

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเลือกดักจับแก๊สเรือนกระจกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสม
กระแสไฮโดรเจนเข้มข้นบนตัวดูดซับของแข็งชนิดดินที่ดัดแปร
หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน

Selective carbon dioxide greenhouse gas capture from H₂-rich stream
on amine-functionalized clay solid sorbents

รองศาสตราจารย์ ดร. ณัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ และคณะ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุน
ทุนอุดหนุนการวิจัย (งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2559)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เล็งเห็นถึงความสำคัญของงานวิจัยและให้ทุนอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และเครื่องมือวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประสานงาน เจ้าหน้าที่และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ที่อำนวยความสะดวกด้านต่างๆ

คณะผู้วิจัย

คำนำ

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้เกี่ยวข้องกับการจับแก๊สเรือนกระจกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสมกระแสไฮโดรเจนเข้มข้นบนตัวดูดซับของแข็งชนิดินที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน รายงานฉบับสมบูรณ์นี้จะกล่าวถึงออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อทราบอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่เตรียม รวมถึงความสามารถในการเลือกดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม การคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งาน และความคงทนของตัวดูดซับที่เตรียม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตและฟังก์ชันด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีนที่ปริมาณโดยมวลต่างๆ และเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดด้วยการออกแบบและการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอนไฮโดรเจน และไนโตรเจน และการหาพื้นที่ผิวจำเพาะหรือบีอีที สภาวะการดูดซับ/คายซับของคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการภายใต้ความดันบรรยากาศและสภาวะที่แห้ง เพื่อประเมินระดับความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นผลตอบสนอง ผลกระทบหลักทั้งสี่ที่ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ (ร้อยละ 30-50 โดยมวล) ปริมาณไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตในตัวดูดซับ (ร้อยละ 0-10 โดยมวล) อุณหภูมิการดูดซับ (60-100 องศาเซลเซียส) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 10-30 โดยปริมาตร) และอันตรกิริยาของผลกระทบหลัก ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ซึ่งพบว่า ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าในแต่ละผลกระทบหลักทั้งสี่ ซึ่งอธิบายได้ว่า ผลกระทบหลักทั้งสี่มีอิทธิพลในเชิงบวกต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ สภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุด โดยใช้การวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบสนอง อยู่ในช่วงของปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 43-47 โดยมวล ปริมาณไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตในตัวดูดซับร้อยละ 4-8 โดยมวล อุณหภูมิ 86-94 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 30 โดยปริมาตร ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้อยู่ในช่วง 5.6-6.0 มิลลิโมลต่อกรัม จากการทดสอบความคงทนของตัวดูดซับ พบว่า ตัวดูดซับมีความเสถียรตลอดช่วงการทำงานภายใต้สภาวะที่ศึกษา

คำสำคัญ: (1) การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (2) การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (3) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน (4) ไฮโดรทาลไซต์

Abstract

The aim of this study was to synthesize the sodium dodecyl sulfate (SDS)-treated hydrotalcite (HT) functionalized with different loading of tetraethylenepentamine (TEPA) and to find the optimized CO₂ adsorption capacity via statistical design and analysis. The TEPA-SDS/HT sorbents were characterized by X-ray diffraction, Fourier transform infrared spectrometry, CHN analysis and Brunauer-Emmet-Teller. The condition of CO₂ adsorption/desorption was performed under atmospheric pressure and dry basis. The main factors, which were of TEPA loading (30-50% (w/w)), SDS loading (0-10% (w/w)), adsorption temperature (60-100 °C), and CO₂ concentration (10-30% (v/v)), and their interactions were used to evaluate a significant influence on the CO₂ adsorption capacity by using a full 2⁴ factorial design. The CO₂ adsorption capacity increased as each of these four main effects increased, suggesting that the four main effects had a positive influence on the CO₂ adsorption. The optimal condition for CO₂ adsorption on TEPA/HT obtained by a response surface method (RSM) was TEPA loading of 43-47% (w/w), SDS loading of 4-8% (w/w), adsorption temperature of 86-94 °C, and CO₂ concentration of 30% (v/v). The maximum CO₂ adsorption capacity was around 5.6-6.0 mmole g⁻¹. The CO₂ adsorption/desorption cycle tests indicated that the sorbent was stable under the studied condition.

Key Words: (1) Carbon dioxide capture (2) A full 2⁴ factorial design (3) Tetraethylenepentamine (4) Hydrotalcite

สารบัญ

| เรื่อง | หน้า |
|--|----------|
| กิตติกรรมประกาศ | ก |
| คำนำ | ข |
| บทคัดย่อภาษาไทย | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | ง |
| สารบัญ | จ |
| สารบัญรูป | ช |
| สารบัญตาราง | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย | 4 |
| 1.3 สมมติฐานการวิจัย | 4 |
| 1.4 ขอบเขตของการวิจัย | 4 |
| 1.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา | 5 |
| 1.6 คำชี้แจงเบื้องต้น | 5 |
| 1.7 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย | 5 |
| 1.8 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย | 5 |
| 1.9 นิยามศัพท์เฉพาะ | 6 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 7 |
| 2.1 ทฤษฎี | 7 |
| 2.1.1 การดักจับและการกักเก็บคาร์บอน | 7 |
| 2.1.2 ประเด็นสำคัญของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ | 8 |
| 2.1.3 การดักจับแอสคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าและความร้อน | 8 |
| 2.1.4 ประเภทของเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ | 10 |

| เรื่อง | หน้า |
|---|-----------|
| 2.1.5 ทฤษฎีพื้นฐานในเรื่องต้นสำหรับปฏิกิริยาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่มีหมู่เอมีน และ รูปแบบการเตรียมตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีน | 14 |
| 2.1.6 ตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ | 16 |
| 2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 20 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย | 24 |
| 3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ แก๊สและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย | 24 |
| 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย | 24 |
| 3.1.2 แก๊สที่ใช้ในการวิจัย | 24 |
| 3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย | 25 |
| 3.2 วิธีดำเนินการทดลอง | 25 |
| 3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ | 25 |
| 3.2.2 การทดสอบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ | 27 |
| 3.2.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ | 27 |
| 3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะตัวดูดซับ | 29 |
| บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการวิจัย | 31 |
| 4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ | 31 |
| 4.1.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD) | 31 |
| 4.1.2 เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) | 34 |
| 4.1.3 เทคนิคการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN analyzer) | 38 |
| 4.1.4 เทคนิคบีอีที (The Brunauer-Emmet-Teller, BET) | 38 |
| 4.2 การออกแบบการทดลอง 2 ⁴ แฟคทอเรียล | 40 |
| 4.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง | 49 |
| 4.4 การทดสอบการเลือกดักจับของตัวดูดซับในแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน | 54 |

| เรื่อง | หน้า |
|----------------------------------|------|
| 4.5 การทดสอบความคงทนของตัวดูดซับ | 55 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย | 56 |
| บรรณานุกรม | 58 |
| ผลผลิต | 64 |

สารบัญภาพ

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|---|----|
| 2.1 | เทคนิคที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจน | 9 |
| 2.2 | รูปแบบทั่วไปของกระบวนการแยกหลักที่เกี่ยวข้องกับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สที่ถูกแยกออกอาจจะเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน หรือแก๊สออกซิเจน ในรูปที่ 2b และ 2c หนึ่งในกระแสแก๊สที่ถูกแยก (A และ B) คือ กระแสที่มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน หรือแก๊สออกซิเจน และอื่นๆ ที่เป็นกระแสแก๊สกับแก๊สที่เหลืออยู่ในแก๊สเดิม (A+B) | 11 |
| 2.3 | ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนในภาวะที่ไม่มีน้ำ โดยที่ B หมายถึง เอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ | 14 |
| 2.4 | ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนตติยภูมิในภาวะที่มีน้ำ | 15 |
| 2.5 | ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิในภาวะที่มีน้ำ | 15 |
| 2.6 | การเตรียมตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีน ในรูปแบบต่างๆ | 16 |
| 4.1 | รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (b) ไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซิลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซิลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซิลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (e) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซิลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (f) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (g) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซิลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล | 32 |

| รูปที่ | หน้า | |
|--------|--|----|
| 4.2 | รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดด้วยเทคนิคเอฟทีไออาร์ของ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (b) ไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (e) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (f) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (g) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล (เส้นทึบ หมายถึง ตัวดูดซับก่อนใช้ในการดูดซับ และ เส้นประ หมายถึง ตัวดูดซับหลังผ่านการดูดซับแล้ว) | 35 |
| 4.3 | แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.4 | 45 |
| 4.4 | พล็อตความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability plot) ของตัวแปร 4 ตัวแปร (ตัวแปร A–D) และอันตรกิริยาของตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.4 | 46 |
| 4.5 | พล็อตเพอร์เทอร์เบชัน (Perturbation plot) ของตัวแปรหลัก 4 ตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.4 | 48 |
| 4.6 | พล็อตระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย | 49 |
| 4.7 | พล็อตความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้างสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง | 52 |
| 4.8 | พล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง | 52 |
| 4.9 | พล็อตโครงร่างของผลกระทบหลักทั้งสี่สำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง | 53 |
| 4.10 | การเลือกดูดซับของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 5 โดยมวล ในแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียสและความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 30 โดยปริมาตร | 54 |

| รูปที่ | หน้า |
|--------|------|
| 4.10 | 55 |

4.10 วัฏจักรการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพน-
ตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซัลเฟต
ร้อยละ 5 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของคาร์บอนได-
ออกไซด์ ร้อยละ 30 โดยปริมาตร

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ตัวอย่างวัสดุของแข็งที่ใช้เป็นตัวดูดซับ | 19 |
| 4.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของคาร์บาเมตและโบคาร์บอเนตบนตัวดูดซับ | 37 |
| 4.2 ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ | 39 |
| 4.3 ตัวแปรการทดลองที่ถูกเข้ารหัสสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล โดยทดลอง 16 การทดลองและเพิ่ม 3 จุดกึ่งกลาง | 41 |
| 4.4 แสดงค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล | 42 |
| 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของเทอมที่มีความสำคัญสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล | 43 |
| 4.6 ตัวแปรการทดลองที่ถูกเข้ารหัสสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง FCCCD-RSM โดยทดลอง 14 การทดลองและเพิ่ม 4 จุดกึ่งกลาง | 50 |
| 4.7 แสดงค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง | 51 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปริมาณเฉลี่ยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 9.6 เท่าจากปี พ.ศ. 2532 จนถึงปี พ.ศ. 2554 ในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยเป็นประเทศอันดับที่ 24 ของโลกที่มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีอัตราการปลดปล่อยสูงกว่าค่าเฉลี่ยของโลกถึงสองเท่า คิดเทียบเป็นจำนวน 351.3 ล้านตันต่อปี หรือร้อยละ 0.93 เทียบกับจำนวนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยสู่บรรยากาศทั่วโลก^[1] การเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ ความแปรปรวนของสภาพอากาศ (Climate change) หรือที่เรียกว่าภาวะโลกร้อน ซึ่งประชากรทั่วโลกต่างได้รับผลกระทบทั้งทางสุขภาพ การเปลี่ยนแปลงของฤดูกาลที่มีต่อผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น จนในที่สุดประเทศอุตสาหกรรมและประเทศต่างๆ ในทวีปยุโรปรวม 37 ประเทศที่ต่างได้รับผลกระทบ ดำเนินการทำข้อตกลงในพิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ว่าด้วยการจำกัดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกโดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังมีข้อตกลงโคเปนเฮเกนในการประชุมเกี่ยวกับสภาวะอากาศครั้งที่ 15 ว่าด้วยการลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกโดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่ออุณหภูมิของโลกสูงขึ้นไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส ตามหลักการทางวิทยาศาสตร์ แหล่งที่มาของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศมาจากกระบวนการการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเปลี่ยนรูปทางเคมีร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเปลี่ยนรูปทางเคมีก่อนการเผาไหม้ และปฏิกิริยาเคมีต่างๆ^[2] ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสแก๊สขาออกจากกระบวนการจะมีค่าต่างกัน โดยความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงร้อยละ 2-35 โดยปริมาตร

ตารางที่ 1.1 ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสแก๊สขาออกจากกระบวนการต่างๆ
(ดัดแปลงจาก [2])

| แหล่ง | ความเข้มข้นของ คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดยปริมาตร) ภายใต้สภาวะไม่มีน้ำ |
|--|---|
| คาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง | |
| + แก๊สปล่องไฟจากโรงไฟฟ้า | |
| - หม้อไอน้ำที่ใช้แก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง | 7 – 10 |
| - กังหันแก๊ส | 3 – 4 |
| - หม้อไอน้ำที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง | 11 – 13 |
| - หม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง | 12 – 14 |
| - IGCC* หลังการเผาไหม้ | 12 – 14 |
| + โรงกลั่นน้ำมันปิโตรเคมีที่ให้ความร้อนด้วยเครื่องทำความร้อน | 8 |
| การเปลี่ยนรูปทางเคมีรวมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิง | |
| + แก๊สเตาหลอมเหล็ก | |
| - ก่อนการเผาไหม้** | 20 |
| - หลังการเผาไหม้ | 27 |
| + แก๊สจากเตาเผาซีเมนต์ | 14 – 33 |
| การเปลี่ยนรูปทางเคมีก่อนการเผาไหม้ | |
| + IGCC: แก๊สสังเคราะห์หลังกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน | 8 – 20 |
| ปฏิกิริยาเคมี | |
| + การผลิตแอมโมเนีย | 18 |
| + เอทิลีนออกไซด์ | 8 |
| + การผลิตไฮโดรเจน | 2 – 30 |
| + การผลิตเมทานอล | 10 |

* IGCC (Integrated gasification combined cycle): วงจรที่รวมกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันโดยรวม

** แก๊สเตาหลอมที่มีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณมากที่สามารถแปลงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์
โดยใช้ปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟิ

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การใช้เยื่อเลือกผ่าน^[3] การดูดซึมโดยใช้สารละลาย^[4] และการดักจับโดยใช้ตัวดักจับชนิดของแข็ง^[5] เป็นต้น การดูดซึมด้วยสารละลายเอมีนเป็นนิยมในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากดำเนินการได้ง่ายและใช้ต้นทุนต่ำ แต่มักประสบปัญหาจากสารละลายที่ใช้ดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีฤทธิ์ในการกัดกร่อนทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ของหอดูดซึมเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง นอกจากนี้เมื่อสารละลายถูกใช้งานไปได้ระยะหนึ่งจะเกิดการเสื่อมสภาพจำเป็นต้องเปลี่ยนสารละลายใหม่ โดยในการทำสารละลายขึ้นมาใช้ใหม่จำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำมหาศาลด้วยเหตุที่หอดูดซึมนั้นมีขนาดใหญ่ อีกทั้งการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซึมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ต้องใช้พลังงานที่สูงกว่ามากเมื่อเทียบกับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับชนิดของแข็ง^[6] การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้วิธีดูดซับบนตัวดูดซับชนิดของแข็งใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง มีความคงทน ไม่มีการรั่วไหลของเอมีน สามารถจัดเก็บและขนส่งตัวดูดซับได้ง่าย และที่สำคัญสามารถคืนสภาพตัวดูดซับได้ง่ายโดยใช้การเพิ่ม-ลดอุณหภูมิหรือความดัน^[7,8] และใช้พลังงานน้อยในการคืนสภาพตัวดูดซับ ซึ่งจะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการคืนสภาพตัวดูดซับหรือการคายซับสามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นต่อไปได้ เช่น นำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ กระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์รีฟอร์มมิง การผลิตน้ำแข็งแห้ง การผลิตเป็นสารดับเพลิง เป็นต้น

ระดับความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างกว้างและครอบคลุมระดับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 1-30 โดยปริมาตร (ดังแสดงในตารางที่ 1.1) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจน ตัวอย่างเช่น สัดส่วนองค์ประกอบของแก๊สผสมที่เกิดจากกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจากมีเทน^[9] ประกอบด้วย แก๊สไฮโดรเจนร้อยละ 75.09 โดยปริมาตร แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 5.33×10^{-5} โดยปริมาตร (หรือประมาณร้อยละ 0.00005 โดยปริมาตร) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 19.28 โดยปริมาตร แก๊สมีเทนร้อยละ 0.1214 โดยปริมาตร แก๊สไนโตรเจนร้อยละ 5.248 โดยปริมาตร และแก๊สออกซิเจนร้อยละ 0.2591 โดยปริมาตร ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกแยกออกจากกระแสไฮโดรเจนเข้มข้น ณ ความดันบรรยากาศ สามารถนำกลับไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งจะทำให้เป็นการผลิตที่ยั่งยืนและเกิดการหมุนเวียนโดยไม่ก่อเกิดมลพิษ

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาและพัฒนาตัวดูดซับของแข็งชนิดดินประเภทที่มีโครงสร้างเป็นชั้น เช่น ดินฟอก ไฮโดรทาลไซต์ ที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีนเพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยงานวิจัยนี้จะใช้ดินฟอกในการศึกษาเบื้องต้น และใช้ไฮโดรทาลไซต์ในการ

การศึกษาวิจัย หนึ่งรายละเอียดของการศึกษาจะแสดงเฉพาะไฮโดรทาลไซต์ที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน (เนื่องจากส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินฟอก กำลังดำเนินการยื่นจดสิทธิบัตร)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 สังเคราะห์ตัวดูดซับของแข็งชนิดดินประเภทไฮโดรทาลไซต์ที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน

1.2.2 หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความดันบรรยากาศ

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 การเพิ่มปริมาณเอมีนในตัวดูดซับช่วยส่งเสริมความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

1.3.2 การใช้โซเดียมโอดีซิลซิลเฟตในปริมาณที่เหมาะสมในการเตรียมตัวดูดซับ ช่วยส่งเสริมการกระจายตัวของเอมีนบนตัวดูดซับ ส่งผลให้เกิดการดักจับได้ดีขึ้น

1.3.3 การเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับทำให้ตัวดูดซับสามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในปริมาณที่สูงขึ้น

1.3.4 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสขาเข้าที่ต่างกัน ส่งผลให้ได้ค่าความสามารถในการดักจับของตัวดูดซับที่ต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 สังเคราะห์ตัวรองรับไฮโดรทาลไซต์แล้วดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน

1.4.2 ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่เตรียม ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ ปริมาณเอมีนในตัวดูดซับ ปริมาณโซเดียมโอดีซิลซิลเฟตในตัวดูดซับ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม พร้อมทั้งหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้การออกแบบการทดลองพื้นที่ผิวตอบสนองตลอดทั้งการเลือกดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และความคงทนของตัวดูดซับ

1.4.3 วิเคราะห์เอกลักษณ์หรือลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

1.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ตัวแปรต้น ปริมาณเอมีนในตัวดูดซับ ปริมาณโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต อุณหภูมิในการดักจับ และความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า

