



โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

การพัฒนาระบบการจับ CO₂ ด้านดาว์นเนอร์ของหน่วยปฏิบัติการซีเอฟบี

Development a CO₂ Capture System on Downer Side of CFB Unit

โดย

นางสาวรัญญา	ขันติอุดม	รหัสนิสิต	5832961523
นางสาวรัญจิรา	มณีวัฒนกุลผล	รหัสนิสิต	5832987923

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the senior project authors' files submitted through the faculty.

ชื่อโครงการ การพัฒนาระบบการจับ CO₂ ในฝั่งดาว์นเนอร์ของหน่วยปฏิบัติการซีเอฟบี
ชื่อนิติผู้ทำโครงการ น.ส. วรัญญา ขั้นตอนิอดม
 น.ส. ธัญจิรา มณีวัฒนกุลผล
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์
ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกซึ่งเป็นสาเหตุหลักของปัญหาภาวะโลกร้อน ในปัจจุบันจึงได้มีการนำเทคโนโลยีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาช่วยลดปัญหาดังกล่าว โดยงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่อยอดจากระบบการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของหน่วยปฏิบัติการฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulation Fluidized Bed) ในฝั่งไรเซอร์ (Riser) กล่าวคือ ฝั่งดาว์นเนอร์ (Downer) ของหน่วยปฏิบัติการฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulation Fluidized Bed) ได้ถูกออกแบบและจัดสร้างขึ้นใหม่เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟื้นฟูตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้จนเป็นโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) อีกทั้งศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมและประสิทธิภาพในการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ให้สามารถนำตัวดูดซับกลับไปใช้ใหม่ได้ การดำเนินงานวิจัยในระบบนี้ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) ชนิดสำเร็จรูปเป็นสารตั้งต้น และจากงานวิจัยอ้างอิง ได้เลือกศึกษาผลของความดันเริ่มต้นในระบบที่ -0.67, -0.40 และ -0.13 barg และผลของอุณหภูมิการฟื้นฟูตัวดูดซับที่ 100 °C, 110 °C และ 120 °C ในระบบการทดลองแบบกะ (Batch system) ซึ่งพบว่า ที่สภาวะความดันเริ่มต้นที่ต่ำกว่าบรรยากาศมาก (-0.67 barg) และอุณหภูมิสูง (120 °C) จะสามารถคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับได้ 34.85% โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าที่สภาวะความดันเริ่มต้นที่ต่ำกว่าบรรยากาศน้อยกว่า (-0.13 barg) และอุณหภูมิต่ำกว่า (100 °C) ซึ่งสามารถคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับได้เพียง 5.69% โดยน้ำหนัก

คำสำคัญ: การจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, หน่วยปฏิบัติการฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน,
 ฝั่งดาว์นเนอร์

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิติ วรัญญา ขั้นตอนิอดม

ลายมือชื่อนิติ ธัญจิรา มณีวัฒนกุลผล

สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก [ลายมือ]

Title Development a CO₂ Capture System on Downer Side of CFB Unit

Student name Miss Waranya Khantiudom
Miss Thanjira Maneewatthanakulphol

Advisor Prof. Dr. Pornpote Piumsomboon

**Department of Chemical Technology, Faculty of Science,
Chulalongkorn University, Academic Year 2018**

ABSTRACT

Carbon dioxide from combustion process is one of main causes of Greenhouse effect. Now, there are several CO₂ capture technologies being developed to handle this problem. This research is a further study of CO₂ adsorption system on the Circulation Fluidized Bed unit (CFB) focusing on the downer. The downer side was designed, constructed and investigated operating factors that affected the behavior and performance of CO₂ desorption from spent adsorbent. In this research, NaHCO₃ will be used as the spent adsorbent. The operating factors are initial pressures and temperatures of regenerable system. By varying the initial pressures of -0.67, -0.40, and -0.13 barg and the temperatures of 100 °C, 110 °C and 120 °C in a batch system, CO₂ desorption from the spent sorbent were observed. This research found that at the low initial pressure (-0.67 barg) and high temperature (120 °C), 34.85% by weight of CO₂ can be desorbed from the adsorbent, while only 5.69% by weight of CO₂ is desorbed at high initial pressure (-0.13 barg) and low temperature (100 °C).

Keywords: CO₂ capture, Circulation Fluidized Bed unit (CFB), Downer side

Department of Chemical Technology

Student's signature

.....
.....

Student's signature

.....
.....

Major: Chemical Engineering

Advisor's signature

.....
.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการการเรียนการสอนเพื่อประสบการณ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ที่คอยสนับสนุน ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำเกี่ยวกับแนวทางการทำโครงการวิจัย ซึ่งทำให้คณะผู้ทำโครงการได้รับข้อมูลที่ครบถ้วน และเป็นประโยชน์ สามารถนำมาวิเคราะห์ผลการวิจัยได้อย่างสมบูรณ์ ผู้จัดทำโครงการจึงขอกราบขอบพระคุณในความกรุณา ความเอาใจใส่ของอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับโครงการวิจัยและถ่ายทอดความรู้วิชาฟลูอิดเซชันเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการนำมาต่อยอดในโครงการวิจัยฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.สุทธิชัย บุญประสพ นักวิจัยประจำห้องปฏิบัติการฟลูอิดเซชัน ที่คอยให้ความรู้และคำปรึกษาด้านวิชาการเกี่ยวกับการดำเนินการวิจัย รวมถึงถ่ายทอดความรู้ด้านอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย อีกทั้งคอยให้ความช่วยเหลือและติดตามการวิจัยจนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณพี่ชาติยา ตรีพูนสุข และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ที่คอยให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับโปรแกรม และให้คำปรึกษาด้านต่าง ๆ เกี่ยวกับโครงการนี้

คณะผู้จัดทำโครงการ

วรัญญา ชันติอุดม

ธัญจิรา มณีวัฒนกุลผล

สารบัญ

บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ	1
1.2. วัตถุประสงค์.....	2
1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4. สมมติฐาน.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	3
2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	8
3.1. แผนภาพแสดงระบบโดยรวม	8
3.2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	9
3.3. ระเบียบวิธีวิจัย.....	9
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	13
4.1 การออกแบบ และสร้างหน่วยปฏิบัติการฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulation Fluidized Bed) ในฝั่งดาว์นเนอร์.....	13
4.2 ผลของความดันเริ่มต้นในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ	15

4.3	ผลของอุณหภูมิการคายซ้บในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซ้บ	25
4.4	การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการคายซ้บต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซ้บ โดยที่โมลเริ่มต้นของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบมีค่าใกล้เคียงกัน	27
4.5	การเปรียบเทียบผลของความดันเริ่มต้นในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซ้บ โดยที่โมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบมีค่าใกล้เคียงกัน	30
	อภิปรายและวิจารณ์ผลการวิจัย	33
	บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	37
5.1	สรุปผลการวิจัย	37
5.2	ข้อเสนอแนะ	37
	เอกสารอ้างอิง	38
	ภาคผนวก.....	39
1.	ตัวอย่างการคำนวณ	39
2.	ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของแต่ละการทดลอง	43
3.	รูปประกอบงานวิจัยเพิ่มเติม	44
4.	โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย	46

สารบัญรูป

รูปที่ 1 แสดงแผนภาพแสดงระบบโดยรวม	8
รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองฝังดาว์นเนอร์.....	13
รูปที่ 3 แสดงขนาดส่วนต่าง ๆ ของฝังดาว์นเนอร์	14
รูปที่ 4 แสดงภาพจริงของฝังดาว์นเนอร์	14
รูปที่ 5 (a) และ (b) แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับในช่วงตั้งแต่ Preheating และในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 100 °C) ตามลำดับ	15
รูปที่ 6 แสดงความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบ ในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 100 °C).....	16
รูปที่ 7 แสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบ ในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 100 °C).....	17
รูปที่ 8 (a) และ (b) แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับในช่วงตั้งแต่ Preheating และในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 110 °C) ตามลำดับ	18
รูปที่ 9 แสดงความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบ ในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 110 °C).....	19
รูปที่ 10 แสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบ ในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 110 °C).....	20
รูปที่ 11 (a) และ (b) แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับในช่วงตั้งแต่ Preheating และในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 120 °C) ตามลำดับ	21
รูปที่ 12 แสดงความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในระบบในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 120 °C).....	23
รูปที่ 13 แสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบ ในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 120 °C).....	23
รูปที่ 14 แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับที่ความดันเริ่มต้น -0.67 barg ..	25
รูปที่ 15 แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับที่ความดันเริ่มต้น -0.40 barg ..	25
รูปที่ 16 แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับที่ความดันเริ่มต้น -0.13 barg ..	26
รูปที่ 17 แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับของการทดลองที่ 5 และ 6.....	27

รูปที่ 18 แสดงประสิทธิภาพการคายซ้บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (% g-CO₂ ที่ถูกคายซ้บต่อ g-CO₂ เริ่มต้น)..... 28

รูปที่ 19 แสดงประสิทธิภาพการคายซ้บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (g-CO₂ ที่ถูกคายซ้บต่อ g ตัวดูดซ้บ) 29

รูปที่ 20 แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซ้บของการทดลองที่ 3 และ 7..... 30

รูปที่ 21 แสดงประสิทธิภาพการคายซ้บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (% g-CO₂ ที่ถูกคายซ้บต่อ g-CO₂ เริ่มต้น)..... 31

รูปที่ 22 แสดงประสิทธิภาพการคายซ้บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (g-CO₂ ที่ถูกคายซ้บต่อ g ตัวดูดซ้บ)..... 32

รูปที่ 23 แสดงรอยร้วที่ตรวจสอบพบของห่อฟื้นฟูสภาพตัวดูดซ้บ..... 44

รูปที่ 24 แสดงการดำเนินการตรวจสอบห่อฟื้นฟูสภาพ 44

รูปที่ 25 แสดงเครื่องจำลองห่อฟื้นฟูสภาพขนาด Lab-scale 45

รูปที่ 26 แสดงปัญหาที่พบขณะทำการวิจัย..... 46

รูปที่ 27 แสดงโปรแกรมบันทึกอัตราการไหล FlowPlot..... 46

รูปที่ 28 แสดงโปรแกรมบันทึกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO₂ Analyzer 47

รูปที่ 29 แสดงโปรแกรมบันทึกอุณหภูมิ Phidget (Temperature) 47

รูปที่ 30 แสดงโปรแกรมบันทึกความดัน SPARKvue..... 48

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 แบบการปรับปริมาตรของระบบที่ใช้ในแต่ละการทดลอง	12
ตารางที่ 2 แสดงโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นในระบบของการทดลองที่ 5 และ 6	27
ตารางที่ 3 แสดงประสิทธิภาพการคายซ้บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองที่ 5 และ 6	28
ตารางที่ 4 แสดงโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นในระบบของการทดลองที่ 3 และ 7	30
ตารางที่ 5 แสดงประสิทธิภาพการคายซ้บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองที่ 3 และ 7	31
ตารางที่ 6 แสดงค่าพารามิเตอร์และโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบของการทดลองที่ 5 และ 6	40
ตารางที่ 7 แสดงค่าพารามิเตอร์และโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบของการทดลองที่ 3 และ 7	40
ตารางที่ 8 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของแต่ละการทดลอง	43

บทที่ 1 บทนำ

1.1. ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจ

ปัญหาภาวะโลกร้อน เป็นปัญหาที่ถูกสังสมมาอย่างยาวนาน นับตั้งแต่มีการปฏิวัติอุตสาหกรรม ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง โดยสาเหตุหลักของปัญหานี้เกิดจากการที่โลกมีก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศมากเกินไป ซึ่งหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่มีปัญหาอยู่นั้นคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากรายงานของ IPCC พบว่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและยังไม่มีแนวโน้มที่จะลดลงในระยะเวลายาวไกล โดยปัญหานี้ได้เริ่มต้นขึ้นนับตั้งแต่มนุษย์รู้จักการนำเชื้อเพลิงถ่านหินและน้ำมันมาใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งเชื้อเพลิงเหล่านั้นล้วนแล้วแต่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เมื่อผ่านกระบวนการการเผาไหม้ จึงทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น ดังนั้นถ้าสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ออกสู่ชั้นบรรยากาศได้ก็จะสามารถลดผลกระทบของภาวะโลกร้อนลงได้ ซึ่งการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสามารถทำได้หลายวิธี อาทิ การหันไปใช้แหล่งพลังงานสะอาด หรือการเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามกระบวนการต่าง ๆ ข้างต้นนั้น ยังไม่สามารถลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากและมีต้นทุนสูง ดังนั้นเทคโนโลยีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากก๊าซเผาไหม้ ซึ่งแหล่งกำเนิดหลักขนาดใหญ่ คือ โรงไฟฟ้าพลังงานฟอสซิล หรือโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จากนั้นทำการขนส่งก๊าซไปยังสถานที่จัดเก็บและเก็บกักไว้ในสถานที่ที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่สามารถกลับเข้าสู่บรรยากาศได้ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่หลายฝ่ายกำลังให้ความสนใจ และพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้ จะใช้ระบบ Circulating Fluidized bed (CFB) ซึ่งเป็นระบบที่ภายในมีอนุภาคของแข็งและของไหลซึ่งมีอันตรกิริยาระหว่างกัน โดยอนุภาคของแข็งจะมีพฤติกรรมเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล นอกจากนี้ยังมีกลไกในการแยกอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีแล้ว กลับมาฟื้นฟูสภาพและป้อนกลับเข้าสู่ระบบเพื่อกลับไปทำปฏิกิริยาในรอบการทำงานต่อไป ระบบ CFB มีส่วนประกอบหลัก คือ Riser, Cyclone, Downer และ Return system โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาต่อยอดจากการใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K₂CO₃) เป็นตัวดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซเผาไหม้ทางด้านฝั่ง Riser แล้ว โดยพัฒนาออกแบบและทดสอบการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับในฝั่ง Downer ซึ่งเป็นส่วนของการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ แต่เปลี่ยนชนิดตัวดูดซับเป็นโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃)

เนื่องจากหาง่ายและส่งผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมน้อย โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบ คือ อุณหภูมิและความดันเริ่มต้นของระบบในการคายซับ และศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการคายซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ Na_2CO_3 เพื่อสามารถนำตัวดูดซับกลับไปใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2. วัตถุประสงค์

1. พัฒนา และทดสอบการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับตัวดูดซับ Na_2CO_3 ในทางฝั่ง Downer
2. ศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ Na_2CO_3
3. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ Na_2CO_3 เพื่อสามารถนำตัวดูดซับกลับไปใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับทักษะในการทำงานวิจัย การเรียงลำดับความคิด และการแก้ไขปัญหาอย่างมีระบบตามหลักของเหตุและผล
2. ได้สร้างองค์ความรู้ และความเข้าใจต่าง ๆ ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ Na_2CO_3 ในทางฝั่ง Downer

