

การตัดแปรดินไคอะตอมด้วยเอมีนเพื่อเพิ่มสมรรถนะของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

นางสาวรสสุคนธ์ เปานิล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODIFICATION OF DIATOMACEOUS EARTH WITH AMINE TO ENHANCE
PERFORMANCE OF CO₂ ADSORPTION

Miss Rossukon Paonil



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตัดแปรดินไคอะตอมด้วยเอมีนเพื่อเพิ่มสมรรถนะของ
	การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
โดย	นางสาวรสสุคนธ์ เปานิล
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐยานัน พงศ์สถาปติ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐยานัน พงศ์สถาปติ)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ศิริพงษ์ โรจน์ลือชัย)

รสสุคนธ์ เปานิล : การดัดแปรดินไดอะตอมด้วยเอมีนเพื่อเพิ่มสมรรถนะของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (MODIFICATION OF DIATOMACEOUS EARTH WITH AMINE TO ENHANCE PERFORMANCE OF CO₂ ADSORPTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ, 100 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอทิลีนไดเอมีนและเตตระเอทิลีนเพนตามีน (EDA/DE-MeOH และ TEPA/DE-MeOH) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโพลีอีนซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอทิลีนไดเอมีนและเตตระเอทิลีนเพนตามีน (EDA/DE-TsCl และ TEPA/DE-TsCl) ภายใต้ความดันบรรยากาศ ตัวแปรที่ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือ ชนิดตัวดูดซับ ชนิดเอมีน ปริมาณเอมีน อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า อุณหภูมิ การดูดซับ ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า และความสามารถในการเลือกจับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดทั้ง 4 ชนิด มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ เพิ่มปริมาณเอมีน เพิ่มปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 1 โดยปริมาตร และเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าเป็นร้อยละ 30 โดยปริมาตร และพบว่าตัวดูดซับ TEPA/DE-MeOH ปริมาณเอมีนที่ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 4.9 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ในสภาวะไม่มีความชื้น อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้าเท่ากับ 0.9 กรัม/วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 30 โดยปริมาตร ดุลในฮีเลียม และพบว่าค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นจาก 4.9 เป็น 5.5 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 1 โดยปริมาตร นอกจากนี้ตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH และ 30%TEPA/DE-TsCl สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้สูงถึง 8 รอบการดูดและคายซับ และมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี โดยทำที่อุณหภูมิการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการคายซับ เท่ากับ 110 องศาเซลเซียส อีกทั้งเมื่อทำการศึกษาเสถียรภาพทางความร้อนของตัวดูดซับจะเห็นได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวดินไดอะตอมด้วยโพลีอีนซิลโฟนิลคลอไรด์จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน ซึ่งสามารถยืนยันได้โดยผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA และพบว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH มีความสามารถในการเลือกดักจับเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย จลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH พบว่าสอดคล้องกับแบบจำลองอาฟรามากที่สุด โดยอธิบายถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการดูดซับที่มีความซับซ้อนหรือมีกลไกการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไก

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5672061023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CO₂ ADSORPTION, DIATOMACEOUS EARTH, AMINE MODIFICATION

ROSSUKON PAONIL: MODIFICATION OF DIATOMACEOUS EARTH WITH AMINE TO ENHANCE PERFORMANCE OF CO₂ ADSORPTION. ADVISOR: ASSOC. PROF. NATTAYA PONGSTABODEE, Ph.D., 100 pp.

The purpose of this research was to study the effect of factors on CO₂ adsorption capacity of diatomaceous earth (DE) modified methanol and functionalized with EDA and TEPA (EDA/DE-MeOH and TEPA/DE-MeOH) and DE modified with TsCl and functionalized with EDA and TEPA (EDA/DE-TsCl and TEPA/DE-TsCl) adsorbents at atmospheric pressure. The factors investigated here were types of adsorbents, types of amine, levels of amine loading, amount of adsorbents (W/F Ratio), operating temperatures, water vapor concentrations in a constant 30% (V/V) CO₂ feed stream, level of CO₂ concentration in the feed stream and selectivity of adsorbents. From the experimental results, it was found that the CO₂ adsorption capacity of EDA/DE-MeOH, TEPA/DE-MeOH, EDA/DE-TsCl and TEPA/DE-TsCl adsorbents were increased with rising temperature, increasing amine loading level, adding the amount of water vapor in the feed up to 1% (v/v) and rising CO₂ concentration in the feed stream to 30% (v/v). The TEPA loading on DE-MeOH was optimized as 30% (wt) (30%TEPA/DE-MeOH), which gave the maximal CO₂ adsorption capacity of 4.9 mmol g⁻¹ at 95 °C under dry condition, the W/F ratio was 0.9 g . s . cm⁻³ and the CO₂ concentration in the feed was constant at 30% (v/v) in a He balance. When adding the amount of water vapor in the feed up to 1% (v/v), the CO₂ adsorption capacity was increased from 4.9 to 5.5 mmol g⁻¹ at 95 °C. Moreover, the 30%TEPA/DE-MeOH and 30%TEPA/DE-TsCl adsorbents showed a good regenerability for eight adsorption-desorption cycles tested and a good stability in the temperature range of CO₂ adsorption (80 °C) and desorption (110 °C). In addition, the thermal stability study indicated that the surface modification of DE with TsCl enhanced a tolerance of thermal stability which can be confirmed by TGA results. In addition, the results show that the 30%TEPA/DE-MeOH adsorbent has an ability of CO₂ selectivity. From three kinetics models (pseudo-first-order, pseudo-second-order model and Avrami's equation), the adsorption kinetics show that the Avrami's equation can provide a good experimental-simulation fit for the CO₂ adsorption on the 30%TEPA/DE-MeOH.

Department: Chemical Technology

Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จด้วยดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้ด้วยความร่วมมือจากหลายๆฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาแนะนำในทุกๆด้าน ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

งานวิจัยเรื่อง “การตัดแปรดินไคอะตอมด้วยเอมีนเพื่อเพิ่มสมรรถนะของการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนการทำงานวิจัยตลอดการศึกษา ซึ่งผู้วิจัย ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.ศิริพงษ์ โรจน์ลือชัย กรรมการจากภายนอก ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความคิดที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ “ ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ” ที่เป็นผู้สนับสนุนทุนการวิจัยที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่บุคลากรทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการอำนวยความสะดวกสำหรับการใช้เครื่องมือ ในการทดลองวิเคราะห์ต่างๆ และการใช้ห้องปฏิบัติการ ขอขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังซึ่งคอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือสนับสนุนในด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมติฐานการวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO ₂) [2]	5
2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	5
2.1.2 แหล่งกำเนิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	5
2.1.3 ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) [4].....	6
2.1.4 ภาวะโลกร้อน (Global warming).....	7
2.1.5 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ	7
2.1.5.1 ผลกระทบทางตรง.....	8
2.1.5.2 ผลกระทบทางอ้อม.....	8

2.2 เทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture and Storage, CCS) [6].....	9
2.2.1 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	10
2.2.1.1 การดักจับก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture).....	10
2.2.1.2 การดักจับหลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture).....	11
2.2.1.3 การดักจับหลังจากการเผาไหม้โดยใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture).....	12
2.2.2 เทคโนโลยีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	13
2.2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption) [8].....	13
2.2.2.2 กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) [9].....	13
2.2.2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) [10].....	13
2.2.3 กลไกของกระบวนการดูดซับ.....	14
2.2.4 ประเภทของการดูดซับ.....	14
2.2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption).....	15
2.2.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption).....	15
2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [13].....	16
2.3 ตัวดูดซับของแข็ง (Solid adsorbent).....	19
2.3.1 ตัวดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorbent).....	19
2.3.2 ตัวดูดซับทางเคมี (Chemical adsorbent).....	22
2.3.2.1 เอมีน (Amine) [19].....	23
2.3.3.2 สมบัติของเอมีน.....	23
2.3.3.3 วิธีการเตรียมตัวดูดซับทางเคมี.....	25
2.4 ปฏิกริยาการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับทางเคมี [23].....	26
2.5 กระบวนการปรับคืนสภาพตัวดูดซับ (Regeneration processes) [25].....	28

3.3.2.3 การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับ (CHN elemental analysis, CHN)	43
3.3.2.4 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู พรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ (Brunauer–Emmett–Teller surface area, BET)	43
3.3.2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ (X-ray diffraction, XRD).....	44
3.3.3 การทดสอบความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	44
3.3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับและคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	46
3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา	47
3.4.1 ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	47
3.4.2 ชนิดของเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ.....	47
3.4.3 ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ	47
3.4.4 ปริมาณตัวดูดซับ.....	48
3.4.5 อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	48
3.4.6 ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า.....	48
3.4.7 ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า.....	48
3.3.8 ความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า.....	48
3.5 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	50
4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของของตัวดูดซับ	50
4.1.1 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับ (Thermogravimetric analysis, TGA).....	50
4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ.....	55
4.1.3 การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับ	59

4.1.4 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย ...	60
4.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ	63
4.2 ผลของตัวแปรต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ	
สังเคราะห์	65
4.2.1 ชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของเอมีน และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ	
คาร์บอนไดออกไซด์.....	65
4.2.2 ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ	71
4.2.3 ปริมาณตัวดูดซับ.....	73
4.2.4 ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า	76
4.2.5 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า.....	79
4.2.6 ความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า.....	80
4.3 ความเสถียรของตัวดูดซับ	82
4.4 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	88
5.1 สรุปผลการทดลอง	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	90
รายการอ้างอิง	92
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก แหล่งการปลดปล่อยและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	98
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	100

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2. 1 การเปรียบเทียบการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [12]	16
ตารางที่ 4.1 ร้อยละองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของตัวดูดซับ สังเคราะห์	60
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูด ซับสังเคราะห์	61
ตารางที่ 4. 3 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH.....	86
ตารางที่ ก. 1 แหล่งการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และความเข้มข้นของแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสแก๊สขาออก (ดัดแปลงจาก[53]).....	98

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 1 ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี[1].....	1
รูปที่ 2. 1 แหล่งกำเนิดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [3].....	6
รูปที่ 2. 2 ภาวะเรือนกระจก [5].....	7
รูปที่ 2. 3 แผนผังของสายโซ่กระบวนการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [7].....	10
รูปที่ 2. 4 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ [ดัดแปลงจาก [6]]	11
รูปที่ 2. 5 เทคโนโลยีการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ [ดัดแปลงจาก [6]].....	12
รูปที่ 2. 6 เทคโนโลยีการกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ [ดัดแปลงจาก [6]]	12
รูปที่ 2. 7 กลไกของกระบวนการดูดซับ [11].....	14
รูปที่ 2. 8 ภาพถ่านกัมมันต์ และภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ	20
รูปที่ 2. 9 ภาพซิลิกาเจล [15]	20
รูปที่ 2. 10 ภาพแอคติเวทเต็ด อะลูมินา [17].....	21
รูปที่ 2. 11 ภาพซีโอไลต์ [18]	22
รูปที่ 2. 12 โครงสร้างของเอมีนปฐมภูมิ เอมีนทุติยภูมิ	23
รูปที่ 2. 13 โครงสร้างของเอทิลีนไดเอมีน [21].....	24
รูปที่ 2. 14 โครงสร้างของเตตระเอทิลีนเพนตามีน [22].....	25
รูปที่ 2. 15 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเอมีนปฐมภูมิ.....	26
รูปที่ 2. 16 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนทุติยภูมิ [23].....	27
รูปที่ 2. 17 ดินไดอะตอมหรือดินเบา และโครงสร้างของดินไดอะตอม [26].....	29
รูปที่ 3. 1 แผนภาพการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	45
รูปที่ 3. 2 แผนภาพการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์.....	46

รูปที่ 4.1 เสถียรภาพทางความร้อนบนตัวดูดซับสังเคราะห์ โดย (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Mass loss (wt%)) กับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส และ (ข-จ) แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG), ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (TG%) กับอุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส.....	52
รูปที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับสังเคราะห์ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปก	56
รูปที่ 4.3 โครงสร้างโมเลกุลโพลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ (TsCl)	58
รูปที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ทั้งก่อนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ หลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะแห้งและภาวะที่มีความชื้นในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตร.....	59
รูปที่ 4.5 โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับสังเคราะห์	64
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิของชนิดตัวดูดซับต่างๆ ได้แก่ ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน (EDA/DE-MeOH และ TEPA/DE-MeOH) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโพลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (EDA/DE-TsCl และ TEPA/DE-TsCl) โดยน้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม และปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสภาวะไม่มีความชื้น....	65
รูปที่ 4.7 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโพลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีน (30%EDA/DE-TsCl) [ดัดแปลงมาจาก [45]].....	68
รูปที่ 4.8 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโพลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (30%TEPA/DE-TsCl) [ดัดแปลงมาจาก [45]].....	68
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณเอมีน (ร้อยละ 15-40 โดยน้ำหนัก) ที่ตรึงลงบนตัวดูดซับ EDA/DE-MeOH, TEPA/DE-MeOH, EDA/DE-TsCl และ TEPA/DE-TsCl อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสภาวะไม่มีความชื้น.....	72

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาออกที่เวลาใดๆ กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า (C/C_0) และเวลาที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ของตัวดูดซับชนิด 30%TEPA/DE-MeOH ที่ W/F Ratio เท่ากับ 0.3 0.6 0.9 1.2 และ 1.5 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 30 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม ในสถานะไม่มีความชื้น 75

รูปที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ในช่วงอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า (W/F Ratio) เท่ากับ 0.3 ถึง 1.5 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 30 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม ในสถานะไม่มีความชื้น 76

รูปที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ในสถานะที่ไม่มีความชื้น และสถานะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร อุณหภูมิในการดูดซับ 50 ถึง 115 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร 78

รูปที่ 4. 13 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ในสถานะแห้ง และสถานะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1 7 และ 15 โดยปริมาตร โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร 79

รูปที่ 4. 14 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร โดยน้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม และปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ในสถานะไม่มีความชื้น 80

รูปที่ 4. 15 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ต่อความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า โดยน้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสถานะที่ไม่มีความชื้น 81

รูปที่ 4. 16 ผลการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ (ก) 30%TEPA/DE-MeOH และ (ข) 30%TEPA/DE-TsCl โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสภาวะไม่มีความชื้น..... 84

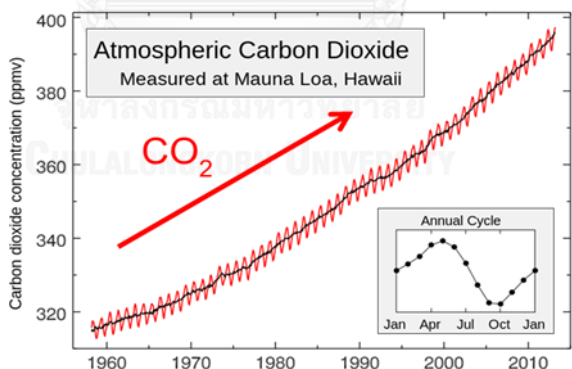


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลกมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อตอบสนองต่อความต้องการในการบริโภคของมนุษย์ที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ที่มีบทบาทสำคัญในภาคอุตสาหกรรม แต่ในขณะเดียวกันก็ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการเพิ่มระดับการปล่อยสารมลพิษจากกระบวนการในภาคอุตสาหกรรมสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน และส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ จากรูปที่ 1 แสดงปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี โดยจากการวิจัยพบว่าระหว่างปี ค.ศ. 1950-2010 พบว่า อุณหภูมิผิวโลกเพิ่มสูงขึ้น ประมาณ $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศและกิจกรรมของมนุษย์ทั่วโลกด้วยสาเหตุนี้เองจึงเป็นแรงกระตุ้นให้มีการค้นคว้าวิจัยวิธีการจับยึดหรือกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนปล่อยเข้าสู่บรรยากาศ



รูปที่ 1 ปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี[1]

เทคโนโลยีการจับยึดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีมากมายหลายวิธี ได้แก่ การดูดซึมทางกายภาพ การดูดซึมทางเคมี การดูดซับบนตัวดูดซับของแข็ง และการใช้เยื่อเลือกผ่าน จากเทคโนโลยีที่กล่าวมานี้ พบว่าการดูดซึมทางเคมีโดยใช้สารละลายเอมีนเป็นวิธีที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม แต่

วิธีนี้มีข้อเสียบางประการ เช่น ต้องใช้พลังงานมากในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึม การออกซิเดชันของเอมีน ซึ่งนำไปสู่ปัญหาการกัดกร่อนจนทำให้เกิดการรั่วซึม และจำเป็นต้องใช้หลอดดูดซึมขนาดใหญ่ กรณีการใช้เยื่อเลือกผ่านในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ต้องการใช้เยื่อเลือกผ่านหรือเมมเบรนที่มีขนาดใหญ่มาก เนื่องจากในระบบจริงจะมีปริมาณแก๊สผสมที่จะต้องทำการแยกจำนวนมาก ซึ่งก็จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และต้องใช้เครื่องอัดที่มีขนาดใหญ่เพื่อให้เกิดแรงขับ (Driving force) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนของมวลผ่านเมมเบรน จากข้อเสียดังกล่าวจึงทำให้เกิดการพัฒนาสู่การดูดซับบนตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งต้องการพลังงานน้อยในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ อีกทั้งยังสะดวกต่อการบริหารจัดการกระบวนการทำงาน

ตัวดูดซับที่ใช้ในประเทศไทยส่วนใหญ่แล้วต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงทำให้ต้นทุนในการดำเนินการค่อนข้างสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกตัวดูดซับ คือ ดินไดอะตอม ที่มีอยู่มากมายภายในประเทศ อีกทั้งดินไดอะตอมมีความพรุนตัวสูง มีพื้นที่ผิวสูง หาง่าย และมีราคาถูก จึงถูกเลือกใช้เป็นตัวดูดซับของแข็ง เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ดัดแปรด้วยเอมีน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินไดอะตอมดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน

1.3 สมมติฐานการวิจัย

ตัวดูดซับดินไดอะตอมดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีนสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความดันบรรยากาศ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 สังเคราะห์ตัวดูดซับดินไดอะตอมดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน โดยใช้วิธีฝังตัว (Impregnation)

1.4.2 ศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับสังเคราะห์ภายใต้อิทธิพลของตัวแปรที่ทำการศึกษา ดังนี้

วิธีการตรึงเอมีนบนตัวดูดซับ	ชนิดและปริมาณเอมีนที่โหลดบนตัวดูดซับ
ปริมาณตัวดูดซับ	อุณหภูมิการดูดซับ
องค์ประกอบของแก๊สผสมขาเข้า	

1.4.3 วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับทั้งก่อนและหลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

1.4.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 ค้นคว้าหาข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1.5.2 จัดเตรียมเครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี สำหรับการดำเนินงานวิจัย

1.5.3 สังเคราะห์ตัวดูดซับดินไดอะตอมมัตต์แปรฟังกซ์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน โดยใช้วิธีฝังตัว (Impregnation)

1.5.4 ศึกษาผลของวิธีการตรึงเอมีนบนตัวดูดซับ ชนิดเอมีน ปริมาณเอมีนที่โหลดบนตัวดูดซับ ปริมาณตัวดูดซับ อุณหภูมิการดูดซับ ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า และความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับสังเคราะห์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

1.5.5 วิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับทั้งก่อนและหลังการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

- การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลซิส (Thermogravimetric analysis, TGA)

- การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)

- การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN elemental analysis, CHN)

- การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคบรูน่าวอร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer–Emmett–Teller surface area, BET)

- การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD)

1.5.6 ศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ

1.5.7 ศึกษาการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งาน

1.5.8 ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

1.5.9 วิเคราะห์ผลการทดลอง สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ตัวดูดซับดินไต่อะตอมดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีนที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความดันบรรยากาศ



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) [2]

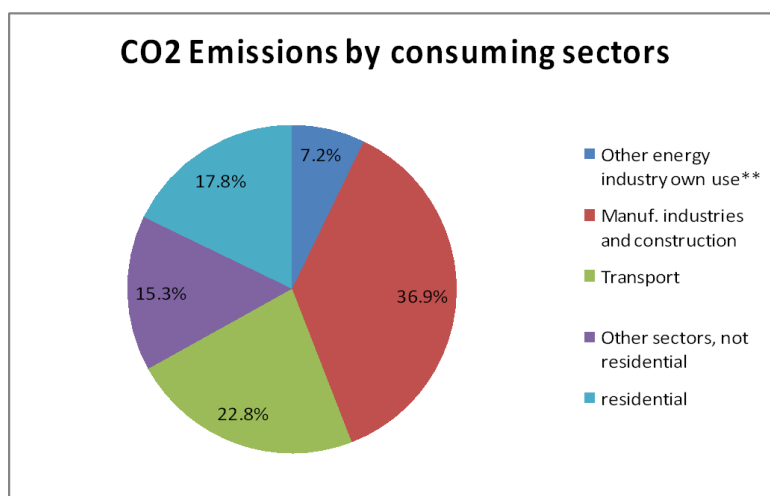
คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สในบรรยากาศ ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอม และออกซิเจน 2 อะตอมต่อหนึ่งโมเลกุล คาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในสารประกอบเคมีที่เป็นที่รู้จักมากที่สุด และมีสูตรเคมี คือ CO₂ เมื่ออยู่ในสถานะของแข็ง มักจะเรียกว่า น้ำแข็งแห้ง (Dry ice) และพบว่าเป็นแก๊สที่มีปริมาณมากเป็นอันดับ 4 ในอากาศ รองจากแก๊สไนโตรเจน แก๊สออกซิเจน และแก๊สอาร์กอน ตามลำดับ

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่มีสี ซึ่งหากหายใจเอาแก๊สนี้เข้าไปในปริมาณมากๆ จะรู้สึกเปรี้ยวที่ปาก หรืออาจเกิดการระคายเคืองที่จมูกและคอ เนื่องจากอาจเกิดการละลายของแก๊สนี้ในเมือก ที่อยู่ใต้อวัยวะก่อให้เกิดกรดคาร์บอนิกอย่างอ่อน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่น 1.98 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m³) ซึ่งเป็นประมาณ 1.5 เท่าของอากาศ โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบด้วยพันธะคู่ 2 พันธะ (O=C=O) ไม่ติดไฟและไม่ทำปฏิกิริยา และสามารถกลายเป็นของแข็งที่มีสีขาวที่อุณหภูมิ -78 องศาเซลเซียส โดยไม่ผ่านการเป็นของเหลวก่อน หากต้องการทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเหลว จะต้องใช้ความดันไม่น้อยกว่า 5.1 บรรยากาศ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายน้ำได้ร้อยละ 1 ของสารละลายนั้น โดยจะละลายกลายเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งจะเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตในภายหลัง

2.1.2 แหล่งกำเนิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแก๊สที่ทำให้เกิดพลังงานความร้อนสะสมในบรรยากาศของโลกมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับบรรดาแก๊สชนิดอื่นๆ ที่อยู่ในกลุ่มแก๊สเรือนกระจก อีกทั้งเป็นตัวการสำคัญที่สุดในการก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก โดยเป็นผลมาจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นหลัก จากรูปที่ 2.1 แสดงแหล่งกำเนิดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ การเผาไหม้ในหลายรูปแบบ เช่น การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรม รถยนต์ และการหุงต้ม การตัดไม้ทำลายป่า การเผาป่า เพื่อใช้พื้นที่อยู่อาศัย หรือทำการเกษตร หรือเผาหญ้าเผาฟางหลังการเก็บเกี่ยว การทำปุ๋ยสัตว์ การเลี้ยงสัตว์ และการทำฟาร์ม เป็นต้น

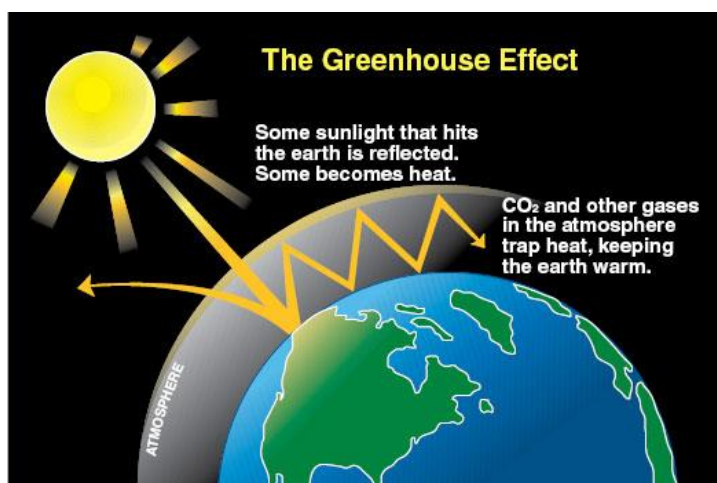


รูปที่ 2.1 แหล่งกำเนิดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [3]

อีกทั้งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเกิดขึ้นได้จากหลายลักษณะ เช่น ภูเขาไฟระเบิด การหายใจของสิ่งมีชีวิต หรือการเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์ แก๊สนี้เป็นวัตถุดิบสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เพื่อใช้แก๊สคาร์บอนในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงนี้ พืชจะปล่อยแก๊สออกซิเจนออกมาสู่บรรยากาศ ทำให้สัตว์ได้ใช้แก๊สออกซิเจนนี้ในการหายใจ การใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของพืชนี้เป็นการลดแก๊สเรือนกระจกลงได้ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สหนึ่งที่เป็นสาเหตุของปรากฏการณ์เรือนกระจก

2.1.3 ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) [4]

ปรากฏการณ์เรือนกระจก เป็นปรากฏการณ์ที่คล้ายกับการสร้างเรือนกระจกกลางแจ้ง จากรูปที่ 2.2 แสดงการเกิดภาวะเรือนกระจก โดยแสงแดดสามารถผ่านเข้ามาในเรือนกระจก แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่สามารถระบายออกข้างนอกได้ ทำให้อุณหภูมิภายในเรือนกระจกสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อแสงอาทิตย์ส่องผ่านลงมายังพื้นโลก ก็เกิดการดูดซับและสะท้อนกลับ โดยรังสีจากแสงอาทิตย์จะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดคลื่นสั้น แก๊สเรือนกระจก ซึ่งได้แก่ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทน แก๊สไนตรัสออกไซด์ และแก๊สโอโซน จะทำการดูดซับรังสีจากดวงอาทิตย์เอาไว้ส่วนหนึ่งและสะท้อนกลับออกไปส่วนหนึ่ง ส่วนรังสีคลื่นยาวหรือรังสีอินฟราเรดที่ถูกส่งออกไปจากโลกนั้น จะถูกดูดซับเอาไว้โดยแก๊สเรือนกระจก จากนั้นก็จะคายพลังงานความร้อนให้กระจายอยู่ภายในชั้นบรรยากาศและพื้นผิวโลก จึงเปรียบเสมือนกระจกที่ปกคลุมผิวโลกให้มีภาวะสมดุลทางอุณหภูมิทำให้อุณหภูมิที่พื้นผิวของโลกมีความอบอุ่น



รูปที่ 2.2 ภาวะเรือนกระจก [5]

2.1.4 ภาวะโลกร้อน (Global warming)

ภาวะโลกร้อน เกิดจากปรากฏการณ์เรือนกระจกที่รุนแรงกว่าที่ควรจะเป็นตามธรรมชาติ โดยความร้อนจากดวงอาทิตย์ถูกเก็บกักไว้ในโลกมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกสูงขึ้น โดยกิจกรรมของมนุษย์มีส่วนสำคัญที่ทำให้ปริมาณแก๊สเรือนกระจกในบรรยากาศเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การผลิตและใช้พลังงาน การเผาไหม้เชื้อเพลิง การเกษตรอุตสาหกรรมการตัดไม้ทำลายป่า การรั่วไหลของแก๊สจากอุตสาหกรรม การใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีแก๊สเรือนกระจกเป็นองค์ประกอบ เป็นต้น

2.1.5 ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

การเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นหนึ่งในแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญ ที่มีผลทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น นักวิทยาศาสตร์ได้ทำการประเมินผลกระทบที่จะเกิดขึ้นโดยใช้แบบจำลองภูมิอากาศ โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่า ถ้าหากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในชั้นบรรยากาศของโลกในปี ค.ศ. 2100 เพิ่มขึ้น เป็น 2 เท่าจากระดับปัจจุบัน จะส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศ เศรษฐกิจ และสังคม รวมทั้งด้านอุทกวิทยา หรือการจัดการแหล่งน้ำ ตลอดจนโครงสร้างพื้นฐาน และสุขภาพของมนุษย์ โดยผลกระทบที่เกิดจากภาวะโลกร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ผลกระทบทางตรง และผลกระทบทางอ้อม ดังนี้

2.1.5.1 ผลกระทบทางตรง

เมื่อโลกร้อนขึ้นก็จะทำให้หลายส่วนของโลกเกิดภาวะแห้งแล้ง เกิดไฟไหม้ป่าง่ายขึ้น รวมถึงมนุษย์บุกรุกทำลายป่าเพื่อแสวงหาที่ทำกินเพิ่มขึ้น เพื่อทดแทนพื้นที่ที่แห้งแล้งหรือขาดความอุดมสมบูรณ์ ทำให้ป่าไม้ที่เคยเป็นแหล่งดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแหล่งเพิ่มแก๊สออกซิเจนให้กับโลกลดลงอย่างรวดเร็ว การเกิดไฟป่าจะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นในชั้นบรรยากาศของโลก การที่อุณหภูมิโลกเพิ่มสูงขึ้นมีผลต่อการเพิ่มการละลายของน้ำแข็งขั้วโลก แต่เดิมฤดูร้อนของบริเวณขั้วโลกเหนือจะมีน้ำแข็งบางส่วนละลาย แต่ก็มีน้ำแข็งเหลืออยู่ในปริมาณที่มากพอที่จะทำให้ฤดูหนาวที่มาถึงมีอุณหภูมิต่ำเพียงพอที่จะทำให้เกิดน้ำแข็งใหม่ เพื่อทดแทนน้ำแข็งที่ละลายไปในฤดูร้อน หมุนเวียนเป็นวัฏจักรเช่นนี้อย่างต่อเนื่อง แต่เมื่อโลกร้อนขึ้นจะทำให้ น้ำแข็งละลายในปริมาณที่มากขึ้นเรื่อยๆ และมีน้ำแข็งเหลืออยู่ในฤดูหนาวน้อยลงก็จะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในฤดูหนาวสูงขึ้น การเกิดเป็นน้ำแข็งใหม่น้อยลง จึงเป็นไปได้ว่าในฤดูร้อนของปี ค.ศ. 2030 บริเวณขั้วโลกเหนืออาจไม่มีน้ำแข็งเหลืออยู่เลย ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดน้ำแข็งในฤดูหนาวอย่างแน่นอน การที่น้ำแข็งละลายมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะท้อนของแสงอาทิตย์น้อยลง ปกติแล้วน้ำแข็งบนพื้นดินและในมหาสมุทรจะสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์กลับสู่อวกาศได้ถึงร้อยละ 90 แต่เมื่อโลกร้อนขึ้นน้ำแข็งก็จะละลายมากขึ้นและน้ำแข็งที่เหลืออยู่ก็จะสะท้อนพลังงานแสงอาทิตย์ได้น้อยลง เมื่อเป็นเช่นนี้ อุณหภูมิของโลกก็จะสูงขึ้นไปอีก เกิดเป็นวัฏจักรที่น้ำแข็งละลายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกกักอยู่ในน้ำแข็ง เมื่อน้ำแข็งละลาย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่กักเก็บอยู่ก็จะกลับสู่ชั้นบรรยากาศ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้โลกร้อนขึ้นไปอีก

