



## รายงานโครงการวิจัย

การเตรียมตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับ

ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

Preparation of modified solid adsorbent for CO<sub>2</sub> capture

โดย

นางสาวกัญญ์รัศม์ ฝิวจันทร์ 5832904823

นางสาวจุฑาภา มาศ เลขศักดิ์ 5832913423

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CU-IR)  
โครงการการเรียนรู้การสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ปีการศึกษา 2561  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CU-IR)

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
are the senior project authors' files submitted through the faculty.

CHULALONGKORN UNIVERSITY  
CHEMICAL TECHNOLOGY

Preparation of modified solid adsorbent for CO<sub>2</sub> capture

Kanrat Piwchan  
Juthamad Laksak

A Project Submitted in Partial Senior Project Subject (2306499)

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic year 2018

โครงการ การเตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

นิสิตหัวหน้าโครงการ นางสาวจุฑามาศ เลขศักดิ์  
นางสาวกัญญ์รัศม์ ผิวจันทร์

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ  
ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบฟลูอิดไคซ์เบด โดยทำการศึกษาผลของการปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) บนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $\gamma-Al_2O_3$ ) การปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับทำได้โดยการป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนนำสารละลายไปเขย่าที่ความดันเท่ากับ 1 บาร์ 2 บาร์ และ 3 บาร์ การปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ โดยทำการทดลองที่ปริมาณเท่ากับ 25 มิลลิลิตร 20 มิลลิลิตร และ 15 มิลลิลิตร และ การปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการเขย่าสารละลาย โดยทำการทดลองที่จำนวนชั่วโมงเท่ากับ 4 ชั่วโมง 14 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ ได้แก่ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET) และ เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF) เพื่อหาสัดส่วน ปริมาณโพแทสเซียมที่ถูกอิมเพกกลงบนตัวดูดซับ และ องค์ประกอบของตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุง กระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบฟลูอิดไคซ์เบดถูกดำเนินการที่ภาวะดังนี้ อุณหภูมิคอลัมน์ และ อุณหภูมิไอน้ำ เท่ากับ 60 และ 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์วิเคราะห์ได้จากระยะเวลาที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เดินทางไปถึงเซนเซอร์วัดความเข้มข้นของแก๊สจากการศึกษาพบว่าตัวดูดซับที่ถูกเตรียมโดยมีการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 2 บาร์ ปริมาณน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร และ ระยะเวลาในการเขย่า 14 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด คือ มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 56.16 มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับ โดยมีค่าสูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับปรุงซึ่งถูกเตรียมด้วยวิธีอิมเพกเนชัน ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 51.00 มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับ และเมื่อนำตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดมาทำการฟื้นฟูสภาพในภาวะสูญญากาศภายใต้ความดัน -600 มิลลิบาร์ เป็นระยะเวลา 1 นาที พบว่าประสิทธิภาพตัวดูดซับลดลงร้อยละ 13.65 และคงที่ในทุกรอบการใช้งาน

คำสำคัญ: การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, ตัวดูดซับของแข็ง, โพแทสเซียมคาร์บอเนต, แกมมาอลูมินา

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต ..... *จุฑามาศ เลขศักดิ์* .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... *กัญญ์รัศม์ ผิวจันทร์* .....

สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ..... *เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ* .....

Title Preparation of modified solid adsorbent for CO<sub>2</sub> capture  
 Student name Miss Juthamad Laksak  
 Miss Kanrat Piwchan  
 Advisor Assoc. Prof. Dr. Benjapon Chalermsoinsuwan  
 Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,  
 Academic Year 2018

ABSTRACT

In this study, the modified preparation method aims to improve the sorption efficiency of K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sorbent which is used to adsorb CO<sub>2</sub> in fluidized bed system. The modification is performed by adding different preparation pressure under CO<sub>2</sub> atmosphere, 1 bar, 2 bar and 3 bar, and different deionized water quantity, 15 ml, 20 ml and 25 ml. The stirring time is also varied, 4 hours, 14 hours and 24 hours. The morphology study of percent impregnation of potassium (K) and composition on the solid sorbents were investigated by SEM, XRD, BET and XRF. The assumption is that these parameters may have an effect to the appearance and structure of solid sorbents. Therefore, the CO<sub>2</sub> capture capacities will increase. The adsorption process, using fluidized bed system, is done under the column temperature of 60°C and steam temperature of 100°C. The adsorbed CO<sub>2</sub> results are calculated from the residence time of CO<sub>2</sub> which is detected from the top of the column by the sensor. The capture capacity then can be computed using the obtained CO<sub>2</sub> concentration profile. From the experiments, modified sorbent preparing from the stirring time of 14 hours, the deionized water of 20 ml and the preparation pressure of 2 bar has the highest CO<sub>2</sub> capture capacity of 56.16 milligrams of CO<sub>2</sub> per gram of sorbent. This obtained result is higher than the CO<sub>2</sub> capture capacity of unmodified sorbent, 51.00 milligrams of CO<sub>2</sub> per gram of sorbent. The capture capacity of the highest capture capacity sorbent after regeneration in vacuum condition at -600 mbar for 1 minute decreases by 13.65 percent and stable at this value in every sorption cycles.

Keywords: CO<sub>2</sub> capture, solid sorbent, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Department of Chemical Technology Student's signature.....  
 Student's signature.....  
 Major: Chemical Engineering Advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา Senior Project (2306499) ซึ่งเป็นการเรียนการสอนในระดับปริญญาตรี ประจำปีการศึกษา 2561 ของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเสริมสร้างประสบการณ์ให้กับนิสิต ในการดำเนินโครงการเตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ผ่านการปรับปรุงสำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ นิสิตผู้ดำเนินโครงการได้รับความอนุเคราะห์และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือให้งานวิจัยครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณ นางสาวจรรุวรรณ เจริญชัยเพชร และนายกนกพล โรจนกิจ นิสิตปริญญาโท สาขาเคมีเทคนิค และนายสุทธิชัย บุญประสพ นักวิจัยหลังปริญญาเอก สาขาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำเรื่องอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินโครงการ

ขอขอบคุณ คุณสุพจน์ พุทธวงศ์ และคุณประเสริฐ ช่วยศรีนวล บุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องปฏิบัติการ รวมถึงเจ้าหน้าที่ บุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำการวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำ และให้กำลังใจ ทำให้การทำงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ณ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ข้อยกเว้นงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
2. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การดูดซับ (Adsorption)	4
2.1.1 แบบจำลองการดูดซับ (Sorption model)	4
2.1.2 หลักการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> capture concept)	6

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
2.2 ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization)	7
2.2.1 ปรากฏการณ์เกี่ยวกับฟลูอิดิเซชัน (Fluidization phenomenon)	10
2.2.2 รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิดิเซชัน (Fluidization regime) (Conventional fluidization regime)	12
2.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
3. วิธีทำการทดลอง	16
3.1 ตัวดูดซับ	16
3.1.1 การเตรียมตัวดูดซับ	16
3.2 วิธีทำการทดลอง	17
3.2.1 การปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับแบบไม่มีการ อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	17
3.2.2 การปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับแบบมีการ อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	17
3.2.3 การใช้โปรแกรม CO <sub>2</sub> Analyzer	18
3.2.4 การทำ Flow measurement	18
3.2.5 การใช้งาน Heater	19
3.2.6 การหา Residence time เมื่อไม่บรรจุตัวดูดซับ	21
3.2.7 การหา Residence time เมื่อบรรจุตัวดูดซับ	22
3.2.8 การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ	23

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	24
4.1 ปฏิบัติการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนต บนตัวรองรับอลูมินา	24
4.2 การวิเคราะห์ทางสัณฐานปริมาณและองค์ประกอบของตัวดูดซับ	28
4.2.1 การวิเคราะห์ผลโดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM)	28
4.2.2 การวิเคราะห์ผลโดยเทคนิคเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)	32
4.2.3 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET)	35
4.2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF)	35
4.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	36
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	40
5.1 สรุปผลการทดลอง	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
รายการอ้างอิง	42
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การคำนวณปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	43



## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1 แบบจำลองการดูดซับ	5
รูปที่ 2 Breakthrough curve สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	6
รูปที่ 3 การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดเซชันสำหรับการแยกแร่ให้บริสุทธิ์	8
รูปที่ 4 การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดเซชันสำหรับปฏิกิริยาการผลิตแก๊สโพรวินเซอร์	8
รูปที่ 5 การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดเซชันสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	9
รูปที่ 6 การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดเซชัน	10
รูปที่ 7 Free body diagram ของอนุภาคของแข็ง	11
รูปที่ 8 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งตามวิธีการของ Geldart	11
รูปที่ 9 รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชันจากทฤษฎี	13
รูปที่ 10 แผนผังการดูดซับด้วยเครื่องฟลูอิดเซชัน (Fluidization adsorption diagram)	20
รูปที่ 11 Breakthrough curve ของตัวดูดซับของแข็ง	26
รูปที่ 12 ประสิทธิภาพหลังการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ (Regeneration)	27
รูปที่ 13 ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับที่ถูกเตรียมด้วยวิธีอิมเพรกเนชันที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง และตัวดูดซับที่ถูกเตรียมโดยผ่านกระบวนการปรับปรุง	28
รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์ผลโดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) ของตัวดูดซับที่ยังไม่ได้ผ่านการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ (ก) No CO <sub>2</sub> 24hr DI25ml (ข) CO <sub>2</sub> 1 bar 24hr DI20ml (ค) CO <sub>2</sub> 2 bar 24hr DI20ml (ง) CO <sub>2</sub> 2 bar 14hr DI20ml (จ) CO <sub>2</sub> 2 bar 4hr DI20ml (ฉ) CO <sub>2</sub> 3 bar 24hr DI25ml (ช) CO <sub>2</sub> 3 bar 24hr DI20ml (ซ) CO <sub>2</sub> 3 bar 24hr DI15ml	30

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
<p><b>รูปที่ 15</b> ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงก่อนและหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวดูดซับถูกเตรียมด้วย CO<sub>2</sub> 2 บาร์, DI water 20 มิลลิลิตร และใช้เวลาในการเขย่าที่ (ก) 4 ชม. (ข) 14 ชม. และ (ค) 24 ชม. ก่อนผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวดูดซับหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ง) 4 ชม. (จ) 14 ชม. และ (ฉ) 24 ชม. [ ■ :K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, ▲ :KHCO<sub>3</sub>, ● :Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ ◆ :KAl(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(O</p>	32
<p><b>รูปที่ 16</b> ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงก่อนและหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไซด์ โดยตัวดูดซับถูกเตรียมด้วย DI water 20 มิลลิลิตร ที่เวลาในการเขย่า 24 ชม. และ CO<sub>2</sub> ที่ความดัน (ก) 1 บาร์ (ข) 2 บาร์ และ (ค) 3 บาร์ ก่อนผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวดูดซับหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ง) 1 บาร์ (จ) 2 บาร์ และ (ฉ) 3 บาร์ [ ■ :K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, ▲ :KHCO<sub>3</sub>, ● :Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ ◆ :KAl(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>]</p>	33
<p><b>รูปที่ 17</b> ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงก่อนและหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไซด์ โดยตัวดูดซับถูกเตรียมด้วย CO<sub>2</sub> 3 บาร์ ที่เวลาในการเขย่า 24 ชม. และปริมาณ DI water (ก) 15 มิลลิลิตร (ข) 20 มิลลิลิตร และ(ค) 25 มิลลิลิตร ก่อนผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวดูดซับหลังกระบวนการดูดซับแก๊ส (ง) 15 มิลลิลิตร (จ) 20 มิลลิลิตร และ (ฉ) 25 มิลลิลิตร [ ■ :K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, ▲ :KHCO<sub>3</sub>, ● :Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, และ ◆ :KAl(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>]</p>	34
<p><b>รูปที่ 18</b> ผลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์</p>	37
<p><b>รูปที่ 19</b> ผลของอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของความดันที่อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (A) และระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า (B) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์</p>	37
<p><b>รูปที่ 20</b> ผลของอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของความดันที่อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (A) และปริมาณน้ำปราศจากไอออน (C) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์</p>	38
<p><b>รูปที่ 21</b> ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า (B) และปริมาณน้ำปราศจากไอออน(C) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์</p>	38

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1	24
ตารางที่ 2	25
ตารางที่ 3	35
ตารางที่ 4	35
ตารางที่ 5	36
ตารางที่ 6	44

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ภาวะภูมิอากาศของโลกในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากโดยมีสาเหตุมาจากภาวะโลกร้อน (Global warming) ซึ่งสาเหตุหลักของปัญหานี้เกิดจากแก๊สเรือนกระจกเนื่องจากเป็นแก๊สที่มีคุณสมบัติในการดูดซับพลังงานความร้อนที่สะท้อนจากโลกกลับสู่ชั้นบรรยากาศ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในแก๊สเรือนกระจกที่มีส่วนสำคัญต่อการเกิดภาวะโลกร้อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มนุษย์ปล่อยออกสู่บรรยากาศมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อการผลิตพลังงานและการขนส่งเป็นหลัก นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและการทำลายป่ายังเป็นอีกสาเหตุสำคัญด้วย เนื่องจากต้นไม้ซึ่งเป็น "ตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์" โดยธรรมชาติถูกทำลายไป ดังนั้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ เมื่ออยู่ในบรรยากาศแล้ว แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะคงอยู่เป็นเวลา 50 ถึง 200 ปี และบางส่วนคงอยู่ตลอดไป

ปัจจุบัน มีการพัฒนาเทคโนโลยีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลายวิธีด้วยกัน เช่น กระบวนการดูดซึม (Absorption) กระบวนการแยกผ่านชั้นเมมเบรน (Membrane separation) และการแช่แข็งในภาวะเย็นเยือกยิ่ง (Cryogenic techniques) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เป็นที่นิยมเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตาม กระบวนการเหล่านี้ก็มีข้อเสียเนื่องจากต้องการพลังงานในปฏิกิริยาการทำให้คืนสภาพและมีค่าใช้จ่ายสูง จึงมีการพัฒนากระบวนการใหม่ๆ เพื่อใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

การใช้ของแข็งในกระบวนการดูดซับเป็นอีกหนึ่งวิธีที่กำลังเป็นที่สนใจเนื่องจากสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในปริมาณสูง และสามารถฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้งานได้ดี มีความต้องการพลังงานในปฏิกิริยาฟื้นฟูและมีค่าใช้จ่ายต่ำ นอกจากนี้ ลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของตัวดูดซับของแข็งยังสามารถลดปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้ซึ่งถือเป็นการลดค่าใช้จ่าย รวมไปถึงการเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $K_2CO_3/Al_2O_3$ ) ถูกเลือกเป็นตัวดูดซับในการทดลองนี้ โดยจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโพแทสเซียมคาร์บอเนต แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (1)



ซึ่งปฏิกิริยานี้สามารถเกิดได้ที่ความดันบรรยากาศ และเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน โดยในการศึกษานี้จะศึกษาปัจจัยต่างๆ ในขั้นตอนการเตรียมซึ่งส่งผลต่อปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสนใจการปรับปรุงตัวดูดซับภายใต้บรรยากาศของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณน้ำปราศจากไอออน และ เวลาการเขย่าที่แตกต่างกัน จะมีความสามารถในการปรับสภาพพื้นผิวของตัวดูดซับให้เหมาะสมต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

รวมถึงการเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของอลูมินา โดยการใช้ปริมาณความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 1 บาร์ 2 บาร์ และ 3 บาร์ ปริมาณของน้ำปราศจากไอออนที่แตกต่างกัน คือ 15 มิลลิลิตร 20 มิลลิลิตร และ 25 มิลลิลิตร รวมทั้งเวลาการเขย่าที่แตกต่างกัน คือ 4 ชั่วโมง 14 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อเตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนอลูมินา เมื่อกระบวนการเตรียมตัวดูดซับของแข็งมีการอัด CO<sub>2</sub> ในระบบ ที่ความดันต่างกันผ่านการปรับปรุงในขั้นตอนที่แตกต่างกัน และผ่านการปรับปรุงในขั้นตอนที่แตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนอลูมินา เมื่อกระบวนการเตรียมตัวดูดซับของแข็งมีการอัด CO<sub>2</sub> ในระบบ ที่ความดันต่างกันผ่านการปรับปรุงในขั้นตอนที่แตกต่างกัน และผ่านการปรับปรุงในขั้นตอนที่แตกต่างกัน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

1.3.2 ปรับปรุงการเตรียมตัวดูดซับภายใต้บรรยากาศของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 1 บาร์ 2 บาร์ และ 3 บาร์ ปริมาณของน้ำปราศจากไอออน คือ 15 มิลลิลิตร 20 มิลลิลิตร และ 25 มิลลิลิตร รวมทั้งเวลาการเขย่าที่ คือ 4 ชั่วโมง 14 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง จากนั้น นำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลก่อนการปรับปรุง และวิเคราะห์ผลโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เทคนิควิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความพรุน (BET Surface Area Pore Size and Pore Volume Distribution Analyzer, BET) และเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence, XRF)

## 1.4 ข้อจำกัดงานวิจัย

1.4.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่นำมาใช้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้บรรยากาศ คือ 1 บาร์ 2 บาร์ และ 3 บาร์ ปริมาณของน้ำปราศจากไอออน คือ 15 มิลลิลิตร 20 มิลลิลิตร และ 25 มิลลิลิตร รวมทั้งเวลาการเขย่าที่ คือ 4 ชั่วโมง 14 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง

1.4.2 ฟลูอิดเซชันเป็นแบบสองวัฏภาค คือ ของแข็ง และแก๊ส

1.4.3 อนุภาคของของแข็งที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันทุกอนุภาค

1.4.4 ไม่มีการสูญเสียความร้อนในระบบ

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

### 1.5.1 ด้านความรู้ และประสบการณ์ต่อตัวนิสิต

ได้รับความรู้ที่สามารถนำไปใช้ในการทำงานด้านวิศวกรรมเคมีในอนาคตได้ เช่น การเลือกตัวดูดซับของแข็งเพื่อใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ฝึกประสบการณ์การทำงานกับผู้อื่น ในการวางแผนกระบวนการต่างๆ อย่างเป็นขั้นตอนในเวลาที่มียู่อย่างจำกัด มาใช้ในการทำการศึกษาวิจัยได้อย่างเหมาะสม

### 1.5.2 ด้านความรู้ ความเข้าใจที่นำไปสู่การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรม

ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำวิจัยนี้สามารถนำไปปรับปรุงตัวดูดซับของแข็ง เพื่อใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศจากโรงงานอุตสาหกรรม

## 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.6.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูล ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

1.6.2 ศึกษาวิธีการเตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา

1.6.3 เตรียมสารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

1.6.4 เตรียมตัวดูดซับตามขั้นตอนและวิธีที่ออกแบบไว้

1.6.5 นำตัวดูดซับไปทดสอบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

1.6.6 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1.6.7 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง จัดทำรายงาน และนำเสนอผลงาน

## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

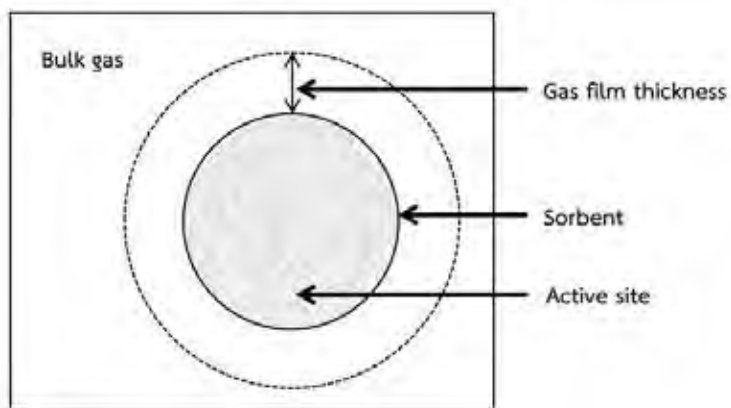
#### 2.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิว หรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะ แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งคุณสมบัติหลักของตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม คือ (ก) ความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง (ข) คุณสมบัติการฟื้นฟูที่ดี (ค) ความต้านทานในการสึกกร่อนสูงสำหรับการดำเนินงานแบบวัฏจักรที่ใช้ระยะเวลานาน

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สกรดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับง่าย โดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่า กระบวนการสะเทิน โดยตัวดูดซับในสถานะเบส สารประกอบเอมีนและสารประกอบคาร์บอนเนตของธาตุหมู่ I เป็นสารที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีราคาถูก และสามารถเกิดปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในอุณหภูมิต่ำ และใช้น้ำเป็นสารตั้งต้น กระบวนการนี้จึงเหมาะสมกับปฏิกิริยาที่เกิดหลังการเผาไหม้เชื้อเพลิง อีกทั้งสารประกอบเอมีนจัดว่าเป็นสารก่อมะเร็ง ดังนั้นการเลือกใช้สารประกอบคาร์บอนเนตของโลหะหมู่ I จึงปลอดภัยกว่า นอกจากนี้ การพิจารณาการเลือกใช้สารยังต้องขึ้นอยู่กับกลไกการเกิดปฏิกิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการทำการทดลอง

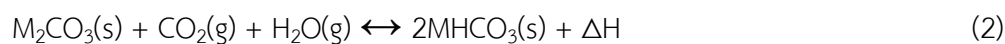
##### 2.1.1. แบบจำลองการดูดซับ (Sorption Model)

ลักษณะของการดูดซับมีส่วนคล้ายกับกระบวนการการเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ อนุภาคที่ต้องการดูดซับจะแพร่ผ่านฟิล์มของแก๊ส (Gas film) เพื่อทำปฏิกิริยากับด้านที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังรูปที่ 1 ความหนาของฟิล์มทำหน้าที่เป็นตัวต้านทาน (Mass transfer resistance) ซึ่งความต้านทานนี้สามารถลดได้ผ่านการลดปัจจัย 2 ปัจจัย คือ การเพิ่มความเร็วของกลุ่มแก๊ส และการลดขนาดตัวดูดซับ



รูปที่ 1 แบบจำลองการดูดซับ

ตัวต้านทานอีกชนิดหนึ่งในการดูดซับคือจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และสารประกอบคาร์บอเนตของธาตุหมู่ I ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา 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 ค่าคงที่อัตราของการถ่ายโอนมวลสาร (Rate of mass transfer)

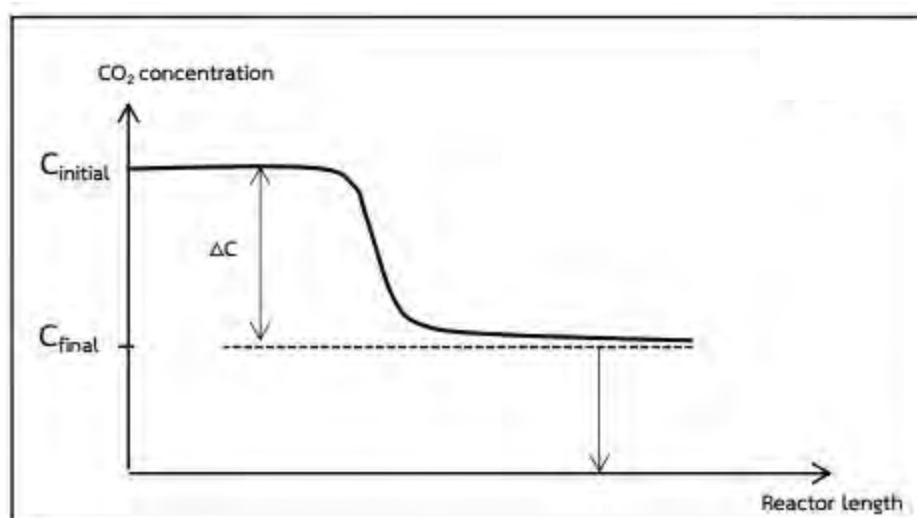
จากการศึกษาของ Onischak และคณะ [1] ได้ศึกษาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มี  $Na_2CO_3$  และ  $K_2CO_3$  เป็นตัวดูดซับ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแปรผันตามสถานะของการดูดซับ โดยค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับของ  $K_2CO_3$  มีค่าสูงกว่า  $Na_2CO_3$  และมีอันดับของปฏิกิริยาเท่ากัน รูปแบบความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถอธิบายได้โดยใช้  $k_{\text{eff}}$  รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างของ Breakthrough curve ของรูปแบบความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับความยาวของท่อของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการดูดซับ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่อระยะทางที่เคลื่อนที่ไป



ในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น และจะคงที่เนื่องจากเข้าสู่ภาวะสมดุล และค่าคงที่เฝ้าเพิกทีฟ (Effective rate) สามารถหาได้จากสมการ (4)

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

- เมื่อ L คือ ระยะที่สั้นที่สุดก่อนที่ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะคงที่
- V คือ ความเร็วของแก๊ส
- $\Delta C$  คือ ความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าและขาออก
- C คือ ความเข้มข้นของความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก



รูปที่ 2 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 ดังนั้น ขั้นตอนกำหนดอัตรา (The rate limiting step) ของปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยสารประกอบของธาตุหมู่ I คือขั้นตอนการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer limitation)

### 2.1.2. หลักการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub> Capture Concept)

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> และ K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ถูกพัฒนาโดย Onischak, Gidaspow [1] และ Nelson และคณะ [9] ผลการวิจัยของทั้งคู่พบว่าอัตราการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับมี  $k_{\text{eff}}$  มากถึง 10 วินาทีซึ่ง

ถือเป็นอัตราที่สูง ทำให้สามารถใช้หอดูดซับที่มีขนาดเล็กได้ การเตรียมตัวดูดซับด้วยโลหะอัลคาไลน์หมู่ I โดยวิธีอิมเพรกเนชัน เป็นการวิธีที่ค่อนข้างแพร่หลาย เนื่องจากได้ลักษณะของพื้นผิวของตัวดูดซับที่เหมาะสม และสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้การเตรียมตัวดูดซับยังใช้วิธีแคลซิเนชันเพื่อเพิ่มความสามารถทั้งในการดูดซับและการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยปกติแล้วการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดขึ้นได้สองทาง อย่างแรกคือการเกิด  $\text{MHCO}_3$  และเกิด  $\text{MAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง โดย M แทนธาตุของโลหะหมู่ I ซึ่ง Zhou และคณะ [10] ได้แนะนำว่าควรกำจัด  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  ออกไปเพื่อที่จะให้เหลือแค่  $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$  ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการดูดซับเนื่องจากผลิตภัณฑ์  $\text{KHCO}_3$  แคตัวเดียวจะให้ผลลัพธ์ของการนำกลับมาใช้ใหม่ที่มีค่าสูงที่สุด

## 2.2 ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization)

ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization) ถูกคิดค้นเพื่ออธิบายรูปแบบการสัมผัสกันเฉพาะของอนุภาคของแข็งและของไหล เป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวเหมือนของไหล

การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดิเซชันที่ได้มีการบันทึกไว้เป็นครั้งแรกเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1556 โดย Agricola ซึ่งใช้เทคนิคนี้ในการแยกแร่ให้บริสุทธิ์ โดยอาศัยระบบฟลูอิดิเซชันแบบของเหลว (น้ำ) และของแข็ง (แร่ที่ต้องการทำให้บริสุทธิ์)

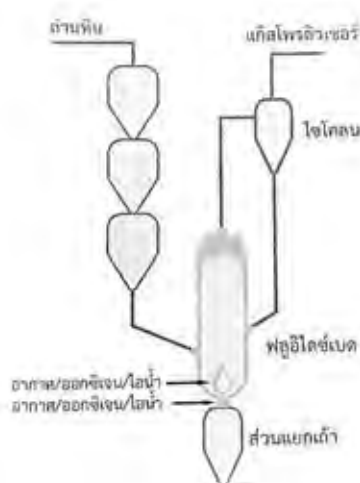
สิทธิบัตรฉบับแรกที่เกี่ยวข้องกับฟลูอิดิเซชันเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1910 โดย Philips และ Bulteel ซึ่งผู้คิดค้นทั้งสองได้เสนอแนวทางการสัมผัสกันระหว่างแก๊สและอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมัน อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งจะถูกแก๊สสารตั้งต้นพาเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ตัวที่หนึ่ง ปฏิกิริยาเคมีหลักจะเกิดในรูปแบบการสัมผัสกันเฉพาะของอนุภาคของแข็งและของไหลแบบฟลูอิดิเซชัน จากนั้น แก๊สผลิตภัณฑ์จะพาอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งที่ผ่านการใช้งานไปยังเครื่องปฏิกรณ์เครื่องหนึ่ง (Regenerator) เพื่อปรับสภาพให้พร้อมก่อนนำกลับไปป้อนใช้งานใหม่ต่อไป

เครื่องปฏิกรณ์เชิงพาณิชย์เครื่องแรกที่เกี่ยวข้องกับฟลูอิดิเซชันถูกสร้างขึ้นใน ค.ศ. 1920 โดยบริษัท BASF ประเทศเยอรมัน ซึ่งได้ประยุกต์ใช้งานฟลูอิดิเซชันนี้กับการผลิตแก๊สโปรดิวเซอร์ (Producer gas) หรือแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) ประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน จากถ่านหินและอากาศหรือแก๊สออกซิเจน โดยอาจมีการป้อนไอน้ำเข้าไปเป็นสารตั้งต้นร่วมด้วยขึ้นกับแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ สำหรับตัวเครื่องปฏิกรณ์จะทำการป้อนแก๊สสารตั้งต้นเข้าทางด้านล่าง ป้อนถ่านหินเข้าทางด้านข้าง แก๊สผลิตภัณฑ์จะออกจากระบบทางด้านบน ส่วนเถ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะออกจากตัวเครื่องปฏิกรณ์ทางด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 4



Die Pfahlpfahl A. Der Pocher B. Die gelochten Nadeln C. Das Querschnitt D.  
Die Bienenwabe E. Die kleine Gitter F. Der Fingerring G. Die Eisenkette H.  
Die Eisenkette I. Die Eisenkette J. Die Eisenkette K.

