

การพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูงในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน

Development of computational fluid dynamics model for high concentration CO₂ capture in circulating fluidized bed reactor

ธนพร เบนจปรักายรัตน์^{1,2}, พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์^{1,2} และ เบนจพล เฉลิมสินสุวรรณ^{1,2,*}

Tanaporn Benjaprakairat^{1,2}, Pornpote Piumsomborn^{1,2} and Benjapon Chalermssinuwana^{1,2,*}

¹ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

² ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*ติดต่อ E-mail: benjapon.c@chula.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 02-218-7682

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศเพิ่มขึ้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สเรือนกระจกที่เป็นสาเหตุหลักในการเกิดภาวะโลกร้อนทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มขึ้น และ ส่งผลต่อระบบนิเวศ รวมถึงการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ งานวิจัยนี้เลือกศึกษากระบวนการดูดซับด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนแกมมาอะลูมินาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนด้วยโปรแกรมจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำเร็จรูป ANSYS FLUENT เพื่ออธิบายรูปแบบการไหลของกระบวนการและหาภาวะการเกิดการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงจากอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาปรับปรุงกระบวนการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนต่อไป มีตัวแปรดำเนินการหลักที่สนใจสองตัวแปรคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และ ปริมาณของตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในระบบ ผลที่ได้พบว่า การเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือ การปรับปรุงตัวดูดซับของแข็ง และ ปริมาณของตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในระบบที่เหมาะสมจะมีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น

คำสำคัญ: เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน, การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง, ตัวดูดซับของแข็ง, แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

Abstract

At present, the advances in technology and industrial increase the carbon dioxide emission to atmosphere. Carbon dioxide is the main component in greenhouse gases which causes the global warming. The impact of the global warming is the increasing of average temperature on global surface. Moreover, it influences the environment and human daily life. In this research study, the aim is to investigate the carbon dioxide capture with potassium carbonate supported on alumina gamma using circulating fluidized bed reactor in commercial computational fluid dynamics program, ANSYS FLUENT. The simulation results can show the hydrodynamics in circulating fluidized bed reactor with high concentration carbon dioxide capture from cement plant and can use for optimizing the adsorption process in circulating fluidized bed reactor. Here, the independent variables are kinetic reaction rate and initial solid sorbent quantity. The results showed that increasing kinetic reaction rate or improvement of solid sorbent and reasonable initial solid sorbent quantity increased the carbon dioxide capture efficiency.

Keywords: Circulating fluidized bed reactor, High concentration carbon dioxide capture, Solid sorbent, Computational fluid dynamics

1. บทนำ

จากผลกระทบของแก๊สเรือนกระจกที่เพิ่มขึ้นกำลังได้รับความสนใจในวงกว้าง เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของแก๊สเรือนกระจกที่ถูกปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศของประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี พ.ศ. 2559 พบว่า มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 81 โดยเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรทำให้เกิดความก้าวหน้าของเทคโนโลยีและอุตสาหกรรม เพื่อสร้างพลังงานที่ใช้ในการดำเนินชีวิตประจำวันให้เพียงพอต่อความต้องการ ดังนั้น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล จึงยังคงมีแนวโน้มที่สูงขึ้น โดยเฉพาะการเผาไหม้ในโรงงานไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลัก และ เป็นแหล่งที่มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 34 สำหรับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ [1] ในปัจจุบัน จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบ่งออกเป็น 3 วิธีการหลัก ได้แก่ เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion) เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน (Oxy-fuel) และเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion)

เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้มากมายได้ถูกพัฒนามาเพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น การดูดซึม (Absorption) [2] การแยกด้วยความเย็นยวดยิ่ง (Cryogenic) [3] การแยกโดยใช้เมมเบรน (Membranes) [4] และ การดูดซับ (Adsorption) [5] โดยกระบวนการดูดซึมด้วยสารละลายเอมีนเป็นวิธีที่นิยมใช้ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง แต่ด้วยข้อจำกัดในด้านพลังงานที่ใช้ในการคืนสภาพตัวดูดซึม การกักต่อนอุปกรณ์ และการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายที่ใช้ในการดูดซึม [6] ดังนั้น การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการดูดซับด้วยตัวดูดซับของแข็ง