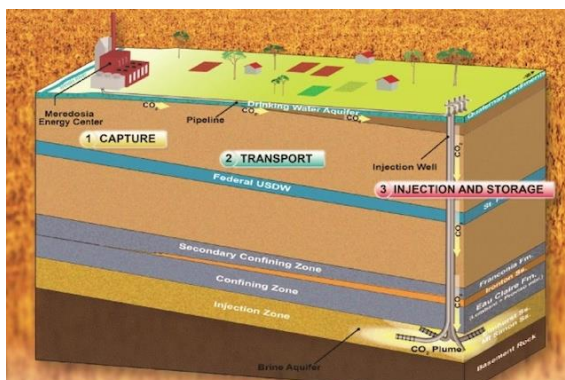
2.1.5.2 ผลกระทบทางอ้อม

กระแสน้ำอุ่นในมหาสมุทรเกิดการเปลี่ยนแปลง โลกยุคปัจจุบันเข้าสู่ยุคน้ำแข็งใหม่ เมื่อน้ำแข็งในบริเวณมหาสมุทรอาร์กติกและเกาะกรีนแลนด์ละลายมากขึ้นเนื่องจากภาวะโลกร้อน ทำให้ความเค็มของน้ำทะเลลดลง ความเข้มข้นของน้ำทะเลมีการเปลี่ยนแปลง น้ำทะเลเบาขึ้นลอยนิ่งอยู่ที่ผิวหน้า ทำให้วัฏจักรของกระแสน้ำอุ่นแอตแลนติกที่ให้ความอบอุ่นกับซีกโลกเหนืออาจจะหยุดไหลได้ และถ้าเหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นจริง ซีกโลกเหนือก็จะกลับสู่ยุคน้ำแข็ง การเกิดความหายนะของระบบนิเวศวิทยา ซึ่งผลกระทบกับระบบนิเวศวิทยาที่เห็นได้ชัดแห่งหนึ่งของโลกเกิดขึ้นบริเวณขั้วโลกเหนือ ตัวอย่างเช่น หมิขั้วโลกซึ่งต้องเดินทางกินอยู่บนแผ่นน้ำแข็ง เมื่อน้ำแข็งละลาย เขตหากินของหมิขั้วโลกก็จะแคบลง มีผลกระทบต่อความอยู่รอดของหมิขั้วโลกจนมีความเสี่ยงที่จะสูญพันธุ์ได้ อีกทั้งสัตว์อื่นๆ ที่เคยอยู่ในบริเวณที่มีอากาศหนาวเย็น เมื่อโลกร้อนขึ้น สัตว์เหล่านั้นก็จะพยายามปรับตัว บางชนิดก็อพยพย้ายถิ่นไปยังบริเวณที่ยังมีอากาศหนาวเย็น สัตว์เหล่านั้นมีโอกาสที่

จะสูญพันธุ์ได้ และจากการที่ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นมากในมหาสมุทรนั้นก็จะมีผลกระทบต่อสมดุลแร่ธาตุต่างๆ ในน้ำทะเล ซึ่งส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตที่ดำรงชีวิตอยู่ใต้ท้องทะเล นอกจากนี้ยังเกิดการระบาดของโรคต่างๆ ในหลายส่วนของโลก เช่น ในพื้นที่ที่เป็นเขตร้อน มีรายงานทางการแพทย์ว่า การเพิ่มของการระบาดของไข้เลือดออกซึ่งเป็นโรคในเขตร้อน เนื่องจากเมื่อโลกร้อนขึ้น พาหะของโรคจากเชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อไวรัสซึ่งต้นเหตุของโรคร้ายสามารถเจริญเติบโตและแพร่กระจายได้โดยง่าย การเกิดฝนตกหนัก น้ำท่วม พายุถล่ม เมื่อโลกร้อนขึ้น อัตราการระเหยของน้ำบนดินและในมหาสมุทรเพิ่มขึ้น ไอน้ำในชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งไอน้ำนี้เองก็มีคุณสมบัติเช่นเดียวกับแก๊สเรือนกระจก ซึ่งยิ่งทำให้เกิดภาวะโลกร้อนเพิ่มขึ้นอีก ทั้งหมดนี้มีผลต่อความกดอากาศของโลก ทำให้ในบางพื้นที่ที่แห้งแล้งก็เกิดฝนตก เกิดฤดูกาลที่ผิดปกติไปทั่วโลก อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวโลกที่สูงขึ้นและความกดอากาศที่เปลี่ยนแปลง จากผลกระทบที่เกิดขึ้น องค์การสหประชาชาติจึงเห็นความสำคัญของปัญหาการเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตบนโลก จึงมีความพยายามในการศึกษาและพัฒนาวิธีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อลดปัญหาดังกล่าว

2.2 เทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon Capture and Storage, CCS) [6]

การดักจับและการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การกักแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกจากระบบใดๆก็ตามแล้วเก็บไว้ในที่หนึ่ง โดยไม่ปล่อยให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่อากาศ เป้าหมายหลักของการดักจับและการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพื่อลดภาวะโลกร้อน รูปที่ 2.3 แสดงแผนผังของสายโซ่กระบวนการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อแยกการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสม การขนส่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



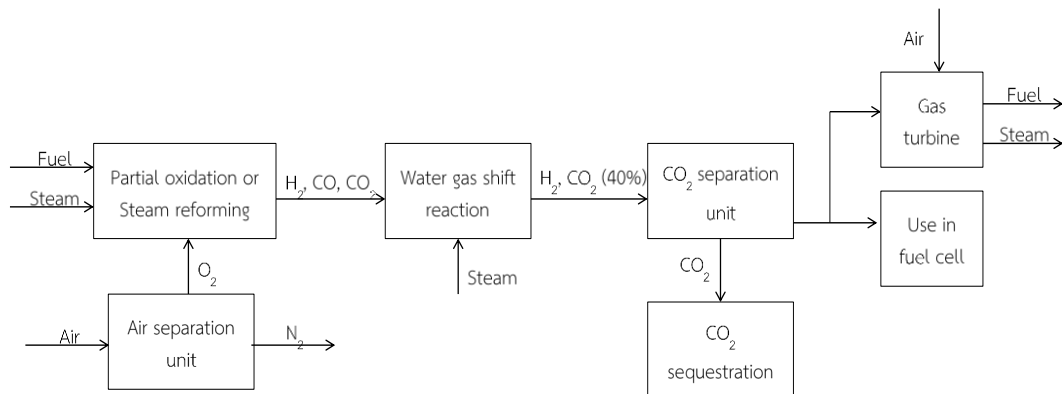
รูปที่ 2.3 แผนผังของสายโซ่กระบวนการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [7]

2.2.1 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ปัจจุบันเทคโนโลยีการดักจับแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่ การดักจับก่อนการเผาไหม้ (Precombustion capture) การดักจับหลังการเผาไหม้ (Postcombustion capture) และการดักจับหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ ออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxyfuel combustion capture)

2.2.1.1 การดักจับก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture)

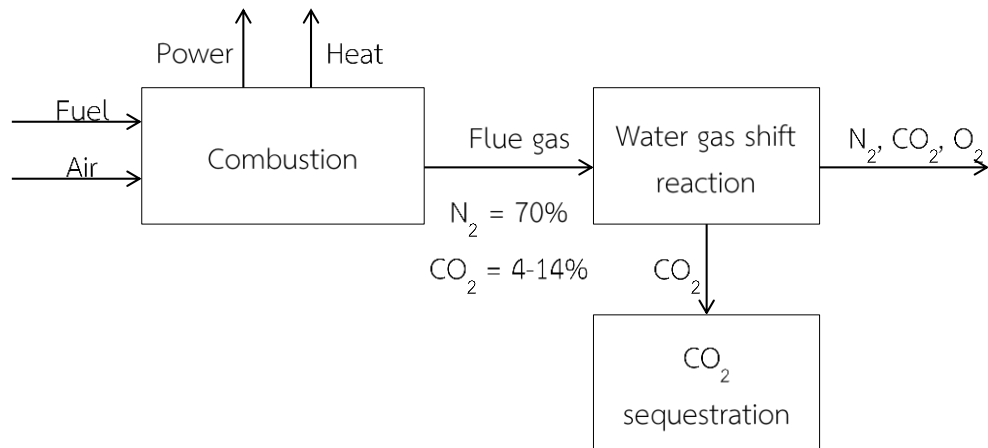
กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 จากรูปจะพบว่า เชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไอน้ำ เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) หรือ การรีฟอร์มด้วยไอน้ำ (Steam reforming) ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้แก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas) คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดปฏิกิริยา Water gas shift ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และได้แก๊สไฮโดรเจนที่มีปริมาณมากขึ้น ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ใช้ในกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) หรือ ทำปฏิกิริยากับอากาศ เพื่อให้เกิดพลังงานใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป จากรูปที่ 2.4 พบว่า แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกมาจากหน่วย Water gas shift มีปริมาณค่อนข้างมากถึง ร้อยละ 40 ซึ่งทำให้สามารถเลือกวิธีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้หลากหลายวิธี



รูปที่ 2.4 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ [ดัดแปลงจาก [6]]

2.2.1.2 การดักจับหลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture)

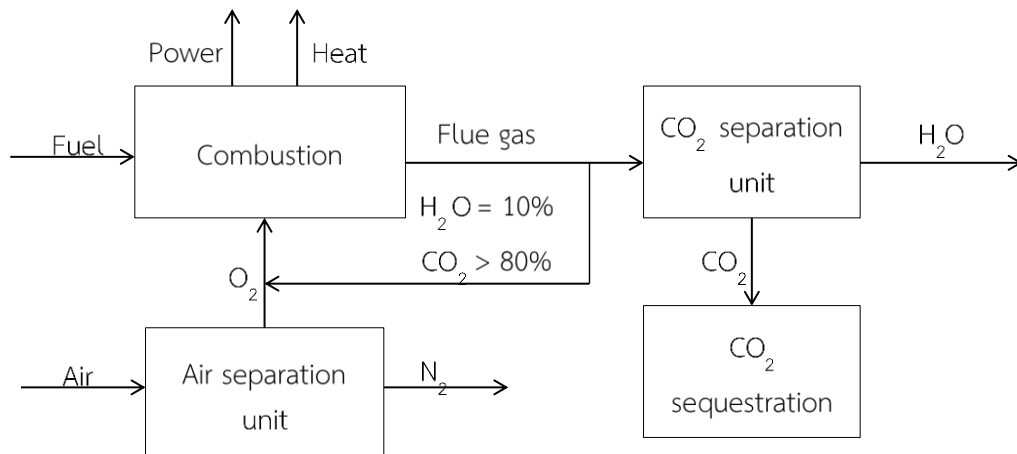
กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.5 จากรูปจะพบว่า เซลล์เพลิงทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับอากาศในขั้นตอนการเผาไหม้ ทำให้ได้พลังงานและความร้อนเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไป และได้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจากกระบวนการนี้ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแก๊สไนโตรเจนที่มีมากถึงร้อยละ 70 ในขณะที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่เพียงร้อยละ 14 ซึ่งก็หมายความว่า ต้องมีการออกแบบเครื่องมือที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะรองรับปริมาตรของแก๊สผสมที่มาก ส่งผลให้ต้นทุนในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง นอกจากนี้อากาศที่ป้อนเข้ากระบวนการเผาไหม้สามารถทำปฏิกิริยาแล้วเกิดแก๊สไนตรัสออกไซด์ซึ่งต้องกำจัดก่อนที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศต่อไป ซึ่งการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนปล่อยแก๊สผสมสู่ชั้นบรรยากาศต้องเลือกวิธีที่สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น (Selective CO₂ capture) ในขณะที่ปล่อยแก๊สอื่นๆ ออกไป



รูปที่ 2.5 เทคโนโลยีการกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ [ดัดแปลงจาก [6]]

2.2.1.3 การดักจับหลังจากการเผาไหม้โดยใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture)

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้โดยใช้แก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาต่อมาจาก การดักจับหลังการเผาไหม้ โดยเชื้อเพลิงทำปฏิกิริยากับออกซิเจนบริสุทธิ์ทำให้ได้พลังงานและความร้อน ข้อได้เปรียบของการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้ คือ ทำให้อุณหภูมิของแก๊สผสมมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่มากถึงร้อยละ 80 ทำให้สามารถเลือกใช้เทคนิคการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้หลากหลาย การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้ทำให้อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีการนำแก๊สผสมออกมารีไซเคิลไปยังเตาปฏิกรณ์เพื่อทำให้อุณหภูมิในเตาไม่สูงเกินไป ข้อได้เปรียบอีกประการหนึ่งของวิธีนี้คือ ออกซิเจนบริสุทธิ์ไม่ทำให้เกิดไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นสารประกอบ อย่างไรก็ตาม การใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ทำให้ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการแยกออกซิเจนออกจากอากาศ



รูปที่ 2.6 เทคโนโลยีการกักเก็บหลังจากการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ [ดัดแปลงจาก [6]]

2.2.2 เทคโนโลยีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ การดูดซึม (Absorption) การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) และการดูดซับ (Adsorption)

2.2.2.1 กระบวนการดูดซึม (Absorption) [8]

กระบวนการดูดซึมหรือการดูดกลืนเป็นกระบวนการถ่ายเทมวล ซึ่งใช้กำจัดสารมลพิษที่เป็นแก๊สออกจากกระแสอากาศโดยให้สัมผัสกับของเหลว การที่โมเลกุลสามารถถ่ายเทจากสภาพแก๊สไปยังสภาพของเหลวได้ เนื่องจากทั้ง 2 เฟสนั้นมีความเข้มข้นต่างกัน (Concentration gradient) ที่ผิวของเหลวและแก๊สเป็นแรงดัน (Driving force) ทำให้เกิดการถ่ายเทมวล นอกจากนี้แล้วพื้นที่ผิวสัมผัสสูง การปั่นป่วน (Turbulent) และสัมประสิทธิ์การแพร่มวลสูงจะช่วยเร่งการเกิดกระบวนการ ในแง่มลพิษทางอากาศการดูดซึมเป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการลดปริมาณสารมลพิษก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ แต่กระบวนการนี้ยังมีข้อเสียบางประการ ตัวอย่างเช่น ต้องใช้พลังงานมากในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึม อาจเกิดการออกซิเดชันของเอมีนซึ่งนำไปสู่การกัดกร่อนอุปกรณ์ในกระบวนการ และจำเป็นต้องใช้หอดูดซึมขนาดใหญ่

2.2.2.2 กระบวนการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) [9]

กระบวนการแยกแก๊สด้วยเยื่อเลือกผ่านหรือเมมเบรน เป็นกระบวนการแยกแก๊สที่ไม่ต้องการออกจากแก๊สผสม โดยผ่านรูพรุนที่ผิวเมมเบรนไปยังของเหลว โดยอาศัยคุณสมบัติการละลายน้ำของแก๊ส (Physical absorption) หรือการทำปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับสารละลายดูดซึม (Chemical absorption) โดยผิวสัมผัสของเมมเบรนมีบทบาททำหน้าที่เป็นตัวกั้นระหว่างเฟสของแก๊สและของเหลว ทำให้ไม่มีการสัมผัสกันโดยตรงของทั้งสองเฟส อย่างไรก็ตามในระบบจริงจะมีปริมาณแก๊สผสมที่จะต้องทำการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมาก ทำให้ต้องการเมมเบรนที่มีขนาดใหญ่มาก ซึ่งก็จะเพิ่มค่าใช้จ่ายในการสร้าง และต้องใช้เครื่องอัดที่มีขนาดใหญ่อีกด้วย

2.2.2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) [10]

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ ตัวอย่างเช่น ของเหลวกับของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับ

ของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดจับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) และสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent)

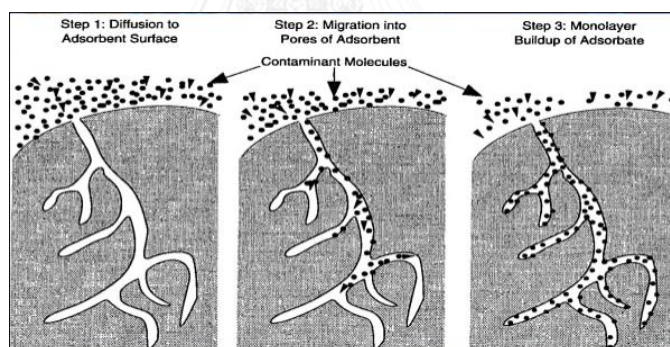
2.2.3 กลไกของกระบวนการดูดซับ

กลไกของกระบวนการดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.7 กระบวนการดูดซับสามารถแบ่งออกได้ 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก คือ กลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่เข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ ซึ่งที่ผิวของตัวดูดซับจะมีชั้นฟิล์มที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะแพร่ผ่านชั้นฟิล์มนี้แล้วแพร่เข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน คือ กลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 การดูดติดผิว คือ กลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับดูดติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่



รูปที่ 2.7 กลไกของกระบวนการดูดซับ [11]

2.2.4 ประเภทของการดูดซับ

การจำแนกประเภทของกระบวนการดูดซับ สามารถพิจารณาได้จากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Forces) จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

ในงานวิจัยนี้ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาระหว่างเฟสแก๊สและเฟสของแข็งซึ่งการดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งทางกายภาพและทางเคมี เมื่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับแล้ว ก็สามารถทำการรีเจนเนอเรตโดยการลดความดัน เรียกว่า Pressure Swing Adsorption หรือการเพิ่มอุณหภูมิ เรียกว่า Temperature Swing Adsorption

2.2.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพ เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อน ทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดี เนื่องจากสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย สารที่ถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆ ผิวของสารดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) หรือในแต่ละชั้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2.2.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกละลายกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกละลายเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล หมายความว่า การกำจัดตัวถูกละลายออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือ ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับได้ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

จะเห็นได้ว่าการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีนั้นมีความแตกต่างกันหลายประการ สามารถสรุปความแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี [12]

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
1. ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 kJ/mole	50-400 kJ/mole
2. อุณหภูมิการดูดซับ	ต่ำ	สูง
3. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
4. การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
5. การดูดซับบนเฟสแก๊ส-ของแข็ง	ได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะระบบ
6. พลังงานก่อกัมมันต์ในกระบวนการเกิด	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
7. รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [13]

ก. ขนาดของตัวดูดซับ

ขนาดของตัวดูดซับ จะเป็นสัดส่วนผกผันกับอัตราการดูดซับ กล่าวคือ ตัวดูดซับที่มีขนาดของโมเลกุลเล็กจะมีอัตราเร็วในการดูดซับมากกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่ ถ้าตัวดูดซับเป็นชนิดที่ไม่มีรูพรุน พื้นที่ที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดเล็กลง ดังนั้นจึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับเป็นชนิดที่มีรูพรุนมาก พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ดังนั้นขนาดจึงไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับชนิดที่มีรูพรุนมาก

ข. พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมากขึ้น อย่างไรก็ตามพื้นที่ผิวในการดูดซับนั้นยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ทั้งหมด โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถที่จะเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ดังนั้นการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับไม่สามารถที่จะเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับได้ ความสามารถในการดูดซับก็จะลดลง

ค. ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลาย

ในกระบวนการดูดซับโมเลกุลของตัวถูกละลาย จะถูกดึงออกจากน้ำไปเกาะติดอยู่กับตัวดูดซับ หากตัวถูกละลายมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี แรงยึดเหนี่ยวระหว่างน้ำกับตัวถูกละลายจะมีค่าสูง ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะดึงให้ตัวถูกละลายไปเกาะติดอยู่กับตัวดูดซับ

ง. ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลาย

ขนาดของตัวถูกละลายมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ โดยส่วนใหญ่การดูดซับจะเกิดขึ้นในโพรงของตัวดูดซับ จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การดูดซับจะเกิดได้ดีที่สุดเมื่อขนาดของตัวถูกละลายมีความใกล้เคียงกับขนาดของโพรงของตัวดูดซับหรือเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างมวลของตัวถูกละลายและตัวดูดซับจะมีค่าสูงสุด

จ. ความมีขั้วของโมเลกุล

เมื่อโมเลกุลมีสภาพขั้ว (Polarity) มากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องมาจากการเพิ่มของสภาพมีขั้วนั้น จะส่งผลทำให้ความสามารถในการละลายมากขึ้น

ฉ. ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่มีผลต่อตัวดูดซับและตัวถูกละลาย ทั้งตัวถูกละลายและตัวดูดซับอาจมีลักษณะทางเคมี ซึ่งได้รับผลจากความเข้มข้นของไอออนไฮโดรเจนในสารละลาย ตัวดูดซับบางตัวที่มีไอออนไฮโดรเจนไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีผลต่อค่าความเป็นกรดเบสของสารละลาย ความสามารถในการละลาย และค่าความจุของการดูดซับโดยตรง สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายในระบบที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายจะมีความไวต่อค่าความเป็นกรดเบสสูง ซึ่งตัวถูกละลายจะเลือกช่วงค่าความเป็นกรดเบส ที่เป็นกลาง และจุดที่เกิดการดูดซับได้สูงที่สุดนั้นเกิดจากความสามารถในการละลายที่ต่ำของตัวดูดซับซึ่งเป็นสารที่ไม่แตกตัวเป็นไอออนและสามารถเกิดการดูดซับกับตัวดูดซับที่ไม่มีขั้วได้

ช. อุณหภูมิอัตราของการดูดซับ

อุณหภูมิมิอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ โดยอัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลงตาม que อุณหภูมิสูงขึ้นและจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic)

ข. ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับสามารถจำแนกออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

- **ตัวดูดซับแบบไม่มีขั้ว (Non-polar Adsorption)** จะเกิดการดูดซับทางกายภาพ ตัวดูดซับที่อยู่ในกลุ่มนี้ คือ คาร์บอนกัมมันต์
- **ตัวดูดซับแบบมีขั้ว (Polar Adsorption)** การดูดซับที่เกิดขึ้นกับสารประเภทนี้เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมี โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุล และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ได้แก่ พวกรอกไซด์ เช่น ออกไซด์ของซิลิกา และออกไซด์ของโลหะ วัสดุจำพวกซิลิกา ได้แก่ ซิลิกาเจล และฟลูออไรด์
- **ตัวดูดซับที่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมี** ตัวดูดซับนี้จะมีหน้าที่ดูดซับทางเคมี โดยทั่วไปตัวดูดซับที่ใช้ ได้แก่ โครโมเมต์ และซิลิกาเจลกัมมันต์

ฅ. ความดัน

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความดันย่อยของไอสารที่ต้องการดูดซับไว้และความดันย่อยของไอสารที่ต้องการจะดูดซับไว้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันทั้งหมดของระบบ โมเลกุลของสารที่ต้องการดูดซับถูกอัดเข้าไว้ด้วยกันมากขึ้น จึงมีจำนวนโมเลกุลมากขึ้นที่มีโอกาสที่จะชนกับตำแหน่งเพื่อการดูดซับได้ ส่งผลให้จำนวนโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีเพิ่มขึ้น

ฉ. ความเร็วของแก๊ส

ระยะเวลาของการสัมผัสระหว่างกระแสแก๊สกับตัวดูดซับถูกกำหนดโดยความเร็วของกระแสแก๊สที่ผ่านหน่วยดูดซับ ระยะเวลาในการสัมผัสมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไว้ โดยความเร็วของกระแสแก๊สที่มีสารพิษ ซึ่งให้ผ่านหน่วยดูดซับที่ช้าลงจะหมายถึงการมีโอกาสที่มากขึ้นของโมเลกุลของสารพิษที่จะชนกับตำแหน่งที่สามารถดูดซับได้ ทันทันทีที่โมเลกุลของสารถูกจับไว้แล้ว มันจะคงอยู่ที่ผิวนั้นจนกระทั่งสภาวะทางกายภาพของระบบเปลี่ยนแปลงไป

ค. ความสูงของเบด

ความสูงของชั้นตัวดูดซับที่เพียงพอมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อให้มีการกำจัดแก๊สพิษออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าความสูงของเบดตัวดูดซับน้อยกว่าเขตการแลกเปลี่ยนมวล (Mass transfer zone: MTZ) จะถึงจุด Breakthrough โดยทันที ส่งผลให้ระบบไม่มีประสิทธิภาพในการดูดซับ

ฎ. ความชื้น

ตัวดูดซับที่ชอบดูดซับโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วมากกว่าโมเลกุลของไอน้ำที่มีขั้ว โมเลกุลของไอน้ำในกระแสแก๊สผสมพิษที่ต้องการบำบัดจะมีแรงดึงดูดต่อกันที่แรงกว่าแรงดึงดูดกับตัวดูดซับ แต่ที่สภาวะซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์สูงคือ มากกว่าร้อยละ 50 จะมีจำนวนโมเลกุลของน้ำเพิ่มขึ้นมาก จนกระทั่งโมเลกุลของน้ำเริ่มที่จะเข้าแย่งตำแหน่งเพื่อการดูดซับกับโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอน ทำให้ความสามารถและประสิทธิภาพของระบบลดลง กรณีกระแสแก๊สผสมพิษที่ต้องการบำบัดที่มีความชื้นสูงมากกว่าร้อยละ 50 จำเป็นต้องเพิ่มอุปกรณ์เพื่อกำจัดไอน้ำบางส่วนออก เช่น หน่วยทำความเย็น (Cooler) หรืออาจใช้วิธีเติมอากาศเฉื่อยจากที่มีความชื้นต่ำมาก หรือเพิ่มอุณหภูมิของกระแสแก๊สผสมพิษขึ้นเท่าที่ทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น เพื่อไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเสียไป

2.3 ตัวดูดซับของแข็ง (Solid adsorbent)

ตัวดูดซับของแข็งได้รับความนิยมค่อนข้างมากในการใช้งานสำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากสามารถลดข้อเสียจากกระบวนการดูดซับตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยคุณสมบัติที่ดีของตัวดูดซับของแข็งคือ ราคาถูก ค่าการกักเก็บความร้อนที่ต่ำ การดูดซับเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ค่าความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง อีกทั้งสามารถการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และมีเสถียรภาพทางความร้อน

ตัวดูดซับที่นิยมใช้กันทั่วไป แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ตัวดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorbent) และตัวดูดซับทางเคมี (Chemical adsorbent)

2.3.1 ตัวดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorbent)

ตัวดูดซับทางกายภาพที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซิลิกาเจล (Silica gel) แอคติเวทเต็ด อะลูมินา (Activated alumina) และซีโอไลต์ (Zeolites) ซึ่งตัวดูดซับแต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะตามธรรมชาติที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ปริมาณของพื้นที่ผิว และลักษณะการกระจายของขนาดรูพรุน เป็นต้น

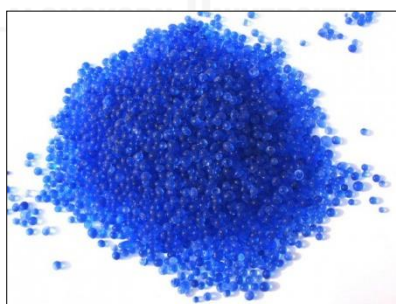
ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นของแข็งที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นหลัก มีโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) ลักษณะการจัดเรียงตัวของคาร์บอนอะตอมแตกต่างจากรูปแบบอื่น เช่น เพชร หรือ กราไฟต์ สมบัติทางกายภาพที่เด่นชัดของถ่านกัมมันต์ คือ มีความพรุนและพื้นที่ผิวสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากชีวมวล เช่น กะลามะพร้าว ไม้ไผ่

เป็นต้น มักมีความเป็นขี้ด่ำหรือไม่มีขี้ด จึงไม่ดูดไอน้ำที่ปะปนอยู่ในกระแสดอากาศ และสามารถดูดซับสารละลายอินทรีย์ กลิ่น และแก๊สพิษต่างๆได้ดี การเตรียมถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมได้โดยการให้ความร้อนกับวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอน เช่น ถ่านหินลิกไนต์ การเผาไหม้ในบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน เพื่อกำจัดน้ำและสารระเหยได้ง่าย



รูปที่ 2.8 ภาพถ่านกัมมันต์ และภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์ [14]

ซิลิกาเจล (Silica gel) คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 2.9 หรือมีลักษณะเป็นผงสีขาว ซิลิกาเจลเป็นวัสดุที่มีความพรุนสูง ผิวของซิลิกาเจลเป็นประเภที่มีขี้ด จึงใช้ดูดซับไอน้ำหรือความชื้นได้ดี มีขนาดของรูพรุน 2.4 นาโนเมตร ซิลิกาเจลสังเคราะห์มาจากโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)



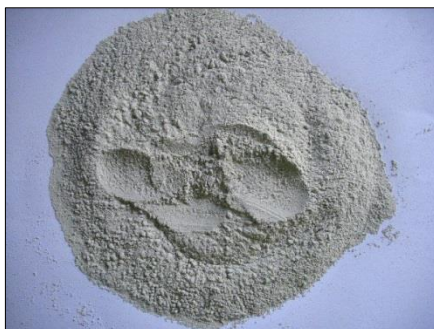
รูปที่ 2.9 ภาพซิลิกาเจล [15]