ตัวแปรตาม ค่าความสามารถในการดักจับของคาร์บอนไดออกไซด์

ตัวแปรควบคุม ความดันในระบบ ณ ความดันบรรยากาศ และสภาวะการดูดซับในสภาวะแห้ง

1.6 คำชี้แจงเบื้องต้น

1.6.1 ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองหรือ Design of experiments (DOE) สำหรับด้วยวิธีแฟคทอเรียล 4 ตัวแปรหรือ 2^4 factorial และวิธีพื้นผิวตอบสนองหรือ Response surface

1.6.2 การออกแบบการทดลองทั้งสองวิธีมีการเพิ่มค่ากลางหรือ Central point เพื่อใช้ในการตรวจสอบผลของความโค้งหรือ Curvature และใช้ในการพิจารณาความเหมาะสมของสมการถดถอยหรือ Regression model equation

1.6.3 ความสำคัญของแฟคเตอร์หรือผลกระทบของตัวแปรที่ใช้ศึกษานั้น วิจารณ์ที่ระดับความเชื่อมั่นหรือ Confidence interval ร้อยละ 95

1.7 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2558 จนถึง กันยายน 2559

1.8 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.8.1 ได้ตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีนที่มีความสามารถในการดักจับและเลือกดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความดันบรรยากาศ

1.8.2 เพื่อเป็นต้นแบบการดักจับแก๊สเรือนกระจกคาร์บอนไดออกไซด์และสามารถนำกลับเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ที่ไม่ก่อมลพิษสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชนที่ต้องการสร้างรายได้จากการขายคาร์บอนเครดิตและลดภาวะโลกร้อน หรือสู่สังคมคาร์บอนต่ำ

1.8.3 เผยแพร่ผลงาน โดยการนำเสนอผลงานและตีพิมพ์ผลงานลงในวารสารระดับชาติและวารสารระดับนานาชาติ เพื่อเป็นการถ่ายทอดความรู้แก่ผู้สนใจ

1.9 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.9.1 อัตราส่วนน้ำหนักของตัวดูดซับต่ออัตราเร็วสายป้อนหรือ W/F ratio หมายถึง ปริมาณน้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ (หน่วยเป็น กรัม) หารด้วยอัตราเร็วโดยรวมของแก๊สผสมทุกชนิด (หน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที)

1.9.2 ปริมาณเอมีนในตัวดูดซับ หมายถึง ร้อยละโดยมวลของเอมีนที่มีอยู่บนตัวดูดซับ

1.9.3 ปริมาณโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต หมายถึง ร้อยละโดยมวลของโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ที่มีอยู่บนตัวดูดซับ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 การดักจับและการกักเก็บคาร์บอน (Carbon capture and storage)

การดักจับและการกักเก็บคาร์บอน (CCS) หรือ การดักจับและการตัดแยกคาร์บอน (Carbon capture and sequestration) เป็นกระบวนการในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากแหล่งกำเนิดขนาดใหญ่ เช่น โรงไฟฟ้าที่ผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิล การคมนาคมขนส่ง อุตสาหกรรม และกิจกรรมต่างๆ ในชีวิตประจำวัน เป็นต้น จุดมุ่งหมายของกระบวนการนี้ คือ การป้องกันไม่ให้เกิดการปล่อยหรือลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมากสู่ชั้นบรรยากาศ อันก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศหรือที่รู้จักกันดีคือภาวะโลกร้อน^[10] และลดความเป็นกรดของมหาสมุทร^[11] แม้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์ได้รับการนำกลับได้พื้นโลกเพื่อกักตัวทางธรณีวิทยาและกักเก็บน้ำมันเป็นเวลาหลายทศวรรษที่ผ่านมา รวมถึงการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแนวคิดที่ค่อนข้างใหม่ ตัวอย่างในเชิงพาณิชย์ครั้งแรกเป็นของเวย์เบอร์นเมื่อปี ค.ศ. 2000^[12] ตัวอย่างอื่น ๆ ได้แก่ เชื้อเพลิงในเขตแดนของซาสค์พาวเวอร์ (SaskPower's Boundary Dam) และโครงการเคมเปอร์พลังงานมิสซิสซิปปี (Mississippi Power's Kemper Project Kemper) นอกจากนี้การดักจับและการกักเก็บคาร์บอนยังสามารถนำมาใช้เพื่ออธิบายการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอากาศที่เป็นเทคนิควิศวกรรมสภาพภูมิอากาศ

การดักจับและบีบอัดคาร์บอนไดออกไซด์อาจช่วยเพิ่มความต้องการเชื้อเพลิงร้อยละ 25-40 ของโรงดักจับและตัดแยกคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาถ่านหิน^[13] ค่าใช้จ่ายของระบบเหล่านี้และอื่นๆ คาดว่าจะเพิ่มค่าใช้จ่ายของพลังงานที่ผลิตร้อยละ 21-91 สำหรับโรงที่สร้างตามวัตถุประสงค์ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีให้กับโรงงานที่มีอยู่จะมีราคาแพงมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลจากโรงดักจับและตัดแยกคาร์บอนไดออกไซด์ อุตสาหกรรมล่าสุดแสดงให้เห็นถึงความสำเร็จด้านการวิจัยในการพัฒนาและการใช้งาน ที่ถูกแยกจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงในปี ค.ศ. 2025 จะมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่า การผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินที่ใช้ในปัจจุบัน^[14]

การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกคาดการณ์ทั้งในกักตัวทางธรณีวิทยาในระดับลึกหรือในรูปแบบของแร่คาร์บอนเนต การกักเก็บในทะเลลึกถือว่าเป็นไปได้แค่เพียงระยะสั้นเพราะเป็น

การเพิ่มปัญหาอย่างมากที่ก่อให้เกิดความเป็นกรดของมหาสมุทร^[15] ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ (The National Energy Technology Laboratory หรือ NETL) รายงานว่าอเมริกาเหนือมีความจุในการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากพอในระยะเวลาที่มากกว่า 900 ปี ด้วยอัตราการผลิตในปัจจุบัน^[16] ปัญหาทั่วไป คือ การคาดการณ์ในระยะยาวเกี่ยวกับความปลอดภัยในการกักเก็บได้น้ำหรือใต้ดินเป็นเรื่องที่ยากมากและไม่แน่นอน ทั้งยังมีความเสี่ยงที่อาจเกิดการรั่วไหลของคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ^[17]

2.1.2 ประเด็นสำคัญของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

การดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide capture and storage หรือ CCS) สามารถนำไปใช้กับโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuelled power plants) ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมและในการผลิตเชื้อเพลิงและส่วนของการเปลี่ยนรูป (Transformation sectors)

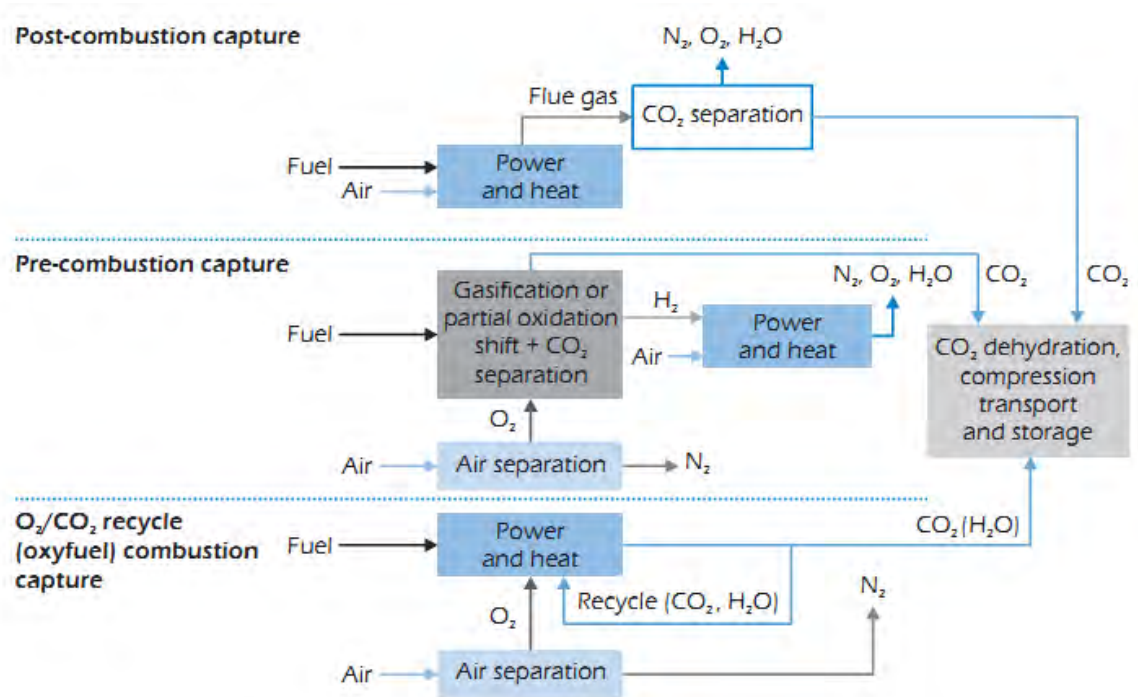
สามตัวเลือกหลักของเทคโนโลยีสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ คือ การเผาไหม้หลัง (Post-combustion) การเผาไหม้ก่อน (Pre-combustion) และกระบวนการเผาไหม้ในออกซิเจน (Oxyfuel combustion) หรือกระบวนการดีไนโตรจีเนชัน (Denitrogenation)

การลดค่าใช้จ่ายในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านการออกแบบกระบวนการใหม่และการปรับปรุงการออกแบบที่มีอยู่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการใช้งานขนาดใหญ่สำหรับการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการแยกก๊าซธรรมชาติ การผลิตเอทานอลและการผลิตปุ๋ยมีความเป็นไปได้ที่จะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการดักจับจากโรงไฟฟ้า และการผลิตไฮโดรเจนและกระบวนการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงอื่นๆ เป็นที่น่าสนใจสำหรับการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกวันนี้

2.1.3 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าและความร้อน (CO₂ Capture in Electricity and Heat Generation)

มีสามตัวเลือกหลักสำหรับเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน คือ การเผาไหม้หลัง (Post-combustion) ดักจับโดยใช้การดูดซับทางเคมี (Chemical absorption) การเผาไหม้ก่อน (Pre-combustion) และกระบวนการเผาไหม้ในออกซิเจน (Oxyfuel combustion หรือ denitrogenation) (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์^[18]

ในกระบวนการเผาไหม้ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดักจับจากแก๊สปล่องไฟ (Flue gases) ที่มีประมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ร้อยละ 4-8 โดยปริมาตรสำหรับโรงไฟฟ้าเผาไหม้ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas-fired power plants) และร้อยละ 12-15 โดยปริมาตรสำหรับโรงไฟฟ้าเผาไหม้ถ่านหิน (Coal-fired power plants) โดยทั่วไปแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับมักจะใช้ตัวทำละลายและตัวทำละลายภายหลังการฟื้นฟูสภาพ ซึ่งในบางครั้งร่วมกับการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) เทคโนโลยีขั้นพื้นฐานที่ใช้ตัวทำละลายจำพวกสารประกอบเอมีนได้ถูกนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมมานานหลายทศวรรษ แต่ความท้าทายคือการนำกลับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้พลังงานขั้นต่ำและค่าใช้จ่ายที่ยอมรับได้

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับกระบวนการเผาไหม้สามารถนำมาใช้ในโรงงานถ่านหินหรือก๊าซธรรมชาติ โดยเชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจนและ/หรือไอน้ำก่อนแล้วดำเนินการต่อไปในเครื่องปฏิกรณ์ชิฟต์ (Shift reactor) เพื่อผลิตแก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และจะดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมความดันสูง (สูงถึง 70 บาร์) ที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่างร้อยละ 15 และ 40 ส่วนแก๊สไฮโดรเจนถูกนำมาใช้ในการผลิตไฟฟ้าและความร้อนในกังหันแก๊สวงจรรวม (Combined-cycle gas turbine)

กระบวนการเผาไหม้ในออกซิเจนจะเกี่ยวข้องกับการแยกแก๊สไนโตรเจนออกจากอากาศในกระแสสารที่มีแก๊สออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxidant stream) โดยใช้หน่วยแยกอากาศ (Air separation unit หรือ ASU) หรืออาจใช้เยื่อแลกเปลี่ยนไอออนในอนาคต เชื้อเพลิงฟอสซิลจะถูกเผาไหม้กับแก๊สออกซิเจนที่ความเข้มข้นใกล้เคียงบริสุทธิ์โดยใช้แก๊สปล่อยไฟที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled flue gas) ในการควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้

2.1.4 ประเภทของเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

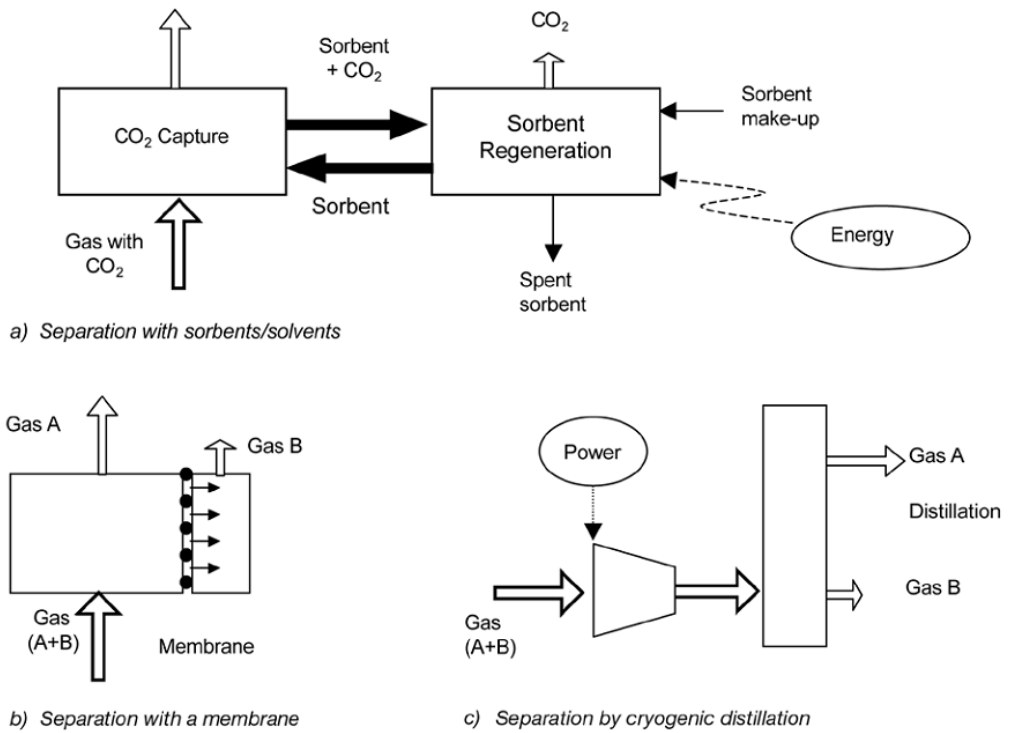
ระบบดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ใช้หลายเทคโนโลยีที่เป็นที่รู้จักกันสำหรับการแยกแก๊สซึ่งมีรวมเข้ากับระบบพื้นฐานสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระบุไว้ในส่วนสุดท้าย รายละเอียดวิธีการแยกมีดังต่อไปนี้

1) การแยกด้วยตัวดูดซับ/ตัวทำละลาย (Separation with sorbents/solvents)

การแยกทำได้โดยการผ่านแก๊สที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ให้สัมผัสกับตัวดูดซับของเหลวหรือตัวดูดซับของแข็งที่สามารถจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ **รูปที่ 2.2a** แสดงผังโดยทั่วไปของระบบการแยกด้วยตัวดูดซับ/ตัวทำละลาย ซึ่งตัวดูดซับที่เต็มไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับ จะถูกส่งไปยังภาชนะที่แตกต่างกัน ที่ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนจะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในขั้นตอนของการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) หลังจากการลดลงความดันหรือหลังการเปลี่ยนแปลงสภาวะอื่น ๆ รอบๆ ตัวดูดซับ โดยตัวดูดซับหลังจากขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพจะถูกส่งกลับเพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในลักษณะหมุนเวียน ในกรณีที่ตัวดูดซับเป็นของแข็งจะไม่มีกรไหลเวียนระหว่างภาชนะ เนื่องจากการดูดซับและการฟื้นฟูสภาพทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงแบบวงจร (การเพิ่ม/ลดความดันหรืออุณหภูมิ) ในภาชนะที่ตัวดูดซับบรรจุอยู่ และต้องมีการเพิ่มตัวดูดซับใหม่เข้ามาเสมอเพื่อชดเชยตัวดูดซับที่เสื่อมสภาพไป ในบางสถานการณ์ ตัวดูดซับอาจเป็นออกไซด์ของแข็งที่ทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิงฟอสซิลหรือชีวมวลในภาชนะได้รับความร้อนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก และตัวดูดซับที่ใช้แล้วจะถูกหมุนเวียนไปยังภาชนะที่สองเพื่อออกซิไดซ์ในอากาศอีกครั้ง แล้วจึงนำมาใช้กับตัวดูดซับใหม่บางส่วนที่สูญเสียไปและที่เพิ่มเข้ามา

ผังทั่วไปที่แสดงใน **รูปที่ 2.2** มีอิทธิพลต่อระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญมากมาย รวมทั้งตัวเลือกในเชิงพาณิชย์ชั้นนำ เช่น การดูดซับทางเคมี การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับ กระบวนการที่เกิดขึ้นใหม่อื่นๆ ที่ใช้ตัวดูดซับของเหลวใหม่หรือตัวดูดซับของแข็งใหม่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ ที่ได้รับการพัฒนาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดของ

ระบบที่มีอยู่ หนึ่งในปัญหาที่พบบ่อยของระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหล่านี้ คือ การไหลของตัวดูดซับระหว่างภาชนะของรูปที่ 2.2a นั้นแรง เพื่อให้สอดคล้องกับการไหลที่แรงของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกดำเนินการในโรงไฟฟ้า ดังนั้นขนาดของอุปกรณ์และพลังงานที่จำเป็นสำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับควรมีขนาดใหญ่และมีแนวโน้มที่จะแปรเป็นประสิทธิภาพที่สูญเสียและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเป็นสำคัญ นอกจากนี้ในระบบที่ใช้วัสดุดูดซับที่มีราคาแพง ทั้งยังค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นที่เกี่ยวข้องกับการซื้อตัวดูดซับและการกำจัดสารพิษตกค้างของตัวดูดซับที่ใช้แล้ว ประสิทธิภาพการทำงานของตัวดูดซับที่ดีภายใต้สภาวะที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงในหลายรอบซ้ำๆ เป็นสภาวะที่จำเป็นในระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.2 รูปแบบทั่วไปของกระบวนการแยกหลักที่เกี่ยวข้องกับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สที่ถูกแยกออกอาจจะเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน หรือแก๊สออกซิเจน ในรูปที่ 2b และ 2c หนึ่งในกระแสแก๊สที่ถูกแยก (A และ B) คือ กระแสที่มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน หรือแก๊สออกซิเจน และอื่นๆ ที่เป็นกระแสแก๊สกับแก๊สที่เหลืออยู่ในแก๊สเดิม (A+B)^[19]

