]

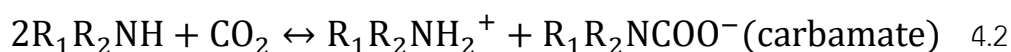
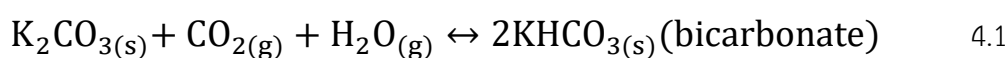
ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินา (Conventional solid sorbent, $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) และตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทาโนลามีนที่มีความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยปริมาตร (Modified solid sorbent, modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) เพื่อเป็นสารตั้งต้นสำหรับการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ ยังศึกษาความสามารถในการดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของตัวดูดซับของแข็ง

โพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีน ซึ่งความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะคำนวณจากสมการที่ 3.2 โดยจะบันทึกค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนไปตามเวลา จนกระทั่งค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับขาเข้า (ร้อยละ 12 โดยปริมาตร)

ตารางที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ

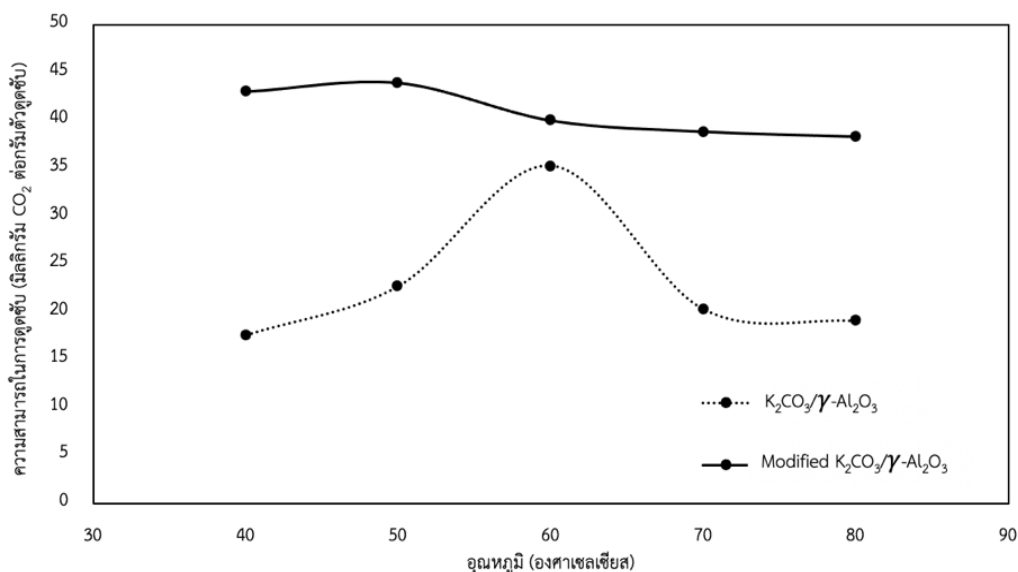
ตัวดูดซับของแข็ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม CO ₂ ต่อกรัมตัวดูดซับ)
K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃	40	17.61
	50	22.71
	60	35.25
	70	20.29
	80	19.06
Modified K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃	40	43.01
	50	43.92
	60	39.98
	70	38.82
	80	38.30

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง ในภาวะคาร์บอนไดออกไซด์เปียกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 12 โดยปริมาตร (คลดด้วยไนโตรเจน) ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่มีการไหลแบบปั่นป่วน พบว่า ที่อุณหภูมิเดียวกัน ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีนมีค่าสูงกว่าตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ซึ่งคาดว่า การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะเกิดขึ้นทั้งจากปฏิกิริยาการดูดซับของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและจากปฏิกิริยาการดูดซับของมอนอเอทานอลามีน แสดงดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 โดยความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุดและต่ำสุดของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 50 และ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 43.92 และ 38.30 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ขณะที่ความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุดและต่ำสุดของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 60 และ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 35.25 และ 17.61 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ และจากข้อมูลข้างต้นพบว่า ค่าต่ำสุดของความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง (38.30 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ) มีค่ามากกว่าค่าสูงสุดของความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง (35.25 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ) จึงสามารถสรุปได้ว่า การปรับปรุงตัวดูดซับของแข็งด้วยสารละลายเอมีนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์



ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีน แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยศึกษาอุณหภูมิในช่วง 40 ถึง 80 องศาเซลเซียส พบว่า

ในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีนจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 50 องศาเซลเซียส เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงไปถึงจุด ๆ หนึ่ง ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง ซึ่งสามารถอธิบายผ่านทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ เนื่องจากปฏิกิริยาดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาผันกลับที่อุณหภูมิสูง โดยความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะลดลงในช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 80 องศาเซลเซียส ขณะที่ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะลดลงในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 80 องศาเซลเซียส จากข้อมูลข้างต้นพบว่า การลดลงของความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง เนื่องจากการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของสารละลายมอนอเอทานอลามีนจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส [43] และเมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงกับงานวิจัยของ Castellazzi และคณะ [44] พบว่า ที่อุณหภูมิในการดูดซับเดียวกัน ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนมีความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าตัวดูดซับของแข็งแกมมา-อะลูมินาที่ผ่านการอิมเพกเนชันด้วยสารละลายเอมีน



รูปที่ 4.1 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.1.2 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

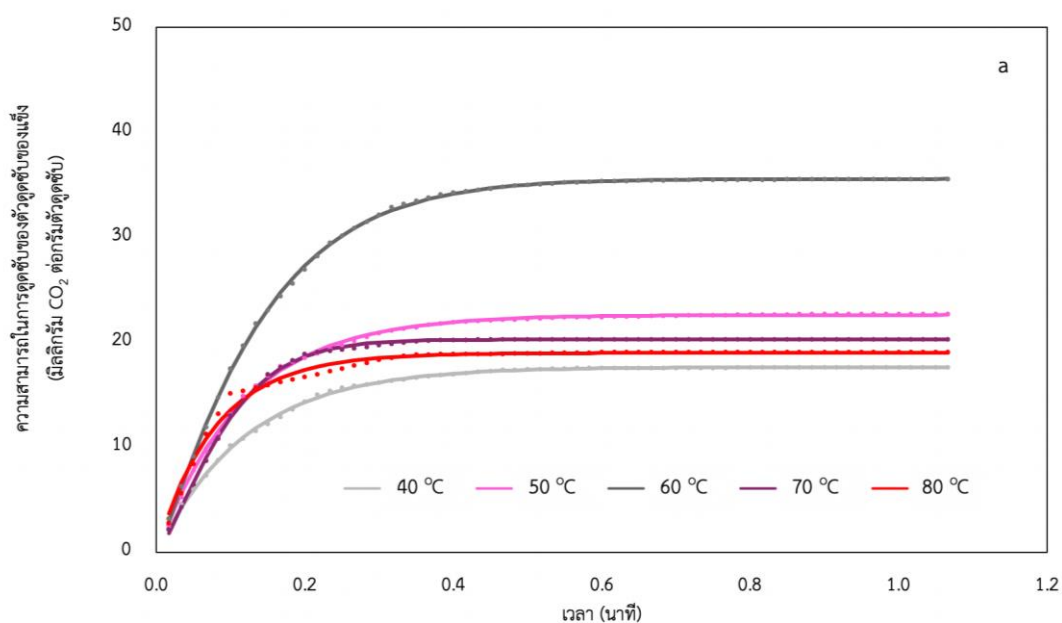
ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชด์เบด เพื่อใช้ในการอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยา ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการดูดซับ รวมถึงกลไกในการเกิดการดูดซับ อันจะเป็นประโยชน์ในการประยุกต์ในการออกแบบต่อไป ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order model) แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Pseudo-second order model) และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's fractional-order model) ซึ่งจะนำข้อมูลความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนไปตามเวลา มาสร้างกราฟตามสมการที่ 3.4 ถึง 3.6 เพื่อหาพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ และการพิจารณาแบบจำลองที่เหมาะสมกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งจะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับของทั้ง 3 แบบจำลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ

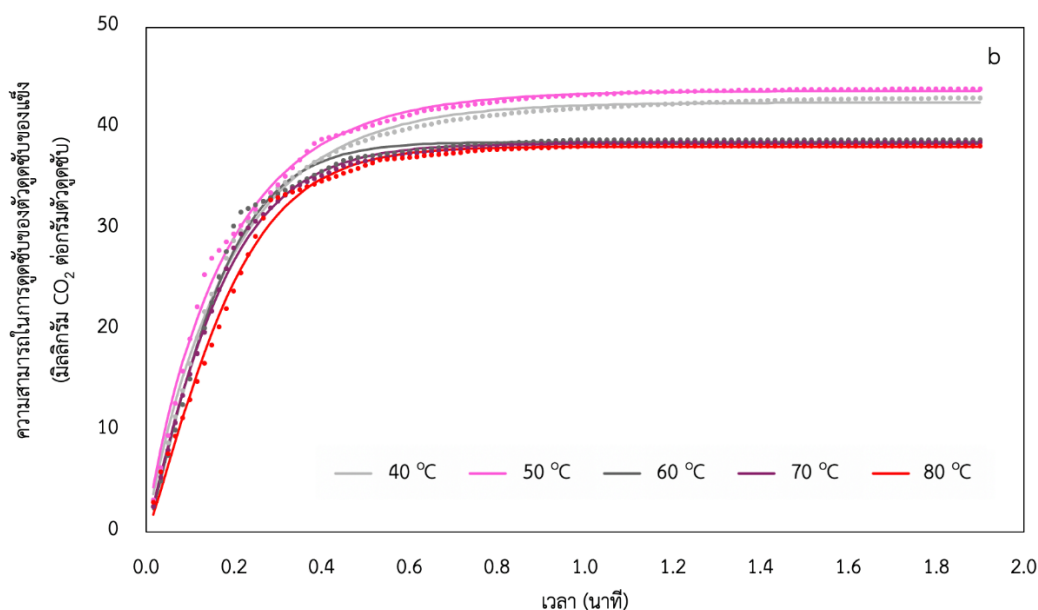
ตัวดูดซับ ของแข็ง	อุณหภูมิ (°C)	แบบจำลองปฏิกิริยา อันดับหนึ่งเทียม		แบบจำลองปฏิกิริยา อันดับสองเทียม		แบบจำลองอาฟรามี		
		k_1	R^2	k_2	R^2	k_A	n_A	R^2
K ₂ CO ₃ / γ-Al ₂ O ₃	40	7.7324	0.9786	0.0777	0.9785	8.2767	1.0054	0.9990
	50	7.7641	0.9825	0.0835	0.9923	8.6348	1.0121	0.9986
	60	9.0038	0.9875	0.0865	0.9599	9.5697	1.1396	0.9997
	70	12.4203	0.9653	0.1066	0.9181	10.0326	1.3296	0.9989
	80	12.6025	0.9712	0.1179	0.9929	12.5686	0.9824	0.9858
Modified K ₂ CO ₃ / γ-Al ₂ O ₃	40	3.5640	0.9500	0.0193	0.8301	5.2243	0.9753	0.9968
	50	4.5964	0.9604	0.0205	0.8631	5.5425	0.9356	0.9960
	60	5.2244	0.9654	0.0194	0.8113	6.1042	1.2256	0.9939
	70	5.5441	0.9736	0.0178	0.7762	6.3604	1.1366	0.9981
	80	5.6363	0.9717	0.0179	0.7990	6.5814	1.2460	0.9954

พารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์จากตารางที่ 4.2 ประกอบด้วย ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (k_1 , นาที⁻¹) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (k_2 , (มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ•นาที)⁻¹) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองอาฟรามี (k_A , นาที⁻¹) และค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจของแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองอาฟรามีของการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียมมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจต่ำลงมา ตามลำดับ กล่าวคือ ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองอาฟรามี

มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากที่สุด ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 ดังนั้น จึงสามารถใช้แบบจำลอง ออฟรามีมาใช้เพื่ออธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่าน กระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอโนเอทาโนลามีนได้ นอกจากนี้ พบว่า ค่าคงที่อัตราการ เกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองออฟรามีของการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่าน กระบวนการปรับปรุงเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วย เพิ่มอัตราการปฏิกิริยา [29] นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลอง ออฟรามี จะพบว่า ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองออฟรามีในการดูดซับของตัวดูดซับ ของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าในตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง เป็นผลอันเนื่องมาจาก ปฏิกิริยาการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงใช้เวลาใน การดูดซับน้อยกว่าเพราะมีความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าปฏิกิริยาการดูดซับของ ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2(a) และรูปที่ 4.2(b)



รูปที่ 4.2(a) ความสามารถการดูดซับที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณจาก แบบจำลองออฟรามีของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิต่าง ๆ (จุด คือ ผลจากการทดลอง เส้น คือ ผลจากการคำนวณ)



รูปที่ 4.2(b) ความสามารถในการดูดซับที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณ จากแบบจำลองอาฟรามิซของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิต่าง ๆ (จุด คือ ผลจากการทดลอง เส้น คือ ผลจากการคำนวณ)

4.2 การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [37] พบว่า ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง สามารถใช้การให้ความร้อน และการลดความดัน โดยดำเนินการภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน อย่างไรก็ตาม การดำเนินการของกระบวนการคายซับภายใต้ไนโตรเจนจำเป็นต้องมีส่วนที่ใช้สำหรับ แยกคาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจน ส่งผลให้ต้นทุนของกระบวนการนี้เพิ่มสูงขึ้น Verougstraete และคณะ [33] จึงได้ศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้บรรยากาศไอน้ำ ซึ่งพบว่า สามารถคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้บรรยากาศไอน้ำได้ เนื่องจากปริมาณไอน้ำไม่ได้ส่งผล กระทบต่อการคายซับมากนัก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้บรรยากาศไอน้ำของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและ ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีนโดยใช้ความร้อนและการลดความดัน

4.2.1 ความสามารถในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโดยใช้ความร้อน

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่อเวลาในกระบวนการคายซับของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทาโนลามีนที่อุณหภูมิในการคายซับต่าง ๆ (100 150 200 250 และ 300 องศาเซลเซียส) ความดัน 1 บาร์ และอัตราการไหลของแก๊ส 0.05 ลิตรต่อนาที โดยการคำนวณปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่อเวลาจะคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 ซึ่งจะบันทึกค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไป จนกระทั่งค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกคงที่

ตารางที่ 4.3 อัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ และความดัน 1 บาร์

ตัวดูดซับของแข็ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการคายซับ (มิลลิกรัม CO ₂ ต่อนาที)
K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃	100	1.54
	150	8.95
	200	12.55
	250	22.45
	300	29.74

ตารางที่ 4.3 อัตราการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซึบของแข็งที่อุณหภูมิต่าง ๆ และความดัน 1 บาร์ (ต่อ)

ตัวดูดซึบของแข็ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการคายซึบ (มิลลิกรัม CO ₂ ต่อนาที)
Modified K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃	100	2.97
	150	18.95
	200	57.00
	250	30.36
	300	45.56