โพแทสเซียมคาร์บอเนต จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกเลือกมาใช้ เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาไม่สูง ใช้คุณสมบัติในการดูดซับต่ำ ใช้พลังงานในการคืนสภาพตัวดูดซับต่ำและมีประสิทธิภาพในการคืนสภาพตัวดูดซับที่สูง รวมถึงมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง [7]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของของไหลโดยการนำสมการพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน รวมถึง สมการภายใต้เงื่อนไขขอบเขต ผ่านปริมาตรขนาดเล็กๆ ที่ถูกแบ่งขึ้นมาและแก้สมการอนุพันธ์เหล่านี้ด้วยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณ [8] จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด โดยการจำลองฝั่การดูดซับและใช้แก๊สเสียที่ป้อนเข้ามีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 8 - 12 โดยโมล และศึกษาผลของความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ [9] อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา และ ความเร็วของแก๊สป้อนเข้า [10] นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้แบบจำลองมัลติสเกลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน [11] อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่ได้มาจากแก๊สเสียอื่นในเครื่องปฏิกรณ์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน งานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่ออธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนทั้งฝั่การดูดซับและฝั่การคืนสภาพตัวดูดซับ โดยการใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงในการป้อนเข้าและศึกษาผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและปริมาณของตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในระบบ โดยมีตัวแปรตาม คือ ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ประกาศตัวแปร

ตัวอักษรทั่วไป

C_{D0} สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่สำหรับแบบจำลอง EMMS (-)

d_s เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)

p ความดัน (พาสคัล)

\vec{g} ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

e สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (-)

g_0 ฟังก์ชันการกระจายตัวในแนวรัศมี (-)

h เอนทัลปี (จูลต่อเคลวิน)

\bar{I} Unit tensor (-)

J_i	ฟลักซ์การแพร่ขององค์ประกอบ (กิโลกรัมต่อตารางเมตร วินาที)
k	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล วินาที)
K_S	พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตร วินาที)
r	อัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบวัฏภาคเดียว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร วินาที)
R_r	อัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบหลายวัฏภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร วินาที)
R	ค่าคงที่ของแก๊ส (จูลต่อกิโลโมล เคลวิน)
S	Source term ของการถ่ายโอนความร้อน (จูลต่อลูกบาศก์เมตร วินาที)
t	เวลา (วินาที)
T	อุณหภูมิ (เคลวิน)
v	ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)
Y	สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ (-)

ตัวอักษรกรีก

β	สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)
ε	สัดส่วนช่องว่าง (-)
$\varepsilon_{s,max}$	สัดส่วนของแข็งที่มากที่สุด (-)
ξ_s	ความหนืดรวม (กิโลกรัมต่อเมตร วินาที)
ρ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
\bar{t}	ความเค้นเทนเซอร์ (พาสคัล)
μ	ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตร วินาที)
ω	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (-)

- θ พลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็ง (ตารางเมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
- γ_s พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตร วินาทีกำลังสาม)

ตัวอักษรที่เขียนต่ำกว่าตัวอื่น

g	แก๊ส	H ₂ O	ไอน้ำ
q	เฟส	K ₂ CO ₃	โพแทสเซียมคาร์บอเนต
s	อนุภาคของแข็ง	KHCO ₃	โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต
CO ₂	คาร์บอนไดออกไซด์		

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมคำนวณเชิงพาณิชย์ ANSYS FLUENT รุ่น 19.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของของไหลในกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่าง ๆ