2) การแยกด้วยเยื่อแผ่นเลือกผ่าน (Separation with membranes)

เยื่อแผ่นเลือกผ่าน (รูปที่ 2.2b) เป็นวัสดุที่ผลิตขึ้นเป็นพิเศษที่ช่วยเลือกซึมผ่านแก๊สบางชนิดจากแก๊สผสม ซึ่งการเลือกผ่านของเยื่อแผ่นเลือกผ่านสำหรับแก๊สที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่น แต่การไหลของแก๊สผ่านเยื่อแผ่นจำเป็นต้องใช้แรงผลักดันโดยใช้ความแตกต่างความดันผ่านเยื่อแผ่น ดังนั้นกระแสแรงดันสูงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการแยกด้วยเยื่อแผ่นเลือกผ่าน ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่นมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท เช่น พอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก เป็นต้น ที่อาจประยุกต์ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแยกแก๊สไฮโดรเจนออกจากกระแสแก๊สเชื้อเพลิง การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการ หรือ การแยกแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศ แก๊สออกซิเจนที่ถูกแยกจะถูกส่งต่อเพื่อผลิตกระแสคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง แม้ว่าการแยกด้วยเยื่อแผ่นเลือกผ่านพบว่า ในปัจจุบันมีการใช้งานเชิงพาณิชย์อยู่มากในอุตสาหกรรม บ้างก็มีขนาดใหญ่เช่นเดียวกับการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติ ซึ่งยังไม่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับขนาดใหญ่ และสถานะที่ต้องการในแง่ของความน่าเชื่อถือและต้นทุนที่ต่ำสำหรับระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หน่วยวิจัยและพัฒนาขนาดใหญ่ระดับโลกมีความพยายามที่จะติดตามความคืบหน้า โดยมุ่งเป้าไปที่การผลิตวัสดุเยื่อแผ่นอื่นๆ ที่เหมาะสมกว่าสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในการใช้งานขนาดใหญ่

3) การกลั่นของกระแสแก๊สเหลวและการแยกที่ใช้ความเย็น (Distillation of a liquefied gas stream and refrigerated separation)

แก๊สสามารถทำเป็นของเหลวโดยชุดของขั้นตอนการบีบอัด (Compression) ระบายความร้อน (Cooling) และการขยายตัว (Expansion) เมื่ออยู่ในรูปของเหลวส่วนประกอบของแก๊สสามารถแยกออกจากกันในหอกลั่น (Distillation column) ในกรณีของอากาศการดำเนินการนี้จะดำเนินการในระดับขนาดใหญ่ในเชิงพาณิชย์ แก๊สออกซิเจนสามารถแยกออกจากอากาศได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2c และจะถูกใช้ในช่องของระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (การเผาไหม้ในออกซิเจนและการดักจับการเผาไหม้ก่อน) ในวรรณคดีก่อนหน้านี้ปัญหาคritical สำหรับระบบเหล่านี้คือต้องการกระแสแก๊สออกซิเจนปริมาณมาก นอกจากนี้การแยกที่ใช้ความเย็นยังสามารถใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สอื่นๆ ซึ่งสามารถใช้ในการแก๊สเจ็บบนออกจากกระแสแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่อนข้างสูงความบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่นจากการเผาไหม้ในแก๊สออกซิเจนและสำหรับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติหรือ

แก๊สสังเคราะห์ที่ได้รับการแปลงจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยาชิฟต์

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะติดตั้งในโรงงานที่มีการใช้พลังงานแบบใหม่หรืออาจจะถูกดัดแปลงให้กับโรงงานที่มีอยู่ ซึ่งถ้าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นได้รับการแนะนำอย่างรวดเร็วก็อาจจะต้องมีการดัดแปลงบางส่วนของโรงงานที่มีอยู่หรือโรงงานเหล่านี้จะต้องมีหมดอายุการใช้งานก่อนกำหนดและถูกแทนที่ด้วยโรงงานใหม่ที่มีการดักจับ ข้อเสียของการดัดแปลงคือ

- อาจจะมีข้อจำกัดของสถานที่ เช่น ความพร้อมของที่ดินสำหรับอุปกรณ์การดักจับ
- โรงงานที่มีอายุยาวนานที่เหลืออยู่อาจมีความจำเป็นที่จะปรับค่าใช้จ่ายที่จำนวนมากสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์การดักจับ
- โรงงานเก่ามีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งการเพิ่มส่วนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานเก่าจะมีผลกระทบมากกว่าในโรงงานที่มีประสิทธิภาพสูง

เพื่อการลดข้อจำกัดของสถานที่ตั้ง โรงงานที่ใช้พลังงานแบบใหม่สามารถที่จะสร้างส่วนพร้อมดักจับที่อยู่กับการออกแบบกระบวนการโดยใช้ตัวแปรเริ่มต้นในการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นในการเพิ่มการดักจับและมีพื้นที่เพียงพอและสิ่งอำนวยความสะดวกให้พร้อมสำหรับการติดตั้งอย่างง่ายของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่จะติดตั้งต่อไป สำหรับบางประเภทของการดักจับที่ปรับปรุงใหม่ ตัวอย่างเช่น การจับภาพการเผาไหม้ก่อนและการเผาไหม้ในออกซิเจน อุปกรณ์ที่ปรับปรุงใหม่ส่วนมากสามารถสร้างขึ้นบนสถานที่ที่แยกต่างหากถ้ามีความจำเป็น อุปสรรคอื่น ๆ สามารถแก้ไขได้โดยส่วนใหญ่จะปรับปรุงหรือสร้างใหม่อย่างแข็งแกร่งจากโรงงานที่มีอยู่เดิมเมื่อมีการปรับปรุงการดักจับใหม่ ตัวอย่างเช่น หม้อไอน้ำและกังหันไอน้ำเก่าที่ด้อยประสิทธิภาพจะถูกแทนที่ด้วยหม้อไอน้ำและกังหันไอน้ำเหนือวิกฤติที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพสูงหรือโรงงาน IGCC ในขณะที่ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของโรงงานที่ปรับปรุงกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะสูงที่สุดเทียบเท่ากับของโรงงานเดิมโดยปราศจากการดักจับ

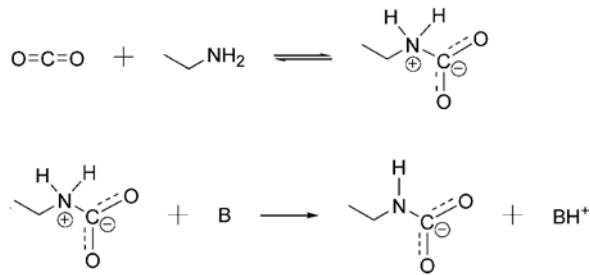
2.1.5 ทฤษฎีพื้นฐานในเบื้องต้นสำหรับปฏิกิริยาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดักจับที่มีหมู่เอมีน และ รูปแบบการเตรียมตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีน

ปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดักจับที่มีหมู่เอมีน

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่มีความเป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) สามารถรับอิเล็กตรอนจากเบสลิวอิสได้ เอมีนจัดว่าเป็นเบสลิวอิส (Lewis base) เพราะที่มีหมู่เอมีน (-NH₂) ประกอบด้วยไนโตรเจนที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวทั้งสองจึงสามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา และกรณีที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา

กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (In absence of water)

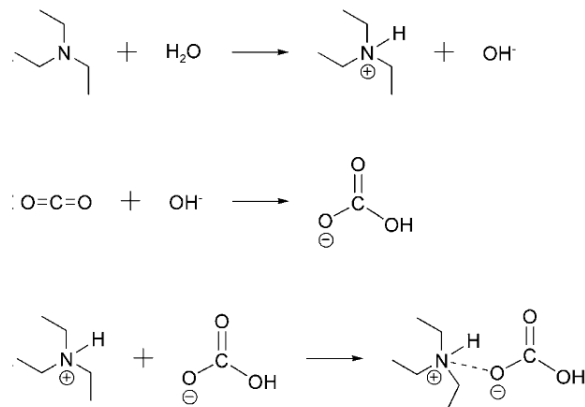
เอมีน 1 โมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ และกลายเป็น สวิทเทอร์ไอออน (Zwitterion) จากนั้นเอมีนอีก 1 โมเลกุลทำการดึงโปรตรอนจากสวิทเทอร์ไอออนเกิดเป็นเกลือของแอมโมเนียมและคาร์บาเมท (Carbamate) สัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยานี้คือ 2:1 เกิดขึ้นกับเอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ (Primary/Secondary amines) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนในภาวะที่ไม่มีน้ำ โดยที่ B หมายถึง เอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ^[20]

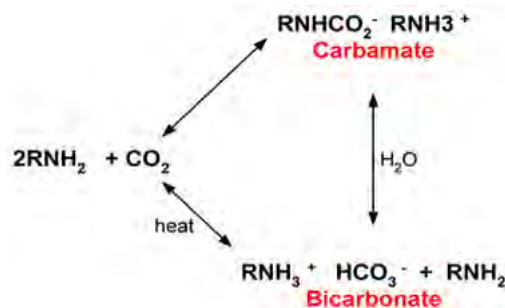
กรณีที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (In presence of water)

สำหรับเอมีนตติยภูมิ (Tertiary amines) มักจะเกิดปฏิกิริยาประเภทนี้ กล่าวคือ ไนโตรเจนบนเอมีนให้อิเล็กตรอนกับน้ำ ได้ควอเทอร์นารีแคทไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออน จากนั้นไฮดรอกไซด์ไอออนจะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์กลายเป็นไบคาร์บอเนตแอนไอออน จากนั้นทั้งสองตัวจับกันด้วยแรงระหว่างไอออน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนตติยภูมิในภาวะที่มีน้ำ^[20]

นอกจากนี้ เอมีนปฐมภูมิและเอมีนทุติยภูมิสามารถเกิดปฏิกิริยานี้ได้เช่นกัน โดยมีพลังงานการกระตุ้นน้อยกว่าการเกิดเป็นคาร์บาเมท สำหรับเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิจะเกิดเป็นคาร์บาเมทก่อนแล้วจึงเกิดต่อเป็นไบคาร์บอเนต ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่สัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยานี้คือ 1:1



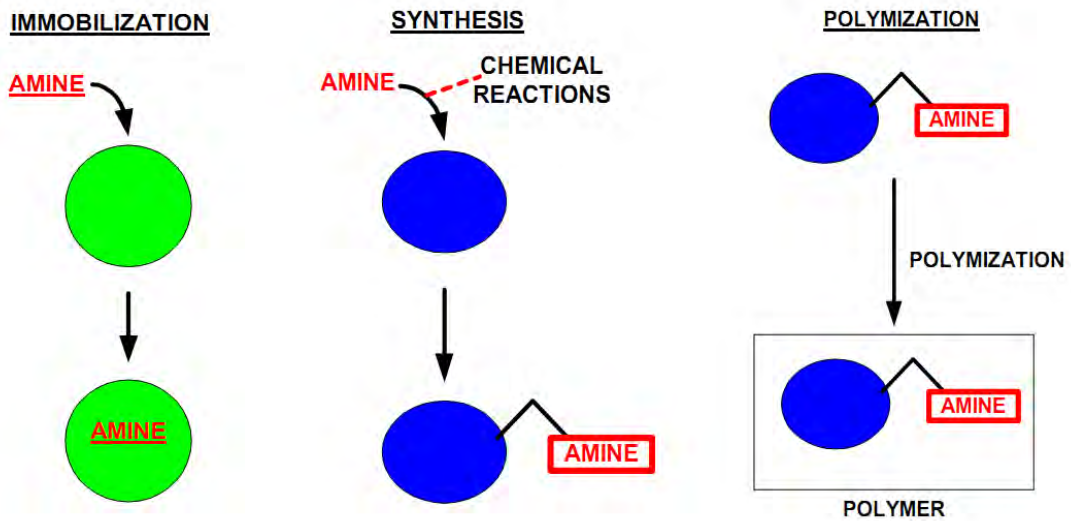
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิในภาวะที่มีน้ำ (ดัดแปลงมาจาก [21])

รูปแบบการเตรียมตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีน การเตรียมตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีนสามารถจำแนกออกเป็น 3 วิธี ดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนี้คือ

1) การจำกัดการเคลื่อนไหว (Immobilization) คือ การนำเอมีนไปเคลือบที่ผิวของเม็ดของแข็งโดยตรงด้วยวิธีฝังตัว (Impregnation)

2) การสังเคราะห์ (Synthesis) คือ การทำให้เอมีนเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือเกิดการเชื่อมพันธะระหว่างเอมีนกับพื้นผิวของของแข็ง

3) พอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) คือ การนำตัวดักจับที่ได้จากวิธีที่ 2 มายึดติดกับวัสดุพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนสูง เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของของแข็งเอมีน



รูปที่ 2.6 การเตรียมตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีน^[22]

2.1.6 ตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Solid sorbents for carbon dioxide capture)

ตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงวัสดุของแข็งที่มีขนาดรูพรุนที่หลากหลาย รวมทั้งซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดเมโซ (Mesoporous silicas) ซีโอไลต์ (Zeolites) และโครงร่างโลหะอินทรีย์ (Metal-organic frameworks) ที่มีศักยภาพในการทำงานสูงและเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่และขนาดย่อม^[23] ในขณะที่ความพร้อมด้านเทคโนโลยีของตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มีความแตกต่างกันระหว่างระดับการวิจัยและระดับสาธิต ซึ่งตัวดูดซับของแข็งแสดงให้เห็นถึง ศักยภาพในเชิงพาณิชย์ของตัวดูดซับในการประยุกต์ใช้กับส่วนที่เกี่ยวข้องกับการช่วยชีวิตและกระบวนการกลั่นอนุกรมสูง อย่างไรก็ตามตัวดูดซับของแข็งนั้นมีความเหมาะสมสำหรับการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์และได้รับความสนใจในการวิจัยด้านวัสดุศาสตร์ นอกจากนี้ในปัจจุบันเทคโนโลยีดังกล่าวยังมีอุปสรรคในด้านข้อจำกัดในการพัฒนาเทคโนโลยีของการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

การเปรียบเทียบกับตัวดูดซึ่มสารละลายเอมีน

สารละลายเอมีนที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านการก่อตัวที่ผันกลับได้ (Reversible formation) ของแอมโมเนียมคาร์บาเมต (Ammonium carbamate) แอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium carbonate) และแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium bicarbonate)^[24] การก่อตัวและความเข้มข้นโดยเทียบเคียงของสารประกอบเหล่านี้ในสารละลายขึ้นอยู่กับเอมีนที่เฉพาะเจาะจงหรือเอมีนที่ถูกนำมาใช้ เช่นเดียวกับอุณหภูมิและความดันของแก๊สผสม คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึ่มได้ดีโดยเอมีนที่อุณหภูมิต่ำและจะหลุดออกที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่สารละลายเอมีนของเหลวได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อที่จะกำจัดแก๊สที่เป็นกรดมาเป็นเวลาเกือบศตวรรษ เทคโนโลยีการคัดแยกด้วยเอมีนยังคงอยู่ภายใต้การพัฒนาในระดับที่จำเป็นสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สไอเสีย^[25]

ข้อดีของตัวดูดซับของแข็ง

ข้อดีของการใช้ตัวดูดซับของแข็งได้รับรายงานอยู่จำนวนมาก เอมีนที่แตกต่างกันของตัวดูดซับของแข็งสามารถเลือกดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยไม่เกิดการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) ที่สำคัญค่าความร้อนของการดูดซับที่ต่ำกว่า (Lower heat of adsorption) สำหรับของแข็งต้องใช้พลังงานที่น้อยกว่าการคายซับ (Desorption) คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากพื้นผิววัสดุ นอกจากนี้เอมีนปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ (Primary or secondary amines) โดยทั่วไปจะดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เดี่ยวๆ ในของเหลว สำหรับพื้นผิวของของแข็งแล้วความจุในการดูดซับรวมที่สูงมากจะสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี และในกระบวนการดูดซับแบบเปลี่ยนอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption) ได้มีการรายงานค่าความร้อนของการดูดซับที่ต่ำกว่าของของแข็งเพื่อที่จะลดการใช้พลังงานที่เหมาะสมที่จำเป็นสำหรับการฟื้นฟูตัวดูดซับ^[26] ที่สำคัญยังมีความกังวลด้านสิ่งแวดล้อมต่อผลกระทบที่ร้ายแรงของการใช้เอมีนเหลว โดยหันมาใช้ตัวดูดซับของแข็งแทน^[27]

ข้อเสียของตัวดูดซับของแข็ง

ด้วยในการผลิตตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคาดว่า มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าค่าใช้จ่ายของเอมีนพื้นฐานที่สามารถผลิตได้โดยง่ายในระดับที่ใหญ่อย่างมีนัยสำคัญ เพราะแก๊สไอเสียหรือแก๊สปล่องควัน (Flue gas) มีสิ่งปนเปื้อนบางส่วนที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ นี่คือการท้าทายทางวิศวกรรมอย่างมีนัยสำคัญที่จะป้องกันตัวดูดซับของแข็งจากการใช้งานในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งยังพลังงานที่เหมาะสมที่จำเป็นสำหรับ

การฟื้นฟูตัวดูดซับนั้นไม่สามารถกู้คืนได้อย่างมีประสิทธิภาพถ้าของแข็งถูกใช้งาน นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนผ่านเบดของแข็งอย่างช้าๆ และไม่มีประสิทธิภาพทำให้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูงในการทำให้ตัวดูดซับเย็นลงในระหว่างการดูดซับและการให้ความร้อนแก่ตัวดูดซับในระหว่างการคายซับ ทำหน้าที่ที่สุดตัวดูดซับของแข็งที่ได้รับความสนใจมากมายมีเพียงการวัดภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ซึ่งจะไม่สนใจผลกระทบของน้ำอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการทำงานและพลังงานที่ใช้ในการฟื้นฟู

ตัวดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorbents)

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของวัสดุที่มีรูพรุนจำนวนมากจะเกิดผ่านปฏิสัมพันธ์แวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals interactions) คาร์บอนไดออกไซด์จะดูดซับได้มากกว่าอย่างมากเมื่อเทียบกับไนโตรเจนเพราะโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์มีความมีขั้วที่มากกว่า^[26] และเกิดการดูดซับได้ดีขึ้นในภาวะที่มีน้ำที่เกี่ยวข้องกับกลไกการดูดซับทางกายภาพ ดังนั้นการค้นพบวัสดุที่มีรูพรุนที่สูงสามารถเลือกดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะแก๊สไอเสียโดยใช้เพียงกลไกการดูดซับทางกายภาพในขอบเขตงานวิจัยที่ศึกษา