รูปที่ 3 การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดเซชันสำหรับการแยกแร่ให้บริสุทธิ์  
(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 4 การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดเซชันสำหรับปฏิกิริยาการผลิตแก๊สโพรวิวเซอร์  
(ที่มา: เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ. (2560). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฟลูอิดเซชัน. ฟลูอิดเซชัน. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: หน้า 5)

เครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่เครื่องแรกที่เกี่ยวข้องกับฟลูอิดเซชันถูกสร้างขึ้นในปี ค.ศ.1945 โดยบริษัท Standard Oil Company ประเทศสหรัฐอเมริกา (ปัจจุบันคือบริษัท Exxon Mobil) ที่ต้องการจะเพิ่มปริมาณแก๊สโซลีน (Gasoline) ในกระบวนการกลั่น จึงมีการประยุกต์ใช้งานฟลูอิดเซชันนี้กับปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (FCC) ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดไอเซชันสำหรับปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

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

กระบวนการฟลูอิดไอเซชันมีข้อดี คือ มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็งสูง และมีการเขย่าผสมอยู่ภายใน (Internal mixing) สูง เนื่องจากความเร็วของไหลป้อนเข้าสู่กระบวนการทำให้เกิดแก๊สและอนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนภายในกระบวนการตลอด รวมไปถึงมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งที่เฉพาะเจาะจง คือ อนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงและต่ำจะอยู่บริเวณด้านล่างและด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ ตามลำดับ กระบวนการฟลูอิดไอเซชันเป็นกระบวนการที่สามารถแยกอนุภาคของแข็งที่ผ่านการดำเนินการ/การเกิดปฏิกิริยาแล้วได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ โดยอนุภาคที่ผ่านการดำเนินการ/การเกิดปฏิกิริยาจะมีขนาดเล็กลงและลอยออกบริเวณด้านบนกระบวนการ นอกจากนี้กระบวนการฟลูอิดไอเซชันเป็นตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนที่ดี มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเบด และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูง เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานในการดำเนินการต่ำ เพราะมีแรงต้านทานภายในกระบวนการ (Friction) ที่ต่ำ นอกจากนี้ยังเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous) และการดำเนินการทำได้ง่าย อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่มีความยืดหยุ่นในการดำเนินงานสูง มีช่วงความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการกว้าง จึงสามารถใช้งานได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิด

อย่างไรก็ตาม กระบวนการฟลูอิดไอเซชันก็มีข้อเสีย คือ อนุภาคของแข็งมีเวลาอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์สั้น เนื่องจากเป็นการไหลของของไหลและอนุภาคของแข็งไปในทิศทางเดียวกันเป็นส่วนมาก โดยสามารถทำการปรับปรุงได้ด้วยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชั้นลำดับ รวมทั้งเกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ภายในกระบวนการในบางรูปแบบ การไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิดไอเซชัน ซึ่งจะลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล การผสมของกระบวนการฟลูอิดไอเซชันเกิดขึ้นได้ดีในทิศทางตามแนวแกน (Vertical) มากกว่าการผสมในทิศทางตามแนวนอน

(Horizontal) จึงอาจมีความไม่สม่ำเสมอของคุณภาพผลิตภัณฑ์ของกระบวนการ นอกจากนี้ อนุภาคของแข็งจะหลุดออกจากกระบวนการที่ความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการสูง ดังนั้น ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อดักเก็บและป้อนอนุภาคของแข็งที่หลุดออกกลับเข้ามาในกระบวนการ และจะมีขนาดลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเกิดจากการชนกันของอนุภาคของแข็งหรือปฏิกิริยาเคมีภายในกระบวนการ เครื่องปฏิกรณ์จะเกิดการสั่นและสึกกร่อนเนื่องจากการชนของอนุภาคของแข็งกับผนังเครื่องปฏิกรณ์ ทั้งนี้กระบวนการฟลูอิดเซชันยังมีข้อจำกัดบางประการ คือ ไม่สามารถใช้งานกับอนุภาคของแข็งที่เปียกหรือเหนียว เพราะจะเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่

การประยุกต์ใช้งานกระบวนการฟลูอิดเซชันมีการใช้งานหลากหลาย เช่น การอบแห้ง (Drying) คือ การให้ความร้อนภายใต้ภาวะการควบคุมเพื่อกำจัดความชื้นหรือระเหยน้ำที่มีอยู่ในตัวอนุภาคของแข็งที่ต้องการยกตัวอย่างเช่น ผลผลิตทางการเกษตร จำพวกข้าวเปลือก และเมล็ดข้าวโพด



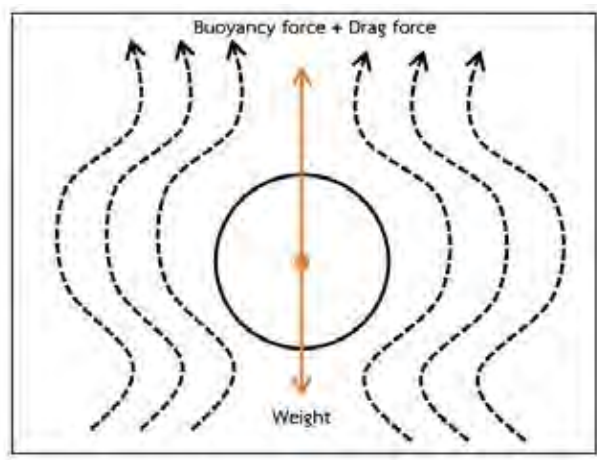
รูปที่ 6 การประยุกต์ใช้งานฟลูอิดเซชัน

(ที่มา: [http://rescom.trf.or.th/display/keydefault.aspx?id\\_colum=2148](http://rescom.trf.or.th/display/keydefault.aspx?id_colum=2148))

## 2.2.1 ปรากฏการณ์เกี่ยวกับฟลูอิดเซชัน (Fluidization phenomenon)

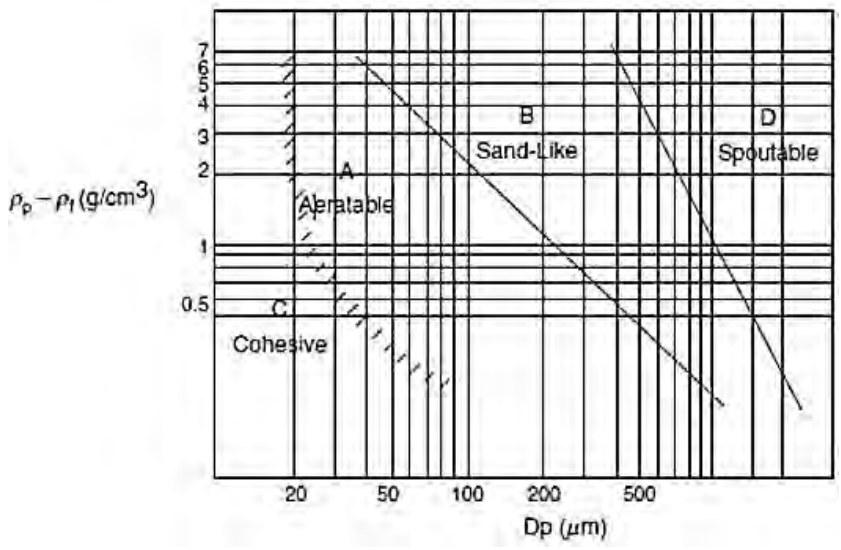
Free body diagram ของอนุภาคที่ลอยอยู่ในที่มีแก๊สเคลื่อนที่ผ่านจากข้างล่างขึ้นสู่ข้างบน แรงอันเนื่องมาจากน้ำหนักของอนุภาคมีทิศชี้ลง เนื่องแรงโน้มถ่วง แรงที่มีทิศชี้ขึ้นเป็นผลรวมระหว่างแรงต้าน (Drag force) และแรงลอยตัว (Buoyancy force) แรงในทิศชี้ขึ้นถูกแสดงโดยเส้นกระแสดังแสดงในรูป 7 ที่ความเร็วขณะหนึ่ง แรงในทิศชี้ขึ้นมีค่ามากกว่าแรงในทิศชี้ลงเป็นเหตุให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ตรงข้ามแรงโน้มถ่วงในทิศชี้ลง กล่าวคือ อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ไปในทิศเดียวกันกับแก๊ส โดยการเคลื่อนที่นี้จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของ

ระดับการเปลี่ยนแปลงความดัน (The pressure gradient) ซึ่งการประพุดิตัวคล้ายของไหลของอนุภาคของแข็งนี้ เรียกว่า ฟลูอิดเซชัน (Fluidization)



รูปที่ 7 Free body diagram ของอนุภาคของแข็ง

ลักษณะการไหลที่เกิดภายในกระบวนการฟลูอิดเซชันขึ้นอยู่กับประเภทของอนุภาคของแข็ง โดยวิธีการหนึ่งที่มีการใช้งานกันค่อนข้างมากในการแบ่งประเภทอนุภาคของแข็ง คือ วิธีการของ Geldart ซึ่งแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งจากความสัมพันธ์ของผลต่างความหนาแน่นอนุภาคของแข็งและของไหลและขนาดอนุภาคของแข็ง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งตามวิธีการของ Geldart

(ที่มา: เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ. (2560). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฟลูอิดเซชัน. ฟลูอิดเซชัน. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: หน้า 33)

กลุ่ม A เป็นอนุภาคของแข็งที่จะเกิดกระบวนการฟลูอิดเซชันได้ดี แต่จะเกิดการขยายตัวก่อนช่วงหนึ่งที่จะเริ่มเกิดฟองแก๊สในกระบวนการ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี (FCC catalyst) ส่วนมากอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับกระบวนการเคมีที่อาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี

กลุ่ม B เป็นอนุภาคของแข็งที่จะเกิดกระบวนการฟลูอิดเซชันได้ดีมาก จะเริ่มเกิดฟองแก๊สในกระบวนการได้ทันที เช่น ททราย ส่วนมากอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับกระบวนการเผาไหม้หรือการผลิตแก๊ส

กลุ่ม C เป็นอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก แรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งจึงมีค่าใกล้เคียงกับแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่ออนุภาคของแข็งนั้น อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดกระบวนการฟลูอิดเซชันได้ยาก เช่น แปะและผงแก้ว การประยุกต์ใช้งานอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จึงเป็นไปได้ยากและจำกัด

กลุ่ม D เป็นอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่มาก จึงต้องการความเร็วที่สูงมากในการใช้งานกระบวนการ เช่น เม็ดข้าวและเม็ดคาแฟ ส่วนมากอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะถูกประยุกต์ใช้กับการอบแห้ง

## 2.2.2 รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน (Fluidization regime)

เบตนิ่ง (Fixed bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนิ่ง ยังไม่ถือว่าเป็นรูปแบบการไหลในช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน อัตราการป้อนหรือความเร็วของของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์จะยังไม่เพียงพอที่ทำให้อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัว หรือมีลักษณะเด่น คืออนุภาคของแข็งในกระบวนการจะไม่มีเคลื่อนที่

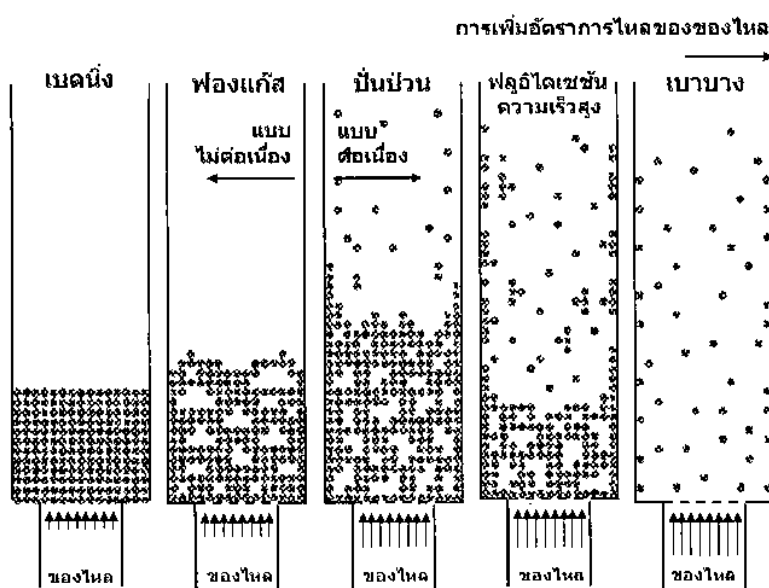
ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส (bubbling fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้เริ่มถือว่าเป็นรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน ความเร็วเริ่มต้นที่อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัวเรียกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน มีลักษณะเด่นคือจะเริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้น

ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้ จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่าอยู่ระหว่างความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งในกระบวนการที่มีค่าสูงที่สุด และความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวัดแกว่งมีค่าต่ำที่สุดจนเข้าสู่สภาวะคงตัวมีลักษณะเด่นคือฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะแตกอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเร็วที่สูงขึ้นจนคล้ายกับไม่มีฟองแก๊สในกระบวนการ

ฟลูอิดเซชันแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้ เกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่า ความเร็วขนส่ง โดย

เป็นช่วงการไหลที่อยู่ระหว่าง ช่วงการไหลฟลูอิด์เบดแบบปั่นป่วน และฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง ที่บริเวณกลาง เครื่องปฏิกรณ์ จะมีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง แต่ที่บริเวณผนังเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น

ฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง (Dilute หรือ Pneumatic transport fluidized bed) เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์มีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม อนุภาคของแข็งทั้งหมดจะถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยเคลื่อนที่แยกจากการเป็นอนุภาคของแข็งเดี่ยวกระจายตัวอยู่ในกระแสของไหล



รูปที่ 9 รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลของฟลูอิด์เซชันจากทฤษฎี

(ที่มา: เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ. (2560). ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับฟลูอิด์เซชัน. ฟลูอิด์เซชัน. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: หน้า 10)

## 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Okunev และคณะ [8] ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนโพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) โดยใช้ตัวรองรับคือ อลูมินา ถ่านกัมมันต์ เวอร์มิคูไลต์ และซิลิกาเจล พบว่า อลูมินามีปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ เวอร์มิคูไลต์ และซิลิกาเจล ตามลำดับ

Zhao และคณะ [5] ศึกษาตัวรองรับชนิดต่างๆ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์จากถ่านหิน ซิลิกาเจล และอลูมินา โดยการเตรียมแบบการอิมเพรเกชัน (Impregnation) พบว่า โพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) บนตัวรองรับอลูมินามีความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด เนื่องจาก



มีลักษณะการกระจายตัวของรูพรุนแบบมีโซพอร์ (Mesopore) อย่างกว้างขวางโดยศึกษาจากวิธี SEM และการทดสอบโดยใช้ไนโตรเจนดูดซับ ( $N_2$  absorption) ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

Park และคณะ [4] ศึกษาประสิทธิภาพของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบน ตัวรองรับ แอลฟา ( $\alpha$ -) และแกมมา ( $\gamma$ -) อลูมินา ( $Al_2O_3$ ) เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสม และมีราคาที่ถูก พบว่า โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) มีความสามารถในการดูดซับมากกว่า โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแอลฟาอลูมินา ( $K_2CO_3/\alpha-Al_2O_3$ ) นอกจากนี้  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ยังมีพื้นที่ผิวที่มากกว่า  $K_2CO_3/\alpha-Al_2O_3$  ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับมาก ดังนั้น งานวิจัยมากมายในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะศึกษาและคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของ  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  รวมทั้งการนำกลับไปใช้ใหม่ (Regeneration)

Lee และคณะ [6] พบว่า กระบวนการแคลซิเนชัน มีผลต่อการเกิดวัฏภาคของ  $KAl(CO_3)(OH)_2$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการคาร์บอเนชัน (Carbonation) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไล่น้ำที่สูงขึ้น มีผลทำให้  $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$  ที่ได้มีความเป็นผลึกที่บริสุทธิ์มากขึ้นซึ่งทำให้โอกาสในการเกิด  $KAl(CO_3)(OH)_2$  น้อยลง

Lee และคณะ [7] พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 60 ถึง 70 องศาเซลเซียส และน้ำในแก๊สผสม ( $CO_2$  และ  $N_2$ ) ที่มากเกินไปจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาดูดซับนั้นเร็วขึ้น