2.2 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 2 มิติ และ 2 ภูมิภาค เพื่ออธิบายอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และการคืนสภาพตัวดูดซับ โดยสมการควบคุม ประกอบด้วยสมการอนุรักษ์มวลหรือสมการของความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน และ สมการอนุรักษ์องค์ประกอบภูมิภาค ซึ่งจะถูกร่วมกับสมการช่วยจากทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็ง

$$\text{สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการของความต่อเนื่อง} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_q \rho_q) + \nabla \cdot (\varepsilon_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (1)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \varepsilon_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\varepsilon_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\varepsilon_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \varepsilon_q \rho_q \vec{g} + \beta_{pq} (\vec{v}_q - \vec{v}_p) \quad (2)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\varepsilon_q \rho_q \vec{v}_q h_q) = -\varepsilon_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q : \nabla \vec{v}_q + S_q \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } h_q = \int c_{p,q} dT_{q*} \quad (4)$$

สมการอนุรักษ์องค์ประกอบวัฏภาค

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_q \alpha_q Y_{q,i}) + \nabla \cdot (\rho_q \alpha_q \vec{v}_q Y_{q,i}) = -\nabla \cdot \varepsilon_q \vec{J}_{q,i} + \varepsilon_q r_{q,i} + R_r \quad (5)$$

สมการพลังงานจลน์การกวดแกว่งของของแข็ง

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s \theta) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \theta) v_s \right] = (-\nabla p_s \bar{I} + \tau_s) \cdot \nabla v_s + \nabla \cdot (K_s \nabla \theta) - \gamma_s \quad (6)$$

$$\text{เทนเซอร์ความเครียด ความเค้นของเฟสแก๊ส } \bar{\tau}_g = \mu_g (\nabla \vec{v}_g + (\nabla \vec{v}_g)^T) - \frac{2}{3} \mu_g (\nabla \vec{v}_g) \bar{I} \quad (7)$$

เทนเซอร์ความเครียด ความเค้นของเฟสอนุภาคของแข็ง

$$\bar{\tau}_s = \varepsilon_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + (\nabla \vec{v}_s)^T) - \frac{2}{3} \mu_s (\nabla \vec{v}_s) \bar{I} + \xi_s \nabla \vec{v}_s \bar{I} \quad (8)$$

$$\text{เมื่อ } \mu_s = \frac{4}{5} \varepsilon_s^2 \rho_s d_s g_0 (1+e) \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} + \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta \pi}}{96(1+e) \varepsilon_s g_0} \left[1 + \frac{4}{5} \varepsilon_s g_0 (1+e)\right]^2 \quad (9)$$

$$\text{ความหนืดรวม } \xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s^2 \rho_s d_s g_0 (1+e) \left(\frac{\theta}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

แบบจำลองสัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคของ EMMS (Energy Minimization Multi-Scale, β_{gs}) คำนวณได้ตั้งสมการ (11) และ (12)

$$\text{สำหรับ } \varepsilon_g \leq 0.74 \quad \text{จะได้ว่า } \beta_{gs} = 150 \frac{(1-\varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_g) \rho_g |v_g - v_s|}{d_p} \quad (11)$$

$$\text{สำหรับ } \varepsilon_g > 0.74 \quad \text{จะได้ว่า } \beta_{gs} = \frac{3(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{4 d_p} \rho_g |v_g - v_s| C_{D0} \omega(\varepsilon_g) \quad (12)$$

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ คือ อัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคของ EMMS และ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคพื้นฐาน คำนวณได้ตั้งสมการ (13) ถึง (18)

$$\text{สำหรับ } 0.74 < \varepsilon_g \leq 0.82 \quad \text{จะได้ว่า } \omega = -0.5769 + \frac{0.0214}{4(\varepsilon_g - 0.7463)^2 + 0.0044} \quad (13)$$

$$\text{สำหรับ } 0.82 < \varepsilon_g \leq 0.97 \text{ จะได้ว่า } \omega = -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0040} \quad (14)$$

$$\text{และ สำหรับ } \varepsilon_g > 0.97 \text{ จะได้ว่า } \omega = -31.8295 + 32.8295\varepsilon_g \quad (15)$$

