

การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์บนมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน

นายภูวเดช พรอรุณธรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR) ปีการศึกษา 2556

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตที่ส่งมาที่ศูนย์วิทยานิพนธ์ ที่ส่งมาทางบัณฑิตวิทยาลัย  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

CARBON DIOXIDE CAPTURE ON AMINE MODIFIED MONTMORILLONITE

Mr. Phuwadej Pornaroontham

The logo of Chulalongkorn University, featuring a central emblem with a sunburst and a tiered structure, set against a light background.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์บนมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน
โดย	นายภูวเดช พรอรุณธรรม
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐยานัน พงศ์สถาปตี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกี้ยวลี พุกษาทร)  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐยานัน พงศ์สถาปตี)  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย)  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย)  
.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร. ศิริพงษ์ โรจน์ลือชัย)

ภูวเดช พรอรุณธรรม : การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์บนมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน. (CARBON DIOXIDE CAPTURE ON AMINE MODIFIED MONTMORILLONITE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ญัฐยานัน พงศ์สถาปติ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ. ดร. อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย, 78 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นดัดแปรด้วยเอมีน(MSM)เพื่อจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการดูดซับ ณ ภาวะความดันบรรยากาศ ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส การปรับปรุงพื้นผิวมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารละลายเบสช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวตัวดูดซับ การโหลดเอมีนบนตัวดูดซับทำโดยใช้โมโนเอทาโนลามีนเพื่อเพิ่มหมู่เข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีปริมาณเอมีนที่โหลดบนตัวดูดซับMSM ที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก การเพิ่มปริมาณเอมีนที่มากกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนักทำให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากการกีดขวางของเอมีนที่มากเกินไปต่อการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวดูดซับMSMที่มีปริมาณโหลดของเอมีนที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (MSM\_30) สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมที่ระดับร้อยละ 10-100 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม มีความสามารถในการดูดซับสูงสุดที่ 240 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิดำเนินการ 30 องศาเซลเซียส ใช้คาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ ที่อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่ออัตราการไหลของแก๊สเข้าที่ 1.8 กรัม·วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การเพิ่มไอน้ำในแก๊สผสมเข้าช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาการสร้างไบคาร์บอเนต พฤติกรรมการดูดซับสามารถอธิบายจากแบบจำลองจลนศาสตร์อาฟรามิ(Avrami's equation) อธิบายถึงการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 เป็นแบบการดูดซับที่มีความซับซ้อน คือเกิดการดูดซับทางกายภาพพร้อมกับการดูดซับทางเคมี ข้อมูลจากการทดลองเข้ากันได้กับแบบจำลองไอโซเทิร์มทอท(Toth isotherm) โดยการดูดซับเกิดขึ้นบนความไม่เป็นเนื้อเดียวกันบนพื้นผิวตัวดูดซับ อันเนื่องมาจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสองหมู่ฟังก์ชัน จากการศึกษาอุณหพลศาสตร์พบว่า การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 สามารถเกิดขึ้นเองได้ เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนและเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

# # 5472071123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CARBON DIOXIDE / CAPTURE / ADSORPTION / AMINE / ADSORBENT /  
MONTMORILLONITE

PHUWADEJ PORNAROONTHAM: CARBON DIOXIDE CAPTURE ON AMINE  
MODIFIED MONTMORILLONITE. ADVISOR: ASSOC. PROF. NUTTAYA  
PONGSTABODEE, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. APANEE  
LUENGNARUEMITCHAI, Ph.D., 78 pp.

The investigation on amine modified montemorillonite with surface modification (MSM) is reported in this study. Carbon dioxide(CO<sub>2</sub>) capture was simulated via adsorption under atmospheric pressure at the range operating temperature of 30 to 70 degree Celcius. Surface modification with basic solution enhanced the CO<sub>2</sub> adsorption capacity by creation of hydroxyl groups on surface. Impregnation with monoethanolamine(MEA) on adsorbent's surface increased alkalinity which promoted adsorption capacity. The best loading amine percentage was obtained at 30 %by weight (denoted as MSM\_30). Further increasing amine loading percentage reduced the capacity due to the blockage of excess amine. The MSM\_30 performed the adsorption capacity in a wide range of initial CO<sub>2</sub> concentration of 10 to 100 volume%. The maximum capacity was obtained about 242 mg/g at the operating temperature of 30 degree Celcius, initial CO<sub>2</sub> concentration of 100 volume% with W/F ratio at 1.8 gscm<sup>-3</sup>. Addition of water in feedstream also enhanced the capacity via bicarbonate formation. Kinetic studies were also presented. Avrami's equation exhibited to be the best-fit model of this capture system, indicating that this process depends on physisorption and chemisorption. The experimental data fitted by Toth isotherm were used to explain the heterogeneous surface of sorbent because of bifunctional group modifications. Thermodynamic studies suggested that the CO<sub>2</sub> adsorption on MSM\_30 was spontaneous, favored at low temperature.

Department: Chemical Technology

Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Technology

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีโอกาสสำเร็จลุล่วงได้ดีหากมิได้รับคำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.อาภาณี เหลืองนฤมิตชัย ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณที่คอยให้คำปรึกษาด้านการใช้โปรแกรม อีกทั้งคณาจารย์ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย นิสิตรุ่นพี่รุ่นน้อง และบุคคลากรจากภาควิชาที่คอยให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น รวมถึงอำนวยความสะดวกต่างๆในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย และ ดร.ศิริพงษ์ โนจร์ลือชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำและทำให้วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ “ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย” กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ที่เป็นผู้สนับสนุนทุนการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	1
สารบัญรูป.....	ข
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	4
1.3.2 เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับ.....	4
1.4 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	5
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	5
1.7 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	6
บทที่ 2 เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 เทคโนโลยีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	7
2.1.1 การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม.....	9
2.1.1.1 การดูดซึมทางกายภาพ.....	9
2.1.1.2 การดูดซึมทางเคมี – เทคโนโลยีการดูดซึมด้วยเอมีน.....	9
2.1.2 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซับบนตัวดูดซับของแข็ง.....	11
2.1.2.1 ตัวดูดซับทางกายภาพ.....	12
2.1.2.2 ตัวดูดซับทางเคมี.....	14
2.2 รูปแบบการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งเอมีนดัดแปร.....	15
2.2.1 การตรึงเอมีนลงบนพื้นผิวตัวดูดซับ.....	15

2.2.2 การสังเคราะห์ .....	15
2.2.3 พอลิเมอร์เซชัน .....	16
2.3 ปฏิิกิริยาการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่มีหมู่เอมีน .....	18
2.3.1 ภาวะที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา .....	18
2.3.2 ภาวะที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา .....	18
2.4 กระบวนการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ .....	20
2.4.1 กระบวนการสลับเปลี่ยนความดัน .....	20
2.4.2 กระบวนการสลับเปลี่ยนอุณหภูมิ .....	20
2.4.3 กระบวนการสลับเปลี่ยนสุญญากาศ .....	20
2.4.4 กระบวนการสลับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า .....	21
2.4.5 กระบวนการแบบลูกผสม .....	21
2.5 มอนต์มอริลโลไนต์ .....	22
2.6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ .....	23
2.6.1 แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม .....	23
2.6.2 แบบจำลองอันดับสองเทียม .....	23
2.6.3 แบบจำลองอาฟรามี .....	24
2.7 ไอโซเทิร์มการดูดซับ .....	25
2.7.1 แบบจำลองไอโซเทิร์มแลงเมียร์ .....	25
2.7.2 แบบจำลองไอโซเทิร์มฟรุนดลิช .....	25
2.7.3 แบบจำลองไอโซเทิร์มทอท .....	26
2.8 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	29
3.1 สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ .....	29
3.1.1 สารเคมี .....	29
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ .....	29
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	30
3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน .....	30



3.2.1.1	ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน .....	30
3.2.1.2	ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีน .....	30
3.2.2	การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ .....	30
3.2.2.1	การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับ .....	30
3.2.2.2	การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ .....	30
3.2.2.3	การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ .....	31
3.2.2.4	การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ .....	31
3.2.2.5	การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับ .....	31
3.2.3	การทดสอบความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ .....	31
3.3	ตัวแปรที่ทำการศึกษา .....	32
3.3.1	ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ .....	32
3.3.2	ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ .....	32
3.3.3	อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ .....	33
3.3.4	อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า .....	33
3.3.5	ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า .....	34
3.3.6	ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า .....	34
3.4	การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับ .....	35
3.4.1	จลนพลศาสตร์การดูดซับ .....	35
3.4.2	ไอโซเทิร์มการดูดซับ .....	37
3.4.3	อุณหพลศาสตร์การดูดซับ .....	38
บทที่ 4	ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล .....	39
4.1	การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับสังเคราะห์ .....	39
4.1.1	การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับ .....	39
4.1.2	การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ .....	40
4.1.3	การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ .....	42
4.1.4	การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ .....	44
4.1.5	การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับ .....	45

4.2 การศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	47
4.2.1 ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ .....	47
4.2.2 ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิว .....	49
4.2.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ .....	50
4.2.4 อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า .....	51
4.2.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า.....	53
4.2.6 ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า.....	54
4.3 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับ .....	58
4.3.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ.....	58
4.3.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับ .....	62
4.3.3 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ.....	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	66
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
รายการอ้างอิง .....	68
ภาคผนวก.....	74
ก. การคำนวณความจุการดูดซับ.....	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	78

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ใช้ในการศึกษา .....	35
ตารางที่ 3.2 แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับที่ใช้ในการศึกษา .....	37
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของรพูนบนตัวดูดซับสังเคราะห์.....	42
ตารางที่ 4.2 ร้อยละองค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจนของตัวดูดซับสังเคราะห์ ...	46
ตารางที่ 4.3 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM_30 ในช่วง อุณหภูมิการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส .....	59
ตารางที่ 4.4 แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM_30 ในช่วง อุณหภูมิการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส .....	63
ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ที่อุณหภูมิการดูดซับต่างกัน .....	64

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1880-2012.....	1
รูปที่ 1.2 การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก .....	2
รูปที่ 1.3 การปล่อยแก๊สเรือนกระจกชนิดต่างๆจากการกระทำของมนุษย์ .....	2
รูปที่ 1.4 ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ .....	3
รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึมทางเคมี และการดูดซับบนตัวดูดซับ ของแข็ง.....	8
รูปที่ 2.2 ระบบการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย.....	10
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	12
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างโครงสร้างของซีโอไลต์.....	13
รูปที่ 2.5 โครงสร้างเมโซพอร์สซิลิกา .....	13
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างโครงสร้างของตัวดูดซับโครงสร้างเชิงโลหะอินทรีย์.....	14
รูปที่ 2.7 วิธีเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ชนิดของแข็งเอมีนดัดแปรในรูปแบบต่างๆ .....	15
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเอมีนที่นิยมใช้เพื่อการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์.....	17
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนในภาวะที่ไม่มีน้ำ .....	18
รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนตติยภูมิ ในภาวะที่มีน้ำ ..	19
รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิ ในภาวะที่มีน้ำ .....	19
รูปที่ 2.12 ไอโซเทิร์มการดูดซับช่วงสุญญากาศและความดันสูง.....	21
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ .....	22
รูปที่ 4.1 เสถียรภาพทางความร้อนบนตัวดูดซับสังเคราะห์.....	40
รูปที่ 4.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับและคายไนโตรเจนของตัวดูดซับ .....	41
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของตัวดูดซับ.....	43
รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับ.....	44
รูปที่ 4.5 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วย สารละลายเบส .....	47
รูปที่ 4.6 การเกิดปฏิกิริยาการสร้างไบคาร์บอเนตบนพื้นผิวไฮดรอกซิล .....	48
รูปที่ 4.7 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิว(MSM)ที่มีการ ตรึงเอมีนปริมาณ 0 25 30 35 และ 40 โดยน้ำหนักตามลำดับ .....	49

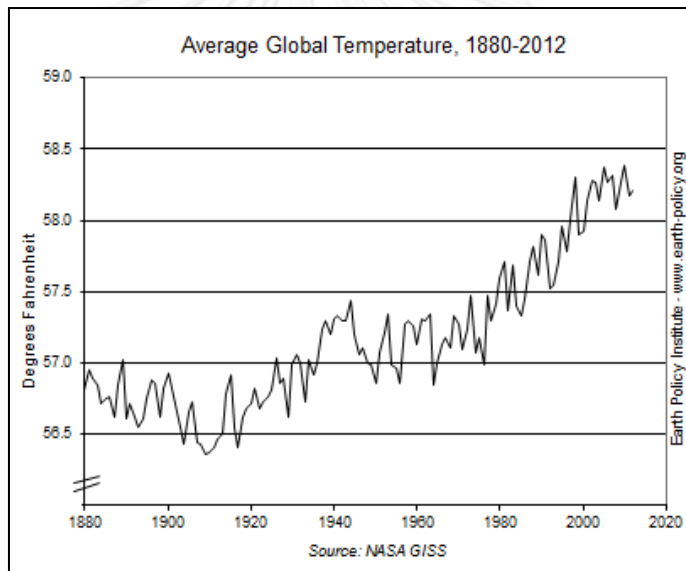
รูปที่ 4.8 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ บนตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวที่ตรง เอมีนที่ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก(MSM_30) ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส .....	50
รูปที่ 4.9 เส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของตัวดูดซับ MSM_30 ในช่วงอัตราส่วน ระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า(W/F) ตั้งแต่ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร <sup>-3</sup> ถึง 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร <sup>-3</sup> .....	51
รูปที่ 4.10 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM_30 ในช่วงอัตราส่วนระหว่าง ปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 ถึง 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร <sup>-3</sup> .....	53
รูปที่ 4.11 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM_30 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของ คาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10 โดยปริมาตรถึงร้อยละ 100 โดย ปริมาตรดูลในฮีเลียม .....	54
รูปที่ 4.12 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM_30 ในภาวะไม่มีไอน้ำในแก๊ส ผสมขาเข้า และภาวะมีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าความเข้มข้น ร้อยละ 5 โดยปริมาตร ในช่วงอุณหภูมิ การดูดซับตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียส .....	55
รูปที่ 4.13 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM_30 ในภาวะมีไอน้ำในแก๊สผสม ขาเข้าความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยปริมาตร ถึงร้อยละ 20 โดยปริมาตร ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียส.....	56
รูปที่ 4.14 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM_30 ที่ได้จากการทดลอง ณ เวลา ใดๆ (q <sub>t</sub> ) เทียบค่าจากแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศา เซลเซียส.....	61
รูปที่ 4.15 การพล็อตกราฟด้วยสมการของแวนท์ฮอฟ (Van't Hoff equation).....	64

# บทที่ 1

## บทนำ

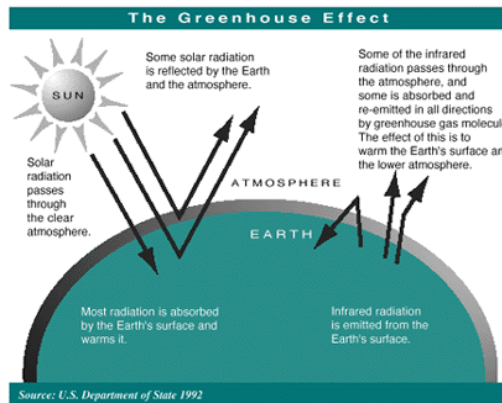
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้อมูลจากสถาบันศึกษาอวกาศกอดดาร์ด องค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (GISS, NASA)[1] แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในระยะเวลา 132 ปีที่ผ่านมาดังแสดงในรูป 1.1 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลกที่เรียกว่า ภาวะโลกร้อน ก่อให้เกิดปรากฏการณ์มากมาย อาทิ การละลายตัวของภูเขาน้ำแข็งขั้วโลก ระดับน้ำทะเลเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น การเกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติที่มีความถี่มากขึ้น และฤดูกาลไม่ตรงตามกาลเวลา เป็นต้น



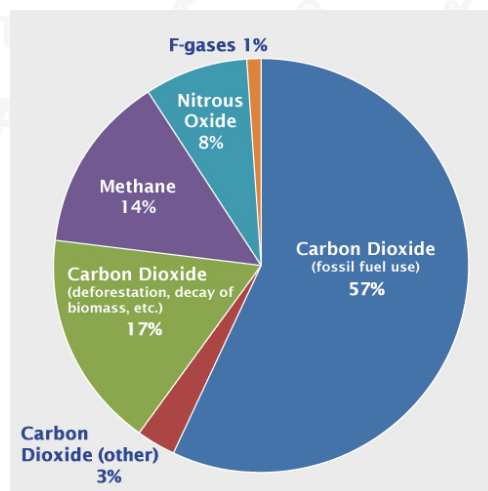
รูปที่ 1.1 อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกตั้งแต่ปี ค.ศ. 1880-2012[1]

ภาวะโลกร้อนมีสาเหตุหลักมาจากปรากฏการณ์เรือนกระจกดังรูปที่ 1.2 โดยแก๊สเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากกิจกรรมของมนุษย์จะสะสมในชั้นบรรยากาศโลก มีคุณสมบัติกักเก็บความร้อน โดยปกติความร้อนที่ส่งผ่านมายังพื้นโลกบางส่วนถูกสะท้อนกลับไปที่พื้น แต่แก๊สเรือนกระจกขัดขวางการส่งผ่านความร้อนออกสู่ชั้นบรรยากาศ ทำให้ความร้อนสะสมอยู่ในอันเป็นสาเหตุทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น

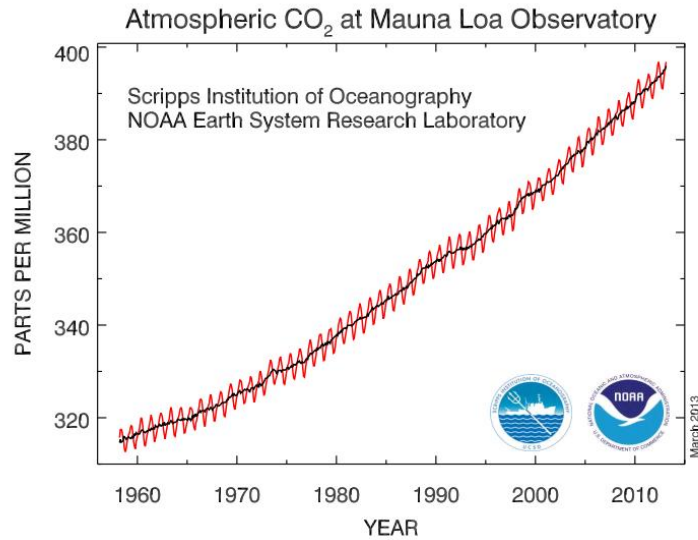


รูปที่ 1.2 การเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก[2]

แก๊สเรือนกระจกประกอบไปด้วยแก๊สหลายชนิดมีทั้งเกิดจากธรรมชาติ และจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และคลอโรฟลูโอโรคาร์บอน แก๊สเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุหลักของภาวะโลกร้อนในปัจจุบันคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีปริมาณการปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศสูงที่สุดมากถึงร้อยละ 77 เมื่อเทียบกับแก๊สเรือนกระจกชนิดอื่นดังแสดงในรูปที่ 1.3 (IPCC, 2007)[3] แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยมากมาจากกิจกรรมของมนุษย์ที่ต้องใช้พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ข้อมูลจากสำนักงานบริหารภาคพื้นทะเลและบรรยากาศแห่งสหรัฐอเมริกา (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA)[4] แสดงให้เห็นถึงระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นจากระดับ 318 ส่วนในล้านส่วนในปี 1960 ถึงระดับ 394 ส่วนในล้านส่วนเมื่อปี 2012 คิดเป็นร้อยละ 24 ดังรูปที่ 1.4 ดังนั้นการควบคุมปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้วิธีการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศจึงมีความสำคัญ เพื่อลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกสู่บรรยากาศ



รูปที่ 1.3 การปล่อยแก๊สเรือนกระจกชนิดต่างๆจากการกระทำของมนุษย์[3]



รูปที่ 1.4 ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ[4]

การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เยื่อเลือกผ่าน[5] การดูดซึมโดยใช้สารละลาย[6] และการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับชนิดของแข็ง[7] ในเชิงพาณิชย์ใช้วิธีการดูดซึมด้วยสารละลายเอมีน เช่น เอทานอลามีน ซึ่งมีข้อดีคือ ง่ายต่อการดำเนินการ ใช้ทุนการร่้างต่ำ แต่ข้อเสียก็มีมากเช่นกันคือ เครื่องมือสามารถถูกสารละลายกัดกร่อนได้ สารละลายเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตหากเกิดการรั่วไหล สารละลายมีการเสื่อมสภาพได้ต้องมีการเปลี่ยนใหม่ ซึ่งในการทำสารละลายต้องใช้ปริมาณน้ำมหาศาล และการนำตัวดูดซึมกลับมาใช้ใหม่ต้องใช้พลังงานสูงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดของแข็ง[8] ตัวดูดซับชนิดของแข็งมีคุณสมบัติที่ดีคือ ตัวดูดซับชนิดของแข็งมีความคงทน ไม่มีการรั่วไหลของเอมีน สามารถจัดเก็บตัวดูดซับได้ง่าย และที่สำคัญการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่สามารถทำได้โดยใช้การสลับอุณหภูมิหรือความดัน[9, 10] ตัวดูดซับของแข็งมีหลายประเภท ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ ตัวดูดซับทางกายภาพ และตัวดูดซับทางเคมี ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวดูดซับเอมีน ซึ่งจัดอยู่ในประเภทตัวดูดซับทางเคมีโดยประกอบด้วยตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูงและสารที่มีหมู่เอมีน โดยการตรึงหรือดัดแปรลงบนพื้นผิวของตัวรองรับ ตัวดูดซับประเภทนี้มีข้อดีคือ สามารถทำการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ที่อุณหภูมิต่ำและมีความจุการดูดซับสูง ที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาชนิดของเอมีน ปริมาณเอมีนที่อยู่บนตัวดูดซับ[11-16] และตัวรองรับประเภทคาร์บอนรูพรุน[17] ซีโอไลต์[18] พอลิเมอร์ เช่น พอลิเมทิลเมทาคริเลท, พอลิสไตรีน[19] และตัวรองรับประเภทที่มีซิลิกาเป็นส่วนประกอบ[20-22]

เทคโนโลยีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักคือ การดูดซับแบบสลับเปลี่ยนความดัน (Pressure swing adsorption : PSA) และการดูดซับแบบสลับเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption : TSA) โดย PSA เป็นการดูดซับและคายที่ความดันต่างกัน ภายใต้ภาวะอุณหภูมิคงที่ ส่วน TSA เป็นการดูดซับและคายที่อุณหภูมิต่างกันภายใต้ภาวะความดัน



คงที่ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ TSA เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถทำได้โดยง่าย และ ประหยัดการใช้พลังงานมากกว่าPSA

ทางคณะผู้วิจัยมีแนวคิดในการสังเคราะห์ตัวดูดซับที่สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการตรึงเอมีนลงบนพื้นผิวตัวรองรับที่มีความพรุน สามารถดูดซับได้ที่มีความดันบรรยากาศ ทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่อความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ครั้งนี้คือ อุณหภูมิที่ใช้ดำเนินการ อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สผสม ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า และปริมาณของเอมีนที่ตรึงลงบนผิวของตัวดูดซับ

ตัวรองรับที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้คือ มอนต์มอริลโลไนต์ จัดอยู่ในประเภทดิน (clay) มีราคาถูก หาได้ง่ายในประเทศไทย มีพื้นที่ผิวมาก สามารถในการกักเก็บความชื้นได้ดี และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงก่อให้เกิดสมมติฐานที่ว่า มอนต์มอริลโลไนต์ที่ถูกดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยการตรึงเอมีน จะสามารถใช้เป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความดันบรรยากาศ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาความสามารถการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

### 1.3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

- |  |   |
|--|---|
| • อุณหภูมิการดูดซับ  | 30 – 70 องศาเซลเซียส                          |
| • อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า | 1.8 – 5.4 กรัม.วินาที.เซนติเมตร <sup>-3</sup> |
| • ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า    | ร้อยละ 10 – 100 โดยปริมาตร                    |
| • ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า                       | ร้อยละ 0 – 20 โดยปริมาตร                      |
| • ปริมาณของเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ                         | ร้อยละ 0 – 40 โดยน้ำหนัก                      |

### 1.3.2 เทคนิคที่ใช้ในการศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับ

- Thermogravimetric analysis (TGA)  
ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับสังเคราะห์

- Brunauer Emmett. Teller surface area (BET)  
ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับสังเคราะห์
- Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)  
ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับสังเคราะห์
- X-ray diffraction (XRD)  
ศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับสังเคราะห์
- CHN elemental analysis (CHN)  
ศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับสังเคราะห์

#### 1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

ระบบจำลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการที่ภาวะความดันบรรยากาศ

#### 1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

การดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ เอมีน มอนต์มอริลโลไนต์ ตัวดูดซับชนิดของแข็ง

#### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้ตัวดูดซับเอมีนดัดแปรที่มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิต่ำ

#### 1.7 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาหาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
2. ศึกษาเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ออกแบบและวางแผนการทดลอง
3. สังเคราะห์ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน และทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อหาช่วงของอัตราการไหลของแก๊สผสมและช่วงอุณหภูมิที่ใช้ดำเนินการ
4. ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลจากตัวแปร
5. ศึกษาลักษณะสมบัติของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคต่างๆ
6. ประมวล วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง
7. เขียนวิทยานิพนธ์