ตัวดูดซับทางเคมี (Chemical adsorbents)

ในที่นี้ คือ ของแข็งที่ผ่านการฝังตัวด้วยเอมีน (Amine impregnated solids) ที่พบบ่อยมักเป็นตัวดูดซับที่มีรูพรุนมากและมีพื้นที่ผิวสูง แต่ด้วยเกิดการดูดซับอย่างอ่อนทำให้มีความจุไม่เพียงพอต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะความดันบรรยากาศ เพื่อเพิ่มความจุหรือความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดันต่ำ วัสดุที่มีรูพรุนสูงจะถูกเพิ่มหมู่เอมีนซึ่งได้รับการรายงานว่าได้ตัวดูดซับที่มีความจุในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ซึ่งที่ผ่านมาได้ใช้วัสดุของแข็งจำพวกโพลีเมอร์ ซิลิกา ถ่าน และโครงร่างโลหะอินทรีย์^[23] ของแข็งที่ผ่านการฝังตัวด้วยเอมีนถูกนำมาใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาเคมีกรดเบสของคาร์บอนไดออกไซด์กับเอมีนสามารถเจือจางเอมีนผ่านการบรรจุในรูพรุนของของแข็งได้มากกว่าที่กรณีสารละลายเอมีนที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ในการเปรียบเทียบกับตัวดูดซับของแข็งอื่นๆ เอมีนมีการรายงานเพื่อรักษาขีดความสามารถในการดูดซับและการเลือกดักจับภายใต้สภาวะที่ชื้น

ตัวอย่างวัสดุของแข็งที่ใช้เป็นตัวดูดซับ แสดงดัง ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างวัสดุของแข็งที่ใช้เป็นตัวดูดซับ^[28]

| ตัวดูดซับ | ชนิด | ความจุที่ 0.15 บาร์ (ร้อยละโดยมวล) |
|------------------|---------|------------------------------------|
| PEI-MIL-101 | Amine | 17.7 |
| mmen-Mg2(dobpdc) | Amine | 13.7 |
| Mg-MOF-74 | MOF | 20.6 |
| SIFSIX-3(Zn) | MOF | 10.7 |
| HKUST-1 | MOF | 11.6 |
| Ni-MOF-74 | MOF | 16.9 |
| Co-MOF-74 | MOF | 14.2 |
| mmen-CuBTtri | MOF | 9.5 |
| Zn(ox)(atz)2 | MOF | 8.3 |
| Zn-MOF-74 | MOF | 7.6 |
| CuTATB-60 | MOF | 5.8 |
| bio-MOF-11 | MOF | 5.4 |
| FeBTT | MOF | 5.3 |
| MOF-253-Cu(BF4) | MOF | 4.0 |
| ZIF-78 | MOF | 3.3 |
| NH2-MIL-53(Al) | MOF | 3.1 |
| CuBTtri | MOF | 2.9 |
| SNU-50 | MOF | 2.9 |
| en-CuBTtri | MOF | 2.3 |
| USO-2-Ni-A | MOF | 2.1 |
| MIL-53(Al) | MOF | 1.7 |
| MIL-47 | MOF | 1.1 |
| UMCM-150 | MOF | 1.8 |
| MOF-253 | MOF | 1.0 |
| ZIF-100 | MOF | 1.0 |
| MTV-MOF-EHI | MOF | 1.0 |
| ZIF-8 | MOF | 0.6 |
| IRMOF-3 | MOF | 0.6 |
| MOF-177 | MOF | 0.6 |
| UMCM-1 | MOF | 0.5 |
| MOF-5 | MOF | 0.5 |
| 13X | Zeolite | 15.3 |
| Ca-A | Zeolite | 18.5 |

2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Singh และคณะ^[29,30] ศึกษาผลความยาวสายโซ่ของเอมีนต่อความสามารถในการดักจับและอัตราการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการเพิ่มความยาวสายโซ่ระหว่างหมู่เอมีนกับหมู่ฟังก์ชันต่างๆในโครงสร้างของตัวดักจับมีผลให้อัตราการดักจับลดลง แต่กลับทำให้มีความสามารถในการดักจับเพิ่มขึ้น ศึกษาผลจากโซ่กิ่ง จำนวนหมู่ฟังก์ชันบนเอมีนโซ่ตรง และการแทนที่หมู่แอลคิลบนไดเอมีนแอโรแมติกต่อความสามารถในการดักจับและอัตราการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า การแทนที่โซ่กิ่งด้วยหมู่แอลคิลบนเอมีนที่ตำแหน่งแอลฟาคาร์บอนทำให้เกิดแรงกีดขวางเนื่องจากขนาดของโซ่กิ่ง ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซึมสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการแทนที่บนบีตาคาร์บอน การเพิ่มจำนวนหมู่ฟังก์ชันบนเอมีนทำให้ความสามารถในการดักจับสูงขึ้นซึ่งมากถึง 3.03 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อโมลเอมีนที่ใช้ และการแทนที่หมู่แอลคิลที่ตำแหน่ง 2 และ/หรือ 5 บนไดเอมีนอะโรมาติกทำให้ความเป็นต่างของสารประกอบเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการดักจับและความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

Liu และคณะ^[31] ศึกษาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบผันกลับได้ของตัวดักจับ SBA-15 ที่ผ่านการปรับปรุงด้วยไตรเอทาโนลามีนในแก๊สผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน พบว่า การปรับปรุง SBA-15 ด้วยไตรเอทาโนลามีนช่วยเพิ่มการเลือกจับคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าการเลือกจับแก๊สมีเทนมากถึง 7 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับ SBA-15 ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง โดยไตรเอทาโนลามีนไม่ได้เข้าไปเปลี่ยนโครงสร้างของตัวดักจับ SBA-15 แต่อย่างใด การปรับปรุงนี้ช่วยทำให้กระบวนการดักจับสามารถผันกลับได้ โดยเกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องโดยใช้แก๊สมีเทนบริสุทธิ์เป็นตัวนำพาหรือใช้ความดันสูญญากาศ การทำซ้ำระหว่างการดักจับและการผันกลับเป็นข้อยืนยันถึงเสถียรภาพและศักยภาพในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนของตัวดักจับนี้

Gray และคณะ^[20] ศึกษาประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดักจับของแข็งที่ตรึงด้วยเอมีนตติยภูมิ ซึ่งแตกต่างจากเอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิ กล่าวคือ อัตราส่วนในการเข้าทำปฏิกิริยาของเอมีนต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิ เท่ากับ 2:1 ในขณะที่อัตราส่วนในการเข้าทำปฏิกิริยาของเอมีนตติยภูมิอัตราส่วนเป็นเพียง 1:1 เท่านั้น โดยทดสอบตัวดักจับดังกล่าวพบว่า มีความสามารถในการเข้าทำปฏิกิริยาสูงถึง 3.0 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดักจับ ณ อุณหภูมิ 298 เคลวิน ซึ่งมีประสิทธิภาพเทียบได้กับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลาย และจากการทดสอบคุณลักษณะตัวดูดซับด้วยเทคนิค XPS และ TGA พบว่าตัวดักจับมีเสถียรภาพในการดักจับและการผันกลับ ณ อุณหภูมิช่วง 298-360 เคลวิน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ แก๊สและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 1) แมกนีเซียมทิวไนเตรตเฮกซะไฮเดรต หรือ Magnesium (II) nitrate hexahydrate ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 256.40 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท เมอร์ค (Merck)
- 2) อลูมิเนียมทริไนเตรตโนนาไฮเดรต หรือ Aluminium (III) nitrate nonahydrate ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 375.13 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท เมอร์ค (Merck)
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ Sodium hydroxide (NaOH) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 40.00 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท เอแจ็กซ์ ไฟน์เคมี จำกัด มหาชน (Ajax Finechem Pty. Ltd.)
- 4) โซเดียมคาร์บอเนต หรือ Sodium carbonate (Na_2CO_3) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 105.99 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท เอแจ็กซ์ ไฟน์เคมี จำกัด มหาชน (Ajax Finechem Pty. Ltd.)
- 5) เตตระเอทิลีนเพนตามีน (Tetraethylenepentamine) หรือ ทีอีพีเอ (TEPA) ($(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2)_2\text{NH}$) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 189.30 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท ซิกม่าอัลดริช จำกัด (Sigma-Aldrich Co. LLC.)
- 6) โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate) หรือ เอสดีเอส (SDS) ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 288.38 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท เอแจ็กซ์ ไฟน์เคมี จำกัด มหาชน (Ajax Finechem Pty. Ltd.)

3.1.2 แก๊สที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ในฮีเลียม (10% carbon dioxide (CO_2) in helium (He)) ผลิตโดยบริษัท แพร็กซ์แอร์ ประเทศไทย จำกัด (Praxair Thailand Co., Ltd.)
- 2) คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในฮีเลียม (30% carbon dioxide (CO_2) in helium (He)) ผลิตโดยบริษัท แพร็กซ์แอร์ ประเทศไทย จำกัด (Praxair Thailand Co., Ltd.)

3) ฮีเลียมบริสุทธิ์สูงพิเศษ (Ultra-high purity helium, He) ร้อยละความบริสุทธิ์ 99.999 ผลิตโดยบริษัท ไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (TIG Co., Ltd.)

4) ไฮโดรเจนบริสุทธิ์สูงพิเศษ (Ultra-high purity hydrogen, H₂) ร้อยละความบริสุทธิ์ 99.999 ผลิตโดยบริษัท ไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (TIG Co., Ltd.)

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1) อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส (Mass flow controller) ยี่ห้ออัลบร็อก (AALBROG) รุ่น GFC 1715

2) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ต่อเข้ากับตัววัดอุณหภูมิและเตาไฟฟ้าชนิดขดลวด (Temperature controller equipped with thermocouple and solenoid electric furnace)

3) มาตรวัดความดัน (Pressure gauge)

4) ท่อ ข้อต่อ และวาล์วเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316 (Stainless steel 316 tube, fitting, and valve) ยี่ห้อสเวลล็อก (Swagelok)

5) ท่อแก้วควอตซ์ (Quartz tubes) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1/4 นิ้ว และ 6 มิลลิเมตร

6) เทปใยแก้วความร้อน (Heating tab)

7) อุปกรณ์ดักจับน้ำ (Glass water trap)

8) เต้าไฟฟ้า (Electric oven)

9) เต้าเผาอากาศนิ่ง (Static air muffle furnace)

10) อุปกรณ์ปรับความดันแก๊ส (Regulator)

11) แก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatography, GC)

3.2 วิธีดำเนินการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ (Sorbent preparation)

3.2.1.1 ตัวรองรับไฮดรอลไซต์ (Hydrotalcite support)

เตรียมโลหะออกไซด์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วม เริ่มจากเตรียมสารละลายเกลือไนเตรตผสมของโลหะ ซึ่งประกอบด้วย แมกนีเซียมทูไนเตรตเฮกซะไฮเดรต ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และอลูมิเนียมทรีไนเตรตโนนาไฮเดรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ที่อัตราส่วนโมลาร์ของแมกนีเซียมต่ออลูมิเนียม (Mg/Al molar ratio) เท่ากับ 3 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำต่อเกลือไนเตรต (W/N ratio) เท่ากับ 4.50 เตรียมสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ที่

อัตราส่วนของคาร์บอเนตต่อผลรวมของอลูมิเนียมและแมกนีเซียม ($\text{CO}_3^{2-}/(\text{Al}+\text{Mg})$) เท่ากับ 0.67 อัตราส่วนของไฮดรอกไซด์ต่อผลรวมของอลูมิเนียมและแมกนีเซียม ($\text{OH}^-/(\text{Al}+\text{Mg})$) เท่ากับ 2.25 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำต่อไฮเดียมไฮดรอกไซด์ผสมไฮเดียมคาร์บอเนต (W/S ratio) เท่ากับ 8.32

นำสารละลายผสมของไฮเดียมไฮดรอกไซด์และไฮเดียมคาร์บอเนตไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียสและกวนอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) หยดสารละลายเกลือในเตรตผสมของโลหะอย่างช้าๆ ลงในสารละลายผสมของไฮเดียมไฮดรอกไซด์และไฮเดียมคาร์บอเนต ทำการควบคุมอุณหภูมิและกวนต่อไปโดยทิ้งไว้เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาดังกล่าวให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำตะกอนที่ได้มากรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนในปริมาณมาก

3.2.1.2 ตัวรองรับไฮโดรทัลไซต์ไลต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟต

เตรียมสารละลายไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตในเอทานอลที่อัตราส่วนของแห้งต่อของเหลว 1:2 และร้อยละโดยมวลของไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตต่อตัวดูดซับ (ไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตต่อผลรวมของไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตเตตระเอทิลีนเพนตามีนและตัวรองรับไฮโดรทัลไซต์ไลต์) ของเท่ากับ 1 ถึง 10 จากนั้นเติมตัวรองรับไฮโดรทัลไซต์ไลต์ในปริมาณตามร้อยละโดยมวลของไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตต่อตัวดูดซับ แล้วกวนผสมเป็นเวลา 30 นาทีที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที รอจนแห้งหมาดๆ เก็บไว้ในส่วนการตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีนต่อไป

3.2.1.3 ตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์ไลต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตและตัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน

นำไฮโดรทัลไซต์ไลต์ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่แห้งหมาดๆ มาเติมเอทานอล 15 มิลลิลิตร แล้วทำการกวนต่อเนื่องนาน 10 นาทีที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที จากนั้นเติมเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเตตระเอทิลีนเพนตามีน ต่อตัวดูดซับ (เตตระเอทิลีนเพนตามีนต่อผลรวมของไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟต เตตระเอทิลีนเพนตามีนและตัวรองรับไฮโดรทัลไซต์ไลต์) เท่ากับ 30 ถึง 50 แล้วทำการกวนผสมต่ออีกเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปอบแห้งที่ภายใต้ความดันบรรยากาศอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหนึ่งคืน

3.2.2 การทดสอบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

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

การดำเนินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะแห้ง บรรจุตัวดูดซับสังเคราะห์ 0.3 กรัมในคอลัมน์การดูดซับ ก่อนเริ่มทำการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะทำการให้ความร้อนเริ่มต้นเพื่อทำความสะอาดพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 110 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 30 นาที พร้อมกับผ่านแก๊สฮีเลียมเข้าสู่คอลัมน์การดูดซับที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิของระบบการดูดซับจนถึงระดับที่ต้องการ ที่อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนแก๊สเข้าจากแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สผสมซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์คู่ด้วยฮีเลียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 10-30 โดยปริมาตร เข้าสู่ระบบ ทำการตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกทุกๆ 2 นาทีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี สิ้นสุดการดูดซับที่ภาวะสมดุล โดยความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยของมิลลิโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ ($\text{mmol CO}_2 / \text{g sorbent}$) กระทำโดยใช้การอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟของเส้นโค้งทะลุผ่าน (Breakthrough curves) กับเส้นของความเข้มข้นเริ่มต้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

3.2.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ (Design of experiments and statistical analysis)

เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดในด้วยการออกแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง (FCCCD-RSM) การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบสองระดับหรือ Full four-level factorial design (สี่ปัจจัยและสองระดับ) ที่มีสามจุดกลางได้ดำเนินการในส่วนแรก (แบบสุ่มโดยสมบูรณ์ของการทำงาน) เพื่อประเมินอิทธิพลของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อ

เปลี่ยนแปลงปัจจัยหนึ่งที่อยู่ในระดับของปัจจัยอื่นๆ สี่ปัจจัยที่เป็นอิสระ ได้แก่ ปริมาณเอมีนในตัวดูดซับ อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่ออัตราเร็วสายป้อน อุณหภูมิในการดักจับ และความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ในหน่วยวัดเดิมจะถูกเข้ารหัสในตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless variables) ซึ่งในแต่ละปัจจัยจะนำเสนอเป็นระดับต่ำ (-1), จุดกลาง (0) และระดับสูง (+1) และกำหนดให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ใช้เป็นผลตอบสนอง (Responses) ปัจจัยอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองจะถูกจำกัดไว้ ได้แก่ ความดันในระบบ ณ ความดันบรรยากาศ และสภาวะการดูดซับในสภาวะแห้ง การทดสอบทั้งหมดได้ดำเนินการทดสอบซ้ำสามซ้ำและข้อมูลที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของทั้งสาม

ในส่วนที่สองถัดมาเป็นการออกแบบพื้นที่ผิวตอบสนอง FCCCD-RSM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ขนาดของความแตกต่างในผลการทดลองที่ได้จากผลการประเมินถูกใช้ในการสะท้อนให้เห็นถึงความถูกต้องของแบบจำลองและรายงานผลในรูปแบบของร้อยละความผิดพลาด (Percentage error)

การทดสอบทั้งหมดได้ดำเนินการทำซ้ำสามซ้ำและข้อมูลเฉลี่ยวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปดีไซด์เอ็กซ์เพิร์ต 7.0 (Design-Expert 7.0 software package, Stat Ease Inc. Minneapolis, USA) รวมทั้งการวิเคราะห์ความแปรปรวนหรือ Analysis of variance (ANOVA) ร้อยละความผันแปร (Percentage of contribution) แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) ของผลกระทบมาตรฐานสัมบูรณ์ (Absolute standardized effects) และแผนภูมิส่วนตกค้าง (Residual plot) ผลกระทบของแต่ละปัจจัยที่ทดสอบโดยใช้การทดสอบแบบสตูเดนต์ (Student test) ที่สอดคล้องกับค่า P-value ปัจจัยที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ได้รับการพิจารณาให้เป็น “นัยสำคัญทางสถิติ”

3.2.4 การทดสอบความสามารถในการเลือกดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การดำเนินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะแห้ง บรรจุตัวดูดซับสังเคราะห์ 0.3 กรัมในคอลัมน์การดูดซับ ก่อนเริ่มทำการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะทำการให้ความร้อนเริ่มต้นเพื่อทำความสะอาดพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 110 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 30 นาที พร้อมกับผ่านแก๊สฮีเลียมเข้าสู่คอลัมน์การดูดซับที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิของระบบการดูดซับจนถึงระดับที่ต้องการ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนแก๊สขาเข้าจากแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สผสมซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์คู่ด้วยไฮโดรเจนที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร เข้าสู่ระบบ ทำการ

ตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขาออกทุกๆ 2 นาทีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ สิ้นสุดการดูดซับที่ภาวะสมดุล โดยความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า และคำนวณหาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยของมิลลิโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ ($\text{mmol CO}_2 / \text{g sorbent}$)

3.2.5 การทดสอบความคงทนของตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การดำเนินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะแห้ง บรรจุตัวดูดซับสังเคราะห์ 0.3 กรัมในคอลัมน์การดูดซับ ก่อนเริ่มทำการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะทำการให้ความร้อนเริ่มต้นเพื่อทำความสะอาดพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 110 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 30 นาที พร้อมกับผ่านแก๊สฮีเลียมเข้าสู่คอลัมน์การดูดซับที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิของระบบการดูดซับจนถึงระดับที่ต้องการ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนแก๊สขาเข้าจากแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สผสมซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์คู่ด้วยฮีเลียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยปริมาตร เข้าสู่ระบบ ทำการตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกทุกๆ 2 นาทีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ สิ้นสุดการดูดซับที่ภาวะสมดุล โดยความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยของมิลลิโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ ($\text{mmol CO}_2 / \text{g sorbent}$)

การดำเนินการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปิดการป้อนแก๊สทุกชนิดและทำการเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 110 องศาเซลเซียส จากนั้นป้อนแก๊สฮีเลียมที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกทุกๆ 2 นาทีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ จนสิ้นสุดการคายซับที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เป็นศูนย์ และคำนวณหาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยของมิลลิโมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ ($\text{mmol CO}_2 / \text{g sorbent}$)

ดำเนินการทดลองซ้ำในส่วนการดูดซับ/คายซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัฏจักรจนครบ 6 รอบ

3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะตัวดูดซับ

การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยไซติยมโดเดซิลซัลเฟตและดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน ประกอบด้วย

- หาหมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)
- หาปริมาณเอมีนในตัวดูดซับด้วยซีเอชเอ็นอนาไลเซอร์ (CHN analyzer)
- ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)
- หาพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนด้วยเทคนิคบีอีที (The Brunauer-Emmet-Teller, BET)

บทที่ 4

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

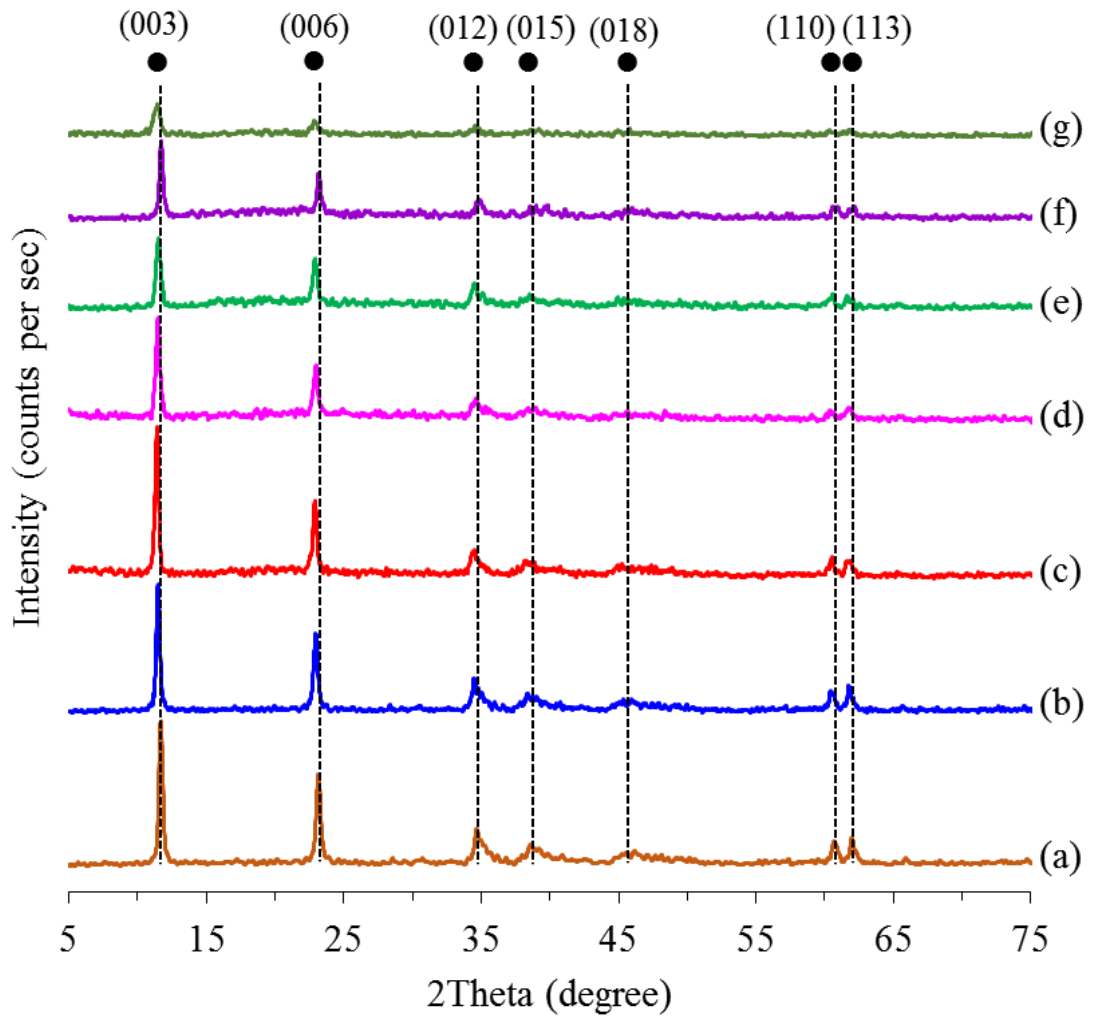
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ (Sorbent characterization)

4.1.1 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)

จากการวิเคราะห์รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล และตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณร้อยละโดยมวลของเตตระเอทิลีนเพนตะมีนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.1

เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (รูปที่ 4.1a) พบว่า พีคของไฮโดรทาลไซต์ (Hydrotalcite) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนหรือ 2 Theta เท่ากับ 11.64 23.22 34.48 39.28 46.38 60.88 และ 62.08 องศา ตามลำดับ โดยมีระนาบผลึกเป็น (003) (006) (012) (015) (018) (110) และ (113) ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (รูปที่ 4.1b) พบว่า พีคของไฮโดรทาลไซต์ (Hydrotalcite) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนหรือ 2 Theta เท่ากับ 11.44 23.02 33.44 38.36 46.18 60.40 และ 61.72 องศา ตามลำดับ โดยมีระนาบผลึกเป็น (003) (006) (012) (015) (018) (110) และ (113) ตามลำดับ ซึ่งมีการเลื่อนของตำแหน่งพีคไปในทิศทางองศาการเลี้ยวเบนที่น้อยลงในทุกๆ พีคที่ปรากฏเมื่อพิจารณาเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (รูปที่ 4.1a) แสดงว่า เกิดการแทนที่ของแอนไอออนคาร์บอนเนตด้วยโคเดซิลซัลเฟตระหว่างชั้นของบลูไซต์ในไฮโดรทาลไซต์



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับ โดยที่ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (b) ไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (e) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (f) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (g) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคโคซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล

เมื่อทำการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณร้อยละของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน เท่ากับ 30 40 และ 50 โดยมวล (รูปที่ 4.1c-4.1e) พบว่า ความสูงของพีคไฮโดรทาลไซต์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนตัวดูดซับ เนื่องจากปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการบดบังไฮโดรทาลไซต์มากขึ้น และไม่มีการเลื่อนของตำแหน่งพีคในทุกๆ พีคที่ปรากฏ แสดงว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกเนื่องจากการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

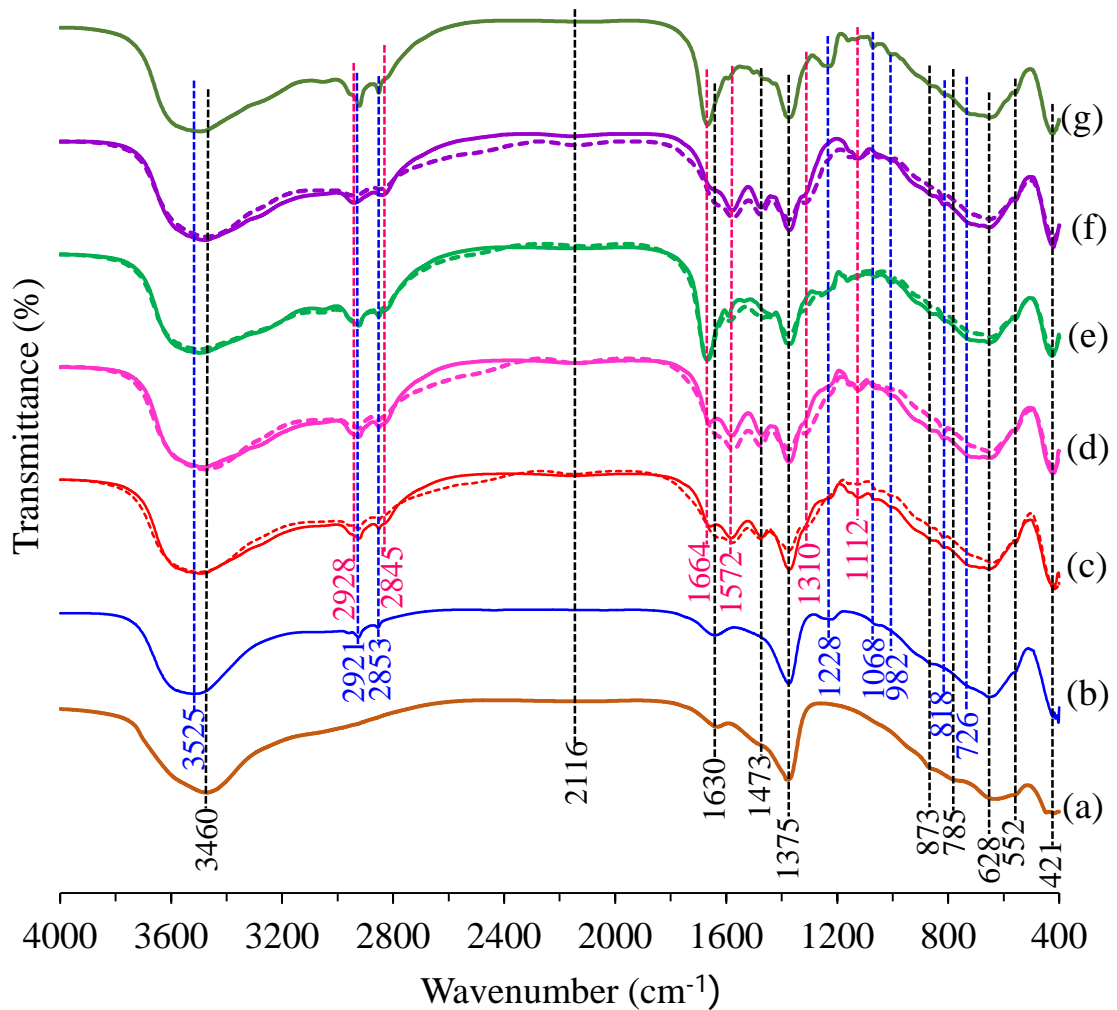
เมื่อพิจารณาที่เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (รูปที่ 4.1f) เทียบกับไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (รูปที่ 4.1a) พบว่า ความสูงของพีคไฮโดรทาลไซต์ลดลงเมื่อเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง เนื่องจากเตตระเอทิลีนเพนตะมีนเข้าไปบดบังพื้นผิวของไฮโดรทาลไซต์ และไม่มีการเลื่อนของตำแหน่งพีคไฮโดรทาลไซต์ในทุกๆ พีคที่ปรากฏ แสดงว่า การเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกของไฮโดรทาลไซต์ และเมื่อเพิ่มปริมาณของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตจากร้อยละ 5 เป็น 10 โดยมวล ในตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต พบว่า การเพิ่มปริมาณของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตทำให้ความสูงของพีคไฮโดรทาลไซต์ลดลง เนื่องจากปริมาณโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้เกิดการบดบังไฮโดรทาลไซต์มากขึ้น และไม่มีการเลื่อนของตำแหน่งพีคในทุกๆ พีคที่ปรากฏ แสดงว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกเนื่องจากการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

การเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนตัวดูดซับ จากร้อยละ 30 โดยมวล (รูปที่ 4.1b) ไปเป็น ร้อยละ 40 และ 50 โดยมวล ตามลำดับ (รูปที่ 4.1c-4.1d) พบว่า ความสูงของพีคทั้งแอลฟาอะลูมิเนียมออกไซด์และเพอร์เคลสของแมกนีเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ลดต่ำลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ซึ่งกล่าวได้ว่าการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงในไฮโดรทาลไซต์ และการเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนตัวดูดซับมีส่วนทำให้เกิดการบดบังอนุภาคผลึกของทั้งสององค์ประกอบมากยิ่งขึ้น จากตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า ไม่มีการเลื่อนของตำแหน่งพีคในทุกๆ พีคที่ปรากฏ เมื่อเทียบกับไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (รูปที่ 4.1b) แสดงว่า ไม่เกิดการแทนที่เพิ่มเติมของแอนไอออนคาร์บอเนตด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีนระหว่างชั้นภายในโครงสร้างไฮโดรทาลไซต์

4.1.2 เทคนิคฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)

รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยมวล แสดงในรูปที่ 4.2

เมื่อพิจารณาการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ดังแสดงในรูปที่ 4.2a (เส้นที่บ) พบว่า พบพีคการดูดกลืนที่ 3460 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหด (O-H stretching vibration) ของโมเลกุลน้ำที่ผิวและระหว่างชั้นบลูไซต์ของไฮโดรทาลไซต์ การดูดกลืนที่ 1630 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอ (HOH bending vibration) ของโมเลกุลน้ำระหว่างชั้น^[39] การดูดกลืนที่ 1476 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของคาร์บอเนตแอนไอออน^[40] การดูดกลืนที่ 1383 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบสมดุลดต่ำกว่า (Lowering of the symmetry) ของคาร์บอเนตแอนไอออน จากระนาบ D_{3h} ไประนาบ C_{2v} และการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอของคาร์บอเนตแอนไอออน ที่ 870 เซนติเมตร⁻¹ การดูดกลืนเนื่องจากการสั่นของ Al-O or Mg-Al-O ในชั้นบลูไซต์ไลต์ที่ 785 เซนติเมตร⁻¹^[41] นอกจากนี้การดูดกลืนที่ 628 552 และ 421 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอของคาร์บอเนต การสั่นแบบยืดหดและแบบงอของ M-O M-O-M และ O-M-O และการสั่นของ Mg-OH Al-OH และ Zn-OH จากโครงสร้างออกตะฮีดรอลของไฮโดรทาลไซต์ ตามลำดับ ซึ่งการดูดกลืนที่สองพีคสุดท้ายเป็นเอกลักษณ์ของชั้นบลูไซต์ไลต์



รูปที่ 4.2 รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดด้วยเทคนิคเอฟทีไออาร์ของ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (b) ไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (e) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (f) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (g) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล (เส้นทึบ หมายถึง ตัวดูดซับก่อนใช้ในการดูดซับ และ เส้นประ หมายถึง ตัวดูดซับหลังผ่านการดูดซับแล้ว)

เมื่อพิจารณาการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ดังแสดงในรูปที่ 4.2b (เส้นทึบ) พบว่า พบพบพีคการดูดกลืนที่ 3525 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหด (O-H stretching vibration) ของโมเลกุลน้ำที่ผิวของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต พีคการดูดกลืนที่ 2928 และ 2853 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ -CH₃ แบบสมมาตรและไม่สมมาตร (Asymmetric and symmetric stretching) ของส่วนหาง (tail) ไฮโดรคาร์บอนของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ตามลำดับ[42-45] การดูดกลืนที่ 2921 และ 2845 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ -CH₂- แบบสมมาตรและไม่สมมาตรของส่วนหางไฮโดรคาร์บอนของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ตามลำดับ การดูดกลืนที่ 1473 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอของ -CH₂- (Bending vibration) ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต และ ที่ 1375 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบผิดรูปของ -CH₃ (Deformation vibration) ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต การดูดกลืนที่ 1228 และ 1068 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ -OSO₃⁻ แบบไม่สมมาตรและสมมาตร (Asymmetric and symmetric stretching bands) ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ตามลำดับ การดูดกลืนที่ 982 818 และ 726 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ C-S-O และ S-O แบบสมมาตร การสั่นแบบยืดหดของ O-S-O แบบไม่สมมาตรและ S-O แบบสมมาตร และการสั่นแบบโยก (Rocking) ของ -CH₂- ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยมวล ดังแสดงในรูปที่ 4.2c-4.2e (เส้นทึบ) ตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง และ ตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 40 โดยมวล แสดงในรูปที่ 4.2f และ 4.2g (เส้นทึบ) พบว่า พบพีคการดูดกลืนของเตตระเอทิลีนเพนตะมีนปรากฏขึ้น^[46] คือ การดูดกลืนที่ 3345 และ 3270 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ N-H แบบไม่สมมาตรและสมมาตรของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ตามลำดับ การดูดกลืนที่ 2928 และ 2845 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ C-H แบบไม่สมมาตรและ N-CH₂ ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ตามลำดับ การดูดกลืนที่ 1664 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ ring skeleton ของการเกิดเป็นวงระหว่างเตตระเอทิลีนเพนตะมีน การดูดกลืนที่ 1572

เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอเข้า (Scissoring) ของ N-H ที่ตำแหน่ง NH₂ ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน การดูดกลืนที่ 1310 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบเบนจากระนาบ (Wagging) ของ C-H ที่ตำแหน่ง CH₂ ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน และการดูดกลืนที่ 1112 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ C-N ที่ตำแหน่ง R-N ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน

เมื่อพิจารณาตัวดูดซับหลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยไซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยมวล และตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 40 โดยมวล แสดงในรูปที่ 4.2c-4.2f (เส้นประ) พบว่า ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของพีคการดูดกลืนของโมเลกุลน้ำที่ผิวและระหว่างชั้นบลูไซต์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ 3460 เซนติเมตร⁻¹ และพีคการสั่นแบบยืดหดของ C-O ของไบคาร์บอเนต (Bicarbonate แสดงว่า ไม่มีน้ำโมเลกุลทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นไบคาร์บอเนต แต่พบการเพิ่มความสูงของพีคการดูดกลืนในช่วง 1200-1600 เซนติเมตร⁻¹ เมื่อเทียบกับตัวดูดซับก่อนการดูดซับ เนื่องจากมีคาร์บาเมตเกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พีคการสั่นแบบยืดหดของ CO₂⁻ แบบสมมาตร การสั่นแบบยืดหดผิดรูปของ NH₃⁺ แบบสมมาตร และการสั่นแบบยืดหดของ CO₂⁻ แบบไม่สมมาตรของคาร์บาเมตตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของคาร์บาเมตและไบคาร์บอเนตบนตัวดูดซับ

| Wavenumber (cm-1) | Assignment | Reference |
|-------------------|--|-----------|
| 1310 | symmetric CO ₂ ⁻ stretching | [47-49] |
| 1473 | symmetric NH ₃ ⁺ deformation | [48-50] |
| 1572 | asymmetric CO ₂ ⁻ stretching | [43,50] |
| 1664 | NH ₃ ⁺ deformation | [48] |
| | symmetric C-O stretching of bicarbonate | [51] |

