



## รายงานโครงการวิจัย

การเตรียมตัวดูดซับของแข็ง  $K_2CO_3/Al_2O_3$  ที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน

(Preparation of  $K_2CO_3/Al_2O_3$  Solid Sorbent Modified with Amine Solution)

### โดย

นายพัชรพล นกโพธิ์ รหัสนิต 5932943323

นายภาณุศร กลิ่งสุวรรณชัย รหัสนิต 5932950723

### อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ ปีการศึกษา 2562

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเตรียมตัวดูดซับของแข็ง  $K_2CO_3/Al_2O_3$  ที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน

นายพัชรพล นกโพธิ์

นายภาณุศร กลิ่งสุวรรณชัย

โครงการวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# Preparation of $K_2CO_3/Al_2O_3$ Solid Sorbent Modified with Amine Solution

Pacharapol    Nokpho

Panusorn    Klungsuwannachai

A Senior Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for  
the Degree of Bachelor of Science Program in Chemical Technology Department  
Faculty of Science Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

ชื่อโครงการ การเตรียมตัวดูดซับของแข็ง  $K_2CO_3/Al_2O_3$  ที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน

ชื่อนิติผู้ทำโครงการ นายพัชรพล นกโพธิ์  
นายภาณุศร กลิ่งสุวรรณชัย

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2562

### บทคัดย่อ

การปรับปรุงวิธีการเตรียมตัวดูดซับมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบฟลูอิดซ์เบด การปรับปรุงวิธีการเตรียมตัวดูดซับในงานวิจัยนี้ทำได้โดยการเติมสารละลายเอมีนลงไปผสมกับตัวดูดซับในขั้นตอนการเตรียมเนื่องจากเอมีนอาจสามารถปรับสภาพพื้นผิวของตัวดูดซับได้ โดยจะศึกษาผลของเอมีน 2 ชนิด ได้แก่ เอทานอลามีน (MEA) และ เมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) ซึ่งแต่ละชนิดศึกษาทั้งหมด 2 ความเข้มข้น ได้แก่ 15% และ 35% โดยมวล นอกจากนี้ ยังศึกษาผลของอุณหภูมิของการอบตัวดูดซับที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียม และผลของระยะเวลาที่ใช้ในการกวนสารที่มีต่อประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในขั้นตอนการเตรียมแบ่งออกเป็น 2 อุณหภูมิ ได้แก่ การใช้อุณหภูมิในการอบที่ 105 และ 145 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้ในการกวนสาร ได้แก่ 24 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง กระบวนการดูดซับในระบบฟลูอิดซ์เบดถูกทดลองภายใต้ภาวะการทดลองดังนี้ อุณหภูมิคอลัมน์ และ อุณหภูมิไอน้ำ เท่ากับ 60 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ผลที่ได้จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ได้จากระยะเวลาที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เดินทางไปถึงเซนเซอร์วัดความเข้มข้นของแก๊ส และประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากรูปแบบความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับที่มีการปรับปรุงโดยใช้สารละลายเอมีนมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่มีการเติมสารละลายเอมีน ตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดคือตัวดูดซับที่มีการปรับปรุงโดยใช้เอมีนชนิดเมทิลไดเอทานอลามีน ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยมวล ใช้อุณหภูมิในการอบที่ 145 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ใช้ในการกวนสาร 24 ชั่วโมง ซึ่งมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 76.45 มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับ

คำสำคัญ: ตัวดูดซับของแข็ง, สารละลายเอมีน, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิติ ..... พัชรพล นกโพธิ์  
สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม ลายมือชื่อนิติ ..... ภาณุศร กลิ่งสุวรรณชัย  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ..... เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

**Title** Preparation of  $K_2CO_3/Al_2O_3$  Solid Sorbent Modified with Amine Solution  
**Student name** Mr. Pacharapol Nokpho  
 Mr. Panusorn Klungsuwannachai  
**Advisor** Assoc. Prof. Dr. Benjapon Chalermsoisuan  
**Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,**  
**Academic Year 2019**

### ABSTRACT

The improvement of the adsorption preparation method aims to increase the efficiency of carbon dioxide capture in the fluidized bed system. The improvement of the adsorption method in this research is done by adding amine solution to the adsorbent in the preparation process because amines may be able to adjust the surface area of the adsorbent. This research studies the effects of two types of amines, which are ethanolamine (MEA) and methyl diethanolamine (MDEA) using the concentrations at 15 and 35 percent by weight. In addition, the drying temperature in the preparation process at 105 and 145 degree Celsius and the duration of stirring at 24 hours and 5 hours are investigated. The adsorption process in the fluidized bed system is tested under the following conditions, column temperature and steam temperature at 60 and 100 degrees Celsius, respectively. The results of the experiment can be analyzed from the time of carbon dioxide gas moves to the gas concentration sensor. According to the results, adsorbents that are improved using amine solution are more effective than adsorbents that are not improved by amine solution. The adsorbent with the highest carbon dioxide capture capacity is the adsorbent that is improved by methyl diethanolamine using amine concentration 35 percent by weight, drying temperature at 145 degrees Celsius and 24 hours of stirring time, which has the efficiency of carbon dioxide capture 76.45 mg of carbon dioxide per gram of adsorbent.

**Keywords:** Solid sorbent, Amine solution, Carbon dioxide

Department of Chemical Technology Student's signature..... *พัชรพอล นกโพธิ์*

Major: Chemical Engineering Student's signature..... *ปานุสรณ์ คลึงสุวรรณชัย*

Advisor's signature..... *BENJAPON CHALERM SOISUAN*

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนในระดับปริญญาตรี เพื่อสร้างเสริมประสบการณ์ ประจำปีการศึกษา 2562 ของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการดำเนินโครงการเตรียมตัวดูดซับของแข็ง  $K_2CO_3/Al_2O_3$  ที่ปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน นิสิตผู้ดำเนินโครงการได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและช่วยเหลือให้งานวิจัยครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ นายกนกพล โรจนกิจ และ นางสาวชาติยา ตรีพูนสุข นิสิตปริญญาโท สาขาเคมีเทคนิค ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำทุกเรื่องอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินโครงการ

ขอขอบคุณ คุณสุพจน์ พุทธวงศ์ บุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ รวมถึงเจ้าหน้าที่ บุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ภาวะโลกร้อน (Global warming).....	4
2.2 การดูดซับ (Adsorption).....	6
2.2.1 แบบจำลองการดูดซับ (Sorption Model).....	7
2.2.2 หลักการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> Capture concept).....	9
2.3 ฟลูอิดิเดชัน (Fluidization).....	10
2.3.1 ปรากฏการณ์เกี่ยวกับฟลูอิดิเดชัน (Fluidization Phenomenon).....	13
2.3.2 รูปแบบการไหล/ช่วงของการไหล (Conventional fluidization regime).....	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 ตัวดูดซับ.....	18
3.2 วิธีทำการทดลอง.....	20
3.2.1 การปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยเอมีน.....	20
3.2.2 การใช้โปรแกรม CO <sub>2</sub> analyzer.....	20
3.2.3 การทำ Flow measurement.....	21
3.2.4 การใช้งาน Heater.....	21
3.2.5 การหา Resident time ของคอลัมน์เปล่า.....	23
3.2.6 การหา Resident time เมื่อบรรจุตัวดูดซับ.....	24
3.2.7 การทดสอบการดูดซับ.....	25
3.3 การวิเคราะห์ตัวดูดซับ.....	26

### บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับ (Breakthrough Curve).....	27
4.2 ปฏิกิริยาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา....	34
4.3 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> Adsorption Capacity).....	36
4.4 ผลของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	37
4.4.1 ผลของชนิดเอมีนที่ทำการศึกษา.....	37
4.4.2 ผลของความเข้มข้นของเอมีน.....	38
4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งตัวดูดซับ.....	39
4.4.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการเขย่าสารผสมในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ.....	40
4.5 ผลการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบของตัวดูดซับ.....	41

### บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง.....	43
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	44

รายการอ้างอิง.....	45
--------------------	----

ภาคผนวก.....	47
--------------	----

ภาคผนวก ก. การคำนวณปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	48
---	----



## สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ปรากฏการณ์เรือนกระจกที่เกิดจากการกักเก็บความร้อนของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์.....	4
รูปที่ 2.2	ผลกระทบจากสภาวะโลกร้อนที่ส่งผลต่อธารน้ำแข็ง.....	6
รูปที่ 2.3	แบบจำลองการดูดซับ.....	7
รูปที่ 2.4	Breakthrough curve สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	9
รูปที่ 2.5	การประยุกต์ใช้ฟลูอิดิเซชันสำหรับการแยกแรมให้บริสุทธิ์.....	10
รูปที่ 2.6	การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดิเซชันสำหรับปฏิกิริยาการผลิตก๊าซโพรวินเซอร์.....	11
รูปที่ 2.7	การประยุกต์ใช้ฟลูอิดิเซชันสำหรับกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (FCC).....	11
รูปที่ 2.8	การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดิเซชัน.....	12
รูปที่ 2.9	Free body diagram ของอนุภาคของแข็ง.....	13
รูปที่ 2.10	Geldart Classification.....	14
รูปที่ 2.11	รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิดิเซชันจากทฤษฎี.....	16
รูปที่ 3.1	แผนผังการดูดซับด้วยเครื่องฟลูอิดิเซชัน (Fluidization adsorption diagram).....	22
รูปที่ 3.2	แผนภาพเครื่องทดสอบการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	25
รูปที่ 3.3	เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR).....	26
รูปที่ 4.1	แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่า CO <sub>2</sub> adsorption capacity ของตัวดูดซับของแข็ง.....	36
รูปที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับตัวดูดซับที่ปรับปรุงด้วยเอมีนชนิด MEA และ MDEA.....	37
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับตัวดูดซับที่ปรับปรุงด้วยเอมีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 และ 35 โดยมวล.....	38
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งตัวดูดซับที่ 105 และ 145 องศาเซลเซียส.....	39
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับระยะเวลาในการเขย่าสารผสมในขั้นตอนการเตรียมที่ 5 และ 24 ชั่วโมง.....	40
รูปที่ 4.6	ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR.....	42

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง.....	19
ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแบบ $2^4$ ของการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ .....	19
ตารางที่ 4.1 Breakthrough Curve ของตัวดูดซับที่เตรียมจากสภาวะต่าง ๆ.....	28
ตารางที่ 4.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และผลการทดลอง.....	35
ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จาก CO <sub>2</sub> Analyzer.....	49

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมา

การเกิดภาวะเรือนกระจกในปัจจุบันมีสาเหตุหลักมาจากการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ โดยอาจเกิดขึ้นจาก การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มาจากโรงงาน การตัดไม้ทำลายป่า ไอเสียจากรถยนต์ และการเผาไหม้ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยมานั้นได้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก เช่น การเกิดภาวะโลกร้อนซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิพื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น อันจะส่งผลกระทบต่อเนื่องทำให้เกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติมากมาย งานวิจัยนี้ได้ตระหนักถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นจึงได้ศึกษาหาวิธีการในการลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศพบว่ามีวิธีการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดักจับหลากหลายวิธี โครงการนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งและปรับปรุงด้วยสารละลายเอมีน

การใช้ของแข็งในกระบวนการดูดซับเป็นอีกหนึ่งวิธีที่กำลังเป็นที่สนใจเนื่องจากสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในปริมาณสูง และสามารถฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้งานได้ดี มีความต้องการพลังงานในปฏิกิริยาฟื้นฟูและมีค่าใช้จ่ายต่ำ การดูดซับทางเคมีด้วยของแข็งจำพวกโลหะแอลคาไลน์มีการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำรวมทั้งไม่มีปัญหาในด้านของความเสี่ยงในการระเบิดหรือใช้พลังงานสูงในกระบวนการคืนสภาพ (Regeneration) การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเอมีน จะช่วยให้ตัวดูดซับมีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงขึ้นและมีข้อดีมากกว่าการใช้วิธีการดูดซับหลายประการ เช่น มีการกักตัวของอุปกรณ์น้อยและใช้ความร้อนในระบบต่ำ เป็นต้น ในทางตรงกันข้าม การใช้วิธีการดูดซับตัวทำละลายเอมีนมักให้ความร้อนมากกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  เพื่อใช้ในกระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งทำให้มีโอกาสเกิดอันตรายได้

โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ถูกเลือกเป็นตัวดูดซับในการทดลองนี้โดยจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนต คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (1)



ซึ่งปฏิกิริยานี้สามารถเกิดได้ที่ความดันบรรยากาศ และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยจะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ในขั้นตอนการเตรียมซึ่งส่งผลต่อปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ การศึกษานี้สนใจการปรับปรุงตัวดูดซับโดยใช้สารละลายเอมีน 2 ชนิด คือ Monoamine และ Diamine เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด โดยคาดว่าสารละลายเอมีนจะมีความสามารถในการปรับสภาพพื้นผิวของตัวดูดซับให้

เหมาะสมต่อการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงการเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของอลูมินา นอกจากนี้จะศึกษาการปรับปรุงขั้นตอนการเตรียมที่ต่างกัน รวมทั้งผลของเวลาการเขย่าตัวดูดซับที่ต่างกันที่จะนำไปสู่ตัวดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนอลูมินาที่ผ่านการปรับปรุงโดยใช้เอมีน ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลของการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) ที่ถูกปรับปรุงด้วยเอมีนเพื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยที่ผ่านมา

1.3.2 ปรับปรุงการเตรียมตัวดูดซับด้วยเอมีน 2 ชนิดคือ เมทิลเอทานอลามีน (MEA) และเมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) รวมถึงศึกษาผลกระทบของการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเอมีน อุณหภูมิของการอบตัวดูดซับและระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่าสารละลายในกระบวนการเตรียม จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลก่อนปรับปรุง และวิเคราะห์ผลโดยเทคนิคการดูดกลืนแสงของสาร (FTIR)

## 1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1.4.1 กรดที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นตัวแทนเอมีน 2 ประเภท คือ เอมีนปฐมภูมิ (Monoamine) และเอมีนทุติยภูมิ (Diamine)

1.4.2 ฟลูอิดเซชันเป็นแบบสองวัฏภาค คือ ของแข็ง และก๊าซ

1.4.3 อนุภาคของของแข็งที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันทุกอนุภาค

1.4.4 ไม่มีการสูญเสียความร้อนในระบบ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

### 1.5.1 ในด้านความรู้และประสบการณ์ต่อตัวนิสิตเอง

ได้ประสบการณ์ในการวางแผนที่มีกระบวนการคิดเป็นขั้นตอน มีระเบียบแบบแผน และมีการจัดสรรเวลาที่มีอย่างจำกัด มาใช้ในการทำการศึกษาวิจัยได้อย่างเหมาะสม พร้อมทั้งได้รับความรู้ที่สามารถนำไปใช้ในการทำงานด้านวิศวกรรมเคมีต่อไปในอนาคตได้ เช่น การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม การใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด เป็นต้น นอกจากนี้ ยังได้ฝึกฝนทักษะในการทำวิจัย รวมถึงสามารถออกแบบการทดลองด้วยตนเองได้

### 1.5.2 ความรู้ ความเข้าใจที่นำไปสู่การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรม

สามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยนี้ไปใช้เพื่อปรับปรุงกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อลดอัตราการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม นอกจากนี้ ยังสามารถนำความรู้การเลือกใช้ และเตรียมตัวดูดซับที่เหมาะสม ไปประยุกต์ใช้กับการดูดซับ หรือกระบวนการอื่น ๆ ในอุตสาหกรรมได้

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาวิธีการเตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา
3. เตรียมสารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย
4. เตรียมตัวดูดซับตามขั้นตอนและวิธีที่ออกแบบไว้
5. นำตัวดูดซับไปทดสอบการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง จัดทำรายงานและนำเสนอผลงาน

## บทที่ 2

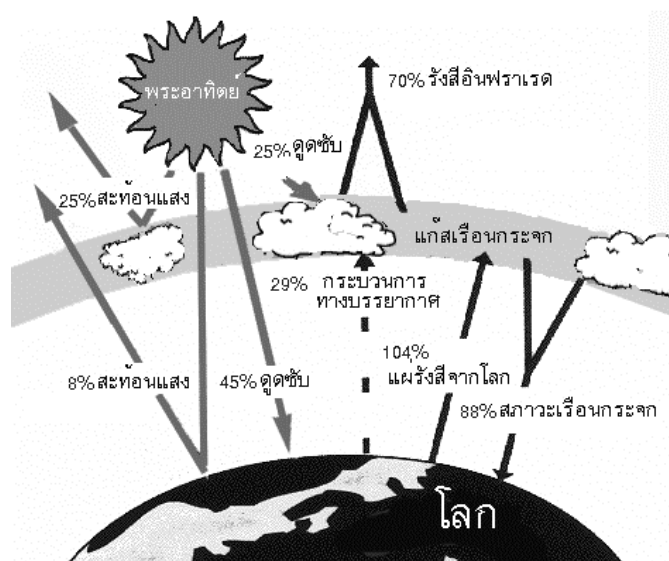
### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สภาวะโลกร้อน (Global Warming)

สภาวะโลกร้อน (Global Warming) การที่ชั้นบรรยากาศตั้งแต่ผิวโลกขึ้นไปมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะสภาพของภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิ ฝน ลม เป็นต้น ส่งผลกระทบต่อชีวิตและทำให้ระบบนิเวศมีการเปลี่ยนแปลง

