

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การเลือกดักจับแก๊สเรือนกระจกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสม
กระแสไฮโดรเจนเข้มข้นบนตัวดูดซับของแข็งชนิดดินที่ดัดแปร
หมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน

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

รองศาสตราจารย์ ดร. ญัฐธยาน์ พงศ์สถาปติ และคณะ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุน
ทุนอุดหนุนการวิจัย (งบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2558)

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เล็งเห็นถึงความสำคัญของงานวิจัยและให้ทุนอุดหนุนการวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่และเครื่องมือวิจัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประสานงาน เจ้าหน้าที่และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ที่อำนวยความสะดวกด้านต่างๆ

คณะผู้วิจัย

คำนำ

รายงานความก้าวหน้างานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการจับแก๊สเรือนกระจกคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสมกระแสไฮโดรเจนเข้มข้นบนตัวดูดซับของแข็งชนิดินที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน โดยมีระยะเวลาการดำเนินการ 2 ช่วง กล่าวคือ ช่วงแรกจะดำเนินการศึกษาในปีที่ 1 โดยจะศึกษาและออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองของตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียมได้ ช่วงที่สองจะดำเนินการศึกษาในปีที่ 2 โดยจะศึกษาความสามารถในการเลือกดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสม การคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งาน และความคงทนของตัวดูดซับที่เตรียม โดยรายงานฉบับสมบูรณ์นี้จะเป็นผลการวิจัยในช่วงแรก ซึ่งจะกล่าวถึงออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนองเพื่อทราบอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่เตรียม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและต่าง และฟังก์ชันด้วยเตตระเอทิลีนเพนตะมีนที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ และเพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดด้วยการออกแบบและการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ฟลูเรียทรานฟอรั่มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี การวิเคราะห์ธาตุคาร์บอนไฮโดรเจน และไนโตรเจน การหาพื้นที่ผิวจำเพาะหรือบีอีที และการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนหรือทีจีเอ การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการภายใต้ความดันบรรยากาศและสภาวะที่แห้ง เพื่อประเมินระดับความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญที่มีต่อค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นผลตอบสนอง ผลกระทบหลักทั้งสิ้น คือ ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ (ร้อยละ 30-40 โดยมวล) อุณหภูมิการดูดซับ (40-80 องศาเซลเซียส) อัตราส่วน W/F ratio (0.9-1.8 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ 10-30 โดยปริมาตร) และอันตรกิริยาของผลกระทบหลัก ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ ซึ่งพบว่า ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าในแต่ละผลกระทบหลักทั้งสิ้น นั่นคือ ผลกระทบหลักทั้งสิ้นมีอิทธิพลในเชิงบวกต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ สภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุดโดยใช้การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง อยู่ในช่วงของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ ร้อยละ 35-36 โดยมวล อุณหภูมิ 74-80 องศาเซลเซียส อัตราส่วน W/F 1.72-1.80 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 27-30 โดยปริมาตร ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้อยู่ในช่วง 6.1-6.2 มิลลิโมลต่อกรัม จากการทดสอบความคงทนของตัวดูดซับ พบว่า ตัวดูดซับมีความคงทนภายใต้สภาวะที่ศึกษา

คำสำคัญ: (1) การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (2) การหาสภาวะที่ดีที่สุด (3) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน (4) ไฮโดรทาลไซต์

Abstract

The aim of this study was to prepare the thermal- and basic-treated hydrotalcite (HT) functionalized with various levels of tetraethylenepentamine (TEPA) and to optimize CO₂ adsorption capacity via statistical design and analysis. The TEPA/HT sorbents were characterized by X-ray diffraction, Fourier transform infrared spectrometry, CHN analysis, Brunauer-Emmet-Teller and Thermogravimetric analysis. The operation of CO₂ capture was performed under atmospheric pressure and dry condition. The main effects, which were of TEPA loading (30-40% (w/w)), operating temperature (40-80 °C), W/F ratio (0.9-1.8 g s cm⁻³), and CO₂ concentration (10-30% (v/v)), and their interactions were employed 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. Thus, 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 35-36% (w/w), operating temperature of 74-80 °C, W/F ratio of 1.72-1.80 g s cm⁻³, and CO₂ concentration of 27-30% (v/v). The maximum CO₂ adsorption capacity was around 6.1-6.2 mmole g⁻¹. The stability test for the CO₂ adsorption indicated that the sorbent was stable under the studied condition.

Key Words: (1) Carbon dioxide capture (2) Optimization (3) Tetraethylenepentamine (4) Hydrotalcite

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
คำนำ	ข
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
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 ทฤษฎีพื้นฐานในเบื้องต้นสำหรับปฏิกิริยาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ของตัวดูดซับที่มีหมู่เอมีน และ รูปแบบการเตรียมตัวดูดจับคาร์บอนได- ออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีน	14
2.1.6 ตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์	16
2.2 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	23
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ แก๊สและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	23
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย	23
3.1.2 แก๊สที่ใช้ในการวิจัย	23
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	24
3.2 วิธีดำเนินการทดลอง	24
3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ	24
3.2.2 การทดสอบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์	25
3.2.3 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ	26
3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะตัวดูดซับ	27
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผลการวิจัย	28
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ	28
4.2 การออกแบบการทดลอง 2 ⁴ แฟคทอเรียล	35
4.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง	45
4.4 การทดสอบความคงทนของตัวดูดซับ	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	52
บรรณานุกรม	53
ผลผลิต	58

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) ไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและต่าง (b) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 35 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ และ (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์	28
4.2	รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดด้วยเทคนิคเอฟทีไออาร์ของ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและต่าง (b) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 35 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ และ (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ (เส้นทึบ หมายถึง ตัวดูดซับก่อนใช้ในการดูดซับ และ เส้นประ หมายถึง ตัวดูดซับหลังผ่านการดูดซับแล้ว)	30

รูปที่	หน้า
4.3 รูปแบบการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคที่จีเอของ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและต่าง (b) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 35 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ และ (e) เตตระเอทิลีนเพนตะมีนบริสุทธิ์	32
4.4 แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.3	40
4.5 พล็อตความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability plot) ของตัวแปร 4 ตัวแปร (ตัวแปร A-E) และอันตรกิริยาของตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.3	41
4.6 พล็อตหนึ่งตัวแปร (One factor plots) ของตัวแปร 4 ตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล	42
4.7 พล็อตระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย	44
4.8 พล็อตความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้างสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง	48
4.9 พล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง	49
4.10 พล็อตโครงร่างของผลกระทบหลักทั้งสิ้นสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง	49
4.11 วิจัยการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วน W/F เท่ากับ 1.8 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 30 โดยปริมาตร	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างวัสดุของแข็งที่ใช้เป็นตัวดูดซับ	19
4.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของคาร์บาเมตและไปคาร์บอเนตบนตัวดูดซับ	32
4.2 ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ	34
4.3 ตัวแปรการทดลองที่ถูกเข้ารหัสสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล โดยทดลอง 16 การทดลองและเพิ่ม 3 จุดกึ่งกลาง	36
4.4 แสดงค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล	37
4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของทอมที่มีความสำคัญสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล	39
4.6 ตัวแปรการทดลองที่ถูกเข้ารหัสสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง FCCCD-RSM โดยทดลอง 24 การทดลองและเพิ่ม 4 จุดกึ่งกลาง	46
4.7 แสดงค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปริมาณเฉลี่ยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 9.6 เท่าจากปีพ.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 ตามหลักการวิทยาศาสตร์

แหล่งที่มาของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศมาจากกระบวนการการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเปลี่ยนรูปทางเคมีร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเปลี่ยนรูปทางเคมีก่อนการเผาไหม้ และปฏิกิริยาเคมีต่างๆ^[2] ดังแสดงในตารางที่ 1.1 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสแก๊สขาออกจากกระบวนการจะมีค่าต่างกัน โดยความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงร้อยละ 2-35 โดยปริมาตร

ตารางที่ 1.1 ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสแก๊สขาออกจากกระบวนการต่างๆ
(ดัดแปลงจาก [8])

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
การเปลี่ยนรูปทางเคมีร่วมกับการเผาไหม้เชื้อเพลิง	
+ 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
โดยใช้ปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟิเคชัน

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 กระบวนการคาร์บอนไดออกไซด์รีฟอร์มมิ่ง 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 หนึ่งรายละเอียดของการศึกษาจะแสดงเฉพาะไฮโดรทาลไฮต์ที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน (เนื่องจากส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับดินฟอก กำลังดำเนินการยื่นจดสิทธิบัตร)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 สังเคราะห์ตัวดูดซับของแข็งชนิดดินประเภทไฮโดรทาลไฮต์ที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความดันบรรยากาศ และหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับที่เตรียม

1.3 สมมติฐานการวิจัย

1.3.1 การเพิ่มปริมาณเอมีนในตัวดูดซับช่วยส่งเสริมความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

1.3.2 การใช้ปริมาณของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น หรือการเพิ่มอัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่ออัตราเร็วสายป้อน ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งต้นมีเวลาในการสัมผัสกับพื้นผิวของตัวดูดซับมากขึ้น ส่งผลให้เกิดการดักจับได้ดีขึ้น

1.3.3 การเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับทำให้ตัวดูดซับสามารถดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในปริมาณที่สูงขึ้น

1.3.4 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในกระแสขาเข้าที่ต่างกัน ส่งผลให้ได้ค่าความสามารถในการดักจับของตัวดูดซับที่ต่างกัน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 สังเคราะห์ตัวรองรับไฮโดรทาลไฮต์แล้วดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีน

1.4.2 ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บนตัวดูดซับไฮโดรทาลไฮต์ที่เตรียม ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับ ปริมาณเอมีนในตัวดูดซับ อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่ออัตราเร็วสายป้อน พร้อมทั้งหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้การออกแบบการทดลองพื้นที่ผิวตอบสนอง ตลอดจนทั้งความคงทนของตัวดูดซับ

1.4.3 วิเคราะห์เอกลักษณ์หรือลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับที่สังเคราะห์ทั้งก่อนและหลังการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

1.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ตัวแปรต้น ปริมาณเอมีนในตัวดูดซับ อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่ออัตราเร็วสายป้อน 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 พิจารณาที่ระดับความเชื่อมั่นหรือ Confidence interval ร้อยละ 95

1.7 ระยะเวลาดำเนินการวิจัย

ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 จนถึง กันยายน 2558

1.8 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.8.1 ได้ตัวดูดซับของแข็งดินประเภทไฮโดรทาลไซต์ที่ดัดแปรหมู่ฟังก์ชันพื้นผิวด้วยเอมีนที่มีความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ความดันบรรยากาศ

1.8.2 เพื่อเป็นต้นแบบการดักจับแก๊สเรือนกระจกคาร์บอนไดออกไซด์และสามารถนำกลับเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ที่ไม่ก่อมลพิษสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมและ

ชุมชนที่ต้องการสร้างรายได้จากการขายคาร์บอนเครดิตและลดภาวะโลกร้อน หรือผู้สังคมนคาร์บอนต่ำ

1.8.3 เผยแพร่ผลงาน โดยการนำเสนอผลงานและตีพิมพ์ผลงานลงในวารสารระดับชาติ และวารสารระดับนานาชาติ เพื่อเป็นการถ่ายทอดความรู้แก่ผู้สนใจ

1.9 นิยามศัพท์เฉพาะ

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

1.9.2 ปริมาณเอมีนในตัวดูดซับ หมายถึง ร้อยละโดยมวลของเอมีนที่มีอยู่บนตัวดูดซับ

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] แม้ว่าคาร์บอนไดออกไซด์ได้รับการนำกลับได้พื้นโลกเพื่อก่อตัวทางธรณีวิทยาและกักเก็บน้ำมันเป็นเวลาหลายทศวรรษที่ผ่านมา รวมถึงการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแนวคิดที่ค่อนข้างใหม่ ตัวอย่างในเชิงพาณิชย์ครั้งแรกเป็นของเวย์เบอร์นเมื่อปี ค.ศ. 2000^[12] ตัวอย่างอื่น ๆ ได้แก่ เชื้อนในเขตแดนของซาสค์พาวเวอร์ (SaskPower's Boundary Dam) และโครงการเคมเปอร์พลังงานมิสซิสซิปปี (Mississippi Power's Kemper Project Kemper) นอกจากนี้การดักจับและการกักเก็บคาร์บอนยังสามารถนำมาใช้เพื่ออธิบายการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอากาศที่เป็นเทคนิควิศวกรรมสภาพภูมิอากาศ

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

การกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกคาดการณ์ทั้งในก่อตัวทางธรณีวิทยาในระดับลึก หรือในรูปแบบของแร่คาร์บอนเนต การกักเก็บในทะเลลึกถือว่าเป็นไปได้แค่เพียงระยะสั้นเพราะเป็นการเพิ่มปัญหาอย่างมากที่ก่อให้เกิดความเป็นกรดของมหาสมุทร^[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)

