

รายงานโครงการวิจัย

การพัฒนาระบบดักจับ CO₂ โดยใช้เทคโนโลยีฟลูอิดไอเดเซชัน
(Develop a CO₂ capture system of CTFB unit)

โดย

นายชววิช เซวารินทร์ รหัสนิสิต 5932915823
นางสาวพิชชาพร เจนเจริญวงศ์ รหัสนิสิต 5932944023

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ปีการศึกษา 2562
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การพัฒนาระบบดักจับ CO₂ โดยใช้เทคโนโลยีฟลูอิดเซชัน

นายชวิช เชาวรินทร์
นางสาวพิชชาพร เจนเจริญวงศ์

โครงงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Develop a CO₂ capture system of CTFB unit

Chuvich Chaovarin
Pichaporn Jenjaroenwong

A Senior Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of Bachelor of Science Program in Chemical Technology Department

Faculty of Science Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

ผู้ดำเนินงาน นายชววิช เชาวรินทร์ 5932915823
นางสาวพิชชาพร เจนเจริญวงศ์ 5932944023
เรื่อง การพัฒนาระบบดักจับ CO₂ โดยใช้เทคโนโลยีฟลูอิดิเดชัน
(Develop a CO₂ capture system of CTFB unit)
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์
ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

การพัฒนาระบบดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งเป้าจะใช้เทคโนโลยีฟลูอิดิเดชันในช่วงการไหลแบบ Circulating-Turbulent Fluidized Bed (CTFB) ด้วยหอดักจับไรเซอร์แบบหลายชั้น สูง 1 เมตร และกว้าง 0.05 เมตร มีการติดตั้งระบบแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งมีหน่วยแลกเปลี่ยนความร้อน ใช้ท่อทองแดงประเภท L ขนาด ¼ นิ้ว จำนวนทั้งสิ้น 66 ท่อ เป็นท่อลำเลียงน้ำหล่อเย็น ในระบบนี้ใช้ตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K₂CO₃) ที่ไหลดบน แกรมมาอลูมิน่า (γ-Al₂O₃) ด้วยวิธี Impregnation โดยทำการศึกษาตัวแปร 3 ตัวที่ส่งผลต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ อัตราการไหลเข้าของแก๊ส, อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า โดยใช้โปรแกรม LabVIEW สำหรับวัดและประมวลผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นและอุณหภูมิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเซนเซอร์ จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อหาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการทดลองพบว่าการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธี Impregnation สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น, อัตราการไหลเข้าของก๊าซส่งผลต่อการกระจายตัวของตัวดูดซับ, อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อความสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตาม ด้วยความเร็วของแก๊สที่ใช้ ฟลูอิดิเดชันที่เกิดขึ้น อยู่ในช่วงการไหลแบบ Bubbling flow regime

คำสำคัญ: การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ฟลูอิดิเดชัน, Impregnation

ภาควิชาเคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต.....  เชาวรินทร์ ✓

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต.....  พิชชาพร เจนเจริญวงศ์

ลายมือชื่ออาจารย์..... 

Student Name Mr. Chuvich Chaovarin 5932915823

Ms. Pichaporn Jenjaroenwong 5932944023

Title Develop a CO₂ capture system of CTFB unit

Advisor Prof. Dr. Pornpote Piumsomboon

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,

Academic Year 2019

Abstract

The development of a carbon dioxide capture system aims to use Fluidization technology in Circulating-Turbulent Fluidized Bed (CTFB) regime with a multi-staged sorption riser. The riser column is 1 m high and 0.05 m wide and a heat exchanger system installed with 66 type L copper tubes with a nominal size of ¼ inch to transport cooling water. This system uses Potassium Carbonate (K₂CO₃) support on gamma alumina (γ-Al₂O₃) as solid sorbent by impregnation method. This project studied 3 parameters that affect CO₂ capture capacity: flow rate of gas inlet, temperature of cooling water, concentration of gas inlet, respectively. LabVIEW program was used for analyzing CO₂ concentration and temperature from sensors. From this result, the sorbent which was prepared by impregnation method improves CO₂ capture capacity. Flow rate and concentration of gas inlet affect the distribution of the sorbent in the riser. Temperature of cooling water affects CO₂ adsorption reaction. However, with selected gas flow rates, the flow regime of the fluidized bed system was in bubbling regime.

Keywords: Carbon dioxide capture, Fluidization, Impregnation

Department of Chemical Technology

Major: Chemical Engineering

Student's signature.....*Chuvich Chaovarin*.....

Student's signature.....*Pichaporn Jenjaroenwong*.....

Advisor's signature.....*[Signature]*.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษา ตลอดจนปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ทำให้คณะผู้วิจัยได้รับข้อมูลที่ครบถ้วน และสามารถนำมาวิเคราะห์ผลงานวิจัยได้อย่างสมบูรณ์ ผู้วิจัยตระหนักถึง ความตั้งใจจริงและความทุ่มเทของอาจารย์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และหัวหน้าห้องปฏิบัติการฟลูอิดไดเซชัน ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยและถ่ายทอดความรู้วิชาฟลูอิดไดเซชัน เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการนำมาต่อยอดในงานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สุทธิชัย บุญประสพ นักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการฟลูอิดไดเซชัน ที่คอยให้คำปรึกษาด้านวิชาการเกี่ยวกับกระบวนการดำเนินงานวิจัยรวมถึงถ่ายทอดความรู้ด้านอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย อีกทั้งคอยให้ความช่วยเหลือและติดตามงานวิจัยจนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณพีบัณฑิตประจำห้องไซเบอร์เนติกส์ทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมผ่าน LabVIEW และให้คำปรึกษาด้านต่าง ๆ เกี่ยวกับโครงการวิจัยฉบับนี้

คณะผู้จัดทำโครงการ

นายชูวิช เขาวรินทร์

นางสาวพิชชาพร เจนเจริญวงศ์

สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
Abstract.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
บทที่ 1: บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 สมมติฐาน	1
1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย	2
1.5 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2: เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 3: วิธีดำเนินงานวิจัย.....	7
3.1. แผนภาพแสดงระบบโดยรวม.....	7
3.2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	8
3.3. การเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธี impregnation.....	9
3.4. การเตรียมตัวดูดซับก่อนการทดลอง.....	9
3.5. การประกอบเครื่อง Multi-staged sorbent ไโรเซอร์ และการทดสอบประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	10
3.6. โปรแกรม LabView สำหรับวัดค่าในการทดลอง	11
บทที่ 4: ผลการวิจัย	13
4.1. ศึกษาผลของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในหอไรเซอร์ขณะเกิดการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	13
4.2. ผลการทดสอบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอไรเซอร์	14

4.3. ผลการกระจายของตัวดูดซับของแข็ง (Solid volume fraction) ภายในท่อไรเซอร์.....	21
บทที่ 5: สรุปผลการวิจัย.....	23
เอกสารอ้างอิง	24
ภาคผนวก	26

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 ภาพรวมของระบบดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยหอไรเซอร์	7
รูปที่ 2 แบบจำลองภาพด้านหน้าของหอไรเซอร์ (หน่วย: mm)	7
รูปที่ 3 แบบจำลองภาพด้านข้างของส่วนยึดติดท่อทองแดงกับหอไรเซอร์ที่วางแบบสับหว่าง	8
รูปที่ 4 โปรแกรมสำหรับวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ	11
รูปที่ 5 โปรแกรมสำหรับวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในหอไรเซอร์	11
รูปที่ 6 โปรแกรมสำหรับวัดความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในหอไรเซอร์	12
รูปที่ 7 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอไรเซอร์ขณะเกิดการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	13
รูปที่ 8 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาและตำแหน่งต่างๆ ขณะเกิดการดูดซับ	16
รูปที่ 9 เปอร์เซ็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับที่เวลาและตำแหน่งต่างๆ ขณะเกิดการดูดซับ	18
รูปที่ 10 สัดส่วนของของแข็งภายในหอไรเซอร์ที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM	21
รูปที่ 11 กราฟแสดงช่วงการไหลของระบบฟลูอิดซ์เบด	30

บทที่ 1: บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปฏิบัติการเผาไหม้ถือเป็นปฏิกิริยาสำคัญที่ใช้ในโรงอุตสาหกรรม มีการใช้ถ่านหินและน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งปฏิกิริยานี้ก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปลดปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ ในปัจจุบันสัดส่วนการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคอุตสาหกรรมคิดเป็น ร้อยละ 27 ของสัดส่วนการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นถือเป็นส่วนประกอบสำคัญของก๊าซเรือนกระจกที่ส่งผลให้เกิดสภาวะโลกร้อน ดังนั้น ถ้าสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้สู่ชั้นบรรยากาศได้ ก็จะสามารถลดผลกระทบของภาวะโลกร้อนลงได้ ซึ่งการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่หลายๆกระบวนการนั้น ยังมีต้นทุนสูงและมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้สารเอมีน ดังนั้นวิธีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซเผาไหม้ จึงเป็นงานวิจัยที่กำลังได้รับความสนใจและพัฒนาอย่างต่อเนื่องให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

สำหรับงานวิจัยนี้สนใจที่จะพัฒนาระบบการดักจับและการจัดเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เทคโนโลยีฟลูอิดไอเซชัน ในช่วงการไหลแบบ Circulating-Turbulent Fluidized Bed (CTFB) เพื่อดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระบบดังกล่าวใช้สารดูดซับอันได้แก่ โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ซึ่งเป็นสารที่ราคาไม่แพงและสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก โดยสารดูดซับในระบบดังกล่าวสามารถฟื้นฟูและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นการออกแบบและพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้การดูดซับและสามารถฟื้นฟูสารดูดซับได้ตามแนวคิดข้างต้น จึงเป็นประเด็นวิจัยที่ได้รับความสนใจ การกำหนดสภาวะการทำงานภายในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้บรรลุเป้าหมายการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการฟื้นฟูสารดูดซับและการดำเนินการเป็นประเด็นที่ต้องพัฒนาเพื่อให้ระบบ ดังกล่าวทำงานได้ตรงตามความต้องการ

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิต่ำที่ไม่คงที่ โดยใช้ K_2CO_3 เป็นตัวดูดซับ ภายในระบบฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed)

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1. ศึกษาผลของการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ของตัวดูดซับ K_2CO_3 ซึ่งเตรียมด้วยวิธี Impregnation
- 1.2.2. ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิต่ำที่ไม่คงที่

1.3 สมมติฐาน

- 1.3.1. อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นมีผลต่อความสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยิ่งน้ำหล่อเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำจะสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่า

- 1.3.2. อัตราการไหลของก๊าซขาเข้าที่ 30 LPM สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าอัตราการไหลของก๊าซขาเข้าที่ 20 LPM
- 1.3.3. ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 12 % vol สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าที่ความเข้มข้น 6% vol

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

ระบบจำลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการภายใต้ภาวะความดันบรรยากาศ

1.5 ขอบเขตของการศึกษา

ขอบเขตของการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่

- 1.5.1. เตรียมตัวดูดซับด้วยวิธี Impregnation
- 1.5.2. ทดสอบความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะแตกต่างกัน ดังนี้
- อัตราการไหลเข้าของก๊าซ (20 LPM และ 30 LPM)
 - อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (5 °C และ 25 °C)
 - ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า (6 % vol และ 12 % vol)
- 1.5.3. วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผล เผยแพร่ผลงาน และเขียนรูปเล่มรายงาน

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.6.1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.6.2. จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ต้องใช้ในการวิจัย
- 1.6.3. ทดสอบระบบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของหอไรเซออร์ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
- 1.6.4. นำผลที่ได้มาวิเคราะห์ และหาแนวทางพัฒนาระบบ
- 1.6.5. สรุปผลการทดลอง อภิปราย และเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1. ได้รับองค์ความรู้และความเข้าใจต่างๆ จากการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของหอไรเซออร์ แบบอุณหภูมิไม่คงที่ด้วยวิธี Circulating Fluidized Bed
- 1.7.2. ได้รับข้อมูลเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาเครื่อง Circulating Fluidized Bed ให้มีประสิทธิภาพ และมีต้นทุนที่ไม่สูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมได้จริง