แอคติเวทเต็ด อะลูมินา (Activated alumina) ผลิตโดยการเผาอะลูมิเนียม เพื่อให้กลายเป็นออกไซด์ของอะลูมิเนียม ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ปกติจะไม่ใช้แอคติเวทเต็ด อะลูมินา ในการกำจัดแก๊สมลพิษจากกระแสวนอากาศ แต่จะใช้กันมากในการดูดซับความชื้นจากอากาศ พื้นที่ผิวของแอคติเวทเต็ด อะลูมินาค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิดอื่นๆ คือ ประมาณ 200–300 ตารางเมตรต่อกรัม [16]



รูปที่ 2.10 ภาพแอคติเวทเต็ด อะลูมินา [17]

ซีโอไลต์ (Zeolite) หรือ โมเลกุลาร์ ซีฟส์ (Molecular sieves) คือ สารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต (Crystalline Aluminosilicates) ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอนหรืออะลูมิเนียม หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) โดยโมเลกุลของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่เชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งแตกต่างจากสารดูดซับชนิดอื่นๆที่ไม่ได้เป็นผลึก ดังนั้นซีโอไลต์จึงมีรูพรุนที่มีขนาดเท่ากันโดยตลอด ปกติจะนิยมใช้ซีโอไลต์ในการดูดซับความชื้น ในกระแสวนอากาศ บางครั้งอาจใช้ในการดูดซับพาราฟิน ในกระบวนการผลิตของโรงงานกลั่นน้ำมัน นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ ที่มีประโยชน์ เช่น มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงมาก รวมทั้งความสามารถในการดูดซับโมเลกุลสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์หลายชนิด



รูปที่ 2.11 ภาพซีโอไลต์ [18]

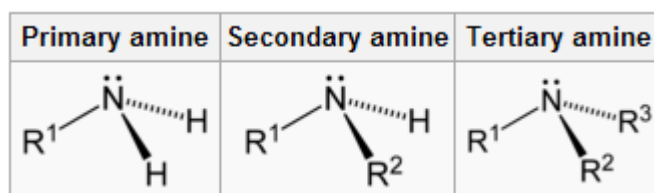
จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับทางกายภาพ แม้ว่าจะมีความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ เช่น สภาวะที่ใช้ในการดูดซับต้องทำที่ความดันสูง อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับต้องทำที่อุณหภูมิต่ำ เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงพื้นผิวของตัวดูดซับทางกายภาพด้วยวิธีทางเคมี หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวดูดซับทางเคมี (Chemical adsorbent) เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป

2.3.2 ตัวดูดซับทางเคมี (Chemical adsorbent)

ตัวดูดซับทางเคมี (Chemical adsorbent) คือ การที่นำตัวดูดซับทางกายภาพมาทำการปรับปรุงพื้นผิวทางเคมีด้วยสารเคมีเช่นสารเคมีชนิดเอมีน (Amine) เพื่อเป็นการเพิ่มหมู่เอมีนลงบนพื้นผิวตัวดูดซับทางกายภาพ เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากหมู่เอมีนนั้นมีคุณสมบัติเป็นเบส สามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นกรดได้ นอกจากนี้ตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอมีนนั้น ยังมีข้อดีอีกหลายประการที่สามารถมาแก้ไขข้อจำกัดของตัวดูดซับทางกายภาพ กล่าวคือ สามารถใช้ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่ำ อีกทั้งอุณหภูมิที่ใช้ในการนำกลับมาใช้ใหม่ต่ำกว่าระบบการดูดซับโดยใช้สารละลายเอมีนจากคุณสมบัติข้างต้น ตัวดูดซับทางเคมีจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีความน่าสนใจในการนำมาใช้ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปัจจุบัน

2.3.2.1 เอมีน (Amine) [19]

เอมีน เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เกิดจากหมู่แอลคิลหรือหมู่แอริลเข้าแทนที่ไฮโดรเจนในโมเลกุลของแอมโมเนีย ซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันคือ หมู่อะมิโน ($-NH_2$) สูตรทั่วไปของเอมีนคือ $R-NH_2$ เอมีนแบ่งเป็น 3 ชนิด ได้แก่ เอมีนปฐมภูมิ (Primary amine) เอมีนทุติยภูมิ (Secondary amine) และเอมีนตติยภูมิ (Tertiary amine) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของเอมีนปฐมภูมิ เอมีนทุติยภูมิ และเอมีนตติยภูมิ [20]

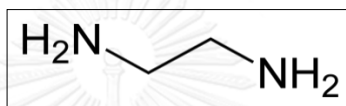
2.3.3.2 สมบัติของเอมีน

สมบัติของเอมีน คือ จุดเดือดเพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบจุดเดือดของแอลเคน เอมีน และแอลกอฮอล์ ที่มีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน พบว่าเอมีนมีจุดเดือดสูงกว่าแอลเคน แต่ต่ำกว่าแอลกอฮอล์ เนื่องจากแอลเคนเป็นโมเลกุลไม่มีขั้ว แต่เอมีนเป็นโมเลกุลมีขั้ว จึงมีทั้งแรงลอนดอนและแรงดึงดูดระหว่างขั้ว นอกจากนี้เอมีนยังสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ด้วย สำหรับเอมีนกับแอลกอฮอล์เป็นโมเลกุลที่มีขั้วทั้งคู่ แต่สภาพขั้วของเอมีนอ่อนกว่าแอลกอฮอล์ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลจึงน้อยกว่าแอลกอฮอล์ ความสามารถในการละลายของเอมีน โดยเอมีนที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก จะมีสถานะเป็นแก๊ส สามารถละลายน้ำได้ดีและละลายได้ในตัวทำละลายที่มีขั้ว อย่างไรก็ตามสารละลายเอมีนในน้ำมีสมบัติเป็นเบส เนื่องจากไนโตรเจนมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวซึ่งรับโปรตอนจากน้ำได้ เกิดเป็นแอลคิลแอมโมเนียมไอออน (Alkyl ammonium ion, $[RNH_3]^+$) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และเอมีนมีสมบัติเป็นเบสสามารถเกิดปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือ

เอมีนที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ซึ่งนำมาตรึงลงบนตัวดูดซับเพื่อนำไปใช้ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวอย่างเช่น โมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine; MEA) เอธิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine; EDA) เตตระเอทิลีนเพนทามีน (Tetraethylenepentamine; TEPA) และ พอลิเอทิลีนอิมีน (Polyethyleneimine; PEI) เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกเอมีน 2

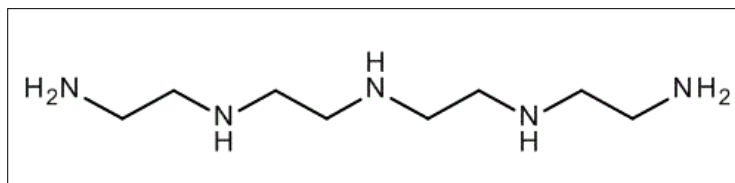
ชนิด คือ EDA และ TEPA มาทำการตรึงลงบนตัวดูดซับดินไดอะตอม เพื่อนำมาศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเอมีนทั้งสองชนิดมีสมบัติดังต่อไปนี้

เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine, EDA) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุล คือ $C_2H_8N_2$ และมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.13 เอทิลีนไดเอมีนมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 60.10 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดเดือดเท่ากับ 116 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลวเท่ากับ 8 องศาเซลเซียส ลักษณะทางกายภาพคือ มีลักษณะเป็นของเหลว ไม่มีสี และมีกลิ่นคล้ายแอมโมเนีย มักใช้เป็นเอมีนพื้นฐานในการเป็นตัวตั้งต้นสังเคราะห์สารเคมีอื่นๆ อีกทั้งยังมีความไวในการเกิดปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศได้ดี



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของเอทิลีนไดเอมีน [21]

เตตระเอทิลีนเพนตามีน (Tetraethylenepentamine, TEPA) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีสูตรโมเลกุลคือ $C_8H_{23}N_5$ และมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.14 เตตระเอทิลีนเพนตามีน มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 189.31 กรัมต่อโมล มีจุดเดือด 340.3 องศาเซลเซียส และมีจุดหลอมเหลวที่ -40 องศาเซลเซียส มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 0.998 กรัมต่อมิลลิเมตร ที่ 25 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นของไอเท่ากับ 6.53 (ของอากาศเท่ากับ 1.0) เตตระเอทิลีนเพนตามีน มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดที่อุณหภูมิห้อง สามารถละลายได้ในน้ำ แต่สามารถละลายได้ดีกว่าในตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvents) เช่น เมทานอล หรือเอทานอล เป็นต้น ในปัจจุบันมีการใช้เตตระเอทิลีนเพนตามีน ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น การทำสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้บริสุทธิ์ ใช้กำจัดคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) ออกเพื่อให้สารไฮโดรคาร์บอนมีความบริสุทธิ์มากขึ้น ใช้ในกระบวนการผลิตปิโตรเลียม ใช้เป็นสารยับยั้งการกัดกร่อน อีกทั้งยังใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของเตตระเอทิลีนเพนตามีน [22]

จากโครงสร้างของเอมีนทั้งสองชนิด จะเห็นได้ว่าเอมีนชนิดเอมีนไดเอมีน เป็นสารประกอบเอมีนที่มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนทั้งชนิดปฐมภูมิ ส่วนโครงสร้างของเตตระเอทิลีนเพนตามีนเป็นสารประกอบเอมีนที่มีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนทั้งชนิดปฐมภูมิและทุติยภูมิ

2.3.3.3 วิธีการเตรียมตัวดูดซับทางเคมี

การเตรียมตัวดูดซับทางเคมี สามารถเตรียมได้จากการนำตัวดูดซับทางกายภาพมาทำการปรับปรุงพื้นผิวหรือผ่านการตรึงด้วยเอมีน โดยมีวิธีการหลักอยู่ 2 วิธี คือ วิธีการฝังตัว (Impregnation) และวิธีการต่อติด (Synthesis Grafting)

วิธีการฝังตัว (Impregnation) หรือการตรึงเอมีนลงบนตัวดูดซับทางกายภาพ คือ วิธีการนำเอมีนไปเคลือบที่ผิวของตัวดูดซับทางกายภาพ และยึดจับกันด้วยแรงอ่อนๆ การตรึงเอมีนลงบนตัวดูดซับสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ และถือได้ว่าเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการเตรียมตัวดูดซับทางเคมี แต่ก็ยังมีข้อเสียคือ มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำ และถ้าทำการดูดซับที่อุณหภูมิสูงอาจเกิดการหลุดหรือสลายตัวของเอมีนที่ถูกตรึงบนตัวดูดซับ ส่งผลให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

วิธีการต่อติด (Synthesis Grafting) คือ วิธีการทำให้เอมีนเกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวดูดซับทางกายภาพ หรือเกิดพันธะเคมีเชื่อมระหว่างเอมีนกับตัวดูดซับทางกายภาพ วิธีนี้มีความคล้ายคลึงกับวิธีการฝังตัว แต่มีข้อดีคือ วิธีการเตรียมด้วยวิธีการสังเคราะห์เป็นการเชื่อมด้วยพันธะเคมี จึงมีความแข็งแรงของพันธะมากกว่า จึงส่งผลให้ตัวดูดซับทางเคมีที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีนี้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่าวิธีการฝังตัว แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ขั้นตอนในการเตรียมตัวดูดซับเตรียมยากกว่า อีกทั้งมีความซับซ้อนมากกว่า

2.4 ปฏิิกิริยาการจับยึดคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับทางเคมี [23]

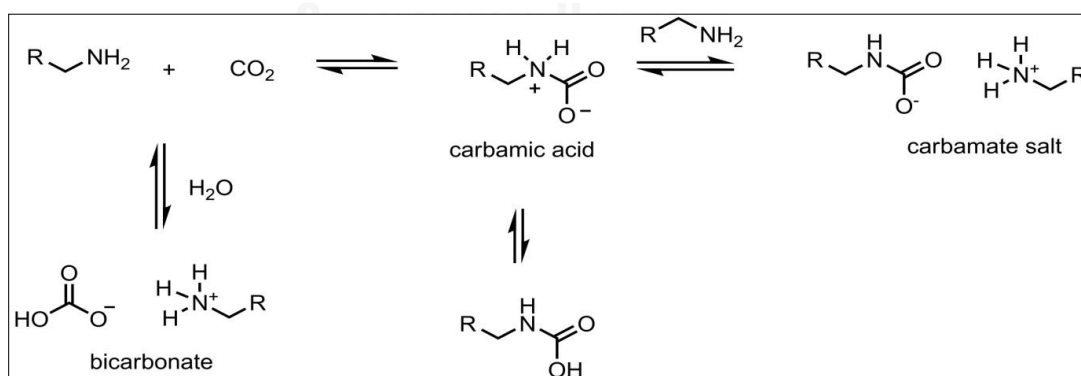
กรณีที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่ในแก๊สผสมในระดับต่ำจำเป็นต้องใช้ตัวดูดซับที่มีแรงทางเคมี เพื่อให้เกิดการเลือกดูดซับเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น โดยปฏิิกิริยาการจับยึดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับทางกายภาพที่ผ่านการดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีนสามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีคุณสมบัติเป็นแก๊สกรด และตัวดูดซับทางเคมีที่ใช้จึงต้องมีคุณสมบัติเป็นเบส กล่าวคือ คาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีความเป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) สามารถรับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวจากเบสลิวอิส (Lewis base) ซึ่งคือหมู่เอมีนได้ จึงสามารถเกิดปฏิิกิริยาการจับยึดได้

ตัวอย่างการเกิดปฏิิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีน แสดงดังสมการที่ 2.1



เมื่อ R คือ หมู่แอลคิล

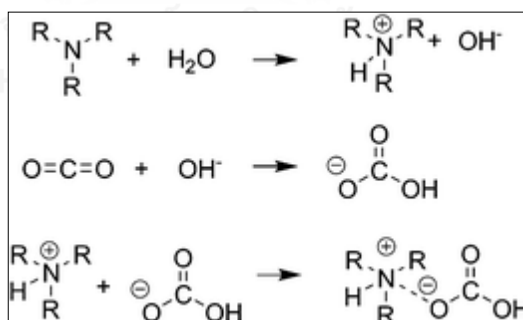
ปฏิิกิริยาการจับยึดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่ผ่านการดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน สามารถเกิดได้ 2 สภาวะ ได้แก่ สภาวะแห้ง และสภาวะที่มีน้ำหรือความชื้นเข้ามาทำปฏิิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การเกิดปฏิิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเอมีนปฐมภูมิ และเอมีนทุติยภูมิ [24]

รูปที่ 2.15 แสดงปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีน ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดจากการที่เอมีนปฐมภูมิ (Primary amines) หรือทุติยภูมิ (Secondary amines) เข้าทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยโมเลกุลของเอมีนที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวที่อะตอมกลางของไนโตรเจน จะสามารถให้อิเล็กตรอนแก่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จนเกิดเป็นสวิตเทอร์ไอออน (สวิตเทอร์ไอออน หมายถึง โมเลกุลที่มีสองขั้ว จึงเป็นโมเลกุลที่เป็นกลาง (Neutral molecule) มีทั้งประจุบวกและประจุลบ) จากนั้นโมเลกุลของเอมีนอีกโมเลกุล ก็จะสามารถเกิดปฏิกิริยากับสวิตเทอร์ไอออนต่อไป โดยทำการดึงโปรตอนจากสวิตเทอร์ไอออน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเกลือของคาร์บาเมต (Carbamate salt)

นอกจากนี้เอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในสถานะที่มีน้ำหรือมีความชื้นเข้าทำปฏิกิริยา โดยจะเกิดเป็นเกลือของคาร์บาเมตก่อน แล้วจึงเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็นไบคาร์บอเนต (Bicarbonate) ในทางตรงกันข้ามกรณีเป็นเอมีนตติยภูมิ (Tertiary amines) พบว่าเอมีนชนิดนี้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในสถานะที่มีน้ำหรือมีความชื้นเข้าทำปฏิกิริยาเท่านั้น โดยเกิดจากการที่ไนโตรเจนซึ่งมีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวให้อิเล็กตรอนกับน้ำ เกิดเป็นควอเตอร์นารีแคทไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน และ ไฮดรอกไซด์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนตแอนไอออนจากนั้นควอเตอร์นารีแคทไอออนและเป็นไบคาร์บอเนตแอนไอออนที่ได้จึงสามารถจับยึดกันด้วยแรงระหว่างไอออนบวกและไอออนลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนตติยภูมิ [23]

2.5 กระบวนการปรับคืนสภาพตัวดูดซับ (Regeneration processes) [25]

กระบวนการปรับคืนสภาพตัวดูดซับ คือ กระบวนการทำให้ตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญข้อหนึ่งของตัวดูดซับที่ดี อีกทั้งการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ยังเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายอีกด้วย โดยกระบวนการปรับคืนสภาพตัวดูดซับที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 2 ประเภท ได้แก่ กระบวนการสลับเปลี่ยนความดัน (Pressure swing adsorption) และกระบวนการสลับเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption)

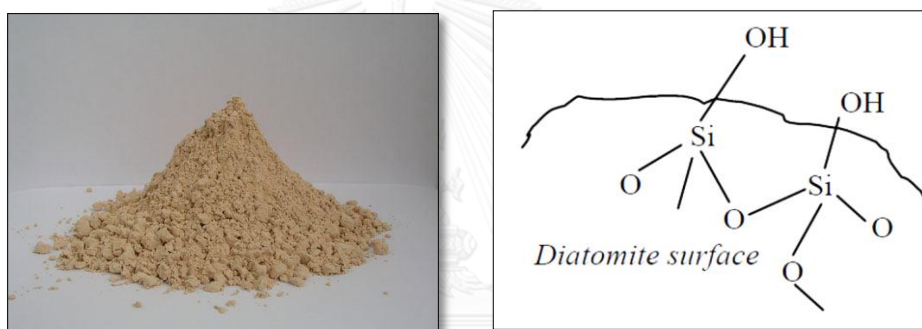
กระบวนการสลับเปลี่ยนความดัน (Pressure swing adsorption, PSA) เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการที่ตัวดูดซับจะดูดซับได้ดีที่ความดันสูง แต่จะคายซับได้ดีที่ความดันต่ำ ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้กับการดูดซับสารที่มีความดันไอสูงหรือมีสถานะแก๊สที่อุณหภูมิห้อง โดยเมื่อเกิดการดูดซับเรียบร้อยแล้ว จะทำการลดความดันภายในหอดูดซับลงมาอยู่ที่ความดันบรรยากาศ และหยุดการปล่อยแก๊สที่ต้องการดูดซับ จากนั้นทำการปล่อยแก๊สตัวพา (Carrier gas) เข้าไปในหอดูดซับแทนเพื่อให้แก๊สตัวพาเข้าไปนำพาแก๊สที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับออกมาที่ความดันบรรยากาศแทน ซึ่งพบว่าตัวดูดซับก็จะมีพื้นที่ผิวที่ว่างในการที่จะให้แก๊สที่ต้องการดูดซับเข้าไปเกิดการดูดซับได้ในครั้งถัดไป ซึ่งในกระบวนการสลับเปลี่ยนความดันก็จะเกิดการเพิ่มความดันเพื่อให้เกิดการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และลดความดันเพื่อให้เกิดการคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สลับกันไปเช่นนี้เรื่อยๆเป็นวัฏจักร

กระบวนการสลับเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption; TSA) เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamics) ในการดูดซับและคายซับ โดยการดูดซับจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่การคายจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง กล่าวคือ เมื่อเกิดการดูดซับแก๊สที่ต้องการดูดซับเรียบร้อยแล้วที่อุณหภูมิต่ำ จะหยุดการปล่อยแก๊สที่ต้องการดูดซับ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิในหอดูดซับให้สูงขึ้นและปล่อยแก๊สตัวพาเข้าไป เพื่อให้เกิดการคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับออกมาที่อุณหภูมิสูง เมื่อการคายซับเสร็จสิ้นแล้ว จะทำการลดอุณหภูมิในหอดูดซับลงมาที่อุณหภูมิการดูดซับอีกครั้ง ทำการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อคายซับและลดอุณหภูมิสำหรับการดูดซับในครั้งต่อไป ทำเช่นนี้วนไปเรื่อยๆจนเกิดเป็นวัฏจักร

ในการปรับคืนสภาพตัวดูดซับ โดยใช้วิธีการสลับเปลี่ยนความดัน (Pressure swing adsorption) และการสลับเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption) ถือได้ว่ามีความน่าสนใจในการนำมาใช้เพื่อปรับคืนสภาพตัวดูดซับ แต่วิธีการสลับเปลี่ยนอุณหภูมิถือว่าเป็นกระบวนการที่สามารถทำได้ง่ายกว่า แต่มีข้อจำกัดคือต้องใช้พลังงานมากกว่าวิธีการสลับเปลี่ยนความดัน

2.6 ดินไดอะตอม (Diatomaceous Earth)

ดินไดอะตอม (Diatomaceous Earth) หรือดินเบา ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวที่ประกอบด้วยไดอะตอม (Diatom) เป็นส่วนใหญ่ ดินไดอะตอมเป็นดินที่เกิดจากการทับถมของเปลือกหรือส่วนที่มีโครงสร้างแข็งของพืชเซลล์เดียวชนิดหนึ่งที่มีองค์ประกอบจำพวกซิลิกาประมาณร้อยละ 70 ถึง 90 โครงสร้างของดินไดอะตอมส่วนใหญ่เป็นซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous silica) มีสูตรโมเลกุลอยู่ในรูป $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งมีสมบัติเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมี ละลายได้ในเบส และละลายได้ดีในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid, HF) แต่ไม่ละลายในกรดอื่น ดินไดอะตอมมีน้ำปนอยู่เล็กน้อยประมาณร้อยละ 2 ถึง 10 และมีสารอนินทรีย์อื่นๆเจือปน เช่น อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ประมาณร้อยละ 10 และส่วนที่เหลือเป็นโลหะออกไซด์ชนิดต่างๆ เป็นต้น สมบัติทางกายภาพที่เด่นชัดของดินไดอะตอม คือ มีสีขาวนวลถึงน้ำตาลอ่อน มีน้ำหนักเบา มีความพรุนตัวสูง มีพื้นที่ผิวสูง เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ดินไดอะตอมหรือดินเบา และโครงสร้างของดินไดอะตอม [26]

ปัจจุบันดินมีการนำดินไดอะตอมมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น ใช้เป็นสารขัดถู (Abrasive) สำหรับขัดภาชนะโลหะ ใช้ในการกรอง (Filtering) เช่น กรองน้ำตาลและกรองสารอื่นๆ ใช้เป็นตัวเติม (Filter) ในการผลิตสีและการขึ้นรูปพลาสติก ใช้เป็นส่วนผสมในการทำกระดาษเพื่อให้เนื้อกระดาษแน่นเนียน ใช้เป็นฉนวน โดยนำมาอัดเป็นก้อนหรือแผ่น มีสมบัติที่ดีคือสามารถทนความร้อนได้สูง ใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ สำหรับใช้ในงานประเภทที่ต้องอาศัยความละเอียดและใช้กันน้ำได้ มีการเลือกใช้ดินไดอะตอมแทนซิลิกาในส่วนผสมของน้ำเคลือบสำหรับเซรามิกส์ และใช้เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) สำหรับดูดซับสารเคมี จากสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของดินไดอะตอมตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น อีกทั้งสามารถหาได้ง่าย และมีราคาถูก ทางผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำดินไดอะตอมมาใช้เป็นตัวดูดซับของแข็ง โดยทำการดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวดินไดอะตอมด้วยเอมีน เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

2.7 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ [27]

จลนพลศาสตร์การดูดซับ คือ การศึกษาอัตราการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินไดอะตอมดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีนในช่วงระยะเวลาหนึ่งๆ จนกระทั่งการดูดซับเข้าใกล้จุดสมดุล ซึ่งการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ ใช้เพื่อทำนายกลไกอัตราการดูดซับ อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงสภาวะสมดุล ซึ่งอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับขั้นตอนในการแพร่ของตัวถูกดูดซับ ว่าขั้นตอนใดเกิดขึ้นช้าที่สุด ขั้นตอนนั้นจะเป็นขั้นกำหนดอัตราการดูดซับ (Rate of limiting step) โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo- first Order) แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order) และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's equation)

2.7.1 แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo- first Order)

แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first Order) มีสมมติฐานว่าขั้นตอนการถ่ายโอนมวลของตัวถูกดูดซับผ่านรอบตัวดูดซับ เกิดขึ้นช้าที่สุด โดยสมการแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม แสดงได้ในสมการที่ (2.2)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.2)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.2) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่สภาวะ $t = 0$ ถึง $t = t$ ($q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$) จะได้ดังสมการที่ (2.3)

$$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (2.3)$$

เมื่อ q_t หมายถึง ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)

q_e หมายถึง ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)

k_1 หมายถึง ค่าคงที่อัตรา (Rate Constant) ของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที)

และ t หมายถึง เวลาใดๆ ที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

2.7.2 แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order)

แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order) อธิบายถึงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นได้ช้าที่สุด โดยสมการแบบจำลองอันดับสองเทียม แสดงได้ในสมการที่ (2.4)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.4)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.4) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่สถานะ $t = 0$ ถึง $t = t$ ($q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$) จะได้ดังสมการที่ (2.5)

$$q_t = \frac{k_2 q_e^2 t}{1 + k_2 q_e t} \quad (2.5)$$

เมื่อ q_t หมายถึง ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)

q_e หมายถึง ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)

k_2 หมายถึง ค่าคงที่อัตรา (Rate Constant) ของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิโมล-นาท) และ t หมายถึง เวลาใดๆ ที่ใช้ในการดูดซับ (นาท)

2.7.3 แบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's equation)

แบบจำลองปฏิกิริยาอาฟรามิ (Avrami's equation) อธิบายถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการดูดซับที่มีความซับซ้อนหรือมีกลไกการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไก ซึ่งกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดการดูดซับทั้งในทางเคมีและกายภาพ โดยสมการแบบจำลองอาฟรามิ แสดงได้ในสมการที่ (2.6)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_a^n t^{n-1} (q_e - q_t) \quad (2.6)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.6) โดยใช้เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่สภาวะ $t = 0$ ถึง $t = t$ ($q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$) จะได้ตั้งสมการที่ (2.7)

$$q_t = q_e (1 - e^{-(kat)^{n_a}}) \quad (2.7)$$

เมื่อ q_t หมายถึง ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับที่เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)

q_e หมายถึง ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ ณ สภาวะสมดุล (มิลลิโมลต่อกรัม)

k_a หมายถึง ค่าคงที่ของอาฟรามี (ต่อนาที)

n_a หมายถึง ค่าคงที่อื่นๆ

และ t หมายถึง เวลาใดๆ ที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

โดยความถูกต้องของสมการดูดซับและจลนพลศาสตร์ดูดซับที่ได้ สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination, R^2) โดยค่า R^2 ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 และพิจารณาได้จากค่าฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function, $Err(\%)$) ดังแสดงในสมการที่ (2.8) และ (2.9) ตามลำดับ

$$R^2 = \frac{\sum(q_{t,cal} - \bar{q}_{t,exp})^2}{\sum(q_{t,exp} - \bar{q}_{t,exp})^2} \quad (2.8)$$

$$Err(\%) = \sqrt{\sum \left\{ \frac{[(q_{t,exp} - q_{t,cal}) / q_{t,exp}]^2}{N-1} \right\}} \times 100 \quad (2.9)$$

เมื่อ $q_{t,exp}$ หมายถึง ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการทดลอง ณ เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)

$q_{e,cal}$ หมายถึง ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการคำนวณ ณ เวลาใดๆ (มิลลิโมลต่อกรัม)

N หมายถึง จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

และ t หมายถึง เวลาใดๆ ที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินเหนียว 2 ชนิด คือ เคโอลิไนต์ (Kaolinite, Kao) และมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, Mon) โดยทำการปรับแต่งพื้นผิวดินเหนียวด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 6 โมลาร์ และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 5 โมลาร์ แล้วทำการตรึงด้วยพอลิเอทิลีนิมิน (Polyethylenimine, PEI) ลงบนพื้นผิวของตัวดูดซับ พบว่าเมื่อทำการปรับแต่งพื้นผิวดินเหนียวด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้ปริมาตรรูพรุน และพื้นที่ผิวมีค่าเพิ่มขึ้น และพบว่า มอนต์มอริลโลไนต์ปรับแต่งด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกแล้วทำการตรึงพอลิเอทิลีนิมิน ที่ระดับร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ให้ค่าความจุการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 112 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ณ อุณหภูมิการดูดซับ 75 องศาเซลเซียส อีกทั้งยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 10 รอบ จึงกล่าวได้ว่าตัวดูดซับชนิดนี้มีเสถียรภาพที่ดี และมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Sarmah และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับเถ้าลอย (Fly ash) ที่ผ่านการตรึงด้วยเอมีนผสม คือ มอนอเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA) ผสมกับไดเมทิลแอนิลีน (Dimethylaniline, DMA) และไดเอทิลเอมีน (Diethylamine, DEA) ผสมกับไดเมทิลแอนิลีน ในอัตราส่วน 4:1 โดยมอนอเอทานอลามีนเป็นเอมีนปฐมภูมิ ไดเอทิลเอมีนเป็นเอมีนทุติยภูมิ และไดเมทิลแอนิลีนเป็นเอมีนตติยภูมิ พบว่ากระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยที่ตรึงด้วยเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นคาร์บาเมตเอมีน และค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของมอนอเอทานอลามีน ผสมกับไดเมทิลแอนิลีน (MEA/DMA) และไดเอทิลเอมีนผสมกับไดเมทิลแอนิลีน (DEA/DMA) มีค่าเท่ากับ 6.89 และ 5.99 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ จากค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเห็นได้ว่ามอนอเอทานอลามีนผสมกับไดเมทิลแอนิลีน มีค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าไดเอทิลเอมีนผสมกับไดเมทิลแอนิลีน เนื่องมาจากผลของจุดเดือดที่สูงกว่า และมอนอเอทานอลามีนมีความหนาแน่นสูง อีกทั้งมีการเกิดพันธะไฮโดรเจนในโครงสร้างของเถ้าลอยที่ผ่านการตรึงด้วยมอนอเอทานอลามีนผสมกับไดเมทิลแอนิลีน จากค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อนำตัวดูดซับเถ้าลอยมาผ่านการตรึงด้วยเอมีนผสม สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Elkhalifah และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาการปรับแต่งไอออนบวกบนพื้นผิวดูดซับเบนโทไนต์ (Bentonite) ด้วยแอลคาไลและแอลคาไลน์เอิร์ท เพื่อศึกษาการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไอออนบวกของสารละลายเอมีน 3 ชนิด คือ สารละลายมอนอเอทานอลามีน โอลิเอทิลเอมีน และไดเอทิลเอมีน