ปรากฏการณ์ภาวะโลกร้อนเกิดจาก การจับเคลือบอากาศของโลกด้วยพลังงานจากดวงอาทิตย์ เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบผิวโลก พลังงานบางส่วนจะสูญเสียไปในการทำให้พื้นผิวของโลกทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น โดยโลกจะสะท้อนและแผ่กระจาย พลังงานบางส่วนที่เหลืกลับคืนสู่บรรยากาศในรูปของความร้อน แต่ก๊าซเรือนกระจกที่อยู่ในชั้นบรรยากาศของโลกจะช่วยกันกักเก็บพลังงานความร้อนเหล่านี้เอาไว้ด้วยการดูดซับ การสะท้อน หรือแผ่กระจายพลังงานความร้อนกลับสู่พื้นโลกอีกครั้ง

ดังนั้นบรรยากาศในชั้นนี้จึงกระทำตัวเสมือนเป็นเรือนกระจก คือยอมให้พลังงานในช่วงคลื่นสั้น เช่น รังสียูวีจากดวงอาทิตย์ผ่านเข้ามาได้ แต่ไม่ยอมให้พลังงานในช่วงคลื่นยาว (รังสีอินฟราเรดหรือคลื่นความร้อน) ผ่านออกไป ปรากฏการณ์เรือนกระจกจึงทำให้เกิดการเก็บสะสมความร้อนอยู่ภายในชั้นบรรยากาศทำให้โลกร้อนมากขึ้น ยังมีก๊าซเรือนกระจกมากขึ้นเท่าไร ความร้อนก็จะถูกกักไว้ในชั้นบรรยากาศมากขึ้น อันทำให้โลกยิ่งร้อนมากขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์เรือนกระจกที่เกิดจากการกักเก็บความร้อนของก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ (ที่มา: <https://sites.google.com/site/energyandenvironment00/sphawa-lok-rxn-global-warming>)

สาเหตุที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นมีดังนี้

1. การตัดไม้ทำลายป่า
2. การเผาไหม้เชื้อเพลิงในรูปแบบต่าง ๆ
3. การสลายตัวของอินทรีย์วัตถุ เช่น ขยะมูลฝอยที่ย่อยสลายได้ของเสีย
4. ก๊าซสำคัญของการเกิดก๊าซเรือนกระจก

4.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) มาจากกระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิต การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ

4.2 ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) จากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต การเผาไหม้ที่เกิดจากธรรมชาติ การเผาไหม้จากนาข้าว แหล่งที่น้ำท่วมขัง จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ

4.3 ก๊าซไนตรัสออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) จากอุตสาหกรรมที่ใช้กรดไนตริกในขบวนการผลิต อุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมไนลอนอุตสาหกรรมเคมี การเผาไหม้เชื้อเพลิงจากซากพืช และสัตว์ป่ายการเผาป่า

4.4 ก๊าซที่มีส่วนประกอบคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) อุตสาหกรรมและอุปกรณ์เครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น โฟม กระจกสเปรย์ เครื่องทำความเย็นตู้เย็น แอร์ตัวทำลาย (ก๊าซนี้จะรวมตัวทางเคมีได้ดีกับโอโซนทำให้โอโซนในชั้นบรรยากาศลดลงหรือเกิดรูรั่วในชั้นโอโซน)

4.5 Sulphur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) อุตสาหกรรมการหล่อแม่พิมพ์และอุตสาหกรรมกระจก และอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูงต่าง ๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า

4.6 Hydrofluorocarbons (HFCs) อุตสาหกรรมและอุปกรณ์เครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น เครื่องทำความเย็นตู้เย็น แอร์ ตัวทำลาย (ก๊าซนี้จะรวมตัวทางเคมีได้ดีกับโอโซนทำให้โอโซนในชั้นบรรยากาศลดลงหรือเกิดรูรั่วในชั้นโอโซน)

4.7 Perfluorinated compounds (PFCs) อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องครัว อุตสาหกรรมผลิตบรรจุภัณฑ์ อุตสาหกรรมผลิตน้ำยาซักล้าง

### ผลกระทบจากสภาวะโลกร้อนมีดังนี้

1. การเกิดฝนกรด เกิดจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และก๊าซไนตรัสออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์และโรงงานต่าง ๆ แล้วถูกปล่อยสู่บรรยากาศมากเกินไปผลกระทบที่เกิดจากการเกิดฝนกรดคือทำให้พืชไม่สามารถนำธาตุอาหารไปใช้ได้ ความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้นของน้ำทำให้สัตว์น้ำไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ทำให้สิ่งก่อสร้างเกิดการผุกร่อน เป็นต้น

2. อุณหภูมิของโลกเพิ่มขึ้น การที่อุณหภูมิอากาศเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่บนโลก นักวิทยาศาสตร์คาดการณ์ว่าถ้าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้นอีก 0.3 องศาเซลเซียส จะทำให้น้ำแข็งบริเวณขั้วโลกเกิดการละลายจนระดับน้ำในมหาสมุทรเพิ่มขึ้นอีก 100 เมตร การขยายตัวของมหาสมุทรทำให้เมืองที่อยู่บริเวณชายฝั่งทะเล และที่ราบลุ่มปากแม่น้ำที่อยู่สูงจากระดับน้ำทะเลไม่มากจะถูกน้ำท่วมจนมนุษย์ต้องมีการย้ายถิ่นฐานใหม่ ซึ่งมีผลกระทบต่อสภาพความเป็นอยู่และสภาพสังคม



รูปที่ 2.2 ผลกระทบจากสภาวะโลกร้อนที่ส่งผลกระทบต่อธารน้ำแข็ง

(ที่มา: <http://www.rayongwit.ac.th/thailandgogreen/pon.html>)

3. การเกิดพายุหมุน เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นภัยธรรมชาติต่าง ๆ มีแนวโน้มว่าจะเกิดบ่อยครั้งและรุนแรงมากยิ่งขึ้น เช่น ภัยแล้ง ไฟป่า พายุไต้ฝุ่นไซนร้อน น้ำท่วม และการพังทลายของชั้นดิน
4. สิ่งมีชีวิตที่ไม่สามารถปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปได้ ก็จะค่อยๆ ตายลงและอาจสูญพันธุ์ไปในที่สุด ทำให้บางพื้นที่กลายเป็นทะเลทรายประชาชนขาดแคลนอาหารและน้ำดื่ม
5. บางพื้นที่ประสบปัญหาน้ำท่วมหนักเนื่องจากมีฝนตกอย่างรุนแรง

## 2.2 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการกักพวงสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอย ขนาดเล็กนี้เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับนี้จะเป็นการดูดซับแบบระหว่างสถานะต่าง ๆ ทั้งสามสถานะ คือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และ ของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง ซึ่งคุณสมบัติหลักของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม คือ ความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ และคุณสมบัติการฟื้นฟู

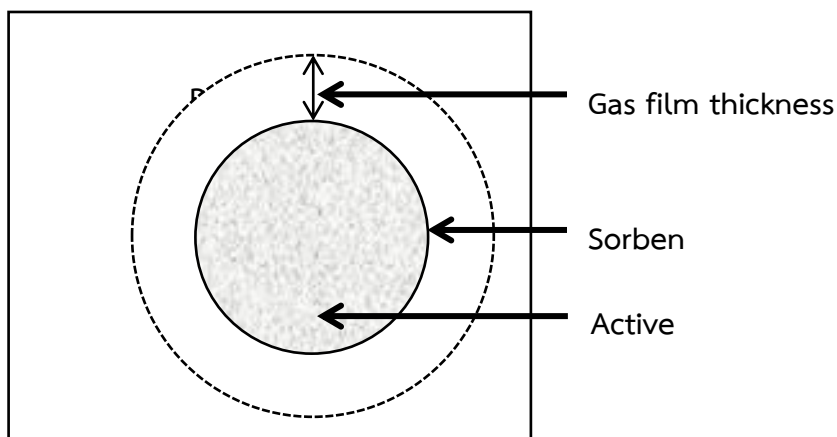


ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซกรดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับง่าย โดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่า กระบวนการสะเทิน โดยตัวดูดซับในสภาวะเบส สารประกอบเอมีนและสารประกอบคาร์บอนเนต ของธาตุหมู่ I เป็นสารที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีราคาถูก และสามารถเกิดปฏิกิริยาการดักจับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในอุณหภูมิต่ำ และใช้น้ำเป็นสารตั้งต้น กระบวนการนี้จึงเหมาะสมกับปฏิกิริยาที่เกิดหลัง การเผาไหม้เชื้อเพลิง

เมื่อคำนึงถึงเรื่องความปลอดภัยแล้ว สารประกอบเอมีนจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นการเลือกใช้ สารประกอบคาร์บอนเนตของโลหะหมู่ I จึงปลอดภัยกว่า นอกจากนี้การพิจารณาการเลือกใช้สารยังต้องขึ้นอยู่กับ กลไกการเกิดปฏิกิริยาดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการทำการทดลอง

### 2.2.1. แบบจำลองการดูดซับ (Sorption Model)

ลักษณะของการดูดซับมีส่วนคล้ายกับกระบวนการการเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ อนุภาคที่ต้องการดูดซับจะ แพร่ผ่านฟิล์มของก๊าซ (Gas Film) เพื่อทำปฏิกิริยากับด้านที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังรูปที่ 2.3 ความหนาของฟิล์มทำหน้าที่เป็นตัวต้านทาน (Mass Transfer Resistance) ซึ่งความต้านทานนี้สามารถลดได้ผ่าน การลดปัจจัย 2 ปัจจัย คือ การเพิ่มความเร็วของกลุ่มก๊าซ และการลดขนาดตัวดูดซับ



รูปที่ 2.3 แบบจำลองการดูดซับ

ตัวต้านทานอีกชนิดหนึ่งในการดูดซับคือจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และ ด้านที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา หรือสารประกอบคาร์บอนเนตของธาตุหมู่ I ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน;



เมื่อ  $M$  คือธาตุหมู่ 1

ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถคำนวณได้จากค่าคงที่อัตราของการถ่ายโอนมวลสาร (Rate of mass transfer) และค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ (Rate of sorption reaction)

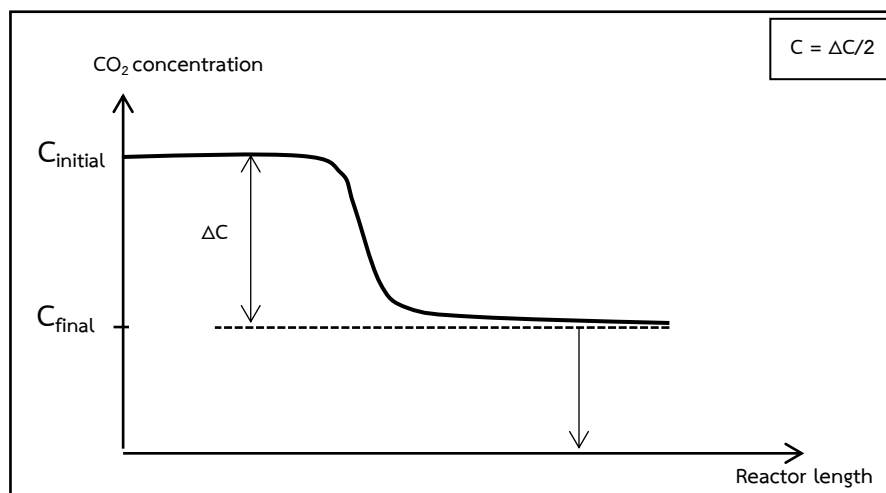
$$\frac{1}{k_{\text{eff}}} = \frac{1}{k} + \frac{1}{k_{\text{mass}}} \quad (3)$$

เมื่อ  $k_{\text{eff}}$  คือ ค่าคงที่ Effective rate  
 $k$  คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ (Rate of sorption reaction)  
 $k_{\text{mass}}$  คือ อัตราของการถ่ายโอนมวลสาร (Rate of mass transfer)

จากการศึกษาของ Onischak และคณะ [2] ได้ศึกษาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มี  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  เป็นตัวดูดซับค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแปรผันตามสถานะของการดูดซับ โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับของ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  มีค่ามากกว่า  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และมีอันดับของปฏิกิริยาเท่ากัน รูปแบบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถอธิบายได้โดยใช้  $k_{\text{eff}}$  รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของ Breakthrough Curve ของ รูปแบบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับความยาวของท่อของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการดูดซับ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อระยะทางที่เคลื่อนที่ไปในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น และจะคงที่เนื่องจากเข้าสู่ภาวะสมดุล และค่าคงที่เอฟเฟกทีฟ (Effective rate) สามารถหาได้จากสมการ (4)

$$k_{\text{eff}} = \frac{\Delta C}{C} * \frac{v}{L} \quad (4)$$

เมื่อ  $L$  คือ ระยะที่สั้นที่สุดก่อนที่ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะคงที่  
 $V$  คือ ความเร็วของก๊าซ  
 $\Delta C$  คือ ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าและขาออก  
 $C$  คือ ความเข้มข้นเฉลี่ยระหว่างความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าและขาออก



รูปที่ 2.4 Breakthrough curve สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อได้ค่า  $k$  จากการทดลอง และ  $k_{\text{eff}}$  จากกราฟ คำนวณตามสมการ (3) จะได้ค่า  $k_{\text{mass}}$  จากการคำนวณ จะเห็นได้ว่าค่า  $k$  มากกว่า  $k_{\text{eff}}$  สำหรับปฏิกิริยาอันดับสอง [17] ดังนั้นขั้นกำหนดอัตรา (The rate limiting step) ของปฏิกิริยาการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารประกอบของธาตุหมู่ I คือขั้นการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer limitation)

## 2.2.2 หลักการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Capture concept)

การดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  ถูกพัฒนาโดย Onischak, Gidaspow [14] และ Nelson และคณะ [15] ผลการวิจัยของทั้งคู่พบว่าอัตราการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับมี  $k_{\text{eff}}$  มากถึง 10 วินาทีซึ่งถือเป็นอัตราที่สูง ทำให้สามารถใช้หอดูดซับที่มีขนาดเล็กได้ การเตรียมตัวดูดซับด้วยโลหะอัลคาไลนัมหมู่ I โดยวิธีอิมเพรกเนชัน เป็นวิธีการที่ค่อนข้างแพร่หลายเนื่องจากได้ลักษณะของพื้นผิวของตัวดูดซับที่เหมาะสมและสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้การเตรียมตัวดูดซับยังใช้วิธีแคลซิเนชัน เพื่อเพิ่มความสามารถทั้งในการดูดซับและการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยปกติแล้วการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้สองทาง อย่างแรกคือการเกิด  $\text{MHCO}_3$  และเกิด  $\text{MAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง โดย M แทนธาตุของโลหะหมู่ I Zhou และคณะ [9] ได้แนะนำว่าควรกำจัด  $\text{MAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  ออกไปเพื่อที่จะให้เหลือแค่  $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการดูดซับ เนื่องจาก  $\text{K}_2\text{CO}_3$  แคตัวเดียวจะให้ผลลัพธ์ของการนำกลับมาใช้ใหม่มีค่าสูงที่สุด

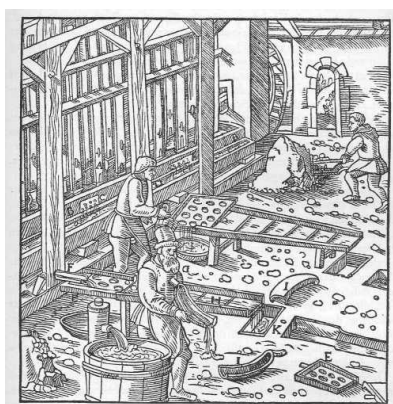
## 2.3 ฟลูอิดเซชัน (Fluidization)

ฟลูอิดเซชัน เป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวเหมือนของไหล ยกตัวอย่างเช่น อนุภาคของแข็งสามารถเคลื่อนที่จากความดันสูงไปยังความดันต่ำได้ เป็นต้น

การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดเซชันที่ได้มีการบันทึกไว้เป็นครั้งแรกเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1556 โดย Agricola ซึ่งใช้เทคนิคนี้ในการแยกแร่ให้บริสุทธิ์ โดยอาศัยระบบฟลูอิดเซชันแบบของเหลว (น้ำ) และของแข็ง (แร่ที่ต้องการทำให้บริสุทธิ์)

สิทธิบัตรฉบับแรกที่เกี่ยวข้องกับฟลูอิดเซชันเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1910 โดย Philips และ Bulteel ซึ่งผู้คิดค้นทั้งสองได้เสนอแนวทางการสัมผัสกันระหว่างก๊าซและอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมัน อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งจะถูกก๊าซสารตั้งต้นพาเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ตัวที่หนึ่ง ปฏิกิริยาเคมีหลักจะเกิดในรูปแบบการสัมผัสกันเฉพาะของอนุภาคของแข็งและของไหลแบบฟลูอิดเซชัน จากนั้น ก๊าซผลิตภัณฑ์จะพาอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งที่ผ่านการใช้งานไปยังเครื่องปฏิกรณ์เครื่องหนึ่ง (Regenerator) เพื่อปรับสภาพให้พร้อมก่อนนำกลับไปป้อนใช้งานใหม่ต่อไป

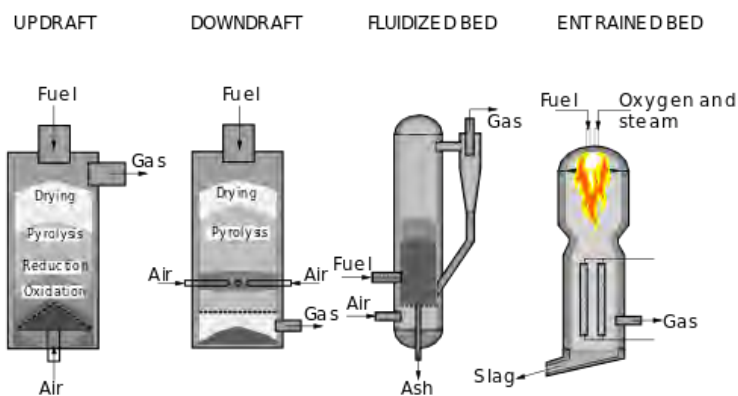
เครื่องปฏิกรณ์เชิงพาณิชย์เครื่องแรกที่เกี่ยวข้องกับฟลูอิดเซชันถูกสร้างขึ้นใน ค.ศ. 1920 โดยบริษัท BASF ประเทศเยอรมัน ซึ่งได้ประยุกต์ใช้งานฟลูอิดเซชันนี้กับการผลิตก๊าซไพริตวเซอร์ (Producer gas) หรือก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis gas) ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน จากถ่านหินและอากาศ หรือก๊าซออกซิเจน โดยอาจมีการป้อนไอน้ำเข้าไปเป็นสารตั้งต้นร่วมด้วยขึ้นกับก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ สำหรับตัวเครื่องปฏิกรณ์จะทำการป้อนก๊าซสารตั้งต้นเข้าทางด้านล่าง ป้อนถ่านหินเข้าทางด้านข้าง ก๊าซผลิตภัณฑ์จะออกจากระบบทางด้านบน ส่วนเถ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะออกจากตัวเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่างดังแสดงในรูป 2.5



Die Pochtampel A. Der Pochtrog B. Die gelöschten Blöcke C. Das Quergewinne D. Die Bretter mit Verriegelungen E. Die kleinen Gerinne F. Der Trog, in den die Erze fallen G. Die Planenherde H. Der einem Schiffchen ähnliche Sichertrög I. Ein Sumpf unter den Herden K.

