

แบบจำลองการเสื่อมสภาพสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้คาร์บอนเนตของโลหะแอล
คาไลในฟลูอิด์เบด



นางสาวณัฐภััสสร จงอาจกลาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
ปีการศึกษา 2556

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

DEACTIVATION MODEL FOR CO₂ SORPTION USING ALKALI METAL CARBONATES IN
FLUIDIZED BED

Miss Nathphatsorn Jongartklang



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองการเสื่อมสภาพสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้คาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไลในฟลูอิดไคต์เบด
โดย	นางสาวณัฏฐภัศร จงอาจกลาง
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกี้ยวลี พุกษาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. คุณากร ภูจินดา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. บุญรอด สัจกุลนุกิจ)

ณัฐรัฐภัสสร จงอาจกลาง : แบบจำลองการเสื่อมสภาพสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้คาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไลในฟลูอิดิซด์เบด. (DEACTIVATION MODEL FOR CO₂ SORPTION USING ALKALI METAL CARBONATES IN FLUIDIZED BED) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ.ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, , หน้า.

งานวิจัยนี้ ศึกษาปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และตัวแปรทางจลนพลศาสตร์จากแก๊สทิ้งหลังการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้วยตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอนเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซด์เบดที่ทำจากแก้ว เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.025 เมตร และความสูง 0.80 เมตร แบ่งการศึกษาหลักด้วยการใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอนเนตและโซเดียมคาร์บอนเนต ออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลของรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซด์เบดจากการวัดค่าการวัดแกว่งของความดัน แบ่งได้เป็น 5 รูปแบบ ได้แก่ เบดนิ่ง เบดแบบพองแก๊ส เบดแบบสลักกิ่ง เบดแบบปั่นป่วน และเบดแบบฟลูอิดิซด์เบดความเร็วสูง ผลของอุณหภูมิการดูดซับแบ่งได้เป็น 4 อุณหภูมิ และ ผลของปริมาณไอน้ำในแก๊สทิ้ง แบ่งได้เป็น 4 ค่า จากการทดลองพบว่า รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ 268 และ 194 มิลลิกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของโพแทสเซียมคาร์บอนเนตและโซเดียมคาร์บอนเนต ตามลำดับ โดยปริมาณการดูดซับมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิการดูดซับ 333 เคลวินและปริมาณไอน้ำในแก๊สทิ้งร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร จากนั้น ข้อมูลตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ได้ถูกคำนวณจากกราฟการดูดซับกับเวลาภายใต้ภาวะการทดลองที่กำหนด แบบจำลองต่างๆ เช่น แบบจำลองแกนกลางหดตัว แบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวและแบบจำลองการเสื่อมสภาพ ได้ถูกใช้อธิบายตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ จากการทดลองพบว่า แบบจำลองการเสื่อมสภาพให้ผลการคำนวณใกล้เคียงมากที่สุดกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับที่รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนมีค่าสูงสุด ผลของอุณหภูมิการดูดซับต่อตัวแปรจลนพลศาสตร์สามารถสร้างความสัมพันธ์ในรูปแบบอาร์เรเนียนส์ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอนเนตและโซเดียมคาร์บอนเนต มีค่า 12.31 กิโลจูลต่อโมลและ 14.67 กิโลจูลต่อโมล ผลของปริมาณไอน้ำในแก๊สทิ้งที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับลดลง ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการศึกษาผลของชนิดตัวดูดซับโลหะแอลคาไลต่อปริมาณการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ พบว่า รูปีเตียมคาร์บอนเนตให้ปริมาณการดูดซับสูงสุด เมื่อเทียบกับตัวดูดซับลิเทียมคาร์บอนเนต โซเดียมคาร์บอนเนตและโพแทสเซียมคาร์บอนเนตที่ 306 มิลลิกรัมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของรูปีเตียมคาร์บอนเนต

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5571998923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: FLUIDIZATION / KINETIC / CARBONATE / REGIME

NATHPHATSORN JONGARTKLANG: DEACTIVATION MODEL FOR CO₂ SORPTION USING ALKALI METAL CARBONATES IN FLUIDIZED BED. ADVISOR: ASST. PROF. DR. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. DR. PORNPOTE PIUMSOMBOON, pp.

In this study, the carbon dioxide (CO₂) capture capacity and kinetic parameters from flue gas using alkali metal carbonate supported on alumina solid sorbents were investigated inside the glass fluidized bed reactor. The reactor had 0.025 m inner diameter and 0.80 m height. The main experiments using potassium carbonate (K₂CO₃) and sodium carbonate (Na₂CO₃) solid sorbents were divided into three parts. First, the effects of flow regime/pattern measured by pressure fluctuation in the reactor including five flow regimes/patterns, fixed bed, bubbling bed, slugging bed, turbulent bed and fast fluidization bed, were explored. Second, the effects of sorption or carbonation temperature including four sorption temperatures were evaluated. Third, the effects of water content in flue gas including four values were compared. From the results, the turbulent regime provided the highest CO₂ capture capacity at 268 mg of CO₂/g of K₂CO₃ and 194 mg of CO₂/g of Na₂CO₃. The highest CO₂ sorption capacity was obtained at sorption temperature of 333 K and water content in flue gas of 19.5 %vol. Then, the breakthrough curve was used for calculating the kinetic parameters under given conditions using several model, which were the shrinking-core model, the homogeneous model and the deactivation model in the non-catalytic heterogeneous reaction systems. It was found that the selected deactivation kinetic model fitted well with all the experimental data. The sorption reaction rate constant was highest at turbulent fluidization flow regime. The effects of sorption temperature were described in the Arrhenius from. The activation energies of the CO₂ sorption reaction using potassium carbonate and sodium carbonate solid sorbents were experimentally calculated as 12.31 kJ/mol and 14.67 kJ/mol, respectively. The increasing of water content in flue gas made the sorption reaction rate constant to decrease. In addition, the effects of alkali metal carbonate type on CO₂ sorption capacity and the kinetic parameters were evaluated. The CO₂ sorption capacity of rubidium carbonate was highest when comparing to lithium carbonate, sodium carbonate and potassium carbonate solid sorbents at 306 mg of CO₂/g of Rb₂CO₃.

Department: Chemical Technology

Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology

Advisor's Signature

Academic Year: 2013

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์แบบจำลองการเสื่อมสภาพสำหรับการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้คาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไลในฟลูอิดไคต์เบต ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและรองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะ ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.คุณากร ภูจินดา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบตลอดจนให้คำแนะนำและเสนอแนะความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณการสนับสนุนทุนจากโครงการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2557 สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (WCU-044-CC-57) และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช (THE 90th ANNIVERSARY OF CHULALONGKORN UNIVERSITY FUND (RATCHADAPHISEK SOMPHOT ENDOWMENT FUND))

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้การสนับสนุนให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจให้คำปรึกษา คำแนะนำและการสนับสนุนด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย	4
1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.1.1 ระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂ Capture System).....	6
2.1.1.1 การดักจับก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture).....	7
2.1.1.2 การดักจับหลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture).....	7
2.1.1.3 การดักจับด้วยการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture).....	7
2.1.2 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-Combustion Technology).....	8
2.1.2.1 การแยกด้วยตัวดูดซับหรือสารละลาย.....	8
(a) กระบวนการดูดซับทางเคมีด้วยเอมีน	9
(b) กระบวนการดูดซับทางกายภาพด้วยตัวดูดซับของแข็งที่มีรูพรุน.....	10
(c) กระบวนการดูดซับทางเคมีด้วยดูดซับของแข็งที่สามารถฟื้นฟูสภาพใหม่	11

2.1.2.2 การแยกด้วยเมมเบรน	12
2.1.2.3 การแยกด้วยเทคนิคโครโอเจนิค	13
2.1.3 ตัวดูดซับคาร์บอนของโลหะแอลคาไล	14
2.1.3.1 ความก้าวหน้าของเทคโนโลยี	14
2.1.4 ฟลูอิดเซชัน	17
2.1.5 รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดเซชัน	18
2.1.5.1 เบดนิ่ง (Fixed bed)	18
2.1.5.2 ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidization).....	19
2.1.5.3 ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ้ง (Slugging fluidization)	22
2.1.5.4 ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidization).....	22
2.1.5.5 ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization)	25
2.1.6 สมบัติของตัวดูดซับของแข็ง.....	26
2.1.7 แบบจำลองการดูดซับ	28
2.1.7.1 แบบจำลองแกนกลางหดตัว (Shrinking - core model).....	28
2.1.7.2 แบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous model).....	29
2.1.7.3 แบบจำลองการเสื่อมสภาพ (Deactivation model)	31
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	36
3.1 วัสดุ.....	36
3.1.1 สารเคมี.....	36
3.1.2 แก๊ส.....	36
3.2 การเตรียมอุปกรณ์และการติดตั้งเครื่องมือ	36
3.2.1 เครื่องมือ	36
3.2.2 การติดตั้งเครื่องมือ (Apparatus set-up)	37
3.3 การทดลอง.....	38
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับของแข็งโลหะแอลคาไลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์	38
3.3.2 ลักษณะรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชัน.....	39

3.3.3 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	39
3.3.4 การคำนวณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับ	42
3.3.5 ลักษณะของตัวดูดซับของแข็ง	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปราย	44
4.1 สมบัติของโลหะแอลคาไลคาร์บอเนต	44
4.1.1 โครงสร้างระดับโมเลกุลของโลหะแอลคาไลต่างชนิด	44
4.1.2 สัณฐานวิทยาของโลหะแอลคาไล	45
4.2 ลักษณะของรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดเซชันในระบบฟลูอิดเซชัน	46
4.2.1 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน	47
4.2.2 ความเร็วทรานซิชั่น	48
4.2.3 ความเร็วส่งผ่าน	50
4.3 สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด	52
4.4 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต	53
4.4.1 ผลของรูปแบบการไหล	53
4.4.2 ผลของอุณหภูมิในท่อไรเซอร์	59
4.4.3 ผลของปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้า	62
4.5 การเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์	65
4.6 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของโพแทสเซียมและโซเดียมคาร์บอเนต	66
4.6.1 ผลของรูปแบบการไหล	66
4.6.2 ผลของอุณหภูมิในท่อไรเซอร์	70
4.6.3 ผลของปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้า	74
4.7 ผลของชนิดตัวดูดซับคาร์บอเนตต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และตัวแปรทาง จลนพลศาสตร์	76
4.8 โครงสร้างของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตซึ่บก่อนและหลังการดักจับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์	79
4.9 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตก่อนและ หลังการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	81
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	83

5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	83
5.1.1 ลักษณะของรูปแบบการไหล	83
5.1.2 ผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	83
5.1.2.1 ผลของรูปแบบการไหล	83
5.1.2.2 ผลอุณหภูมิจ.....	84
5.1.2.3 ผลปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้า.....	84
5.1.3 ผลต่อตัวแปรทางจลนพลศาสตร์.....	84
5.1.3.1 ผลของรูปแบบการไหล.....	85
5.1.3.2 ผลอุณหภูมิจ.....	85
5.1.3.3 ผลปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้า.....	85
5.1.4 เปรียบเทียบชนิดของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนต.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	86
.....	87
รายการอ้างอิง	87
ภาคผนวก ก.....	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	124

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	การใช้งานอุตสาหกรรมของฟลูอิดไซเบด.....	17
ตารางที่ 2.2	ความสัมพันธ์สำหรับความเร็ว Transition (U_c).....	24
ตารางที่ 2.3	ความสัมพันธ์ของความเร็วส่งผ่าน (U_{tr}).....	26
ตารางที่ 3.1	ภาวะการทดลองที่ความเร็วแก๊สแตกต่างกัน.....	39
ตารางที่ 3.2	ภาวะการทดลองของรูปแบบการไหลต่อผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	40
ตารางที่ 3.3	ภาวะการทดลองของผลอุณหภูมิจากการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	40
ตารางที่ 3.4	ภาวะการทดลองของผลปริมาณไอน้ำต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	41
ตารางที่ 3.5	ภาวะการทดลองผลของชนิดโลหะแอลคาไล.....	42
ตารางที่ 4.1	โครงสร้างระดับโมเลกุลของตัวดูดซับโลหะแอลคาไล.....	45
ตารางที่ 4.2	เปรียบเทียบระหว่างความเร็วทรานซิชันจากความสัมพันธ์กับความเร็วที่คำนวณได้จากงานวิจัย.....	49
ตารางที่ 4.3	ความสัมพันธ์ของความเร็วส่งผ่าน (U_{tr}) จากความสัมพันธ์และความเร็วที่คำนวณได้จากงานวิจัย.....	51
ตารางที่ 4.4	รูปแบบการไหลของโลหะคาร์บอนเดนตอร์รับอะลูมินา.....	51
ตารางที่ 4.5	ผลของรูปแบบการไหลต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้นและอัตราการเสื่อมสภาพ.....	68
ตารางที่ 4.6	ผลของอุณหภูมิในการดูดซับต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้นและอัตราการเสื่อมสภาพ.....	71
ตารางที่ 4.7	ผลของปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้าต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้นและอัตราการเสื่อมสภาพ.....	75
ตารางที่ 4.8	ผลของชนิดของดูดซับต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้นและอัตราการเสื่อมสภาพ.....	78

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	ระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการ	6
รูปที่ 2.2	กระบวนการทั่วไปของการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้	8
รูปที่ 2.3	กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย	10
รูปที่ 2.4	กระบวนการดูดซับสลับความดันสำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊ส สังเคราะห์	11
รูปที่ 2.5	การแยกแก๊สด้วยเมมเบรน	12
รูปที่ 2.6	เมมเบรนคอนแทคเตอร์สำหรับแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	12
รูปที่ 2.7	กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โครโอเจนิค	14
รูปที่ 2.8	รูปแบบการไหลในฟลูอิดไชน์เบด	18
รูปที่ 2.9	ความดัน (a) และความสูงเบด (b) กับความเร็วของแก๊ส	20
รูปที่ 2.10	รูปแบบการไหลแบบฟองแก๊ส	21
รูปที่ 2.11	รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน	23
รูปที่ 2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วในช่วงการเกิดเบดแบบปั่นป่วน	23
รูปที่ 2.13	รูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง	25
รูปที่ 2.14	การจำแนกกลุ่มของอนุภาคด้วยวิธี Geldart	27
รูปที่ 2.15	แบบจำลองแกนกลางหดตัว	28
รูปที่ 2.16	แบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวกัน	29
รูปที่ 3.1	ระบบฟลูอิดไชน์เบด/กึ่งฟลูอิดไชน์เบดที่ใช้ในงานวิจัย	37
รูปที่ 3.2	ผังงานสำหรับการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีอิมเพกเนชัน	38
รูปที่ 4.1	ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 10000 เท่าของพื้นผิวของ (a) $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (c) $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (d) $\text{Rb}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ (e) Al_2O_3	46
รูปที่ 4.2	ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันจากความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความ ดันกับความเร็วของแก๊สที่ตำแหน่งการวัดความดันสูงกว่าตระแกรงกรอง 0.1 เมตร	47
รูปที่ 4.3	ความเร็วทรานซิชันจากความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความดันกับความเร็วของ แก๊สที่ตำแหน่งการวัดความดันเหนือตระแกรงกรอง 0.15 เมตร	49
รูปที่ 4.4	Empty-time ของของแข็งที่ใช้ในการศึกษาที่ความเร็วที่แตกต่างกันของปริมาณของแข็ง 40 กรัม	50
รูปที่ 4.5	รูปแบบสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ที่ความเร็วแตกต่างกัน	52
รูปที่ 4.6	ผลของรูปแบบการไหลต่อกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของแก๊สกับเวลาของ (a) ตัวดูด ซับ $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ (b) ตัวดูดซับ $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร และอุณหภูมิในการดูดซับ 333 เคลวิน	55

รูปที่ 4.7 ผลของรูปแบบการไหลต่อกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของแก๊สกับค่าเวลาไร้หน่วยของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร และอุณหภูมิในการดูดซับ 333 เคลวิน 56

รูปที่ 4.8 ปริมาณการดักจับทั้งหมดของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร และอุณหภูมิในการดูดซับ 333 เคลวิน 58

รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิในท่อโรเซออร์ต่อกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของแก๊สกับเวลาของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตรและปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร 60

รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิในท่อโรเซออร์ต่อปริมาณการดักจับทั้งหมดของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตรและปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร 61

รูปที่ 4.11 ผลของความแตกต่างของปริมาณไอน้ำต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณแก๊สไนโตรเจนสมดุลและอุณหภูมิ 333 เคลวิน 63

รูปที่ 4.12 ผลของความแตกต่างของปริมาณไอน้ำต่อปริมาณการยึดจับสูงสุดของของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร และอุณหภูมิ 333 เคลวิน 64

รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์กับผลการทดลอง 65

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบข้อมูลของทุกรูปแบบการไหลของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพของ 67

รูปที่ 4. 15 ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งต่ออัตราค่าคงที่ของการดูดซับเริ่มต้น (k_0) ของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 69

รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบข้อมูลของทุกอุณหภูมิของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพ 70

รูปที่ 4.17 การคำนวณของตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ในรูปแบบอาร์เรเนียสและค่าคงที่การดูดซับเริ่มต้นของตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 72

รูปที่ 4.18 การคำนวณของตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ในรูปแบบอาร์เรเนียสของค่าคงที่ในการเสื่อมสภาพของตัวดูดซับของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 73

รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบข้อมูลของทุกปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้าของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพ 74

รูปที่ 4.20 (a) ผลของชนิดโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตต่อกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของแก๊สกับเวลาและ (b) ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโลหะแอลคาไลที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร และอุณหภูมิในการดูดซับ 323 เคลวิน.....	77
รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบข้อมูลของชนิดตัวดูดซับคาร์บอเนตต่างๆ ด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพ .	78
รูปที่ 4.22 XRD ของโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตก่อนและหลังปฏิกิริยาคาร์บอนขึ้น.....	80
รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวของแข็งที่ (1) ก่อนการดูดซับและ (2) หลังการดูดซับกำลังขยาย 10000 เท่า ของ (a) $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (c) $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ (d) $\text{Rb}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$	81



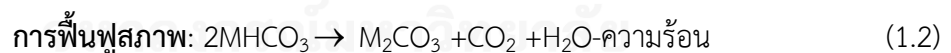
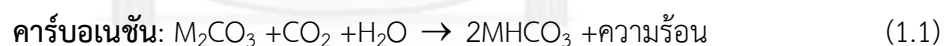
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เป็นแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse gas) ที่มีบทบาทสำคัญต่อการเกิดภาวะโลกร้อนโดยการกักเก็บความร้อนไว้ในชั้นบรรยากาศ ปัญหานี้เกิดขึ้นเมื่อมีการพัฒนาอุตสาหกรรม เทคโนโลยีและการใช้ชีวิตสมัยใหม่ มนุษย์จึงปล่อยแก๊สเรือนกระจกที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจากน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน ทั้งในรถยนต์ โรงงานและโรงไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon capture and storage) สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศได้หลากหลายวิธี เช่น การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane separation) การดูดซับด้วยการใช้เอมีน (Amine scrubbing) และการดูดซับด้วยสารที่มีรูพรุน (Molecular sieves) [1, 2] อีกหนึ่งเทคโนโลยีสำหรับดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้รับความสนใจ คือ การดูดซับทางเคมี (Chemical sorption) ด้วยของแข็งจำพวกโลหะแอลคาไลและโลหะแอลคาไลเอิร์ท [3] ส่วนมากโลหะแอลคาไลนิยมใช้เพราะอุณหภูมิการดูดซับ (Adsorption) มีค่าต่ำประมาณ 323-343 เคลวินและง่ายต่อการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 473 เคลวิน [4] กลไกของการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน (Carbonation reaction) ของโลหะแอลคาไลกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เกิดเป็นโลหะแอลคาไลไบคาร์บอเนตได้ถูกพิสูจน์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction, XRD) และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscope, SEM) บนพื้นผิวของแข็ง [5]

ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการดักจับแก๊สแอลคาไลด้วยตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตแสดงในสมการที่ (1.1) และ (1.2) :



ปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแบ่งได้ 2 ขั้นตอน คือ คาร์บอเนชันและการฟื้นฟูสภาพ โดยคาร์บอเนตของโลหะแอลคาไลจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเกิดปฏิกิริยาเป็นไฮโดรเจนคาร์บอเนตของโลหะแอลคาไลหลังจากการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในระหว่างปฏิกิริยาคาร์บอเนชันตามสมการที่ (1.1) สำหรับการสลายไฮโดรเจนคาร์บอเนตของโลหะแอลคาไลที่เกิดขึ้นสามารถฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อนเปลี่ยนเป็นแอลคาไลคาร์บอเนต แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำตามสมการที่ (1.2) ไอน้ำมีผลต่อการเกิดไฮโดรเจนคาร์บอเนตของโลหะแอลคาไลดังแสดงในสมการที่ (1.1) โดยความชื้นในแก๊สทั้งในช่วงร้อยละ 8-17 โดยปริมาตร จะเป็นประโยชน์ต่อปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แต่จะส่งผลเสียต่อปริมาณการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของการดูดซับด้วยสารที่มีรูพรุน (Molecular sieves) [6]

งานวิจัยเกี่ยวกับการดักจับและกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปัจจุบันจะพัฒนาจาก 2 ประเด็นหลัก คือ พัฒนาระบบการ (Process system improvement) และการพัฒนาตัวดูดซับ (Solid sorbent development) เทคโนโลยีฟลูอิดเซชันได้ถูกใช้ร่วมกับตัวดูดซับของแข็งเพื่อแก้ปัญหาในการลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับรูปแบบการไหลของแข็งและแก๊สทั่วไป แบ่งเป็น 5 รูปแบบ คือ แบบเบตนิ่ง (Fixed bed) ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidization) ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ้ง (Slugging fluidization) ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidization) และฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization) โดยแต่ละรูปแบบการไหลจะมีลักษณะเฉพาะ [7] ในการพัฒนาตัวดูดซับของแข็งบนตัวรองรับอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เป็นที่นิยมใช้เพราะมีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และอัตราการดูดซับสูง นอกจากนี้ ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการเตรียมโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาชนิดเกรดอุตสาหกรรมที่มีราคาต่ำแต่มีประสิทธิภาพสูงในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรูพรุนและพื้นผิวในการทำปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อยเมื่อทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง [8] นอกจากนี้ งานวิจัยที่ผ่านมาทั้งสองที่กล่าวมานี้ ยังมีอีกประเด็นหนึ่งที่ต้องตระหนักถึงคือ จลนพลศาสตร์ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพราะจะช่วยวิศวกรในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ให้เหมาะสม การศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองจลนพลศาสตร์การเสื่อมสภาพ (Deactivation model) ได้ประสบความสำเร็จในการใช้อธิบายการลดลงของประสิทธิภาพของโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตระหว่างการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชันของโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตหลายๆ ชนิดด้วยการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น [9] กราฟการดูดซับกับเวลา (Breakthrough curve) ของแบบจำลองการเสื่อมสภาพเป็นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลจริงได้ดีกว่าแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ที่ค่า R-square เท่ากับ 0.9999 [10] ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงใช้แบบจำลองการเสื่อมสภาพในการคำนวณตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน

ปัจจุบัน งานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ระบบฟลูอิดเซชันกับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งจลนพลศาสตร์ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีผู้ศึกษากันอยู่น้อย งานวิจัยนี้ จึงได้วิเคราะห์ผลของรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดเซชันต่างๆ กับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของตัวดูดซับของแข็ง ได้แก่ โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์และโซเดียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ จากนั้น เปรียบเทียบผลของชนิดตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ในระบบฟลูอิดเซชัน ได้แก่ ลิเทียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์และรูปีเดียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดไอเซชันต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้คาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไลในระบบฟลูอิดไอเซชัน
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดไอเซชันกับตัวแปรทางจลนพลศาสตร์โดยใช้คาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไลในระบบฟลูอิดไอเซชัน
3. เพื่อเปรียบเทียบชนิดคาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไลที่มีต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และตัวแปรทางจลนพลศาสตร์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ผลของรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดไอเซชันในระบบฟลูอิดไอเซชันและชนิดคาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไลที่มีต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และตัวแปรทางจลนพลศาสตร์

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

อุทกพลศาสตร์ คือ การศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหลและการเคลื่อนที่ของวัตถุในของไหล

จลนพลศาสตร์ คือ การศึกษาความสัมพันธ์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาจากกลไกของปฏิกิริยาและปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นและตัวเร่งปฏิกิริยา

ฟลูอิดไอเซชัน คือ การทำให้ของแข็งขนาดเล็กมีพฤติกรรมเหมือนกับของไหลโดยการปล่อยแก๊สหรือของเหลวไปสัมผัสกับของแข็งเหล่านั้น

รูปแบบการไหล คือ พฤติกรรมการสัมผัสของแก๊สและของแข็งที่เปลี่ยนไปเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลตลอดเบดของแข็ง เช่น แบบเบดนิ่ง ฟลูอิดไอเซชันแบบพองแก๊ส ฟลูอิดไอเซชันแบบสลักกิ่ง ฟลูอิดไอเซชันแบบปั่นป่วนและฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดไอเซชันกับตัวแปรทางจลนพลศาสตร์
2. ได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไลแต่ละชนิด
3. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการระดับอุตสาหกรรมต่อไป

1.6 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ฟลูอิดไอเซชันและแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน เป็นต้น

2. เตรียมเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอเซชันแบบกึ่งหมุนเวียนขนาดห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) และติดตั้งเครื่องมือเช่น เครื่องมือวัดอุณหภูมิและความดัน

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอเซชันแบบกึ่งหมุนเวียนประกอบด้วยส่วนของท่อไรเซอร์ผลิตจากแก้วที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.025 เมตร และความสูง 0.80 เมตร ท่อดาวคัมเมอร์ (Downcomer) ผลิตจาก พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร วาล์วแบบลูกทรงกลม (Ball Valve) ถูกใช้ควบคุมการไหลของของแข็งจากท่อดาวคัมเมอร์ไปยังท่อไรเซอร์ จำนวนของแข็งที่ออกมาจากด้านบนของท่อไรเซอร์จะถูกเก็บในถังรองรับของแข็งจากทางออก (Solid output storage) อุปกรณ์วัดความดันได้ติดตั้งตลอดความสูงของท่อไรเซอร์จำนวน 10 ตำแหน่ง เพื่อวัดสัญญาณความดันในระบบ เครื่องมือวัดอุณหภูมิได้ติดตั้งที่สามจุด คือ ด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของท่อไรเซอร์ ที่ความสูง 0.075 0.400 และ 0.700 เมตร เหนือจากที่จ่ายแก๊ส (Gas distributor) ตามลำดับ อัตราการไหลของแก๊สที่เข้าถูกปรับด้วยโรตاميเตอร์ (Rotameter)

3. วิเคราะห์ตัวแปรอุทกพลศาสตร์ด้วยตัวดูดซับของแข็งอะลูมินาในท่อไรเซอร์ ได้แก่ สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง และ รูปแบบความดัน

4. เตรียมโลหะแอลคาไลน์บนตัวบนตัวรองรับอะลูมินา คือ โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนต โซเดียมคาร์บอนเนต ลิเทียมคาร์บอนเนตและรูบิเดียมคาร์บอนเนต ด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน (Impregnation)

- เตรียมสารละลายโลหะคาร์บอนเนต ที่ประกอบด้วยโลหะคาร์บอนเนต 5 กรัมในน้ำที่ปราศจากไอออน ปริมาตร 25 มิลลิลิตร

- เติมอะลูมินา 5 กรัม ลงในสารละลายโลหะคาร์บอนเนต

- ผสมสารละลายด้วยการเขย่าสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

- ทำให้แห้งในเครื่องอบระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

- เผาตัวอย่างที่แห้งภายใต้อัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส [7]

- ตรวจสอบวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับของแข็งโลหะแอลคาไลที่สังเคราะห์ได้คือการวัดพื้นที่ผิวด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET) การตรวจวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่ปรากฏในตัวดูดซับเบื้องต้นด้วยวิธีเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD) หาปริมาณที่แท้จริงของโลหะบนตัวรองรับด้วยเครื่องวิเคราะห์หาธาตุด้านเอกซเรย์ (Energy dispersive X-Ray, EDX)

5. ทดสอบตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการวัดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ

- รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดเซชันคือ แบบเบตนิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนและฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง

- อุณหภูมิในการดูดซับ 323 333 343 และ 353 เคลวิน

- ปริมาณส่วนประกอบของไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (X_{H_2O}/X_{CO_2}) เท่ากับ 0.6 1.1 1.6 และ 1.95

- ชนิดของโลหะแอลคาไล ลิเทียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมคาร์บอเนต และรูบิเดียมคาร์บอเนต

6. คำนวณตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ทั้งหมดของตัวแปรดำเนินการจากกราฟความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกกับเวลาโดยใช้แบบจำลองการเสื่อมสภาพด้วยเทคนิคผลต่างกำลังสองน้อยที่สุด

- หาความสัมพันธ์รูปแบบการไหลกับตัวแปรทางจลนพลศาสตร์

7. รวบรวมข้อมูลที่ทำกรวิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง เขียนบทความและวิทยานิพนธ์

1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ข้อจำกัดของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัยประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย และขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2 ระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โลหะคาร์บอเนต ฟลูอิดเซชัน สมบัติตัวดูดซับของแข็ง แบบจำลองการดูดซับและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การเตรียมตัวดูดซับของแข็งโลหะแอลคาไลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ ลักษณะของรูปแบบการไหลและการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 4 สมบัติของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนต ลักษณะของช่วงการไหล/รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชัน สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชัน การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต การเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองกับแบบจำลองพลศาสตร์ จลนพลศาสตร์การดูดซับของตัวดูดซับ โพแทสเซียมคาร์บอเนตและตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต ผลของชนิดของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ โครงสร้างของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตซึ่ก่อนและหลังการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

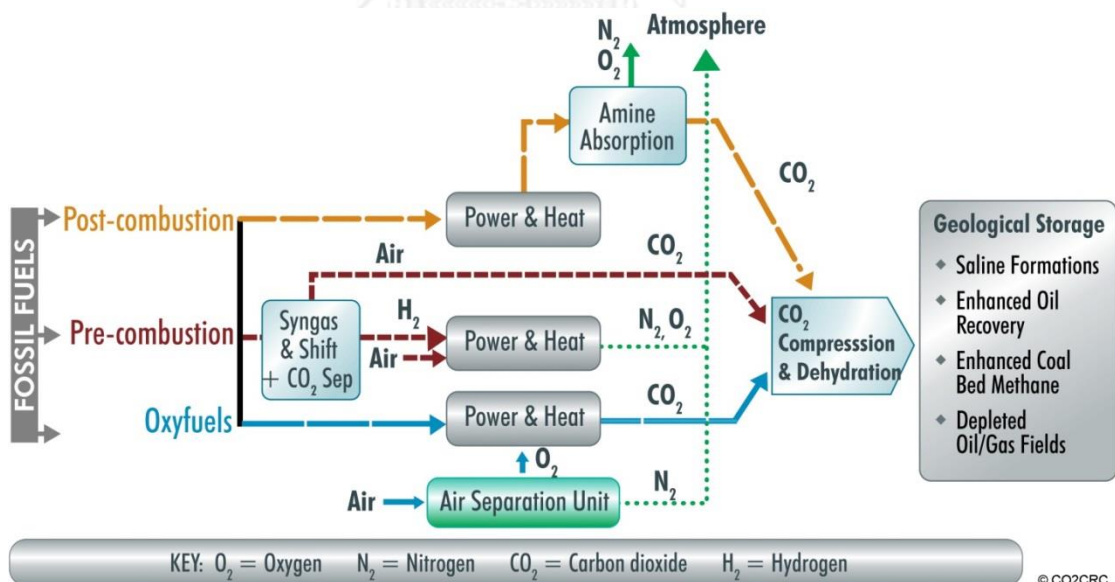
2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Capture System)

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถูกประยุกต์ใช้กับแหล่งการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดใหญ่ ยกตัวอย่างเช่น เชื้อเพลิงจากโรงงานไฟฟ้า (Fossil fuel power) และเชื้อเพลิงจากกระบวนการผลิต (Fuel processing plants) เป็นต้น เมื่อเทียบกับแหล่งผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดเล็ก เช่น การขนส่ง ที่อยู่อาศัยหรือตึกแถวที่จะมีความยุ่งยากและราคาที่สูงกว่า กระบวนการพื้นฐานสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ได้แก่

- การดักจับก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture)
- การดักจับหลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture)
- การดักจับด้วยการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture)

ระบบเหล่านี้สามารถแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการ [11]

2.1.1.1 การดักจับก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion capture)

การดักจับก่อนการเผาไหม้ หมายถึง กระบวนการที่ธาตุคาร์บอนถูกแยกออกจากเชื้อเพลิงก่อนการเผาไหม้ แทนที่จะเผาไหม้เชื้อเพลิงแต่เชื้อเพลิงจะทำปฏิกิริยากับแก๊สออกซิเจน ในกระบวนการ ที่เรียกว่า กระบวนการแกซิฟิเคชัน (Gasification Process) หรือทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและไอน้ำในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) เพื่อผลิตแก๊สที่ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน จากนั้นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ถูกเปลี่ยนให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้แก๊สที่ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนเป็นหลัก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดึงออกทำให้แก๊สที่ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจนที่สามารถเผาไหม้เพื่อผลิตพลังงานที่ไม่มีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

2.1.1.2 การดักจับหลังการเผาไหม้ (Post-combustion capture)

กระบวนการดักจับหลังการเผาไหม้ หมายถึง การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สทิ้งของกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงและชีวมวล ในกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง แก๊สทิ้งหลังจากการเผาไหม้จะประกอบด้วยปริมาณความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 3-15 โดยปริมาตร ในกระบวนการนี้แก๊สทิ้งจากการเผาไหม้จะผ่านเข้าสู่ระบบที่สามารถแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนจะปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ออกสู่บรรยากาศ เทคนิคในการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของกระบวนการนี้ คือ การดูดซับด้วยเอมีน (Amine adsorption) การแยกด้วยเมมเบรน (Membrane separation) และการแยกด้วยคริโอเจนิค (Cryogenic) ในปัจจุบันการดูดซับด้วยเอมีนเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันทั่วไปในอุตสาหกรรม [12, 13]

2.1.1.3 การดักจับด้วยการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxy-fuel combustion capture)

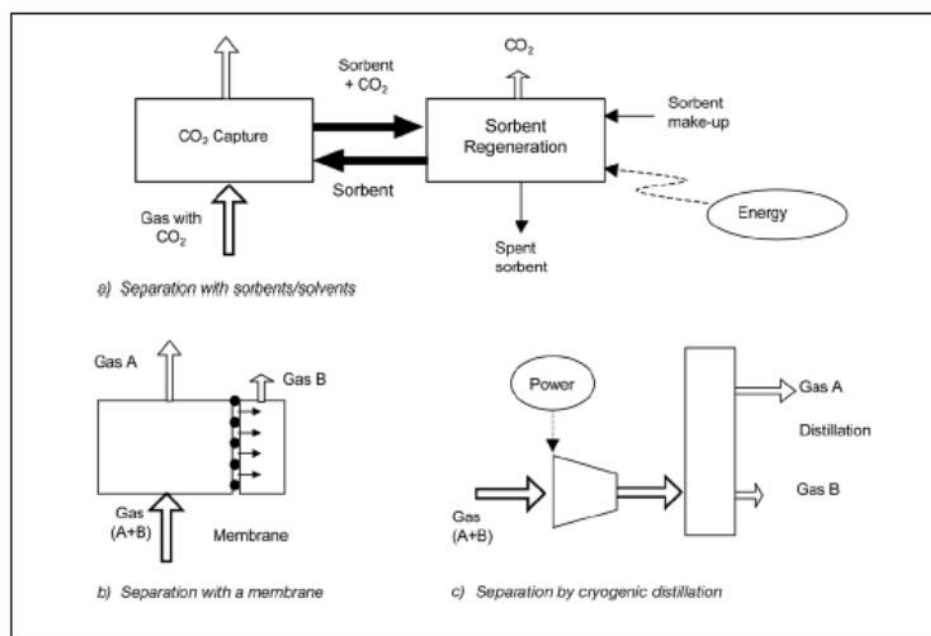
กระบวนการดักจับด้วยการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ คือ การเผาไหม้เชื้อเพลิงในออกซิเจนบริสุทธิ์แทนอากาศในการเผาไหม้เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ แก๊สทิ้งที่ได้จากการเผาไหม้ด้วยแก๊สออกซิเจนบริสุทธิ์จะประกอบด้วยไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 80-98 โดยปริมาตร จากนั้นทำการแยกไอน้ำออกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการการควบแน่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์จะถูกกักอัดและกักเก็บ ปัจจัยหลักของกระบวนการดักจับด้วยการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ คือ ราคาและประสิทธิภาพในการผลิตออกซิเจนบริสุทธิ์ ซึ่งการผลิตออกซิเจนส่วนมากจะเกิดจากการแยกอากาศที่อุณหภูมิต่ำ [12, 14]

2.1.2 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-Combustion Technology)

ระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้เป็นเทคโนโลยีที่ใช้งานในการแยกแก๊ส แบ่งเป็น 3 ประเภท [12]

- การแยกด้วยตัวดูดซับของแข็งหรือสารละลาย
- การแยกด้วยเมมเบรน
- การแยกด้วยโครโอเจนิค

กระบวนการทั่วไปของการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กระบวนการทั่วไปของการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ [12]

2.1.2.1 การแยกด้วยตัวดูดซับหรือสารละลาย

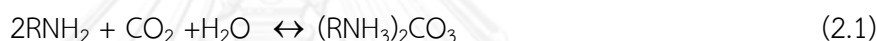
การแยกแก๊สผสมที่มีส่วนประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการสัมผัสกับตัวดูดซับของเหลวหรือของแข็งที่สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงในรูปที่ 2.2 จากนั้นตัวดูดซับหรือสารละลายที่ทำการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกนำไปฟื้นฟูสภาพ เช่น ให้ความร้อนหรือลดความดัน ของแข็งในขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพจะถูกส่งกลับมาในขั้นตอนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อีกครั้ง มี 2 วิธีที่นิยมใช้สำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ สารละลายแอมโมเนียและเอมีน สำหรับตัวดูดซับของแข็ง เช่น โลหะออกไซด์ ตัวดูดซับบนตัวรองรับโลหะซีโอไลท์ (Zeolites) และ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) กระบวนการแยกด้วยตัวดูดซับของแข็งหรือสารละลายสามารถแบ่งตามพื้นฐานของการดูดซับได้เป็น กระบวนการดูดซับทางเคมีด้วยเอมีน