(Monoethanolammonium cations, MEA⁺) สารละลายไดเอทานอลแอมโมเนียม (Diethanolammonium cations, DEA⁺) และสารละลายไตรเอทานอลแอมโมเนียม (Triethanolammonium cations, TEA⁺) สำหรับนำไปใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าตัวดูดซับเบนโทไนต์ที่ปรับแต่งไอออนบวกด้วยแอลคาไลน์เอิร์ทแมกนีเซียมไอออน (Mg²⁺) และผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับสารละลายมอนอเอทานอลแอมโมเนียมจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงสุด เท่ากับ 147.28 ตารางเมตรต่อกรัมตัวดูดซับ และให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 3.15 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวสัมผัสมีผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากจะให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ซึ่งส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวสัมผัส นำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

Stevens และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก คือ เฮกซะเดซิลไตรเมทิล แอมโมเนียมโบรไมด์ (Hexadecyltrimethylammonium bromide, CTAB) ลงบนตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite, MMT) และตรึงด้วยไตรเอมีน คือ 2-อะมิโนเอทิล-3-อะมิโนโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน (*N*-2-aminoethyl-3-aminopropyl trimethoxysilane, AEAPTS) พบว่าค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของตัวดูดซับมอนต์มอริลโลไนต์ตรึงด้วยไตรเอมีน (MMT N₂) และมอนต์มอริลโลไนต์ที่ผ่านการเติมสารลดแรงตึงผิว และตรึงด้วยไตรเอมีน (MMT CTAB N₂) เท่ากับ 1.68 และ 2.42 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ ณ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับคายซับ เท่ากับ 80 และ 160 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และได้ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้แบบจำลอง 4 แบบจำลองคือ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) แบบจำลองอีโลวิช (Elovich's equation) และแบบจำลองอาฟรามี (Avrami's equation) ณ อุณหภูมิช่วง 25 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองอาฟรามี มีความเข้ากับข้อมูลจากการทดลองมากที่สุด โดยมีร้อยละความผิดพลาดน้อยที่สุด แบบจำลองอาฟรามีอธิบายถึงพฤติกรรมทางจลนพลศาสตร์การดูดซับในระบบที่มีความซับซ้อน ซึ่งความซับซ้อนเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่มีมากกว่าหนึ่งปฏิกิริยา ซึ่งการดูดซับที่เกิดขึ้นมีทั้งการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี อีกทั้งตัวดูดซับยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 9 รอบ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับที่ดี

Hua Chen และคณะ [32] ได้ทำการศึกษาการเตรียมตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีราคาถูกสำหรับการนำไปใช้ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกตัวดูดซับเคโอลิไนต์ มาตรึงเอมีนผสม คือ มอนอเอทานอลามีน (Monoethanolamine, MEA) ผสมกับเอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine, EDA) ในอัตราส่วน 4:1 โดยใช้วิธีการฝังตัวแบบเปียก (Wet Impregnation) พบว่าค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของเคโอลิไนต์ที่ไม่ผ่านการตรึงเอมีน เท่ากับ 3.3 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ และเมื่อนำตัวดูดซับเคโอลิไนต์มาผ่านการตรึงเอมีนผสม พบว่าที่ร้อยละร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะให้ค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 149 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ แสดงให้เห็นว่าการนำตัวดูดซับมาตรึงด้วยเอมีนผสม สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) และการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับโดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) พบว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับเคโอลิไนต์ที่ตรึงเอมีนผสมเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

Zhang และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาการเตรียมตัวดูดซับซิลิกาเมโซพอร์ชนิด SBA-15 กับอะคริโลไนไตรล์ (Acrylonitrile, AN) ที่ผ่านการตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (Tetraethylenepentamine, TEPA) โดยใช้วิธีการฝังตัว (Impregnation) เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และเพิ่มเสถียรภาพให้กับตัวดูดซับ จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับ SBA-15 ที่ผ่านการตัดแปรอะคริโลไนไตรล์กับเตตระเอทิลีนเพนตามีน (S-TN โดยที่ TN ย่อมาจาก AN ถูกตัดแปรด้วย TEPA) เมื่อนำไปศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ให้ค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 180.1 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ปริมาณเอมีนที่ตรึงลงบนตัวดูดซับเท่ากับร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับตัวดูดซับอีกชนิด คือ S-TEPA ที่ไม่มีการเติมอะคริโลไนไตรล์ พบว่าตัวดูดซับชนิด S-TN มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าตัวดูดซับชนิด S-TEPA ในทุกช่วงร้อยละปริมาณเอมีนที่ตรึงลงบนตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามพบว่าเมื่อทำการศึกษาเสถียรภาพหรือการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่นั้น พบว่าตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 12 รอบ แต่ตัวดูดซับชนิด S-TN มีเสถียรภาพที่ดีกว่า ซึ่งดูได้จากค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อนำกลับมาใช้ใหม่

Zheng และคณะ [34] ได้ทำการสังเคราะห์ตัวดูดซับซิลิกาเมโซพอร์ชนิด SBA-15 โดยผ่านการตัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine, EDA) เพื่อนำมาศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับ EDA-SBA-15 ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อกรัมตัวดูดซับ ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ที่ความ

เข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้าร้อยละ 15 โดยปริมาตร ดุลในแก๊สไนโตรเจน และทำการศึกษาผลของไอน้ำหรือความชื้นในแก๊สผสมขาเข้า ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับสภาวะแห้ง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำร้อยละ 2 โดยปริมาตร ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่าความชื้นไม่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับซิลิกาเมโซพอร์ต์ดัดแปรด้วยเอทิลีนไดเอมีน และพบว่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับชนิดนี้ได้ผลิตภัณท์เป็นคาร์บาเมต



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย

บทนี้เกี่ยวข้องกับ การเตรียมตัวดูดซับดินไดอะตอมดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน วิธีการทดสอบความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงจะกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ดังนี้ สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงบรรยายเกี่ยวกับวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ดินไดอะตอม (Diatomaceous Earth, DE) จากบริษัท ที เค อูริก
- 3.1.2 เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine, EDA) ความเข้มข้นร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท Panreac
- 3.1.3 เตตระเอทิลีนเพนตามีน (Tetraethylenepentamine, TEPA) เกรดเชิงพาณิชย์ (Commercial grade) จากบริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.4 โทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ (Toluenesulfonyl chloride, TsCl) เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท Sigma Aldrich
- 3.1.5 เมทานอล (Methanol, MeOH) เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท RCI Labscan
- 3.1.6 ไพริดีน (Pyridine) เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท RCI Labscan
- 3.1.7 ไดเมทิลฟอร์มมาไมด์ (Dimethylformamide, DMF) เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท RCI Labscan
- 3.1.8 ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane, CH_2Cl_2) เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท RCI Labscan
- 3.1.9 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) ความเข้มข้นร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท RCI Labscan
- 3.1.10 กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก เกรดเชิงพาณิชย์ (Commercial grade) จากบริษัท RCI Labscan
- 3.1.11 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH_4OH) ความเข้มข้นร้อยละ 28.0-30.0 โดยน้ำหนัก เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท J.T.Baker
- 3.1.12 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เกรดวิเคราะห์ (AR grade) จากบริษัท RCI Labscan

3.1.13 น้ำปราศจากไอออน (DI water)

3.1.14 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ดุลในฮีเลียม จากบริษัท Praxair

3.1.15 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ดุลในฮีเลียม จากบริษัท Praxair

3.1.16 แก๊สฮีเลียม ความเข้มข้นร้อยละ 99.999 โดยปริมาตร จากบริษัท Praxair

3.1.17 แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ จากบริษัท TIG

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องชั่งละเอียด ยี่ห้อ Mettler รุ่น AB204-S

3.2.2 เครื่องให้ความร้อนและกวนสารเคมี (Hot plate and stirrer) ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7

3.2.3 เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ

3.2.4 ชุดกรองสาร ประกอบด้วย กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) กระดาษกรองเบอร์ 42 (Filter paper) ขวดลดความดัน (suction flask) และเครื่องปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ยี่ห้อ GAST รุ่น DOA-P504-BN

3.2.5 โถรงบดสาร

3.2.6 เตาอบ (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UE200

3.2.7 ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)

3.2.8 เครื่องควบคุมอัตราการไหล ยี่ห้อ AALBROG model รุ่น GFC1715

3.2.9 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

3.2.10 เครื่องควบคุมความดัน

3.2.11 ท่อควอตซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก $\frac{1}{4}$ นิ้ว ความยาว 60 เซนติเมตร

3.2.12 ชุดการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

3.2.13 แก๊สโครมาโทกราฟ (Gas chromatograph) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2014 จากบริษัท Bara Scientific

3.3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับดินไคอะตอมดัดแปรพื้นผิวด้วยเอมีน

ในการทดลองจะทำการเตรียมตัวดูดซับที่ผ่านวิธีการปรับปรุงพื้นผิวต่างกัน 2 วิธี ก่อนการตรึงเอมีน 2 ชนิด คือ ตัวดูดซับดินไคอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีน (EDA/DE-MeOH) ตัวดูดซับดินไคอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA/DE-MeOH) ตัวดูดซับดินไคอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีน (EDA/DE-TsCl) และตัวดูดซับดินไคอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA/DE-TsCl) โดยวิธีการเตรียมเป็นดังนี้

3.3.1.1 การเตรียมตัวดูดซับดินไคอะตอมดัดแปรพื้นผิวดินไคอะตอมด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน

- 1) ชั่งดินไคอะตอมจำนวน 5 กรัม ผสมกับเมทานอล 10 มิลลิลิตร
- 2) ทำการเตรียมสารละลายเอมีนในเมทานอล โดยชั่งเอทิลีนไดเอมีน (EDA) หรือเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) ตามจำนวนที่ต้องการผสมกับเมทานอล 10 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้อัตราส่วนร้อยละ 15 30 40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
- 3) เติมสารละลายเอมีนในเมทานอลที่เตรียมไว้ในข้อที่ 2) ผสมกับสารแขวนลอยดินไคอะตอมที่เตรียมไว้ในข้อที่ 1) แล้วกวนผสมต่อเนื่องด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
- 4) นำไปอบให้แห้ง ภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง จะได้ของแข็งมีลักษณะเป็นก้อน สีน้ำตาลอ่อน จะได้ตัวดูดซับที่มีชื่อว่า ตัวดูดซับดินไคอะตอมดัดแปรพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเอมีน หรือสามารถเขียนย่อได้เป็น EDA/DE-MeOH และ TEPA/DE-MeOH ตามลำดับ
- 5) นำตัวดูดซับที่ผ่านการอบแห้งแล้ว มาบดด้วยโกร่งบดสารจนละเอียด และเก็บไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ เพื่อศึกษาในขั้นต่อไป

3.3.1.2 การเตรียมตัวดูดซับดินไโดอะตอมดัดแปรพื้นผิวด้วยโพลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน

การเตรียมตัวดูดซับดินไโดอะตอมดัดแปรพื้นผิวดินไโดอะตอมด้วยโพลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกต้องทำการดัดแปรพื้นผิวดินไโดอะตอมให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) และขั้นที่สองทำการตรึงด้วยเอมีน โดยนำตัวดูดซับที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิลแล้ว มาเติมโพลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอมีน ซึ่งวิธีการเตรียมตัวดูดซับมีดังนี้

3.3.1.2.1 การดัดแปรพื้นผิวดินไโดอะตอมให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH)

1) เตรียมสารละลายผสมระหว่างกรดซัลฟิวริกกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในอัตราส่วน 2:1 โดยปริมาตร แล้วใส่ดินไโดอะตอม 20 กรัม ลงในสารละลายผสมนี้ ทำการกวนผสมต่อเนื่องด้วยความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมื่อครบ 10 นาที ให้นำดินไโดอะตอมที่ปรับด้วยสารละลายกรดดังกล่าวมาล้างด้วยน้ำกลั่น จนกว่าน้ำล้างมีสีภาวะเป็นกลาง

2) เตรียมสารละลายเบส ที่ผสมระหว่างแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 1:1:5 โดยปริมาตร มาผสมกับดินไโดอะตอมที่ปรับให้มีสีภาวะเป็นกลางในข้อที่ 1) กวนผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมื่อครบ 10 นาที ให้นำดินไโดอะตอมที่ปรับด้วยสารละลายเบสมาล้างความเป็นเบสออกด้วยน้ำกลั่นโดยผ่านการกรอง จนมีสีภาวะเป็นกลาง

3) เตรียมสารละลายกรด ที่ผสมระหว่างกรดไฮโดรคลอริก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และน้ำกลั่น ในอัตราส่วน 1:1:6 โดยปริมาตร มาผสมกับดินไโดอะตอมที่ปรับให้มีสีภาวะเป็นกลางในข้อที่ 2) กวนผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 10 นาที ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เมื่อครบ 10 นาที ให้นำดินไโดอะตอมที่ปรับด้วยสารละลายกรดดังกล่าวมาล้างความเป็นกรดออกด้วยน้ำกลั่นโดยผ่านการกรอง จนมีสีภาวะเป็นกลาง

4) นำดินไโดอะตอมที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวทั้ง 3 ขั้นตอน ที่มีสีภาวะเป็นกลาง มาอบให้แห้งภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

3.3.1.2.2 การสังเคราะห์ตัวดูดซับโดยนำตัวดูดซับที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) แล้ว มาผ่านการเติมโทลูอินซิลฟีนีลคลอไรด์และตรึงด้วยเอมีน

- 1) ชั่งดินไดอะตอมที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) จาก 3.3.1.2.1 จำนวน 3 กรัม
- 2) เตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ของโทลูอินซิลฟีนีลคลอไรด์ละลายในไพริดีน
- 3) เทสารละลายในข้อ 2) ลงในดินไดอะตอมที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้วในข้อ 1) กวนผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 90 นาที ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง
- 4) เมื่อครบ 90 นาที นำตัวดูดซับมาชะล้างด้วยตัวทำละลาย 3 ชนิด ได้แก่ ไดมethylฟอร์มาไมด์ (DMF) จำนวน 2 รอบ เมทานอล (MeOH) จำนวน 1 รอบ และไดคลอโรมีเทน (CH_2Cl_2) จำนวน 2 รอบ ตามลำดับ
- 5) ทำการเตรียมสารละลายเอทิลีนไดเอมีน (EDA) หรือเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) ตามอัตราส่วนโดยน้ำหนัก (ร้อยละ 15, 30, 40) ผสมกับเมทานอล 10 มิลลิลิตร
- 6) นำสารละลายเอมีนในข้อ 5) เทผสมกับตัวดูดซับที่ชะล้างด้วยตัวทำละลายเรียบร้อยแล้ว จากนั้นกวนผสมต่อเนื่องเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
- 7) นำไปอบให้แห้งภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- 8) นำตัวดูดซับที่แห้งมาดให้ละเอียดและเก็บไว้ในขวดที่เตรียมไว้ จะได้ตัวดูดซับที่มีชื่อว่า ตัวดูดซับดินไดอะตอมดัดแปรพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลฟีนีลคลอไรด์และตรึงเอมีน หรือสามารถเขียนย่อได้เป็น EDA/DE-TsCl และ TEPA/DE-TsCl ตามลำดับ

3.3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ

3.3.2.1 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับ (Thermogravimetric analysis, TGA)

Thermogravimetric analysis หรือ TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุ เมื่อได้รับความร้อนโดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูง โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermal Gravimetric Analyzer, TGA) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Pyris Diamond วิธีการวิเคราะห์ทำได้โดยการนำตัวดูดซับสังเคราะห์ จำนวน 0.01 กรัม ใส่ลงในถ้วยตัวอย่าง (Pan) จากนั้นทำการวิเคราะห์ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิ 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

3.3.2.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)

เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์จำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล และนิยมใช้สำหรับหาโครงสร้างของสารอินทรีย์ เช่น หาหมู่ฟังก์ชันต่างๆ รวมถึงสามารถบอกถึงปริมาณองค์ประกอบที่มีอยู่ในโมเลกุลของสารผสม ตัวอย่างที่ไม่ทราบชนิด โดยทำการตรวจวัดการดูดกลืนแสงรังสีอินฟราเรดของตัวอย่างที่มีความถี่ต่างๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละพันธะ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ยี่ห้อ Perkin-Elmer (Spectrum one) spectrometer ต่อเข้ากับตัวตรวจจับ mercury-cadmium-telluride detector วิธีการวิเคราะห์ทำได้โดยการนำตัวดูดซับสังเคราะห์ จำนวน 0.5 กรัม มาบดผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) แล้วให้นำไปใส่ในแก้ว เพื่อที่จะนำไปอัดให้เป็นแผ่น หลังจากที่ได้ตัวอย่างเป็นแผ่นแล้วก็นำไปใส่ในช่องใส่ตัวอย่างแล้วทำการวัดหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับต่อไป

3.3.2.3 การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับ (CHN elemental analysis, CHN)

หลักการของเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN elemental analysis หรือ CHN) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และไนโตรเจน (Nitrogen) โดยการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ตัวอย่างจะถูกเผาไหม้ในบรรยากาศของออกซิเจนเกิดเป็น CO_2 H_2O และ N_2 จากนั้นก๊าซฮีเลียมจะทำหน้าที่พาท่ำที่ที่เกิดขึ้นเข้าสู่เครื่องวัด Infrared Absorption Detector และ Thermal Conductivity Detector แปลงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์และประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN628 วิธีการวิเคราะห์ทำได้โดยการนำตัวดูดซับสังเคราะห์จำนวน 0.1 กรัม มาห่อด้วยแผ่นดีบุกบางๆ (Tin foil) เป็นแคปซูลเล็กๆ และนำไปใส่ในเครื่องสุ่มตัวอย่างอย่างอัตโนมัติ (Autosampler) จากนั้นแคปซูลของตัวอย่างจะถูกนำไปหย่อนลงในหลอดเผาไหม้ (Combustion tube) ที่ทำจากควอทซ์หรือเหล็กกล้าซึ่งให้อุณหภูมิสูงถึง 1020 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สฮีเลียมซึ่งไหลผ่านตลอดเวลา จากนั้นจึงนำแก๊สออกซิเจนผ่านเข้ามา ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับดีบุกได้ SnO_2 พร้อมกับคายความร้อนออกมาทำให้อุณหภูมิสูงถึง 1800 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์

3.3.2.4 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ (Brunauer–Emmett–Teller surface area, BET)

เทคนิค Brunauer–Emmett–Teller (Brunauer–Emmett–Teller surface area หรือ BET) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface area) ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (Average pore size) ของตัวดูดซับ โดยอาศัยเทคนิคการดูดซับ/การคายซับไนโตรเจน (N_2) ใช้หลักการของการดูดซับแก๊สบนพื้นผิวของตัวอย่างที่ต้องการทดสอบ โดยมีสมมติฐานว่าการดูดซับของแก๊สเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวไม่จำเพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่ง และอีกสมมติฐานหนึ่ง คือ แก๊สที่ใช้มีความสามารถในการดูดซับบนพื้นผิวได้ดีกว่าการที่แก๊สเกิดดึงดูดกันเองของสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นผิว หรือรูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020 วิธีการวิเคราะห์ทำได้โดยการนำตัวดูดซับสังเคราะห์จำนวน 0.06 กรัม ไปกำจัดแก๊ส (Degas) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นระบบจะทำการดูดซับ/การคาย

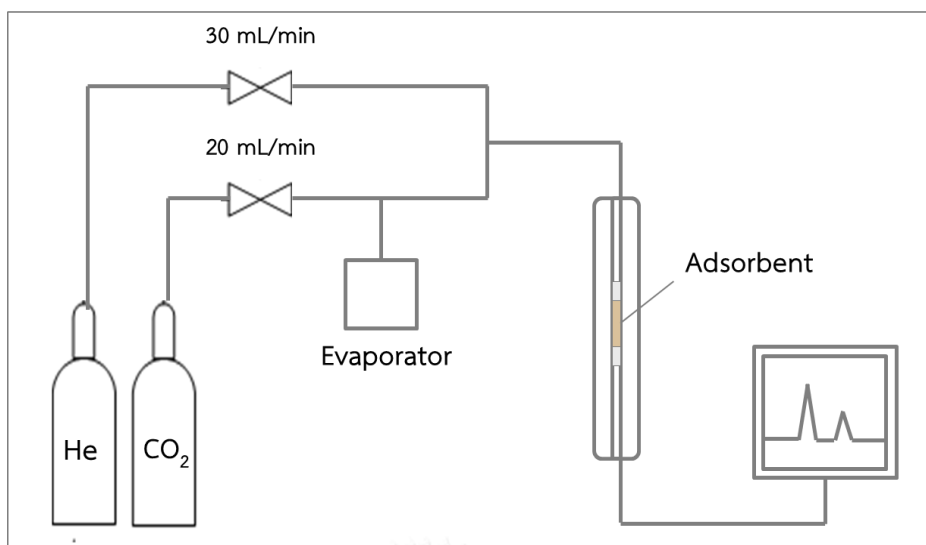
ซับไนโตรเจน (N_2) ที่อุณหภูมิการดูดซับและคายซับเท่ากับ -196 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับต่อไป

3.3.2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ (X-ray diffraction, XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d \sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอกซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์หัตถ์ Bruker รุ่น D8 Advance ที่มีมุม 2θ ตั้งแต่ 5 จนถึง 80 วิธีการวิเคราะห์ทำได้โดยการนำตัวดูดซับสังเคราะห์มาบดละเอียด ใส่ลงในฐานรอง (Stub) แล้วกดให้เรียบ จากนั้นนำตัวดูดซับสังเคราะห์ที่เตรียมใส่ลงใน Holder จากนั้นทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับต่อไป

3.3.3 การทดสอบความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

งานวิจัยนี้ทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งหรือคอลัมน์การดูดซับ ภายใต้ภาวะความดันบรรยากาศ มีการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้แถบเพิ่มความร้อนเป็นการตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ และควบคุมอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าโดยเครื่องควบคุมอัตราการไหล (Flow meter) อีกทั้งใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีในการตรวจวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกด้วยวิธีออนไลน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



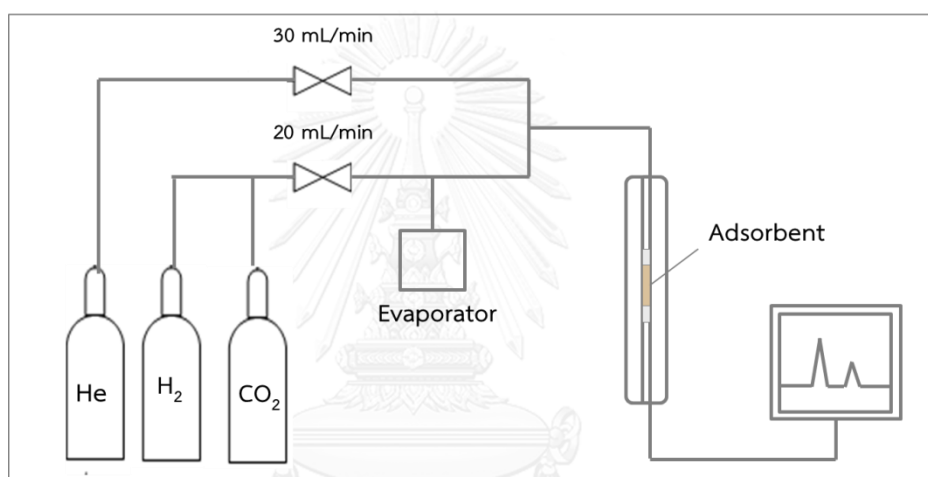
รูปที่ 3.1 แผนภาพการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

วิธีการทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะแห้งหรือไม่มีความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้อง มีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งน้ําบรรจุตัวดูดซับสังเคราะห์ 0.3 กรัม ลงในคอลัมน์การดูดซับ
2. ผ่านกระแสแก๊สฮีเลียมเข้าไปในคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 15 นาที อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการไล่แก๊สผสมอื่นๆ ที่ตกค้างอยู่ในหลอดดูดซับออกจากระบบ
3. ปรับลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษา (ช่วงอุณหภูมิที่เลือกศึกษา 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส) และสลับเปลี่ยนแก๊สเข้าให้เป็นกระแสแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูลในฮีเลียม ตามสัดส่วนร้อยละของแก๊สผสมที่ต้องการ (30:70) ตามลำดับ ด้วยอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที แล้วจึงเริ่มทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
4. ทำการบันทึกผลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟทุกๆ 4 นาที จนกระทั่งการดูดซับเข้าสู่ สมดุล (การเข้าสู่สมดุลได้จากความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า)
5. กรณีทดสอบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะชื้นหรือมีไอน้ำเข้ามาเกี่ยวข้อง จะมีวิธีการทดลองเหมือนกับสถานะแห้ง ยกเว้น กระแสแก๊สผสมขาเข้าจะประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดูลในฮีเลียมผ่านเครื่องระเหยน้ำที่มีความ

เข้มข้นของไอน้ำต่างกัน จากนั้นปล่อยแก๊สเข้าสู่ระบบการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และตรวจวัดความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟเช่นเดิม

6. ศึกษาความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Selectivity) ของตัวดูดซับ ในสภาวะแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน ตามสัดส่วนร้อยละของแก๊สผสม คือ 30:70 ตามลำดับ ซึ่งวิธีการทดลองจะทำเหมือนกับสภาวะแห้ง แต่มีความแตกต่างกันตรงที่เปลี่ยนจากการดูลในฮีเลียมไปเป็นไฮโดรเจนแทน ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพการทดลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์
ในสภาวะแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮโดรเจน

3.3.4 การศึกษาความสามารถในการดูดซับและคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับและคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับสังเคราะห์ เพื่อเป็นการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งทำการทดลองโดยอาศัยกระบวนการสลับเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption, TSA) โดยมีวิธีการทดลอง 2 ขั้นตอน คือ การดูดซับและการคายซับ

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ บรรจุตัวดูดซับสังเคราะห์ 0.3 กรัม ลงในคอลัมน์การดูดซับ จากนั้นผ่านกระแสแก๊สฮีเลียม เข้าไปในคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 48 นาที ให้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นปรับลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิที่ต้องการศึกษา (ช่วงอุณหภูมิที่เลือกศึกษา 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส) และสลับเปลี่ยนแก๊สขาเข้าให้

เป็นกระแสแก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดูลในฮีเลียม ด้วยอัตราการไหล 20 มิลลิลิตร ต่อนาที แล้วจึงเริ่มทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำการบันทึกผลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ ออกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีทุกๆ 4 นาที จนกระทั่งการดูดซับเข้าสู่สมดุล เมื่อทำการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์เรียบร้อยแล้ว จึงเข้าสู่กระบวนการคายซับโดยจะทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น เท่ากับ 110 องศาเซลเซียส และผ่านกระแสแก๊สฮีเลียมเข้าไปในคอลัมน์ด้วยอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลาประมาณ 15 นาที ให้อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเพื่อเป็นการไล่แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ดูดซับออกมาที่อุณหภูมิสูง เมื่อการคาย ซับเสร็จสิ้นแล้ว จะทำการลดอุณหภูมิในหอดูดซับลงมาที่อุณหภูมิการดูดซับอีกครั้ง ทำการเพิ่ม อุณหภูมิเพื่อคายซับและลดอุณหภูมิสำหรับการดูดซับในครั้งต่อไป ทำเช่นนั้นวนไปเรื่อยๆจนเกิดเป็น วัฏจักร

3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปรที่ทำการศึกษาต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีดังต่อไปนี้

3.4.1 ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ศึกษาชนิดของตัวดูดซับที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน ได้แก่ ตัวดูดซับดินไดอะตอมมดัดแปรพื้นผิวดินไดอะตอมด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน (EDA/DE-MeOH) และ ตัวดูดซับดินไดอะตอมมดัดแปรพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโพลีคลอไรด์และตรึงเอมีน (EDA/DE-TsCl)

3.4.2 ชนิดของเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ

ศึกษาผลของชนิดเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ ได้แก่ เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine, EDA) และเตตระเอทิลีนเพนตามีน (Tetraethylenepentamine, TEPA) ตัวอย่างเช่น EDA/DE-MeOH และ EDA/DE-TsCl หรือ TEPA/DE-MeOH และ TEPA/DE-TsCl เป็นต้น

3.4.3 ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ

ศึกษาผลของปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาในช่วงร้อยละ 0-40 โดยน้ำหนัก

3.4.4 ปริมาณตัวดูดซับ

ศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับ โดยแสดงเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า (W/F Ratio) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาในช่วง 0.1 ถึง 0.5 กรัม

3.4.5 อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส

3.4.6 ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า

ศึกษาผลของความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าที่อุณหภูมิต่างๆ (ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาในช่วงความเข้มข้นของไอน้ำร้อยละ 0 ถึง 15 โดยปริมาตร

3.4.7 ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า

ศึกษาผลของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่อุณหภูมิต่างๆ (ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส) ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกศึกษาในช่วงความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร

3.3.8 ความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า

ศึกษาผลของความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้แก๊สผสมระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2)

3.5 การศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินโตอะตอมที่ผ่านการดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน โดยศึกษาจากแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์การดูดซับ 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo- first Order) แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order) และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's

equation) เพื่อทำนายกลไกอัตราการดูดซับ อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงสภาวะสมดุล ซึ่งแต่ละแบบจำลองจะอธิบายเกี่ยวกับพฤติกรรมของการดูดซับที่แตกต่างกันไป



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

บทนี้จะเกี่ยวข้องกับผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง โดยจะอธิบายรายละเอียดต่างๆ ในส่วนผลการทดลองทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีนโดยใช้เทคนิคต่างๆ ผลการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับสังเคราะห์ และศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับ นอกจากนี้ยังมีการอธิบายพฤติกรรมการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ

4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของของตัวดูดซับ

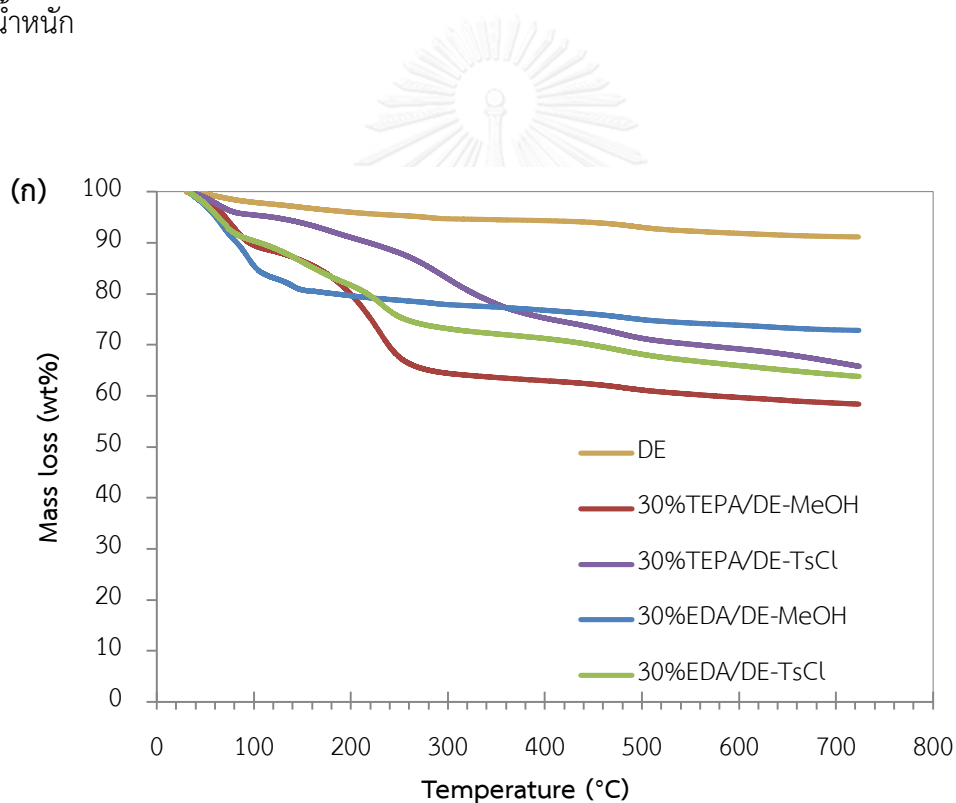
ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จะถูกวิเคราะห์คุณลักษณะด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุ เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน-ไฮโดรเจน-ไนโตรเจน เทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน และเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ดังมีรายละเอียด ดังนี้

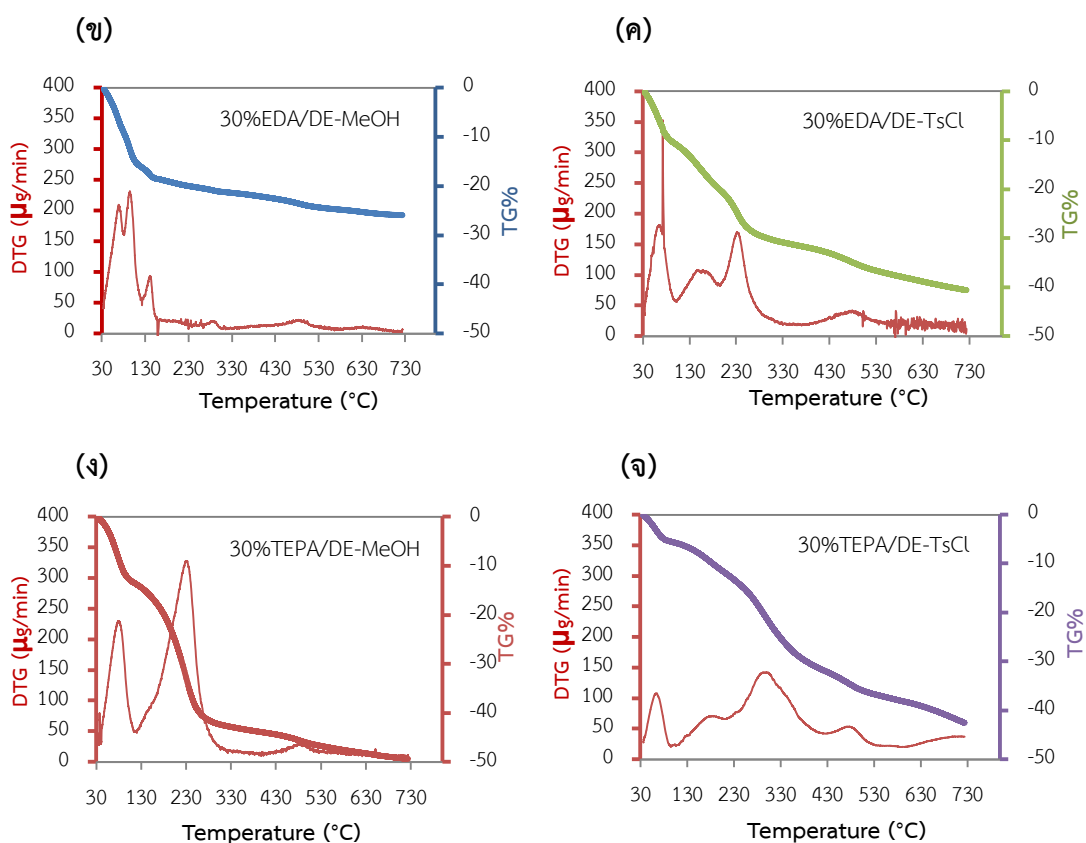
4.1.1 การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับ (Thermogravimetric analysis, TGA)

ตัวดูดซับที่ถูกวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเพื่อทราบอุณหภูมิการสลายตัว ซึ่งทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน ได้แก่ ดินไดอะตอม (DE) ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30%EDA/DE-MeOH) ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30%EDA/DE-TsCl) ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30%TEPA/DE-MeOH) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30%TEPA/DE-TsCl) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยที่รูปที่ 4.1 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Mass loss (wt%)) กับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส และ รูปที่ 4.1 (ข) ถึงรูปที่ 4.1 (จ)

แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG ($\text{microgram min}^{-1}$)), ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (TG%) กับ อุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส สำหรับตัวดูดซับสังเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ดินไคอะตอมมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อน 2 ช่วงอุณหภูมิ โดยช่วงแรกเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 250 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของน้ำบนพื้นผิวของดินไคอะตอม และน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของตัวดูดซับ และช่วงที่สองเป็นการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิล(-OH) โดยผ่านปฏิกิริยาดีไฮดรอกซีเลชัน (Dehydroxylation) ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างที่เป็นหมู่ซิลานอล (Si-OH) ที่อยู่บนพื้นผิวภายนอกของดินไคอะตอม [35] การสลายของช่วงที่สองจะเกิดในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 500 องศาเซลเซียส จากการสลายตัวทั้งสองช่วง อุณหภูมินี้ พบว่า ร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียไปของดินไคอะตอมมีค่าประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก





รูปที่ 4.1 เกลียวกราฟทางความร้อนของตัวดูดซับสังเคราะห์ โดย (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Mass loss (wt%)) กับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส และ (ข-จ) แสดงอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG), ร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (TG%) กับอุณหภูมิในช่วง 30 ถึง 800 องศาเซลเซียส

ส่วนผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของตัวดูดซับ 30%EDA/DE-MeOH พบ ยอดพีคการสลายตัว 3 พีค ดังแสดงในรูปที่ 4.1ข ทำให้ทราบว่า การสูญเสียน้ำหนักเกิด 3 ช่วงอุณหภูมิ โดยช่วงแรกตั้งแต่อุณหภูมิ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ และช่วงที่สองซึ่งเกิดที่ช่วงอุณหภูมิ 110 ถึง 130 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของตัวดูดซับ ช่วงที่สามตั้งแต่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ขึ้นไป เป็นการสลายตัวของเอทิลีนไดเอมีน ถึงแม้ว่าจุดเดือดของเอทิลีนไดเอมีนที่เท่ากับ 116 องศาเซลเซียส แต่เมื่อเอทิลีนไดเอมีนที่ถูกตรึงบนตัวดูดซับจะเกิดการสร้างพันธะกับผิวของตัวดูดซับ จึงทำให้ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นในการสลายตัว จากการสลายตัวทั้งสามช่วงอุณหภูมินี้ พบว่า ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียโดยรวมบนตัวดูดซับ 30%EDA/DE-MeOH มีค่าประมาณร้อยละ 27 โดยน้ำหนัก

แต่เมื่อทำการตัดแปรพื้นผิวดินไดอะตอมด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์แล้วจึงตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีนเพื่อสังเคราะห์ตัวดูดซับ 30%EDA/DE-TsCl พบว่า เสถียรภาพทางความร้อนของตัวดูดซับ 30%EDA/DE-TsCl สูงกว่า เสถียรภาพทางความร้อนของตัวดูดซับ 30%EDA/DE-MeOH ดังแสดงในรูปที่ 4.1ค เนื่องจาก TsCl ทำหน้าที่เป็น leaving group ในการตรึงเอทิลีนไดเอมีนจึงเกิดพันธะที่แข็งแรงกว่าการใช้ MeOH จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนบนตัวดูดซับสังเคราะห์ข้างต้น จะเห็นได้ว่า ตัวดูดซับ 30%EDA/DE-TsCl มีช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของเอทิลีนไดเอมีนสูงกว่าตัวดูดซับ 30%EDA/DE-MeOH หรือกล่าวได้ว่าเอทิลีนไดเอมีนที่ถูกตรึงบนตัวดูดซับ DE-TsCl สลายตัวได้ยากกว่า เนื่องมาจากตัวดูดซับ 30%EDA/DE-TsCl หมู่เอมีนของเอทิลีนไดเอมีนจะเกิดการสร้างพันธะกับดินไดอะตอม (Si-N) ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง ส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวของเอทิลีนไดเอมีนบนตัวดูดซับชนิดนี้ สามารถทนความร้อนได้สูงกว่า จึงมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.1ค ยังพบอีกว่า ยอดพีคการสลายตัว 4 พีค ซึ่งหมายความว่า ลักษณะการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนจะเกิดใน 4 ช่วงอุณหภูมิ ช่วงแรกตั้งแต่อุณหภูมิ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวของน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 120 ถึง 200 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวของน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างตัวดูดซับ ช่วงที่สามตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของเอทิลีนไดเอมีน และช่วงที่สี่ตั้งแต่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ขึ้นไป จะเป็นเกิดการสลายตัวของโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ (TsCl) เนื่องจาก TsCl ยังคงหลงเหลือที่ผิวตัวดูดซับ ซึ่งแสดงในผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันโดยอาศัยเทคนิค FTIR ที่จะกล่าวในลำดับถัดไป จากการสลายตัวทั้งสี่ช่วงอุณหภูมิ พบว่า ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียโดยรวมบนตัวดูดซับ 30%EDA/DE-TsCl มีค่าประมาณร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

สำหรับการเสถียรภาพทางความร้อนของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH พบ ยอดพีคการสลายตัว 3 พีค ดังแสดงในรูปที่ 4.1ง ทำให้ทราบว่า การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนเกิด 3 ช่วงอุณหภูมิ เช่นเดียวกับตัวดูดซับ 30%EDA/DE-MeOH โดยช่วงแรกตั้งแต่อุณหภูมิ 30 ถึง 120 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ และช่วงที่สองที่ช่วงอุณหภูมิ 120 ถึง 270 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างของตัวดูดซับ และช่วงที่สามตั้งแต่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขึ้นไป เป็นการสลายตัวของเตตระเอทิลีนเพนตามีน [36] ทั้งที่จุดเดือดของเตตระเอทิลีนเพนตามีน เท่ากับ 340.3 องศาเซลเซียส แต่จากรูปที่ 4.1ง จะพบว่า ต้องใช้ความร้อนมากขึ้นในการกระตุ้นให้เกิดการสลายตัวของเตตระเอทิลีนเพนตามีน แสดงว่า เตตระเอ

ทีลีนเพนตามีนที่ถูกตรึงนั้นได้สร้างพันธะกับผิวของตัวดูดซับ จึงจำเป็นต้องใช้ความร้อนมากขึ้น จาก การสลายตัวทั้งสามช่วงอุณหภูมิ พบว่า ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียโดยรวมบนตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH มีค่าประมาณร้อยละ 48 โดยน้ำหนัก

ส่วนผลเสถียรภาพทางความร้อนของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl ดังแสดงในรูปที่ 4.1จ พบ ยอดพีการสลายตัว 4 พีค ทำให้ทราบว่า การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนเกิด 4 ช่วงอุณหภูมิเช่นเดียวกับตัวดูดซับ 30%EDA/DE-TsCl โดยช่วงแรก ตั้งแต่อุณหภูมิ 30 ถึง 110 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 120 ถึง 250 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างตัวดูดซับ ช่วงที่สามตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 420 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์ (TsCl) เนื่องจาก TsCl ยังคงหลงเหลือที่ผิวตัวดูดซับ ซึ่งแสดงในผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน โดยอาศัยเทคนิค FTIR ที่จะ กล่าวในลำดับถัดไป และช่วงที่สี่ตั้งแต่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส ขึ้นไป จะเป็นเกิดการสลายตัวของเตตระเอทีลีนเพนตามีน จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนบนตัวดูดซับสังเคราะห์ ข้างต้น จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl มีช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของเตตระเอทีลีนเพนตามีนสูงกว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH หรือกล่าวได้ว่าเตตระเอทีลีนเพนตามีนที่ถูก ตรึงบนตัวดูดซับ DE-TsCl สลายตัวได้ยากกว่า เนื่องมาจากหมู่เอมีนของเตตระเอทีลีนเพนตามีนที่อยู่ บนตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl จะเกิดการสร้างพันธะกับดินไดอะตอม (Si-N) ซึ่งเป็นพันธะที่มีความ แข็งแรง ส่งผลให้อุณหภูมิในการสลายตัวของเตตระเอทีลีนเพนตามีนบนตัวดูดซับชนิดนี้ สามารถทนความร้อนได้สูงกว่า จึงมีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีกว่า จากการสลายตัวทั้งสี่ช่วง อุณหภูมิ พบว่า ร้อยละน้ำหนักที่สูญเสียโดยรวมบนตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl มีค่าประมาณร้อยละ 42 โดยน้ำหนัก

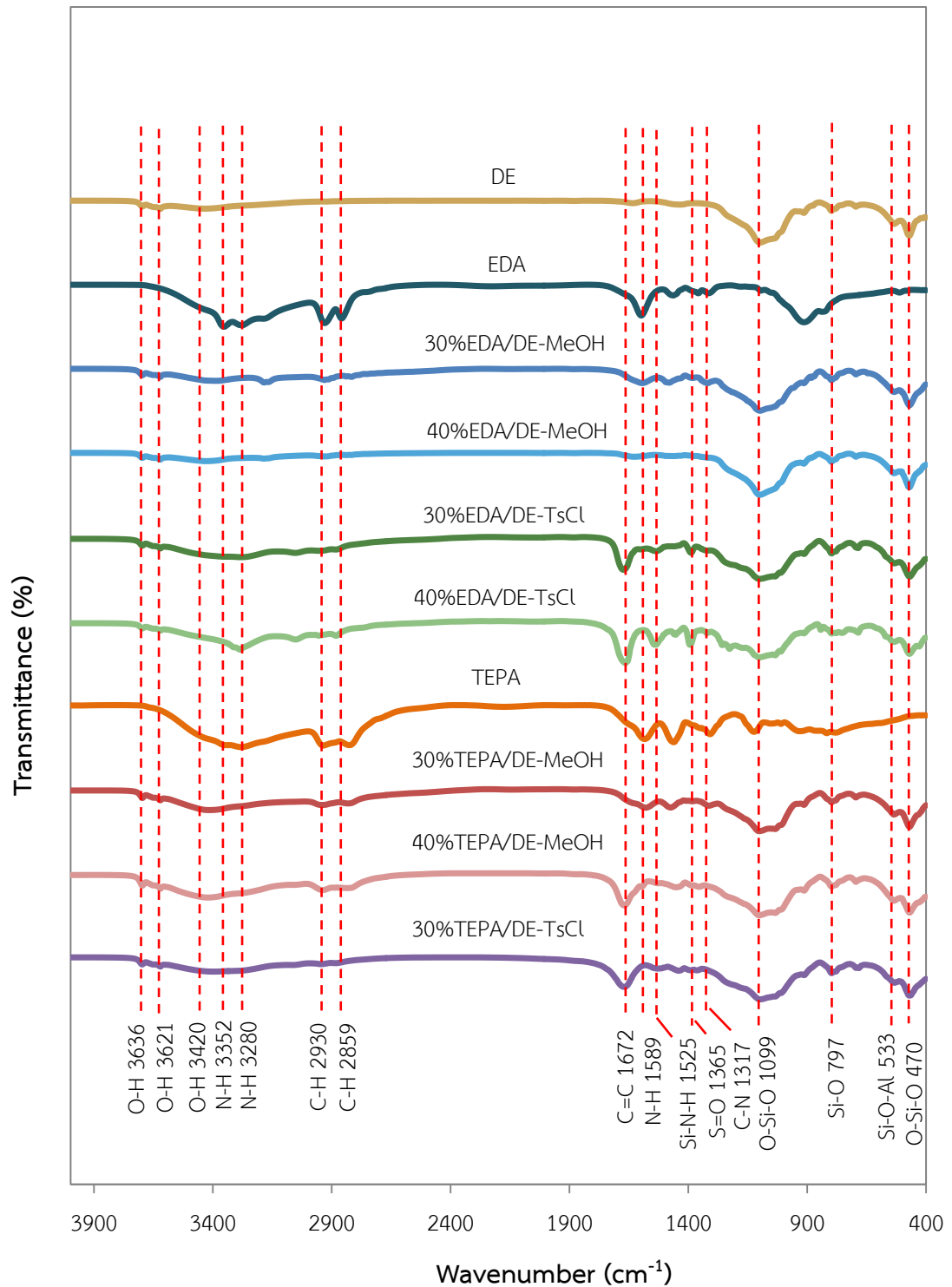
จากผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดข้างต้น แสดง ให้เห็นว่าวิธีการเตรียมตัวดูดซับที่แตกต่างกัน ส่งผลถึงเสถียรภาพทางความร้อนของตัวดูดซับ สังเคราะห์ กล่าวคือ ตัวดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์ (ตัวดูดซับ 30%EDA/DE-TsCl และ 30%TEPA/DE-TsCl) จะส่งผลต่ออุณหภูมิการสลายตัวของเอทีลีนไดเอมีนและเตตระเอทีลีนเพนตามีนให้มีการสลายตัวที่ช่วงอุณหภูมิสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของเอทีลีนไดเอมีนและเตตระเอทีลีนเพนตามีนบนตัวดูดซับที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอล (30%EDA/DE-MeOH และ 30%TEPA/DE-MeOH) ตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์

นั้น จะมีความสามารถในการทนความร้อนได้สูงกว่า และสามารถนำไปใช้งานในสภาวะที่ต้องการทำที่อุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากเอมีนทั้งสองชนิดสลายตัวได้ยาก ซึ่งเป็นผลมาจากการสร้างพันธะ Si-N ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวดูดซับ 30%EDA/DE-TsCl และ 30%TEPA/DE-TsCl มีเสถียรภาพทางความร้อนที่สูงกว่าตัวดูดซับ 30%EDA/DE-MeOH และ 30%TEPA/DE-MeOH

นอกจากนี้ จากผลการศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวของตัวดูดซับสังเคราะห์ข้างต้น พบว่า ช่วงอุณหภูมิที่เลือกใช้ในการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีความเหมาะสม เนื่องจากยังอยู่ในช่วงที่เอทิลีนไดเอมีนและเตตระเอทิลีนเพนตามีนยังไม่เกิดการสลายตัว

4.1.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับ

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันบนผิวของตัวดูดซับดินโดอะตอม (DE) ตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30%EDA/DE-MeOH) ตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (40%EDA/DE-MeOH) ตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30%EDA/DE-TsCl) ตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (40%EDA/DE-TsCl) ตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30%TEPA/DE-MeOH) ตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก (40%TEPA/DE-MeOH) ตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก (30%TEPA/DE-TsCl) เอทิลีนไดเอมีน (EDA) และเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) ในช่วงความถี่ 400 – 3900 เซนติเมตร⁻¹ แสดงผลดังรูปที่ 4.2



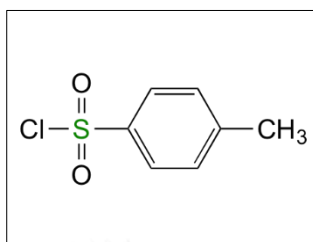
รูปที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับสังเคราะห์ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

จากสเปกตรัมของตัวดูดซับดินไดอะตอม พบว่า พีคที่ปรากฏสามารถถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่มหลัก โดยกลุ่มแรกจะอยู่ในช่วงความถี่สูง ได้แก่ พีคที่ความถี่ 3636 และ 3621 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ O-H stretching ของโมเลกุลน้ำที่อยู่บนตัวดูดซับ และ พีคที่ความถี่ 3420 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ O-H stretching ของหมู่ไฮดรอกซิลและโมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับในตัวดูดซับ [37] กลุ่มที่สองที่อยู่ในช่วงความถี่ต่ำ ได้แก่ พีคการสั่นของหมู่ O-Si-O stretching ที่ความถี่ 1099 เซนติเมตร⁻¹ พีคการสั่นของหมู่ Si-O-Si bending ที่ความถี่ 797 เซนติเมตร⁻¹ พีคการสั่นของหมู่ Si-O-Al stretching ที่ความถี่ 533 เซนติเมตร⁻¹ และ พีคการสั่นของหมู่ O-Si-O bending ที่ความถี่ 470 เซนติเมตร⁻¹ [38] จากผลสเปกตรัมนี้ สะท้อนถึงองค์ประกอบหลักของดินไดอะตอม (DE) ที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂.nH₂O) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃)

สเปกตรัมของตัวดูดซับที่ผ่านการดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน จะพบพีคที่ต่างจากสเปกตรัมของตัวดูดซับดินไดอะตอม ที่แสดงถึงพีคของหมู่เอมีนที่ถูกตรึงลงบนตัวดูดซับดินไดอะตอม ได้แก่ พีคที่ความถี่ 3352 เซนติเมตร⁻¹ และ 3280 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ N-H stretching และที่ความถี่ 1589 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ N-H bending นอกจากนี้ยังพบพีคที่ความถี่ 2930 เซนติเมตร⁻¹ และ 2859 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ C-H stretching ของหมู่แอลคิลที่อยู่ในโครงสร้างของเอทิลีนไดเอมีน (EDA) และเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) พีคที่เป็นของหมู่ฟังก์ชัน C-N stretching ที่ความถี่ 1317 เซนติเมตร⁻¹ [39] ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของ EDA และ TEPA

สเปกตรัมของตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ มีพีคที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด คือ สเปกตรัมของตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ จะพบพีคที่ความถี่ 1672 เซนติเมตร⁻¹ และ 1365 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C stretching ของวงอะโรมาติก และหมู่ฟังก์ชัน S=O stretching ตามลำดับ [40] หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้เป็นหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างโมเลกุลโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ (TsCl) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 อีกทั้งยังพบพีคที่ความถี่ 1525 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการสั่นของหมู่ Si-N-H ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนตัวดูดซับที่ผ่านการดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน [41] แสดงให้เห็นว่าเกิดการสร้างพันธะ Si-N-H ระหว่างหมู่เอมีนและซิลิกา ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของดินไดอะตอม จากผลการ

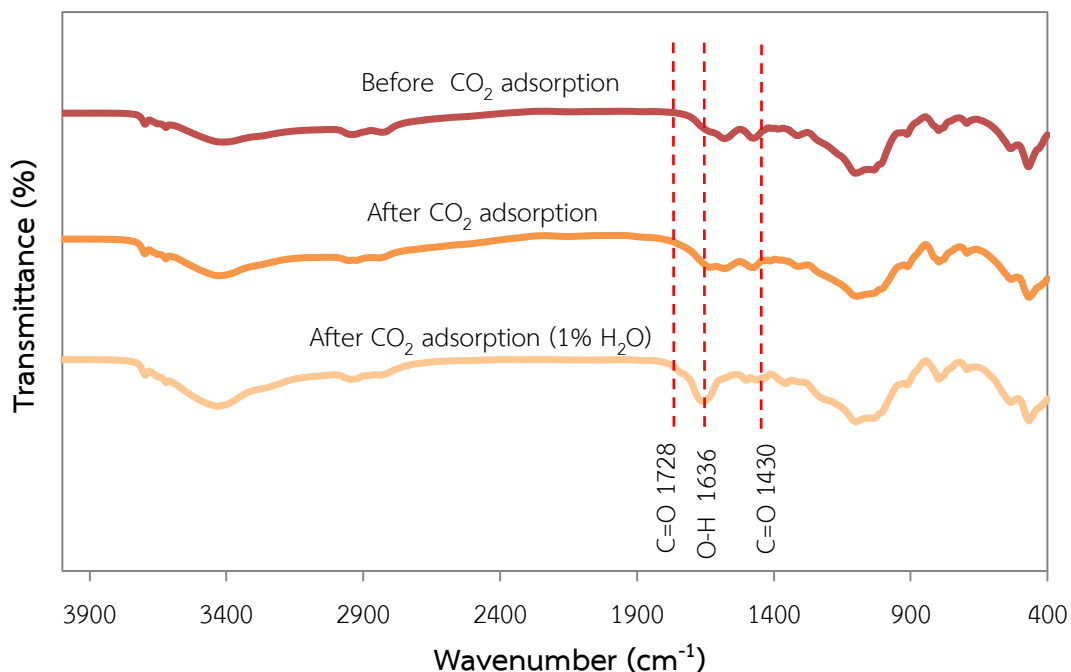
วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน ทำให้ทราบว่าหมู่ฟังก์ชันของโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ยังคงมีการตกค้างอยู่บนตัวดูดซับสังเคราะห์ เนื่องมาจากการล้างทำความสะอาดออกไม่หมด จึงส่งผลให้ยังพบพีคที่เป็นหมู่ฟังก์ชันหลักของโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของตัวดูดซับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น



รูปที่ 4.3 โครงสร้างโมเลกุลโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ (TsCl)

จากสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด สามารถสรุปได้ว่า ประสบความสำเร็จในการเตรียมตัวดูดซับ และสามารถตรึงเอมีนลงบนตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน เนื่องจากการเพิ่มหมู่เอมีนให้กับตัวดูดซับ และจะเห็นได้ว่ามีหมู่เอมีนมากขึ้นเมื่อทำการตรึงเอมีนลงบนตัวดูดซับในปริมาณเพิ่มขึ้น

จากรูป 4.4 แสดงหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ทั้งก่อนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลังการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งในสถานะที่ไม่มีและมีความชื้นในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตร จากผลวิเคราะห์พบว่า พีคที่สำคัญเกิดขึ้นที่ความถี่ 1728 เซนติเมตร⁻¹ และ 1430 เซนติเมตร⁻¹ เป็นหมู่ C=O stretching ของโมเลกุลของคาร์บาเมต และไบคาร์บอเนต ตามลำดับ [32, 36] เนื่องจากคาร์บาเมต และไบคาร์บอเนตเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างเอมีนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงสามารถยืนยันได้ว่า ตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเอมีนที่เตรียมขึ้นนั้น สามารถนำมาใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้จริง นอกจากนี้ยังพบพีคเกิดขึ้นที่ความถี่ 1636 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นการสั่นของหมู่ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่ถูกเพิ่มเข้าไปในแก๊สผสมขาเข้า สำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะที่มีความชื้นในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร



รูปที่ 4.4 หมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ทั้งก่อนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ หลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะแห้งและภาวะที่มีความชื้นในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร ความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตร

4.1.3 การศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับ

ผลการศึกษาร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนบนตัวดูดซับทั้งก่อนและหลังดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน และปริมาณหมู่เอมีนที่ถูกตรึงบนตัวดูดซับสังเคราะห์ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN elemental analysis หรือ CHN) แสดงดังในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ร้อยละองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนของตัวดูดซับสังเคราะห์

ชนิดตัวดูดซับ	%C	%H	%N	ปริมาณหมู่เอมีน (mmol/g)	ร้อยละโดยน้ำหนัก ปริมาณเอมีน
DE	1.25	1.94	0	0	0
30%TEPA/DE-MeOH	17.19	5.17	10.26	1.52	28.83
30%TEPA/DE-TsCl	20.73	4.56	10.15	1.51	29.08

เมื่อพิจารณาตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปรด้วยเอมีน พบว่า มีค่าร้อยละธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนน้อยมาก และไม่พบค่าร้อยละธาตุไนโตรเจน เนื่องจากโครงสร้างหลักของตัวดูดซับดินไดอะตอม คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) แต่เมื่อทำการตรึงเอมีนลงบนตัวดูดซับดินไดอะตอม พบว่าตัวดูดซับ TEPA/DE-MeOH และ TEPA/DE-TsCl ค่าร้อยละโดยน้ำหนักปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงลงบนตัวดูดซับ คือ 30 โดยน้ำหนัก มีค่าใกล้เคียงกับร้อยละเอมีนที่วิเคราะห์ได้จากเทคนิค CHN จากผลการวิเคราะห์สามารถยืนยันได้ว่าประสบความสำเร็จในการตรึงเอมีนลงบนตัวดูดซับ

4.1.4 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย

ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ โดยใช้เทคนิค Brunauer-Emmett-Teller (Brunauer-Emmett-Teller surface area หรือ BET) แสดงดังในตารางที่ 4.2

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการตรึงด้วยเอมีน (DE) กับตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอล (DE-MeOH) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวเป็นหมู่ไฮดรอกซิล (DE-Si-OH) พบว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิลมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นการยืนยันว่าการปรับปรุงพื้นผิวดินไดอะตอมด้วยเมทานอลและการปรับปรุงพื้นผิวดินไดอะตอมให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิล สามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับดินไดอะตอมได้ และเมื่อพิจารณาตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้เป็นหมู่ไฮดรอกซิลแล้วมาผ่านการเติมโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์ (DE-TsCl) พบว่า ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ

ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับมีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจาก โทลูอินซัลโฟนิคคลอไรด์ ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลที่ค่อนข้างใหญ่ ได้เข้าไปทำปฏิกิริยากับดินไดอะตอม ส่งผลให้อาจเกิดการบดบังทำให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยลดลง

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับสังเคราะห์

ตัวดูดซับสังเคราะห์	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m^2/g)	ปริมาตรรูพรุน (cm^3/g)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (nm)
DE	32.20	0.0376	4.6717
DE-MeOH	37.21	0.0441	4.7418
DE-Si-OH	37.81	0.0443	4.6858
DE-TsCl	0.77	0.0002	0.2546
15%EDA/DE-MeOH	16.48	0.0208	5.0552
30%EDA/DE-MeOH	8.50	0.0094	4.7890
40%EDA/DE-MeOH	7.84	0.0072	3.3822
15%EDA/DE-TsCl	8.66	0.0054	2.5041
30%EDA/DE-TsCl	5.84	0.0035	2.4270
40%EDA/DE-TsCl	4.16	0.0024	2.2934
15%TEPA/DE-MeOH	4.47	0.0023	2.0806
30%TEPA/DE-MeOH	1.65	0.0004	0.8933
40%TEPA/DE-MeOH	0.62	0.0001	0.3349
15%TEPA/DE-TsCl	3.19	0.0004	0.5606
30%TEPA/DE-TsCl	0.55	0.0002	0.1691

เมื่อทำการตรึงเอมีนลงบนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์ ได้แก่ EDA/DE-MeOH EDA/DE-TsCl TEPA/DE-MeOH และ TEPA/DE-TsCl พบว่าปริมาณการตรึงเอมีนลงบนตัวดูดซับมีผลต่อพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับ จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ตามการเพิ่มปริมาณเอมีน คือ ร้อยละ 15 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ [42] เนื่องจากปริมาณเอมีนที่มากเกินไปจะเข้าไปปกคลุมบริเวณพื้นผิวตัวดูดซับ ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยมีค่าลดลง จึงสามารถยืนยันได้ว่าเอมีนถูกตรึงลงบนพื้นผิวตัวดูดซับได้สำเร็จ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างของชนิดเอมีน คือ เอทิลีนไดเอมีน และเตตระเอทิลีนเพนตามีน พบว่าตัวดูดซับที่ผ่านการตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนมีค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยน้อยกว่าเอทิลีนไดเอมีน เนื่องจากผลของขนาดโครงสร้างโมเลกุลของเตตระเอทิลีนเพนตามีนที่ใหญ่กว่า ซึ่งเกิดการปกคลุมพื้นผิวดิน ส่งผลให้พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยลดลง [43]

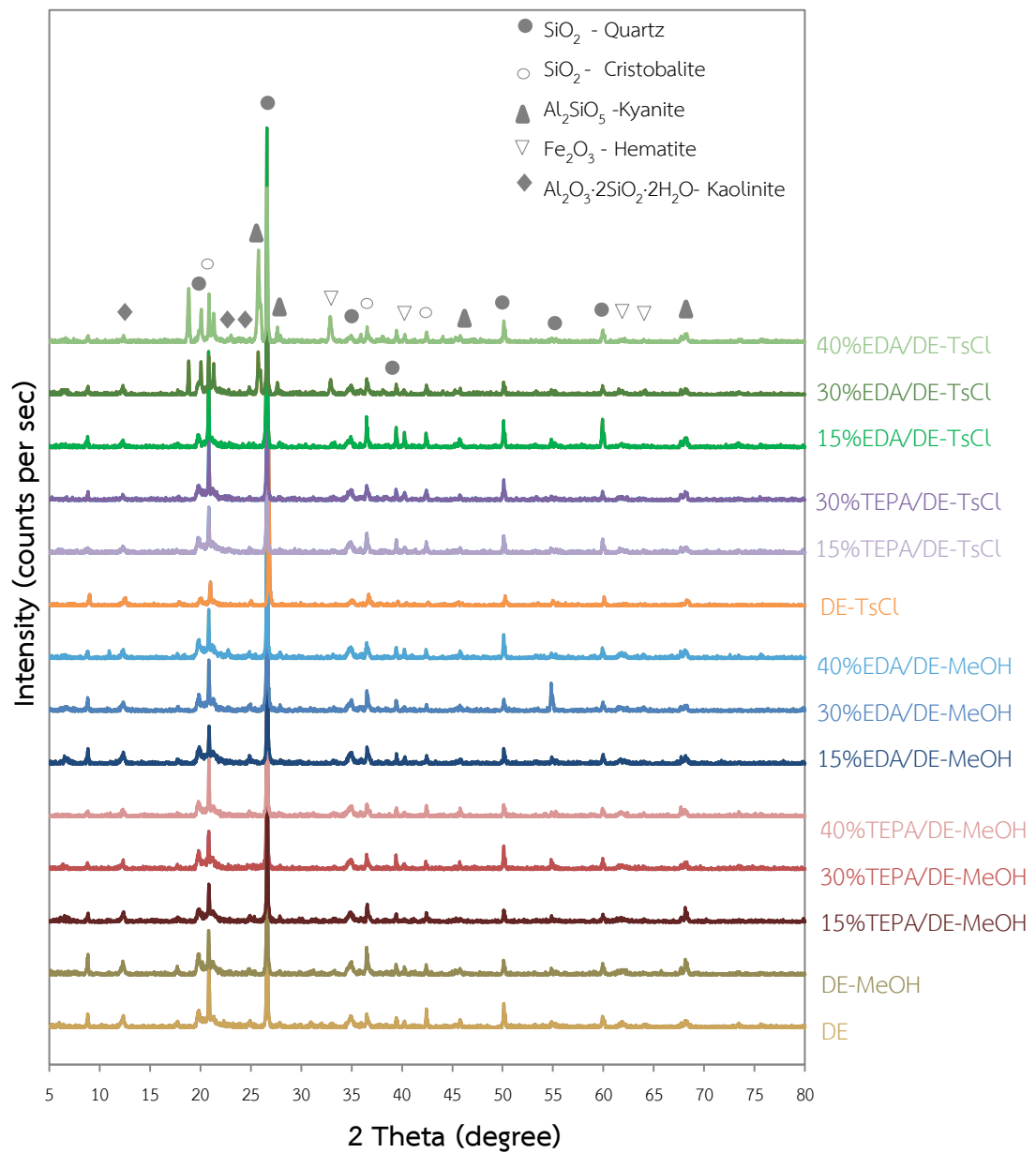
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย บนตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวดินไดอะตอมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน คือ ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเอมีน และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอมีน พบว่าตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอมีนจะมีค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยน้อยกว่าตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเอมีนในทุกชนิดเอมีน เนื่องจากยังคงมีโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์บางส่วนตกค้างอยู่ในโครงสร้างตัวดูดซับ ซึ่งโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จึงส่งผลต่อค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยที่มีค่าน้อยกว่า

4.1.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับ

จากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับสังเคราะห์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction หรือ XRD) ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เมื่อพิจารณาตัวดูดซับดินไต่อะตอมที่ไม่ผ่านการดัดแปรด้วยเอมีน (DE) ตัวดูดซับดินไต่อะตอมดัดแปรพื้นผิวด้วยเมทานอล (DE-MeOH) ตัวดูดซับดินไต่อะตอมดัดแปรพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ (DE-TsCl) ตัวดูดซับดินไต่อะตอมดัดแปรพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน (15-40%EDA/DE-MeOH และ 15-40%TEPA/DE-MeOH) และตัวดูดซับดินไต่อะตอมดัดแปรพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (15-40%EDA/DE-TsCl และ 15-30%TEPA/DE-TsCl) พบว่าตัวดูดซับสังเคราะห์ประกอบด้วยแร่ที่สำคัญทั้งหมด 5 ชนิด คือ แร่ควอตซ์ (Quartz) แร่คริสโตบาไลต์ (Cristobalite) แร่ไคยาไนต์ (Kyanite) แร่เฮมาไทต์ (Hematite) และแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) โดยจะเห็นตำแหน่งของแร่ควอตซ์ (Quartz) ที่ 2theta เท่ากับ 19.8 26.6 36.8 39.8 50.3 55.1 และ 60.1 องศา ตำแหน่งของแร่คริสโตบาไลต์ (Cristobalite) ที่ 2 theta เท่ากับ 22.1 36.4 และ 43.2 องศา ตำแหน่งของแร่ไคยาไนต์ (Kyanite) ที่ 2theta เท่ากับ 28.0 46.3 และ 68.0 องศา ตำแหน่งของแร่เฮมาไทต์ (Hematite) ที่ 2 theta เท่ากับ 33.2 41.1 62.5 และ 64.4 องศา และตำแหน่งของแร่เคโอลิไนต์ (Kaolinite) ที่ 2 theta เท่ากับ 12.5 23.2 และ 25.0 องศา [35]

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับสังเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงพื้นผิวดินไต่อะตอมด้วยเมทานอล (DE-MeOH) การปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ (DE-TsCl) ตัวดูดซับดินไต่อะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน (15-40%EDA/DE-MeOH และ 15-40%TEPA/DE-MeOH) และดูดซับดินไต่อะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (15-40%EDA/DE-TsCl และ 15-40%TEPA/DE-TsCl) พบว่าโครงสร้างผลึกยังคงเหมือนเดิม โดยพีคที่ตำแหน่งต่างๆ ไม่ได้มีการเลื่อนตำแหน่ง แสดงว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน และการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ ไม่ได้ทำให้โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับดินไต่อะตอมเปลี่ยนแปลงไป



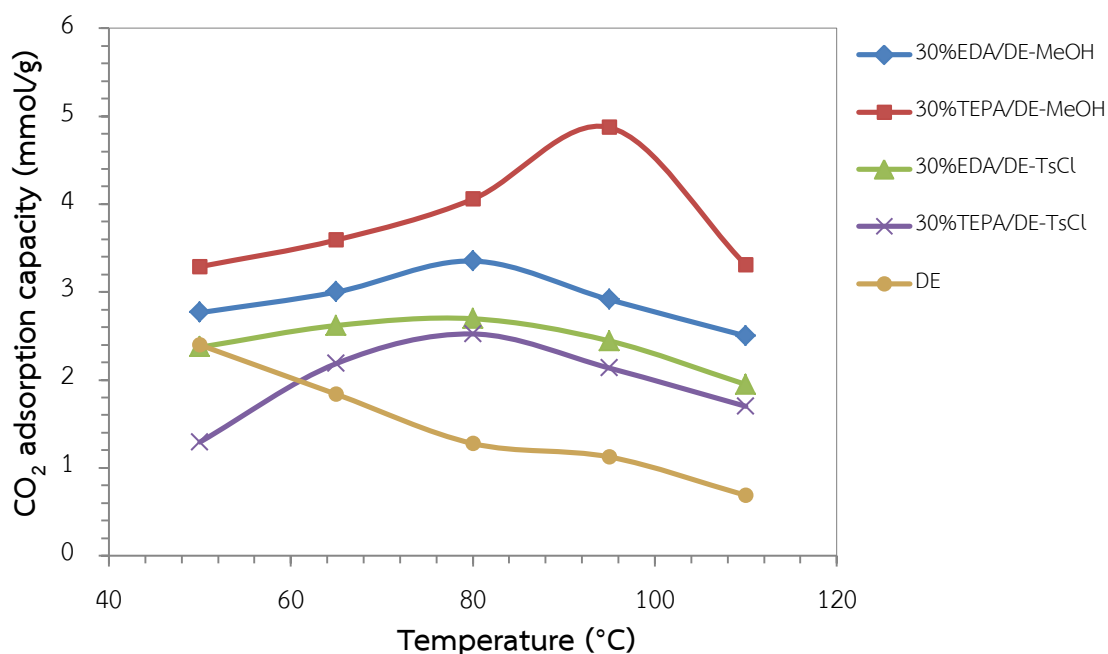
รูปที่ 4.5 โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับสังเคราะห์

4.2 ผลของตัวแปรต่อความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับสังเคราะห์

4.2.1 ชนิดของตัวดูดซับ ชนิดของเอมีน และอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ก. ชนิดของตัวดูดซับ

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของของตัวดูดซับดินไดอะตอมทั้งก่อนและหลังการตรึงด้วยเอมีน ได้แก่ ตัวดูดซับดินไดอะตอม (DE) ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน (EDA/DE-MeOH และ TEPA/DE-MeOH) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (EDA/DE-TsCl และ TEPA/DE-TsCl) ที่ช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสภาวะไม่มีความชื้น แสดงผลดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิของชนิดตัวดูดซับต่างๆ ได้แก่ ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน

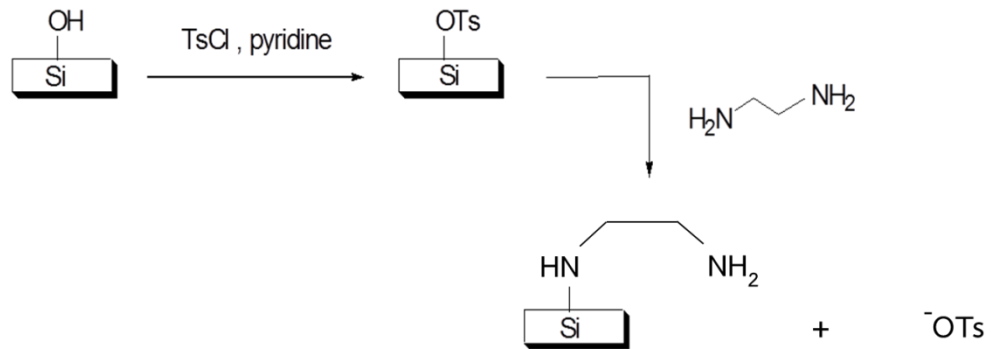
(EDA/DE-MeOH และ TEPA/DE-MeOH) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วย โทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (EDA/DE-TsCl และ TEPA/DE-TsCl) โดยน้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม และปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้น คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสภาวะไม่มีความชื้น

จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการตรึงด้วยเอมีน (DE) กับตัวดูดซับที่ทำการตรึงด้วยเอมีนต่างแสดงความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตลอดช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา แต่ลักษณะจะมีความต่างกัน กล่าวคือ ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการตรึงด้วยเอมีน (DE) จะแสดงความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงกับการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ แต่ตัวดูดซับชนิดต่างๆ ที่ทำการตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีน (EDA) และเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) ต่างแสดงลักษณะการดูดซับคล้ายกัน กล่าวคือ ความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นกับการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับถึงอุณหภูมิหนึ่ง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมินี้ ค่าความสามารถในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง

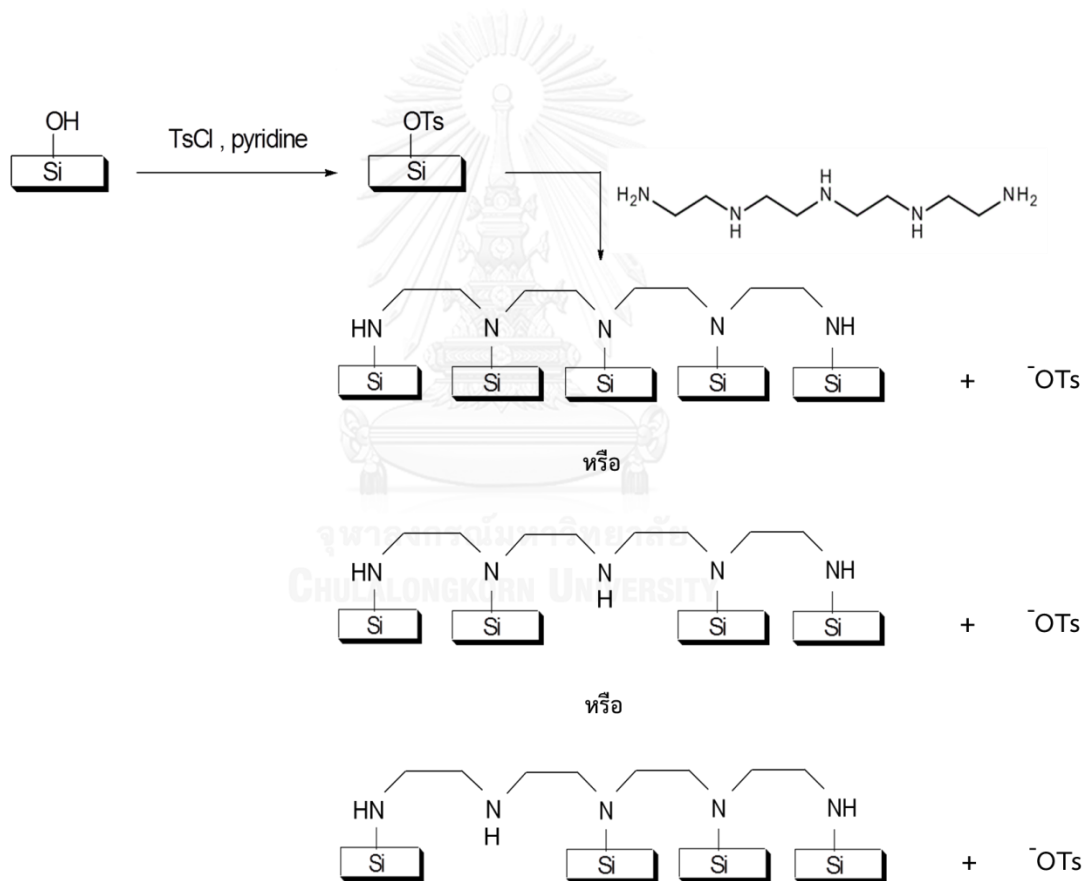
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการตรึงด้วยเอมีน (DE) กับตัวดูดซับที่ทำการตรึงด้วยเอมีน ได้แก่ ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน (30%EDA/DE-MeOH และ 30%TEPA/DE-MeOH) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (30%EDA/DE-TsCl และ 30%TEPA/DE-TsCl) พบว่า ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการตรึงด้วยเอมีนจะให้ค่าความสามารถในการดูดซับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการตรึงด้วยเอมีน [33] เนื่องจากตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ทำการตรึงเอมีนจะมีหมู่เอมีนที่มีคุณสมบัติเป็นเบสจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาจับกับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นกรดได้ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชนิดตัวดูดซับซึ่งถูกเตรียมด้วยการปรับปรุงพื้นผิว ดินไดอะตอมด้วยวิธีที่แตกต่างกัน คือ ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอล และตรึงเอมีน (30%EDA/DE-MeOH และ 30%TEPA/DE-MeOH) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (30%EDA/DE-TsCl และ 30%TEPA/DE-TsCl) พบว่า ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินไดอะตอม

ที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีนให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากผลของลักษณะของเอมีนที่ถูกตรึงลงบนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ตัวดูดซับ 30%EDA/DE-MeOH และ 30%TEPA/DE-MeOH ซึ่งถูกเตรียมขึ้นด้วยการปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับโดยเมทานอล ซึ่งจะช่วยเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยหมู่ไฮดรอกซิลจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต [44] อีกทั้งเอมีนที่ถูกตรึงลงบนตัวดูดซับมีลักษณะการถูกเคลือบลงบนตัวดูดซับ และยึดจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ซึ่งการจับกันในลักษณะนี้จะทำให้หมู่เอมีนในโครงสร้าง คือ เอทิลีนไดเอมีน (EDA) มีหมู่เอมีน 2 หมู่ และเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) มีหมู่เอมีน 5 หมู่ สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เกือบทุกตำแหน่งของหมู่เอมีน จึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับมีค่าสูงกว่า แต่ในทางตรงกันข้ามตัวดูดซับ 30%EDA/DE-TsCl และ 30%TEPA/DE-TsCl ซึ่งถูกเตรียมขึ้นด้วยการปรับปรุงพื้นผิวดินไดอะตอมด้วยการนำมาผ่านการปรับปรุงพื้นผิวให้เป็นหมู่ซิลานอล (Si-OH) ก่อน แล้วจึงมาผ่านการเติมโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอมีน พบว่า ให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมตัวดูดซับดินไดอะตอม ซึ่งทำการปรับปรุงพื้นผิวให้เป็นหมู่ซิลานอล จากนั้นทำการเติมโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ละลายในไพริดีน โดยไพริดีนที่มีสมบัติเป็นเบส จะเกิดการดึงเอากรดไฮโดรคลอริก (HCl) ออก ได้เป็น Si-OTs เมื่อมีเอมีนเข้ามาทำปฏิกิริยา ส่งผลให้ออกซิเจนที่เกาะยึดติดอยู่กับโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นกลุ่มที่หลุดออกที่ดี (Leaving group) หลุดออกมาได้ เอมีนจึงแย่งเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งที่เป็น -OTs [45] ตัวอย่างการเกิดปฏิกิริยาของการสังเคราะห์ตัวดูดซับ 30%EDA/DE-TsCl และ 30%TEPA/DE-TsCl ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ จากรูปทั้งสอง จะเห็นว่า หมู่เอมีนจะเข้าไปทำปฏิกิริยา โดยเกิดการสร้างพันธะกับซิลิกาซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของตัวดูดซับดินไดอะตอม ดังนั้นจะเหลือหมู่เอมีนที่ไม่ได้เกิดการสร้างพันธะกับซิลิกาน้อยลง ส่งผลให้มีหมู่เอมีนอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ลดลง



รูปที่ 4.7 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีน (30%EDA/DE-TsCl) [ดัดแปลงมาจาก [45]]



รูปที่ 4.8 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (30%TEPA/DE-TsCl) [ดัดแปลงมาจาก [45]]

ข. ชนิดของเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ

จากรูปที่ 4.6 แสดงผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ และทำการตรึงด้วยเอมีนที่แตกต่างกัน ได้แก่ เอทิลีนไดเอมีน (EDA) และเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) โดยปริมาณเอมีนที่ใช้ในการตรึงลงบนตัวดูดซับมีค่าเท่ากันคือปริมาณร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่ช่วงอุณหภูมิการดูดซับ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชนิดของเอมีนที่ทำการตรึงลงบนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอล ได้แก่ 30%EDA/DE-MeOH และ 30%TEPA/DE-MeOH พบว่า ในทุกช่วงอุณหภูมิการดูดซับ ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงด้วยเอมีนชนิดเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีน (EDA) เนื่องจากสูตรโครงสร้างโมเลกุลของเตตระเอทิลีนเพนตามีนมีหมู่เอมีน (NH_2) สูงถึง 5 หมู่ แต่ในโครงสร้างโมเลกุลของเอทิลีนไดเอมีน มีหมู่เอมีนเพียง 2 หมู่ หากโครงสร้างโมเลกุลของตัวดูดซับสังเคราะห์ยังมีหมู่เอมีนมาก จะสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น [39] จึงส่งผลให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนมีค่าสูงกว่าเอทิลีนไดเอมีน

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบชนิดของเอมีนบนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์ ได้แก่ 30%EDA/DE-TsCl และ 30%TEPA/DE-TsCl พบว่า ในทุกช่วงอุณหภูมิการดูดซับ ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงด้วยเอมีนชนิดเอทิลีนไดเอมีน (EDA) ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการตรึงด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของเอมีนชนิดเอทิลีนไดเอมีน (EDA) นั้น จะมีหมู่เอมีน 1 หมู่ ที่เข้าไปทำปฏิกิริยาและเกิดการสร้างพันธะกับซิลิกา ที่เป็นโครงสร้างหลักของตัวดูดซับดินไดอะตอม ($\text{Si-NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2$) ดังนั้นจะเหลือหมู่เอมีนอิสระเพียงอีกหมู่เดียวเท่านั้นที่สามารถเกิดปฏิกิริยาในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ซึ่งคาดว่าเกิดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนของเอทิลีนไดเอมีนกับซิลิกานั้น น่าจะเกิดการสร้างพันธะในลักษณะที่มีความเป็นระเบียบ โดยการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนต่อซิลิกาเป็นแบบ 1:1 กล่าวคือเอทิลีนไดเอมีน 1 โมเลกุล จะมีหมู่เอมีนตำแหน่งที่หัวหรือปลายโมเลกุล 1 หมู่เท่านั้นที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกา 1 ตำแหน่งได้ ส่งผลให้หมู่เอมีนอิสระที่เหลืออีกหนึ่งหมู่ของทุกๆโมเลกุลของเอทิลีนไดเอมีนสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แต่กรณีเอมีนชนิดเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) การเกิดปฏิกิริยาจะเกิดในลักษณะเช่นเดียวกัน แต่จากผลการทดลองซึ่งพบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำกว่าเอทิลีนไดเอมีน เนื่องจาก

โครงสร้างของเตตระเอทิลีนเพนตามีนมีหมู่เอมีนสูงถึง 5 หมู่ ซึ่งหมู่เอมีนทุกตำแหน่งในโครงสร้างโมเลกุลมีโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาและสร้างพันธะกับซิลิกาที่เป็นโครงสร้างหลักในดินไดอะตอมได้ (Si-N-H) ลักษณะการเกิดพันธะระหว่างหมู่เอมีนกับซิลิกานั้น จะเกิดระหว่างหมู่เอมีนที่ตำแหน่งหัวและปลายโมเลกุลกับซิลิกา หรืออาจเกิดพันธะระหว่างหมู่เอมีนที่อยู่ภายในสายโซ่โมเลกุลกับซิลิกา ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดแบบไม่จำเพาะเจาะจง และต่อพันธะกันแบบไม่เป็นระเบียบทั่วทั้งตัวดูดซับ ซึ่งนำไปสู่การเหลือหมู่เอมีนที่ไม่ได้เกิดพันธะกับซิลิกาน้อยลง ส่งผลให้หมู่เอมีนอิสระที่สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8

ค. อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการตรึงเอมีน (DE) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน (30%EDA/DE-MeOH และ 30%TEPA/DE-TsCl) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (30%EDA/DE-TsCl และ 30%TEPA/DE-TsCl) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีทั้งหมด 5 อุณหภูมิ ได้แก่ 50 65 80 95 และ 110 องศาเซลเซียส ดังแสดงผลในรูปที่ 4.6

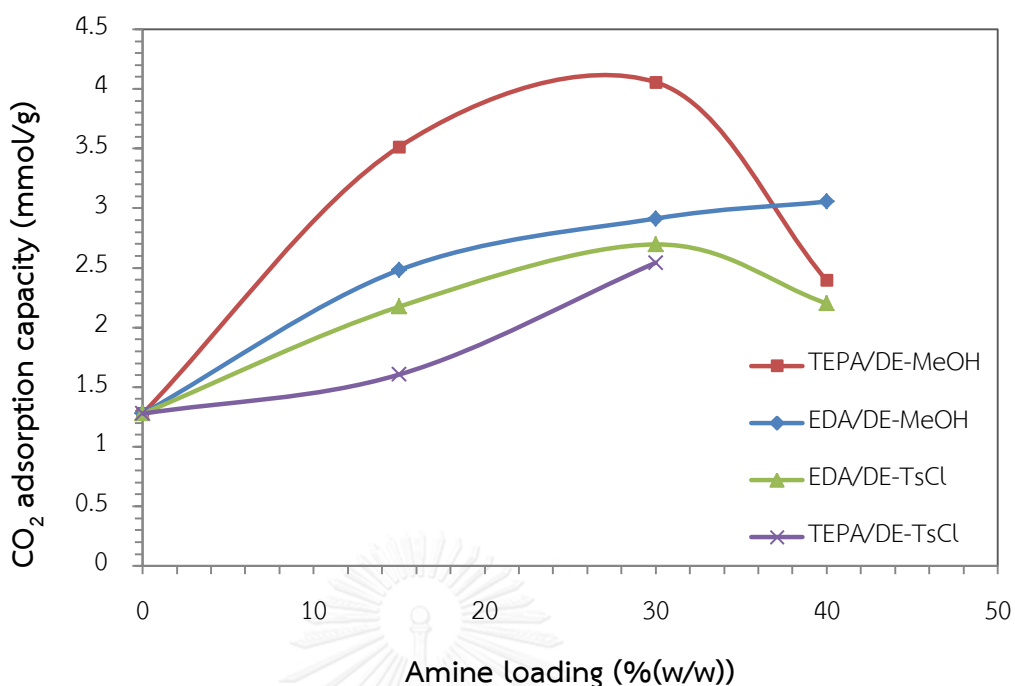
เมื่อพิจารณาค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ไม่ผ่านการตรึงด้วยเอมีน พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 2.4 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิการดูดซับต่อไป ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์กลับมีค่าลดลงตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินไดอะตอมเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งการดูดซับทางกายภาพเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ การเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นทำให้ไปทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์และดินไดอะตอม ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น [46]

สำหรับตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอทิลีนไดเอมีน (30%EDA/DE-MeOH) จะให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 3.4 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเตตระเอทิลีนเพนตามีน (30%TEPA/DE-MeOH) จะให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 4.9 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอทิลีนไดเอมีน (30%EDA/DE-TsCl) จะให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 2.7 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ตัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโฟ

นิลคลอไรด์และตรึงเตตระเอทิลีนเพนตามีน (30% TEPA/DE-TsCl) จะให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 2.5 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากผลการทดลอง พบว่า ตัวดูดซับที่ผ่านการตรึงเอมีนทุกชนิด เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นถึงค่าหนึ่ง ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากผลของจลนพลศาสตร์ (Kinetic) ของปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับเอมีน กล่าวคือ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ จะช่วยเพิ่มพลังงานจลน์ให้กับโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับเอมีนได้เพิ่มขึ้น หรือเรียกอีกอย่างว่าเป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาให้ดำเนินไปข้างหน้า แต่พบว่าหลังจากนั้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นต่อไปอีก ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าลดลง เนื่องจากผลของอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic) กล่าวคือ การเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนนั้น เป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมต (Carbamate) ลดลง [28] จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

4.2.2 ปริมาณเอมีนที่ตรึงบนตัวดูดซับ

การศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (EDA/DE-MeOH, TEPA/DE-MeOH และ EDA/DE-TsCl) โดยทำการตรึงด้วยปริมาณเอมีนแตกต่างกันที่ร้อยละ 15 30 และ 40 โดยน้ำหนัก สำหรับตัวดูดซับ TEPA/DE-TsCl จะทำการตรึงเอมีนที่ร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสถานะไม่มีความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 สำหรับตัวดูดซับ EDA/DE-MeOH ปริมาณเอมีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 3.1 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตัวดูดซับ TEPA/DE-MeOH ปริมาณเอมีนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 4.1 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ตัวดูดซับ EDA/DE-TsCl ปริมาณเอมีนร้อยละ 30 ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 2.7 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ และตัวดูดซับ TEPA/DE-TsCl ปริมาณเอมีนร้อยละ 30 ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 2.5 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณเอมีน (ร้อยละ 15-40 โดยน้ำหนัก) ที่ตรึงลงบนตัวดูดซับ EDA/DE-MeOH, TEPA/DE-MeOH, EDA/DE-TsCl และ TEPA/DE-TsCl อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสถานะไม่มีความชื้น