1.4. สมมติฐาน

1. อุณหภูมิและความดันเริ่มต้นของระบบมีผลต่อการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ Na_2CO_3
2. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระบบในการคายซับ จะส่งผลให้สามารถคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับได้มากขึ้น
3. การคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันเริ่มต้นของระบบมีค่าต่ำบรรยากาศมาก (มีความเป็นสุญญากาศมาก) จะส่งผลให้สามารถคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับได้มากขึ้น

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1.1. ปัญหาภาวะโลกร้อน

ภาวะเรือนกระจก คือ ภาวะที่ชั้นบรรยากาศของโลกกระทำตัวเสมือนกระจกที่ยอมให้รังสีคลื่นสั้นผ่านลงมายังผิวโลกได้ แต่จะดูดกลืนรังสีคลื่นยาวช่วงอินฟราเรดที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลกเอาไว้ จากนั้นก็จะคายพลังงานความร้อนให้กระจายอยู่ภายในชั้นบรรยากาศและพื้นผิวโลกจึงเปรียบเสมือนกระจกที่ปกคลุมผิวโลกให้มีภาวะสมดุลทางอุณหภูมิและเหมาะสมต่อสิ่งมีชีวิตบนผิวโลก

แต่ในปัจจุบันมีก๊าซบางชนิดสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศมากเกินไปจนสมดุล เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC_8) และ ก๊าซไนตรัส-คาร์บอนไดออกไซด์ (N_2O) เป็นต้น ซึ่งก๊าซเหล่านี้สามารถดูดกลืนรังสีคลื่นยาวช่วงอินฟราเรด และคายพลังงานความร้อนได้ดี พื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศจึงมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศของโลก และสิ่งมีชีวิตพื้นผิวโลกอย่างมากมาย กลายเป็นปัญหาภาวะโลกร้อน [1]

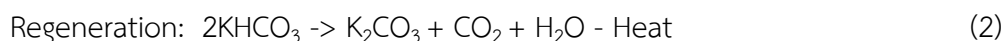
2.1.2. CO_2 capture system

CO_2 capture system คือระบบดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากเข้าสู่ชั้นบรรยากาศ โดยวิธีการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีได้หลายวิธี อาทิ วิธีการดูดซึม (Absorption) และ วิธีการดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น [2]

การใช้ตัวดูดซับของแข็งเป็นวิธีหนึ่งในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ประหยัดค่าใช้จ่ายและประหยัดพลังงาน เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง มีความสะดวกในการจัดหาตัวดูดซับ มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม รวมถึงมีการใช้พลังงานในการฟื้นฟูสภาพต่ำ

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [3] พบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดักจับได้อย่างมีประสิทธิภาพบน Alkaline carbonate solid sorbent เช่น K_2CO_3 , Na_2CO_3 , และ Li_2CO_3 โดยที่ K_2CO_3 ได้ให้ผลในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากกว่า

จากปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ K_2CO_3 solid sorbent



พบว่า ปฏิกิริยาแบ่งได้เป็น 2 ชั้น คือ Carbonation และ Regeneration ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และดูดความร้อนตามลำดับ โดย K_2CO_3 จะทำปฏิกิริยากับ CO_2 และ H_2O ได้เป็น $KHCO_3$ หลังจากดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว (Carbonation reaction, สมการ (1)) ในการสลาย $KHCO_3$ สามารถทำได้โดยวิธี Thermal regeneration ให้กลับมาเป็น K_2CO_3 และ CO_2 โดยการให้ความร้อน (Regeneration, สมการ (2)) จะเห็นได้ว่า ความร้อนเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมกระบวนการที่เกิดขึ้น

2.1.3. Chemical Adsorption of Regenerable Solid Sorbent

การดูดซับทางเคมีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านการฟื้นฟูได้ (Chemical Adsorption of CO_2 with a regenerable solid sorbent) เป็นอีกเทคนิคของการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกระบวนการนี้ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

เมื่อปล่อยก๊าซเสียที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ระบบ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับของแข็ง จากนั้นตัวดูดซับของแข็งที่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มากจะถูกส่งไปฟื้นฟูในขั้นตอน Sorbent regeneration ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในของแข็งจะถูกคายซับออกได้ด้วยความร้อน

ความร้อนที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ ขึ้นกับประเภทของตัวดูดซับที่ใช้ และสถานะทางเคมีที่ปรากฏระหว่างที่เกิดการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และจากนั้นตัวดูดซับของแข็งจะถูกส่งกลับไปใช้งานใหม่อีกครั้ง [3]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [4] ขั้นตอนในการฟื้นฟูสภาพจะอยู่ในส่วนที่เรียกว่า Downer ของ Circulating fluidized bed และจะทำการให้ความร้อนโดยการใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนจากน้ำ และ Flue gas โดยใช้ความร้อนของ flue gas ที่อุณหภูมิ 100-130 °C ให้ลดลงไปที่ 55 °C จะได้ตัวดูดซับที่ไม่มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือมีน้อยมาก เพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้ง

2.1.4. Fluidization

Fluidization คือ กระบวนการหรือวิธีการที่มีของแข็งซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดสัมผัสกับของไหล แล้วอนุภาคของแข็งเหล่านี้จะประพฤติตัวให้มีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยที่จะปล่อยของไหลให้ผ่าน มาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลจะไหลผ่านชั้นเม็ดของแข็งแล้วออกทาง ส่วนบนของหอทดลองที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก (Column) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้ มากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งเห็นเม็ดของแข็งเริ่มขยับตัว และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน นั่นคือ ลักษณะของของแข็งที่มีสมบัติคล้ายของไหล กล่าวคือมีการไหลแบบหมุนเวียนของเม็ดของแข็งภายใน เบด (bed) [5]

2.2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1. Effect of the operating parameters on the CO₂ capture capacity of potassium carbonate supported on gamma alumina (K₂CO₃ / γ -Al₂O₃) using conventional heat regeneration

Boonprasop S. และคณะ กล่าวถึงผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวสนับสนุนแกมมาอะลูมินา (K₂CO₃/ γ -Al₂O₃) ภายใต้ ช่วงการไหลของเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบปั่นป่วน โดยได้ทำการทดสอบตัวแปร 2 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ ในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ 200-300 °C และเวลาที่ใช้ 2-20 นาที พบว่าความสามารถในการดักจับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นกับความชื้นที่เหลืออยู่ในตัวดูดซับ กล่าวคือ แม้ว่าการใช้อุณหภูมิและเวลา ที่มากในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะสามารถนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงถึง 90.7% ของตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการใช้งานในรอบแรก แต่การใช้เวลานานจะทำให้ปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ในตัวดูดซับน้อย ส่งผลให้การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรอบต่อไปมีประสิทธิภาพลดลง จากครั้งก่อน ๆ ในทางตรงกันข้ามหากใช้เวลาน้อยในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ จะส่งผลให้ ตัวดูดซับยังคงเหลือปริมาณน้ำภายใน ซึ่งจะช่วยในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในครั้งต่อไปให้มี ประสิทธิภาพมากขึ้นตามสมการปฏิกิริยาเคมีของโพแทสเซียมคาร์บอเนต แม้ว่าประสิทธิภาพในการ ดูดซับจะไม่ได้สูงมากก็ตาม อย่างไรก็ตามการออกแบบหน่วยการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ แบบต่อเนื่องและการฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (200 °C) และใช้เวลาในการดำเนินการ

ที่สั้น (2 นาที) ก็เพียงพอที่จะรักษากระบวนการได้ อีกทั้งยังมีความเหมาะสมด้านการลงทุนเชิงเศรษฐศาสตร์อีกด้วย [6]

2.2.2. Effect of operating parameters of potassium carbonate supported on gamma alumina ($K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) on CO_2 capture capacity using depressurized regeneration

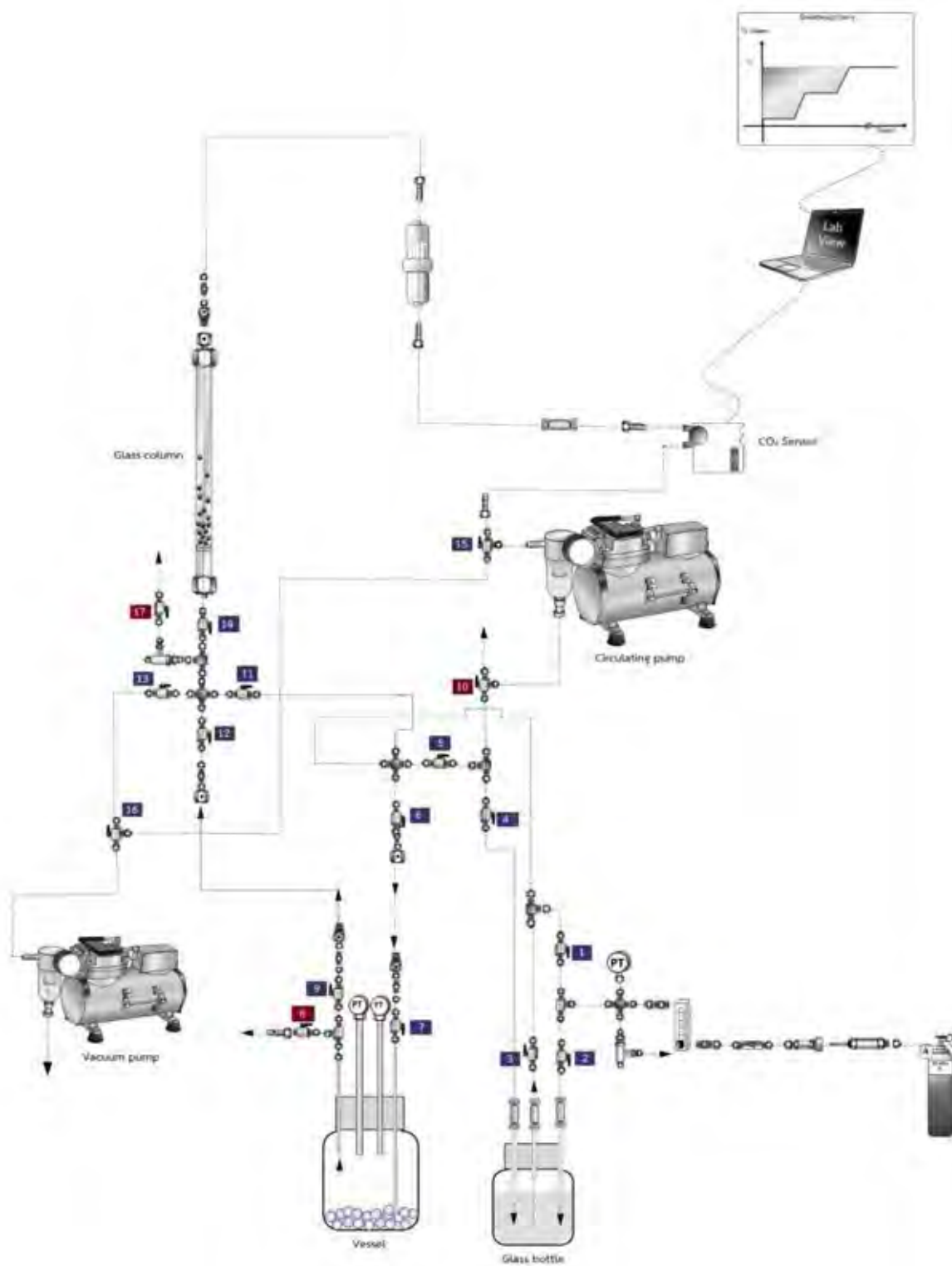
Boonprasop S. และคณะ ได้ทำการวิจัยโดยการนำโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) 17% โดยน้ำหนัก บนตัวสนับสนุนแกมมาอะลูมินา ($\gamma-Al_2O_3$) ซึ่งถูกเตรียมโดยวิธี Impregnation ก่อนนำไปใช้ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ภายใต้ช่วงการไหลของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบปั่นป่วนในหอดูดซับชนิดแก้ว โดยตัวดูดซับ ($K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) ที่ผ่านการใช้งานแล้ว จะถูกนำไปฟื้นฟูสภาพผ่านกระบวนการลดความดัน (Depressurization) ที่ 0.8 หรือ 0.2 atm เป็นเวลา 2 หรือ 20 นาที โดยกระบวนการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดทั้งกระบวนการทางเคมีและทางกายภาพ อีกทั้งความสามารถของการดูดซับทั้งหมดจะไม่ได้ขึ้นกับเวลาในการดูดซับ (Regeneration time, 2 หรือ 20 นาที) หรือจำนวนรอบในการฟื้นฟู (Regeneration cycles, 1-3) แต่จะขึ้นกับผลของความดันในการฟื้นฟูสภาพมากกว่า ซึ่งพบว่าที่ความดัน 0.2 atm จะฟื้นฟูสภาพได้ดีกว่าที่ 0.8 atm นอกจากนี้สำหรับตัวดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพแล้ว ยังตรวจไม่พบการเกิดของผลิตภัณฑ์ข้างเคียง เช่น ดาวนิโซไนต์ ($KAl(CO_3)(OH)_2 \cdot H_2O$) และในส่วนของจำนวนรอบในการฟื้นฟูก็ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ผิว Meso-pore Type IV เช่นกัน

จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนตำแหน่งของน้ำบนพื้นผิวตัวดูดซับของการทำ Hydrothermal treatment หลังการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับถูกตั้งสมมติฐานว่ามีบทบาทสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ครั้งต่อไป เนื่องจากปริมาณน้ำที่สะสมใกล้กับบริเวณทางเข้ารูพรุนมีมากกว่าปริมาณน้ำที่อยู่ด้านในรูพรุนนั้นจะไปลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางตรงทางเข้าของรูพรุนหรือขัดขวางการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในครั้งต่อไปทำได้ไม่ดี ซึ่งหากดำเนินการที่ความดัน 0.8 atm จะมีประสิทธิภาพในการดันน้ำกลับเข้าไปในรูพรุนระหว่างการทำ hydrotreatment เพื่อเพิ่มขนาดทางเข้าของรูพรุน น้อยกว่าการดำเนินการที่ความดันลดต่ำลงที่ 0.2 atm ซึ่งพบว่าตัวดูดซับที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพที่ 0.2 atm เป็นเวลา 2 นาที มีความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึง 95% เมื่อเทียบกับตัวดูดซับใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน อีกทั้งหน่วยการฟื้นฟูสภาพผ่านการลดความ

ต้นใช้เวลา ในการฟื้นฟูสภาพที่น้อย (2 นาที) ทำให้การจะขยายขนาดของระบบการดักจับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้หน่วย CFD จึงค่อนข้างสะดวกและใช้พลังงานน้อยกว่าหน่วยการ ฟื้นฟูสภาพที่ใช้ความร้อนได้ [7]