บทที่ 2: เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

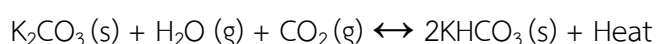
2.1.1. ปัญหาภาวะโลกร้อน

ภาวะเรือนกระจก คือ ภาวะที่ชั้นบรรยากาศของโลกมีคุณสมบัติเสมือนกระจก ที่ยอมให้รังสีคลื่นสั้นผ่านลงมายังผิวโลกได้ แต่จะดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงอินฟราเรดที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลกเอาไว้ จากนั้นก็จะคายพลังงานความร้อน ให้กระจายอยู่ภายในชั้นบรรยากาศและพื้นผิวโลก ในปัจจุบันชั้นบรรยากาศของโลกมีปริมาณก๊าซบางชนิด มากเกินสมดุลของธรรมชาติ อันเป็นผลมาจากการเผาไหม้ในโรงงานและอุตสาหกรรม เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซมีเทน (CH₄) ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC_s) และก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N₂O) เป็นต้น ก๊าซเหล่านี้มีคุณสมบัติพิเศษ คือสามารถดูดกลืนรังสีคลื่นยาวช่วงอินฟราเรดและคายความร้อนได้ดีมาก พื้นผิวโลกจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศของโลก และสิ่งมีชีวิตพื้นผิวโลกอย่างมาก กลายเป็นปัญหาภาวะโลกร้อน [1]

2.1.2. CO₂ capture system

CO₂ capture system คือ เทคโนโลยีดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ในโรงงานถ่านหิน กระบวนการกลั่นน้ำมัน และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ มีจุดมุ่งหมายเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปล่อย CO₂ ในปริมาณมากเข้าสู่ชั้นบรรยากาศทำให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อน ซึ่งในการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่ในหลายๆกระบวนการนั้น ยังมีต้นทุนสูงและมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่การใช้ตัวดูดซับของแข็งเป็นวิธีหนึ่งในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและประหยัดพลังงาน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงใช้พลังงานในการฟื้นฟูต่ำ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [2] พบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดักจับได้อย่างมีประสิทธิภาพบนตัวดูดซับ K₂CO₃ ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีดังนี้



ซึ่งปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาสมดุล โดยสมดุลไปข้างหน้าเรียกว่า Carbonation เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดย K₂CO₃ จะทำปฏิกิริยากับ CO₂ และ H₂O ได้เป็น KHCO₃ หลังจากดักจับ CO₂ แล้ว ในการสลาย KHCO₃ สามารถทำได้โดยวิธี Thermal regeneration ให้กลับมาเป็น K₂CO₃ และ CO₂ ซึ่งเป็นสมดุลย้อนกลับเรียกว่า Regeneration เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนโดยการให้ความร้อน [3]

2.1.3. Fluidization

ฟลูอิดเซชัน (Fluidization) คือ กระบวนการที่ของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ด สัมผัสกับของไหลแล้วอนุภาคของแข็งเหล่านี้มีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยที่ของไหลที่ใช้จะถูกปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของหอของไหลจะไหลผ่านออกทางส่วนบนของหอทดลองซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Column) เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งเริ่มเคลื่อนที่ และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระ ซึ่งของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะอยู่ในสภาวะไร้น้ำหนัก เมื่อพิจารณาแรงที่กระทำต่ออนุภาคของแข็งแต่ละเม็ด พบว่า ผลรวมของ

แรงลอยตัว และแรงต้านทานการเคลื่อนที่จะมีค่าเท่ากับแรงโน้มถ่วงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็งนั้น [4]

2.1.4. Circulating fluidized bed

ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization) คือ กระบวนการที่ของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ด สัมผัสกับของไหลแล้วอนุภาคของแข็งเหล่านี้มีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยที่ของไหลที่ใช้จะถูกปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของหอ แล้วไหลออกทางส่วนบนของหอทดลองซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Column)

เครื่อง circulating fluidized bed เป็นเครื่องที่ใช้ในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีการแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ Riser เป็นส่วนที่มีการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวดูดซับ, Cyclone เป็นส่วนที่มีการแยกระหว่างแก๊สสะอาดกับตัวดูดซับ และ Downer เป็นส่วนที่ทำการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ [2]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุทธิชัย บุญประสพ และคณะได้ทำการศึกษากระบวนการดักจับ CO_2 โดยใช้ตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง โดยเริ่มศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับ K_2CO_3 บน $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ในหอดูดซับ มีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ ($50\text{-}70\text{ }^\circ\text{C}$), ความเร็วของแก๊ส ($0.13\text{-}0.31\text{ m/s}$) และปริมาณตัวดูดซับที่บรรจุในหอดูดซับ ($5\text{-}15\text{ g}$) ซึ่งส่งผลต่อค่าปริมาณการดูดซับของ CO_2 และพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิ $60\text{ }^\circ\text{C}$, ความเร็วของแก๊ส 0.22 m/s และปริมาณตัวดูดซับที่บรรจุในหอดูดซับ 5 g จะมีประสิทธิภาพการดักจับ CO_2 เท่ากับ 81.2% ของ CO_2 ที่ป้อนในระบบ คิดเป็น $279.95\text{ mg of CO}_2/\text{g of K}_2\text{CO}_3$ [5]

เมื่อพบสภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับ K_2CO_3 บน $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ จึงทำการศึกษาวิธีการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับด้วยการให้ความร้อน ซึ่งมีตัวแปรได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ($200\text{-}300\text{ }^\circ\text{C}$), เวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ($2\text{-}20$ นาที) และจำนวนครั้งที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ($1\text{-}3$ ครั้ง) โดยนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นของ CO_2 กับเวลา และคำนวณหาปริมาณการดูดซับของ CO_2 จากการทดลองพบว่าในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ จะทำให้น้ำภายในตัวดูดซับสามารถแพร่ผ่านมายังผิวนอกของตัวดูดซับ ซึ่งน้ำดังกล่าวจะถูกใช้ในปฏิกิริยาดูดซับ CO_2 ครั้งต่อไป ซึ่งในสภาวะที่อุณหภูมิสูง ($300\text{ }^\circ\text{C}$) และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับนาน (20 นาที) ทำให้ตัวดูดซับกลับมาดูดซับ CO_2 ได้มาก ในทางตรงกันข้ามสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ($200\text{ }^\circ\text{C}$) และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับนาน (20 นาที) ทำให้ตัวดูดซับกลับมาดูดซับ CO_2 ได้น้อย เพราะการใช้เวลาในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับนาน (20 นาที) จะทำให้น้ำที่ผิวนอกของตัวดูดซับระเหยไปและน้ำภายในตัวดูดซับไม่สามารถแพร่ผ่านมายังผิวนอกของตัวดูดซับได้เนื่องจากอยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ ($200\text{ }^\circ\text{C}$) และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับสั้น (2 นาที) เป็นสภาวะที่เหมาะสมและมีความคุ้มค่าทางหลักเศรษฐศาสตร์ [6]

นอกจากวิธีการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับด้วยการให้ความร้อน ยังสามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับด้วยการลดความดัน จึงทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของตัวดูดซับ K_2CO_3 บน $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่

ความดันที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ (0.2 หรือ 0.8 atm), จำนวนครั้งที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ (1-3 ครั้ง) และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ (2 หรือ 20 นาที) โดยนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความเข้มข้นของ CO₂ กับเวลา และคำนวณหาปริมาณการดูดซับของ CO₂ และจากการทดลองพบว่า เมื่อมีการดักจับ CO₂ จะเกิด KAl(CO₃)(OH)₂H₂O จะปลดปล่อยพื้นที่ผิวของตัวดูดซับทำให้เกิดการดูดซับ CO₂ ได้น้อยซึ่งสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ด้วยวิธี Hydro treatment ซึ่งเป็นการใส่น้ำเข้าไปในตัวดูดซับก่อนที่จะเริ่มกระบวนการดูดซับ CO₂

ในสภาวะ ความดัน 0.2 atm และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ 20 นาที จะมีปริมาณการดูดซับ CO₂ มาก แต่ในสภาวะที่ความดัน 0.2 atm และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับสั้น 2 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเป็นสภาวะที่มีความคุ้มค่าทางหลักเศรษฐศาสตร์ ส่วนในสภาวะที่ความดัน 0.8 atm และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสั้น 2 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมน้อยที่สุด เนื่องจากที่สภาวะนี้ไม่สามารถดึงน้ำให้เข้าไปอยู่ภายในรูของตัวดูดซับได้จึงทำให้มีการดูดซับ CO₂ น้อยลง [7]

เครื่อง circulating fluidized bed เป็นเครื่องที่ใช้ในการดักจับ CO₂ มีการแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ Riser เป็นส่วนที่มีการทำปฏิกิริยาระหว่าง CO₂ กับตัวดูดซับ, Cyclone เป็นส่วนที่มีการแยกระหว่างแก๊สสะอาดกับตัวดูดซับและ Downer เป็นส่วนที่ทำการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ มีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ความเร็วของแก๊ส (1 หรือ 1.5 m/s), อัตราการหมุนเวียนของตัวดูดซับ (50 หรือ 100 kg/m²·s), ปริมาณเริ่มต้นของตัวดูดซับที่บรรจุในหอดูดซับ (300 หรือ 600 g) และเวลาที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ (1 หรือ 12 นาที) จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วของแก๊สมีผลต่อการดูดซับ CO₂ เมื่อความเร็วของแก๊สมีค่ามากจะส่งผลให้สามารถดักจับ CO₂ ได้มาก ซึ่งที่ความเร็วของแก๊ส 1 m/s และอัตราการหมุนเวียนของตัวดูดซับ 100 kg/m²·s เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดในการดักจับ CO₂ [8]

กระบวนการดักจับ CO₂ ด้วยวิธีฟลูอิดาเซชัน มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากการใช้ amine solvent ซึ่งเป็นของเหลวทำให้มีพื้นที่สัมผัสน้อย ต้องมีการสร้างหอดูดซับสูงถึง 24 เมตร ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการสร้างสูง จึงเปลี่ยนมาใช้ตัวดูดซับของแข็ง Na₂CO₃ แทน เนื่องจากมีความเป็นพิษน้อย, ราคาถูก และสามารถดักจับ CO₂ ได้มาก ในงานวิจัยนี้จึงทำการแบ่งหออออกเป็น stage โดยอุณหภูมิจะลดลงทีละ 5 °C เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดูดซับเกิดมากขึ้น เพราะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ถือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ CO₂ เป็น 96% ของ CO₂ ที่ป้อนในระบบ จากการคำนวณทาง kinetic สร้าง equilibrium curve ได้สมการดังนี้

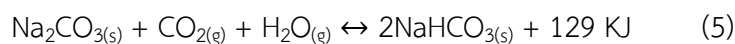
$$r_{fw} = k_{fw} [\text{CO}_2]^{0.4} [\text{H}_2\text{O}]^{0.4} \quad (1)$$

$$k_{fw} = 1 \cdot 10^{-1} [e^{(70/RT)}] \quad (2)$$

$$r_{bw} = k_{bw} (1 / [\text{CO}_2])^{0.15} (1 / [\text{H}_2\text{O}])^{0.5} \quad (3)$$

$$k_{bw} = 7.83 \cdot 10^{-3} [e^{(-0.000502/RT)}] \quad (4)$$

จากนั้นหา stage ออกมาได้เป็น 6 stages มีอุณหภูมิเท่ากับ 55, 50, 45, 40, 35 และ 30 °C ตามลำดับ [9] และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับ CO₂ จึงมีการติดตั้งระบบแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยน้ำหล่อเย็นในท่อทองแดง เข้าไปในหอดูดซับที่มีความสูง 355 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 cm โดยรวมทุก stage เข้าเป็นหอเดียวกันเพื่อลดอุณหภูมิภายในหอดูดซับ เพราะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น