จากผลการทดลอง พบว่าตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ถูกเตรียมโดยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน (Amine/DE-MeOH) จะให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ถูกเตรียมโดยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (Amine/DE-TsCl) ไม่ว่าจะทำการตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีนหรือเตตระเอทิลีนเพนตามีนก็ตาม ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเอมีน(EDA และ TEPA) ที่ใช้ตรึงบนตัวดูดซับ ลักษณะโดยรวมพบว่าค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับทุกชนิดมีค่าเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง เนื่องจากในช่วงแรก que เพิ่มปริมาณเอมีนเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มตำแหน่งกัมมันต์ (Active site) ทำให้สามารถจับกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น โดยตัวดูดซับ EDA/DE-MeOH และ TEPA/DE-TsCl จะให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตลอดช่วงการเพิ่มปริมาณเอมีน แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณเอมีนให้สูงขึ้นต่อไปอีก พบว่า ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณเอมีนมีมากเกินไป จึงอาจเกิดการบดบังหรืออุดตันที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ทำให้เกิดการกีด

ขบวนการแพร่ผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์ในการเข้าไปทำปฏิกิริยากับเอมีนที่อยู่ในรูพรุน จึงส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ดังแสดงในผลการทดลองข้างต้น [28] จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับ TEPA/DE-MeOH และ EDA/DE-TsCl เมื่อเพิ่มปริมาณเอมีนจากร้อยละ 30 ถึง 40 โดยน้ำหนัก ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงตามการเพิ่มปริมาณเอมีน ที่เป็นเช่นนี้เพราะ TEPA ที่มากเกินไปจะทำให้พื้นที่ผิวของตัวดูดซับน้อยลง ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับโดยเทคนิค BET

สำหรับตัวดูดซับตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ถูกเตรียมโดยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอล และตรึงเอทิลีนไดเอมีนและเตตระเอทิลีนเพนตามีน พบว่าการตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีน (EDA) ที่ปริมาณเอมีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ยังสามารถเตรียมตัวดูดซับได้และยังให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถตรึงปริมาณเอมีนเพิ่มขึ้นได้อีก เนื่องจากเอทิลีนไดเอมีนมีโครงสร้างโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก จึงสามารถเพิ่มปริมาณเอมีนที่ใช้ในการตรึงลงบนตัวดูดซับได้อีก แต่สำหรับเตตระเอทิลีนเพนตามีน จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเอมีนถึงร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอล และตรึงเตตระเอทิลีนเพนตามีนมีความเหมาะสมในการตรึงเอมีนที่ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก จึงจะเลือกตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH สำหรับการศึกษาต่อไป

สำหรับตัวดูดซับตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ถูกเตรียมโดยผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์และตรึงเอทิลีนไดเอมีนและเตตระเอทิลีนเพนตามีน พบว่าการตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีน (EDA) ที่ปริมาณเอมีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ยังสามารถเตรียมตัวดูดซับได้ เนื่องจาก EDA ซึ่งเป็นเอมีนที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดเล็ก จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาแบบ 1:1 ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แต่สำหรับเตตระเอทิลีนเพนตามีน ที่ตรึงด้วยปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าตัวดูดซับที่เตรียมได้มีลักษณะของเหลวหนืด (Slurry) เนื่องจากโมเลกุลของเตตระเอทิลีนเพนตามีนมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เมื่อเพิ่มปริมาณมากเกินไป ตัวดูดซับจึงมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้ดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

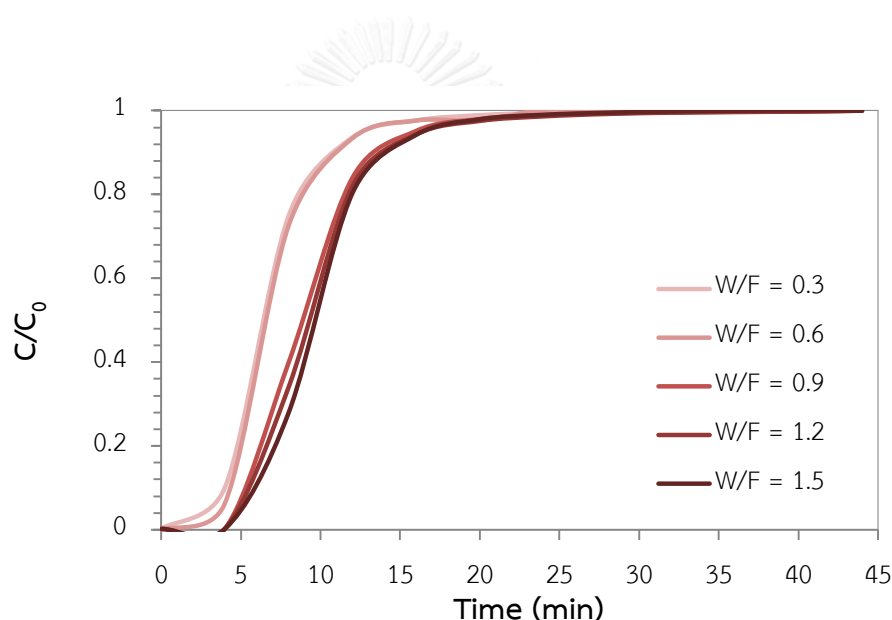
4.2.3 ปริมาณตัวดูดซับ

การศึกษาผลของปริมาณตัวดูดซับต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาออกที่เวลาใดๆ กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า (C/C_0) และเวลาที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ของตัวดูดซับชนิด 30%TEPA/DE-MeOH ที่ W/F Ratio เท่ากับ 0.3 0.6 0.9

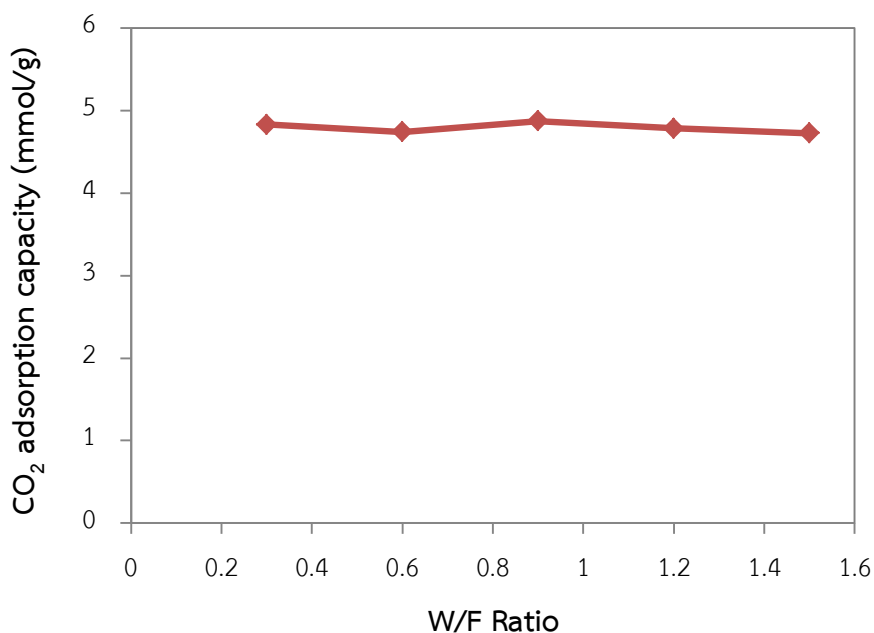
1.2 และ 1.5 กรัม . วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังรูปที่ 4.10 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 30 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม ในสภาวะไม่มีความชื้น ผลการทดลองแสดงลักษณะกราฟจะเป็นกราฟรูปตัวเอส เรียกว่า Breakthrough curve ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาออกที่เวลาใดๆ (C) กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า (C_0) หรือ C/C_0 เทียบกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (Time, min) จากผลการทดลองพบว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการปรากฏตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาออกจะนานขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม W/F โดยที่ค่า W/F เท่ากับ 0.3 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาในการปรากฏตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.5 นาที ที่ W/F เท่ากับ 0.6 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาในการปรากฏตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 2.5 นาที ที่ W/F เท่ากับ 0.9 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาในการปรากฏตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 4 นาที ที่ W/F เท่ากับ 1.2 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาในการปรากฏตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 4.1 นาที และที่ W/F เท่ากับ 1.5 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาในการปรากฏตัวของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 4.2 นาที ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อพิจารณาความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า (C/C_0) ที่มีค่าเท่ากับ 1 พบว่าที่ W/F เท่ากับ 0.3 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ 22.5 นาที ที่ W/F เท่ากับ 0.6 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ 23 นาที ที่ W/F เท่ากับ 0.9 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ 26 นาที ที่ W/F เท่ากับ 1.2 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ 28 นาที และที่ W/F เท่ากับ 1.5 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ 30 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้หากพิจารณาความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า (C/C_0) คงที่ ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง ตัวอย่างเช่น ที่ C/C_0 เท่ากับ 0.4 พบว่าที่ W/F เท่ากับ 0.3 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ 5.5 นาที ที่ W/F เท่ากับ 0.6 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ 6 นาที ที่ W/F เท่ากับ 0.9 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ 8 นาที ที่ W/F เท่ากับ 1.2 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ 8.5 นาที และที่ W/F เท่ากับ 1.5 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต้องใช้เวลาเท่ากับ 9 นาที ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้องใช้ระยะเวลาในการดูดซับนานขึ้นเมื่อทำการเพิ่ม W/F เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า หรือ W/F Ratio นั้น จะเป็นการเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสกันระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวดูดซับสังเคราะห์ที่บรรจุในคอลัมน์ดูดซับ ส่งผลให้ใช้เวลานานขึ้นสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่ม W/F ไม่ได้ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4.8 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ในช่วง W/F เท่ากับ 0.3 ถึง 1.5 กรัม . วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับทั้ง 4 ชนิดข้างต้น จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเตตระเอทิลีนเพนตามีน (30%TEPA/DE-MeOH) ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา ทางผู้วิจัยจึงได้สนใจที่จะนำตัวดูดซับชนิดนี้มาทำการศึกษาผลกระทบจากตัวแปรอื่นๆ ในลำดับถัดไป



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาออกที่เวลาใดๆ กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า (C/C_0) และเวลาที่ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ของตัวดูดซับชนิด 30%TEPA/DE-MeOH ที่ W/F Ratio เท่ากับ 0.3 0.6 0.9 1.2 และ 1.5 กรัม·วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 30 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม ในสถานะไม่มีความชื้น



รูปที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ในช่วงอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า (W/F Ratio) เท่ากับ 0.3 ถึง 1.5 กรัม·วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 95 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 30 โดยปริมาตรดูลในฮีเลียม ในสถานะไม่มีความชื้น

4.2.4 ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า

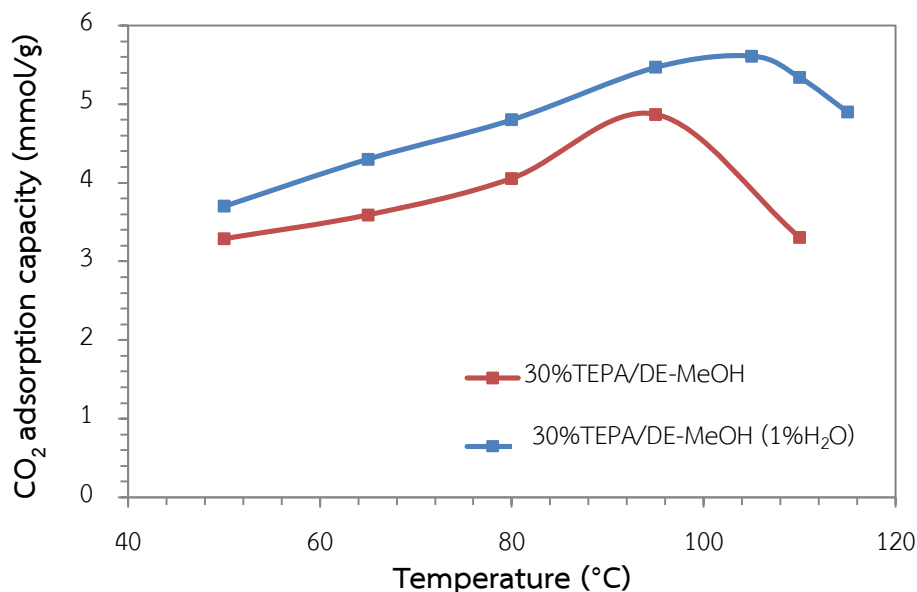
การศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ในสถานะที่ไม่มีความชื้น และสถานะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร อุณหภูมิในการดูดซับ 50 ถึง 115 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ปริมาณ TEPA ที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อทำการเพิ่มปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับที่ทำในสถานะไม่มีความชื้น และจากผลการทดลองเมื่อพิจารณาค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิการดูดซับต่างๆ จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ในสถานะที่ไม่มีความชื้น และสถานะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร จะมีลักษณะแนวโน้มผลการทดลองที่คล้ายกัน คือ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ค่าการดูดซับ

คาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง โดยค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะที่ไม่มีควมชื้นสูงสุด เท่ากับ 4.9 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และในสถานะมีไอน้ำร้อยละ 1 โดยปริมาตร ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 5.6 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของสถานะที่ไม่มีควมชื้น และมีความชื้นจะมีอุณหภูมิการดูดซับที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะที่มีความชื้นและไม่มีควมชื้นเกิดต่างกัน โดยพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy, E_a) ของปฏิกิริยามีค่าไม่เท่ากัน กล่าวคือ ในสถานะที่มีความชื้นหรือมีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า ปฏิกิริยาการสร้างไบคาร์บอเนตมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์สูงกว่าปฏิกิริยาการสร้างไบคาร์บอเนตของสถานะที่ไม่มีควมชื้น ดังนั้นในสถานะที่มีความชื้นจึงจำเป็นต้องทำการดูดซับที่อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ [47] โดยการเพิ่มปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า ไอน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บาเมตไอออน (Carbamate ion, RNHCOO^-) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบ 3 ชนิด คือ แอมโมเนียมไอออน (Ammonium ion, RNH_3^+) ไบคาร์บอเนตไอออน (Bicarbonate, HCO_3^-) และเอมีน (Amine, RNH_2) [48] ดังสมการที่ (4.1) แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจากอุณหภูมิที่ให้ค่าการดูดซับสูงสุด พบว่า ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงที่ในสถานะที่ไม่มีควมชื้นและสถานะมีความชื้น เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะที่มีไอน้ำร้อยละ 1 โดยปริมาตร หรือมีความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบนั้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์



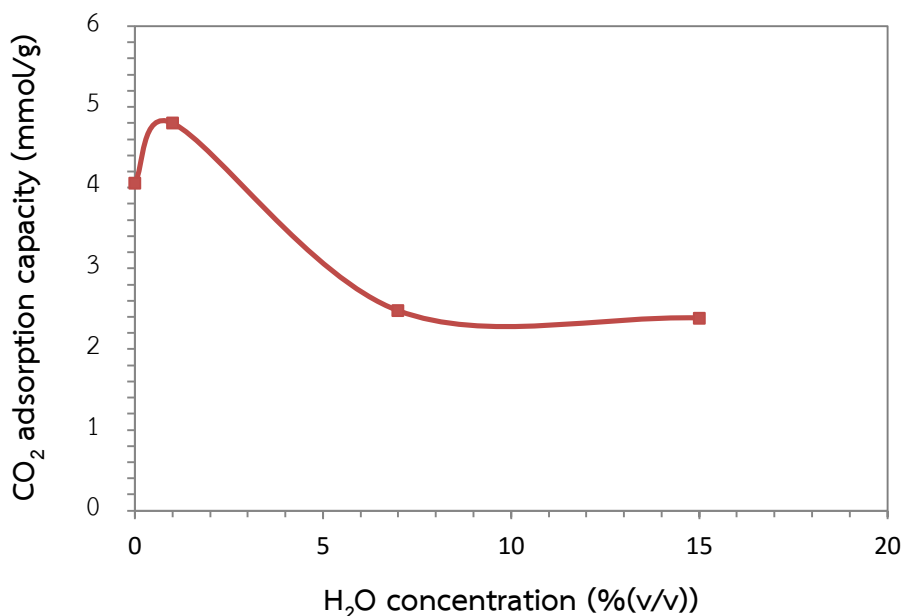
นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และตัวดูดซับที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวด้วยเอมีนทั้งในสถานะที่ไม่มีควมชื้น และสถานะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า พบว่า ข้อดีของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ ในสถานะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า คือ สัดส่วนในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 1 : 1 กล่าวคือ การเกิดปฏิกิริยาในสถานะที่มีไอน้ำ เอมีนเพียง 1 โมล สามารถเกิดปฏิกิริยาจับกับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมลได้ แต่ในทางตรงกันข้าม สำหรับในสถานะที่ไม่มีควมชื้น สัดส่วนในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 2 : 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาจับกันระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์ต้องใช้เอมีนถึง 2 โมล จึงจะเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ 1 โมลได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ในสถานะที่ไม่มีไอน้ำและสถานะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร อุณหภูมิในการดูดซับ 50 ถึง 115 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.13 เป็นผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ในสถานะที่ไม่มีไอน้ำและสถานะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมเข้าร้อยละ 1 7 และ 15 โดยปริมาตร โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมเข้าที่ร้อยละ 1 โดยปริมาตร ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น [28] แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมเข้าเป็นร้อยละ 7 และ 15 โดยปริมาตร พบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงอย่างมาก และค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณไอน้ำ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากภายในโครงสร้างของตัวดูดซับดินไดอะตอมซึ่งมีความชื้นเป็นองค์ประกอบอยู่แล้ว เมื่อทำการเพิ่มปริมาณไอน้ำร้อยละ 1 โดยปริมาตร ซึ่งมีปริมาณน้อย จะช่วยส่งเสริมให้ตัวดูดซับสังเคราะห์สามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น แต่ปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมเข้าที่มีมากเกินไป (ร้อยละ 7 และ 15) ทำให้เกิดการกีดขวางการเข้าทำ

ปฏิกิริยาระหว่างเอมีนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง [49]

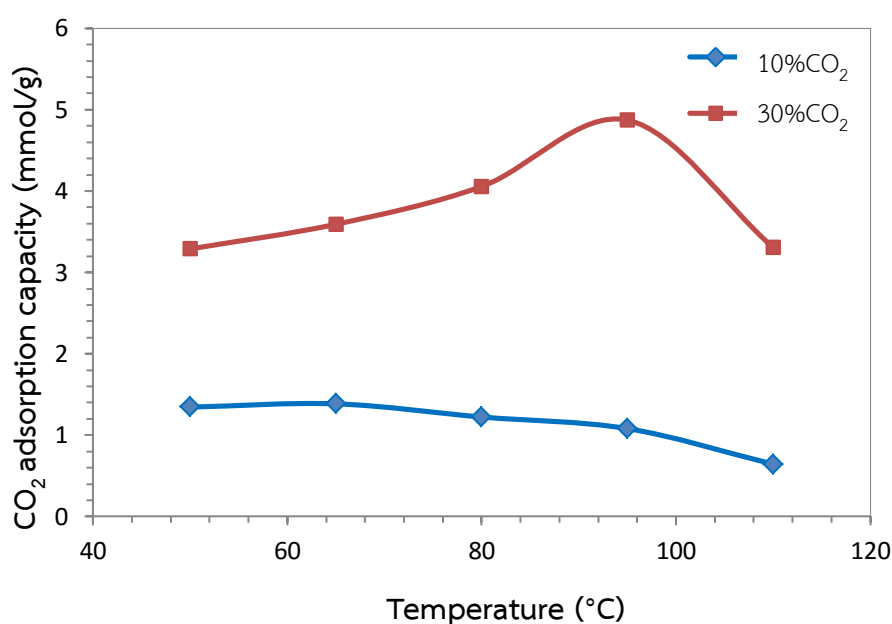


รูปที่ 4. 13 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ในสถานะแห้ง และสถานะที่มีไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1.7 และ 15 โดยปริมาตร โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร

4.2.5 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า

การศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาที่ความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร โดยน้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม และปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ในสถานะไม่มีความชื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 10 โดยปริมาตร พบว่าค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 1.4 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และที่ความเข้มข้นเริ่มต้น

ของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 30 โดยปริมาตร ให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 4.9 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษา เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ทำให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์มีมากขึ้น จึงมีโอกาสมอเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถไปจับกับเอมีนได้มากขึ้น [50] จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

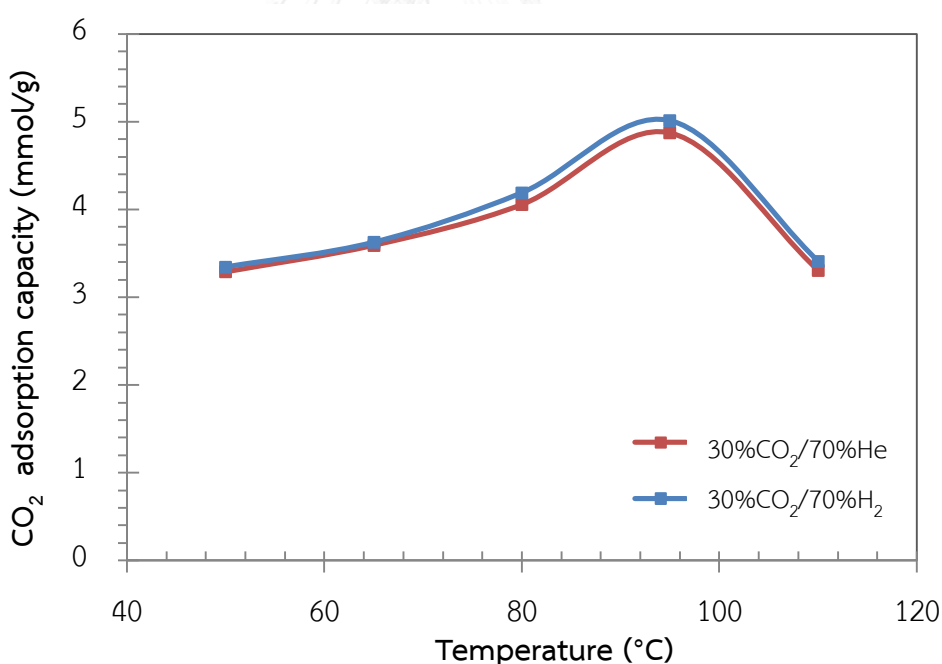


รูปที่ 4. 14 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 30 โดยปริมาตร โดยน้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม และปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ในสภาวะไม่มีความชื้น

4.2.6 ความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า

การศึกษาความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ซึ่งแก๊สผสมขาเข้าเป็นแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์

(CO₂) และไฮโดรเจน (H₂) ที่แก๊สผสมร้อยละ 30 โดยปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อร้อยละ 70 โดยปริมาตรของไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ที่แก๊สผสมเข้าคือ คาร์บอนไดออกไซด์ในฮีเลียม (30%CO₂/70%He) พบว่าค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 4.9 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และที่แก๊สผสมเข้าคือ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน (30%CO₂/70%H₂) พบว่าค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 5 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งจากค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเห็นได้ว่ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน อีกทั้งจะเห็นได้ว่าที่ทุกอุณหภูมิการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของแก๊สผสม 30%CO₂/70%He และ 30%CO₂/70%H₂ จะมีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงเช่นเดียวกัน หรือแทบจะไม่มี ความแตกต่างกัน จึงสามารถยืนยันได้ว่าตัวดูดซับสังเคราะห์ 30%TEPA/DE-MeOH มีความสามารถในการเลือกจับเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น หรือกล่าวได้ว่าตัวดูดซับสังเคราะห์ชนิดนี้มีความจำเพาะเจาะจงในการเลือกจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยไม่เลือกจับไฮโดรเจน เนื่องจากเอมีนและไฮโดรเจนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ [51] ส่งผลให้ตัวดูดซับสังเคราะห์ไม่เลือกจับไฮโดรเจน



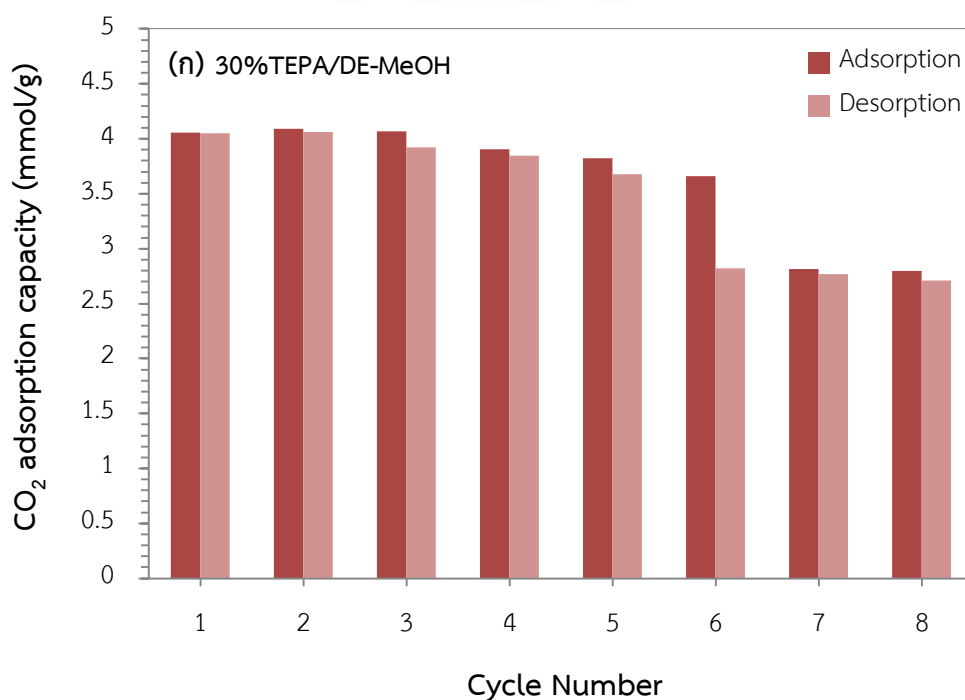
รูปที่ 4. 15 ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH ต่อความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมเข้า โดยน้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสภาวะที่ไม่มี ความชื้น

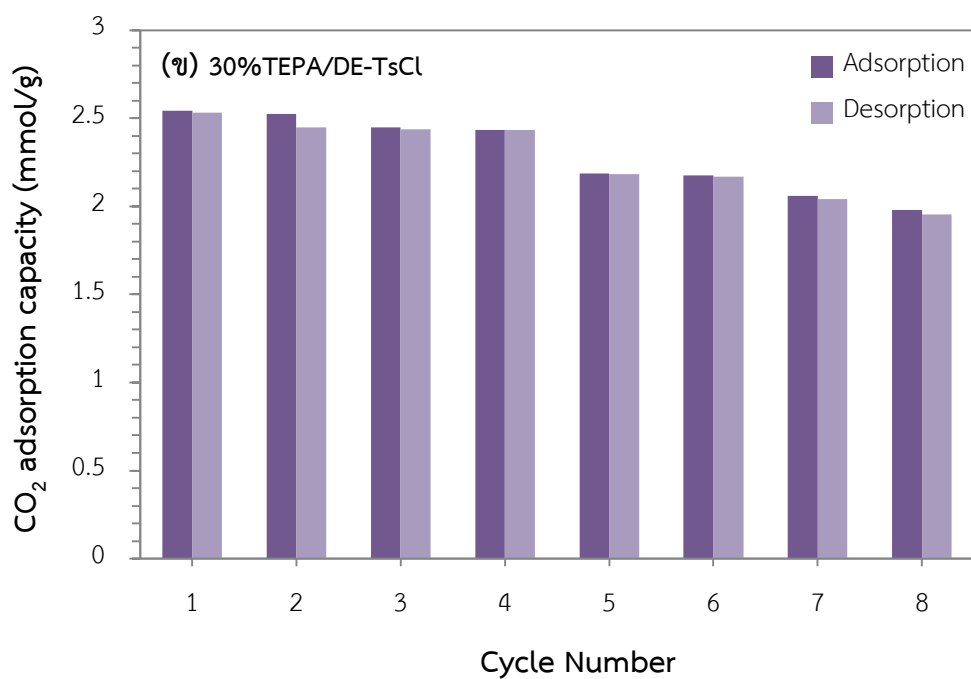
4.3 ความเสถียรของตัวดูดซับ

ในการศึกษาความเสถียรหรือความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่จะเลือกศึกษาตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH นอกจากนี้ยังเลือกตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl ด้วย เนื่องจาก ตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl นี้มีเสถียรภาพทางความร้อนสูง ดังที่เคยอธิบายข้างต้น จึงเป็นเหตุที่จะนำมาศึกษาความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยจะศึกษาทั้งความสามารถในการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการคายซับ เท่ากับ 110 องศาเซลเซียส ดังแสดงผลในรูปแบบที่ 4.16 (ก) และ (ข) จากผลการทดลองพบว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH และ 30%TEPA/DE-TsCl สามารถทำการดูดซับและคายซับได้สูงถึง 8 รอบ โดยการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับทั้งสอง จะมีการดูดซับทั้งทางกายภาพและทางเคมี กล่าวคือ การดูดซับทางกายภาพจะเกิดจากการที่คาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามาผ่านตัวดูดซับจะเกิดการแทรกตัวเข้าไปอยู่ในรูพรุนของดินโดอะตอม และการดูดซับทางเคมีเกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามาจะไปเกิดปฏิกิริยาจับกับเอมีนที่ถูกตรึงลงบนตัวดูดซับ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตไอออน (Carbamate ion, RNHCOO^-) ดังรูปที่ 2.15 ดังนั้นเมื่อทำการคายซับ จะทำโดยการผ่านกระแสแก๊สฮีเลียมเข้าไปในหลอดดูดซับเพื่อเป็นตัวพาให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับหลุดออกจากตัวดูดซับ และทำการเพิ่มอุณหภูมิในการคายซับเท่ากับ 110 องศาเซลเซียส เพื่อช่วยในการทำลายพันธะคาร์บาเมต (RNHCOO^-) ซึ่งเป็นพันธะที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ การหลุดของคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาจากตัวดูดซับที่ดัดแปรด้วยเอมีน