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1. แผนภาพแสดงระบบโดยรวม



รูปที่ 1 แสดงแผนภาพแสดงระบบโดยรวม

3.2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย
 - 1.1 Sodium Bicarbonate (NaHCO_3)
 - 1.2 Nitrogen (N_2)
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
 - 2.1 เครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง
 - 2.2 Carbon dioxide concentration sensor
 - 2.3 Mass flow controller
 - 2.4 Heat controller
 - 2.5 Air compressor
 - 2.6 Thermocouple
 - 2.7 Vacuum pump
 - 2.8 Circulating pump
 - 2.9 Pressure sensor
 - 2.10 Vessel
 - 2.11 Glass column
 - 2.12 Glass bottle
 - 2.13 อุปกรณ์เสริมอื่น ๆ

3.3. ระเบียบวิธีวิจัย

1. การออกแบบและจัดสร้างหน่วยปฏิบัติการฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulation Fluidized Bed) ในฝังดาวเนอร์
 - 1.1 ออกแบบ และกำหนดขนาดส่วนต่าง ๆ ของฝังดาวเนอร์
 - 1.2 เลือกวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการสร้างฝังดาวเนอร์
 - 1.3 จัดทำ หรือซื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง ได้แก่ คอลัมน์แก้ว, น็อต-สกรู และ O-ring
 - 1.4 ปรัชษาช่าง และปรับแก้ไขงานออกแบบเพื่อดำเนินการสร้างฝังดาวเนอร์
 - 1.5 เมื่อสร้างฝังดาวเนอร์เรียบร้อยแล้ว ดำเนินการต่อเข้ากับระบบก๊าซ และปั๊มสุญญากาศ
 - 1.6 ทดสอบระบบก๊าซ, ตรวจสอบการรั่วไหล, และปรับแก้ไขเพื่อความปลอดภัย

2. การทดลอง (Lab-scale)

แผนภาพระบบในการทดลอง (Lab-scale) จะแสดงในรูปที่ 2

2.1 การตรวจสอบการรั่วของระบบ

- 2.1.1 ติดตั้งคอลลัมน์แก้วที่เป็นส่วนของฝั่งดาว์นเนอร์เข้ากับระบบ
- 2.1.2 ตรวจสอบวาล์ว โดยให้ปิดวาล์ว V8, V10 และ V17 (Drain valve), เปิดวาล์ว V5, V6, V7, V9, V11 และ V12, สลับวาล์ว V15 เพื่อให้ก๊าซในระบบไหลเข้าปั๊มสุญญากาศ
- 2.1.3 เปิดปั๊มสุญญากาศ, วาล์ว V16 และ V13 ตามลำดับ เพื่อให้ภายในระบบเป็นสุญญากาศ
- 2.1.4 เมื่อระบบเป็นสุญญากาศแล้ว ปิดวาล์ว V13, V16 และปั๊มสุญญากาศตามลำดับ และสลับวาล์ว V15 เพื่อให้ก๊าซในระบบไหลเข้าปั๊มหมุนเวียน
- 2.1.5 สังเกตความดันในระบบ จับเวลา 5 นาที หากความดันคงที่ถือว่าระบบไม่เกิดการรั่ว แต่หากความดันมีการเปลี่ยนแปลง แสดงว่าระบบเกิดการรั่วให้ถอดคอลลัมน์ และทำตามข้อ 2.1.1-2.1.5 อีกครั้ง

2.2 การไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตกค้างอยู่ในระบบด้วยก๊าซไนโตรเจน

- 2.2.1 เปิดโปรแกรม Flow DDE, Flow Plot, Flow View และ CO₂ Analyzer
- 2.2.2 เปิดวาล์ว V10
- 2.2.3 กำหนดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้ในการไล่เป็น 1 LPM โดยใช้โปรแกรม Flow View
- 2.2.4 เปิดวาล์ว V1 ให้ก๊าซไนโตรเจนไล่เข้าระบบ สังเกต %CO₂ จากโปรแกรม CO₂ Analyzer จนภายในระบบมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงถึงช่วงที่ยอมรับได้ คือ ไม่เกิน 2.5%
- 2.2.5 ปิดวาล์ว V1 และ V10

2.3 การทดสอบผลของความดันเริ่มต้นในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

- 2.3.1 เปิดโปรแกรม Flow DDE, Flow Plot, Flow View, CO₂ Analyzer, Phidget (Temperature), และเชื่อมแอปพลิเคชันสำหรับบันทึกค่าความดัน SPARKvue
- 2.3.2 นำ Sodium Bicarbonate (NaHCO₃) 5 g ใส่ลงในคอลลัมน์
- 2.3.3 ทำให้ภายในระบบเป็นสุญญากาศ ตามข้อ 2.1.1-2.1.4
- 2.3.4 ปรับปริมาตรของระบบตามที่ได้กำหนดในข้อ 2.5

- 2.3.5 เปิดก๊าซไนโตรเจนเข้าในระบบทางวาล์ว V1 เพื่อปรับความดันเริ่มต้นในระบบให้เท่ากับ -0.67 barg
- 2.3.6 เปิดใช้งาน Heat Controller เพื่อปรับอุณหภูมิภายในคอลัมน์เป็น 100 °C โดยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิทีละชั้นจากอุณหภูมิห้องเป็น 40, 60, 80 และ 100 °C ตามลำดับ พร้อมเปิดระบบระบายความร้อน
- 2.3.7 กดบันทึกข้อมูล %CO₂ ในโปรแกรม CO₂ Analyzer, บันทึกความดันในระบบด้วยแอปพลิเคชัน SPARKvue และบันทึกอุณหภูมิของเบตในโปรแกรม Phidget (Temperature) จนกระทั่งความดันในระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) กดหยุดการบันทึกค่าทั้งหมด
- 2.3.8 ถอดคอลัมน์ออกมาทำความสะอาด และเป่าให้แห้งสนิทก่อนทำการทดลองครั้งต่อไป
- 2.3.9 ทำซ้ำโดยเปลี่ยนความดันเริ่มต้นในระบบเป็น -0.40 และ -0.13 barg

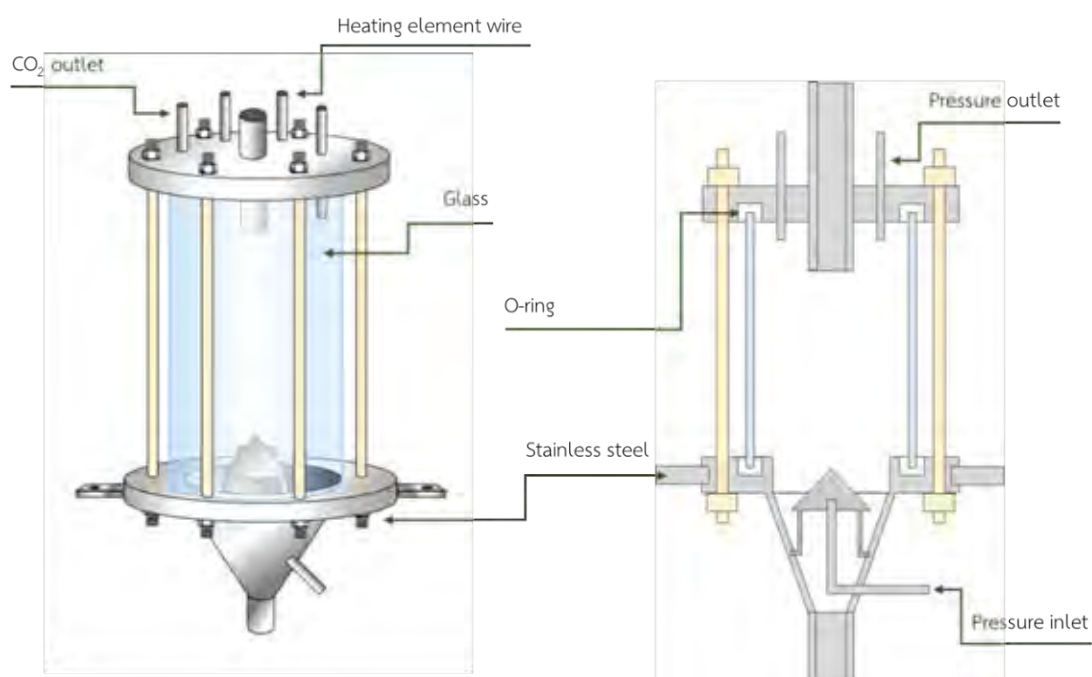
2.4 การทดสอบผลของอุณหภูมิการคายซับในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

- 2.4.1 เปิดโปรแกรม Flow DDE, Flow Plot, Flow View, CO₂ Analyzer, Phidget (Temperature), และเชื่อมแอปพลิเคชันเก็บค่าความดัน SPARKvue
- 2.4.2 นำ Sodium Bicarbonate (NaHCO₃) 2.5 g ใส่ลงในคอลัมน์
- 2.4.3 ทำให้ภายในระบบเป็นสุญญากาศ ตามข้อ 2.1.1-2.1.4
- 2.4.4 ปรับปริมาตรของระบบตามที่ได้กำหนดในข้อ 2.5
- 2.4.5 เปิดก๊าซไนโตรเจนเข้าในระบบทางวาล์ว V1 เพื่อปรับความดันเริ่มต้นในระบบให้เท่ากับ -0.67 barg
- 2.4.6 เปิดใช้งาน Heat Controller เพื่อปรับอุณหภูมิภายในคอลัมน์เป็น 110 °C โดยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิทีละชั้นจากอุณหภูมิห้องเป็น 40, 60, 80, 100 และ 110 °C ตามลำดับ พร้อมเปิดระบบระบายความร้อน
- 2.4.7 กดบันทึกข้อมูล %CO₂ ในโปรแกรม CO₂ Analyzer, บันทึกความดันในระบบด้วยแอปพลิเคชัน SPARKvue และบันทึกอุณหภูมิของเบตในโปรแกรม Phidget (Temperature) จนกระทั่งความดันในระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) กดหยุดการบันทึกค่าทั้งหมด
- 2.4.8 ถอดคอลัมน์ออกมาทำความสะอาด และเป่าให้แห้งสนิทก่อนทำการทดลองครั้งต่อไป

บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 การออกแบบ และสร้างหน่วยปฏิบัติการฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน (Circulation Fluidized Bed) ในฝังดาวนเนอร์

ในการออกแบบฝังดาวนเนอร์ของหน่วยปฏิบัติการฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนสำหรับพื้นที่สภาพตัวดูดซับได้มีการออกแบบให้มีลักษณะดังนี้

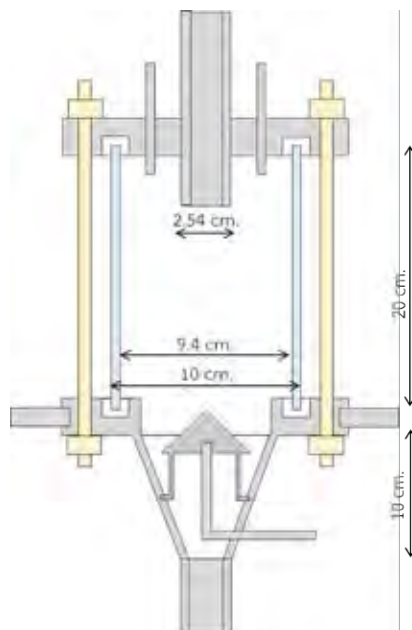


รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองฝังดาวนเนอร์

รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองฝังดาวนเนอร์ โดยมีการเลือกใช้ตัวคอลัมน์ที่ทำจากแก้ว เนื่องจากสามารถใช้งานได้ในสถานะที่อุณหภูมิสูง และสามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงของตัวดูดซับภายในคอลัมน์ขณะทำการทดลอง ในส่วนด้านบนและด้านล่างของคอลัมน์จะถูกประกบด้วยสแตนเลสซึ่งด้านบนจะมีท่อ 5 ท่อเป็นท่อขาเข้าของตัวดูดซับ, ท่อสำหรับขดลวดให้ความร้อน 2 ท่อ, ท่อสำหรับหมุนเวียนก๊าซขาเข้าคอลัมน์ และท่อสำหรับต่อปั๊มสุญญากาศ ส่วนด้านล่างมีท่อ 2 ท่อเป็นท่อขาออกของตัวดูดซับ และท่อสำหรับหมุนเวียนก๊าซออกคอลัมน์

4.1.1 ขนาดส่วนต่าง ๆ ของฝังดาว์เนอร์

คอลัมน์แก้วเป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 10 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 9.4 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ด้านบนและด้านล่างของคอลัมน์มีท่อขาเข้าและขาออกของตัวดูดซับ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.54 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.94 เซนติเมตร



รูปที่ 3 แสดงขนาดส่วนต่าง ๆ ของฝังดาว์เนอร์

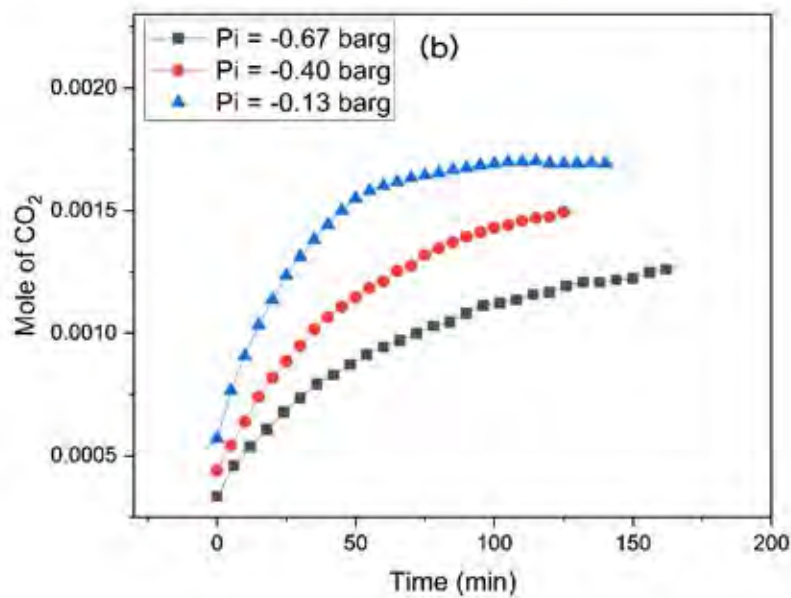
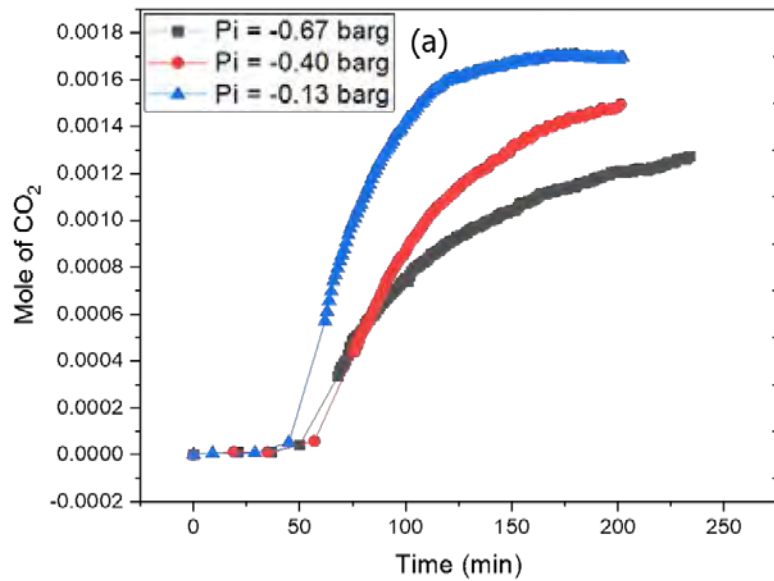
4.1.2 รูปฝังดาว์เนอร์สำหรับฟื้นฟูตัวดูดซับที่ได้สร้างขึ้น