กระบวนการดูดซับทางกายภาพด้วยตัวดูดซับของแข็งที่มีรูพรุนและกระบวนการดูดซับทางเคมีด้วยตัวดูดซับของแข็งที่สามารถฟื้นฟูสภาพใหม่

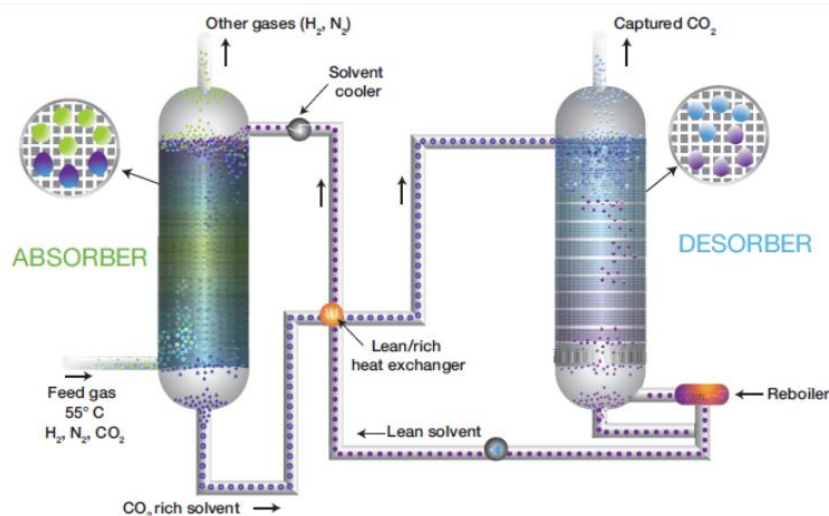
(a) กระบวนการดูดซับทางเคมีด้วยเอมีน

การดูดซับทางเคมีด้วยเอมีนใช้มากในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สทิ้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีโรงงานไฟฟ้า 9 แห่งทั่วโลกได้ใช้การดูดซับทางเคมีด้วยเอมีน ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สทิ้ง สารละลายเอมีนที่ใช้มีหลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น โมโนเอทานอลามีน (MEA) ไดอีทานอลามีน (DEA) เมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) และไดไอโซโพรพานอลเอมีน (DIPA) ถูกใช้กับเทคโนโลยีเหล่านี้ [15]

วิธีทั่วไปคือการปล่อยแก๊สไอน้ำไปยังสารละลายเอมีน และทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาสะเทินกรดเบสเกิดเป็นเกลือคาร์บอเนตที่ละลายน้ำแสดงในสมการ (2.1)



ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะปล่อยความร้อนในขั้นตอนการแยก ในรูปที่ 2.3 ได้อธิบายขั้นตอนของแผนผังกระบวนการดูดซับด้วยการใช้สารละลายเอมีนสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนเตรียมแก๊สทิ้ง ขั้นตอนการดูดซับ และขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพ ก่อนจะถึงขั้นตอนการดูดซับ แก๊สทิ้งทั่วไปจำเป็นต้องมีอุณหภูมิต่ำและมีความบริสุทธิ์สูง คือ มีปริมาณ SO_x และ NO_x ในระดับที่เหมาะสม หลังจากนั้นผ่านแก๊สทิ้งเข้าสู่หม้อไอน้ำเพื่อให้เกิดความดันลดในเครื่องปฏิกรณ์ดูดซับที่อุณหภูมิประมาณ 313-333 เคลวิน แก๊สทิ้งจะไหลผ่านขึ้นมาจากด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ดูดซับและสารละลายเอมีนที่ฟื้นฟูสภาพจะเข้ามาที่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ดูดซับ โดยการไหลของสารละลายเอมีนจะสวนทางกับการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และทำการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สทิ้ง หลังจากขั้นตอนการดูดซับ สารละลายเอมีนที่ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ดูดซับถูกย้ายมาที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในขั้นตอนนี้สารละลายเอมีนที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกให้ความร้อนจากสารละลายเอมีนที่ 378 เคลวิน จากนั้นสารละลายเอมีนที่มีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ฟื้นฟูสภาพและถูกนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารละลายเอมีนที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ฟื้นฟูสภาพมีการสะสมอยู่ของสารละลายเอมีนและถูกกลับมาใช้ใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ดูดซับสำหรับรอบใหม่ ที่ด้านบนคอลัมน์ฟื้นฟูสภาพผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำและสารละลายเอมีนผสมจะถูกควบแน่นแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออก

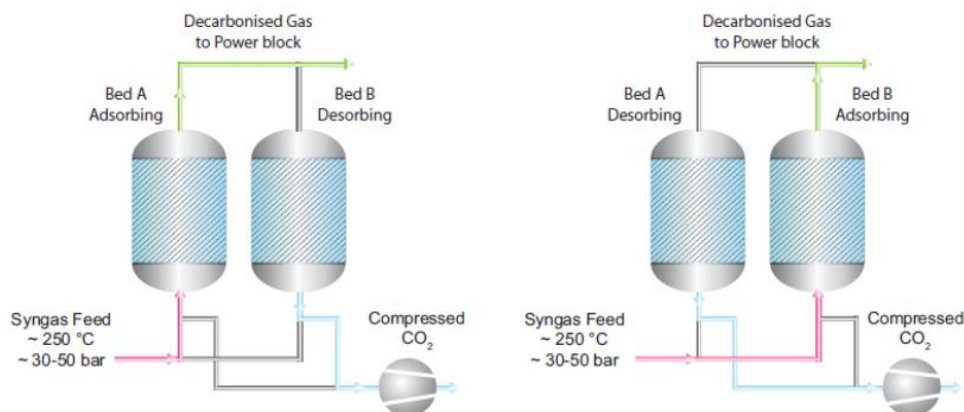


รูปที่ 2.3 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย [12]

(b) กระบวนการดูดซับทางกายภาพด้วยตัวดูดซับของแข็งที่มีรูพรุน

การแยกด้วยตัวดูดซับอนุภาคของแข็งที่มีรูพรุน โดยทั่วไปที่ใช้ คือ ซีโอไลต์ หรือ ถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับสมบัติการดูดซับของของแข็งที่มีรูพรุน การดูดซับและการฟื้นฟูสภาพของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถูกติดตั้งด้วยเทคนิคการดูดซับสลับความดัน (Pressure swing adsorption, PSA) หรือเทคนิคการดูดซับสลับอุณหภูมิ (Temperature swing adsorption, TSA) เกือบทุกการใช้งานจะเกี่ยวข้องกับเทคนิคการดูดซับสลับความดัน ขณะที่เทคนิคการดูดซับสลับอุณหภูมิมีการใช้งานที่น้อยกว่าเพราะใช้เวลานานต่อการเพิ่มความร้อนของตัวดูดซับระหว่างกระบวนการฟื้นฟูสภาพ [16, 17]

เทคนิคการดูดซับสลับความดันขึ้นอยู่กับความดันภายในเครื่อง เมื่อความดันภายในเครื่องสูง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกดูดซับ เมื่อลดความดันภายในเครื่อง ตัวดูดซับจะถูกฟื้นฟูสภาพหรือคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา กระบวนการดูดซับสลับความดันในการนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้จากแก๊สทิ้งแสดงในรูปที่ 2.4 ประกอบด้วย 2 เครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุตัวดูดซับซีโอไลต์สำหรับใช้ในกระบวนการต่อเนื่อง ในเครื่องปฏิกรณ์ A ที่ควบคุมภายใต้ความดันสูงแก๊สทิ้งผสมจะผ่านตลอดเบดตัวดูดซับของซีโอไลต์ที่ทำหน้าที่ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์ A ที่มีปริมาณการดูดซับจำกัด แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลือจากการดูดซับจะออกจากเครื่องปฏิกรณ์ A เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ B ด้วยสวิตช์ควบคุม ซีโอไลต์ที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากในเครื่องปฏิกรณ์ A จะถูกฟื้นฟูสภาพด้วยการลดความดันและปลดปล่อยการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อตัวดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ B มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เต็มปริมาณตัวดูดซับ เครื่องปฏิกรณ์ A ก็พร้อมที่จะดูดซับด้วยการเพิ่มความดันอีกครั้ง ความดันทั้งสองเครื่องปฏิกรณ์ถูกควบคุมให้มีค่าความดันสูงและความดันต่ำซึ่งเป็นชื่อของกระบวนการนี้คือ เทคนิคการดูดซับสลับความดัน



รูปที่ 2.4 กระบวนการดูดซับสลับความดันสำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สสังเคราะห์ [12]

ประโยชน์ของการดูดซับทางกายภาพด้วยตัวดูดซับของแข็งที่มีรูพรุน คือ ใช้พลังงานต่ำในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับและเร็วต่อการฟื้นฟูสภาพจากการเปลี่ยนแปลงความดัน เช่น กระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สทิ้งผสมสำหรับผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนและกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สธรรมชาติ การดูดซับด้วยตัวดูดซับของแข็งที่มีรูพรุนยังไม่สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากความเฉพาเจาะจงที่ต่ำของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และความต้องการกำลังดูดซับสูง อีกหนึ่งเหตุผลจากการมีไอน้ำอยู่ในแก๊สทิ้งเป็นสาเหตุที่ลดปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับของแข็งที่มีรูพรุน

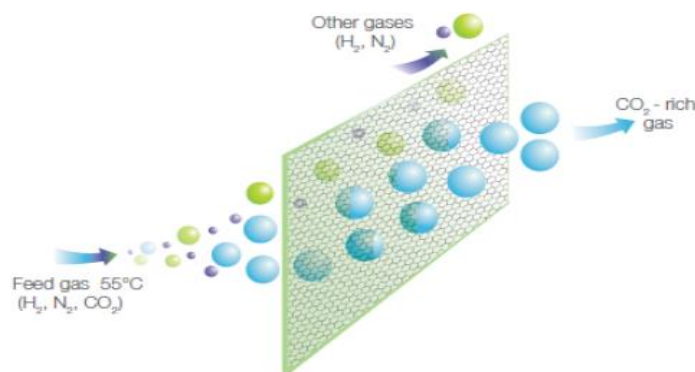
(c) กระบวนการดูดซับทางเคมีด้วยดูดซับของแข็งที่สามารถฟื้นฟูสภาพใหม่

การดูดซับทางเคมีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งที่สามารถฟื้นฟูสภาพใหม่เป็นเทคนิคที่เป็นไปได้ต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เทคนิคนี้ เป็นระบบการดักจับหลังการเผาไหม้ เสนอโดย Shimizu [18] กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งที่สามารถฟื้นฟูใหม่ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การดักจับแก๊สและการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับแสดงในรูปที่ 2.1 แก๊สที่ผ่านการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิงจะผ่านเครื่องปฏิกรณ์เพื่อสัมผัสกับตัวดูดซับของแข็งที่สามารถฟื้นฟูใหม่ เมื่อเกิดการดูดซับทางเคมีของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวดูดซับของแข็งเสร็จ ตัวดูดซับของแข็งจะถูกส่งผ่านไปยังขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพ สามารถคายซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยความร้อน ความร้อนที่จำเป็นสำหรับการฟื้นฟูสภาพขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้และภาวะเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สุดท้ายตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพใหม่ถูกส่งกลับมายังกระบวนการดูดซับอีกครั้ง

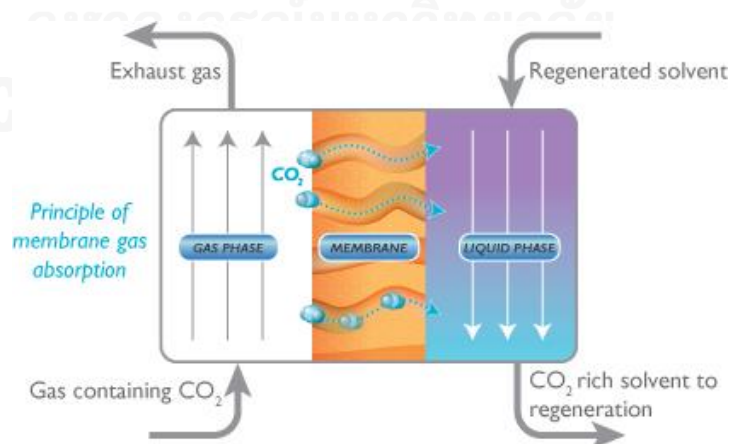
2.1.2.2 การแยกด้วยเมมเบรน

การแยกด้วยเมมเบรนแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นวัสดุเฉพาะที่มีความเจาะจงต่อชนิดของแก๊ส ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุ การไหลของแก๊สตลอดเมมเบรนจะเคลื่อนที่ด้วยความแตกต่างของความดันระหว่างเมมเบรน จึงใช้ความดันสูงที่ได้จากไอน้ำสำหรับการแยกด้วยเมมเบรนและความต่างของชนิดวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ยกตัวอย่างเช่น วัสดุพอลิเมอร์โลหะ และซีเมนต์ (Cement) ปัจจุบันมีการใช้งานในระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อแยกไฮโดรเจนจากแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ ระหว่างกระบวนการผลิตไอน้ำหรือออกซิเจนจากอากาศด้วยการแยกออกซิเจนจากการผลิตไอน้ำที่มีความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์สูง [19]

เทคโนโลยีการดูดซับแก๊สด้วยเมมเบรนคอนแทคเตอร์ (Contactor) คือ การรวมวิธีการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนกับเทคโนโลยีในการดูดซับด้วยของเหลวแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 การแยกแก๊สด้วยเมมเบรน [12]



รูปที่ 2.6 เมมเบรนคอนแทคเตอร์สำหรับแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [20]

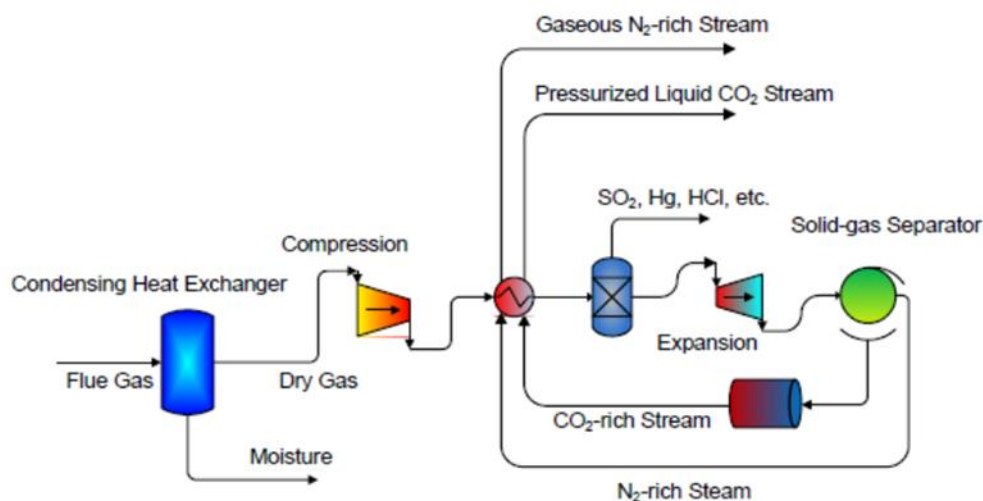
เมมเบรนทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างแก๊สขาเข้าและตัวดูดซับของเหลวของกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทนด้วยการแพร่กระจายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากด้านของแก๊สขาเข้าผ่านตลอดเมมเบรนแล้วดูดซับในของเหลวที่มีความเฉพาะเจาะจง ของเหลวถูกหมุนเวียนจากเครื่องดูดซับ (absorber) เพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปยังเครื่องคายซับ (desorb) ที่มีการสัมผัสกับเมมเบรนเพื่อคายซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น ความเฉพาะเจาะจงของกระบวนการไม่เพียงแต่ใช้การดูดซับของเหลวแต่เมมเบรนยังทำหน้าที่แสดงความเฉพาะเจาะจง [21] เมมเบรนคอนแทคเตอร์เป็นกระบวนการดูดซับด้วยเมมเบรนที่มีการควบคุมง่ายและความยืดหยุ่นสูง [22-24] ประโยชน์ของกระบวนการแยกแก๊สของเหลวเมมเบรนคอนแทคเตอร์สามารถสร้างทางเลือกสำหรับการใช้งานที่แตกต่าง ยกตัวอย่างเช่น การแยกของโอเลฟินและพาราฟิน [23, 25] การหมุนเวียนออกซิเจนในเลือด [26] และการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สเบา

2.1.2.3 การแยกด้วยเทคนิคไครโอเจนิค

การดักจับแก๊สด้วยเทคนิคไครโอเจนิค (Cryogenic) คือวิธีการแยกสารประกอบที่มีจุดเดือดต่างกัน โดยสารประกอบจะถูกลดอุณหภูมิจนกระทั่งแยกในวัฏภาคที่แตกต่างกัน ในปี 1950 เทคนิคไครโอเจนิคใช้กับการผลิตแก๊สธรรมชาติเหลว ปัจจุบันการแยกด้วยไครโอเจนิคได้พัฒนาสำหรับการทำให้บริสุทธิ์ของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากไอน้ำทำให้ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง [27]

ไครโอเจนิค คือ เทคนิคที่ดำเนินกระบวนการในอุณหภูมิต่ำมากกว่า 100 องศาเซลเซียส สามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การกดอัด ระบบทำความเย็นและการขยายตัว แสดงในรูปที่ 2.7 เริ่มต้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สที่ส่งผ่านตัวกรองและส่วนของการกดอัดด้วยการเพิ่มความดันแก๊ส ระหว่างขั้นตอนนี้สิ่งเจือปนรวมถึงน้ำถูกกำจัดออก จากนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะกดอัดถูกลดอุณหภูมิในระบบทำความเย็นและขั้นตอนการขยายตัวที่อุณหภูมิต่ำประมาณ -78 องศาเซลเซียส แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ควบแน่นเป็นของเหลวแล้วถูกแยกจากแก๊สในคอลัมน์การกลั่น

การแยกด้วยเทคนิคไครโอเจนิคสามารถแยกในไอน้ำที่บริสุทธิ์และสามารถผลิตคาร์บอนไดออกไซด์เหลวได้โดยตรงซึ่งเป็นประโยชน์หลักสำหรับการขนส่ง เทคนิคไครโอเจนิคเป็นประโยชน์ในการพัฒนาสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ยังเป็นการทดลองระดับเครื่องขนาดสาธิต เนื่องจากความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณต่ำเป็นผลให้ความต้องการพลังงานสูงสำหรับการทำความเย็น (refrigeration) ในปัจจุบันเทคนิคไครโอเจนิคในทางการค้าใช้กำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบการดักจับหลังการเผาไหม้โดยใช้ ออกซิเจนบริสุทธิ์และการดักจับหลังการเผาไหม้ ทั้งสองระบบนี้ประกอบด้วยความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงในแก๊สขาเข้า



รูปที่ 2.7 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โครโอเจนิค [27]

2.1.3 ตัวดูดซับคาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไล

ที่ผ่านมา มีหลายวิธีพัฒนาสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาของราคาและพลังงานที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนในการดูดซับ ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของราคาและพลังงาน คือ การใช้ตัวดูดซับคาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไลที่อุณหภูมิต่ำ [28]

2.1.3.1 ความก้าวหน้าของเทคโนโลยี

ในปัจจุบันการใช้คาร์บอนเนตของโลหะแอลคาไลสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเชื้อเพลิงมีงานวิจัยจำนวนมากและบางงานวิจัยจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

(a) กระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับโซเดียม

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการใช้ตัวดูดซับโซเดียมที่ปรับสภาพแล้วจากงานวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานของประเทศสหรัฐอเมริกา (DOE/NETL) โดยมีสถาบัน RTI เป็นคู่สัญญาหลัก (Prime contractor) และมีมหาวิทยาลัย Louisiana state เป็นคู่สัญญาร่วม (Subcontractor) และมี Church และ Dwight เป็นภาคอุตสาหกรรมที่ร่วมในงานวิจัยนี้ [29-34]

RTI ได้ออกแบบกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการใช้ตัวดูดซับโซเดียมหลายประเภทของตัวดูดซับที่มีโซเดียมเป็นองค์ประกอบได้ถูกทดสอบเนื่องจากมีราคาค่อนข้างถูก ตัวดูดซับที่ใช้คือ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตหลายเกรด (SCB 1# 2# 3# และ 5#) โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตมอนอไฮเดรต โซเดียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับมีการเตรียมได้หลายวิธีเพื่อทำให้มีพื้นที่ผิวสูง กระบวนการดูดซับโดยใช้คาร์บอนเนตทดลองด้วยหลายเทคนิค เช่น เครื่องวิเคราะห์

การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) เครื่องเบตหนึ่งขนาดห้องปฏิบัติการ เครื่องฟลูอิดซ์เบตขนาดห้องปฏิบัติการ และเครื่องขนาดสาคิตด้วยแก๊สจริงจากการเผาไหม้ถ่านหิน กระบวนการเหล่านี้ออกแบบสำหรับตัวดูดซับโซเดียม

- พฤติกรรมของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

การทดสอบภาวะของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับโซเดียมของ RTI ใช้ความดัน 1 บาร์ สำหรับการใช้งานในแก๊สเชื้อเพลิง การวิเคราะห์ทางพื้นฐานเทอร์โมไดนามิก อุณหภูมิที่เลือกใช้คือ 323-353 เคลวิน ส่วนประกอบของแก๊สคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 5-10 โดยปริมาตร ปริมาณน้ำร้อยละ 10-20 โดยปริมาตรและปรับปริมาตรด้วยไนโตรเจนด้วยการประมาณจากส่วนประกอบจริงจากการเผาไหม้ของแก๊สธรรมชาติ

LSU ศึกษาปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันต่อชนิดตัวดูดซับโซเดียมที่ต่างกันในเรื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) ร่วมกับ HSC Chemistry RTI พัฒนาแบบจำลองแกนกลางหดตัว (Shrinking - core model) คำนวณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของโซเดียมคาร์บอเนตในเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน [35] พบว่าโซเดียมคาร์บอเนต [36] และโซเดียมคาร์บอเนตมอนอไฮดรตเกิดปฏิกิริยาอย่างช้าๆกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตอธิบายจากการสลายตัวของโซเดียมไฮดรเจนคาร์บอเนต กระบวนการคาร์บอนเนชันมีเหตุผลมาจากการเกิด $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{NaHCO}_3$ (Wegscheider's salt) ที่อุณหภูมิกระบวนการคาร์บอนเนชันที่ 343 เคลวิน ขณะที่โซเดียมไฮดรเจนคาร์บอเนต เกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่า 343 เคลวิน [37] การสรุปนี้ถูกยอมรับอย่างกว้างด้วยหลายงานวิจัยสำหรับทั้งโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตที่มีตัวรองรับ

RTI ได้คำนวณค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาของโซเดียมคาร์บอเนต [36] และเทียบค่าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) กับ LSU โดยตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ถูกอธิบาย [34] และค่าพลังงานก่อกัมมันต์ที่คำนวณได้คือ 39.9 กิโลจูลต่อโมล ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ อุณหภูมิที่ภาวะสมดุลคืออุณหภูมิที่โซเดียมคาร์บอเนตถูกเปลี่ยนเป็นโซเดียมไฮดรเจนคาร์บอเนต [38] อุณหภูมิสมดุลที่คำนวณได้คือ 346.4 เคลวิน สำหรับ Wegscheider's salt ค่าอุณหภูมิสมดุลที่คำนวณได้คือ 355.2-355.6 เคลวิน [39]

(b) กระบวนการดูดซับด้วยโพแทสเซียม

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ ตัวดูดซับโพแทสเซียมศึกษาจาก 3 สถาบันวิจัย คือ มหาวิทยาลัยนานาชาติคุงปัก (KNU) สถาบันวิจัยพลังงานกำลังไฟฟ้าเกาหลี (KEPRI) และสถาบันงานวิจัยพลังงานของเกาหลี (KIER) [40-46] มหาวิทยาลัยนานาชาติคุงปักได้พัฒนาตัวดูดซับหลายแบบเพื่อเอาไปใช้ในงานวิจัย การศึกษาทั่วไปจะใช้ถึงปฏิกรณ์เบตหนึ่งและตัวดูดซับผงแบ่ง การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการปรับสภาพของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและวัสดุอื่นที่ใช้สำหรับเป็นตัวรองรับเช่น ถ่านกัมมันต์ ไทเทเนียมออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และซีโอไลท์ หลายชนิด สถาบันวิจัยพลังงานกำลังไฟฟ้าเกาหลีได้ศึกษาวิธีผลิตอนุภาคทรงกลมและมวลของตัวดูด

ชั้นที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดและพัฒนากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบคู่

- พฤติกรรมของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน

การศึกษาการปล่อยแก๊สทิ้งจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ภาวะอุณหภูมิที่ทดสอบคือ 323-373 เคลวิน แก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 5-10 โดยปริมาตร ปริมาณน้ำร้อยละ 5-20 โดยปริมาตร และสมดุลไนโตรเจน

เครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (TGA) เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งและ XRD ถูกใช้ศึกษาปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของชนิดโลหะแอลคาไลที่แตกต่างกัน สามารถสรุปได้เหมือนโซเดียมคาร์บอเนตว่า โพลีเอทิลีนคาร์บอเนตแบบไม่มีตัวรองรับและ $K_2CO_3 \cdot 1.5H_2O$ ยากต่อการทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ภาวะการทดลอง ก่อนเกิดกระบวนการคาร์บอนเนชันของโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตที่เกิดจากการสลายตัว $K_2CO_3 \cdot 1.5H_2O$ ที่ถูกสร้างขึ้นเมื่อเริ่มต้นและทำปฏิกิริยาอย่างช้าๆ กับคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตอธิบายจากการสลายตัวของ $K_4H_2(CO_3)_3 \cdot 1.5H_2O$ ที่ถูกสร้างขึ้นเมื่อเริ่มต้นแล้วผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อสร้างโพลีเอทิลีนไฮโดรเจนคาร์บอเนต [47]

(c) การพัฒนาตัวดูดซับโลหะแอลคาไล

ลักษณะการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตโดยศึกษาจากมหาวิทยาลัย South-east ในจีนเพื่อปรับปรุงอัตราการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเนชัน [48] โพลีเอทิลีนคาร์บอเนตที่ได้จากการเผาโพลีเอทิลีนไฮโดรเจนคาร์บอเนตพบว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาและร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนเนชันสูง โพลีเอทิลีนคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา ความแข็งแรงเชิงกลสูงและมีความต้านทานการสึกกร่อนสูง เนื่องจากสมบัติของอะลูมินาออกไซด์ นอกจากนี้ การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินายังถูกทดสอบภายใต้การหมุนเวียนต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบคู่

2.1.4 ฟลูอิดเซชัน

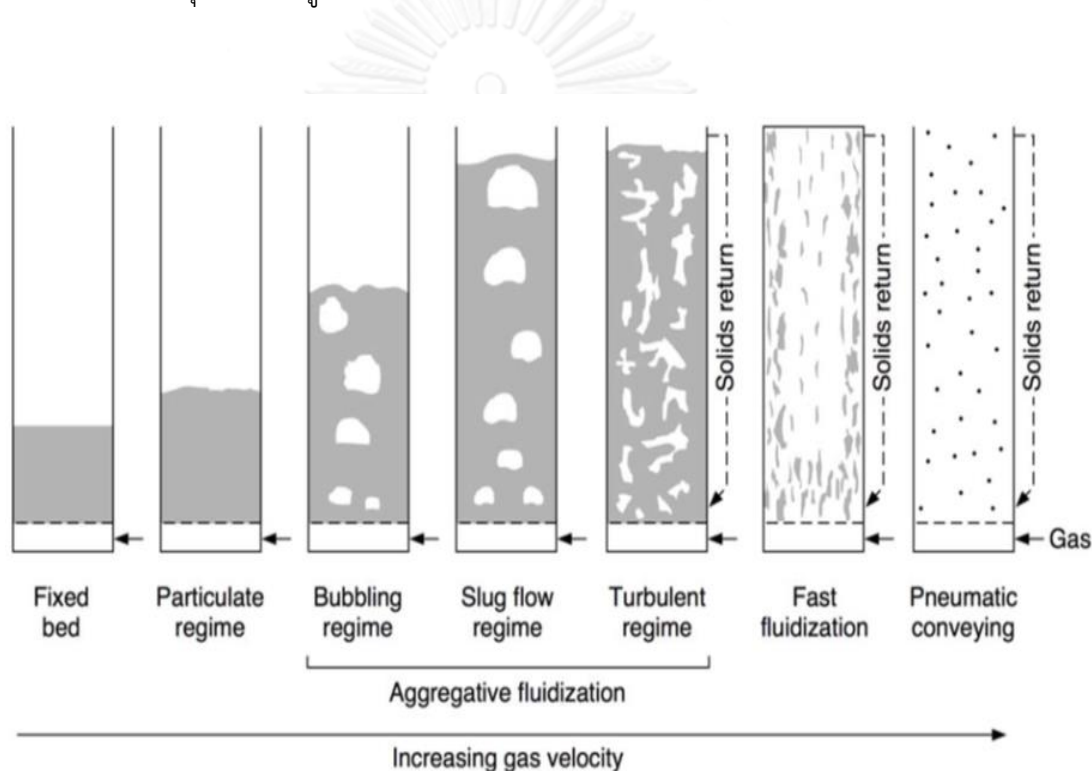
ฟลูอิดเซชัน หมายถึง กระบวนการที่อนุภาคของแข็งถูกเปลี่ยนจากภาวะอยู่นิ่งเป็นภาวะของไหล กระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อแก๊สหรือของเหลวผ่านตลอดอนุภาคของแข็ง ถ้าไม่มีแก๊สหรือของเหลวผ่านในกระบวนการอนุภาคของแข็งจะถูกดึงลงด้วยแรงโน้มถ่วง เมื่อแก๊สหรือของเหลวเริ่มผ่านเข้ามาด้านล่างของคอลัมน์ทำให้เกิดแรงต้านที่มีทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงภายในระบบฟลูอิดเซชันแรงต้านที่ดึงขึ้นจะสมดุลกับแรงโน้มถ่วงที่ดึงลง ดังนั้น อนุภาคของแข็งจะกลายเป็นสารกึ่งแขวนลอยภายในแก๊สหรือของเหลว ระบบฟลูอิดเซชันทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลและความร้อนระหว่างวัฏภาคแก๊สและของแข็งผสมอย่างรวดเร็วและสามารถใช้ได้ในกระบวนการขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ตัวอย่างการใช้งานในระบบฟลูอิดเซชันแสดงในตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 การใช้งานอุตสาหกรรมของฟลูอิดเซชัน [49]

ชนิดงานอุตสาหกรรม	การใช้งาน
วัสดุพอลิเมอร์ (Polymeric Materials)	ปฏิกิริยาเตรียมมอนอเมอร์ในวัฏภาคแก๊สของพอลิเอทิลีน
ชีวเคมี (Biochemical)	การเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์สำหรับอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมยา
สังเคราะห์สารเคมี (Chemical Synthesis)	พาราคลิกแอนไฮไดรด์ ปฏิกิริยาฟิชเชอร์ทรอปของไฮโดรคาร์บอนอะคลีโรไนไตรต์ มาเลอิกแอนไฮไดรด์
กระบวนการปิโตรเลียม (Petroleum Processing)	การแตกโมเลกุลด้วยสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับผลิตภัณฑ์ของแก๊สโซลีนจากแก๊สเชื้อเพลิง การแยกสลายด้วยความร้อนของแนฟทา
การเผาไหม้ (Combustion)	การเผาไหม้ถ่านหิน การเผาขยะในเตาเผา
กระบวนการทางกายภาพ (Physical operation)	เคลือบโลหะ การทำของแข็งให้แห้ง การดูดซับสารละลาย

2.1.5 รูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดเซชัน

เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สตลอดเบดของแข็ง พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของแก๊สและของแข็งในระบบจะเปลี่ยนไปแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะรูปแบบการไหลได้เป็น แบบเบดนิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ้ง ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนและฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง เมื่อความเร็วของแก๊สเริ่มผ่านเบดที่ความเร็วแก๊สต่ำ ตัวดูดซับของแข็งอยู่ในภาวะคงที่ เรียกเบดชนิดนี้ว่า เบดนิ่ง เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มเคลื่อนที่ขึ้น เรียกความเร็วจุดนี้ว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันหรือความเร็วต่ำสุดที่ของแข็งเคลื่อนที่ หลังจากจุดนี้ ความสูงเบดจะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มของความเร็วแก๊ส



รูปที่ 2.8 รูปแบบการไหลในฟลูอิดซ์เบด [50]

2.1.5.1 เบดนิ่ง (Fixed bed)

เบดนิ่ง หมายถึง การคงที่ของอนุภาคในคอลัมน์ขณะที่มีการไหลผ่านของแก๊ส เมื่อไม่มีการไหลของแก๊สผ่านเบดจะมีเพียงแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่ออนุภาคของแข็ง เมื่อแก๊สผ่านเบดจะเกิดแรงต้านที่มีขนาดตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงกระทำต่ออนุภาคเป็นผลทำให้เกิดความดันลด สำหรับเบดนิ่ง ความดันลดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของแก๊ส Ergun [51] เสนอความสัมพันธ์ของสมการความดันลดต่อหนึ่งหน่วยความสูงของเบด ($\Delta P/L$) แสดงในสมการ (2.2)

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U}{(\phi d_p)^2} + 175 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho U^2}{\phi d_p} \quad (2.2)$$

เมื่อ

- ε คือ สัดส่วนปริมาตรของวัฏภาคแก๊ส (-)
- ϕ คือ ความเป็นทรงกลมของอนุภาคของแข็ง (-)
- μ คือ ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
- ρ_s คือ ความแน่นของของของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- U คือ ความเร็วของแก๊ส (เมตรต่อวินาที)
- d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (เมตร)

2.1.5.2 ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidization)

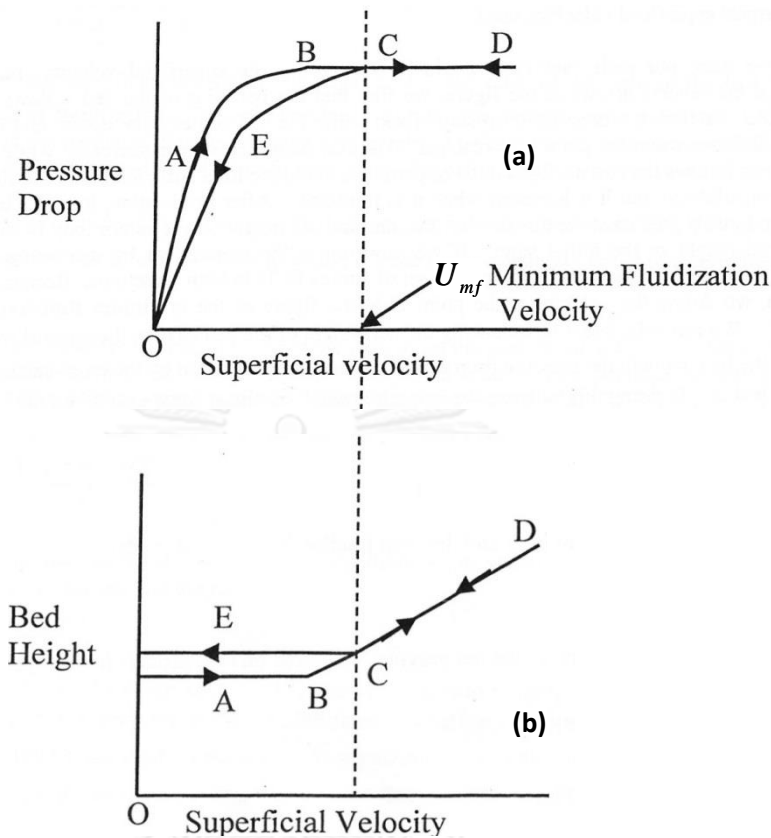
จากรูปที่ 2.8 เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สตลอดเบตจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง คือค่าความเร็ววิกฤตที่รูปแบบการไหลแบบเบตหนึ่งจะเปลี่ยนเป็นรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส ค่านี้เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันหรือความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ของความดันลดและความสูงเบตกับความเร็วแก๊สที่เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาความเร็วของแก๊สที่ต่ำกว่าค่า U_{mf} จะเห็นว่าความดันลดที่เกิดจากแรงต้านจะมีค่าเพิ่มขึ้นขณะที่ความสูงเบตมีค่าคงที่เมื่อมีการเพิ่มความเร็วแก๊ส ที่ตำแหน่ง B หรือความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ที่ค่านี้แรงต้านที่เกิดจากอนุภาคของแข็งจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบต จากนั้นเมื่อความเร็วแก๊สมีค่ามากกว่าค่า U_{mf} ของแข็งในเบตจะประพฤติตัวคล้ายของไหล โดยที่ความสูงเบตเริ่มขยายตัวในขณะที่ค่าความดันลดมีค่าคงที่ไม่เพิ่มขึ้นด้วยความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น

ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันถูกเสนอด้วยความสัมพันธ์ของ Wen และ Yu [52] ที่นิยมใช้ในการคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf}) ความสัมพันธ์ของ Wen และ Yu คือ

$$\text{Re}_{mf} = \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu} = [27.2^2 + 0.0408 \text{Ar}]^{0.5} - 27.2 \quad (2.3)$$

โดยค่าตัวเลขไร่นหน่วยอาร์คิมิดีส คือ

$$\text{Ar} = \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g d_g^3}{\mu^2} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.9 ความดัน (a) และความสูงเบต (b) กับความเร็วของแก๊ส [53]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอวิธีในการคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ซึ่งการคำนวณด้วยความสัมพันธ์ของค่าความดันลดกับความเร็วแก๊สที่แตกต่างกันแสดงในรูปที่ 2.9 ค่าความเร็วแก๊สต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันสามารถอธิบายจากการลากเส้นตรงแบ่งเป็น 2 ส่วน [54]

Puncochur เสนอวิธีคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันด้วยพื้นฐานความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความดันและความเร็วแก๊ส ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันอธิบายด้วยส่วนร่วมของเส้นถดถอย (regression line) กับความเร็วของแก๊ส [55]