จากตารางที่ 4.3 พบว่า อัตราการคายซึบของตัวดูดซึบของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มอัตราในการเกิดปฏิกิริยาของการเปลี่ยนแปลงของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต (Potassium bicarbonate, KHCO_3) ไปเป็นสารตั้งต้นโพแทสเซียมคาร์บอเนตคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิยังช่วยในการกำจัดน้ำ สารผลึกภัณฑ์ และสิ่งเจือปนต่าง ๆ ที่อยู่ภายในรูพรุนให้ออกจากรูพรุนได้ง่ายขึ้น [45] ซึ่งอัตราการคายซึบที่สูงที่สุดและต่ำที่สุดในการคายซึบของตัวดูดซึบของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 29.74 และ 1.54 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที ที่อุณหภูมิ 300 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขณะที่ตัวดูดซึบของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีอัตราการคายซึบสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 57.00 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที และมีอัตราการคายซึบที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 2.97 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาอัตราการคายซึบของตัวดูดซึบของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะพบว่า ในช่วงอุณหภูมิคายซึบ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส อัตราการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิคายซึบสูงเกิน 200 องศาเซลเซียส อัตราการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง เนื่องจากในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการสลายตัวของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต และคาร์บาเมต (Carbamate, $\text{R}_1\text{R}_2\text{NCOO}^-$) อีกทั้ง เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 200 องศาเซลเซียส

คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการสลายตัวของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตเพียงอย่างเดียว เพราะมอนอเอทานอลามีนจะเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส [46]

4.2.2 ความสามารถในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโดยใช้การลดความดัน

การศึกษาผลของความดันที่มีต่อกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีน ในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาความดันที่ใช้ในช่วง 0.2 ถึง 0.8 บาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊ส 0.02 ลิตรต่อนาที ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ความดันต่าง ๆ

ตารางที่ 4.4 อัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ความดันต่าง ๆ และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ตัวดูดซับของแข็ง	ความดัน (บาร์)	อัตราการคายซับ (มิลลิกรัม CO ₂ ต่อนาที)
K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃	0.2	1.94
	0.4	1.66
	0.6	0.42
	0.8	0.35
Modified K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃	0.2	2.21
	0.4	2.05
	0.6	0.53
	0.8	0.52

จากตารางที่ 4.4 พบว่า การลดความดันที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์จะส่งผลให้อัตราการคายซับของตัวดูดซับของแข็งทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการลดความดันจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกรูพรุน ซึ่งภายในรูพรุนมีความดันสูงกว่าภายนอกรูพรุน ส่งผลให้เกิดการปล่อยแก๊สบางส่วนที่อยู่ในรูพรุนออกจากรูพรุน นอกจากนี้ การลดความดันช่วยให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ เพื่อเพิ่มโมลของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ และทำให้โพแทสเซียมไบคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เปลี่ยนกลับไปเป็นสารตั้งต้นโพแทสเซียมคาร์บอเนต [47] โดยอัตราการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสูงสุดเมื่อคายซับที่ความดัน 0.2 บาร์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.21 และ 1.94 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาทิตามลำดับ จากผลการทดลองจะพบว่า อัตราการคายซับของตัวดูดซับของแข็งทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งอธิบายได้ด้วยอันตรกิริยา (Interaction) ของสารตั้งต้น โดยอันตรกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์จะมีความแข็งแรงกว่าอันตรกิริยาระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนตและคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลข้างต้นพบว่า การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ความดันมีประสิทธิภาพในการคายซับไม่สูงมากเมื่อเทียบกับการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้อุณหภูมิในหัวข้อ 4.2.1 ดังนั้น การใช้ผลรวมของทั้งความดันและอุณหภูมิในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการคายซับที่สูง และใช้พลังงานในการคายซับต่ำ จึงเป็นสิ่งที่ควรพิจารณา

4.2.3 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้แบบจำลองอาฟรามีเพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากแบบจำลองอาฟรามีสามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนวัฏภาค และการเติบโตของผลึกได้ [29] ซึ่งในปฏิกิริยาการคายซับนี้จะเกี่ยวข้องกับการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับ ดังนั้น ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการคายซับภายใต้บรรยากาศไอน้ำโดยใช้อุณหภูมิและความดันของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดของงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองอาฟรามี ซึ่งจะนำข้อมูลความสามารถในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนไปตามเวลาสร้างกราฟตามสมการที่ 3.7 เพื่อหาพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์ของแบบจำลองอาฟรามี ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ของ

แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ และความดัน 1 บาร์ และตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับที่ความดันต่าง ๆ และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

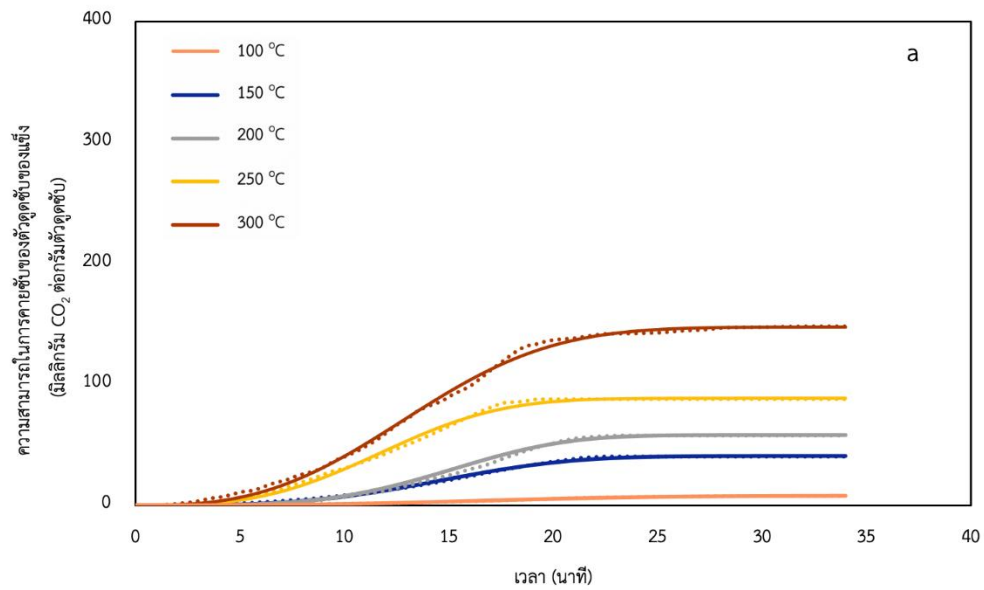
ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ และความดัน 1 บาร์

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃			Modified K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃		
	k _A (นาที) ⁻¹	n _A (-)	R ²	k _A (นาที) ⁻¹	n _A (-)	R ²
100	0.0544	2.0064	0.9767	0.0406	3.2666	0.9294
150	0.0609	2.7019	0.9674	0.0569	3.8385	0.9748
200	0.0622	2.8836	0.9617	0.0573	3.8281	0.9988
250	0.0714	2.2735	0.9624	0.0593	3.4839	0.9493
300	0.0754	2.6311	0.9763	0.0650	3.3982	0.9763

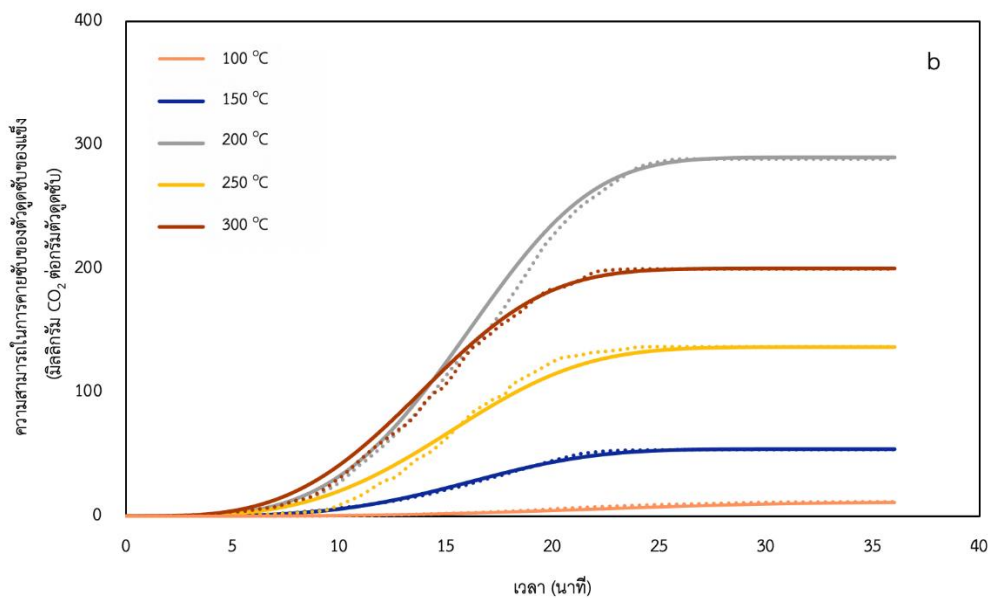
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับที่ความดันต่าง ๆ และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ความดัน (บาร์)	K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃			Modified K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃		
	k _A (นาที) ⁻¹	n _A (-)	R ²	k _A (นาที) ⁻¹	n _A (-)	R ²
0.2	0.1124	2.0538	0.9231	0.1250	2.1828	0.9881
0.4	0.0721	3.2451	0.9640	0.0714	2.4393	0.9883
0.6	0.0677	3.0935	0.9495	0.0656	2.5694	0.9758
0.8	0.0666	2.9821	0.9691	0.0653	2.6732	0.9699

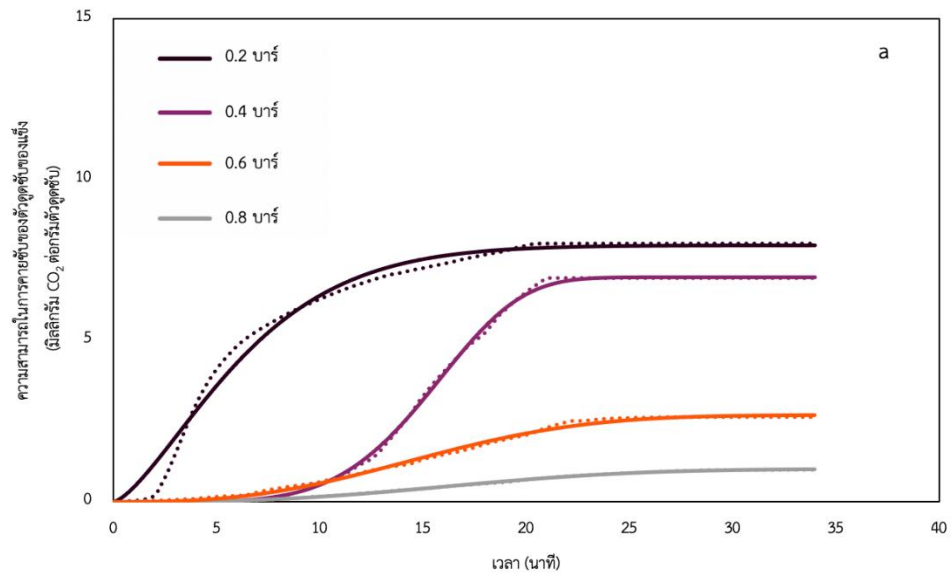
จากตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการคายซัของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสามารถใช้แบบจำลองอาฟรามิในการอธิบายอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 1 นอกจากนี้พบว่า ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองอาฟรามิของการคายซัเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการคายซัเพิ่มขึ้นและความดันที่ใช้ในการคายซัลดลง รูปที่ 4.3 ถึง 4.4 แสดงความสามารถในการคายซัที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองอาฟรามิของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ เมื่อพิจารณา รูปที่ 4.3(a) และรูปที่ 4.3(b) พบว่า กระบวนการคายซัคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้อุณหภูมิของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงเกิดขึ้นเร็วกว่าและมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการคายซัต่ำกว่ากระบวนการคายซัคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ทำให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองอาฟรามิของการคายซัของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ขณะที่กระบวนการคายซัคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ความดันของตัวดูดซับที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงใช้เวลาใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4.4(a) และรูปที่ 4.4(b)) ส่งผลให้ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแบบจำลองอาฟรามิของการคายซัในตารางที่ 4.6 มีค่าใกล้เคียงกัน



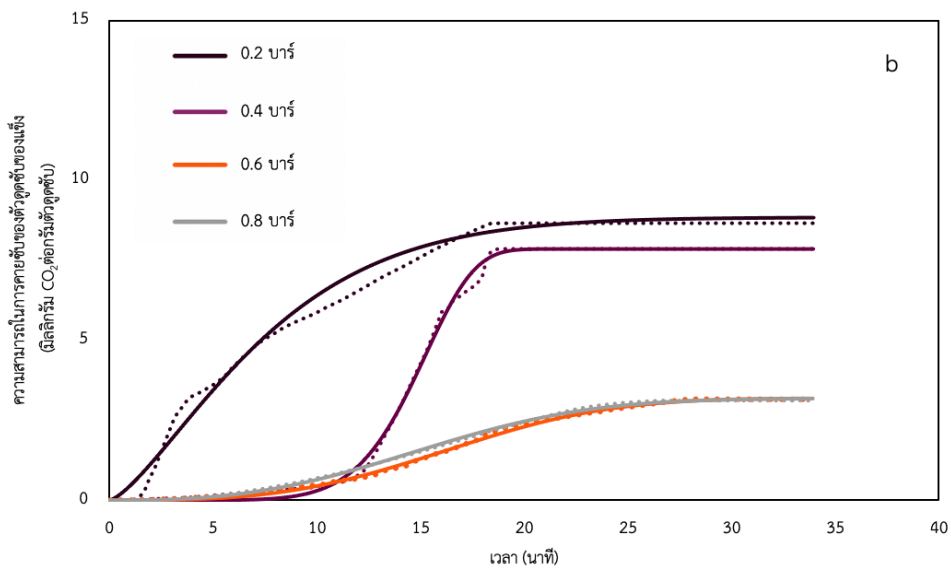
รูปที่ 4.3(a) ความสามารถในการคายซับที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลอง ออฟรามิของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิต่าง ๆ และความดัน 1 บาร์ (จุด คือ ผลจากการทดลอง เส้น คือ ผลจากการคำนวณ)



รูปที่ 4.3(b) ความสามารถในการคายซับที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลอง ออฟรามิของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิต่าง ๆ และความดัน 1 บาร์ (จุด คือ ผลจากการทดลอง เส้น คือ ผลจากการคำนวณ)



รูปที่ 4.4(a) ความสามารถการคายซึบที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลอง
 อพราณีของตัวดูดซึบของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ความดันต่าง ๆ และ
 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (จุด คือ ผลจากการทดลอง เส้น คือ ผลจากการคำนวณ)