รูปที่ 2.5 การประยุกต์ใช้ฟลูอิดเซชันสำหรับการแยกแร่ให้บริสุทธิ์

(ที่มา : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:De\\_re\\_metallica\\_p\\_279.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:De_re_metallica_p_279.jpg))



รูปที่ 2.6 การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดไคเซชันสำหรับปฏิกิริยาการผลิตก๊าซโพรวินเซอร์

(ที่มา: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/12/Gasifier\\_types.svg/2000px-](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/12/Gasifier_types.svg/2000px-Gasifier_types.svg.png)

[Gasifier\\_types.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/12/Gasifier_types.svg/2000px-Gasifier_types.svg.png))

เครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่เครื่องแรกที่เกี่ยวข้องกับฟลูอิดไคเซชันถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1945 โดยบริษัท Standard Oil Company ประเทศสหรัฐอเมริกา (ปัจจุบันคือบริษัท Exxon Mobil) ที่ต้องการจะเพิ่มปริมาณ ก๊าซโซลีน (Gasoline) ในกระบวนการกลั่น จึงมีการประยุกต์ใช้งานฟลูอิดไคเซชันนี้กับปฏิกิริยาการแตกตัวของ ไขมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (FCC) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การประยุกต์ใช้ฟลูอิดไคเซชันสำหรับกระบวนการแตกตัวของไขมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (FCC)

(ที่มา : [https://en.wikipedia.org/wiki/Standard\\_Oil](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Oil))

การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดไอเซชันในประเทศไทยแรกเริ่มถูกใช้ในโรงกรองน้ำประปา เพื่อล้างชั้นกรวดทรายที่ใช้ในการกรองน้ำ โดยจะผ่านน้ำเข้าไปเพิ่มทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่อยู่ในชั้นกรวดทรายเหล่านั้น นอกจากนี้ โรงงานอาหารสัตว์ใช้งานรูปแบบการสัมผัสกันเฉพาะของอนุภาคของแข็งและของไหลนี้ในการเป่าลมขนส่งส่วนผสมต่าง ๆ ไปยังเครื่องผสม และโรงงานถั่วลิสงก็ใช้เทคนิคนี้ในการทำให้ถั่วลิสงแห้งก่อนการบรรจุกระสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



(ก)

(ข)

### รูปที่ 2.8 การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดไอเซชันสำหรับ

(ก) การล้างชั้นกรวดทรายในโรงกรองน้ำประปา (ข) การขนส่งอาหารสัตว์

([https://www.mwa.co.th/ewt\\_news.php?nid=244&filename=index](https://www.mwa.co.th/ewt_news.php?nid=244&filename=index)

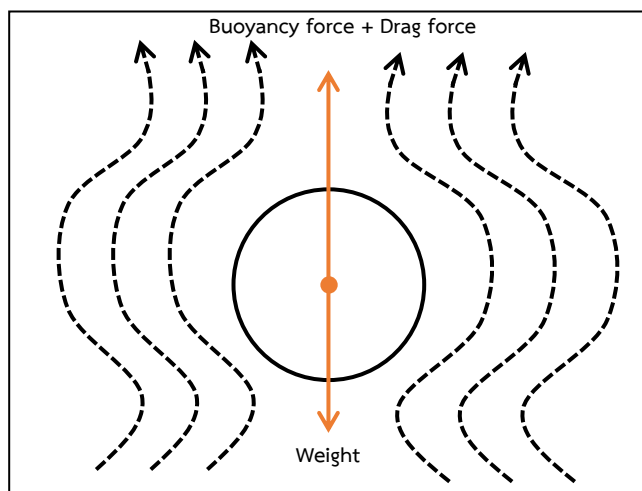
<https://pixabay.com/en/photos/silo/> และ <http://th.rddryer.com/vertical-fluid-bed-dryer/53444661.html>)

ข้อดีของฟลูอิดไอเซชันคือ มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็งสูง และมีการเขย่าผสมอยู่ภายใน (Internal mixing) สูง เนื่องจากความเร็วของไหลป้อนเข้าสู่กระบวนการ ทำให้ก๊าซและอนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน ภายในกระบวนการตลอด รวมไปถึงมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งที่เฉพาะเจาะจงคือ อนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงและต่ำจะอยู่บริเวณด้านล่างและด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ ตามลำดับ ฟลูอิดไอเซชันยังเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนที่ดี มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเบด และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูง เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานในการดำเนินการต่ำ เพราะมีแรงต้านทานภายในกระบวนการ (Friction) ที่ต่ำ นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous) และการดำเนินการทำได้ง่าย

อย่างไรก็ตามข้อเสียของฟลูอิดเซชัน คือ อนุภาคของแข็งมีเวลาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้น เนื่องจากเป็นการไหลของของไหลและอนุภาคของแข็งไปในทิศทางเดียวกันเป็นส่วนมาก โดยสามารถทำการปรับปรุงได้ด้วยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชั้นลำดับ รวมทั้งเกิดฟองก๊าซขนาดใหญ่ภายในกระบวนการในบางรูปแบบการไหล ซึ่งจะลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการในการใช้งานกับอนุภาคบางประเภท เช่น มีลักษณะเป็นของแข็งที่เปื่อย หรือเหนียว เป็นต้น และมีการสึกกร่อนง่ายเนื่องจากการชนของอนุภาคภายในเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้ต้องมีการซ่อมบำรุงบ่อยๆ [10]

### 2.3.1 ปรากฏการณ์เกี่ยวกับฟลูอิดเซชัน (Fluidization Phenomenon)

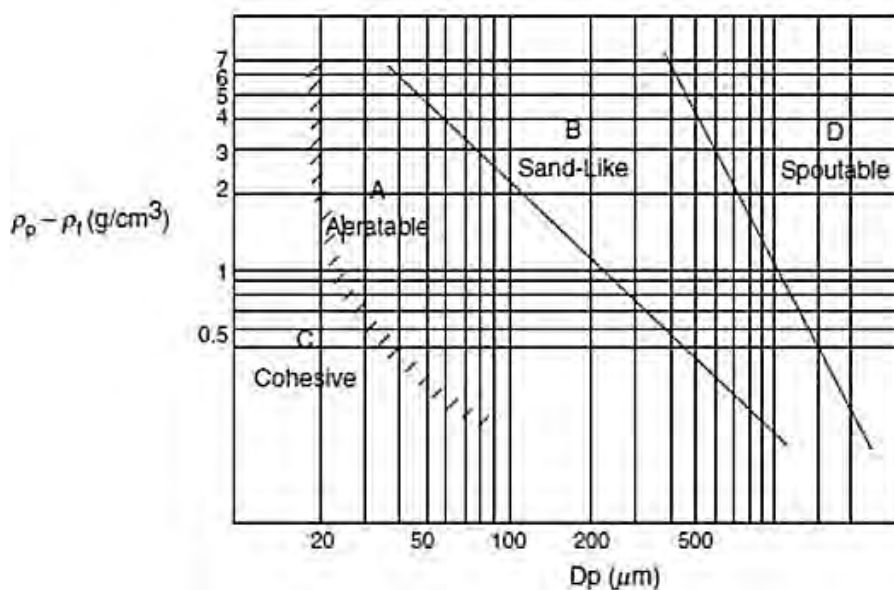
ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แสดงถึง Free body diagram ของอนุภาคที่ลอยอยู่ในที่ที่มีก๊าซเคลื่อนที่ผ่านจากข้างล่างขึ้นสู่ข้างบน แรงอันเนื่องมาจากน้ำหนักของอนุภาคมีทิศขึ้น เนื่องจากแรงโน้มถ่วง แรงที่มีทิศขึ้นเป็นผลรวมระหว่าง แรงต้าน (Drag force) และ แรงลอยตัว (Buoyancy force) แรงในทิศขึ้นนี้ถูกแสดงโดยเส้นกระแสดังแสดงในรูป 2.9 ที่ความเร็วขณะหนึ่ง แรงในทิศขึ้นมีค่ามากกว่าแรงในทิศลงเป็นเหตุให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ตรงข้ามแรงโน้มถ่วงในทิศขึ้น กล่าวคือ อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกันกับก๊าซ โดยการเคลื่อนที่นี้จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของระดับการเปลี่ยนแปลงความดัน (The pressure gradient) ซึ่งการประพฤติตัวคล้ายของไหลของอนุภาคของแข็งนี้ เรียกว่า ฟลูอิดเซชัน (Fluidization)



รูปที่ 2.9 Free body diagram ของอนุภาคของแข็ง

ประเภทของก๊าซและอนุภาคของแข็งมีผลอย่างยิ่งกับลักษณะของเส้นกระแส ซึ่งมีทิศขึ้น การจำแนกประเภทของอนุภาคอย่างคร่าว ๆ ทำได้โดยอาศัยความหนาแน่นของก๊าซ และอนุภาคของแข็ง รวมไปถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค ในปี ค.ศ. 1973 Geldart ได้แสดงทฤษฎีเกี่ยวกับการจำแนกอนุภาคไว้ดังที่แสดงในรูป 2.10

กลุ่ม C เป็นกลุ่มที่มีขนาดเล็กมากที่สุดซึ่งเป็นกลุ่มที่มีแรงยึดติด (Cohesive) มากที่สุด ขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 20 ถึง 30 ไมโครเมตร เนื่องจากมีแรงยึดติดสูง อนุภาคในกลุ่มนี้สามารถเกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก กลุ่ม A มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 20 ถึง 100 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นน้อยกว่า  $1.4 \text{ g/cm}^3$  สารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst powder) ส่วนใหญ่จะถูกจัดอยู่ในกลุ่มนี้ อนุภาคกลุ่ม A จะสามารถทำให้ขยายตัวขึ้นด้วยการเพิ่มความเร็วก๊าซ กลุ่ม B มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 40 ถึง 500 ไมโครเมตร และ มีความหนาแน่น 1.4 ถึง  $4 \text{ g/cm}^3$  ตัวดูดซับที่ทำจากสารประกอบคาร์บอนจัดอยู่ในกลุ่มนี้ ซึ่งสามารถเกิดฟองอากาศได้ทันทีในช่วงที่มีความเร็วของการไหลต่ำสุด (Incipient Fluidization) กลุ่ม D เป็นกลุ่มที่อนุภาคมีขนาดใหญ่มีขนาดของอนุภาคมากกว่า 600 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นสูง การทำให้เกิดฟลูอิดเซชันในอนุภาคกลุ่มนี้ต้องใช้ก๊าซที่มีความเร็วสูงพอที่จะชนะแรงอันเนื่องมาจากน้ำหนักของอนุภาคได้



รูปที่ 2.10 Geldart Classification

(ที่มา : <http://article.sciencepublishinggroup.com/journal/248/2481051/image005.jpg>)

### 2.3.2 รูปแบบการไหล/ช่วงของการไหล (Fluidization regime)

ฟลูอิดเซชันถูกใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการเผาไหม้ (Combustion), Fluid Catalytic Cracking (FCC), กระบวนการอบแห้ง (Drying process) และ Fast pyrolysis เนื่องจากทำให้ก๊าซและอนุภาคของแข็งผสมกันได้ดี การศึกษาอุทกพลศาสตร์ระหว่างก๊าซและอนุภาคของแข็งที่มีต่อกัน หรือ Transient flow ทำได้โดยการศึกษามวลของการเคลื่อนที่ของของแข็งและก๊าซ การเปลี่ยนรูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชันทำได้โดยการปรับความเร็วของก๊าซในท่อเปล่า (Superficial gas velocity) ( $U_0$ )



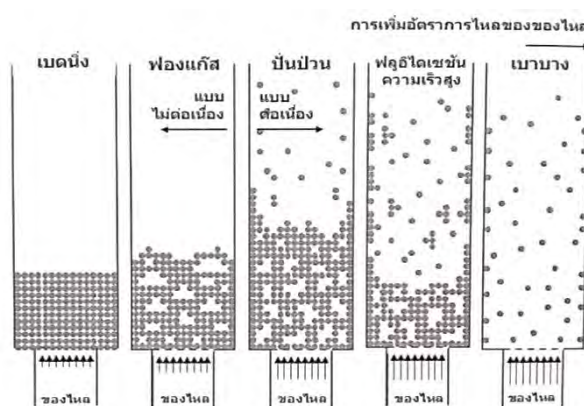
รูปแบบการไหล แสดงในรูป 9 ที่ความเร็วของก๊าซในท่อเปล่า ( $U_0$ ) ต่ำๆ จะยังไม่เกิดฟลูอิดเซชันเนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงอันเนื่องมาจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็งได้ ดังนั้นอนุภาคของแข็งยังคงอยู่นิ่งและมีความสามารถในการเรียงตัวกันสูงสุด (Packing capacity) ซึ่งอธิบายได้โดยอัตราส่วนของปริมาตรของแข็ง (Solid Volume) และปริมาตรทั้งหมดของระบบ (Total volume) โดยปกติแล้ว Packing capacity ของอนุภาคของแข็งจะอยู่ที่ 0.63 โดยประมาณ การประพุดตัวของก๊าซในช่วงนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) ก๊าซจะเคลื่อนตัวผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็ง ซึ่งจุดสุดท้ายที่จะเกิดเบดนิ่ง จะเกิดเมื่อ ความเร็วของก๊าซในท่อเปล่า ( $U_0$ ) มีค่าเท่ากับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity) ( $U_{mf}$ ) ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงอันเนื่องมาจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง

ฟลูอิดเซชันเบดแบบฟองก๊าซ (Bubbling fluidized bed) การไหลแบบนี้เริ่มถือว่าเป็นรูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชัน ความเร็วเริ่มต้นที่อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Incipiently fluidized bed, Onset of fluidization, Fluidization point หรือ Bed at minimum fluidization) มีลักษณะเด่นคือ จะเกิดฟองก๊าซขึ้น อย่างไรก็ตามลักษณะการเกิดฟองก๊าซจะเกิดต่างกันไปตามขนาดของอนุภาคของแข็ง อนุภาคของแข็งในกลุ่ม A เมื่อความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ถึงความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันจะยังไม่เกิดฟองก๊าซในทันที แต่จะมีการขยายตัวของเบดเกิดขึ้นก่อนเนื่องจากแรงกระทำระหว่างอนุภาค โดยจะเริ่มเกิดฟองก๊าซหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน [10] สำหรับอนุภาคของแข็งในกลุ่ม B และ D ฟองก๊าซจะเกิดขึ้นทันทีหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน เนื่องจากขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้มีแรงระหว่างอนุภาคลดลง ส่วนอนุภาคกลุ่ม C จะไม่เกิดฟองก๊าซเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กลงทำให้มีแรงระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น

ที่  $U_0$  มากขึ้น ฟองก๊าซจะหายไปและอนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random movement) ความเร็วนี้ เรียกว่า ความเร็ววิกฤต (Critical Velocity) ( $U_c$ ) ซึ่งเป็นความเร็วสุดท้ายในช่วงฟลูอิดเซชันเบดแบบฟองก๊าซ และเป็นจุดเริ่มต้นของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed) จะเกิดขึ้นหลังจาก  $U_c$  มีค่าอยู่ระหว่างความเร็วสองค่า ซึ่งคือ ความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวดแกว่งในกระบวนการมีค่าสูงที่สุดและความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวดแกว่งมีค่าต่ำที่สุดจนเข้าสู่ภาวะคงตัว โดยลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนอย่างชัดเจนคือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่นที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางที่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์

ฟลูอิดเซชันเบดแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed) เกิดขึ้นเมื่อ  $U_0$  มีค่ามากกว่าความเร็วขนส่ง (Transport velocity) ( $U_{tr}$ ) โดยเป็นช่วงการไหลที่อยู่ระหว่างการไหลแบบปั่นป่วนและฟลูอิดเซชันเบดแบบเบาบาง และเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของของไหล รวมเรียกลักษณะการไหลแบบนี้ว่าการไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annulus flow)

ฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง (Dilute หรือ Pneumatic transport fluidized bed) เกิดขึ้นหลังจาก  $U_g$  มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม (Minimum pneumatic transport velocity) สำหรับช่วงการไหลนี้จะพบว่า อนุภาคของแข็งทั้งหมดจะถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์โดยจะเคลื่อนที่แยกจากกันเป็นอนุภาคของแข็งเดี่ยวกระจายตัวอยู่ในกระแสของของไหล ซึ่งมีสัดส่วนระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลอยู่ที่ประมาณ 1 ต่อ 20 หรือมีปริมาณของไหลในเครื่องปฏิกรณ์อยู่สูงมาก