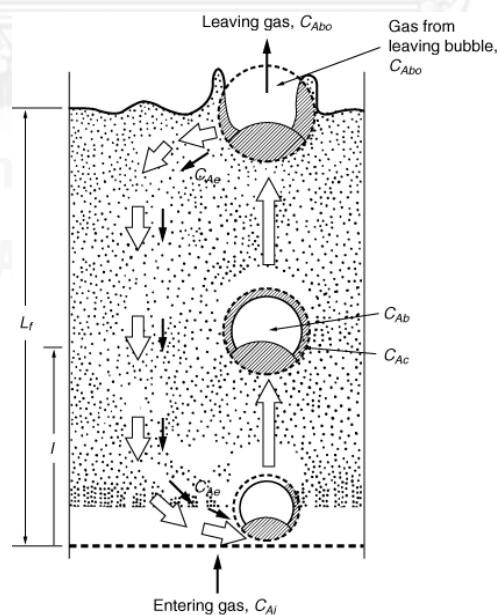
ลักษณะการเคลื่อนไหวภายในเบตจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

- 1.) Bubble phase คือ ส่วนที่เป็นฟองแก๊ส ซึ่งในส่วนนี้อาจมีอนุภาคของแข็งอยู่บ้างแต่มีปริมาณน้อย
- 2.) Emulsion phase คือ ส่วนที่ไม่ใช่ฟองแก๊สหรือส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น ขนาดของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคของแข็งและความเร็วแก๊สที่ป้อนเข้ากระบวนการ

ลักษณะการเคลื่อนไหวภายในเขตแสดงในรูปที่ 2.10 ฟองแก๊สขนาดเล็กจากเขตด้านล่างจะเชื่อมเข้าด้วยกันจนเกิดเป็นฟองแก๊สขนาดใหญ่ขึ้นและแตกออกที่พื้นผิว รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สมีลักษณะเฉพาะตัว คือ การมีฟองแก๊สเกิดขึ้นซึ่งมีอิทธิพลอย่างมากต่อการผสมกันของแก๊ส-ของแข็ง สำหรับอนุภาคที่ต่างกันลักษณะการเกิดช่วงการไหลนี้จะมีความแตกต่างกันด้วย กล่าวคือ สำหรับอนุภาคในหมวดหมู่ของ Geldart กลุ่ม B และ D ช่วงการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สมีค่าเท่ากับค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf}) สำหรับฟลูอิดเซชันของ Geldart A เมื่อความเร็วแก๊สถึงความเร็วแก๊สต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันของแข็งจะไม่เกิดฟองแก๊สทันทีจะมีเพียงการขยายตัวของเขต โดยจะเริ่มมีช่วงการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สก็ต่อเมื่อความเร็วแก๊สเข้ามากว่าความเร็วที่เรียกว่าค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองแก๊ส (U_{mb}) รูปแบบการไหลของของแข็งที่อยู่ระหว่างค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันและค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองแก๊ส เรียกว่า รูปแบบการไหลฟองแก๊สอิสระ (bubble-free) [56] สำหรับ Geldart C ที่ของแข็งมีขนาดละเอียดมากและยากที่จะเกิดพฤติกรรมของไหล จึงไม่เกิดช่วงการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สสำหรับอนุภาคกลุ่มนี้ Geldart และ Abrahamsen [60] ได้เสนอวิธีประมาณค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองแก๊สสำหรับกลุ่ม Geldart A คือ

$$U_{mb} = 2.07 \exp(0.716F) d_p \left[\frac{\rho_g^{0.06}}{\mu^{0.347}} \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ F คือ สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 45 ไมโครเมตร (-)



รูปที่ 2.10 รูปแบบการไหลแบบฟองแก๊ส [57]

2.1.5.3 ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง (Slugging fluidization)

สลัก คือ ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นในเบดที่บรรจุอยู่ในหอทดลองซึ่งมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด (ห้องทดลอง) ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดและแยกอนุภาคของแข็งออกเป็นชั้นๆ [58]

ความเร็วของแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดหรือหอทดลองคือ Minimum slugging velocity (U_{sl}) เสนอโดย Stewart และ Davidson [59]

$$U_{sl} = U_{mf} + 0.07(gd)^{0.5} \quad (2.6)$$

ค่าวิกฤตสำหรับการเกิดสลักที่ทำให้หลุดตัน ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการก่อตัวอนุภาคของแข็งในระบบฟลูอิดเซชันของแก๊ส-ของแข็งเสนอโดย Yang [60] ค่า (U_t^2 / gD) ต้องมากกว่า 0.123 แสดงในสมการ (2.7)

$$\frac{U_t^2}{gD} \geq 0.123 \quad (2.7)$$

เมื่อ

U_t คือ ความเร็วสุดท้ายของของแข็งเฉลี่ย (เมตรต่อวินาที)

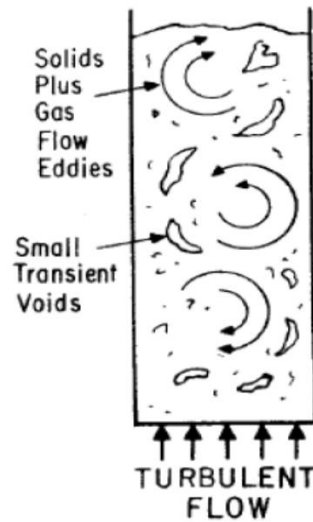
D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ (เมตร)

2.1.5.4 ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidization)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่ผ่านรูปแบบการไหลแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้นมากกว่าค่า U_{mb} สำหรับหมวดหมู่ของ Geldart อนุภาคกลุ่ม A หรือมากกว่าค่า U_{mf} สำหรับหมวดหมู่ของ Geldart อนุภาคกลุ่ม B และ D จนส่งผลให้เกิดการขยายตัวของเบดจนมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบสัมผัสกันของอนุภาคของแข็ง-แก๊ส ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแยกออกจากกันอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากรูปแบบจากฟองแก๊สเป็นรูปแบบการไหลใหม่ที่เรียกว่า ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน แสดงในรูปที่ 2.1 [61]

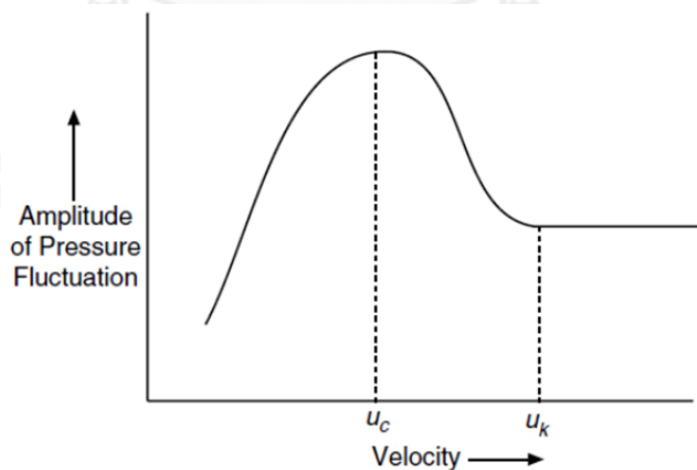
ลักษณะการเคลื่อนไหวในเบดปั่นป่วนจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

- 1.) Dense phase คือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น จะอยู่ด้านล่างของหอทดลอง
- 2.) Dilute phase คือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง จะอยู่ด้านบนของหอทดลอง



รูปที่ 2.11 รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน [61]

สำหรับช่วงที่เปลี่ยนแปลงภาวะเขตแบบฟองแก๊สไปเป็นเขตแบบปั่นป่วนนั้นไม่เกิดขึ้นทันทีที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงความเร็วในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ จากผลงานวิจัยของนักวิจัยหลายๆ ท่าน พบว่า การเปลี่ยนจากภาวะจากเขตแบบฟองแก๊สไปเป็นเขตแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงการเปลี่ยน โดยเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง เขตซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเขตแบบฟองแก๊สนั้น ที่ผิวหน้าของเขต จะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเขตแบบปั่นป่วนซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเขตที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนภาวะได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วในช่วงการเกิดเขตแบบปั่นป่วน [62]

จากรูปที่ 2.12 ค่าความเร็วของการเปลี่ยนแปลงภาวะเบตแบบฟองแก๊สไปเป็นเบตแบบปั่นป่วนสามารถแบ่งเป็น 2 ค่าคือ

- 1.) Transition velocity (U_c) คือ ความเร็วที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความดันมีค่าสูงสุด [63] มีหลายงานวิจัยอธิบายค่า U_c ที่เกี่ยวข้องกับหลายตัวแปร เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ ความหนาแน่นของวัฏภาคแก๊ส อุณหภูมิ และขนาดอนุภาคที่กระจายตัว เทคนิคการวัดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความดันได้ถูกศึกษาที่ภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน ดังนั้น มีหลายงานวิจัยที่เสนอความสัมพันธ์เพื่อคำนวณค่า U_c แสดงในตารางที่ 2.2
- 2.) Critical velocity (U_k) คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความดันที่ค่าเริ่มคงที่ขณะที่ความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นแสดงในรูปที่ 2.12 พฤติกรรมนี้หมายถึง การรวมฟองแก๊สและกระจายตัวออกกลายเป็นช่องว่างขนาดเล็ก [63]

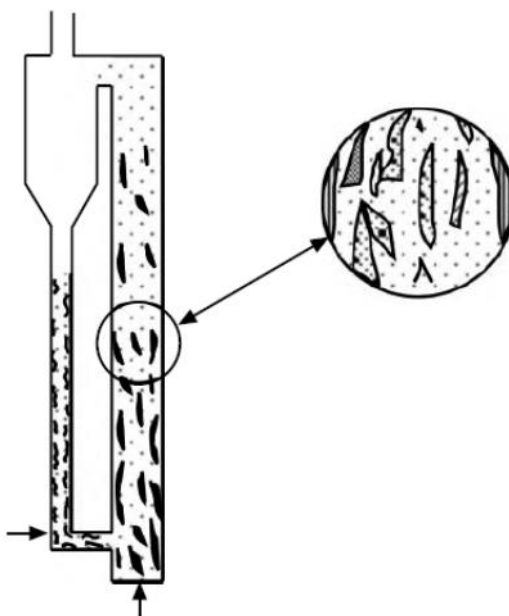
รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนถูกใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมเพราะการสัมผัสกันของแก๊ส-ของแข็งที่สูงหรือมีสัมประสิทธิ์การกระจายตัวสูงสำหรับของแข็งและมีการเกิด back-mixing [64]

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์สำหรับความเร็ว Transition (U_c)

งานวิจัย	ความสัมพันธ์	สมการ
Yerushalmi และ Cankurt [62]	$U_c = 3.0(\rho_p d_p)^{0.5} - 0.77$	(2.8)
Yang [64]	$U_c = U_t \varepsilon_e^m$ $U_t = U_t \text{Re}^{-0.485}$	(2.9)
Jin และคณะ [65]	$\varepsilon_e = (m-1)/m, m = 2.31 \text{Re}_t^{-0.0547}$ $\frac{U_c}{\sqrt{g d_p}} = \left(f \frac{D_t \rho_s - \rho_g}{d_p \rho_g} \right)^{0.27}$ $f D_t = 0.00367$ $f D_t = 0.00232$ $f D_t = 0.00032$	(2.10)
Lee และ Kim [66]	$\text{Re}_c = 0.700 A r^{0.485}$	(2.11)
Leu, Huang และ Gua [67]	$\text{Re}_c = 0.568 A r^{0.578}$	(2.12)
Horio [68]	$\text{Re}_c = 0.936 A r^{0.472}$	(2.13)

2.1.5.5 ฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization)

รูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูงค้นพบมากกว่า 20 ปี ถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย Yerushalmi และคณะ [62] ว่าเป็นลักษณะการไหลที่อยู่ระหว่างรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบปั่นป่วนและรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบเบาบาง เกิดขึ้นจากเมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นจากรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบปั่นป่วน เบทจะมีการขยายตัวจนไม่สามารถระบุพื้นผิวด้านบนของเบตได้ อนุภาคของแข็งจะหลุดไปด้านบนของหอตลอด Li และ Kwauk [69] เสนอรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูงว่ามีค่าเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดในท่อไรเซอร์จากหนาแน่นไปเบาบาง เรียกว่ารูปแบบของตัวเอส ลักษณะเด่นที่สามารถสังเกตเห็นได้จากช่วงการไหลนี้ก็คือ บริเวณตรงกลางของหอตลอดจะมีของแข็งเคลื่อนที่ขึ้นในลักษณะเบาบาง ขณะที่บริเวณผนังกลุ่มอนุภาคของแข็งมีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) และเคลื่อนที่ลง เรียกลักษณะการเกิดแบบนี้ว่า การไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annulus flow) เสนอโดย Takeuchi และคณะ [70] แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง [71]

ค่าความเร็วต่ำสุดที่ของการเกิดฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง โดยยังไม่มีภาระหมุนเวียนอนุภาคของแข็ง เราเรียกว่า ความเร็วส่งผ่าน (Transport velocity, U_{tr}) เมื่อเบตมีความเร็วเหนือความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity) อนุภาคจะแยกกันอย่างอิสระ อนุภาคของแข็งจะถูกพาออกจากคอลัมน์โดยใช้เวลาจำกัด ถ้าลดความเร็วลงเรื่อยๆ แต่มีค่าเกินความเร็วสุดท้าย เวลาที่ใช้จะเพิ่มขึ้น ในการที่อนุภาคของแข็งถูกพัดพาจากคอลัมน์จนหมดถ้าลดความเร็วลงจนถึงค่าวิกฤตเวลาที่ใช้จะเพิ่มขึ้นทันทีทันใด เรียกว่า ความเร็วส่งผ่าน

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วแก๊สและฟลักซ์ปริมาตรของแข็ง (Solid volumetric flux) ที่ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง [62, 72] ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขไร้นิติหน่วยเรย์โนลด์ส์สำหรับความเร็วขนส่ง (Re_{tr}) และค่าตัวเลขไร้นิติหน่วยอาร์คิมิดิสได้ใช้คำนวณค่า U_{tr} แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของความเร็วส่งผ่าน (U_{tr})

งานวิจัย	ความสัมพันธ์	สมการ
Lee และ Kim [73]	$Re_{tr} = 2.916Ar^{0.354}$	(2.14)
Perales และคณะ [74]	$Re_{tr} = 1.415Ar^{0.438}$	(2.15)
Bi และ Fan [75]	$Re_{tr} = 2.28Ar^{0.419}$	(2.16)
Adanez และคณะ [76]	$Re_{tr} = 2.078Ar^{0.458}$	(2.17)
Tsukada และคณะ [77]	$Re_{tr} = 1.806Ar^{0.458}$	(2.18)
Chehbouni และคณะ [78]	$Re_{tr} = 0.169Ar^{0.545}(D_t/d_p)^{0.3}$	(2.19)

2.1.6 สมบัติของตัวดูดซับของแข็ง

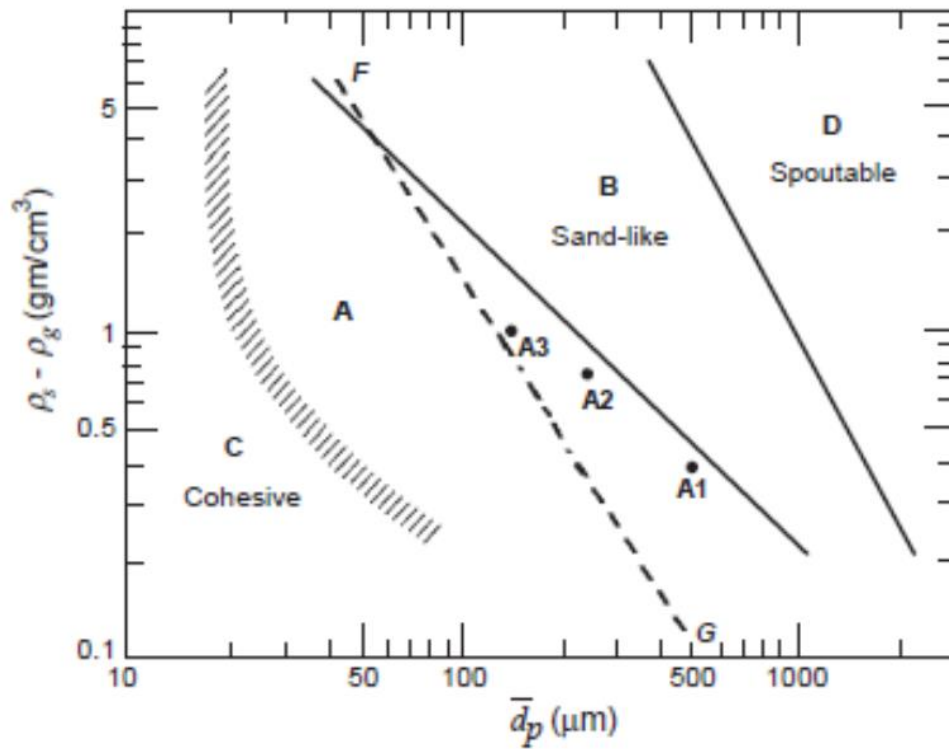
การจำแนกอนุภาคของแข็งด้วยวิธี Geldart (Geldart powder classification) จะอาศัยค่าผลต่างของความหนาแน่นของแก๊สและขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งลักษณะอนุภาคแต่ละกลุ่มสามารถอธิบายได้ดังนี้ [79, 80]

กลุ่ม A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยน้อยกว่า 30 ไมโครเมตรและความหนาแน่นต่ำกว่า 1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC (Fluid catalytic cracking) จัดอยู่ในของแข็งประเภทนี้ ของแข็งในกลุ่มนี้สามารถเกิดฟลูอิดเซชันได้ง่ายที่ความเร็วต่ำเป็นฟลูอิดเซชันแบบสม่ำเสมอ (Smooth fluidization) และที่ความเร็วสูงก็สามารถควบคุมการเกิดฟองแก๊สได้

กลุ่ม B คือ Sandlike บางครั้งเรียกว่าอนุภาคฟองแก๊ส อนุภาคในกลุ่มนี้มีขนาด 150 ถึง 500 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 1.4 ถึง 4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ของแข็งในกลุ่มนี้สามารถเกิดฟลูอิดเซชันได้ง่าย แต่มักจะมีฟองแก๊สเกิดขึ้นด้วย ชนิดของวัสดุกลุ่ม B คือ เม็ดแก้วและก้อนกรวด

กลุ่ม C คือ Cohesive หรือ very fine powder เป็นของแข็งที่สามารถยึดเกาะได้ดี ที่ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 30 ไมโครเมตร และยากในการเกิดฟลูอิดเซชันเพราะมีแรงยึดเหนี่ยวแต่ละอนุภาคมากกว่าแรงดันจากการกระทำของแก๊ส ในหอการทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อนุภาคกลุ่ม C จะง่ายต่อการเกิดช่องว่าง ยกตัวอย่างอนุภาคกลุ่ม C เช่น แร่ทัลก์และแป้ง

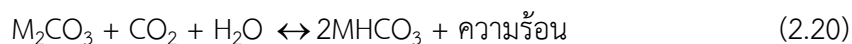
กลุ่ม D คือ Spoutable เป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาแน่นมาก ยากที่จะเกิดฟลูอิดไลเซชันในเบดที่แคบ ยกตัวอย่างอนุภาคกลุ่ม D เช่น กาแฟคั่ว



รูปที่ 2.14 การจำแนกกลุ่มของอนุภาคด้วยวิธี Geldart [80]

2.1.7 แบบจำลองการดูดซับ

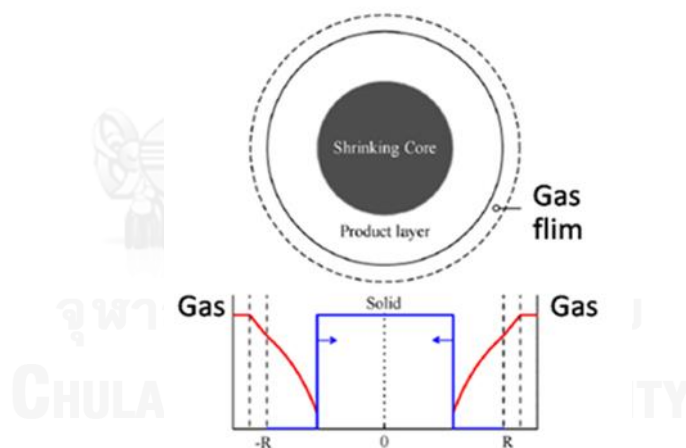
ปฏิกิริยาการดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เกิดเป็นโลหะแอลคาไลไบคาร์บอเนตที่อุณหภูมิต่ำ แสดงในสมการที่ (2.20)



สมการการดูดซับเป็น ปฏิกิริยาของสารที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous) ระหว่างแก๊สและของแข็ง การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการดูดซับนั้นในเวลาเดียวกันจะมีอิทธิพลที่เกิดขึ้นพร้อมกัน คือ ปฏิกิริยาเคมีและการถ่ายโอนความร้อนและมวล ที่จะต้องถูกพิจารณาเพื่อความถูกต้องในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยา (Conversion) กับเวลา ในการศึกษาจะคำนวณตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ทางเคมีของสมการที่ (2.20) จากกราฟสารดูดซับกับเวลา (Breakthrough curve) มี 3 แบบจำลองคือ

- 1) แบบจำลองแกนกลางหดตัว (Shrinking - core model)
- 2) แบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous model)
- 3) แบบจำลองการเสื่อมสภาพ (Deactivation model)

2.1.7.1 แบบจำลองแกนกลางหดตัว (Shrinking - core model)



รูปที่ 2.15 แบบจำลองแกนกลางหดตัว [81]

แบบจำลองแกนกลางหดตัว แสดงดังรูปที่ 2.15 อนุภาคของแข็งที่ไม่มีรูพรุนที่มีการจำกัดการแพร่กระจายในรูพรุน อัตราของการเคลื่อนที่ของตัวเชื่อมระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงด้านนอกเปลือก (Shell) และแกน (Core) ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาสามารถเขียนความสัมพันธ์ตลอดสมดุลสารสัมพันธ์ได้เป็น

$$-\frac{d}{dt}\left(\frac{4}{3}\pi r_c^3 \frac{\rho_B}{M_B}\right) = R_A \quad (2.21)$$

R_A คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ที่เกิดขึ้น ดังสมการ

$$R_A = 4\pi r_c^2 k_1 C_A \quad (2.22)$$

โดยที่ $k_1 = k_s C_w$ และมีค่าคงที่ถ้า C_w มากกว่า C_A

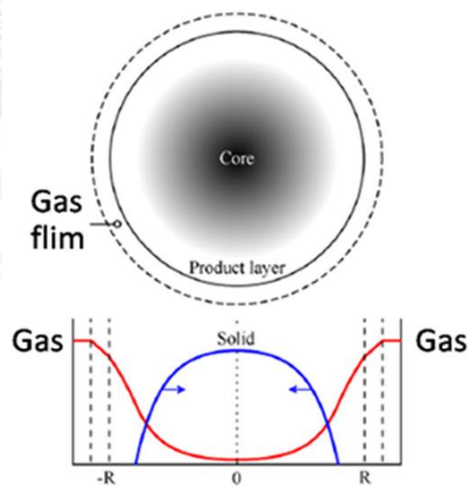
สำหรับแบบจำลองนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$x_B = 1 - \left(1 - \frac{C_A k_1 M_B}{R \rho_B} t\right)^3 \quad (2.23)$$

x_B คือ การเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาของ B

$$x_B = \frac{w_0 - w}{w_0} = 1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^3 \quad (2.24)$$

2.1.7.2 แบบจำลองแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous model)



รูปที่ 2.16 แบบจำลองแบบเนื้อเดียวกัน [81]

เมื่ออุณหภูมิของแข็งมีอุณหภูมิสูงและอัตราการแพร่กระจายของแก๊สตั้งต้นมีค่าสูง แก๊สจะแทรกซึมทุกที่ภายในของแข็งและปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นตลอดก่อนกลมเล็กๆ เป็นเหตุผลที่เกิดการเพิ่มของปฏิกิริยาภายในแบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวกันในรูปที่ 2.16 เมื่อความเป็นรูพรุนของอนุภาคมีค่าคงที่ ดังนั้น ประสิทธิภาพการกระจายของสารตั้งต้นแก๊สไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเป็นของแข็งผสม อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ B คือ

$$-\frac{dC_B}{dt} = k_2 C_A C_B \quad (2.25)$$

$$\text{โดยที่ } k_2 = k_v C_w$$

สำหรับแบบจำลองนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาแสดงในสมการคือ

$$x_B = 1 - \exp(-k_2 C_A t) \quad (2.26)$$

การวิเคราะห์กราฟสารดูดซับกับเวลาด้วยแบบจำลองแกนกลางหัดตัวและแบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวกัน

แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อนำสมการความต่อเนื่องสำหรับวัฏภาคแก๊สรวมกันกับสมการสำหรับปฏิกิริยาของอนุภาคเดี่ยว สมมติฐานที่กำหนดคือ

- 1.) ปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นภายในใต้เงื่อนไขภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal)
- 2.) อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของแข็งต่อความเข้มข้นน้อยมากจึงไม่มีความสำคัญ

สมการแบบจำลองแกนกลางหัดตัวแสดงในสมการ (2.27)

$$\int_a^1 \frac{da}{c_1 a (1 - c_2 a)^2} = 1 \quad (2.27)$$

$$\text{โดยที่ } a = \frac{C_A}{C_{A0}}, c_1 = \frac{3k_1 w_f}{Q_g R \rho_B}, c_2 = \frac{C_{A0} k_1 M_B}{R \rho_B} t$$

สมการแบบจำลองเป็นเนื้อเดียวกันแสดงในสมการ (2.28)

$$\int_a^1 \frac{da}{c_3 a \exp(-c_4 a)} = 1 \quad (2.28)$$

$$\text{โดยที่ } c_3 = \frac{k_2 w_f}{Q_g M_B}, c_4 = k_2 C_{A0} t$$

2.1.7.3 แบบจำลองการเสื่อมสภาพ (Deactivation model)

สำหรับแบบจำลองการเสื่อมสภาพ (Deactivation model) ผลึกภัณฑ์จะเกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและปกคลุมพื้นผิวของสารตั้งต้น ซึ่งจะเพิ่มความต้านทานในการแพร่ (Diffusion) ส่งผลให้อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาลดลง เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในโครงสร้างรูพรุน (Pore structure) พื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา (Active surface area) และค่าประสิทธิภาพต่อหน่วยพื้นที่ (Activity per unit area) การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดจะลดการทำงานของสารตั้งต้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไป จากงานวิจัยที่ผ่านมา แบบจำลองการเสื่อมสภาพสามารถใช้อธิบายได้ดีในปฏิกิริยาของแก๊ส-ของแข็ง [81, 82]

การวิเคราะห์กราฟสารดูดซับกับเวลาด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพ

แบบจำลองนี้รวมผลของอัตราการลดลงในการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันไว้ในพจน์ของปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพ (Deactivation reaction) ที่เกิดขึ้นจากผลึกภัณฑ์ของตัวดูดซับของแข็งด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สมมติฐานที่กำหนดขึ้นคือ

- (I) ปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันถูกทำภายใต้เงื่อนไขภาวะอุณหภูมิคงที่ (Isothermal)
- (II) การถ่ายโอนมวลภายนอกน้อยมากจึงสมมติว่าไม่มีการถ่ายโอนมวลภายนอก
- (III) ระบบอยู่ในสถานะเสมือนคงตัว (Pseudo-steady state)
- (IV) การเสื่อมสภาพของตัวดูดซับในปฏิกิริยาอันดับ 1 เนื่องจาก active sites ของของแข็งขณะที่ปฏิกิริยาอันดับ 0 เนื่องจากความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สมการของแบบจำลองการเสื่อมสภาพของกระบวนการคาร์บอนเนชันแสดงในสมการที่ (2.20)

$$-\frac{da}{dt} = k_d C^m a^n \Rightarrow a = a_0 \exp(-k_d t) \quad (m=0, n=1) \quad (2.29)$$

$$\int_{a_0}^a \frac{da}{a} = -k_d \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{a}{a_0} = -k_d t$$

$$a = a_0 \exp(-k_d t)$$

(a_0 = ความว่องไวของตัวดูดซับเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1)

ด้วยระบบอยู่ในสถานะเสมือนคงตัว สมการภาวะอุณหภูมิคงที่สำหรับสารตั้งต้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในสมการที่ (2.30)

$$-Q_o \frac{dC}{dW} - k_o C a = 0 \quad (2.30)$$

อินทิเกรตสมการที่ (2.30) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.31)

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = -\left(\frac{k_0 a}{Q_0}\right) \int_0^W dW \Rightarrow \ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\left(\frac{k_0 a}{Q_0}\right) W \quad (2.31)$$

รวมสมการที่ (2.29) (2.30) และ (2.31) ได้เป็น

$$C = C_0 \exp\left[-\frac{k_0 W}{Q_0} \exp(-k_d t)\right] \quad (2.32)$$

จัดสมการที่ (2.32)

$$\ln\left[\ln\left(\frac{C_0}{C}\right)\right] = \ln\left(\frac{k_0 W}{Q_0}\right) - k_d t \quad (2.33)$$

เมื่อสร้างกราฟระหว่าง $\ln\left[\ln\left(\frac{C_0}{C}\right)\right]$ กับเวลาความชื้นของเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $-k_d$ และค่าตัดแกน y มีค่าเท่ากับ $\ln\left(\frac{k_0 W}{Q_0}\right)$ สามารถนำมาหาค่า k_0 การแก้ปัญหของสมการที่ (2.32) และ (2.33) ด้วยการแทนค่า $n = m = 1$ จะได้สมการที่ (2.34) เป็นแบบจำลองการเสื่อมสภาพแบบที่ 2

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left[1 - \frac{\exp\left(\frac{k_0 W}{Q_0} (1 - \exp(-k_d t))\right)}{1 - \exp(-k_d t)}\right] \exp(-k_d t) \quad (2.34)$$

เมื่อค่า

- a คือ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็ง
- t คือ เวลา (นาที)
- k คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับเริ่มต้น อันดับที่ 1 (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม นาที)
- k_1 คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา อันดับที่ 1 (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม นาที)
- k_2 คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา อันดับที่ 2 (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม นาที)
- k_d คือ ค่าคงที่อัตราการเสื่อมสภาพ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล นาที)
- k_0 คือ ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัม นาที)
- Q_0 คือ อัตราเร็วในการไหลของแก๊ส (ลูกบาศก์เมตรต่อ นาที)
- w คือ น้ำหนักของตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัม)
- C คือ ความเข้มข้นขาเข้าของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)
- C_0 คือ ความเข้มข้นขาออกของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)
- C_B คือ ความเข้มข้นของแข็ง (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)
- C_W คือ ความเข้มข้นของไอน้ำ (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)
- ρ_B คือ ความแน่นของอนุภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- M_B คือ มวลโมเลกุลของอนุภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อโมล)

- k_s คือ ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาในแบบจำลองแบบแกนกลางหดตัว
(ตารางเมตรต่อกิโลโมลทั้งหมดกำลังสอง นาที่)
- k_v คือ ค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาในแบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวกัน
(ตารางเมตรต่อกิโลโมลทั้งหมดกำลังสอง นาที่)
- C_A คือ ความเข้มข้นของ A ในวัฏภาค bulk (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตร)
- r_c คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของ A ต่อหนึ่งหน่วยของเบตนิ่ง
(กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นาที่)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lee และคณะ [3] ทำการทดลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการฟื้นฟูสภาพใหม่ (Regeneration) ด้วยโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่เตรียมโดยวิธีการอิมเพกเนชัน (Impregnation) บนตัวรองรับชนิดต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่งด้วยการทดลองซ้ำหลายครั้ง โดยมีเงื่อนไขอุณหภูมิที่แตกต่างกัน (การดูดซับที่ 333-363 เคลวินและการฟื้นฟูสภาพที่ 403-673 เคลวิน) ตัวดูดซับ คือ โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์และโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้รวมทั้งสามารถฟื้นฟูสภาพใหม่ได้ที่อุณหภูมิ 403 403 623 และ 673 เคลวิน ตามลำดับ การฟื้นฟูสภาพใหม่ที่อุณหภูมिन้อยกว่า 473 เคลวิน ของโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์และบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ ปริมาณการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากการฟื้นฟูสภาพมีค่าลดลงซึ่งสามารถอธิบายจากการเกิด $KAl(CO_3)_2(OH)_2$, $K_2Mg(CO_3)_2$, และ $K_2Mg(CO_3)_2 \cdot 4(H_2O)$ ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนกลับเป็นวัฏภาคโพแทสเซียมคาร์บอเนตเริ่มต้นได้ ในส่วนโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์และบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ โครงสร้างผลึกโพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตถูกสร้างระหว่างการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แต่โครงสร้างดังกล่าวไม่เกิดในโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์และบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งโครงสร้างนี้ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปยังวัฏภาคเริ่มต้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 403 เคลวิน ดังนั้น การเกิดโครงสร้างผลึกโพแทสเซียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตหลังจากดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับปรับสภาพที่อุณหภูมิต่ำ โดยธรรมชาติ ตัวรองรับมีความสำคัญสำหรับการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการปรับสภาพโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับไทเทเนียมออกไซด์ แสดงคุณลักษณะที่ดีทั้งการดูดซับและการปรับสภาพ เนื่องจากให้ค่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับจำนวนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากและปรับสภาพได้เร็วที่อุณหภูมิต่ำ

Liang และคณะ [4] ศึกษาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า (Electrobalance) และเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง จากแก๊สเชื้อเพลิงด้วยการใช้ตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่ฟื้นฟูสภาพใหม่ การดูดซับมีประสิทธิภาพดีในช่วงอุณหภูมิ 333-343 เคลวิน ขณะที่การฟื้นฟูสภาพเกิดขึ้นในช่วง 393-473 เคลวิน โดยอุณหภูมิในการฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับขึ้นอยู่กับความดันย่อยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สที่เกิดขึ้นใหม่ การทดลองดูดซับหลายครั้ง (Multicycle)

จำนวนโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำที่เท่ากันถูกสร้างระหว่างกระบวนการปรับสภาพตัวดูดซับ ผลการทดลองแสดงความเป็นไปได้ของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่าร้อยละ 90

Park และคณะ [5] คำนวณค่าจลนพลศาสตร์ทางเคมีของปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและโพแทสเซียมคาร์บอเนต ด้วยการใช้อกราฟการดูดซับกับเวลา (Breakthrough curve) ในถังปฏิกรณ์เบตนิ่ง โดยการเปรียบเทียบกลไกปฏิกิริยาคาร์บอเนชันของโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วย 3 แบบจำลอง คือแบบจำลองการเสื่อมสภาพ (Deactivation model) แบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous model) และแบบจำลองแกนกลางหดตัว (Shrinking-core model) ซึ่งแบบจำลองการเสื่อมสภาพสามารถใช้อธิบายกราฟการดูดซับกับเวลาได้ดีที่สุดด้วยวิธีผลต่างกำลังสองน้อยที่สุด เนื่องจากการเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นระหว่างปฏิกิริยาคาร์บอเนชันและปกคลุมพื้นผิวของสารตั้งต้น ส่งผลทำให้การทำงานของสารตั้งต้นลดลงเมื่อเวลาเปลี่ยนไป

Shigemoto และคณะ [6] เปรียบเทียบชนิดของแอลคาไลคาร์บอเนตบนตัวรองรับถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับที่อุณหภูมิสูงตามลำดับของโลหะคาร์บอเนตจากน้อยไปมาก คือ โซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมคาร์บอเนต รูบิเดียมคาร์บอเนตและซีเซียมคาร์บอเนต การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดที่อุณหภูมิ 313-393 เคลวิน ด้วยโลหะแอลคาไลที่เตรียมโดยการอิมเพกเนชันภายในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดห้องปฏิบัติการที่บรรจุด้วยตัวดูดซับ การดูดกลับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Uptake) จากมากไปน้อยตามลำดับคือ ซีเซียมคาร์บอเนต รูบิเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต โดยการผันกลับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Recovery process) สำหรับแก๊สเชื้อเพลิงที่ 313-393 เคลวิน มีค่ามากกว่าวิธีการดูดซับด้วยเอมีน

Javad และคณะ [8] เตรียมตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาแบบใหม่ด้วยการใช้อะลูมินาเกรดอุตสาหกรรมที่มีความบริสุทธิ์ต่ำ ราคาถูกและมีปริมาณในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง ค่าปริมาณในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้อกราฟการดูดซับกับเวลา (Breakthrough curve) ของตัวดูดซับที่ปรับปรุง คือ 76 มิลลิกรัมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมของตัวดูดซับ นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยของการกระจายขนาดรูพรุน (Pore size distribution) และพื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวดูดซับหลังจากใช้ทดลอง 5 รอบ

Jai boon และคณะ [7] สำรองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สเชื้อเพลิงด้วยการใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาที่มีรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด/ฟลูอิดซ์เบดกึ่งหมุนเวียน ถึงปฏิกรณ์สูงขนาด 0.8 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 เมตร ผลการดูดซับที่ได้คือ รูปแบบการไหลแบบเบตนิ่ง ฟลูอิดซ์แบบพองแก๊ส สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดในระหว่าง 17 นาที และ 10 นาที ตามลำดับ ส่วนฟลูอิดซ์แบบสลักกึ่งฟลูอิดซ์แบบปั่นป่วน และฟลูอิดซ์แบบความเร็วสูงไม่สามารถกำจัดแก๊สออกได้ทั้งหมดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามา มีค่าสัดส่วนการกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 0.98 0.94 และ 0.72 ตามลำดับ เหตุผลของปรากฏการณ์เกิดจากการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับรูปแบบการสัมผัสกันของแก๊ส-ของแข็งเครื่องถึงปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด/ฟลูอิดซ์เบดกึ่งหมุนเวียน

Hwang และคณะ [10] ศึกษาการใช้รูปีเดียมคาร์บอนเอนตในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง อธิบายด้วยกราฟการดูดซับกับเวลา การทดลองถูกทำที่ความเร็วแก๊สผสมของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับไนโตรเจน 5×10^{-6} ถึง 35×10^{-6} ลูกบาศก์เมตรต่อนาที ความเร็วน้ำ 0.5×10^{-6} ถึง 3.0×10^{-6} ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง จำนวนตัวดูดซับ 0.5×10^{-3} ถึง 1.8×10^{-3} กิโลกรัม สัดส่วนโดยโมลคาร์บอนไดออกไซด์ 0.03 ถึง 0.22 และความแตกต่างอุณหภูมิดูดซับ 323-353 เคลวิน ที่ความดันบรรยากาศ แบบจำลองการเชื่อมสภาพถูกใช้วิเคราะห์จลนพลศาสตร์การดูดซับระหว่างแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจนและไอน้ำ ผลการทดลองได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองจริงได้ดีกว่าแบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้ วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในวิธีดำเนินงานวิจัยแสดงในหัวข้อที่ 3.1 และหัวข้อที่ 3.2 ตามลำดับ การทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การเตรียมตัวดูดซับของแข็งโลหะ แอลคาไลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ ลักษณะรูปแบบการไหลและการดูดซับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์