รูปที่ 4.4(b) ความสามารถในการคายซึบที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลอง
 อพราณีของตัวดูดซึบของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ความดันต่าง ๆ และ
 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (จุด คือ ผลจากการทดลอง เส้น คือ ผลจากการคำนวณ)

4.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวดูดซับ (Characterization of sorbents)

4.3.1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับเชิงกายภาพของไนโตรเจน (N_2 adsorption-desorption technique)

ตารางที่ 4.7 สมบัติทางกายภาพของตัวดูดซับของแข็ง

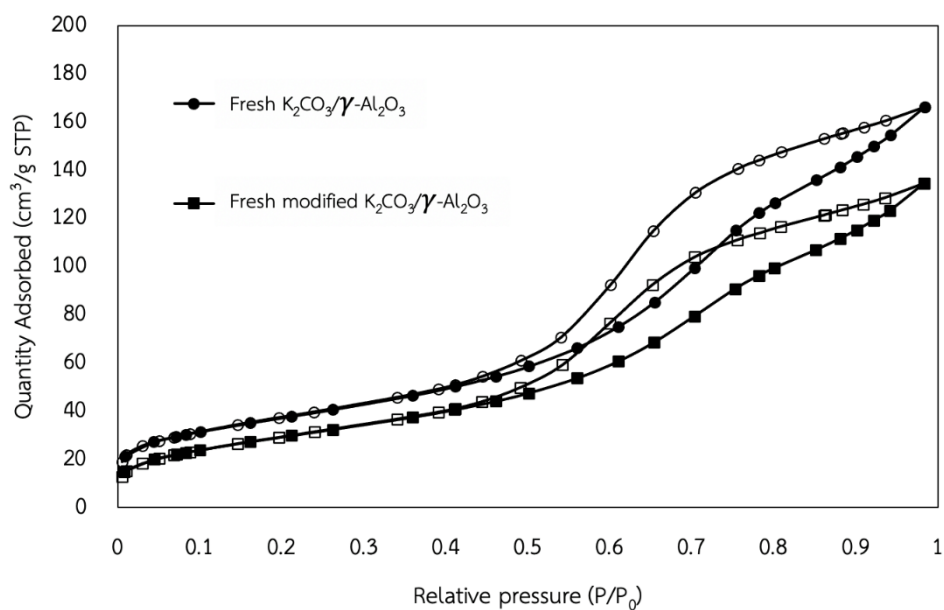
ตัวดูดซับของแข็ง	S_{bet}^a (ตารางเมตรต่อกรัม)	V_t^b (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	D_p^c (นาโนเมตร)
K_2CO_3	2.5	0.0010	2.00
$\gamma-Al_2O_3$	122.25	0.2250	7.40
Fresh $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$	114.78	0.0007	7.63
Fresh modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$	109.7	0.0008	7.58

^a BET surface area, ^b Total pore volume และ ^c Pore diameter คำนวณจากวิธีการ BJH

เทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนใช้หลักการดูดซับและคายซับไนโตรเจน (N_2 physisorption) บนพื้นผิวและภายในรูพรุนของสารตัวอย่าง ซึ่งขั้นแรกจะทำการดึงแก๊สออกจากสารตัวอย่าง จากนั้นทำการป้อนไนโตรเจนเข้าไปเพื่อเกิดการดูดซับ โดยภาวะที่เหมาะสมในการป้อนไนโตรเจนจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของสารตัวอย่าง จากนั้นทำการลดความดันเพื่อให้เกิดการคายซับ ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกคายซับออกมาจะถูกบันทึกค่าและนำมาวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน รูปที่ 4.5 แสดงไอโซเทอมการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง จากรูปที่ 4.5 พบว่า ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีรูปแบบไอโซเทอมดูดซับประเภท IV ตามการแบ่งประเภทไอโซเทอมของ International Union of Pure and Applied Chemist (IUPAC) ซึ่งแสดงถึงลักษณะการเกิดฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) ของรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) โดยมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร เมื่อพิจารณาวงฮิสเทอรีซิสที่เกิดขึ้น จะพบว่า วงฮิสเทอรีซิสเป็น

ประเภท H3 ของการจำแนกโดย IUPAC ซึ่งแสดงถึงรูพรุนที่มีลักษณะเหมือนร่องเป็นแนวยาว (Slit-shaped pores) [48]

จากตารางที่ 4.7 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของโพแทสเซียมคาร์บอเนต ตัวรองรับแกมมา-อะลูมินา ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (Fresh $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) และตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (Fresh modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) พบว่า โพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นโลหะกัมมันต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 2.5 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.001 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 2.00 นาโนเมตร ขณะที่ตัวรองรับแกมมา-อะลูมินามีพื้นที่ผิวจำเพาะ 122.25 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.225 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และขนาดรูพรุน 7.40 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่า ตัวรองรับแกมมา-อะลูมินามีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าโพแทสเซียมคาร์บอเนตมาก เมื่อพิจารณาตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการเตรียมด้วยวิธีอิมเพรกเนชันจะพบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวรองรับแกมมา-อะลูมินา เนื่องจากการฝังตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมา-อะลูมินา และเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนต (Interparticle void) และรวมตัวกันเป็นก้อน (Agglomeration) บนพื้นผิวของตัวรองรับ [49] อย่างไรก็ตาม ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการเตรียมด้วยวิธีอิมเพรกเนชันมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่าตัวรองรับแกมมา-อะลูมินา ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่อนุภาคของโลหะกัมมันต์และตัวรองรับเกิดการรวมตัวกันเป็นก้อนและเกิดการสร้างรูพรุนใหม่ โดยจะสังเกตว่า พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวรองรับแกมมา-อะลูมินา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Castellazzi และคณะ [44] ที่ศึกษาการอิมเพรกเนชันสารละลายเอมีนลงบนตัวรองรับแกมมา-อะลูมินา นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงและขนาดรูพรุนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ซึ่งคาดว่า มีการฝังตัวและเกิดการรวมตัวของอนุภาคที่เพิ่มมากขึ้น

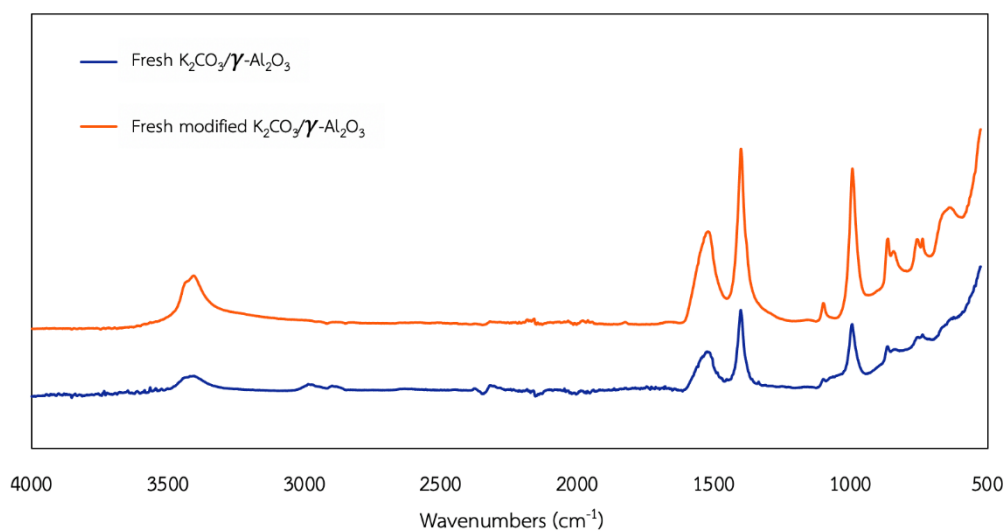


รูปที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับและคายซับไนโตรเจนของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน

4.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับของแข็งด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared (FTIR) Spectroscopy)

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีและหมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการสั่นของโมเลกุลที่เกิดจากการดูดกลืนพลังงานจากรังสีอินฟราเรดในช่วงคลื่นพลังงานที่จำเพาะของแต่ละหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม FTIR ของตัวดูดซับของแข็ง เมื่อพิจารณาสเปกตรัม FTIR ของทั้งตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง จะพบว่า ที่ตำแหน่ง 800 ถึง 500 cm⁻¹ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงพันธะของ Al-O และ Al-OH ของตัวรองรับแกมมา-อะลูมินา ที่ตำแหน่ง 997 cm⁻¹ แสดงถึงการสั่นแบบยืด (Stretching vibration) ของพันธะ C-O/C-N ขณะที่ตำแหน่ง 1526 และ 1404 cm⁻¹ แสดงตำแหน่งของหมู่คาร์บอนेट นอกจากนี้ ที่ตำแหน่ง 1526 และ 1404 cm⁻¹ ก็แสดงถึงพันธะ C-H₂ และ C-N ตามลำดับ ที่ตำแหน่ง 3407 cm⁻¹ แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H ของโมเลกุลน้ำ [43] สำหรับตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง พบว่า แถบแสดงตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชันมีความคล้ายคลึงกับตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงเพียงแต่มี

ความสูงของพีคที่สูงกว่าของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง โดยเฉพาะตำแหน่งในช่วง 1500 ถึง 1000 cm^{-1} โดยความสูงที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถอธิบายได้จาก 2 สาเหตุ คือ การกระจายตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนพื้นผิวของตัวรองรับแกมมา-อะลูมินาเพิ่มมากขึ้น หรือมีหมู่ฟังก์ชันของมอนอเอทานอลามีนซึ่งแสดงที่ตำแหน่งเดียวกันกับหมู่คาร์บอเนตบนพื้นผิวของตัวรองรับแกมมา-อะลูมินา [44]



รูปที่ 4.6 สเปกตรัม FTIR ของตัวดูดซับของแข็ง

4.3.3 การวิเคราะห์หาลองค์ประกอบธาตุของตัวดูดซับด้วย Elemental analyzer-CHNS/O

เครื่องวิเคราะห์หาลองค์ประกอบธาตุ (Elemental analyzer-CHNS/O) เป็นเครื่องที่สามารถวิเคราะห์หาลองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) ในสารตัวอย่าง โดยหลักการทำงาน คือ สารตัวอย่างจะถูกเผาไหม้ภายใต้บรรยากาศของฮีเลียมโดยใช้ออกซิเจนช่วยในการเผาไหม้ ทำให้ได้ไนโตรเจน (N_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไอน้ำ (H_2O) และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) เป็นผลิตภัณฑ์ จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกพาไปยังคอลัมน์เพื่อทำการแยกและตรวจวัด ได้เป็นโครมาโตแกรมของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ โดยผลที่ได้จะแสดงเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องวิเคราะห์หาลองค์ประกอบธาตุเพื่อพิจารณาองค์ประกอบของธาตุในตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีน

ตารางที่ 4.8 สมบัติทางเคมีของตัวดูดซับของแข็ง

ตัวดูดซับของแข็ง	ปริมาณของธาตุในตัวดูดซับ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	C	H	N
Fresh $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$	0.84	0.79	0.39
Fresh modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$	2.02	0.96	0.78
Spent modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ desorption at 200 °C	2.03	1.08	0.68
Spent modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ desorption at 250 °C	1.04	0.88	0.39

จากตารางที่ 4.8 แสดงสมบัติทางเคมีของตัวดูดซับของแข็ง พบว่า ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน (Fresh $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) จะประกอบไปด้วย คาร์บอนร้อยละ 0.84 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 0.79 โดยน้ำหนัก และไนโตรเจนร้อยละ 0.39 โดยน้ำหนัก ขณะที่ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน (Fresh modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) จะประกอบไปด้วย คาร์บอนร้อยละ 2.02 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 0.96 โดยน้ำหนัก และไนโตรเจนร้อยละ 0.78 โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า พื้นผิวของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนมีเอมีนอยู่บนพื้นผิว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของการดูดซับและการคายซับในหัวข้อ 4.1 และหัวข้อ 4.2 อย่างไรก็ตาม การที่พบธาตุไนโตรเจนในตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องวิเคราะห์ ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนในการวัดเท่ากับร้อยละ ± 0.3 โดยน้ำหนัก [50] นอกจากนี้เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของธาตุในตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังผ่านการคายซับที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส (Spent modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ desorption at 250 °C) จะมีการลดลงของปริมาณไนโตรเจนเมื่อเทียบกับตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังผ่านการคายซับที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (Spent modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$

desorption at 200 °C) เนื่องจากการเสื่อมสภาพของมอนอเอทานอลามีนที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส

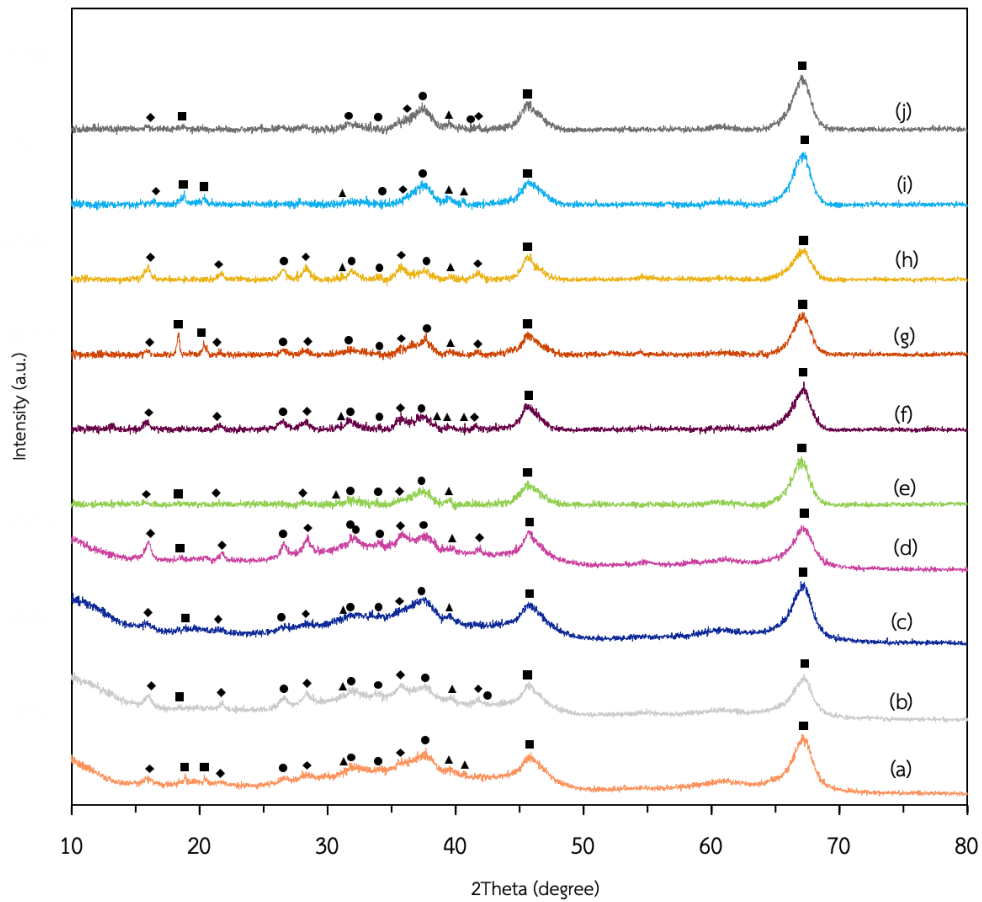
4.3.4 การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

การวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เป็นเทคนิคที่นำรังสีเอกซ์มาช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง โดยยิงรังสีเอกซ์กระทบสารตัวอย่าง เกิดการเลี้ยวเบนและสะท้อนออกมาในมุมต่าง ๆ ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดและโครงสร้างของสาร ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์มาช่วยในการวิเคราะห์โครงสร้างของสาร รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของสารในตัวดูดซับของแข็ง รูปที่ 4.7 แสดงดิฟแฟรกโตแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวดูดซับของแข็ง ได้แก่ ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (Fresh $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (Fresh modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ($K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ adsorption at 60 °C) ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส (Modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ adsorption at 50 °C) ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ผ่านการใช้งาน (Spent $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ผ่านการใช้งาน (Spent modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส (Spent $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ desorption at 300 °C) ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส (Spent modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ desorption at 200 °C) ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 0.2 บาร์ (Spent $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ desorption at 0.2 bar) ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 0.2 บาร์ (Spent modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ desorption at 0.2 bar) จากการพิจารณาแสดงดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็ง พบว่า ตัวดูดซับของแข็งทุกตัวมีวัฏภาคของแกมมา-อะลูมินาปรากฏชัดเจนที่ตำแหน่งเดียวกันทั้งหมด ซึ่งพบที่ 2θ เท่ากับ 45.71 และ 67.52 นอกจากนี้ แกมมา-อะลูมินายังพบในตำแหน่งอื่น ๆ คือ ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับ

คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 0.2 บาร์ ปรากฏจุดยอดกราฟที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 18.68 และ 20.06 [51] จากผลที่ได้พบว่า แกมมา-อะลูมินาไม่เกิดการเปลี่ยนโครงสร้าง เนื่องจาก แกมมา-อะลูมินาทำหน้าที่เป็นตัวรองรับ และไม่ทำปฏิกิริยาในการดูดซับและคายซับ คาร์บอนไดออกไซด์

พิจารณาดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน พบว่า ปรากฏจุดยอดกราฟของวัฏภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งปรากฏที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 26.19 31.99 32.14 และ 34.06 [52] ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ยังไม่ผ่านการใช้งานจะพบวัฏภาคของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตซึ่งปรากฏจุดยอดกราฟที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 31.77 38.35 และ 39.92 ขณะที่จุดยอดกราฟของวัฏภาคโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตในตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ยังไม่ผ่านการใช้งานจะพบที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 31.77 และ 39.92 [52] นอกจากนี้ พบวัฏภาคของสารประกอบดาวนโซไนต์ (Dowsonite, $KAl(CO_3)(OH)_2$) ที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 16.07 21.88 28.01 36.28 และ 41.25 [51] ในตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน จากผลที่ได้พบว่า ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ยังไม่ผ่านการใช้งานพบวัฏภาคของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของโพแทสเซียมคาร์บอเนต โดยอาจเกิดขึ้นขณะที่เตรียมตัวดูดซับ เนื่องจากการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ พบวัฏภาคสารประกอบของดาวนโซไนต์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ ($KAlO_2$) และโพแทสเซียมคาร์บอเนต และเมื่อพิจารณาดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังดูดซับที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีลักษณะคล้ายกับดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน เพียงแต่ปรากฏจุดยอดกราฟของวัฏภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่มีความสูงลดลง ที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 26.19 31.99 และ 32.14 และปรากฏจุดยอดกราฟของวัฏภาคโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่มีความสูงมากขึ้น ที่ตำแหน่ง 20 เท่ากับ 26.19 38.35 และ 39.92 [52] ขณะที่ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังดูดซับที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีลักษณะเหมือนกับดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน

พิจารณาดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปรากฏจุดยอดกราฟของภูมิภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ผ่านการใช้งาน ที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 26.19 และพบจุดยอดกราฟของภูมิภาคโพแทสเซียมโบคาร์บอเนตลดลงเนื่องจากอุณหภูมิของการสลายตัวของโพแทสเซียมโบคาร์บอเนตเท่ากับ 91 องศาเซลเซียส โพแทสเซียมโบคาร์บอเนตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ถูกเปลี่ยนกลับเป็นโพแทสเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสารตั้งต้น อย่างไรก็ตาม จุดยอดกราฟของภูมิภาคสารประกอบทาวนไซต์ยังคงปรากฏในตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของสารประกอบทาวนไซต์อยู่ในช่วง 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส [45] ขณะที่ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีลักษณะคล้ายกับที่ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ผ่านการใช้งาน แต่ปรากฏจุดยอดกราฟของภูมิภาคโพแทสเซียมโบคาร์บอเนตลดลง และเมื่อพิจารณาที่ดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงหลังคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 0.2 บาร์ จะมีลักษณะคล้ายกับดิฟแฟรกโตแกรมของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ผ่านการใช้งาน ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 ดิฟแฟร็กโตแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของตัวดูดซับของแข็ง

(■ คือ $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, ● คือ K_2CO_3 , ▲ คือ KHCO_3 , ◆ คือ $\text{KAl}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$)

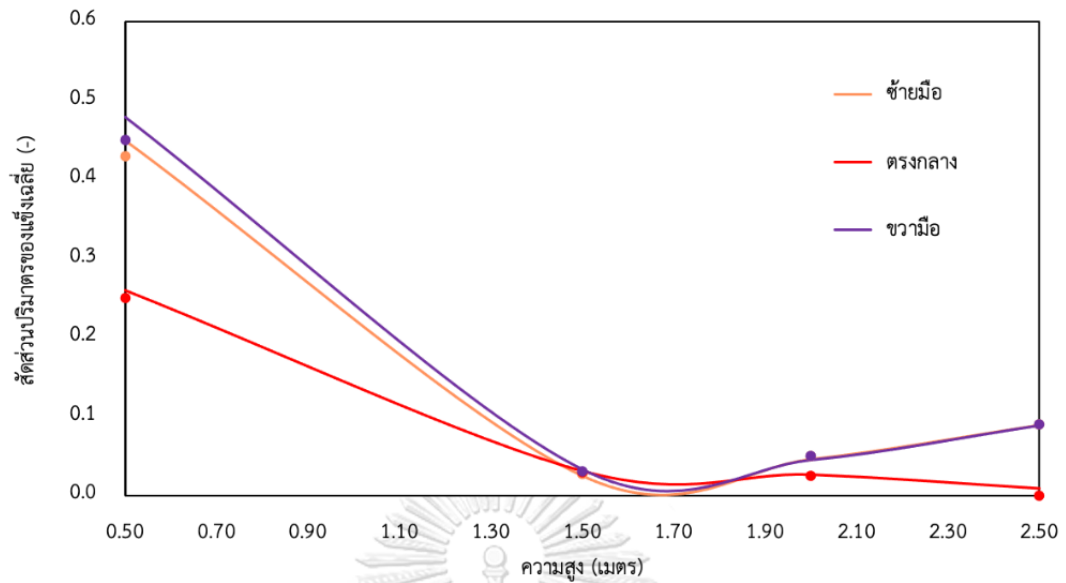
- (a) Fresh $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (b) Fresh modified $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (c) $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ adsorption at 60 °C (d) Modified $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ adsorption at 50 °C (e) Spent $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (f) Spent modified $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (g) Spent $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ desorption at 300 °C (h) Spent modified $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ desorption at 200 °C (i) Spent $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ desorption at 0.2 bar (j) Spent $\text{K}_2\text{CO}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ desorption at 0.2 bar

4.4 ผลการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับ

4.4.1 ผลการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT 2020 R2 โดยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์อ้างอิงจากงานวิจัยของ Kongkitisupchai และคณะ [7] ซึ่งเป็นโดเมนการคำนวณแบบสองมิติ และมีการแบ่งโดเมนการคำนวณเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ จำนวน 8,000 เซลล์ ในส่วนนี้จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับจากการเปรียบเทียบสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ยที่ตำแหน่งตรงกลางของทางเข้าของตัวดูดซับของแข็งด้านซ้ายมือ (Left) ตำแหน่งตรงกลางของเครื่องปฏิกรณ์ (Center) และตำแหน่งตรงกลางของทางเข้าของตัวดูดซับของแข็งด้านทางขวามือ (Right) ที่ความสูงจากฐานของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหมด 4 ความสูง ได้แก่ ที่ความสูง 0.5 1.5 2 และ 2.5 เมตร โดยมีการปรับ ความเร็วของแก๊สป้อนเข้า และสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag coefficient)

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ยของการจำลองกับงานวิจัยของ Kongkitisupchai และคณะ [7] พบว่า ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการคายซับ ที่ภาวะความเร็วของแก๊สป้อนเข้าเท่ากับ 0.183 เมตรต่อวินาที และสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเท่ากับ 0.88 ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดซึ่งมีร้อยละเฉลี่ยเท่ากับ 5.65 และรูปที่ 4.8 แสดงผลการเปรียบเทียบสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ยของการจำลองกับงานวิจัยของ Kongkitisupchai และคณะ [7] พบว่า สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ยของแบบจำลองและงานวิจัยมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้น จึงสามารถนำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในการจำลองต่อไปได้



รูปที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ยของการจำลองกับงานวิจัยของ Kongkitisupchai และคณะ [7] (จุด คือ ผลจากงานวิจัย เส้น คือ ผลจากการจำลอง)

ตารางที่ 4.9 ค่าความคลาดเคลื่อนของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ยของการจำลองกับงานวิจัยของ Kongkitisupchai และคณะ [7]

ความสูง (เมตร)	สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง (ไซยมือ)			สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง (ตรงกลาง)			สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง (ขวามือ)		
	งานวิจัย	การ จำลอง	Error (%)	งานวิจัย	การ จำลอง	Error (%)	งานวิจัย	การ จำลอง	Error (%)
0.5	0.430	0.451	4.884	0.250	0.260	4.000	0.450	0.480	6.667
1.5	0.030	0.025	9.607	0.030	0.032	5.272	0.030	0.034	11.353
2.0	0.050	0.046	7.544	0.030	0.027	7.897	0.050	0.046	8.415
2.5	0.090	0.089	0.567	0.000	0.009	1.000	0.090	0.090	0.545

4.4.2 ผลการทดสอบแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของกระบวนการคายซั้บ

เพื่อทดสอบความเหมาะสมและความแม่นยำของแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของกระบวนการคายซั้บคาร์บอนไดออกไซด์ ได้นำสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Boonprasop และคณะ [40] ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.11 มาใช้ร่วมกับค่าคงที่ของอัตราการปฏิกิริยาการคายซั้บได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.2.3 พบว่า อัตราการคายซั้บคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงกว่าผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 เนื่องจากขนาดของอนุภาคตัวดูดซั้บของแข็งแตกต่างกัน รวมทั้งเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แตกต่างกัน ส่งผลให้การถ่ายโอนมวล ความร้อนและปัจจัยอื่น ๆ แตกต่างกัน จึงทำการปรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยการคูณแบบจำลองจลนพลศาสตร์ด้วยสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ เพื่อหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้ต่ำลง โดยอัตราการคายซั้บที่ได้จากการทดลองของตัวดูดซั้บของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 1.9 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที่ และอัตราการคายซั้บของตัวดูดซั้บของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 2.2 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที่ ตารางที่ 4.10 แสดงอัตราการคายซั้บคาร์บอนไดออกไซด์หลังคูณด้วยสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ซึ่งพบว่า เมื่อคูณด้วยสัมประสิทธิ์เท่ากับ $2.5E-17$ และ $2.0E-18$ จะให้อัตราการคายซั้บคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซั้บของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง (2.1 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที่) และผ่านกระบวนการปรับปรุง (2.5 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที่) ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด ตามลำดับ ดังนั้น เพื่อให้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง งานวิจัยนี้จึงทำการปรับค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาของการคายซั้บของตัวดูดซั้บของแข็งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยการคูณสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเท่ากับ $2.5E-17$ และ $2.0E-18$ ตามลำดับ และนำไปใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณต่อไป

ตารางที่ 4.10 อัตราการคายซับที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 0.2 บาร์ เมื่อคุณสมบัติจำลอง
จลนพลศาสตร์ด้วยสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ

ตัวดูดซับของแข็ง	สัมประสิทธิ์ (-)	อัตราการคายซับ (มิลลิกรัม CO ₂ ต่อนาทีก)
K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃	5.0E-02	34.0
	1.5E-03	30.0
	1.5E-05	23.6
	2.2E-09	15.1
	5.0E-14	8.2
	2.5E-17	2.1
Modified	5.0E-02	38.7
K ₂ CO ₃ /γ-Al ₂ O ₃	1.5E-03	35.2
	1.5E-05	28.6
	2.0E-09	12.1
	2.0E-18	2.5

4.4.3 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับโดยใช้ผลร่วมของความดันและอุณหภูมิ