รูปที่ 2.11 รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิด์เบดจากทฤษฎี

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sumit และคณะ พบว่า ตัวดูดซับโพแทสเซียมบนอะลูมินาที่ถูกเตรียมด้วยกระบวนการการเผาของอลูมินา impregnated กับโพแทสเซียมอะซิเตท แสดงให้เห็นถึงการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงภายใต้สภาวะที่มีความเจือจางและเจือจางมาก ๆ ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีการไหลดโพแทสเซียมปริมาณต่ำ ๆ (ประมาณ 5% และ 10% โดยมวล) ที่สภาวะ 1% คาร์บอนไดออกไซด์ การดูดซับของ AIK มีค่ามากกว่าตัวดูดซับแบบเอมีนมาตรฐานทั้งสองตัวภายใต้สภาวะอากาศจำลองของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์แห่ง 400 ppm แสดงให้เห็นถึงการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง

Castellazzi และคณะ พบว่าการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับกลไกการดูดซับทางเคมี ความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในตัวอย่าง 15-25-36 DEA-SA เพิ่มขึ้นกับการลดลงของพื้นที่ผิวจำเพาะกับปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ ยิ่งไปกว่านั้น กลไกการศึกษา Spectroscopic IR ในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะเสถียรชี้ให้เห็นว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่ถูกดูดซับทางเคมีในบริเวณที่มีเอมีนในรูปของคาร์บอนเนต

Zhao และคณะ ศึกษาตัวรองรับชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน ซิลิกาเจล และอลูมินา โดยการเตรียมแบบการอิมเพกเนชัน (Impregnation) พบว่า

โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) บนตัวรองรับอลูมินามีความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด เนื่องจาก มีลักษณะการกระจายตัวของรูพรุนแบบมีโซพอร์ (Mesopore) อย่างกว้างขวางโดยศึกษาจากวิธี SEM และ การทดสอบโดยใช้ไนโตรเจนดูดซับ ( $N_2$  absorption) ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

Park และคณะ ศึกษาประสิทธิภาพของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบน ตัวรองรับ แอลฟา ( $\alpha$ -) และ แกมมา ( $\gamma$ -) อลูมินา ( $Al_2O_3$ ) เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสม และมีราคาที่ถูก พบว่า โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) มีความสามารถในการดูดซับมากกว่าโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแอลฟาอลูมินา ( $K_2CO_3/\alpha-Al_2O_3$ ) นอกจากนี้  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ยังมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า  $K_2CO_3/\alpha-Al_2O_3$  ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับมาก ดังนั้น งานวิจัยในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะศึกษาและคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงาน (Experiment method)

#### 3.1 ตัวดูดซับ

เนื่องจากความสามารถในการดูดซับที่สูงและเร็วของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) จึงทำให้ตัวดูดซับดังกล่าวเป็นอีกทางเลือกหนึ่งสำหรับกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) แทนที่การดูดซับโดยใช้เอมีนในรูปของเหลวซึ่งส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก

#### การเตรียมตัวดูดซับ

นำโพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) (QReC, AR grade) และแกมมาอลูมินา ( $\gamma-Al_2O_3$ ) (Merck, activity stage I) มาอย่างละ 5 กรัม ผสมกับน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized water) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร บรรจุใส่ในขวดรูปชมพู่ และนำไปเขย่า (WiseShake, model SHO-2D) ด้วยความเร็ว 220 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวดูดซับ และอนุภาคที่เหลืออยู่ไปกรองแบบสุญญากาศ และนำมาเข้าตู้อบ (Binder, model ED 115) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดน้ำออก

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการเตรียมตัวดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา โดยการปรับปรุงด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การปรับปรุงสภาพผิวแบ่งออกเป็นสองวิธี ได้แก่ การปรับปรุงตัวดูดซับด้วยเอมีนโดยใช้เอมีน 2 ชนิด ได้แก่ เมทิลเอทาโนลามีน (MEA) และเมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) โดยมีความเข้มข้นร้อยละ 15 และ 35 โดยมวล การปรับเปลี่ยนจำนวนชั่วโมงในการเขย่าสาร ได้แก่ 24 และ 5 ชั่วโมง และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการอบสาร ได้แก่ 105 และ 145 องศาเซลเซียส

โดยตารางที่ 3.1 แสดงการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล  $2^k$  ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองของปัจจัย 2 ระดับ (Level) คือระดับต่ำ (Low) และระดับสูง (High) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ (Code) คือ “-1” แทนระดับต่ำ และ “1” แทนระดับสูง และ k คือจำนวนปัจจัยที่ต้องการศึกษาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อตัวแปรตอบสนอง และตารางที่ 3.2 แสดงการออกแบบการทดลองรวมถึงผลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

Code	-1	1
Type of Amine	MEA	MDEA
Amine Concentration (%wt)	15	35
Stirring Time (hr)	24	5
Drying Temperature (°C)	105	145

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแบบ 2<sup>4</sup> ของการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Number of Experiments	Type of amine	Amine Concentration	Stirring Time	Drying Temperature
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	1	-1	-1
3	1	-1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	-1	1
6	-1	1	-1	1
7	1	-1	-1	1
8	1	1	-1	1
9	-1	-1	1	-1
10	-1	1	1	-1
11	1	-1	1	-1
12	1	1	1	-1
13	-1	-1	1	1
14	-1	1	1	1
15	1	-1	1	1
16	1	1	1	1
17*	-	-	-	-




\*Number of experiments: 17 เป็นตัวดูดซับชนิดยังไม่ถูกปรับปรุง (Unmodified)

### 3.2 วิธีทำการทดลอง

#### 3.2.1 การปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับด้วยเอมีน

1. ชั่งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอลูมินามาอย่างละ  $5 \pm 0.01$  กรัม
2. นำโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอลูมินาที่ชั่งได้บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. นำสารละลายเอมีนตามชนิดและความเข้มข้นที่กำหนดมาปริมาณ 25 มิลลิลิตร ซึ่งละลายอยู่ในน้ำปราศจากไอออนและเมทานอล บรรจุลงในขวดรูปชมพู่
4. นำขวดรูปชมพู่บรรจุลงในเครื่องเขย่าสาร และตั้งเวลาในการเขย่าสารตามจำนวนชั่วโมงที่กำหนด
5. นำสารที่ได้หลังจากการเขย่ามากรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรองเบอร์ 0
6. นำสารที่ติดบนกระดาษกรองไปอบในเครื่องอบตามอุณหภูมิที่กำหนด เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. เก็บสารที่ได้ในภาชนะดูดความชื้น

#### 3.2.2 การใช้โปรแกรม CO<sub>2</sub> Analyzer

1. เข้าโปรแกรมที่มีสัญลักษณ์ดังกล่าว 
2. เลือก USB port ที่ USB Input หากเลือก port ที่ถูกต้อง กราฟแสดงผลต้องมีการเคลื่อนไหว
3. กด save as เมื่อต้องการบันทึกข้อมูล (ข้อมูลจะเริ่มบันทึกเมื่อกด OK)
4. เมื่อต้องการสิ้นสุดการบันทึกข้อมูลกด stop ที่สัญลักษณ์วงกลมสีแดงบริเวณมุมบนซ้ายมือ 
5. หากต้องการบันทึกข้อมูลชุดใหม่ ต้องกดสัญลักษณ์ refresh  ให้เป็นสีดำ ก่อนบันทึกข้อมูลทุกครั้ง
6. กดกากบาทที่มุมบนขวาเมื่อต้องการปิดโปรแกรม

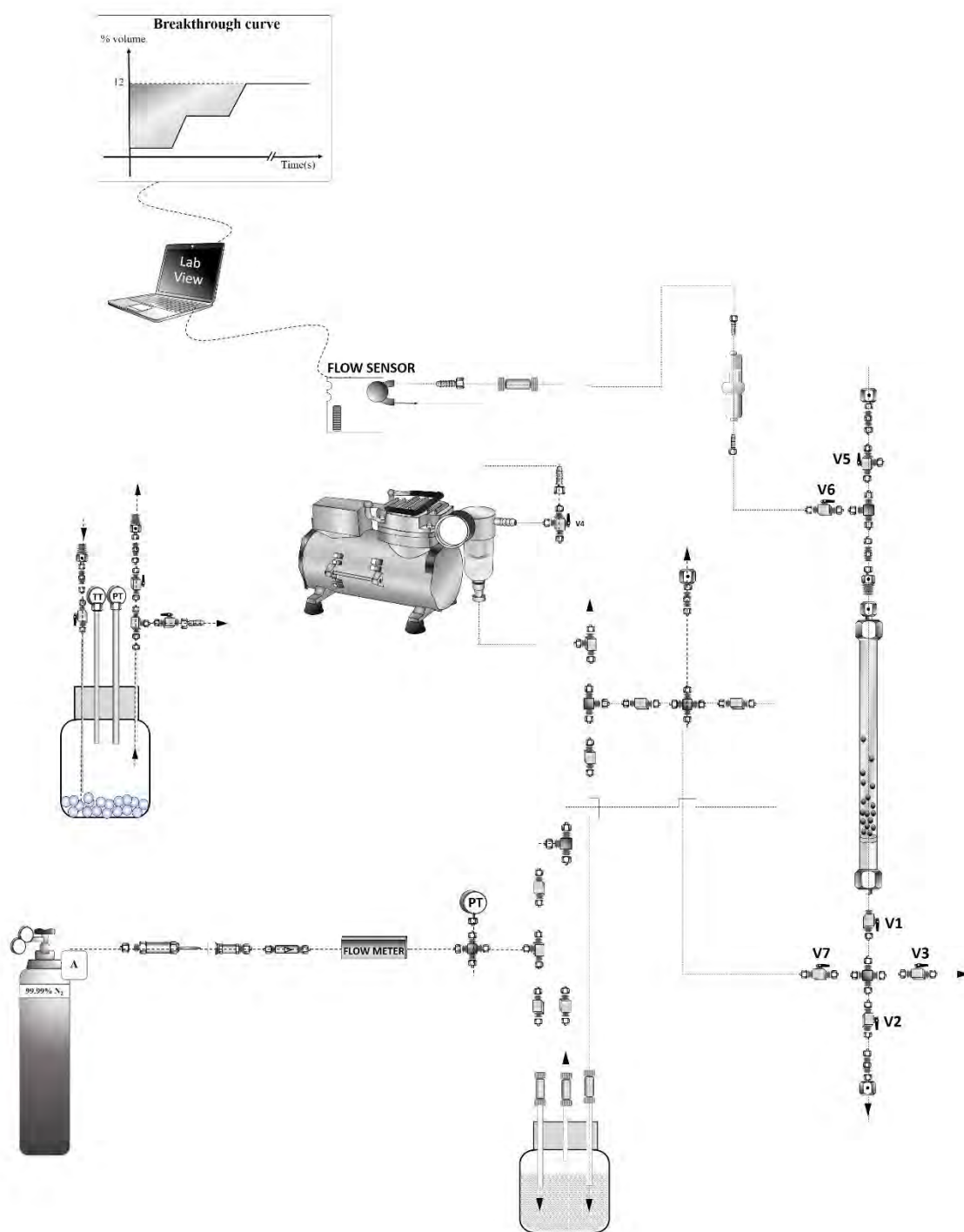
### 3.2.3 การทำ Flow measurement

การทำ Flow measurement ด้วย 3 โปรแกรมย่อย ได้แก่ Flow DDE, Flow Plot และ Flow view

1. เข้าโปรแกรม Flow DDE
  - 1.1 กด Communication แล้วเลือก Communication setting เพื่อเลือก port
  - 1.2 กด Communication แล้วเลือก Open communication
2. เข้าโปรแกรม FlowPlot จะปรากฏหน้าต่าง Select parameter
  - 2.1 กด remove พารามิเตอร์อื่น ๆ ให้เหลือเพียง '8 Measure' แล้วกด OK
3. เข้าโปรแกรม Flow View
  - 3.1 กด Advanced
  - 3.2 เลือก '0.Bus/RS232' ที่ Setpoint/control mode
  - 3.3 กรอก flow (L/m) ที่ต้องการในช่องที่อยู่เหนือปุ่ม Advanced
  - 3.4 หากไม่มีความผิดปกติ ค่าที่ขึ้นในส่วนของ measure ต้องได้เท่ากับค่าที่กรอก (setpoint)
4. เมื่อต้องการปิดโปรแกรม ให้ปิดโปรแกรม FlowDDE โดยกด Communication แล้วเลือก Close communication และกดกากบาทที่มุมบนขวามือ
5. ปิดโปรแกรม FlowPlot โดยกด stop และกดกากบาทที่มุมบนขวามือ
6. ปิดโปรแกรม FlowView โดยกดการ exit

### 3.2.4 การใช้งาน Heater

1. เปิดสวิตช์ บริเวณข้างไฟสีเขียว (ให้แถบสีขาวไปทางด้าน OFF)
  2. กำหนดค่าอุณหภูมิที่ต้องการ
- (หมายเหตุ: ห้ามเปิด Heater เมื่อไม่ได้ใส่ก๊าซเข้าระบบ)



รูปที่ 3.1 แผนผังการดูดซับด้วยเครื่องฟลูอิดเซชัน (Fluidization adsorption diagram)



### 3.2.5 การหา Resident time ของคอลัมน์เปล่า

1. เช็ควัสดุปริมาณน้ำในขวด Steam generator ให้มีปริมาณ 300 ml
2. เปิดโปรแกรม CO<sub>2</sub> Analyzer และ Flow measurement (FlowDDE, FlowPlot และ FlowView)
3. เปิดใช้งาน Downer heater กำหนดอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส
4. เปิดใช้งาน Pre-heater กำหนดอุณหภูมิ Pre-heater 1 ที่ 100 องศาเซลเซียส และกำหนดอุณหภูมิ Pre-heater 1 ที่ 60 องศาเซลเซียส
5. เปิดวาล์วของก๊าซ N<sub>2</sub>
6. เปิดวาล์ว V1, V5 และเปิดวาล์ว V7 โดยไม่ให้ก๊าซผ่าน steam generator (หัวลูกศรลงด้านล่าง) เพื่อให้ได้ก๊าซที่แห้ง
7. ปิดวาล์ว V2, V3 และ V6
8. ในกรณีที่คอลัมน์มีความชื้น ให้เปิดไล่ความชื้นในคอลัมน์ด้วยก๊าซ N<sub>2</sub> แห้งเป็นเวลา 4 นาทีหรือ จนไม่เห็นไอน้ำเกาะที่ผิวด้านในของคอลัมน์ จากนั้น ปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2 และ V3
9. ไล่ก๊าซ CO<sub>2</sub> ออกจาก line ปลอยก๊าซด้วยก๊าซ N<sub>2</sub> แห้ง โดยปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2, V3, V7 โดยไม่ให้ก๊าซผ่าน steam generator (หัวลูกศรลงด้านล่าง)
10. ไล่ก๊าซ CO<sub>2</sub> โดยเปิดวาล์ว V7 โดยให้ก๊าซผ่าน steam generator (หัวลูกศรลงด้านบน)
11. ปิดวาล์ว V2, V3 และเปิดวาล์ว V1 เพื่อปลอยก๊าซ N<sub>2</sub> เปียกเข้าคอลัมน์เป็นเวลา 4 นาทีเพื่อให้ได้คอลัมน์ชื้น โดยให้ปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่วัดได้จาก CO<sub>2</sub> Analyzer ให้น้อยกว่า 0.100
12. ปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2, V3
13. เปลี่ยน Quick connect เป็นก๊าซผสม (CO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>) ไล่ก๊าซผสมออกเป็นเวลา 4 นาที โดยปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V2, V3, V7 โดยไม่ให้ก๊าซผ่าน steam generator (หัวลูกศรลงด้านล่าง)
14. ไล่ก๊าซผสมเปียก โดยเปิดวาล์ว V7 โดยให้ก๊าซผ่าน steam generator (หัวลูกศรลงด้านบน)
15. ปิดวาล์ว V2, V3
16. อุ่นก๊าซโดยการ ปิดวาล์ว V2 แล้วเปิด หลังจากนั้นจะได้ยินเสียงก๊าซออกจาก release valve

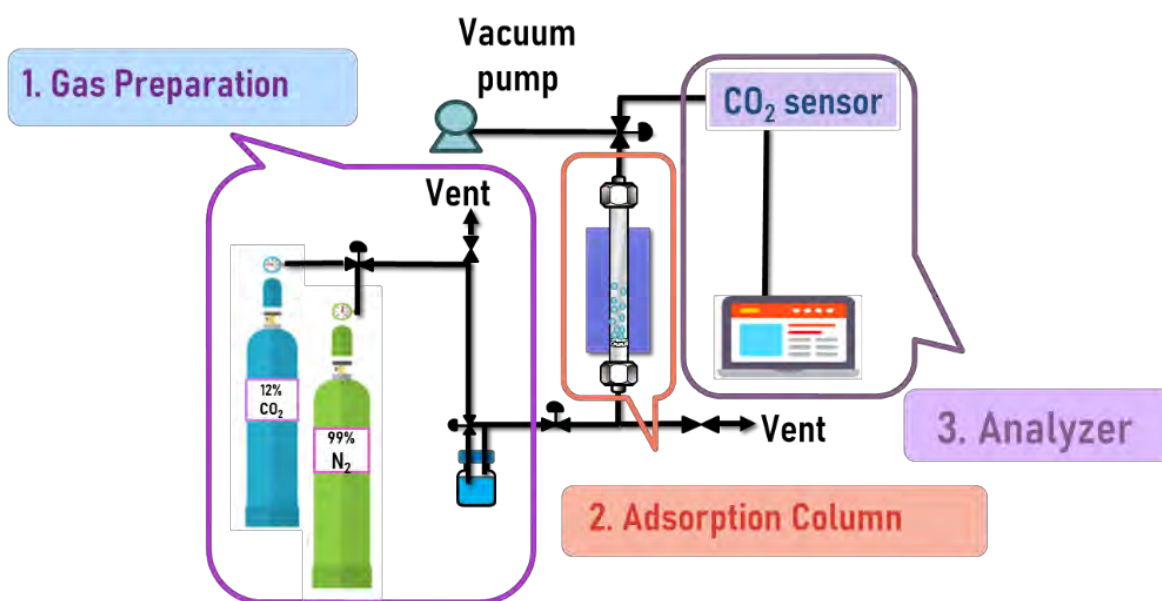
17. ทำซ้ำข้อ 18 อีก 2 รอบ (สุดท้ายแล้ววาล์ว V2 จะปิด)
18. บันทึกข้อมูลใน CO<sub>2</sub> Analyzer ทันทีที่เปิดวาล์ว V1 จากนั้น ปิดวาล์ว V1 และเปิด V2, V3