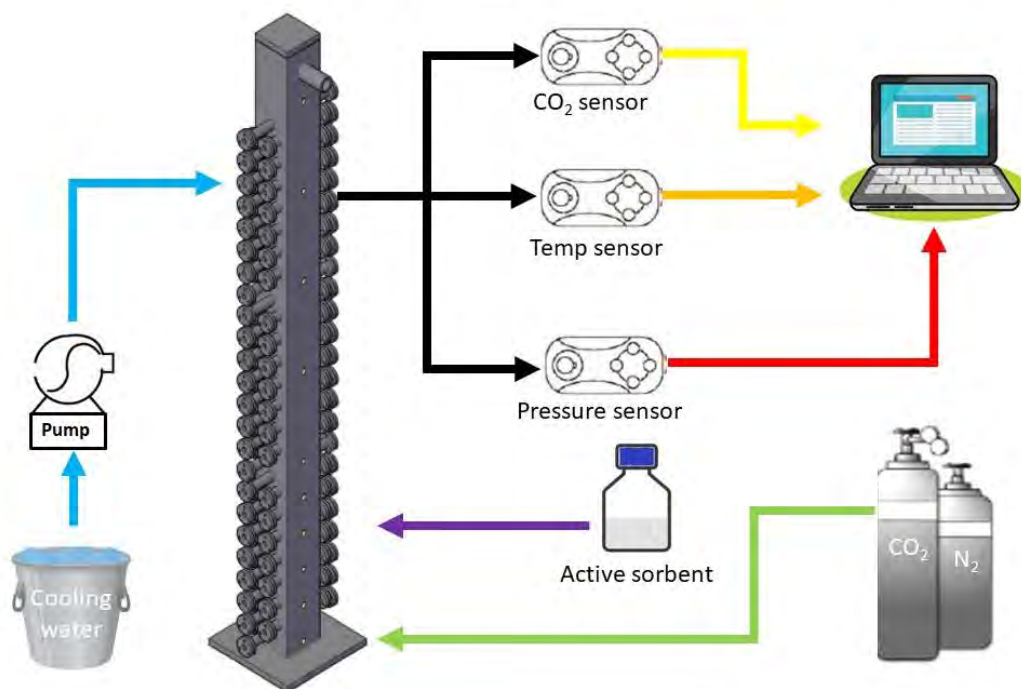
เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเมื่อลดอุณหภูมิลงจะทำให้สมดุลไปข้างหน้ามากขึ้น นอกจากนี้ท่อหล่อเย็นของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนยังช่วยเพิ่มการกระจายตัวของตัวดูดซับให้สัมผัสกับแก๊สและทำปฏิกิริยากันได้มากขึ้น

ตัวแปรที่ศึกษาคืออุณหภูมิภายในหอดูดซับ โดยทำการควบคุมอุณหภูมิภายในหอดูดซับแต่ละช่วงของหอที่ 14-28%, 35-56% และ 63-89% ของความสูงของหอดูดซับ พบว่าการคุมอุณหภูมิในช่วงดังกล่าวให้อยู่ที่ 50, 40 และ 30 °C ตามลำดับ เป็นสถานะที่ดีที่สุด ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพการดักจับ CO₂ ให้มากกว่า 95% ของ CO₂ ที่ป้อนเข้าสู่ระบบได้ [3]

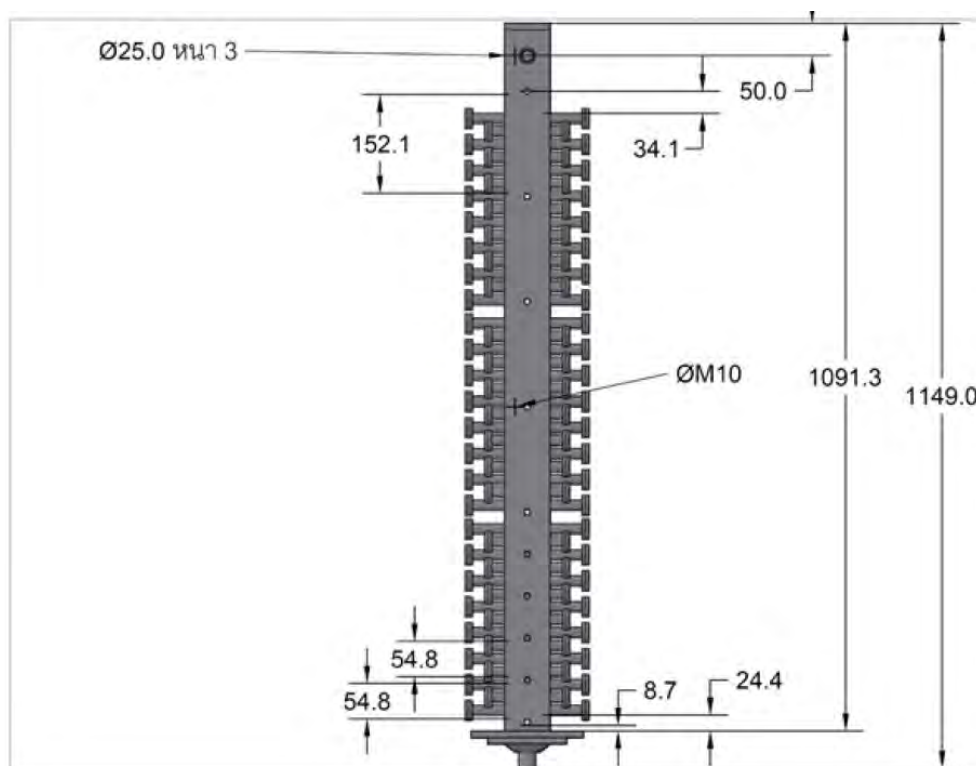
จากงานวิจัยและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ผ่านมา จึงมีการศึกษาแนวคิดดังกล่าวในห้องปฏิบัติการ โดยทำการออกแบบและสร้างหอดักจับ CO₂ แบบอุณหภูมิไม่คงที่ โดยมีชุดแลกเปลี่ยนความร้อนที่แบ่งเป็น 3 ช่วงภายในหอ โดยใช้การไหลของน้ำหล่อเย็นในท่อทองแดง 66 ท่อ เพื่อลำเลียงน้ำหล่อเย็นเข้าไปลดอุณหภูมิในหอไรเซอร์ เนื่องจากท่อทองแดงมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูง เมื่อทำการใส่น้ำหล่อเย็นเข้าไปในระบบพบว่าลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในหอไรเซอร์ ลดลงตลอดแนวความสูงของหอและทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับ CO₂ ระหว่างการใช้ระบบน้ำหล่อเย็น (5 °C) กับไม่ใช้ระบบน้ำหล่อเย็น โดยทดสอบการดักจับที่อัตราการไหลของ CO₂ ที่ 5, 10 และ 15 LPM พบว่าการดักจับที่มีการใช้น้ำหล่อเย็นในท่อทองแดงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ CO₂ เพราะปฏิกิริยาดูดซับ CO₂ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนเมื่อชุดแลกเปลี่ยนความร้อนลำเลียงน้ำหล่อเย็นเข้าไปลดอุณหภูมิภายในหอไรเซอร์ ลงจะทำให้สมดุลไปข้างหน้ามากขึ้น จึงดูดซับ CO₂ มากขึ้น นอกจากนี้ท่อหล่อเย็นของระบบแลกเปลี่ยนความร้อนภายในหอดักจับ CO₂ ยังช่วยเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาระหว่าง CO₂ และตัวดูดซับ เพราะการเคลื่อนที่ของกลุ่มก้อนตัวดูดซับถูกปะทะด้วยท่อหล่อเย็น จึงเป็นการเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา และท่อหล่อเย็นยังช่วยในการแยกตัวดูดซับที่จับกันเป็นก้อนให้กระจายตัวกัน ตัวดูดซับจึงสัมผัสกับแก๊สได้มากขึ้น [10]

บทที่ 3: วิธีดำเนินงานวิจัย

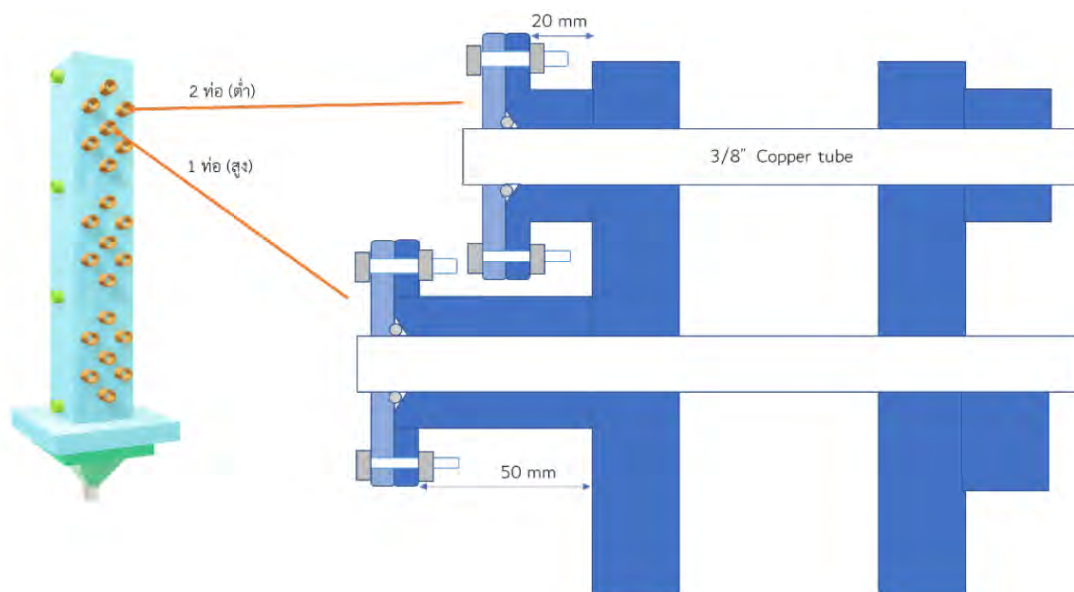
3.1. แผนภาพแสดงระบบโดยรวม



รูปที่ 1 ภาพรวมของระบบดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยหอโรเซอร์



รูปที่ 2 แบบจำลองภาพด้านหน้าของหอโรเซอร์ (หน่วย: mm)



รูปที่ 3 แบบจำลองภาพด้านข้างของส่วนยึดติดท่อทองแดงกับหอโรเซออร์ที่วางแบบสับหว่าง

รูปที่ 1 และ 2 แสดงแบบจำลองของหอโรเซออร์แบบอุณหภูมิไม่คงที่ โดยจะมีการใช้ท่อทองแดงเพื่อผ่านน้ำหล่อเย็นเข้าไปเพื่อลดอุณหภูมิในหอโรเซออร์ เนื่องจากทองแดงมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูง การใส่ท่อทองแดงจะใส่แบบสแตกริ่ง (Staging) เพื่อการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ดี โดยจะแบ่งการใส่ท่อทองแดงออกเป็น 3 ชั้น จำนวนชั้นละ 22 ท่อ รวมท่อทองแดงที่ใช้ทั้งหมด 66 ท่อ

3.2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- Potassium Carbonate (K_2CO_3)
- Gamma alumina ($\gamma-Al_2O_3$)
- Carbon dioxide (CO_2)
- Nitrogen (N_2)

3.2.2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- ตู้อบ (Oven)
- ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
- ปิมน้ำ
- เครื่องเขย่า

- Bucket of cold water
- Vacuum pump
- เครื่องกรองสุญญากาศ
- Air compressor
- Mass flow controller
- Pressure sensor with USB link
- Carbon dioxide concentration sensor
- Thermocouple
- Multi-staged sorbent โรเซอร์
- เครื่องแกว้อื่นๆ ภายในห้องปฏิบัติการ

3.3. การเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธี impregnation

- 3.3.1. บด Gamma alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) และ Potassium Carbonate (K_2CO_3) ที่เปียกก่อนให้เป็นผง
- 3.3.2. ชั่ง Gamma alumina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) และ Potassium Carbonate (K_2CO_3) อย่างละ 10 g ใส่ขวดรูปชมพู่จำนวน 40 ขวด
- 3.3.3. ใส่ น้ำกลั่น 25 ml ใส่ในขวดรูปชมพู่แต่ละขวด แล้วปิดปากขวดด้วยจุกยาง
- 3.3.4. นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าด้วยความเร็ว 230 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3.3.5. นำตัวดูดซับมากรองเอาน้ำออกด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ
- 3.3.6. นำเข้าตู้อบ ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 3.3.7. ทำการ Calcined ที่ heat rate 3 °C/min ที่อุณหภูมิ 600 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และลดอุณหภูมิมาที่ 150 °C จนครบเวลา 24 ชั่วโมง