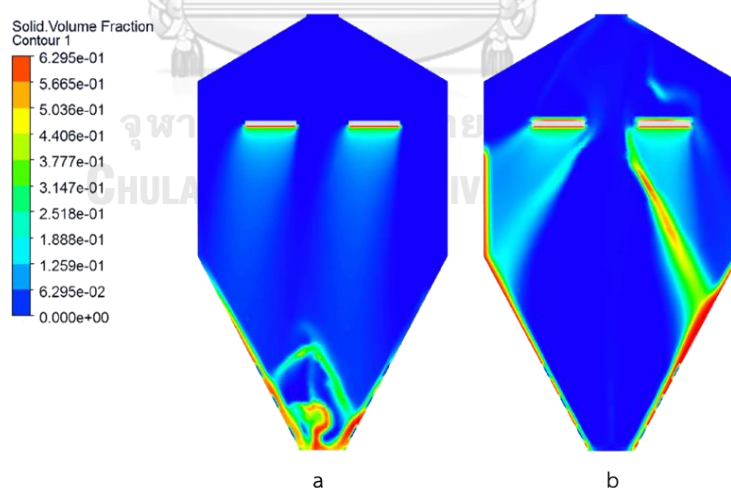
เมื่อได้แบบจำลองและอัตราในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมแล้ว ในส่วนนี้จึงเป็นการศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และเพื่อให้การจำลองมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นจึงศึกษา ร่วมกับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต (Dynamics restitution coefficient) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.8 เนื่องจากการชนของอนุภาคเป็นส่วนสำคัญที่จะส่งผลต่อปรากฏการณ์การถ่ายโอนมวล โมเมนตัม และพลังงานในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรเซด [53] ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการคายซับภายใต้บรรยากาศของไอน้ำในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรเซดดาวเนอร์ทำให้เกิดชั้นของเหลวบนพื้นผิวของตัวดูดซับ และส่งผลต่อการชนของอนุภาคของตัวดูดซับของแข็ง โดยภาวะที่งานวิจัยนี้เลือกศึกษา คือ การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1000 ปาสคาล และการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 1000 ปาสคาล และการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 3500 ปาสคาล ซึ่งเนื่องจากโปรแกรม ANSYS FLUENT ไม่สามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัตได้โดยตรง งานวิจัยนี้จึงพิจารณาผลของแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัตผ่านสมการที่เกี่ยวข้องซึ่งแสดงดังสมการที่ 3.29 ถึง 3.33 โดยอัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีนแสดงดังตารางที่ 4.11 เมื่อพิจารณาผลของสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต พบว่า อัตราการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1000 ปาสคาล ของกรณีพิจารณา ร่วมกับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัตมีค่าเท่ากับ 1.2577 กิโลกรัมต่อวินาที ซึ่งต่ำกว่ากรณีที่ไม่พิจารณา ร่วมกับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต โดยในกรณีที่ไม่พิจารณาการชนแบบพลวัต น้ำในกระบวนการคายซับไม่ส่งผลต่อการชนของตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งจะเห็นได้ว่า ตัวดูดซับของแข็งเกิดฟลูอิดเซชัน ทำให้การกระจายตัวของแข็งเกิดขึ้นได้ดี แสดงดังรูปที่ 4.9(a) ส่งผลให้เกิดการคายซับได้ดี ขณะที่ในกรณีที่พิจารณาสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต การกระจายตัวของตัวดูดซับของแข็งเกิดขึ้นได้ไม่ดี เนื่องจากมีน้ำเกาะที่บริเวณผิวของตัวดูดซับของแข็งส่งผลให้ตัวดูดซับเกาะกันอยู่บริเวณผนังของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.9(b) ทำให้การถ่ายโอนมวล โมเมนตัม และพลังงานเกิดขึ้นได้น้อย อัตราการคายซับจึงมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ไม่ได้พิจารณาผลของสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต และ

เมื่อพิจารณาอัตราการคายซึบของตัวดูดซึบของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง พบว่าที่ภาวะในการคายซึบเดียวกัน อัตราในการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซึบของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าของตัวดูดซึบที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาคายซึบซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการดูดซึบของตัวดูดซึบของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าในตัวดูดซึบของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมามีค่าสูงกว่า นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน อัตราการคายซึบของตัวดูดซึบของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงในกรณีที่ไม่พิจารณาสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัตมีอัตราการคายซึบสูงกว่าการคายซึบของตัวดูดซึบของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงในกรณีที่พิจารณาสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต ซึ่งจะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของตัวดูดซึบของแข็งส่งผลอย่างมากในการเกิดปฏิกิริยาคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อพิจารณากรณีที่พิจารณาร่วมกับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัตของการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซึบของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ภาวะแตกต่างกัน พบว่า กระบวนการคายซึบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1000 ปาสคาล ให้ค่าอัตราการคายซึบเท่ากับ 1.3394 กิโลกรัมต่อวินาที ขณะที่กระบวนการคายซึบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 1000 ปาสคาล ให้ค่าอัตราการคายซึบเท่ากับ 1.3248 กิโลกรัมต่อวินาที และเมื่อพิจารณาผลของความดันต่ออัตราการคายซึบ พบว่า ตัวดูดซึบที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงเมื่อคายซึบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 3500 ปาสคาล จะมีอัตราการคายซึบที่ต่ำกว่าตัวดูดซึบที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงเมื่อคายซึบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 1000 ปาสคาล โดยจากผลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการคายซึบต่ออัตราการคายซึบจะพบว่า อัตราการคายซึบคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและลดความดัน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2

ตารางที่ 4.11 อัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ในช่วงเวลา 30 วินาที)

ตัวดูดซับ	ภาวะ	อัตราการคายซับ (กิโลกรัมต่อวินาที)
	200 °C, 1000 Pa	1.4703
$K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$	200 °C, 1000 Pa พิจารณาร่วมกับ สัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต	1.2577
	100 °C, 1000 Pa พิจารณาร่วมกับ สัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต	1.3248
Modified $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$	100 °C, 3500 Pa พิจารณาร่วมกับ สัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต	1.3085
	200 °C, 1000 Pa พิจารณาร่วมกับ สัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต	1.3394



รูปที่ 4.9 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ของกระบวนการคายซับของ

ตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

ความดัน 1000 ปาสคาล ที่เวลา 30 วินาที (a คือ กรณีไม่พิจารณาสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต

b คือ กรณีพิจารณาสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต)

4.5 ผลการประเมินพลังงาน

ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง นอกจากประสิทธิภาพของการดูดซับและการคายซับที่สำคัญแล้ว การพิจารณาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการก็เป็นอีกเรื่องที่สำคัญ ซึ่งการพิจารณาพลังงานของกระบวนการการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จะพิจารณาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับเป็นหลัก เนื่องจากกระบวนการคายซับต้องมีการให้พลังงานแก่ระบบเพื่อให้เกิดการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้คำนวณพลังงานที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทาโนลามีนตามสมการที่ 3.34 ซึ่งเป็นผลรวมของพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไปยังอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับ พลังงานที่ใช้ในการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับ (Enthalpy of desorption) รวมถึงพลังงานที่ใช้ในปั๊มสุญญากาศ ตารางที่ 4.12 แสดงพลังงานที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิและความดันต่าง ๆ

ตารางที่ 4.12(a) พลังงานที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดัน 1 บาร์

ตัวดูดซับ ของแข็ง	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการคายซับ (mg CO ₂ /min)	พลังงานที่ใช้ใน การคายซับ (J)	พลังงานที่ใช้ใน การคายซับ (J/mg CO ₂ min ⁻¹)
K ₂ CO ₃ / γ-Al ₂ O ₃	100	1.54	786.2	510.52
	150	8.95	1788.12	199.79
	200	12.55	2542.04	202.55
	250	22.45	3504.29	156.09
	300	29.74	4952.92	166.54

ตารางที่ 4.12(a) พลังงานที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ความดัน 1 บาร์ (ต่อ)

ตัวดูดซับ ของแข็ง	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการคายซับ (mg CO ₂ /min)	พลังงานที่ใช้ใน การคายซับ (J)	พลังงานที่ใช้ใน การคายซับ (J/mg CO ₂ min ⁻¹)
Modified K ₂ CO ₃ / γ-Al ₂ O ₃	100	2.97	850.37	286.32
	150	18.95	2010.59	106.10
	200	57.00	6301.09	110.55
	250	30.36	3956.83	130.33
	300	45.56	5055.88	110.97

ตารางที่ 4.12(b) พลังงานที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ความดันต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ตัวดูดซับ ของแข็ง	ความดัน (bar)	อัตราการคายซับ (mg CO ₂ /min)	พลังงานที่ใช้ใน การคายซับ (J)	พลังงานที่ใช้ใน การคายซับ (J/mg CO ₂ min ⁻¹)
K ₂ CO ₃ / γ-Al ₂ O ₃	0.2	1.94	946.06	487.66
	0.4	1.66	844.52	508.75
	0.6	0.42	753.42	1793.86
	0.8	0.35	730.55	2087.29

ตารางที่ 4.12(b) พลังงานที่ใช้ในการคายซั้บคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซั้บของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ความดันต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ตัวดูดซั้บ ของแข็ง	ความดัน (bar)	อัตราการคายซั้บ (mg CO ₂ /min)	พลังงานที่ใช้ใน การคายซั้บ (J)	พลังงานที่ใช้ใน การคายซั้บ (J/mg CO ₂ min ⁻¹)
Modified K ₂ CO ₃ / γ-Al ₂ O ₃	0.2	2.21	962.79	435.65
	0.4	2.05	866.29	422.58
	0.6	0.53	813.80	1535.47
	0.8	0.52	716.24	1377.38

ในการคำนวณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซั้บคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซั้บของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะถูกคำนวณจากพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไปยังอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซั้บ และพลังงานที่ใช้ในการสลายตัวของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต จากตารางที่ 4.12(a) พบว่า พลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซั้บของตัวดูดซั้บของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าสูงกว่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซั้บของตัวดูดซั้บของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง โดยเมื่อใช้อุณหภูมิเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส ในการคายซั้บของตัวดูดซั้บของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะใช้พลังงานในการคายซั้บสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6301.09 จูล และเมื่อทำการคายซั้บตัวดูดซั้บของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะใช้พลังงานต่ำที่สุด ซึ่งเท่ากับ 850.37 จูล ขณะที่ในกระบวนการคายซั้บของตัวดูดซั้บของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 300 และ 100 องศาเซลเซียส จะใช้พลังงานในการคายซั้บสูงสุดและต่ำที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4952.92 จูล และ 786.20 จูล ตามลำดับ โดยพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการคายซั้บโดยใช้ความร้อนส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ในการสลายตัวของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่ถูกคำนวณจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซั้บออกมาในตัวดูดซั้บของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน เนื่องจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมาของตัวดูดซั้บของแข็งที่ผ่านกระบวนการ

ปรับปรุงมีค่ามากกว่าของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงส่งผลให้ปริมาณของพลังงานที่ใช้ในการคายซับมีค่าสูงกว่า นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการคายซับที่อุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส จะพบว่า เมื่อทำการคายซับภายใต้อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะใช้พลังงานในการคายซับต่ำสุด ซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานที่ใช้ในการสลายตัวของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับการคายซับภายใต้อุณหภูมิ 200 และ 300 องศาเซลเซียส รวมทั้งพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิมีน้อยกว่าในการคายซับภายใต้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ในการคำนวณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ความดันของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงจะเพิ่มส่วนของพลังงานที่ถูกใช้ไปในป้อนสุญญากาศ เนื่องจากการปรับความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ จากตารางที่ 4.12(b) พบว่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงกับพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าแตกต่างกันไม่มาก เนื่องจากปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมามีค่าใกล้เคียงกัน โดยในการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ความดัน 0.2 บาร์ จะใช้พลังงานในการคายซับสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 962.79 จูล และเมื่อทำการคายซับตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ความดัน 0.8 บาร์ จะใช้พลังงานต่ำที่สุด ซึ่งเท่ากับ 716.24 จูล ขณะที่ในกระบวนการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 0.2 และ 0.8 บาร์ จะใช้พลังงานในการคายซับสูงที่สุดและต่ำที่สุด ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 946.06 และ 730.55 จูล นอกจากนี้ จากตารางที่ 4.12(a) และ 4.12(b) จะพบว่า กระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโดยใช้ความดันใช้พลังงานในการคายซับที่ต่ำกว่ากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโดยใช้อุณหภูมิ เนื่องจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมามีค่าต่ำกว่าการคายซับโดยใช้อุณหภูมิ และพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไปยังอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับ รวมถึงพลังงานที่ใช้ในป้อนสุญญากาศมีค่าต่ำ

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาพลังงานที่ใช้ในการคายซับต่ออัตราการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง พบว่า กระบวนการคายซับโดยใช้ความดันจะใช้พลังงานที่ใช้ในการคายซับต่ออัตราการคายซับสูงกว่ากระบวนการคายซับโดยใช้อุณหภูมิในทั้งตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง เนื่องมาจากอัตราการคายซับของกระบวนการคายซับโดยใช้ความดันมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราการคายซับของกระบวนการ

คายซ์บโดยใช่อุณหภูมิจึงจกผลกรค้ำนวณท้งหมด พบว่ ภวะท้ใช้ปล้งงนในกรคยซ์บต่ออ้ตรกรกรคยซ์บต่ำท้สุด ค้ือ กรคยซ์บของตัวดูดซ์บของแ้็งท้ไม่ผ่านกรบวณกรปร้บปรุ้งท้ อุณหภูมิจ 250 องศเซลเซียส คว้มด้น 1 บาร์ และกรคยซ์บของตัวดูดซ์บของแ้็งท้ผ่าน กรบวณกรปร้บปรุ้งท้ อุณหภูมิจ 150 องศเซลเซียส คว้มด้น 1 บาร์ แต่จะเห็นได้ว่ ปล้งงนท้ใช้ใน กรคยซ์บต่ออ้ตรกรกรคยซ์บของตัวดูดซ์บของแ้็งท้ผ่านกรบวณกรปร้บปรุ้งท้ อุณหภูมิจ 200 องศเซลเซียส คว้มด้น 1 บาร์ มีค้่าใกล้ค้ียงกับปล้งงนท้ใช้ในกรคยซ์บต่ออ้ตรกรกรคยซ์บท้ อุณหภูมิจ 150 องศเซลเซียส คว้มด้น 1 บาร์ แต่ให้อ้ตรกรกรคยซ์บท้สูงกว้่ามก ด้งน้ัน ภวะท้ เหมะสมในกรคยซ์บของตัวดูดซ์บของแ้็งท้ให้อ้ตรกรกรคยซ์บสูงแต่ใช้ปล้งงนต่ำ ค้ือ กรคยซ์บท้ อุณหภูมิจ 250 องศเซลเซียส คว้มด้น 1 บาร์ และอุณหภูมิจ 200 องศเซลเซียส คว้มด้น 1 บาร์ ของตัวดูดซ์บของแ้็งท้ไม่ผ่านและผ่านกรบวณกรปร้บปรุ้ง ตามล้่าดับ



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการดูดซับและกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทาโนลามีน ซึ่งในส่วนสรุปผลการวิจัยจะสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่

- การศึกษากระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน และการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ
- การศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยอุณหภูมิและความดันของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน รวมถึงการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของการคายซับ
- การศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโดยใช้ผลร่วมของความดันและอุณหภูมิโดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต (Dynamics restitution coefficient)
- การศึกษาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน

5.1.1 การศึกษากระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทาโนลามีน พบว่า ที่อุณหภูมิของการดูดซับเดียวกัน ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทาโนลามีนมีค่าสูงกว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง นอกจากนี้ การศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับต่อค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

พบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นในทั้งตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง อย่างไรก็ตาม ค่าความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงเกินไป เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาผันกลับที่อุณหภูมิสูง ซึ่งตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากที่สุดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ขณะที่ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากที่สุดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม และแบบจำลองอาฟรามี พบว่า แบบจำลองอาฟรามีมีความเหมาะสมมากที่สุดในการใช้อธิบายการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจมีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด และค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด

5.1.2 การศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

ในการศึกษาผลของความดันและอุณหภูมิต่ออัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีน พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับส่งผลให้ค่าอัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของทั้งตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเมื่อทำการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่ 300 องศาเซลเซียส จะสามารถคายซับได้ดีที่สุด ขณะที่อัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเสื่อมสภาพของมอนอเอทานอลามีนที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาผลของความดันต่ออัตราการคายซับ พบว่า เมื่อลดความดันที่ใช้ในการคายซับจะทำให้อัตราการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ งานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองอาฟรามีเพื่อใช้อธิบายจลนพลศาสตร์ของการคายซับ พบว่า แบบจำลองอาฟรามีมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจมีค่าใกล้เคียง 1 ดังนั้น จึงสามารถใช้แบบจำลองอาฟรามีมาอธิบายจลนพลศาสตร์

ของการคายซับของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต/แกมมา-อะลูมินาที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงด้วยสารละลายมอนอเอทานอลามีนได้

5.1.3 การศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

การศึกษาผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง เพื่อให้ผลการจำลองมีความแม่นยำ จึงทำการปรับความเร็วของแก๊สป้อนเข้าและสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ และเปรียบเทียบสัดส่วนโดยปริมาตรของแก๊สเฉื่อยของงานวิจัยของ Kongkitisupchai และคณะ [7] พบว่า ที่ภาวะความเร็วของแก๊สป้อนเข้าเท่ากับ 0.183 เมตรต่อวินาที และสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเท่ากับ 0.88 ให้ค่าความเคลื่อนที่น้อยที่สุด นอกจากนี้ งานวิจัยนี้เลือกใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Boonprasop และคณะ [40] โดยค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะได้อัตราการทดลองการคายซับ จากผลการจำลองพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวให้อัตราการคายซับสูงเกินความจริง จึงทำการห้วงอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยการคูณด้วยสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ พบว่า เมื่อคูณด้วย $2.5E-17$ และ $2.0E-18$ จะให้อัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการปรับปรุงใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองมากที่สุด

ในการจำลองกระบวนการคายซับโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัตของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง พบว่า ที่อุณหภูมิในการคายซับเดียวกัน กรณีที่พิจารณาสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัตให้อัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่ากรณีที่ไม่พิจารณาสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ในการคายซับต่ออัตราการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและการลดความดันที่ใช้ในการคายซับจะทำให้อัตราการคายซับมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการคายซับของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1000 ปาสคาล มีอัตราการคายซับสูงที่สุด ซึ่งเท่ากับ 1.3394 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อวินาที

5.1.4 การศึกษาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง

ในการศึกษาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง โดยใช้ความดันและอุณหภูมิ พบว่า พลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ อุณหภูมิมีค่าสูงกว่ากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ความดัน เนื่องจากพลังงานส่วนใหญ่จะมาจากพลังงานที่ใช้ในการสลายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับซึ่งคำนวณได้จากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับ และพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไปยังอุณหภูมิคายซับ นอกจากนี้ เมื่อทำการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะใช้พลังงานสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 4952.92 จูล ขณะที่พลังงานสูงสุดที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5055.88 จูล อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาพลังงานที่ใช้ต่ออัตราการคายซับ พบว่า การคายซับของตัวดูดซับที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และการคายซับของตัวดูดซับที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นภาวะที่ให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการคายซับต่ออัตราการคายซับต่ำ ดังนั้น ภาวะที่เหมาะสมในการคายซับ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการคายซับที่สูงแต่ใช้พลังงานในการคายซับต่ำ คือ การคายซับที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ และ 200 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ ของตัวดูดซับของแข็งที่ไม่ผ่านและผ่านกระบวนการปรับปรุง ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ข้อเสนอแนะ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

นำตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการคายซับไปใช้ซ้ำเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง และเพื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับในเมื่อมีจำนวนรอบการใช้งานมากขึ้น พัฒนากระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งให้มีทั้งกระบวนการดูดซับและกระบวนการคายซับอยู่ในระบบเดียวกัน เพื่อให้สามารถดำเนินการได้ครบวงจร และในการศึกษากระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของงานวิจัยนี้มีการให้พลังงานความร้อนในดาวเนอร์โดยใช้การเพิ่มอุณหภูมิผ่านผนังเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งอาจจะไม่ใกล้เคียงกับการให้ความร้อนจริงในอุตสาหกรรม ดังนั้น หากมีการพัฒนาแบบจำลองใหม่ควรพิจารณาในส่วนนี้เพิ่มเติม เพื่อให้การจำลองมีความถูกต้องและแม่นยำ

เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ในการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการคายซับควรมีการคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการเสื่อมสลายของมอนอเอทานอลามีน เพื่อให้การคำนวณพลังงานมีความถูกต้องมากขึ้น



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ก.1. การคำนวณความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ที่เวลาต่าง ๆ เมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลา จะได้กราฟ Breakthrough curve ซึ่งความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก.1 และข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ ก.1

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

เมื่อ	q	คือ	ความสามารถของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง (มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ)
	m	คือ	มวลของตัวดูดซับ (กรัม)
	C_{in}	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	C_{out}	คือ	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	Q	คือ	อัตราการไหลของแก๊สโดยมวล (กรัมต่อวินาที)
	t	คือ	เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (วินาที)

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณความสามารถของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ภาวะ	ค่า	หน่วย
มวลของตัวดูดซับ	5	กรัม
อัตราการไหลของแก๊สโดยปริมาตร	5	ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	60	องศาเซลเซียส
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.0821	atm•L/mol•K
ช่วงเวลาที่ใช้	0.01667 - 0.03333	นาที
ค่าความเข้มข้น CO ₂	0.2189	โมลต่อลิตร
ค่าความเข้มข้น CO ₂ ที่เวลาสุดท้าย	12	โมลต่อลิตร

ปริมาตร CO₂ ขาออก = $(5 \times 0.2189) / 100 = 0.00109$ ลิตรต่อนาที

ปริมาตร CO₂ ที่ดูดซับ = $(5 \times 12.00 / 100) - (5 \times 0.2189 / 100) = 0.58905$ ลิตรต่อนาที

มวล CO₂ ที่ดูดซับ = $(44 \times 0.58905) / (0.0821 \times (273 + 60)) = 0.94918$ กรัม

พื้นที่ของ CO₂ ที่ถูกดูดซับในช่วง 0.01667 - 0.03333 นาที

= $0.94918 \times (0.03333 - 0.01667) = 0.01582$ กรัมคาร์บอนไดออกไซด์

พื้นที่ทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณ = 0.17555 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์

ปริมาณการดูดซับ = $0.17555 \times 1000 / 5$

= 35.11 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ

ก.2. การคำนวณอัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

ในการคำนวณอัตราการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก.2 และข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ ก.2

$$\text{CO}_2 \text{ desorption rate} = \frac{m_{\text{released CO}_2}}{t} \quad \text{ก.2}$$

เมื่อ **m** คือ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดการคายซับ (มิลลิกรัม)

t คือ เวลาที่ใช้ในการคายซับ (นาที)

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณอัตราการคายซั้บคาร์บอนไดออกไซด์

ภาวะ	ค่า	หน่วย
อัตราการไหลของแก๊สโดยปริมาตร	0.05	ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิ	200	องศาเซลเซียส
ความดัน	1	บาร์
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.0821	atm•L/mol•K
ช่วงเวลาที่ใช้	2.25 – 2.26667	นาที
ค่าความเข้มข้น CO ₂	0.1851	โมลต่อลิตร
ค่าความเข้มข้น CO ₂ เริ่มต้น	0	โมลต่อลิตร

ปริมาตร CO₂ ขาออก = $(0.05 \times 0.1851) / 100 = 0.00925$ ลิตรต่อนาที

ปริมาตร CO₂ ที่คายซั้บ = $(0.05 \times 0.1851 / 100) - 0 = 0.00925$ ลิตรต่อนาที

มวล CO₂ ที่คายซั้บ = $(44 \times 0.00925 \times 0.9869) / (0.0821 \times (273 + 200)) = 0.01034$ กรัม

พื้นที่ของ CO₂ ที่ถูกคายซั้บในช่วง 2.25 – 2.26667 นาที = $0.01034 \times (2.26667 - 2.25)$

= 0.00017 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์

พื้นที่ทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณ = 0.27231 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์

อัตราการคายซั้บ = $0.27231 \times 1000 / 25 = 10.89$ มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อนาที

ก.3. การคำนวณจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

เวลา (นาทีก)	q_t	เวลา (นาทีก)	q_t	เวลา (นาทีก)	q_t
0.00	0.00	0.32	92.79	0.63	100.46
0.02	6.80	0.33	93.53	0.65	100.57
0.03	13.59	0.35	94.27	0.67	100.67
0.05	20.39	0.37	95.00	0.68	100.77
0.07	27.19	0.38	95.74	0.70	100.80
0.08	33.98	0.40	96.48	0.72	100.83
0.10	40.78	0.42	97.22	0.73	100.86
0.12	47.57	0.43	97.96	0.75	100.89
0.13	54.37	0.45	98.70	0.77	100.92
0.15	61.17	0.47	99.44	0.78	100.95
0.17	67.96	0.48	99.54	0.80	100.98
0.18	74.76	0.50	99.64	0.82	101.01
0.20	81.56	0.52	99.75	0.83	101.04
0.22	88.35	0.53	99.85	0.85	101.07
0.23	89.09	0.55	99.95	0.87	101.10
0.25	89.83	0.57	100.05	0.88	101.13
0.27	90.57	0.58	100.16	0.90	101.16
0.28	91.31	0.60	100.26	0.92	101.18
0.30	92.05	0.62	100.36	0.93	101.18

- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

จากสมการ

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

เมื่อ q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ
(มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัม)

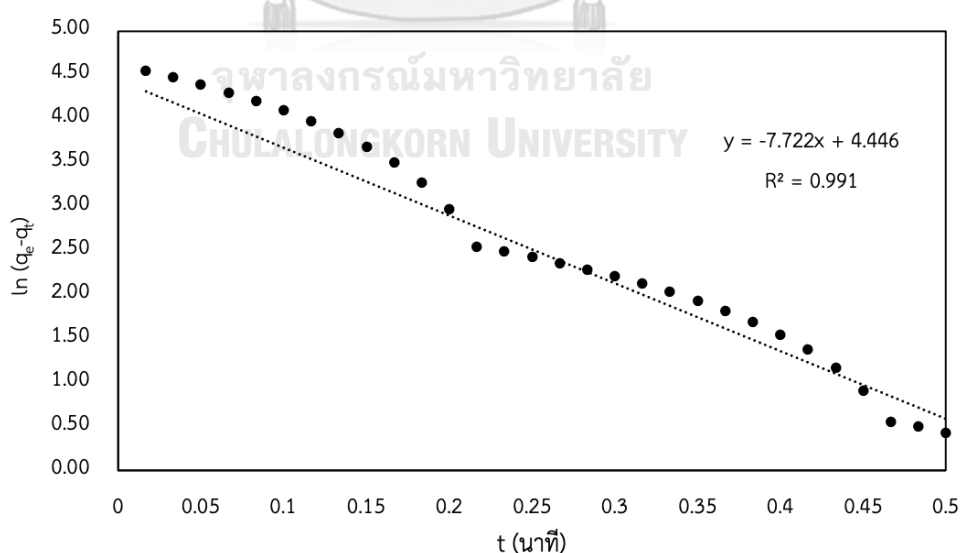
q_e คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล
(มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัม)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม
(นาที่⁻¹)

t คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที่)

นำข้อมูลจากตารางที่ ก.3 มาสร้างความสัมพันธ์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

โดยที่ แกน x คือ t
แกน y คือ $\ln(q_e - q_t)$



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม

จากรูปที่ ก.1 จะได้

$$\begin{aligned} \text{จุดตัดแกน } y &= \ln q_e = 4.446 \\ \text{ความชัน} &= -k_1 = -7.722 \\ R^2 &= 0.991 \end{aligned}$$

จากนั้น สามารถหาค่าความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาใด ๆ ($q_{t,\text{pre}}$) ได้จาก

$$q_{t,\text{pre}} = q_e(1 - e^{-k_1 t})$$

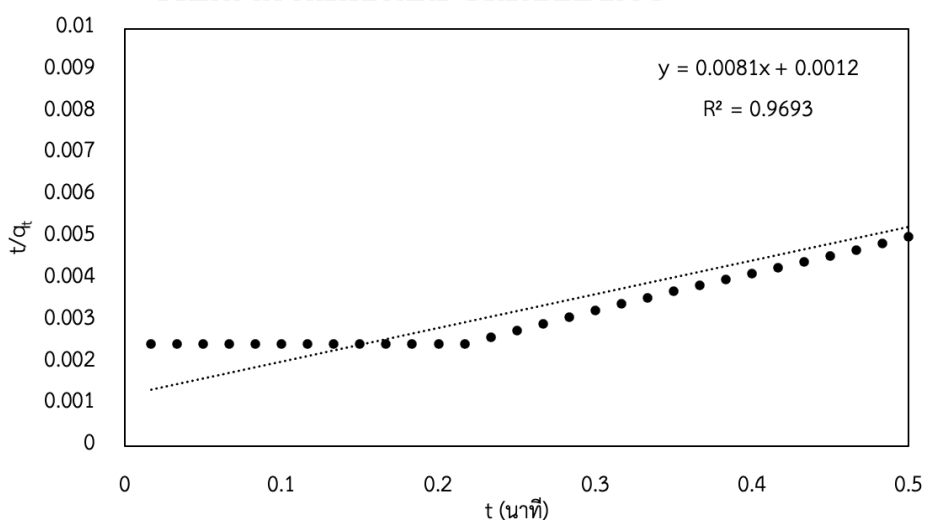
- แบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

จากสมการ
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{q_e^2 k_2} + \frac{t}{q_e}$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ นาที)⁻¹

นำข้อมูลจากตารางที่ ก.3 มาสร้างความสัมพันธ์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

โดยที่ แกน x คือ t
แกน y คือ $\frac{t}{q_e}$



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับของแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

จากรูปที่ ก.2 จะได้

$$\text{จุดตัดแกน } y = \frac{1}{q_e^2 k_2} = 0.0012$$

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{q_e} = 0.0081$$

$$R^2 = 0.9693$$

จากนั้น สามารถหาค่าความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาใด ๆ ($q_{t,pre}$) ได้จาก

$$q_{t,pre} = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t}$$

- แบบจำลองอาฟรามี

จากสมการ

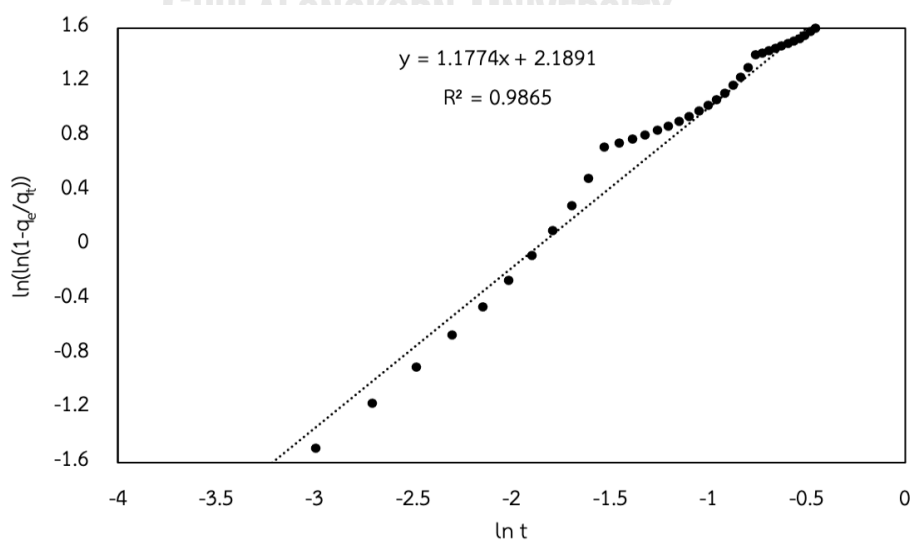
$$\ln(\ln(1 - \frac{q_t}{q_e})) = n_A \ln k_A + n_A \ln t$$