4.1.3 เทคนิคการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน (CHN analyzer)

จากการวิเคราะห์หาร้อยละองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน เพื่อตรวจสอบปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับด้วยเทคนิค CHN analysis พบว่า ตัวดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้เริ่มต้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตัวดูดซับที่เตรียมมีปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับตามจริง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

4.1.4 เทคนิคบีอีที (The Brunauer-Emmet-Teller, BET)

ตารางที่ 4.2 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน จากผลการวิเคราะห์ พบว่า ก่อนการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์นั้น ไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (HT) มีพื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน เท่ากับ 30.8 ตารางเมตรต่อกรัม 0.142 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 111.2 อังสตรอม ตามลำดับ และเมื่อเติมโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (5%SDS/HT) เท่ากับ 67.9 ตารางเมตรต่อกรัม 0.189 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 94.4 อังสตรอม ตามลำดับ

เมื่อเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนร้อยละ 30 40 และ 50 โดยมวล พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ลดลงเป็น 9.1 ตารางเมตรต่อกรัม 0.012 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 80.6 อังสตรอม ตามลำดับ สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง 12.5 ตารางเมตรต่อกรัม 0.022 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 64.6 อังสตรอม ตามลำดับ สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง และ 1.4 ตารางเมตรต่อกรัม 0.003 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 40.9 อังสตรอม ตามลำดับ สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง จะเห็นได้ว่า การเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์และการเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนมีค่าลดลง และ

ตารางที่ 4.2 ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

| ตัวดูดซับ | ปริมาณ TEPA ^a (ร้อยละโดยมวล) | S _{BET} ^b (ตารางเมตร ต่อกรัม) | V _p ^b (ลูกบาศก์ เซนติเมตร ต่อกรัม) | D _p ^b (อังสตรอม) |
|---|--|---|---|---|
| ไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (HT) | - | 30.8 | 0.142 | 111.2 |
| ไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิล | - | 67.9 | 0.189 | 94.4 |
| ซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (5%SDS/HT) | | | | |
| TEPA ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (30%TEPA/HT) | 28.2 | 9.1 | 0.012 | 80.6 |
| TEPA ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (30%TEPA-5%SDS/HT) | 28.4 | 26.6 | 0.060 | 70.8 |
| TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (40%TEPA/HT) | 38.8 | 12.5 | 0.022 | 64.6 |
| TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (40%TEPA-5%SDS/HT) | 39.1 | 40.7 | 0.117 | 87.6 |
| TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล (40%TEPA-10%SDS/HT) | 38.9 | 0.6 | n.d. ^c | n.d. ^c |
| TEPA ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง (50%TEPA/HT) | 49.6 | 1.4 | 0.003 | 40.9 |
| TEPA ร้อยละ 50 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (50%TEPA-5%SDS/HT) | 49.7 | 5.7 | 0.006 | 66.9 |

^a ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN analyzer

^b S_{BET}, V_p และ D_p คือ พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ตามลำดับ

^c ไม่สามารถตรวจวัดได้

เมื่อพิจารณาที่ตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 30 40 และ 50 โดยมวล พบว่า ตัวดูดซับดังกล่าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะปอร์ที่ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน มากกว่าตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุง ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนที่เท่ากัน การเพิ่มปริมาณโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตเป็นร้อยละ 10 โดยมวล สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 10 โดยมวล (40%TEPA-10%SDS/HT) พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะปอร์ที่ ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนลดลงเมื่อเทียบกับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล (40%TEPA-5%SDS/HT)

4.2 การออกแบบการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียล (2^4 factorial design)

การออกแบบการทดลอง จะใช้ 2^4 แฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียม **ตารางที่ 4.3** แสดงเมทริกซ์ของสัจปัจจัยในรูปค่าที่เข้ารหัสและผลตอบสนองที่ผ่านการออกแบบการทดลองด้วย 2^4 แฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (Full 2^4 factorial design) โดยมีการเพิ่มจุดกลางเข้าไปสามจุด เพื่อตรวจสอบความมีส่วนโค้งของโมเดลที่ออกแบบ ข้อมูลจะผ่านการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับผลกระทบมาตรฐาน (Standardized effect) ของปัจจัยและอันตรกิริยาของตัวแปร รวมถึงค่าเอฟ (F-value) และค่าพี (P-value) ของผลกระทบในโมเดลการออกแบบที่ได้ ซึ่งค่าค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียลจะแสดงใน **ตารางที่ 4.4**

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรการทดลองที่ถูกเข้ารหัสสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล โดยทดลอง 16 การทดลองและเพิ่ม 4 จุดกึ่งกลาง

| ลำดับมาตรฐาน | ลำดับทดลอง | A ปริมาณ TEPA ใน ตัวดูดซับ (ร้อยละโดยมวล) | B ปริมาณ SDS ในตัว ดูดซับ (ร้อยละโดยมวล) | C อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส) | D ความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดย ปริมาตร) | ค่าความสามารถ ในการดูดซับ (มิลลิโมลต่อ กรัม) |
|--------------|------------|--|---|-------------------------------------|--|---|
| 1 | 25 | -1 | -1 | -1 | -1 | 2.085 |
| 2 | 28 | 1 | -1 | -1 | -1 | 0.905 |
| 3 | 1 | -1 | +1 | -1 | -1 | 1.041 |
| 4 | 24 | 1 | +1 | -1 | -1 | 5.674 |
| 5 | 11 | -1 | -1 | +1 | -1 | 2.723 |
| 6 | 6 | 1 | -1 | +1 | -1 | 1.475 |
| 7 | 27 | -1 | +1 | +1 | -1 | 2.008 |
| 8 | 13 | +1 | +1 | +1 | -1 | 2.109 |
| 9 | 10 | -1 | -1 | -1 | +1 | 4.150 |
| 10 | 26 | +1 | -1 | -1 | +1 | 2.964 |
| 11 | 19 | -1 | 1 | -1 | +1 | 3.067 |
| 12 | 15 | 1 | 1 | -1 | +1 | 3.977 |
| 13 | 21 | -1 | -1 | 1 | +1 | 5.053 |
| 14 | 2 | 1 | -1 | 1 | +1 | 3.613 |
| 15 | 9 | -1 | 1 | 1 | +1 | 4.026 |
| 16 | 3 | 1 | 1 | 1 | +1 | 5.672 |
| 17 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.815 |
| 18 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.846 |
| 19 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.919 |
| 20 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.924 |

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล

| ตัวแปร | ค่าเข้ารหัส (Coded values) | | | หน่วย |
|--------------------------------|----------------------------|---------|--------|------------------|
| | ค่าสูง | ค่ากลาง | ค่าต่ำ | |
| | (+1) | (0) | (-1) | |
| A: ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ | 30 | 40 | 50 | ร้อยละโดยมวล |
| B: ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ | 0 | 5 | 10 | ร้อยละโดยมวล |
| C: อุณหภูมิการดูดซับ | 60 | 80 | 100 | องศาเซลเซียส |
| D: ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ | 10 | 20 | 30 | ร้อยละโดยปริมาตร |

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พิจารณาจากการทดสอบค่าเอฟของฟิชเชอร์ (Fisher's F-test) และค่าความน่าจะเป็นของตัวแปรหลักทั้งสี่ ซึ่งได้แก่ (1) ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ หรือตัวแปร A (2) อุณหภูมิ หรือตัวแปร B (3) อัตราส่วน W/F หรือตัวแปร C และ (4) ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือตัวแปร D และอันตรกิริยาของตัวแปร โดยสรุปไว้ในตารางที่ 4.5 จากค่า R^2 ที่บ่งบอกถึงค่าที่เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการทำนาย มีค่าเท่ากับ 0.9997 และค่า Adj. R^2 (มีค่าเท่ากับ 0.9985) มีค่าใกล้เคียงกันกับค่า R^2 ซึ่งบ่งบอกว่าไม่มีปัจจัยหรืออันตรกิริยาที่ไม่มีความสำคัญรวมอยู่ในโมเดล มีการกระจายของข้อมูลระหว่างค่ากลาง (Mean) ร้อยละ 1.64 เมื่อพิจารณาจากค่า C.V. % และค่า Adeq. Precision มีค่ามากกว่า 4 แสดงว่าโมเดลมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะทำนายค่าความสามารถในการดูดซับ ซึ่งเป็นค่าผลตอบสนอง

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของเทอมที่มีความสำคัญสำหรับการ
ออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล

| Source ^a | Sum of Squares | DF | Mean Square | F-value | P-value ^b | Percent Contribution |
|---------------------|----------------|-----------------|-------------|---------|----------------------|----------------------|
| Model | 35.06 | 15 | 2.34 | 798.52 | < 0.0001 | |
| A | 0.31 | 1 | 0.31 | 106.70 | 0.0019 | 0.85 |
| B | 1.33 | 1 | 1.33 | 453.08 | 0.0002 | 3.61 |
| C | 0.50 | 1 | 0.50 | 169.42 | 0.0010 | 1.35 |
| D | 13.15 | 1 | 13.15 | 4491.25 | < 0.0001 | 35.81 |
| AB | 9.53 | 1 | 9.53 | 3254.34 | < 0.0001 | 25.95 |
| AC | 1.06 | 1 | 1.06 | 362.23 | 0.0003 | 2.89 |
| AD | 0.35 | 1 | 0.35 | 120.52 | 0.0016 | 0.96 |
| BC | 0.46 | 1 | 0.46 | 155.82 | 0.0011 | 1.24 |
| BD | 0.45 | 1 | 0.45 | 153.74 | 0.0011 | 1.23 |
| CD | 1.96 | 1 | 1.96 | 668.40 | 0.0001 | 5.33 |
| ABC | 0.75 | 1 | 0.75 | 257.57 | 0.0005 | 2.05 |
| ABD | 0.25 | 1 | 0.25 | 83.73 | 0.0028 | 0.67 |
| ACD | 1.61 | 1 | 1.61 | 551.53 | 0.0002 | 4.40 |
| BCD | 1.51 | 1 | 1.51 | 514.50 | 0.0002 | 4.10 |
| ABCD | 1.86 | 1 | 1.86 | 634.96 | 0.0001 | 5.06 |
| Curvature | 1.64 | 1 | 1.64 | 561.74 | 0.0002 | 4.48 |
| Pure Error | 0.009 | 3 | 0.003 | | | 0.02 |
| Total | 36.71 | 19 | | | | |
| R ² | 0.9997 | C.V. % | | 1.64 | | |
| Adj. R ² | 0.9985 | Adeq. Precision | | 95.609 | | |

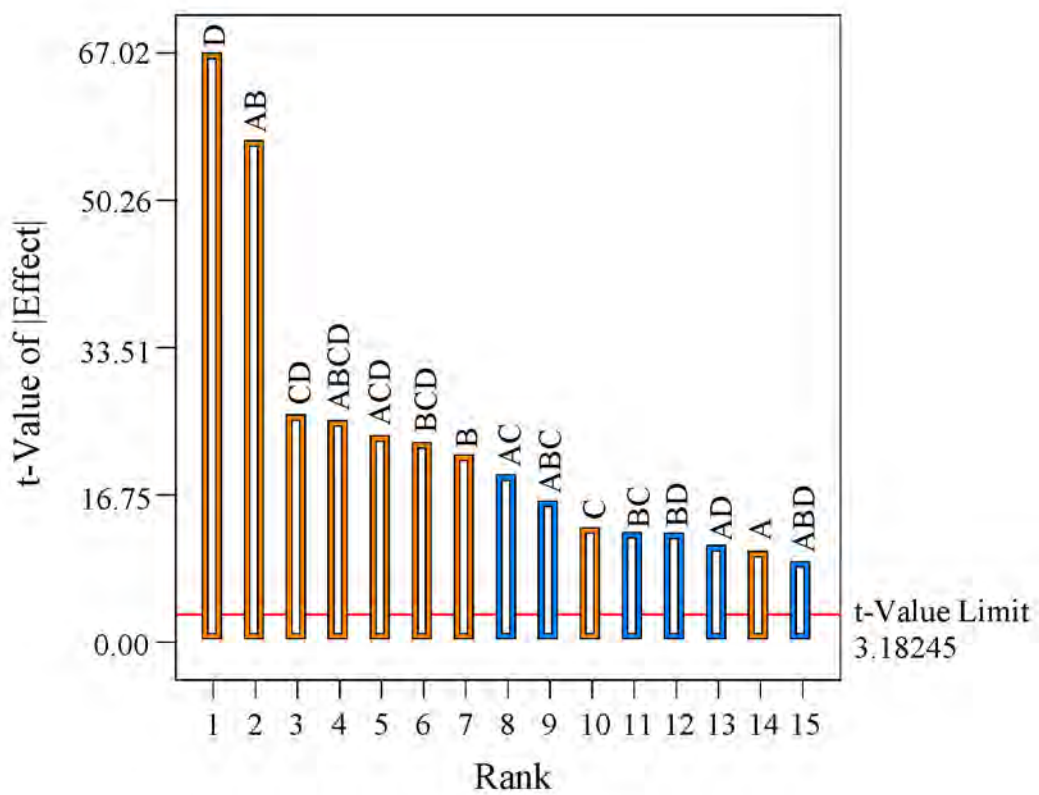
^a The A, B, C and D factors refer to TEPA loading, SDS loading, adsorption temperature and CO₂ concentration, respectively.

^b P-value is based on the 95 percent confidence interval.

ความสำคัญของแต่ละปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในเทอมของร้อยละความผันแปร (Percent Contribution) ของแต่ละปัจจัย (แสดงในตารางที่ 4.5) โดยเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ D (ร้อยละ 35.81) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและปริมาณ SDS ในตัวดูดซับหรือผลกระทบ AB (ร้อยละ 25.95) อันตรกิริยาของอุณหภูมิการดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ CD (ร้อยละ 5.33) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ อุณหภูมิการดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ ABCD (ร้อยละ 5.06) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ อุณหภูมิการดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ ACD (ร้อยละ 4.40) อันตรกิริยาของปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ อุณหภูมิการดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ BCD (ร้อยละ 4.10) ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับหรือผลกระทบ B (ร้อยละ 3.61) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและอุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ AC (ร้อยละ 2.89) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับและอุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ ABC (ร้อยละ 2.05) อุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ C (ร้อยละ 1.35) อันตรกิริยาของปริมาณ SDS ในตัวดูดซับและอุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ BC (ร้อยละ 1.24) อันตรกิริยาของปริมาณ SDS ในตัวดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ BD (ร้อยละ 1.24) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ AD (ร้อยละ 0.96) ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับหรือผลกระทบ A (ร้อยละ 0.85) และอันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ ABD (ร้อยละ 0.67) ตามลำดับ ซึ่งค่าที่อยู่ในวงเล็บ คือ ค่าร้อยละความผันแปร และค่าร้อยละความผันแปรของควมมีส่วนโค้งหรือ Curvature เท่ากับ 4.48 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ค่า P -value ของ Curvature พบว่า มีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งทำให้ทราบว่า สมการเส้นตรงไม่เพียงพอต่อการทำนายผลตอบสนองอย่างค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

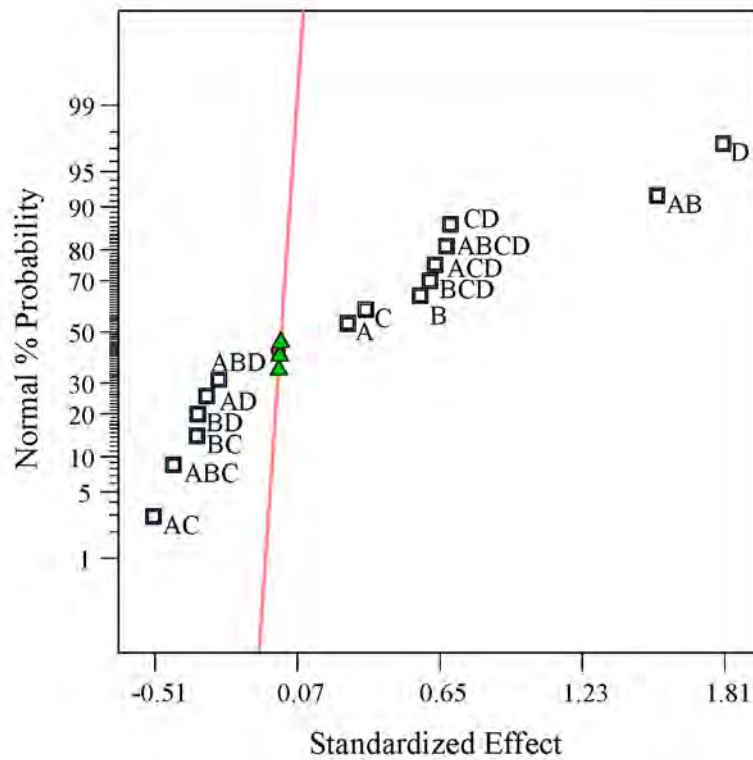
การประเมินระดับความสำคัญของตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองจะแสดงด้วยแผนภูมิพาเรโต รูปที่ 4.3 แสดงแผนภูมิพาเรโตที่พล็อตระหว่างตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรกับค่า t -value ของผลกระทบสัมบูรณ์ ซึ่งค่า t -value ได้มาจากการหารผลกระทบเชิงตัวเลข (Numerical effect) ด้วยค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard error) ที่เกี่ยวข้อง และความสูงของแต่ละแถบในแนวตั้ง ในรูปที่ 4.3 เป็นค่าของ t -value โดย

ผลกระทบหรือตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรที่มีค่า t-value สูงกว่าค่าจำกัด t-value (t-value limit) ที่ค่า 3.18245 แสดงว่าผลกระทบนั้นมีส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ความสูงของแถบยังบ่งบอกถึงระดับความสำคัญของตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนอง ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เรียงจากซ้ายไปขวา ตามลำดับ โดยแถบสีส้มและแถบสีฟ้าแสดงถึงผลกระทบในเชิงบวกและผลกระทบในเชิงลบ ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.4

พล็อตความน่าจะเป็นปกติของผลกระทบเพื่อประเมินความสำคัญของแต่ละตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปร แสดงในรูปที่ 4.4 จากรูปจะเห็นได้ว่าไม่มีตัวแปรใดที่อยู่ในแนวเส้นตรงซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลกระทบทุกตัวมีแนวโน้มความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลกระทบที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญจะเบนออกนอกแนวเส้นตรงและผลกระทบใดมีแนวโน้มที่จะเบนออกนอกเส้นมาก ยิ่งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองมากเช่นกัน ดังนั้นตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ D AB CD ABCD ACD BCD B AC ABC C BC BD AD A และ ABD ซึ่งรายละเอียดตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรแสดงในตารางที่ 4.4