3.4. การเตรียมตัวดูดซับก่อนการทดลอง

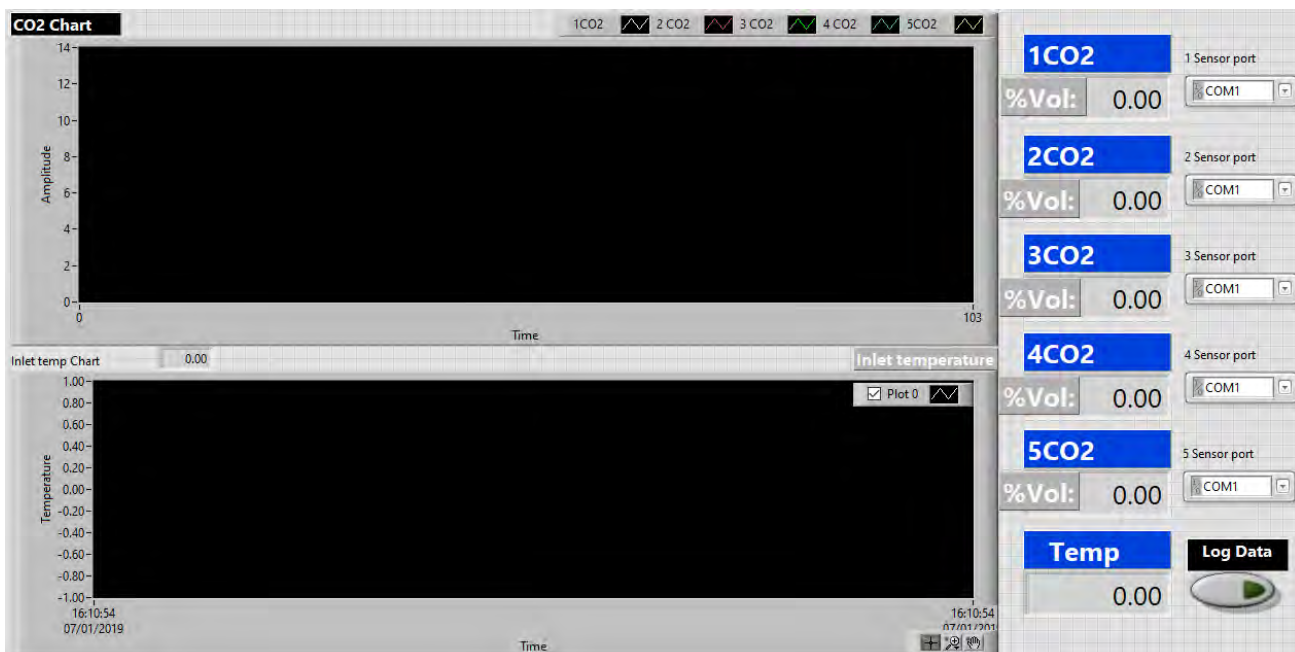
- 3.4.1. บดตัวดูดซับที่จับตัวเปียกก่อนให้เป็นผง
- 3.4.2. ชั่งตัวดูดซับที่ผ่านการเตรียมด้วยวิธี impregnation 400 g
- 3.4.3. ตัวดูดซับที่ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดรออกไซด์แล้วใส่ขวด ปิดปากขวดด้วยฟรอยแบบหลวมๆ
- 3.4.4. นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 30 นาที
- 3.4.5. ประกอบขวดที่มีตัวดูดซับ เข้ากับ เครื่อง vacuum เพื่อดูดอากาศออก เขย่าขวดเป็นเวลา 3 นาที
- 3.4.6. เปิดวาล์ว B ให้แก๊สไนโตรเจนขึ้นเข้ามาในขวด เขย่าขวดเป็นเวลา 3 นาที

3.5. การประกอบเครื่อง Multi-staged sorbent โรเซอร์ และการทดสอบประสิทธิภาพการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

- 3.5.1. ตรวจสอบปริมาณน้ำภายในขวด Steamer ให้มีปริมาตร 300-400 ml
- 3.5.2. นำตัวดูดซับที่เตรียมไว้ใส่เข้าคอลัมน์ และติดตั้งคอลัมน์ พร้อมเตรียมระบบน้ำหล่อเย็นให้เรียบร้อย
- 3.5.3. เชื่อมต่อเซนเซอร์วัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่งที่ต้องการทดสอบจำนวน 5 ตำแหน่ง ส่วนตำแหน่งอื่นๆ ให้ใช้สายรัดปิดกั้นทางออกไว้เพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซ
- 3.5.4. เปิดโปรแกรม LabView จากนั้นเปิดพอร์ตวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามจำนวนเซนเซอร์ที่ต้องการใช้
- 3.5.5. ตรวจสอบวาล์ว V7 เพื่อไม่ให้ก๊าซเข้าไหลผ่าน Steamer, ปิดวาล์ว V8 เพื่อไม่ให้ก๊าซไหลเข้าสู่คอลัมน์
- 3.5.6. สลับวาล์วก๊าซเข้าเป็นก๊าซไนโตรเจน และควบคุมอัตราการไหลของก๊าซที่ 1 LPM
- 3.5.7. เปิดใช้งาน Pre-heater ตัวที่ 1-3 แล้วตั้งค่าอุณหภูมิแต่ละตัวไว้ที่ 140 °C, 100 °C, 101-130 °C ตามลำดับ
- 3.5.8. สลับวาล์ว V8 เพื่อให้ก๊าซเข้าไหลผ่าน Steamer และจับเวลา 3 นาที
- 3.5.9. เปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเป็น 3 LPM จากนั้นสลับวาล์ว V8 เพื่อไม่ให้ก๊าซไหลเข้าสู่คอลัมน์, สลับวาล์ว V7 เพื่อไม่ให้ก๊าซเข้าไหลผ่าน Steamer และสลับวาล์วก๊าซเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จับเวลา 2 นาที
- 3.5.10. สลับวาล์ว V7 เพื่อให้ก๊าซเข้าไหลผ่าน Steamer แล้วจับเวลา 3 นาที พร้อมทั้งเปิดปั้มน้ำและปรับวาล์วเพื่อควบคุมให้น้ำหล่อเย็นในแต่ละสายมีอัตราการไหลเท่ากัน
- 3.5.11. เปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 30 LPM จากนั้นสลับวาล์ว V8 ครึ่งทางเพื่ออันก๊าซ แล้วปล่อยก๊าซเข้าสู่คอลัมน์พร้อมกด Log data ในโปรแกรม LabView จับเวลา 3 นาที แล้วกด Stop ในโปรแกรม LabView พร้อมทั้งปิดแก๊สที่เข้าสู่คอลัมน์
- 3.5.12. จากนั้นทำซ้ำข้อ 9 เพื่อหา เส้นอ้างอิง (base line)
- 3.5.13. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-12 โดยเปลี่ยนค่าตามสภาวะที่ศึกษา
- 3.5.14. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-11 โดยเปลี่ยนเป็นเซนเซอร์วัดอุณหภูมิทั้งหมด 4 ตำแหน่ง
- 3.5.15. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-11 โดยเปลี่ยนเป็นเซนเซอร์วัดความดันทั้งหมด 4 ตำแหน่ง

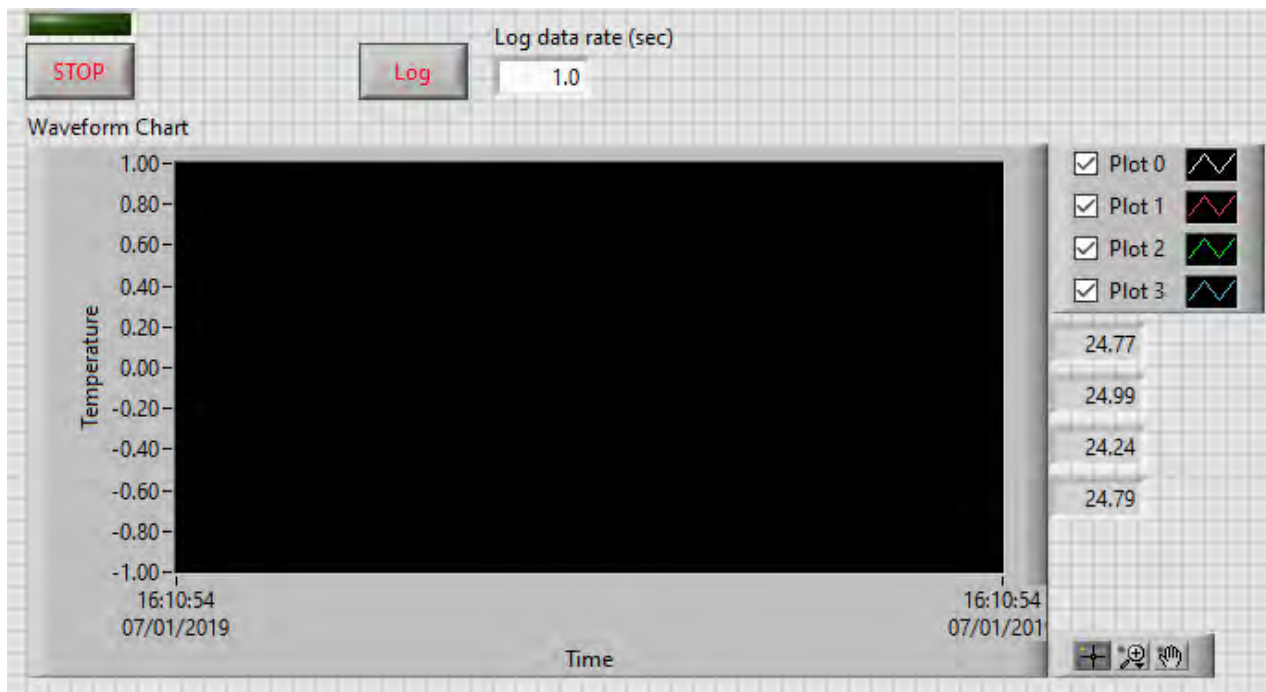
3.6. โปรแกรม LabView สำหรับการทดลอง

3.6.1. โปรแกรมสำหรับวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ



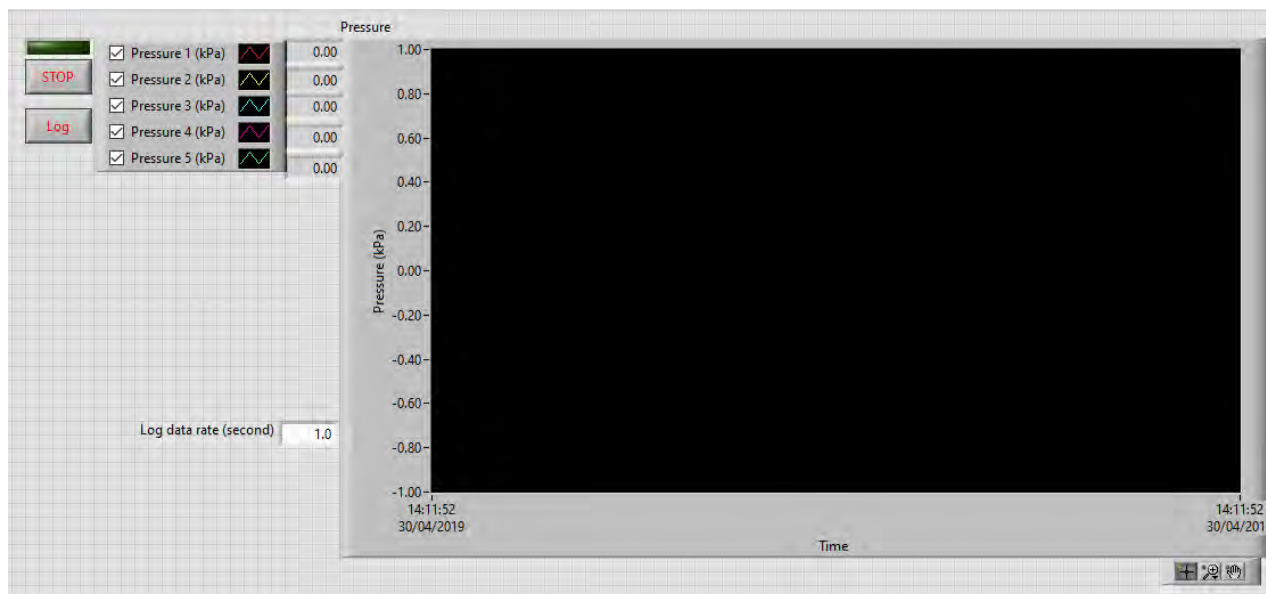
รูปที่ 4 โปรแกรมสำหรับวัดค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ

3.6.2. โปรแกรมสำหรับวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในหอไรเซอร์



รูปที่ 5 โปรแกรมสำหรับวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในหอไรเซอร์

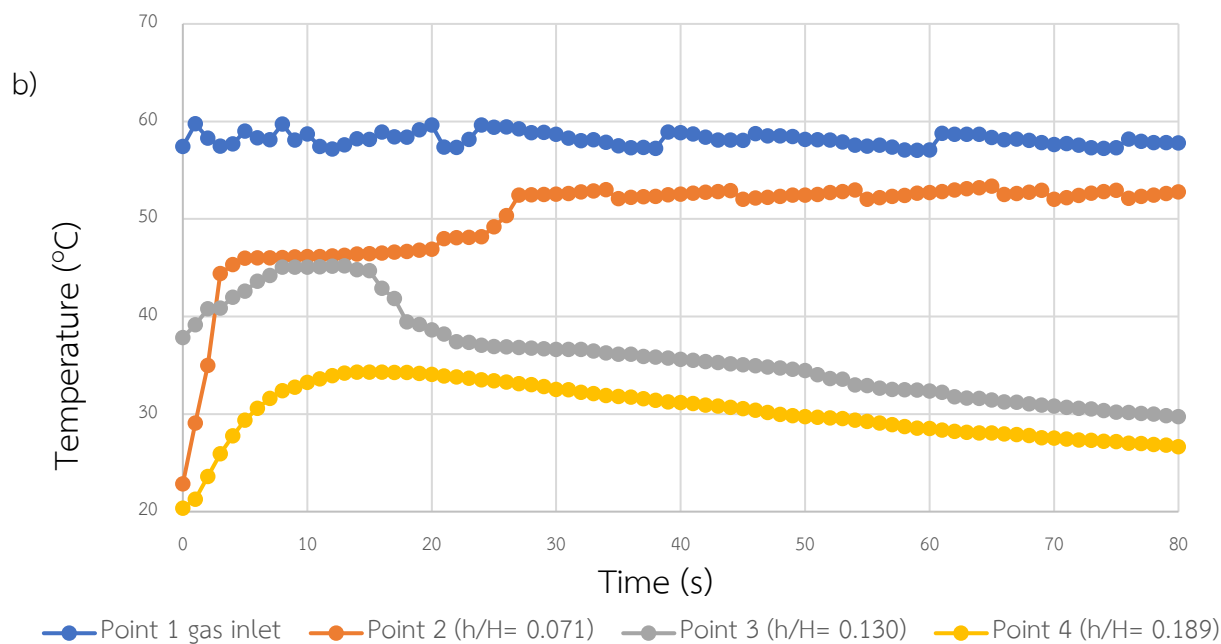
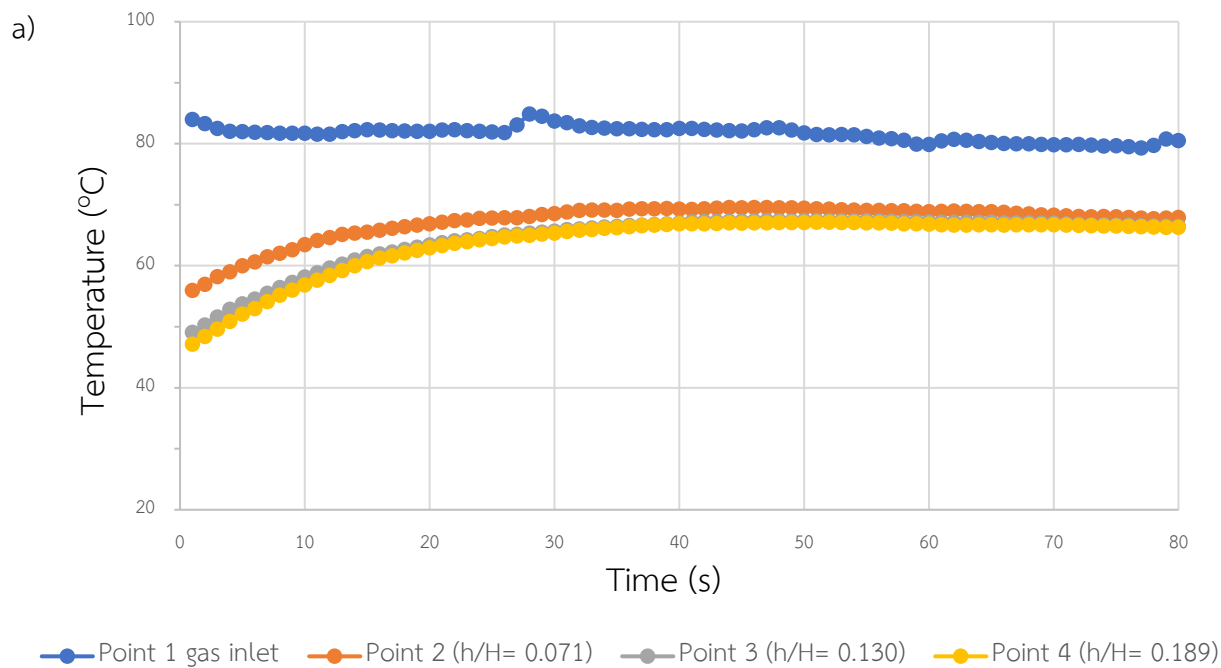
3.6.3. โปรแกรมสำหรับวัดความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในหอไรเซอร์



รูปที่ 6 โปรแกรมสำหรับวัดความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในหอไรเซอร์

บทที่ 4: ผลการวิจัย

4.1. ศึกษาผลของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในหอไรเซอร์ขณะเกิดการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 7 รูปแบบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอไรเซอร์ขณะเกิดการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

a) ระบบที่ใช้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 25 °C, b) ระบบที่ใช้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 5 °C

อุณหภูมิ 5 °C และ 25 °C ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นรูปแบบอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ณ ระดับความสูงที่แตกต่างกันบนหอไรเซอร์ โดยตำแหน่งที่ 1 เป็นตำแหน่งของอุณหภูมิก๊าซขาเข้า และตำแหน่งที่ 4 เป็นตำแหน่งความสูงสุดท้ายที่ยังเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ

จากรูปที่ 7a) พบว่าที่ตำแหน่งที่ 1 อุณหภูมิก๊าซขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมีการถ่ายโอนความร้อนให้กับตัวดูดซับ ณ ตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 อุณหภูมิในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนจากการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง อุณหภูมิจะคงที่แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลแล้ว อุณหภูมิที่ตำแหน่งที่ 2 จะมีค่ามากกว่าตำแหน่งอื่นเนื่องมาจากเป็นตำแหน่งที่ตัวดูดซับหนาแน่นทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับมากกว่าตำแหน่งอื่นๆ

จากรูปที่ 7b) พบว่าที่ตำแหน่งที่ 1 อุณหภูมิก๊าซขาเข้ามีการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมีการถ่ายโอนความร้อนให้กับตัวดูดซับ ณ ตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 อุณหภูมิในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนจากการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

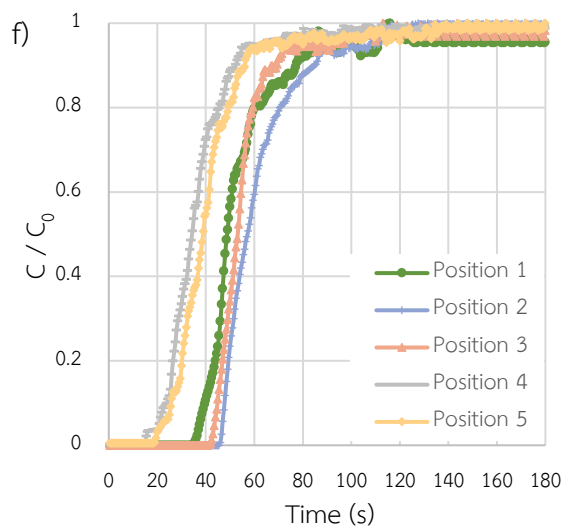
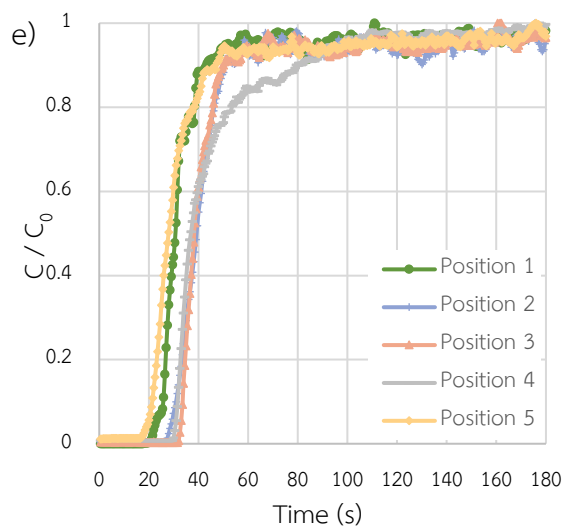
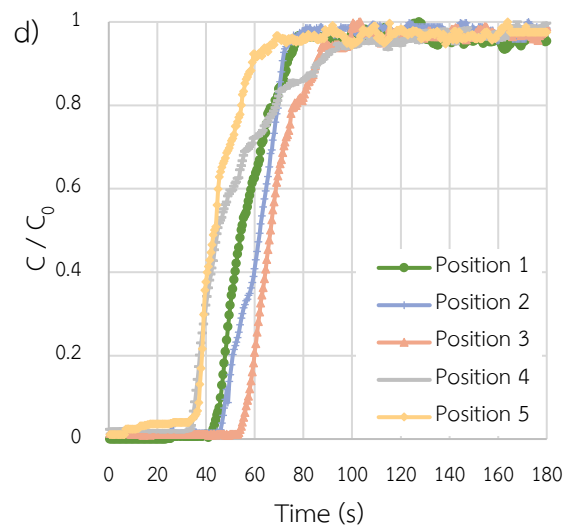
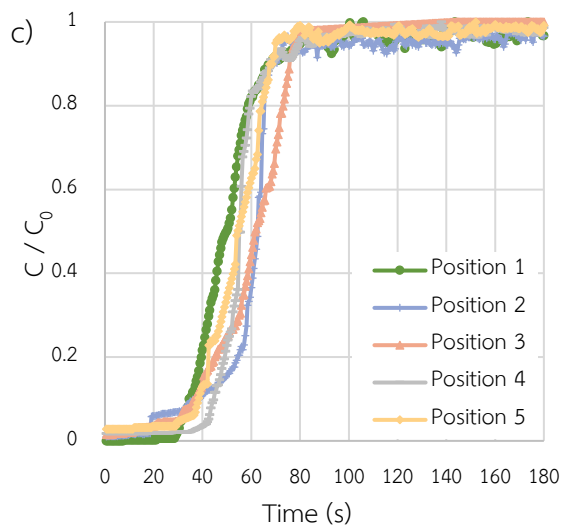
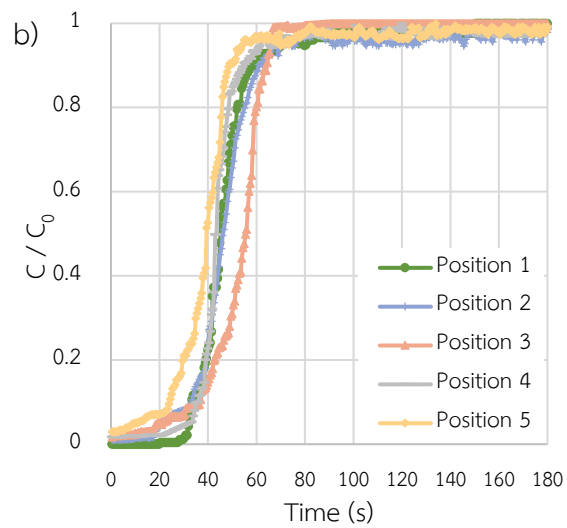
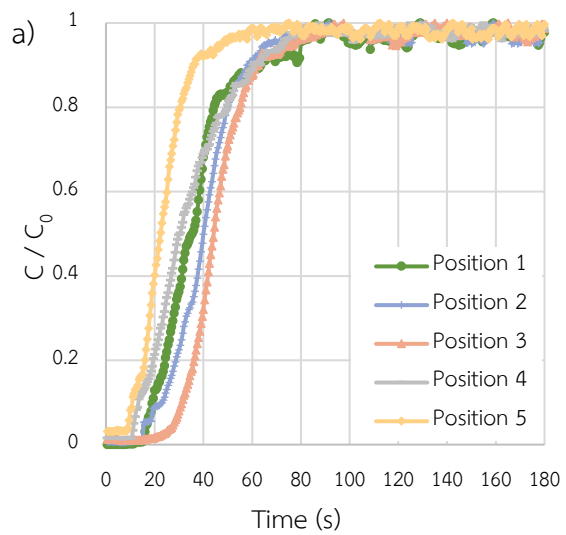
ณ ตำแหน่งที่ 2 ที่วินาทีที่ 25 จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอีกเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับจะสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อได้อีก ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้น้ำหล่อเย็นเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบ

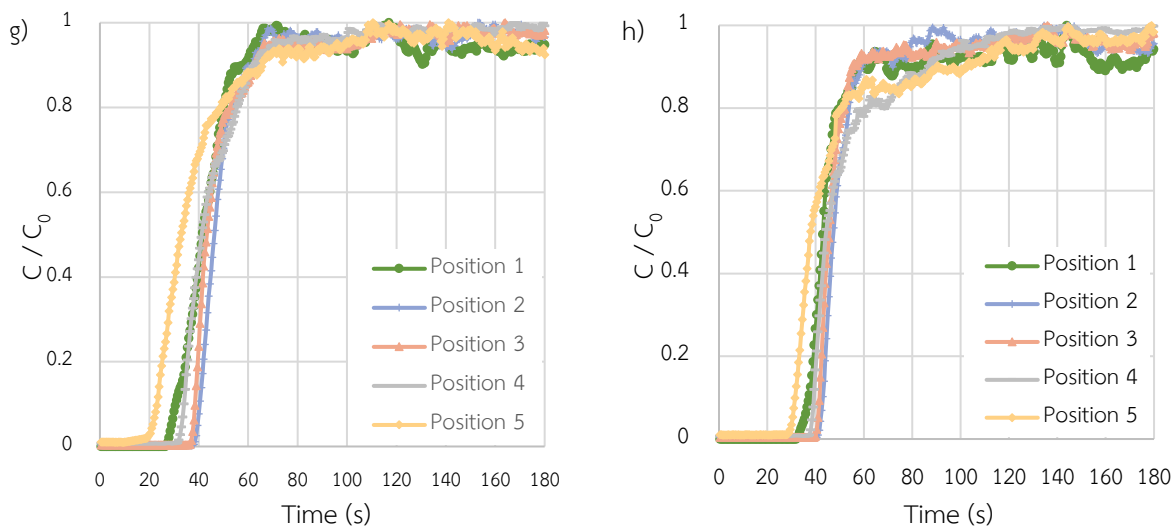
ณ ตำแหน่งที่ 3 และ 4 อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงเล็กน้อยอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากมีน้ำหล่อเย็นมารับความร้อนในระบบ

จากการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 7a) และ 7b) แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในหอไรเซอร์เป็นไปตามทฤษฎี โดยการลดอุณหภูมิจะเป็นการรบกวนสมดุลทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นและระบบที่ใช้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 5 °C จะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 25 °C

4.2. ผลการทดสอบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอไรเซอร์

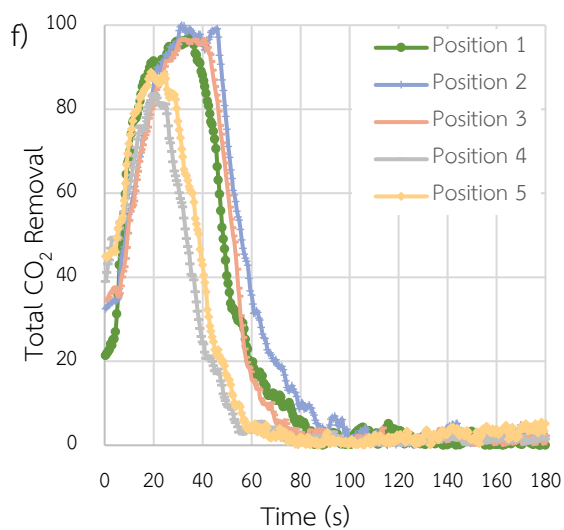
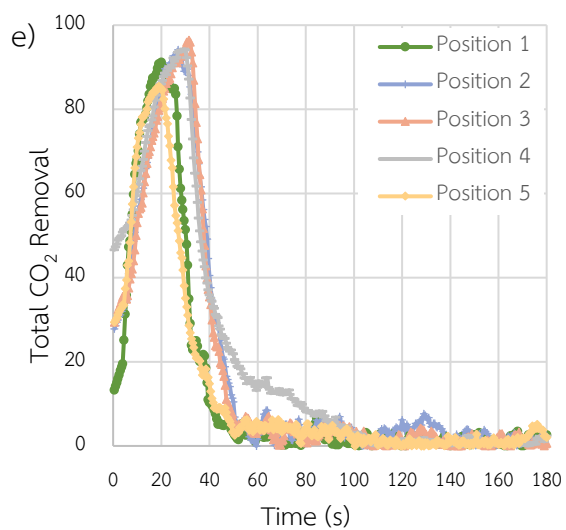
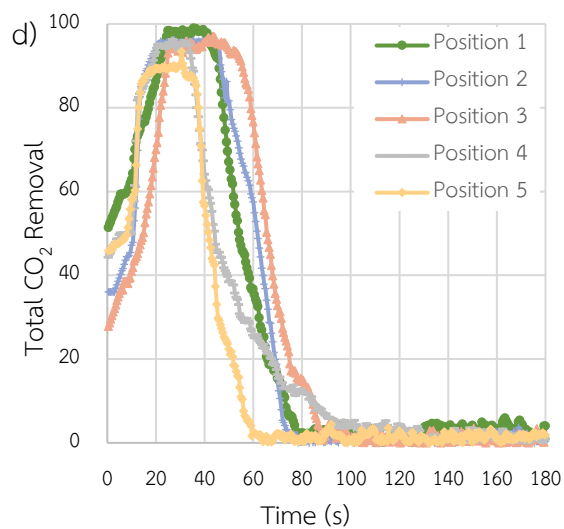
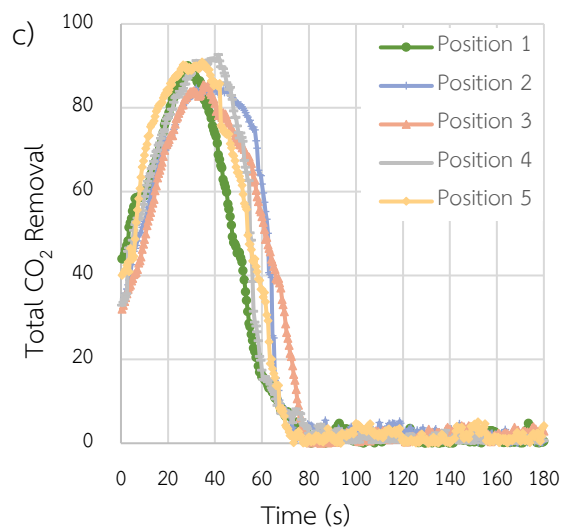
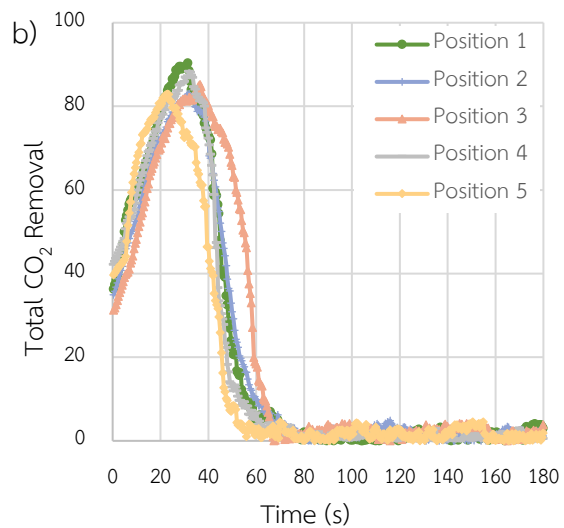
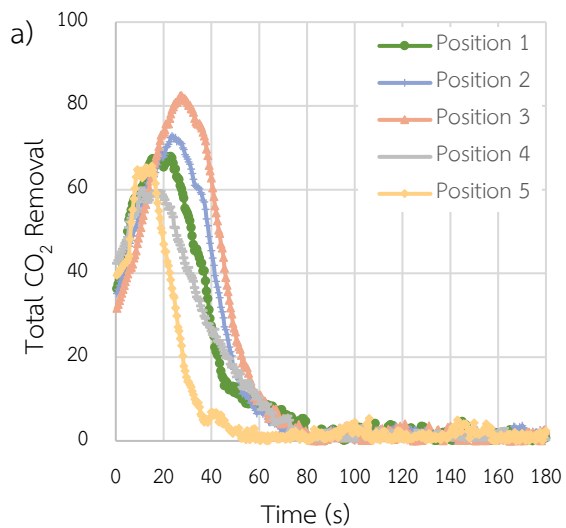
ทำการศึกษาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอไรเซอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ ขณะเกิดปฏิกิริยาดูดซับโดยศึกษาที่สภาวะดังนี้ อัตราการไหลเข้าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (20 LPM และ 30 LPM), อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (5 °C และ 25 °C) และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า (6 % vol และ 12 % vol) ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปต่อไปนี้

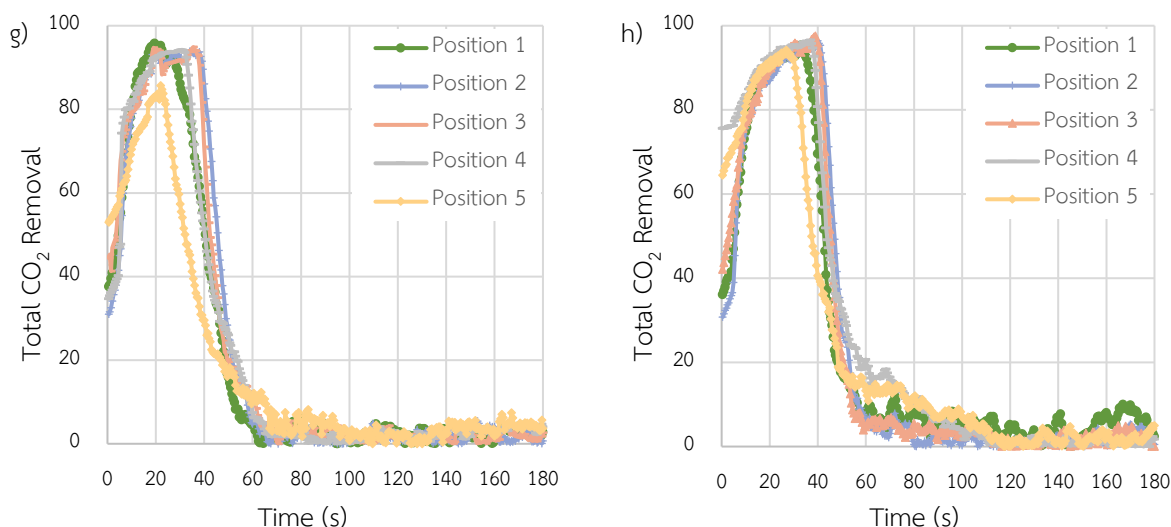




รูปที่ 8 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาและตำแหน่งต่างๆ ขณะเกิดการดูดซับ