เมื่อ k_A คือ ค่าคงที่อาฟรามี (นาที)⁻¹

นำข้อมูลจากตารางที่ ก.3 มาสร้างความสัมพันธ์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอาฟรามี

โดยที่ แกน x คือ $\ln(\ln(1 - \frac{q_t}{q_e}))$

แกน y คือ $\ln t$



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ของจลนพลศาสตร์การดูดซับของแบบจำลองอาฟรามี

จากรูปที่ ก.3 จะได้

$$\text{จุดตัดแกน } y = n_A \ln k_A = 2.1891$$

$$\text{ความชัน} = n_A = 1.1774$$

$$R^2 = 0.9865$$

จากนั้น สามารถหาค่าความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาใด ๆ ($q_{t,\text{pre}}$) ได้จาก

$$q_{t,\text{pre}} = q_e [1 - \exp(-(k_A t)^{n_A})]$$



ก.4. การคำนวณจลนพลศาสตร์การคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับ

เวลา (นาที)	y_t	เวลา (นาที)	y_t
0.00	2.8441E-05	.	.
0.02	5.6883E-05	.	.
0.03	8.5324E-05	.	.
0.05	0.00011377	.	.
0.07	0.00014221	.	.
0.08	0.00017065	.	.
0.10	0.00019909	.	.
0.12	0.00022753	.	.
0.13	0.00025597	.	.
0.15	0.00028441	30.32	0.99687144
0.17	0.00031286	30.33	0.9971843
0.18	0.0003413	30.35	0.99749716
0.20	0.00036974	30.36	0.99781001
0.22	0.00039818	30.38	0.99812287
0.23	0.00042662	30.40	0.99843572
0.25	0.00044890	30.42	0.99874858
.	.	30.43	0.99906143
.	.	30.45	1.00000000

- แบบจำลองอาฟรามี

จากสมการ $\ln(\ln(1 - y_t)) = n_D \ln k_D + n_D \ln t$

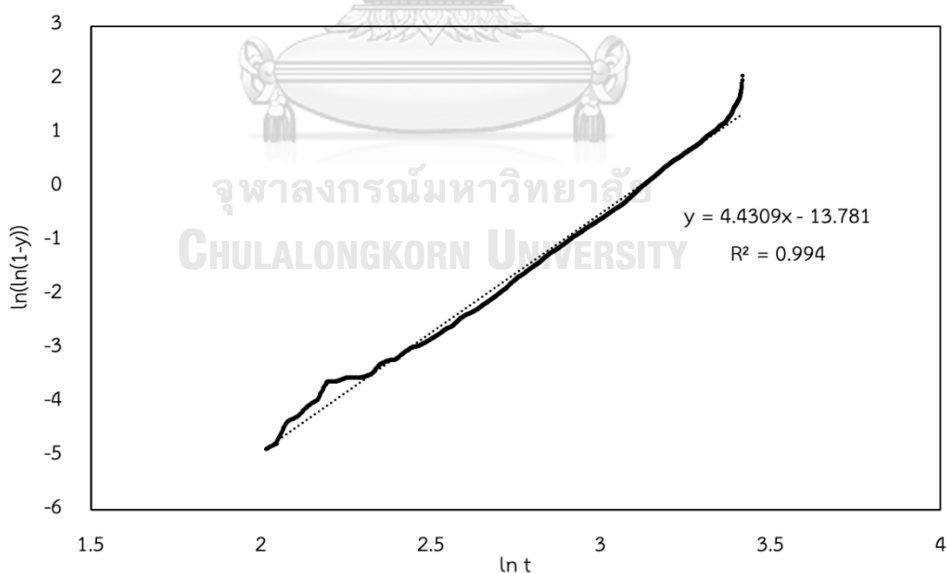
เมื่อ y_t คือ สัดส่วนของการคายซัฟที่เวลาใด ๆ ต่อ
ค่าการคายซัฟที่เวลา t

k_D คือ ค่าคงที่อาฟรามีของการคายซัฟ (นาที่⁻¹)

n_D คือ เลขชี้กำลังอาฟรามีของการคายซัฟ (-)

นำข้อมูลจากตารางที่ ก.4 มาสร้างความสัมพันธ์ของแบบจำลองปฏิกิริยาอาฟรามี
ของการคายซัฟ

โดยที่ แกน x คือ $\ln(\ln(1 - y_t))$
แกน y คือ $\ln t$



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ของจลนพลศาสตร์การคายซัฟของแบบจำลองอาฟรามี

จากรูปที่ ก.4 จะได้

$$\text{จุดตัดแกน } y = -n_D \ln k_D = -13.781$$

$$\text{ความชัน} = n_D = 4.4309$$

$$R^2 = 0.994$$

จากนั้น สามารถหาค่าความสามารถการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ เวลาใด ๆ ($Y_{t,\text{pre}}$) ได้จาก

$$Y_{t,\text{pre}} = 1 - \exp(-(k_D t))^{n_D}$$

ก.5. การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์

การคำนวณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ ก.3 ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นรวมระหว่างพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมไปยังอุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับ พลังงานที่ใช้ในการสลายตัวของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต (Enthalpy of desorption) รวมถึงพลังงานที่ใช้ในปั๊มสุญญากาศที่คำนวณได้จากสมการที่ ก.4 [54] ตารางที่ ก.5 แสดงข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการคายซับ

$$H_D = \int_{T_{\text{ambient}}}^{T_D} c_{p,s} m_s dT + Q_D + W_{\text{pump}} \quad \text{ก.3}$$

$$W_{\text{pump}} = n_{\text{gas}} R T_D \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad \text{ก.4}$$

เมื่อ H_D คือ พลังงานที่ใช้ในการคายซับ (จูล)

$c_{p,s}$ คือ ความจุความร้อนของตัวดูดซับแข็ง

(จูลต่อกิโลกรัม•เคลวิน)

m_s คือ ปริมาณตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัม)

Q_D คือ เอนทัลปีของปฏิกิริยาการคายซับ (จูล)

W_{pump}	คือ	พลังงานที่ใช้ของปั๊ม (จูล)
T_D	คือ	อุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับ (เคลวิน)
T_{ambient}	คือ	อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (เคลวิน)
n_{gas}	คือ	โมลแก๊สทั้งหมดที่ผ่านปั๊มสุญญากาศ (โมล)
P_2	คือ	ความดันเริ่มต้น (บาร์)
P_1	คือ	ความดันที่ใช้ในการคายซับ (บาร์)

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการคายซับ

ภาวะ	ค่า	หน่วย
อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม	30	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ใช้ในการคายซับ	100	องศาเซลเซียส
ความดันที่ใช้ในการคายซับ	0.2	บาร์
ปริมาณตัวดูดซับของแข็ง	5	กรัม
โมล CO_2 ที่เกิดขึ้น	0.000912	โมล
โมลแก๊สทั้งหมดที่ผ่านปั๊มสุญญากาศ	0.009984	โมล
เอนทัลปีของปฏิกิริยาคายซับ	143	กิโลจูลต่อโมล
ค่าคงที่ของแก๊ส	8.314	จูลต่อโมล•เคลวิน
ความจุความร้อนของตัวดูดซับแข็ง	1888	จูลต่อกิโลกรัม•เคลวิน

$$\begin{aligned} \text{พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ} &= (0.005 \text{ kg}) \left(1888 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \right) (373 - 303 \text{ K}) \\ &= 660.8 \text{ J} \end{aligned}$$

พลังงานที่ใช้ในการสลายตัวของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต

$$= (0.000912 \text{ mol CO}_2)(143000 \frac{\text{J}}{\text{mol CO}_2}) = 130.4 \text{ J}$$

พลังงานที่ใช้ในปฏิกิริยา

$$= (0.009984 \text{ mol})(8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}})(373 \text{ K})(\frac{1 \text{ bar}}{0.2 \text{ bar}}) = 154.8 \text{ J}$$

$$\text{พลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการคายซึบ} = 660.8 + 130.4 + 154.8 = 946 \text{ J}$$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างชุดคำสั่งของแบบจำลองสัมประสิทธิ์การชนแบบพลวัต

- **Solid viscosity**

```
DEFINE_PROPERTY (solid_kinematic_v, c, ts)
```

```
{
```

```
Thread *tm = THREAD_SUPER_THREAD(ts);
```

```
Thread *tg = THREAD_SUB_THREAD(tm,0);
```

```
real solid_k_v;
```

```
real cor_w, a, stoke, pi, impact_v, rdf, j, k, b, d, e, f;
```

```
pi = 3.14159265359;
```

```
impact_v = (3/2)*sqrt(pi*C_GT(c,ts));
```

```
stoke = (1000*0.0005*impact_v)/(9*2.825e-4);
```

```
a = (3/2)*(1000/C_R(c,ts))*(0.0000375/0.0005)*(1/0.9);
```

```
cor_w = (0.9-a)*(1-(14/stoke));
```

```
if (cor_w < 0)
```

```
{
```

```
cor_w = 0;
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
cor_w = cor_w;
```

```

}

j = pow((C_VOF(c,ts)/0.63),(1/3));
    if (j==1)
    {
k = 1;
    }
else
    {
k = (1-j);
    }
rdf = 1/k;
if (C_VOF(c,ts) == 0)
    {
solid_k_v = 0;
    }
else
    {
b =
10*C_R(c,ts)*0.0005*pow((C_GT(c,ts)*pi),0.5)/(96*C_VOF(c,ts)*(1+cor_w)*rdf);
    }

d = 1+((4/5)*rdf*C_VOF(c,ts)*(1+cor_w));

e = (4/5)*C_VOF(c,ts)*C_R(c,ts)*0.0005*rdf*(1+cor_w)*pow((C_GT(c,ts)*pi),0.5);

```



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

```
f = (4/5)*C_VOF(c,ts)*C_R(c,ts)*0.0005*rdf*(1+0.9)*pow((C_GT(c,ts)*pi),0.5);  
  
solid_k_v = b*pow(d,2)+(e-f);  
  
return solid_k_v;  
  
}
```



- **Solid bulk viscosity**

```

DEFINE_PROPERTY (solid_bv, c, ts)
{
  Thread *tm = THREAD_SUPER_THREAD(ts);
  Thread *tg = THREAD_SUB_THREAD(tm,0);
  real solid_bulk_v;
  real cor_w, a, b, stoke, pi, impact_v, rdf, j, k;
  pi = 3.14159265359;

  impact_v = (3/2)*sqrt(pi*C_GT(c,ts));

  stoke = (1000*0.0005*impact_v)/(9*2.825e-4);

  a = (3/2)*(1000/C_R(c,ts))*(0.0000375/0.0005)*(1/0.9);

  cor_w = (0.9-a)*(1-(14/stoke));

  if (cor_w < 0)
  {
    cor_w = 0;
  }

  else

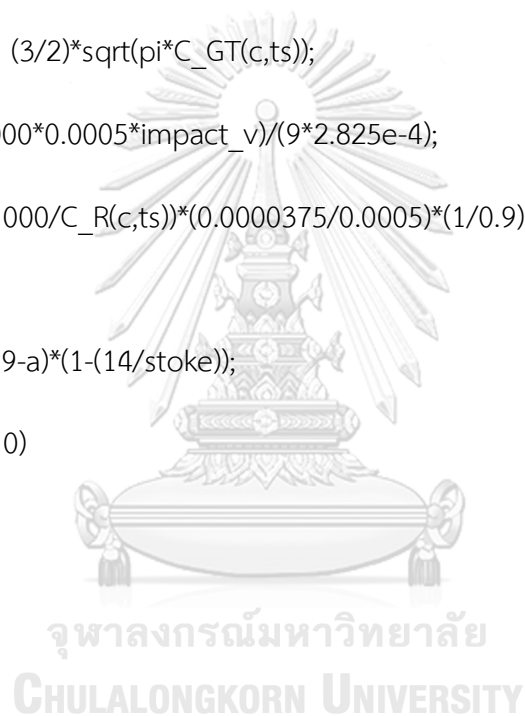
  {

    cor_w = cor_w;

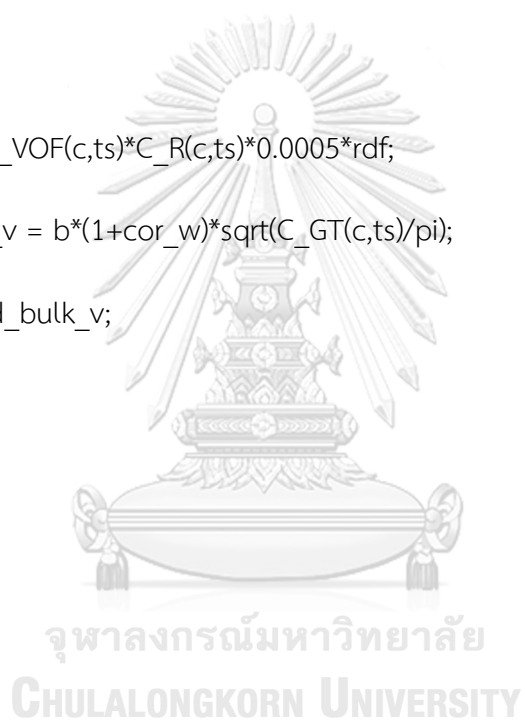
  }

  j = pow((C_VOF(c,ts)/0.63),(1/3));
  if (j==1)
  {

```




```
k = 1;  
  
}  
  
else  
  
{  
  
k = (1-j);  
  
}  
  
rdf = 1/k;  
  
b = (4/3)*C_VOF(c,ts)*C_R(c,ts)*0.0005*rdf;  
  
solid_bulk_v = b*(1+cor_w)*sqrt(C_GT(c,ts)/pi);  
  
return solid_bulk_v;  
  
}
```



- **Solid conductivity**

```

DEFINE_PROPERTY (solidconduct, c, ts)
{
  Thread *tm = THREAD_SUPER_THREAD(ts);
  Thread *tg = THREAD_SUB_THREAD(tm,0);
  real diff_coeff_energy;
  real cor_w, a, b, d, e, stoke, pi, impact_v, rdf, x, ab, j, k;
  pi = 3.14159265359;
  impact_v = (3/2)*sqrt(pi*C_GT(c,ts));
  stoke = (1000*0.0005*impact_v)/(9*2.825e-4);
  a = (3/2)*(1000/C_R(c,ts))*(0.0000375/0.0005)*(1/0.9);

  cor_w = (0.9-a)*(1-(14/stoke));

  if (cor_w < 0)
  {
    cor_w = 0;
  }
  else
  {
    cor_w = cor_w;
  }
  j = pow((C_VOF(c,ts)/0.63),(1/3));

  if (j==1)
  {
    k = 1;
  }

  else