Lee และคณะ [6] พบว่า ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินาที่ถูกเตรียมด้วยวิธีปกติ มีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบของการดูดซับ (ที่ 60 องศาเซลเซียส) และจำนวนรอบของการฟื้นฟูสภาพ (ที่ 200 องศาเซลเซียส) เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเกิดขึ้นของวัฏภาค  $KAl(CO_3)(OH)_2$  โดย  $KAl(CO_3)(OH)_2$  จะสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็น  $K_2CO_3$  ซึ่งเป็นวัฏภาคเริ่มต้น ได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส แต่ตัวดูดซับที่ถูกเตรียมด้วยตัวรองรับอลูมินาที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ซึ่งในกระบวนการเตรียมตัวรองรับมีการป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 95% อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และป้อนด้วยอัตราการไหล 15 มิลลิลิตรต่ออนาที ตัวดูดซับที่ได้นั้นสามารถคงประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ได้เมื่อมีรอบการใช้งานที่เพิ่มขึ้น แม้ใช้อุณหภูมิในกระบวนการฟื้นฟูสภาพต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส โดยความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการฟื้นฟูสภาพที่ดีขึ้นนี้ เป็นผลจากคุณสมบัติเฉพาะของตัวดูดซับที่ถูกเตรียมด้วยตัวรองรับอลูมินาที่ผ่านกระบวนการปรับปรุง ที่จะเกิดเพียงวัฏภาคของ  $KHCO_3$  เท่านั้น ตลอดกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Chalermssinsuwan และคณะ [3] ประยุกต์ระบบฟลูอิดส์เบตมาใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดย  $K_2CO_3/Al_2O_3$  เป็นตัวดูดซับ ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดอยู่ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน โดยมี แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คิดเป็นร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก

### บทที่ 3

#### วิธีทำการทดลอง (Experiment method)

##### 3.1 ตัวดูดซับ

เนื่องจากตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$ ) มีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง และมีความเป็นพิษที่ต่ำ จึงเป็นทางเลือกที่คุ้มค่าในการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

##### 3.1.1 การเตรียมตัวดูดซับ

ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาถูกเตรียมด้วยวิธีอิมเพกเนชัน โดยการนำโพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) (QReC, AR grade) และแกมมาอลูมินา ( $\gamma-Al_2O_3$ ) (Merck, activity stage I) อย่างละ 5 กรัม ใส่ลงในภาชนะ จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ปริมาณ 25 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ไปเขย่า (WiseShake, model SHO-2D) ด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปกรองแบบสุญญากาศ ต่อมาสารที่ติดอยู่บนกระดาษกรองเข้าตู้อบ (Binder, model ED 115) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อกำจัดน้ำ และขั้นตอนสุดท้ายคือการนำตัวดูดซับมาบดและนำไปเผาในเตาเผา (Carbolite, CWF 13) ที่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับ 3 องศาเซลเซียสต่อ นาที จนถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสและคงอุณหภูมิดังกล่าวไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปรับปรุงด้วยวิธีการต่างๆ ได้แก่ การป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนนำสารละลายไปเขย่า โดยทำการทดลองด้วยการอัดที่ความดันเท่ากับ 1 บาร์ 2 บาร์ และ 3 บาร์ การปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ โดยทำการทดลองที่ปริมาณเท่ากับ 25 มิลลิลิตร 20 มิลลิลิตร และ 15 มิลลิลิตร และการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการเขย่าสารละลาย โดยทำการทดลองที่จำนวนชั่วโมงเท่ากับ 4 ชั่วโมง 14 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง

### 3.2 วิธีทำการทดลอง

#### 3.2.1 การปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับแบบไม่มีการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์





1. ชั่งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอลูมินาอย่างละ  $5 \pm 0.01$  กรัม
2. นำโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอลูมินาที่ชั่งได้บรรจุลงในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 250 มิลลิลิตร
3. เติมน้ำปราศจากไอออนตามปริมาณที่กำหนด ลงในขวดรูปชมพู่
4. นำขวดรูปชมพู่บรรจุลงในเครื่องเขย่าสาร ที่รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที และตั้งเวลาในการเขย่าสารตามจำนวนชั่วโมงที่กำหนด
5. นำสารที่ได้หลังจากการเขย่ามากรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรองเบอร์ 0
6. นำสารที่ติดบนกระดาษกรองไปอบในเครื่องอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. นำสารที่ได้หลังจากการอบมาบดในโม่ร่งบดสาร และนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วรักษาอุณหภูมิอยู่ที่ 105 องศาเซลเซียส
8. เก็บตัวดูดซับที่ได้ในภาชนะดูความชื้น

#### 3.2.2 การปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับแบบมีการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1. ชั่งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอลูมินาอย่างละ  $5 \pm 0.01$  กรัม
2. นำโพแทสเซียมคาร์บอเนตและอลูมินาที่ชั่งได้บรรจุลงในขวดแก้วทนความดันปริมาตร 250 มิลลิลิตร
3. เติมน้ำปราศจากไอออนตามปริมาณที่กำหนด ลงในขวดแก้วทนความดัน
4. นำขวดแก้วทนความดันบรรจุลงในแจ็กเก็ต แล้วนำไปอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันตามที่กำหนด โดยขั้นตอนในการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีดังนี้
  - 4.1 ป้อนแก๊สไนโตรเจนไหลผ่าน ที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที
  - 4.2 ป้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไหลผ่าน ที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
  - 4.3 ปิดวาล์วที่สายป้อนแก๊สออก สังเกตเข็มที่เกจวัดความดัน เมื่อได้ความดันตามที่ต้องการให้เริ่มจับเวลาจนครบ 1 นาที จากนั้นปิดวาล์วที่สายป้อนแก๊สเข้า

5. นำแจ็คเก็ตที่มีขดบรรจุสารละลายอยู่ภายในประกอบเข้ากับเครื่องเขย่าสาร และเขย่าที่รอบการเขย่าเท่ากับ 150 รอบต่อนาที และตั้งเวลาในการเขย่าสารตามจำนวนชั่วโมงที่กำหนด
6. นำสารที่ได้หลังจากการเขย่ามากรองสุญญากาศด้วยกระดาษกรองเบอร์ 0
7. นำสารที่ติดบนกระดาษกรองไปอบในเครื่องอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
8. นำสารที่ได้หลังจากการอบมาบดในโกร่งบดสาร และนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วรักษาอุณหภูมิอยู่ที่ 105 องศาเซลเซียส
9. เก็บตัวอย่างที่ได้ในภาชนะดูความชื้น

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

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

### 3.2.4 การทำ Flow measurement

การทำ Flow measurement จะดำเนินการผ่าน 3 โปรแกรมย่อย ได้แก่ FlowDDE, FlowPlot และ Flowview

1. เข้าโปรแกรม FlowDDE
  - 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 FlowView

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

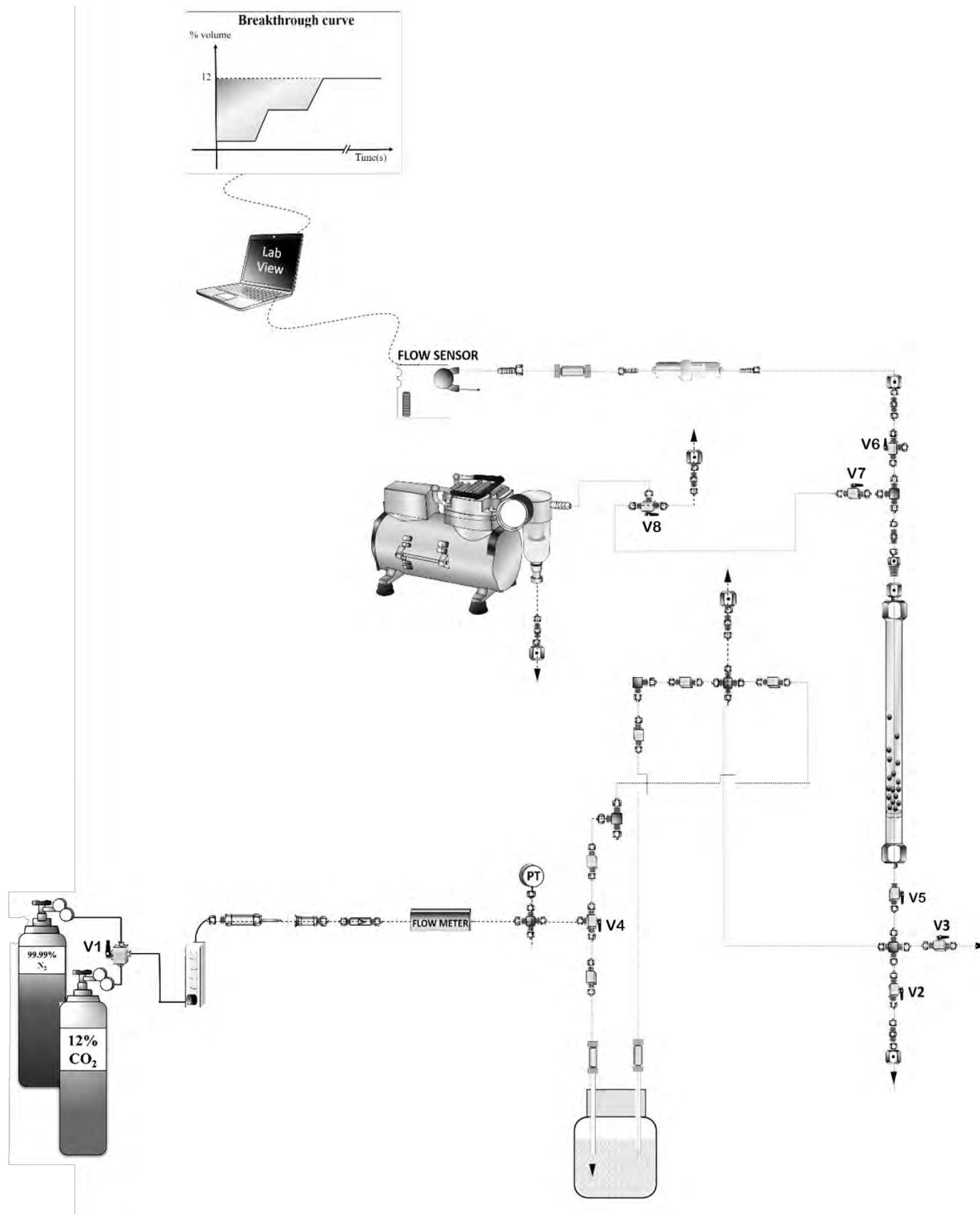
6. ปิดโปรแกรม FlowView โดยกดการ exit

#### 3.2.5 การใช้งาน Heater

1. เปิดสวิตช์บริเวณด้านข้าง เมื่อเครื่องเปิดจะมีไฟสีเขียวปรากฏ (ให้แถบสีขาวไปทางด้าน OFF)

2. กำหนดค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ

(หมายเหตุ : ห้ามเปิด Heater เมื่อไม่ได้ใส่แก๊สเข้าระบบ)



รูปที่ 10 แผนผังการดูดซับด้วยเครื่องฟลูอิดเซชัน (Fluidization adsorption diagram)

### 3.2.6 การหา Residence time เมื่อไม่บรรจุตัวดูดซับ (รูปที่ 10)

1. เช็ควัฒานน้ำในขวด Steam generator ให้มีปริมาณ 300 ml
2. เปิดโปรแกรม CO<sub>2</sub> Analyzer
3. เปิดโปรแกรม Flow measurement (FlowDDE, FlowPlot และ FlowView)
4. เปิดใช้งาน Downer heater กำหนดอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส
5. เปิดใช้งาน Pre-heater กำหนดอุณหภูมิ Pre-heater 1 ที่ 100 องศาเซลเซียส และกำหนดอุณหภูมิ Pre-heater 2 และ Pre-heater 3 ที่ 60 องศาเซลเซียส
6. เปิดวาล์วของแก๊ส N<sub>2</sub> โดยหมุนวาล์ว V1 ไปทางสายของแก๊ส N<sub>2</sub> (หัวลูกศรขึ้นด้านบน)
7. เปิดวาล์ว V4 โดยไม่ให้แก๊สผ่าน steam generator (หัวลูกศรลงด้านล่าง) เพื่อให้ได้แก๊สที่แห้ง
8. ไล่แก๊ส CO<sub>2</sub> ออกจากระบบด้วยแก๊ส N<sub>2</sub> แห้ง โดยปิดวาล์ว V5 และเปิดวาล์ว V2 กับ V3
9. เข้าโปรแกรม FlowView ตั้งค่าอัตราการไหลที่ 5 L/min แล้วกด OK เพื่อปล่อยแก๊ส N<sub>2</sub> เข้าสู่ระบบเป็นเวลา 4 นาที
10. ปิดวาล์ว V2, V3 และเปิดวาล์ว V5 เพื่อปล่อยแก๊ส N<sub>2</sub> แห้งเข้าคอลัมน์เป็นเวลา 4 นาทีเพื่อให้ได้คอลัมน์ที่แห้ง
11. ต่อมาเป็นการไล่แก๊สในระบบ ด้วยแก๊ส N<sub>2</sub> เปียก โดยเปิดวาล์ว V4 ให้แก๊สผ่าน steam generator (หัวลูกศรขึ้นด้านบน) เพื่อให้ได้แก๊สที่เปียก
12. ปิดวาล์ว V5 และเปิดวาล์ว V2 กับ V3 แล้วปล่อยแก๊ส N<sub>2</sub> เป็นเวลา 4 นาที
13. ปิดวาล์ว V2, V3 และเปิดวาล์ว V5 เพื่อปล่อยแก๊ส N<sub>2</sub> เปียกเข้าคอลัมน์เป็นเวลา 4 นาทีเพื่อให้ได้คอลัมน์ที่ชื้น โดยให้ปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่วัดได้จาก CO<sub>2</sub> Analyzer ให้น้อยกว่า 0.100
14. ปิดวาล์ว V5 และเปิดวาล์ว V2 และ V3 และหมุนวาล์ว V4 ไม่ให้แก๊สผ่าน steam generator (หัวลูกศรลงด้านล่าง) เพื่อให้ได้แก๊สที่แห้ง
15. เปลี่ยน Quick connect โดยหมุนวาล์ว V1 ไปทางสายของแก๊สผสม (CO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>) (หัวลูกศรลงด้านล่าง) จากนั้นไล่แก๊สผสมออกจากระบบ เป็นเวลา 4 นาที



16. ต่อมาเป็นการไล่แก๊สผสมเปียกในระบบ โดยหมุนวาล์ว V1 ให้แก๊สผ่าน steam generator (หัวลูกศร ขึ้นด้านบน) ไล่แก๊สผสมเปียกออกจากระบบ เป็นเวลา 4 นาที
17. ระหว่างที่ปล่อยแก๊สออกจากระบบให้เตรียมบันทึกข้อมูลโดยกด save as และตั้งชื่อข้อมูลที่บันทึก
18. เมื่อไล่แก๊สเปียกออกจากระบบครบ 4 นาที ให้ปิดวาล์ว V3 และอันแก๊สโดยการปิดวาล์ว V2 เมื่อได้ยินเสียงแก๊สออกจาก release valve ให้เปิดวาล์ว V2 เพื่อปล่อยแก๊สออก และปิดวาล์ว V2 อีกครั้ง
19. ทำซ้ำข้อ 18 อีก 2 รอบ (สุดท้ายแล้ววาล์ว V2 จะปิด)
20. บันทึกข้อมูลใน CO<sub>2</sub> Analyzer ทันทีที่เปิดวาล์ว V1
21. เมื่อค่าความเข้มข้นของแก๊ส CO<sub>2</sub> ขึ้นถึง 12% และเริ่มคงที่ ให้กดหยุดบันทึกข้อมูล และปิดวาล์ว V1 และเปิด V2 และ V3