$$\text{สำหรับ } Re < 1000 \text{ จะได้ว่า } C_{D0} = \frac{24}{Re(1+0.15Re^{0.687})} \quad (16)$$

$$Re \geq 1000 \text{ จะได้ว่า } C_{D0} = 0.44 \quad (17)$$

$$\text{เมื่อ } Re = \frac{\varepsilon_g \rho_g |v_g - v_s| d_s}{\mu_g} \quad (18)$$

$$\text{ความดันของของแข็ง } p_s = \varepsilon_s \rho_s \theta + 2\rho_s(1+e)\varepsilon_s^2 g_0 \theta \quad (19)$$

$$\text{เมื่อ } g_0 = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (20)$$

พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการนำ

$$\kappa_s = \frac{25d_s \rho_s \sqrt{\theta \pi}}{64(1+e)\varepsilon_s g_0} \left[1 + \frac{6}{5} \varepsilon_s g_0 (1+e) \right]^2 + 2\rho_s \varepsilon_s^2 d_s g_0 (1+e) \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

$$\gamma_s = 3(1-e^2)\varepsilon_s \rho_s g_0 \theta \left(\frac{4}{d_s} \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} - \nabla v_s \right) \quad (22)$$

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาเป็นตัวดูดซับของแข็งในกระบวนการ โดยมีสมการดังนี้



และนำสมการการเกิดปฏิกิริยาจากงานวิจัยของ Boonprasop และคณะ [12] ที่แสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับของการใช้ตัวดูดซับมาปรับใช้ในระบบไฟล์ประยุกต์ ดังสมการต่อไปนี้

$$r_{fw} = k_{fw} [CO_2]^{0.4} [H_2O]^{0.4} \quad (24)$$

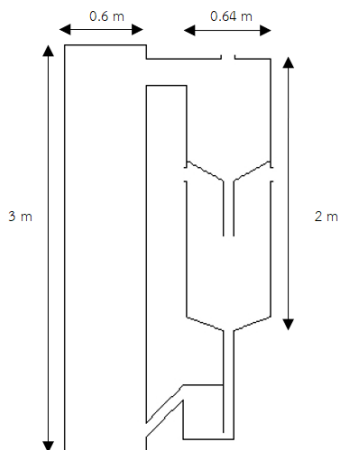
$$k_{fw} = 1 * 10^{-10} \exp\left(\frac{70}{RT}\right) \quad (25)$$

$$r_{bw} = \left(\frac{1}{[CO_2]} \right)^{0.15} \left(\frac{1}{[H_2O]} \right)^{0.15} \quad (26)$$

$$k_{bw} = 7.83 * 10^{-3} \exp\left(\frac{-0.000502}{RT}\right) \quad (27)$$

2.3 เงื่อนไขขอบเขตและแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียน ดังแสดงในรูปที่ 1 ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ ฝั่งการดูดซับ ฝั่งการคืนสภาพตัวดูดซับ ไฮโคลนและท่อป้อนกลับ โดยแก๊สเสียจะถูกป้อนเข้ามาและเกิดการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ฝั่งการดูดซับ จากนั้น จะปล่อยแก๊สที่ผ่านการดูดซับแล้วทางด้านบนของฝั่งการคืนสภาพตัวดูดซับ ตัวดูดซับของแข็งจะผ่านลงมาทางทางออกด้านล่างของไฮโคลนและเกิดการคืนสภาพตัวดูดซับ และ ถูกส่งกลับไปฝั่งการดูดซับผ่านทางท่อป้อนกลับ



รูปที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย

แบบจำลอง 2 มิติสร้างขึ้นจากโปรแกรม GAMBIT โดยแบ่งขนาดเซลล์แต่ละช่องเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีจำนวนช่องเท่ากับงานวิจัยของ Wang และคณะ [11] ใช้การไหลแบบราบเรียบ และแบบจำลอง Eulerian-Eulerian สำหรับแก๊สและของแข็งในระบบ ที่ไม่อยู่ในสถานะคงตัว ค่าที่ใช้ในการจำลองต่างๆ ได้แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Wang และคณะ [11] และนำประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ไปเทียบกับผลการทดลองจริงจากงานวิจัยของ Yi และคณะ [13] เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้