3.1 วัสดุ

3.1.1 สารเคมี

- โพแทสเซียมคาร์บอเนตปราศจากน้ำ (K_2CO_3) น้ำหนักโมเลกุล = 138.21 กรัมต่อโมล จาก Fisher Chemical
- โซเดียมคาร์บอเนตปราศจากน้ำ (Na_2CO_3) น้ำหนักโมเลกุล = 105.98 กรัมต่อโมล จาก Fisher Chemical
- ลิเทียมคาร์บอเนตปราศจากน้ำ (Li_2CO_3) น้ำหนักโมเลกุล = 73.89 กรัมต่อโมล จาก Sigma-Aldrich
- รูบิเดียมคาร์บอเนตปราศจากน้ำ (Rb_2CO_3) น้ำหนักโมเลกุล = 230.94 กรัมต่อโมล จาก Sigma-Aldrich
- อะลูมินา ($\gamma-Al_2O_3$) น้ำหนักโมเลกุล = 101.90 กรัมต่อโมล จาก Merck

3.1.2 แก๊ส

- แก๊ส 12% CO_2 88% N_2 จากบริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด
- แก๊ส 99.99% N_2 จากบริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จำกัด

3.2 การเตรียมอุปกรณ์และการติดตั้งเครื่องมือ

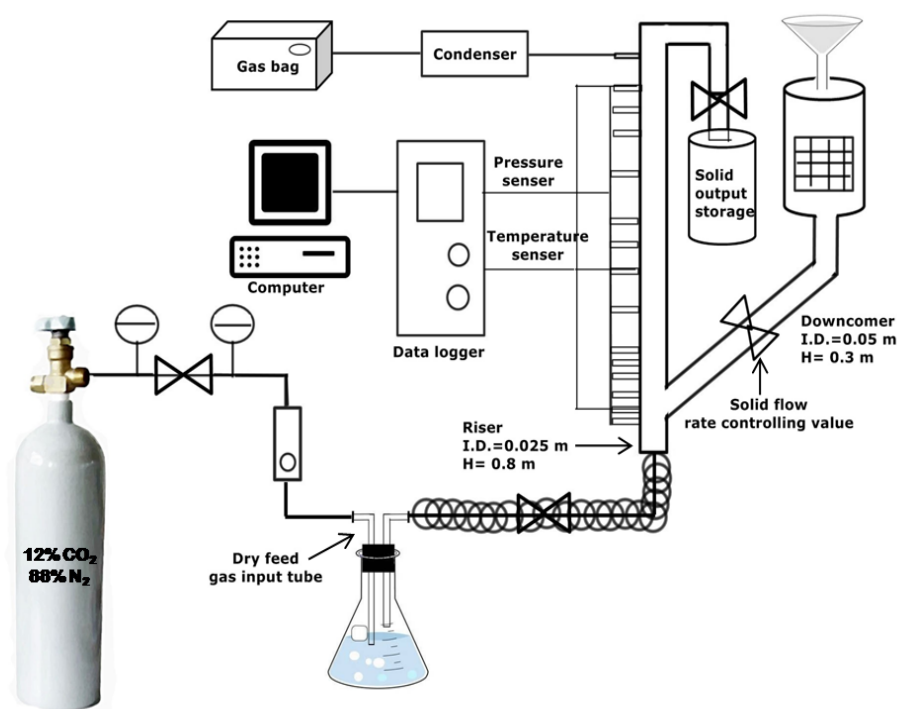
3.2.1 เครื่องมือ

- ตัวควบคุมการไหลของแก๊ส : ตัวควบคุมการไหล รุ่น K-1013 ช่วงการไหล 1-10 ลิตรต่อ นาที และตัวควบคุมการไหล รุ่น K-1014 ช่วงการไหล 2-20 ลิตรต่อนาที
- แผ่นให้ความร้อน : แผ่นให้ความร้อนใยแก้ว อุณหภูมิสูงสุด 250 องศาเซลเซียส ด้านทานกันความร้อน มากกว่า 2 มิลลิโอห์ม
- ตัวควบคุมอุณหภูมิ : ตัวควบคุมอุณหภูมิรุ่น TCL ช่วง อุณหภูมิ 0-200 องศาเซลเซียส
- ท่อและวาล์ว
- เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์ที่ทำจากแก้วทนความร้อนสูง 650 องศาเซลเซียส

- เครื่องวัดความดัน : เครื่องวัดความดันฟูเรียร์รุ่น DT015 ช่วงของความดันคือ 150-1150 มิลลิบาร์ ความถูกต้อง ± 1 อัตราตัวอย่าง 10 ตัวอย่างต่อวินาที
- เครื่องวัดปริมาณความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

3.2.2 การติดตั้งเครื่องมือ (Apparatus set-up)

เครื่องฟลูอิด์เบดแบบกึ่งหมุนเวียนประกอบด้วยส่วนของท่อไรเซอร์ผลิตจากแก้วที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.025 เมตร และความสูง 0.80 เมตร ท่อดาวคัมเมอร์ (Downcomer) ผลิตจากพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร วาล์วแบบลูกทรงกลม (Ball Valve) ถูกใช้ควบคุมการไหลของของแข็งจากท่อดาวคัมเมอร์ไปยังท่อไรเซอร์ จำนวนของแข็งที่ออกมาจากด้านบนของท่อไรเซอร์จะถูกเก็บในที่รองรับของแข็งจากทางออก (Solid output storage) อุปกรณ์วัดความดันได้ติดตั้งตลอดความสูงของท่อไรเซอร์จำนวน 10 ตำแหน่ง เพื่อวัดสัญญาณความดันในระบบ เครื่องมือวัดอุณหภูมิได้ติดตั้งที่สามจุด คือ ด้านบน ตรงกลางและด้านล่างของท่อไรเซอร์ ที่ความสูง 0.075 0.40 และ 0.70 เมตร เหนือจากที่จ่ายแก๊ส (Gas distributor) ตามลำดับ อัตราการไหลของแก๊สที่เข้ามาถูกวัดด้วยโรตามิเตอร์ (Rotameter)



รูปที่ 3.1 ระบบฟลูอิด์เบด/กึ่งฟลูอิด์เบดที่ใช้ในงานวิจัย

3.3 การทดลอง

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับของแข็งโลหะแอลคาไลบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์

เตรียมโลหะแอลคาไลบนตัวรองรับอะลูมินา (Al_2O_3) คือ โพแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต ลิเทียมคาร์บอเนตและรูบิเดียมคาร์บอเนต ด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน (Impregnation) แสดงวิธีการเตรียมในรูปที่ 3.2 เติมอะลูมินา 5 กรัม ลงในสารละลายโลหะคาร์บอเนตที่ประกอบด้วยโลหะคาร์บอเนต 5 กรัมในน้ำที่ปราศจากไอออน ปริมาตร 25 มิลลิลิตร หลังจากนั้นผสมสารละลายด้วยการเขย่าสารละลายเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้แห้งในเครื่องอบระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำตัวอย่างไปเผาภายใต้บรรยากาศไรลของไนโตรเจนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จำนวนโลหะแอลคาไลอิมเพรกเนชันคำนวณด้วยเครื่องวิเคราะห์หาธาตุด้านเอกซ์เรย์ (EDX)



รูปที่ 3.2 ผังงานสำหรับการเตรียมตัวดูดซับด้วยวิธีอิมเพรกเนชัน

3.3.2 ลักษณะรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชัน

ในการศึกษาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยระบบฟลูอิดเซชันของแก๊ส-ของแข็ง เนื่องจากระบบฟลูอิดเซชันมีการสัมผัสกันที่สูงระหว่างแก๊สและตัวดูดซับของแข็งและอัตราการถ่ายโอนมวลและความร้อนสูง ประสิทธิภาพของการสัมผัสกันของแก๊ส-ของแข็งภายในระบบฟลูอิดเซชันขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีพฤติกรรมการสัมผัสกันระหว่างแก๊ส-ของแข็งที่แตกต่างกัน รูปแบบการไหลทั่วไปแบ่งได้เป็น แบบเบตนิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊ส ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนและฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง ดังนั้นการศึกษาลักษณะรูปแบบการไหลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงต้องศึกษารูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันก่อน ในงานวิจัยนี้รูปแบบการไหลของตัวดูดซับแอลคาไลกัวด์ด้วยวิธีการวัดสัดส่วนช่องว่างและความดันด้วยตัวดูดซับของแข็งอะลูมินาในท่อไรเซอร์เนื่องจากติดตั้งเครื่องมือที่วัดค่าได้ง่าย

การศึกษาลักษณะรูปแบบการไหล ความเร็วแก๊สคือตัวแปรสำคัญสำหรับการศึกษา โดยแต่ละช่วงความเร็ววัดด้วยความดัน 2 แบบจากเครื่องวัดความดันฟูเรียร์ DT015

- 1.) ค่าความดันลด ใช้ศึกษารูปแบบความเข้มข้นของตัวดูดซับของแข็งตามแนวแกน
- 2.) ค่ากวัดแกว่งความดัน ใช้ศึกษาพฤติกรรมแก๊ส-ของแข็งในแต่ละรูปแบบการไหล

สัดส่วนปริมาตรของแข็ง (ϵ_s) คำนวณด้วยกระบวนการความดันลด (ΔP) จากความสัมพันธ์ความดันลดและสัดส่วนปริมาตรของแข็ง

จากตาราง 3.1 แสดงภาวะการทดลองที่ความเร็วแก๊สแตกต่างกันของช่วงความเร็วจาก 0.01-2.3 เมตรต่อวินาที ระบบฟลูอิดเซชัน 2 ระบบถูกใช้ในงานวิจัยคือ ฟลูอิดเซชันแบบไม่หมุนเวียนและฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน ระบบฟลูอิดเซชันจะเปลี่ยนจากไม่หมุนเวียนเป็นหมุนเวียนที่ความเร็วมากกว่า 0.84 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 3.1 ภาวะการทดลองที่ความเร็วแก๊สแตกต่างกัน

ความเร็ว (m/s)	ระบบฟลูอิดเซชัน	ปริมาณตัวดูดซับ (g)
0.02-0.84	ไม่หมุนเวียน	40
2.30	หมุนเวียน	200

3.3.3 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

เมื่อพิจารณาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มี 3 ตัวแปรหลักที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น รูปแบบการไหล อุณหภูมิในการดูดซับและปริมาณไอน้ำ ในการศึกษาความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตรต่อตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ Na_2CO_3/Al_2O_3 ผลของรูปแบบการไหล 5 รูปแบบการไหลที่แตกต่าง คือ แบบเบตนิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊ส ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนและฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง

ของแข็งปริมาณ 40 กรัมสำหรับแบบเบตนิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊ส ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง และฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน ของแข็งปริมาณ 200 กรัม สำหรับฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง ภาวะการทดลองของรูปแบบการไหลต่อผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ภาวะการทดลองของรูปแบบการไหลต่อผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สภาวะการทดลอง	การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ชนิดของตัวดูดซับ	K_2CO_3/Al_2O_3 และ Na_2CO_3/Al_2O_3
อุณหภูมิในการดูดซับ (K)	333
ความดัน (atm)	1
รูปแบบการไหล	แบบเบตนิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊ส ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนและฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง
ความเร็วแก๊ส (เมตรต่อวินาที)	0.02-2.30
อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	2-75
ปริมาณของแข็ง (กรัม)	40
ส่วนประกอบแก๊ส	$CO_2 : 12 H_2O : 19.5 N_2$ balance
อัตราส่วนไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	1.6

สำหรับผลของอุณหภูมิในการดูดซับ ของแข็งปริมาณ 40 กรัมของตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ Na_2CO_3/Al_2O_3 ของรูปแบบการไหลที่มีค่าจลนพลศาสตร์มากที่สุด อุณหภูมิการดูดซับ 4 อุณหภูมิที่ศึกษา คือ 323 333 343 และ 353 ตารางที่ 3.3 แสดงภาวะการทดลองของผลอุณหภูมิการดูดซับต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 3.3 ภาวะการทดลองของผลอุณหภูมิการดูดซับต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สภาวะการทดลอง	การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ชนิดของตัวดูดซับ	K_2CO_3/Al_2O_3 และ Na_2CO_3/Al_2O_3
อุณหภูมิในการดูดซับ (K)	323 333 343 และ 353
ความดัน (atm)	1
รูปแบบการไหล	ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน
ความเร็วแก๊ส (เมตรต่อวินาที)	0.84
อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	23
ปริมาณของแข็ง (กรัม)	40
ส่วนประกอบแก๊ส	$CO_2 : 12 H_2O : 19.5 N_2$ balance
อัตราส่วนไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	1.6

สำหรับผลของปริมาณไอน้ำในแก๊สขาเข้า 40 กรัมของตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ Na_2CO_3/Al_2O_3 ที่ความเร็วแก๊สของรูปแบบการไหลที่มีค่าจลนพลศาสตร์มากที่สุด ปริมาณไอน้ำที่ศึกษา คือ 7.4 13.4 19.5 และ 23.5 โดยปริมาตร ตารางที่ 3.4 แสดงภาวะการทดลองของผล ปริมาณไอน้ำต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 3.4 ภาวะการทดลองของผลปริมาณไอน้ำต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สภาวะการทดลอง	การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ชนิดของตัวดูดซับ	K_2CO_3/Al_2O_3 และ Na_2CO_3/Al_2O_3
อุณหภูมิในการดูดซับ (K)	333
ความดัน (atm)	1
รูปแบบการไหล	ฟลูอิดไอเซนแบบปั่นป่วน
ความเร็วแก๊ส (เมตรต่อวินาที)	0.84
อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	23
ปริมาณของแข็ง (กรัม)	40
ส่วนประกอบแก๊ส	$CO_2 : 12 H_2O : 7.4 N_2$ balance $CO_2 : 12 H_2O : 13.4 N_2$ balance $CO_2 : 12 H_2O : 19.5 N_2$ balance $CO_2 : 12 H_2O : 23.5 N_2$ balance
อัตราส่วนไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	0.60 (ร้อยละ 7.4 ปริมาตรน้ำ) 1.10 (ร้อยละ 13.4 ปริมาตรน้ำ) 1.60 (ร้อยละ 19.5 ปริมาตรน้ำ) 1.95 (ร้อยละ 23.5 ปริมาตรน้ำ)

สำหรับผลของชนิดโลหะแอลคาไล ของแข็งปริมาณ 40 กรัมของตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 Na_2CO_3/Al_2O_3 Li_2CO_3/Al_2O_3 และ Rb_2CO_3/Al_2O_3 ของรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซนแบบปั่นป่วนที่มีค่าจลนพลศาสตร์มากที่สุด อุณหภูมิการดูดซับ 333 เคลวิน ตารางที่ 3.5 แสดงภาวะการทดลองของผล ชนิดโลหะแอลคาไลต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 3.5 ภาวะการทดลองผลของชนิดโลหะแอลคาไล

สภาวะการทดลอง	การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ชนิดของตัวดูดซับ	K_2CO_3/Al_2O_3 Na_2CO_3/Al_2O_3 Li_2CO_3/Al_2O_3 และ Rb_2CO_3/Al_2O_3
อุณหภูมิในการดูดซับ (K)	333
ความดัน (atm)	1
รูปแบบการไหล	ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน
ความเร็วแก๊ส (เมตรต่อวินาที)	0.84
อัตราการไหล (ลิตรต่อนาที)	23
ปริมาณของแข็ง (กรัม)	40
ส่วนประกอบแก๊ส	$CO_2 : 12$ $H_2O : 19.5$ N_2 balance
อัตราส่วนไอน้ำต่อแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	1.6

3.3.4 การคำนวณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับ

- สัดส่วนการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (F)

ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คำนวณด้วยสัดส่วนการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในสมการที่ (3.1)

$$F = 1 - \frac{[CO_2]_{output}}{[CO_2]_{input}} \quad (3.1)$$

- ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงในความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวแปรที่ใช้สำหรับการคำนวณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดที่ดักจับ (A_c คือ มิลลิกรัมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมตัวดูดซับ) และจำนวนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อ 1 กรัมตัวดูดซับ (R_c คือ มิลลิกรัมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมโลหะแอลคาไล) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$A_c = \frac{1000n_A M_{CO_2}}{m} \quad (3.2)$$

$$R_c = \frac{A_c}{a} \quad (3.3)$$

เมื่อ

n_A คือ จำนวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน (โมล)

M_{CO_2} คือ น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัมต่อโมล)

m คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (กรัม)

α คือ จำนวนของโลหะแอลคาไลบนตัวรองรับในตัวอย่าง (กรัม)

a คือ จำนวนโลหะแอลคาไลในตัวอย่าง (กรัม)

3.3.5 ลักษณะของตัวดูดซับของแข็ง

- เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (BET) เป็นวิธีวัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุนด้วยการใช้การดูดซับและคายซับไนโตรเจนที่ -196 องศาเซลเซียส (Micromeritics 2020)

- เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffractometer, XRD) คือการตรวจวิเคราะห์ชนิดของเฟสที่ปรากฏในตัวดูดซับเบื้องต้น

- เครื่องวิเคราะห์หาธาตุด้านเอกซเรย์ (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer, EDX) หาปริมาณที่แท้จริงของโลหะบนตัวรองรับ

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) หาสัญญาณวิทยาของตัวดูดซับที่แตกต่างกันที่กำลังขยาย 10000 เท่า

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปราย

ในบทนี้ การศึกษาสมบัติของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลแสดงในหัวข้อที่ 4.1 และศึกษาลักษณะของรูปแบบการไหลของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชัน คือ แบบเบตนิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนและฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง ด้วยการเพิ่มความเร็วก๊าซต่อการเปลี่ยนแปลงความดันกวดแกว่งแต่ละรูปแบบการไหลได้อธิบายในหัวข้อ 4.2 สำหรับแต่ละชนิดรูปแบบการไหลได้ศึกษาสัดส่วนปริมาตรของแข็งตลอดความสูงของโรเตอร์ อธิบายในหัวข้อที่ 4.3

การศึกษาผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลของรูปแบบการไหล ผลของอุณหภูมิและผลของปริมาณน้ำแสดงในหัวข้อ 4.4

จากนั้นศึกษาผลของตัวแปรจลนพลศาสตร์แสดงในหัวข้อ 4.5 และการศึกษาผลของตัวแปรจลนพลศาสตร์ต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลของรูปแบบการไหล ผลของอุณหภูมิ และผลของปริมาณไอน้ำ แสดงในหัวข้อ 4.6

จากภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากการศึกษาข้างต้น ได้ศึกษาผลการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และผลของค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์โดยใช้ลิเทียมคาร์บอเนตและรูบิเดียมคาร์บอเนต จากนั้นเปรียบเทียบผลชนิดของโลหะแอลคาไลกับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตแสดงในหัวข้อที่ 4.7 และการศึกษาผลทางกายภาพและโครงสร้างของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลหลังการดูดซับในหัวข้อที่ 4.8

4.1 สมบัติของโลหะแอลคาไลคาร์บอเนต

4.1.1 โครงสร้างระดับโมเลกุลของโลหะแอลคาไลต่างชนิด

พื้นที่ผิวทั้งหมดและปริมาณโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตต่างชนิด แสดงในตารางที่ 4.1 จากตารางค่าปริมาณร้อยละโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินามีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 10-13 ยกเว้น ลิเทียมคาร์บอเนตซึ่งเครื่องวิเคราะห์ไม่สามารถอธิบายได้ (เครื่องวิเคราะห์หาธาตุ EDX ไม่สามารถวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมน้อยกว่า 5 คือ H He Li และ Be [83])

ค่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินามีค่าสูงอยู่ในช่วง 99.4-127.1 ตารางเมตรต่อกรัม เนื่องจากตัวรองรับอะลูมินาที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ที่มีรูพรุน/พื้นที่ผิวสูง ความแตกต่างของค่าพื้นที่ผิวสามารถอธิบายจากลักษณะพื้นที่ผิวของภาพถ่าย SEM โดยทั่วไปโลหะแอลคาไลจะมีสัณฐานแบบผลึกและเส้นใย [84] ในการศึกษาครั้งนี้ รูบิเดียมคาร์บอเนตและ

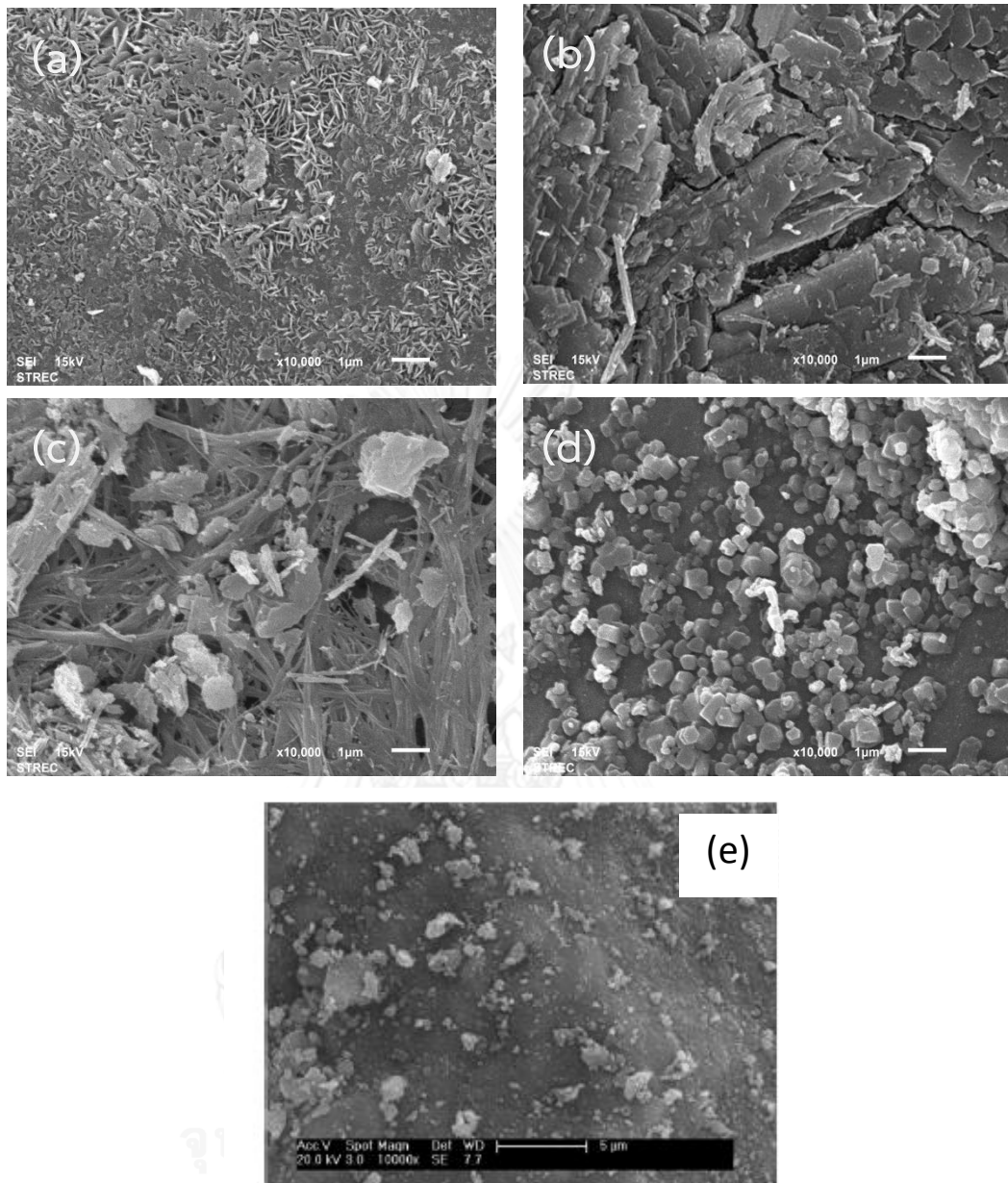
โพแทสเซียมคาร์บอเนตที่มีสัดส่วนส่วนใหญ่เป็นแบบผลึกกลมและเส้นใยจึงเป็นเหตุผลให้ตัวดูดซับทั้งสองมีค่าพื้นที่ผิวสูงและต่ำที่สุด ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 โครงสร้างระดับโมเลกุลของตัวดูดซับโลหะแอลคาไล

ตัวดูดซับ	ร้อยละปริมาณโลหะ แอลคาไลบนตัวรองรับ	พื้นที่ผิวรวม ($M_2CO_3 + \gamma-Al_2O_3$) (ตารางเมตรต่อกรัม)
Li_2CO_3/Al_2O_3	N/A	127.27
Na_2CO_3/Al_2O_3	10 ± 3.344	105.4
K_2CO_3/Al_2O_3	13 ± 3.173	99.4
Rb_2CO_3/Al_2O_3	12 ± 1.512	129.1

4.1.2 สันฐานวิทยาของโลหะแอลคาไล

สันฐานวิทยาของอนุภาคตัวดูดซับของแข็งก่อนการดูดซับถูกทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 10000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.1 ส่วนประกอบวงไว้ที่กระจายบนพื้นที่ผิวอะลูมินาออกไซด์ของโลหะแอลคาไลทั้ง 4 ชนิดมีความแตกต่างกัน รูปที่ 4.1 (a) แสดงรูปบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลิเทียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินา จากงานวิจัยของ Sulaimam และคณะ [69] พื้นที่ผิวของลิเทียมคาร์บอเนตจะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนผลึกทรงเรียวยาวเมื่อผสมอนุภาคอะลูมินาออกไซด์ จากรูปพบว่า กลุ่มก้อนผลึกทรงเรียวยาวของลิเทียมคาร์บอเนตจะปกคลุมพื้นที่ผิวอะลูมินา รูปที่ 4.1 (b) แสดงรูปบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่มีโครงสร้างพื้นที่ผิวเชื่อมต่อกันเป็นผลึกเหมือนกับงานวิจัยของ Dong และคณะ [85] รูปที่ 4.1 (c) แสดงรูปบนพื้นที่ผิวบนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต พบว่าพื้นที่ผิวมีการกระจายตัวของเส้นใยกับผลึกกลมเช่นเดียวกันกับ Zhao และคณะ ที่อธิบายโครงสร้างของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่มีเส้นใยกับผลึกกลมเป็นส่วนประกอบที่วงไว้กระจายบนพื้นที่ผิวอะลูมินาออกไซด์ทั้งนี้ปริมาณของส่วนที่วงไว้ขึ้นอยู่กับปริมาณของโลหะแอลคาไล [84] รูปที่ 4.1 (d) แสดงรูปบนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับรูบิเดียมคาร์บอเนตที่มีโครงสร้างเป็นผลึกขนาดเล็กจำนวนมากสะสมอยู่บนพื้นที่ผิว ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของรูบิเดียมคาร์บอเนตที่อธิบายจากงานวิจัยของ Hwang และคณะ [10] และรูป (e) แสดงพื้นที่ผิวอะลูมินาออกไซด์จากงานวิจัยของ Zhao และคณะ [84]



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ที่กำลังขยาย 10000 เท่าของพื้นผิวของ (a) $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (c) $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (d) $\text{Rb}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ (e) Al_2O_3 [84]

4.2 ลักษณะของรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดเซชันในระบบฟลูอิดเซชัน

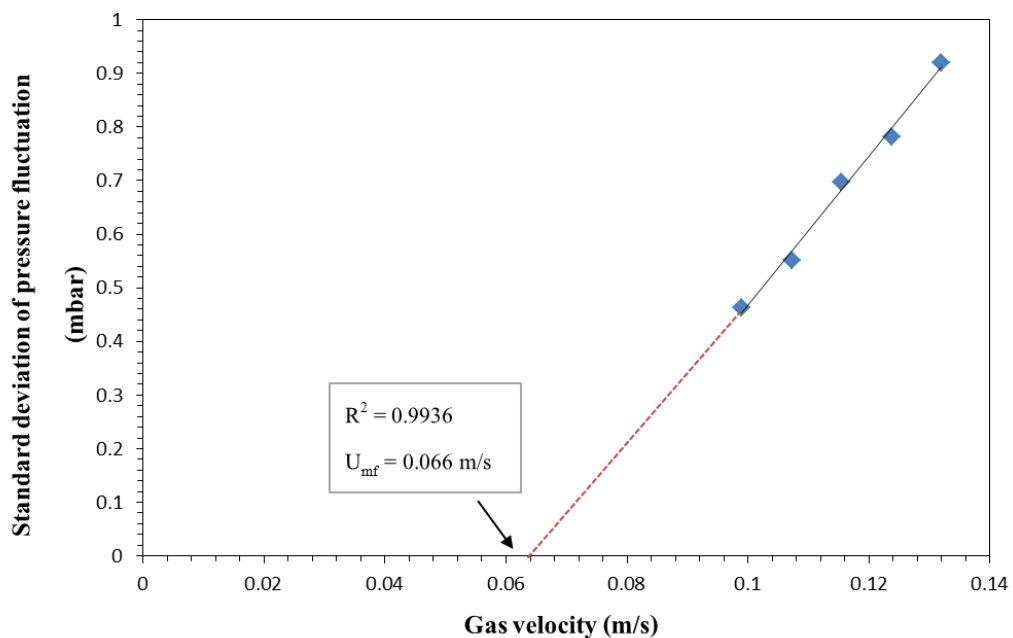
ในการคำนวณความเร็วของการเปลี่ยนแปลงลักษณะของรูปแบบการไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดเซชันในระบบฟลูอิดเซชันมี 3 ตัวแปร คือ ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum

velocity fluidization, U_{mf}) ความเร็วทรานซิชัน (Transition velocity, U_c) และความเร็วส่งผ่าน (Transport velocity, U_{tr})

4.2.1 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน คือ ความเร็วต่ำสุดที่เปลี่ยนจากเบตนิ่งเป็นรูปแบบฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส ถ้าอนุภาคของแข็งที่ใช้มีลักษณะจัดอยู่ในกลุ่ม B ของ Geldart ดังนั้นค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจึงเป็นความเร็วสำหรับการเปลี่ยนจากรูปแบบเบตนิ่งไปยังรูปแบบการไหลแบบฟองแก๊ส

ในงานวิจัยที่ผ่านมา ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันถูกคำนวณด้วยวิธี Puncochar เป็นความสัมพันธ์พื้นฐานที่สร้างกราฟระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดแกว่งความดัน (σ_p) กับความเร็วแก๊ส เครื่องวัดความดันถูกติดตั้งที่ผนังเบตเหนือตระแกรงกรองและต่ำกว่าพื้นที่ผิวอนุภาคของแข็ง ดังนั้นในงานวิจัยจึงวัดที่ตำแหน่งวัดความดัน 0.1 เมตรเหนือตระแกรงกรอง จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดัน (σ_p) ที่วัดได้กับความเร็วของแก๊สที่ค่าแตกต่างกัน โดยค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันหาได้จากค่าตัดแกนของความเร็วของแก๊สที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับศูนย์ วิธีผลต่างกำลังสองน้อยที่สุดถูกใช้คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและความเร็ว [7] ค่า R-square มีค่ามากกว่า 0.95 ดังนั้นค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันมีค่าเท่ากับ $U_{mf} = 0.06$ เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.2 ค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความดันกับความเร็วของแก๊สที่ตำแหน่งการวัดความดันสูงกว่าตระแกรงกรอง 0.1 เมตร

ในการทดสอบความถูกต้องของค่าจากวิธี Puncochar สามารถเปรียบเทียบค่าของข้อมูลการทดลองกับความสัมพันธ์ของ Wen และ Yu [39] ในสมการที่ 4.1 จากสมการความสัมพันธ์ของ Wen และ Yu คำนวณค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันได้คือ 0.06 เมตรต่อวินาที จะเห็นว่าค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันจากวิธี Puncochar มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์ของ Wen และ Yu

$$\text{Re}_{mf} = \frac{U_{mf} d_p \rho_g}{\mu} = [27.2^2 + 0.0408 Ar]^{0.5} - 27.2 \quad (4.1)$$

เมื่อ

ρ_g คือ ความหนาแน่นวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

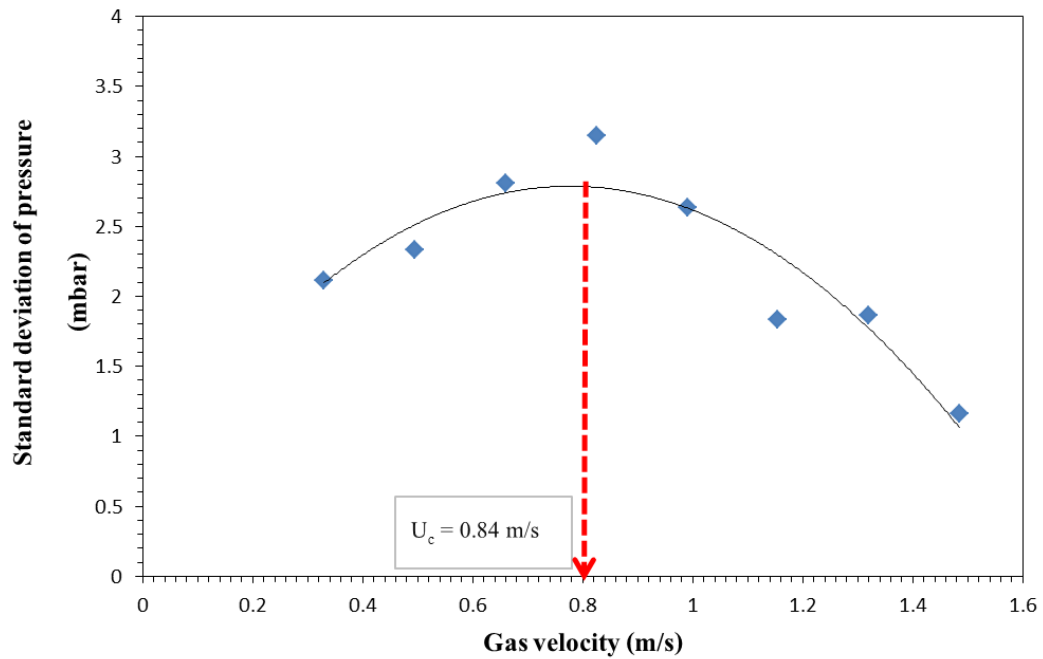
d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)

μ คือ ความหนืด (นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร)

4.2.2 ความเร็วทรานซิชั่น

รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนเป็นระบบการไหลที่สามารถเกิดขึ้นได้ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน เนื่องจากเริ่มมีอนุภาคของแข็งหลุดออกจากท่อโรเตอร์ โดยอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่จะอยู่เรียงตัวอยู่หนาแน่นที่บริเวณด้านล่างของท่อโรเตอร์ ความเร็วที่เปลี่ยนจากรูปแบบฟองแก๊สหรือสลักกิ่งไปเป็นรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน เรียกว่าความเร็วทรานซิชั่น (U_c) ที่ตำแหน่งสูงสุดของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความดัน จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีหลายวิธีที่สามารถคำนวณค่าความเร็วทรานซิชั่น [50] ในการศึกษาความเร็วทรานซิชั่นคำนวณด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการกวัดแกว่งความดันที่ตำแหน่งด้านล่างของท่อโรเตอร์กับค่าความเร็วแก๊สที่แตกต่างกันที่ตำแหน่งความดัน 0.15 เมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งพื้นที่ผิวเบดแสดงในรูปที่ 4.3 ขณะที่มีการเพิ่มความเร็วในรูปแบบการไหลแบบฟองแก๊ส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกวัดแกว่งความดันเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการรวมตัวของฟองแก๊สขนาดเล็กเป็นฟองแก๊สขนาดใหญ่ ความเร็วทรานซิชั่นคือตำแหน่งที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกวัดแกว่งความดันมีค่ามากที่สุด ดังนั้นจากการศึกษาความเร็วทรานซิชั่น คือ 0.84 เมตรต่อวินาที หลังจากเพิ่มความเร็วมากกว่าความเร็วทรานซิชั่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการกวัดแกว่งความดันจะมีค่าลดลงเนื่องจากการแตกของฟองแก๊สขนาดใหญ่กลายเป็นช่องว่างขนาดเล็ก

การเปรียบเทียบความเร็วทรานซิชั่นกับค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ในตารางที่ 4.3 จากตารางที่ 4.3 พบว่าความเร็วทรานซิชั่นจากการศึกษาในงานวิจัยนี้มีค่าอยู่ในช่วงความเร็วทรานซิชั่นที่คำนวณได้จากความสัมพันธ์



รูปที่ 4.3 ความเร็วทรานซิชันจากความสัมพันธ์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานความดันกับความเร็วของแก๊สที่ตำแหน่งการวัดความดันเหนือตระแกรงกรอง 0.15 เมตร

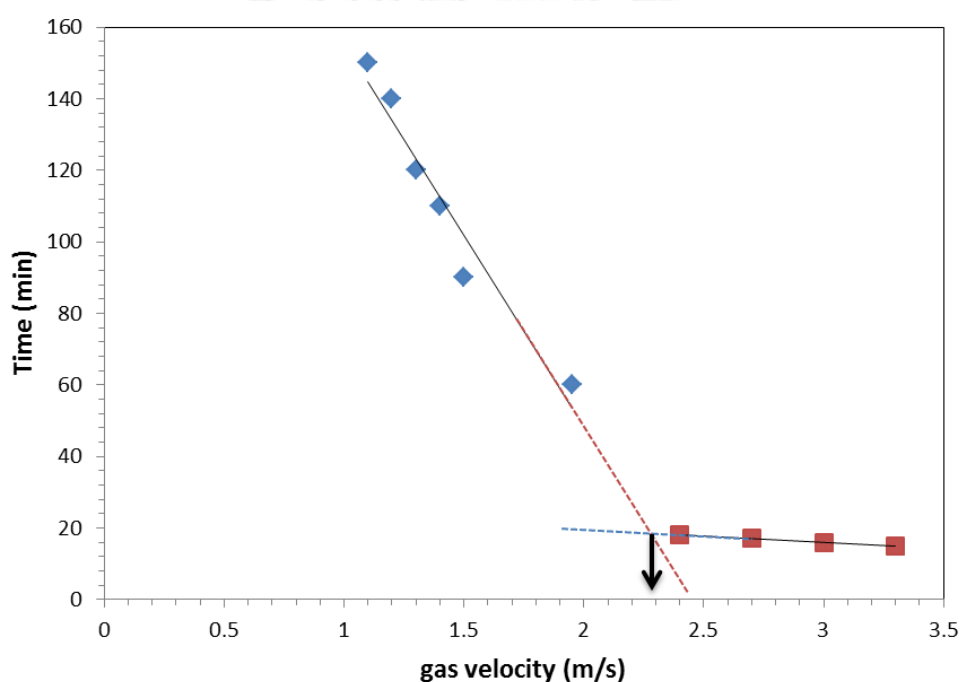
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบระหว่างความเร็วทรานซิชันจากความสัมพันธ์กับความเร็วที่คำนวณได้จากงานวิจัย