รูปที่ 4 แสดงภาพจริงของฝังดาว์เนอร์

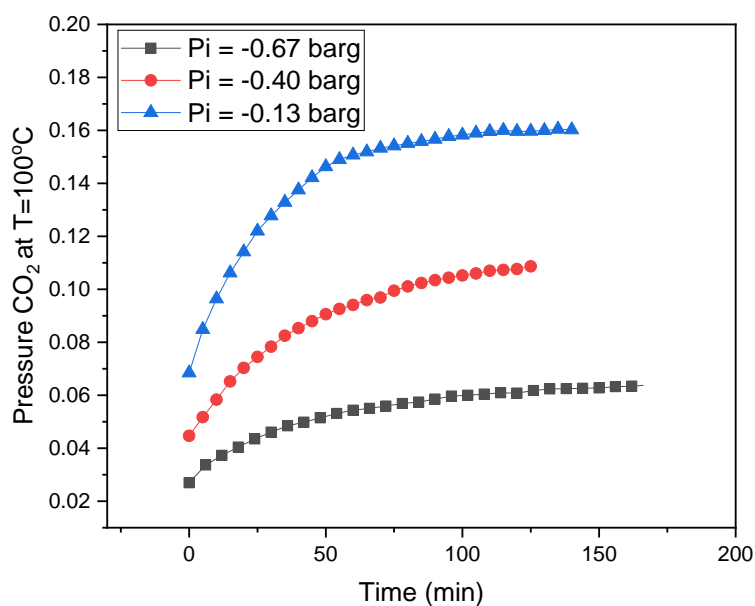
4.2 ผลของความดันเริ่มต้นในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

4.2.1 เมื่อความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่างกัน คือ -0.67, -0.40, -0.13 barg โดยควบคุมอุณหภูมิการคายซับในระบบอยู่ที่ 100 °C จะได้กราฟดังรูป

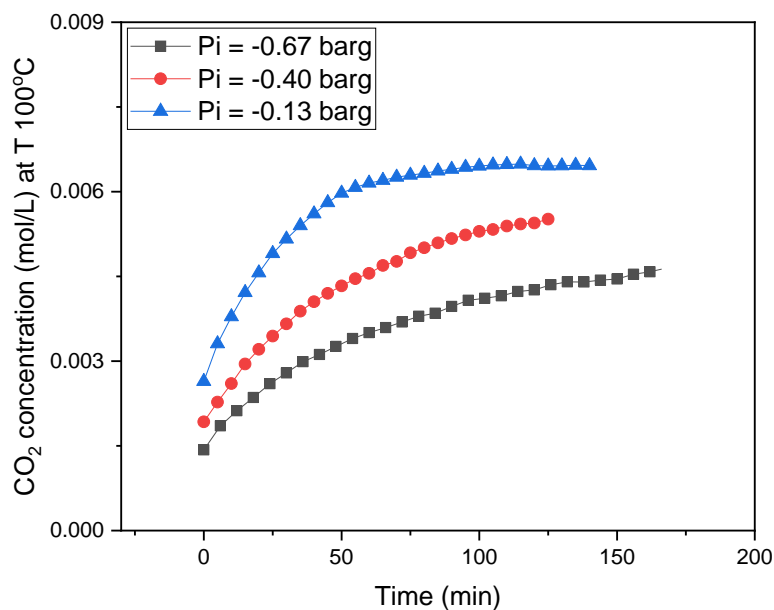


รูปที่ 5 (a) และ (b) แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับในช่วงตั้งแต่ Preheating และในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 100 °C) ตามลำดับ

จากรูปที่ 5 แสดงปริมาณโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่คายออกจากตัวดูดซับจะแสดงเป็น 2 ช่วง คือ (a) ช่วงตั้งแต่ Preheating และ (b) ช่วงหลัง Preheating ($100\text{ }^\circ\text{C}$) โดยมีกราฟสีน้ำเงินแสดงความดันเริ่มต้นที่ -0.13 barg กราฟสีแดงแสดงความดันเริ่มต้นที่ -0.40 barg และกราฟสีดำแสดงความดันเริ่มต้นที่ -0.67 barg และจะเริ่มทดลองตั้งแต่อุณหภูมิห้อง จะเห็นได้ว่า การทดลองในช่วงแรก รูปที่ 5 (a) ปริมาณโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก เนื่องจากอุณหภูมิที่อยู่ในระบบยังไม่เพียงพอที่ส่งผลให้ตัวดูดซับเกิดการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างชัดเจน แต่จะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิถึง $100\text{ }^\circ\text{C}$ ที่เวลาประมาณ 60 – 80 นาที ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองส่วนหลังที่ $100\text{ }^\circ\text{C}$ มาสร้างกราฟและปรับแกนเวลาใหม่ให้เริ่มต้นที่เวลาเดียวกันจะได้ตามรูปที่ 5 (b) พบว่าปริมาณโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกมามีความแตกต่างกัน โดยความดันเริ่มต้นที่มากกว่า (-0.13 barg) จะให้ปริมาณโมลคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าความดันเริ่มต้น -0.40 และ -0.67 barg ตามลำดับ



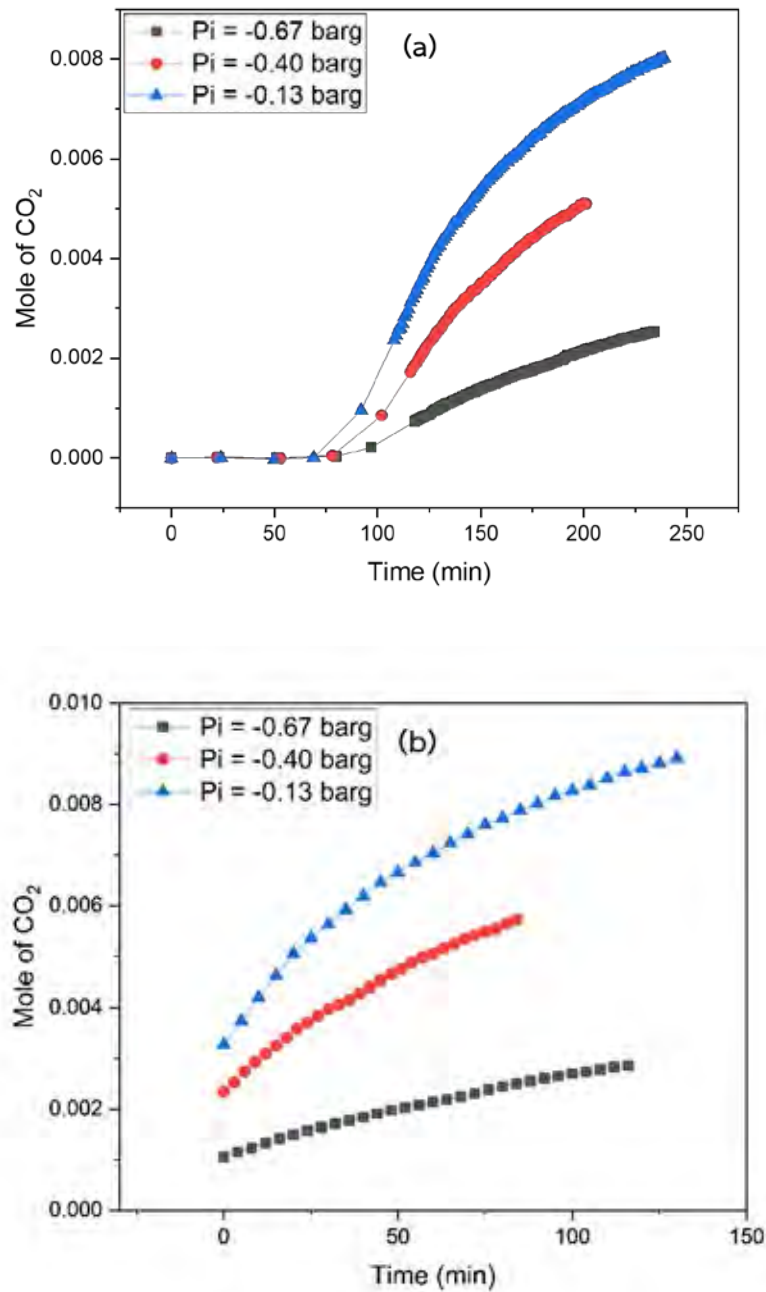
รูปที่ 6 แสดงความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบ ในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ $100\text{ }^\circ\text{C}$)



รูปที่ 7 แสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบ ในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 100 °C)

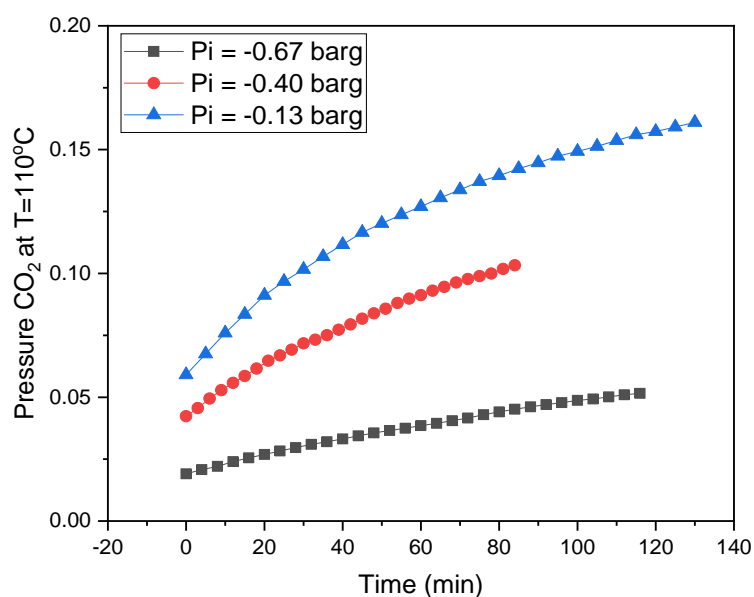
รูปที่ 6 แสดงความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้น ช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 100 °C) และรูปที่ 7 แสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นภายในระบบช่วงหลัง Preheating เช่นกัน พบว่าแนวโน้มที่เกิดขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ความดันเริ่มต้นมากกว่า (-0.13 barg) จะแสดงผลของความดันย่อยและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าผลของความดันเริ่มต้นที่ -0.40 และ -0.67 barg ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลของโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามรูปที่ 5 (b) และเป็นไปตามกฎของก๊าซอุดมคติ (Ideal gas law)

4.2.2 เมื่อความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่างกัน คือ -0.67, -0.40, -0.13 barg โดยควบคุมอุณหภูมิการคายซับในระบบอยู่ที่ 110 °C จะได้กราฟดังรูป

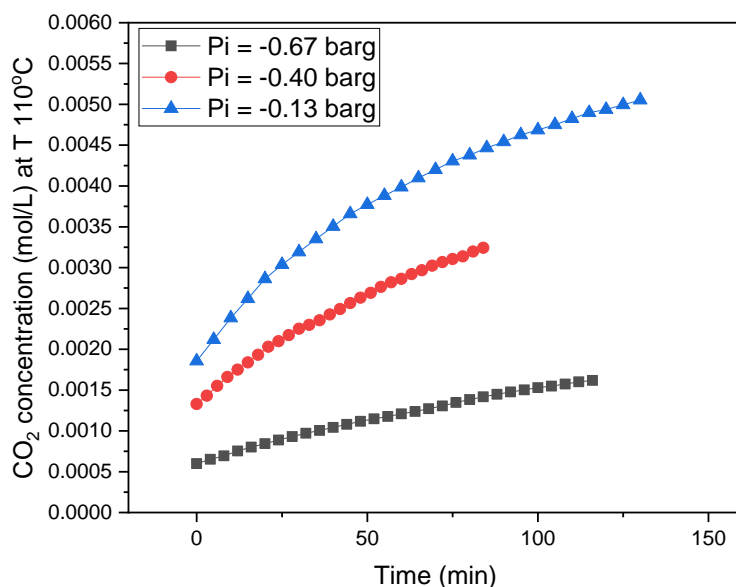


รูปที่ 8 (a) และ (b) แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับในช่วงตั้งแต่ Preheating และในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 110 °C) ตามลำดับ

รูปที่ 8 แสดงปริมาณโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับ จะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ (a) ช่วงตั้งแต่ Preheating (เริ่มที่อุณหภูมิห้อง) และ (b) ช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 110 °C) โดยมีกราฟสีน้ำเงินแสดงความดันเริ่มต้นที่ -0.13 barg กราฟสีแดงแสดงความดันเริ่มต้นที่ -0.4 barg และกราฟสีดำแสดงความดันเริ่มต้นที่ -0.67 barg จากรูปที่ 8 (a) พบว่าในช่วงแรก (Preheating) ที่มีการปรับอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้อง ที่เวลา 0 นาที จนถึงอุณหภูมิ 100 °C ที่เวลา ประมาณ 80–100 นาที จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับช่วงหลังที่เวลาประมาณ 120 นาทีเป็นต้นไป คือช่วงที่อุณหภูมิถึง 110 °C ตามที่ต้องการ จะเกิดการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 110 °C) มาสร้างกราฟใหม่ โดยปรับแกนเวลาให้เริ่มต้นเท่ากัน จะพบว่าที่ความดันเริ่มต้นมากกว่า (-0.13 barg) จะให้ปริมาณโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่าความดันเริ่มต้นที่น้อยกว่าคือ -0.40 และ -0.67 barg ตามลำดับ