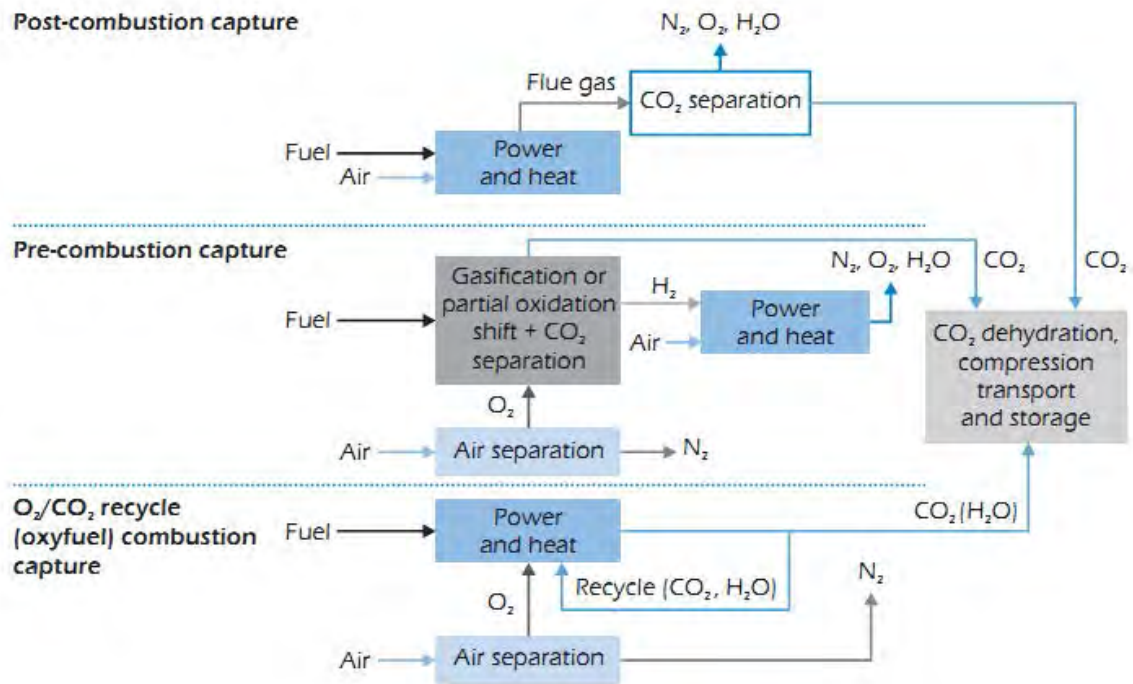
การลดค่าใช้จ่ายในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านการออกแบบกระบวนการใหม่และการปรับปรุงการออกแบบที่มีอยู่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการใช้งานขนาดใหญ่สำหรับการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากการแยกก๊าซธรรมชาติ การผลิตเอทานอลและการผลิตปุ๋ยมีความเป็นไปได้ที่จะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการดักจับจากโรงไฟฟ้า และการผลิตไฮโดรเจนและกระบวนการเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงอื่นๆ เป็นที่น่าสนใจสำหรับการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ในทุกวันนี้

2.1.3 การดักจับแอสคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าและความร้อน (CO₂ Capture in Electricity and Heat Generation)

มีสามตัวเลือกหลักสำหรับเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน คือ การเผาไหม้หลัง (Post-combustion) ดักจับโดยใช้การดูดซึมทางเคมี

(Chemical absorption) การเผาไหม้ก่อน (Pre-combustion) และกระบวนการเผาไหม้ใน ออกซิเจน (Oxyfuel combustion หรือ denitrogenation) (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์^[18]

ในกระบวนการเผาไหม้ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดักจับจากแก๊สปล่องไฟ (Flue gases) ที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ร้อยละ 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) หรืออาจใช้เยื่อแลกเปลี่ยนในอนาคต เพื่อเพลิงฟอสซิลจะถูกเผาไหม้กับแก๊สออกซิเจนที่ความเข้มข้นใกล้เคียงกับแก๊สพล่องไฟที่นำกลับมาใช้ใหม่ (Recycled flue gas) ในการควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้

2.1.4 ประเภทของเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

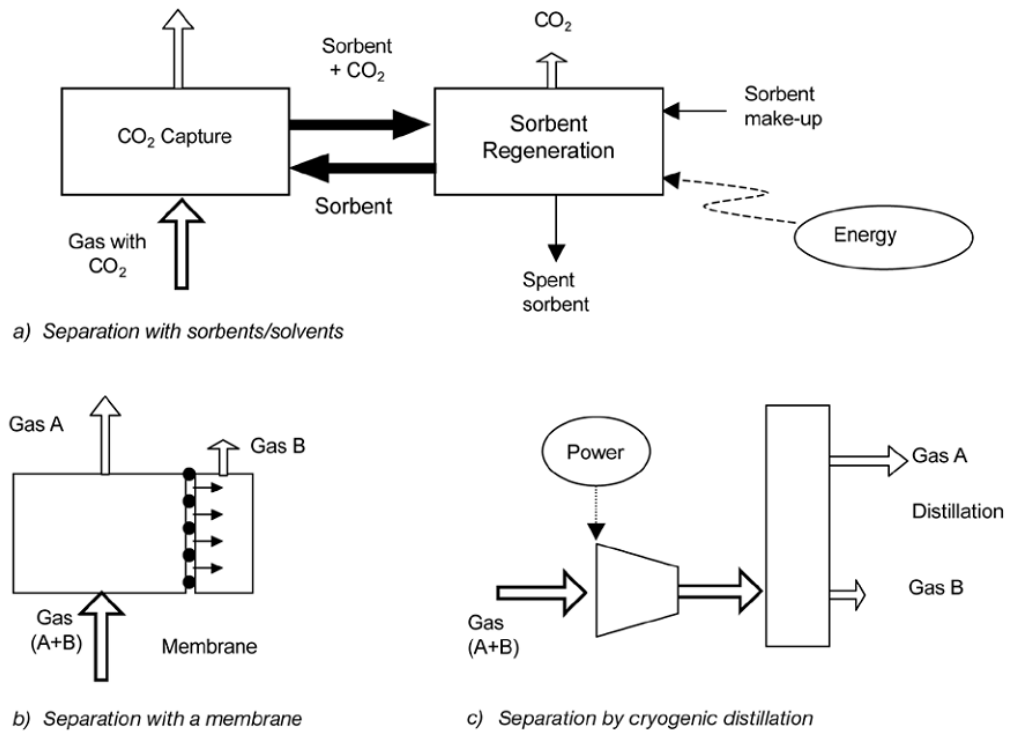
ระบบดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ใช้หลายเทคโนโลยีที่เป็นที่รู้จักกันสำหรับการแยกแก๊สซึ่งมีรวมเข้ากับระบบพื้นฐานสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระบุไว้ในส่วนสุดท้าย รายละเอียดวิธีการแยกมีดังต่อไปนี้

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

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

ผังทั่วไปที่แสดงใน**รูปที่ 2.2** มีอิทธิพลต่อระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญมากมาย รวมทั้งตัวเลือกในเชิงพาณิชย์ชั้นนำ เช่น การดูดซับทางเคมี การดูดซับทาง

กายภาพ และการดูดซับ กระบวนการที่เกิดขึ้นใหม่อื่นๆ ที่ใช้ตัวดูดซับของเหลวใหม่หรือตัวดูดซับของแข็งใหม่ที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ ที่ได้รับการพัฒนาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดของระบบที่มีอยู่ หนึ่งในปัญหาที่พบบ่อยของระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหล่านี้ คือ การไหลของตัวดูดซับระหว่างภาชนะของรูปที่ 2.2a นั้นแรง เพื่อให้สอดคล้องกับการไหลที่แรงของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ถูกดำเนินการในโรงไฟฟ้า ดังนั้นขนาดของอุปกรณ์และพลังงานที่จำเป็นสำหรับการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับควรมีขนาดใหญ่และมีแนวโน้มที่จะแปลเป็นประสิทธิภาพที่สูญเสียและค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นเป็นสำคัญ นอกจากนี้ในระบบที่ใช้ตัวดูดซับที่มีราคาแพง 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 และจะถูกใช้ในช่วงของระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (การเผาไหม้ในออกซิเจนและการดักจับการเผาไหม้ก่อน) ในวรรคก่อนหน้านี้นี้ปัญหาที่สำคัญสำหรับระบบเหล่านี้คือต้องการกระแสแก๊สออกซิเจนปริมาณมาก นอกจากนี้การแยกที่ใช้ความเย็นยังสามารถใช้ในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สอื่นๆ ซึ่งสามารถใช้ในการแก๊สเจ็บบนออกจากกระแสแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่อนข้างสูงความบริสุทธิ์ ตัวอย่างเช่นจากการเผาไหม้ในแก๊สออกซิเจนและสำหรับการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติหรือ

แก๊สสังเคราะห์ที่ได้รับการแปลงจากแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยาซิฟต์

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะติดตั้งในโรงงานที่มีการใช้พลังงานแบบใหม่หรืออาจจะถูกดัดแปลงให้กับโรงงานที่มีอยู่ ซึ่งถ้าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นได้รับการแนะนำอย่างรวดเร็วก็อาจจะต้องมีการดัดแปลงบางส่วนของโรงงานที่มีอยู่หรือโรงงานเหล่านี้จะต้องมีหมดอายุการใช้งานก่อนกำหนดและถูกแทนที่ด้วยโรงงานใหม่ที่มีการดักจับ ข้อเสียของการดัดแปลงคือ

- อาจจะมีข้อจำกัดของสถานที่ เช่น ความพร้อมของที่ดินสำหรับอุปกรณ์การดักจับ
- โรงงานที่มีอายุยาวนานที่เหลืออยู่อาจมีความจำเป็นที่จะปรับค่าใช้จ่ายที่จำนวนมากสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์การดักจับ
- โรงงานเก่ามีแนวโน้มที่จะมีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำ ซึ่งการเพิ่มส่วนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงงานเก่าจะมีผลกระทบมากกว่าในโรงงานที่มีประสิทธิภาพสูง

เพื่อลดข้อจำกัดของสถานที่ตั้ง โรงงานที่ใช้พลังงานแบบใหม่สามารถที่จะสร้างส่วนพร้อมดักจับที่อยู่กับการออกแบบกระบวนการโดยใช้ตัวแปรเริ่มต้นในการเปลี่ยนแปลงที่จำเป็นในการเพิ่มการดักจับและมีพื้นที่เพียงพอและสิ่งอำนวยความสะดวกให้พร้อมสำหรับการติดตั้งอย่างง่ายของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ที่จะติดตั้งต่อไป สำหรับบางประเภทของการดักจับที่ปรับปรุงใหม่ ตัวอย่างเช่น การจับภาพการเผาไหม้ก่อนและการเผาไหม้ในออกซิเจน อุปกรณ์ที่ปรับปรุงใหม่ส่วนมากสามารถสร้างขึ้นบนสถานที่ที่แยกต่างหากถ้ามีความจำเป็น อุปสรรคอื่นๆ สามารถแก้ไขได้โดยส่วนใหญ่จะปรับปรุงหรือสร้างใหม่อย่างแข็งแรงจากโรงงานที่มีอยู่เดิมเมื่อมีการปรับปรุงการดักจับใหม่ ตัวอย่างเช่น หม้อไอน้ำและกังหันไอน้ำเก่าที่ด้อยประสิทธิภาพจะถูกแทนที่ด้วยหม้อไอน้ำและกังหันไอน้ำเหนือวิกฤติที่ทันสมัยและมีประสิทธิภาพสูงหรือโรงงาน IGCC ในขณะที่ประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของโรงงานที่ปรับปรุงกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์อาจจะสูงที่สุดเทียบเท่ากับของโรงงานเดิมโดยปราศจากการดักจับ

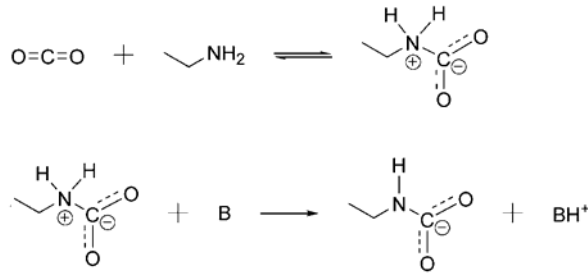
2.1.5 ทฤษฎีพื้นฐานในเบื้องต้นสำหรับปฏิกิริยาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดักจับที่มีหมู่เอมีน และ รูปแบบการเตรียมตัวดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีน

ปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดักจับที่มีหมู่เอมีน

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่มีความเป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) สามารถรับอิเล็กตรอนจากเบสลิวอิสได้ เอมีนจัดว่าเป็นเบสลิวอิส (Lewis base) เพราะที่มีหมู่เอมีน ($-NH_2$) ประกอบด้วยไนโตรเจนที่มีอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวทั้งสองจึงสามารถแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนได้ การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเอมีนแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา และกรณีที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา

กรณีที่ไม่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (*In absence of water*)

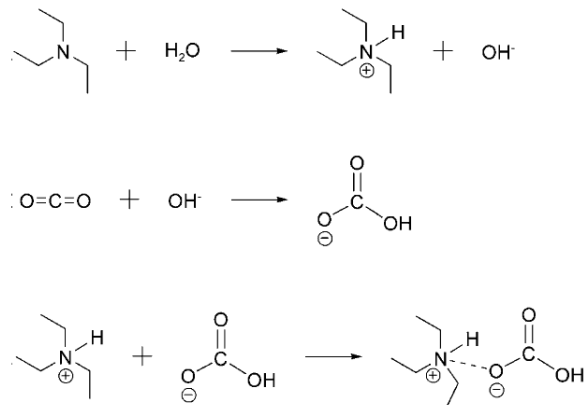
เอมีน 1 โมเลกุลเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์โดยให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของไนโตรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ และกลายเป็น สวิทเทอร์ไอออน (Zwitterion) จากนั้นเอมีนอีก 1 โมเลกุลทำการดึงโปรตรอนจากสวิทเทอร์ไอออนเกิดเป็นเกลือของแอมโมเนียมและคาร์บาเมท (Carbamate) สัดส่วนเอมีนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยานี้คือ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



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนในภาวะที่ไม่มีน้ำ โดยที่ B หมายถึง เอมีนชนิดปฐมภูมิหรือทุติยภูมิ^[20]