### 3.2.6 การหา Resident time เมื่อบรรจุตัวดูดซับ

1. ปฏิบัติตามข้อ 1-9 ของวิธีการหา Resident time ของคอลัมน์เปล่าเพื่อให้คอลัมน์แห้ง
2. ใส่ตัวดูดซับทางด้านบนของคอลัมน์ (หมายเหตุ: ต้องปิดวาล์ว V1 ก่อนใส่ตัวดูดซับเสมอ)
3. ดูดอากาศที่ค้างอยู่ในคอลัมน์ โดยปิดวาล์ว V5, เปิดวาล์ว V6, หมุนวาล์ว V4 ให้หัวลูกศรไปทางซ้าย และเปิดปั๊มเป็นเวลา 4 นาที หลังจากนั้นปิดปั๊ม, วาล์ว V6 และ V4
4. ปฏิบัติตามข้อ 11-12 ของวิธีการหา Resident time ของคอลัมน์เปล่า
5. ปิดวาล์ว V2, V3 และค่อยๆเปิดวาล์ว V1 และเปิดวาล์ว V5 ตามอย่างค่อยเป็นค่อยไป พร้อมกับจับเวลา 4 นาที เพื่อปล่อยก๊าซ N<sub>2</sub> เปียกเข้าคอลัมน์ สำหรับการทำให้ตัวดูดซับให้ชื้น โดยให้ปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่วัดได้จาก CO<sub>2</sub> Analyzer ให้น้อยกว่า 0.100
6. ปฏิบัติตามข้อ 14-21 ของวิธีการหา Resident time ของคอลัมน์เปล่า
7. เปิดก๊าซ N<sub>2</sub> แห้งเข้าคอลัมน์เพื่อไล่ความชื้นออก โดยเปิดวาล์ว V1 และ V7 โดยไม่ให้ก๊าซผ่าน steam generator (หัวลูกศรลงด้านล่าง)
7. นำตัวดูดซับออกจากคอลัมน์โดยการถอดคอลัมน์แล้วเทตัวดูดซับออก หรือ
  - 7.1 ถอดข้อต่อส่วนบนออกจากคอลัมน์
  - 7.2 หมุนวาล์ว V4 ให้หัวลูกศรไปทางซ้ายมือ
  - 7.3 เปิดปั๊ม และตรวจสอบสายยางที่จะนำมาดูว่าปั๊มทำงานหรือไม่
  - 7.4 ใส่สายยางเข้าในคอลัมน์ โดยค่อย ๆ เข้าใกล้ผิวหน้าของตัวดูดซับ (หมายเหตุ: อย่าจุ่มสายลงในตัวดูดซับทันที เพราะจะทำให้ตัวดูดซับอุดตันในสายยาง)

### 3.2.7 การทดสอบการดูดซับ

การทดสอบการดูดซับในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบโดยใช้วิธีการฟลูอิดเซชันซึ่งจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนการเตรียมก๊าซ (Gas Preparation), ส่วนดูดซับ (Adsorption Column) และ ส่วนการวัดและวิเคราะห์ผล (Analyzer) โดยสถานะที่เราทำการทดสอบคือที่ความดันใกล้เคียงสุญญากาศ อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคือ 60 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไนโตรเจนที่ 5 ลิตรต่ออนาที โดยขั้นตอนในการทดสอบตัวดูดซับมีดังนี้



รูปที่ 3.2 แผนภาพเครื่องทดสอบการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1. ตรวจสอบอุปกรณ์ให้พร้อมสำหรับการเริ่มการทดสอบ เช่น วาล์ว ท่อ ถึงก๊าซ เป็นต้น
2. ติดตั้ง Column เพื่อเตรียมสำหรับการใส่ตัวดูดซับ
3. ทำการเปิดวาล์วไนโตรเจนเพื่อให้เกิดการไหลของไนโตรเจนภายในระบบ
4. ใส่ตัวดูดซับลงใน Column และทำการเปิดปั๊มสุญญากาศ
5. เปิดวาล์วให้น้ำเข้ามาพร้อมกับก๊าซไนโตรเจนในระบบโดย
6. เปิดวาล์วให้ก๊าซไนโตรเจนและไอน้ำไหลเข้าสู่คอลัมน์
7. ปิดวาล์วก๊าซที่เข้าสู่คอลัมน์ และสลับวาล์วก๊าซเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

8. เปิดวาล์วให้น้ำเข้ามาพร้อมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ
9. เปิดวาล์วให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำไหลเข้าสู่คอลัมน์ และทำการบันทึกผลด้วยโปรแกรม CO<sub>2</sub> analyzer ทันทีที่เปิดวาล์ว
10. เมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขาออกของคอลัมน์มีค่าคงที่ให้ทำการปิดวาล์วและหยุดการบันทึก
11. เปิดวาล์วให้ก๊าซไนโตรเจนไหลเข้ามาในคอลัมน์เพื่อทำให้ตัวดูดซับแห้ง
12. เทตัวดูดซับออกจากคอลัมน์และเก็บไว้ในภาชนะที่ป้องกันความชื้น
13. นำผลการทดสอบที่ได้มาคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

### 3.3 การวิเคราะห์ตัวดูดซับ

ทำการทดสอบตัวดูดซับโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวดูดซับ เพื่อยืนยันถึงองค์ประกอบของเอมีนที่ทำการปรับปรุงลงไปในตัวดูดซับ



รูปที่ 3.3 เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

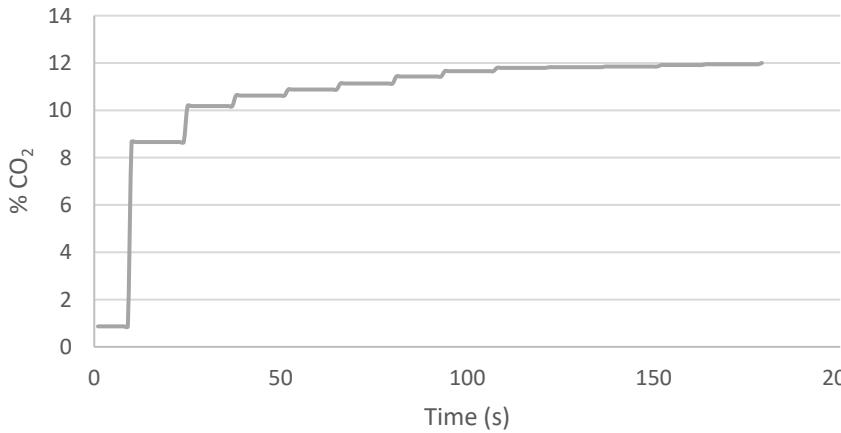
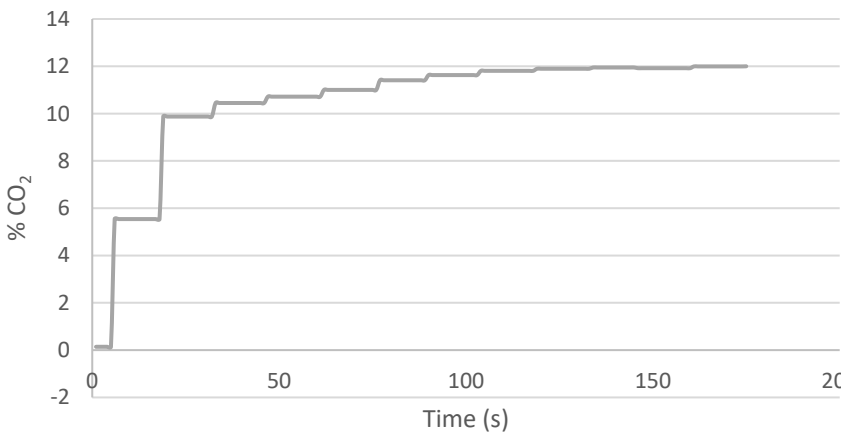
#### 4.1 เส้นโค้งแสดงการถ่ายเทมวลในระหว่างการดูดซับ (Breakthrough Curve)

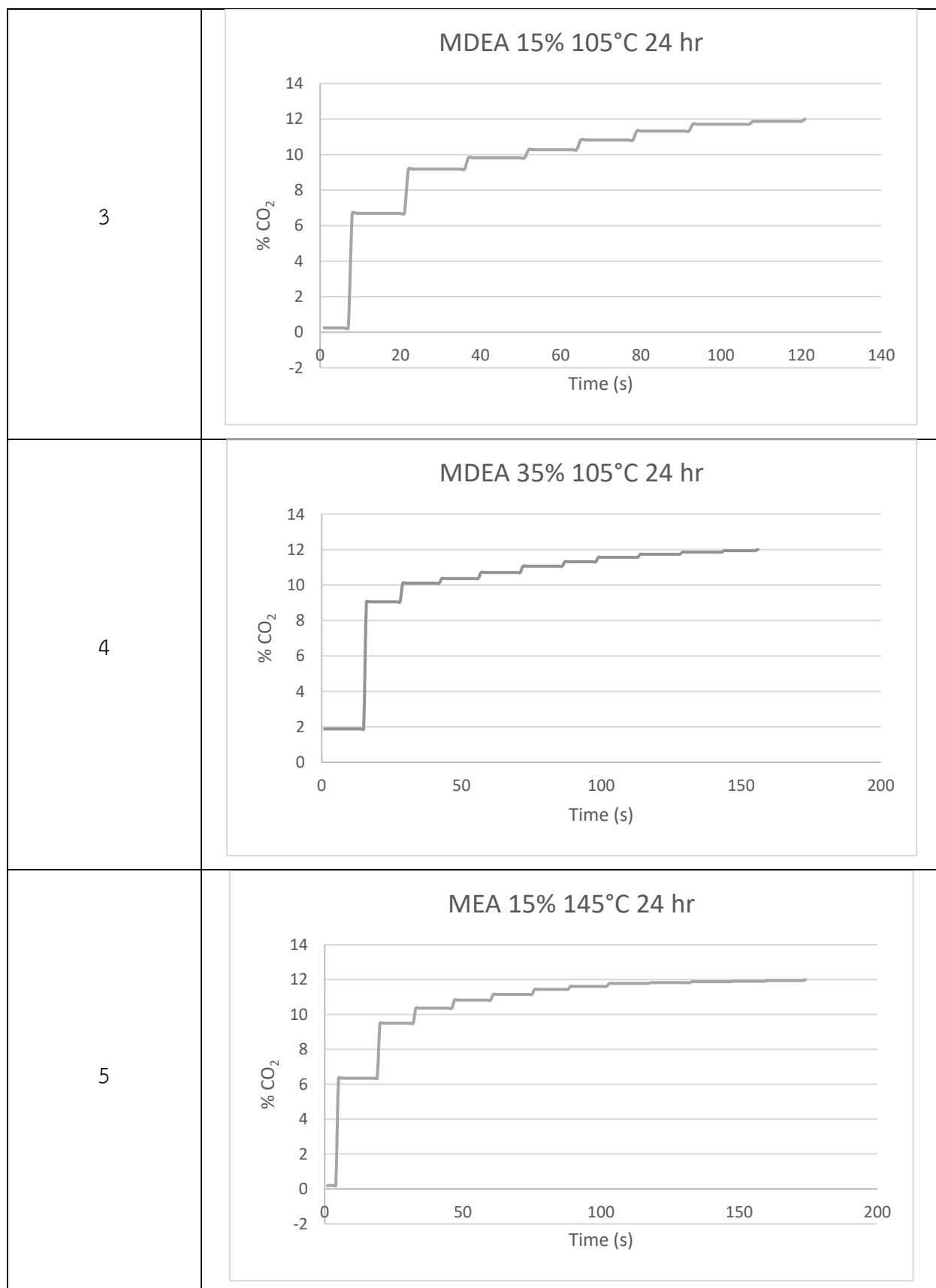
เวลาที่ใช้ในการดูดซับตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งความสามารถในการดูดซับเริ่มหมดไปเรียกว่า เวลาเบรคทรู (breakthrough time) หาได้จากกราฟเบรคทรู (breakthrough curve) โดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) จุดที่ความเข้มข้นของก๊าซในขาออกของคอลัมน์มีค่าเท่ากับความเข้มข้นของก๊าซในขาเข้าเรียกว่า จุดอิมิตัวของตัวดูดซับ (Breakthrough point) ซึ่งเป็นจุดที่ตัวดูดซับไม่สามารถทำการดูดซับต่อไปได้อีก

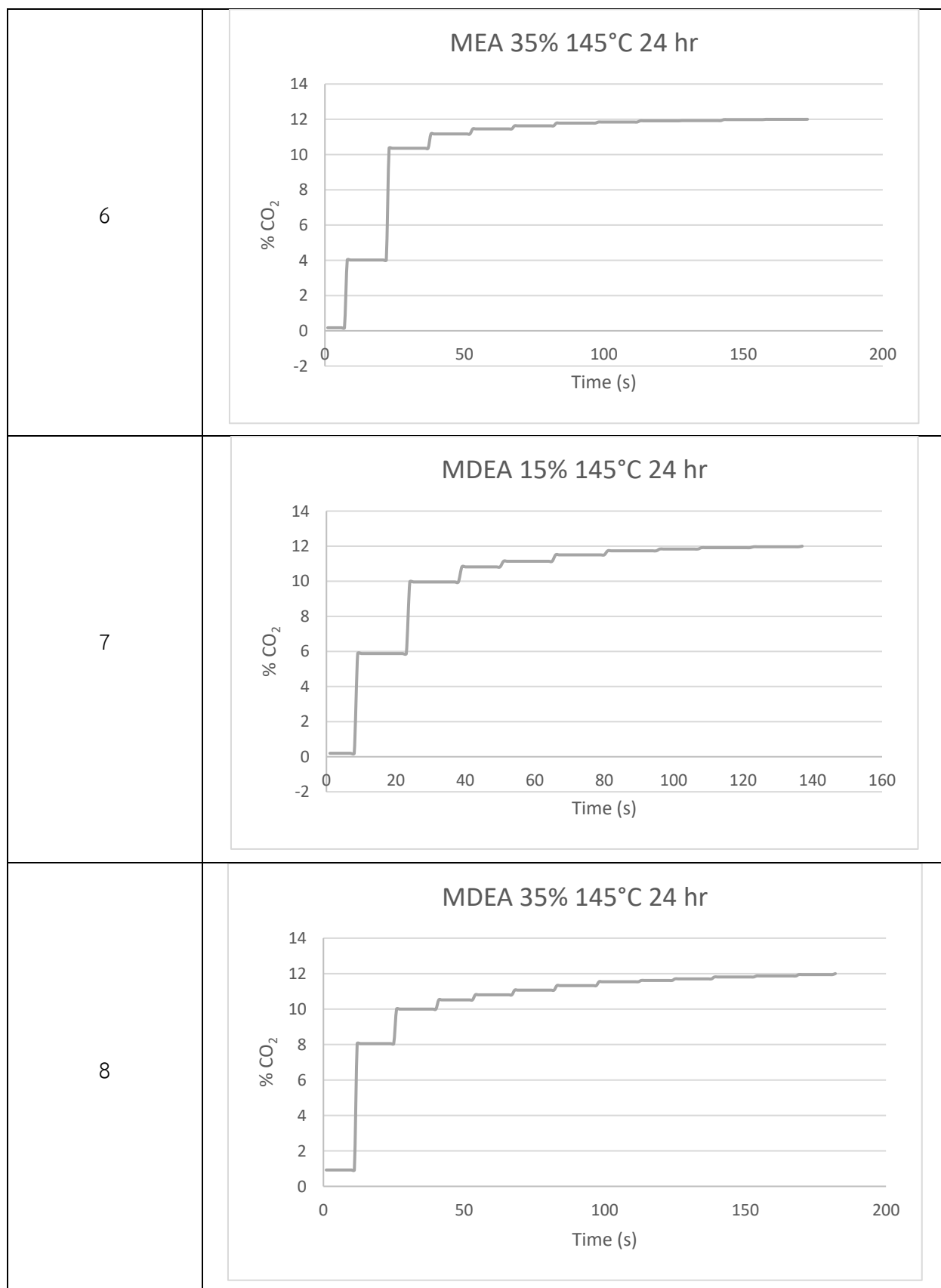
จากตารางที่ 4.1 ปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียมจากเอมีนทั้ง 2 ชนิดมีความแตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยมวล เวลาในการเขย่าสาร 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการอบที่ 145 องศาเซลเซียส (MDEA 35% 24hr 145°C) นั้นมีพื้นที่ใต้กราฟ Breakthrough Curve มากที่สุด แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับสามารถดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ค่อนข้างนานก่อนที่ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขาออกของคอลัมน์จะขึ้นไปที่ร้อยละ 12 โดยพื้นที่ใต้กราฟนี้จะถูกนำไปคำนวณหาปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ นั้นหมายความว่าพื้นที่ใต้กราฟดังกล่าวก็จะแปรผันตรงกับค่าความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  adsorption capacity) ตามสมการที่ 5 ซึ่งตัวอย่างในการคำนวณหาความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกแสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก

$$q = \frac{1}{m} \int_0^t Q(C_{in} - C_{out}) dt \quad (5)$$

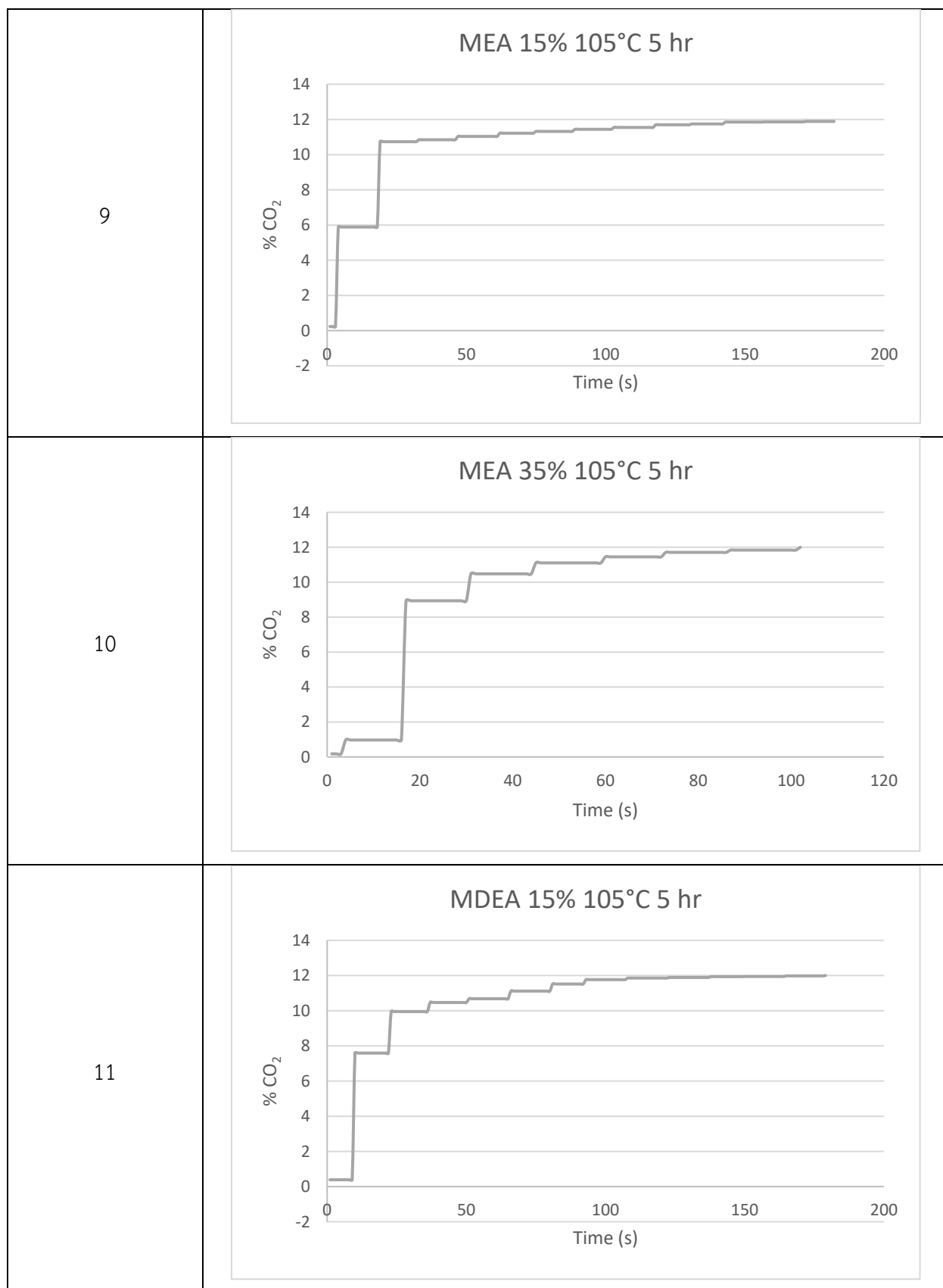
ตารางที่ 4.1 Breakthrough Curve ของตัวดูดซับที่เตรียมจากสภาวะต่าง ๆ

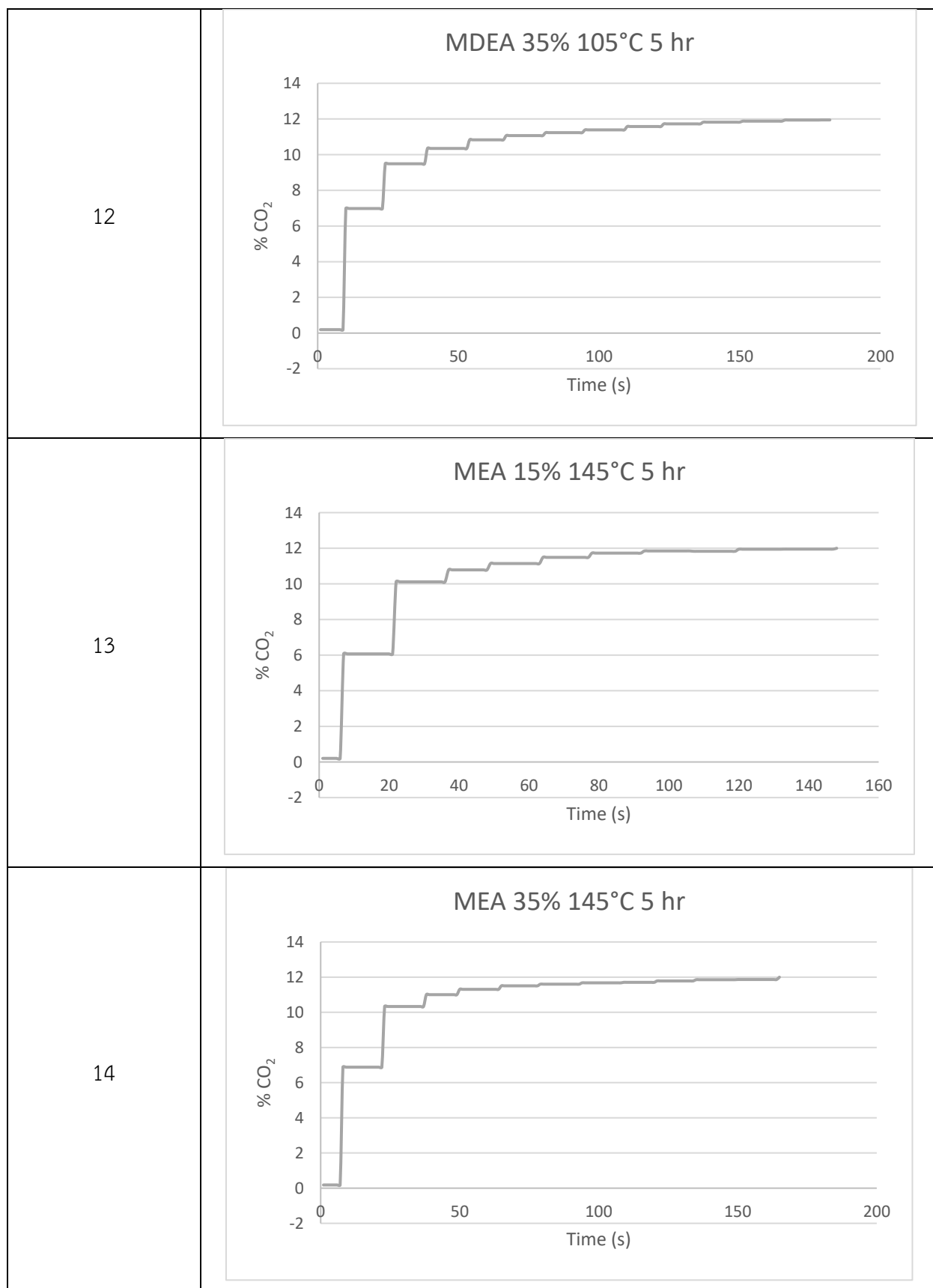
Number of Experiment	Breakthrough Curve																																								
1	<p style="text-align: center;">MEA 15% 105°C 24 hr</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data points for MEA 15% 105°C 24 hr</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>% CO<sub>2</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>10</td><td>8.5</td></tr> <tr><td>20</td><td>10.0</td></tr> <tr><td>30</td><td>10.5</td></tr> <tr><td>40</td><td>10.8</td></tr> <tr><td>50</td><td>11.0</td></tr> <tr><td>60</td><td>11.2</td></tr> <tr><td>70</td><td>11.4</td></tr> <tr><td>80</td><td>11.6</td></tr> <tr><td>90</td><td>11.8</td></tr> <tr><td>100</td><td>11.9</td></tr> <tr><td>110</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>120</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>130</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>140</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>150</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>160</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>170</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>180</td><td>12.0</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	% CO <sub>2</sub>	0	0	10	8.5	20	10.0	30	10.5	40	10.8	50	11.0	60	11.2	70	11.4	80	11.6	90	11.8	100	11.9	110	12.0	120	12.0	130	12.0	140	12.0	150	12.0	160	12.0	170	12.0	180	12.0
Time (s)	% CO <sub>2</sub>																																								
0	0																																								
10	8.5																																								
20	10.0																																								
30	10.5																																								
40	10.8																																								
50	11.0																																								
60	11.2																																								
70	11.4																																								
80	11.6																																								
90	11.8																																								
100	11.9																																								
110	12.0																																								
120	12.0																																								
130	12.0																																								
140	12.0																																								
150	12.0																																								
160	12.0																																								
170	12.0																																								
180	12.0																																								
2	<p style="text-align: center;">MEA 35% 105°C 24 hr</p>  <table border="1"> <caption>Approximate data points for MEA 35% 105°C 24 hr</caption> <thead> <tr> <th>Time (s)</th> <th>% CO<sub>2</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>10</td><td>5.5</td></tr> <tr><td>20</td><td>9.8</td></tr> <tr><td>30</td><td>10.3</td></tr> <tr><td>40</td><td>10.6</td></tr> <tr><td>50</td><td>10.8</td></tr> <tr><td>60</td><td>11.0</td></tr> <tr><td>70</td><td>11.2</td></tr> <tr><td>80</td><td>11.4</td></tr> <tr><td>90</td><td>11.6</td></tr> <tr><td>100</td><td>11.8</td></tr> <tr><td>110</td><td>11.9</td></tr> <tr><td>120</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>130</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>140</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>150</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>160</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>170</td><td>12.0</td></tr> <tr><td>180</td><td>12.0</td></tr> </tbody> </table>	Time (s)	% CO <sub>2</sub>	0	0	10	5.5	20	9.8	30	10.3	40	10.6	50	10.8	60	11.0	70	11.2	80	11.4	90	11.6	100	11.8	110	11.9	120	12.0	130	12.0	140	12.0	150	12.0	160	12.0	170	12.0	180	12.0
Time (s)	% CO <sub>2</sub>																																								
0	0																																								
10	5.5																																								
20	9.8																																								
30	10.3																																								
40	10.6																																								
50	10.8																																								
60	11.0																																								
70	11.2																																								
80	11.4																																								
90	11.6																																								
100	11.8																																								
110	11.9																																								
120	12.0																																								
130	12.0																																								
140	12.0																																								
150	12.0																																								
160	12.0																																								
170	12.0																																								
180	12.0																																								

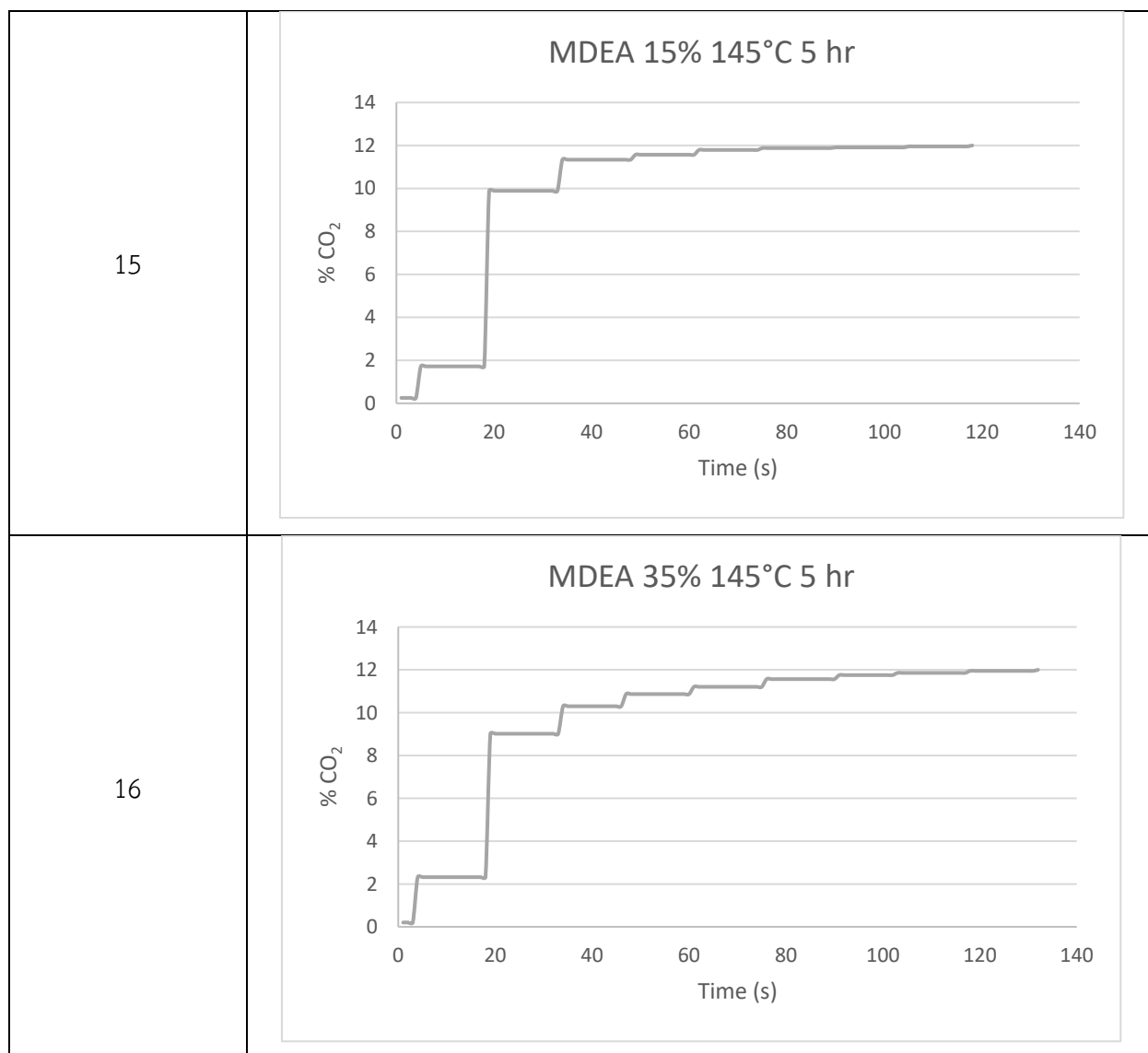












#### 4.2 ปฏิบัติการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา

เมื่อทำการทดลองดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินาที่ได้จากการเตรียมโดย (1) การปรับปรุงตัวดูดซับด้วยเอมีน (2) ความเข้มข้นของเอมีน (3) จำนวนชั่วโมงในการเขย่าสาร (4) อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง พบว่า ตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเอมีนชนิดทุติยภูมิ (MDEA) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยมวล เวลาในการเขย่าสาร 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการอบที่ 145 องศาเซลเซียส (MDEA 35% 24hr 145°C) นั้นมีปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงที่สุด คือ มีความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 76.43 มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับ รองลงมาคือตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเอมีนชนิดทุติยภูมิ (MDEA) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยมวล ใช้ระยะเวลาในการเขย่าสาร 24 ชั่วโมง และใช้อุณหภูมิในการอบที่ 105 องศาเซลเซียส (MDEA 35% 24hr 105°C) มีความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 76.32 กรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับทั้งสองชนิดนี้มีปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าตัวดูดซับแบบไม่ผ่านการปรับปรุงที่มีปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 27.17 มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับ

#### ความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Adsorption Capacity)

จากการทดสอบตัวดูดซับโดยการป้อนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้น 12% เพื่อทดสอบตัวดูดซับ และได้ทำการคำนวณความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Adsorption Capacity) ซึ่งผลการคำนวณแสดงไว้ดังตารางที่ 4.2

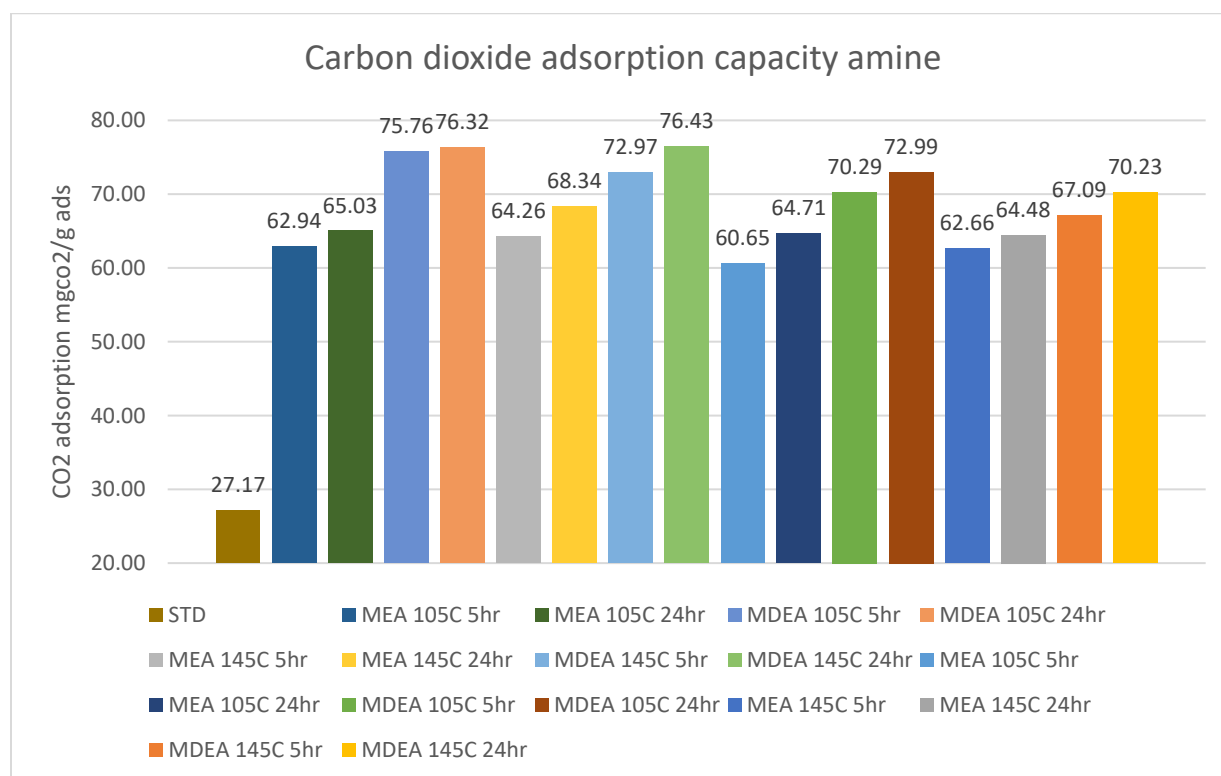
ตารางที่ 4.2 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และผลการทดลอง