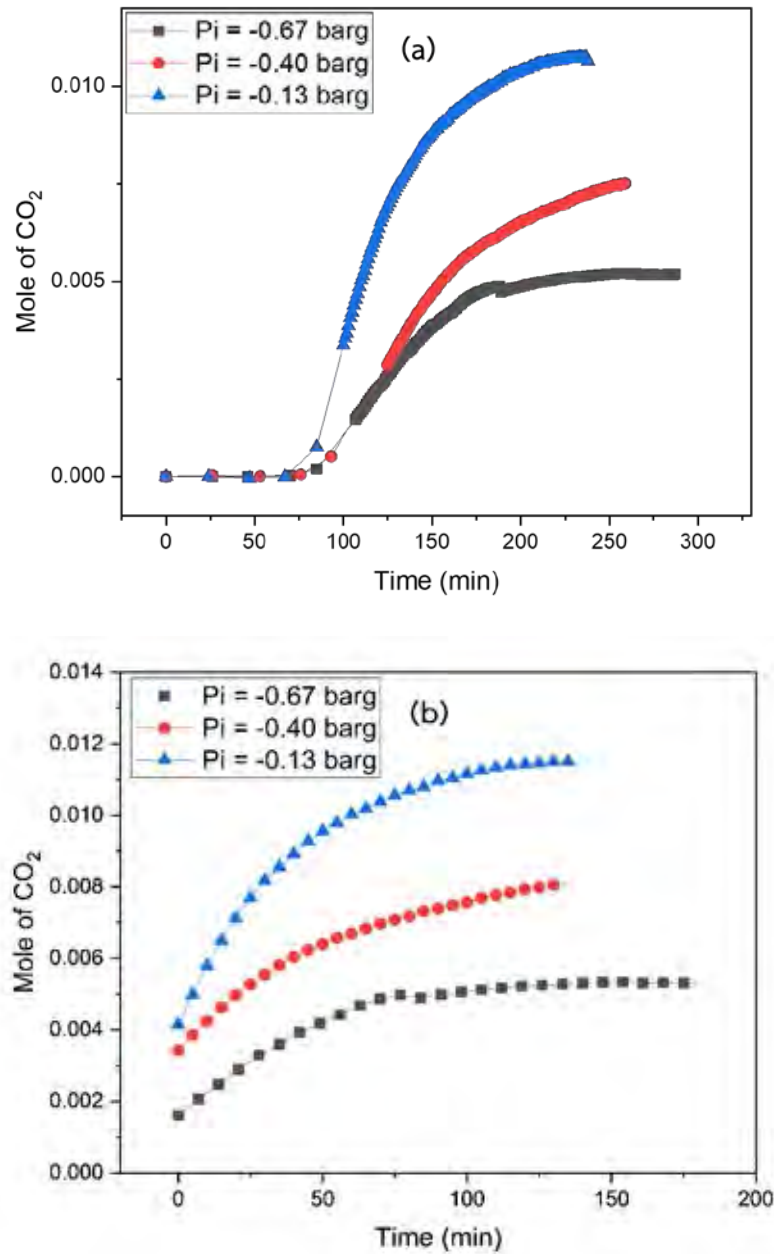
รูปที่ 9 แสดงความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบ ในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 110 °C)



รูปที่ 10 แสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบ ในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 110 °C)

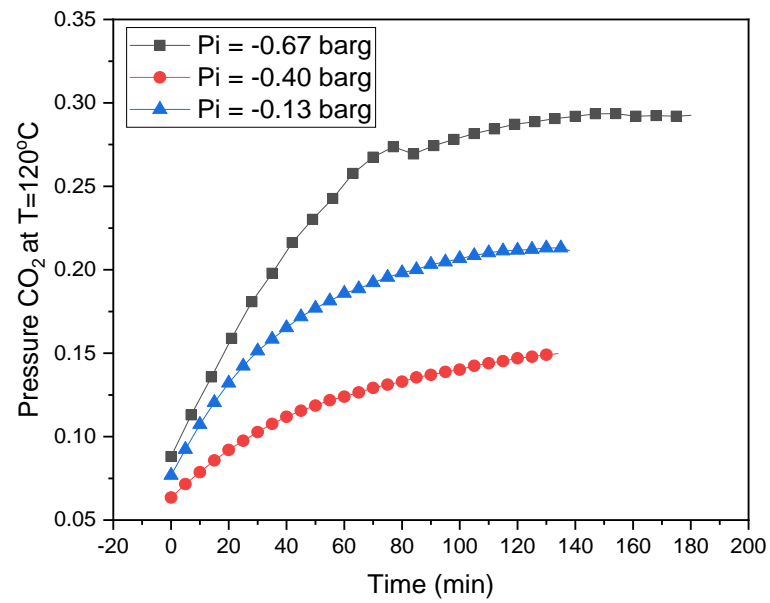
รูปที่ 9 แสดงความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นในระบบช่วงหลัง Preheating และ รูปที่ 10 แสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ที่เกิดขึ้นในระบบ ช่วงหลัง Preheating เช่นกัน พบว่าแนวโน้มของทั้ง 2 กราฟเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณ โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ (รูปที่ 8 (b)) กล่าวคือ เมื่อจำนวนโมลในระบบ เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นและความดันก็ต้องมากขึ้นด้วยเป็นไปตามทฤษฎีก๊าซอุดมคติ (Ideal gas law)

4.2.3 เมื่อความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่างกัน คือ -0.67, -0.40, -0.13 barg โดยควบคุมอุณหภูมิการคายซับในระบบอยู่ที่ 120 °C จะได้กราฟดังรูป

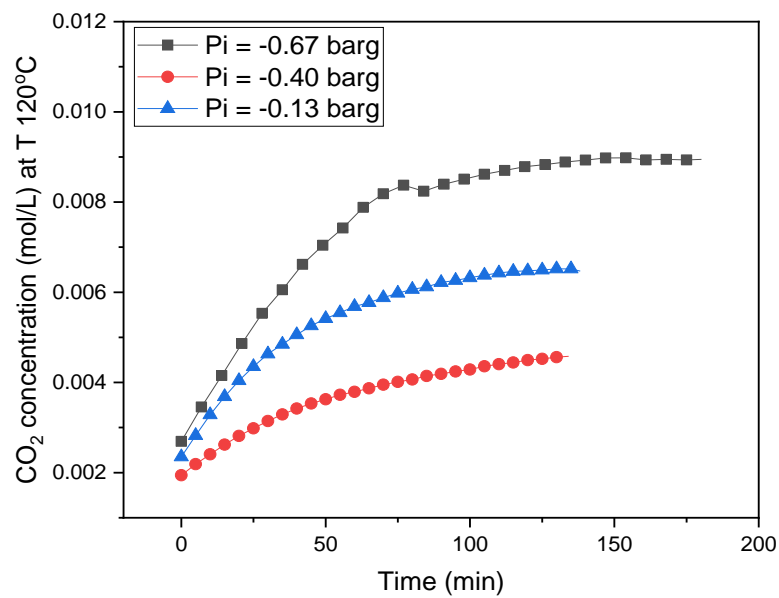


รูปที่ 11 (a) และ (b) แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับในช่วงตั้งแต่ Preheating และในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 120 °C) ตามลำดับ

รูปที่ 11 แสดงปริมาณโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับ จะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ (a) ช่วงตั้งแต่ Preheating (เริ่มที่อุณหภูมิห้อง) และ (b) ช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 120 °C) โดยมีกราฟสีน้ำเงินแสดงความดันเริ่มต้นที่ -0.13 barg กราฟสีแดงแสดงความดันเริ่มต้นที่ -0.4 barg และกราฟ สีดำแสดงความดันเริ่มต้นที่ -0.67 barg จากรูปที่ 11 (a) ในช่วงแรก (Preheating) ที่มีการเพิ่มอุณหภูมิ โดยเริ่มตั้งแต่อุณหภูมิห้องที่เวลา 0 นาที จนถึงเวลาประมาณ 100 นาที อุณหภูมิจะอยู่ประมาณ 120 °C พบว่าการเปลี่ยนแปลงของปริมาณโมลของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีเพียงเล็กน้อย และจะเริ่มเพิ่มอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 100 °C ขึ้นไป นอกจากนี้หากพิจารณาช่วงหลังที่เวลาประมาณ 100 นาทีเป็นต้นไป คือช่วงที่อุณหภูมิ ถึง 120 °C ตามที่ต้องการจะเกิดการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อนำ ช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 120 °C) มาสร้างกราฟใหม่ โดยปรับแกนเวลาให้เริ่มต้นเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 11 (b) จะพบว่าที่ความดันเริ่มต้นมากกว่า (-0.13 barg) จะให้ปริมาณโมลของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่า ความดันเริ่มต้นที่น้อยกว่าคือ -0.40 และ -0.67 barg ตามลำดับ



รูปที่ 12 แสดงความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
ภายในระบบในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 120 °C)



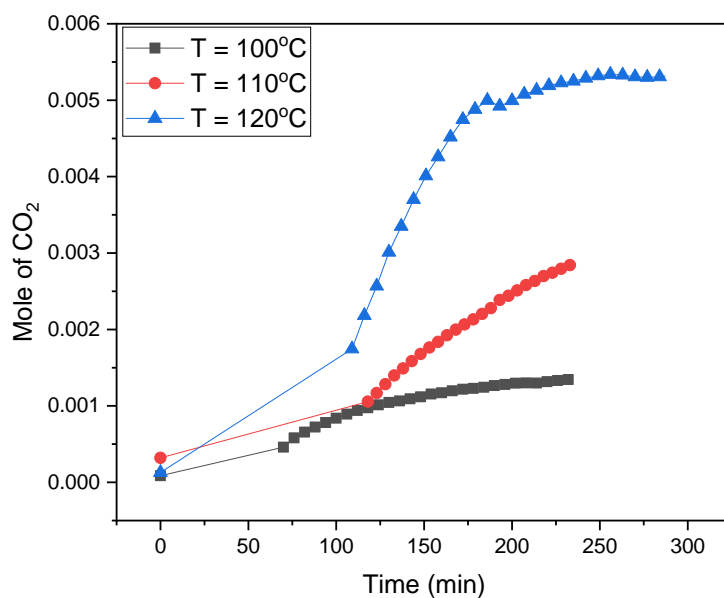
รูปที่ 13 แสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบ
ในช่วงหลัง Preheating (อุณหภูมิ 120 °C)

รูปที่ 12 แสดงความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดขึ้นในระบบ ช่วงหลัง Preheating และรูปที่ 13 แสดงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดขึ้นในระบบ ช่วงหลัง Preheating ของอุณหภูมิที่ $120\text{ }^\circ\text{C}$ เช่นกัน พบว่าแนวโน้มของทั้ง 2 กราฟเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ที่ความดันเริ่มต้นเท่ากับ -0.67 barg มีความดันย่อยและความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่าการทดลองที่ความดันเริ่มต้น -0.40 และ -0.13 barg ตามลำดับ แต่จะเป็นแนวโน้มที่ตรงกันข้ามกับรูปที่ 11 (b) คือปริมาณโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นใน และแตกต่างกับแนวโน้มของการทดลองที่อุณหภูมิ $100\text{ }^\circ\text{C}$ และ $110\text{ }^\circ\text{C}$ ของรูปอื่น ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น

ในส่วนของกราฟระบบ ความดันเริ่มต้น เท่ากับ -0.67 barg (เส้นสีดำ) ที่เวลาประมาณ 180 นาที ของรูปที่ 11 (a) หรือที่เวลาประมาณ 70 – 80 นาที ของรูปที่ 11 (b), 12 และ 13 เกิดการลดลงของแกน y เนื่องจากปริมาณโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณเกินค่าที่เครื่องตรวจจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 sensor) จะสามารถตรวจจับได้ จึงได้ทำการ Calibration เพื่อหาสมการประมาณค่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น

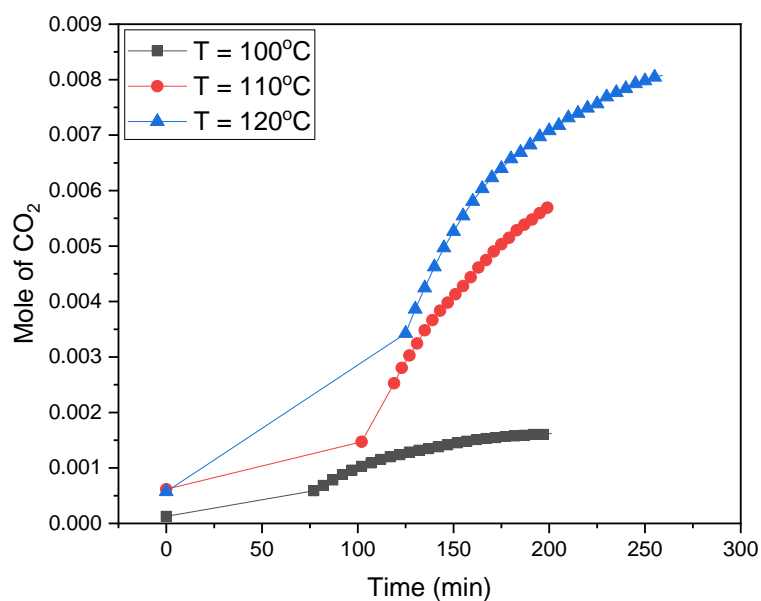
4.3 ผลของอุณหภูมิการคายซับในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

4.3.1 เมื่ออุณหภูมิการคายซับในระบบมีค่าต่างกัน คือ 100, 110, 120 °C โดยควบคุมความดันเริ่มต้นในระบบอยู่ที่ -0.67 barg จะได้กราฟดังรูป



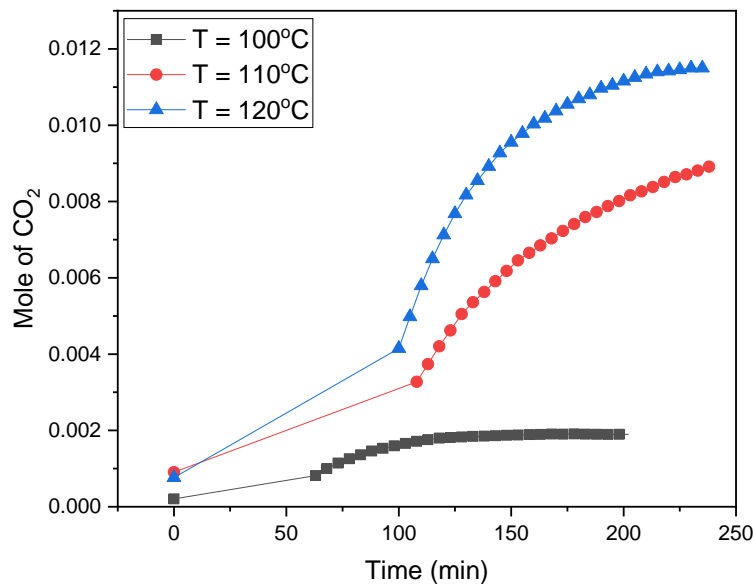
รูปที่ 14 แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับที่ความดันเริ่มต้น -0.67 barg

4.3.2 เมื่ออุณหภูมิการคายซับในระบบมีค่าต่างกัน คือ 100, 110, 120 °C โดยควบคุมความดันเริ่มต้นในระบบอยู่ที่ -0.40 barg จะได้กราฟดังรูป