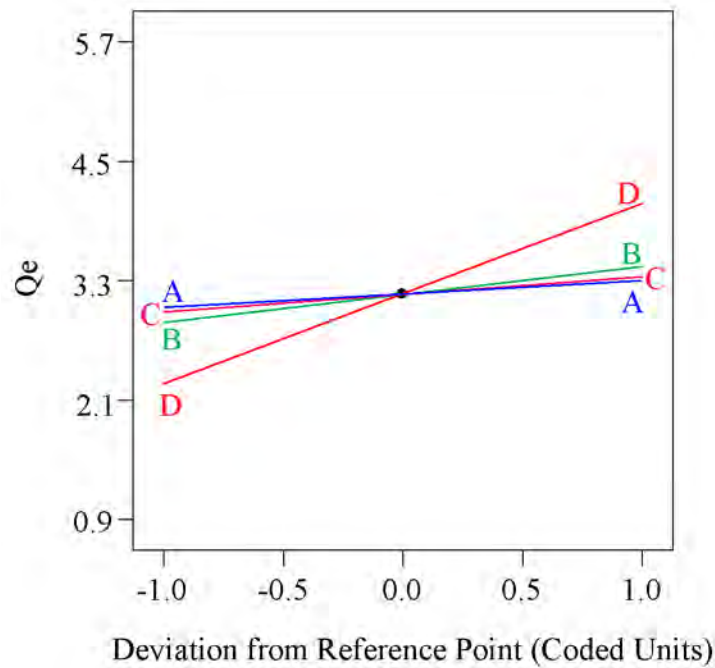


รูปที่ 4.4 พล็อตความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability plot) ของตัวแปร 4 ตัวแปร (ตัวแปร A–D) และอันตรกิริยาของตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.4

ตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่เบนออกจากเส้นตรงที่มีค่าความน่าจะเป็นปกติ น้อยกว่า ร้อยละ 50 ได้แก่ AC ABC BC BD AD และ ABD ส่งผลต่อผลตอบสนอง (หรือค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์) ในเชิงลบ (Negative effects) ในขณะที่ตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่เบนออกจากเส้นตรงที่มีค่าความน่าจะเป็นปกติ มากกว่า ร้อยละ 50 ได้แก่ D AB CD ABCD ACD BCD B C และ A ส่งผลต่อผลตอบสนองในเชิงบวก (Positive effects) โดยข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนผลการทดลองและผลทางทฤษฎี ดังแสดงในแผนภูมิพาเรโตและการวิเคราะห์ความแปรปรวน (แสดงในรูปที่ 4.3 และตารางที่ 4.5)

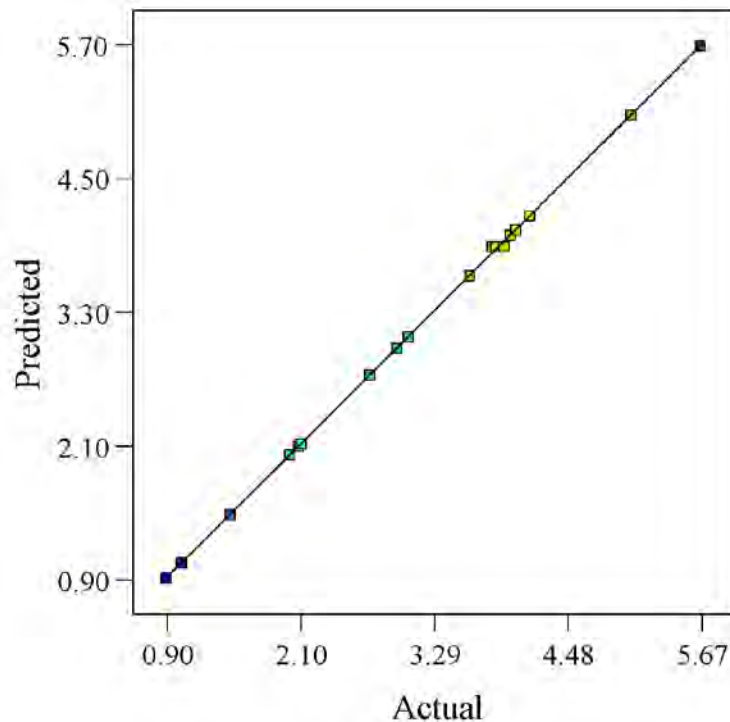
รูปที่ 4.5 แสดงพล็อตเพอร์เทอร์เบชันของตัวแปรหลัก 4 ตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งเป็นการรวมพล็อตหนึ่งตัวแปร (One factor plots) เข้าด้วยกัน พบว่า (1) สำหรับปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับหรือตัวแปร A ที่ร้อยละ 30 โดยมวล มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 3.02 มิลลิโมลต่อกรัม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.30 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับร้อยละ 50 โดยมวล (2) สำหรับปริมาณ SDS ในตัวดูดซับหรือตัวแปร B ที่ร้อยละ 0 โดยมวล มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 2.87 มิลลิโมลต่อกรัม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.45 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับร้อยละ 60 โดยมวล (3) สำหรับอุณหภูมิการดูดซับหรือตัวแปร C ที่ 60 องศาเซลเซียส มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 2.98 มิลลิโมลต่อกรัม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 3.34 มิลลิโมลต่อกรัม ที่อุณหภูมิการดูดซับ 100 องศาเซลเซียส และ (4) สำหรับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์หรือตัวแปร D ที่ร้อยละ 10 โดยปริมาตร มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ 2.25 มิลลิโมลต่อกรัม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.06 มิลลิโมลต่อกรัม ที่ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับร้อยละ 30 โดยปริมาตร

จากการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเพิ่มระดับปัจจัยจากระดับต่ำ (Low level) ไปเป็นระดับสูง (High level) พบว่า ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับต่ำเทียบเคียงกับระดับสูงของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ มีความแตกต่างกัน (0.28 มิลลิโมลต่อกรัม) น้อยกว่ากรณีของอุณหภูมิการดูดซับ (0.36 มิลลิโมลต่อกรัม) ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ (0.58 มิลลิโมลต่อกรัม) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (1.81 มิลลิโมลต่อกรัม) ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างนี้บ่งบอกถึงความสำคัญที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ยังมีความแตกต่างมากก็จะมีผลกระทบมาก ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงในระดับที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวตอบสนอง



รูปที่ 4.5 พล็อตเพอร์เทอร์เบชัน (Perturbation plot) ของตัวแปรหลัก 4 ตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.4

ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลของแผนภูมิพาเรโต (รูปที่ 4.3) พล็อตความน่าจะเป็นปกติของสี่ปัจจัย (รูปที่ 4.4) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่า จุดทุกจุดอยู่ในแนวเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โมเดลที่ได้มีความสมบูรณ์ไม่ได้ละทิ้งผลกระทบที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองและการวิเคราะห์นี้ประสบความสำเร็จเป็นที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.6 พล็อตระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย

4.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (FCCC-RSM analysis)

เนื่องจากความมีส่วนโค้งในโมเดลที่พบจากการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ดังนั้นในส่วนถัดมาจะทำการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเพื่อให้โมเดลมีความถูกต้องมากขึ้นและสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียม โดยกำหนดเงื่อนไขการดำเนินการที่เหมาะสมในการดูดซับภายใต้อิทธิพลของผลกระทบบหลักทั้งสาม ซึ่งได้แก่ (1) ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับหรือตัวแปร A (2) ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับหรือตัวแปร B และ (3) อุณหภูมิการดูดซับหรือตัวแปร C โดยทำการจำกัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์หรือตัวแปร D เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และส่งผลกระทบมากกว่าถึง 11-42 เท่าเมื่อเทียบกับตัวแปรหลักอื่นๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการบิดเบือนผลกระทบของตัวแปรหลักทั้งสามและอันตรกิริยาของตัวแปรเหล่านี้ เมทริกซ์ของการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6 ส่วนค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ตัวแปรการทดลองที่ถูกเข้ารหัสสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง FCCCD-RSM โดยทดลอง 14 การทดลองและเพิ่ม 4 จุดกึ่งกลาง

| ลำดับ มาตรฐาน | ลำดับ ทดลอง | A ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ (ร้อยละโดยมวล) | B ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ (ร้อยละโดยมวล) | C อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | ค่าความสามารถ ในการดูดซับ (มิลลิโมลต่อกรัม) |
|------------------|----------------|---|--|---------------------------------|---|
| 1 | 17 | -1 | -1 | -1 | 4.150 |
| 2 | 18 | 1 | -1 | -1 | 2.964 |
| 3 | 14 | -1 | 1 | -1 | 3.067 |
| 4 | 12 | 1 | 1 | -1 | 3.977 |
| 5 | 8 | -1 | -1 | 1 | 5.053 |
| 6 | 7 | 1 | -1 | 1 | 3.613 |
| 7 | 9 | -1 | 1 | 1 | 4.026 |
| 8 | 13 | 1 | 1 | 1 | 5.672 |
| 9 | 5 | -1 | 0 | 0 | 4.585 |
| 10 | 10 | 1 | 0 | 0 | 4.465 |
| 11 | 4 | 0 | -1 | 0 | 4.295 |
| 12 | 6 | 0 | 1 | 0 | 5.175 |
| 13 | 3 | 0 | 0 | -1 | 5.390 |
| 14 | 15 | 0 | 0 | 1 | 5.808 |
| 15 | 16 | 0 | 0 | 0 | 5.951 |
| 16 | 2 | 0 | 0 | 0 | 5.999 |
| 17 | 11 | 0 | 0 | 0 | 5.956 |
| 18 | 1 | 0 | 0 | 0 | 5.964 |

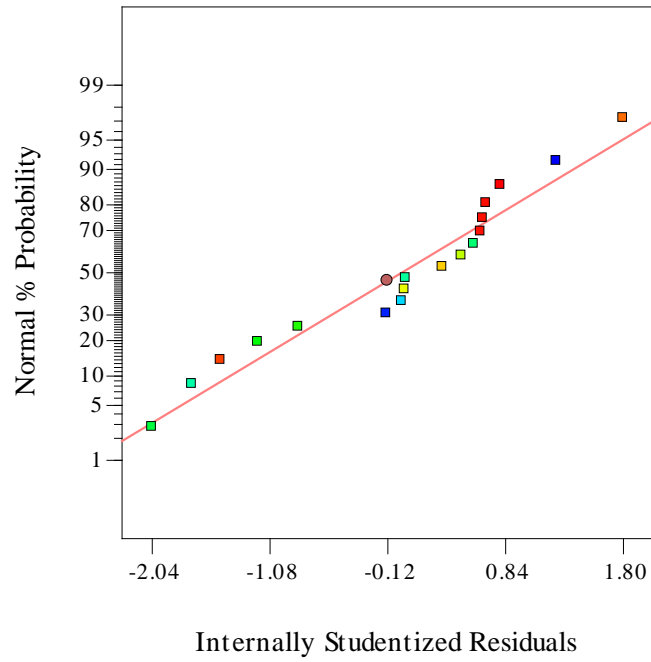
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง

| ตัวแปร | ค่าเข้ารหัส (Coded values) | | | หน่วย |
|----------------------------|----------------------------|---------|--------|--------------|
| | ค่าต่ำ | ค่ากลาง | ค่าสูง | |
| | (-1) | (0) | (+1) | |
| A: ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ | 30 | 40 | 60 | ร้อยละโดยมวล |
| B: ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับ | 0 | 5 | 10 | ร้อยละโดยมวล |
| C: อุณหภูมิ | 60 | 80 | 100 | องศาเซลเซียส |

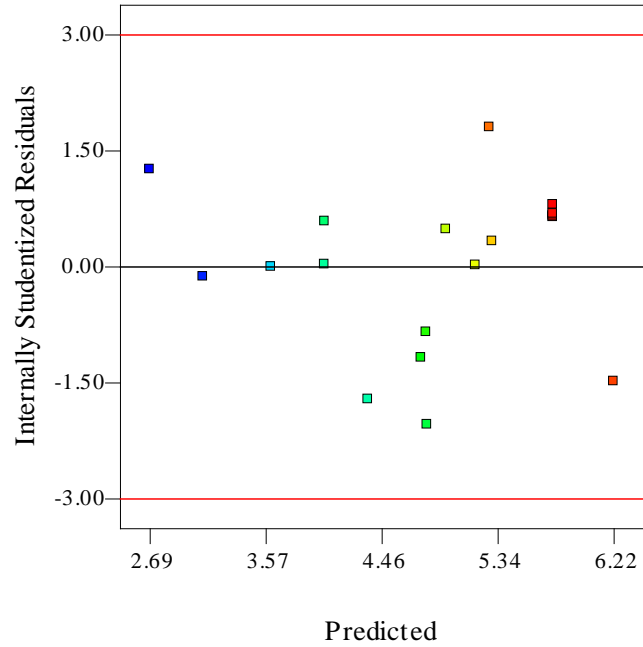
สมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเทอมของปัจจัยเข้ารหัส (Coded factors) แสดงในสมการ (1)

$$Q_e = +5.76 - 0.019A + 0.18B + 0.46C + 0.65AB - 0.98A^2 - 0.77B^2 \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้ (Adjusted r^2) ของโมเดลอยู่ที่ 0.9354 และ 0.9001 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลพื้นผิวตอบสนองมีความถูกต้องสูง ค่าความแม่นยำเพียงพอ (Adequate precision) เท่ากับ 17.589 ซึ่งค่านี้เมื่อมีค่ามากกว่า 4 แสดงว่า โมเดลที่ได้มีเทอมผลกระทบที่เพียงพอต่อการทำนายผลตอบสนอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ (ก) พล็อตความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้าง แสดงในรูปที่ 4.7 พบว่า การกระจายของจุดข้อมูลอยู่ในแนวเส้นตรง และ (ข) พล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนาย แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนของการกระจายตัวของจุดข้อมูล ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า โมเดลหรือสมการพื้นผิวตอบสนองที่ได้มีการกระจายตัวแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomized distribution) และมีความเที่ยงตรงเพียงพอที่จะทำนายผลตอบสนอง

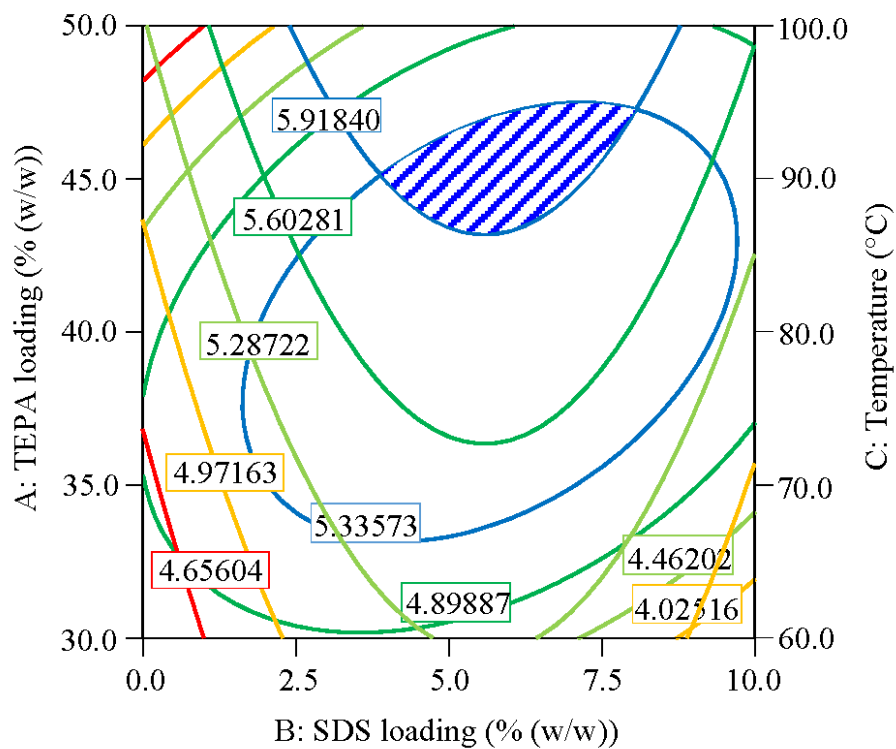


รูปที่ 4.7 พล็อตความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้างสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ 4.8 พล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง

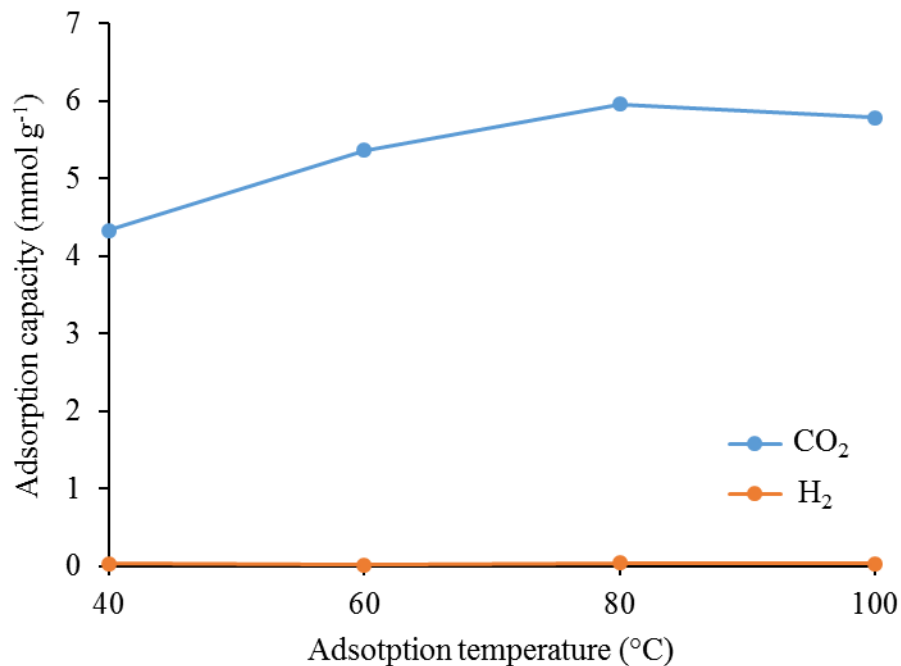
พล็อตโครงร่าง (Contour plot) ของผลกระทบหลักทั้งสามสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง แสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งบ่งบอกถึงแนวโน้มของค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และให้ได้มาซึ่งช่วงของแต่ละปัจจัยหลักที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุด ส่วนที่แรงเงาสีน้ำเงินแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้และสภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับร้อยละ 43-47 โดยมวล ปริมาณ SDS ในตัวดูดซับร้อยละ 4-8 โดยมวล และอุณหภูมิการดูดซับ 86-94 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยมวล ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ อยู่ในช่วง 5.6-6.0 มิลลิโมลต่อกรัม



รูปที่ 4.9 พล็อตโครงร่างของผลกระทบหลักทั้งสามสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง

4.4 การทดสอบการเลือกดักจับของตัวดูดซับในแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน (Selectivity test of the sorbent in mixed gas of CO₂ and H₂)

จากการทดสอบการเลือกดูดซับของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยไซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 5 โดยมวล เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการเลือกดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.10