เมื่อพิจารณาตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH จะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 4.1 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 2.5 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในรอบการดูดซับที่ 1 ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับค่าการคายซับที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการศึกษาการดูดซับและคายซับในรอบถัดไป จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับสังเคราะห์ทั้งสองชนิด ในรอบการดูดซับและคายซับที่ 1 ถึง 4 จะมีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใกล้เคียงกัน แต่ในการดูดซับและคายซับรอบที่ 5 ถึง 8 พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มมีค่าลดลงตามลำดับ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าในรอบการดูดซับและคายซับที่ 6 มีค่าไม่เท่ากัน และจะเห็นได้ว่าค่าการคายซับในรอบดังกล่าวมีค่าลดลงอย่างมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากผลของการเกิดผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนเนตได้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบไป ซึ่งรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นใหม่นี้ ต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นเพื่อทำลายแรงระหว่างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่จับกับเอมีน จึงส่งผลให้การคายซับในรอบที่ 6 มีค่าลดลง

จากผลการทดลองข้างต้นเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและเสถียรภาพของตัวดูดซับสังเคราะห์ทั้งสองชนิด พบว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH มีประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl ซึ่งดูได้จากค่าการความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่าในทุกรอบการดูดซับและคายซับ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงเสถียรภาพของตัวดูดซับสังเคราะห์ พบว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH จะมีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในการทำงานที่รอบที่ 8 ลดลงจากค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในการทำงานที่รอบที่ 1 ประมาณร้อยละ 33.2 แต่ตัวดูดซับชนิด 30%TEPA/DE-TsCl จะมีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในการทำงานที่รอบที่ 8 ลดลงจากค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในการทำงานที่รอบที่ 1 เพียงประมาณร้อยละ 23.2 แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับชนิด 30%TEPA/DE-TsCl มีเสถียรภาพหรือมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดีกว่าตัวดูดซับชนิด 30%TEPA/DE-MeOH เนื่องจากวิธีการเตรียมตัวดูดซับดินโดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซิลโพนิลคลอไรด์และเอมีนนั้น จะช่วยให้เกิดพันธะระหว่างหมู่เอมีนกับซิลิกาที่เป็นโครงสร้างหลักในดินโดอะตอม (Si-N-H) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และแสดงในผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งการเกิดพันธะ Si-N-H เป็นพันธะที่มีความแข็งแรง ทำให้เอมีนที่ตรึงลงบนตัวดูดซับหลุดออกจากตัวดูดซับได้ยากมาก [52] สามารถยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์โดยเทคนิค TGA ที่ตัวดูดซับชนิด 30%TEPA/DE-TsCl จะมีอุณหภูมิการสลายตัวของเอมีนที่อุณหภูมิสูงกว่า จึงส่งผลตัวดูดซับที่เตรียมด้วยวิธีนี้มีเสถียรภาพที่ดีกว่า ถึงแม้จะมีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำกว่าก็ตาม





รูปที่ 4. 16 ผลการดูดซับและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ (ก) 30%TEPA/DE-MeOH และ (ข) 30%TEPA/DE-TsCl โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสถานะไม่มีความชื้น

4.4 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับดินไต่อะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน (30%TEPA/DE-MeOH) โดยอาศัยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo- first Order) แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order) และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's equation) เพื่อทำนายกลไกอัตราการดูดซับ อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ และเวลาที่ใช้ในการดูดซับจนถึงสภาวะสมดุล โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียส น้ำหนักตัวดูดซับ เท่ากับ 0.3 กรัม ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมเข้าร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสภาวะแห้ง โดยความถูกต้องของสมดุลการดูดซับและจลนพลศาสตร์ดูดซับที่ได้ สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination, R^2) โดยค่า R^2 ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 และพิจารณาได้จากค่าฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function, Err(%))

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผลการศึกษาเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination, R^2) และค่าฟังก์ชันความผิดพลาด (Error function, Err(%)) ของแบบจำลองทั้งสาม พบว่าแบบจำลองอาฟรามิ มีค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 มากที่สุด และค่า Err(%) ต่ำที่สุด ตามมาด้วยแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo- first Order) และแบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order) ตามลำดับ ซึ่งแต่ละแบบจำลองสามารถใช้อธิบายกลไกอัตราการดูดซับที่แตกต่างกัน กล่าวคือ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo- first Order) อธิบายถึงขั้นตอนการถ่ายโอนมวลหรือการแพร่ของตัวถูกดูดซับคือคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านรอบตัวดูดซับดินไต่อะตอมดัดแปรพื้นผิวด้วยเอมีน เกิดขึ้นช้าที่สุด โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ สำหรับแบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order) อธิบายถึงขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมีของตัวถูกดูดซับคือคาร์บอนไดออกไซด์กับพื้นผิวของตัวดูดซับสังเคราะห์เกิดขึ้นได้ช้าที่สุด โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมี และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's equation) อธิบายถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการดูดซับที่มีความซับซ้อนหรือมี

ตารางที่ 4. 3 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH

	Temperature (°C)				
	50	65	80	95	110
$q_{e,exp}$ (mmol g ⁻¹)	3.289	3.592	4.056	4.872	3.307
แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo- first Order)					
k_1 (min ⁻¹)	0.1883	0.1754	0.1622	0.1466	0.1801
$q_{e,cal}$ (mmol g ⁻¹)	3.332	3.614	4.089	4.936	3.329
R^2	0.9958	0.9968	0.9954	0.9905	0.9965
%Err	3.16	2.98	4.08	7.09	2.88
แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order)					
k_2 (g mmol ⁻¹ min ⁻¹)	0.0024	0.0018	0.0014	0.0009	0.0021
$q_{e,cal}$ (mmol g ⁻¹)	3.605	3.957	4.532	5.570	3.627
R^2	0.9854	0.9877	0.9848	0.9768	0.9872
%Err	5.57	5.54	6.97	10.46	5.21
แบบจำลองอาฟรามี่ (Avrami's equation)					
k_a (min ⁻¹)	0.0922	0.0881	0.1003	0.1216	0.1112
n_a	2.04	1.99	1.62	1.21	1.62
$q_{e,cal}$ (mmol g ⁻¹)	3.332	3.614	4.089	4.936	3.329
R^2	0.9958	0.9968	0.9954	0.9905	0.9965
%Err	2.98	2.81	3.85	6.68	2.71

กลไกการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไก ซึ่งกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดการดูดซับทั้งในทางเคมีและกายภาพ [31] ซึ่งสามารถอธิบายได้จากค่าคงที่อาฟรามิ (n_a) โดยทั่วไปค่า n_a จะค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง 4 หากค่า n_a มีค่าเท่ากับ 1 แบบจำลองจะกลายเป็นแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม ซึ่งจากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือ 50 ถึง 110 องศาเซลเซียสนั้น จะมีค่า n_a มากกว่า 1 ที่ทุกอุณหภูมิ และเมื่อพิจารณาค่า R^2 และ $Err(\%)$ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองอาฟรามิ มีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือมากที่สุด ซึ่งสามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับดินไต่อะตอมที่ผ่านการดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีนชนิด 30%TEPA/DE-MeOH ได้ว่ากลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดการดูดซับทั้งในทางเคมีและกายภาพ ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาพฤติกรรมของการดูดซับทั้งในทางเคมีและกายภาพของตัวดูดซับสังเคราะห์ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo- first Order) มีค่า R^2 เท่ากันกับแบบจำลองอาฟรามิ และมีค่า $Err(\%)$ มากกว่าแบบจำลองอาฟรามิเพียงเล็กน้อย ดังนั้นอาจจะพูดได้ว่ากลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่าการดูดซับทางเคมี ในส่วนของการดูดซับทางกายภาพเกิดจากการที่คาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามาผ่านตัวดูดซับจะเกิดการแทรกตัวเข้าไปอยู่ในรูพรุนของดินไต่อะตอม และการดูดซับทางเคมีเกิดจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามาจะไปเกิดปฏิกิริยาจับกับเอมีนที่ถูกตรึงลงบนตัวดูดซับ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บาเมตไอออน (Carbamate ion, $RNHCOO^-$) และการเกิดไปคาร์บอเนตจากหมู่ไฮดรอกซิลหรือความชื้นที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับดินไต่อะตอมดัดแปรฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะที่ได้จากการศึกษาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน (EDA/DE-MeOH และ TEPA/DE-MeOH) และตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (EDA/DE-TsCl และ TEPA/DE-TsCl) โดยตัวแปรที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ชนิดตัวดูดซับ ชนิดเอมีน ปริมาณเอมีน ปริมาณตัวดูดซับ อุณหภูมิการดูดซับ ความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้า ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า และความสามารถในการเลือกจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับสังเคราะห์ อีกทั้งยังทำการศึกษาเสถียรภาพของตัวดูดซับสังเคราะห์ การฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับสังเคราะห์ที่ผ่านการใช้งาน และศึกษาพฤติกรรมการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยอาศัยแบบจำลองจลนพลศาสตร์

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่า การตรึงเอมีนลงบนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์ ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากหมู่เอมีนที่มีคุณสมบัติเป็นเบสจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาจับกับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นกรดได้ และพบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเอมีน (EDA/DE-MeOH และ TEPA/DE-MeOH) ให้ค่าความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีน (EDA/DE-TsCl และ TEPA/DE-TsCl) เนื่องจากความแตกต่างของวิธีการเตรียมตัวดูดซับและการตรึงเอมีนบนตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงด้วยเมทานอลจะเป็นการช่วยเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยหมู่ไฮดรอกซิลจะสามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนต และเอมีนถูกตรึงในลักษณะเคลือบติดบนตัวดูดซับ ส่งผลให้หมู่เอมีนสามารถเกิดปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เกือบทั้งหมด แต่ตัวดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงด้วยโทลูอินซัลโฟนิลคลอไรด์และตรึงเอมีนมีค่าการดูดซับต่ำกว่า เนื่องจากหมู่เอมีนตำแหน่งปลายโมเลกุลเกิดปฏิกิริยาและสร้างพันธะกับซิลิกาที่เป็นโครงสร้างหลักของดินไดอะตอม (Si-N-H) ส่งผลให้เหลือหมู่เอมีนอิสระน้อยลงที่จะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ สำหรับชนิดเอมีนที่ถูกตรึงบนตัวดูดซับ DE-MeOH พบว่าเตตระเอทิลีนเพนตามีนให้ค่าความจุการดูดซับ

คาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีน เนื่องจากมีโครงสร้างโมเลกุลมีหมู่เอมีนมากกว่า ในทางตรงกันข้ามเตตระเอทิลีนเพนตามีนซึ่งถูกตรึงบนตัวดูดซับ DE-TsCl ให้ค่าความจุการดูดซับต่ำกว่าการตรึงด้วยเอทิลีนไดเอมีน เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีขนาดใหญ่ซึ่งอาจเกิดการบดงของสายโซ่โมเลกุลได้ อีกทั้งหมู่เอมีนทั้ง 5 หมู่ในสายโซ่โมเลกุลมีโอกาสเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาได้ทั้งหมด โดยจับกันแบบไม่เป็นระเบียบ ทำให้เหลือหมู่เอมีนอิสระน้อยมากที่จะจับกับคาร์บอนไดออกไซด์ แต่เอทิลีนไดเอมีนซึ่งมีโครงสร้างขนาดเล็กและมีหมู่เอมีนอยู่ที่ปลาย 2 ฝั่งของโมเลกุล จึงมีโอกาสจะเกิดปฏิกิริยากับซิลิกาแบบ 1:1 ส่งผลให้ในการจับกันต่อโมเลกุลเอมีนจะเหลือหมู่เอมีน 1 หมู่ ซึ่งทำให้ความจุการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ผลของปริมาณเอมีนที่ตรึงลงบนตัวดูดซับ พบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มปริมาณเอมีน นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า (W/F Ratio) ในช่วง 0.3 ถึง 1.5 กรัม วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จะช่วยเพิ่มเวลาก่อนการปรากฏตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สขาออก จาก 0.5 เป็น 4.2 นาที ตามลำดับ และผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการดูดซับ พบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับสังเคราะห์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากผลของจลนพลศาสตร์ แต่เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีก พบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง เนื่องจากผลของผลของอุณหพลศาสตร์ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบคายความร้อน และจากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 1 โดยปริมาตร เนื่องจากไอน้ำสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บาเมต ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไบคาร์บอเนตไอออนต่อได้ แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณไอน้ำเพียงเล็กน้อยจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังพบว่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นการเพิ่มโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้มีโอกาสที่โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จะสามารถไปจับกับเอมีนได้มากขึ้น

จากผลการศึกษาเสถียรภาพและการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH และ 30%TEPA/DE-TsCl อุณหภูมิการดูดซับ เท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการคายซับ เท่ากับ 110 องศาเซลเซียส พบว่าตัวดูดซับทั้งสองสามารถทำการดูดซับและคายซับได้สูงถึง 8 รอบ ซึ่งมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้สูง โดยตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH จะให้ค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl ในทุกรอบการดูดซับ แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH จะมีค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากค่าการดูดซับในรอบที่ 1 ประมาณร้อยละ 33.21 แต่ตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl จะมีค่าการดูดซับลดลงเพียงประมาณร้อยละ 23.24 แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-TsCl มีเสถียรภาพทางความ

ร้อนที่ต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอมีนกับซิลิกาสร้างพันธะ Si-N-H ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง ทำให้เอมีนที่ถูกตรึงลงบนตัวดูดซับหลุดออกจากตัวดูดซับได้ยากขึ้น แต่ตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH เอมีนถูกเคลือบติดลงบนตัวดูดซับ และยึดจับกันด้วยแรงอ่อนๆ เท่านั้น เมื่อทำการดูดซับและคายซับในรอบถัดไป ส่งผลให้เอมีนที่เคลือบติดด้วยแรงอ่อนๆ อยู่บนตัวดูดซับนั้น อาจเกิดการหลุดออกระหว่างที่ทำการดูดซับและคายซับได้ จึงส่งผลให้มีเสถียรภาพทางความร้อนต่ำกว่า อีกทั้งยังพบว่าตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH มีความสามารถในการเลือกจับเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าที่แตกต่างกัน (30%CO₂/70%He และ 30%CO₂/70%H₂) อีกด้วย

จากการศึกษาพฤติกรรมดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับ 30%TEPA/DE-MeOH โดยอาศัยแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับ 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo- first Order) แบบจำลองอันดับสองเทียม (Pseudo-second Order) และแบบจำลองอาฟรามิ (Avrami's equation) พบว่าแบบจำลองอาฟรามิเป็นแบบจำลองที่เข้ากับผลการทดลองมากที่สุด โดยอธิบายถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการดูดซับที่มีความซับซ้อนหรือมีกลไกการเกิดปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งกลไก ซึ่งกลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดการดูดซับทั้งในทางเคมี (Chemisorption) และกายภาพ (Physisorption) จึงสามารถสรุปได้ว่าตัวดูดซับสังเคราะห์ชนิด 30%TEPA/DE-MeOH มีพฤติกรรมดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแบบการดูดซับทั้งในทางเคมีและกายภาพ

ในงานวิจัยนี้พบว่าตัวดูดซับดินไดอะตอมที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวด้วยเมทานอลและตรึงเตตระเอทิลีนเพนทามีน (TEPA/DE-MeOH) ปริมาณเอมีนที่ใช้ตรึงลงบนตัวดูดซับร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 4.9 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวดูดซับกับอัตราเร็วของแก๊สขาเข้า (W/F Ratio) เท่ากับ 0.9 กรัม . วินาที ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเข้มข้นเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้าร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในสภาวะที่ไม่มีความชื้น และพบว่าค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นจาก 4.9 เป็น 5.5 มิลลิโมลต่อกรัมตัวดูดซับ ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของไอน้ำในแก๊สผสมขาเข้าที่ร้อยละ 1 โดยปริมาตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

วิธีการเตรียมตัวดูดซับดินไดอะตอมปรับปรุงพื้นผิวด้วยโพลีอีนซิลโพลีคลอไรด์และตรึงเอมีนนั้น ถือได้ว่าเป็นวิธีการเตรียมตัวดูดซับที่มีความน่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้กับตัวดูดซับได้ อีกทั้งยังสามารถแก้ไขข้อจำกัดเกี่ยวกับการทำในระบบที่

ต้องใช้อุณหภูมิสูง ซึ่งตัวดูดซับที่สังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะช่วยให้เอมีนที่ตรึงลงบนตัวดูดซับหลุดออกได้ยากขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าตัวดูดซับที่เตรียมด้วยวิธีนี้มีเสถียรภาพทางความร้อนที่ดี แต่เมื่อคำนึงถึงประสิทธิภาพหรือค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่อนข้างต่ำ จึงควรหาวิธีการปรับปรุงตัวดูดซับเพื่อให้ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น



รายการอ้างอิง

1. สาเหตุโลกร้อนขึ้น. *Atmospheric Carbon Dioxide Measured at Mauna Loa, Hawaii*. Available from: <http://202.129.59.73/hotworld/greenhouse/how2hot2.htm>.
2. จุฑารัตน์ ฉัตรวิริยวงศ์ and วิวัฒน์ เอกบุรณะวัฒน์. *Carbon dioxide*. 2555; Available from: http://www.summacheeva.org/index_thaitox_carbon_dioxide.htm.
3. *Amateur Climate Change. CO₂ Emission percentaje by consuming sector in the world, source of data IEA*. . 2010; Available from: <http://climatechangeinmylife.com/tag/building/>.
4. บทที่ 11 คาร์บอนไดออกไซด์กับการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ. . Available from: <http://e-book.ram.edu/e-book/g/GE410/chapter11.pdf>.
5. Vinzant, A. *Earth Day & the Greenhouse Effect*. 2015; Available from: <http://astrocampschool.org/greenhouse-effect/>.
6. วิฑูรย์, ธ., บทความวิชาการ “เทคโนโลยีการกักเก็บและการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล”. วิศวกรรมสาร มข, ตุลาคม-ธันวาคม 2554. 38(4): p. 453-467.
7. Casey, T. *No Future For Clean Coal: \$1 Billion Plug Pulled On FutureGen*. 2015 February 6th; Available from: <http://cleantechnica.com/2015/02/06/no-future-clean-coal-1-billion-plug-pulled-futuregen/>.
8. บทที่ 4 การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมแก๊ส. การดูดซึมกาซบนของแข็ง Available from: <http://www2.diw.go.th/km/pdf%5Cknow%5Cgas.pdf>.
9. มั่นเจริญ, ศ., เทคนิคการแยกสารในสถานะแก๊สที่ประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์แบบไหล *Applications of Gas Phase Separation Techniques for Flow Injection Analysis*. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา, 2556. 18(2): p. 305-312.
10. *Adsorption, Absorption and Desorption*. [cited 2014 Aug 24]; Available from: http://www.chromatographytoday.com/news/hplc-uhplc/31/breaking_news/adsorption_absorption_and_desorption_whats_the_difference/31397/.

11. *Adsorption process*. 2015, Mar 3]; Available from: <http://www.slideshare.net/sorbeadindia123/facts-and-information-about-indicating-silica-gel>.
12. Pradthana. กระบวนการดูดซับ (*Adsorption Process*). 19 มีนาคม 2008]; Available from: <https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>.
13. แสงอาทิตย์, น., การดูดซับยาปฏิชีวนะ *Norfloxacin* โดยเถ้าแกลบที่ pH 5-8, in สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ 2554, มหาวิทยาลัยศิลปากร.
14. อยู่มี, พ., การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากผงถ่านไม้ โดยการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้ง (*Preparation of Activated Carbons with High Surface Area from Wood Charcoal Powder by Dry Chemical Activation*). วารสารวิทยาศาสตร์ มข, 2558. ปีที่ 43(ฉบับที่ 4): p. 788-798.
15. *Silica Gel*. 2557; Available from: <http://www.vloveklong.com/article/>.
16. Wikipedia. *Activated alumina*. 2008; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Activated_alumina.
17. *Industrial Filter Store How to Regenerate Activated Alumina?* 2011; Available from: <http://filtration.industrialfilterstore.com/wp-content/uploads/2011/05/activated-alumina-desiccant-regenerate.jpg>.
18. *Indonesia Natural Green Zeolite Manufacturer - Powder and Granular Zeolite Supplier by D&W Corporation. Natural Zeolite*. 2012; Available from: <http://naturalzeolites.net/>.
19. Wikibooks. *Organic Chemistry/Amines*. 2015; Available from: https://en.wikibooks.org/wiki/Organic_Chemistry/Amines.
20. Wikipedia. *Amine*. 2016; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Amine>.
21. Wikipedia. *Ethylenediamine*. 2015; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ethylenediamine>.
22. Sigma-Aldrich. *Tetraethylenepentamine*. 2012; Available from: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/t11509?lang=en®ion=TH>.
23. Bollini, P., S.A. Didas, and C.W. Jones, *Amine-oxide hybrid materials for acid gas separations*. *Journal of Materials Chemistry*, 2011. 21(39): p. 15100.

24. *The Organic Solution Random musings about chemistry from the real world.* 2012; Available from:
<https://theorganicsolution.wordpress.com/category/carbon-capture/>.
25. García, S., et al., *Cyclic operation of a fixed-bed pressure and temperature swing process for CO₂ capture: Experimental and statistical analysis.* International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013. 12: p. 35-43.
26. Khraisheh, M.A., et al., *Effect of OH and silanol groups in the removal of dyes from aqueous solution using diatomite.* Water Res, 2005. 39(5): p. 922-32.
27. ทรงศักดิ์ สระแก้ว and จ. อัมพพ, “การหาพารามิเตอร์เชิงจลนพลศาสตร์และเชิงสมดุลของการดูดซับสีย้อมผ้าเคมีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยแร่ดินมอนต์มอริลโลไนต์เคลือบผิวด้วยโคโคซาน”. การประชุมวิชาการนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา, ประจำปี 2554 p. น.14-22.
28. Wang, W., et al., *Development of a new clay supported polyethylenimine composite for CO₂ capture.* Applied Energy, 2014. 113: p. 334-341.
29. Sarmah, M., B.P. Baruah, and P. Khare, *A comparison between CO₂ capturing capacities of fly ash based composites of MEA/DMA and DEA/DMA.* Fuel Processing Technology, 2013. 106: p. 490-497.
30. Elkhalfah, A.E.I., et al., *Effects of exchanged ammonium cations on structure characteristics and CO₂ adsorption capacities of bentonite clay.* Applied Clay Science, 2013. 83-84: p. 391-398.
31. Stevens, L., et al., *Preparation and CO₂ adsorption of diamine modified montmorillonite via exfoliation grafting route.* Chemical Engineering Journal, 2013. 215-216: p. 699-708.
32. Chen, Y.H. and D.L. Lu, *Amine modification on kaolinites to enhance CO(2) adsorption.* J Colloid Interface Sci, 2014. 436: p. 47-51.
33. Zhang, X., et al., *Development of efficient amine-modified mesoporous silica SBA-15 for CO₂ capture.* Materials Research Bulletin, 2013. 48(10): p. 3981-3986.
34. Feng Zheng, et al., *ETHYLENEDIAMINE-MODIFIED SBA-15 AS REGENERABLE CO₂ SORBENTS* Fuel Chem, 2004. 49(1): p. 261-262.

35. Chaisena, A. and K. Rangsiwatananon, *EFFECTS OF THERMAL AND ACID TREATMENTS ON SOME PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF LAMPANG DIATOMITE*. J. Sci. Technol, 2004. 11: p. 289-299.
36. Pornaroonthama, P., N. Thouchprasitchai, and S. Pongstabodee, *CO₂ adsorption on diatomaceous earth modified with cetyltrimethylammonium bromide and functionalized with tetraethylenepentamine: Optimization and kinetics*. Journal of Environmental Management, 2015. 157: p. 194-204.
37. Madejová, J., et al., *FTIR analyses of water in MX-80 bentonite compacted from high salinary salt solution systems*. Applied Clay Science, 2002. 20(6): p. 255-271.
38. Mohamedbagr, H. and M. Burkitbaev, *Elaboration and Characterization of Natural Diatomite in Aktyubinsk/Kazakhstan*. The Open Mineralogy Journal, 2009. 3: p. 12-16
39. Liu, Z., et al., *CO₂ adsorption performance of different amine-based siliceous MCM-41 materials*. Journal of Energy Chemistry, 2015. 24(3): p. 322-330.
40. Awada, H. and C. Daneault, *Chemical Modification of Poly(Vinyl Alcohol) in Water* Appl. Sci, 2015. 5: p. 840-850.
41. Vyhmeister, E., et al., *In situ FTIR experimental results in the silylation of low-k films with hexamethyldisilazane dissolved in supercritical carbon dioxide*. The Journal of Supercritical Fluids, 2014. 90: p. 134-143.
42. Wang, J., et al., *Supporting Materials for Surfactant Promoted Solid Amine Sorbents for CO₂ capture*. The Royal Society of Chemistry, 2012.
43. Song, F., et al., *Capture of carbon dioxide from flue gases by amine-functionalized TiO₂ nanotubes*. Applied Surface Science, 2013. 268: p. 124-128.
44. Dixon, T., et al., *12th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, GHGT-12 Isolation and Structural Characterization of Bicarbonate and Carbonate Species Formed During CO₂ Absorption/Desorption By a Hindered Alkanolamine*. Energy Procedia, 2014. 63: p. 2190-2198.

45. Gericke, M., et al., *Studies on the tosylation of cellulose in mixtures of ionic liquids and a co-solvent*. Carbohydrate Polymers, 2012. 89(2): p. 526-536.
46. Freund, H.J. and M.W. Roberts, *Surface chemistry of carbon dioxide*. Surface Science Reports, 1996. 25(8): p. 225-273.
47. Yamada, H., et al., *Density Functional Theory Study on Carbon Dioxide Absorption into Aqueous Solutions of 2-Amino-2-methyl-1-propanol Using a Continuum Solvation Model*. The Journal of Physical Chemistry A, 2011. 115(14): p. 3079-3086.
48. Qi, G., et al., *Mesoporous amine-bridged polysilsesquioxane for CO₂ capture*. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2011. 1(3): p. 278-284.
49. Xu, X., et al., *Influence of Moisture on CO₂ 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.
50. Wang, L., et al., *Component fractionation of temporal evolution in adsorption-desorption for binary gas mixtures on coals from Haishiwang Coal Mine*. International Journal of Mining Science and Technology, 2013. 23(2): p. 201-205.
51. Wang, N., et al., *Amine-modified Mg-MOF-74/CPO-27-Mg membrane with enhanced H₂/CO₂ separation*. Chemical Engineering Science, 2015. 124: p. 27-36.
52. Wang, X., L. Chen, and Q. Guo, *Development of hybrid amine-functionalized MCM-41 sorbents for CO₂ capture*. Chemical Engineering Journal, 2015. 260: p. 573-581.
53. Bradshaw, J., et al., *Sources of CO₂*. IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage: p. 75-103.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

แหล่งการปลดปล่อยและความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ก. 1 แหล่งการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสแก๊สขาออก (ดัดแปลงจาก[53])

แหล่งการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะไม่มีน้ำ (ร้อยละโดยปริมาตร)
คาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง <ul style="list-style-type: none"> ● แก๊สปล่องไฟจากโรงไฟฟ้า <ul style="list-style-type: none"> - หม้อไอน้ำที่ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง 7 - 10 - กังหันแก๊ส 3 - 4 - หม้อไอน้ำที่ใช้ น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง 11 - 13 - หม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง 12 - 14 - IGCC* หลังการเผาไหม้ 12 - 14 ● โรงกลั่นน้ำมัน/ปิโตรเคมีที่ให้ความร้อนด้วยเครื่องทำความร้อน 8 	
คาร์บอนไดออกไซด์จากการเปลี่ยนรูปทางเคมีร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิง <ul style="list-style-type: none"> ● แก๊สจากเตาเผาถลุงเหล็ก <ul style="list-style-type: none"> - ก่อนการเผาไหม้ 20 - หลังการเผาไหม้ 27 ● แก๊สจากเตาเผาซีเมนต์ 14 - 33 	

แหล่งการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์	ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะไม่มีน้ำ (ร้อยละโดยปริมาตร)
คาร์บอนไดออกไซด์จากการเปลี่ยนรูปทางเคมีก่อนการเผาไหม้ <ul style="list-style-type: none"> ● IGCC: แก๊สสังเคราะห์หลังจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน 	8 - 20
คาร์บอนไดออกไซด์จากปฏิกิริยาเคมี <ul style="list-style-type: none"> ● การผลิตแอมโมเนีย (Ammonia production) ● เอทิลีนออกไซด์ (Ethylene oxide) ● การผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen production) ● การผลิตเมทานอล (Methanol production) 	18 8 2 – 30 10

*IGCC (Integrated gasification combined cycle.) คือ การผสมผสานระหว่างเทคโนโลยีที่เปลี่ยนสถานะถ่านหินให้เป็นแก๊ส (Coal Gasification) กับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วมกังหันแก๊ส (Gas Fired Combined Cycle Plant) เข้าด้วยกัน โดยกระบวนการเริ่มจากการนำถ่านหินไปผสมกับไอน้ำและออกซิเจน โดยใช้แรงดันและอุณหภูมิสูงจนเกิดปฏิกิริยาทางเคมี จะได้แก๊สที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน แก๊สที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนี้ จะผ่านขั้นตอนในการทำให้สะอาด โดยการสกัดฝุ่นละออง กำมะถัน และไนโตรเจนออกไป ก่อนที่จะนำไปเผาไหม้ผ่านเครื่องกังหันแก๊ส เพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นอกจากนี้ความร้อนหรือแก๊สเสียที่ออกมาจากเครื่องกังหันแก๊ส จะนำไปใช้ให้ความร้อนแก่หม้อกำเนิดไอน้ำ เพื่อหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้อีกทอดหนึ่ง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรสสุคนธ์ เปานิล เกิดวันที่ 19 มกราคม พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ ในปีการศึกษา 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2555 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 และเข้าร่วมการประชุมวิชาการ The 5th TIChE International Conference 2015 "Creating Green Society through Green Process Engineering" ที่เมืองพัทยา จังหวัดชลบุรี เมื่อวันที่ 9-10 พฤศจิกายน 2558