## 1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

- บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ข้อจำกัดของการวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย
- บทที่ 2 ทฤษฎีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็ง แร่ มอนต์มอริลโลไนต์ วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 ระบบจำลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ วิธีเตรียมตัวดูดซับสังเคราะห์ ภาวะที่ใช้ในการทดลอง
- บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่างๆต่อความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับสังเคราะห์ พร้อมทั้งคุณลักษณะของตัวดูดซับที่สังเคราะห์
- บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

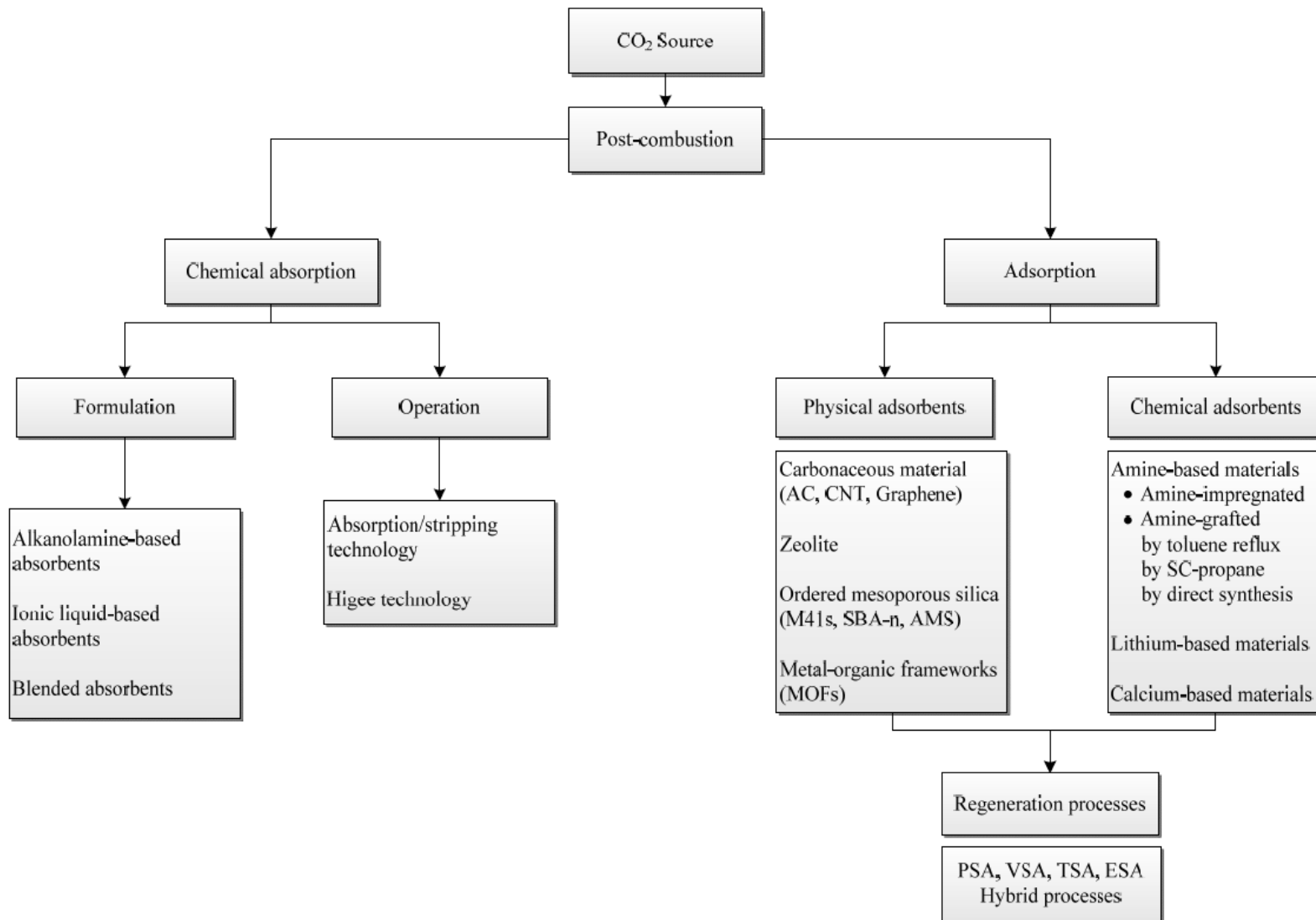
### เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เทคโนโลยีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ปัญหาภาวะโลกร้อนซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกกำลังได้รับความสนใจเป็นวงกว้าง โดยการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็นร้อยละ 60 ของแก๊สเรือนกระจกทั้งหมด ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศปัจจุบันมีค่าเกือบ 400 ส่วนในล้านส่วนซึ่งสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงก่อนยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมที่มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพียง 300 ส่วนในล้านส่วน เพื่อเป็นการบรรเทาผลที่เกิดจากภาวะโลกร้อน ในพิธีสารเกียวโตจึงมีการกระตุ้นให้ชาติอุตสาหกรรม 37 ประเทศและสหภาพยุโรปลดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกให้ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 5.2 เมื่อเทียบกับการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกในปีค.ศ. 1990 ภายในช่วงปี ค.ศ. 2008 – 2012 ในข้อตกลงโคเปนเฮเกนก็ได้มีการเรียกร้องให้มีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิให้มีค่าไม่เกิน 2 องศาเซลเซียสในปีค.ศ. 2100 เมื่อเทียบกับช่วงก่อนยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม องค์การพลังงานระหว่างประเทศ (IEA) ก็ยังบ่งชี้ว่าการจะบรรลุเป้าหมายดังกล่าว เทคโนโลยีการดูดซับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสิ่งจำเป็น และการสนับสนุนในด้านดังกล่าวจะสูงขึ้นถึงร้อยละ 19 ในปี ค.ศ. 2050 ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีการจับยึดและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการลดระดับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่หลายวิธี ทั้งการดูดซึมทางกายภาพ การดูดซึมทางเคมี การดูดซับบนตัวดูดซับของแข็ง และการใช้เยื่อเลือกผ่าน โดยยกตัวอย่างแหล่งที่มาของคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหลังการเผาไหม้(Post-combustion) ของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากมีอัตราการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สูง

ในบรรดาเทคโนโลยีเหล่านี้ การดูดซึมทางเคมีโดยใช้สารละลายแอลคาโนลามีนเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับว่ามีความเหมาะสมและสามารถประยุกต์ใช้ได้มากที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายแอลคาโนลามีนก็ยังมีข้อเสียบางประการ เช่น มีอัตราการกัดกร่อนอุปกรณ์สูง จำเป็นต้องใช้พลังงานมากในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึม และจำเป็นต้องใช้หอดูดซึมขนาดใหญ่ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการเสนอกระบวนการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง เพื่อหาวิธีในการก้าวข้ามข้อจำกัดของการดูดซึมทางเคมี การทำให้ตัวดูดซับอิมตัวและเพิ่มหมู่ฟังก์ชันด้วยเอมีนเป็นวิธีการหนึ่งซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ และช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของน้ำที่ 2.1 แสดงกระบวนการในการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึมและดูดซับ รวมถึงวิธีการนำกลับมาใช้ใหม่(Regeneration Process) บนตัวดูดซับชนิดของแข็ง[23, 24]



รูปที่ 2.1 เทคโนโลยีการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึมทางเคมี และการดูดซับบนตัวดูดซับของแข็ง[24]

## 2.1.1 การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม

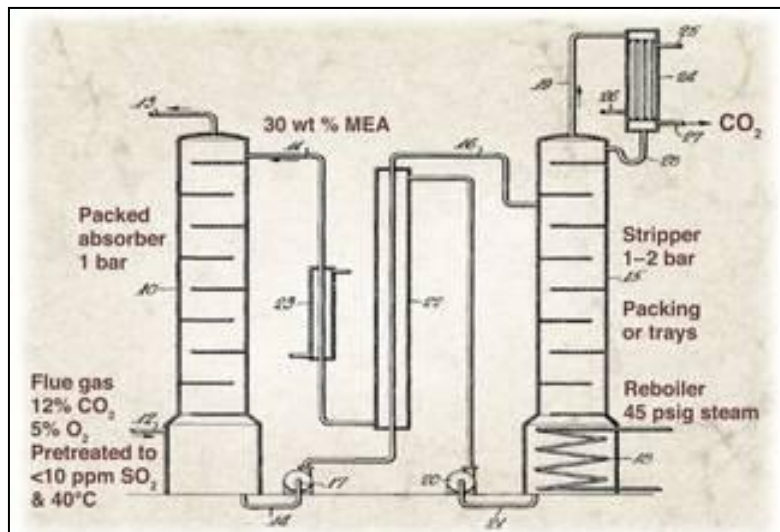
### 2.1.1.1 การดูดซึมทางกายภาพ

การดำเนินการสำหรับการดูดซึมทางกายภาพจะเป็นไปตามกฎของเฮนรี (Henry's Law) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึมภายใต้ภาวะความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ ในขณะที่การคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดขึ้นเมื่อลดความดันและเพิ่มอุณหภูมิ เทคโนโลยีนี้มีการใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายทั้งในกระบวนการผลิตแก๊สธรรมชาติ แก๊สสังเคราะห์ และแก๊สไฮโดรเจน ปัจจุบันมีกระบวนการเชิงการค้าหลายกระบวนการเช่น กระบวนการเซลโซล (Selexol Process) กระบวนการเรกติซอล (Rectisol Process) และกระบวนการพิริซอล (Purisol Process) เป็นต้น ตัวดูดซึมที่ใช้ ได้แก่ ไดเมทิลอีเทอร์ (dimethyl ether) หรือ พรอพิลีนไกลคอล (propylene glycol) สำหรับกระบวนการเซลโซล สารละลายเมทานอลสำหรับกระบวนการเรกติซอล และเมทิลไพโรลิโดน (N-methylpyrrolidone) สำหรับกระบวนการพิริซอล เป็นต้น กระบวนการเซลโซลสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดทั้งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่อุณหภูมิต่ำได้ และสามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึมได้โดยการลดความดัน ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ มีความดันไอต่ำ ความเป็นพิษน้อย และสารละลายที่ใช้มีฤทธิ์กัดกร่อนต่ำ กระบวนการเรกติซอลเหมาะสำหรับการจัดการไอเสียที่มีกำมะถันอยู่ มีข้อดีคือตัวดูดซึมที่ใช้มีฤทธิ์กัดกร่อนต่ำและมีความเสถียรสูง ส่วนข้อดีของกระบวนการพิริซอลคือใช้พลังงานน้อย

### 2.1.1.2 การดูดซึมทางเคมี – เทคโนโลยีการดูดซึมด้วยเอมีน

กระบวนการดูดซึมทางเคมีโดยทั่วไปประกอบด้วยหน่วยดูดซึม(adsorber) และหน่วยปลดเปลื้อง(stripper) หรือเรียกรวมกันว่า สครับเบอร์(Scrubber) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นส่วนที่ตัวดูดซึมเกิดการฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อน ในกระบวนการดูดซึมทางเคมี แก๊สทั้งที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบจะถูกป้อนเข้าสู่หน่วยดูดซึมแบบเบตนิ่งทางด้านล่าง และสัมผัสกับตัวดูดซึมแบบสวนทางกัน หลังเกิดการดูดซึม ตัวดูดซึมที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงจะไหลเข้าสู่หน่วยปลดเปลื้องเพื่อฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อน หลังจากการฟื้นฟูสภาพ ตัวดูดซึมที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำจะถูกนำกลับเข้าสู่หน่วยดูดซึมเพื่อนำไปใช้งานอีกครั้งหนึ่ง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ที่ถูกปลดปล่อยจากหน่วยปลดเปลื้องจะถูกบีบอัดอีกครั้งเพื่อใช้ในการขนส่งและกักเก็บ ความดันที่ใช้ดำเนินการจะอยู่ที่ประมาณ 1 บาร์ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในหน่วยดูดซึมและหน่วยปลดเปลื้องจะอยู่ในช่วง 40 -60 และ 120 - 140 องศาเซลเซียสตามลำดับ พลังงานต่ำสุดที่จำเป็นต้องใช้ในการนำกลับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สทิ้ง รวมถึงการบีบอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีความดัน 150 บาร์ตามทฤษฎี คือ 0.396 กิกะจูลต่อตันของคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วจำเป็นต้องใช้พลังงานสูงถึง 0.72 กิกะจูลต่อตันของคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออ้างอิงตามกระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกาแล้ว เป้าหมายของการพัฒนาเทคโนโลยีการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นถึงร้อยละ 90 โดยค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นกว่าร้อยละ 35 จึงจะสามารถนำไปใช้สำหรับกระบวนการเผาไหม้ได้ ดังนั้นจึงมี

ความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาประสิทธิภาพของตัวดูดซึม วิธีการดำเนินงาน และการฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อน



รูปที่ 2.2 ระบบการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย[25]

ข้อดีของเทคโนโลยีการดูดซึมทางเคมี คือ เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนามากที่สุดในปัจจุบัน และมีการใช้ในเชิงการค้ามาเป็นเวลานานถึงแม้จะไม่ได้ใช้สำหรับโรงผลิตไฟฟ้าก็ตาม ข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือ มีความเหมาะสมในการนำไปปรับใช้ในโรงผลิตไฟฟ้าเดิมได้ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีนี้ก็มีข้อเสียหลายประการ ได้แก่

1. ตัวดูดซึมมีความสามารถในการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ
2. มีอัตราการกัดกร่อนอุปกรณ์สูง
3. การเสื่อมสภาพของเอมีนเนื่องจากซัลเฟอร์ออกไซด์ ไนโตรเจนออกไซด์ และออกซิเจนในแก๊สทิ้ง
4. ใช้พลังงานในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึมสูง
5. อุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดใหญ่ ต้องการพื้นที่มาก

แอลคาโนลามีนเป็นตัวดูดซึมที่มีการใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ โครงสร้างของแอลคาโนลามีนทั้งแบบปฐมภูมิทุติยภูมิ และตติยภูมิต้องประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกไซด์อย่างน้อย 1 หมู่และหมู่เอมีน เช่น โมโนเอทาโนลามีน (monoethanolamine, MEA) ไดเอทาโนลามีน (diethanolamine, DEA) และเมทิลไดเอทาโนลามีน (N-methyldiethanolamine, MDEA) ความว่องไวของเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์เรียงตามชนิดของหมู่เอมีน คือ ปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และตติยภูมิ สอดคล้องกับค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาของ MEA DEA และ MDEA ที่ 25 องศาเซลเซียส คือ 7,000 1,200 และ 3.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาทีต่อ

กิโลโมลตามลำดับ ในทางกลับกันหมู่เอมีนแบบตติยภูมิมีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลของเอมีนสูงกว่าหมู่เอมีนแบบปฐมภูมิ และทุติยภูมิซึ่งมีความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วง 0.5-1 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลของเอมีน

เนื่องจากคุณสมบัติและข้อดีที่หลากหลายของหมู่เอมีน สารประกอบเอมีน จึงได้รับการเสนอให้เป็นทางเลือกสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึมอีกด้วย นอกจากการใช้หมู่เอมีนแบบปฐมภูมิ ทุติยภูมิ และตติยภูมิแล้ว ก็ยังมีการเสนอให้ใช้หมู่เอมีนขนาดใหญ่ เช่น 2-อะมิโน-2-เมทิล-1-พโรพานอล (2-amino-2-methyl-1-propanol, AMP) เนื่องจากการกีดขวางจากขนาดของหมู่เอมีน (Steric hindrance) จะช่วยลดเสถียรภาพของคาร์บาเมตที่เกิดขึ้น ทำให้คาร์บาเมตสามารถย่อยสลายด้วยน้ำเกิดเป็นไบคาร์บอเนตได้ ในขณะที่เดียวกันยังปลดปล่อยโมเลกุลเอมีนอิสระช่วยให้เกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างต่อเนื่อง และเพิ่มความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ที่สมดุลเป็น 1.0 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลของเอมีนเทียบเท่ากับหมู่เอมีนแบบตติยภูมิ ไพเพอราซีน (Piperazine, PZ) เป็นไดเอมีนแบบวงซึ่งใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากความสามารถในการเกิดเป็นคาร์บาเมตได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังพบว่าไพเพอราซีนมีความสามารถในการต้านทานการเสื่อมสภาพเนื่องจากออกซิเจนและการเสื่อมสภาพเชิงความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 150 องศาเซลเซียสได้ อย่างไรก็ตามไพเพอราซีนมีความสามารถในการละลายในน้ำจำกัด คือ สามารถละลายในน้ำได้เพียงร้อยละ 14 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ทำให้การจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลายไพเพอราซีนที่มีความเข้มข้นสูงต้องดำเนินการที่อุณหภูมิสูง

การเสื่อมสภาพของแอลคาโนลามีนเป็นประเด็นสำคัญสำหรับกระบวนการดูดซึมทางเคมีเนื่องจากส่งผลต่อความคุ้มค่า การดำเนินการ และปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยตรง สำหรับตัวดูดซึมที่มีการใช้ทั่วไป เช่น MEA เมื่อเกิดการเสื่อมสภาพจำเป็นต้องมีการเปลี่ยน MEA ถึง 2.2 กิโลกรัมสำหรับการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ 1 ตัน หรือกล่าวคือประมาณร้อยละ 70-80 ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดเพื่อการดำเนินการ เป็นส่วนของการนำตัวดูดซึมกลับมาใช้ใหม่ แต่มีงานวิจัยออกมาเพื่อแก้ไขจุดเสียนี้คือการใช้ระบบสลับเปลี่ยนความเป็นกรดเบส (pH swing) โดยหลักการคือเพิ่มความเข้มข้นกรดในสารละลายก่อนเข้าสู่กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยทำให้สามารถเกิดการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำลง ดังนั้นค่าใช้จ่ายโดยรวมจึงลดลง อีกทั้งการเติมกรดอ่อน (กรดซูเบอร์ริก กรดพาทาลิก และกรดออกซาลิก) ทำให้ใช้เวลาในการคายคาร์บอนไดออกไซด์เร็วขึ้นและคายออกมาในปริมาณที่มากขึ้นด้วย[26]

### 2.1.2 การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซับบนตัวดูดซับของแข็ง

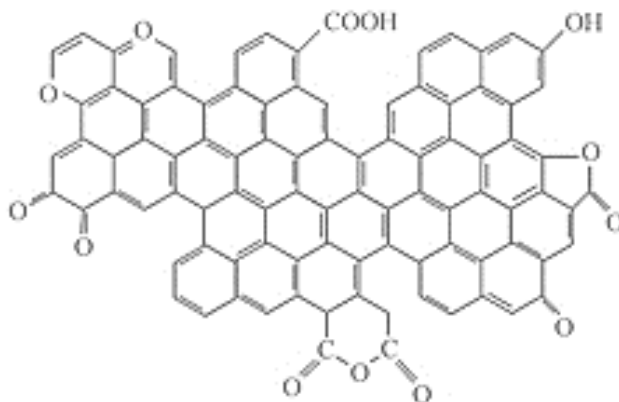
จากปัญหาที่กล่าวไว้ข้างต้น เทคโนโลยีการดูดซึมยังคงมีข้อเสียอยู่อาทิเช่น ความจุการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ เนื่องจากพื้นผิวสัมผัสระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สและเอมีนซึ่งเป็นของเหลว มีพื้นที่สัมผัสต่ำ อีกทั้งปัญหาการกัดกร่อน และการนำกลับมาใช้ใหม่ การดูดซับบนตัวดูดซับของแข็งจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อเสียจากในกระบวนการดูดซึม โดยคุณสมบัติของตัวดูด



ซับที่ควรมีคือ (1)ราคาถูก (2)มีค่ากักเก็บความร้อนต่ำ(low heat capacity) (3)การดูดซับเกิดขึ้นได้เร็ว (4)ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูง (5)เลือกจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี และ (6)มีเสถียรภาพทางความร้อนเหมาะกับการนำไปใช้ในวัฏจักรหมุนเวียน โดยชนิดของตัวดูดซับนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักด้วยกันคือ (1)ตัวดูดซับทางกายภาพ และ (2)ตัวดูดซับทางเคมี

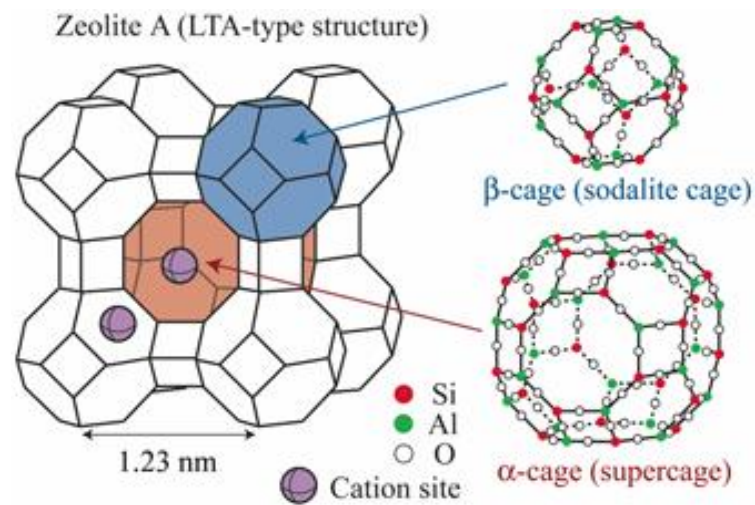
### 2.1.2.1 ตัวดูดซับทางกายภาพ

จากการศึกษาที่ผ่านมา มีการศึกษาตัวดูดซับทางกายภาพ(Physical-adsorbent)หลายชนิดด้วยกัน อาทิ ตัวดูดซับทางกายภาพที่มีคาร์บอนเป็นพื้นฐาน หรือถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งถูกใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากราคาถูก มีเสถียรภาพทางความร้อน และทนต่อสภาพความชื้นได้ดี แต่สามารถใช้ได้กับระบบที่มีความดันสูงเท่านั้น และมีความไวกับช่วงอุณหภูมิ โดยมีช่วงที่เหมาะสมในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 50-120 องศาเซลเซียส เท่านั้น เนื่องจากข้อเสียเหล่านี้จึงมีการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยวิธีต่างๆ เช่น (1)การเพิ่มพื้นผิวให้กับตัวดูดซับถ่านกัมมันต์โดยใช้พรีเคอร์เซอร์ที่ต่างๆ(Precursors) รวมถึงการปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นรูพรุนชนิดมีโอส และ(2)การเพิ่มความเป็นเบสให้กับตัวดูดซับโดยการปรับปรุงทางเคมี



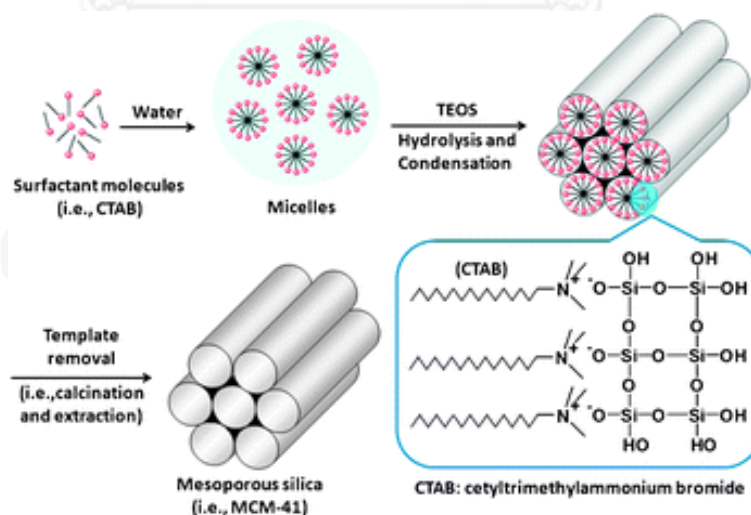
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างโครงสร้างของถ่านกัมมันต์[27]

ตัวดูดซับทางกายภาพซีโอไลต์(Zeolite)เป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสูง โครงสร้างหลักของซีโอไลต์คือ อะลูมิโนซิลิเกต โดยโครงสร้างมีความหลากหลายตามอัตราส่วนซิลิกาและอะลูมิเนียม ปัจจัยมีที่ผลต่อการดูดซับบนตัวดูดซับนี้คือ ขนาดของรูพรุน ความหนาแน่นของประจุ และชนิดของประจุบวกในโครงสร้างของรูพรุน ทั้งนี้มีการศึกษาเพื่อปรับปรุงความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกของโลหะแอลคาไลน์ และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ ซึ่งสามารถเลือกจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น แต่ทั้งนี้ข้อเสียของตัวดูดซับซีโอไลต์คือ ความจุการดูดซับลดลงเมื่ออยู่ในภาวะที่มีความชื้น และอุณหภูมิที่ใช้ในการนำกลับมาใช้ใหม่สูงถึง 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างโครงสร้างของซีโอไลต์[28]