Number of Experiments	Type of amine	Amine Concentration	Stirring Time	Drying Temperature	CO <sub>2</sub> Adsorption Capacity (mg CO <sub>2</sub> /g sorbent)
1	MEA	15 %	24 h	105 °C	64.71
2	MEA	35 %	24 h	105 °C	65.03
3	MDEA	15 %	24 h	105 °C	72.99
4	MDEA	35 %	24 h	105 °C	76.32
5	MEA	15 %	24 h	145 °C	64.48
6	MEA	35 %	24 h	145 °C	68.34
7	MDEA	15 %	24 h	145 °C	70.23
8	MDEA	35 %	24 h	145 °C	76.43
9	MEA	15 %	5 h	105 °C	60.65
10	MEA	35 %	5 h	105 °C	62.94
11	MDEA	15 %	5 h	105 °C	70.29
12	MDEA	35 %	5 h	105 °C	75.76
13	MEA	15 %	5 h	145 °C	62.66
14	MEA	35 %	5 h	145 °C	64.26
15	MDEA	15 %	5 h	145 °C	67.09
16	MDEA	35 %	5 h	145 °C	72.97
17*	-	-	-	-	27.17

\*Number of experiments: 17 เป็นตัวดูดซับชนิดยังไม่ถูกปรับปรุง (Unmodified)

### 4.3 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Adsorption Capacity)

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงผลของการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเอมีนทั้ง 2 ชนิดในทุก ๆ สภาวะ ซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนถึงความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเอมีน นั้นแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยสารละลายเอมีนช่วยให้การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ รวมถึงตัวแปรอื่น ๆ ที่ทำการศึกษา เช่น การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเอมีนก็มีส่วนที่ทำให้ความสามารถเหล่านี้เพิ่มขึ้น



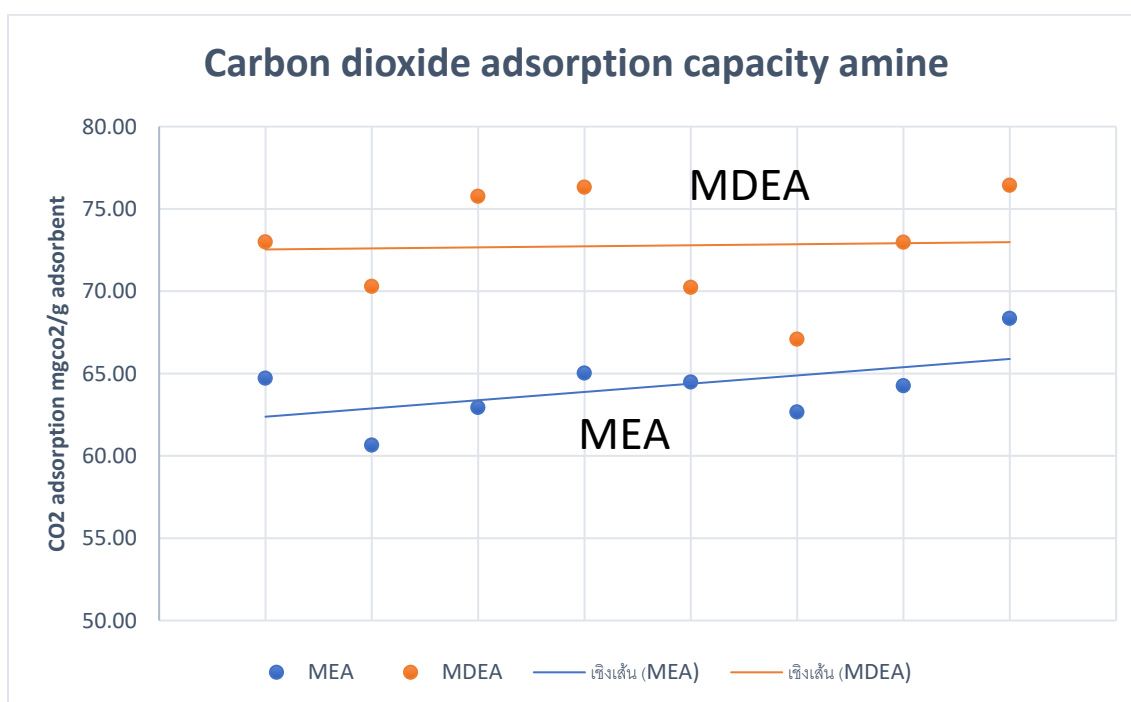
รูปที่ 4.1 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบค่า CO<sub>2</sub> adsorption capacity ของตัวดูดซับของแข็ง

เมื่อสังเกตถึงความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการเตรียมตัวดูดซับที่แตกต่างกันตามตัวแปรที่ทำการศึกษา พบว่า การปรับปรุงตัวดูดซับด้วยเอมีน การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้น ชั่วโมงที่ใช้ในการเขย่า รวมถึงการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตัว std หรือ ตัวดูดซับพื้นฐานที่ไม่ทำการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยเอมีน

## 4.4 ผลของตัวแปรที่ทำการศึกษา

### 4.4.1 ผลของชนิดเอมีนที่ทำการศึกษา

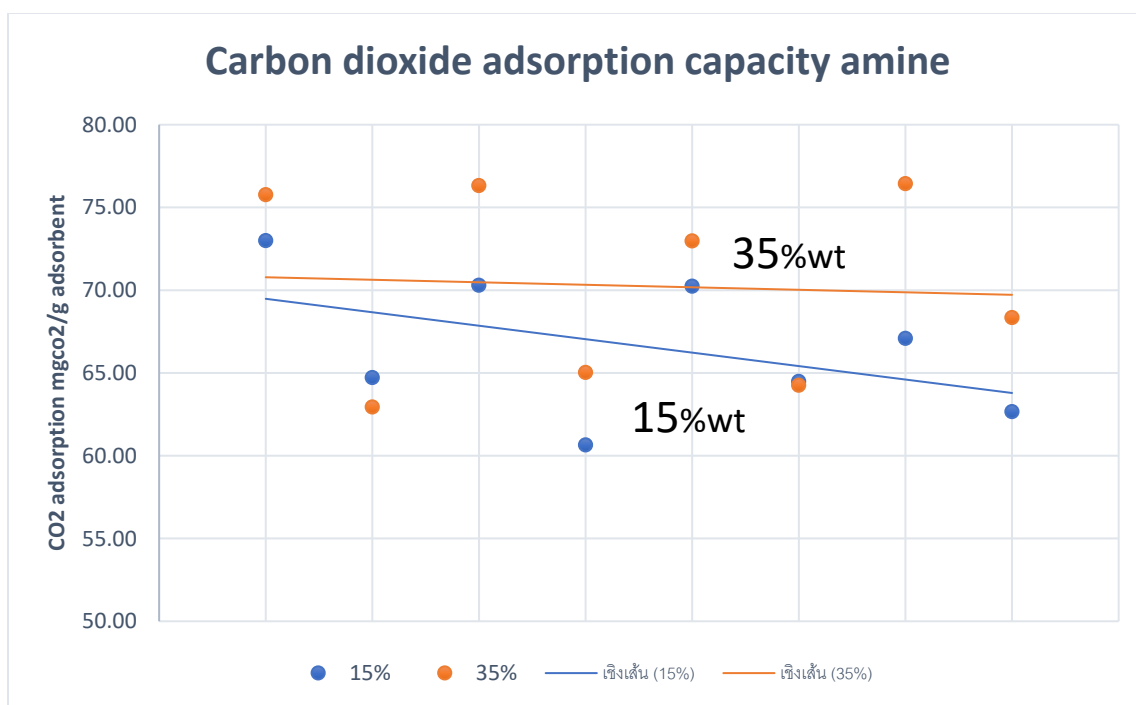
จากการศึกษาปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยทำการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยวิธีการเปลี่ยนชนิดของเอมีนที่เติมลงไปในตัวดูดซับของแข็งเพื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติในการดูดซับ ซึ่งเอมีนที่ทำการศึกษามี 2 ชนิดได้แก่ เมทิลเอทาโนลามีน (MEA) และ เมทิลไดเอทาโนลามีน (MDEA) ซึ่งผลจากการทดสอบตัวดูดซับแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่ทำการปรับปรุงโดยใช้ MDEA ให้ค่าความสามารถในการดูดซับ ( $\text{CO}_2$  adsorption capacity) สูงกว่าตัวดูดซับที่ทำการปรับปรุงโดยใช้ MEA นั้นเป็นผลมาจาก MDEA เป็นเอมีนชนิด Diamine นั่นคือมีหมู่ฟังก์ชันของอะมิโนอยู่ถึง 2 หมู่ด้วยกัน ซึ่งหมู่อะมิโนที่กล่าวถึงจะสามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้ MDEA ที่มีจำนวนหมู่อะมิโนมากกว่า MEA สามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่า ดังรูป 4.2



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับตัวดูดซับที่ปรับปรุงด้วยเอมีนชนิด MEA และ MDEA

#### 4.4.2 ผลของความเข้มข้นของเอมีน

จากการศึกษาปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยทำการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยวิธีการเปลี่ยนความเข้มข้นของเอมีนที่เติมลงไปในตัวดูดซับของแข็งเพื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติในการดูดซับ ซึ่งความเข้มข้นของเอมีนที่ทำการศึกษามี 2 ความเข้มข้น ได้แก่ ร้อยละ 15 และ 35 โดยมวล ซึ่งจากการทดสอบตัวดูดซับแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่ทำการปรับปรุงโดยใช้เอมีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 35 ให้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงกว่าตัวดูดซับที่ทำการปรับปรุงโดยใช้เอมีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 เป็นผลมาจากความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นทำให้มีโมเลกุลของเอมีนที่เข้าไปทำปฏิกิริยาจับกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ทำให้มีค่า  $\text{CO}_2$  adsorption capacity ที่สูงกว่า ดังรูป 4.3

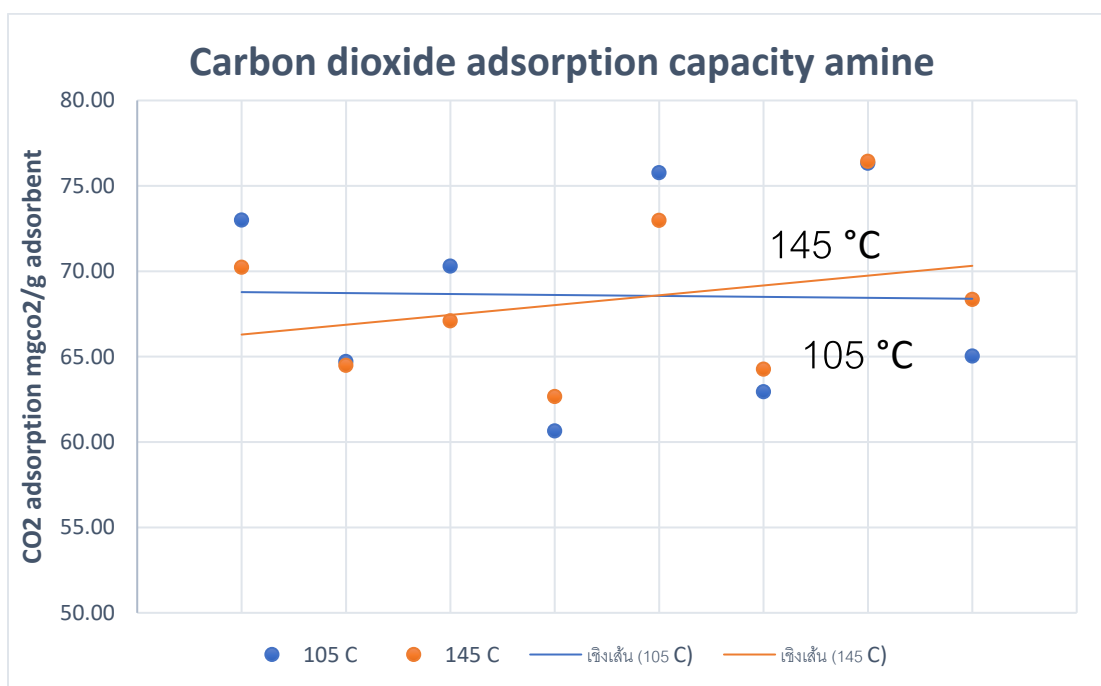


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับตัวดูดซับที่ปรับปรุงด้วยเอมีนที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 และ 35 โดยมวล



#### 4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งตัวดูดซับ

จากการศึกษาปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยทำการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยวิธีการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งอุณหภูมิที่ทำการศึกษามี 2 อุณหภูมิได้แก่ 105 และ 145 องศาเซลเซียส ซึ่งผลจากการทดสอบตัวดูดซับแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่อบโดยใช้อุณหภูมิดังกล่าวนั้นให้ค่าความสามารถในการดูดซับ ( $\text{CO}_2$  adsorption capacity) ไม่แตกต่างกัน นั้นแสดงว่าการอบตัวดูดซับในช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษามีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากอุณหภูมิที่ทำการศึกษานั้นยังคงมีค่าต่ำกว่าจุดเดือดของเอมีนทั้งสองชนิดคือ 170 และ 247.1 องศาเซลเซียสของเมทิลเอทานอลามีน (MEA) และเมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) ตามลำดับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิแตกต่างกัน ดังรูป 4.4

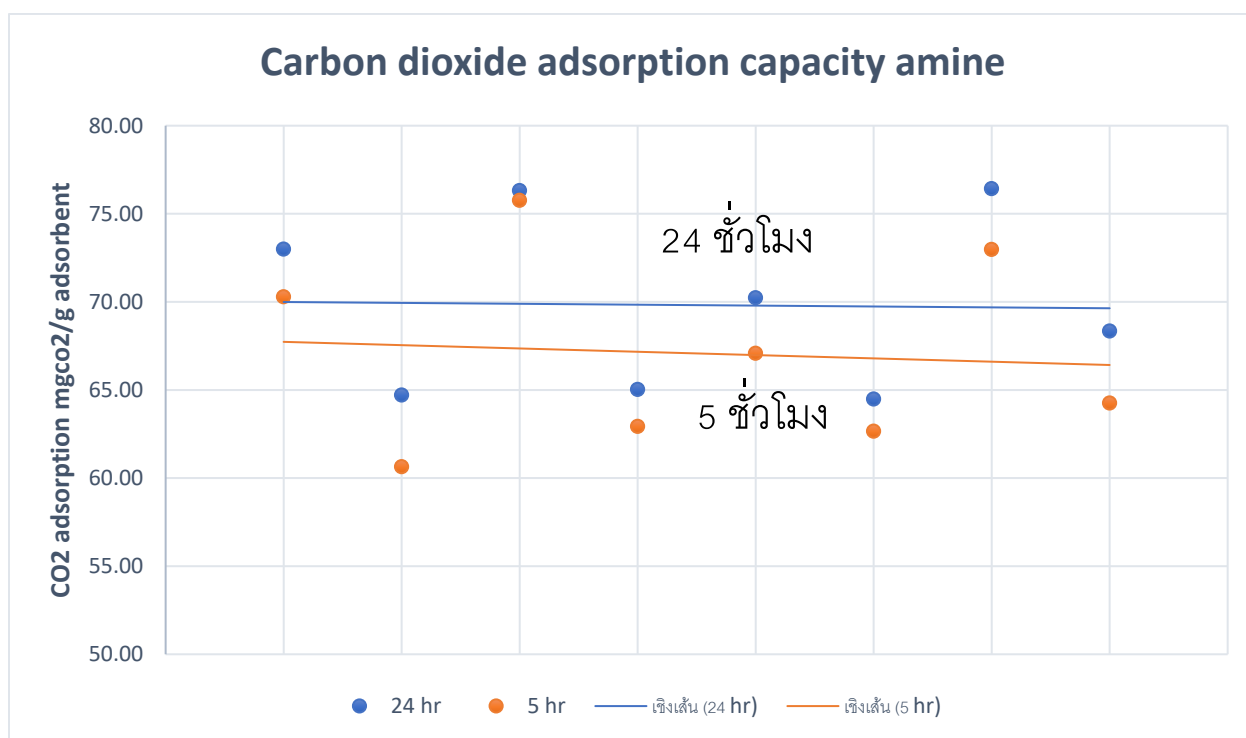


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งตัวดูดซับ

ที่ 105 และ 145 องศาเซลเซียส

#### 4.4.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการเขย่าสารผสมในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ

จากการศึกษาปฏิกิริยาการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยทำการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยวิธีการเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการผสมหรือเขย่าตัวดูดซับของแข็งกับเอมีนที่ทำการปรับปรุง ซึ่งระยะเวลาที่ทำการศึกษามี 2 ระยะเวลา ได้แก่ 5 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ซึ่งผลจากการทดสอบตัวดูดซับแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่ใช้เวลาในการเขย่าในขั้นตอนการเตรียม 24 ชั่วโมงให้ค่าความสามารถในการดูดซับ ( $\text{CO}_2$  adsorption capacity) สูงกว่าตัวดูดซับที่ใช้เวลาในการเขย่าในขั้นตอนการเตรียม 5 ชั่วโมง นั่นเป็นผลมาจากระยะเวลาที่นานกว่าจะทำให้สารละลายเอมีนที่เราทำการเติมลงไปในตัวดูดซับของแข็งเข้ากันได้มากยิ่งขึ้น นั่นคือโมเลกุลของเอมีนจะเข้าไปเกาะติดกับพื้นผิวของตัวดูดซับของแข็ง ทำให้เมื่อทำการทดสอบการดูดซับตัวทดสอบที่ใช้เวลาในการเขย่าสารนานกว่าจึงมีค่า  $\text{CO}_2$  adsorption capacity ที่สูงกว่า ดังรูป 4.5

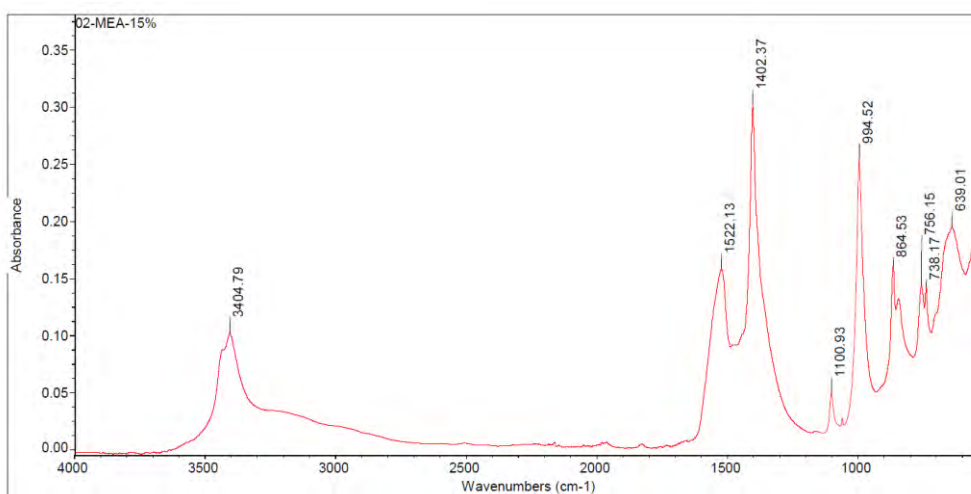


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับกับระยะเวลาในการเขย่าสารผสม  
ในขั้นตอนการเตรียมที่ 5 และ 24 ชั่วโมง

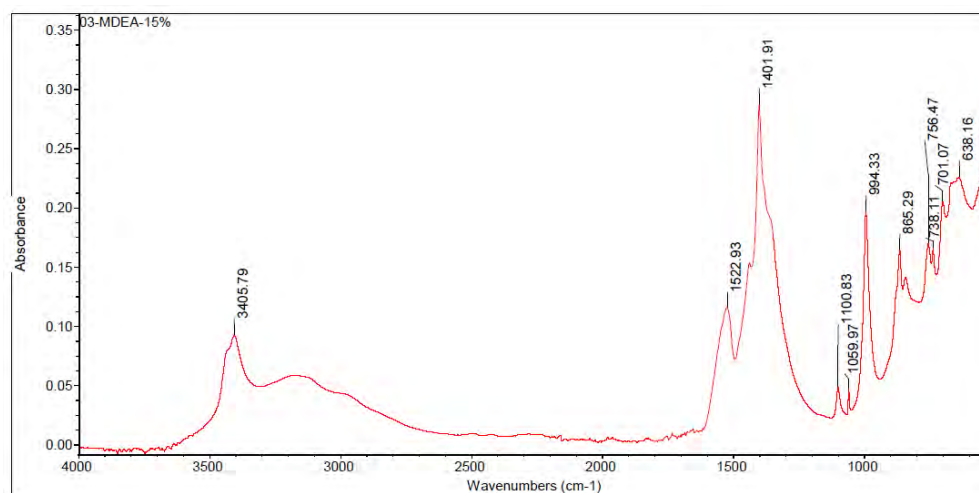
#### 4.5 ผลการวิเคราะห์ทางองค์ประกอบของตัวดูดซับ

##### การวิเคราะห์การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสาร (FTIR)

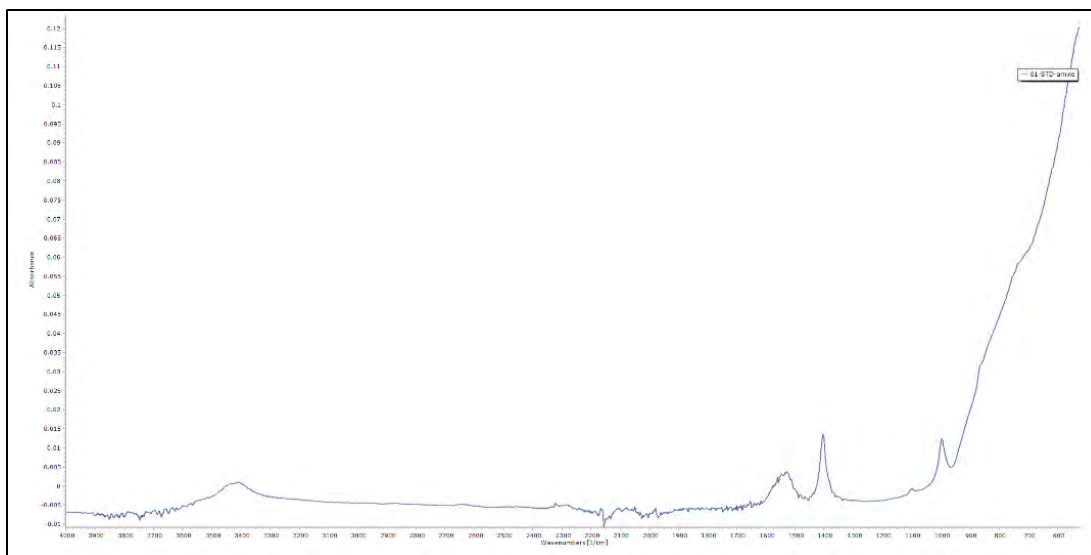
การวิเคราะห์ IR สเปกตรัม IR สเปกตรัมมีประโยชน์ในการหาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล แต่เนื่องจากมีพีคจำนวนมากใน IR สเปกตรัม จึงสนใจเฉพาะในการตรวจสอบว่ามีหมู่เอไมด์หรือไม่ระหว่างตัวพื้นฐานกับตัวที่ปรับปรุงด้วย MEA และ MDEA โดยจากการวิเคราะห์ค่าดูดซึมของเอมีน หมู่ฟังก์ชันเอไมด์ (N-H) ให้แถบที่มีความเข้มปานกลางใกล้เคียง  $3500 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งจากการวิเคราะห์ FTIR ดังรูป 4.6 ที่ทำการปรับปรุงตัวดูดซับพื้นฐานด้วยเอมีนนั้นมีพีคสูงชันที่ตำแหน่งประมาณ  $3400\text{-}3500 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการยืนยันถึงการเข้าไปยึดเกาะ (Impregnation) ของเอมีนบนพื้นผิวของตัวดูดซับของแข็ง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR (ก) MEA 15% stir 24hr Drying temp 105 °C (ข) MDEA 15% stir 24hr Drying temp 105 °C (ค) STD stir 24hr Drying temp 105 °C

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้ศึกษาตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนอนุภาคนาโนที่ผ่านการปรับปรุงวิธีการเตรียมด้วยเอมีน 2 ชนิด คือ เมทิลเอทานอลามีน (MEA) และเมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) รวมไปถึงการศึกษาลักษณะของขั้นตอนการเตรียม ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายเอมีน จำนวนชั่วโมงในการเขย่าสาร และอุณหภูมิที่ใช้ในการอบสารจากการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยมวล เวลาในการเขย่าสาร 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิในการอบที่ 145 องศาเซลเซียส (MDEA 35% 24hr 145°C) นั้นส่งผลให้ปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการปรับปรุงด้วยวิธีอื่น ๆ รวมทั้งมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุง

โดยผลจากการทดสอบการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ทราบถึงผลของตัวแปรที่ทำการศึกษาดังนี้ ผลของชนิดเอมีนที่ทำการศึกษา การปรับปรุงตัวดูดซับด้วยเอมีนชนิด เมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) ให้ผลการทดสอบตัวดูดซับดีกว่า เมทิลเอทานอลามีน (MEA) การศึกษาผลของความเข้มข้นของเอมีน ผลการทดสอบค่าการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นที่มากกว่าให้ผลการดูดซับที่ดีกว่า ต่อมาเป็นผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งตัวดูดซับ การศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อค่าความสามารถในการดูดซับ และสุดท้ายผลของเวลาที่ใช้ในการเขย่าสารผสมในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับ การทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แสดงให้เห็นว่าการใช้ระยะเวลาที่นานกว่าในการเขย่าเพื่อผสมสารผสมระหว่างตัวดูดซับของแข็งกับสารละลายเอมีนให้ค่าความสามารถในการดูดซับ ( $\text{CO}_2$  adsorption capacity) ที่ดีกว่าในการใช้ระยะเวลาการเขย่าที่ต่ำกว่า

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิควิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสาร (FTIR) พบว่าการเปรียบเทียบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของตัวอย่างที่ทำการปรับปรุงตัวดูดซับด้วยเอมีนกับตัวพื้นฐานที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงด้วยเอมีน จะพบเห็นแถบของความถี่ที่ช่วง  $3400\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นช่วงของสารประกอบจำพวกเอไมด์นั้นแสดงให้เห็นชัดเจนว่าการเตรียมตัวดูดซับทำให้เอมีนสามารถเข้าไปยึดเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับของแข็งได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรควบคุมปัจจัยภายนอกที่มีอาจผลต่อการทดลอง เช่น ไม่ทำการทดลองในช่วงที่มีความชื้นในอากาศสูง เนื่องจากจะทำให้ตัวดูดซับอาจชื้น และทำให้ปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับลดลง นอกจากนี้ ควรติดตั้งแผ่นกรองในคอลัมน์ส่วนบนก่อนที่ก๊าซจะออกจากคอลัมน์เพื่อลดการสูญเสียของตัวดูดซับ และลดโอกาสเกิดการอุดตันของสายยางที่เชื่อมระหว่างคอลัมน์และเซนเซอร์วัดความเข้มข้นของก๊าซที่ออกจากคอลัมน์เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง

## รายการอ้างอิง

- [1] Zhao CW, Chen XP, and Zhao CS. CO<sub>2</sub> Absorption Using Dry Potassium-Based Sorbents with Different Supports. *Energy Fuels* 2009; 23:4683–4687.
- [2] Park YC, Jo SH, Park KW, Park YS, Yi CK. Effect of bed height on the carbon dioxide capture by carbonation/regeneration cyclic operation using dry potassium-based sorbents. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2009; 26:874-878.
- [3] Lee SC, Kwon YM, Chae HJ, Jung SY, Lee JB, Ryu CK, et al. Improving regeneration properties of potassium-based alumina sorbents for carbon dioxide capture from flue gas. *FUEL*. 2013;104: 882-885.
- [4] Lee SC, Cho MS, Jung SY, Ryu CK, Kim JC. Effects of alumina phases on CO<sub>2</sub> sorption and regeneration properties of potassium-based alumina sorbents. *Adsorption*. 2014; 20:331-339
- [5] Jaiboon O-a, Chalermssinsuwan B, Mekasuta L, Piumsomboon P. Effect of flow pattern on power spectral density of pressure fluctuation in various fluidization regimes. *Powder Technology*. 2013; 233:215-216
- [6] Lee SC, Kwon YM, Jung SY, Ryu CK, Kim JC. Development of new alumina-modified sorbents for CO<sub>2</sub> sorption and regeneration at temperatures below 200 °C. *FUEL*. 2011; 90:1465-1470
- [7] Guo Y, Zhao C, Li C, Lu S. Application of PEI-K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/AC for capturing CO<sub>2</sub> from flue gas after combustion. *Applied Energy*. 2014; 129:17-24
- [8] Lee SC, Choi BY, Ryu CK, Ahn YS, Lee TJ, Kim JC. The effect of water on the activation and the CO<sub>2</sub> capture capacities of alkali metal-based sorbents. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2006; 23:374-379

- [9] Zhao WY, Sprachmann G, Li Zh, Cai NS, Zhang XH. Effect of  $K_2CO_3 \cdot 1.5H_2O$  on the regeneration energy consumption of potassium-based sorbents for  $CO_2$  capture. *Applied Energy*. 2013; 112:381-387
- [10] Chalermssinsuwan B. Fluidization. Chulalongkorn University. Thailand. 2017.
- [11] Han W, Niw H, Long XY, Li MF, Yang Q, Li D. Effects of the support Bronsted acidity on the hydrodesulfurization and hydrodenitrogenation activity of sulfided NiMo/ $Al_2O_3$  catalysts. *Catalysis Today*. 2017; 292:58-66
- [12] Wu YS, Ma J, Hu F, Li MC. Synthesis and Characterization of Mesoporous Alumina via Reverse Precipitation Method. *Journal of Materials Science & Technology*. 2012; 28(6):572-576]
- [13] Chalermssinsuwan B, Thummakul T, Gidaspow D, Piumsomboon P. Characterization of fluidization regime in circulating fluidized bed reactor with high solid particle concentration using computational fluid dynamics. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2014; 31:350-363
- [14] Gidaspow D, Onischak M. Process for regenerative sorption of  $CO_2$ . US patent 3,865,924. In: *Technologu loG*, editot.Chicago.Illinois, US.1975.
- [15] Nelson TO, Coleman LJ, Green DA, Gupta RP. The dry carbonate process: carbon dioxide recovery from power plant flue gas. *Energy Procedia*. 2009; 1:1305-1311.
- [16] Sengupta S, Amte V, Dongara R, Das AK, Bhunia H, Bajpai PK. Effects of the Adsorbent Preparation Method for  $CO_2$  Capture from Flue Gas Using  $K_2CO_3/Al_2O_3$  Adsorbent. *Energy & fuels*. 2015; 29:287-297.
- [17] Onischak DG M. *Recent Developments in Separation Science*. CRC press. 1972; 73-93.



ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก. การคำนวณปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม CO<sub>2</sub> Analyzer จะได้รับรายละเอียดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เซนเซอร์สามารถวัดได้ต่อเวลา เมื่อนำข้อมูลสองชุดนี้มาวาดกราฟจะได้กราฟ Breakthrough Curve ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ในทางทฤษฎี พื้นที่กราฟหาได้จากสมการ

$$q = \frac{1}{m} \int_0^t Q(C_{in} - C_{out})dt \quad (5)$$

โดย

$q$  = ความสามารถในการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [มิลลิกรัมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ต่อ 1 กรัมของตัวดูดซับ],

$m$  = มวลของตัวดูดซับ [กรัม],

$C_{in}$  = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ขาเข้า (% มวล) [-],

$C_{out}$  = ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ขาออก (% มวล) [-],

$Q$  = อัตราการไหลของก๊าซ [กรัมต่อวินาที],

$T$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ [วินาที]

ในการทดลองนี้จะใช้โดยใช้โปรแกรม Excel ในการคำนวณปริมาณการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการ ดังนี้

$$\text{Volume CO}_2 \text{ out} = (\text{Flow rate gas} \times \% \text{CO}_2) / 100 \quad (6)$$

$$\text{Volume CO}_2 \text{ add} = (\% \text{CO}_2, \text{ final} \times \text{Flow rate gas} / 100) - (\text{Flow rate gas} \times \% \text{CO}_2 / 100) \quad (7)$$

$$\text{Mass CO}_2 \text{ add} = (44 \times \text{Volume CO}_2 \text{ add}) / (0.082 \times (273 + \text{Temp}_{\text{operate}})) \quad (8)$$

$$\text{Strip area} = \text{Mass CO}_2 \text{ add} \times (\text{time}_2 - \text{time}_1) \quad (9)$$

$$\text{Area} = \text{Sum of strip areas} \quad (10)$$

$$\text{Capacity} = \text{Area} * 1000 / \text{Initial sorbent loading} \quad (11)$$

## ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวดูดซับ MDEA 35% 24hr 145°C

จากข้อมูล CO<sub>2</sub> Analyzer

ตารางที่ ก.1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จาก CO<sub>2</sub> Analyzer

Time 0.01667 – 1.65 min (Overall)		
Flow rate gas	5	L/min
Initial sorbent loading	5	g
Time 0.016667 – 0.03333 min		
%CO <sub>2,t = 0.016667</sub>	3.648	
%CO <sub>2,t = 0.03333</sub>	3.648	
%CO <sub>2,final</sub>	12	
Temperature	60	°C

$$\text{Volume CO}_2 \text{ out} = (5 \times 3.648) / 100 = 0.1824$$

$$\text{Volume CO}_2 \text{ add} = (12 \times 5 / 100) - (5 \times 3.648 / 100) = 0.4175$$

$$\text{Mass CO}_2 \text{ add} = (44 \times 0.4175) / (0.082 \times (273 + 60)) = 0.6728 \text{ g}$$

$$\text{Strip area} = 0.6728 \times (0.03333 - 0.016667)$$

เมื่อคิดผลรวมของ Strip area จะได้ว่า Total Area = 0.376992

$$\text{Capacity} = 0.376992 \times 1000 / 5 = 76.45 \text{ g mg CO}_2 / \text{g adsorbent}$$