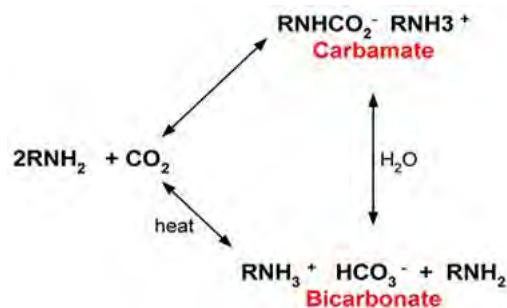
กรณีที่มีน้ำเข้าทำปฏิกิริยา (*In presence of water*)

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



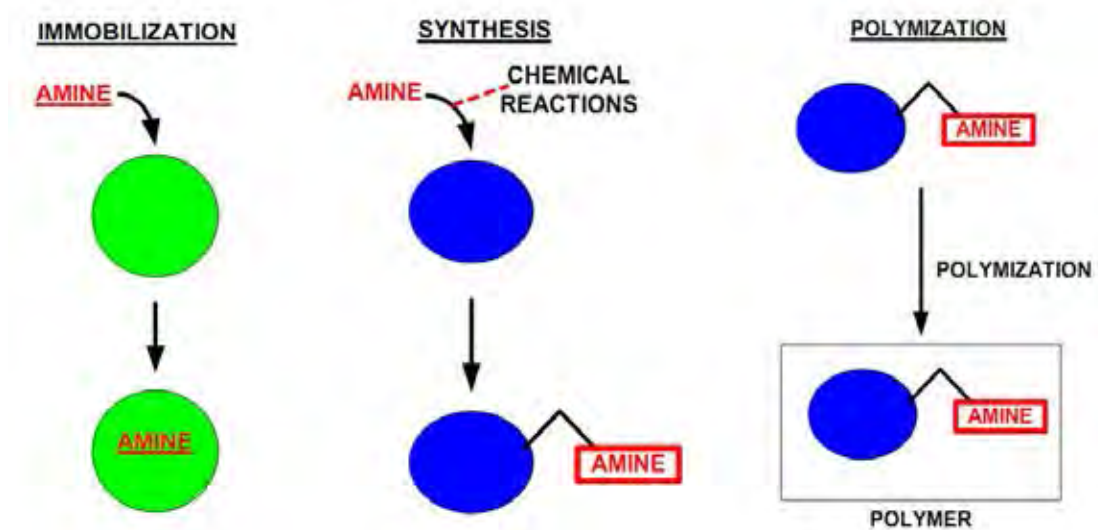
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และเอมีนปฐมภูมิหรือเอมีนทุติยภูมิในภาวะที่มีน้ำ (ดัดแปลงมาจาก [21])

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 การเตรียมตัวดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดของแข็งที่ยึดติดด้วยเอมีนในรูปแบบต่างๆ^[22]

2.1.6 ตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Solid sorbents for carbon dioxide capture)

ตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงวัสดุของแข็งที่มีขนาดรูพรุนที่หลากหลาย รวมทั้งซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดเมโซ (Mesoporous silicas) ซีโอไลต์ (Zeolites) และโครงร่างโลหะอินทรีย์ (Metal-organic frameworks) ที่มีศักยภาพในการทำงานสูง และเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์จากโรงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่และขนาดย่อม^[23] ในขณะที่ความพร้อมด้านเทคโนโลยีของตัวดูดซับของแข็งสำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์มีความแตกต่างกันระหว่างระดับการวิจัยและระดับสาธิต ซึ่งตัวดูดซับของแข็งแสดงให้เห็นถึง ศักยภาพในเชิงพาณิชย์ของตัวดูดซับในการประยุกต์ใช้กับส่วนที่เกี่ยวข้องกับการช่วยชีวิตและกระบวนการกลั่นอนุณภูมิสูง อย่างไรก็ตามตัวดูดซับของแข็งนั้นมีความเหมาะสมสำหรับการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์และได้รับความสนใจในการวิจัยด้านวัสดุ

ศาสตร์ นอกจากนี้ในปัจจุบันเทคโนโลยีดังกล่าวยังมีอุปสรรคในด้านข้อจำกัดในการพัฒนาเทคโนโลยีของการดักจับและการกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์

การเปรียบเทียบกับตัวดูดซึ่มสารละลายเอมีน

สารละลายเอมีนที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายสามารถดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านการก่อตัวที่ผันกลับได้ (Reversible formation) ของแอมโมเนียมคาร์บาเมต (Ammonium carbamate) แอมโมเนียมคาร์บอเนต (Ammonium carbonate) และแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (Ammonium bicarbonate)^[24] การก่อตัวและความเข้มข้นโดยเทียบเคียงของสารประกอบเหล่านี้ในสารละลายขึ้นอยู่กับเอมีนที่เฉพาะเจาะจงหรือเอมีนที่ถูกนำมาใช้ เช่นเดียวกับอุณหภูมิและความดันของแก๊สผสม คาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซึมได้ดีโดยเอมีนที่อุณหภูมิต่ำและจะหลุดออกที่อุณหภูมิสูง 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 มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าค่าใช้จ่ายของเอมีนพื้นฐานที่สามารถผลิตได้โดยง่ายในระดับที่ใหญ่อย่างมี

นัยสำคัญ เพราะแก๊สไอเสียหรือแก๊สปล่องควัน (Flue gas) มีสิ่งปนเปื้อนบางส่วนที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับ นี่คือการทำให้เสียหายทางวิศวกรรมอย่างมีนัยสำคัญที่จะป้องกันตัวดูดซับของแข็งจากการใช้งานในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งยังพลังงานที่เหมาะสมที่จำเป็นสำหรับการฟื้นฟูตัวดูดซับนั้นไม่สามารถกู้คืนได้อย่างมีประสิทธิภาพถ้าของแข็งถูกใช้งาน นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนผ่านเบดของแข็งอย่างช้าๆ และไม่มีประสิทธิภาพทำให้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูงในการทำให้ตัวดูดซับเย็นลงในระหว่างการดูดซับและการให้ความร้อนแก่ตัวดูดซับในระหว่างการคายซับ ทำหน้าที่สุดท้ายตัวดูดซับของแข็งที่ได้รับความสนใจมากมายมีเพียงการวัดภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม 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

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 และการแทนที่หมู่แอลคิลบนไดเอมีนแอมโรแมติกต่อความสามารถในการดักจับและอัตราการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ 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 โมลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกิโลกรัมตัวดักจับ ณ อุณหภูมิ 298 เคลวิน ซึ่งมีประสิทธิภาพเทียบได้กับการดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สารละลาย และจากการทดสอบคุณลักษณะตัวดูดซับด้วยเทคนิค XPS และ TGA พบว่าตัวดักจับมีเสถียรภาพในการดักจับและการผันกลับ ณ อุณหภูมิช่วง 298-360 เคลวิน

Khalil และคณะ^[32] ศึกษาการตรึงเอมีนสองชนิดได้แก่ โมโนเอทานอลามีน(MEA) และ 2-อะมิโน-2-เมทิล-1-โพรพานอล(AMP) บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ที่ทำจากกะลาปาล์มด้วยวิธีการฝังตัว พบว่า การตรึงเอมีนลงบนพื้นผิวทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง แต่กลับช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการตรึงเอมีนบนพื้นผิวเป็นการเพิ่มพื้นที่ว่างไว้ในการปฏิกิริยาระหว่างเอมีนและคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น โดยถ่านกัมมันต์ที่ตรึงด้วย MEA มีความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่ตรึงด้วย AMP จากการทดสอบด้วยเทคนิค FESEM พบว่า การตรึงเอมีนบนพื้นผิวทำให้รูพรุนภายในถ่านกัมมันต์ถูกปิดกั้น และการทดสอบการผันกลับของปฏิกิริยา พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสามารถเกิดการผันกลับได้ ด้วยการผ่านแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ที่อัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาที แต่กลับไม่เพียงพอที่ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการตรึงด้วยเอมีนเกิดการผันกลับได้ เนื่องจากมีพลังงานไม่เพียงพอต่อการสลายพันธะที่เกิดจากกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

Kamarudin และคณะ^[33] ศึกษาการตรึงเอมีนบนพื้นผิวของ MCM-41 โดยเปรียบเทียบระหว่างเอมีนสองชนิดได้แก่ โมโนเอทานอลามีน (MEA) และไดเอทานอลามีน (DEA) พบว่า การตรึงเอมีนบนพื้นผิวช่วยเพิ่มความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของตัวดักจับ แต่ขึ้นอยู่กับพื้นที่เข้าทำปฏิกิริยาของเอมีนในตัวดักจับ การตรึง MEA สามารถทำได้สูงสุดที่ร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีประสิทธิภาพในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการตรึงเอมีนด้วย DEA บนพื้นผิว MCM-41 การทดสอบการดักจับและการผันกลับโดยใช้วิธีสลับเปลี่ยนความดันแสดงให้เห็นถึงเสถียรภาพของตัวดูดซับแม้ผ่านการใช้งานมากกว่า 10 วัฏจักร

Belmabkhout และคณะ^[34] ศึกษาการดักจับของคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงกว้างโดยใช้ตัวดักจับซิลิกาที่มีรูพรุนระดับมีโซ ซึ่งประกอบด้วย MCM-41 ชนิดธรรมดา, MCM-41 ขยายรูพรุน (PE-MCM-41) และ PE-MCM-41 ปรับปรุงผิวด้วยไตรเอมีน (TRI-PE-MCM-41) จากการศึกษาไอโซเทอมการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และข้อมูลจลนพลศาสตร์แสดงถึงศักยภาพที่สูงของวัสดุ TRI-PE-MCM-41 สำหรับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในการแยกและการทำให้แก๊สบริสุทธิ์ และมีการเลือกจับคาร์บอนไดออกไซด์ของเพิ่มขึ้นในช่วงกว้างเมื่อเทียบกับซิลิกาที่มีรูพรุนระดับมีโซบริสุทธิ์ นอกจากนี้การดักจับสามารถผันกลับได้อย่างรวดเร็วและทนต่อความร้อนและความชื้นได้ดี

León และคณะ^[35] ศึกษาออกไซด์คู่ควบของอลูมิเนียมและแมกนีเซียมที่ได้มาจากการให้ความร้อนของไฮโดรทาลไซต์สำหรับทดสอบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการดูดซับนี้เกี่ยวข้องกับกาบการก่อตัวของสปีชีส์ยูนิเดนเทตคาร์บอนไดออกไซด์ (Unidentate CO₂) กับตัวดูดซับกับตำแหน่งการดูดซับอย่างแข็งแรง ในขณะที่ไบเดนเทต (Bidentate) และไบคาร์บอเนต (Bicarbonates) แบบพื้นผิวนำไปสู่การย้อนกลับของการดูดซับที่สูง โดยสรุปขั้นตอนการเตรียมที่นำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของไซต์ชนิดเบสไม่ได้นำไปสู่การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของความจุในการดูดซับ แต่นำไปสู่การนำกลับมาใช้ที่ยากขึ้นของตัวรองรับที่อิ่มตัว

Ebner และคณะ^[36] ศึกษาเอมีนที่เป็นของแข็งประกอบด้วย poly (ethylenimine) ตั้งเป็นพื้นผิวนบนซิลิกา CARIACT G10 ซึ่งเป็นสารดูดซับสำหรับการใช้งานในกระบวนการการดูดซับแบบความดันแกว่ง (PSA) สำหรับการจับคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงการเผาไหม้หลัง (postcombustion) อุณหภูมิที่ใช้อยู่ระหว่าง 4-10 องศาเซลเซียส ความดันบางส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่างร้อยละ 1.2-100 โดยปริมาตร โดยคงที่ความดันรวมที่ 1 บรรยากาศ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วงสภาวะที่แห้งถึงร้อยละ 2 โดยปริมาตรและจำนวนรอบของการดูดซับและคายซับอยู่ในช่วง 4-76 รอบ ผลการศึกษาพบว่า ตัวดูดซับเอมีนของแข็งนี้มีเสถียรภาพมากภายใต้ภาวะที่ศึกษา ใอน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำมีผลเพียงเล็กน้อยและผลย้อนกลับในทั้งอุณหภูมิศาสตร์และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ความจุทำงานของคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิคงที่อยู่ระหว่าง 0.25 และ 2.8 โมลต่อกิโลกรัม เพิ่มขึ้นกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น แสดงถึงค่าสูงสุดกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและการผลิตความร้อนของการดูดซับ/ปฏิกิริยาราว 50.0 กิโลจูลต่อโมล และถูกกำหนดว่าอุณหภูมิในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการ PSA อยู่ที่ประมาณ 80 องศาเซลเซียส ความดันบางส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ >10 กิโลปาสคาลและ 60-70 องศาเซลเซียส ความดันบางส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ <10 กิโลปาสคาล

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ แก๊สและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- 1) แมกนีเซียมทิวไนเตรตเฮกซะไฮเดรต หรือ Magnesium (II) nitrate hexahydrate ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 256.40 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท เมอร์ค (Merck)
- 2) อลูมิเนียมทริไนเตรตโนนาไฮเดรต หรือ Aluminium (III) nitrate nonahydrate ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 375.13 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท เมอร์ค (Merck)
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ 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) เตตระเอทิลเพนตามีน (Tetraethylenepentamine) หรือ TEPA ($(NH_2CH_2CH_2NHCH_2CH_2)_2NH$) น้ำหนักโมเลกุล เท่ากับ 189.30 กรัมต่อโมล ผลิตโดยบริษัท ซิกม่าอัลดริช จำกัด (Sigma-Aldrich Co. LLC.)