```

```

{
k = (1-j);
}

rdf = 1/k;

ab = (384*(1+cor_w)*rdf);
b = (150*C_R(c,ts)*0.0005*sqrt(C_GT(c,ts)*pi))/ab;
d = 1+((6/5)*C_VOF(c,ts)*rdf*(1+cor_w));
e = 2*C_R(c,ts)*pow(C_VOF(c,ts),2)*0.0005*(1+cor_w)*rdf*sqrt(C_GT(c,ts)/pi);

x = b*pow(d,2)+e;
diff_coeff_energy = x;
return diff_coeff_energy;
}

```

- **Solid pressure**

```

DEFINE_PROPERTY (solid_pressure, c, ts)

{

Thread *tm = THREAD_SUPER_THREAD(ts);

Thread *tg = THREAD_SUB_THREAD(tm,0);

real sol_pres;

real cor_w, a, stoke, pi, impact_v, rdf, ab, j, k;

pi = 3.14159265359;

impact_v = (3/2)*sqrt(pi*C_GT(c,ts));

stoke = (1000*0.0005*impact_v)/(9*2.825e-4);

a = (3/2)*(1000/C_R(c,ts))*(0.0000375/0.0005)*(1/0.9);

cor_w = (0.9-a)*(1-(14/stoke));

if (cor_w < 0)

{

cor_w = 0;

}

else

{

cor_w = cor_w;

}

j = pow((C_VOF(c,ts)/0.63),(1/3));

```

```
if (j==1)
{
k = 1;
}
else
{
k = (1-j);
}
rdf = 1/k;
sol_pres = (1+2*(1+cor_w)*C_VOF(c,ts)*rdf)*C_VOF(c,ts)*C_R(c,ts)*C_GT(c,ts);
return sol_pres;
}
```



- **Collisional energy dissipation**

```

DEFINE_SOURCE (cor_source, c, ts, ds, eqn)
{
  Thread *tm = THREAD_SUPER_THREAD(ts);
  Thread *tg = THREAD_SUB_THREAD(tm,0);

  real cor_w, b, s, source, a, stroke, pi, impact_v, d, r, rdf, j, k;

  impact_v = (3/2)*sqrt(pi*C_GT(c,ts));
  stoke = (1000*0.0005*impact_v)/(9*2.825e-4);
  a = (3/2)*(1000/C_R(c,ts))*(0.0000375/0.0005)*(1/0.9);
  cor_w = (0.9-a)*(1-(14/stoke));

  if (cor_w < 0)
  {
    cor_w = 0;
  }
  else
  {
    cor_w = cor_w;
  }

  j = pow((C_VOF(c,ts)/0.63),(1/3));

  if (j==1)
  {

```

```

k = 1;

}

else

{

k = (1-j);

}

rdf = 1/k;

b = ((12*(1-
pow(0.9,2))*rdf)/(0.0005*sqrt(pi)))*C_R(c,ts)*pow(C_VOF(c,ts),2)*pow(C_GT(c,ts),1.5);

s = ((12*(1-
pow(cor_w,2))*rdf)/(0.0005*sqrt(pi)))*C_R(c,ts)*pow(C_VOF(c,ts),2)*pow(C_GT(c,ts),1.5);

d = ((12*(1-pow(0.9,2))*rdf)/(0.0005*sqrt(pi)))*C_R(c,ts)*pow(C_VOF(c,ts),2);

r = ((12*(1-pow(cor_w,2))*rdf)/(0.0005*sqrt(pi)))*C_R(c,ts)*pow(C_VOF(c,ts),2);

source = b-s;

ds[eqn] = (d-r)*(3/2)*pow(C_GT(c,ts),0.5);

return source;

}

```

บรรณานุกรม

1. Olivier, J.G., K. Schure, and J. Peters, *Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2017. **5**.
2. Samanta, A., et al., *Post-combustion CO₂ capture using solid sorbents: a review*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012. **51**(4): p. 1438-1463.
3. Abunowara, M. and M. Elgarni, *Carbon dioxide capture from flue gases by solid sorbents*. Energy Procedia, 2013. **37**: p. 16-24.
4. 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.
5. Qin, C., et al., *Effect of support material on the performance of K₂CO₃-based pellets for cyclic CO₂ capture*. Applied energy, 2014. **136**: p. 280-288.
6. Veselovskaya, J.V., et al., *Direct CO₂ capture from ambient air using K₂CO₃/Al₂O₃ composite sorbent*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013. **17**: p. 332-340.
7. Kongkitisupchai, S. and D. Gidaspow, *Carbon dioxide capture using solid sorbents in a fluidized bed with reduced pressure regeneration in a downer*. AIChE Journal, 2013. **59**(12): p. 4519-4537.
8. Gabrielli, P. and M.G. , and Marco Mazzotti, *The Role of Carbon Capture and Storage and Carbon Capture and Utilization to Achieve the Climate Change Mitigation Goals*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020. **59**: p. 7033-7045.
9. Ficicilar, B. and T. Dogu, *Breakthrough analysis for CO₂ removal by activated hydrotalcite and soda ash*. Catalysis today, 2006. **115**(1-4): p. 274-278.
10. Burdyny, T. and H. Struchtrup, *Hybrid membrane/cryogenic separation of oxygen from air for use in the oxy-fuel process*. Energy, 2010. **35**(5): p. 1884-1897.
11. Mondal, M.K., H.K. Balsora, and P. Varshney, *Progress and trends in CO₂ capture/separation technologies: A review*. Energy, 2012. **46**(1): p. 431-441.
12. Øi, L.E. and S.H.P. Kvam, *Comparison of energy consumption for different CO₂*

- absorption configurations using different simulation tools.* Energy Procedia, 2014. **63**: p. 1186-1195.
13. Nagy, T., et al., *Improvement of post-combustion carbon capture process in retrofit case.* Energy Procedia, 2017. **114**: p. 1567-1575.
 14. Schöny, G., et al. *Pilot scale demonstration of solid sorbent CO₂ capture technology at a biomass power station.* in *14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference Melbourne.* 2018.
 15. Dietrich, F., et al., *Experimental study of the adsorber performance in a multi-stage fluidized bed system for continuous CO₂ capture by means of temperature swing adsorption.* Fuel Processing Technology, 2018. **173**: p. 103-111.
 16. Carapellucci, R. and A. Milazzo, *Membrane systems for CO₂ capture and their integration with gas turbine plants.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2003. **217**(5): p. 505-517.
 17. Zaman, M. and J.H. Lee, *Carbon capture from stationary power generation sources: A review of the current status of the technologies.* Korean Journal of Chemical Engineering, 2013. **30**(8): p. 1497-1526.
 18. Baxter, L., A. Baxter, and S. Burt. *Cryogenic CO₂ capture as a cost-effective CO₂ capture process.* in *International Pittsburgh Coal Conference.* 2009.
 19. Pirngruber, G.D., et al., *A theoretical analysis of the energy consumption of post-combustion CO₂ capture processes by temperature swing adsorption using solid sorbents.* International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013. **14**: p. 74-83.
 20. Sorrels, J.L., et al., *Carbon adsorbers.* US Environmental Protection Agency, 2018: p. 1-47.
 21. Ho, M.T., G.W. Allinson, and D.E. Wiley, *Reducing the cost of CO₂ capture from flue gases using pressure swing adsorption.* Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008. **47**(14): p. 4883-4890.
 22. Siqueira, R.M., et al., *Carbon dioxide capture by pressure swing adsorption.* Energy Procedia, 2017. **114**: p. 2182-2192.
 23. Simons, S., *Imaging techniques for fluidized bed systems: a review.* The

- Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal, 1995. **56**(3): p. 83-93.
24. Torfeh, S. and R. Kouhikamali, *Numerical study of different gas–solid flow regimes effects on hydrodynamics and heat transfer performance of a fluidized bed reactor*. Heat Transfer—Asian Research, 2020. **49**(1): p. 213-235.
 25. Ye, M., M.A. van der Hoef, and J. Kuipers, *The effects of particle and gas properties on the fluidization of Geldart A particles*. Chemical engineering science, 2005. **60**(16): p. 4567-4580.
 26. Tsukada, M., D. Nakanishi, and M. Horio, *The effect of pressure on the phase transition from bubbling to turbulent fluidization*. International journal of multiphase flow, 1993. **19**(1): p. 27-34.
 27. Johnson, G., M. Massoudi, and K. Rajagopal, *Flow of a fluid—solid mixture between flat plates*. Chemical Engineering Science, 1991. **46**(7): p. 1713-1723.
 28. Zhang, H., et al., *Operation diagram of circulating fluidized beds (CFBs)*. Procedia engineering, 2015. **102**: p. 1092-1103.
 29. Raganati, F., et al., *Kinetic study and breakthrough analysis of the hybrid physical/chemical CO₂ adsorption/desorption behavior of a magnetite-based sorbent*. Chemical Engineering Journal, 2019. **372**: p. 526-535.
 30. Zawawi, M.H., et al. *A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD)*. in *AIP Conference Proceedings*. 2018. AIP Publishing LLC.
 31. Zadeh, E.S. and K. Hejazi, *Eulerian oil spills model using finite-volume method with moving boundary and wet-dry fronts*. Modelling and Simulation in Engineering, 2012. **2012**.
 32. Liu, Q., et al., *Kinetics studies of CO₂ adsorption/desorption on amine-functionalized multiwalled carbon nanotubes*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014. **53**(29): p. 11677-11683.
 33. Verougstraete, B., et al., *A new honeycomb carbon monolith for CO₂ capture by rapid temperature swing adsorption using steam regeneration*. Chemical Engineering Journal, 2020. **383**: p. 123075.
 34. Dhoke, C., et al., *Sorbents screening for post-combustion CO₂ capture via combined temperature and pressure swing adsorption*. Chemical Engineering

- Journal, 2020. **380**: p. 122201.
35. Qasem, N.A. and R. Ben-Mansour, *Energy and productivity efficient vacuum pressure swing adsorption process to separate CO₂ from CO₂/N₂ mixture using Mg-MOF-74: A CFD simulation*. Applied Energy, 2018. **209**: p. 190-202.
 36. Shen, Y., et al., *Two-dimensional full-loop simulation of CO₂ capture process in a novel dual fluidized bed system*. Fuel Processing Technology, 2020. **205**: p. 106429.
 37. Lee, S.C., et al., *CO₂ absorption and regeneration of alkali metal-based solid sorbents*. Catalysis Today, 2006. **111**(3-4): p. 385-390.
 38. Gollwitzer, F., et al., *Coefficient of restitution for wet particles*. Physical Review E, 2012. **86**(1): p. 011303.
 39. Pokhrel, J., et al., *CO₂ adsorption behavior of amine-functionalized ZIF-8, graphene oxide, and ZIF-8/graphene oxide composites under dry and wet conditions*. Microporous and Mesoporous Materials, 2018. **267**: p. 53-67.
 40. Boonprasop, S., et al., *CO₂ capture in a multistage CFB: Part I: Number of stages*. AIChE Journal, 2017. **63**(12): p. 5267-5279.
 41. Ju, Y. and C.-H. Lee, *Dynamic modeling of a dual fluidized-bed system with the circulation of dry sorbent for CO₂ capture*. Applied Energy, 2019. **241**: p. 640-651.
 42. Mukherjee, S. and A.N. Samanta, *Amine-impregnated MCM-41 in post-combustion CO₂ capture: Synthesis, characterization, isotherm modelling*. Advanced Powder Technology, 2019. **30**(12): p. 3231-3240.
 43. Li, M.-H. and K.-P. Shen, *Calculation of equilibrium solubility of carbon dioxide in aqueous mixtures of monoethanolamine with methyldiethanolamine*. Fluid phase equilibria, 1993. **85**: p. 129-140.
 44. Castellazzi, P., et al., *CO₂ capture by functionalized alumina sorbents: DiEthanolAmine on γ -alumina*. Microporous and Mesoporous Materials, 2016. **226**: p. 444-453.
 45. Zhao, C., X. Chen, and C. Zhao, *K₂CO₃/Al₂O₃ for capturing CO₂ in flue gas from power plants. Part 2: Regeneration behaviors of K₂CO₃/Al₂O₃*. Energy & fuels,

2012. **26**(2): p. 1406-1411.
46. Kali-Stella, Z., *Aspects of degradation of monoethanolamine solutions during Co₂ absorption*. Cardiff University.
 47. Boonprasop, S., B. Chalermisinsuwan, and P. Piumsomboon, *Effect of operating parameters of potassium carbonate supported on gamma alumina (K₂CO₃/γ-Al₂O₃) on CO₂ capture capacity using depressurized regeneration*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2018. **88**: p. 215-225.
 48. Vikrant, K., et al., *Evidence for superiority of conventional adsorbents in the sorptive removal of gaseous benzene under real-world conditions: Test of activated carbon against novel metal-organic frameworks*. Journal of Cleaner Production, 2019. **235**: p. 1090-1102.
 49. Jo, S.B., et al., *Regenerable potassium-based alumina sorbents prepared by CO₂ thermal treatment for post-combustion carbon dioxide capture*. Korean Journal of Chemical Engineering, 2016. **33**(11): p. 3207-3215.
 50. Vidaud, L., *Mat-CHN software for drug substance titrations in discovery and development*. Journal of Analytical Science and Technology, 2018. **9**(1): p. 1-17.
 51. Martin, O., et al., *Design of hydrothermally-stable dawsonite-based sorbents in technical form for CO₂ capture*. Energy & Environmental Science, 2014. **7**(11): p. 3640-3650.
 52. 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.
 53. Loha, C., H. Chattopadhyay, and P.K. Chatterjee, *Effect of coefficient of restitution in Euler-Euler CFD simulation of fluidized-bed hydrodynamics*. Particuology, 2014. **15**: p. 170-177.
 54. Park, J.-H., et al., *Numerical analysis on the power consumption of the PSA process for recovering CO₂ from flue gas*. Industrial & engineering chemistry research, 2002. **41**(16): p. 4122-4131.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศศิธร อังคณาวิศัลย์
วัน เดือน ปี เกิด	22 พฤศจิกายน 2539
สถานที่เกิด	อุบลราชธานี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีวิศวกรรม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	201/4 ถนนพรหมเทพ ตำบลในเมือง อ.เมือง จ.อุบลราชธานี
ผลงานตีพิมพ์	Proceeding: CO ₂ capture by modified potassium carbonate with monoethanolamine supported on gamma-alumina, TIChE 2021 (6-7 May 2021) Paper: Regeneration of modified potassium carbonate with monoethanolamine sorbent supported on gamma-alumina in CO ₂ capture, Energy Reports (2021) Accepted manuscript