งานวิจัย	ความสัมพันธ์	U_c (m/s)	สมการ
Yerushalmi และ Cankurt [50]	$U_c = 3.0(\rho_p d_p)^{0.5} - 0.77$	0.65	(4.2)
Yang [52]	$U_c = U_t \varepsilon_e^m$ $U_t = U_t \text{Re}^{-0.485}$ $\varepsilon_e = (m-1)/m, m = 2.31 \text{Re}_t^{-0.0547}$	0.70	(4.3)
Jin และคณะ [53]	$\frac{U_c}{\sqrt{g d_p}} = \left(f \frac{D_t}{d_p} \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.27}$ $f D_t = 0.00367$ (for bed without internal)	0.81	(4.4)
Lee และ [54]	$\text{Re}_c = 0.700 \text{Ar}^{0.485}$	1.00	(4.5)
Leu และ Huang [55]	$\text{Re}_c = 0.568 \text{Ar}^{0.578}$	1.20	(4.6)
Horio [56]	$\text{Re}_c = 0.936 \text{Ar}^{0.472}$		(4.7)
จากงานวิจัยนี้		0.84	

4.2.3 ความเร็วส่งผ่าน

ความเร็วในการส่งผ่านคำนวณจากความเร็วแก๊สต่ำสุดที่เปลี่ยนรูปแบบการไหลฟลูอิดไฮดรอลิกเป็นรูปแบบการไหลฟลูอิดไฮดรอลิกแบบความเร็วสูง มีหลายวิธีที่ใช้วัดค่าความเร็วส่งผ่านของตัวดูดซับของแข็ง เทคนิค empty-time สำหรับรูปแบบการไหลฟลูอิดไฮดรอลิกแบบความเร็วสูงเป็นวิธีที่นิยมใช้เนื่องจากสามารถวัดได้ง่ายและมีความรวดเร็ว [50] ดังนั้นวิธีนี้จึงเลือกใช้ในการศึกษานี้ เทคนิค empty-time คือ การวัดเวลาที่ของแข็งทั้งหมดออกจากเบดที่ค่าความแตกต่างของความเร็วแก๊ส จากรูปที่ 4.3 ที่ความเร็วแก๊สต่ำจะไม่มีอนุภาคหลุดออกมา แต่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น เบดของแข็งสามารถ empty ในช่วงเวลาสั้นด้วยการเพิ่มความเร็ว ค่าความเร็วส่งผ่านคือการตัดกันของเส้นของความเร็วดำและความเร็วสูงค่าที่ได้ คือ 2.3 เมตรต่อวินาที

งานวิจัยที่พัฒนาความสัมพันธ์สำหรับความเร็วส่งผ่านแสดงในตารางที่ 4.3 นอกจากนี้การอธิบายความเร็วส่งผ่านเปรียบเทียบกับความสัมพันธ์ในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าความเร็วส่งผ่านจากเทคนิค empty-time มีค่าใกล้เคียงกับความสัมพันธ์ในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 Empty-time ของของแข็งที่ใช้ในการศึกษาที่ความเร็วที่แตกต่างกันของปริมาณของแข็ง 40 กรัม

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของความเร็วส่งผ่าน (U_{tr}) จากความสัมพันธ์และความเร็วที่คำนวณได้จากงานวิจัย

อ้างอิง	ความสัมพันธ์ของ U_{tr}	U_{tr} (m/s)	สมการ
Lee และ Kim [63]	$Re_{tr} = 2.916Ar^{0.354}$	2.50	(4.8)
Perales และคณะ [64]	$Re_{tr} = 1.415Ar^{0.438}$	2.40	(4.9)
Bi และ Fan [65]	$Re_{tr} = 2.28Ar^{0.419}$	2.45	(5.0)
Adanez และคณะ [66]	$Re_{tr} = 2.078Ar^{0.458}$	2.50	(5.1)
Tsukada และคณะ [67]	$Re_{tr} = 1.806Ar^{0.458}$	2.00	(5.2)
Chebouni และคณะ [68]	$Re_{tr} = 0.169Ar^{0.545}(D_t/d_p)^{0.3}$	2.00	(5.3)
จากงานวิจัยนี้		2.30	

ความเร็วของการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลแสดงในตารางที่ 4.4 แบ่งเป็น 4 ช่วงความแตกต่างของความเร็วแก๊สกับชนิดรูปแบบการไหล ที่ความเร็วต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf}) จะเป็นรูปแบบการไหลแบบเบตนิ่ง สำหรับความเร็วระหว่างความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf}) กับความเร็วทรานซิชั่น (U_c) คือความเร็วของรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สและฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่งหรือค่า 0.06-0.84 เมตรต่อวินาที เมื่อความเร็วของแก๊สอยู่ระหว่างความเร็วทรานซิชั่นและความเร็วในการส่งผ่าน (U_{tr}) หรือช่วง 0.84-2.30 เมตรต่อวินาที เป็นช่วงการไหลที่เปลี่ยนรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สไปยังรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนและที่ความเร็วมากกว่า 2.30 เมตรต่อวินาที เป็นรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง

ตารางที่ 4.4 รูปแบบการไหลของโลหะคาร์บอนเตนตอร์รับอะลูมินา

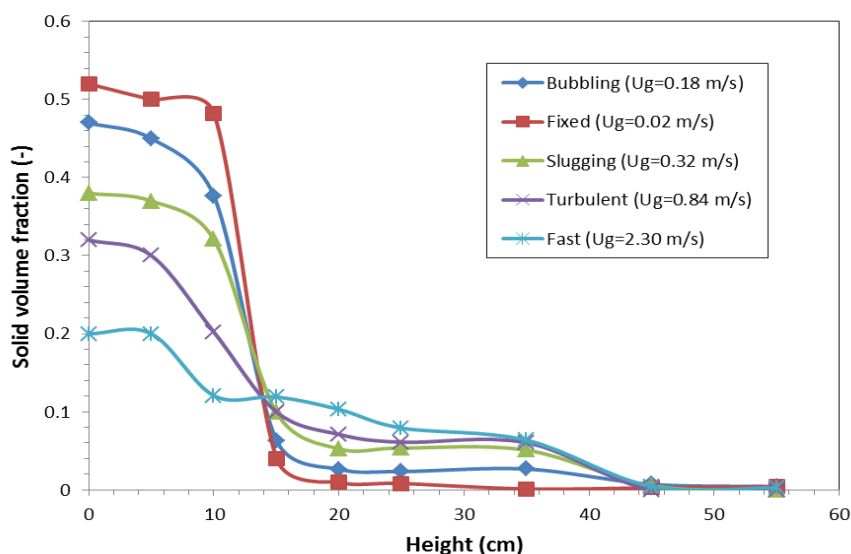
ช่วงความเร็ว	ช่วงของ U_g (m/s)	รูปแบบการไหล
$U_g < U_{mf}$	<0.06	แบบเบตนิ่ง
$U_{mf} < U_g < U_c$	0.06-0.84	ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สและ ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่ง
$U_c < U_g < U_{tr}$	0.84-2.30	ฟลูอิดเซชันแบบการไหลแบบปั่นป่วน
U_{tr}	>2.30	ฟลูอิดเซชันแบบการไหลความเร็วสูง

4.3 สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบด

ในแต่ละความเร็วของรูปแบบการไหลได้ทำการวัดรูปแบบความดันในแนวแกนตลอดความสูงท่อโรเตอร์ด้วยเครื่องวัดความดัน โดยความดันในแนวแกนจะใช้คำนวณสัดส่วนปริมาตรของแข็งรูปแบบของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งตลอดความสูงท่อโรเตอร์แสดงในรูปที่ 4.5 เมื่อความเร็วสูงขึ้นค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งจะลดลงเนื่องจากแรงต้าน รูปแบบการไหลเบดนิ่งที่ความเร็ว 0.02 เมตรต่อวินาที ของแข็งกองตั้งอยู่ด้านล่างของกระบวนการ ที่ตำแหน่งสูงกว่า 10 เซนติเมตร เบดลดลงมีค่าเป็นศูนย์ รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สที่ความเร็ว 0.18 เมตรต่อวินาที มีสัดส่วนของปริมาตรของแข็งใกล้เคียงกันที่ทุกความสูงของเบดและลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งสูงกว่า 0.20 เซนติเมตร เพราะไม่มีของแข็งหลุดจากพื้นผิวหน้าเบด ส่วนรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่งที่ความเร็ว 0.32 เมตรต่อวินาที มีค่าสัดส่วนของปริมาตรของแข็งต่ำกว่ารูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สและใกล้เคียงกันที่ทุกความสูงของเบดและลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งสูงกว่า 0.20 เซนติเมตรเช่นเดียวกับรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส

เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นสูงกว่าความเร็วทรานซิชันหรือความเร็วในช่วง 0.84-2.30 เมตรต่อวินาทีรูปแบบการไหลจะเป็นรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน จากรูปที่ 4.5 สัดส่วนโดยปริมาตรที่ด้านล่างจะต่ำกว่ารูปแบบการไหลแบบฟลูอิดเซชันฟองแก๊สเพราะของแข็งในเบดกระจายตัวได้ง่าย ดังนั้น รูปแบบสัดส่วนของแข็งตลอดความสูงของรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนจะลดลงเรื่อยๆ จนค่าคงที่ ที่ความสูง 0.40 เซนติเมตร และมีอนุภาคของแข็งหลุดออกจากระบบเล็กน้อยที่บริเวณผิวหน้าเบด

สำหรับรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง ความเร็วของแก๊สคือ 2.30 เมตรต่อวินาที รูปแบบสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งคล้ายกับรูปเอส ที่ด้านล่างของคอลัมน์มีอนุภาคของแข็งหนาแน่นและเบาบางที่ด้านบนของคอลัมน์ ผลที่ได้นี้คล้ายกับการสรุปของงานวิจัยก่อนหน้านี้ [64, 65, 66]



รูปที่ 4.5 รูปแบบสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งตลอดความสูงของท่อโรเตอร์ที่ความเร็วแตกต่างกัน

4.4 การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต

4.4.1 ผลของรูปแบบการไหล

ผลของรูปแบบการไหลต่อความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขาออกของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธเซนต์ ที่อุณหภูมิการดูดซับภายในท่อโรเตอร์ 333 เคลวิน ของแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตรและปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตรแสดงในรูปที่ 4.6 (a) สำหรับตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและรูปที่ 4.6 (b) สำหรับตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต รูปแบบการไหลที่ใช้ในการทดลองคือ เบริ่ง ฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊ส ฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ้ง ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนและฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง

รูปแบบการไหลแบบเบดนิ่ง ความเร็วที่เข้ามาในระบบมีค่าต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน เวลาในที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ทั้งหมดของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตเป็นเวลา 7 นาทีและโซเดียมคาร์บอเนตเป็นเวลา 6 นาที จากนั้นกราฟการดูดซับกับเวลาลดลงเรื่อยๆ ตามการเพิ่มขึ้นของเวลาในการดูดซับจนไม่สามารถดูดซับได้หลังจากเวลา 25 นาทีและ 15 นาที ตามลำดับ

รูปแบบการไหลแบบพองแก๊ส เวลาในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ทั้งหมดมีค่าน้อยกว่ารูปแบบการไหลเบดนิ่ง ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ทั้งหมดเป็นเวลา 3 นาทีและ 2 นาที ตามลำดับ เวลาในการดูดซับจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงเวลา 17 นาที สำหรับตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและลดลงถึง 10 นาทีของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต อธิบายได้จากความเร็วของแก๊สของรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊สมีค่าสูงกว่ารูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบเบดนิ่งที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผ่านเข้ามาในกระบวนการจำนวนมากกว่า อีกทั้งตัวดูดซับของแข็งโลหะคาร์บอเนตในรูปแบบการไหลแบบฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊สจะมีโอกาสมากกว่าที่จะสัมผัสกับโมเลกุลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

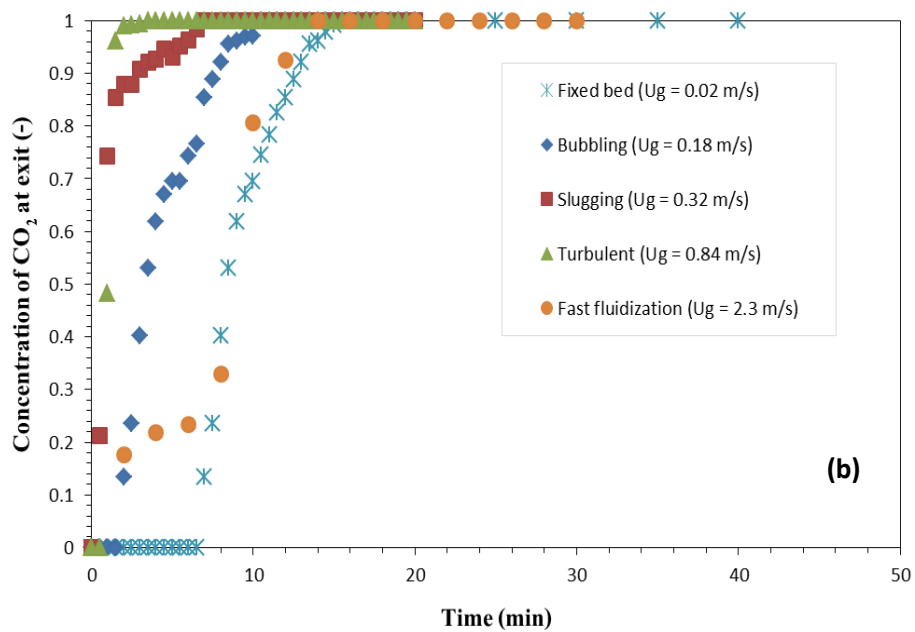
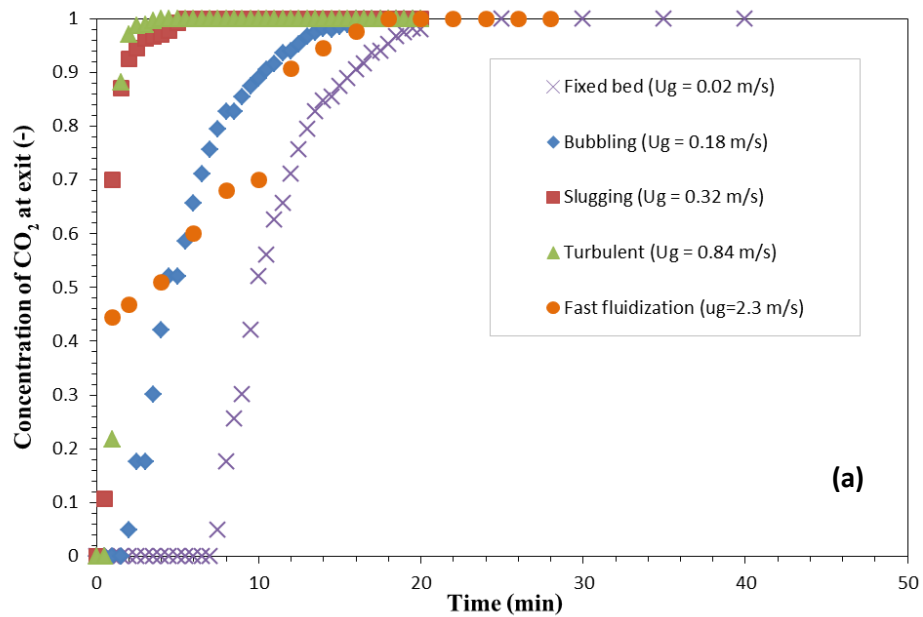
เมื่อความเร็วที่ผ่านตลอดเบดเพิ่มขึ้นเป็น 0.32 เมตรต่อวินาที เบดเปลี่ยนจากรูปแบบการไหลแบบฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊สเป็นแบบฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ้ง เห็นได้จากตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดแค่ 30 วินาทีเมื่อแก๊สสัมผัสกับของแข็ง จากนั้นลดลงอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของเวลาในการดูดซับรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ้งแสดงรูปแบบกราฟที่แตกต่างจากรูปแบบเบดนิ่งและแบบพองแก๊สที่ไม่ได้เป็นรูปร่างตัวเอส อธิบายจากเวลาในการทำปฏิกิริยามีค่าน้อยกว่ารูปแบบเบดนิ่งและรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊สและมีช่วงที่แก๊สบางส่วนเคลื่อนที่แยกชั้นกับอนุภาคของแข็ง

สำหรับรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนที่ความเร็วแก๊ส 0.84 เมตรต่อวินาที ความเข้มข้นของแก๊สขาออกมีแนวโน้มคล้ายกับรูปแบบการไหลสลักกิ้ง ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดเพียง 30 วินาทีและลดลงตามการเพิ่มของเวลาในการดูดซับ ถึงแม้ว่าเวลาในการดูดซับของแก๊สในรูปแบบการไหล

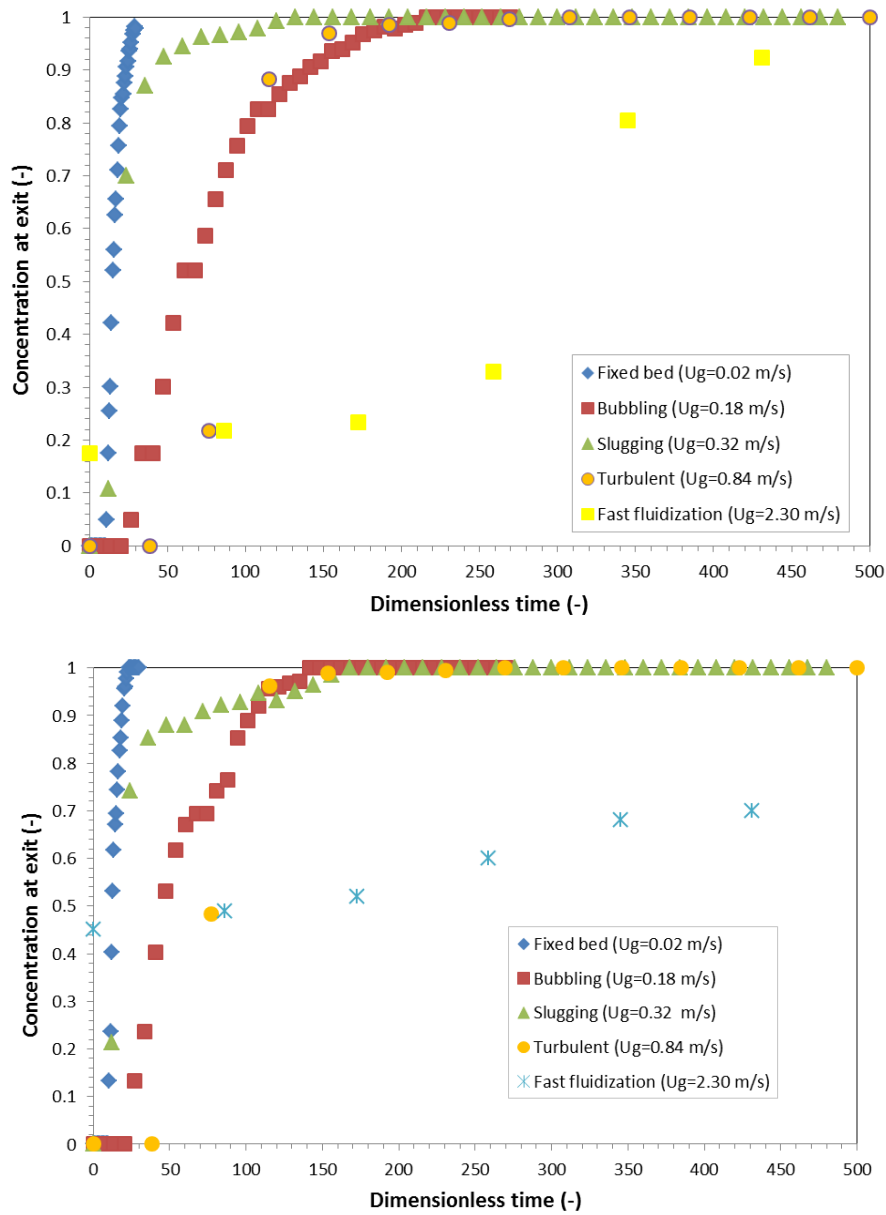
ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนมีค่าน้อยกว่าฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่งแต่การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนสูงกว่า หมายความว่ารูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนมีการผสมของแก๊สและตัวดูดซับของแข็งที่ดีกว่า โดยจากทฤษฎีเครื่องปฏิกรณ์มีประสิทธิภาพเนื่องจากเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะแบบผสมกลับ (back mixing) [53, 62] แต่อย่างไรก็ตามตัวดูดซับของแข็งโลหะคาร์บอนเตสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียง 30 วินาที ซึ่งอธิบายจากเวลาที่สั้นในการสัมผัสกันของแข็ง-แก๊ส

เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเป็นรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง ตัวดูดซับของแข็งถูกนำออกด้านนอกด้วยแก๊สและกลับเข้ามาในท่อไรเซอร์ ดังนั้นตัวดูดซับที่ใช้จึงมากกว่ารูปแบบการไหลแบบอื่น ในรูปแบบนี้ใช้ตัวดูดซับ 200 กรัม สำหรับ 1 รอบของตัวดูดซับโลหะคาร์บอนเตของแข็ง 200 กรัม จะใช้เวลา 6 นาที ผ่านตลอดท่อไรเซอร์อย่างต่อเนื่องเป็นจำนวน 4 รอบ จนกระทั่งปฏิกิริยาการดูดซับหยุด

จากรูปที่ 4.6 ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอนเตสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงร้อยละ 45 สำหรับโซเดียมคาร์บอนเตดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพียงร้อยละ 80 สำหรับการดูดซับรอบแรกหรือ 0-6 นาที หลังจาก 6 นาที ปริมาณการดูดซับลดลงเนื่องจากตัวดูดซับที่ใช้เป็นตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานแล้ว สามารถสรุปได้ว่าการดำเนินการที่ภาวะรูปแบบการไหลความเร็วสูงตัวดูดซับสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ได้ทั้งหมด อธิบายจากความเร็วสูงของท่อไรเซอร์ไม่สูงพอที่จะกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนดังกล่าว

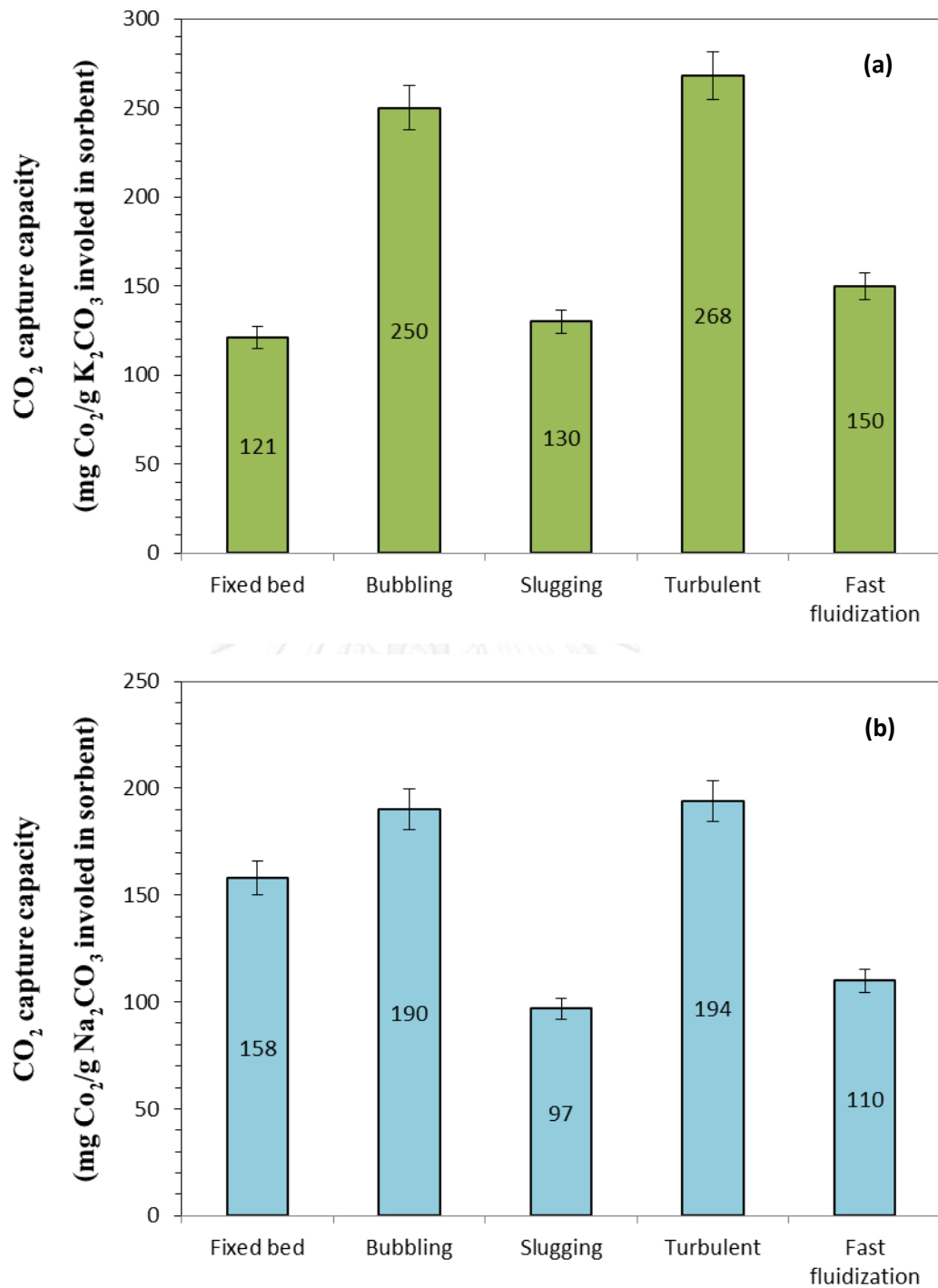


รูปที่ 4.6 ผลของรูปแบบการไหลต่อกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของแก๊สกับเวลาของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร และอุณหภูมิในการดูดซับ 333 เคลวิน



รูปที่ 4.7 ผลของรูปแบบการไหลต่อกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของแก๊สกับค่าเวลาไร้หน่วยของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร และอุณหภูมิในการดูดซับ 333 เคลวิน

ผลของรูปแบบการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอเซชันด้วยการใช้ตัวดูดซับของแข็ง โพรแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าขึ้นอยู่กับรูปแบบการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ รูปแบบการไหลแบบเบตนิ่ง รูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบสลักกิ้งและฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูงมีค่าปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำ รูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบปั่นป่วนมีค่าปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ค่าสูงสุด ส่วนรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบฟองแก๊สมีค่าปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับรูปแบบการไหลแบบฟลูอิดไอเซชันปั่นป่วน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับค่าความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขาออกในรูปที่ 4.7 รูปแบบเบตนิ่งให้เวลาในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดแต่กลับให้ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำสุด เหตุผลจากพฤติกรรมของการจัดเรียงตัวตัวดูดซับของแข็งในเบตนิ่งทำให้สูญเสียพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามาในระบบต่ำกว่า แต่ค่าปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใน รูปแบบการไหลแบบเบตนิ่งของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตมีค่ามากกว่าโพรแทสเซียมคาร์บอเนตใน อธิบายจากค่าความหนาแน่นของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตมีค่าต่ำกว่าโพรแทสเซียมคาร์บอเนตใน ปริมาณเดียวกันโซเดียมคาร์บอเนตจะมีการอัดตัวภายในมากกว่าทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นตาม รูปแบบการไหลแบบฟองแก๊ส สัดส่วนความเข้มข้นของแก๊สที่ทางออกยังคงมีค่าสูงแต่น้อยกว่ารูปแบบเบตนิ่ง แต่มีค่าปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าเบตนิ่ง แสดงว่ามีการสัมผัสของแก๊ส-ของแข็งที่สูงมากกว่ารูปแบบเบตนิ่ง สำหรับรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบสลักกิ้งและรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง ตัวดูดซับของแข็งโลหะคาร์บอเนตสามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้หมดในเวลาไม่ถึง 1 นาที จะเห็นว่าปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบสลักกิ้งและรูปแบบฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูงมีค่าต่ำใกล้เคียงกับแบบเบตนิ่ง เนื่องจากการเกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ในรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบสลักกิ้งทำให้พื้นที่การสัมผัสกันของแก๊สและของแข็งน้อยลงและสำหรับรูปแบบการไหลแบบฟลูอิดไอเซชันความเร็วสูงที่มีปริมาณพื้นที่ในการสัมผัสกันของแก๊สและของแข็งสูงแต่เนื่องจากการมีการกระจายตัวของเบตของแข็งทำให้ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าน้อย ในงานวิจัยนี้รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนมีปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเนื่องจากระบบการผสมย้อนกลับ (Back mixing) สูง



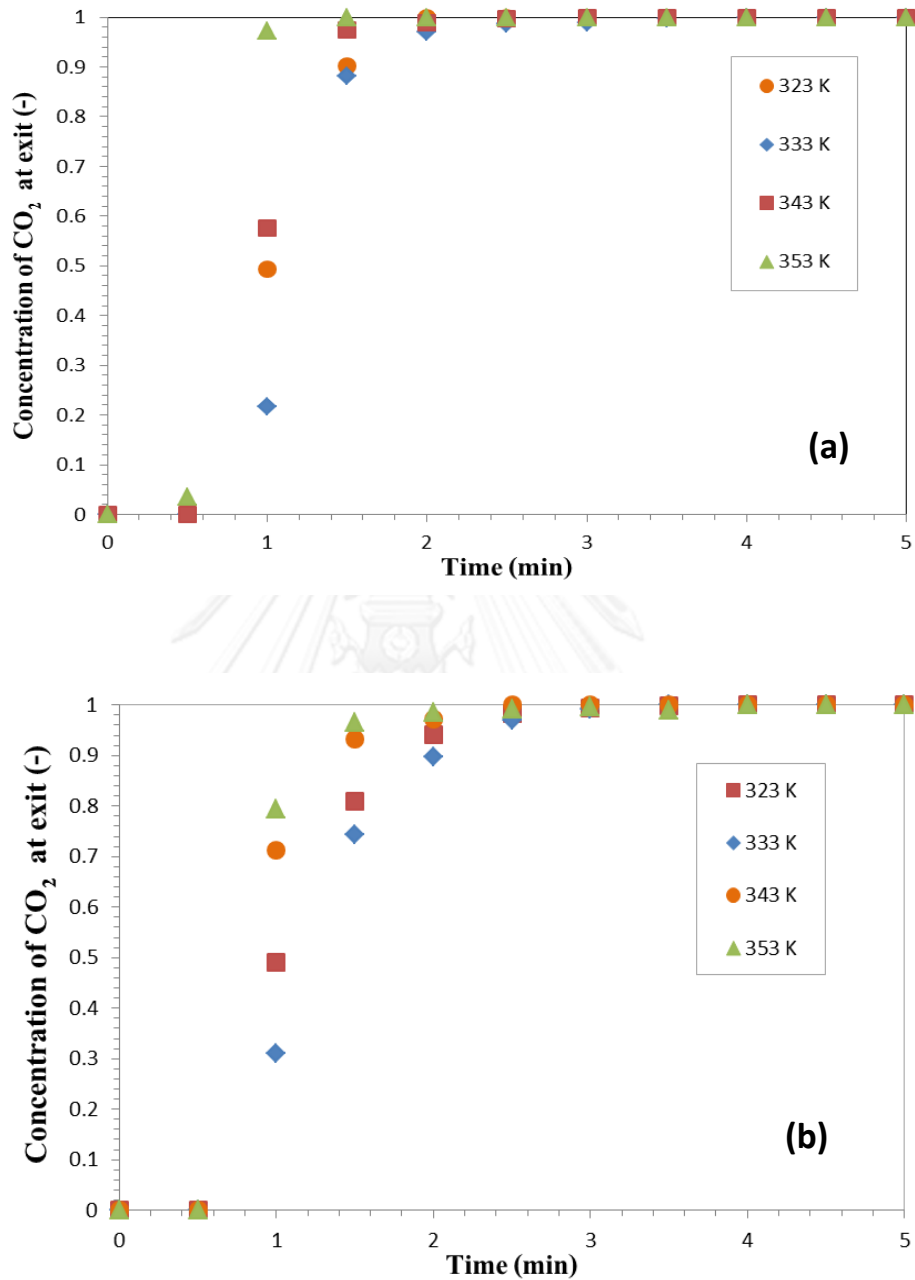
รูปที่ 4.8 ปริมาณการดักจับทั้งหมดของ (a) ตัวดูดซับ K₂CO₃/Al₂O₃ และ (b) ตัวดูดซับ Na₂CO₃/Al₂O₃ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร และอุณหภูมิในการดูดซับ 333 เคลวิน

4.4.2 ผลของอุณหภูมิในท่อไรเซอร์

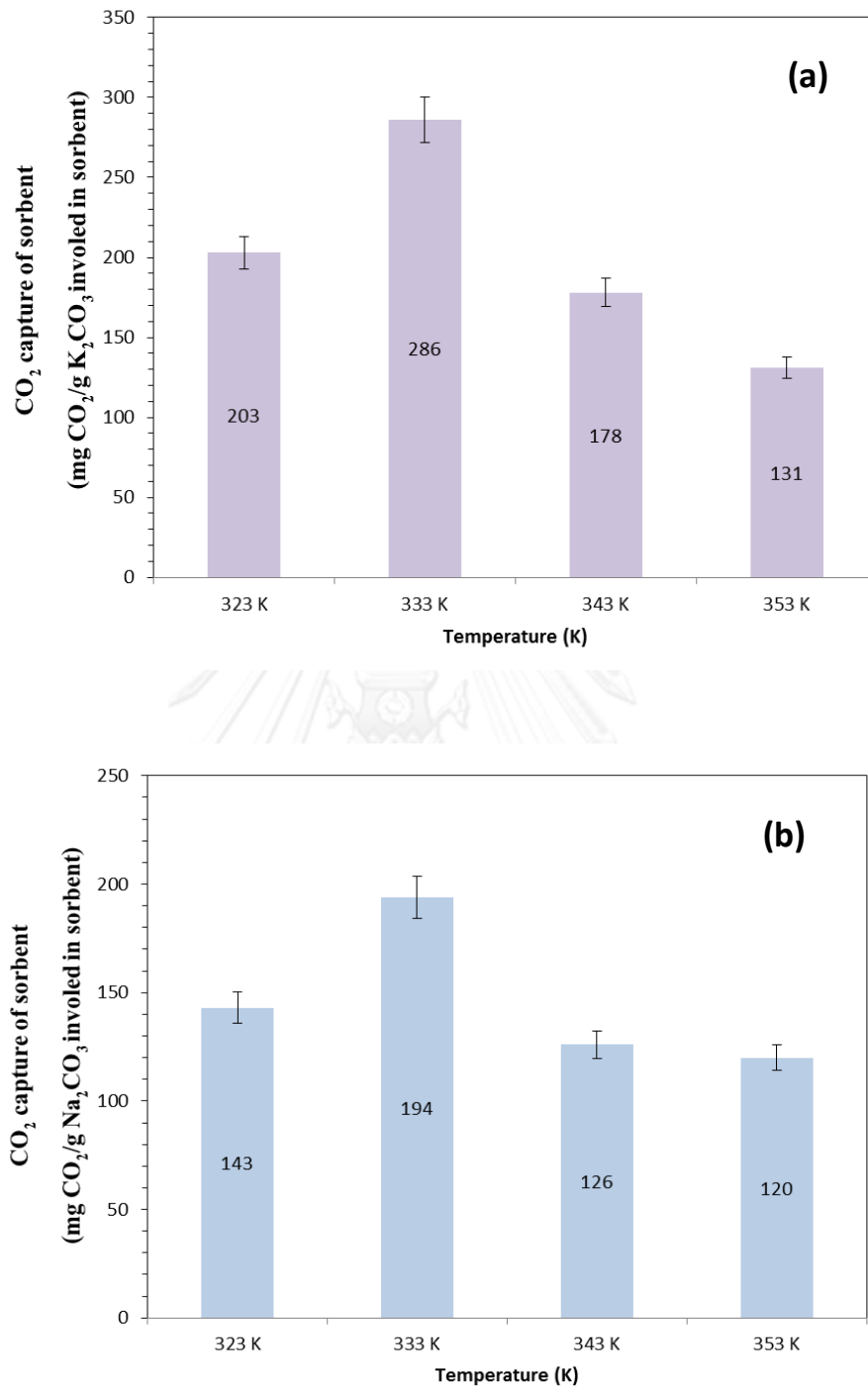
ผลของอุณหภูมิในท่อไรเซอร์ต่อปริมาณการดูดซับของอุณหภูมิในการทดลอง เท่ากับ 323 333 343 และ 353 เคลวิน ที่รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนความเร็ว 0.84 เมตรต่อวินาที ของแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร ปริมาณแก๊สไนโตรเจนสมดุลและปริมาณตัวดูดซับ 40 กรัม