3.1.2 แก๊สที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ในฮีเลียม (10% carbon dioxide (CO_2) in helium (He)) ผลิตโดยบริษัท แพริกซ์แอร์ ประเทศไทย จำกัด (Praxair Thailand Co., Ltd.)
- 2) คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตร ในฮีเลียม (30% carbon dioxide (CO_2) in helium (He)) ผลิตโดยบริษัท แพริกซ์แอร์ ประเทศไทย จำกัด (Praxair Thailand Co., Ltd.)
- 3) ฮีเลียมบริสุทธิ์สูงพิเศษ (Ultra-high purity helium, He) 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) เตาไฟฟ้า (Electric oven)
- 9) เตาเผาอากาศนิ่ง (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 ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และ อลูมิเนียมทรีไนเตรตโนนาไฮเดรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) ที่อัตราส่วนโมลาร์ของแมกนีเซียมต่ออลูมิเนียม (Mg/Al molar ratio) เท่ากับ 3 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำต่อเกลือไนเตรต (W/N ratio) เท่ากับ 4.50 เตรียมสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ที่อัตราส่วนของคาร์บอเนตต่อผลรวมของอลูมิเนียมและแมกนีเซียม ($\text{CO}_3^{2-}/(\text{Al}+\text{Mg})$) เท่ากับ 0.67 อัตราส่วนของไฮดรอกไซด์ต่อผลรวมของอลูมิเนียมและแมกนีเซียม ($\text{OH}^-/(\text{Al}+\text{Mg})$) เท่ากับ 2.25 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมโซเดียมคาร์บอเนต (W/S ratio) เท่ากับ 8.32

นำสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนตไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียสและกวนอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) หยดสารละลายเกลือไนเตรตผสมของโลหะอย่างช้าๆ ลงในสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนต ทำการควบคุมอุณหภูมิและกวนต่อไปโดยทิ้งไว้เป็นเวลา 18 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาดังกล่าวให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำตะกอนที่ได้มากรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนในปริมาณมาก

3.2.1.2 ตัวรองรับไฮโดรทัลไซต์ไลต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่าง

นำสารประกอบไฮโดรทัลไซต์ไลต์ที่สังเคราะห์ได้ มาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ได้ของแข็งที่มีลักษณะเป็นผงสีขาว จากนั้นเตรียมสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในเอทานอลที่อัตราส่วนของแข็งต่อของเหลว 1:2 จากนั้นเติมตัวรองรับไฮโดรทัลไซต์ไลต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน 3 กรัมแล้วกวนผสมเป็นเวลา 30 นาทีที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่ออ ล้างต่างส่วนเกินออกด้วยเอทานอล 3-4 รอบแล้วทำให้แห้งโดยการอบที่ 60 องศาเซลเซียสภายใต้ความดันบรรยากาศเป็นเวลาหนึ่งคืน

3.2.1.3 ตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์ไลต์ที่ดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน

นำไฮโดรทัลไซต์ไลต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและปรับปรุงพื้นผิวด้วยต่าง 3 กรัมใส่ในกับเอทานอล 15 มิลลิลิตร แล้วทำการกวนผสมต่อเนื่องนาน 30 นาทีที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที จากนั้นเติมเตตระเอทิลีนเพนตามีน (TEPA) ในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก เท่ากับ 30 แล้วทำการกวนผสมต่ออีกเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปอบแห้งที่ภายใต้ความดันบรรยากาศอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหนึ่งคืน

3.2.2 การทดสอบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ดำเนินการโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งหรือคอลัมน์การดูดซับ ภายใต้ภาวะความดันบรรยากาศ ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สเข้าโดยใช้เครื่องควบคุมอัตราการไหล (AALBROG model: GFC 1715) และอุณหภูมิที่ใช้ดำเนินการควบคุมโดยใช้เทปเพิ่มความร้อนในการให้ความร้อนแก่ระบบ ตรวจจับอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ และตรวจวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ขาออก

ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Shimadzu GC-2014) ด้วยวิธีออนไลน์ ส่วนของคอลัมน์การดูดซับใช้ท่อควอตซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1/4 นิ้ว ความยาว 60 เซนติเมตร

การดำเนินการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะแห้ง บรรจุตัวดูดซับสังเคราะห์ 0.3-0.6 กรัมในคอลัมน์การดูดซับ ก่อนเริ่มทำการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะทำการให้ความร้อนเริ่มต้นเพื่อทำความสะอาดพื้นผิวของตัวดูดซับ โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 110 องศาเซลเซียส และคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 30 นาที พร้อมกับผ่านแก๊สฮีเลียมเข้าสู่คอลัมน์การดูดซับที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นลดอุณหภูมิของระบบการดูดซับจนถึงระดับที่ต้องการ ที่อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนแก๊สขาเข้าจากแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สผสมซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยฮีเลียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 10-30 โดยปริมาตร เข้าสู่ระบบ ทำการตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกทุกๆ 2 นาทีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี สิ้นสุดการดูดซับที่ภาวะสมดุล โดยความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาออกเท่ากับความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า การคำนวณหาความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยของมิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ ($\text{mg CO}_2/\text{g sorbent}$) 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 เมื่อเปลี่ยนแปลงปัจจัยหนึ่งที่อยู่ในระดับของปัจจัยอื่นๆ สี่ปัจจัยที่เป็นอิสระ ได้แก่ ปริมาณเอมีนในตัวดูดซับ อัตราส่วนน้ำหนักตัวดูดซับต่ออัตราเร็วสายบ่อน อุณหภูมิในการดักจับ และความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สผสมขาเข้า ในหน่วยวัดเดิมจะถูกเข้ารหัสในตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless variables) ซึ่งในแต่ละปัจจัยจะนำเสนอเป็นระดับต่ำ (-1), จุดกลาง (0) และระดับสูง (+1) และกำหนดให้ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่ใช้เป็นผลตอบสนอง (Responses) ปัจจัยอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองจะถูกจำกัดไว้ ได้แก่

ความดันในระบบ ณ ความดันบรรยากาศ และสภาวะการดูดซับในสภาวะแห้ง การทดสอบทั้งหมดได้ดำเนินการทดสอบซ้ำสามซ้ำและข้อมูลที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยของทั้งสาม

ในส่วนที่สองถัดมาเป็นการออกแบบพื้นที่ผิวตบอบสนอง FCCCD-RSM เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ขนาดของความแตกต่างในผลการทดลองที่ได้จากผลการประเมินถูกใช้ในการสะท้อนให้เห็นถึงความถูกต้องของแบบจำลองและรายงานผลในรูปแบบของร้อยละความผิดพลาด (Percentage error)

การทดสอบทั้งหมดได้ดำเนินการทำซ้ำสามซ้ำและข้อมูลเฉลี่ยวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปดีไซด์เอ็กซ์เพิร์ต 7.0 (Design-Expert 7.0 software package, Stat Ease Inc. Minneapolis, USA) รวมทั้งการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือ 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”

3.3 การวิเคราะห์คุณลักษณะตัวดูดซับ

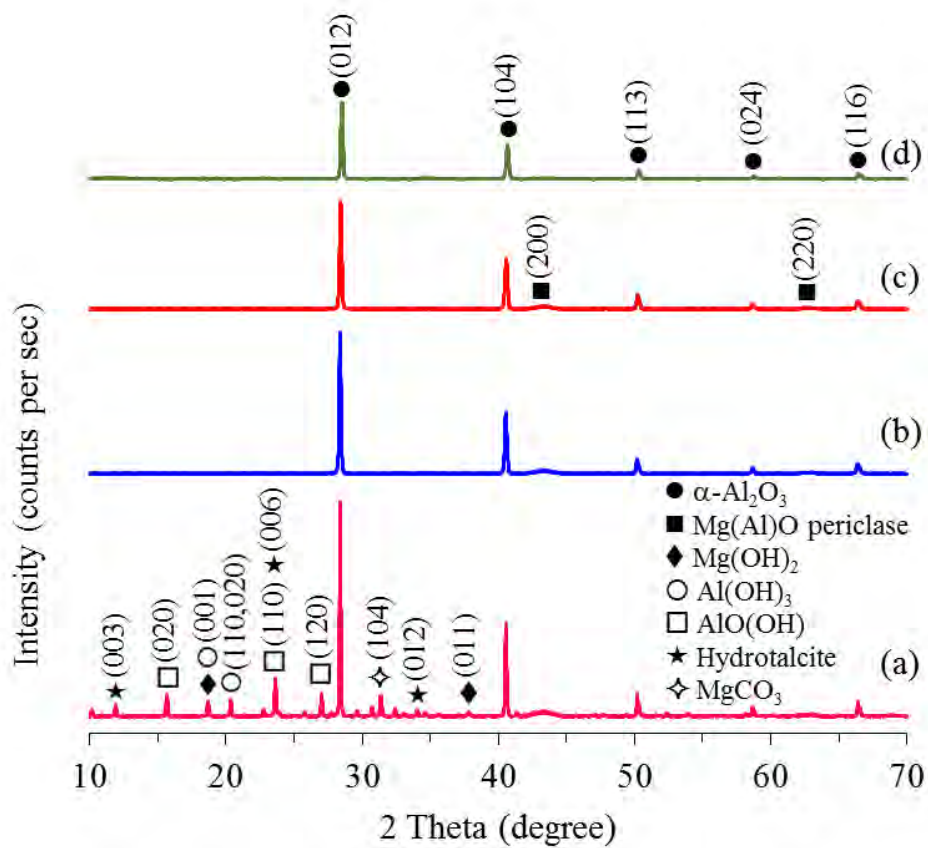
ตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ที่ดัดแปรด้วยเตตระเอทิลีนเพนตามีน จะถูกวิเคราะห์

- หมู่ฟังก์ชันบนตัวดูดซับด้วยฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคป (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)
- ปริมาณเอมีนในตัวดูดซับด้วยซีเอชเอ็นอนาไลเซอร์ (CHN analyzer)
- โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer, XRD)
- พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนด้วยเทคนิคบีอีที (The Brunauer-Emmett-Teller, BET)
- พฤติกรรมการสลายตัวของตัวดูดซับด้วยเทคนิคทีจีเอ (Thermogravimetric analysis, TGA)

บทที่ 4

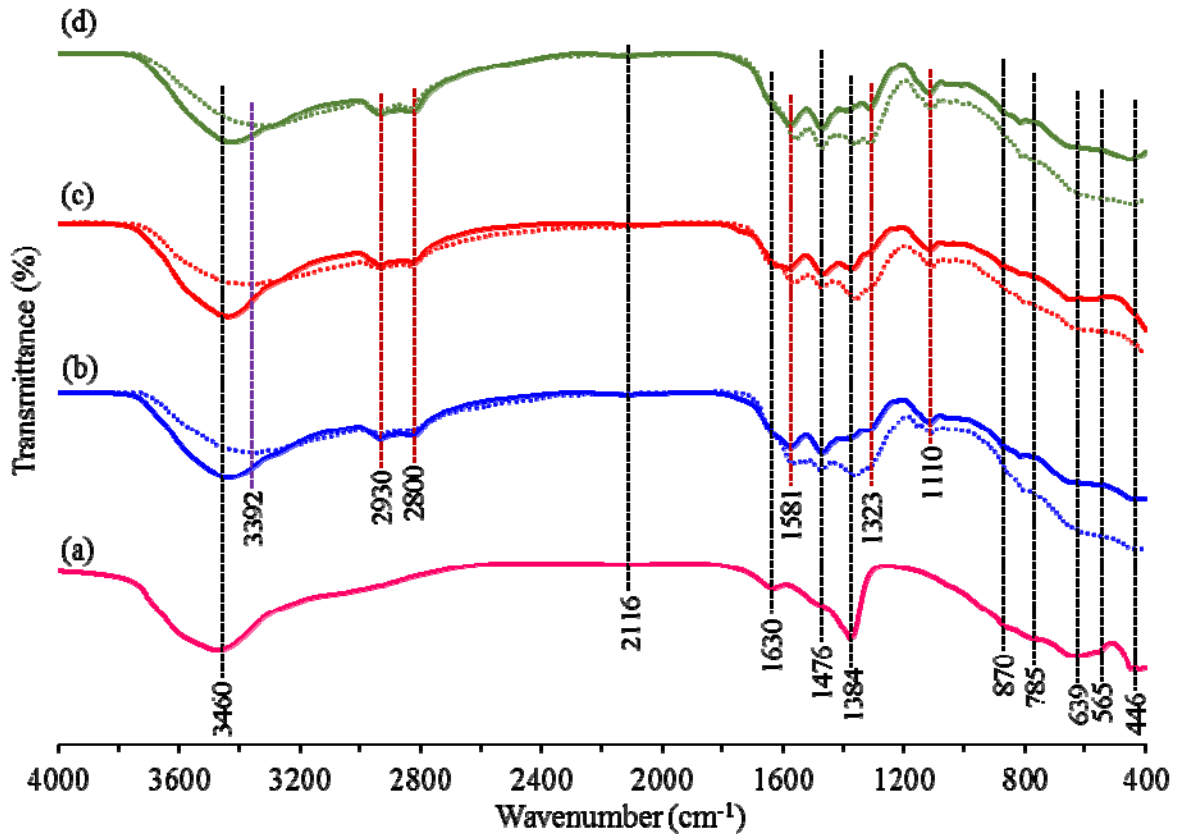
ผลและอภิปรายผลการวิจัย

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ (Sorbent characterization)



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและต่าง (b) เติตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ (c) เติตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 35 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ และ (d) เติตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์

จากการทดสอบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ ที่ปริมาณร้อยละโดยมวลของเตตระเอทิลีนเพนตะมีนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าพีคของแอลฟาอะลูมิเนียมออกไซด์ ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนหรือ 2 Theta เท่ากับ 28.38 40.55 50.20 58.62 และ 66.35 องศา โดยมีระนาบผลึกเป็น (012) (104) (113) (024) และ (116) ตามลำดับ พีคของเพอริเคลสแมกนีเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ (Mg(Al)O periclase) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนเท่ากับ 43.59 และ 62.93 องศา โดยมีระนาบผลึกเป็น (200) และ (220) ตามลำดับ พีคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)₂) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนเท่ากับ 18.67 และ 37.84 องศา โดยมีระนาบผลึกเป็น (001) และ (011) ตามลำดับ พีคของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนเท่ากับ 18.67 และ 20.34 องศา โดยมีระนาบผลึกเป็น (001) และ (110,020) ตามลำดับ พีคของอะลูมิเนียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (AlO(OH)) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนเท่ากับ 15.65 23.62 และ 27.01 องศา โดยมีระนาบผลึกเป็น (020) (110) และ (120) ตามลำดับ พีคของไฮโดรทาลไซต์ (Hydrotalcite) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนเท่ากับ 11.89 23.62 และ 34.62 องศา โดยมีระนาบผลึกเป็น (003) (006) และ (012) ตามลำดับ และพีคของแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) ปรากฏที่องศาการเลี้ยวเบนเท่ากับ 31.37 องศา โดยมีระนาบผลึกเป็น (104) เมื่อทำการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ พบว่า ไม่ปรากฏพีคของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ไฮดรอกไซด์ ไฮโดรทาลไซต์ และแมกนีเซียมคาร์บอเนต และความสูงของพีคทั้งแอลฟาอะลูมิเนียมออกไซด์และเพอริเคลสของแมกนีเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน จากร้อยละ 30 โดยมวล (รูปที่ 4.1b) ไปเป็น ร้อยละ 35 และ 40 โดยมวล ตามลำดับ (รูปที่ 4.1c-4.1d) พบว่า ความสูงของพีคทั้งแอลฟาอะลูมิเนียมออกไซด์และเพอริเคลสของแมกนีเซียมอะลูมิเนียมออกไซด์ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ซึ่งกล่าวได้ว่าการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงในไฮโดรทาลไซต์ และการเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับมีส่วนทำให้เกิดการบดบังอนุภาคผลึกของทั้งสององค์ประกอบมากยิ่งขึ้น จากตำแหน่งพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า ไม่มีการเลื่อนของตำแหน่งพีคในหลายๆ พีคที่ปรากฏ แสดงว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกเนื่องจากการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์



รูปที่ 4.2 รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดด้วยเทคนิคเอฟทีไออาร์ของ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและต่าง (b) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 35 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ และ (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ (เส้นทึบ หมายถึง ตัวดูดซับก่อนใช้ในการดูดซับ และ เส้นประ หมายถึง ตัวดูดซับหลังผ่านการดูดซับแล้ว)

รูปแบบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์และเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับ ร้อยละ 30 35 และ 40 โดยมวล แสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับไฮโดรทาลไซต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2a (เส้นทึบ) พบว่า พบพีคการดูดกลืนที่ 3460 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหด (O-H stretching vibration) ของโมเลกุลน้ำที่ผิวและระหว่างชั้นบลูไซต์ของไฮโดรทาลไซต์ การดูดกลืนที่ 1630 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอ (HOH bending vibration) ของโมเลกุล

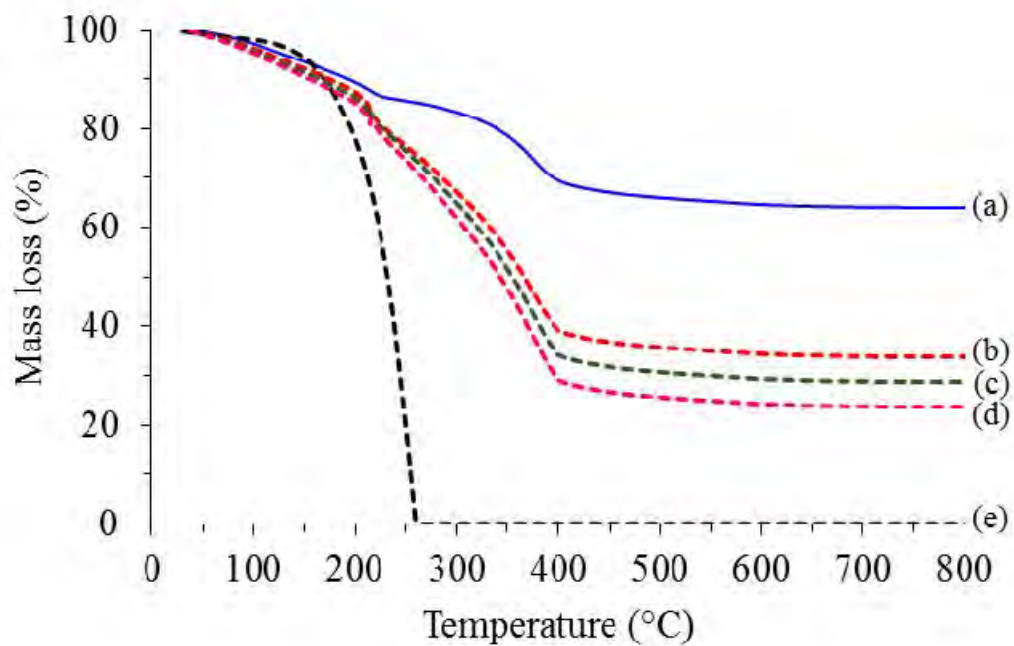
น้ำระหว่างชั้น^[37] การดูดกลืนที่ 1476 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ คาร์บอนเตแอนไอออน^[38] การดูดกลืนที่ 1383 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบ สมดุลต่ำกว่า (Lowering of the symmetry) ของคาร์บอนเตแอนไอออน จากระนาบ D_{3h} ไประนาบ C_{2v} และการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอของคาร์บอนเตแอนไอออน ที่ 870 เซนติเมตร⁻¹ การดูดกลืนเนื่องจากการสั่นของ Al-O or Mg-Al-O ในชั้นบลูไซต์ไลต์ที่ 785 เซนติเมตร⁻¹^[39] นอกจากนี้ การดูดกลืนที่ 639 565 และ 446 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอของคาร์บอนเตแอนไอออน การสั่นแบบยืดหดและแบบงอของ M-O M-O-M และ O-M-O และการสั่นของ Mg-OH Al-OH และ Zn-OH จากโครงสร้างออกตะฮีดรอลของไฮโดรทาลไซต์ ตามลำดับ ซึ่งการดูดกลืนที่สองพีคสุดท้าย เป็นเอกลักษณ์ของชั้นบลูไซต์ไลต์

เมื่อพิจารณาการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 35 และ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2b-4.2d (เส้นทึบ) พบว่า พีคการดูดกลืนของเตตระเอทิลีนเพนตะมีนปรากฏขึ้น^[40] คือ การดูดกลืนที่ 3345 และ 3270 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ N-H แบบไม่สมมาตรและสมมาตรของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ตามลำดับ การดูดกลืนที่ 2930 และ 2800 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ C-H แบบไม่สมมาตรและ N-CH₂ ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ตามลำดับ การดูดกลืนที่ 1581 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบงอเข้า (Scissoring) ของ N-H ที่ตำแหน่ง NH₂ ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน การดูดกลืนที่ 1323 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบเบนจากระนาบ (Wagging) ของ C-H ที่ตำแหน่ง CH₂ ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน และการดูดกลืนที่ 1110 เซนติเมตร⁻¹ เป็นการดูดกลืนเนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ C-N ที่ตำแหน่ง R-N-R ของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน

เมื่อพิจารณาตัวดูดซับหลังการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ แสดงในรูปที่ 4.2b-4.2d (เส้นประ) พบว่า พีคการดูดกลืนของโมเลกุลน้ำที่ผิว และระหว่างชั้นบลูไซต์ของไฮโดรทาลไซต์ที่ 3460 เซนติเมตร⁻¹ มีขนาดเล็กลง แสดงว่าน้ำบางส่วนได้ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นไบคาร์บอเนต อีกทั้งพีคการดูดกลืนในช่วง 1200-1600 เซนติเมตร⁻¹ มีความสูงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับตัวดูดซับก่อนการดูดซับ เนื่องจากมีคาร์บาเมตเกิดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4.1 และเกิดการลดลงของพีคที่ 3392 เซนติเมตร⁻¹ เนื่องจากการสั่นแบบยืดหดของ NH

ตารางที่ 4.1 การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของคาร์บาเมตและไบคาร์บอเนตบนตัวดูดซับ

Wavenumber (cm-1)	Assignment	Reference
1323, 1384	symmetric CO ₂ ⁻ stretching	[41-43]
1476	symmetric NH ₃ ⁺ deformation	[42-44]
1581	asymmetric CO ₂ ⁻ stretching	[43,44]
1630	NH ₃ ⁺ deformation	[42]
	symmetric C–O stretching of bicarbonate	[45]
3392	loss band NH stretching	[44]



รูปที่ 4.3 รูปแบบการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคทีจีเอของ (a) ไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและต่าง (b) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ (c) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 35 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ (d) เตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ และ (e) เตตระเอทิลีนเพนตะมีนบริสุทธิ์

จากการทดสอบรูปแบบการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคที่จีเอชของตัวดูดซับที่ปริมาณร้อยละโดยมวลของเตตระเอทิลีนเพนตะมีนต่างๆ รวมถึงไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและต่าง และเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบริสุทธิ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 พบว่า การสลายตัวทางความร้อนของไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อน (ในรูปที่ 4.3a) มีการสลายตัวอยู่สองช่วง คือ ช่วงแรก ร้อยละ 16 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 215 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสูญเสียโมเลกุลน้ำจากพื้นผิวภายนอกและภายในรูพรุนของไฮโดรทาลไซต์ และการสลายตัวในช่วงที่สอง ร้อยละ 18 โดยมวล ในช่วงอุณหภูมิ 215-500 องศาเซลเซียส เนื่องจากการกำจัดหมู่ไฮดรอกซิลออกจากระหว่างชั้น (Interlayer) ของไฮโดรทาลไซต์

สำหรับการสลายตัวของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ที่ปริมาณของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 35 และ 40 โดยมวล (แสดงในรูปที่ 4.3b-4.3d) มีการสลายตัวอยู่สองช่วง คือ ช่วงแรก ประมาณร้อยละ 18 โดยมวล สำหรับทุกปริมาณของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ที่อุณหภูมิ 215 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสูญเสียโมเลกุลน้ำจากพื้นผิวภายนอกและภายในรูพรุนของไฮโดรทาลไซต์และน้ำภายในเตตระเอทิลีนเพนตะมีน และการสลายตัวในช่วงที่สอง ประมาณร้อยละ 47 51 และ 56 โดยมวล สำหรับปริมาณของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 30 35 และ 40 โดยมวล ตามลำดับในช่วงอุณหภูมิ 215-500 องศาเซลเซียส เนื่องจากการกำจัดหมู่ไฮดรอกซิลออกจากระหว่างชั้น (Interlayer) ของไฮโดรทาลไซต์และการสลายตัวของเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไซต์ และสำหรับการสลายตัวของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน (แสดงในรูปที่ 4.3e) พบการสลายสองช่วง คือ ประมาณร้อยละ 3 โดยมวล ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสูญเสียน้ำภายในเตตระเอทิลีนเพนตะมีน และในช่วงที่สอง ประมาณร้อยละ 97 โดยมวล ในช่วงอุณหภูมิ 120-260 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสลายตัวของเตตระเอทิลีนเพนตะมีน

จากการวิเคราะห์หาร้อยละองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน เพื่อตรวจสอบปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับด้วยเทคนิค CHN analysis พบว่า ตัวดูดซับมีปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้เริ่มต้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ตัวดูดซับที่เตรียมมีปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนในตัวดูดซับตามจริง ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับ

ตัวดูดซับ	ปริมาณ TEPA ^a (ร้อยละโดยมวล)	S_{BET} ^b (ตาราง เมตรต่อ กรัม)	V_p ^b (ลูกบาศก์ เซนติเมตร ต่อกรัม)	D_p ^b (อังสตรอม)	Amine surface density (หมู่ต่อตารางนาโนเมตร)
ไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการ กระตุ้นด้วยความร้อนและ ต่าง	-	165.2	0.574	124.9	-
TEPA ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์	28.1	38.2	0.120	46.9	23.4
TEPA ร้อยละ 35 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์	34.6	31.0	0.060	38.9	35.5
TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์	39.7	21.8	0.061	37.0	58.0

^a ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง CHN analyzer

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

เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ก่อนการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ พบว่า ไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและต่างมีพื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน เท่ากับ 165.2 ตารางเมตรต่อกรัม 0.574 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 124.9 อังสตรอม ตามลำดับ และเมื่อเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ ที่ปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนร้อยละ 30 35 และ 40 โดยมวล พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุน ลดลงเป็น 38.2 ตารางเมตรต่อกรัม 0.120 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 46.9 อังสตรอม ตามลำดับ สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ 31.0 ตารางเมตรต่อกรัม 0.060 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 38.9 อังสตรอม ตามลำดับ สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 35 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ และ 21.8 ตารางเมตรต่อกรัม 0.061 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 37.0 อังสตรอม ตามลำดับ สำหรับตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ จะเห็นได้ว่าการเติมเตตระเอทิลีนเพนตะมีนลงบนไฮโดรทาลไซต์ และการเพิ่มปริมาณเตตระเอทิลีนเพนตะมีนทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะบีอีที ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรู

พรมมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาที่ความหนาแน่นพื้นผิวของเอมีน (Amine surface density) พบว่า ตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ มีค่าความหนาแน่นพื้นผิวของเอมีนสูงที่สุดที่ 58.0 หมู่ต่อตารางนาโนเมตร รองลงมาคือ ตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 35 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ และตัวดูดซับ TEPA ร้อยละ 30 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ที่ 35.5 และ 23.4 หมู่ต่อตารางนาโนเมตร ตามลำดับ

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

เพื่อที่จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียม **ตารางที่ 4.3** แสดงเมทริกซ์ของสี่ปัจจัยในรูปค่าที่เข้ารหัสและผลตอบสนองที่ผ่านการออกแบบการทดลองด้วย 2^4 แฟคทอเรียลแบบเต็มรูปแบบ (Full 2^4 factorial design) โดยมีการเพิ่มจุดกลางเข้าไปสามจุด เพื่อตรวจสอบความมี ส่วนโค้งของโมเดลที่ออกแบบ ข้อมูลจะผ่านการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สำหรับผลกระทบมาตรฐาน (Standardized effect) ของปัจจัยและอันตรกิริยาของตัวแปร รวมถึงค่าเอฟ (F -value) และค่าพี (P -value) ของผลกระทบในโมเดลการออกแบบที่ได้ ซึ่งค่าค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียลจะแสดงใน **ตารางที่ 4.4**

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรการทดลองที่ถูกเข้ารหัสสำหรับการออกแบบ 2⁴ แฟคทอเรียล โดยทดลอง 16 การทดลอง และเพิ่ม 3 จุดกึ่งกลาง

ลำดับ มาตรฐาน	ลำดับ ทดลอง	A ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ (ร้อยละโดย มวล)	B อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	C อัตราส่วน W/F (กรัม วินาทีต่อ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	D ความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดย ปริมาตร)	ค่าความสามารถ ในการดูดซับ (มิลลิโมลต่อ กรัม)
1	10	-1	-1	-1	-1	2.03
2	17	1	-1	-1	-1	2.31
3	5	-1	+1	-1	-1	2.59
4	14	1	+1	-1	-1	3.01
5	13	-1	-1	+1	-1	3.27
6	2	1	-1	+1	-1	3.41
7	7	-1	+1	+1	-1	3.44
8	12	+1	+1	+1	-1	3.58
9	1	-1	-1	-1	+1	2.96
10	19	+1	-1	-1	+1	4.21
11	9	-1	1	-1	+1	3.78
12	3	1	1	-1	+1	4.79
13	11	-1	-1	1	+1	5.29
14	15	1	-1	1	+1	5.36
15	4	-1	1	1	+1	5.81
16	8	1	1	1	+1	6.14
17	6	0	0	0	0	4.87
18	16	0	0	0	0	4.87
19	18	0	0	0	0	4.89

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล

ตัวแปร	ค่าเข้ารหัส (Coded values)			หน่วย
	ค่าสูง	ค่ากลาง	ค่าต่ำ	
	(+1)	(0)	(-1)	
A: ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ	0.3	0.45	0.6	ร้อยละโดยมวล
B: อุณหภูมิ	40	60	80	องศาเซลเซียส
C: อัตราส่วน W/F	0.9	1.35	1.8	กรัม วินาทีต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร
D: ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์	10	20	30	ร้อยละโดยปริมาตร

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พิจารณาจากการทดสอบค่าเอฟของฟิชเชอร์ (Fisher's F-test) และค่าความน่าจะเป็นของตัวแปรหลักทั้งสิ้น (ได้แก่ (1) ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ หรือตัวแปร A (2) อุณหภูมิ หรือตัวแปร B (3) อัตราส่วน W/F หรือตัวแปร C และ (4) ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือตัวแปร D) และอันตรกิริยาของตัวแปร โดยสรุปไว้ใน **ตารางที่ 4.5** เมื่อทำการทดสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย (Lack of fit) ว่ามีความเหมาะสมกับข้อมูลการทดลองหรือไม่ พบว่า ที่ค่าเอฟ เท่ากับ 10.16 แสดงถึงไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับค่าความผิดพลาดบริสุทธิ์ (Pure error) ที่ได้ตัดเทอมที่ไม่สำคัญออกจากโมเดล นอกจากนี้จากค่า R^2 ที่บ่งบอกถึงค่าที่เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่ได้จากการทำนาย มีค่าเท่ากับ 0.9999 และค่า Adj. R^2 (มีค่าเท่ากับ 0.9995) มีค่าใกล้เคียงกันกับค่า R^2 ซึ่งบ่งบอกว่าไม่มีปัจจัยหรืออันตรกิริยาที่ไม่มีความสำคัญรวมอยู่ในโมเดล

ความสำคัญของแต่ละปัจจัยและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในเทอมของร้อยละความผันแปร (Percent Contribution) ของแต่ละปัจจัย (แสดงใน **ตารางที่ 4.5**) ปัจจัยหลักมีส่วนที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 81.83 ในขณะที่ร้อยละความผันแปรของอันตรกิริยาของปัจจัยอยู่ที่ 18.17 ร้อยละความผันแปรเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ D (ร้อยละ 50.90) อัตราส่วน W/F หรือผลกระทบ C (ร้อยละ 26.60) อุณหภูมิหรือ

ผลกระทบ B (ร้อยละ 4.32) ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับหรือผลกระทบ A (ร้อยละ 3.14) อันตรกิริยาของอัตราส่วน W/F และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ CD (ร้อยละ 2.24) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและอัตราส่วน W/F หรือผลกระทบ AC (ร้อยละ 1.23) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ AD (ร้อยละ 0.67) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ อัตราส่วน W/F และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ ACD (ร้อยละ 0.49) อันตรกิริยาของอุณหภูมิและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ BD (ร้อยละ 0.28) อันตรกิริยาของอุณหภูมิและอัตราส่วน W/F หรือผลกระทบ BC (ร้อยละ 0.25) อันตรกิริยาของอุณหภูมิ อัตราส่วน W/F และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ BCD (ร้อยละ 0.16) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ อุณหภูมิ อัตราส่วน W/F และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์หรือผลกระทบ ABCD (ร้อยละ 0.10) และ อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ อุณหภูมิ และอัตราส่วน W/F หรือผลกระทบ ABC (ร้อยละ 0.03) ตามลำดับ ซึ่งค่าที่อยู่ในวงเล็บ คือ ค่าร้อยละความผันแปร นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ค่า *P*-value ของความมีส่วนโค้งหรือ Curvature พบว่า มีความสำคัญอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งทำให้ทราบว่าการเส้นตรงไม่เพียงพอต่อการทำนายผลตอบสนองอย่างค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

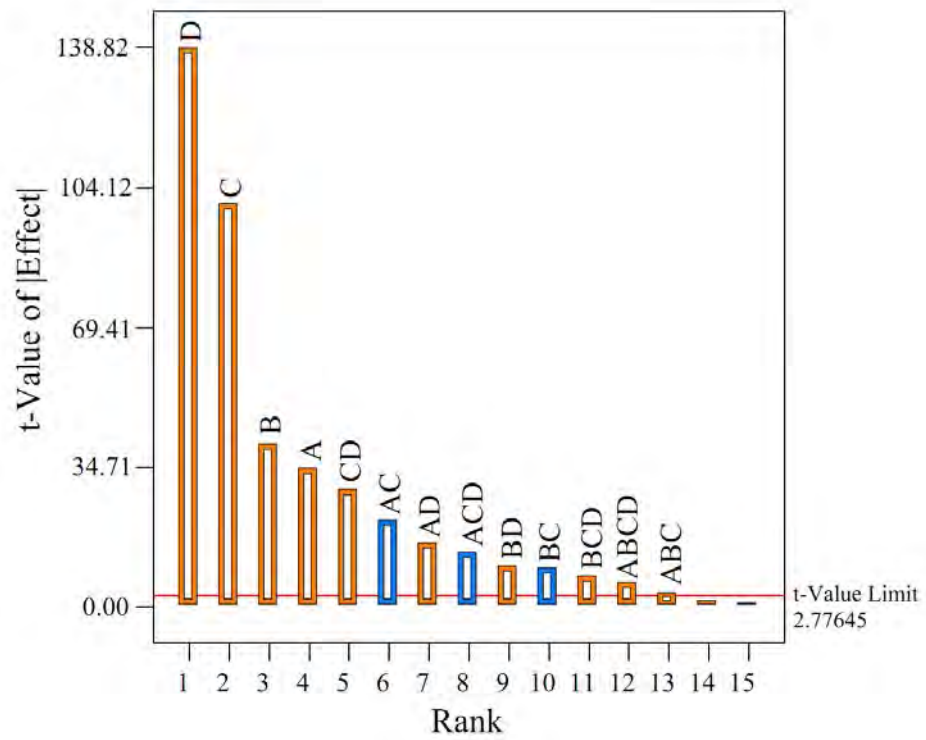
เพื่อประเมินระดับความสำคัญของตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนอง **รูปที่ 4.4** แสดงแผนภูมิพาเรโตที่พล็อตระหว่างตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรกับค่า *t*-value ของผลกระทบสัมบูรณ์ ซึ่งค่า *t*-value ได้มาจากการหารผลกระทบเชิงตัวเลข (Numerical effect) ด้วยค่าความผิดพลาดมาตรฐาน (Standard error) ที่เกี่ยวข้อง และความสูงของแต่ละแถบในแนวตั้ง ใน**รูปที่ 4.4** เป็นค่าของ *t*-value โดยผลกระทบหรือตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรที่มีค่า *t*-value สูงกว่าค่าจำกัด *t*-value (*t*-value limit) ที่ค่า 2.77645 แสดงว่าผลกระทบนั้นมีส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ความสูงของแถบยังบ่งบอกถึงระดับความสำคัญของตัวแปรหลักและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนอง ซึ่งเรียงลำดับจากมากไปหาน้อย ดังแสดงใน**รูปที่ 4.4** เรียงจากซ้ายไปขวา ตามลำดับ โดยแถบสีส้มและแถบสีฟ้าแสดงถึงผลกระทบในเชิงบวกและผลกระทบในเชิงลบ ตามลำดับ

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

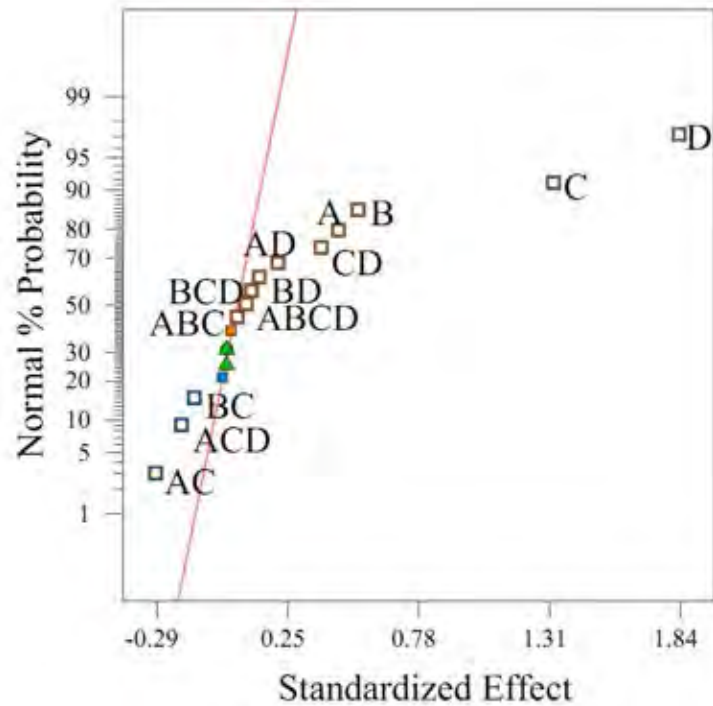
Source ^a	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-value	P-value ^b	Percent Contribution
<i>Model</i>	24.010	13	1.850	2632.23	< 0.0001	
<i>A</i>	0.830	1	0.830	1187.48	< 0.0001	3.14
<i>B</i>	1.150	1	1.150	1637.23	< 0.0001	4.32
<i>C</i>	7.060	1	7.060	10061.12	< 0.0001	26.60
<i>D</i>	13.520	1	13.520	19271.29	< 0.0001	50.90
<i>AC</i>	0.330	1	0.330	465.67	< 0.0001	1.23
<i>AD</i>	0.180	1	0.180	253.07	< 0.0001	0.67
<i>BC</i>	0.066	1	0.066	94.15	0.0006	0.25
<i>BD</i>	0.073	1	0.073	104.02	0.0005	0.28
<i>CD</i>	0.600	1	0.600	849.53	< 0.0001	2.24
<i>ABC</i>	0.008	1	0.008	11.86	0.0262	0.03
<i>ACD</i>	0.130	1	0.130	185.33	0.0002	0.49
<i>BCD</i>	0.042	1	0.042	60.16	0.0015	0.16
<i>ABCD</i>	0.027	1	0.027	38.15	0.0035	0.10
Curvature	2.550	1	2.550	3640.49	< 0.0001	9.61
Residual	0.003	4	0.001			
<i>Lack of Fit</i>	0.003	2	0.001	10.16	0.0896	0.00
<i>Pure Error</i>	0.000	2	0.000			0.00
Total	26.56	18				
R ²	0.9999	C.V. %		0.66		
Adj. R ²	0.9995	Adeq. Precision		175.367		

^a The factor codes (A, B, C, and D) are as defined in Table 2 Codes for the factors