ตารางที่ 1 ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลอง

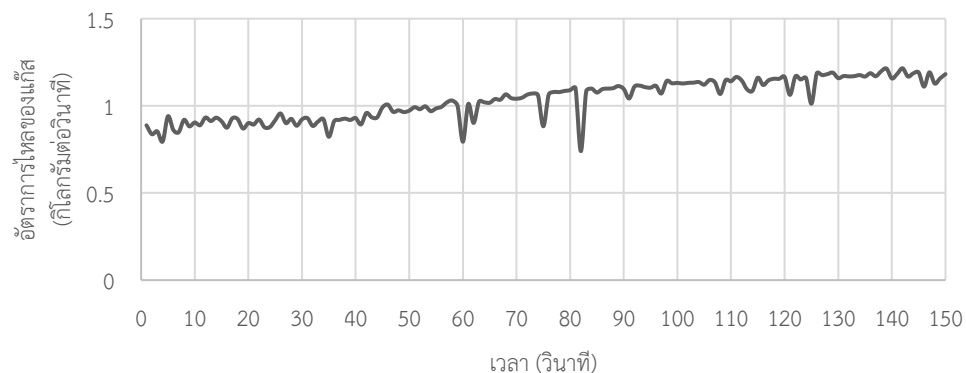
Simulation parameters	Value	Unit
Particle density	1,530	kg/m ³
Particle diameter	75	μm
Inlet gas velocity (adsorber/downer)	2/1	m/s

Inlet gas temperature (adsorber/downer)	343.15/298.15	K
Inlet gas species mass fraction (adsorber/downer)	CO ₂ =0.225/0.0, H ₂ O=0.092/0.0, O ₂ =0.161/0.23, N ₂ =0.522/0.77	-
Initial solid temperature	343.15	K
Initial solid species mass fraction	K ₂ CO ₃ =0.35, KHCO ₃ =0, AL ₂ O ₃ =0.65	-
Initial solid volume fraction	0.50	-
Time step	0.001	s

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 การหาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เหมาะสม

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของฝั่งการคืนสภาพตัวดูดซับ พบว่า ในช่วงเริ่มต้นของระบบจะมีอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำและจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนคงที่ เนื่องจากในช่วงแรก จะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และตัวดูดซับของแข็ง K₂CO₃ ได้ดี จนในช่วงเวลา 140 ถึง 150 วินาที ค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของฝั่งการคืนสภาพตัวดูดซับจะมีการกวัดแกว่งน้อยลงและเริ่มเข้าสู่สภาวะเสมือนคงตัว ดังนั้น ในการจำลองระบบดังกล่าวนี้จะเลือกใช้เวลาในการจำลอง คือ 150 วินาที และค่าเฉลี่ยของผลการจำลองต่างๆ จะเฉลี่ยค่าจากช่วงเวลา 140 ถึง 150 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 2



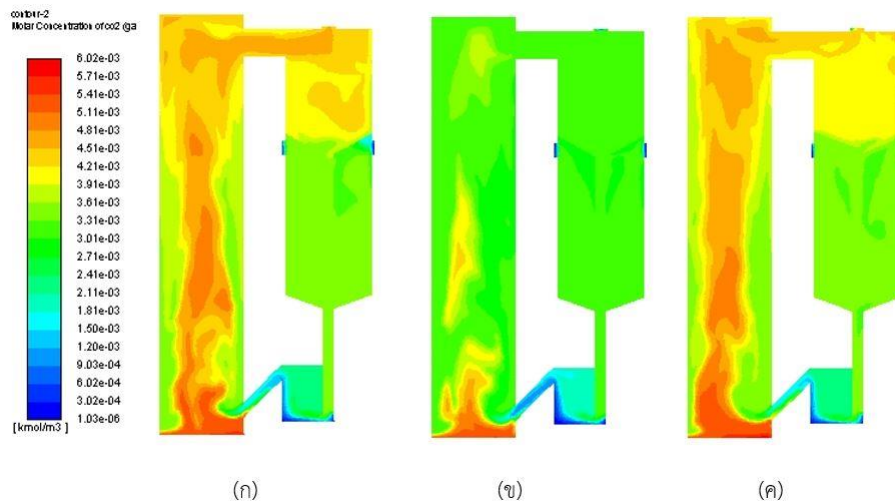
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