รูปที่ 15 แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับที่ความดันเริ่มต้น -0.40 barg

4.3.3 เมื่ออุณหภูมิการคายซับในระบบมีค่าต่างกัน คือ 100, 110, 120 °C โดยควบคุมความดันเริ่มต้นในระบบอยู่ที่ -0.13 barg จะได้กราฟดังรูป



รูปที่ 16 แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับที่ความดันเริ่มต้น -0.13 barg

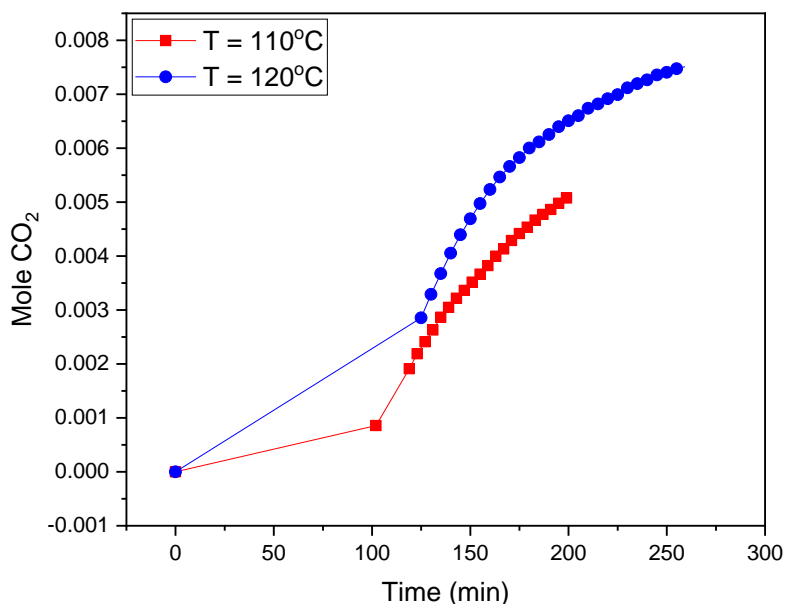
จากกราฟรูปที่ 14, 15 และ 16 ซึ่งแสดงโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับที่อุณหภูมิการคายซับต่าง ๆ โดยมีกราฟเส้นสีดำแสดงที่ 100 °C, กราฟเส้นสีแดงแสดงที่ 110 °C และกราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงที่ 120 °C และมีความดันเริ่มต้นในระบบเท่ากับ -0.67 , -0.40 และ -0.13 barg ตามลำดับ พบว่าที่แต่ละความดันเริ่มต้นมีแนวโน้มของการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับไปในทิศทางเดียวกัน คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถถูกคายออกจากตัวดูดซับได้มากขึ้น เมื่ออุณหภูมิการคายซับนั้นเพิ่มสูงขึ้น สังเกตได้จากกราฟโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการคายซับ 120 °C สูงกว่าที่อุณหภูมิการคายซับ 110 °C และ 100 °C ตามลำดับที่ทุกค่าของความดันเริ่มต้นในระบบ

4.4 การเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการคายซับต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยที่โมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบมีค่าใกล้เคียงกัน

จากการทดลองทั้งหมด 9 การทดลอง ได้ทำการคัดเลือกการทดลองที่มีโมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่าใกล้เคียงกัน เพื่อมาทำการเปรียบเทียบผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยค่าเริ่มต้นของการทดลองที่ได้คัดเลือกมาจะแสดงในตารางที่ 2 และผลการเปรียบเทียบการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะแสดงในเทอมของโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับ ซึ่งได้กราฟดังรูปที่ 17

ตารางที่ 2 แสดงโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นในระบบของการทดลองที่ 5 และ 6

การทดลอง	ความดันเริ่มต้น (barg)	อุณหภูมิการคายซับ (°C)	ปริมาตรระบบ (L)	โมล CO ₂ เริ่มต้นที่ t = 0	โมล CO ₂ ที่อุณหภูมิการคายซับ
5	-0.40	110	1.764	0.0006	0.0023
6	-0.40	120	1.764	0.0006	0.0034

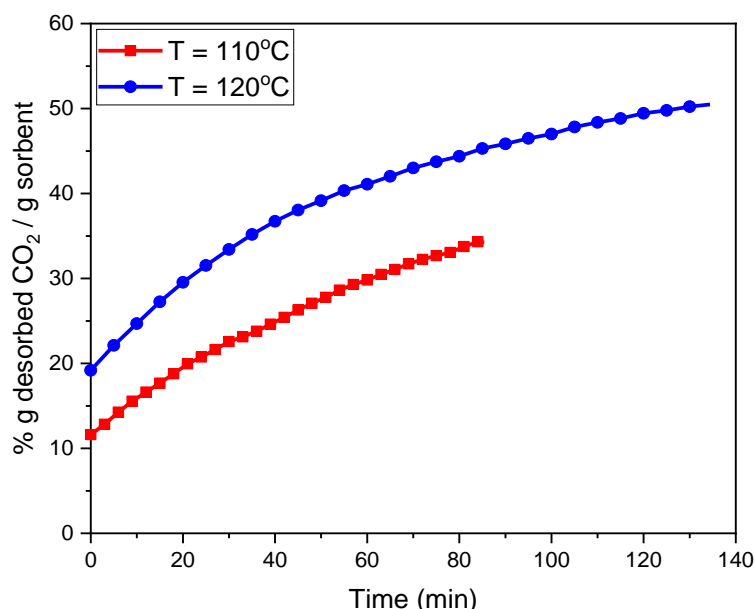


รูปที่ 17 แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับของการทดลองที่ 5 และ 6

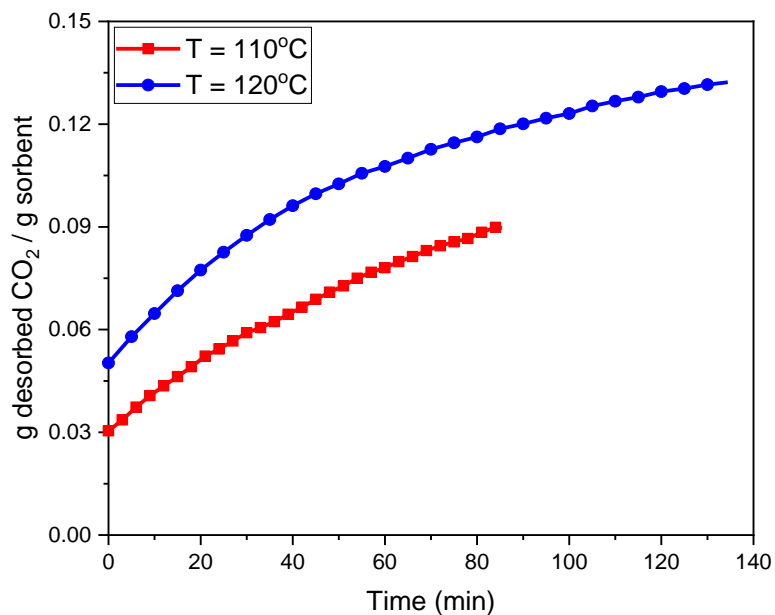
รูปที่ 17 แสดงโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับ ณ สภาวะ ความดัน เริ่มต้นในระบบเท่ากัน (-0.40 barg) ที่อุณหภูมิต่างกันคือ 110 °C และ 120 °C ของการทดลองที่ 5 และ 6 ตามลำดับ โดยเป็นการเลือกการทดลองที่มีโมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากัน หรือมีค่าใกล้เคียงกัน ผลการทดลองพบว่า การทดลองที่อุณหภูมิสูงกว่า (120 °C) สามารถคาย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 110 °C แสดงว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อการคาย ชัยอุณหภูมิการคายซับสูง ปฏิกริยาการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยิ่งเกิดได้ดีมากขึ้น อีกทั้งเมื่อ เวลาที่อยู่ในระบบนานขึ้นส่งผลให้เกิดการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับจากผลของอุณหภูมิการคายซับที่เพิ่มขึ้นจาก 110 °C เป็น 120 °C คิดเป็น 47.06 %

ตารางที่ 3 แสดงประสิทธิภาพการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองที่ 5 และ 6

การทดลอง	ความดันเริ่มต้น (barg)	อุณหภูมิการคายซับ (°C)	CO ₂ ที่ถูกคายซับ (g)	ประสิทธิภาพการคายซับ CO ₂	
				% g- CO ₂ /g-CO ₂ เริ่มต้น	g- CO ₂ ที่ถูกคายซับ /g ตัวดูดซับ
5	-0.40	110	0.224	34.27	0.090
6	-0.40	120	0.330	50.45	0.132



รูปที่ 18 แสดงประสิทธิภาพการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (% g-CO₂ ที่ถูกคายซับต่อ g-CO₂ เริ่มต้น)



รูปที่ 19 แสดงประสิทธิภาพการคายซึบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
(g-CO₂ ที่ถูกคายซึบต่อ g ตัวดูดซึบ)

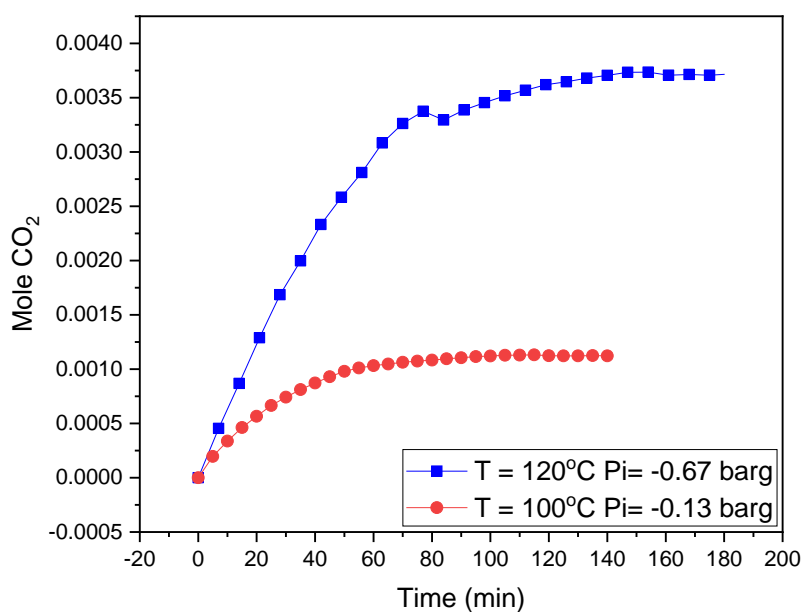
เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการคายซึบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผลการทดลองที่ 5 และ 6 ในเทอมของร้อยละโดยน้ำหนักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซึบต่อน้ำหนักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นในตัวดูดซึบ และเทอมของน้ำหนักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซึบต่อน้ำหนักของตัวดูดซึบ ซึ่งแสดงในตารางที่ 3 และกราฟรูปที่ 18 และ 19 จะเห็นได้ว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูง (120 °C) มีประสิทธิภาพในการคายซึบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซึบได้ถึง 50.45 % ซึ่งมากกว่าในการทดลองที่อุณหภูมิ 110 °C ที่คายซึบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ 34.27 %

4.5 การเปรียบเทียบผลของความดันเริ่มต้นในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยที่โมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบมีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลของอุณหภูมิการคายซับต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับในหัวข้อ 4.4 นั้นจึงได้ทำการคัดเลือกการทดลองที่มีโมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่าใกล้เคียงกัน เพื่อเปรียบเทียบผลของความดันเริ่มต้นต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ แต่เนื่องจากไม่สามารถคัดเลือกการทดลองที่เปรียบเทียบให้เห็นผลของความดันเริ่มต้นได้โดยตรง จึงต้องทำการคัดเลือกการทดลองที่มีผลของทั้งอุณหภูมิการคายซับและความดันเริ่มต้นของระบบ โดยค่าเริ่มต้นของการทดลองที่ได้คัดเลือกมาจะแสดงในตารางที่ 3 และผลการเปรียบเทียบการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะแสดงในเทอมของโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับ ซึ่งได้กราฟดังรูปที่ 18

ตารางที่ 4 แสดงโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นในระบบของการทดลองที่ 3 และ 7

การทดลอง	ความดันเริ่มต้น (barg)	อุณหภูมิการคายซับ (°C)	ปริมาตรระบบ (L)	โมล CO ₂ เริ่มต้นที่ t = 0	โมล CO ₂ ที่อุณหภูมิการคายซับ
3	-0.67	120	0.594	0.0001	0.0016
7	-0.13	100	0.294	0.0002	0.0008

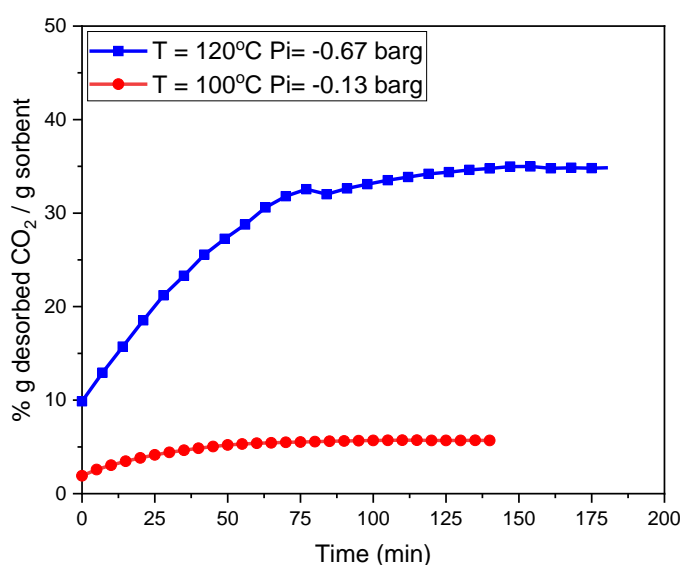


รูปที่ 20 แสดงโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับของการทดลองที่ 3 และ 7