- | | | | |
|----|---|----------------------|------------------|
| a) | CO ₂ concentration 6 % vol, | Cooling water 25 °C, | Flow rate 20 LPM |
| b) | CO ₂ concentration 6 % vol, | Cooling water 25 °C, | Flow rate 30 LPM |
| c) | CO ₂ concentration 6 % vol, | Cooling water 5 °C, | Flow rate 20 LPM |
| d) | CO ₂ concentration 6 % vol, | Cooling water 5 °C, | Flow rate 30 LPM |
| e) | CO ₂ concentration 12 % vol, | Cooling water 25 °C, | Flow rate 20 LPM |
| f) | CO ₂ concentration 12 % vol, | Cooling water 25 °C, | Flow rate 30 LPM |
| g) | CO ₂ concentration 12 % vol, | Cooling water 5 °C, | Flow rate 20 LPM |
| h) | CO ₂ concentration 12 % vol, | Cooling water 5 °C, | Flow rate 30 LPM |





รูปที่ 9 เปอร์เซ็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับที่เวลาและตำแหน่งต่างๆ ขณะเกิดการดูดซับ

- a) CO₂ concentration 6 % vol, Cooling water 25 °C, Flow rate 20 LPM
- b) CO₂ concentration 6 % vol, Cooling water 25 °C, Flow rate 30 LPM
- c) CO₂ concentration 6 % vol, Cooling water 5 °C, Flow rate 20 LPM
- d) CO₂ concentration 6 % vol, Cooling water 5 °C, Flow rate 30 LPM
- e) CO₂ concentration 12 % vol, Cooling water 25 °C, Flow rate 20 LPM
- f) CO₂ concentration 12 % vol, Cooling water 25 °C, Flow rate 30 LPM
- g) CO₂ concentration 12 % vol, Cooling water 5 °C, Flow rate 20 LPM
- h) CO₂ concentration 12 % vol, Cooling water 5 °C, Flow rate 30 LPM

จากรูปที่ 8 เมื่อเริ่มการทดลองค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ จากนั้นค่าความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แล้วคงที่เมื่อเข้าสู่สมดุล ซึ่งในแต่ละสถานะจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ต่างกัน

จากรูปที่ 9 เมื่อเริ่มการทดลองค่าเปอร์เซ็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับที่ตำแหน่งต่างๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับไว้ในตัวดูดซับอย่างต่อเนื่อง จากนั้นจะลดลงเนื่องจากเกิดการคายซับแล้วเข้าใกล้ศูนย์เมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล ซึ่งในแต่ละสถานะจะมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับแตกต่างกัน

ตารางที่ 1 ค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Capture Capacity) ที่สภาวะและตำแหน่งต่างๆ

Condition				CO ₂ Capture Capacity (mg CO ₂ /g sorbent)				
	CO ₂ conc. (% vol)	CW temp (°C)	Flow rate (LPM)	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
1	6	25	20	59.41	62.72	78.97	78.75	66.64
2	6	25	30	91.65	98.60	107.59	91.73	83.13
3	6	5	20	80.47	78.16	109.65	101.68	80.62
4	6	5	30	96.86	97.48	115.84	109.07	93.01
5	12	25	20	128.17	157.18	152.87	158.85	128.96
6	12	25	30	182.87	183.40	180.06	167.62	153.40
7	12	5	20	159.55	175.09	178.27	165.02	132.72
8	12	5	30	178.80	192.97	194.47	182.05	167.48

4.2.1. ศึกษาผลของอัตราการไหลเข้าของก๊าซต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 8g) และ 8h) เป็นการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในตำแหน่งต่างๆ ที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซเป็น 20 และ 30 LPM และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า 12 % vol โดยใช้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในระบบเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 5 °C จากการเปรียบเทียบพบว่าการใช้อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM จะใช้เวลาในการดูดซับมากกว่าอัตราการไหลเข้าของก๊าซ 20 LPM เนื่องจากอัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM ส่งผลให้ตัวดูดซับมีการเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วนและสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 20 LPM ซึ่งสอดคล้องกับค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลองที่ 7 และ 8 อัตราการไหล 30 LPM มีค่าเท่ากับ 178.80, 192.97, 194.47, 182.05 และ 167.48 mg CO₂/g sorbent ตาม ลำดับ และที่อัตราการไหล 20 LPM มีค่าเท่ากับ 159.55, 175.09, 178.27, 165.02 และ 132.72 mg CO₂/g sorbent ตามลำดับ ดังนั้นที่อัตราการไหล 30 LPM จะมีค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าที่อัตราการไหล 20 LPM เนื่องจากมีการกระจายตัวของของแข็งภายในหอดูดซับได้ดีกว่า ณ ตำแหน่งที่ 3 ของอัตราการไหล 20 LPM และ 30 LPM จะมีค่ามากที่สุด เนื่องจากที่ตำแหน่งดังกล่าวมีการกระจายตัวของของแข็งดีที่สุด

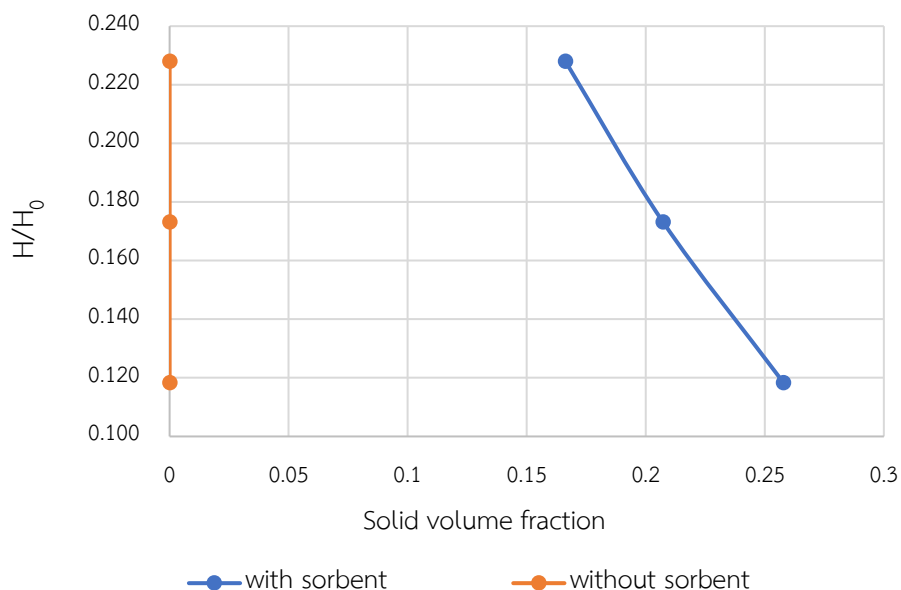
4.2.2. ศึกษาผลของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 9f) และ 9h) แสดงเปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับ โดยใช้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในระบบแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 5 °C และ 25 °C ที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซเป็น 30 LPM และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า 12 % vol จากการเปรียบเทียบพื้นที่ใต้กราฟพบว่าที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 5 °C มีพื้นที่มากกว่าที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 25 °C แสดงว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลองที่ 6 และ 8 อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 5 °C มีค่าเท่ากับ 178.80, 192.97, 194.47, 182.05 และ 167.48 mg CO₂/g sorbent ตามลำดับ และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 25 °C มีค่าเท่ากับ 182.87, 183.40, 180.06, 167.62 และ 153.40 mg CO₂/g sorbent ตามลำดับ ดังนั้นอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 5 °C จะมีค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 25 °C เนื่องจากเมื่อมีการลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นจึงเป็นการรบกวนสมดุลทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น ณ ตำแหน่งที่ 3 ของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 5 °C และตำแหน่งที่ 2 ของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 5 °C จะมีค่ามากที่สุด

4.2.3. ศึกษาผลของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าหอไรเซอร์ต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 8b) และ 8f) เป็นการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในตำแหน่งต่างๆ ที่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า 6 % vol และ 12 % vol ที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซเป็น 30 LPM และที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น 25 °C จากการเปรียบเทียบพบว่าที่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 12 % vol ใช้เวลาในการดูดซับและมีค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า ที่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 6 % vol พบว่าค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตำแหน่งต่างๆ ของการทดลองที่ 2 และ 6 ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า 6 % vol มีค่าเท่ากับ 91.65, 98.60, 107.59, 91.73 และ 83.13 mg CO₂/g sorbent ตามลำดับ และความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า 12 % vol มีค่าเท่ากับ 182.87, 183.40, 180.06, 167.62 และ 153.40 mg CO₂/g sorbent ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงขับเคลื่อน (Driving force) ระบบที่มีความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าจะมีอัตราการแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาก ดังนั้นความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า 12 % vol จะมีค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า 6 % vol ณ ตำแหน่งที่ 2 ของความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า 6 % vol และ 12 % vol จะมีค่ามากที่สุด

4.3. ผลการกระจายของตัวดูดซับของแข็ง (Solid volume fraction) ภายในหอโรเซอรั



รูปที่ 10 สัดส่วนของของแข็งภายในหอโรเซอรัที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM

จากรูปที่ 10 แสดงสัดส่วนของของแข็งภายในหอโรเซอรัที่ความสูงต่างๆ โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าคือ 30 LPM พบว่าสัดส่วนของของแข็งมีค่ามากที่ระดับความสูงต่ำ แสดงว่ามีตัวดูดซับหนาแน่นที่บริเวณด้านล่างของหอโรเซอรัและสัดส่วนของของแข็งจะลดลงเมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงช่วงการไหลแบบ Bubbling ในฟลูอิดเซชัน และเมื่อทำการคำนวณหาช่วงการไหลจะได้ผลที่สอดคล้องกัน [11]

เมื่อมีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของตัวดูดซับมากกว่า จะสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของตัวดูดซับน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอโรเซอรั

อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากงานวิจัยก่อนหน้าพบปัญหาเกี่ยวกับการกระจายตัวของตัวดูดซับในระหว่างการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในงานวิจัยนี้จึงทำการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธี Impregnation และทำการศึกษการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอโรเซอรัที่ตำแหน่งต่างๆ ขณะเกิดปฏิกิริยาดูดซับ โดยศึกษาที่สภาวะต่างๆ ดังนี้ อัตราการไหลเข้าของก๊าซ (20 LPM และ 30 LPM), อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน (5 °C และ 25 °C) และ ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของก๊าซขาเข้า (6 % vol และ 12 % vol)

การดำเนินงานวิจัยในหลายเดือนที่ผ่านมา แล้วนำผลการทดลองมาวิเคราะห์พบว่าตัวดูดซับที่เตรียมด้วยวิธี Impregnation ในขณะที่ทำการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีการกระจายตัวภายในหอโรเซอรัได้ดี ส่งผลให้ตัวดูดซับสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจากงานวิจัยก่อนหน้า

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในหอไรเซอร์ขณะเกิดปฏิกิริยาดูดซับ พบว่าตำแหน่งที่ 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งของก๊าซเข้าอุณหภูมิจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมีการถ่ายโอนความร้อนให้กับตัวดูดซับ เมื่อใช้น้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 25 °C ณ ตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 อุณหภูมิในช่วงแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อใช้น้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 5 °C ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อใช้น้ำหล่อเย็นอุณหภูมิ 5 °C จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอีกเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับจะสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อได้อีก ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายร้อนเมื่อมีการลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นจึงเป็นการรบกวนสมดุลทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น ดังนั้นการใช้น้ำหล่อเย็นอุณหภูมิ 5 °C จะเกิดปฏิกิริยาดูดซับได้ดีกว่าการใช้น้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 25 °C

จากการศึกษาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอไรเซอร์ โดยการวัดค่าความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอไรเซอร์ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนของอัตราการไหลเข้าของก๊าซ พบว่าที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM จะใช้เวลาในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า เนื่องจากที่อัตราการไหลนี้ส่งผลให้ตัวดูดซับมีการเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วนและสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 20 LPM

ในส่วนของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่าที่อุณหภูมิ 5 °C มีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 25 °C โดยสังเกตได้จากค่าความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่ามากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในหอไรเซอร์ดังที่กล่าวมาในข้างต้น

ในส่วนของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าหอไรเซอร์ พบว่าที่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 12 % vol ใช้เวลาในการดูดซับนานกว่าและมีค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า ที่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 6 % vol เนื่องจากผลของแรงขับเคลื่อน (Driving force)

ในส่วนของ การกระจายของตัวดูดซับของแข็ง พบว่าเมื่อมีการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของตัวดูดซับมากกว่า จะสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของตัวดูดซับน้อยกว่าและจากการคำนวณหาช่วงการไหลพบว่ามีการให้แบบ Bubbling fluidized bed ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอไรเซอร์