รูปที่ 4.9 แสดงผลของอุณหภูมิในท่อไรเซอร์ต่อความเข้มข้นของแก๊สที่ทางออกของตัวดูดซับ โพรแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต จะพบแนวโน้มของความเข้มข้นแก๊สที่ขาออก 2 แบบ ที่ช่วงอุณหภูมิ 323-333 เคลวิน ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิ ขณะที่ช่วงอุณหภูมิ 333-353 เคลวิน ปริมาณการดูดซับลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จากทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ปฏิกิริยาในกระบวนการจะมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงเมื่ออุณหภูมิต่ำเพราะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน แต่ที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน มีปริมาณการดูดซับต่ำอธิบายจากการควบแน่นของไอน้ำเนื่องจากอุณหภูมิ 323 เคลวินมีค่าน้อยกว่าจุดน้ำค้างของปริมาณไอน้ำขาเข้า 19.5 โดยปริมาตร อย่างไรก็ตามช่วงอุณหภูมิ 333-353 เคลวิน ปริมาณการดูดซับสูงที่สุดที่ 333 เคลวิน และลดลงเมื่อเพิ่มค่าเป็น 343 เคลวิน นอกจากนี้ปริมาณการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในรูปที่ 4.10 มีค่าลดลงมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 353 เคลวิน ปฏิกิริยาคาร์บอเนชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำจึงมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอเนชัน แต่อย่างไรก็ตามการทดลองในภาวะอุณหภูมิต่ำควรจะสูงกว่าจุดน้ำค้าง (Dew point) ของแก๊สไอน้ำที่อุณหภูมิ 333 เคลวิน เพื่อไม่ให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำทำให้ตัวดูดซับของแข็งเกาะเป็นกลุ่มก้อนสูญเสียการเกิดฟลูอิดเซชัน จากการศึกษาผลของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับตัวดูดซับโพรแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต คือ 333 เคลวิน





รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิในท่อโรเซอรัทต่อกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของแก๊สกับเวลาของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตรและปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร



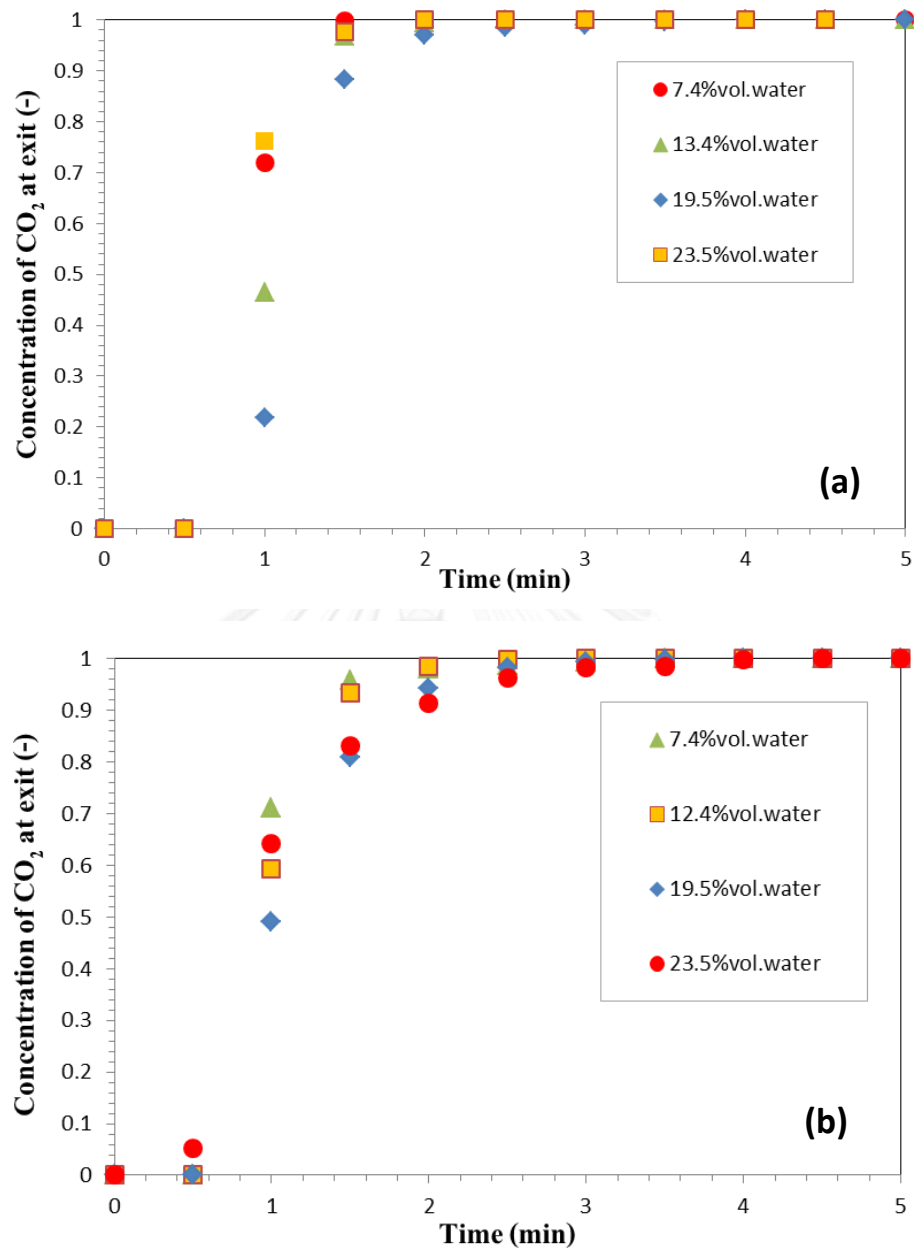
รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิในท่อไรเซอร์ต่อปริมาณการดักจับทั้งหมดของ (a) ตัวดูดซับ K₂CO₃/Al₂O₃ และ (b) ตัวดูดซับ Na₂CO₃/Al₂O₃ ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตรและปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร

4.4.3 ผลของปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้า

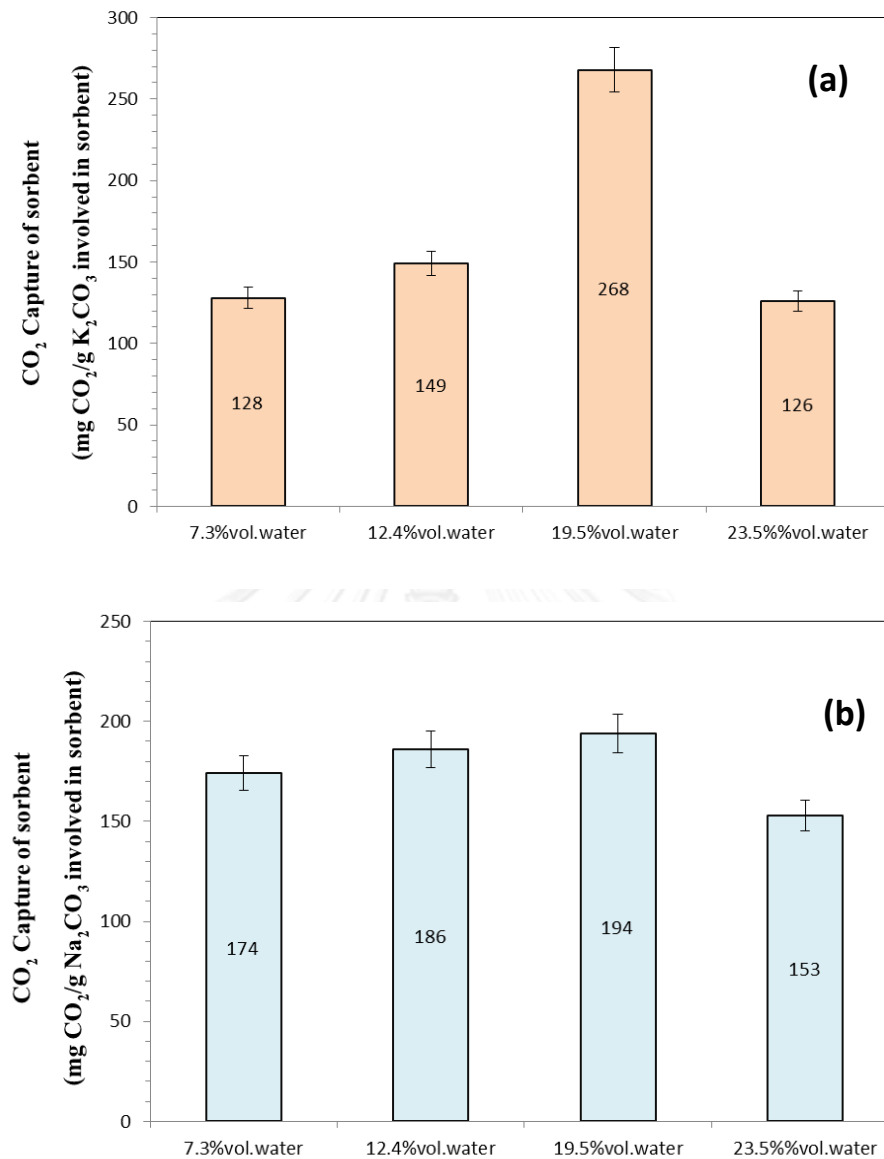
ในการคำนวณปริมาณการดูดซับต่อปริมาณไอน้ำ 4 ค่า คือ ปริมาตรร้อยละ 7.4 13.4 19.5 และ 23.5 รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนที่ความเร็ว 0.84 เมตรต่อวินาที ของแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณแก๊สไนโตรเจนสมดุลและอุณหภูมิ 323 เคลวิน และปริมาณตัวดูดซับ 40 กรัม

จากรูปที่ 4.11 แสดงผลของปริมาณไอน้ำต่อความเข้มข้นของแก๊สที่ทางออกของตัวดูดซับ โพลีเอทิลีนคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต แบ่งแนวโน้มออกเป็น 2 แนวโน้ม ช่วงของปริมาณไอน้ำร้อยละ 7.4-19.5 โดยปริมาตร ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้นขณะที่ช่วงของปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5-23.5 โดยปริมาตร ปริมาณการดูดซับลดลงเมื่อปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.12 แสดงปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับความเข้มข้นของไอน้ำ ที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 7.4 โดยปริมาตร ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า 128 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตและ 174 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมโซเดียมคาร์บอเนต จากปริมาณสารสัมพันธ์ 1 โมลของโลหะคาร์บอเนตสามารถดูดซับ 1 โมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และ 1 โมลของน้ำ ($M_2CO_3 + H_2O + CO_2 \leftrightarrow 2MHCO_3$) เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ 2 โมลของโลหะไฮโดรเจนคาร์บอเนต ($MHCO_3$) ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำภายใต้การขาดไอน้ำ สามารถอธิบายกลไกปริมาณสัมพันธ์ด้านบน เมื่อความเข้มข้นไอน้ำเพิ่มเป็นร้อยละ 18.4 โดยปริมาตร ปริมาณการดักจับเพิ่มขึ้นเป็น 268 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมโพลีเอทิลีนคาร์บอเนตและ 194 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมโซเดียมคาร์บอเนต แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นของไอน้ำเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 23.5 โดยปริมาตร ปริมาณการดูดซับแก๊สลดลง อธิบายจาก ปริมาณไอน้ำในแก๊สขาเข้าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดไอน้ำ นอกจากนี้ปริมาณไอน้ำยังขึ้นก็อยู่กับอุณหภูมิในท่อไรเซอร์เมื่ออุณหภูมิภายในท่อไรเซอร์เพิ่มขึ้นค่าการอิ่มตัวของไอน้ำก็เพิ่มขึ้น ดังนั้นร้อยละ 23.5 โดยปริมาตร ของปริมาณน้ำที่อุณหภูมิการดูดซับ 333 เคลวิน มีค่าอุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิการดูดซับในท่อไรเซอร์ ปริมาณน้ำในแก๊สขาเข้าจึงเกิดการควบแน่นเกิดเป็นหยดน้ำขึ้นซึ่งลดพื้นที่การทำปฏิกิริยาที่ผิวตัวดูดซับ



รูปที่ 4.11 ผลของความแตกต่างของปริมาณไอน้ำต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ (a) ตัวดูดซับ K₂CO₃/Al₂O₃ และ (b) ตัวดูดซับ Na₂CO₃/Al₂O₃ ที่ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณแก๊สไนโตรเจนสมดุลและอุณหภูมิ 333 เคลวิน



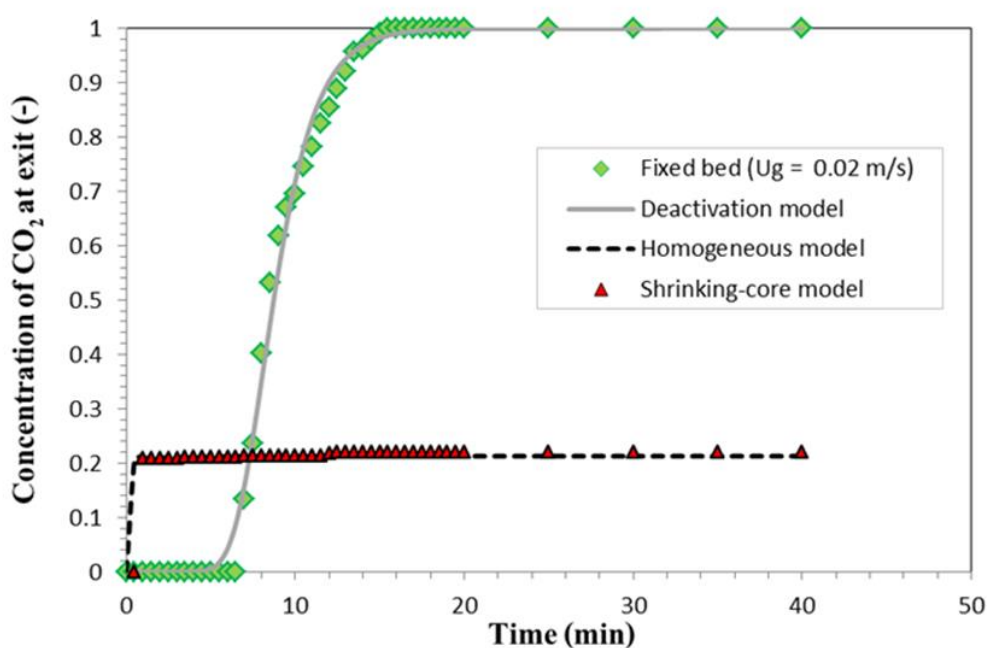
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4.12 ผลของความแตกต่างของปริมาณไอน้ำต่อปริมาณการยึดจับสูงสุดของของ (a) ตัวดูดซับ K₂CO₃/Al₂O₃ และ (b) ตัวดูดซับ Na₂CO₃/Al₂O₃ ที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร และอุณหภูมิ 333 เคลวิน

4.5 การเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองกับแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์

จากงานวิจัยได้เปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลการทดลอง 3 แบบ คือแบบจำลองแกนกลางหัดตัว แบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวกัน และแบบจำลองการเสื่อมสภาพ ด้วยการวัดความเข้มข้นของแก๊สขาออกกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ของรูปแบบเบตนิ่ง ภายใต้ภาวะการทดลองที่ความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร ปริมาณแก๊สไนโตรเจนสมดุล น้ำหนักตัวดูดซับ 40 กรัม และอุณหภูมิการดูดซับ 333 เคลวิน ซึ่งข้อมูลการดูดซับที่ทางออกกับเวลาได้ถูกสร้างเป็นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากรูปความเข้มข้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

กราฟการดูดซับกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา (k_1) ในแบบจำลองแกนกลางหัดตัว โดยอินทิเกรตสมการ (2.27) ด้วยการใช้กฎ Simpson ให้มีค่าเท่ากับ 1 ได้ค่า k_1 คือ 1.8×10^{-2} เมตรต่อนาที แสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์กับผลการทดลอง

การอธิบายกราฟการดูดซับกับเวลาและค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยา (k_2) ในแบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวกันคล้ายกับแบบจำลองแกนกลางหัดตัวยกเว้นสมการ (2.28) ค่า k_2 คือ 0.023 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล นาทีและผลที่ได้คือเส้นประแสดงในรูปที่ 4.13 จากรูปแบบจำลองทั้งสองให้ผลการคำนวณกราฟการดูดซับกับเวลาของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของทั้งสองแบบจำลองไม่ตรงกับผลข้อมูลการทดลองด้วยสมมติฐานที่ว่าความว่องไวการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้นมีค่าคงที่ตลอดการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันของทั้งแบบจำลองแบบแกนกลางและแบบเป็นเนื้อเดียวกัน [14] แต่เพราะ

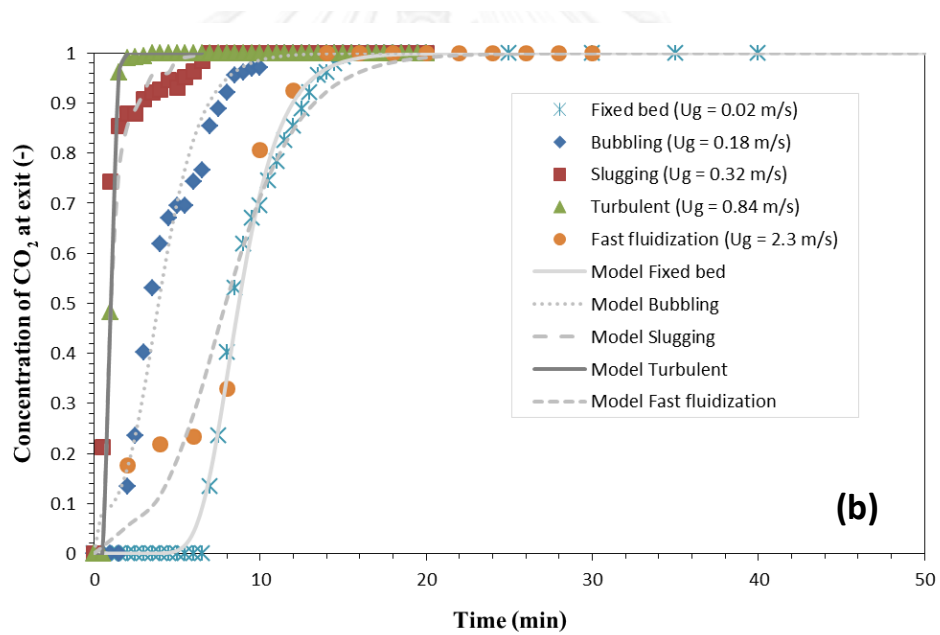
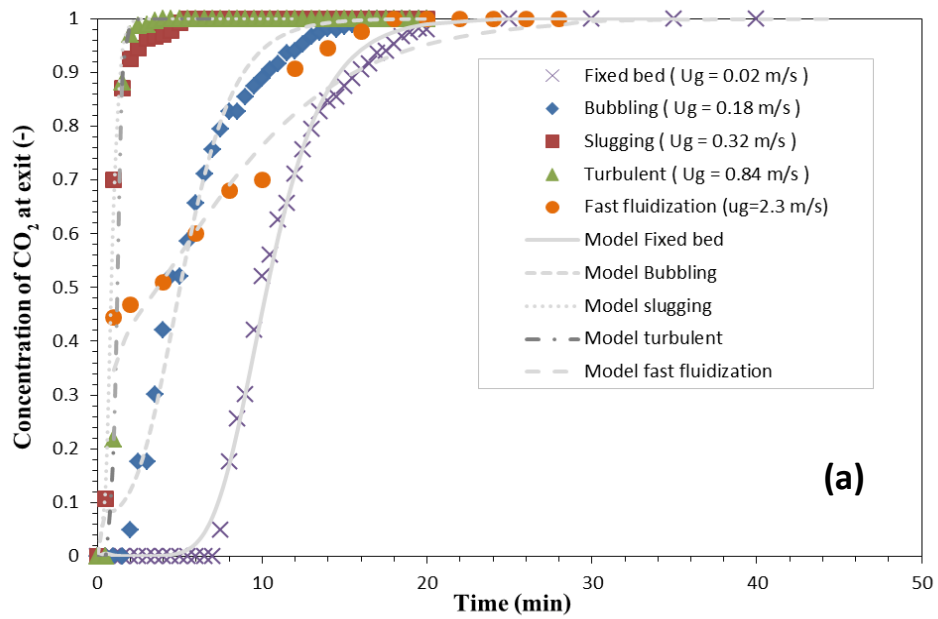
ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาที่มีผลต่อความว่องไวการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่าลดลงเมื่อเกิดผลิตภัณฑ์ปกคลุม ดังนั้นจะอธิบายว่าทั้งสองแบบจำลองไม่ใช่แบบจำลองของจลนพลศาสตร์ที่เหมาะสมกับการดูดซับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กราฟความเข้มข้นกับเวลาจากสมการที่ (2.34) แสดงผลของแบบจำลองการเสื่อมสภาพที่คำนวณด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองด้วยการใช้เทคนิคผลต่างกำลังสองน้อยที่สุดกับ 2 ตัวแปร คือ ค่า $k_0 = 0.1408$ ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล วินาที และค่า $k_d = 0.0098$ ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล วินาที และสร้างเป็นกราฟด้วยเส้นทึบแสดงในรูปที่ 4.13 จากรูปที่ 4.13 การวิเคราะห์การทดลองจากข้อมูลกราฟการดูดซับกับเวลาให้ผลตรงกับสมการ (2.34) โดยมีค่า R-square เท่ากับ 0.997

4.6 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับของของโพแทสเซียมและโซเดียมคาร์บอเนต

4.6.1 ผลของรูปแบบการไหล

การอธิบายตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ (k_0 และ k_d) จากการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลด้วยการใช้สมการ (2.34) ด้วยเทคนิคกำลังน้อยสุดแบบไม่เป็นเส้นตรงข้างต้น รูปที่ 4.14 แสดงภาพจากการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลผลจากการทดลองด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพสามารถทำนายพฤติกรรมของกราฟการดูดซับกับเวลาของทุกรูปแบบการไหลของ (a) ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและ (b) โซเดียมคาร์บอเนตในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ข้อมูลของค่าคงที่ในการเกิดปฏิกิริยาของทุกรูปแบบการไหลตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตแสดงในตารางที่ 4.5 จากตารางตัวแปรทางจลนพลศาสตร์จะพิจารณาเฉพาะค่าคงที่ของอัตราเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (k_0) เนื่องจากการสนใจการดูดซับที่เกิดขึ้น รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนมีค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์สูงสุด เมื่อพิจารณากราฟการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาในรูปที่ 4.14 รูปแบบการไหลแบบเบตนิ่ง แบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สให้การดูดซับดีกว่ารูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนเนื่องจากเวลาในการดูดซับสูงแต่กลับให้ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ต่ำกว่า รูปแบบเบตนิ่งอธิบายจากการอัดตัวของแต่ละอนุภาคเป็นสาเหตุของการสูญเสียบริเวณในการทำปฏิกิริยา (active site) ของตัวดูดซับส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง ส่วนค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (k_0) ของรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สมีค่าต่ำกว่ารูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนเนื่องจากพฤติกรรมของแก๊สและของแข็งหรือพื้นที่ผิวในการสัมผัสกันน้อยกว่าเมื่อเทียบกับรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน สำหรับรูปแบบการไหลแบบสลักกึ่งการเกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ทำให้การสัมผัสกันของแก๊ส-ของแข็งลดลงซึ่งส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง รูปแบบการไหลแบบความเร็วสูงเป็นรูปแบบการไหลที่มีการสัมผัสกันของแก๊ส-ของแข็งสูงแต่เนื่องจากการกระจายตัวสูงของเบตทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง

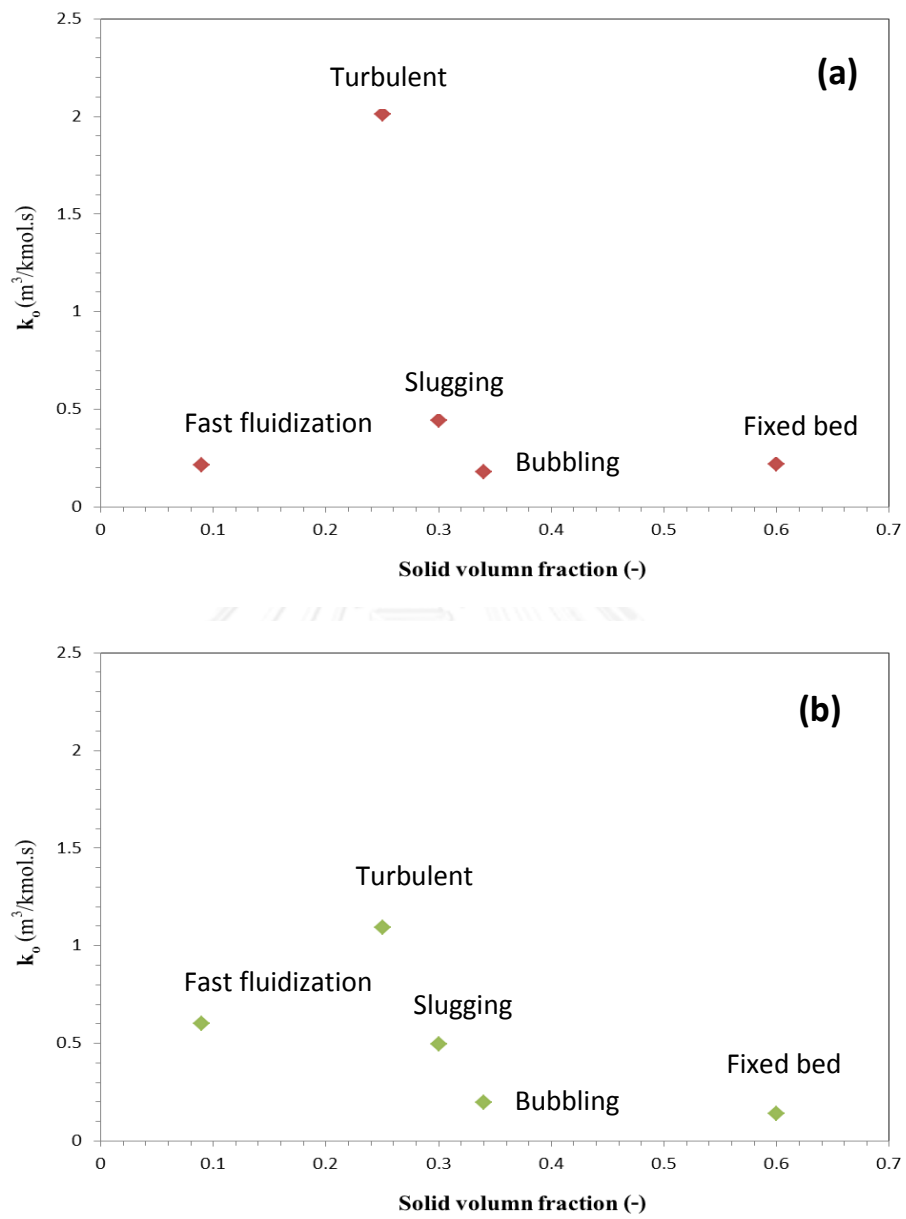


รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบข้อมูลของทุกรูปแบบการไหลของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3 ด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพของ

ตารางที่ 4.5 ผลของรูปแบบการไหลต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้นและอัตราการเสื่อมสภาพ

รูปแบบการไหล	ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3			ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3		
	k_0 ³ (m /kmol.s)	k_d ³ (m /kmol.s)	R^2	k_0 ³ (m /kmol.s)	k_d ³ (m /kmol.s)	R^2
เบตนิ่ง ฟลูอิดเซชัน	0.2207	0.0067	0.9686	0.1408	0.0098	0.9643
แบบฟองแก๊ส ฟลูอิดเซชัน	0.1789	0.0085	0.9297	0.1950	0.0108	0.9079
แบบสลักกึ่ง ฟลูอิดเซชัน	0.4422	0.0623	0.9828	0.4979	0.0471	0.9358
แบบปั่นป่วน ฟลูอิดเซชัน	1.8450	0.0829	0.9930	1.0934	0.0554	0.9998
แบบความเร็ว สูง	0.2136	0.0029	0.8780	0.6020	0.0061	0.8480

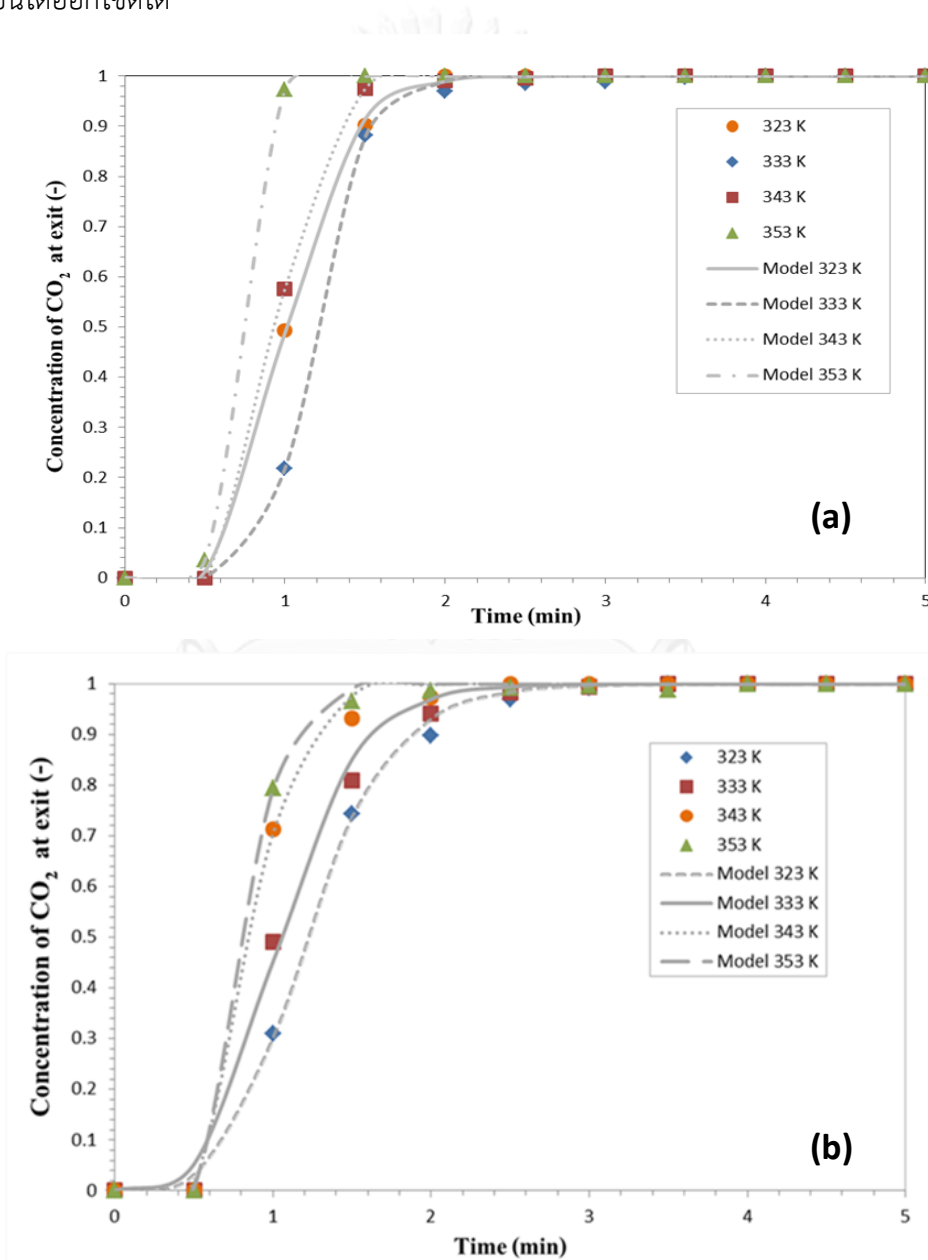
ผลของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งต่อตัวแปรทางจลนพลศาสตร์แสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.15 ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ที่มีค่ามากที่สุดสามารถอธิบายด้วยสัดส่วนปริมาตรในระบบ ทั้งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันที่ให้ค่าคงที่ของการดูดซับเริ่มต้นสูงสุดในรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน



รูปที่ 4.15 ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งต่ออัตราค่าคงที่ของการดูดซับเริ่มต้น (k_0) ของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3

4.6.2 ผลของอุณหภูมิในท่อไรเซอร์

การอธิบายตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ (k_0 และ k_d) ด้วยการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลด้วยการใช้สมการ (2.34) ด้วยเทคนิคกำลังน้อยสุดแบบไม่เป็นเส้นตรง รูปที่ 4.16 แสดงภาพจากการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลผลจากการทดลองด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมของกราฟการดูดซับกับเวลาของผลของอุณหภูมิในท่อไรเซอร์ของ (a) ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและ (b) โซเดียมคาร์บอเนตในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบข้อมูลของทุกอุณหภูมิของ (a) ตัวดูดซับ K₂CO₃/Al₂O₃ และ (b) ตัวดูดซับ Na₂CO₃/Al₂O₃ ด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพ

ตารางที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิในการดูดซับต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้นและอัตราการเสื่อมสภาพ

อุณหภูมิในการดูดซับ (K)	ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3			ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3		
	k_0 ($m^3 / kmol \cdot s$)	k_d ($m^3 / kmol \cdot s$)	R^2	k_0 ($m^3 / kmol \cdot s$)	k_d ($m^3 / kmol \cdot s$)	R^2
323	1.3471	0.0706	0.9995	1.1146	0.0488	0.9975
333	1.8450	0.0829	0.9993	1.0934	0.0554	0.9971
343	1.8802	0.1020	0.9999	1.4769	0.0895	0.9998
353	2.0570	0.1604	0.9999	1.6954	0.1072	0.9989

ความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสของตัวแปรจลนพลศาสตร์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นหรือ k_0 ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตแสดงในรูปที่ 4.17 (a) และตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตแสดงในรูปที่ 4.17 (b) โดยใช้ค่าความชันและเส้นตัดแกนอุณหภูมิของเส้นตรงของข้อมูลการทดลอง แสดงในสมการที่ (4.8) และ (4.9)

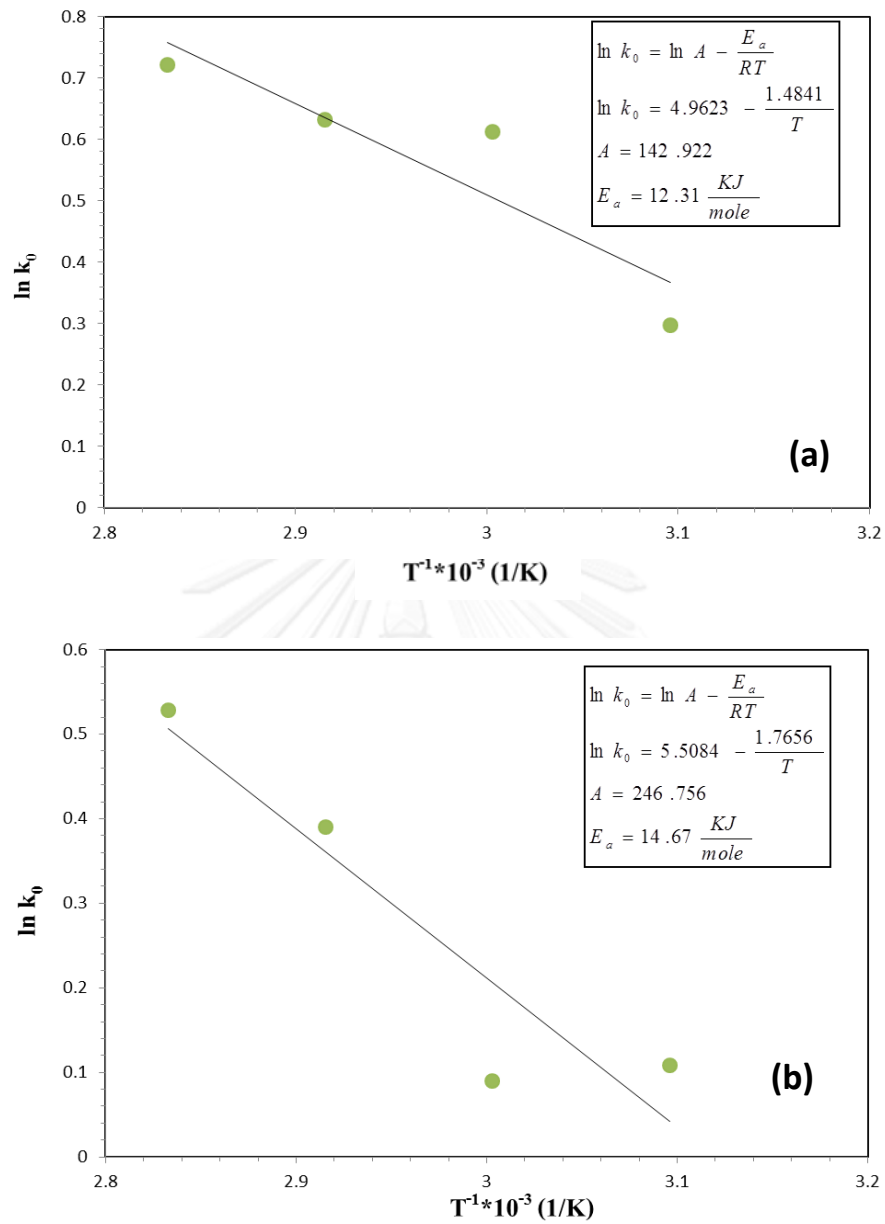
$$\text{โพแทสเซียมคาร์บอเนต : } k_0 = 142.9 \exp\left(-\frac{12.31}{RT}\right) \quad (4.8)$$

$$\text{โซเดียมคาร์บอเนต : } k_0 = 246.7 \exp\left(-\frac{14.67}{RT}\right) \quad (4.9)$$