### 3.2.7 การหา Residence time เมื่อบรรจุตัวดูดซับ (รูปที่ 10)

1. ปฏิบัติตามข้อ 1-12 ของวิธีการหา Residence time เมื่อไม่บรรจุตัวดูดซับ
2. ระหว่างที่ไล่แก๊สในระบบด้วยแก๊ส N<sub>2</sub> เปียก ให้ใส่ตัวดูดซับทางด้านบนของคอลัมน์ (หมายเหตุ: ต้องปิดวาล์ว V5 ก่อนใส่ตัวดูดซับเสมอ)
3. ดูดอากาศที่ค้างอยู่ในคอลัมน์ โดยปิดวาล์ว V6 เปิดวาล์ว V7 และหมุนวาล์ว V8 ให้หัวลูกศรไปทางซ้าย และเปิดปั๊มลมจนความดันคงที่ที่ -600 mbar หลังจากนั้นปิดปั๊มลม และปิดวาล์ว V8 และ V7
4. เมื่อปล่อยแก๊ส N<sub>2</sub> เปียก ครบ 4 นาที ให้ปิดวาล์ว V2 และ V3 จากนั้นค่อยๆเปิดวาล์ว V5 และเปิดวาล์ว V6 ตามอย่างค่อยเป็นค่อยไป พร้อมกับจับเวลา 4 นาที เพื่อปล่อยแก๊ส N<sub>2</sub> เปียกเข้าคอลัมน์ สำหรับการทำให้ตัวดูดซับให้ชื้น โดยให้ปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่วัดได้จาก CO<sub>2</sub> Analyzer ให้น้อยกว่า 0.100
5. ปฏิบัติตามข้อ 14-21 ของวิธีการหา Residence time เมื่อไม่บรรจุตัวดูดซับ
6. เปิดแก๊ส N<sub>2</sub> แห้งเข้าคอลัมน์เพื่อไล่ความชื้นออก โดยหมุนวาล์ว V1 ไปทางสายของแก๊ส N<sub>2</sub> และหมุนวาล์ว V4 ไม่ให้แก๊สผ่าน steam generator (หัวลูกศรลงด้านล่าง)
7. นำตัวดูดซับออกจากคอลัมน์โดยการถอดคอลัมน์แล้วเทตัวดูดซับออก

### 3.2.8 การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ (รูปที่ 10)

ทำการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ภาวะสุญญากาศภายใต้ความดัน -600 mbar เป็นระยะเวลา 1 นาที

1. ใส่ตัวดูดซับที่ต้องการฟื้นฟูสภาพทางด้านบนของคอลัมน์ (หมายเหตุ: ต้องปิดวาล์ว V5 ก่อนใส่ตัวดูดซับเสมอ)
2. ปิดวาล์ว V6 เปิดวาล์ว V7 และหมุนวาล์ว V8 ให้หัวลูกศรไปทางซ้าย และเปิดปั๊มลมจนความดันคงที่ที่ -600 mbar เริ่มจับเวลาจนครบ 1 นาที
3. จากนั้น ปิดปั๊มลม และปิดวาล์ว V8 และ V7
4. นำตัวดูดซับออกจากคอลัมน์ หรือหากต้องการใช้งานตัวดูดซับต่อ สามารถปฏิบัติตามวิธีการหา Residence time เมื่อบรรจุตัวดูดซับ โดยข้ามขั้นตอนของการใส่ตัวดูดซับและการดูดอากาศที่ค้างอยู่ในคอลัมน์ (ข้อที่ 2 และ 3 ของวิธีการหา Residence time เมื่อบรรจุตัวดูดซับ)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ประสิทธิภาพในดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา

เมื่อทำการทดลองดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินาที่ผ่านการปรับปรุง โดยทำการปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับดังนี้ (1) การปรับปรุงสภาพผิวตัวดูดซับด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (2) การปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ และ (3) การปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการเขย่าสารละลาย จากการศึกษาพบว่าตัวดูดซับที่ถูกเตรียมโดยมีการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 2 บาร์ ปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้เท่ากับ 20 มิลลิลิตร และระยะเวลาในการเขย่าสารละลายเท่ากับ 14 ชั่วโมง นั้นมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด คือ มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 56.16 มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับ โดยมีค่าสูงกว่าตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการปรับปรุงซึ่งถูกเตรียมด้วยวิธีอิมเพกเนชัน ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 51.00 มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับ โดยตารางที่ 1 แสดงตัวแปรที่ต้องการศึกษา และตารางที่ 2 แสดงการออกแบบการทดลองรวมไปถึงผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองของปัจจัย 3 ปัจจัย (Level) คือระดับต่ำ (Low) ระดับกลาง (middle) และระดับสูง (High) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์ (Code) คือ “-1” แทนระดับต่ำ “0” แทนระดับกลาง และ “1” แทนระดับสูง

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ศึกษา และค่าที่ใช้ในการทดลอง

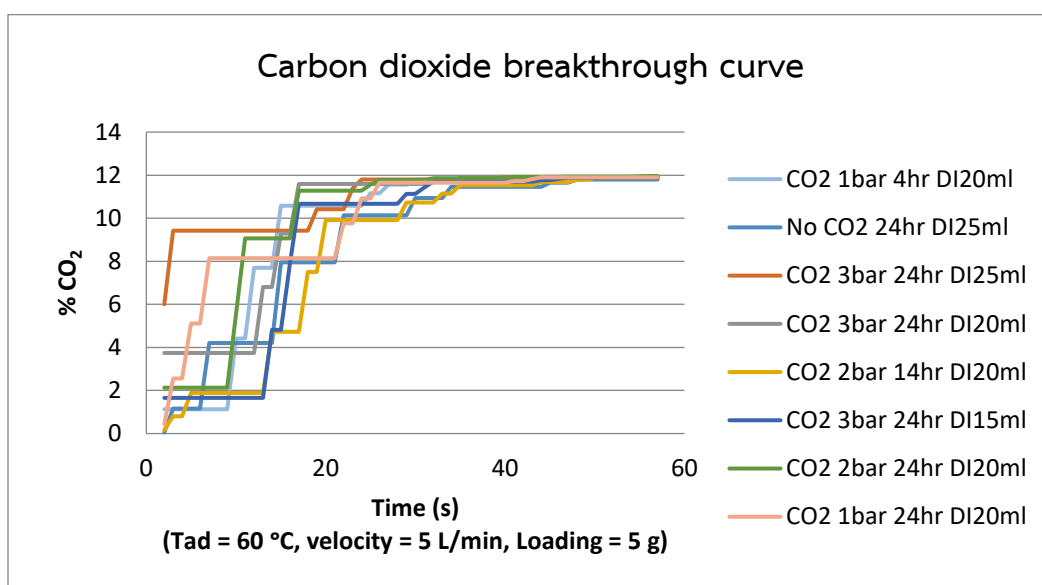
Code	-1	0	1
CO <sub>2</sub> atmosphere (bar)	1	2	3
Stirring time (hr)	4	14	24
DI water (ml)	15	20	25

ตารางที่ 2 การออกแบบทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และผลการทดลอง

Number of experiment	CO <sub>2</sub> atmosphere (bar)	Stirring time (hr)	DI water (ml)	CO <sub>2</sub> capture capacity (mg CO <sub>2</sub> /g sorbent)
1*	-	1	1	51.00
2	-1	-1	-1	39.27
3	-1	-1	0	38.00
4	-1	-1	1	38.32
5	-1	1	-1	28.95
6	-1	1	0	34.71
7	-1	1	1	30.13
8	0	-1	-1	36.96
9	0	-1	0	39.80
10	0	-1	1	34.28
11	0	0	0	56.16
12	0	1	-1	41.68
13	0	1	0	33.61
14	0	1	1	24.54
15	1	-1	-1	39.57
16	1	-1	0	36.30
17	1	-1	1	38.81
18	1	1	-1	48.15
19	1	1	0	33.74
20	1	1	1	18.00

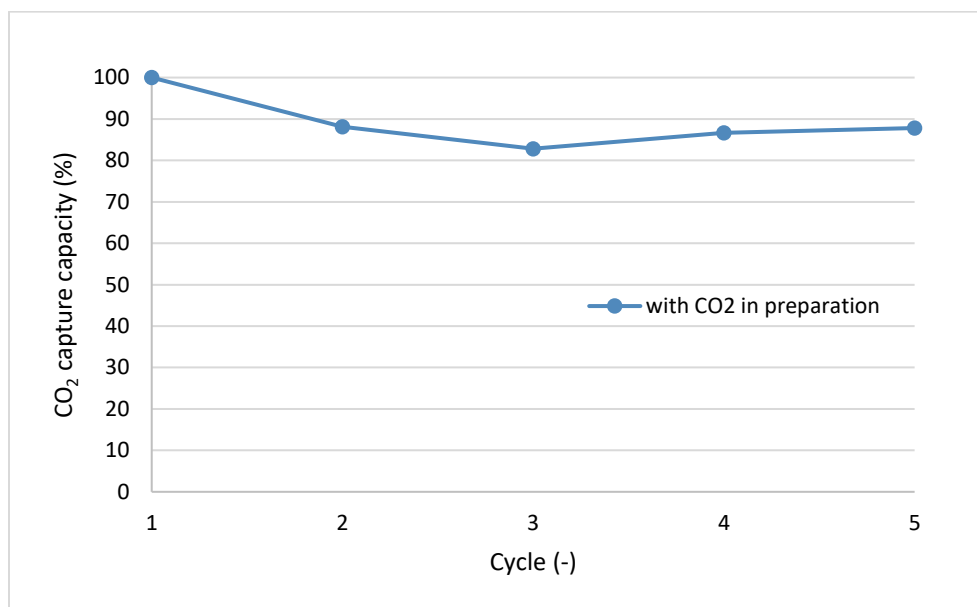
\*Number of experiment: 1 เป็นตัวดูดซับชนิดยังไม่ถูกปรับปรุง (Unmodified)

รูปที่ 11 แสดงปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงวิธีการเตรียมที่ ความแตกต่างกัน พบว่าตัวดูดซับของแข็งที่ถูกเตรียมด้วยการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 2 บาร์ ปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้เท่ากับ 20 มิลลิลิตร และระยะเวลาในการเขย่าเท่ากับ 14 ชั่วโมงนั้น มีพื้นที่กราฟ Breakthrough curve มากที่สุด โดยสังเกตได้จากกราฟที่มีปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ ประมาณร้อยละ 0-5 มีระยะเวลานานที่สุด ซึ่งแสดงถึงช่วงเวลาในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ของแข็งก่อนที่จะขึ้นไปถึงร้อยละ 12 เมื่อถึงจุดอิ่มตัวของตัวดูดซับของแข็ง ทั้งนี้ยังแสดงให้เห็นถึงระยะเวลานาน ที่สุดในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ของตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งพื้นที่กราฟนี้จะถูกนำไปคำนวณหาปริมาณการ ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งต่อไป



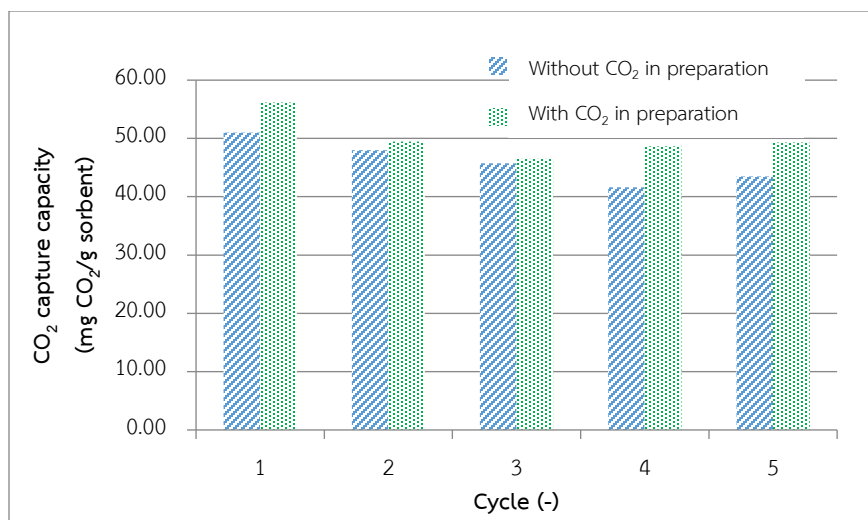
รูปที่ 11 Breakthrough Curve ของตัวดูดซับของแข็ง

เมื่อทราบผลว่าตัวดูดซับของแข็งที่ถูกเตรียมด้วยการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 2 บาร์ ปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้เท่ากับ 20 มิลลิลิตร และระยะเวลาในการเขย่าสารละลายเท่ากับ 14 ชั่วโมง นั้น ให้ค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ได้มีการนำตัวดูดซับดังกล่าวมาทำการฟื้นฟูสภาพใน ภาวะสูญญากาศภายใต้ความดัน -600 มิลลิบาร์ เป็นระยะเวลา 1 นาที พบว่าประสิทธิภาพตัวดูดซับของแข็งลดลง ร้อยละ 13.65 และคงที่ในทุกรอบการใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 12 ค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการฟื้นฟูสภาพที่ได้ทำให้ทราบว่าภาวะที่ใช้ในการฟื้นฟูสภาพดังกล่าวไม่สามารถ ฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ทั้งหมด แต่สามารถฟื้นฟูได้ในปริมาณค่อนข้างคงที่ ซึ่งเหมาะต่อการนำไปใช้งานใน ระบบต่อเนื่องต่อไป



รูปที่ 12 ประสิทธิภาพหลังการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ (Regeneration)

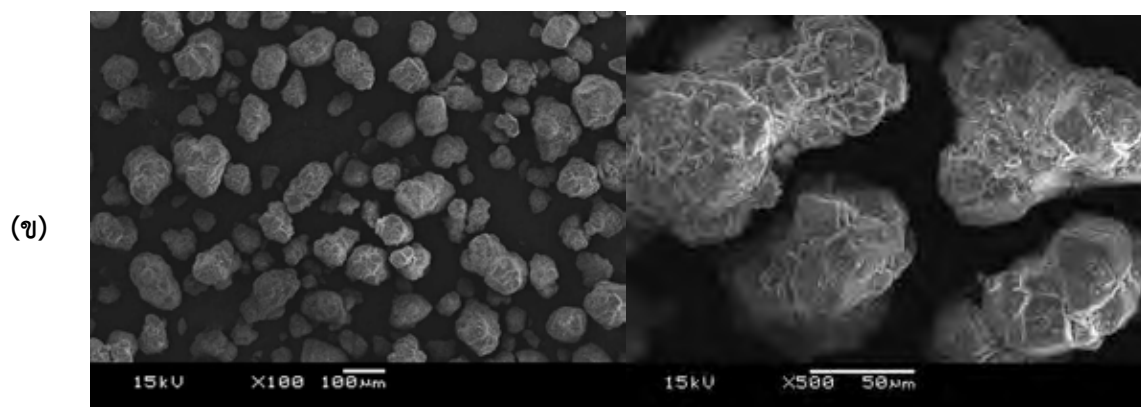
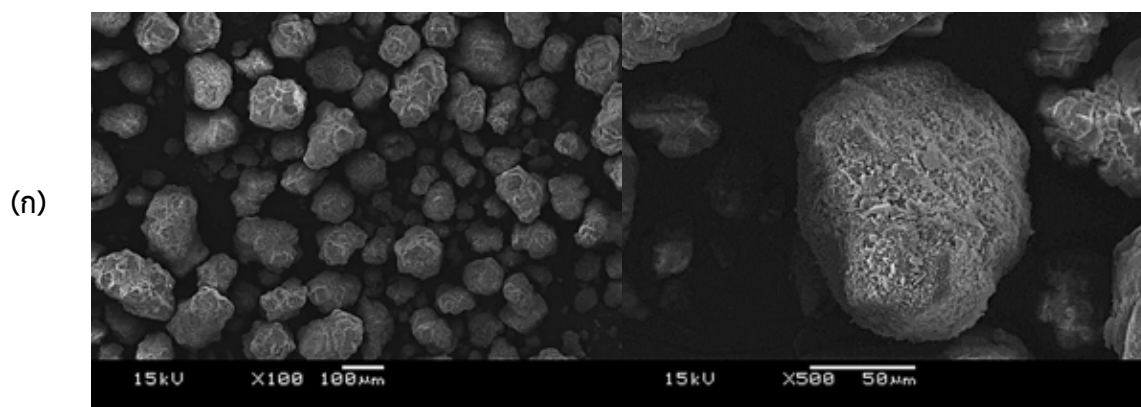
จากรูปที่ 13 แสดงประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับของแข็งที่ถูกเตรียมด้วยวิธีอิมเพกเนชันที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง และตัวดูดซับของแข็งที่ถูกเตรียมโดยผ่านกระบวนการปรับปรุง โดยสังเกตได้ว่า ที่รอบการใช้งานที่ 5 ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งที่ถูกเตรียมด้วยวิธีอิมเพกเนชันที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 43.51 มิลลิกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 85.30 ของตัวดูดซับของแข็งที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน ในขณะที่ตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงมีค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 49.30 มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับของแข็ง คิดเป็นร้อยละ 87.80 ของตัวดูดซับของแข็งที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับของแข็งหลังผ่านกระบวนการฟื้นฟูสภาพแล้วยังคงมีประสิทธิภาพที่สูงในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างสูง และมีค่าค่อนข้างคงที่ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