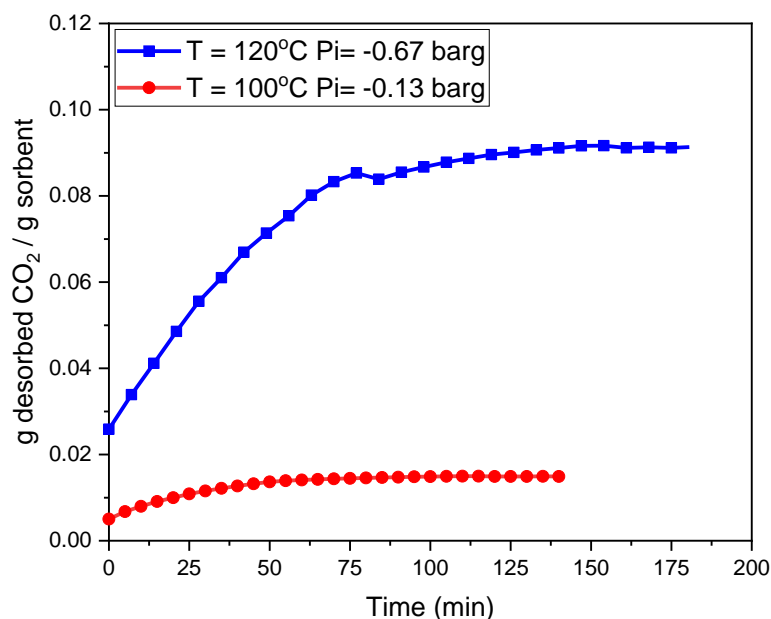
รูปที่ 18 แสดงโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับของการทดลองที่ 3 ที่มีความดันเริ่มต้น -0.67 barg และอุณหภูมิการคายซับ 120 °C และการทดลองที่ 7 ที่มีความดันเริ่มต้น -0.13 barg และอุณหภูมิการคายซับ 100 °C โดยเป็นการเลือกการทดลองที่มีโมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากัน หรือมีค่าใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองพบว่า การทดลองที่มีความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศมากกว่า และมีอุณหภูมิการคายซับสูงกว่า สามารถคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าการทดลองที่มีความดันเริ่มต้นที่มีค่าต่ำกว่าบรรยากาศน้อยกว่า และมีอุณหภูมิการคายซับต่ำกว่า ซึ่งการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซับนี้ คิดเป็น 205.88 % เมื่อเปรียบเทียบกับผลของอุณหภูมิต่อการคายซับในผลการทดลองข้อ 4.4 พบว่าการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นผลของทั้งอุณหภูมิการคายซับที่เพิ่มขึ้นจาก 100 °C เป็น 120 °C และความดันเริ่มต้นในระบบที่ต่ำกว่าบรรยากาศมากขึ้นจาก -0.13 barg เป็น -0.67 barg

ตารางที่ 5 แสดงประสิทธิภาพการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองที่ 3 และ 7

การทดลอง	ความดันเริ่มต้น (barg)	อุณหภูมิการคายซับ (°C)	CO ₂ ที่ถูกคายซับ (g)	ประสิทธิภาพการคายซับ CO ₂	
				% g- CO ₂ /g-CO ₂ เริ่มต้น	g- CO ₂ ที่ถูกคายซับ /g ตัวดูดซับ
3	-0.67	120	0.228	34.85	0.091
7	-0.13	100	0.075	5.69	0.015



รูปที่ 21 แสดงประสิทธิภาพการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (% g-CO₂ ที่ถูกคายซับต่อ g-CO₂ เริ่มต้น)



รูปที่ 22 แสดงประสิทธิภาพการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
(g-CO₂ ที่ถูกคายซับต่อ g ตัวดูดซับ)

เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของผลการทดลองที่ 3 และ 7 ในเทอมของร้อยละโดยน้ำหนักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับต่อน้ำหนักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นในตัวดูดซับ และเทอมของน้ำหนักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ ซึ่งแสดงในตารางที่ 5 และกราฟรูปที่ 21 และ 22 จะเห็นได้ว่าการทดลองที่อุณหภูมิสูง (120 °C) และความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศมาก (-0.67 barg) มีประสิทธิภาพในการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับได้ถึง 34.85 % ซึ่งมากกว่าในการทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า (100 °C) และความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศน้อยกว่า (-0.13 barg) ที่คายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียง 5.69 %

อภิปรายและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากกระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) นอกจากจะมีส่วนของการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Adsorption) แล้ว เพื่อให้เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงได้มีการพัฒนาในส่วนของกระบวนการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ (Regeneration) โดยการให้ความร้อน และการลดความดัน เนื่องจากงานวิจัยก่อนหน้าได้มีการสร้างแบบจำลองทั้งการให้ความร้อนที่สูงและการลดความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศ พบว่าประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพให้ตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มุ่งหวังที่จะยืนยันผลการจำลองระบบดังกล่าว โดยการออกแบบและสร้างหอฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับขึ้นมาและทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในขนาด Lab-scale และมุ่งหวังว่างานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางเบื้องต้นในการนำไปพัฒนาและศึกษาต่อยอดให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

การดำเนินงานวิจัยในหลายเดือนที่ผ่านมา ได้แบ่งงานวิจัยนี้ออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ส่วนแรก ซึ่งเป็นการออกแบบและสร้างหอฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ และส่วนที่สองเป็นการศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยในส่วนแรกการออกแบบและสร้างหอฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับได้ทำการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูง และองค์ประกอบอื่น ๆ จากการอ้างอิงค่าต่าง ๆ ของหอดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Riser) ที่มีอยู่แล้ว เพราะคาดหวังว่าจะประกอบเข้ากับหอโรเซอร์นี้ เพื่อให้เป็นหน่วยปฏิบัติการฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulation Fluidized Bed) จากนั้นได้ทำการทดสอบตัวเครื่องเพื่อหาจุดผิดพลาดหรือรอยรั่ว ซึ่งมีการพบรอยรั่ว 2 บริเวณ ได้แก่ บริเวณรอยต่อสแตนเลสด้านบนของคอลัมน์ และบริเวณขอบแก้วตามรูปที่ 19 เนื่องจากการเชื่อมที่ไม่เรียบร้อย การใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อที่มีขนาดไม่พอดีกับตัวเครื่อง และรอยตัดของขอบแก้วที่ไม่เท่ากัน ทำให้มีช่องว่างและเกิดการรั่วของก๊าซเข้าไปในคอลัมน์ระหว่างการทดลองได้ จึงได้ทำการแก้ไขปัญหาในบางส่วนแล้ว อย่างไรก็ตามในการศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับนั้นจะใช้เป็นขนาด Lab-scale แทน เนื่องจากหอฟื้นฟูสภาพที่ออกแบบมานั้นมีขนาดค่อนข้างใหญ่ต้องใช้ปริมาณสารจำนวนมากในการทดลอง อาจทำให้เกิดการเลื้อยทิ้งของสาร ซึ่งนำไปสู่การทำลายสิ่งแวดล้อมได้

จากผลการวิจัยผลของอุณหภูมิต่อการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 100, 110, และ 120 °C เนื่องจากได้อ้างอิงค่าจากงานวิจัย [6] และนำมาประยุกต์ให้เหมาะสมกับชุดอุปกรณ์การทดลองที่มีอยู่ อีกทั้งได้ควบคุมความดันเริ่มต้นในระบบ

เป็น 3 ค่า ได้แก่ -0.13, -0.40, และ -0.67 barg ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าที่อุณหภูมิสูงจะสามารถคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำในทุกค่าของความดันเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 14, 15, และ 16 โดยสามารถเรียงลำดับโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซั้บได้ที่อุณหภูมิ $120\text{ }^{\circ}\text{C} > 110\text{ }^{\circ}\text{C} > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของการคายซั้บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดี ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซั้บจึงมีค่ามาก และจะเริ่มคั้งที่เมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล

จากผลการวิจัยผลของความดันเริ่มต้นในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซั้บ ได้เลือกศึกษาความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศ 3 ค่า ได้แก่ -0.13, -0.40, และ -0.67 barg เนื่องจากได้มีงานวิจัยศึกษาผลของความดันต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซั้บ [7] ที่ว่า เมื่อดำเนินการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซั้บที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศมากหรือมีความเป็นสุญญากาศมาก การฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซั้บเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่จะยังมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งได้ควบคุมอุณหภูมิระหว่างทำการทดลองที่ 100, 110, และ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งผลการวิจัยพบว่า โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซั้บเพิ่มขึ้นเมื่อใช้เวลาอยู่ในระบบมากขึ้น ดังรูปที่ 5 (b), 8 (b), และ 11 (b) และจะเริ่มคั้งที่เมื่อปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี นอกจากนี้ยังพบว่า การทดลองที่ความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศน้อย (-0.13 barg) จะสามารถคายซั้บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาได้มากกว่าที่ความดันอื่น ๆ โดยสามารถเรียงลำดับโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกมาที่ความดันเริ่มต้น $-0.13\text{ barg} > -0.40\text{ barg} > -0.67\text{ barg}$ ซึ่งขัดแย้งกับสมมติฐานที่ตั้งไว้ในตอนแรกว่า ที่ความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศมากจะสามารถเกิดการคายซั้บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี จึงได้ศึกษาความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มเติม ดังรูปที่ 6, 7, 9, 10, 12, และ 13 พบว่า ทุกกราฟมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันตามโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซั้บ ยกเว้นรูปที่ 12 และ 13 ที่ให้แนวโน้มในทิศทางที่แตกต่าง กล่าวคือ ในรูปที่ 11 จะแสดงโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่คายออกจากตัวดูดซั้บที่ความดันเริ่มต้น $-0.13\text{ barg} > -0.40\text{ barg} > -0.67\text{ barg}$ แต่รูปที่ 12 และ 13 แสดงความดันย่อยและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันเริ่มต้น $-0.67\text{ barg} > -0.13\text{ barg} > -0.40\text{ barg}$ ทั้งนี้เกิดเนื่องจากหลายสาเหตุ ได้แก่ ประการแรกปริมาตรของระบบที่ใช้ในการทดลองไม่เท่ากัน ประการที่สองโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นในระบบไม่เท่ากัน และประการสุดท้ายโมลของความชื้นเริ่มต้นในระบบไม่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยในการทดลองนี้ได้ตั้งสมมติฐานว่าความชื้นเริ่มต้นในระบบมีค่าน้อยมากจนสามารถละได้ ซึ่งสาเหตุเหล่านี้คาดว่าส่งผลกระทบต่อผลการทดลองได้เช่นกัน

จากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น คาดว่าตัวแปรที่น่าจะส่งผลต่อการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มเติม คือ โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นที่มีอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการคายซับต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยกำหนดให้โมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบมีค่าใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 2 พบว่า การคายซับในสภาวะที่มีอุณหภูมิการคายซับสูง สามารถคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับได้มากกว่า เมื่อเทียบกับการคายซับในสภาวะที่มีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีของการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ ซึ่งอ้างอิงจากสมการที่ 2 เขียนเป็นสมการทางเคมีได้ว่า $2\text{NaHCO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} - \text{Heat}$ นั้นเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน เมื่อทำการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาของการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะยิ่งเกิดได้ดีมากขึ้น ส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถถูกคายออกจากตัวดูดซับได้มากยิ่งขึ้น และสามารถคำนวณเป็นประสิทธิภาพในการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับของการทดลองที่ 6 ซึ่งมีอุณหภูมิในการคายซับสูง ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$) ได้เท่ากับ 50.45 % มีค่ามากกว่าในการทดลองที่ 5 ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า ($110\text{ }^{\circ}\text{C}$) ที่มีประสิทธิภาพในการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 34.27 % โดยการเปรียบเทียบนี้จะช่วยสนับสนุนผลการวิจัยผลกระทบของอุณหภูมิต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับได้เช่นกัน นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลของความดันเริ่มต้นในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยกำหนดให้โมลเริ่มต้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบมีค่าใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4 พบว่า การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายออกจากตัวดูดซับ นอกจากจะเป็นผลของอุณหภูมิการคายซับที่เพิ่มสูงขึ้นแล้ว ยังมีผลของความดันเริ่มต้นในระบบที่ต่ำกว่าบรรยากาศมาก หรือมีความเป็นสุญญากาศมากอีกด้วย โดยพิจารณาได้จากการนำผลของอุณหภูมิการคายซับที่สามารถวิเคราะห์ผลได้โดยตรงจากการทดลองที่ 5 และ 6 คือ เมื่ออุณหภูมิการคายซับเพิ่มสูงขึ้น $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะสามารถคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้น 47.06 % โดยโมล มาเทียบกับการทดลองที่ 3 และ 7 ที่มีการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับคิดเป็น 205.88 % โดยโมล ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากอุณหภูมิการคายซับที่เพิ่มขึ้น $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ และความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศมากขึ้น (จาก -0.13 barg เป็น -0.67 barg) โดยถ้ากำหนดให้ความสัมพันธ์ผลของอุณหภูมิต่อโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จะได้ว่า เมื่ออุณหภูมิการคายซับเพิ่มสูงขึ้น $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะสามารถคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้น 94.12 % โดยโมล ดังนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นนอกเหนือจากผลของอุณหภูมิการคายซับที่เพิ่มขึ้นนี้ จึงเป็นผลเนื่องมาจากความดันเริ่มต้นในระบบที่มีค่าต่ำกว่าบรรยากาศมากขึ้นนั่นเอง และแสดงว่าความดันเริ่มต้นในระบบมีผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ โดยการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เมื่อดำเนินการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศมาก ซึ่งสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพในการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจาก

ตัวดูดซับของการทดลองที่ 3 ซึ่งมีอุณหภูมิในการคายซับสูง ($120\text{ }^{\circ}\text{C}$) และความดันเริ่มต้นในระบบต่ำกว่าบรรยากาศมาก ได้เท่ากับ 34.85% ซึ่งมากกว่าในการทดลองที่ 7 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$) และความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศน้อยกว่า (-0.13 barg) ที่มีประสิทธิภาพในการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียง 5.69% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าและที่ได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่า ในการทดลองที่มีอุณหภูมิสูง และมีความดันเริ่มต้นในระบบที่ต่ำกว่าบรรยากาศมากจะมีประสิทธิภาพในการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับสูง แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นเพียงแนวทางเบื้องต้นในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับความสัมพันธ์ผลของอุณหภูมิและความดันเริ่มต้นในระบบต่อโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับอาจไม่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงตามที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งอาจจำเป็นต้องทำการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อหาความสัมพันธ์ที่ถูกต้องของความสัมพันธ์ดังกล่าว