จากผลการทดลองที่กล่าวมาในข้างต้นพบว่าที่สภาวะอัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น 5 °C ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้า 12 % vol มีค่าความสามารถในการดักจับมากที่สุด

บทที่ 5: สรุปผลการวิจัย

- ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยวิธี Impregnation ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของตัวดูดซับภายในท่อไรเซอร์ให้ดีขึ้น ทำให้สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น
- อัตราการไหลเข้าของก๊าซส่งผลต่อการกระจายตัวของตัวดูดซับภายในท่อไรเซอร์ขณะเกิดการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยิ่งตัวดูดซับมีการเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วนทำให้มีการสัมผัสกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้นจะสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น
- อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน ส่งผลต่อปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยิ่งลดอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นให้ต่ำลงจะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น
- ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 12 % vol สามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 6 % vol

เอกสารอ้างอิง

- [1] ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse effect). [Online]. Available from: <https://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=20>. [2019, April 23].
- [2] S. Boonprasop, B. Chalermssinsuwan, P. Piumsomboon. CO₂ sorption and sorbent depressurized regeneration in circulating-turbulent fluidized bed regime, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, (2019), 102928.
- [3] S. Boonprasop, D. Gidaspow, B. Chalermssinsuwan, P. Piumsomboon. CO₂ Capture in a Multi- stage CFB: Part II: Riser with Multiple Cooling Stages. 2017,5281.
- [4] เชาวเลช ชยพัฒนางกูร. การก่อกองตัวของไหล (Fluidization). [Online]. Available from: <http://www.tint.or.th/nkc/nkc53/content/nstkc53-065.html>. [2019, April 23].
- [5] S. Boonprasop, S. Sangteerasintop, D. Gidaspow, B. Chalermssinsuwan and P. Piumsomboon. Optimum operating parameters of CO₂ sorption in turbulent fluidized bed regime using potassium carbonate supported on gamma alumina solid sorbent, *The Royal Society of Chemistry*, 8, (2018), 39678.
- [6] S. Boonprasop, D. Gidaspow, B. Chalermssinsuwan and P. Piumsomboon. Effect of the operating parameters on the CO₂ capture capacity of potassium carbonate supported on gamma alumina (K₂CO₃/γ-Al₂O₃) using conventional heat regeneration, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 78, (2017), 282–289.
- [7] S. Boonprasop, D. Gidaspow, B. Chalermssinsuwan 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*, 88, (2018), 215–225.
- [8] S. Boonprasop, D. Gidaspow, B. Chalermssinsuwan and P. Piumsomboon, CO₂ sorption and sorbent depressurized regeneration in circulating-turbulent fluidized bed regime, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, (2019), 10292.
- [9] S. Boonprasop, D. Gidaspow, B. Chalermssinsuwan and P. Piumsomboon, CO₂ Capture in a Multistage CFB: Part I: Number of Stages, (2017), 5267.

- [10] ชนะพัฒน์ อัจยุตโกคิน, ธิติพันธ์ ประสานทองโกมล. การศึกษาหอไรเซอร์ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบ อุณหภูมิต่างกัน (The study of nonisothermal CO₂ capture ไรเซอร์). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2560.
- [11] J. Yates, P. Lettieri. Fluidized - Bed Reactors: Processes and Operating Conditions, Switzerland, 2016.

ภาคผนวก

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาและตำแหน่งต่างๆ ขณะเกิดการดูดซับ

จากผลการทดลองความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 12 % vol ที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น 5 °C ณ ตำแหน่งที่ 1 โดย C คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้

- ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากที่สุด ณ ตำแหน่งที่ 1

$$C_{\max} = 11.58 \text{ \% vol}$$

- ณ เวลาที่ 32.5 วินาที ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้

$$C = 0.05 \text{ \% vol}$$

- อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลา 32.5 วินาที กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากที่สุด

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{0.05 \text{ \% vol}}{11.58 \text{ \% vol}}$$

$$\frac{C}{C_{\max}} = 0.0043$$

นำค่าอัตราส่วนที่เวลาแตกต่างกัน มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาต่างๆ

2. การคำนวณเปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับที่เวลาและตำแหน่งต่างๆ ขณะเกิดการดูดซับ

จากผลการทดลอง ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 12 % vol ที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น 5 °C ณ ตำแหน่งที่ 1

- เปอร์เซ็นต์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับ ณ เวลาที่ 32.5 วินาที

$$\% \text{ CO}_2 \text{ removal after adsorption} = \left(1 - \frac{C}{C_{\max}} \right) \times 100$$

$$\% \text{ CO}_2 \text{ removal after adsorption} = (1 - 0.0043) \times 100$$

$$\% \text{ CO}_2 \text{ removal after adsorption} = 99.57 \%$$

จากผลการทดลอง เพื่อหาเส้นอ้างอิง (base line) หลังจากการเกิดปฏิกิริยาดูดซับ ที่สภาวะความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 12 % vol, อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น 5 °C ณ ตำแหน่งที่ 1

- ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากที่สุด ณ ตำแหน่งที่ 1

$$C_{\max} = 11.25 \% \text{ vol}$$

- ณ เวลาที่ 32.5 วินาที ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้

$$C = 10.69 \% \text{ vol}$$

- อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลา 32.5 วินาที กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากที่สุด

$$\frac{C}{C_{\max}} = \frac{10.69\% \text{ vol}}{11.25\% \text{ vol}}$$

$$\frac{C}{C_{\max}} = 0.95$$

- เปอร์เซ็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับหลังเกิดปฏิกิริยาดูดซับ ณ เวลาที่ 32.5 วินาที

$$\% \text{ CO}_2 \text{ removal base line} = \left(1 - \frac{C}{C_{\max}} \right) \times 100$$

$$\% \text{ CO}_2 \text{ removal base line} = (1 - 0.95) \times 100$$

$$\% \text{ CO}_2 \text{ removal base line} = 4.98 \%$$

- เปอร์เซ็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับ ณ เวลาที่ 32.5 วินาที

$$\% \text{ CO}_2 \text{ removal} = \% \text{ CO}_2 \text{ removal after adsorption} - \% \text{ CO}_2 \text{ removal base line}$$

$$\% \text{ CO}_2 \text{ removal} = 99.57 \% - 4.98 \%$$

$$\% \text{ CO}_2 \text{ removal} = 94.59 \%$$

นำค่าเปอร์เซ็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับที่เวลาแตกต่างกัน มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับที่เวลาต่างๆ

3. การคำนวณความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Capture Capacity)

จากผลการทดลอง ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 12 % vol ที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM และอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น 5 °C ณ ตำแหน่งที่ 1

- ความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{PV}{RT}$$

$$\frac{dn_{\text{CO}_2}}{dt} = \frac{P}{RT} \left(\frac{dV}{dt} \right)$$

$$\frac{dn_{\text{CO}_2}}{dt} = \frac{PF}{RT}$$

$$\frac{dn_{\text{CO}_2}}{dt} = \left(\frac{\% \text{CO}_2}{100} \right) \frac{PF}{RT}$$

$$dn_{\text{CO}_2} = \frac{PF}{100RT} \% \text{CO}_2 dt$$

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{PF}{100RT} \int \% \text{CO}_2 dt$$

$$n_{\text{CO}_2} = \frac{PF}{100RT} (\text{area})$$

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{44PF}{100RT} (\text{area})$$

โดย พื้นที่ใต้กราฟ ณ ตำแหน่งที่ 1 (area) = 369.87 % vol•s, อัตราการไหลเข้าของก๊าซ (F) = 30 LPM R = 0.082 L•atm / K•mol, อุณหภูมิ (T) = 333 K และความดัน (P) = 1 atm,

$$m_{\text{CO}_2} = \frac{44 \times 1 \times 30}{100 \times 0.082 \times 333} (369.87)$$

$$m_{\text{CO}_2} = 178.80 \text{ mg CO}_2 / \text{g sorbent}$$

ดังนั้น ความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่งที่ 1 เท่ากับ 178.799 mg CO₂/g sorbent

4. การคำนวณสัดส่วนของของแข็ง (Solid Volume Fraction) ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในหอโรเซอรั

จากผลการทดลอง ที่อัตราการไหลเข้าของก๊าซ 30 LPM ณ ตำแหน่งที่ 2

$$\epsilon_s = \frac{\Delta P}{\rho_s g \Delta h}$$

โดยที่

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

$$\Delta P = 102.317 \text{ kPa} - 101.253 \text{ kPa}$$

$$\Delta P = 1.064 \text{ kPa} = 1,064 \text{ Pa}$$

จาก $\rho_s = 3,560 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ และ $\Delta h = 0.118 \text{ m}$

$$\epsilon_s = \frac{1,064 \text{ Pa}}{3,560 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.118 \text{ m}}$$

$$\epsilon_s = 0.26$$

นำค่าสัดส่วนของของแข็งที่ได้ในแต่ละตำแหน่ง ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของความสูงของหอโรเซอรักับสัดส่วนของของแข็ง และพิจารณาช่วงการไหลจากแนวโน้มของสัดส่วนของของแข็งที่ได้ในแต่ละตำแหน่ง

- อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า

$$v = 30 \text{ LPM}$$

- อัตราเร็วของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า

$$v = \frac{\dot{v}}{A}$$

จาก พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ (A) = 0.0025 m²

$$v = \frac{30 \text{ LPM}}{0.0025 \text{ m}^2} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

$$v = 0.2 \text{ m/s}$$

- Reynolds number

$$Re = \frac{\rho_g v d_p}{\mu}$$

จาก $\rho_g = 1.236 \text{ kg/m}^3$, $v = 0.2 \text{ m/s}$, $d_p = 200 \text{ }\mu\text{m}$, $\mu = 1.47 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$

$$Re = \frac{1.236 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 200 \text{ }\mu\text{m}}{1.47 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}}$$

$$Re = 3.36$$

- Archimedes number

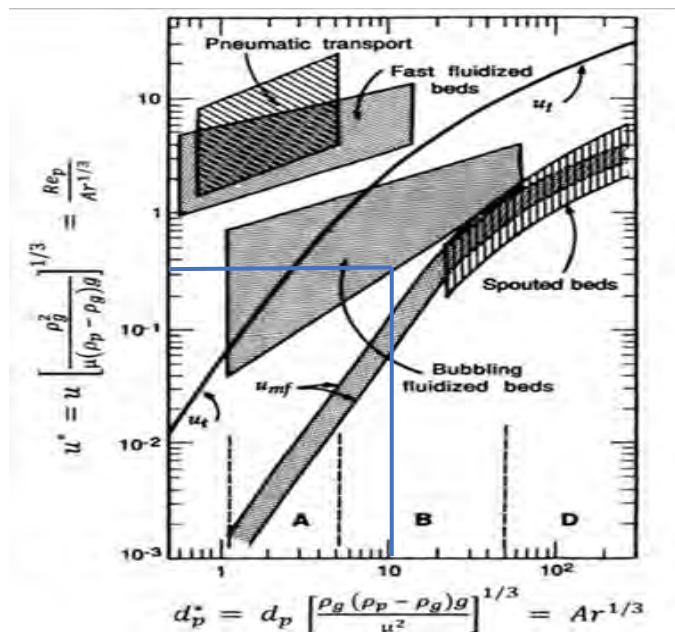
$$Ar^{\frac{1}{3}} = d_p \left[\frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

จาก $\rho_g = 1.236 \text{ kg/m}^3$, $d_p = 200 \text{ }\mu\text{m}$, $\mu = 1.47 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, $\rho_s = 3,560 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$$Ar^{1/3} = 200 \text{ }\mu\text{m} \left[\frac{1.236 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(3,560 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 1.236 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) 9.81 \text{ m/s}^2}{(1.47 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s})^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$Ar^{1/3} = 11.69$$

$$\frac{Re}{Ar^{1/3}} = \frac{3.36}{11.69} = 0.29$$



รูปที่ 11 กราฟแสดงช่วงการไหลของระบบฟลูอิดไรซ์เบด [11]

จากกราฟนำค่า $Ar^{1/3}$ และ $\frac{Re}{Ar^{1/3}}$ ไปอ่านค่าจากกราฟเพื่อหาช่วงของการไหลภายในหอโรเซอรั พบว่าเป็นช่วงการไหลแบบ Bubbling fluidized bed