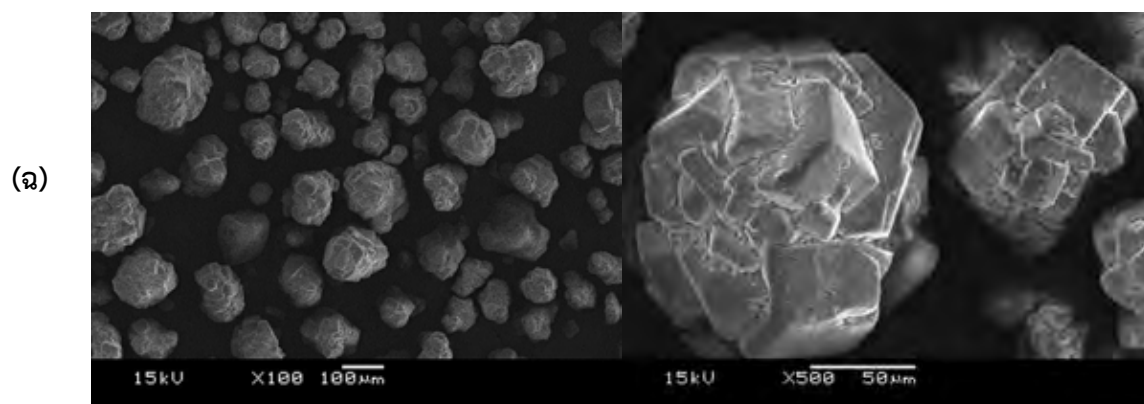
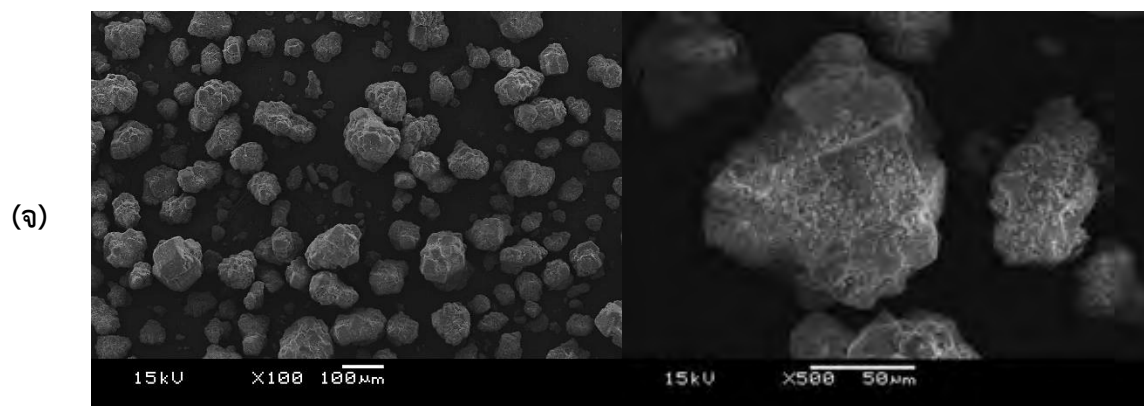
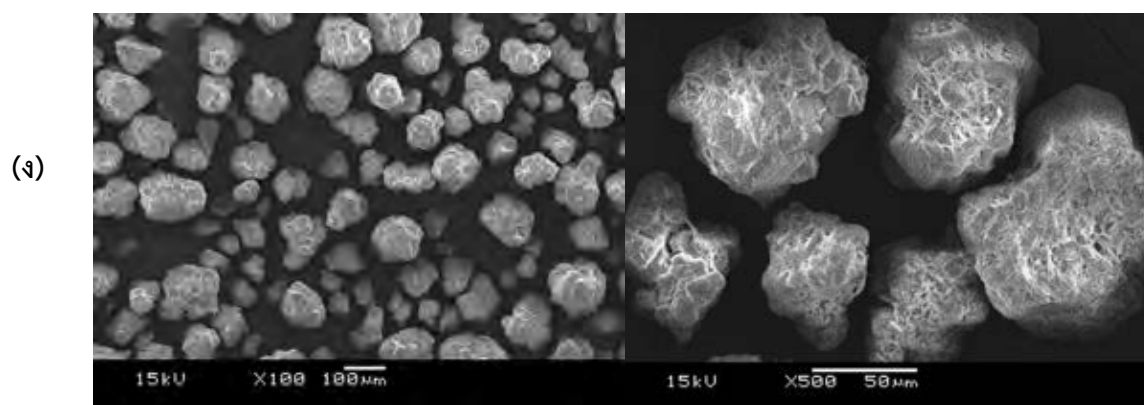
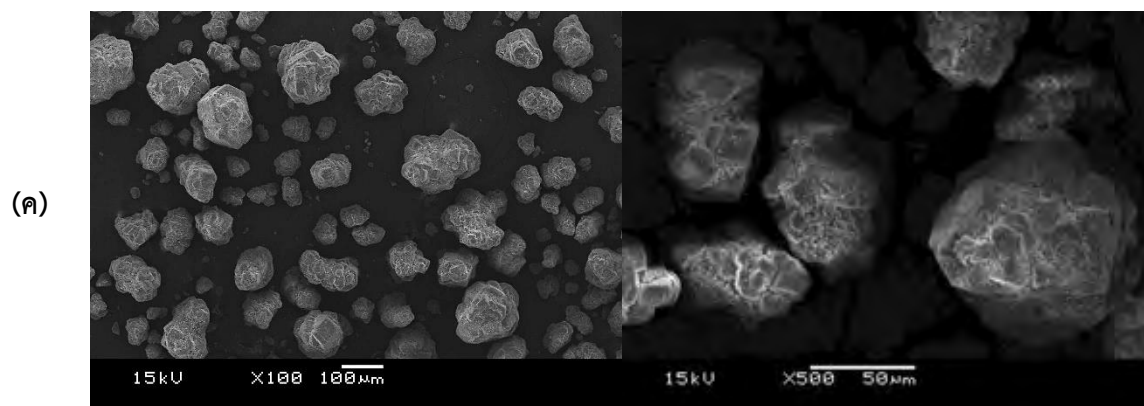


รูปที่ 13 ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับที่ถูกเตรียมด้วยวิธีอิมเพกเนชันที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุง และตัวดูดซับที่ถูกเตรียมโดยผ่านกระบวนการปรับปรุง

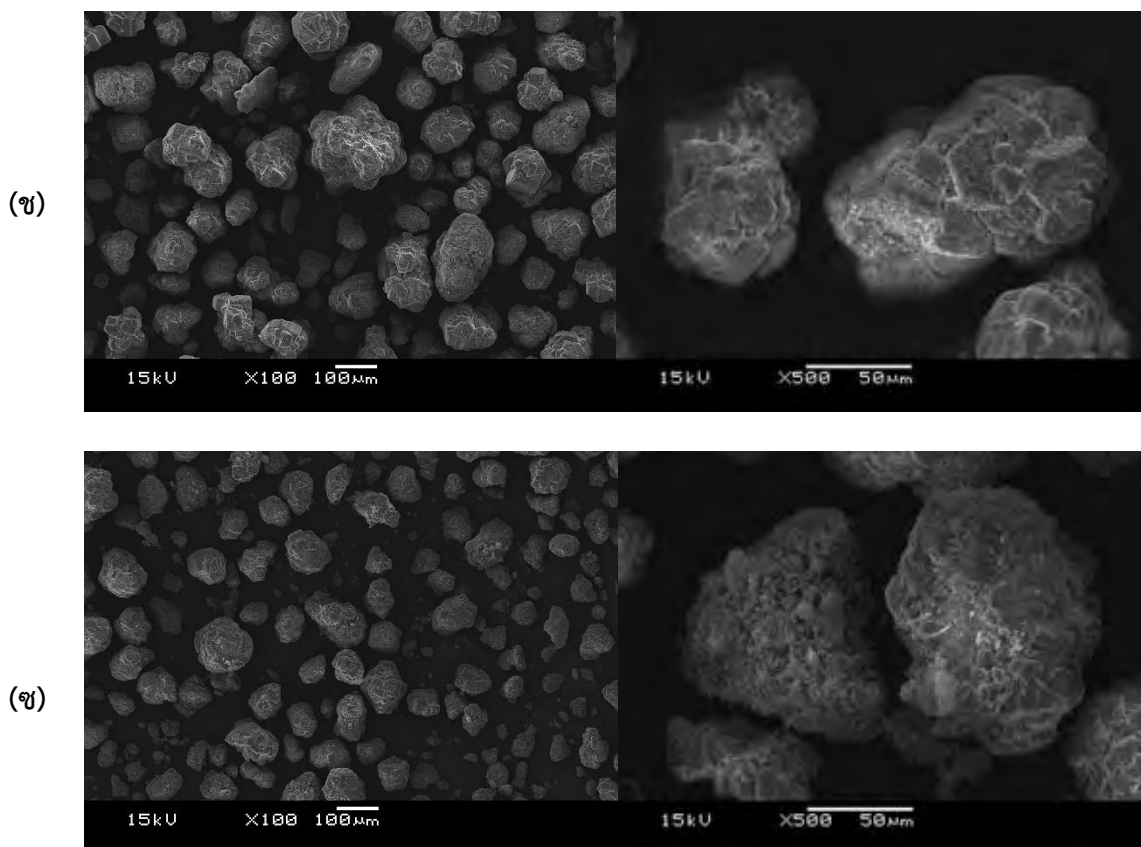
#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ทางสัณฐานปริมาณและองค์ประกอบของตัวดูดซับ

##### 4.2.1 การวิเคราะห์ผลโดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM)









รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์ผลโดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) ของตัวดูดซับที่ยังไม่ได้ผ่านการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ (ก) No CO<sub>2</sub> 24hr DI25ml (ข) CO<sub>2</sub> 1 bar 24hr DI20ml (ค) CO<sub>2</sub> 2 bar 24hr DI20ml (ง) CO<sub>2</sub> 2 bar 14hr DI20ml (จ) CO<sub>2</sub> 2 bar 4hr DI20ml (ฉ) CO<sub>2</sub> 3 bar 24hr DI25ml (ช) CO<sub>2</sub> 3 bar 24hr DI20ml (ซ) CO<sub>2</sub> 3 bar 24hr DI15ml

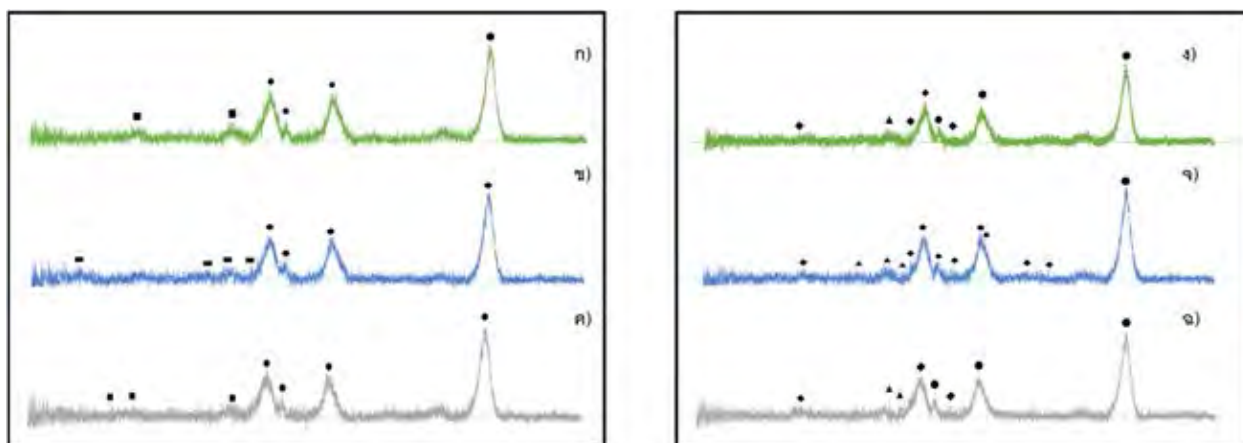
จากผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (SEM) ของตัวดูดซับที่ยังไม่ได้ผ่านการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อเปรียบเทียบจากการปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับ ได้แก่ (1) การปรับปรุงสภาพผิวตัวดูดซับด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (2) การปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ และ (3) การปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการเขย่าสารละลาย พบว่า รูป 14 (ก) No CO<sub>2</sub> 24hr DI25ml และ (ง) CO<sub>2</sub> 2 bar 14hr DI20ml สำหรับกำลังขยาย 100x มีขนาดใกล้เคียงกัน และไม่จับตัวเป็นก้อน ซึ่งเป็นผลให้ตัวดูดซับดังกล่าวมีปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าตัวดูดซับที่มีขนาดแตกต่างกัน และจับตัวเป็นก้อนเนื่องจากมีพื้นที่ที่ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า นอกจากนี้เมื่อสังเกตจากรูปกำลังขยาย 500x พบว่าตัวดูดซับ (ง) CO<sub>2</sub> 2 bar 14hr DI20ml มีพื้นที่ผิวขรุขระมากอย่างเห็นได้ชัด และอนุภาคของตัวดูดซับที่ได้มีขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งส่งผลให้ตัวดูดซับที่ปรับปรุงด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 2 บาร์ ปริมาณน้ำ

ปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร ที่เวลาเขย่า 14 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพในการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกับระยะเวลาในการเขย่าสารละลาย ดังรูป 14 (ค) CO<sub>2</sub> 2 bar 24hr DI20ml และ (จ) CO<sub>2</sub> 2 bar 4hr DI20ml พบว่าที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตัวดูดซับมีลักษณะค่อนข้างเรียบมากกว่า 4 ชั่วโมง เนื่องจากมีความรุนแรงในการเขย่าทำให้อนุภาคของตัวดูดซับเกิดการชนกันเอง และชนกับภาชนะ และด้วยระยะเวลาในการเขย่าที่นานจึงทำให้ตัวดูดซับเกิดการสึกกร่อนมาก แต่หากพิจารณาขนาดอนุภาคตัวดูดซับที่ใช้เวลาเขย่า 4 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคมีขนาดที่ไม่ใกล้เคียงกัน และเกิดการจับตัวเป็นก้อน แสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลา 14 ชั่วโมงเป็นเวลาที่ดีที่สุดที่ใช้ในการปรับปรุงตัวดูดซับ

เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่น คือ ปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ จากรูป 14 (ฉ) CO<sub>2</sub> 3 bar 24hr DI25ml (ช) CO<sub>2</sub> 3 bar 24hr DI20ml และ (ซ) CO<sub>2</sub> 3 bar 24hr DI15ml พบว่า ตัวดูดซับ (ซ) CO<sub>2</sub> 3 bar 24hr DI15ml สำหรับกำลังขยาย 100x มีขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน และไม่จับตัวเป็นก้อน อีกทั้งที่กำลังขยาย 500x มีพื้นที่ผิวขรุขระมากอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลให้ตัวดูดซับดังกล่าวมีปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดีกว่าตัวดูดซับ (ฉ) CO<sub>2</sub> 3 bar 24hr DI25ml และ (ช) CO<sub>2</sub> 3 bar 24hr DI20ml สังเกตได้จากรูป 14 (ฉ) และ (ซ) ที่กำลังขยาย 100x อนุภาคมีขนาดแตกต่างกัน และจับตัวเป็นก้อน ที่กำลังขยาย 500x ตัวดูดซับมีลักษณะค่อนข้างเรียบ เนื่องจากปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่มากเกินไปทำให้สารละลายเจือจาง ส่งผลให้โมเลกุลของตัวดูดซับ K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> มีโอกาสน้อยในการฝังตัวลงบนตัวรองรับ  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> อีกทั้งการใช้ระยะเวลาเขย่าที่นาน ส่งผลให้ตัวดูดซับสึกกร่อน

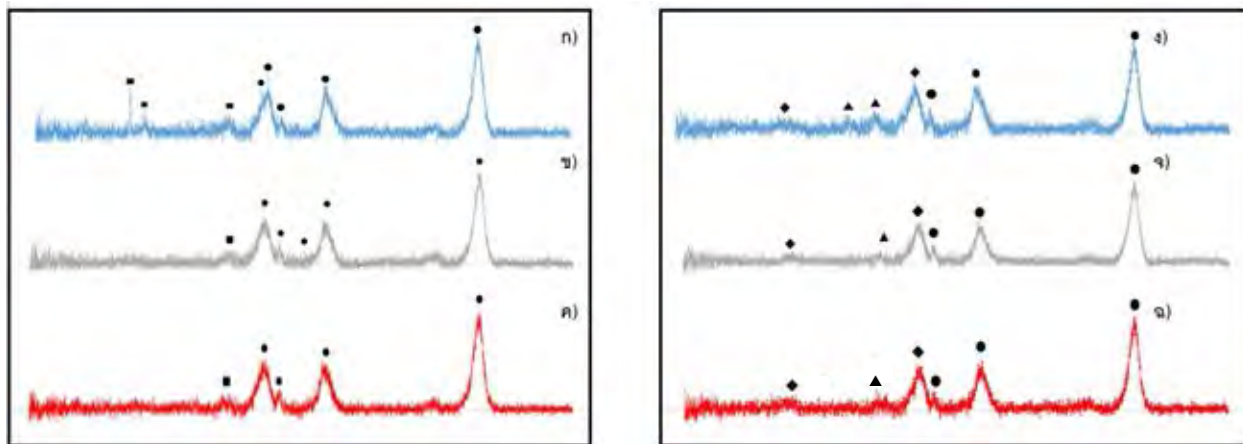
สำหรับอีกปัจจัย คือ ปริมาณความดันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสังเกตได้จากรูป 14 (ข) CO<sub>2</sub> 1 bar 24hr DI20ml (ค) CO<sub>2</sub> 2 bar 24hr DI20ml และ (ง) CO<sub>2</sub> 3 bar 24hr DI20ml พบว่า ตัวดูดซับมีลักษณะ และปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ผลโดยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD)



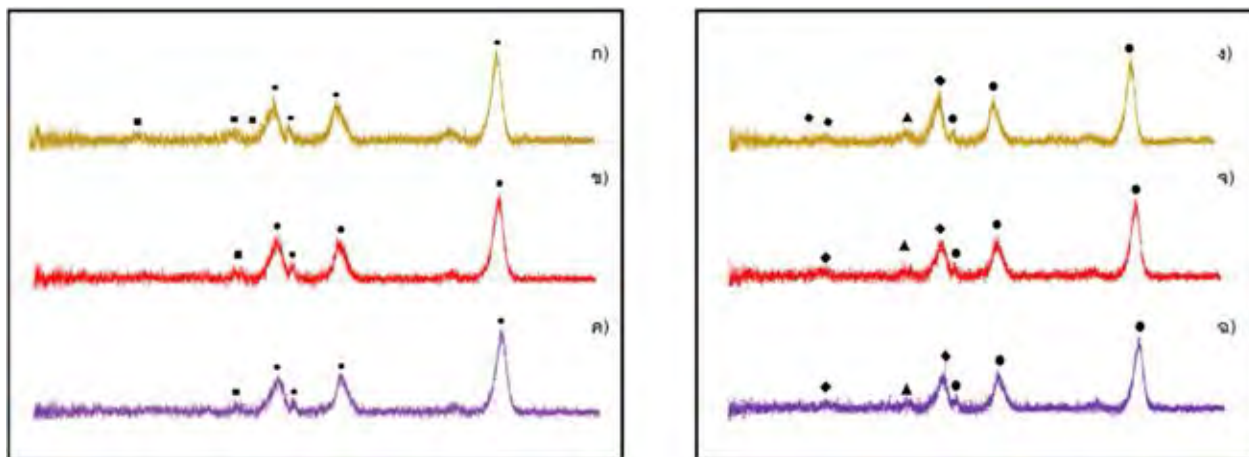
รูปที่ 15 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงก่อนและหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยตัวดูดซับถูกเตรียมด้วย  $\text{CO}_2$  2 บาร์ , DI water 20 มิลลิลิตร และ ใช้เวลาในการเขย่าที่ (ก) 4 ชม. (ข) 14 ชม. และ (ค) 24 ชม. ก่อนผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวดูดซับหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ง) 4 ชม. (จ) 14 ชม. และ (ฉ) 24 ชม. [ ■ : $\text{K}_2\text{CO}_3$ , ▲ : $\text{KHCO}_3$ , ● : $\text{Al}_2\text{O}_3$ , และ ◆ : $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ]

การวิเคราะห์ผลของตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงก่อนและหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในรูปที่ 15 โดยเมื่อเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 2 บาร์ น้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร โดยใช้เวลาในการเขย่าสารต่างกัน จากผลการวิเคราะห์ในช่วงก่อนกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าตัวดูดซับทั้งสาม เกิดพีคของ 2 วัฏภาค คือ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  โดยพีค  $\text{K}_2\text{CO}_3$  ที่ปรากฏนั้นเป็นผลจากการฝังตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตลงบนตัวรองรับอลูมินา ส่วน  $\text{Al}_2\text{O}_3$  เป็นพีคตัวรองรับ โดยเมื่อผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์  $\text{K}_2\text{CO}_3$  จะเปลี่ยนสภาพและเกิดเป็น  $\text{KHCO}_3$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับโพแทสเซียมคาร์บอเนต และเกิดเป็น  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม จากผลการวิเคราะห์หลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวดูดซับทั้งสามแสดงพีคของ  $\text{KHCO}_3$ ,  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่ปรับปรุงใหม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับได้ ทั้งนี้การเกิดขึ้นของ  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  จะส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับเนื่องจาก  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  สลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 16 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงก่อนและหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยตัวดูดซับถูกเตรียมด้วย DI water 20 มิลลิลิตร ที่เวลาในการเขย่า 24 ชม. และ  $\text{CO}_2$  ที่ความดัน (ก) 1 บาร์ (ข) 2 บาร์ และ (ค) 3 บาร์ ก่อนผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวดูดซับหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ง) 1 บาร์ (จ) 2 บาร์ และ (ฉ) 3 บาร์ [ ■ :  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , ▲ :  $\text{KHCO}_3$ , ● :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , และ ◆ :  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ]

การวิเคราะห์ผลของตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงก่อนและหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD เมื่อเทียบผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร เวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง และอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันต่างกัน จากรูป 16 พบว่า ก่อนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงทุกตัวแสดงพีคของ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  เป็นผลมาจากการฝังตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอลูมินา และพีคของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งเป็นตัวรองรับ และเมื่อผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตัวดูดซับทุกตัวแสดงพีคของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$  และ  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับได้



รูปที่ 17 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของตัวดูดซับที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงก่อนและหลังกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกไซด์ โดยตัวดูดซับถูกเตรียมด้วย  $\text{CO}_2$  3 บาร์ ที่เวลาในการเขย่า 24 ชม. และปริมาณ DI water (ก) 15 มิลลิลิตร (ข) 20 มิลลิลิตร และ (ค) 25 มิลลิลิตร ก่อนผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวดูดซับหลังกระบวนการดูดซับแก๊ส (ง) 15 มิลลิลิตร (จ) 20 มิลลิลิตร และ (ฉ) 25 มิลลิลิตร [ ■ :  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , ▲ :  $\text{KHCO}_3$ , ● :  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , และ ◆ :  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ]

การศึกษาผลของปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ต่อประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วย XRD เมื่อเทียบผลการวิเคราะห์ตัวดูดซับที่เตรียมด้วยการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 3 บาร์ เวลาในการเขย่า 24 ชั่วโมง โดยใช้ปริมาณของน้ำปราศจากไอออนต่างกัน จากรูป 17 พบว่า ก่อนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบพีคของ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และเมื่อผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อผ่านกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ วัฏภาคของ  $\text{K}_2\text{CO}_3$  เปลี่ยนสภาพไปเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของ ตัวดูดซับทุกตัวแสดงพีคของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{KHCO}_3$  และ  $\text{KAl}(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงนั้นสามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับได้

อย่างไรก็ตามจากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD สามารถบ่งชี้ได้เพียงสารที่พบบนตัวอย่างเท่านั้น ส่วนพีคของสารที่เกิดขึ้นนั้นไม่ชัดเจนพอที่จะเห็นความแตกต่างด้านความเข้ม (intensities) และนำไปบ่งบอกปริมาณของวัฏภาคของสารในสารตัวอย่างได้

#### 4.2.3 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET)

จากตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเครื่อง BET พบว่าตัวดูดซับ No CO<sub>2</sub> 24hr DI25ml มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface) มากกว่า แต่มีขนาดของรูพรุนต่ำกว่าตัวดูดซับ CO<sub>2</sub> 2 bar 14hr DI20ml เนื่องจากการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงของการเตรียมสารเป็นการทำให้สารละลายที่ได้มีสภาพเป็นกรด ซึ่งสามารถปรับปรุงพื้นที่ผิวของตัวรองรับอลูมินาได้เหมาะสมกับภาวะที่ใช้ในการเคลือบฝังโพแทสเซียมคาร์บอเนต และช่วยเพิ่มขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับให้เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวดูดซับก่อนกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Sample	BET surface (m <sup>2</sup> /g)	Pore Size (Å)
CO <sub>2</sub> 2 bar 14hr DI20ml	116.0044	80.2090
No CO <sub>2</sub> 24hr DI25ml	125.3891	74.2498

#### 4.2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุโดยการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับด้วยเครื่อง XRF ทำให้ทราบปริมาณโพแทสเซียมที่ฝังบนตัวดูดซับซึ่งแสดงค่าออกมาในรูปของร้อยละดังตารางที่ 4 โดยจะสังเกตได้ว่าปริมาณของโพแทสเซียมที่ฝังบนตัวดูดซับ No CO<sub>2</sub> 24hr DI25ml มีค่ามากกว่าตัวดูดซับ CO<sub>2</sub> 2 bar 14hr DI20ml ซึ่งไม่สอดคล้องกับปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับดังกล่าว โดยเมื่อวิเคราะห์ร่วมกับผลของ BET ซึ่งพบว่าปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับ CO<sub>2</sub> 2 bar 14hr DI20ml มีค่าต่ำกว่าตัวดูดซับ No CO<sub>2</sub> 24hr DI25ml แต่รูพรุนมีขนาดที่กว้างกว่า ดังนั้นค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่าของตัวดูดซับ No CO<sub>2</sub> 24hr DI25ml เกิดจากโพแทสเซียมบางส่วนอาจฝังตัวอยู่ในรูพรุนซึ่งมีขนาดเล็กทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดปฏิกิริยากับตัวดูดซับได้ จึงทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีน้อย

ตารางที่ 4 ปริมาณโพแทสเซียมที่ฝังบนตัวดูดซับก่อนกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

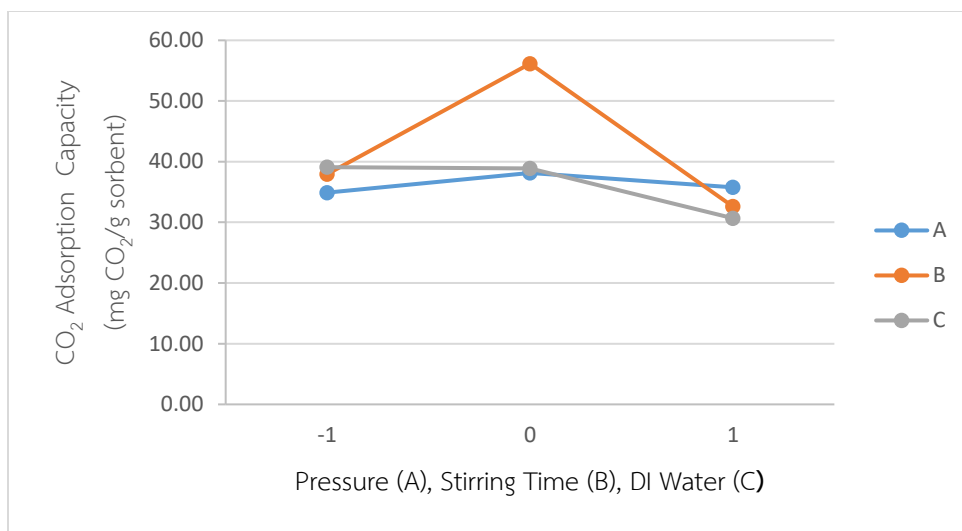
Sample	% K Loading
CO <sub>2</sub> 2 bar 14hr DI20ml	14.8
No CO <sub>2</sub> 24hr DI25ml	18.8

#### 4.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

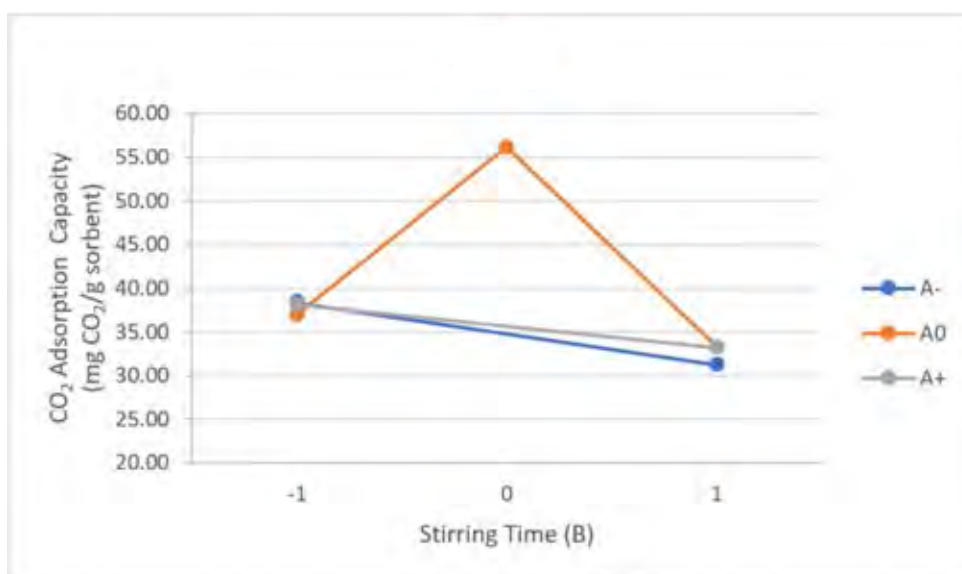
การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) โดยการใช้ตัวแปรตาม คือ ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากตารางที่ 5 พบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า (B) ปริมาณน้ำปราศจากไอออน (C) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณของความดัน ระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า (AB) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณของความดัน และปริมาณน้ำปราศจากไอออน (AC) อันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า และปริมาณน้ำปราศจากไอออน (BC) และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของความดัน ระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า และปริมาณน้ำปราศจากไอออน (ABC) ทั้งหมดนี้เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตาม เนื่องจากมีค่า P-value มีค่าต่ำกว่า 0.05

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	P Value
Model	1.24E+05	18	6890.26	86.52	< 0.05
A-Pressure	248.52	2	124.26	1.56	0.2232
B-Stirring Time	39379.75	2	19689.87	247.25	< 0.05
C-DI Water	22588.16	2	11294.08	141.82	< 0.05
AB	1001.48	2	500.74	6.29	< 0.05
AC	13993.28	4	3498.32	43.93	< 0.05
BC	15456.77	2	7728.38	97.05	< 0.05
ABC	14642.01	4	3660.5	45.97	< 0.05
Pure Error	3026.12	38	79.63		
Cor Total	1.27E+05	56			

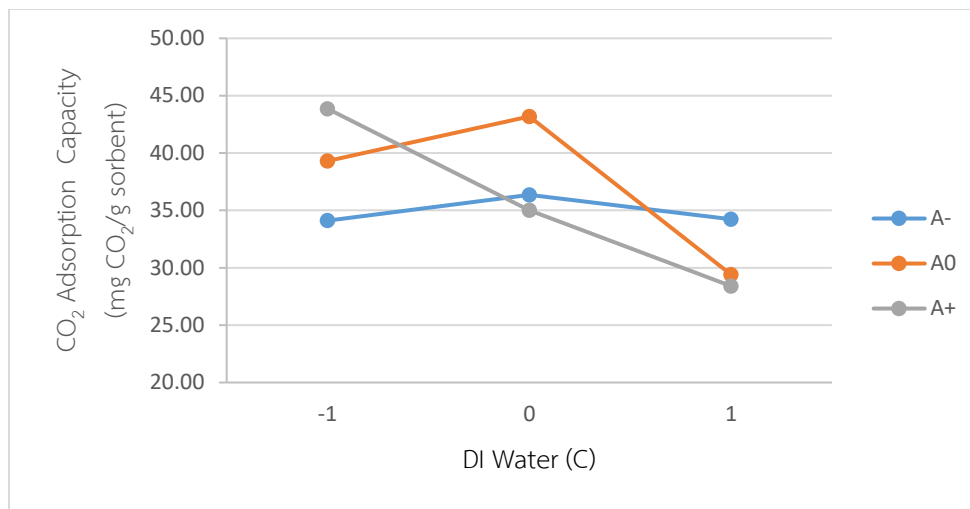


รูปที่ 18 ผลของตัวแปรที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

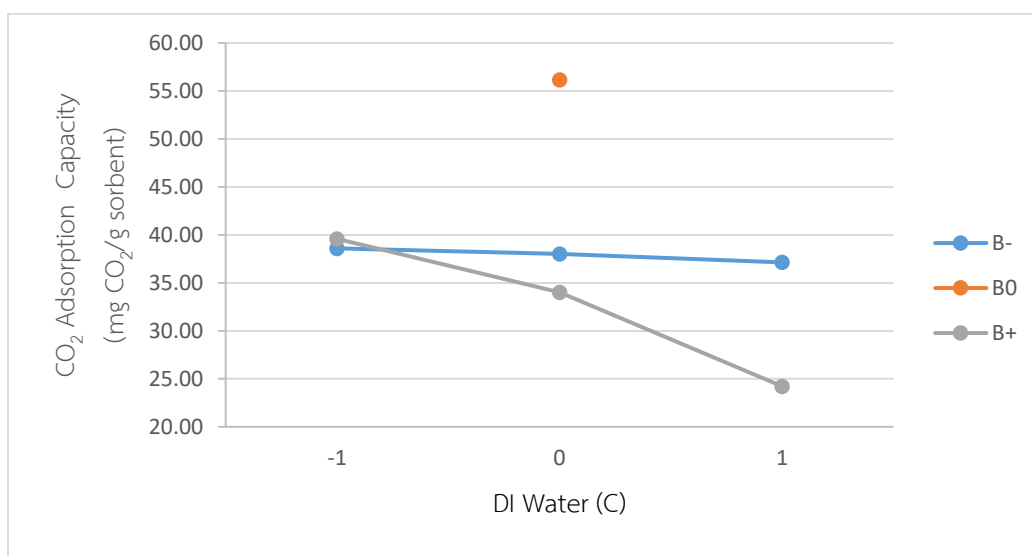


รูปที่ 19 ผลของอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของความดันที่อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (A) และระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า (B) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์





รูปที่ 20 ผลของอันตรกิริยาระหว่างปริมาณของความดันที่อัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (A) และปริมาณน้ำปราศจากไอออน (C) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 21 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า (B) และปริมาณน้ำปราศจากไอออน (C) ที่มีต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 18 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าตัวแปร A ปริมาณของความดัน และตัวแปร B ระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า มีแนวโน้มของค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปในทางเดียวกัน กล่าวคือมีค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ความดัน 2 บาร์ และระยะเวลาเขย่า 14 ชั่วโมง ปริมาณน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร และมีค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด ที่ความดัน 3 บาร์ ระยะเวลาเขย่า 24 ชั่วโมง แต่ในส่วน of ตัวแปร C ปริมาณน้ำ

ปราศจากไอออน มีค่าสูงสุด ที่ปริมาณน้ำปราศจากไอออน 15 มิลลิลิตร มีค่าต่ำสุด ที่ปริมาณน้ำปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร

จากรูปที่ 19 ตัวแปร A หรือปริมาณของความดัน และตัวแปร B หรือระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า มีอันตรกิริยาระหว่างกัน ซึ่งส่งผลต่อปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ที่ปริมาณของความดันในการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นค่าต่ำ (-1) และค่าสูง (1) จะมีค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเขย่า แต่ที่ความดันค่ากลาง (0) เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเขย่าจากค่าต่ำ (-1) ไปถึงค่ากลาง (0) จะมีค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจากค่ากลาง (0) ไปถึงค่าสูง (1) จะมีค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง

จากรูปที่ 20 ตัวแปร A หรือปริมาณของความดัน และตัวแปร C หรือปริมาณน้ำปราศจากไอออน มีอันตรกิริยาระหว่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลต่อปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ที่ปริมาณของความดันในการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นค่าต่ำ (-1) และค่ากลาง (0) จะมีค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของน้ำปราศจากไอออนในช่วงที่เป็นค่าต่ำ (-1) ถึงค่ากลาง (0) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำปราศจากไอออนจากค่ากลาง (0) ไปจนถึงค่าที่สูงที่สุด (1) คือ 25 มิลลิลิตร แนวโน้มการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเฉลี่ยที่ลดลง ในทางกลับกันความดันที่เป็นค่าสูง (1) เมื่อปริมาณน้ำปราศจากไอออนเพิ่มขึ้นจะมีค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง

จากรูปที่ 21 ตัวแปร B หรือระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า และตัวแปร C หรือปริมาณน้ำปราศจากไอออน มีอันตรกิริยาระหว่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งส่งผลต่อปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าที่ระยะเวลาในการเขย่าที่ค่าต่ำ (-1) และค่าสูง (1) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณน้ำปราศจากไอออน จะมีแนวโน้มค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่า และปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ค่ากลาง (0) จะมีค่าเฉลี่ยของปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของการปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต ( $K_2CO_3$ ) บนตัวรองรับแกมมาอลูมินา ( $\gamma-Al_2O_3$ ) การปรับปรุงกระบวนการเตรียมตัวดูดซับทำได้โดย การบ้อนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนนำสารละลายไปเขย่า การปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้ และการปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการเขย่าสารละลาย จากการศึกษาพบว่าตัวดูดซับที่ถูกเตรียมโดยมีการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 2 บาร์ ปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้เท่ากับ 20 มิลลิลิตร และระยะเวลาในการเขย่าสารละลายเท่ากับ 14 ชั่วโมง นั้นมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ส่งผลให้ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการปรับปรุงกระบวนการเตรียมที่ภาวะอื่นๆ โดยมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 56.16 มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับ รวมทั้งมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวดูดซับที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุง ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 51.00 มิลลิกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อหนึ่งกรัมของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตัวดูดซับที่ถูกเตรียมโดยมีการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดัน 2 บาร์ ปริมาณน้ำปราศจากไอออนที่ใช้เท่ากับ 20 มิลลิลิตร และระยะเวลาในการเขย่าสารละลายเท่ากับ 14 ชั่วโมง เป็นภาวะในการเตรียมตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับการฝังตัวของโพแทสเซียมคาร์บอเนตมากที่สุด เนื่องจากพบว่าตัวดูดซับมีพื้นที่ผิวขรุขระมากอย่างเห็นได้ชัด และอนุภาคของตัวดูดซับที่ได้มีขนาดค่อนข้างใกล้เคียงกัน

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพบว่า ภายหลังจากกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์พบพีคของ  $KHCO_3$  และ  $KAl(CO_3)_2(OH)_2$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับสามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับได้ดี แต่การเกิดขึ้นของ  $KAl(CO_3)_2(OH)_2$  จะส่งผลต่อการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ เนื่องจาก  $KAl(CO_3)_2(OH)_2$  จะสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวดูดซับด้วยเครื่อง BET พบว่าตัวดูดซับ No  $CO_2$  24hr DI25ml มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface) มากกว่า แต่มีขนาดของรูพรุนต่ำกว่าตัวดูดซับ  $CO_2$  2 bar 14hr DI20ml เนื่องจากการอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการทำให้สารละลายที่ได้มีสภาพเป็นกรด ซึ่งสามารถ

ปรับปรุงพื้นผิวของตัวรองรับอลูมินาได้เหมาะสมกับภาวะที่ใช้ในการเคลือบฝังโพแทสเซียมคาร์บอเนต และช่วยเพิ่มขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับให้เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวดูดซับด้วยเครื่อง XRF พบว่าปริมาณโพแทสเซียมที่ฝังตัวบนตัวดูดซับไม่สอดคล้องกับความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ ทั้งนี้ค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่าของตัวดูดซับ No CO<sub>2</sub> 24hr DI25ml เนื่องจากโพแทสเซียมบางส่วนอาจฝังตัวอยู่ในรูพรุนซึ่งมีขนาดเล็กทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนและเกิดปฏิกิริยากับตัวดูดซับได้ จึงทำให้ปริมาณโพแทสเซียมที่สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีน้อยกว่าตัวดูดซับ CO<sub>2</sub> 2 bar 14hr DI20ml

เมื่อนำตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดมาทำการคืนสภาพในสภาวะสุญญากาศภายใต้ความดัน -600 มิลลิบาร์ เป็นเวลา 1 นาที พบว่าประสิทธิภาพตัวดูดซับลดลงร้อยละ 13.65 และคงที่ในทุกรอบการใช้งาน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรควบคุมปัจจัยภายนอกที่มีอาจผลต่อการทดลอง เช่น ไม่ทำการทดลองเมื่อฝนตก เนื่องจากความชื้นในอากาศจะทำให้ตัวดูดซับชื้น ซึ่งทำให้ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับลดลง นอกจากนี้ระหว่างทำการทดลองมักเกิดการอุดตันของสายยางที่เชื่อมระหว่างคอลัมน์และเซนเซอร์เนื่องจากมีตัวดูดซับที่หลุดลอยออกจากระบบเข้าไปอุดตัน และยังทำให้คอลัมน์เกิดความเสียหายเนื่องจากความดันภายในระบบสูง เพื่อเป็นการลดโอกาสการเกิดจึงควรติดตั้งแผ่นกรองในคอลัมน์ส่วนบนก่อนที่จะออกจากคอลัมน์เพื่อลดการสูญเสียของตัวดูดซับออกจากระบบ

## รายการอ้างอิง

- [1] Onischak DG M. Recent Developments in Separation Science. CRC press. 1972; 73-93.
- [2] Chalermssinsuwan B. Fluidization. Chulalongkorn University. Thailand. 2017.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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] 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.
- [8] Okunev AG, Sharonov VE, Aristov YI, Parmon VN. Sorption of carbon dioxide from wet gases by K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-in-porous matrix: influence of the matrix nature. Reaction Kinetics and Catalysis Letters. 2000; 71:355–362.
- [9] 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.
- [10] Zhao WY, Sprachmann G, Li Zh, Cai NS, Zhang XH. Effect of K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·1.5H<sub>2</sub>O on the regeneration energy consumption of potassium-based sorbents for CO<sub>2</sub> capture. Applied Energy. 2013; 112:381-387.

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก. การคำนวณปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม CO<sub>2</sub> Analyzer จะได้อะเอียดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เซนเซอร์สามารถวัดได้ต่อเวลา เมื่อนำข้อมูลชุดนี้มาวาดกราฟจะได้กราฟ Breakthrough Curve ดังแสดงในรูปที่ 11 ในทางทฤษฎีพื้นที่กราฟหาได้จากสมการที่ 5

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

โดย

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

$m$  = มวลของตัวดูดซับ [กรัม],

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

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

$Q$  = อัตราการไหลของแก๊ส [กรัมต่อวินาที],

$t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ [วินาที]

ในการทดลองนี้จะใช้โดยใช้โปรแกรม Excel ในการคำนวณปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการ 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 CO<sub>2</sub> 2 bar 14 hr DI 20 ml

จากข้อมูล CO<sub>2</sub> Analyzer

ตารางที่ 6 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จาก CO<sub>2</sub> Analyzer

Time 0.016667 – 1.65 min (Overall)	
Flow rate gas	5 L/min
Initial sorbent loading	5 g
Time 0.016667-0.033333 min	
%CO <sub>2,t</sub> =0.016667	0.02659
%CO <sub>2,t</sub> =0.033333	0.02659
%CO <sub>2,final</sub>	12
Temperature	60 °C

$$\text{Volume CO}_2 \text{ out} = (5 \times 0.02659) / 100 = 0.001330 \text{ L/min}$$

$$\text{Volume CO}_2 \text{ add} = (12 \times 5 / 100) - (5 \times 0.02659 / 100) = 0.5987 \text{ L/min}$$

$$\text{Mass CO}_2 \text{ add} = (44 \times 0.5987) / (0.082 \times (273 + 60)) = 0.9647 \text{ g}$$

$$\text{Strip area} = 0.9647 \times (0.033333 - 0.016667) = 0.01607 \text{ g}\cdot\text{s}$$

เมื่อคิดผลรวมของ Strip area จะได้ว่า Total Area = 0.2805 g·s

$$\text{Capacity} = (0.2805 \times 1000) / 5 = \mathbf{56.1000 \text{ mg CO}_2 / 1 \text{ g sorbent}}$$