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

- ปัจจัยที่มีผลกระทบต่ออัตราการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ Na_2CO_3 คือ อุณหภูมิและความดันเริ่มต้นในระบบ
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกคายซับออกจากตัวดูดซับ Na_2CO_3 เพิ่มมากขึ้น เมื่อดำเนินการในสภาวะที่อุณหภูมิสูง
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกคายซับออกจากตัวดูดซับ Na_2CO_3 เพิ่มมากขึ้น เมื่อดำเนินการในสภาวะที่มีความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่ำกว่าบรรยากาศมาก (มีความเป็นสุญญากาศมาก)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในทุกการทดลองควรกำหนดให้ปริมาตรของระบบมีค่าเท่ากัน แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ ในช่วงแรกผู้วิจัยไม่ทราบช่วงค่าขีดจำกัดของ Pressure sensor และ CO_2 sensor ที่สามารถวัดค่าได้ ทำให้ต้องมีการปรับปริมาตรของระบบไปตามสภาวะของแต่ละการทดลอง
2. จากงานวิจัยนี้ถือเป็นงานวิจัยเบื้องต้น ที่ทำให้ทราบถึงการดำเนินงานและการปรับสภาวะที่ใช้ในการทดลอง คือ ในการทำการทดลองควรกำหนดให้ทุกการทดลองมีโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้นเท่ากัน (หรือใกล้เคียงกัน) เพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากผลของโมลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการฟื้นฟูตัวดูดซับ
3. จากงานวิจัยนี้ทำให้คาดว่าตัวแปรที่น่าจะส่งผลกระทบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับเพิ่มเติมคือการเกิดฟลูอิดไอเซชันระหว่างการทดลอง เนื่องจากการทดลองบางการทดลองเกิดฟลูอิดไอเซชัน จะส่งผลให้ช่วง Preheating สั้นลง ซึ่งการเกิดฟลูอิดไอเซชันจะช่วยในการกระจายตัวของความร้อนให้กับตัวดูดซับ อีกทั้งจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าการทดลองที่ไม่มีฟลูอิดไอเซชัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปราบกฏการเรือนกระจก (Greenhouse effect) [Online]. Available from: <https://guru.sanook.com/2698/>. [2018, April 17].
- [2] IPCC working group III. IPCC Special Report Carbon Dioxide Capture and Storage Summary for Policymakers. 2005,3-4.
- [3] O. Jaiboon. Effects of flow pattern on CO₂ capture using potassium carbonate in circulating fluidized bed. 2011,2-3.
- [4] S. Boonprasop, D. Gidaspow, B. Chalermssinsuwan and P. Piumsomboon. CO₂ Capture in a Multistage CFB: Part I: Number of stages. 2017,5268.
- [5] เซาวเลข ชยพัฒนางกูร. การก่อสภาพของไหล (Fluidization) [Online]. Available from: <http://www0.tint.or.th/nkc/nkc53/content/nstkc53-065.html>. [2018, April 17].
- [6] Boonprasop S, Chalermssinsuwan B, Piumsomboon P. Effect of the operating parameters on the CO₂ capture capacity of potassium carbonate supported on gamma alumina (K₂CO₃/γ-Al₂O₃) using conventional heat regeneration. J Taiwan Inst Chem E. 2017;78:282–289.
- [7] Boonprasop S, Chalermssinsuwan B, Piumsomboon P. Effect of operating parameters of potassium carbonate supported on gamma alumina (K₂CO₃/γ-Al₂O₃) on CO₂ capture capacity using depressurized regeneration. J Taiwan Inst Chem E. 2018;88:215–225.
- [8] Partial pressure [Online]. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Partial_pressure#cite_ref-biophysics200_7-0. [2019, April 18].

ภาคผนวก

1. ตัวอย่างการคำนวณ

1.1 การคำนวณจำนวนโมลของก๊าซทั้งหมดในระบบ

จาก Ideal Gas Law : $PV = nRT$

โดย	P	คือ	ความดันของระบบที่วัดได้ในเวลา t	(bar)
	V	คือ	ปริมาตรของระบบ	(L)
	n	คือ	จำนวนโมลของก๊าซทั้งหมดในระบบ	(mole)
	R	คือ	0.083145	(L bar K ⁻¹ mol ⁻¹)
	T	คือ	อุณหภูมิภายในระบบที่เวลา t	(K)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } (0.320 \text{ bar}) \times (0.294 \text{ L}) &= n_{\text{total}} \times (0.083145 \text{ L bar K}^{-1} \text{ mol}^{-1}) \times (302.75 \text{ K}) \\ n_{\text{total}} &= 0.003734 \text{ mole} \end{aligned}$$

1.2 การคำนวณปริมาตรของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ

จากการทดลองวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เท่ากับ 2.317 % โดยปริมาตร

$$\begin{aligned} \text{โดย } V_{\text{CO}_2} &= \% \text{CO}_2 \times V_{\text{system}} \\ \text{ดังนั้น } V_{\text{CO}_2} &= 2.317\% \times 0.294 \text{ L} \\ &= 0.006812 \text{ L} \end{aligned}$$

1.3 การคำนวณจำนวนโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ

$$\begin{aligned} \text{จาก Amagat's law : } n_{\text{CO}_2} &= \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{total}}} \times n_{\text{total}} \\ \text{ดังนั้น } n_{\text{CO}_2} &= \frac{0.006812 \text{ L}}{0.294 \text{ L}} \times 0.003734 \\ n_{\text{CO}_2} &= 0.000087 \text{ mole} \end{aligned}$$

1.4 การคำนวณความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ

$$\begin{aligned} \text{จาก Amagat's law : } P_{\text{CO}_2} &= \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{total}}} \times P_{\text{total}} \\ \text{ดังนั้น } P_{\text{CO}_2} &= \frac{0.006812 \text{ L}}{0.294 \text{ L}} \times 0.0320 \text{ bar} \\ P_{\text{CO}_2} &= 0.0074 \text{ bar} \end{aligned}$$

1.5 การคำนวณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad [CO_2] &= \frac{n_{CO_2}}{V_{total}} \\ \text{ดังนั้น} \quad [CO_2] &= \frac{0.000087 \text{ mole}}{0.294 \text{ L}} \\ [CO_2] &= 0.000294 \text{ L} \end{aligned}$$

1.6 การคำนวณการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิการคายซ้บในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซ้บในการทดลองที่ 5 และ 6

ตารางที่ 6 แสดงค่าพารามิเตอร์และโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบของการทดลองที่ 5 และ 6

การทดลอง	ความดันเริ่มต้น (barg)	อุณหภูมิการคายซ้บ (°C)	ปริมาตรระบบ (L)	โมล CO ₂ เริ่มต้น	โมล CO ₂ ที่สมดุล	โมล CO ₂ ที่ถูกคายซ้บ
5	-0.40	110	1.764	0.0006	0.0057	0.0051
6	-0.40	120	1.764	0.0006	0.0081	0.0075

จากตารางที่ 4 เมื่ออุณหภูมิการคายซ้บเพิ่มขึ้น 10 °C

พบว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซ้บเพิ่มขึ้น = 0.0075 - 0.0051
= 0.0024 โมล

คิดเป็น = 0.0024 / 0.0051 × 100 = 47.06 %

1.7 การคำนวณการเปรียบเทียบผลของความดันเริ่มต้นในระบบต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซ้บ

ตารางที่ 7 แสดงค่าพารามิเตอร์และโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบของการทดลองที่ 3 และ 7

การทดลอง	ความดันเริ่มต้น (barg)	อุณหภูมิการคายซ้บ (°C)	ปริมาตรระบบ (L)	โมล CO ₂ เริ่มต้น	โมล CO ₂ ที่สมดุล	โมล CO ₂ ที่ถูกคายซ้บ
3	-0.67	120	0.594	0.0001	0.0053	0.0052
7	-0.13	100	0.294	0.0002	0.0019	0.0017

จากตารางที่ 4 เมื่ออุณหภูมิการคายซับเพิ่มขึ้น 20 °C
 และ ความดันเริ่มต้นในระบบเพิ่มขึ้นจาก -0.13 barg เป็น -0.67 barg
 พบว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับเพิ่มขึ้น = 0.0052 - 0.0017
 = 0.0035 โมล
 คิดเป็น = $0.0035 / 0.0017 \times 100 = 205.88 \%$
 กำหนดให้ ความสัมพันธ์ผลของอุณหภูมิต่อโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูก
 คายซับเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง

จากการคำนวณข้อ 1.6 เมื่ออุณหภูมิการคายซับเพิ่มขึ้น 10 °C
 โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับเพิ่มขึ้น 47.06 %

ถ้า อุณหภูมิการคายซับเพิ่มขึ้น 20 °C
 โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับเพิ่มขึ้น = $47.06 \times 20 / 10$
 = 94.12 %

ดังนั้น โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับเพิ่มขึ้นจากผลของอุณหภูมิการคายซับ
 ที่เพิ่มขึ้นคิดเป็น = 94.12 %

ดังนั้น โมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับเพิ่มขึ้นจากผลของความดันเริ่มต้นใน
 ระบบที่เพิ่มขึ้นคิดเป็น = $205.88 - 94.12 = 111.76 \%$

* หมายเหตุ ความสัมพันธ์ผลของอุณหภูมิต่อโมลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกคายซับอาจไม่
 เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ซึ่งต้องทำการทดลองเพิ่มเพื่อให้ทราบรูปแบบของ
 ความสัมพันธ์ที่แน่ชัด

1.8 การคำนวณประสิทธิภาพในการคายซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ

ตัวอย่างการคำนวณของการทดลองที่ 5

ตัวดูดซับ NaHCO₃ 2.5 g = $2.5 \text{ g} / 84.007 \text{ g/mol} = 0.0298 \text{ mol NaHCO}_3$

จากสมการ $2\text{NaHCO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} - \text{Heat}$

จะได้ว่า NaHCO₃ = 0.0298 mol

จะมี CO₂ = $0.0298 \text{ mol} \times 1 \text{ mol CO}_2 / 2 \text{ mol NaHCO}_3$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น CO}_2 \text{ เริ่มต้นในตัวดูดซับ} &= 0.0149 \text{ mol} &= 0.6549 \text{ g} \\
 \text{จากการทดลองสามารถคายซับ CO}_2 &= 0.0051 \text{ mol} &= 0.2244 \text{ g} \\
 \text{ดังนั้น ประสิทธิภาพในการคายซับ} &= 0.2244 / 0.6549 \times 100 \\
 &= 34.27 \% \text{g- CO}_2 \text{ ที่ถูกคายซับต่อ g- CO}_2 \text{ เริ่มต้น} \\
 \text{และ} &= 0.2244 / 2.5 \\
 &= 0.0898 \text{ g- CO}_2 \text{ ที่ถูกคายซับต่อ g ตัวดูดซับ}
 \end{aligned}$$

2. ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของแต่ละการทดลอง

ตารางที่ 8 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของแต่ละการทดลอง

การทดลอง	ความดันเริ่มต้น (barg)	อุณหภูมิการคายซ้บ (°C)	ปริมาตรระบบ (L)	โมลเริ่มต้นที่ t = 0			โมลที่อุณหภูมิการคายซ้บ			
				CO ₂	N ₂	Total	CO ₂	N ₂	H ₂ O	Total
1	-0.67	100	0.294	0.0001	0.0036	0.0037	0.0004	0.0036	0.0003	0.0044
2		110	1.764	0.0003	0.0240	0.0243	0.0011	0.0240	0.0007	0.0258
3		120	0.594	0.0001	0.0081	0.0083	0.0016	0.0081	0.0015	0.0112
4	-0.40	100	0.294	0.0001	0.0068	0.0069	0.0006	0.0068	0.0004	0.0078
5		110	1.764	0.0006	0.0424	0.0430	0.0023	0.0424	0.0017	0.0465
6		120	1.764	0.0006	0.0419	0.0425	0.0034	0.0419	0.0029	0.0482
7	-0.13	100	0.294	0.0002	0.0102	0.0104	0.0008	0.0102	0.0006	0.0115
8		110	1.764	0.0009	0.0601	0.0610	0.0033	0.0601	0.0024	0.0658
9		120	1.764	0.0008	0.0598	0.0606	0.0041	0.0598	0.0034	0.0673

3. รูปประกอบงานวิจัยเพิ่มเติม



รูปที่ 23 แสดงรอยร้าวที่ตรวจสอบพบของท่อพื้นฟูสภาพตัวดูดซับ



รูปที่ 24 แสดงการดำเนินการตรวจสอบท่อพื้นฟูสภาพ

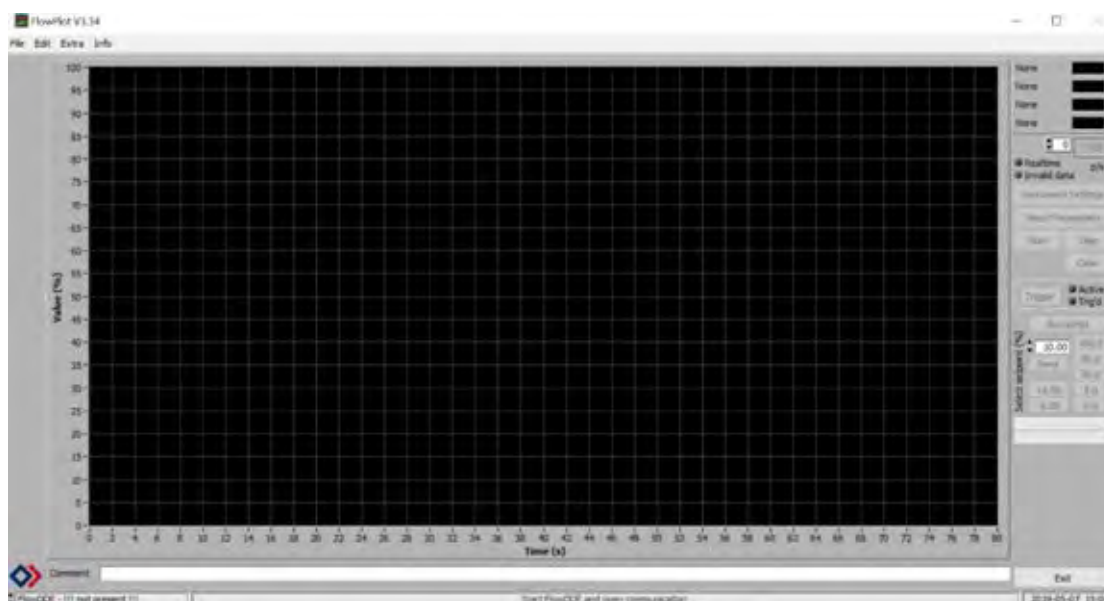


รูปที่ 25 แสดงเครื่องจำลองห่อพื้นฟูสภาพขนาด Lab-scale



รูปที่ 26 แสดงปัญหาที่พบขณะทำการวิจัย

4. โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 27 แสดงโปรแกรมบันทึกอัตราการไหล FlowPlot



รูปที่ 28 แสดงโปรแกรมบันทึกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO₂ Analyzer



รูปที่ 29 แสดงโปรแกรมบันทึกอุณหภูมิ Phidget (Temperature)

PASCO

choose a path

Manual Entry



Manually enter your data into a table and see it in a graph

Sensor Data



Connect your sensors, choose measurements and displays.

Remote Logging



Configure your wireless sensor for remote data logging, or download your logged data.

Open PASCO Experiment

Build New Experiment

Open Saved Experiment

☰
📶 🔗 📄 📷

1: Untitled



Absolute Pressure (kPa)

Run 1

Absolute Pressure 0.000 kPa
🔧 ⚙️ 📶

Periodic: 10 seconds
Start 00:00:00.0

รูปที่ 30 แสดงโปรแกรมบันทึกความดัน SPARKvue