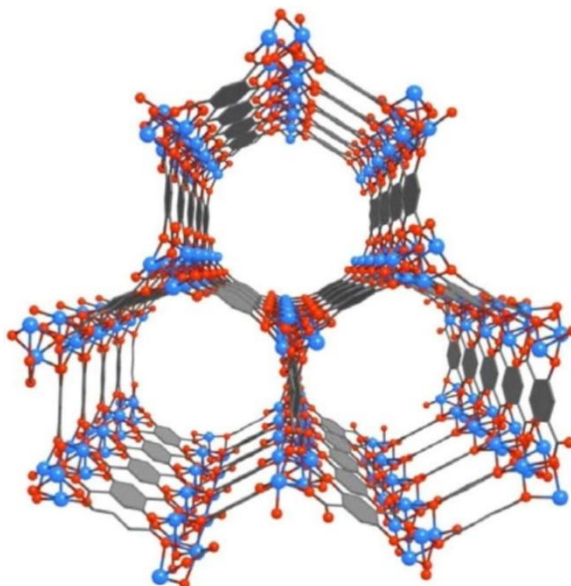
ตัวดูดซับเมโซพอร์ซิลิกาเป็นตัวดูดซับที่มีความพรุนสูง พื้นที่ผิวสูง และมีคุณสมบัติเชิงกล ต้านทานความร้อนได้ดี โดยตัวดูดซับชนิดนี้มีหลายชนิดด้วยกันเช่น Santa Barbara Amorphous type material (SBA-n), anionicsurfactant-templated mesoporous silica (AMS) แต่ตัวดูดซับชนิดนี้มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่สูงนัก โดยเฉพาะในภาวะความดันบรรยากาศ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเมโซพอร์ซิลิกา[29]

ตัวดูดซับโครงสร้างเชิงโลหะอินทรีย์ (Metal-organic frameworks, MOFs) เป็นตัวดูดซับที่น่าสนใจอีกตัวหนึ่ง เนื่องจากสามารถควบคุม ปรับเปลี่ยนขนาดของรูพรุนในโครงสร้างให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ที่ต่างกันได้ โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของกลุ่มโลหะ(metal

clusters) และลิแกนด์ของสารอินทรีย์(organic ligands)บนตัวดูดซับ ตัวดูดซับ MOFs สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ได้ดี แต่ความสามารถลดลงหากนำไปใช้กับแก๊สผสม การวิจัยตัวดูดซับชนิดนี้ยังอยู่ในขั้นการทดลอง อยู่ในระหว่างการศึกษาเพื่อนำไปใช้กับระบบจริง



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างโครงสร้างของตัวดูดซับโครงสร้างเชิงโลหะอินทรีย์[30]

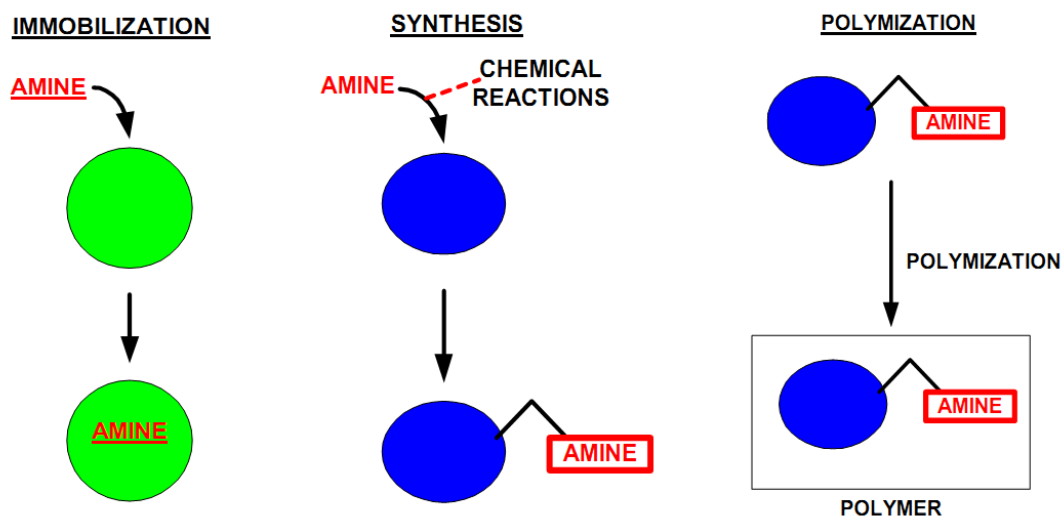
จากตัวดูดซับทางกายภาพที่ได้กล่าวมาแล้วว่าจะสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาก แต่ภาวะที่ใช้มักเป็นความดันสูง อุณหภูมิต่ำ และเลือกดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ไม่ดีนักในแก๊สผสม จึงนำตัวดูดซับเหล่านี้มาผ่านการปรับปรุงด้วยวิธีทางเคมีเป็นตัวดูดซับทางเคมี เพื่อลดข้อเสียที่กล่าวมา

#### 2.1.2.2 ตัวดูดซับทางเคมี

ตัวดูดซับทางเคมี(Chemical-adsorbent)ที่กล่าวถึงนี้ เป็นตัวดูดซับที่มีฐานเป็นเอมีน (Amine-Based adsorbent) โดยการนำตัวรองรับที่เป็นสารอินทรีย์จำพวกออกไซด์ของโลหะ มาผ่านการปรับปรุงพื้นผิวทางเคมี คือการเพิ่มหมู่เอมีนลงบนพื้นผิวตัวดูดซับ ซึ่งมีฤทธิ์เป็นเบส จึงสามารถทำปฏิกิริยาดูดซับกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นกรดได้ดี ทำให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น สามารถเลือกจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี อีกทั้งใช้อุณหภูมิในการนำกลับมาใช้ใหม่ต่ำกว่าระบบดูดซับโดยใช้สารละลายเอมีน เนื่องจากค่าใช้จ่ายของตัวดูดซับที่สูงกว่าระบบดูดซับ และความจุการดูดซับไม่สูงนัก เพื่อที่จะทำให้เป็นเชิงการค้า จึงต้องศึกษาปัจจัยต่างๆของตัวดูดซับนี้คือ (1)การเตรียมตัวรองรับที่สามารถตรึงเอมีนได้มาก (2)การใช้โมเลกุลเอมีนที่มีหมู่เอมีนมาก และ(3)วิธีการตรึงเอมีนลงบนตัวดูดซับ โดยจะกล่าวถึงรูปแบบการตรึงเอมีนลงบนพื้นผิวตัวดูดซับในหัวข้อถัดไป

## 2.2 รูปแบบการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งเอมีนดัดแปร

ในหัวข้อนี้กล่าวถึงกรรมวิธีการเตรียมตัวดูดซับโดยตรึงเอมีนลงบนพื้นผิวตัวรองรับต่างๆ โดยมีด้วยกัน 3 วิธีหลักดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วิธีเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งเอมีนดัดแปรในรูปแบบต่างๆ[31]

### 2.2.1 การตรึงเอมีนลงบนพื้นผิวตัวดูดซับ

การตรึงเอมีนลงบนพื้นผิวตัวดูดซับ(Immobilization) คือ การนำเอมีนไปเคลือบที่ผิวของตัวรองรับและยึดกันด้วยแรงอ่อนๆ วิธีนี้อาจเรียกได้ว่า วิธีฝังตัว (Impregnation) โดยทั่วไปมักใช้ตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวสูง อาทิ ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ เมโซพอร์สซิลิกา(SBA, MCM) เป็นต้น การเพิ่มเอมีนบนพื้นผิวทำให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นตามปริมาณเอมีนที่ตรึง แต่ทั้งนี้หากตรึงเอมีนที่มากเกินไปก่อให้เกิดการบดบังและกีดขวาง(aggregation) ระหว่างเอมีนด้วยกัน อาจทำให้ความจุการดูดซับลดลง เอมีนที่ใช้ในวิธีนี้มักใช้เอมีนทั่วไป อาทิ MEA, DEA หรือ TETA เป็นต้น (รูปที่ 2.8) ข้อดีของวิธีนี้คือ ง่ายต่อการตรึงเอมีนลงบนพื้นผิว แต่ก็มีข้อเสียอย่างเช่น มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ เอมีนอาจเกิดการหลุดออกจากพื้นผิวได้ ซึ่งทำให้ตัวดูดซับมีความจุการดูดซับลดลง

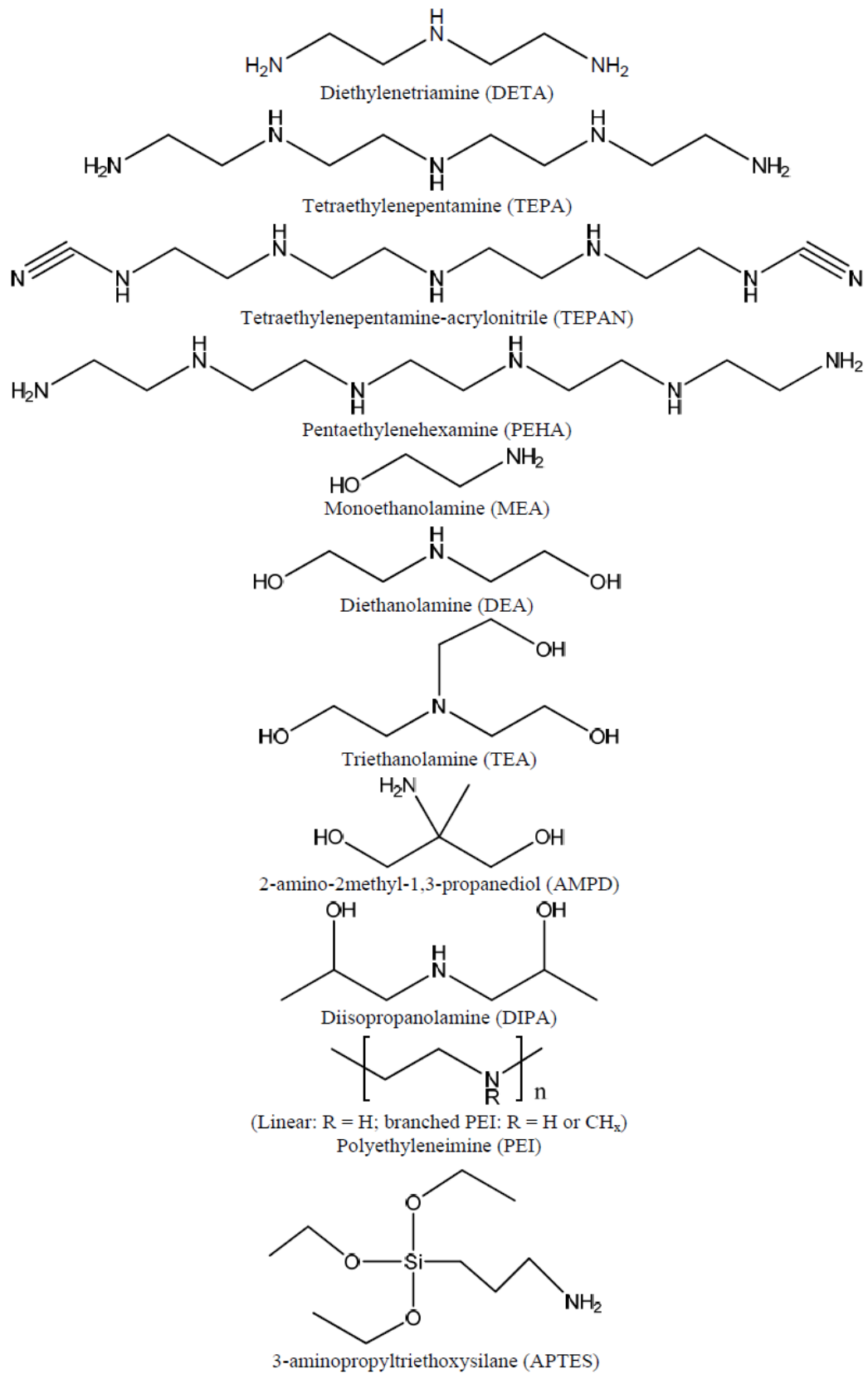
### 2.2.2 การสังเคราะห์

การสังเคราะห์(Synthesis, Grafting) คือ การทำให้เอมีนเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือเกิดการเชื่อมพันธะระหว่างเอมีนกับพื้นผิวของตัวรองรับ วิธีนี้คล้ายกับวิธีฝังตัว แต่เนื่องจากเอมีนและตัว

รองรับยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมี จึงมีความแข็งแรงกว่า มีเสถียรภาพสูงกว่า แต่ทั้งนี้การสร้างตัวดูดซับชนิดนี้ซับซ้อนกว่าวิธีฝังตัว โดยเอมีนที่มักใช้ในกระบวนการนี้ มักเป็นพวก อะมิโนไซเลน Aminosilane เช่น 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES) แสดงในรูปที่ 2.8 ที่ปลายโมเลกุลจะมีหมู่ไซเลน (Si-R) ทำหน้าที่เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ยึดกับตัวรองรับผ่านพันธะไฮดรอกเซน

### 2.2.3 พอลิเมอไรเซชัน

พอลิเมอไรเซชัน(Polymerization) คือ การนำเอมีนและตัวรองรับเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์(Polymerization) เข้าด้วยกัน โดยเอมีนและตัวรองรับที่ใช้ต้องสามารถเกิดเป็นพอลิเมอร์ได้ งานวิจัยของ Gray, M.L. และคณะ[31] ใช้การเตรียมรูปแบบนี้ โดยใช้ตัวรองรับพอลิเมทิล เมทิล อะครีเลท (Poly methyl methyl acrylate: PMMA) ตรึงด้วยเอมีนชนิดพอลิเอทิลีนอิมีน (Polyethylenimine: PEI) ได้ตัวดูดซับที่มีความจุการดูดซับสูงถึง 3 มิลลิโมลต่อกรัม มีเสถียรภาพมากกว่า 10 วัฏจักร และทนต่อความชื้นได้



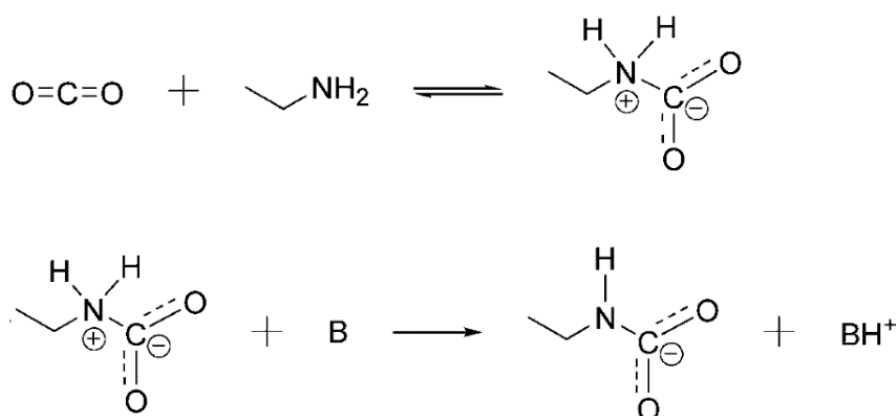
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเอมีนที่นิยมใช้เพื่อการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์[24]

## 2.3 ปฏิกิริยาการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่มีหมู่เอมีน

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่มีความเป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) สามารถรับอิเล็กตรอนจากเบสลิวอิสได้ เอมีนจัดว่าเป็นเบสลิวอิส (Lewis base) เพราะที่มีหมู่เอมีน (-NH<sub>2</sub>) ประกอบด้วยไนโตรเจนที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวทั้งสองจึงสามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนแบ่งออกเป็น 2 ภาวะได้แก่ ภาวะที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา และภาวะที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา

### 2.3.1 ภาวะที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา

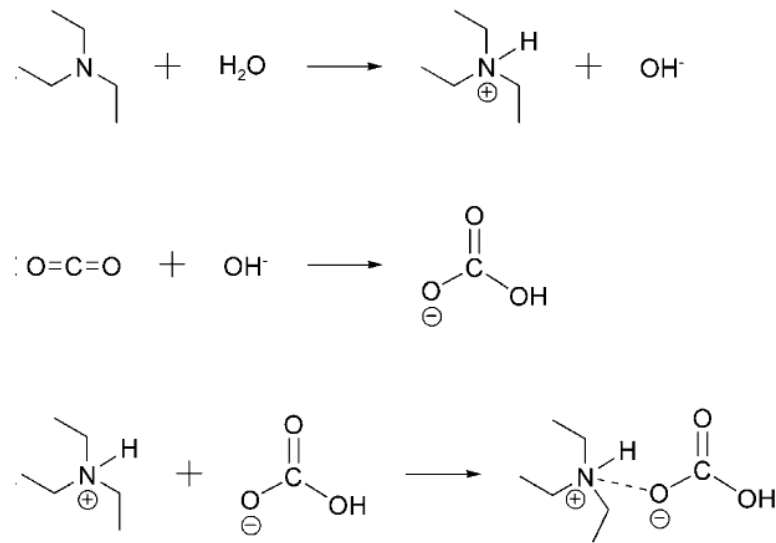
เอมีน 1 โมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ และกลายเป็น สวิตเทอร์ไอออน (Zwitterion) จากนั้นเอมีนอีก 1 โมเลกุลทำการดึงโปรตอนจากสวิตเทอร์ไอออนเกิดเป็นเกลือของแอมโมเนียมและคาร์บาเมต (Carbamate) สัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยานี้คือ 2:1 เกิดขึ้นกับเอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ (Primary/Secondary amines) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนในภาวะที่ไม่มีน้ำ (โดยที่ B หมายถึง เอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ,[8])

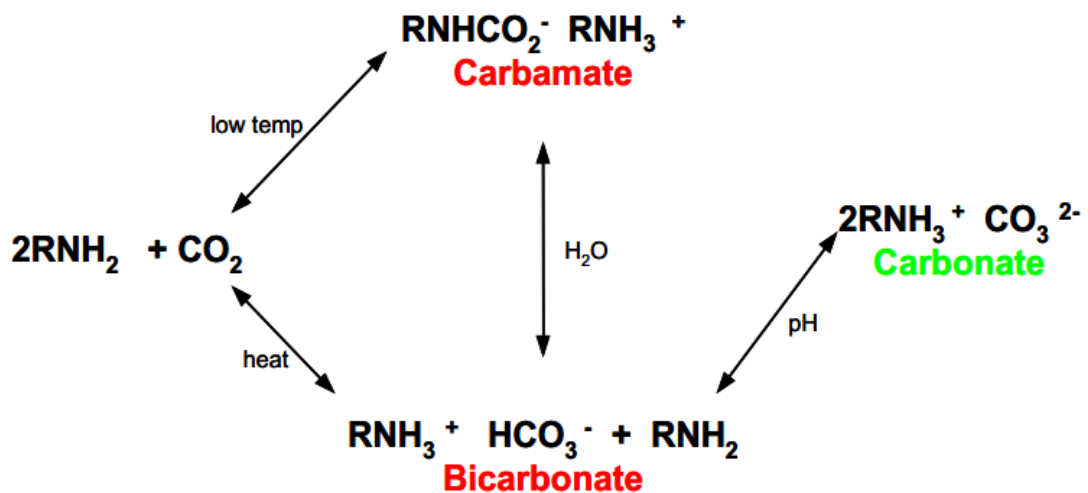
### 2.3.2 ภาวะที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา

สำหรับเอมีนตติยภูมิ (Tertiary amines) มักจะเกิดปฏิกิริยาในภาวะที่มีน้ำเท่านั้น กล่าวคือไนโตรเจนบนเอมีนให้อิเล็กตรอนกับน้ำ ได้ควอเทอร์นารีแคทไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน จากนั้นไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์กลายเป็นไบคาร์บอเนตไอออน จากนั้นทั้งสองตัวจับกันด้วยแรงระหว่างไอออน ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนตติยภูมิ  
ในภาวะที่มีน้ำ[8]

นอกจากนี้ เอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิสามารถเกิดปฏิกิริยานี้ได้เช่นกัน สำหรับเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิจะเกิดเป็นคาร์บาเมตก่อนแล้วจึงเกิดต่อเป็นไบคาร์บอเนต ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยที่สัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยานี้คือ 1:1



รูปที่ 2.11 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และ  
เอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิในภาวะที่มีน้ำ[32]



## 2.4 กระบวนการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่

คุณสมบัติสำคัญของตัวดูดซับที่ดีนอกจากมีความจุการดูดซับสูงแล้ว ต้องสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เพื่อลดความสิ้นเปลือง ในหัวข้อนี้กล่าวถึงกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration Processes) ที่ใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์[23] ดังนี้

### 2.4.1 กระบวนการสลับเปลี่ยนความดัน

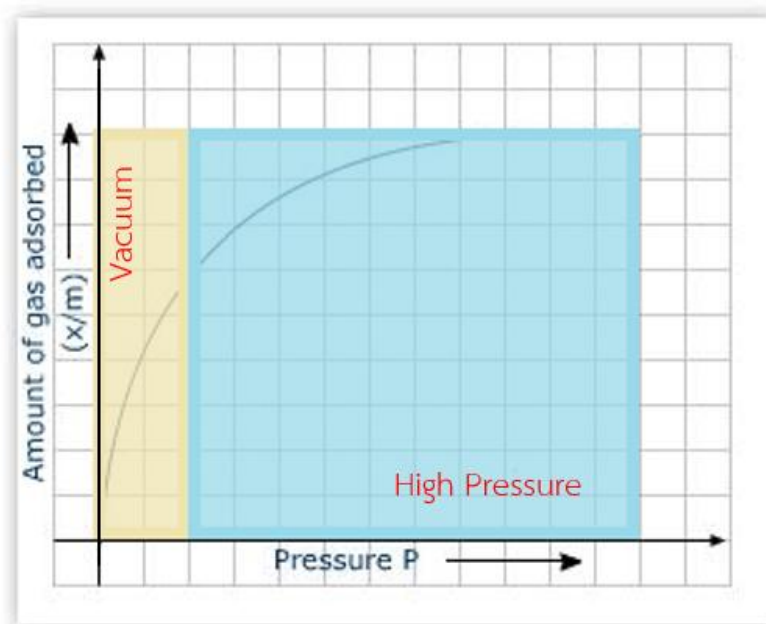
กระบวนการสลับเปลี่ยนความดัน (Pressure swing adsorption: PSA) เป็นกระบวนการที่เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะความดันสูง และที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการดูดซับบนตัวดูดซับของแข็งมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อดำเนินการที่ความดันสูง เมื่อการดูดซับเสร็จสิ้นภายในหอการดูดซับจะลดความดันลงกลับมาที่ความดันบรรยากาศ หดปล่อยแก๊สที่ต้องการดูดซับ และปล่อยแก๊สตัวพา (Carrier gas) หรือแก๊สที่ตัวดูดซับสามารถดูดซับได้ไม่ดีเข้าไปในเบตของตัวดูดซับแทน ซึ่งแก๊สตัวพาจะนำคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับออกมาที่ความดันบรรยากาศ และทำให้ตัวดูดซับพร้อมใช้ในการดูดซับครั้งถัดไป หลังจากการคายเสร็จสิ้น หอดูดซับจะเพิ่มความดันสู่ความดันการดูดซับเกิดการดูดซับอีกครั้งเกิดวนเป็นวัฏจักร

### 2.4.2 กระบวนการสลับเปลี่ยนอุณหภูมิ

กระบวนการสลับเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption: TSA) เป็นกระบวนการที่เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงอุณหภูมิต่ำ โดยการผ่านแก๊สเข้าไปที่หอการดูดซับ ผ่านเบตตัวดูดซับ เมื่อการดูดซับเสร็จสิ้น จะเพิ่มอุณหภูมิในหอการดูดซับและปล่อยแก๊สตัวพาให้เกิดการคายคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูง และเมื่อทำการคายเสร็จสิ้น หอดูดซับจะลดอุณหภูมิลงไปยังอุณหภูมิการดูดซับเกิดวนเป็นวัฏจักร กล่าวคือ ในวิธีนี้การดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ และการคายเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เป็นกระบวนการที่ง่ายแต่อาจใช้พลังงานสิ้นเปลืองกว่าวิธี PSA

### 2.4.3 กระบวนการสลับเปลี่ยนสุญญากาศ

กระบวนการสลับเปลี่ยนสุญญากาศ (Vacuum swing adsorption: VSA) เป็นกระบวนการที่เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะความดันสูง และที่อุณหภูมิต่ำดังเช่น PSA แต่จุดที่ต่างกันคือ กระบวนการคายเกิดขึ้นที่ความดันสุญญากาศ หรือต่ำกว่าความดันบรรยากาศ ทำให้การคายมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากการลดความดันจนถึงสุญญากาศส่งผลต่อไอโซเทิร์มการดูดซับบนช่วงที่มีความเข้มข้นสูง ประสิทธิภาพในการคายจึงดีกว่า PSA ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ไอโซเทอรั่มการดูดซับช่วงสุญญากาศและความดันสูง[23]