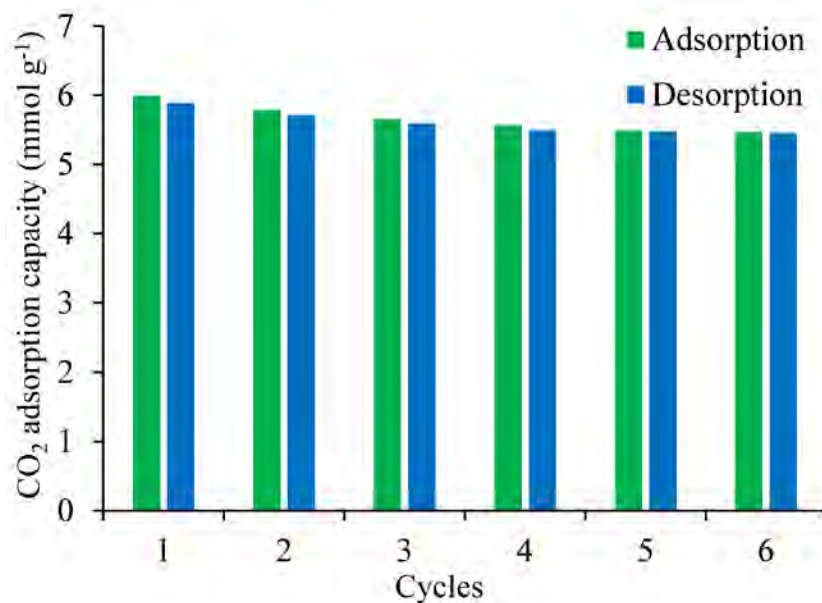


รูปที่ 4.10 การเลือกดูดซับของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยไซเดียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 5 โดยมวล ในแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 40-100 องศาเซลเซียสและความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 30 โดยปริมาตร

จากรูปที่ 4.10 พบว่า ตัวดูดซับให้ค่าความสามารถในการดูดซับในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาใกล้เคียงกับกรณีทดสอบในแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์และฮีเลียม ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดซับของไฮโดรเจนซึ่งพบว่าตัวดูดซับนี้ไม่ดูดซับไฮโดรเจนในทุกช่วงอุณหภูมิ จึงกล่าวได้ว่าตัวดูดซับนี้สามารถใช้ในการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมทั้งในอากาศและกระแสไฮโดรเจนเข้มข้นที่มีการปนเปื้อนของคาร์บอนไดออกไซด์

4.5 การทดสอบความคงทนของตัวดูดซับ (Stability test of the sorbent)

จากการทดสอบการดูดและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบเป็นวัฏจักรของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยไซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 โดยมวล เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมกรรมการดูดซับและคายซับ และความคงทนของตัวดูดซับที่เตรียม ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า การดูดซับและคายซับในช่วงสองวัฏจักรแรก มีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเล็กน้อย (จาก 5.99 มิลลิโมลต่อกรัม เป็น 5.78 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับการดูดซับและจาก 5.89 มิลลิโมลต่อกรัม เป็น 5.71 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับการคายซับ) ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มคงที่ตั้งแต่วัฏจักรที่สาม เป็นต้นไป ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 5.65 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับการดูดซับ และ 5.59 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับการคายซับ



รูปที่ 4.11 วัฏจักรการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยไซเดียมโดเดซิลซัลเฟตร้อยละ 5 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 30 โดยปริมาตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยหลักทั้งสี่และอันตรกิริยาของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงและที่ปรับปรุงด้วยโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ร้อยละ 5 และ 10 โดยมวล การออกแบบการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียลของตัวแปรหลักทั้งสี่ ได้แก่ (1) ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ (ผลกระทบ A) ปริมาณโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในตัวดูดซับ (ผลกระทบ B) อุณหภูมิการดูดซับ (ผลกระทบ C) และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (ผลกระทบ D) ทำให้ทราบถึงตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรหลักที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนอง โดยเรียงลำดับระดับความสำคัญจากมากไปหาน้อย ได้แก่ อันตรกิริยาระหว่างปริมาณโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในตัวดูดซับ-อุณหภูมิการดูดซับ-ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ BCD (ร้อยละ 4.10) ปริมาณโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในตัวดูดซับหรือผลกระทบ B (ร้อยละ 3.61) อันตรกิริยาของปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับและอุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ AC (ร้อยละ 2.89) อันตรกิริยาของปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ-ปริมาณโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในตัวดูดซับ-อุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ ABC (ร้อยละ 2.05) อุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ C (ร้อยละ 1.35) อันตรกิริยาของปริมาณโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในตัวดูดซับและอุณหภูมิการดูดซับหรือผลกระทบ BC (ร้อยละ 1.24) อันตรกิริยาของปริมาณโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในตัวดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ BD (ร้อยละ 1.24) อันตรกิริยาของปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ AD (ร้อยละ 0.96) ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับหรือผลกระทบ A (ร้อยละ 0.85) และอันตรกิริยาของปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ-ปริมาณโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในตัวดูดซับ-ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ ABD (ร้อยละ 0.67) ตามลำดับ ซึ่งค่าที่อยู่ในวงเล็บ คือ ค่าร้อยละความผันแปร และค่าร้อยละความผันแปรของควมมีส่วนโค้งหรือ Curvature เท่ากับ 4.48 ค่า *P*-value ของ Curvature มีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นควมมีส่วนโค้งมีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ทราบว่าสมการเส้นตรงไม่เพียงพอต่อการทำนายผลตอบสนองอย่างค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

จากการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง โดยกำหนดเงื่อนไขคือ จำกัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์หรือตัวแปร D อันเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และส่งผลกระทบมากกว่าถึง 11-42 เท่าเมื่อเทียบกับตัวแปรหลักอื่นๆ ซึ่งส่งผลให้เกิดการบดบังผลกระทบของตัวแปรหลักทั้งสามและอันตรกิริยาของตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นผลกระทบหลักทั้งสาม ได้แก่ (1) ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับหรือตัวแปร A (2) ปริมาณไซเตียมโคเดซิลซัลเฟต ในตัวดูดซับหรือตัวแปร B และ (3) อุณหภูมิการดูดซับหรือตัวแปร C จากการทดลองพบว่า สมการพื้นผิวตอบสนองที่ได้มีความเที่ยงตรงเพียงพอที่จะทำนายผลตอบสนอง และสถานะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงของปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับร้อยละ 43-47 โดยมวล ปริมาณไซเตียมโคเดซิลซัลเฟตในตัวดูดซับร้อยละ 4-8 โดยมวล และอุณหภูมิการดูดซับ 86-94 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยมวล ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้อยู่ในช่วง 5.6-6.0 มิลลิโมลต่อกรัม

การทดสอบความคงทนของตัวดูดซับจากการดูดและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบเป็นวัฏจักรของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ที่ปรับปรุงด้วยไซเตียมโคเดซิลซัลเฟตร้อยละ 5 โดยมวล ทำให้ทราบว่า ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพและความคงทนที่ดีสำหรับใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สถานะที่ศึกษา ตลอดวัฏจักรการดูดและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 6 รอบ

บรรณานุกรม

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) จากการใช้พลังงาน ปี 2554
- [2] Metz, B., Davidson, O., Coninck, H., Loos, M., and Meyer L. Carbon Dioxide Capture and Storage. IPCC, 2005: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- [3] Brunetti, A., Scura, F., Barbieri, G., and Drioli, E. Membrane technologies for CO₂ separation, *Journal of Membrane Science* 359 (2010): 115–125.
- [4] Hasib-ur-Rahman, M., Siaj, M., and Larachi, F. Ionic liquids for CO₂ capture, *Chemical Engineering and Processing* 49 (2010): 313–322.
- [5] Araki, S., Doi, H., Sano, Y., Tanaka, S., and Miyake, Y. Preparation and CO₂ adsorption properties of aminopropyl functionalized mesoporous silica microspheres, *Journal of Colloid and Interface Science* 339 (2009): 382–389.
- [6] Choi, S., Drese, J.H., and Jones, C.W. Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources, *ChemSusChem* 2 (2009): 796–854.
- [7] Kondo, A., Noguchi, H., Ohnishi, S., Kajiro, H., Tohdoh, A., Hattori, Y., Xu, W., Tanaka, C., Kanoh, H., and Kaneko, K. Novel expansion/shrinkage modulation of 2D layered MOF triggered by clathrate formation with CO₂ molecules. *Nano Letters* 6 (2006): 2581–2584.
- [8] Langeroudi, E.G., Kleitz, F., Iliuta, M.C., and Larachi, F. Grafted amine/CO₂ interactions in gas-liquid-solid adsorption/absorption equilibria. *The Journal of Physical Chemistry C* 113 (2009): 21866–21876.
- [9] Koenig, P., and Ivers-Tiffée, E. Modular Testing and Simulation Environment for Analysis and Optimization of Fuel Cell Systems *ECS Trans.* 5(1) (2007): 297–308.
- [10] "IPCC Special Report Carbon Dioxide Capture and Storage Summary for Policymakers" (PDF). Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved 2011-

- 10-05. Available from: http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_summary_forpolicymakers.pdf.
- [11] "Introduction to Carbon Capture and Storage - Carbon storage and ocean acidification activity". Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) and the Global CCS Institute. Retrieved 2013-07-03. Available from: <http://www.globalccsinstitute.com/publications/introduction-carbon-capture-and-storage/online/43531>.
- [12] Burying the problem., *Canadian Geographic*. Available from: <http://www.canadian-geographic.ca/magazine/jf08/indepth/>
- [13] [IPCC, 2015] *ICPC special report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Prepared by working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L.A. Meyer (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp. Available in full at www.ipcc.ch.
- [14] Coal Utilization Research Council (CURC) Technology Roadmap, 2005. Available from: <http://www.coal.org/roadmap/index.asp>.
- [15] Scientific Facts on CO₂ Capture and Storage, 2012. Available from: <http://www.greenfacts.org/en/co2-capture-storage/>.
- [16] NETL 2007 Carbon Sequestration Atlas, 2007. Available from: http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/refshelf/atlas/index.html.
- [17] Phelps, J., Blackford, J., Holt, J., and Polton, J., Modelling Large-Scale CO₂ Leakages in the North Sea, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 38 (2015) 210–220.
- [18] Tanaka, N. CO₂ CAPTURE AND STORAGE: A key carbon abatement option. International Energy Agency (IEA) Publications, France, 2008, ISBN: 978-92-64-04140-0.
- [19] Oh, T.H. Carbon Capture and Storage Potential in Coal-fired Plant in Malaysia-a Review, *Renewable Sustainable Energy reviews* 14 (2010) 2697–2709.

- [20] Gray, M.L., Champagne, K.J., Fauth, D., Baltrus, J.P., and Pennline, H. Performance of immobilized tertiary amine solid sorbents for the capture of carbon dioxide, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2 (2008): 3–8.
- [21] Gray, M.L., Soong, Y., Champagne, K.J., Pennline, H., Baltrus, J.P., Stevens Jr., R.W., Khatri, R., Chuang, S.S.C., and Filburn, T. Improved immobilized carbon dioxide capture sorbents, *Fuel Processing Technology* 86 (2005): 1449–1455.
- [22] Gray, M.L., Champagne, K., Hoffman, J., Hedge, S., Fauth, D., Baltrus, J., and Pennline, H. Systematic Design of Immobilized Solid Amine Sorbents for the Capture of Carbon Dioxide, The National Energy Technology Laboratory (NETL), Proceeding paper.
- [23] Lu, A.H., and Dai, S. *Porous Materials for Carbon Dioxide Capture*, Springer, 2014.
- [24] Boot-Handford, M.E., Abanades, J.C., Anthony, E.J., Blunt, M.J., Brandani, S., Dowell, N.M., Fernández, J.R., Ferrari, M.-C., Gross, R., Hallett, J.P., Haszeldine, R.S., Heptonstall, P., Lyngfelt, A., Makuch, Z., Mangano, E., Porter R.T.J., Pourkashanian M., Rochelle, G.T., Shah, N., Yoo, J.G., and Fennell, P.S. Carbon capture and storage update, *Energy & Environmental Science* 7 (2014) 130–189.
- [25] Rochelle, G. Amine scrubbing for CO₂ capture, *Science* 325 (2009) 1652-1654.
- [26] Sumida, K. Rogow, D.L., Mason, J.A., McDonald, T.M., Bloch, E.D., Herm, Z.R., Bae T.-H., and Long, J.R. Carbon dioxide capture in metal–organic frameworks. *Chemical Reviews* 112 (2012) 724–781.
- [27] NETL, "Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants" Volume 1: Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity. Available from: http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/BitBase_FinRep_Rev2.pdf.
- [28] Solid sorbents for carbon capture, Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_sorbents_for_carbon_capture.
- [29] Singh, P., Niederer, J.P.M. and Versteeg, G.F. Structure and activity relationships for amine based CO₂ absorbents-I, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 1 (2007): 5-10.

- [30] Singh, P., Niederer, J.P.M. and Versteeg, G.F. Structure and activity relationships for amine based CO₂ absorbents-II, *Chemical Engineering Research and Design* 87 (2008): 135-144.
- [31] Liu, X.W., Zhou, L., Fu, X., Sun, Y., Su, W., and Zhou, Y.P. Adsorption and regeneration study of the mesoporous adsorbent SBA-15 adapted to the capture/separation of CO₂ and CH₄, *Chemical Engineering Science* 62 (2007): 1101-1110.
- [32] Khalil, S.H., Aroua, M.K., and Daud, W.M.A.W. Study on the improvement of the capacity of amine-impregnated commercial activated carbon beds for CO₂ adsorbing, *Chemical Engineering Journal* 183 (2012): 15–20.
- [33] Kamarudin, K.S.N., and Alias, N. Adsorption performance of MCM-41 impregnated with amine for CO₂ removal, *Fuel Processing Technology* 106 (2013): 332–337.
- [34] Belmabkhout, Y., and Sayari, A. Effect of pore expansion and amine functionalization of mesoporous silica on CO₂ adsorption over a wide range of conditions. *Adsorption* 15 (2009): 318–328.
- [35] León, M., Díaz, E., Bennici, S., Vega, A., Ordóñez, S., Auroux, A. Adsorption of CO₂ on Hydrotalcite-Derived Mixed Oxides: Sorption Mechanisms and Consequences for Adsorption Irreversibility. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 49 (2010): 3663–3671.
- [36] Ebner, A.D., Gray, M.L., Chisholm, N.G., Black, Q.T., Mumford, D.D., Nicholson, M.A., Ritter, J.A. Suitability of a Solid Amine Sorbent for CO₂ Capture by Pressure Swing Adsorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50 (2011): 5634–5641.
- [37] Zhang, Z., Wang, B., Sun, Q., Ma, X. Enhancing Sorption Performance of Solid Amine Sorbents for CO₂ Capture by Additives. *Energy Procedia* 37 (2013): 205–210.
- [38] Veneman, R., Frigka, N., Zhao, W., Li, Z., Kersten, S., Brilman, W. Adsorption of H₂O and CO₂ on supported amine sorbents. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 41 (2015): 268–275.

- [39] Cavani, F., Trifiro, F., and Vaccari, A. Hydrotalcite-type anionic clays: preparation, properties and applications. *Catalysis Today* 11 (1991): 173–301.
- [40] Davila, V., Lima, E., Bulbulian, S., and Bosch, P. Mixed Mg(Al)O oxides synthesized by the combustion method and their recrystallization to hydrotalcites. *Microporous and Mesoporous Materials* 107 (2008): 240–246.
- [41] Prikhodko, R.V., Sychev, M.V., Astrelin, I.M., Erdmann, K., Mangel, A., and van Santen, R.A. Russ. Synthesis and Structural Transformations of Hydrotalcite-like Materials Mg₃Al and Zn₃Al. *Russian Journal of Applied Chemistry* 74 (2001): 1573–1577.
- [42] B. Bai, N.P. Hankins, M.J. Hey, S.W. Kingman, *Ind. Eng. Chem. Res.* 43 (2004) 5326.
- [43] R.P. Sperline, Y. Song, H. Freiser, *Langmuir* 8 (1992) 2183.
- [44] K.D. Dobson, A.D. Roddick-Lanzilotta, A.J. McQuillan, *Vib. Spectrosc.* 24 (2000) 287.
- [45] Xu, J., Zhang, J., Yin, X., Yang, D., Zhang, H., Qian, J., Liu, L., Liu, X., 2011. Esterification process to synthesize isopropyl chloroacetate catalyzed by lanthanum dodecyl sulfate. *Braz. J. Chem. Eng.* 28, 259e264.
- [46] Yang, Y.-H., Li, F.-F., Yang, C., Zhang, W.-Y., and Wu, J.-H. Grafting morphologies of TEPA on SBA-15(P) and its effect on CO₂ adsorption performance. *Acta Physico-Chimica Sinica* 28 (2012):195–200.
- [47] Knofel, C., Martin, C., Hornebecq, V., and Llewellyn, P.L. Study of Carbon Dioxide Adsorption on Mesoporous Aminopropylsilane-Functionalized Silica and Titania Combining Microcalorimetry and in Situ Infrared Spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry C* 113 (2009): 21726–21734.
- [48] Bossa, J.B., Theule, P., Duvernay, F., Borget, F., and Chiavassa, T. Carbamic acid and carbamate formation in NH₃:CO₂ ices-UV irradiation versus thermal processes. *Astronomy & Astrophysics* 492 (2008): 719–724.

- [49] Robinson, K., McCluskey, A., and Attalla M.I. An ATR-FTIR Study on the Effect of Molecular Structural Variations on the CO₂ Absorption Characteristics of Heterocyclic Amines, Part II. *ChemPhysChem* 13 (2012) 2331–2341.
- [50] Bossa, J. B., Borget, F., Duvernay, F., Theule, P., and Chiavassa, T. Formation of neutral methylcarbamic acid (CH₃NHCOOH) and methylammonium methylcarbamate [CH₃NH₃⁺][CH₃NHCO₂⁻] at low temperature. *The Journal of Physical Chemistry A* 112 (2008): 5113–5120.
- [51] Robinson K., McCluskey A., and Attalla, M. An spectroscopic study on the effect of molecular structural variations on the CO₂ absorption characteristics of heterocyclic amines. *ChemPhysChem* 12 (2011): 1088–1099.

ผลผลิต

ผลผลิตที่เกิดจากงานวิจัยนี้

- [1] Pongstabodee, S., Pintuyothin, N., Pootrakulchote, N., Thouchprasitchai, N. CO₂ capture performance of bi-functional activated bleaching earth modified with basic-alcoholic solution and functionalization with monoethanolamine: isotherms, kinetics and thermodynamics. *Journal of Environmental Sciences. Article in Press.* (Impact factor: 2015 = 2.208) *Available online 20 May 2016*
- [2] CO₂ adsorption capacity on amine-functionalized basic-modified calcined earth. (By submitting the manuscript)