เพื่อความถูกต้องของการทำนายผลจากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยการใช้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจากสมการ (24) ถึง (27) และนำสมการ (24) มาคูณสัมประสิทธิ์เพื่อให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Yi และคณะ [13] พบว่า เมื่อสัมประสิทธิ์มีค่าเท่ากับ 32.5 ค่าของประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองที่มีความเร็วของแก๊สเสียป้อนเข้าเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที มีค่าเท่ากับร้อยละ

51.0 ในขณะที่ผลการทดลองจริง มีค่าเท่ากับร้อยละ 52.0 ซึ่งมีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกัน จึงถือว่าแบบจำลองนี้เหมาะสมเชื่อถือได้ และ จะนำไปใช้ในการทำนายผลต่างๆ ในส่วนถัดไป

3.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ

หลังจากได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สามารถทำนายถึงผลของอุทกพลศาสตร์และปฏิกิริยาการดูดซับ-การคืนสภาพได้ จึงเริ่มเปลี่ยนแก๊สเสียค่าเข้าให้มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น โดยมีค่าสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.261 สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำ เท่ากับ 0.053 สัดส่วนโดยมวลของออกซิเจน เท่ากับ 0.105 และ สัดส่วนโดยมวลของไนโตรเจน เท่ากับ 0.581 [14] ที่ทางเข้าฝั่งการดูดซับ พบว่า ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 31.4 เนื่องจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ป้อนเข้ากระบวนการที่สูงขึ้นในขณะที่มีตัวดูดซับในกระบวนการเท่าเดิม จากนั้น จึงทำการศึกษาตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา 10 เท่าจากการคูณสัมประสิทธิ์จาก 32.5 เป็น 325 ในสมการ (24) โดยมีสัดส่วนของแข็งโดยปริมาตรเริ่มต้น เท่ากับ 0.50 ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 59.8 สังเกตได้จากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่มีปริมาณน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 3 เนื่องจากการเกิดการดูดซับระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และตัวดูดซับของแข็ง K_2CO_3 ได้มากขึ้น ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้โดยการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวดูดซับของแข็งให้มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ-การคืนสภาพสูงขึ้น



รูปที่ 3 แผนภาพความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ก) กรณีเพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเสียป้อนเข้า (ข) กรณีเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา (ค) กรณีเพิ่มสัดส่วนของแข็งในกระบวนการ

จากนั้น จึงศึกษาตัวแปรดำเนินการอีกหนึ่งตัวแปร ได้แก่ ปริมาณของตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในระบบ พบว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแข็งโดยปริมาตรเริ่มต้นจาก 0.50 เป็น 0.55 โดยมีการคูณสัมประสิทธิ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 32.5 จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 49.3

เนื่องจากมีปริมาณของตัวดูดซับของแข็งเพิ่มขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการดูดซับได้สูงขึ้น จึงมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบคงเหลือลดลง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้โดยการเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในระบบ เพื่อทำให้เกิดการดูดซับระหว่างตัวดูดซับของแข็งและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จะศึกษาการดักจับของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงในเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะสนใจแก๊สเสียป้อนเข้าที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 8-12 โดยโมล พบว่า ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองกับผลการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกันและเชื่อถือได้ จากนั้น จึงเปลี่ยนแก๊สเสียป้อนให้ให้มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น พบว่า ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงจากร้อยละ 51.0 เหลือเพียง 31.4 สำหรับผลของตัวแปรดำเนินการ 2 ชนิด ได้แก่ อัตราการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณของตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในระบบกรณีแก๊สเสียป้อนเข้าที่มีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง จะเห็นว่า เมื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณของตัวดูดซับของแข็งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 59.8 และ 49.3 ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับสถานที่ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งคณาจารย์ นิสิตระดับมหาบัณฑิต และดุษฎีบัณฑิต ที่คอยช่วยเหลือ รวมทั้งให้คำแนะนำในการทำวิจัยครั้งนี้ และ ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีและวัสดุ กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (RSA5980052) สำหรับเงินทุนสำหรับการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Environmental Protection Agency. Overview of Greenhouse Gases. Retrieved from <<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>> [2018 July 7]
- [2] Krupiczka, R., Rotkegel, A., & Ziobrowski, Z. (2015). Comparative study of CO₂ absorption in packed column using imidazolium based ionic liquids and MEA solution. *Separation and Purification Technology*, 149, 228-236.
- [3] Zanganeh, E. K., Shafeen, A., & Salvador C. (2009). CO₂ Capture and Development of an Advanced Pilot-Scale Cryogenic Separation and Compression Unit. *Energy Procedia*, 1(1), 247-252.
- [4] Turi, D. M., Ho, M., Ferrari, M. C., Chiesa, P., Wiley, D. E., & Romano, M. C. (2017). CO₂ capture from natural gas combined cycles by CO₂ selective membranes. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 61, 168-183.

- [5] Plaza, M. G., Durán, I., Rubiera, F., & Pevida, C. (2017). Adsorption-based Process Modelling for Post-combustion CO₂ Capture. *Energy Procedia*, 114, 2353-2361.
- [6] Lee, S. C., Chae, H. J., Lee, S. J., Choi, B. Y., Yi, C. K., Lee, J. B., Ryu, C. K., & Kim, J. C. (2008) Development of Regenerable MgO-Based Sorbent Promoted with K₂CO₃ for CO₂ Capture at Low Temperatures. *Environ. Sci. Technol*, 42, 2736–2741.
- [7] Alie, C., Backham, L., Croiset, E., & Douglas, P.L. (2005). Simulation of CO₂ capture using MEA scrubbing: a flowsheet decomposition method. *Energy Convers Manage*, 46(3), 475–487.
- [8] Anderson, J. D. (1995). *Computational fluid dynamics: the basics with applications*. McGrawhill Inc.
- [9] Nouri, M., Rahpaima, G., Nejad, M. M., & Imani, M. (2018). Computational simulation of CO₂ capture process in a fluidized-bed reactor. *Computers and Chemical Engineering*, 108, 1-10
- [10] Chang, J., Zhang, K., Yang, Y., Wang, B., Sun, Q. (2015). Computational investigation of solid sorbent carbon dioxide capture in a fluidized bed reactor. *Powder Technology*, 275, 94-104
- [11] Wang, S., Wang, Q., Chen, J., Liu, G., Lu, H., & Sun, L. (2016). Assessment of CO₂ capture using potassium-based sorbents in circulating fluidized bed reactor by multiscale modeling. *Fuel*, 164, 66-72
- [12] Boonprasop, S., Gidaspow, D., Chalermssinsuwan, B., Piumsomboon, P. (2017). CO₂ Capture in a Multistage CFB: Part I: Number of Stages, *Particle Technology and Fluidization*, 63, 5267-5279.
- [13] Yi, C., Jo, S., Seo, Y., Lee, J., & Ryu, C. (2007). Continuous operation of the potassium-based dry sorbent CO₂ capture process with two fluidized-bed reactors. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 31–36.
- [14] Pérez-Calvo, J., Sutter, D., Gazzani, M., & Mazzotti, M. (2017). Application of a chilled ammonia-based process for CO₂ capture to cement plants. *Energy Procedia*, 114, 6197-6205.