#### 2.4.4 กระบวนการสลับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า

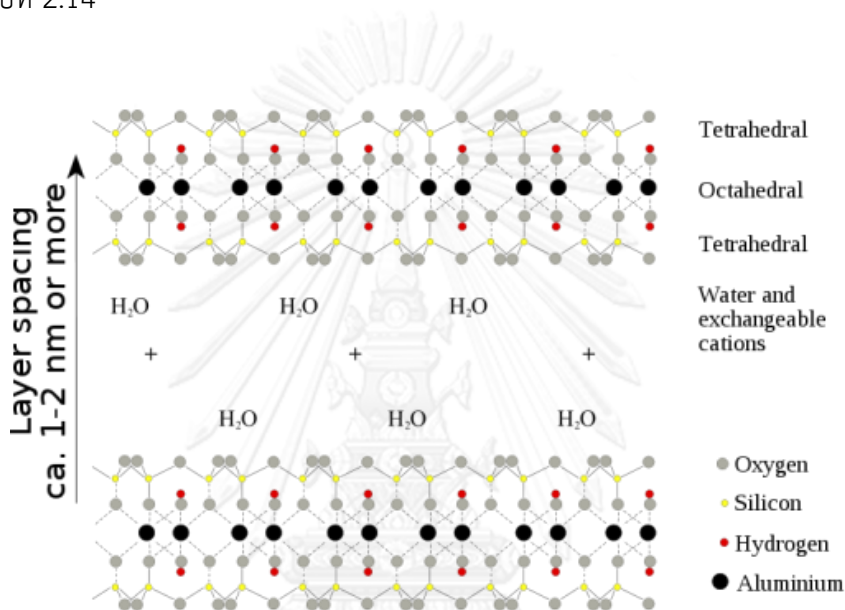
กระบวนการสลับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้า(Electric swing adsorption: ESA) เป็นกระบวนการที่คล้ายคลึงกับ TSA คือการดูดซับเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ และการคายเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง แต่ต่างกันที่แหล่งที่มาของความร้อน โดยกระบวนการ TSA ใช้แก๊สเป็นแหล่งให้ความร้อน แต่ ESA จะใช้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าสู่คอลัมน์การดูดซับโดยตรงทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใต้ด้วย Joule Effect มีข้อดีคือสามารถเพิ่มลดอุณหภูมิได้เร็วกว่าการใช้แก๊สให้ความร้อนในกระบวนการ TSA[33]

#### 2.4.5 กระบวนการแบบลูกผสม

กระบวนการลูกผสม(Hybrid Processes) เป็นการรวมกระบวนการข้างต้นเข้าด้วยกัน เพื่อให้เหมาะกับการนำไปใช้มากขึ้น โดยยกตัวอย่างเช่นกระบวนการสลับเปลี่ยนอุณหภูมิและความดัน (Thermal-Pressure swing adsorption: TPSA) เนื่องจากหากเป็น TSA เพียงอย่างเดียว การเพิ่มและลดอุณหภูมิในช่วงที่มากอาจทำให้มีค่าดำเนินการสูง หรือแม้หากเป็น PSA อย่างเดียว การคายที่ความดันบรรยากาศอาจใช้เวลามากเกินไป การรวมสองกระบวนการเข้าด้วยกันเป็นการแก้ไขข้อเสียให้กันและกันคือ การดูดซับเกิดขึ้นในช่วงความดันสูงและอุณหภูมิต่ำ ส่วนการคายเกิดขึ้นที่ความดันต่ำและอุณหภูมิสูง จะเห็นได้ว่าในช่วงการคายการเพิ่มอุณหภูมิช่วยทำให้เกิดการคายดีขึ้น และใช้เวลาน้อยลง อีกทั้งการคายหากใช้ TSA เพียงอย่างเดียวอาจต้องใช้อุณหภูมิที่สูงมาก PSA จึงช่วยให้การคายเกิดขึ้นได้ดีขึ้น

## 2.5 มอนต์มอริลโลไนต์

ตัวดูดซับที่นำมาใช้ในการศึกษานี้คือ มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) จัดอยู่ในประเภทของดิน(Clay) กลุ่มสเม็คไทท์(Smectite) มีองค์ประกอบหลักเป็นแผ่นของอะลูมิเนียมออกไซด์ หรืออะลูมินา(Alumina) และซิลิกอนไดออกไซด์ หรือซิลิกา(Silica) เรียกรวมกันว่า อะลูมิโนซิลิเกต(Alumino silicate) มีรูปแบบการจัดเรียงตัวกันเป็นชั้น(Layers) ประกอบด้วยชั้นของทรงสี่หน้า(Tetrahedral) ของซิลิกา และทรงแปดหน้า(Octahedral)ของอะลูมินา ด้วยอัตราส่วน 2:1 ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์[34]

การนำไปใช้ของมอนต์มอริลโลไนต์นั้นมักอยู่ในรูปแบบดินฟอกสี(Bleaching earth)เป็นส่วนใหญ่ มีความจุการดูดซับน้ำ สามารถบวมตัวได้ดี(Swelling) ชั้นภายใน(Interlayer) รองรับการแลกเปลี่ยนไอออน(Ion Exchange)ได้เป็นอย่างดี สามารถแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกได้(Cation-exchange) อีกทั้งมอนต์มอริลโลไนต์มีพื้นที่ผิวสูง ประมาณ 100 ตารางเมตรต่อกรัม[35] และมีขนาดรูพรุนจัดอยู่ในประเภทรูพรุนมีโส (Mesopore) จากคุณสมบัติที่ได้กล่าวมา ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่ใช้มอนต์มอริลโลไนต์เป็นตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่หากว่าการดูดซับด้วยรูพรุนขนาดมีโสมักเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งต้องดำเนินการที่ภาวะความดันสูง จึงมีแนวความคิดนำมอนต์มอริลโลไนต์มาปรับปรุงด้วยกระบวนการทางเคมีด้วยการเติมหมู่ฟังก์ชันเอมีน เพื่อเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ คาดว่าทำให้ได้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

## 2.6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับโดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ทำให้ทราบถึงกลไกการดูดซับ อัตราการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงภาวะสมดุล โดยเกิดอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับ(adsorbent) และตัวถูกดูดซับ(adsorbate) งานวิจัยนี้เลือกแบบจำลองจลนพลศาสตร์ 3 แบบจำลองคือ 1. แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo 1<sup>st</sup> Order) 2. แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo 2<sup>nd</sup> Order) และ 3. แบบจำลองอาฟราเมีย (Avrami's equation)

### 2.6.1 แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม

แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมอธิบายระบบการดูดซับที่มีอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ว่างบนตัวดูดซับเพียงตัวแปรเดียว เนื่องจากความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับคงที่ตลอดการดูดซับ และ ค่าคงที่อัตรา (rate constant,  $k_1$ ) แปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ[36] ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.1)$$

หาปริพันธ์สมการ (2.1) ที่เวลา  $t = 0$  ถึง  $t = t$  และ  $q_t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$  จะได้

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (2.2)$$

โดยที่	$q_e$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$q_t$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใดๆ หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$t$	คือ	เวลาใดๆ หน่วยเป็น นาที
	$k_1$	คือ	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม หน่วยเป็น นาที <sup>-1</sup>

### 2.6.2 แบบจำลองอันดับสองเทียม

แบบจำลองอันดับสองเทียมใช้อธิบายระบบการดูดซับที่มีขั้นกำหนดอัตรา(rate limiting step) ในระบบการดูดซับถูกกำหนดการดูดซับทางเคมี(chemisorption)[37] ดังแสดงในสมการที่ (2.3)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.3)$$

หาปริพันธ์สมการ (2.3) ที่เวลา  $t = 0$  ถึง  $t = t$  และ  $q_t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$  จะได้

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (2.4)$$

โดยที่	$q_e$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$q_t$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใดๆ หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$t$	คือ	เวลาใดๆ หน่วยเป็น นาที
	$k_2$	คือ	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของแบบจำลองอันดับสองเทียม

### 2.6.3 แบบจำลองอาฟราไม

แบบจำลองอาฟราไมดัดแปลงมาจากแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม โดยเพิ่มค่าคงที่อาฟราไม( $n_a$ ) ในแบบจำลองหนึ่งเทียม ค่าคงที่อาฟราไมโดยทั่วไปจะมีค่าในช่วง 1-4 แบบจำลองอาฟราไมใช้อธิบายระบบการดูดซับที่มีความซับซ้อน โดยความซับซ้อนนี้อาจเกิดจากปฏิกิริยาเคมีในระบบเกิดขึ้นหลายกลไก[38] ดังแสดงในสมการที่ (2.5)

$$q_t = q_e(1 - e^{-(kat)^{n_a}}) \quad (2.5)$$

โดยที่	$q_e$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$q_t$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใดๆ หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$t$	คือ	เวลาใดๆ หน่วยเป็น นาที
	$k_a$	คือ	ค่าคงที่ของอาฟราไม หน่วยเป็น นาที <sup>-1</sup>
	$n_a$	คือ	ค่าคงที่ของอาฟราไม

## 2.7 ไอโซเทิร์มการดูดซับ

ไอโซเทิร์มเป็นความสัมพันธ์ในภาวะสมดุลระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในของไหลกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนของแข็งที่อุณหภูมิคงที่ สามารถใช้อธิบายกลไกการดูดซับได้โดยใช้แบบจำลองไอโซเทิร์มต่างๆ ในงานวิจัยนี้เลือกแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ 3 แบบจำลองได้แก่ 1. แบบจำลองไอโซเทิร์มแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) 2. แบบจำลองไอโซเทิร์มฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) และ 3. แบบจำลองไอโซเทิร์มทอท (Toth isotherm)

### 2.7.1 แบบจำลองไอโซเทิร์มแลงเมียร์

ไอโซเทิร์มแลงเมียร์ใช้อธิบายระบบการดูดซับที่มีสมมติฐานดังนี้คือ การดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและสม่ำเสมอ (homogeneous surface) กลไกการดูดซับถูกกำหนดด้วยการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ค่าความร้อนการดูดซับ (heat of adsorption) เท่ากันทุกตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ และโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน [39] แสดงสมการไอโซเทิร์มแลงเมียร์ในสมการที่ (2.6)

$$q_e = q_m \frac{K_L P}{1 + K_L P} \quad (2.6)$$

โดยที่	$q_e$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$q_m$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$K_L$	คือ	ค่าคงที่ของแลงเมียร์ หน่วยเป็น บาร์ <sup>-1</sup>
	$P$	คือ	ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ หน่วยเป็น บาร์

### 2.7.2 แบบจำลองไอโซเทิร์มฟรุนดลิช

แบบจำลองไอโซเทิร์มฟรุนดลิชอธิบายถึงการดูดซับเกิดขึ้นอย่างไม่จำกัด บนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous surface) โมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลอื่นของตัวถูกดูดซับได้ เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) [40] แสดงสมการไอโซเทิร์มฟรุนดลิชในสมการที่ (2.7)

$$q_e = k_f P^{n_f} \quad (2.7)$$

โดยที่	$q_e$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$P$	คือ	ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ หน่วยเป็น บาร์
	$k_f, n_f$	คือ	ค่าคงที่ของฟรุนดลิช

### 2.7.3 แบบจำลองไอโซเทิร์มทอท

แบบจำลองไอโซเทิร์มทอทดัดแปลงมาจากไอโซเทิร์มแลงเมียร์โดยเพิ่มค่าคงที่ของทอท( $n_T$ ) ในสมการของแลงเมียร์ ค่าคงที่ของทอทอธิบายถึงการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเมื่อค่า  $n_T$  อยู่ในช่วง  $0 < n_T \leq 1$  การดูดซับถูกจำกัดภายใต้ความจุการดูดซับสูงสุด ณ ภาวะสมดุล ( $q_m$ ) หากค่า  $n_T = 1$  ระบบสมการจะลดรูปเป็นสมการของแลงเมียร์[41] สมการไอโซเทิร์มทอทแสดงดังในสมการที่ (2.8)

$$q_e = \frac{q_m K_T P}{[1 + (K_T P)^{n_T}]^{1/n_T}} \quad (2.8)$$

โดยที่	$q_e$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$q_m$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$P$	คือ	ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ หน่วยเป็น บาร์
	$K_T$	คือ	ค่าคงที่ของทอท หน่วยเป็น บาร์ <sup>-1</sup>
	$n_T$	คือ	ค่าคงที่ของทอท

## 2.8 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Singh และคณะ[42, 43] ศึกษาผลความยาวสายโซ่ของเอมีนต่อความจุการดูดซับ และอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการเพิ่มความยาวสายโซ่ระหว่างหมู่เอมีนกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆในโครงสร้างของตัวดูดซับมีผลให้อัตราการดูดซับลดลง แต่กลับทำให้มีความจุการดูดซับเพิ่มขึ้น ศึกษาผลจากโซ่กิ่ง จำนวนหมู่ฟังก์ชันบนเอมีนโซ่ตรง และการแทนที่หมู่แอลคิลบนไดเอมีนแอร์แมติกต่อความจุการดูดซับและอัตราการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า การแทนที่โซ่กิ่งด้วยหมู่แอลคิลบนเอมีนที่ตำแหน่งแอลฟาคาร์บอนทำให้เกิดแรงกีดขวางเนื่องจากขนาด(Steric hindrance)ของโซ่กิ่งส่งผลให้ความจุการดูดซับสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการแทนที่บนปีตาคารบอน การเพิ่มจำนวนหมู่ฟังก์ชันบนเอมีนทำให้ความจุการดูดซับสูงขึ้นซึ่งมากถึง 3.03 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีนที่โซ่ และการแทนที่หมู่แอลคิลที่ตำแหน่ง 2 และ/หรือ 5 บนไดเอมีนแอร์แมติกทำให้ความเป็นเบสของสารประกอบเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อัตราการดูดซับและความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

Liu และคณะ[44] ศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบผันกลับได้ของตัวดูดซับเมโซพอร์ซิลิกา SBA-15 ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไตรเอทาโนลามีน(TEA) ในแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน พบว่า การปรับปรุง SBA-15 ด้วยไตรเอทาโนลามีนช่วยเพิ่มการเลือกจับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการเลือกจับแก๊สมีเทนมากถึง 7 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ SBA-15 ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง โดยไตรเอทาโนลามีนไม่ได้เข้าไปเปลี่ยนโครงสร้างของตัวดูดซับ SBA-15 แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงด้วยกระบวนการทางเคมี ช่วยทำให้กระบวนการดูดซับสามารถผันกลับได้ โดยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องโดยใช้แก๊สมีเทนบริสุทธิ์เป็นตัวนำพาหรือใช้ความดันสูญญากาศ(VSA) การทำชำระระหว่างการดูดซับและการผันกลับเป็นข้อยืนยันถึงเสถียรภาพและศักยภาพในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนของตัวดูดซับนี้

Gray และคณะ[45] ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับพอลิเมทิล เมทิล อะครีเลท (Poly methyl methyl acrylate: PMMA) ที่ตรึงด้วยเอมีนตติยภูมิ ซึ่งแตกต่างจากเอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิ กล่าวคือ อัตราส่วนในการเข้าทำปฏิกิริยาของเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ของเอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิ เท่ากับ 2:1 ในขณะที่อัตราส่วนในการเข้าทำปฏิกิริยาของเอมีนตติยภูมิอัตราส่วนเป็นเพียง 1:1 เท่านั้น โดยการทดสอบตัวดูดซับดังกล่าวพบว่า มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาสูงถึง 3.0 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ณ อุณหภูมิ 298 เคลวิน ซึ่งมีประสิทธิภาพเทียบได้กับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลาย และจากการทดสอบคุณลักษณะตัวดูดซับด้วยเทคนิค XPS และ TGA พบว่าตัวดูดซับมีเสถียรภาพในการดูดซับและการผันกลับ ณ อุณหภูมิช่วง 298-360 เคลวิน

Khalil และคณะ[46] ศึกษาการตรึงเอมีนสองชนิดได้แก่ โมโนเอทาโนลามีน(MEA) และ 2-อะมิโน-2-เมทิล-1-โพรพานอล(AMP) บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำจากกะลาปาล์มด้วยวิธีการฝังตัว พบว่า การตรึงเอมีนลงบนพื้นผิวทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง แต่กลับช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการตรึงเอมีนบนพื้นผิวเป็นการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเอมีน สามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยถ่านกัมมันต์ที่ตรึงด้วย MEA มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ตรึงด้วย AMP จากการ



ทดสอบด้วยเทคนิค FESEM พบว่า การตรึงเอมีนบนพื้นผิวทำให้รูพรุนภายในถ่านกัมมันต์ถูกปิดกั้น และการทดสอบการผันกลับของปฏิกิริยา พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสามารถเกิดการผันกลับได้ ด้วยการผ่านแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที แต่กลับไม่เพียงพอที่ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการตรึงด้วยเอมีนเกิดการผันกลับได้ เนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอต่อการสลายพันธะที่เกิดจากกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Kamarudin และคณะ[47] ศึกษาการตรึงเอมีนบนพื้นผิวของ MCM-41 โดยเปรียบเทียบระหว่างเอมีนสองชนิดได้แก่ โมโนเอทาโนลามีน (MEA) และไดเอทาโนลามีน (DEA) พบว่า การตรึงเอมีนบนพื้นผิวช่วยเพิ่มความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับปริมาณหมู่เอมีนบนตัวดูดซับด้วยการตรึง MEA สามารถทำได้สูงสุดที่ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการตรึงเอมีนด้วย DEA บนพื้นผิว MCM-41 การทดสอบการดูดซับและการผันกลับโดยใช้วิธีสลับเปลี่ยนความดันแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของตัวดูดซับแม้ผ่านการใช้งานมากกว่า 10 วัฏจักร

Serna-Guerrero และคณะ[38] ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับสังเคราะห์เมโซพอร์ซิลิกาที่ดัดแปรด้วยเอมีนในช่วงความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียส ใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ 3 แบบจำลองคือแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม(Pseudo 1<sup>st</sup> order) แบบจำลองอันดับสองเทียม(Pseudo 2<sup>nd</sup> order) และแบบจำลองอาฟรามี(Avrami's equation) ณ อุณหภูมิช่วง 25 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียสพบว่า แบบจำลองอาฟรามีเข้ากับข้อมูลจากการทดลองมากที่สุด โดยมีร้อยละความผิดพลาดน้อยกว่า 3 แบบจำลองอาฟรามีอธิบายถึงกลไกการดูดซับในระบบมีความซับซ้อน ซึ่งความซับซ้อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่มากกว่าหนึ่งปฏิกิริยา การดูดซับเกิดขึ้นภายใต้การดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

Garnier และคณะ[41] ศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนบนตัวดูดซับถ่านหินชนิดต่างๆ ทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองไอโซเทิร์มของแลงเมียร์(Langmuir isotherm) แบบจำลองเทมคิน(Temkin isotherm) และแบบจำลองทอท(Toth's equation)ที่อุณหภูมิการดูดซับ 25 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 0.1 บาร์ถึง 50 บาร์ ใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์และแก๊สมีเทนบริสุทธิ์พบว่า แบบจำลองทอทเข้ากับค่าความจุการดูดซับจากการทดลองมากที่สุดทั้งการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนถ่านหิน และการดูดซับมีเทนบนถ่านหินแบบจำลองทอทอธิบายถึงการดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน(Heterogeneous surface) สามารถใช้กับช่วงความดันการดูดซับกว้างได้ ในขณะที่แบบจำลองแลงเมียร์อธิบายถึงการดูดซับบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน(Homogeneous surface) และใช้กับช่วงความดันการดูดซับไม่กว้างนัก

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงวิธีดำเนินงานวิจัย โดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

#### 3.1 สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้

##### 3.1.1 สารเคมี

- มอนต์มอริลโลไนต์ร้อยละ 90 (บริษัท เทพเกษตร อุตสาหกรรม จำกัด)
- โมโนเอทานอลามีน (AR, QReC Chemical)
- เอทานอล (absolute, Chemicals VWR BDH Prolabo)
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ACS, BDH Laboratory supplies)
- แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ดุลในฮีเลียม (Praxair (Thailand) Co.,Ltd.)
- แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตร ดุลในฮีเลียม (Praxair (Thailand) Co.,Ltd.)
- แก๊สฮีเลียมร้อยละ 99.999 โดยปริมาตร (TIG Co., Ltd.)

##### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้

- เครื่องควบคุมอัตราการไหล (AALBROG model: GFC 1715)
- อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ
- ท่อสแตนเลส 316 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1/4 นิ้ว 1/8 นิ้ว ข้อต่อ และ วาล์ว (Swagelok)
- ท่อควอตซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/4 นิ้ว ความยาว 60 เซนติเมตร
- แถบเพิ่มความร้อน (Heating tape)
- เกย์วัดแรงดัน
- ตัวคุมค่าความดัน
- แก๊สโครมาโทกราฟ (Shimadzu GC-2014)

## 3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน

#### 3.2.1.1 ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน

นำมอนต์มอริลโลไนต์ 3 กรัมใส่ในกับเอทานอล 15 มิลลิลิตร แล้วทำการกวนผสมต่อเนื่องนาน 30 นาทีที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เพื่อชะล้างผิวของมอนต์มอริลโลไนต์ จากนั้นเติมโมโนเอทาโนลามีน(MEA)ตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่ต้องการแล้วทำการกวนผสมต่ออีกเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปอบแห้งที่ภายใต้ความดันบรรยากาศอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งคืน ได้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์นี้มีชื่อว่า ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน เรียกว่า MS\_X โดย X หมายถึงปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ

#### 3.2.1.2 ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีน

เตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอลที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:2 จากนั้นเติมมอนต์มอริลโลไนต์ 3 กรัมแล้วกวนผสมเป็นเวลา 30 นาทีที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ล้างเบสส่วนเกินออกด้วยเอทานอล 3-4 รอบแล้วทำให้แห้งโดยการอบที่ 60 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันบรรยากาศเป็นเวลาหนึ่งคืน จากนั้นนำตัวดูดซับที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยเบสตรึงด้วยเอมีนโดยใช้วิธีข้างต้น ตัวดูดซับที่สังเคราะห์นี้มีชื่อว่า ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีน เรียกว่า MSM\_X โดย X หมายถึงปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ

### 3.2.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ

#### 3.2.2.1 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับ

(Thermogravimetric analysis, TGA)

ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับสังเคราะห์ โดยใช้ เครื่องยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Pyris diamond ภายใต้ความดันไนโตรเจน อัตราเพิ่มความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที

#### 3.2.2.2 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ

(Brunauer-Emmett-Teller surface area, BET)

ศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน และขนาดของรูพรุนของตัวดูดซับสังเคราะห์โดยใช้เทคนิค BET ด้วยเครื่องยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb-1

### 3.2.2.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ

(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)

ศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับสังเคราะห์โดยใช้เทคนิค FT-IR ด้วยเครื่องยี่ห้อ Perkin-Elmer (Spectrum one) spectrometer ต่อเข้ากับตัวตรวจจับ mercury-cadmium-telluride (MCT detector)

### 3.2.2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ

(X-ray diffraction, XRD)

ศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับสังเคราะห์โดยใช้เทคนิค XRD ด้วยเครื่องยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ที่มุม  $2\theta$  ตั้งแต่ 2 จนถึง 50

### 3.2.2.5 การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับ

(CHN elemental analysis, CHN)

ศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับสังเคราะห์ ด้วยเครื่องยี่ห้อ LECO รุ่น CHN2000

## 3.2.3 การทดสอบความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งหรือคอลัมน์การดูดซับ ภายใต้ภาวะความดันบรรยากาศ ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเข้าโดยใช้เครื่องควบคุมอัตราการไหล(AALBROG model: GFC 1715) และอุณหภูมิที่ใช้ดำเนินการควบคุมโดยใช้แถบเพิ่มความร้อนในการให้ความร้อนแก่ระบบ ตรวจจับอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และตรวจวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี(Shimadzu GC-2014)ด้วยวิธีออนไลน์ ส่วนของคอลัมน์การดูดซับใช้ท่อควอตซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/4 นิ้ว ความยาว 60 เซนติเมตร

การดำเนินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะแห้ง บรรจุตัวดูดซับสังเคราะห์ 0.3 กรัมในคอลัมน์การดูดซับ ก่อนเริ่มทำการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะผ่านแก๊สฮีเลียมเข้าสู่คอลัมน์การดูดซับที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตร/นาที เป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จากนั้นปรับอุณหภูมิของระบบการดูดซับจนถึงระดับที่ต้องการ แต่เปลี่ยนแก๊สเข้าจากแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สผสมซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆลงในฮีเลียมเข้าสู่ระบบ ทำการตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกทุกๆ 2 นาทีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี สิ้นสุดการดูดซับที่ภาวะสมดุลคือความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า การคำนวณหาค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยของมิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัม

ของตัวดูดซับ ( $\text{mg CO}_2 / \text{g sorbent}$ ) ได้โดยใช้การอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟของเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curves) กับเส้นของความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ตั้งภาคผนวก ก.)

การดำเนินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่มีน้ำดำเนินการเหมือนกับภาวะแห้ง แต่ให้แก๊สขาเข้าซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ควบในฮีเลียมผ่านเครื่องระเหยน้ำที่มีความเข้มข้นของน้ำต่างกัน จากนั้นจึงปล่อยเข้าสู่ระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ตรวจวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี

### 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

#### 3.3.1 ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาตัวดูดซับที่ใช้ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มี 3 ชนิดด้วยกันคือ 1. มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรใดๆ (M) 2. ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน (MS) และ 3. ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีน (MSM) โดยกำหนดภาวะการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดังนี้

ปริมาณเอมีนที่ดัดแปรลงบนตัวดูดซับ	: ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
อุณหภูมิการดูดซับ	: 40 องศาเซลเซียส
ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า	: ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดลในฮีเลียม
อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า	: $1.8 \text{ กรัม} \cdot \text{วินาที} \cdot \text{เซนติเมตร}^{-3}$
ภาวะแห้ง	

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับทั้งสามชนิดแล้ว นำชนิดของตัวดูดซับที่มีค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดมาทำการทดลองในขั้นถัดไป เพื่อหาผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ

#### 3.3.2 ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ

การศึกษาผลกระทบของปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับต่อค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ศึกษาในช่วงร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก ภาวะการดูดซับถูกกำหนดดังนี้

ชนิดของตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.1
อุณหภูมิการดูดซับ	: 40 องศาเซลเซียส
ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สผสมขาเข้า	: ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม
อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็ว ของแก๊สขาเข้า	: 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร <sup>-3</sup>
ภาวะแห้ง	

การทดลองขั้นถัดไปจะใช้ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับที่ให้ค่าความจุการดูดซับสูงสุดทำการทดลองต่อไป

### 3.3.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ศึกษาในช่วง 30-70 องศาเซลเซียส โดยมีภาวะการดูดซับดังนี้

ชนิดของตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.1
ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.2
ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สผสมขาเข้า	: ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม
อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็ว ของแก๊สขาเข้า	: 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร <sup>-3</sup>
ภาวะแห้ง	

ทำการเปรียบเทียบค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อได้อุณหภูมิที่ดีที่สุดในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว กำหนดค่าที่อุณหภูมินั้นเพื่อใช้ในการทดลองหาผลกระทบจากตัวแปรถัดไป

### 3.3.4 อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า

การศึกษาผลกระทบจากอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า (W/F Ratio) ที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ศึกษาในช่วง 1.8-5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> มีภาวะการดูดซับดังนี้

ชนิดของตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.1
ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.2
อุณหภูมิการดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.3
ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สผสมขาเข้า	: ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม
ภาวะแห้ง	

### 3.3.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า

การศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าในช่วงอุณหภูมิต่างกันต่อค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ศึกษาในช่วงอุณหภูมิการดูดซับ 30-70 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาเข้าศึกษาในช่วงร้อยละ 10-100 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม โดยกำหนดภาวะการดูดซับดังนี้

ชนิดของตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.1
ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.2
อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็ว ของแก๊สขาเข้า	: 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร <sup>-3</sup>
ภาวะแห้ง	

### 3.3.6 ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า

การศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของน้ำในแก๊สขาเข้าที่อุณหภูมิต่างกันต่อค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ศึกษาในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ 30-70 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของน้ำในแก๊สขาเข้าศึกษาในช่วงร้อยละ 0-20 โดยปริมาตร โดยกำหนดภาวะการดูดซับดังนี้

ชนิดของตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.1
ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.2
ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สผสมขาเข้า	: ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม
อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็ว ของแก๊สขาเข้า	: 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร <sup>-3</sup>

### 3.4 การศึกษาพฤติกรรมกรดดูดซับ

#### 3.4.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ ณ ภาวะอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ 30-70 องศาเซลเซียส โดยใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์ 3 แบบจำลองด้วยกันคือ 1. แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo 1<sup>st</sup> Order) 2. แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo 2<sup>nd</sup> Order) และ 3. แบบจำลอง Avrami (Avrami's equation) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลอง จลนพลศาสตร์การดูดซับ	สมการ
Pseudo 1 <sup>st</sup> Order	$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$
Pseudo 2 <sup>nd</sup> Order	$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t}$
Avrami	$q_t = q_e(1 - e^{-(k_a t)^{n_a}})$

โดยที่	$q_e$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$q_t$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เวลาใดๆ หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$t$	คือ	เวลาใดๆ หน่วยเป็น นาที
	$k_1$	คือ	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม หน่วยเป็น นาที <sup>-1</sup>
	$k_2$	คือ	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของแบบจำลองอันดับสองเทียม หน่วยเป็น กรัม·มิลลิกรัม <sup>-1</sup> ·นาที <sup>-1</sup>
	$k_a$	คือ	ค่าคงที่ของอาฟรามี หน่วยเป็น นาที <sup>-1</sup>
	$n_a$	คือ	ค่าคงที่ของอาฟรามี



ค่าคงที่ของแต่ละแบบจำลองสามารถคำนวณได้จากข้อมูลจากการทดลอง และฟังก์ชันความผิดพลาด(Error function) จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปกติ (Normalized standard deviation) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ(coefficient of determination :  $R^2$ )เป็นตัวชี้วัดถึงการเข้ากันได้ระหว่างแบบจำลองและข้อมูลการทดลอง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2 ตามลำดับ

$$Err(\%) = \sqrt{\frac{\sum [(q_{t,exp} - q_{t,cal}) / q_{t,exp}]^2}{N-1}} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่	Err	คือ	ฟังก์ชันความผิดพลาด
	$q_{t,exp}$	คือ	ค่าความจุการดูดซับจากการทดลองที่เวลา t
	$q_{t,cal}$	คือ	ค่าความจุการดูดซับจากการคำนวณที่เวลา t
	N	คือ	จำนวนของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.2)$$

โดยที่	$R^2$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ
	$\bar{y}$	คือ	ค่าผลได้เฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง
	$\hat{y}$	คือ	ค่าผลได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง
	$y_i$	คือ	ค่าผลได้จากการทดลอง

กำหนดภาวะการดูดซับดังนี้

ชนิดของตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.1
ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.2
ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า	: ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม
อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า	: 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร <sup>-3</sup>
ภาวะแห้ง	

### 3.4.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับ ศึกษาที่ภาวะความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าต่างกัน ตั้งแต่ร้อยละ 10-100 โดยปริมาตร ดุลในฮีเลียม ที่อุณหภูมิต่างกันตั้งแต่ 30-70 องศาเซลเซียส นำผลการทดลองมาคำนวณหาค่าคงที่ไอโซเทิร์มการดูดซับในแต่ละแบบจำลอง โดยมีไอโซเทิร์มการดูดซับ 3 แบบจำลองด้วยกันคือ 1. แบบจำลองแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) 2. แบบจำลองฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) และ 3. แบบจำลองทอท (Toth isotherm) ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ใช้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานปกติจากสมการที่ 3.1 และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ ( $R^2$ ) จากสมการที่ 3.2 เป็นตัวชี้วัดการเข้ากันได้ของข้อมูลจากการทดลองกับแบบจำลองไอโซเทิร์มที่เลือกใช้ โดยกำหนดภาวะการดูดซับดังนี้

ชนิดของตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.1
ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ	: จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.2
อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า	: 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร <sup>-3</sup>
ภาวะแห้ง	

ตารางที่ 3.2 แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ	สมการ
Langmuir	$q_e = q_m \frac{K_L P}{1 + K_L P}$
Freundlich	$q_e = k_f P^{n_f}$
Toth	$q_e = \frac{q_m K_T P}{[1 + (K_T P)^{n_t}]^{1/n_t}}$

โดยที่	$q_e$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$q_m$	คือ	ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ณ ภาวะสมดุล หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม
	$K_L$	คือ	ค่าคงที่ของแลงเมียร์ หน่วยเป็น บาร์ <sup>-1</sup>
	$P$	คือ	ความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ หน่วยเป็น บาร์
	$k_f, n_f$	คือ	ค่าคงที่ของฟรุนดลิช

$K_T$  คือ ค่าคงที่ของทอท หน่วยเป็น บาร์<sup>-1</sup>  
 $n_T$  คือ ค่าคงที่ของทอท

### 3.4.3 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับ ศึกษาที่ภาวะอุณหภูมิต่างกัน ที่อุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส นำผลการทดลองมาคำนวณหาค่าคงที่อุณหพลศาสตร์ ได้แก่ ค่ามาตรฐานเอนทัลปี (Standard Enthalpy :  $\Delta H^0$ ), ค่ามาตรฐานเอนโทรปี (Standard Entropy :  $\Delta S^0$ ) และพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibb's free energy :  $\Delta G^0$ ) คำนวณจากสมการของแวนท์ฮอฟ (Van't Hoff equation) ดังในสมการที่ 3.2

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (3.3)$$

โดยที่  $T$  คือ อุณหภูมิการดูดซับ หน่วยเป็น เคลวิน(K)

กำหนดภาวะการดูดซับดังนี้

ชนิดของตัวดูดซับ : จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.1

ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ : จากการศึกษาขั้นตอน 3.3.2

อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็ว  
ของแก๊สขาเข้า : 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup>

ภาวะแห้ง

## บทที่ 4

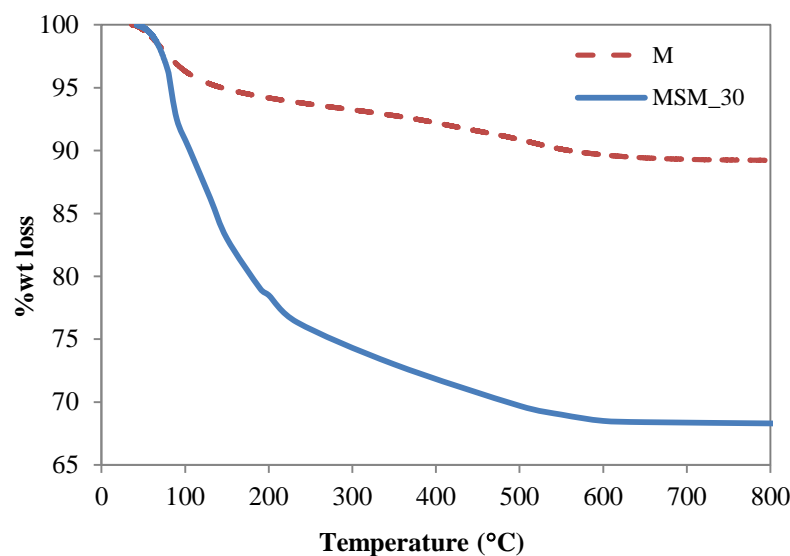
### ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้แสดงผลการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับสังเคราะห์ ฉะนั้นเนื้อหาจะถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ ส่วนแรกกล่าวถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์สังเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆได้แก่ TGA BET FT-IR XRD และ CHN ในส่วนที่สองอธิบายผลจากตัวแปรต่างๆต่อความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับสังเคราะห์ที่ได้แก่ชนิดของตัวดูดซับ ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า และความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า และส่วนสุดท้ายอธิบายพฤติกรรมดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับสังเคราะห์จากการศึกษาทางจลนพลศาสตร์การดูดซับ ไอโซเทิร์ม และอุณหพลศาสตร์

#### 4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับสังเคราะห์

##### 4.1.1 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับ (Thermogravimetric analysis, TGA)

เสถียรภาพทางความร้อนศึกษาที่อุณหภูมิ(Temperature)ตั้งแต่ 40 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส และร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก(%wt. loss) ตัวดูดซับทั้งก่อนและหลังดัดแปรพื้นผิวแสดงดังในรูปที่ 4.1 จากผลการวิเคราะห์ พบว่า การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนของตัวดูดซับก่อนดัดแปรเกิดขึ้นสองช่วง ช่วงแรกตั้งแต่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสถึง 150 องศาเซลเซียส เกิดการกำจัดน้ำออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ ในช่วงที่สองตั้งแต่ 150 องศาเซลเซียสขึ้นไป เป็นการกำจัดน้ำที่แทรกอยู่ในชั้นภายใน(interlayer)ของตัวดูดซับ และการกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างมอนต์-มอริลโลไนต์ผ่านปฏิกิริยาดีไฮดรอกซีเลชัน(Dehydroxylation,[48]) ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของตัวดูดซับก่อนการดัดแปรอยู่ที่ร้อยละ 10 สำหรับตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีน(MSM)พบว่า การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนแบ่งออกเป็นสามช่วงได้แก่ ช่วงแรกตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียสถึง 120 องศาเซลเซียสเป็นการคายน้ำและเอทานอลที่เหลืออยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ช่วงที่สองตั้งแต่ 120 องศาเซลเซียสถึง 200 องศาเซลเซียสเป็นการระเหยออกของMEA อันเนื่องมาจากจุดเดือดของ MEA ที่ 170 องศาเซลเซียส และช่วงที่สามตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาดีไฮดรอกซีเลชันในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์ และเกิดการระเหยออกของเอมีนที่แทรกอยู่ในชั้นภายใน(interlayer) ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียโดยรวมบนตัวดูดซับดัดแปรอยู่ที่ประมาณร้อยละ 32 ซึ่งมีค่ามากกว่าตัวดูดซับก่อนดัดแปร

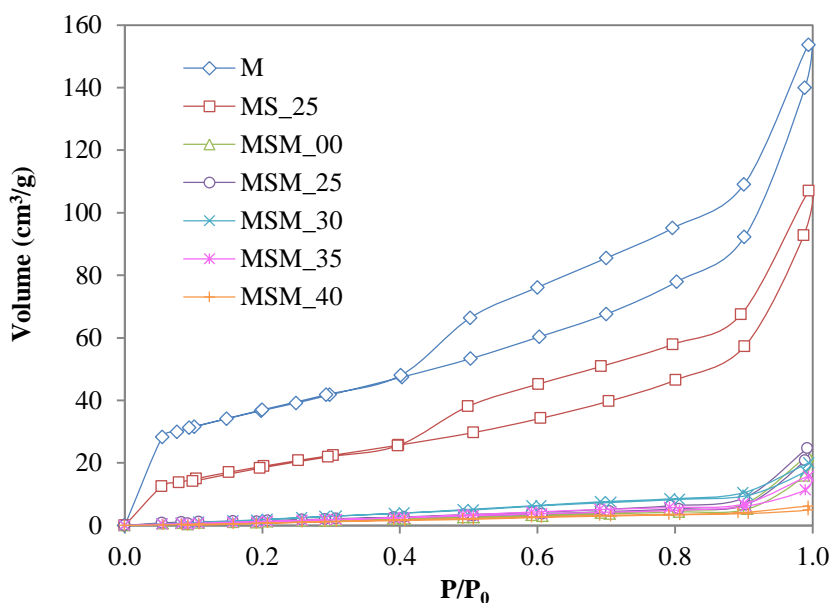


รูปที่ 4.1 เสถียรภาพทางความร้อนบนตัวดูดซับสังเคราะห์

#### 4.1.2 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ

##### (Brunauer-Emmett-Teller(BET) surface area)

ลักษณะของรูพรุนบนตัวดูดซับก่อนและหลังการดัดแปร ศึกษาด้วยไอโซเทอรั่มการดูดซับและคายไนโตรเจนแสดงในรูปที่ 4.2 จากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวดูดซับก่อนดัดแปร(M) ตัวดูดซับหลังดัดแปรด้วยเอมีน(MS) และตัวดูดซับปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีน(MSM) มีรูปแบบรูพรุนเป็น type IV คือ ลักษณะรูพรุนของตัวดูดซับเป็นแบบ Mesoporous[48] และจาก Hysteresis profile เป็นแบบ Type B บ่งบอกว่าโครงสร้างรูพรุนจัดเรียงตัวกันเป็นชั้น[49] คุณสมบัติความพรุนของตัวดูดซับสังเคราะห์แสดงดังในตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบตัวดูดซับก่อนดัดแปร(M) และตัวดูดซับที่ดัดแปรด้วยเอมีน(MS) จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่า พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เป็นการยืนยันว่า MEA ถูกตรึงบนพื้นผิว และในรูพรุนของตัวดูดซับแล้ว เมื่อเปรียบเทียบตัวดูดซับ M และตัวดูดซับ MSM ที่ไม่ตรึงเอมีนบนพื้นผิวพบว่า พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เกิดจากการปรับปรุงพื้นผิวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยสารละลายเบส ช่วยพาไอออนประจุบวกขนาดใหญ่ที่อยู่ในโครงสร้างละลายผ่านสารละลายออกมา จึงทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อนำตัวดูดซับMSMตรึงด้วยเอมีนพบว่า มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณเอมีนที่เพิ่มขึ้น แสดงถึงปริมาณเอมีนบนตัวดูดซับมีมากขึ้นตามการปริมาณเอมีนที่ใช้ในการตรึง



รูปที่ 4.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับและคายไนโตรเจนของตัวดูดซับ

โดยที่	M	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร
	MS_25	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
	MSM_00	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยเอมีน
	MSM_25	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
	MSM_30	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
	MSM_35	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก
	MSM_40	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของรูพรุนบนตัวดูดซับสังเคราะห์

ตัวดูดซับสังเคราะห์	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (nm)
M	114.00	0.212	7.43
MS_25	72.50	0.144	5.92
MSM_00	18.34	0.033	16.37
MSM_25	11.76	0.025	16.21
MSM_30	8.29	0.021	9.11
MSM_35	7.62	0.012	6.64
MSM_40	6.81	0.007	3.79

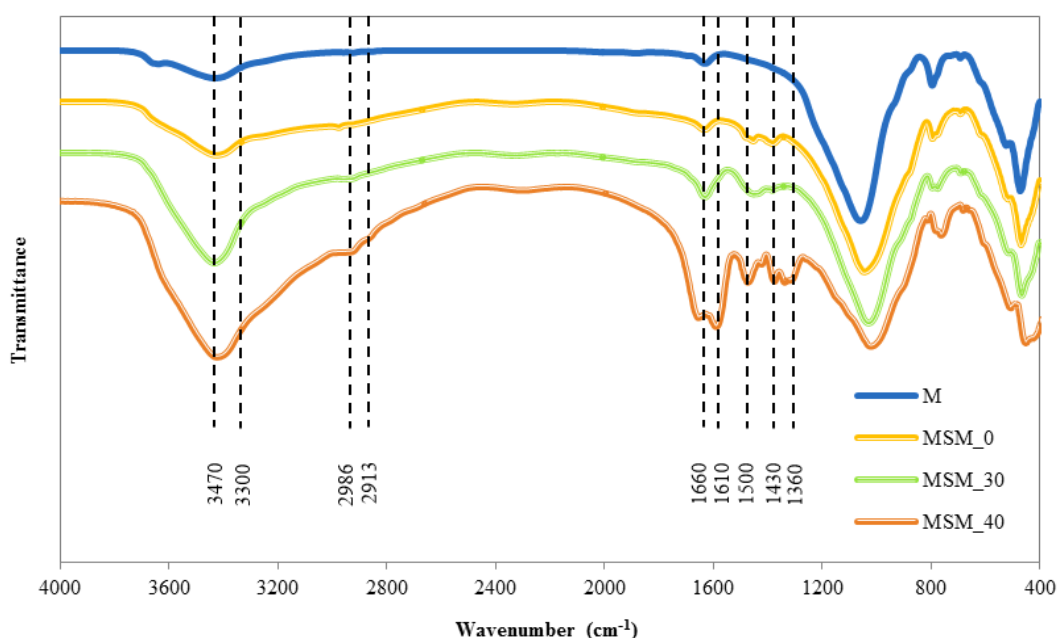
- โดยที่ M คือ มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร
- MS\_25 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
- MSM\_00 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นที่ผิวที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยเอมีน
- MSM\_25 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นที่ผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
- MSM\_30 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นที่ผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
- MSM\_35 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นที่ผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก
- MSM\_40 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นที่ผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

#### 4.1.3 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ

(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)

FT-IR สเปกตรัมของตัวดูดซับก่อน และหลังดัดแปรด้วยเอมีนปริมาณต่างๆกันแสดงในรูปที่ 4.3 จากผลการวิเคราะห์พบว่าตัวดูดซับแต่ละตัวแสดงพีคแถบกว้างที่มีตำแหน่งกลางความถี่

(wavenumber) 3470 เซนติเมตร<sup>-1</sup> และพีคยอดแหลมที่ความถี่ 1660 เซนติเมตร<sup>-1</sup> แสดงถึงหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวตัวดูดซับ[50, 51] เมื่อตรึงเอมีนบนตัวดูดซับพบว่า มียอดพีคปรากฏที่ตำแหน่งความถี่ 3300 เซนติเมตร<sup>-1</sup> โดยยอดนี้แสดงถึงการยืด-หดของพันธะ N-H บนหมู่เอมีโน นอกจากนี้ที่ความถี่ 1610 และ 1500 เซนติเมตร<sup>-1</sup> พบยอดพีคของการงอแบบสมมาตรและอสมมาตรของเอมีนปฐมภูมิ[52] และยอดพีคขนาดเล็กที่ความถี่ 2986 และ 2913 เซนติเมตร<sup>-1</sup> เป็นการยืด-หดแบบสมมาตรและอสมมาตรของหมู่ CH<sub>2</sub> บนสายโซ่แอลคิลบน MEA อีกทั้งพบพีคแถบกว้างที่บริเวณความถี่ 1430 และ 1360 เซนติเมตร<sup>-1</sup> ซึ่งเป็นกลุ่มพันธะ -H<sub>2</sub>C-OH บน MEA[53] จาก FT-IR สเปกตรานี้แสดงให้เห็นว่า การตรึงเอมีนบนตัวดูดซับประสบความสำเร็จ เป็นการเพิ่มหมู่เอมีนให้กับตัวดูดซับ และมีมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณเอมีนลงบนตัวดูดซับ



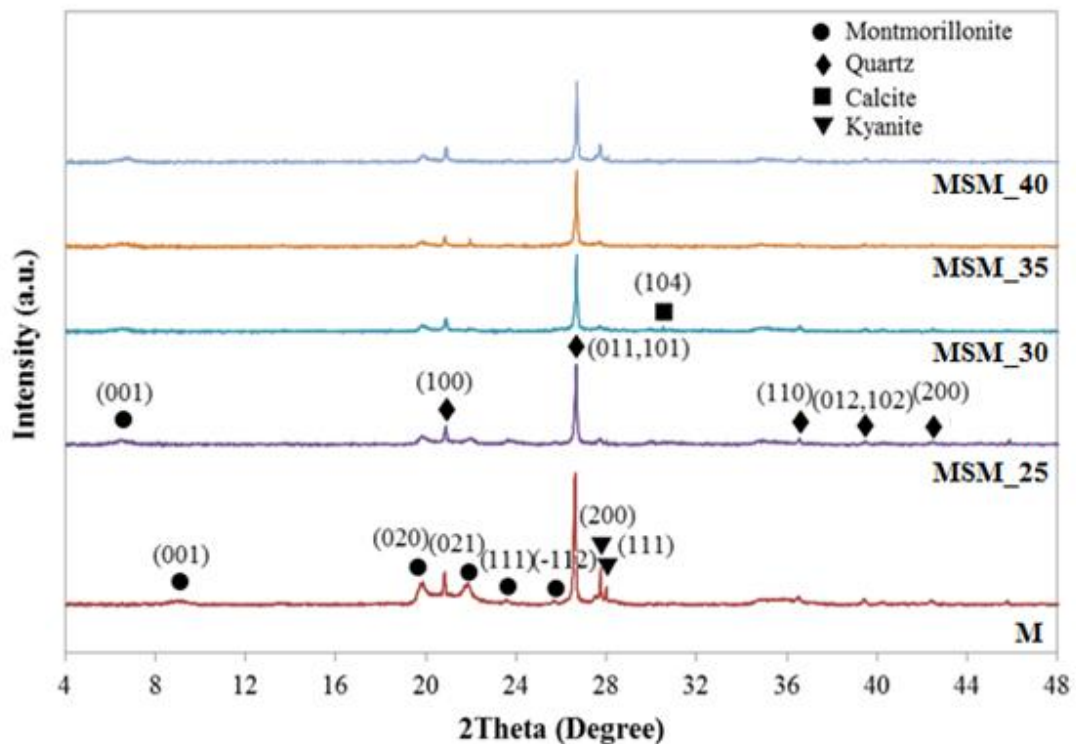
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรานี้ของตัวดูดซับ

โดยที่	M	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร
	MSM_00	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยเอมีน
	MSM_30	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
	MSM_40	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



#### 4.1.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ (X-ray diffraction, XRD)

รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับก่อนและหลังตรึงด้วยเอมีนที่ปริมาณต่างกันแสดงดังในรูปที่ 4.4 จากผลวิเคราะห์พบว่า ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการตัดแปร(M) มีส่วนประกอบของแร่สี่ชนิดด้วยกันคือ มอนต์มอริลโลไนต์(Montmorillonite) ควอตซ์(Quartz) แคลไซต์(Calcite) และคานไนต์(Kyanite) โครงสร้างของแร่แสดงโดยจุดยอดที่องศาต่างๆของดินดังในรูปที่ 4.4 จุดยอดที่  $2\theta$  เท่ากับ 9.1 แสดงถึงโครงสร้างผลึกของมอนต์มอริลโลไนต์ โดยมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งจะปรากฏพีคของมอนต์มอริลโลไนต์ตำแหน่งที่  $2\theta$  เท่ากับ 8.9 ดีกรี[48] หลังการปรับปรุงพื้นผิวและตรึงด้วยด้วยเอมีน พบว่าองศาเลื่อนไปตำแหน่ง  $2\theta$  ค่าน้อยลง โดยเลื่อนจาก 9.1 องศาไป ณ บริเวณที่ 6.6 องศา แสดงให้ทราบว่า การตัดแปรพื้นผิวทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งค่าความเข้ม(Intensity)ของตัวดูดซับที่ผ่านการตัดแปรมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับที่ไม่ผ่านการตัดแปรเนื่อง แสดงให้เห็นว่าการตัดแปรพื้นผิวทำให้ความเป็นออสซิลฐานเพิ่มขึ้น กล่าวได้ว่าการตัดแปรพื้นผิวประสบผลสำเร็จ ส่วนพีคของมอนต์มอริลโลไนต์เลื่อนไปยังค่า  $2\theta$  ที่มีองศาน้อยลง บ่งบอกถึงรูพรุนถูกขยายออกจากการแทรกตัวหมู่ไฮดรอกซิลและเอมีน โดยจากคำอธิบายนี้สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ที่ได้จากเทคนิค BET ที่ว่าเอมีนถูกตรึงบนพื้นผิวและในรูพรุนของตัวดูดซับสังเคราะห์



รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของตัวดูดซับ

โดยที่	M	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร
	MSM_25	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
	MSM_30	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
	MSM_35	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก
	MSM_40	คือ	มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

#### 4.1.5 การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับ (CHN elemental analysis, CHN)

การวิเคราะห์ร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจนบนตัวดูดซับก่อนและหลังดัดแปรด้วยเอมีน และปริมาณหมู่เอมีนบนตัวดูดซับโดยใช้เทคนิค CHN elemental analysis แสดงในตารางที่ 4.2 ตัวดูดซับก่อนการดัดแปรด้วยเอมีน(M) มีร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน น้อยมากเนื่องจากโครงสร้างหลักของตัวดูดซับ(M) เป็นอะลูมิเนียมซิลิเกต จึงมีธาตุเหล่านี้ค่อนข้างน้อย แต่หลังการตรึงด้วยเอมีนจะได้ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีน(MS) และตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีน(MSM) มีร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนสูงขึ้นตามปริมาณเอมีนที่ใช้ดัดแปร เป็นการยืนยันว่าเอมีนได้ถูกดัดแปรอยู่บนตัวดูดซับแล้ว เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับสองชนิดคือ ตัวดูดซับMS และ ตัวดูดซับMSM ที่มีการตรึงปริมาณเอมีนที่ต่างกัน พบว่าร้อยละปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับสังเคราะห์ใกล้เคียงกับร้อยละเอมีนที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค CHN แสดงให้ทราบว่าไม่มีการสูญเสียของเอมีนระหว่างขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับสังเคราะห์

ตารางที่ 4.2 ร้อยละองค์ประกอบธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจนของตัวดูดซับสังเคราะห์

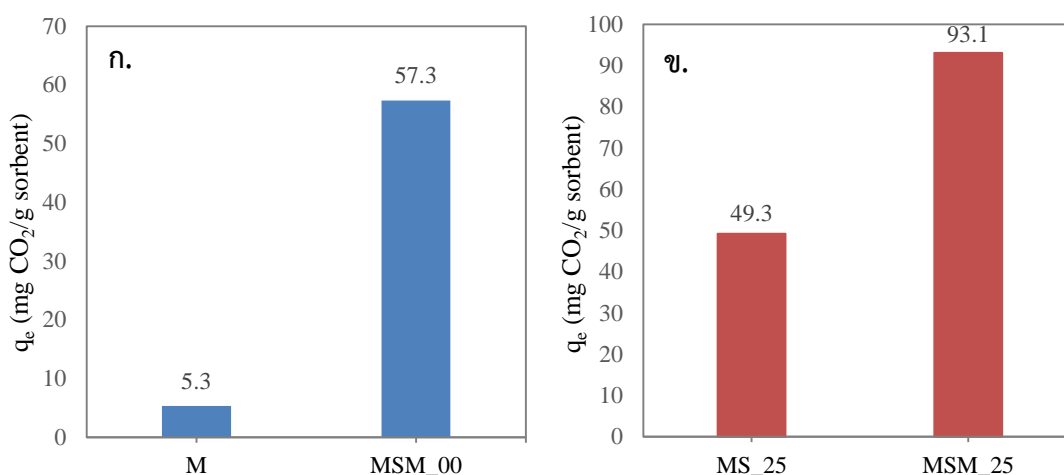
ตัวดูดซับ	%C	%H	%N	ปริมาณหมู่เอมีน mmol/g	ปริมาณเอมีน ร้อยละโดยน้ำหนัก
M	0.133	0.516	0	0	0
MS_25	6.655	2.499	5.818	4.16	25.38
MS_30	7.101	2.811	6.8	4.86	29.67
MSM_00	1.005	0.627	0	0	0
MSM_25	5.42	4.154	5.855	4.18	25.54
MSM_30	7.62	5.165	6.988	4.99	30.49
MSM_35	7.183	4.624	8.02	5.73	34.99
MSM_40	8.126	4.711	8.985	6.42	39.20

- โดยที่ M คือ มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปร
- MS\_25 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
- MS\_30 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
- MSM\_00 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยเอมีน
- MSM\_25 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก
- MSM\_30 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก
- MSM\_35 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก
- MSM\_40 คือ มอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนที่ปริมาณตรึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

## 4.2 การศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

### 4.2.1 ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การทดลองระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับชนิดของแข็ง ทำโดยใช้ตัวดูดซับสี่ชนิดได้แก่ 1.มอนต์มอริลโลไนต์(M) 2.ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสในเอทานอล(MSM\_00) 3.มอนต์มอริลโลไนต์ตรึงด้วยเอมีนร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก(MS\_25) และ 4.ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก(MSM\_25) ภาวะที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือ อุณหภูมิการดูดซับ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าที่ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคลุในฮีเลียม ในภาวะแห้ง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

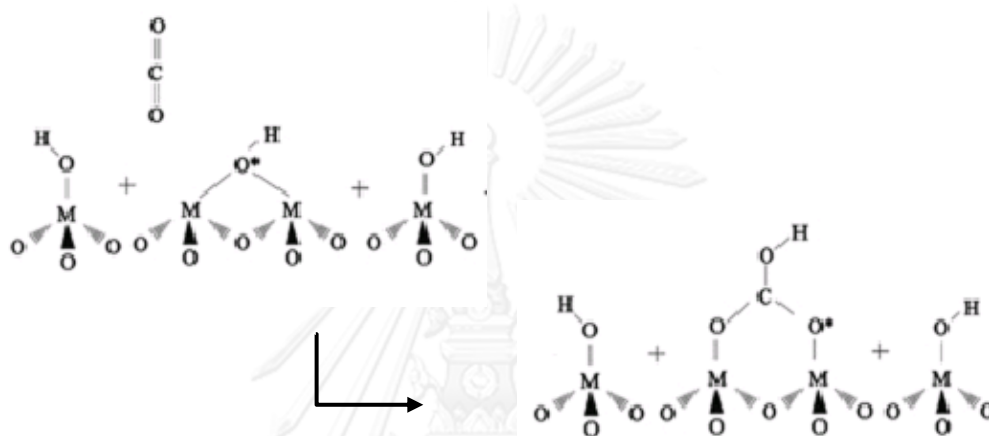
บนตัวดูดซับก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบส

(ก. ก่อนการตรึงเอมีน ข. หลังการตรึงเอมีน)

[ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคลุในฮีเลียม]

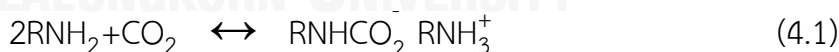
จากรูปที่ 4.5 พบว่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ภาวะสมดุลบนตัวดูดซับชนิด M โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวดูดซับ M และ MSM พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับด้วยสารละลายเบสในเอทานอลทำให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 5.34 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ(M) เป็น 57.33 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ(MSM\_00) หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 11 เท่า และเมื่อทำการตรึงเอมีนบนตัวดูดซับที่ปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนักจะได้ตัวดูดซับ MS\_25 และตัว

ดูดซับ MSM\_25 พบว่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 49.27 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 93.06 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ทั้งนี้มอนต์มอริลโลไนต์ที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างต่ำ เมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสในเอทานอลทำให้มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลบนตัวดูดซับเพิ่มขึ้นแสดงดังในผลจากเทคนิค FT-IR (หัวข้อ 4.1.3) โดยเปลี่ยนพื้นผิวออกไซด์บนตัวดูดซับเป็นหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยผ่านปฏิกิริยาการสร้างไบคาร์บอเนต (Bicarbonate formation,[54]) ดังแสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การเกิดปฏิกิริยาการสร้างไบคาร์บอเนตบนพื้นผิวไฮดรอกซิล  
(ดัดแปลงจาก[54])

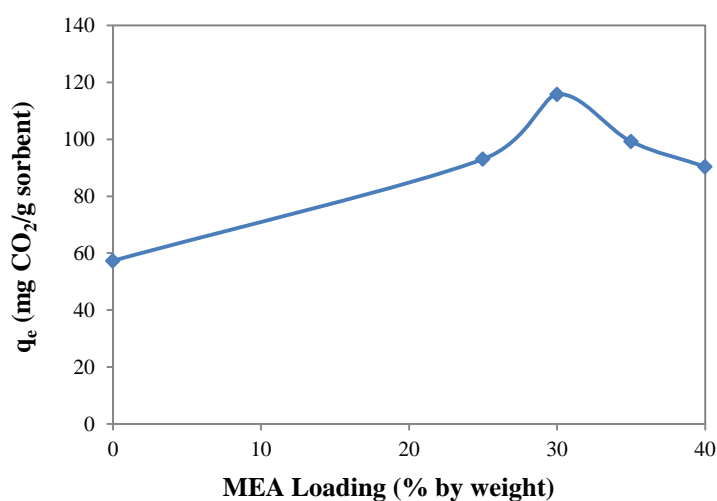
เมื่อทำการตรึงเอมีนบนตัวดูดซับ พบว่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นประมาณ 9 เท่าเมื่อทำการตรึงเอมีนบนตัวดูดซับMปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก(MS\_25) ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นประมาณ 1.6 เท่าเมื่อทำการตรึงเอมีนบนตัวดูดซับMSM ปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก(MSM\_25) เนื่องจากเอมีนบนพื้นผิว เป็นหมู่ฟังก์ชันที่สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ เกิดสารประกอบคาร์บาเมต (Carbamate,[32]) ดังแสดงในสมการที่ (4.1)



เมื่อทำการเปรียบเทียบความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวดัดแปรด้วยเอมีนปริมาณร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก(MSM\_25)กับตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์(M)พบว่า ความจุการดูดซับเพิ่มขึ้นประมาณ 17.5 เท่าเทียบกับความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ(M) แสดงให้ทราบว่าวิธีการที่ใช้ดัดแปรตัวดูดซับให้มีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีความเหมาะสมแล้ว ดังนั้นตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสในเอทานอล(MSM)ที่มีการตรึงเอมีน จะถูกศึกษาผลของตัวแปรอื่นๆต่อความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในการทดลองลำดับถัดไป

#### 4.2.2 ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิว

การศึกษาปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิว(MSM)มีค่าเท่ากับร้อยละ 0 25 30 35 และ 40 โดยน้ำหนักตามลำดับ ทำการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคูลในฮีเลียม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิว(MSM)ที่มีการตรึงเอมีนปริมาณ 0 25 30 35 และ 40 โดยน้ำหนักตามลำดับ

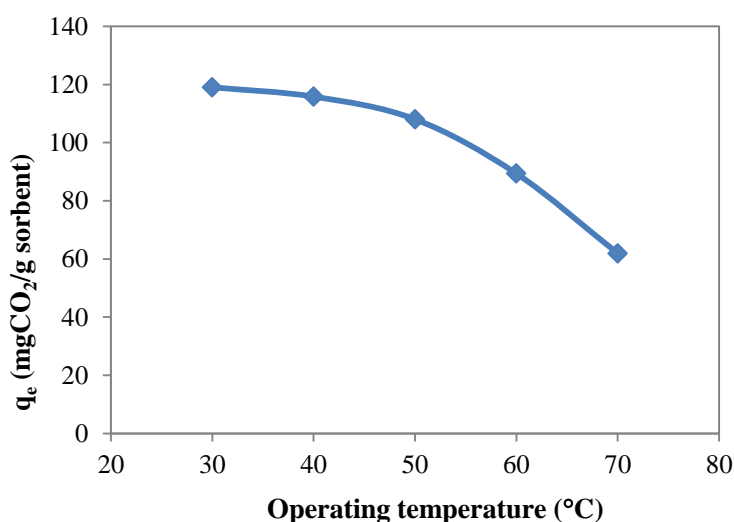
[ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคูลในฮีเลียม]

เมื่อทำการตรึงเอมีนบนตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิว(MSM)จนถึงปริมาณเอมีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่าความจุการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 57 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ เป็น 115 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะหมู่ฟังก์ชันเอมีนสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในสมการที่ (4.1) โดยที่อัตราส่วนการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 2:1 จะเกิดสารประกอบคาร์บาเมต[32] เมื่อทำการตรึงเอมีนเพิ่มขึ้นจากปริมาณเอมีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เป็นที่ร้อยละ 35 โดยน้ำหนักและที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักตามลำดับจะพบว่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงจาก 120 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 99 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 90 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนของตัวดูดซับที่ตรึงเอมีนที่มีมากเกินไปมีขนาดเล็กดังแสดงในตารางที่ 4.1 นั้นหมายถึงปริมาณเอมีนที่มากเกินไปกีดขวางการแพร่กระจายของคาร์บอนไดออกไซด์

เพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับเอมีนที่อยู่ในรูพรุน ทำให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยรวมลดลง จากผลการทดลองนี้จึงทำให้ทราบว่าปริมาณเอมีนที่เหมาะสมบนตัวดูดซับมีค่าเท่ากับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการทดลองในลำดับถัดไป จะเลือกใช้ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวที่มีการตรึงเอมีนที่ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก(MSM\_30)

#### 4.2.3 อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาผลกระทบต่อความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ที่อุณหภูมิต่างกันตั้งแต่ 30-70 องศาเซลเซียส ใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าที่ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคูณในฮีเลียม ในภาวะแห้ง ผลการทดลองแสดงรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

บนตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวที่ตรึงเอมีนที่ปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก(MSM\_30)

ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียส

[ทำการดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8

กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ใน

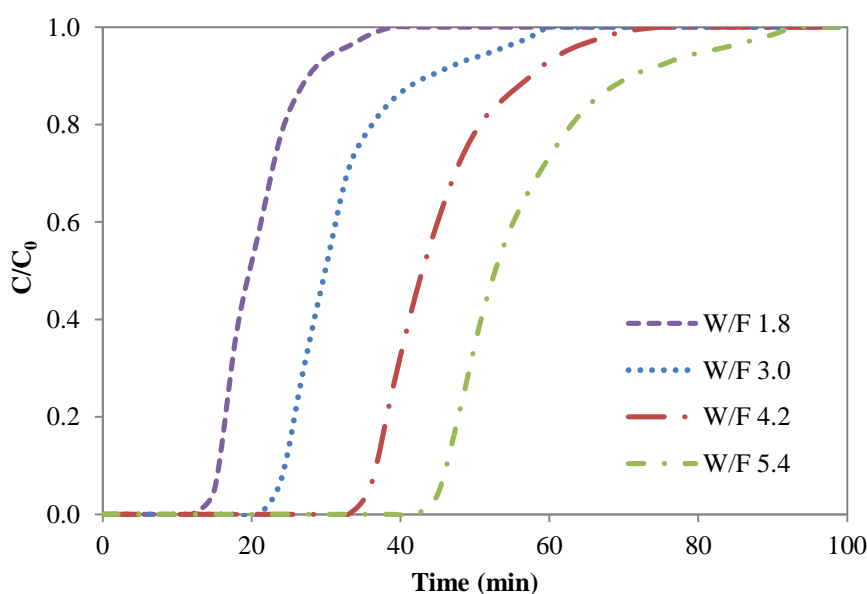
แก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคูณในฮีเลียม]

จากผลการทดลองพบว่า ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 มีค่าลดลงจาก 120 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียสเป็น 115 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส 109 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส 89 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส และ 62 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ

ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน[55, 56] เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์คาร์บาเมตลดลง จึงส่งผลให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

#### 4.2.4 อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า

การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า (W/F Ratio) ในช่วง 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ถึง 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ต่อความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ภายใต้ภาวะการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคูณในฮีเลียม ผลการทดลองจะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (Time) ซึ่งใช้หน่วยนาที (min) กับสัดส่วนความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาออก ณ เวลาใด ๆ กับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ( $C/C_0$ ) และเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า เส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ดังแสดงในรูปที่ 4.9

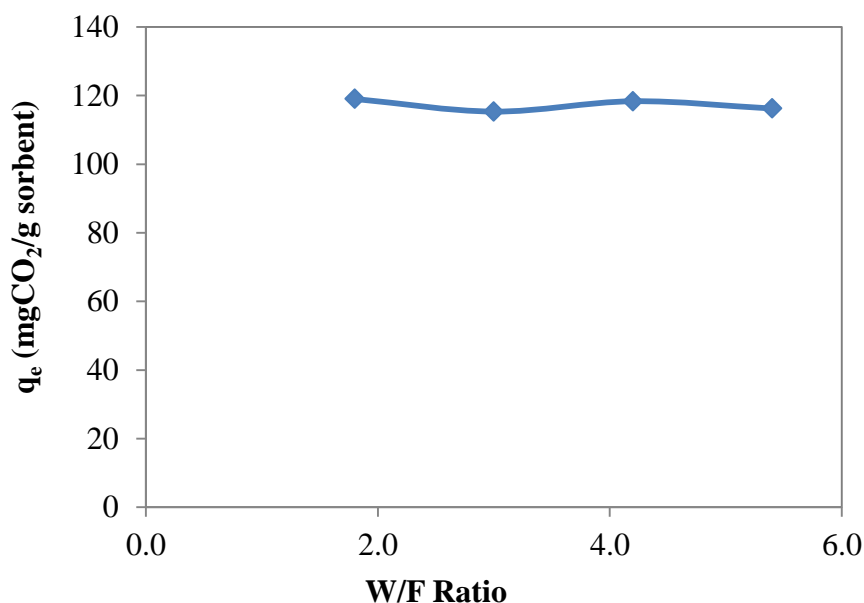


รูปที่ 4.9 เส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curve) ของตัวดูดซับ MSM\_30 ในช่วงอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า (W/F) ตั้งแต่ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ถึง 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup>

[ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคูณในฮีเลียม]



จากผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการปรากฏตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ใน แก๊สขาออก(Breakthrough time)จะนานขึ้นเมื่อเพิ่ม W/F โดยที่ใช้เวลา 15 นาทีเมื่อใช้ W/F เท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> 24 นาทีเมื่อใช้ W/F เท่ากับ 3 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> 36 นาทีเมื่อใช้ W/F เท่ากับ 4.2 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> และ 45 นาทีเมื่อใช้ W/F เท่ากับ 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ตามลำดับ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า( $C/C_0=1$ ) จะต้องเวลาเท่ากับ 39 นาทีสำหรับ W/F เท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> 60 นาทีสำหรับ W/F เท่ากับ 3 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> 79 นาทีสำหรับ W/F เท่ากับ 4.2 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> และ 90 นาทีสำหรับ W/F เท่ากับ 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ตามลำดับ เมื่อพิจารณา ณ ตำแหน่งที่มีค่า( $C/C_0$ )คงที่ใดๆ เวลาที่ใช้ในการ ดูดซับจะนานขึ้นเมื่อทำการเพิ่ม W/F เช่น  $C/C_0$  เท่ากับ 0.6 ระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 21 นาทีสำหรับ W/F เท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> 33 นาทีสำหรับ W/F เท่ากับ 3 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> 45 นาทีสำหรับ W/F เท่ากับ 4.2 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> และ 57 นาที สำหรับ W/F เท่ากับ 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อพิจารณา ณ ที่ เวลาในการดูดซับคงที่ ณ ที่เวลาใดๆ ค่า  $C/C_0$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่า W/F ตัวอย่างเช่น ณ ที่เวลาการ ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 40 นาที ค่า  $C/C_0$  มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ W/F เท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ค่า  $C/C_0$  มีค่าเท่ากับ 0.85 เมื่อ W/F เท่ากับ 3 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ค่า  $C/C_0$  มีค่าเท่ากับ 0.45 เมื่อ W/F เท่ากับ 4.2 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> และค่า  $C/C_0$  มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ W/F เท่ากับ 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เพราะการเพิ่ม W/F เป็นการ เพิ่มเวลาการสัมผัสกันระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวดูดซับมากขึ้น จึงใช้เวลาในการดูดซับนานขึ้น อีกทั้งการเพิ่ม W/F ไม่ส่งผลกับความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยมีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยประมาณ 117 มิลลิกรัมต่อกรัมในช่วง W/F 1.8 ถึง 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup>

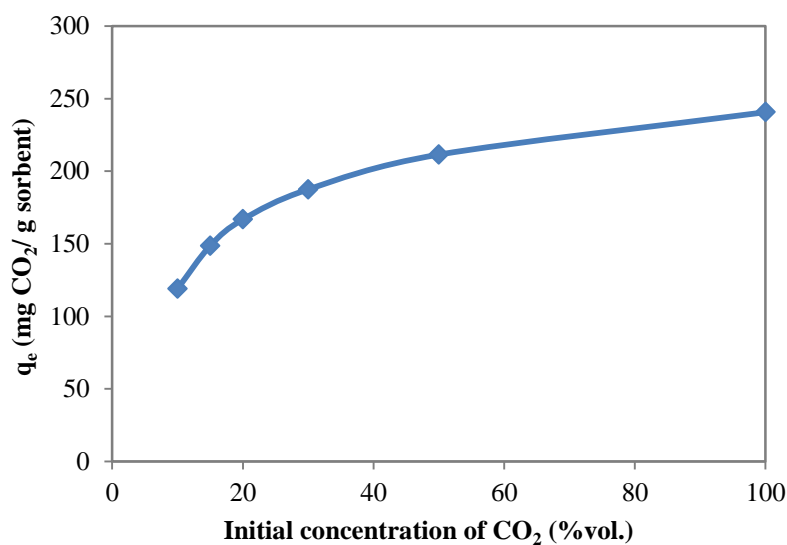


**รูปที่ 4.10** ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ในช่วงอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 ถึง 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup>

[ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคูณในสี่เหลี่ยม]

#### 4.2.5 ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า

การศึกษาผลของร้อยละความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า (Initial concentration of CO<sub>2</sub>, %vol.) ต่อความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับชนิด MSM\_30 ที่อุณหภูมิการดูดซับเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10 โดยปริมาตรถึงร้อยละ 100 โดยปริมาตร อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าคงที่ที่ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30

เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า  
มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10 โดยปริมาตรถึงร้อยละ 100 โดยปริมาตรคูณในฮีเลียม

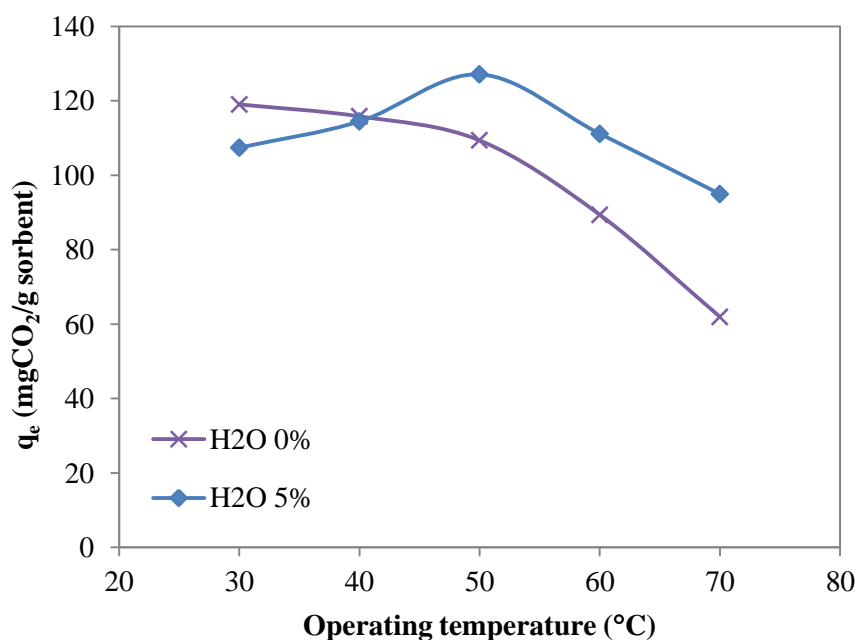
[ทำการดูดซับที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊ส  
ขาเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup>]

จากผลการทดลองพบว่า ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า โดยมีความจุการดูดซับสูงสุดที่ 240 มิลลิกรัมต่อกรัมเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าเท่ากับร้อยละ 100 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าทำให้ความจุการดูดซับสูงขึ้นเนื่องจาก โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์มีมากขึ้น จึงมีโอกาสมที่โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ยึดติดกันเองได้ด้วยแรงอ่อนๆ ก่อให้เกิดการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer adsorption)[57] ความจุการดูดซับจึงเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

#### 4.2.6 ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า

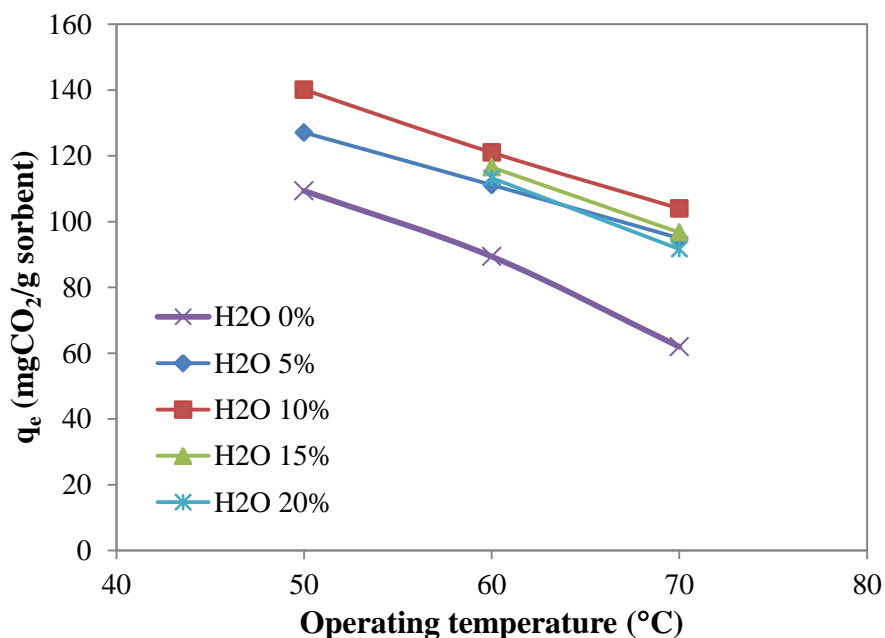
การศึกษาเปรียบเทียบความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ MSM\_30 ในภาวะที่ไม่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้ากับภาวะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าที่ระดับความเข้มข้นเท่ากับร้อยละ 5 โดยปริมาตร โดยกำหนดช่วงอุณหภูมิการดูดซับ 30 ถึง 70 องศาเซลเซียสที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความ

เข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12 นอกจากนี้ยังศึกษาผลของความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าต่อความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิต่างกันต่อค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ศึกษาในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ 30-70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ  $1.8 \text{ กรัม}\cdot\text{วินาที}\cdot\text{เซนติเมตร}^{-3}$  ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม และความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าศึกษาในช่วงร้อยละ 0 โดยปริมาตร ถึงร้อยละ 20 โดยปริมาตร ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13



**รูปที่ 4.12** ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ในภาวะไม่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า และภาวะมีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียส

[ทำการดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ  $1.8 \text{ กรัม}\cdot\text{วินาที}\cdot\text{เซนติเมตร}^{-3}$  ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม]



**รูปที่ 4.13** ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ในภาวะมีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าความเข้มข้นร้อยละ 0 โดยปริมาตร ถึงร้อยละ 20 โดยปริมาตร ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียส [ทำการดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคลในฮีเลียม]

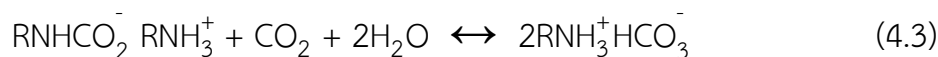
จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.12 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าจากร้อยละ 0 โดยปริมาตรเป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตรพบว่า ในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส ในภาวะที่มีไอน้ำความจุการดูดซับลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะไม่มีไอน้ำ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจาก 40 องศาเซลเซียสไปจนถึง 70 องศาเซลเซียสพบว่า ค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะมีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้ามีค่าสูงกว่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะไม่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า โดยค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะไม่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการดูดซับสูงขึ้น แต่สำหรับในภาวะมีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตรนั้น มีค่าสูงขึ้นจาก 107 มิลลิกรัมต่อกรัม ถึง 127 มิลลิกรัมต่อกรัมเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจาก 30 องศาเซลเซียสไป 50 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับต่อไปจาก 50 องศาเซลเซียส ไปถึง 70 องศาเซลเซียสพบว่า ค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 127 มิลลิกรัมต่อกรัมถึง 95 มิลลิกรัมต่อกรัม ในภาวะที่ไม่มีน้ำอุณหภูมิการดูดซับที่ทำให้ความจุการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 30 องศา

เซลเซียส ในขณะที่อุณหภูมิที่ให้ความจุการดูดซับสูงสุดในภาวะที่มีน้ำอยู่ที่ 50 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะที่มีน้ำและไม่มีน้ำต่างกัน ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy :  $E_a$ ) ของปฏิกิริยาไม่เท่ากัน โดยที่ปฏิกิริยาสร้างไบคาร์บอเนตในภาวะที่มีน้ำมีพลังงานก่อกัมมันต์สูงกว่าปฏิกิริยาสร้างคาร์บาเมตในภาวะที่ไม่มีน้ำ[58] ในภาวะที่มีน้ำจึงต้องการอุณหภูมิการดูดซับสูงขึ้นเพื่อเกิดปฏิกิริยา แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงสุดความจุการดูดซับลดลงเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ทั้งนี้สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้อีกว่า ในช่วงแรก ที่ความจุการดูดซับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมินั้น เกิดจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้โมเลกุลของแก๊สเกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนในตัวดูดซับได้เร็วขึ้น กล่าวคือ ในอุณหภูมิการดูดซับ 30 องศาเซลเซียสถึง 50 องศาเซลเซียสเป็นผลของจลนพลศาสตร์มากกว่าผลของอุณหพลศาสตร์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับต่อไปจาก 50 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียส ความจุการดูดซับลดลงตามอุณหภูมิเป็นผลมาจากผลของอุณหพลศาสตร์ส่งผลมากกว่าผลของจลนพลศาสตร์[59]

จากการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.13 ทำให้ทราบผลของความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าต่อความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับ 50 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรคูณในฮีเลียม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าจากร้อยละ 0 โดยปริมาตรสู่ร้อยละ 5 10 15 และ 20 โดยปริมาตรตามลำดับนั้นจะต้องเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับจาก 30 องศาเซลเซียสเป็นในช่วง 50 องศาเซลเซียสถึง 70 องศาเซลเซียสเนื่องจากที่ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยปริมาตรไม่สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำได้ เนื่องจากไอน้ำในแก๊สผสมเกิดการควบแน่นทำให้เกิดเป็นหยดน้ำทำให้ตัวดูดซับเปียกและจับตัวกันเป็นก้อน ไม่เหมาะกับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงต้องทำที่อุณหภูมิการดูดซับมากกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในเครื่องระเหยน้ำที่ความเข้มข้นต่างๆเพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำเกิดการควบแน่น

จากรูปที่ 4.13 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าถึงระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรจะทำให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 109 มิลลิกรัมต่อกรัมในภาวะที่ไม่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า และ 127 มิลลิกรัมต่อกรัมในภาวะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าปริมาณร้อยละ 5 โดยปริมาตร เป็น 140 มิลลิกรัมต่อกรัมในภาวะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าปริมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตรที่อุณหภูมิการดูดซับ 50 องศาเซลเซียสตามลำดับ และที่อุณหภูมิการดูดซับ 60 องศาเซลเซียสความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 89 มิลลิกรัมต่อกรัมในภาวะที่ไม่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า และ 111 มิลลิกรัมต่อกรัมในภาวะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าปริมาณร้อยละ 5 โดยปริมาตร เป็น 121 มิลลิกรัมต่อกรัมในภาวะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าปริมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตรตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากน้ำมีส่วนช่วยทำให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากในภาวะที่ไม่มีไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยาเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยากันด้วยอัตราส่วน 2:1 ตามลำดับดังในสมการที่ (4.1) แต่ในภาวะที่มีน้ำ เอมีน คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเข้าทำปฏิกิริยากันด้วยการสร้างสารประกอบไบคาร์บอเนต (bicarbonate formation,[22]) ซึ่งทำให้อัตราส่วนเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าทำปฏิกิริยา

เหลือเพียง 1:1 ดังแสดงในสมการที่ (4.2) อีกทั้งสารประกอบคาร์บาเมตสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เพื่อสร้างไบคาร์บอเนตดังแสดงในสมการที่ (4.3)



เมื่อทำการเพิ่มปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าจากระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรเป็นร้อยละ 15 โดยปริมาตร และร้อยละ 20 โดยปริมาตรพบว่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจาก 121 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 116 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 113 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับที่อุณหภูมิการดูดซับ 60 องศาเซลเซียส และลดลงจาก 104 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าเท่ากับร้อยละ 10 โดยปริมาตร เป็น 97 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าเท่ากับร้อยละ 15 โดยปริมาตร และ 92 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าเท่ากับร้อยละ 20 โดยปริมาตรตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากปริมาณไอน้ำที่มากเกินไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ เกิดการกีดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้ส่งผลให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง[22]

### 4.3 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับ

#### 4.3.1 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ทำโดยเลือกแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ 3 แบบจำลองด้วยกันคือ 1. แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo 1<sup>st</sup> Order) 2. แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo 2<sup>nd</sup> Order) และ 3. แบบจำลองอาฟรามี่ (Avrami's equation) โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิต่างกันตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าที่ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าอยู่ที่ระดับร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูในฮีเลียม ในภาวะแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ต่างๆของแต่ละแบบจำลองพร้อมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ(R<sup>2</sup>) และค่าร้อยละความผิดพลาด(%Error)ที่ใช้เป็นตัวชี้วัดการเข้ากันได้ของแบบจำลองกับข้อมูลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

**ตารางที่ 4.3** แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส

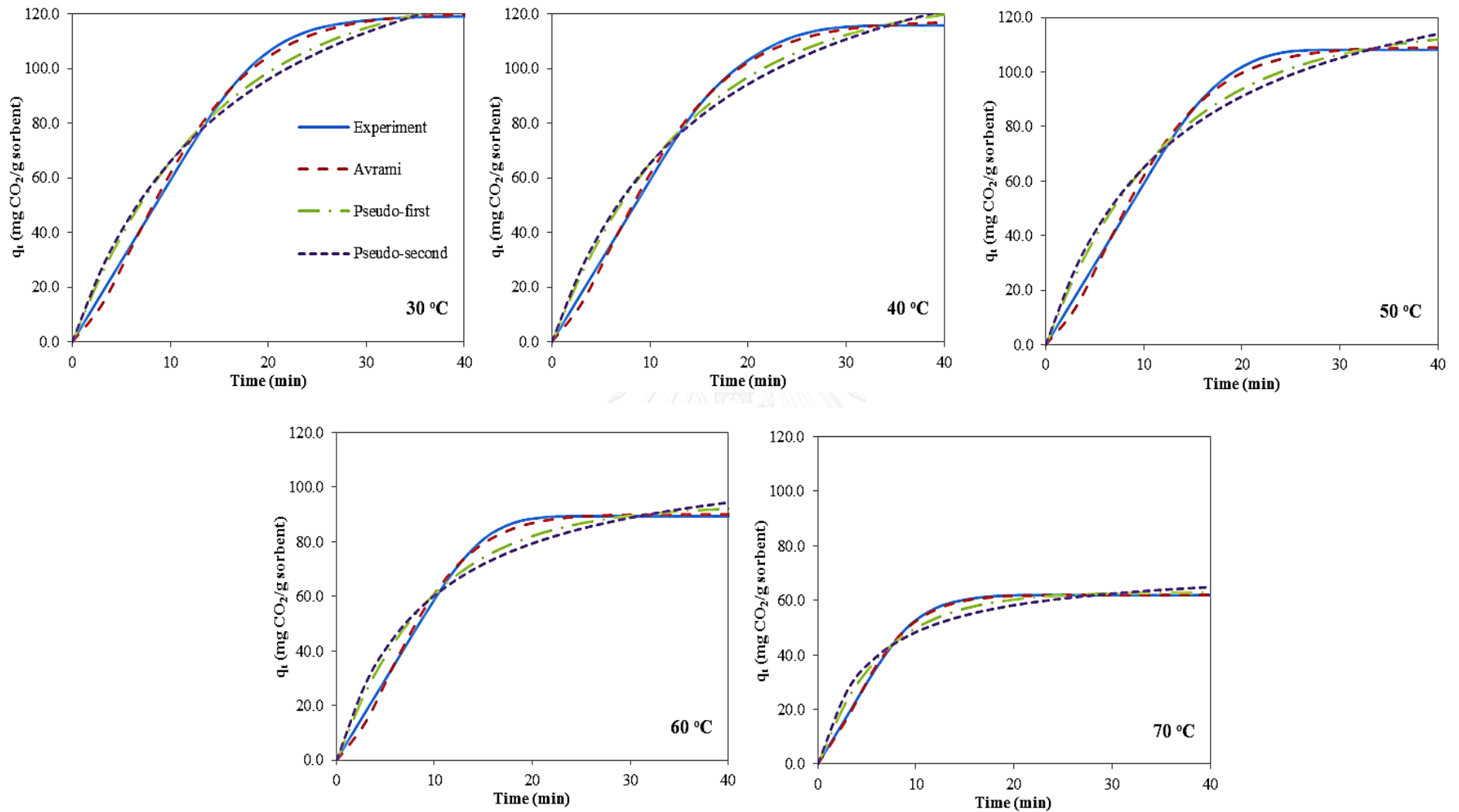
[ทำการดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรตุลในฮีเลียม ในภาวะแห้ง]

Temperature (°C)	30	40	50	60	70
$q_{e,exp}$ (mg·g <sup>-1</sup> )	119.03	115.81	108.05	89.38	61.94
Pseudo 1 <sup>st</sup> order					
$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	0.0701	0.0722	0.0818	0.1055	0.1558
$q_{e,calc}$ (mg·g <sup>-1</sup> )	130.7	126.7	116.4	93.7	63.2
$R^2$	0.9791	0.9805	0.9757	0.9728	0.9828
%Error	14.09	13.65	14.82	14.07	9.64
Pseudo 2 <sup>nd</sup> order					
$k_2$ (g·mg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> ) × 10 <sup>4</sup>	3.38	3.67	4.89	9.31	26.56
$q_{e,calc}$ (mg·g <sup>-1</sup> )	176.7	170.0	152.3	116.2	73.2
$R^2$	0.9646	0.9655	0.9572	0.9488	0.9483
%Error	17.62	17.36	19.02	19.20	15.36
Avrami					
$k_a$ (min <sup>-1</sup> )	0.0803	0.0817	0.0893	0.1085	0.1532
$n_a$	1.495	1.472	1.547	1.564	1.472
$q_{e,calc}$ (mg·g <sup>-1</sup> )	120.2	117.1	109.1	89.9	62.1
$R^2$	0.9980	0.9983	0.9975	0.9974	0.9996
%Error	6.65	5.97	6.89	5.45	1.43



จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าคงที่จลนพลศาสตร์ของทั้งสามแบบจำลองเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ โดย  $k_1$  เป็นของแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม,  $k_2$  ของแบบจำลองอันดับสองเทียม และ  $k_a$  ค่าคงที่อาฟรามี) ซึ่งค่าคงที่เหล่านี้คือค่าคงที่อัตรา (rate constant) จึงมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมของแต่ละแบบจำลองด้วยค่า  $R^2$  และค่า %Error พบว่าแบบจำลองอาฟรามีมีค่า  $R^2$  สูงที่สุดและมีค่า %Error ต่ำที่สุด ในขณะที่รองลงมาคือ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม และแบบจำลองอันดับสองเทียม ตามลำดับ แต่ละแบบจำลองให้คำอธิบายที่ต่างกัน แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมใช้อธิบายว่า ขั้นตอนกำหนดอัตรา (rate limiting step) เป็นการแพร่ของแก๊สเข้าไปในตัวดูดซับ หรือการดูดซับเป็นแบบการดูดซับทางกายภาพ ในขณะที่แบบจำลองอันดับสองเทียมมีขั้นตอนกำหนดอัตราอยู่ที่การเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือการดูดซับเป็นแบบการดูดซับทางเคมี ในงานวิจัยที่ผ่านมาแบบจำลองอาฟรามีถูกใช้เพื่ออธิบายถึงการเติบโตของผลึก และการเปลี่ยนแปลงของเฟส[60] ถัดมานำไปใช้อธิบายในระบบการกำจัดสีย้อมประจุลบบนตัวดูดซับ[61] และปัจจุบันถูกใช้เพื่ออธิบายการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับของแข็ง อย่างเช่น ตัวดูดซับซิลิกาตัดแปรด้วยเอมีน[38] แบบจำลองอาฟรามีได้อธิบายถึงความซับซ้อนของระบบที่เกิดจากกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่มีมากกว่าหนึ่งกลไก หรือในระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยาหลายขั้นตอน อธิบายได้จากค่าคงที่อาฟรามี ( $k_a$ ) โดยทั่วไปจะมีค่าในช่วง 1-4 ถ้าค่า  $k_a$  เท่ากับหนึ่งแบบจำลองจะกลายเป็นแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม ซึ่งในระบบการดูดซับนี้ได้ค่า  $k_a$  ที่มีค่ามากกว่าหนึ่งทุกอุณหภูมิการดูดซับ แสดงให้เห็นถึงระบบเกิดความซับซ้อนอันเนื่องมาจากเหตุผลข้างต้นคือ มีปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งปฏิกิริยา โดยการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 มีการเกิดปฏิกิริยาทั้งการเกิดคาร์บาเมตระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ และการเกิดไบคาร์บอเนตจากหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวตัวดูดซับ อีกทั้ง การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับของแข็งชนิด MSM\_30 นี้ เป็นการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นพร้อมๆกัน[61]

เมื่อนำค่าคงที่ที่ได้จากแต่ละแบบจำลองมาคำนวณหาความจุการดูดซับของแต่ละแบบจำลอง แบบพล็อตกราฟเทียบความแม่นยำของแต่ละแบบจำลองที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ความจุการดูดซับที่คำนวณจากแบบจำลองอาฟรามีมีความใกล้เคียงจากค่าจริงมากที่สุด ถัดมาคือแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียมและแบบจำลองอันดับสองเทียมตามลำดับ



รูปที่ 4.14 ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM<sub>30</sub> ที่ได้จากการทดลอง ณ เวลาใดๆ ( $q_t$ ) เทียบค่าจากแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ในช่วงอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส

[ทำการดูดซับที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม ในภาวะแห้ง]

### 4.3.2 ไอโซเทิร์มการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ทำโดยเลือกแบบจำลองไอโซเทิร์มการดูดซับ 3 แบบจำลองได้แก่ 1. แบบจำลองไอโซเทิร์มแลงเมียร์ (Langmuir isotherm) 2. แบบจำลองไอโซเทิร์มฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) และ 3. แบบจำลองไอโซเทิร์มทอท (Toth isotherm) โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 30 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าที่ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าตั้งแต่ร้อยละ 10-100 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม ในภาวะแห้ง ค่าสัมประสิทธิ์จลนพลศาสตร์ต่างๆของแต่ละแบบจำลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

เมื่อพิจารณาการเข้ากันได้ของแบบจำลองไอโซเทิร์มกับข้อมูลการทดลองโดยใช้ตัวชี้วัดด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) และค่าร้อยละความผิดพลาด (%Error) พบว่า ข้อมูลการทดลองเข้ากันกับแบบจำลองไอโซเทิร์มทอทมากที่สุด รองลงมาคือแบบจำลองไอโซเทิร์มแลงเมียร์ และลำดับสุดท้ายแบบจำลองไอโซเทิร์มฟรุนดลิช ในแต่ละไอโซเทิร์มใช้อธิบายพฤติกรรมการดูดซับแตกต่างกัน โดยที่แบบจำลองไอโซเทิร์มแลงเมียร์ ใช้อธิบายการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous surface) ถูกจำกัดด้วยการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) และให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณที่อุณหภูมิคงที่ [39] แบบจำลองไอโซเทิร์มฟรุนดลิชอธิบายถึงโมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถยึดติดกันด้วยแรงอ่อนๆ เกิดเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption, [40]) และแบบจำลองไอโซเทิร์มทอทเป็นการปรับปรุงมาจากแบบจำลองไอโซเทิร์มแลงเมียร์โดยการเพิ่มค่าคงที่ความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneity factor,  $n_T$ ) ในแบบจำลองไอโซเทิร์มแลงเมียร์ สามารถอธิบายพฤติกรรมการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยที่ค่า  $n_T$  อยู่ในช่วง ( $0 < n_T \leq 1$ ) [41] เมื่อค่า  $n_T$  มีค่าเท่ากับหนึ่งระบบสมการสามารถกลับไปเป็นแบบจำลองไอโซเทิร์มแลงเมียร์ กล่าวคือที่ค่า  $n_T$  เท่ากับหนึ่งหมายถึงพื้นผิวตัวดูดซับมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จากข้อมูลการทดลองพบว่า ค่า  $n_T$  ในแบบจำลองไอโซเทิร์มทอทมีค่าเท่ากับใกล้เคียงในช่วง 0.86-0.91 ที่อุณหภูมิการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 เกิดขึ้นบนพื้นผิวที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิวบนตัวดูดซับเกิดจากการตรึงเอมีนบนตัวดูดซับทำให้มีหมู่ฟังก์ชันเอมีน และการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสในเอทานอลทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลบนตัวดูดซับ อีกทั้งการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 มีทั้งการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.1 ซึ่งเกิดการดูดซับที่เกิดบนพื้นผิวต่างกัน คือ เกิดบนพื้นผิวที่มีหมู่พร้อมเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ และเกิดบนพื้นผิวที่ไม่มีหมู่เข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นการดูดซับบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งไม่ตรงกับสมมติฐานของแบบจำลองไอโซเทิร์มแลงเมียร์ที่ว่า การดูดซับเกิดขึ้นสม่ำเสมอบนพื้นผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 สามารถอธิบายพฤติกรรมการดูดซับจากไอโซเทิร์มของทอทได้อย่างแม่นยำ

ตารางที่ 4.4 แบบจำลองไอโซเทอริมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ในช่วงอุณหภูมิการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส

Langmuir					
Temperature (°C)	$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (bar <sup>-1</sup> )		$R^2$	%Error
30	267.6	7.998		0.9993	1.19
50	237.3	8.101		0.9996	0.93
60	207.6	6.937		0.9972	3.13
70	162.6	5.877		0.9992	1.76
Freundlich					
Temperature (°C)	$k_f$	$n_f$		$R^2$	%Error
30	247.4	3.691		0.9895	6.15
50	219.6	3.731		0.9897	5.63
60	188.3	3.414		0.9852	6.21
70	144.3	3.088		0.9873	6.43
Toth					
Temperature (°C)	$q_m$ (mg/g)	$K_T$ (bar <sup>-1</sup> )	$n_T$	$R^2$	%Error
30	280.1	9.184	0.8665	0.9995	1.15
50	248.4	9.343	0.8649	0.9998	0.65
60	213.7	7.459	0.9171	0.9990	2.27
70	168.4	6.275	0.9115	0.9993	1.54

### 4.3.3 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

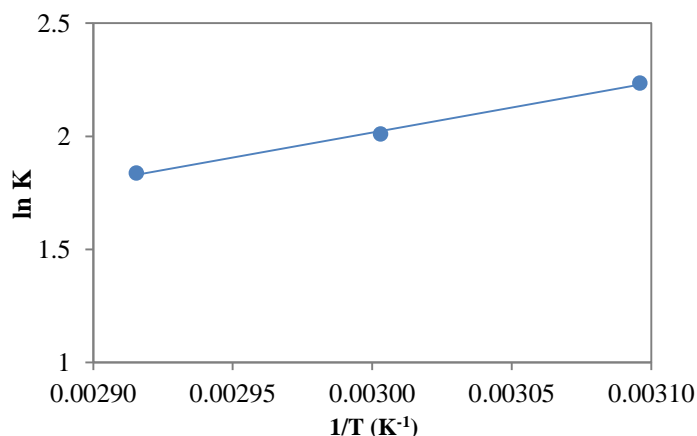
การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับทำโดยใช้ค่าคงที่ทอท ( $K_T$ ) ซึ่งค่าคงที่นี้คือค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant,  $K_{eq}$ ) สามารถนำมาคำนวณหาค่ามาตรฐานเอนทัลปี (Standard Enthalpy :  $\Delta H^0$ ), ค่ามาตรฐานเอนโทรปี (Standard Entropy :  $\Delta S^0$ ) และพลังงานเสรีของกิบส์ (Gibb's free energy :  $\Delta G^0$ ) โดยคำนวณจากสมการของแวนท์ฮอฟ (Van't Hoff equation) ดังในสมการที่แสดงในสมการที่ 4.4, 4.5 และ 4.6

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_{eq}^0 \quad (4.4)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad (4.5)$$

$$\ln K_{eq}^0 = \frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \quad (4.6)$$

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ  $8.314 \text{ จูล}\cdot\text{โมล}^{-1}\cdot\text{เคลวิน}^{-1}$  การคำนวณทำได้โดยพล็อตกราฟระหว่าง  $\ln K_{eq}$  และ  $1/T$  ได้กราฟเส้นตรง จากจุดตัดของกราฟได้ค่ามาตรฐานเอนโทรปีและความชันของกราฟได้ค่ามาตรฐานเอนทัลปี และนำค่าที่ได้คำนวณหาพลังงานเสรีของกิบส์ กราฟและพารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์แสดงในรูปที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 การพล็อตกราฟด้วยสมการของแวนท์ฮอฟ (Van't Hoff equation)

ตารางที่ 4.5 พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ที่อุณหภูมิการดูดซับต่างกัน

Temperature (°C)	$K_T$ (bar <sup>-1</sup> )	$\Delta G^0$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$\Delta S^0$ (J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$\Delta H^0$ (kJ·mol <sup>-1</sup> )	$R^2$
50	9.343	-6.00	-38.29	-18.35	0.9966
60	7.459	-5.56			
70	6.275	-5.24			

การทดลองทำที่อุณหภูมิการดูดซับที่ 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส หรือ 323, 333 และ 343 เคลวิน เนื่องจากที่อุณหภูมิ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียสความจุการดูดซับลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่มากนักแม้ปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนก็ตามโดยมีความจุการดูดซับที่ประมาณ 115 มิลลิกรัมต่อกรัม ทั้งนี้เพราะในช่วงดังกล่าวการดูดซับขับเคลื่อนได้ดีจากการแพร่ทางจลนพลศาสตร์มากกว่าผลจากอุณหพลศาสตร์ จึงไม่สามารถศึกษาอุณหพลศาสตร์ในช่วงดังกล่าวได้