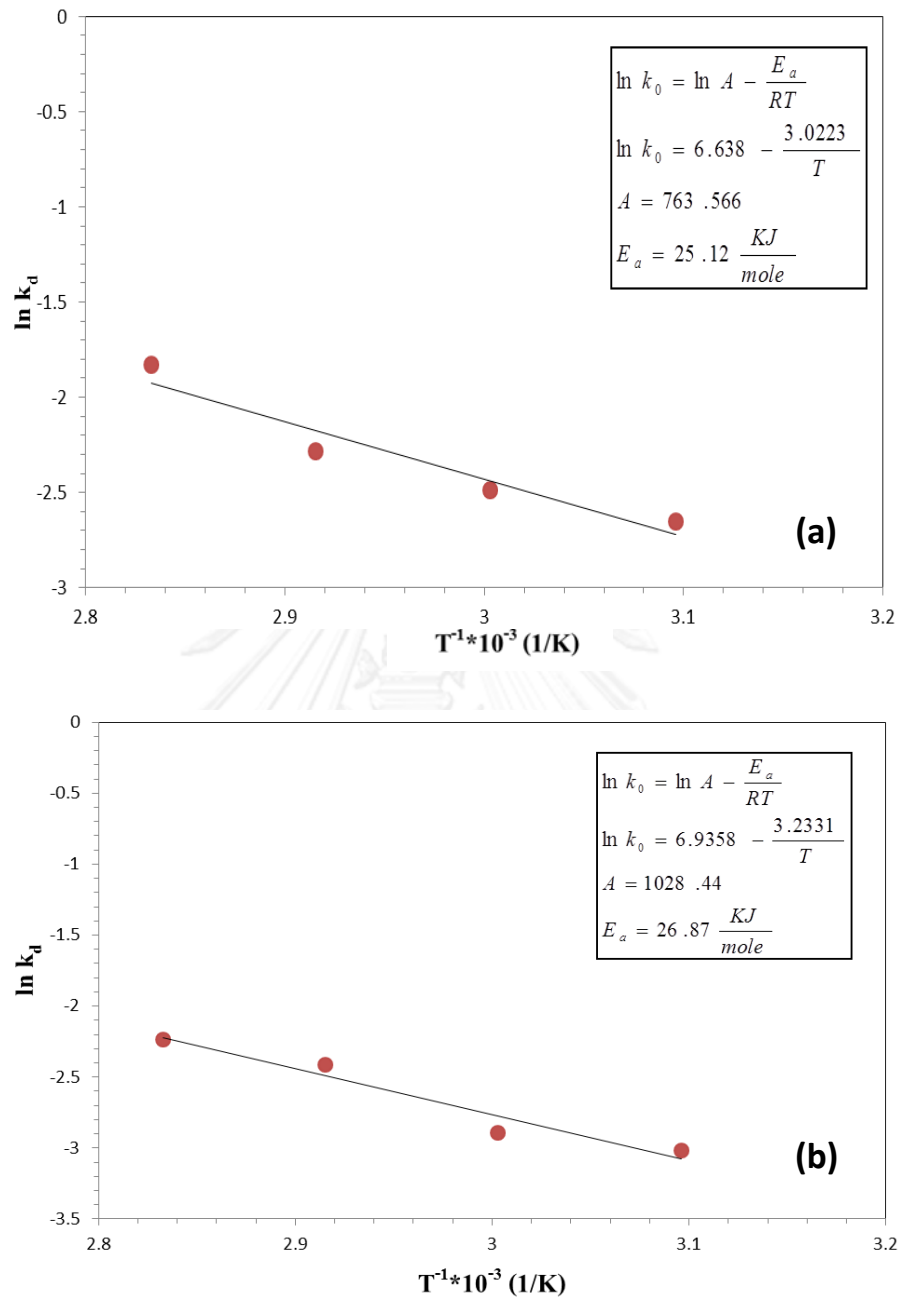
ความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสของตัวแปรจลนพลศาสตร์ของอัตราการเสื่อมสภาพหรือ k_d ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตแสดงในรูปที่ 4.18 (a) และตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตแสดงในรูปที่ 4.18 (b) โดยใช้ค่าความชันและเส้นตัดแกนอุณหภูมิของเส้นตรงของข้อมูลการทดลอง แสดงในสมการที่ (4.10) และ (4.11)

$$\text{โพแทสเซียมคาร์บอเนต : } k_d = 763.5 \exp\left(-\frac{25.12}{RT}\right) \quad (4.10)$$

$$\text{โซเดียมคาร์บอเนต : } k_d = 1028.44 \exp\left(-\frac{26.87}{RT}\right) \quad (4.11)$$



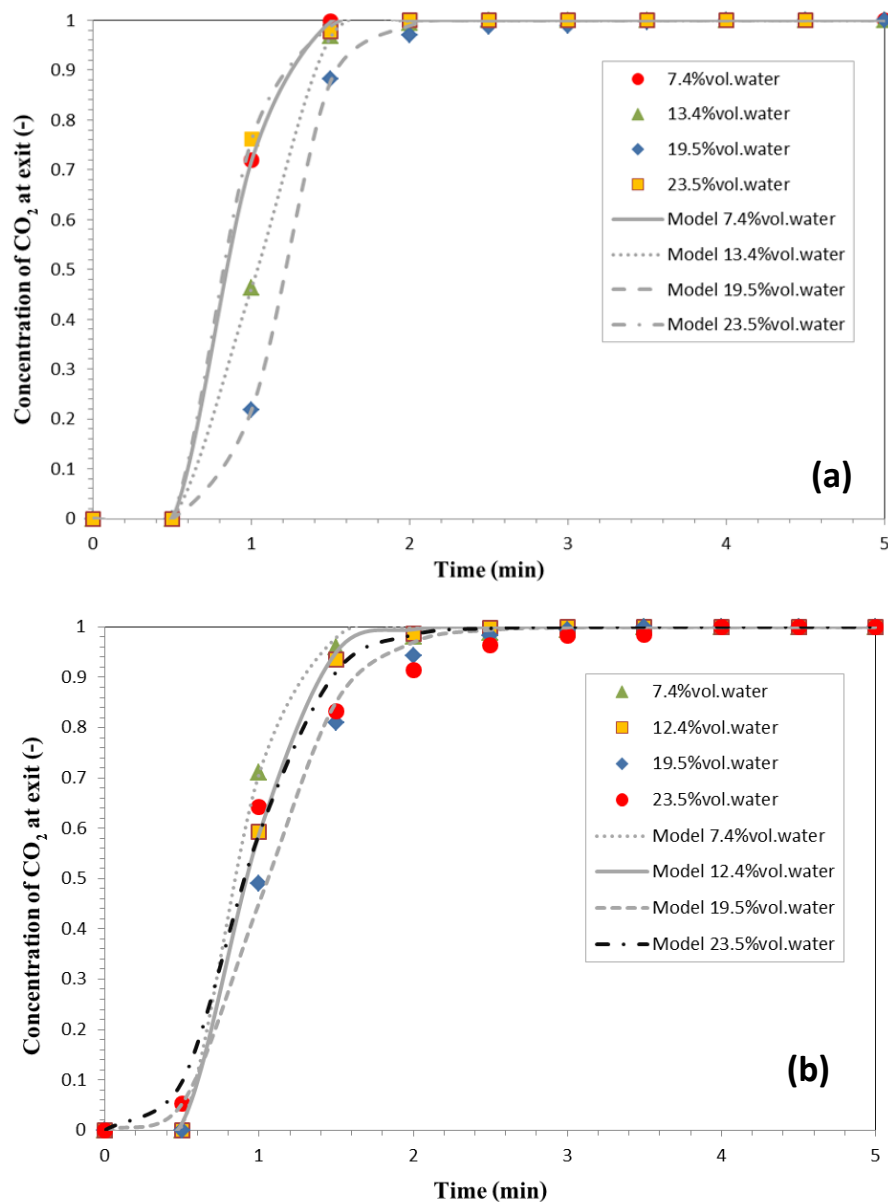
รูปที่ 4.17 การคำนวณของตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ในรูปแบบอาร์เรเนียสและค่าคงที่การดูดซับเริ่มต้นของตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3



รูปที่ 4.18 การคำนวณของตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ในรูปแบบอาร์เรเนียสของค่าคงที่ในการเชื่อมสภาพของตัวดูดซับของ (a) ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3 และ (b) ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3

4.6.3 ผลของปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้า

การอธิบายตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ (k_0 และ k_d) ด้วยการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลด้วยการใช้สมการ (2.34) ด้วยเทคนิคกำลังน้อยสุดแบบไม่เป็นเส้นตรง รูปที่ 4.19 แสดงภาพจากการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลผลจากการทดลองด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพสามารถทำนายพฤติกรรมของกราฟการดูดซับกับเวลาของผลของปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้าของ (a) ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและ (b) โซเดียมคาร์บอเนตในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบข้อมูลของทุกปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้าของ (a) ตัวดูดซับ K₂CO₃/Al₂O₃ และ (b) ตัวดูดซับ Na₂CO₃/Al₂O₃ ด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพ

ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์ของภาวะการเปลี่ยนแปลงปริมาณไอน้ำแสดงในตารางที่ 4.7 จากตารางค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (k_0) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำอธิบายจากหยดน้ำ (Water drop) จะลดพื้นที่ผิวของการดูดซับลงทำให้ปฏิกิริยาดูดซับลดลง [69, 70] เมื่อพิจารณาจากค่าอัตราการเสื่อมสภาพ (k_d) ที่มีค่าต่ำสุดที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร หมายถึงมีการเสื่อมสภาพต่ำของตัวดูดซับในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นผลของการศึกษาปริมาณไอน้ำขาเข้าที่ร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร เป็นภาวะที่เหมาะสมในการทดลองรูปแบบการไหลพลูโอไดเซชันแบบปั่นป่วนที่อุณหภูมิ 333 เคลวิน

ตารางที่ 4.7 ผลของปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้าต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้นและอัตราการเสื่อมสภาพ

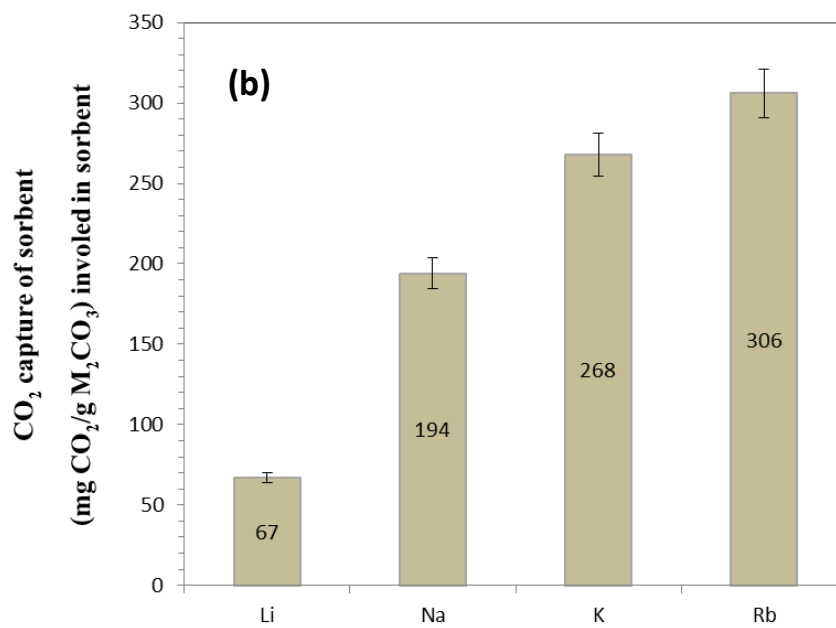
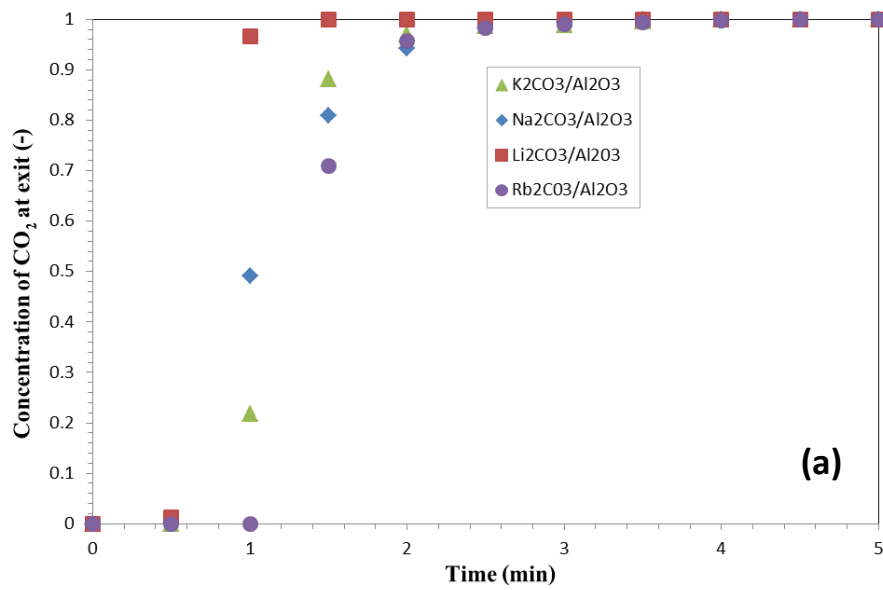
ปริมาณ น้ำ (vol %)	$y_{H_2O}/$ y_{CO_2} (-)	ตัวดูดซับ K_2CO_3/Al_2O_3			ตัวดูดซับ Na_2CO_3/Al_2O_3		
		k_0	k_d	R^2	k_0	k_d	R^2
		($m^3/kmol \cdot s$)	($m^3/kmol \cdot s$)		($m^3/kmol \cdot s$)	($m^3/kmol \cdot s$)	
7.4	0.60	3.366	0.1615	0.9990	1.7915	0.0930	0.9992
12.4	1.10	2.230	0.1045	0.9994	1.5304	0.0787	0.9998
19.5	1.60	1.8450	0.0829	0.9930	1.0934	0.0554	0.9991
23.5	1.95	1.4549	0.1046	0.9825	0.8866	0.0595	0.9989

4.7 ผลของชนิดตัวดูดซับคาร์บอนต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และตัวแปรทางจลนพลศาสตร์

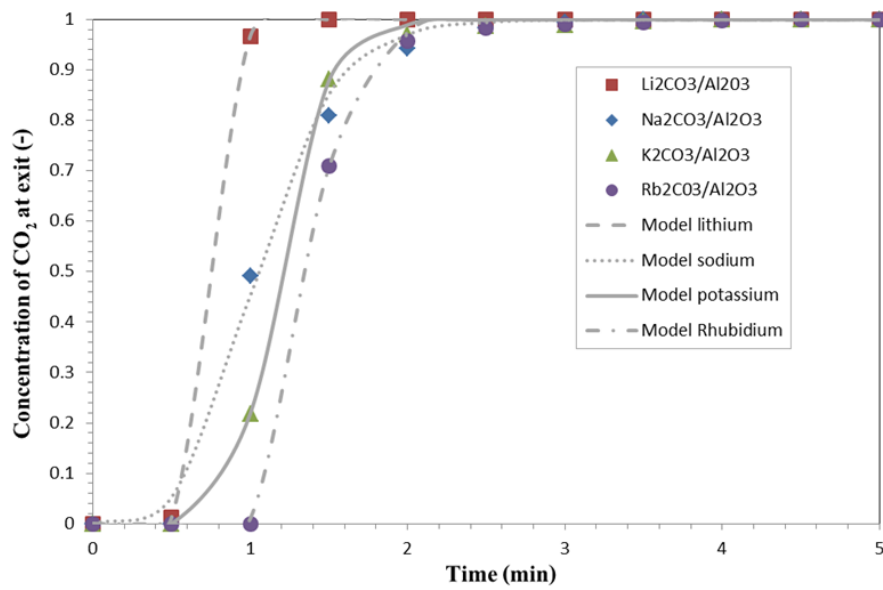
ในการคำนวณปริมาณการดูดซับและตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของชนิดตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนต คือ K_2CO_3/Al_2O_3 , Na_2CO_3/Al_2O_3 , Li_2CO_3/Al_2O_3 และ Rb_2CO_3/Al_2O_3 ที่รูปแบบการไหลแบบป้อนป้อนที่ความเร็ว 0.84 เมตรต่อวินาที ของแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร ปริมาณแก๊สไนโตรเจนสมดุล อุณหภูมิ 333 เคลวินและปริมาณตัวดูดซับ 40 กรัม ผลของชนิดตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตต่อปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการดักจับแสดงในรูปที่ 4.20 เวลาในการทำปฏิกิริยาดูดซับทั้งหมดมีค่าเรียงจาก $Li_2CO_3 < Na_2CO_3 < K_2CO_3 < Rb_2CO_3$ ซึ่งรูปีเดียมคาร์บอเนตมีเวลาในการดูดซับทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 1 นาที ภายใต้รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบป้อนป้อนเมื่อเทียบกับโลหะแอลคาไลตัวอื่น

ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโลหะแอลคาไลต่างชนิดมีค่าอยู่ในช่วง 67-306 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมโลหะแอลคาไลคาร์บอเนต รูปีเดียมคาร์บอเนตมีค่าการดักจับสูงสุดที่ 306 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมรูปีเดียมคาร์บอเนต อธิบายจากภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 4.1 พบว่าพื้นผิวที่มีส่วนประกอบที่ว่องไวเป็นผลึกก่อนกลมหรือเส้นใยจะให้ค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าพื้นที่ผิวที่ไม่ปรากฏส่วนประกอบที่ว่องไว เมื่อพิจารณาพื้นที่ผิวที่มีส่วนประกอบที่ว่องไวสำหรับรูปีเดียมคาร์บอเนตที่มีลักษณะผลึกก่อนกลมพื้นผิวสม่ำเสมอ [10] จึงมีค่ามากกว่าพื้นที่ผิวที่ไม่มีความสม่ำเสมอของโพแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนตและลิเทียมคาร์บอเนต

การอธิบายตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ (k_0 และ k_d) ด้วยการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลด้วยการใช้สมการที่ (2.34) ด้วยเทคนิคกำลังน้อยสุดแบบไม่เป็นเส้นตรง รูปที่ 4.21 แสดงภาพจากการเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูลผลจากการทดลองด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพแบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมของกราฟการดูดซับกับเวลาของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต รูปีเดียมคาร์บอเนตและลิเทียมคาร์บอเนตในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ Lang [86] ได้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันหรือร้อยละการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนต่อชั่วโมง พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นจาก $Li_2CO_3 < Na_2CO_3 < K_2CO_3 < Rb_2CO_3$ โดยคาร์บอเนตของรูปีเดียมมีค่าสูงสุด เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของขนาดอะตอมที่มีค่ามากขึ้นทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมยิ่งน้อยลงเป็นผลให้มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น จากตารางที่ 4.8 แสดงค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (k_0) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก $Li_2CO_3 < Na_2CO_3 < K_2CO_3 < Rb_2CO_3$



รูปที่ 4.20 (a) ผลของชนิดโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตต่อกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นของแก๊สกับเวลาและ (b) ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโลหะแอลคาไลที่ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตร ปริมาณน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร และอุณหภูมิในการดูดซับ 323 เคลวิน



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบข้อมูลของชนิดตัวดูดซับคาร์บอนเนตต่างๆ ด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพ

ตารางที่ 4.8 ผลของชนิดของดูดซับต่ออัตราการดูดซับเริ่มต้นและอัตราการเสื่อมสภาพ

ชนิดของโลหะ	k_0	k_d	R^2
แอลคาไล	³ (m /kmol.s)	³ (m /kmol.s)	
Li_2CO_3	0.8631	0.1756	0.9998
Na_2CO_3	1.0934	0.0554	0.9998
K_2CO_3	2.0128	0.0829	0.9930
Rb_2CO_3	2.4318	0.0878	0.9997

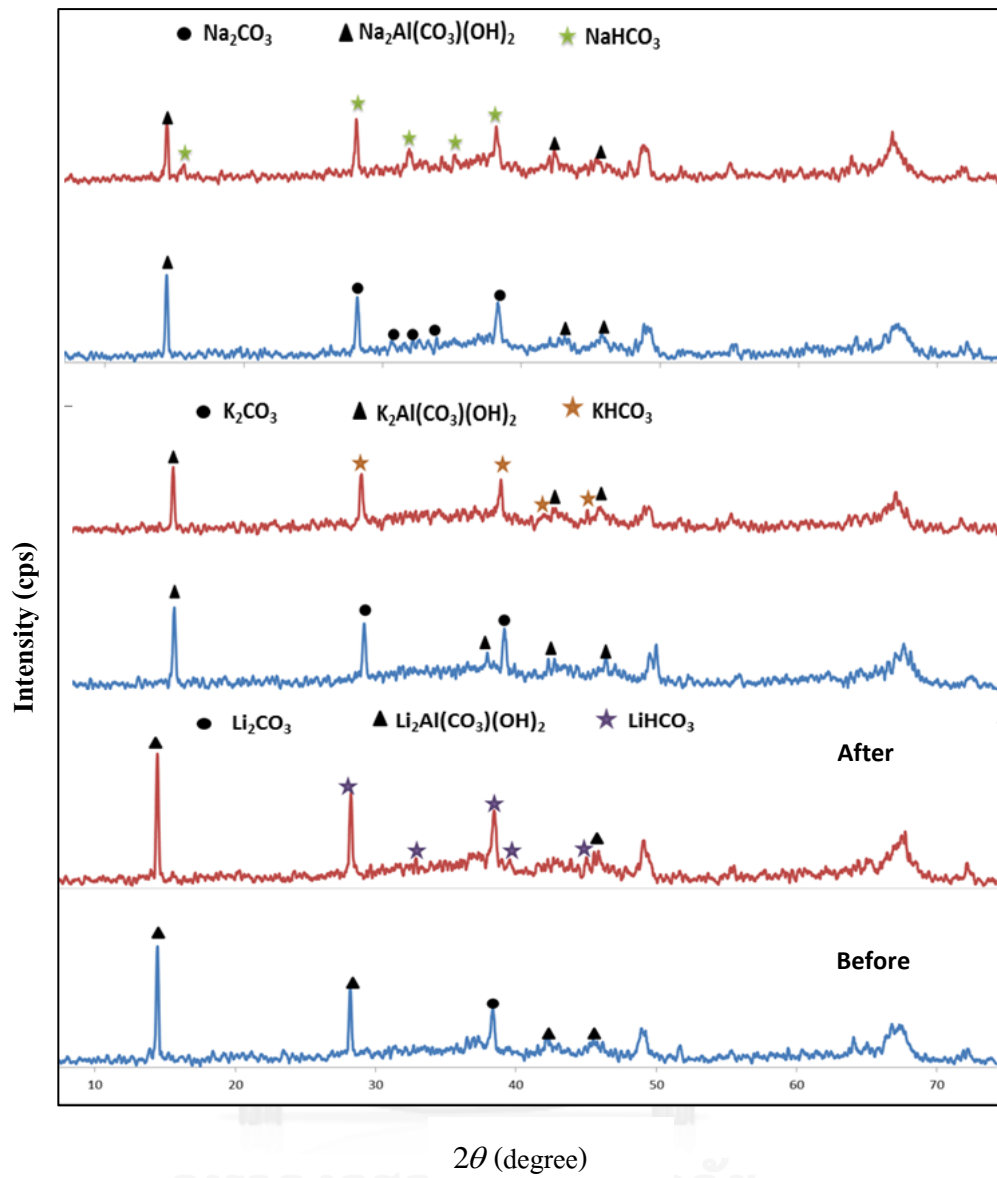
4.8 โครงสร้างของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตซับก่อนและหลังการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ในการสำรวจสมบัติของการดูดซับของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลตัวอย่างได้แก่ ลิเทียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต และโพแทสเซียมคาร์บอเนต การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างก่อนและหลังการดูดซับด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffractometer, XRD) จากรูปที่ 4.22 แสดงรูปแบบ XRD ของตัวดูดซับโลหะแอลคาไล พบว่า

ผลของ XRD ของตัวดูดซับลิเทียมคาร์บอเนตที่เผาที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน ภายใต้แก๊สไนโตรเจนก่อนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นมี 2 วัฏภาคคือ Li_2CO_3 และ $\text{Li}_2\text{Al}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ วัฏภาค $\text{Li}_2\text{Al}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของตัวรองรับอะลูมินากับลิเทียมคาร์บอเนตระหว่างการเผาที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน หลังจากดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตรและปริมาณไอน้ำขาเข้าร้อยละ 18.4 โดยปริมาตร ผลของ XRD แสดง 2 วัฏภาคคือ $\text{Li}_2\text{Al}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ และ LiHCO_3

ผลของ XRD ของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่เผาที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน ภายใต้แก๊สไนโตรเจนก่อนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นมี 2 วัฏภาคคือ Na_2CO_3 และ $\text{Na}_2\text{Al}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ วัฏภาค $\text{Na}_2\text{Al}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของตัวรองรับอะลูมินากับโซเดียมคาร์บอเนตระหว่างการเผาที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน หลังจากดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตรและปริมาณไอน้ำขาเข้าร้อยละ 18.4 โดยปริมาตร ผลของ XRD แสดง 2 วัฏภาคคือ $\text{Na}_2\text{Al}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ และ NaHCO_3

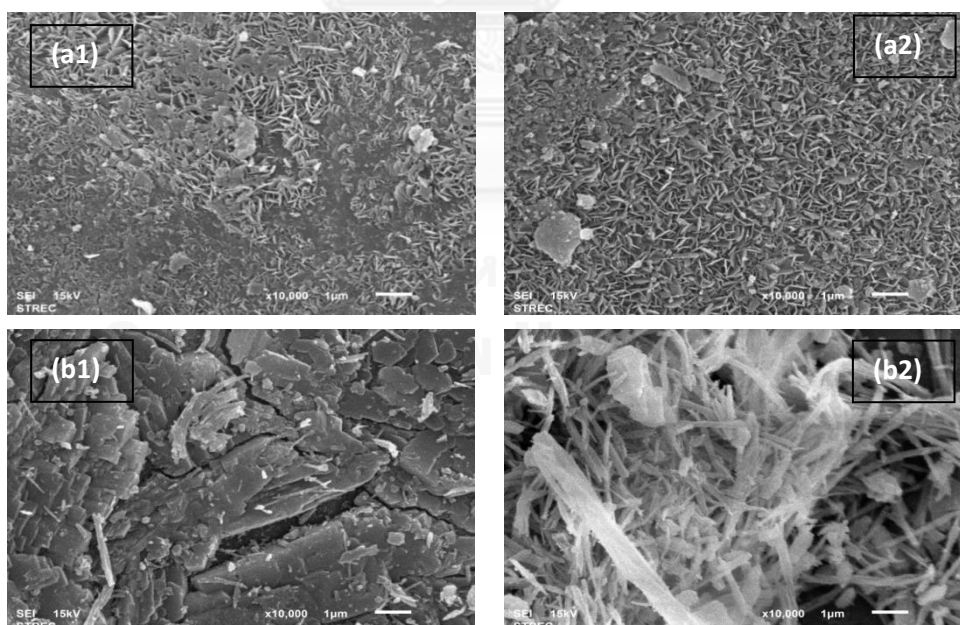
ผลของ XRD ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่เผาที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน ภายใต้แก๊สไนโตรเจนก่อนการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนชั้นมี 2 วัฏภาคคือ K_2CO_3 และ $\text{K}_2\text{Al}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ วัฏภาค $\text{K}_2\text{Al}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของตัวรองรับอะลูมินากับโพแทสเซียมคาร์บอเนตระหว่างการเผาที่อุณหภูมิ 573 เคลวิน หลังจากดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สผสมคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 12 โดยปริมาตรและปริมาณไอน้ำขาเข้าร้อยละ 18.4 โดยปริมาตร หลังจากดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผลของ XRD แสดง 2 วัฏภาคคือ $\text{K}_2\text{Al}(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ และ KHCO_3



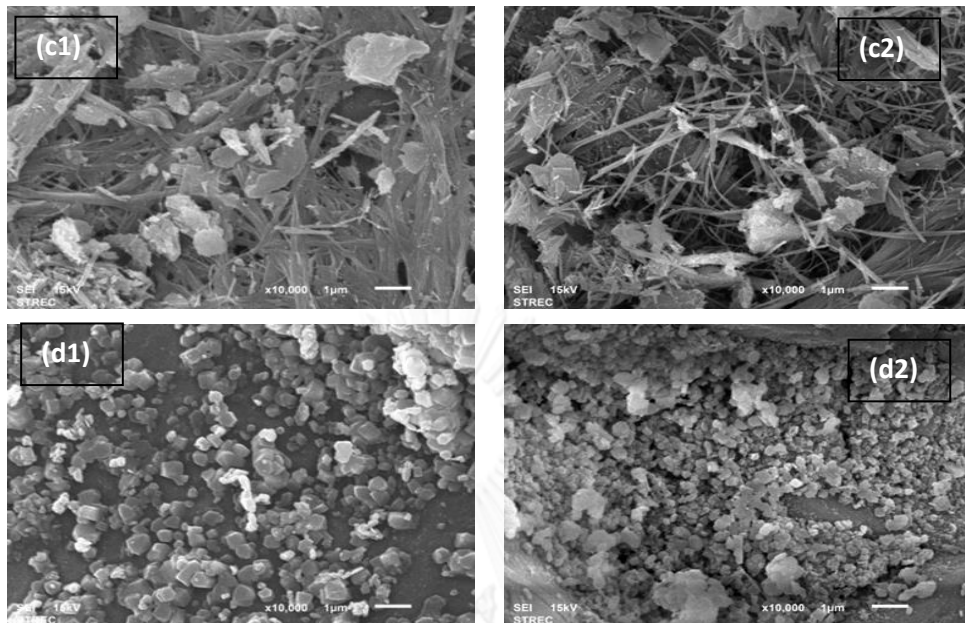
รูปที่ 4.22 XRD ของโลหะแอลคาเลตคาร์บอนก่อนและหลังปฏิกิริยาคาร์บอนชั้น

4.9 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนตก่อนและหลังการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

จากรูปที่ 4.23 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวของตัวดูดซับแข็ง (1) ก่อนการดูดซับและ (2) หลังการดูดซับที่กำลังขยาย 10000 เท่าของตัวดูดซับแข็ง (a) $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (c) $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ (d) $\text{Rb}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ซึ่งแต่ละชนิดมีองค์ประกอบที่ว่องไวแตกต่างกัน รูปแบบพื้นผิวหลังการดูดซับมีความแตกต่างจากพื้นผิวก่อนการดูดซับ จากรูปที่ (c) $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลทรรศน์ของส่วนประกอบที่ว่องไวด้วยลักษณะเส้นใยที่มีความหนาแน่นลดลงเพียงเล็กน้อยหลังจากการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อธิบายจากการเสียดสี (Attrition) ของตัวดูดซับที่แสดงให้เห็นว่าโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีค่าความต้านทานการเสียดสูง จากการศึกษาของ Chong และคณะพบว่าตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตมีค่าการเสียดสูงกว่าโพแทสเซียมประมาณ 5 เท่าที่อุณหภูมิเดียวกัน [87] ดังนั้นในรูป (b) $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางจุลทรรศน์ของโซเดียมคาร์บอเนตหลังการดูดซับที่รูปร่างสัณฐานที่เป็นผลึกเป็นชั้นเปลี่ยนเป็นเส้นใยเนื่องจากมีค่าการเสียดสูง รูปที่ 4.23 (d) $\text{Rb}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ลักษณะสัณฐานของตัวดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเฉลี่ยหลังจากการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากมีผลผลิตเกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการเสื่อมสภาพสามารถใช้วิเคราะห์กราฟการดูดซับที่ทางออกของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับเวลาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันเพราะการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นผิวซึ่งส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและความว่องไวการเกิดปฏิกิริยาของสารตั้งต้น



รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวของแข็งที่ (1) ก่อนการดูดซับและ (2) หลังการดูดซับกำลังขยาย 10000 เท่า ของ (a) $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (c) $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ (d) $\text{Rb}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$



รูปที่ 4.23 (ต่อ) ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวของแข็งที่ (1) ก่อนการดูดซับและ (2) หลังการดูดซับ กำลังขยาย 10000 เท่าของ (a) $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) $\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (c) $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ และ (d) $\text{Rb}_2\text{CO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 ลักษณะของรูปแบบการไหล

ในการศึกษานี้ ค่ากวัดแกว่งความดันที่ความเร็วแก๊สขาเข้าที่แตกต่างกันถูกใช้วัดพฤติกรรม การสัมผัสกันของแก๊ส-ของแข็งของแต่ละรูปแบบการไหล การวิเคราะห์ผลที่ได้สามารถแบ่งรูปแบบ การไหล/ช่วงการไหลฟลูอิดไอเซชันได้ 5 แบบ คือ

เบตนิ่งมีความเร็วน้อยกว่า 0.06 เมตรต่อวินาที

รูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบพองแก๊สและรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบสลักกิ่งที่ ช่วงความเร็ว 0.06-0.84 เมตรต่อวินาที

รูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบปั่นป่วนในช่วงความเร็ว 0.84-2.30 เมตรต่อวินาที

รูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบฟลูอิดไอเซชันความเร็วสูงที่ช่วงความเร็วมากกว่า 2.30 เมตร ต่อวินาที

5.1.2 ผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

5.1.2.1 ผลของรูปแบบการไหล

ผลของรูปแบบการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอเซชันต่อการดูดซับด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียม คาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนตสามารถคำนวณปริมาณการดักจับที่มีค่าสูงสุดขึ้นอยู่กับรูปแบบการ ไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ รูปแบบการไหลแบบเบตนิ่งและรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบสลักกิ่งมี ค่าปริมาณการดักจับต่ำ รูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบปั่นป่วนมีค่าสูงสุด รูปแบบการไหลแบบ ฟลูอิดไอเซชันแบบปั่นป่วนและรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบพองแก๊สมีปริมาณการยึดติดใกล้เคียง กันที่ 268 และ 250 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมโพแทสเซียมคาร์บอเนตและมีปริมาณการ ดักจับ 194 และ 190 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมโซเดียมคาร์บอเนต ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ปริมาณความเข้มข้นที่ทางออกรูปแบบเบตนิ่งให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงเนื่องจาก ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานแต่ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำสุด เนื่องจาก จากพฤติกรรมของการจัดเรียงตัวตัวดูดซับของแข็งในเบตนิ่งทำให้สูญเสียพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามา ในรูปแบบการไหลแบบพองแก๊ส สัดส่วนความเข้มข้นของแก๊สที่ ทางออกมีค่าสูงแต่น้อยกว่ารูปแบบเบตนิ่ง ซึ่งปริมาณการดูดซับมีค่ามากกว่าเบตนิ่ง แสดงว่ามี การสัมผัสของแก๊ส-ของแข็งที่สูงมากกว่ารูปแบบเบตนิ่ง สำหรับรูปแบบการไหลแบบฟลูอิดไอเซชันสลักกิ่ง และรูปแบบการไหลแบบฟลูอิดไอเซชันความเร็วสูง ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตและ โซเดียมคาร์บอเนตสามารถกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดในเวลาไม่ถึง 1 นาที หมายความว่า เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จะเห็นว่าปริมาณการ

ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบสลักกึ่งและฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูงมีค่าต่ำใกล้เคียงกับแบบเบตนิ่ง เนื่องจากการเกิดฟองแก๊สขนาดใหญ่ในรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบสลักกึ่งทำให้พื้นที่การสัมผัสกันของแก๊สและของแข็งน้อยลงและสำหรับรูปแบบความเร็วสูงที่มีปริมาณพื้นที่ในการสัมผัสกันของแก๊สและของแข็งสูงแต่เนื่องจากการมีการกระจายตัวของเบตของแข็งทำให้ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำ ในงานวิจัยนี้รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนมีปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเนื่องจากกระบวนการผสมย้อนกลับ (Back mixing) สูง

5.1.2.2 ผลอุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิในท่อไรเซอร์ต่อความเข้มข้นของแก๊สที่ทางออกของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต จะพบแนวโน้มของความเข้มข้นแก๊สที่ขาออก 2 แบบในช่วงอุณหภูมิ 323-333 เคลวิน ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอุณหภูมิ ขณะที่ช่วงอุณหภูมิ 333-353 เคลวิน ปริมาณการดูดซับลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จากทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ปฏิกิริยาในกระบวนการจะมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงเมื่ออุณหภูมิต่ำเพราะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน แต่ที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน มีปริมาณการดูดซับต่ำอธิบายจากการควบแน่นของไอน้ำที่อุณหภูมินี้ โดยมีปริมาณการดูดซับสูงที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 333 เคลวิน

5.1.2.3 ผลปริมาณไอน้ำป้อนเข้า

แสดงผลของปริมาณไอน้ำต่อความเข้มข้นของแก๊สที่ทางออกของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต แบ่งแนวโน้มออกเป็น 2 แนวโน้ม ช่วงของปริมาณไอน้ำร้อยละ 7.4-19.5 โดยปริมาตร ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำขณะที่ช่วงของปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5-23.5 โดยปริมาตร หรือ 0.60 -1.95 โดยโมล ปริมาณการดูดซับลดลงเมื่อปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้นของไอน้ำเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 23.5 โดยปริมาตร ปริมาณการดูดซับแก๊สลดลงอธิบายจาก ปริมาณไอน้ำในแก๊สขาเข้าจำนวนมากในระบบ ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตรมีปริมาณการดูดซับสูงสุด

5.1.3 ผลต่อตัวแปรทางจลนพลศาสตร์

ในการศึกษาการเปรียบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลการทดลอง 3 แบบ คือแบบจำลองแกนกลางหุดตัว แบบจำลองแบบเป็นเนื้อเดียวกัน และแบบจำลองการเสื่อมสภาพ พบว่าแบบจำลองการเสื่อมสภาพที่ให้ผลใกล้เคียงกับข้อมูลที่มีค่า R-square = 0.997

5.1.3.1 ผลของรูปแบบการไหล

รูปแบบการไหลแบบปั่นป่วนมีค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์สูงสุด เนื่องจากมีความเร็วที่เหมาะสม ทำให้การสัมผัสกันของแก๊ส-ของแข็งมีการสัมผัสกันทั่วถึง ซึ่งรูปแบบเบตนิ่งมีค่าจลนพลศาสตร์ต่ำกว่า อธิบายจากอัตราเร็วของแก๊สที่เข้ามาสัมผัสพื้นที่ผิวของแข็งมีค่าต่ำทำให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ในการสัมผัสกัน สำหรับรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเดเชชันแบบพองแก๊สถึงจะมีการเคลื่อนที่ของเบตแต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่าการสัมผัสกันของรูปแบบฟลูอิดไอเดเชชันแบบปั่นป่วน เนื่องจากเกิดการรวมตัวของพองแก๊สขนาดเล็กในรูปแบบการไหลแบบสลักกิ่งทำให้การสัมผัสกันของแก๊ส-ของแข็งลดลงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง รูปแบบการไหลแบบความเร็วสูงเป็นรูปแบบการไหลที่มีการสัมผัสกันของแก๊ส-ของแข็งสูงแต่เนื่องจากการกระจายตัวสูงของเบตทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลด

5.1.3.2 ผลอุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ของอาร์เรเนียสของตัวแปรจลนพลศาสตร์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นหรือ k_0 ของตัวดูดซับโลหะคาร์บอน

$$\text{โพแทสเซียมคาร์บอนเนต : } k_0 = 142.9 \exp\left(-\frac{12.31}{RT}\right)$$

$$\text{โซเดียมคาร์บอนเนต : } k_0 = 246.7 \exp\left(-\frac{14.67}{RT}\right)$$

และตัวแปรจลนพลศาสตร์ของอัตราการเสื่อมสภาพหรือ k_d ของตัวดูดซับโลหะคาร์บอน

$$\text{โพแทสเซียมคาร์บอนเนต : } k_d = 763.5 \exp\left(-\frac{25.12}{RT}\right)$$

$$\text{โซเดียมคาร์บอนเนต : } k_d = 1028.44 \exp\left(-\frac{26.87}{RT}\right)$$

5.1.3.3 ผลปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้า

ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น (k_0) มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำอธิบายจากการเกิดหยดน้ำ (Water drop) ที่ลดพื้นที่ในการทำปฏิกิริยาของตัวดูดซับของแข็ง ส่วนค่าอัตราการเสื่อมสภาพ (k_d) มีค่าต่ำสุดที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 19.5 โดยปริมาตร เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาดูดซับ จากการทดลองผลของปริมาณไอน้ำที่ป้อนเข้าที่ร้อยละ 19.5 โดยปริมาตรเป็นภาวะที่เหมาะสมในการทดลองรูปแบบการไหลฟลูอิดไอเดเชชันแบบปั่นป่วนที่อุณหภูมิ 333 เคลวิน

5.1.4 เปรียบเทียบชนิดของตัวดูดซับโลหะแอลคาไลคาร์บอเนต

ปริมาณการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของโลหะแอลคาไลต่างชนิด ให้ค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดที่ 306 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อกรัมรูปีเดียมคาร์บอเนต เนื่องจากลักษณะพื้นผิวที่มีส่วนประกอบที่ว่องไวเป็นผลึกก้อนกลมสม่ำเสมอจำนวนมากที่มีค่ามากกว่าพื้นผิวที่ไม่มีมีความสม่ำเสมอของลิเทียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมคาร์บอเนตและโซเดียมคาร์บอเนต

ผลตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ (k_0 และ k_d) พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นจาก $\text{Li}_2\text{CO}_3 < \text{Na}_2\text{CO}_3 < \text{K}_2\text{CO}_3 < \text{Rb}_2\text{CO}_3$ เนื่องจากขนาดอะตอมของธาตุที่เพิ่มขึ้น โดยคาร์บอเนตของรูปีเดียมมีค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์สูงสุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง พบว่า การทดลองแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนยังไม่สมบูรณ์เนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของระบบที่ใช้ศึกษาในปัจจุบัน เพื่อให้ได้ผลของรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูงที่มีความแม่นยำมากขึ้นควรจะมีการต่อเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนให้มีการไหลอย่างต่อเนื่องสมบูรณ์

รายการอ้างอิง

1. Siriwardane, R.V., Shen, M.S. Fisher, E.P. and Poston, J. A., *Adsorption of CO₂ on Molecular sieves and activated carbon*. Energy & Fuels, 2001. 15: p. 279–284.
2. Mavroudi, M., Kaldis and S.P., Sakellaropoulos, G.P., *Reduction of CO₂ emissions by a membrane contacting process*. Energy & Fuels, 2003. 15: p. 2153–2159.
3. Lee, S.C., Choi, B.Y., Lee, T.J., Ryu, C.K., Ahn, Y.S. and Kim, J.C., *CO₂ absorption and regeneration of alkali metal-based solid sorbents*. Catalysis Today, 2006. 111: p. 385–390.
4. Liang, Y., Harrison, D.P., Gupta, R.P., Green, D.A. and McMichael, W.J. , *Carbon dioxide capture using dry sodium-based sorbents*. Energy & Fuels, 2004. 18: p. 569–575.
5. Park, S.-W., Sung, D.-H., Choi, S.-B., Lee, J.-W. and Kumazawa, H., *Carbonation kinetics of potassium carbonate by carbon dioxide*. International Journal of Chemical Engineering, 2006. 12(4): p. 522–530.
6. Lu, D.Y., Huhg, R.W. and Anthony, E.J., *Ca-base sorbent looping combustion for CO₂ capture in pilot-scale dual fluidized bed*. Fuel Processing Technology, 2008. 89: p. 1386-1395.
7. Jaibon, O., Chalermssinsuwan, B., Lursuang and M., Piumsomboon, P. , *Effect of flow patterns/regimes on CO₂ capture using K₂CO₃ solid sorbent in fluidized bed/circulating fluidized bed*. Journal of Chemical Engineering, 2013. 219: p. 262–272.
8. Javad, E.a.M.R.E., *Preparation of the new low-cost K₂CO₃/Al₂O₃ sorbent for CO₂ capture at flue gas operating conditions*. Journal of American Science, 2013. 9(6): p. 58–62.
9. Park, S.-W., Sung, D.-H., Choi, B.-S., Lee, J.-W. and Kumazawa, H, *Sorption of carbon dioxide onto sodium carbonate*. Separation Science and Technology, 2007. 41: p. 2221–2223.
10. Hwang, K.-S., Park, S.-W. , Park D.-W., Oh, K.-Jo. and Kim, S.-S. , *Sorption kinetics of carbon dioxide onto rubidium carbonate*. Korean Journal of Chemical Engineering, 2009. 26(5): p. 1383–1388.

11. Kuuskraa, V., *Review and Evaluation of the CO₂ capture project by the technology advisory board*. Carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations, 2005: p. 37-46.
12. Metz, B., Davidso, O., Coninck H.C., Loos, M. and Meyer, L. , *Working group III of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge United Kingdom and New York, 2005.
13. Eimer, D., *Post-combustion CO₂ separation technology summary*. Carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations, 2005. 1: p. 91-97.
14. Miracca, I., Aasen K.I., Brownscome, T., Gerdes, K., and Simmonds, M., *Oxy fuel combustion for CO₂ capture technology summary* Carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations, 2005. 1: p. 441-449.
15. Strazisar, B., Brian, R., Anderson, R.R., and White, C.M., *Degradation of monoethanolamine used in carbon dioxide capture from flue gas of a coal-fired Electric Power Generating Station*. In Proceeding of First National Conference on Carbon Sequestration, Washington, 2001.
16. Ishibashi, M., Otake, K., Kanamori, S., and Yasutake., *A study on CO₂ removal technology from flue gas of thermal power plant by physical adsorption method*. Greenhouse Gas Control Technologies, 1999: p. 96-100.
17. Yokoyama, T., . *Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, 2003: p. 13-18.
18. Shiumizu, T., HIRAMA, T., Hosoda, H., Inagaki, K.M., and Tejima, K., *A Twin Fluidized-bed reactor for removal of CO₂ from Combustion Processes (Part A)*. Transaction TChemE Journal, 1999. 77: p. 62-68.
19. Jose, D.F., Timothy, F., Sean, P., Howard, M., and Rameshwar, D.S. , *Advances in CO₂ capture technology-The U.S. department of energy's carbon sequestration program*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008. 2: p. 9-20.
20. Visser, T., Wessling, M.,, *When do sorption-induced relaxations in glassy polymers set in ?* Macromolecules, 2007. 40: p. 4992.
21. Obriot, J., Ge, J., Bose, T.K. and St-Arnaud, J.M., *Determination of the density from simultaneous measurements of the refractive index and the dielectric constant of gaseous CH₄, SF₆, and CO₂*. Fluid Phase Equilibria, 1993. 86: p. 314.
22. Kapantaidakis, G.C.a.K., G.H., *High flux polyethersulfonepolyimide blend hollow fiber membranes for gas separation*. Journal of Membrane Science, 2002. 204: p. 153.

23. Hirayama, Y., Yoshinaga, T., Kusuki, Y., Ninomiya, K., Sakakibara, T., and Tamari, T., *Relation of gas permeability with structure of aromatic polyimides*. Journal of Membrane Science, 1996. 111: p. 169.
24. Zaidi, S.M.J., Mikhailenko, S.D., Robertson, G.P., Guiver, M.D. and Kaliaguine, S., *Proton conducting composite membranes from polyether ether ketone and heteropolyacids for fuel cell applications*. Journal of Membrane Science, 2000. 173: p. 17.
25. Chung, T.S., Chan, S.S., Wang, R., Lu, Z. and He, C., *Characterization of permeability and sorption in Matricide/C60 mixed matrix membranes*. Journal of Membrane Science, 2003. 211: p. 91.
26. Simons, K., PhD Thesis, *Membrane technologies for CO₂ capture*. University of Twente, The Netherlands, 2010: p. 1-195.
27. Ushotsearches, *Cryogenic CO₂ capture to control climate change emission*. [Online]. 2000. Available from : <http://sustainabees.com>, [2012 May 15].
28. Duan, Y.H., Zhang, B., Sorescu, D.C. and Johnson, J.K., *CO₂ capture properties of M-CO-H (M =Li, Na, K) systems: a combined density functional theory and lattice phonon dynamics study*. Journal of Solid State Chemistry, 2011. 184(2): p. 304-311.
29. Hoffman, J.S.a.P., H.W., *Study of regenerable sorbents for CO₂ capture*. Journal of Energy and Environmental Research, 2001. 1(1): p. 90-100.
30. Liang, Y., Harrison, D.P., Gupta, R.P., Green, D.A. and McMichael, W.J., *Carbon dioxide capture from flue gas using regenerable sodium based sorbents*. A Thesis, Louisiana State, Louisiana State University, 2003.
31. Liang, Y., Harrison, D.P., Gupta, R.P., Green, D.A., and McMichael, W.J., *Carbon dioxide capture using dry sodium-based sorbents*. Energy & Fuels, 2004. 18(2): p. 569-575.
32. Green, D.A., Turk, B.S., Gupta, R.P. and Lopez-Ortiz, A. , *Carbon dioxide capture from flue gas using dry regenerable sorbents*. Quarterly Technical Progress Report, Research Triangle Institute, January, 2001.
33. Green, D.A., Turk, B.S., Gupta, R.P., Harrison D.P. and Liang, Y., *Carbon dioxide capture from flue gas using dry regenerable sorbents*. Quarterly Technical Progress Report, Research Triangle Institute, October, 2001.
34. Green, D.A., Turk, B.S., Gupta, R.P., McMichael, W.J., Harrison, D.P. and Liang, Y., *Carbon dioxide capture from flue gas using dry regenerable sorbents*. Quarterly technical progress report, Research Triangle Institute, January, 2002.

35. Green, D.A., Turk, B.S., Portzer, J.W., Gupta, R.P., McMichael, W.J., Liang, and Y., et al. , *Carbon dioxide capture from flue gas using dry regenerable sorbents*. Quarterly Technical Progress Report, Research Triangle Institute, August, 2003.
36. Green, D.A., Turk, B.S., Gupta, R.P., Lopez-Ortiz, A., Harrison, D.P. and Liang, Y. , *Carbon dioxide capture from flue gas using dry regenerable sorbents*. Quarterly Technical Progress Report, Research Triangle Institute, July, 2001.
37. Nelson, T.O., Green, D.A., Box, P., Gupta, R.P., Henningsen, G. and Turk, B.S. , *Carbon dioxide capture from flue gas using dry regenerable sorbents*. Final Report (2004.10-2007.6), Research Triangle Institute, January, 2009.
38. Green, D.A., Turk, B.S., Gupta, R.P., McMichael, W.J., Harrison, D.P. and Liang, Y., *Carbon dioxide capture from flue gas using dry regenerable sorbents*. Quarterly Technical Progress Report, Research Triangle Institute, January, 2003.
39. Green, D.A., Turk, B.S., Portzer, J.W., Gupta, R.P., McMichael, W.J. and Liang, Y., et al. , *Carbon dioxide capture from flue gas using dry regenerable sorbents*. Quarterly Technical Progress Report, Triangle Institute, July, 2002.
40. Seo, Y.W., Jo, S.H., Ryu, C.K. and Yi, C.K. , *Effects of water vapor pretreatment time and reaction temperature on CO₂ capture characteristics of a sodium-based solid sorbent in a bubbling fluidized-bed reactor*. Chemosphere, 2007. 69(5): p. 712-718.
41. Park, Y.C., Jo, S.H., Park, K.W., Park, Y.S. and Yi, C.K. , *Effect of bed height on the carbon dioxide capture by carbonation/regeneration cyclic operations using dry potassium-based sorbents*. Korean Journal of Chemical Engineering, 2009. 26(3): p. 874-878.
42. Seo, Y.W., Jo, S.H., Ryu, C.K and Yi, C.K. , *Effect of reaction temperature on CO₂ capture using potassium-based solid sorbent in bubbling fluidized-bed reactor*. Journal of Environmental Engineering ASCE, 2009. 135(6): p. 473-477.
43. Yi, C.K., Jo, S.H. and Seo, Y.W., *The effect of voidage on the CO₂ sorption capacity of K based sorbent in a dual circulating fluidized bed process*. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2008. 41(7): p. 691-694.
44. Yi, C.K., Jo, S.H., Ryu, H.J., Yoo, Y.W., Lee, J.B. and Ryu, C.K., *CO₂ reaction characteristics of dry sorbents in fluidized reactors*. Greenhouse Gas Control Technologies, 2005: p. 1765-1769.
45. Yi, C.K., Jo, S.H., Seo, Y.W., Park, S.D., Moon, K.H., Yoo and J.S., et al. , *CO₂ capture characteristics of dry sorbents in a fast fluidized reactor*. Studies in Surface Science and Catalysis, 2006: p. 501-504.

46. Yi, C.K., Jo, S.H., Seo, Y.W., Lee, J.B. and Ryu, C.K. , *Continuous operation of the potassium based dry sorbent CO₂ capture process with two fluidized-bed reactors*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007. 1(1): p. 31-36.
47. Hayashi, H., Taniuchi, J., Furuyashiki, N., Sugiyama, S., Hirano, S. and Shigemoto N, et al., *Efficient recovery of carbon dioxide from flue gases of coal-fired power plants by cyclic fixed-bed operations over K₂CO₃-on-carbon*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1998. 37(1): p. 185-191.
48. Chen, X.P., Wu, Y., Dong, W. and Zhao, C.W., *CO₂ capture characteristics of K₂CO₃/Al₂O₃ with continuous solid circulation mode*. 21st international on fluidized bed combustion conference, Naples, Italy, June, 2012: p. 3-6.
49. *Fluidized bed term*. Fluidized bed [Online]. 2003 Available from: <http://fluidizedbed2008.webs.com>, [2012 May 15].
50. Radic, D., Jovoic, A., Povlovic, M. and Karamarkovic, V. , *The Influence of variable operation condition on the design and exploitation of fly ash pneumatic transport systems in the thermal power plants Brazilian*. Journal of chemical engineering, 2008. 25: p. 123-135.
51. Sau, D.C., Mohanty, S. and Biswal, K.C. , *Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas-solid tapered fluidized beds*. Chemical Engineering Journal, 2007. 132: p. 151-157.
52. Daleffe, R.V., and Freire, J.T. , *Analysis of the fluid-dynamic behavior of fluidized and vibrofluidized bed containing glycerol*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2004. 21: p. 35-46.
53. Grace, J.R.a.B., H., *Circulating fluidized beds New York*. Blackie Academic and Professional, 1997.
54. Parise, M.R., Tranto, O.P., Kurka, p.R.G., and Benetti, L.B. , *Detection of the minimum gas velocity region using spectral pressure distribution in a gas-solid fluidized bed*. Powder Technology, 2008. 182: p. 453-458.
55. Allan, H., and Nimalan, G. , *Cryogenic CO₂ Capture in natural gas*. Energy Procedia, 2009. 1: p. 697-706.
56. Kunii, D., and Levenspiel, O. , *Fluidization engineering*. United State, Edition. Butterworth-Heinemann E.U.A., 1991.
57. Geldart, D., *Gas fluidization Technology*. New York, John Willey & Sons Inc, 1986.

58. Constantine, J.P., Grace, J.R., Lim, C.J., and Richard, G.G., *Generalized bubbling-slugging fluidized bed reactor model*. Chemical Engineering Science, 2007. 63: p. 70-81.
59. Stewart P.S.B., a.D., J.F., *Slug flow in fluidized bed* Powder Technology, 1967. 1: p. 61-70.
60. Yang, R.T., Shen, M.-S. and Steinberg, M. , *Fluidized-bed combustion of coal with lime additives : Catalytic Saltation of lime with iron compounds and coal ash*. Environmental Science & Technology, 1978. 12: p. 915-918.
61. Bi, H.T., Ellis, N., Abba, I.A., and Grace, J.R., *A state-of-the-art review of gas-solid turbulent fluidization*. Chemical Engineering Science, 2000. 55: p. 4789-4825.
62. Yershalmi, J.a.C., N.T., *Further student of the regimes of fluidization*. Powder Technology, 1979. 24: p. 187-205.
63. Jiradilok, V., Gidaspow, D., Damronglerd, S., Koves, J.W. and Mostofi, R. , *Kinetic theory based CFD simulation of turbulent fluidization of FCC particle in riser*. Chemical Engineering Science, 2006. 61: p. 5544-5559.
64. Yang, W.C., *Mechanistic model for transitions between regimes of fluidization*. American Institution Chemical Engineering Journal, 1984. 30: p. 1025-1027.
65. Jin, Y., Yu, Z.O., Wang, Z.W. and Cai, P.A. , *Criterion for transition from bubbling to turbulent fluidization*. Fluidization volume, New York, Engineering Foundation, 1996.
66. Lee, G.S.a.K., S.D., *Pressure fluctuation in turbulent fluidized beds*. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1988. 21: p. 515-521.
67. Leu, L.-P., huang, J.-W. and Gua, B.-B. , *Axial Pressure Distribution in turbulent fluidized beds*. In Proceeding of the Second Asian Conference on Fluidized-bed and Three-phase Reactor, 1990.
68. Horio, M., *Circulating fluidized bed technology III*. Oxford, Pergamon, 1991.
69. Li, J.a.K., M. , *Fluidization*. New York : Plenum Press, 1980.
70. Takeuchi, H., and HIRAMA, T., *A Quantitative definition and flow regime diagram for fast fluidization*. Powder Technology, 1986. 47: p. 195-199.
71. Schnitzlein, M.G., and Weinstein, H., *Flow Characterization in high velocity fluidized beds using pressure fluctuations*. Chemical Engineering Science, 1998. 43: p. 2605-2614.
72. Namkung, W.K., W.S., and Kim, D.S., *Flow regimes and axial pressure profiles in a circulating fluidized bed*. Chemical Engineering Journal, 1999. 72: p. 245-252.

73. Lee, G.S.a.K., S.D. , *Bed expansion characteristics and transition velocity in turbulent fluidized beds*. Powder Technology, 1990. 62: p. 201-215.
74. Perales, J.F., Coll, T., Llop, M.F., Puigjaner, L., Arnaldos, J., and Casal, J. , *Circulating fluidized bed technology III*. Oxford : Pergamon Press, 1991.
75. Bi, H.T.a.f., U.S., *Existence of turbulent regime in gas-solid fluidization*. American Institution Chemical Engineering Journal, 1992. 38: p. 297-301.
76. Adanez, J., de Diego, L.F. and Gayan, P. , *Transport velocities of coal and sand particles*. Powder Technology, 1993. 77: p. 61-63.
77. Tsukada, m., Nakanishi, D. and Horio, M. , *The effect of pressure on the phase transition from bubbling to turbulent fluidization*. International Journal of Multiphase Flow, 1993. 19: p. 27-34.
78. Chehbouni, A., Chaouki, j., Guy, C. and Klvana, D., *Effect de different parametress sur les vitesses du transition de la fluidization en regime turbulent*. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1995. 73: p. 41-50.
79. Geldart, D., *Types of Gas Fluidization*. Powder Technology, 1973. 7: p. 285-292.
80. Geldart, D., *Homogenous Fluidization in Fine Powder Using Various Gases and Pressures*. Powder Technology, 1978. 19: p. 133-136.
81. Türkan, K.a.S., K. , *Deactivation models for sulfur dioxide adsorption on silica gel*. Korean Journal of Chemical Engineering, 2004. 8: p. 417-424.
82. Suyadal, Y., Erol, M. and Oguz, H. , *Deactivation model for the adsorption of trichloroethylene vapor on an activated carbon bed*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2000. 39: p. 724-730.
83. Scott, V.D.a.L., G., *Quantitative Electron Probe Microanalysis*. 2nd edn. Ellis Horwood, Chichester, 1994.
84. Zhao, C., Chen, X. , Wu, Ye. and Dong, W., *K₂CO₃/Al₂O₃ for Capturing CO₂ in Flue Gas from Power Plants. Part 3:*

CO₂ Capture Behaviors of K₂CO₃/Al₂O₃ in a Bubbling Fluidized-Bed

Reactor. Energy & Fuels, 2012. 26: p. 3062-3068.

85. Dong, W., Wu, Y. , Zhao, C., and Liu C. L., *Carbonation Characteristics of Dry Sodium-Based Sorbents for CO₂*

Capture. Energy & Fuels, 2012. 26: p. 6040-6046.

86. Lang, J., *Anion effects in alkali-catalysed steam gasification*. Fuel 1986. 65(10): p. 1324-1329.

87. Chuanwen, Z., Xiaoping, C. and Changsui Z., *Multiple-Cycles Behavior of K_2CO_3/Al_2O_3 for CO_2 Capture in a Fluidized-Bed Reactor*. Energy & Fuels, 2009. 11.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ ก-1 เงื่อนไขสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลเบดนิ่งของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.02	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลเบดนิ่งของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
0.5	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
1	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
1.5	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
2	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
2.5	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
3	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
3.5	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
4	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
4.5	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
5	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
5.5	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
6	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
6.5	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
7	0.00	0.000	1.000	0.218	0.351
7.5	0.60	0.049	0.951	0.207	0.334
8	2.13	0.175	0.825	0.180	0.289
8.5	3.10	0.255	0.745	0.162	0.261
9	3.66	0.301	0.699	0.152	0.245
9.5	5.11	0.421	0.579	0.126	0.203

10	6.31	0.520	0.480	0.104	0.168
10.5	6.80	0.560	0.440	0.096	0.154
11	7.60	0.626	0.374	0.081	0.131
11.5	7.96	0.656	0.344	0.075	0.121
12	8.63	0.711	0.289	0.063	0.101
12.5	9.18	0.757	0.243	0.053	0.085
13	9.64	0.795	0.205	0.045	0.072
13.5	10.03	0.826	0.174	0.038	0.061
14	10.27	0.846	0.154	0.033	0.054
14.5	10.38	0.855	0.145	0.032	0.051
15	10.62	0.875	0.125	0.027	0.044
15.5	10.78	0.889	0.111	0.024	0.039
16	10.98	0.905	0.095	0.021	0.033
16.5	11.12	0.916	0.084	0.018	0.029
17	11.36	0.937	0.063	0.014	0.022
17.5	11.39	0.939	0.061	0.013	0.021
18	11.56	0.952	0.048	0.010	0.017
18.5	11.74	0.967	0.033	0.007	0.012
19	11.82	0.974	0.026	0.006	0.009
19.5	11.91	0.981	0.019	0.004	0.007
20	11.88	0.979	0.021	0.005	0.007
25	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
30	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
35	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
40	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-3 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊สของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.32	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊สของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	0.544	0.877
0.5	0.00	0.000	1.000	0.544	0.877
1	0.00	0.000	1.000	0.544	0.877
1.5	0.00	0.000	1.000	0.544	0.877
2	0.00	0.000	1.000	0.544	0.877
2.5	0.00	0.000	1.000	0.544	0.877
3	0.00	0.000	1.000	0.544	0.877
3.5	0.59	0.049	0.951	0.518	0.834
4	2.12	0.175	0.825	0.449	0.723
4.5	2.12	0.175	0.825	0.449	0.723
5	3.65	0.301	0.699	0.380	0.613
5.5	5.10	0.421	0.579	0.315	0.508
6	6.30	0.520	0.480	0.261	0.421
6.5	6.30	0.520	0.480	0.261	0.421
7	7.10	0.586	0.414	0.225	0.363
7.5	7.94	0.656	0.344	0.187	0.302
8	8.61	0.711	0.289	0.157	0.253
8.5	9.16	0.757	0.243	0.132	0.213
9	9.62	0.795	0.205	0.112	0.180
9.5	10.00	0.826	0.174	0.095	0.152
10	10.00	0.826	0.174	0.095	0.152
10.5	10.35	0.855	0.145	0.079	0.127
11	10.59	0.875	0.125	0.068	0.110

11.5	10.75	0.889	0.111	0.061	0.098
12	10.95	0.905	0.095	0.052	0.083
12.5	11.09	0.916	0.084	0.046	0.074
13	11.33	0.937	0.063	0.035	0.056
13.5	11.36	0.939	0.061	0.033	0.054
14	11.52	0.952	0.048	0.026	0.042
14.5	11.70	0.967	0.033	0.018	0.029
15	11.79	0.974	0.026	0.014	0.023
15.5	11.87	0.981	0.019	0.010	0.017
16	11.84	0.979	0.021	0.012	0.019
16.5	11.92	0.985	0.015	0.008	0.013
17	11.96	0.989	0.011	0.006	0.010
17.5	12.10	1.000	0.000	0.000	0.000
18	12.10	1.000	0.000	0.000	0.000
18.5	12.10	1.000	0.000	0.000	0.000
19	12.10	1.000	0.000	0.000	0.000
19.5	12.10	1.000	0.000	0.000	0.000
20	12.10	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-5 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่งของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.66	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่งของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	1.055	1.700
0.5	0.00	0.000	1.000	1.055	1.700
1	1.42	0.117	0.883	0.931	1.500
1.5	4.11	0.339	0.661	0.697	1.124
2	5.20	0.428	0.572	0.603	0.971
2.5	7.34	0.605	0.395	0.417	0.672
3	9.32	0.769	0.231	0.244	0.393
3.5	10.01	0.825	0.175	0.184	0.297
4	10.54	0.869	0.131	0.138	0.222
4.5	10.91	0.900	0.100	0.106	0.170
5	11.34	0.935	0.065	0.069	0.111
5.5	11.84	0.976	0.024	0.025	0.040
6	11.87	0.978	0.022	0.023	0.037
6.5	12.01	0.990	0.010	0.010	0.017
7	12.03	0.991	0.009	0.009	0.015
7.5	12.08	0.996	0.004	0.004	0.007
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-7 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.680	4.319
0.5	0.00	0.000	1.000	2.680	4.319
1	0.34	0.029	0.971	2.602	4.194
1.5	4.61	0.395	0.605	1.620	2.611
2	7.81	0.670	0.330	0.884	1.424
2.5	9.28	0.796	0.204	0.547	0.881
3	10.23	0.878	0.122	0.328	0.528
3.5	10.84	0.930	0.070	0.186	0.300
4	11.14	0.956	0.044	0.118	0.189
4.5	11.36	0.975	0.025	0.067	0.108
5	11.59	0.995	0.005	0.014	0.023
5.5	11.59	0.995	0.005	0.014	0.022
6	11.65	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	11.65	1.000	0.000	0.000	0.000
7	11.65	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	11.65	1.000	0.000	0.000	0.000
8	11.65	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	11.65	1.000	0.000	0.000	0.000
9	11.65	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	11.65	0.000	0.000	0.000	0.000
10	11.65	0.029	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-9 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูงของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	200	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	26	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	2.30	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูงของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0	0	1.000	8.491	13.682
1	5.39	0.444	0.556	4.718	7.602
2	5.69	0.469	0.531	4.508	7.264
4	6.19	0.510	0.490	4.158	6.700
6	7.28	0.600	0.400	3.395	5.471
8	8.25	0.680	0.320	2.716	4.376
10	8.49	0.700	0.300	2.548	4.106
12	11.00	0.907	0.093	0.791	1.275
14	11.46	0.944	0.055	0.469	0.756
16	11.83	0.975	0.025	0.210	0.338
18	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
20	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
22	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
24	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
26	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
28	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
30	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-11 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลเบตนิ่งของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	4.8	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.02	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-12 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลเบตนิ่งของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
0.5	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
1	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
1.5	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
2	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
2.5	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
3	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
3.5	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
4	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
4.5	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
5	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
5.5	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
6	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
6.5	0.00	0.000	1.000	0.243	0.391
7	1.62	0.133	0.867	0.210	0.339
7.5	2.87	0.236	0.764	0.185	0.299
8	4.88	0.402	0.598	0.145	0.234
8.5	6.44	0.531	0.469	0.114	0.184
9	7.50	0.618	0.382	0.093	0.149
9.5	8.14	0.671	0.329	0.080	0.129
10	8.43	0.695	0.305	0.074	0.119
10.5	9.04	0.745	0.255	0.062	0.100
11	9.49	0.782	0.218	0.053	0.085

11.5	10.02	0.826	0.174	0.042	0.068
12	10.36	0.854	0.146	0.036	0.057
12.5	10.78	0.889	0.111	0.027	0.043
13	11.17	0.921	0.079	0.019	0.031
13.5	11.60	0.956	0.044	0.011	0.017
14	11.66	0.961	0.039	0.009	0.015
14.5	11.87	0.978	0.022	0.005	0.009
15	12.03	0.992	0.008	0.002	0.003
15.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
16	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
16.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
17	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
17.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
18	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
18.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
19	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
19.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
20	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
25	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
30	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
35	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
40	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000



ตารางที่ ก-13 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	4.8	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.32	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(g·mol·K)

ตารางที่ ก-14 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	0.692	1.114
0.5	0.00	0.000	1.000	0.692	1.114
1	0.00	0.000	1.000	0.692	1.114
1.5	0.00	0.000	1.000	0.692	1.114
2	1.62	0.133	0.867	0.599	0.966
2.5	2.87	0.236	0.764	0.528	0.851
3	4.88	0.402	0.598	0.413	0.666
3.5	6.44	0.531	0.469	0.325	0.523
4	7.50	0.618	0.382	0.264	0.426
4.5	8.14	0.671	0.329	0.228	0.367
5	8.43	0.695	0.305	0.211	0.340
5.5	8.43	0.695	0.305	0.211	0.340
6	9.01	0.742	0.258	0.178	0.287
6.5	9.29	0.766	0.234	0.162	0.261
7	10.36	0.854	0.146	0.101	0.163
7.5	10.78	0.889	0.111	0.077	0.124
8	11.17	0.921	0.079	0.055	0.088
8.5	11.60	0.956	0.044	0.030	0.049
9	11.66	0.961	0.039	0.027	0.043
9.5	11.75	0.968	0.032	0.022	0.035
10	11.79	0.972	0.028	0.020	0.032
10.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
11	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-15 เงื่อนไขในการทำการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่งของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	4.8	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.66	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-16 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบสลักกิ่งของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	1.213	1.955
0.5	2.59	0.213	0.787	0.955	1.538
1	9.01	0.742	0.258	0.313	0.504
1.5	10.35	0.853	0.147	0.178	0.287
2	10.67	0.879	0.121	0.147	0.236
2.5	10.67	0.879	0.121	0.147	0.236
3	11.02	0.908	0.092	0.112	0.180
3.5	11.19	0.922	0.078	0.095	0.153
4	11.26	0.928	0.072	0.088	0.141
4.5	11.49	0.947	0.053	0.064	0.104
5	11.30	0.931	0.069	0.083	0.134
5.5	11.54	0.951	0.049	0.060	0.096
6	11.70	0.964	0.036	0.044	0.070
6.5	11.95	0.985	0.015	0.019	0.030
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	0.000	1.000	1.213	1.955
9.5	12.13	0.213	0.787	0.955	1.538
10	12.13	0.742	0.258	0.313	0.504

ตารางที่ ก-17 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	4.8	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ A-18 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
1	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
1.5	8.61	0.710	0.290	0.810	1.304
2	11.62	0.957	0.043	0.119	0.192
2.5	11.94	0.984	0.016	0.045	0.073
3	12.02	0.991	0.009	0.026	0.042
3.5	12.05	0.993	0.007	0.018	0.029
4	12.12	0.999	0.001	0.004	0.006
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-19 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูงของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	4.8	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	2.30	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-20 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูงของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	5.39	0	1.000	8.491	13.682
1	5.69	0.444	0.825	7.003	11.285
2	6.19	0.469	0.782	6.641	10.701
4	7.28	0.510	0.766	6.505	10.482
6	8.25	0.600	0.670	5.689	9.167
8	8.49	0.680	0.195	1.653	2.664
10	11.00	0.700	0.076	0.644	1.038
12	11.46	0.907	0.000	0.000	0.000
14	11.83	0.944	0.000	0.000	0.000
16	12.13	0.975	0.000	0.000	0.000
18	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
20	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
22	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
24	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
26	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
28	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
30	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-21 เงื่อนไขการวัดสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	323	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-22 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.636
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.636
1	5.98	0.493	0.507	1.415	2.350
1.5	10.96	0.903	0.097	0.270	0.449
2	12.14	1.001	0.000	0.000	0.000
2.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-23 เงื่อนไขการวัดสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 343 เคลวิน

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	343	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-24 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 343 เคลวิน

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.366
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.366
1	6.99	0.576	0.424	1.182	1.849
1.5	11.83	0.975	0.025	0.069	0.108
2	12.01	0.990	0.010	0.028	0.045
2.5	12.09	0.996	0.004	0.011	0.017
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-25 เงื่อนไขภาวะโดยใช่สำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 353 เคลวิน

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	353	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-26 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 353 เคลวิน

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.242
0.5	0.43	0.036	0.964	2.691	4.091
1	11.80	0.972	0.028	0.078	0.118
1.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
2	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
2.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-27 เงื่อนไขการวัดสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	4.8	กรัม
อุณหภูมิ	323	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-28 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 323 เคลวิน

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.636
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.636
1	7.52	0.620	0.380	1.061	1.763
1.5	11.58	0.954	0.046	0.128	0.212
2	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
2.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-29 เงื่อนไขภาวะโดยใช่สำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 343 เคลวิน

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	4.8	กรัม
อุณหภูมิ	343	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-30 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 343 เคลวิน

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.366
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.366
1	9.86	0.813	0.187	0.522	0.817
1.5	11.32	0.933	0.067	0.187	0.293
2	11.80	0.973	0.027	0.076	0.119
2.5	12.00	0.989	0.011	0.030	0.047
3	12.03	0.991	0.009	0.024	0.037
3.5	12.07	0.995	0.005	0.014	0.023
4	12.13	1.000	0.000	0.001	0.001
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-31 เงื่อนไขการสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 353 เคลวิน

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	4.8	กรัม
อุณหภูมิ	353	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-32 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิ 353 เคลวิน

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.242
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.242
1	9.63	0.794	0.206	0.576	0.876
1.5	11.73	0.966	0.034	0.094	0.143
2	11.97	0.986	0.014	0.039	0.059
2.5	12.04	0.992	0.008	0.022	0.033
3	12.08	0.995	0.005	0.013	0.020
3.5	12.08	0.995	0.005	0.013	0.020
4	12.13	1.000	0.000	0.001	0.001
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-33 เงื่อนไขการวัดสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 7.4 โดยปริมาตร

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-34 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 7.4 โดยปริมาตร

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
1	8.72	0.718	0.282	0.786	1.266
1.5	12.11	0.998	0.002	0.006	0.010
2	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
2.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-35 เงื่อนไขการสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 13.5 โดยปริมาตร

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-36 ข้อมูลสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 13.5 โดยปริมาตร

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
1	5.62	0.463	0.537	1.497	2.413
1.5	11.74	0.967	0.033	0.091	0.147
2	12.05	0.993	0.007	0.019	0.030
2.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-37 เงื่อนไขการวัดสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 22.5 โดยปริมาตร

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-38 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 22.5 โดยปริมาตร

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
1	9.24	0.762	0.238	0.666	1.073
1.5	11.86	0.977	0.023	0.063	0.102
2	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
2.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-39 เงื่อนไขการสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดิเดชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 22.5 โดยปริมาตร

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-40 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดิเดชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 22.5 โดยปริมาตร

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
1	9.24	0.762	0.238	0.666	1.073
1.5	11.86	0.977	0.023	0.063	0.102
2	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
2.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-41 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 7.4 โดยปริมาตร

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-42 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 7.4 โดยปริมาตร

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
1	8.63	0.711	0.289	0.806	1.298
1.5	11.64	0.960	0.040	0.113	0.181
2	11.90	0.981	0.019	0.054	0.088
2.5	11.99	0.988	0.012	0.032	0.052
3	12.06	0.994	0.006	0.017	0.027
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-43 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 13.5 โดยปริมาตร

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-44 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 13.5 โดยปริมาตร

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
0.5	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
1	7.20	0.593	0.407	1.135	1.829
1.5	11.34	0.935	0.065	0.182	0.294
2	11.96	0.986	0.014	0.039	0.064
2.5	12.11	0.998	0.002	0.005	0.008
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-45 เงื่อนไขการดำเนินการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 22.5 โดยปริมาตร

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณโพแทสเซียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-46 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอเนตที่ปริมาณไอน้ำร้อยละ 22.5 โดยปริมาตร

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
0.5	0.15	0.012	0.988	2.757	4.443
1	11.73	0.967	0.033	0.093	0.150
1.5	12.13	1.000	0.000	0.001	0.001
2	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
2.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	1.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-47 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับลิเทียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณลิเทียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L ³ /arm)(gmole/K)

ตารางที่ ก-48 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับลิเทียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F (-)	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
0.5	0.15	0.012	0.988	2.757	4.443
1	11.73	0.967	0.033	0.093	0.150
1.5	12.13	1.000	0.000	0.001	0.001
2	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
2.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	1.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ ก-49 เงื่อนไขภาวะสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับรูปีเตียมคาร์บอเนต

ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า	12	%vol
น้ำหนักตัวดูดซับ	40	กรัม
ปริมาณรูปีเตียมคาร์บอเนต	5.2	กรัม
อุณหภูมิ	333	เคลวิน
อัตราการไหล	0.84	ลิตรต่อนาที
ความดัน	1	atm
ค่าคงที่ของแก๊ส	0.082	(L·atm)/(mol·K)

ตารางที่ ก-50 ข้อมูลดิบสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่รูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนของตัวดูดซับรูปีเตียมคาร์บอเนต

เวลา (นาที)	%CO ₂ ขาออก (%vol)	[CO ₂] ขาออก (L/min)	F -	V (L/min)	W (g/min)
0	0.00	0.000	1.000	2.791	4.497
0.5	0.15	0.012	0.988	2.757	4.443
1	11.73	0.967	0.033	0.093	0.150
1.5	12.13	1.000	0.000	0.001	0.001
2	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
2.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
3.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
4.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
5.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
6.5	12.13	1.000	1.000	0.000	0.000
7	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
7.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
8.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
9.5	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000
10	12.13	1.000	0.000	0.000	0.000

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ณิชฎฐภััสสร จงอาจกลาง เกิดเมื่อวันที่ 24 เมษายน 2532 สำเร็จปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์เมื่อ พ.ศ. 2555 ได้เข้าร่วมการนำเสนอผลงานวิชาการ ดังนี้

1.) Jongartklang, N., Piumsomboon, P., and Chalermssinsuwan, B. Correlation of kinetic parameter for CO₂ sorption using K₂CO₃/Al₂O₃ solid sorbents with various fluidization flow regimes. The 3rd TICHe International Conference, Khon Kaen, Thailand (2013).

2.) Jongartklang, N., Piumsomboon, P., and Chalermssinsuwan, B. Arrhenius reaction kinetic of carbon dioxide carbonation with potassium carbonate solid sorbent over alumina oxide support in fixed bed reactor. 9th Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress, Kuala Lumpur, Malaysia (2014)