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



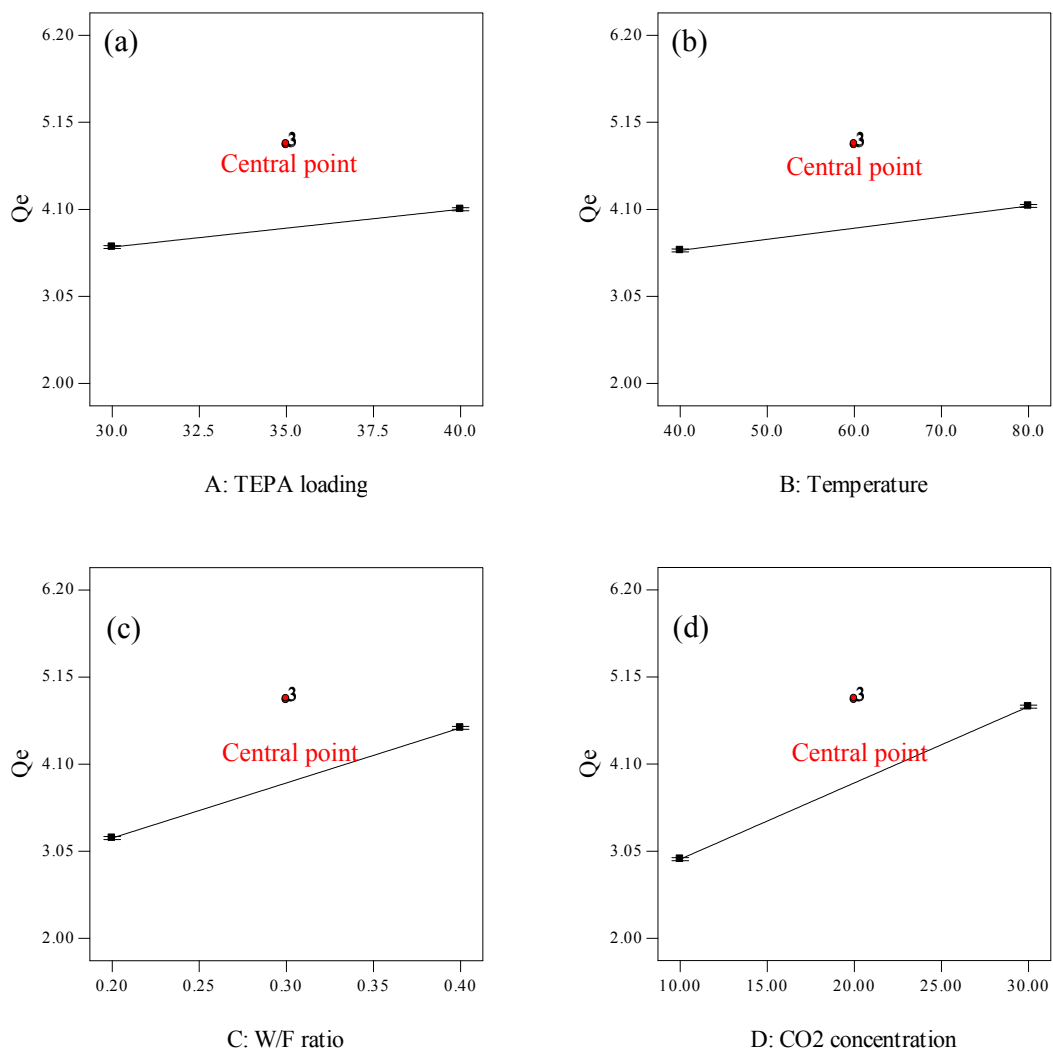
รูปที่ 4.4 แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัส แสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.5 พล็อตความน่าจะเป็นปกติ (Normal probability plot) ของตัวแปร 4 ตัวแปร (ตัวแปร A-E) และอันตรกิริยาของตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ซึ่งตัวแปรเข้ารหัสแสดงในตารางที่ 4.4

พล็อตความน่าจะเป็นปกติของผลกระทบเพื่อประเมินความสำคัญของแต่ละตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปร แสดงในรูปที่ 4.5 จากรูปแสดงให้เห็นว่ามีเพียงอันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและอุณหภูมิ (เทอม AB) และอันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ อุณหภูมิและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (เทอม ABD) อยู่ตามแนวเส้นตรงซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลกระทบเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะไม่มีอย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถละทิ้งจากโมเดลได้ ในทางกลับกันผลกระทบที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญจะเบนออกนอกแนวเส้นตรง ซึ่งผลกระทบใดมีแนวโน้มที่จะเบนออกนอกเส้นมาก ยิ่งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองมากเช่นกัน ดังนั้นตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ D C B A CD AC AD ACD BD BC BCD ABCD และ ABC ซึ่งรายละเอียดตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรแสดงในตารางที่ 4.4 ตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่เบนออกจากเส้นตรงที่มีค่าความน่าจะเป็นปกติ น้อยกว่า ร้อยละ 20 ได้แก่ AC ACD และ BC ส่งผลต่อ

ผลตอบสนอง (หรือค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์) ในเชิงลบ (Negative effects) ในขณะที่ตัวแปรและอันตรกิริยาของตัวแปรที่เบนออกจากเส้นตรงที่มีค่าความน่าจะเป็นปกติ มากกว่าร้อยละ 20 ได้แก่ D C B A CD AD BD BCD ABCD และ ABC ส่งผลต่อผลตอบสนองในเชิงบวก (Positive effects) โดยข้อมูลดังกล่าวสนับสนุนผลการทดลองและผลทางทฤษฎี ดังแสดงในแผนภูมิ พารेटโตและการวิเคราะห์ความแปรปรวน



รูปที่ 4.6 พล็อตหนึ่งตัวแปร (One factor plots) ของตัวแปร 4 ตัวแปร สำหรับการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล

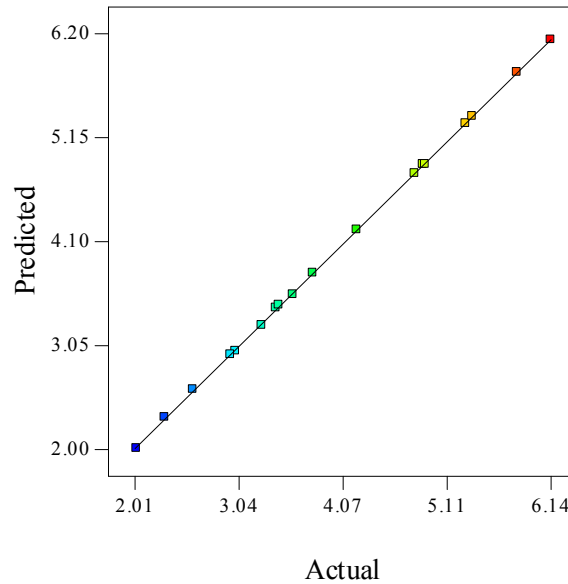
จากผลกระทบของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6a พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 3.64 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับร้อยละ 30 โดยมวล โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับร้อยละ 35 โดยมวล และมีค่าลดลงเป็น 4.10 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับร้อยละ 40 โดยมวล เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิในการดูดซับ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วน W/F เท่ากับ 1.35 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

จากผลกระทบของอุณหภูมิในการดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 4.6b พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 3.61 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อุณหภูมิในการดูดซับ 40 องศาเซลเซียส โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อุณหภูมิในการดูดซับ 60 องศาเซลเซียส และมีค่าลดลงเป็น 4.14 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อุณหภูมิในการดูดซับ 80 องศาเซลเซียส เมื่อทดสอบที่ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับร้อยละ 35 โดยมวล อัตราส่วน W/F เท่ากับ 1.35 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

จากผลกระทบของอัตราส่วน W/F ดังแสดงในรูปที่ 4.6c พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 3.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อัตราส่วน W/F เท่ากับ 0.90 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อัตราส่วน W/F เท่ากับ 1.35 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีค่าลดลงเป็น 4.54 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ อัตราส่วน W/F เท่ากับ 1.80 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อทดสอบที่ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับร้อยละ 35 โดยมวล อุณหภูมิในการดูดซับ 60 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

จากผลกระทบของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.6d พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 2.95 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.87 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 20 โดยปริมาตร และมีค่าลดลงเป็น 4.79 มิลลิกรัมต่อกรัม ณ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 30 โดยปริมาตร เมื่อทดสอบที่ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับร้อยละ 35 โดยมวล อุณหภูมิในการดูดซับ 60 องศาเซลเซียส และอัตราส่วน W/F เท่ากับ 1.35 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อเพิ่มระดับปัจจัยจากระดับต่ำ (Low level) ไปเป็นระดับสูง (High level) พบว่า ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงของความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับต่ำเทียบเคียงกับระดับสูงของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ มีความแตกต่างกัน (0.46) น้อยกว่ากรณีของอุณหภูมิในการดูดซับ (0.53) อัตราส่วน W/F (1.33) และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (1.84) ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างนี้บ่งบอกถึงความมีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ยิ่งมีความแตกต่างมากก็จะมีผลกระทบมาก ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงในระดับที่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญกับความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลของแผนภูมิพาเรโต (รูปที่ 4.4) พล็อตความน่าจะเป็นปกติของสี่ปัจจัย (รูปที่ 4.5) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตารางที่ 4.5 นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า การที่จุดกึ่งกลาง (Central points) ไม่ถูกตัดผ่านด้วยเส้นตรงบ่งบอกถึงความมีส่วนโค้งมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนอง ทำให้ทราบว่าสมการเส้นตรงที่ได้จากการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียลไม่เพียงพอต่อการทำนายผลตอบสนอง และรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย พบว่า จุดทุกจุดอยู่ในแนวเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โมเดลที่ได้มีความสมบูรณ์ ไม่ได้ละทิ้งผลกระทบที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนองและการวิเคราะห์นี้ประสบความสำเร็จเป็นที่ยอมรับได้



รูปที่ 4.7 พล็อตระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองจริงและค่าที่ได้จากการทำนาย

4.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (FCCC-RSM analysis)

เนื่องจากความมีส่วนโค้งในโมเดลที่พบจากการออกแบบ 2^4 แฟคทอเรียล ดังนั้นในส่วนถัดมา จะทำการการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเพื่อให้โมเดลมีความถูกต้องมากขึ้นและสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับที่เตรียม โดยกำหนดเงื่อนไขการดำเนินการที่เหมาะสมในการดูดซับภายใต้อิทธิพลของผลกระทบหลักทั้งสี่ ได้แก่ (1) ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ หรือตัวแปร A (2) อุณหภูมิ หรือตัวแปร B (3) อัตราส่วน W/F หรือตัวแปร C และ (4) ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือตัวแปร D) ซึ่งเมทริกซ์ของการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6 สมการพื้นผิวตอบสนองของค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเทอมของปัจจัยเข้ารหัส (Coded factors) แสดงในสมการ (1)

$$Q_e = +4.88 + 0.24A + 0.25B + 0.66C + 0.91D - 0.14AC + 0.11AD + 0.19CD - 0.79A^2 + 0.46C^2 - 0.68D^2 \quad (1)$$

ตารางที่ 4.6 ตัวแปรการทดลองที่ถูกเข้ารหัสสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง FCCCD-RSM โดย
ทดลอง 24 การทดลองและเพิ่ม 4 จุดกึ่งกลาง

ลำดับ มาตรฐาน	ลำดับ ทดลอง	A ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ (ร้อยละโดย มวล)	B อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	C อัตราส่วน W/F (กรัม วินาทีต่อ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	D ความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดย ปริมาตร)	ค่า ความสามารถ ในการดูดซับ (มิลลิโมลต่อ กรัม)
1	25	-1	-1	-1	-1	2.03
2	28	+1	-1	-1	-1	2.31
3	5	-1	+1	-1	-1	2.59
4	15	+1	+1	-1	-1	3.01
5	11	-1	-1	+1	-1	3.27
6	24	+1	-1	+1	-1	3.41
7	13	-1	+1	+1	-1	3.44
8	12	+1	+1	+1	-1	3.58
9	16	-1	-1	-1	+1	2.96
10	19	+1	-1	-1	+1	4.21
11	14	-1	+1	-1	+1	3.78
12	7	+1	+1	-1	+1	4.79
13	4	-1	-1	+1	+1	5.29
14	6	+1	-1	+1	+1	5.36
15	8	-1	+1	+1	+1	5.80
16	17	+1	+1	+1	+1	6.14
17	1	-1	0	0	0	3.78
18	26	+1	0	0	0	4.39
19	22	0	-1	0	0	4.76
20	21	0	+1	0	0	5.06

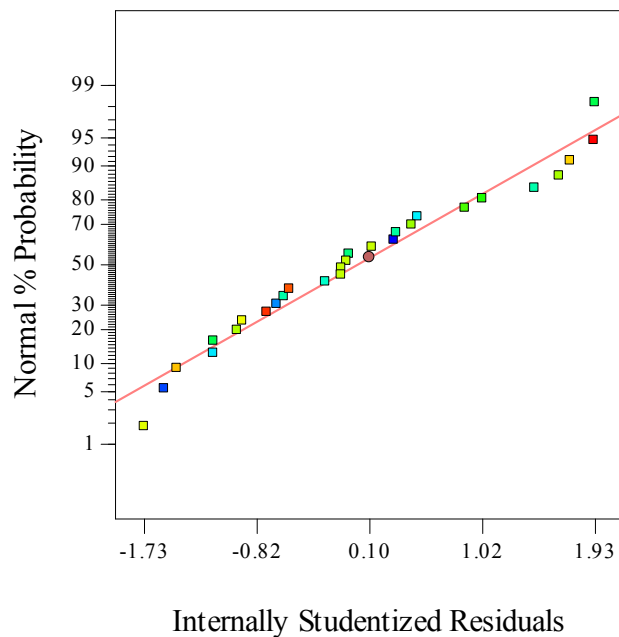
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ลำดับ มาตรฐาน	ลำดับ ทดลอง	A ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ (ร้อยละโดย มวล)	B อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	C อัตราส่วน W/F (กรัม วินาทีต่อ ลูกบาศก์ เซนติเมตร)	D ความเข้มข้น คาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละโดย ปริมาตร)	ค่า ความสามารถ ในการดูดซับ (มิลลิโมลต่อ กรัม)
21	20	0	0	-1	0	4.71
22	9	0	0	+1	0	5.95
23	23	0	0	0	-1	3.39
24	27	0	0	0	+1	4.99
25	10	0	0	0	0	4.87
26	3	0	0	0	0	4.87
27	18	0	0	0	0	4.89
28	2	0	0	0	0	4.87

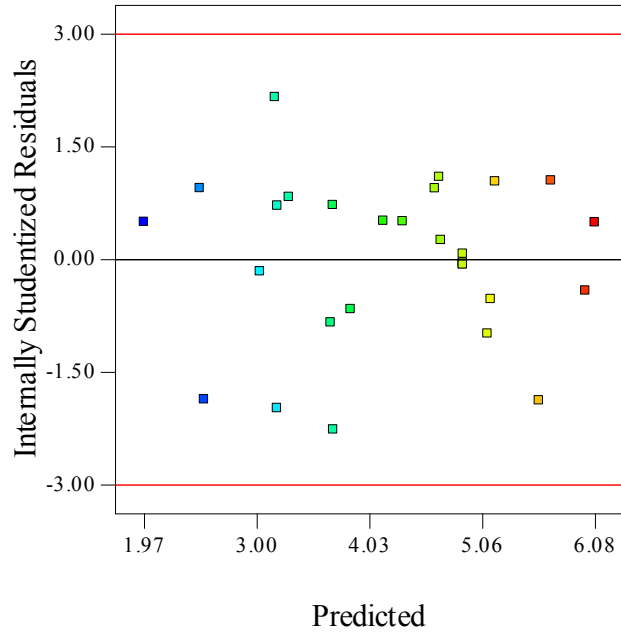
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าจริงและค่าเข้ารหัสของตัวแปรสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง

ตัวแปร	ค่าเข้ารหัส (Coded values)			หน่วย
	ค่าต่ำ (-1)	ค่ากลาง (0)	ค่าสูง (+1)	
A: ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ	0.3	0.45	0.6	ร้อยละโดยมวล
B: อุณหภูมิ	40	60	80	องศาเซลเซียส
C: อัตราส่วน W/F	0.9	1.35	1.8	กรัม วินาทีต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร
D: ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์	10	20	30	ร้อยละโดยปริมาตร

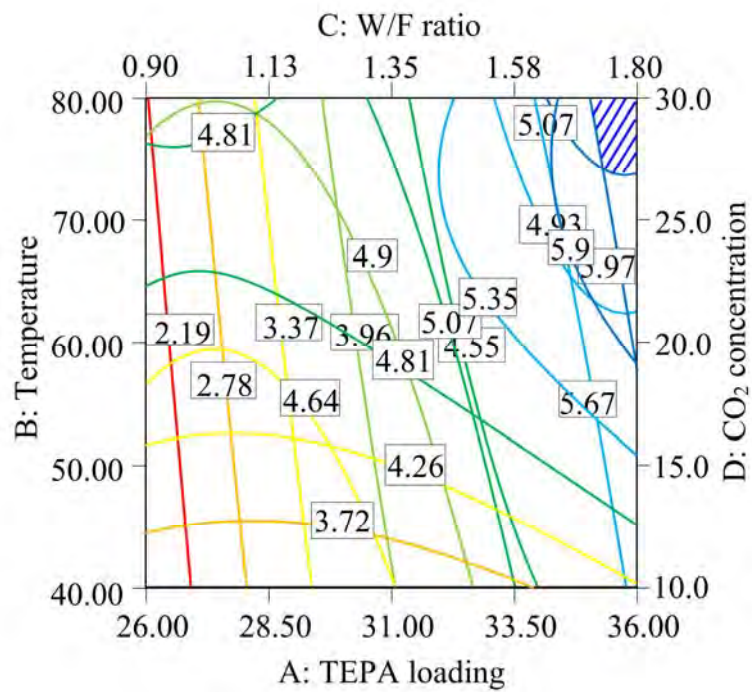
เมื่อพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแก้ (Adjusted r^2) ของโมเดลอยู่ที่ 0.9876 และ 0.9802 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโมเดลพื้นผิวตอบสนองมีความถูกต้องสูง ค่าความแม่นยำเพียงพอ (Adequate precision) เท่ากับ 41.980 ซึ่งค่านี้เมื่อมีค่ามากกว่า 4 แสดงว่า โมเดลที่ได้มีเทอมผลกระทบที่เพียงพอต่อการทำนายผลตอบสนอง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ (ก) พล็อตความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้าง แสดงในรูปที่ 4.8 พบว่า การกระจายของจุดข้อมูลอยู่ในแนวเส้นตรง และ (ข) พล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนาย แสดงในรูปที่ 4.9 พบว่า ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนของการกระจายตัวของจุดข้อมูล ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า โมเดลหรือสมการพื้นผิวตอบสนองที่ได้มีการกระจายตัวแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomized distribution) และมีความเที่ยงตรงเพียงพอที่จะทำนายผลตอบสนอง



รูปที่ 4.8 พล็อตความน่าจะเป็นปกติกับส่วนตกค้างสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง



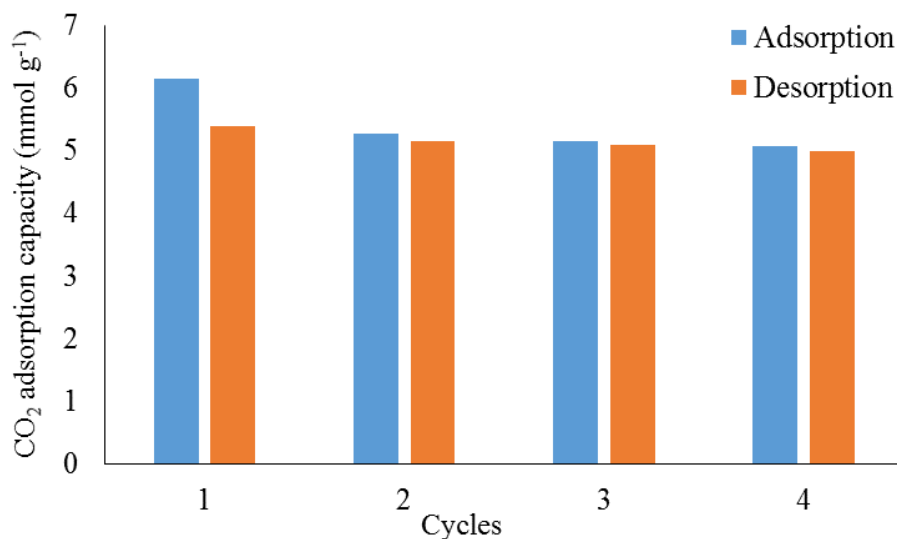
รูปที่ 4.9 พล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ได้จากการทำนายสำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง



รูปที่ 4.10 พล็อตโครงร่างของผลกระทบหลักทั้งสี่สำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง

พล็อตโครงร่าง (Contour plot) ของผลกระทบหลักทั้งสี่สำหรับการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง แสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งบ่งบอกถึงแนวโน้มของค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และให้ได้มาซึ่งช่วงของแต่ละปัจจัยหลักที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุด ส่วนที่แรงเงาสีน้ำเงินแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุดที่เป็นไปได้และสถานะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ ร้อยละ 35-36 โดยมวล อุณหภูมิ 74-80 องศาเซลเซียส อัตราส่วน W/F 1.72-1.80 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 27-30 โดยปริมาตร ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้อยู่ในช่วง 6.1-6.2 มิลลิโมลต่อกรัม

4.4 การทดสอบความคงทนของตัวดูดซับ (Stability test of the sorbent)



รูปที่ 4.11 วัฏจักรการดูดซับและการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส อัตราส่วน W/F เท่ากับ 1.8 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 30 โดยปริมาตร

จากการทดสอบการดูดและคายซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบเป็นวัฏจักรของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน ร้อยละ 40 โดยมวล บนไฮโดรทาลไซต์ เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมกรรมการดูดซับและคายซับ และความคงทนของตัวดูดซับที่เตรียม ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า การคายซับในวัฏจักรที่หนึ่ง มีค่า

ความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเป็น 5.39 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการดูดซับเดิมที่ 6.14 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าเกิดการคายซับได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเกิดการคายซับคาร์บอนไดออกไซด์เฉพาะจากการสลายตัวของคาร์บาเมต (ที่เกิดจากการฟอร์มตัวของคาร์บอนไดออกไซด์กับเตตระเอทิลีนเพนตะมีน) โดยไม่เกิดการสลายตัวของไบคาร์บอเนต (ที่เกิดจากการฟอร์มตัวของคาร์บอนไดออกไซด์กับหมู่ไฮดรอกซิลบนไฮโดรทาลไซต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและต่าง) หลังจากวัฏจักรที่สองเป็นต้นไป พบว่า ค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยในระหว่างการดูดซับและการคายซับ ทำให้ทราบว่ามีการคายซับที่ไม่สมบูรณ์ของตัวดูดซับ ต้องใช้ระยะเวลาในการคายซับที่มากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยหลักทั้งสี่และอันตรกิริยาของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับเตตระเอทิลีนเพนตะมีนบนไฮโดรทาลไฮด์ที่เตรียม การออกแบบการทดลอง 2^4 แฟคทอเรียลทำให้ทราบถึงปัจจัยและอันตรกิริยาของปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบสนอง โดยเรียงลำดับระดับความสำคัญจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (ผลกระทบ D) อัตราส่วน W/F (ผลกระทบ C) อุณหภูมิ (ผลกระทบ B) ปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ (ผลกระทบ A) อันตรกิริยาของอัตราส่วน W/F และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (ผลกระทบ CD) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและอัตราส่วน W/F (ผลกระทบ AC) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (ผลกระทบ AD) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ อัตราส่วน W/F และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (ผลกระทบ ACD) อันตรกิริยาของอุณหภูมิและความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (ผลกระทบ BD) อันตรกิริยาของอุณหภูมิและอัตราส่วน W/F (ผลกระทบ BC) อันตรกิริยาของอุณหภูมิ อัตราส่วน W/F และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (ผลกระทบ BCD) อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ อุณหภูมิ อัตราส่วน W/F และความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ (ผลกระทบ ABCD) และ อันตรกิริยาของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ อุณหภูมิและอัตราส่วน W/F (ผลกระทบ ABC) ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง พบว่า สมการพื้นผิวตอบสนองที่ได้มีความเที่ยงตรงเพียงพอที่จะทำนายผลตอบสนอง และสภาวะที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่าความสามารถในการดูดซับที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงของปริมาณ TEPA ในตัวดูดซับ ร้อยละ 35-36 โดยมวล อุณหภูมิ 74-80 องศาเซลเซียส อัตราส่วน W/F 1.72-1.80 กรัม วินาทีต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 27-30 โดยปริมาตร ซึ่งค่าความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้อยู่ในช่วง 6.1-6.2 มิลลิโมลต่อกรัม

จากการทดสอบความคงทนของตัวดูดซับ พบว่า ตัวดูดซับมีความคงทนภายใต้สภาวะที่ศึกษา

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.canadiangeographic.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] Cavani, F., Trifiro, F., and Vaccari, A. Hydrotalcite-type anionic clays: preparation, properties and applications. *Catalysis Today* 11 (1991): 173–301.
- [38] 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.

- [39] 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 Mg_3Al and Zn_3Al . Russian Journal of Applied Chemistry 74 (2001): 1573–1577.
- [40] 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 CO_2 adsorption performance. Acta Physico-Chimica Sinica 28 (2012):195–200.
- [41] 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.
- [42] Bossa, J.B., Theule, P., Duvernay, F., Borget, F., and Chiavassa, T. Carbamic acid and carbamate formation in $NH_3:CO_2$ ices-UV irradiation versus thermal processes. Astronomy & Astrophysics 492 (2008): 719–724.
- [43] Robinson, K., McCluskey, A., and Attalla M.I. An ATR-FTIR Study on the Effect of Molecular Structural Variations on the CO_2 Absorption Characteristics of Heterocyclic Amines, Part II. ChemPhysChem 13 (2012) 2331–2341.
- [44] Bossa, J. B., Borget, F., Duvernay, F., Theule, P., and Chiavassa, T. Formation of neutral methylcarbamic acid ($CH_3NHCOOH$) and methylammonium methylcarbamate $[CH_3NH_3^+][CH_3NHCO_2^-]$ at low temperature. The Journal of Physical Chemistry A 112 (2008): 5113–5120.
- [45] Robinson K., McCluskey A., and Attalla, M. An spectroscopic study on the effect of molecular structural variations on the CO_2 absorption characteristics of heterocyclic amines. ChemPhysChem 12 (2011): 1088–1099.

ผลผลิต

ผลผลิตที่เกิดจากงานวิจัยนี้

- [1] Phuwadej Pornaroonthama, Nutthavich Thouchprasitchai, Sangobtip Pongstabodee, "CO₂ adsorption on diatomaceous earth modified with cetyltrimethylammonium bromide and functionalized with tetraethylenepentamine: Optimization and kinetics", Journal of Environmental Management 157 (2015) 194-204. (Impact factor = 2.723)
- [2] ยื่นจดสิทธิบัตร เลขที่คำขอรับสิทธิบัตร คือ 1401006072 ชื่อ ตัวดูดซับแร่ดินที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรด/ด่างและดัดแปรฟังก์ชันด้วยเอมีนสำหรับใช้ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์