พารามิเตอร์ทางอุณหพลศาสตร์ได้แก่ พลังงานเสรีของกิบส์มีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิการดูดซับที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ -6 กิโลจูลต่อโมลที่อุณหภูมิการดูดซับ 50 องศาเซลเซียส -5.56 กิโลจูลต่อโมลที่อุณหภูมิการดูดซับ 60 องศาเซลเซียส และ -5.24 กิโลจูลต่อโมลที่อุณหภูมิการดูดซับที่ 70 องศาเซลเซียส ทำให้ทราบว่าระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 สามารถเกิดขึ้นเองได้ (spontaneous) และความสามารถในการเกิดขึ้นเองได้ (spontaneity) ของระบบการดูดซับลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ค่ามาตรฐานเอนทัลปีที่มีค่าเท่ากับ -18.35 กิโลจูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่าระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน สามารถเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ และค่ามาตรฐานเอนโทรปีเท่ากับ -38.29 จูลต่อโมลเคลวิน ซึ่งเป็นค่าลบ ทำให้ทราบว่าระบบการดูดซับมีความไม่เป็นระเบียบลดลง เนื่องจากการดูดซับทำให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ลดความไม่เป็นระเบียบลงเพื่อยึดเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ จึงทำให้ค่ามาตรฐานเอนโทรปีของระบบมีค่าเป็นลบ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ปรับปรุงพื้นผิวตัดแปรด้วยเอมีน(MSM)แสดงศักยภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดันบรรยากาศได้เป็นอย่างดี การปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสบนตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ช่วยเพิ่มความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากการปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารละลายเบสเป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยหมู่ไฮดรอกซิลเกิดปฏิกิริยาการสร้างไบคาร์บอเนต(Bicarbonate formation)กับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้ความจุการดูดซับสูงขึ้น การตรึงเอมีนบนตัวดูดซับช่วยเพิ่มความจุการดูดซับ เนื่องจากการเพิ่มหมู่เอมีนบนพื้นผิวตัวดูดซับ หมู่เอมีนสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านปฏิกิริยาการสร้างคาร์บาเมต(Carbamate formation)ในภาวะที่ไม่มีน้ำ โดยร้อยละของเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับMSM ที่ให้ค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 30 (MSM\_30) ได้ค่าความจุการดูดซับเท่ากับ 120 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ณ อุณหภูมิการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า(W/F ratio) 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร การเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับทำให้ความจุการดูดซับลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นชนิดคายความร้อน และผันกลับได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ดีกว่าปฏิกิริยาไปข้างหน้า ทำให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 ลดลง การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าในช่วง 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ถึง 5.4 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> ช่วยเพิ่มเวลาก่อนการปรากฏตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาออก(Breakthrough time)จาก 15 นาทีเป็น 45 นาทีตามลำดับ ตัวดูดซับMSM\_30 สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมที่ร้อยละ 10-100 โดยปริมาตร ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม โดยมีความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 240 มิลลิกรัมต่อกรัมเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าเท่ากับร้อยละ 100 โดยปริมาตร ที่อุณหภูมิการดูดซับ 30 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร<sup>-3</sup> การเพิ่มไอน้ำในกระแสขาเข้าของแก๊สผสมช่วยเพิ่มความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ MSM\_30 โดยการเปลี่ยนกลไกการเกิดปฏิกิริยาจากการเกิดคาร์บาเมตเป็นการเกิดไบคาร์บอเนต ซึ่งอัตราส่วนการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในภาวะไม่มีน้ำจากเดิม 2:1 ลดลงเหลือ 1:1 ในภาวะที่มีน้ำ ตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ตัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีนจึงสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งในภาวะแห้ง และภาวะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมได้

การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับบนตัวดูดซับ MSM ศึกษาโดยการศึกษากลศาสตร์ไอโซเทิร์ม และอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ จากการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับโดยใช้แบบจำลองทั้งสามแบบจำลองคือ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม(Pseudo 1<sup>st</sup> order) แบบจำลองอันดับสองเทียม(Pseudo 2<sup>nd</sup> order) และแบบจำลองอาฟรามี(Avrami's equation) พบว่าแบบจำลองอาฟรามีเป็นแบบจำลองที่เข้ากับผลการทดลองมากที่สุด โดยแบบจำลองอาฟรามีอธิบายพฤติกรรมทางอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับถึงความซับซ้อนของระบบอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีที่มีมากกว่าหนึ่งขั้นตอน รวมถึงระบบการดูดซับที่มีทั้งการดูดซับทางกายภาพ(Physisorption) และการดูดซับทางเคมี(Chemisorption) การศึกษาไอโซเทิร์มการดูดซับใช้แบบจำลองแลงเมียร์(Langmuir isotherm) แบบจำลองฟรุนดลิช(Freundlich isotherm) และแบบจำลองทอท (Toth isotherm) พบว่าแบบจำลองทอทสามารถเข้ากับผลการทดลองได้มากกว่าแบบจำลองทั้งสอง ซึ่งแบบจำลองทอทอธิบายถึงพื้นผิวตัวดูดซับที่มีความแตกต่าง ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน การดูดซับในแบบจำลองนี้จึงเกิดได้ทั้งการดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมีซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับภายใต้แบบจำลองอาฟรามี อีกทั้งความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของพื้นผิวเกิดจาก การตัดแปรหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และหมู่เอมีนบนตัวดูดซับ การศึกษาอุณหพลศาสตร์การดูดซับทำให้ทราบว่า การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับMSM สามารถเกิดขึ้นเองได้ มีความสามารถในการเกิดขึ้นเองได้ลดลงตามอุณหภูมิการดูดซับที่เพิ่มขึ้น เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน และเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ตัวดูดซับMSM สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำ ภายใต้ความดันบรรยากาศ และสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะแห้ง และภาวะที่มีน้ำได้ แต่ต้องควบคุมไม่ให้ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมมีมากเกินไป ซึ่งทำให้ความจุการดูดซับลดลงได้

การศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของตัวดูดซับเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในเรื่องการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่(Regeneration process) โดยใช้การคายที่อุณหภูมิสูง

งานวิจัยนี้ศึกษาผลจากตัวแปรที่มีผลต่อความจุการดูดซับ แต่ไม่อาจทราบถึงอันตรกิริยาของตัวแปรเหล่านี้ได้ จึงควรศึกษาต่อโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทางสถิติศาสตร์ (Design of experimental, DOE)

ศึกษาการประยุกต์ใช้กับระบบวัฏจักรการดูดซับและคายด้วยวิธีต่างๆเช่น การดูดซับแบบสลับเปลี่ยนอุณหภูมิ(Temperature swing adsorption, TSA) การดูดซับแบบสลับเปลี่ยนความดัน (Pressure swing adsorption) และการดูดซับแบบสลับเปลี่ยนสุญญากาศ(Vacuum swing adsorption, VSA)



## รายการอ้างอิง

1. *GISS Surface Temperature Analysis (GISTEMP)*. [cited 2013 Mar 3]; Available from: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.
2. *Global Warming and Climate Change (United States Environmental Protection Agency)*. [cited 2013 Mar 3]; Available from: <http://www.epa.gov/airtrends/aqtrnd95/globwarm.html>.
3. Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., and Meyer, L.A., *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2007.
4. *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. [cited 2013 Mar 11]; Available from: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.
5. Brunetti, A., Scura, F., Barbieri, G., and Drioli, E., *Membrane technologies for CO<sub>2</sub> separation*. *Journal of Membrane Science*, 2010. **359**(1-2): p. 115-125.
6. Hasib-ur-Rahman, M., Siaj, M., and Larachi, F., *Ionic liquids for CO<sub>2</sub> capture—Development and progress*. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2010. **49**(4): p. 313-322.
7. Araki, S., Doi, H., Sano, Y., Tanaka, S., and Miyake, Y., *Preparation and CO<sub>2</sub> adsorption properties of aminopropyl-functionalized mesoporous silica microspheres*. *J Colloid Interface Sci*, 2009. **339**(2): p. 382-389.
8. Choi, S., Drese, J.H., and Jones, C.W., *Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources*. *ChemSusChem*, 2009. **2**(9): p. 796-854.
9. Kondo, A., et al., *Novel expansion/shrinkage modulation of 2D layered MOF triggered by clathrate formation with CO<sub>2</sub> molecules*. *Nano Lett*, 2006. **6**(11): p. 2581-2584.
10. Langeroudi, E.G., Kleitz, F., Iliuta, M.C., and Larachi, F.c.a., *Grafted Amine/CO<sub>2</sub> Interactions in (Gas-)Liquid-Solid Adsorption/Absorption Equilibria*. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2009. **113**(52): p. 21866-21876.
11. Belmabkhout, Y. and Sayari, A., *Effect of pore expansion and amine functionalization of mesoporous silica on CO<sub>2</sub> adsorption over a wide range of conditions*. *Adsorption*, 2009. **15**(3): p. 318-328.

12. Chen, C., Yang, S.T., Ahn, W.S., and Ryoo, R., *Amine-impregnated silica monolith with a hierarchical pore structure: enhancement of CO<sub>2</sub> capture capacity*. Chem Commun (Camb), 2009(24): p. 3627-3629.
13. Ebner, A.D., et al., *Suitability of a Solid Amine Sorbent for CO<sub>2</sub> Capture by Pressure Swing Adsorption*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011. **50**(9): p. 5634-5641.
14. Heydari-Gorji, A., Yang, Y., and Sayari, A., *Effect of the Pore Length on CO<sub>2</sub> Adsorption over Amine-Modified Mesoporous Silicas*. Energy & Fuels, 2011. **25**(9): p. 4206-4210.
15. Kim, S., Ida, J., Guliants, V.V., and Lin, J.Y., *Tailoring pore properties of MCM-48 silica for selective adsorption of CO<sub>2</sub>*. J Phys Chem B, 2005. **109**(13): p. 6287-6293.
16. Ko, Y.G., Shin, S.S., and Choi, U.S., *Primary, secondary, and tertiary amines for CO<sub>2</sub> capture: designing for mesoporous CO<sub>2</sub> adsorbents*. J Colloid Interface Sci, 2011. **361**(2): p. 594-602.
17. Houshmand, A., Daud, W.M.A.W., Lee, M.-G., and Shafeeyan, M.S., *Carbon Dioxide Capture with Amine-Grafted Activated Carbon*. Water, Air, & Soil Pollution, 2011. **223**(2): p. 827-835.
18. Su, F., Lu, C., Kuo, S.-C., and Zeng, W., *Adsorption of CO<sub>2</sub> on Amine-Functionalized Y-Type Zeolites*. Energy & Fuels, 2010. **24**(2): p. 1441-1448.
19. Gray, M.L., et al., *Parametric Study of Solid Amine Sorbents for the Capture of Carbon Dioxide*. Energy & Fuels, 2009. **23**(10): p. 4840-4844.
20. Bhagiyalakshmi, M., Yun, L.J., Anuradha, R., and Jang, H.T., *Synthesis of chloropropylamine grafted mesoporous MCM-41, MCM-48 and SBA-15 from rice husk ash: their application to CO<sub>2</sub> chemisorption*. Journal of Porous Materials, 2009. **17**(4): p. 475-484.
21. Xu, X., Andresen, J.M., Song, C., Miller, B.G., and Scaroni, A.W., *Preparation of Novel CO<sub>2</sub> "Molecular Basket" of Polymer Modified MCM-41*. Fuel Chemistry Division Preprints 2002. **47**: p. 47-48.
22. Xu, X., Song, C., Miller, B.G., and Scaroni, A.W., *Influence of Moisture on CO<sub>2</sub> Separation from Gas Mixture by a Nanoporous Adsorbent Based on Polyethylenimine-Modified Molecular Sieve MCM-41*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005. **44**(21): p. 8113-8119.
23. Mondal, M.K., Balsora, H.K., and Varshney, P., *Progress and trends in CO<sub>2</sub> capture/separation technologies: A review*. Energy, 2012. **46**(1): p. 431-441.

24. Yu, C.-H., *A Review of CO<sub>2</sub> Capture by Absorption and Adsorption*. Aerosol and Air Quality Research, 2012.
25. *CO<sub>2</sub> capture for post-combustion*. [cited 2013 Dec 26]; Available from: <http://bellona.org/ccs/technology/capture/post-combustion.html>.
26. Feng, B., Du, M., Dennis, T.J., Anthony, K., and Perumal, M.J., *Reduction of Energy Requirement of CO<sub>2</sub> Desorption by Adding Acid into CO<sub>2</sub>-Loaded Solvent†*. Energy & Fuels, 2010. **24**(1): p. 213-219.
27. Daud, W.M.A.W. and Houshamnd, A.H., *Textural characteristics, surface chemistry and oxidation of activated carbon*. Journal of Natural Gas Chemistry, 2010. **19**(3): p. 267-279.
28. Duan, T., Nakano, T., and Nozue, Y., *Magnetic and Optical Properties of Rb and Cs Clusters Incorporated into Zeolite A*. e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, 2007. **5**: p. 6-11.
29. Yang, P., Gai, S., and Lin, J., *Functionalized mesoporous silica materials for controlled drug delivery*. Chem Soc Rev, 2012. **41**(9): p. 3679-3698.
30. *Carbon capture and storage: An inside look at a metal-organic framework (MOF) in action*. [cited 2013 Dec 14]; Available from: <http://www.sciencedaily.com/releases/2013/11/131122132453.htm>.
31. McMahan L. Gray, K.C., James Hoffman, S.H., Daniel Fauth, J.B., and Pennline, a.H. *Systematic Design of Immobilized Solid Amine Sorbents for the Capture of Carbon Dioxide*. [cited 2013 Mar 3]; Available from: [http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/07/carbon-seq/data/papers/tue\\_074.pdf](http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/07/carbon-seq/data/papers/tue_074.pdf).
32. Gray, M.L., et al., *Improved immobilized carbon dioxide capture sorbents*. Fuel Processing Technology, 2005. **86**(14-15): p. 1449-1455.
33. Grande, C. and Rodrigues, A., *Electric Swing Adsorption for CO<sub>2</sub> removal from flue gases*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007.
34. *Montmorillonite*. [cited 2012 Nov 11]; Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/Montmorillonite>.
35. Hussin, F., Aroua, M.K., and Daud, W.M.A.W., *Textural characteristics, surface chemistry and activation of bleaching earth: A review*. Chemical Engineering Journal, 2011. **170**(1): p. 90-106.
36. Itodo, A.U., *Pseudo Constants for Methyl Red Sorption: A Rate Study of Received and Derived Activated Carbon*. Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences, 2011. **01**(04): p. 57-64.

37. Ho, Y.S. and McKay, G., *Pseudo-second order model for sorption processes*. Process Biochemistry, 1999. **34**(5): p. 451-465.
38. Serna-Guerrero, R. and Sayari, A., *Modeling adsorption of CO<sub>2</sub> on amine-functionalized mesoporous silica. 2: Kinetics and breakthrough curves*. Chemical Engineering Journal, 2010. **161**(1-2): p. 182-190.
39. Sohn, S. and Kim, D., *Modification of Langmuir isotherm in solution systems--definition and utilization of concentration dependent factor*. Chemosphere, 2005. **58**(1): p. 115-123.
40. Rahchamani, J., Mousavi, H.Z., and Behzad, M., *Adsorption of methyl violet from aqueous solution by polyacrylamide as an adsorbent: Isotherm and kinetic studies*. Desalination, 2011. **267**(2-3): p. 256-260.
41. Garnier, C., et al., *Selection of coals of different maturities for CO<sub>2</sub> Storage by modelling of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> adsorption isotherms*. International Journal of Coal Geology, 2011. **87**(2): p. 80-86.
42. Singh, P., Niederer, J.P.M., and Versteeg, G.F., *Structure and activity relationships for amine based CO<sub>2</sub> absorbents—I*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007. **1**(1): p. 5-10.
43. Singh, P., Niederer, J.P.M., and Versteeg, G.F., *Structure and activity relationships for amine-based CO<sub>2</sub> absorbents-II*. Chemical Engineering Research and Design, 2009. **87**(2): p. 135-144.
44. Liu, X., et al., *Adsorption and regeneration study of the mesoporous adsorbent SBA-15 adapted to the capture/separation of and*. Chemical Engineering Science, 2007. **62**(4): p. 1101-1110.
45. Gray, M.L., Champagne, K.J., Fauth, D., Baltrus, J.P., and Pennline, H., *Performance of immobilized tertiary amine solid sorbents for the capture of carbon dioxide*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008. **2**(1): p. 3-8.
46. Khalil, S.H., Aroua, M.K., and Daud, W.M.A.W., *Study on the improvement of the capacity of amine-impregnated commercial activated carbon beds for CO<sub>2</sub> adsorbing*. Chemical Engineering Journal, 2012. **183**: p. 15-20.
47. Kamarudin, K.S.N. and Alias, N., *Adsorption performance of MCM-41 impregnated with amine for CO<sub>2</sub> removal*. Fuel Processing Technology, 2013. **106**: p. 332-337.
48. Stevens, L., et al., *Preparation and CO<sub>2</sub> adsorption of diamine modified montmorillonite via exfoliation grafting route*. Chemical Engineering Journal, 2013. **215-216**: p. 699-708.

49. Dumeignil, F., et al., *Modification of structural and acidic properties of sol-gel-prepared alumina powders by changing the hydrolysis ratio*. Applied Catalysis A: General, 2003. **241**(1-2): p. 319-329.
50. Swiatkowski, A., Pakula, M., Biniak, S., and Walczyk, M., *Influence of the surface chemistry of modified activated carbon on its electrochemical behaviour in the presence of lead(II) ions*. Carbon, 2004. **42**(15): p. 3057-3069.
51. Tanaka, K. and White, J.M., *Characterization of species adsorbed on oxidized and reduced anatase*. The Journal of Physical Chemistry, 1982. **86**(24): p. 4708-4714.
52. Wang, X., Li, H., Liu, H., and Hou, X., *AS-synthesized mesoporous silica MSU-1 modified with tetraethylenepentamine for CO<sub>2</sub> adsorption*. Microporous and Mesoporous Materials, 2011. **142**(2-3): p. 564-569.
53. Jackson, P., Robinson, K., Puxty, G., and Attalla, M., *In situ Fourier Transform-Infrared (FT-IR) analysis of carbon dioxide absorption and desorption in amine solutions*. Energy Procedia, 2009. **1**(1): p. 985-994.
54. Baltrusaitis, J., Jensen, J.H., and Grassian, V.H., *FTIR spectroscopy combined with isotope labeling and quantum chemical calculations to investigate adsorbed bicarbonate formation following reaction of carbon dioxide with surface hydroxyl groups on Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. J Phys Chem B, 2006. **110**(24): p. 12005-12016.
55. Blanchon le Bouhelec, E., Mougin, P., Barreau, A., and Solimando, R., *Rigorous Modeling of the Acid Gas Heat of Absorption in Alkanolamine Solutions*. Energy & Fuels, 2007. **21**(4): p. 2044-2055.
56. Leal, O., Bolívar, C., Ovalles, C., García, J.J., and Espidel, Y., *Reversible adsorption of carbon dioxide on amine surface-bonded silica gel*. Inorganica Chimica Acta, 1995. **240**(1-2): p. 183-189.
57. Tamilarasan, P. and Ramaprabhu, S., *Polyaniline-magnetite nanocapsules based nanocomposite for carbon dioxide adsorption*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012. **10**: p. 486-493.
58. Yamada, H., Matsuzaki, Y., Higashii, T., and Kazama, S., *Density functional theory study on carbon dioxide absorption into aqueous solutions of 2-amino-2-methyl-1-propanol using a continuum solvation model*. J Phys Chem A, 2011. **115**(14): p. 3079-3086.
59. Wang, J., et al., *Carbon dioxide capture using polyethylenimine-loaded mesoporous carbons*. Journal of Environmental Sciences, 2013. **25**(1): p. 124-132.

60. Jackson, K.A., *Kinetic processes: Crystal growth, diffusion, and phase transitions in materials*. 2004, Weinheim: Wiley-VCH.
61. Cestari, A.R., Vieira, E.F., Vieira, G.S., and Almeida, L.E., *The removal of anionic dyes from aqueous solutions in the presence of anionic surfactant using aminopropylsilica--a kinetic study*. *J Hazard Mater*, 2006. **138**(1): p. 133-141.



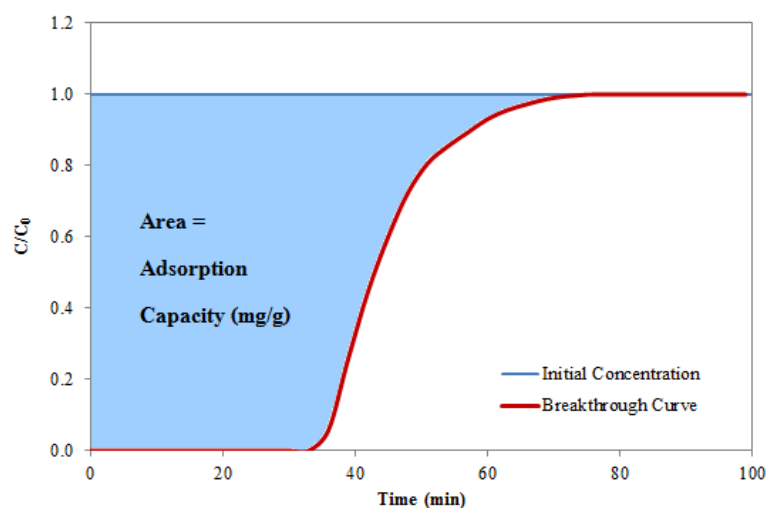


ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

### ก. การคำนวณความจุการดูดซับ

การคำนวณความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ ใช้หลักการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างเส้นโค้งทะลุผ่าน(Breakthrough Curve) และความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมดังในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 การหาความจุการดูดซับจากพื้นที่ใต้กราฟ

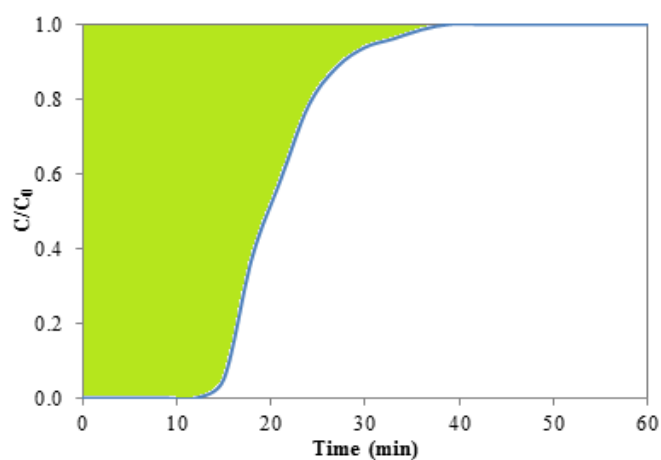
### ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะการทดลองตัวอย่าง

ชนิดของตัวดูดซับ	: MSM
ปริมาณตรึงของเอมีน	: ร้อยละ 30
อุณหภูมิการดูดซับ	: 30 องศาเซลเซียส
ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมเข้าร้อยละ	: ร้อยละ 10 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม
อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สเข้า	: 1.8 กรัม·วินาที·เซนติเมตร <sup>-3</sup>
ภาวะแห้ง	



เส้นโค้งทะลุผ่านของการทดลองตัวอย่างแสดงดังรูป ก.2



รูปที่ ก.2 เส้นโค้งทะลุผ่านของการทดลองตัวอย่าง

พื้นที่ที่แรงเงา = 20.015 มิลลิตรคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับได้ต่อตัวดูดซับ 0.3 กรัม

เปลี่ยนปริมาตรแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับได้เป็นจำนวนโมลโดยใช้สมการแก๊สในอุดมคติ(Ideal gas law)

$$PV = nRT$$

โดยที่	P	คือ	ความดันที่ใช้ในการดูดซับ	หน่วยเป็น	บรรยากาศ (atm)
	V	คือ	ปริมาตรของแก๊ส	หน่วยเป็น	ลิตร (l)
	n	คือ	จำนวนโมลของแก๊ส	หน่วยเป็น	โมล (mol)
	T	คือ	อุณหภูมิ	หน่วยเป็น	เคลวิน (K)
	R	คือ	ค่าคงที่ของแก๊ส	0.0821	หน่วยเป็น atm·l·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>

โดยแต่ละตัวแปรที่มีค่าดังนี้ P = 1 atm, V= 20.818/1000 l, T= 303 K

$$n = \frac{0.020015 \text{ l}}{303.15 \text{ K}} \times \frac{1 \text{ atm}}{0.0821 \text{ atm} \cdot \text{l} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$n = 8.04 \text{ E-}04 \text{ mol}$$

$$n = 0.804 \text{ mmol}$$

เปลี่ยนมิลลิโมล(mmol) เป็นมิลลิกรัมด้วยมวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ = 44.01 กรัมต่อโมล

มวลคาร์บอนไดออกไซด์	=	0.804	mmol	44.01	g
ที่ดูดซับได้					mol

มวลคาร์บอนไดออกไซด์	=	35.39	mg
ที่ดูดซับได้			

คาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับได้	35.39	มิลลิกรัมต่อ 0.3 กรัมตัวดูดซับ
ดังนั้น คาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูดซับได้ต่อกรัมตัวดูดซับคือ	118.0	มิลลิกรัมต่อกรัม

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภูวเดช พรอรุณธรรม เกิดเมื่อวันอังคารที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตที่ภาควิชาเคมีเทคนิค ในปีการศึกษา 2554



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY