

ความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียน
โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

The relationship between operating parameters and the percentage of CO₂ capture in
circulating fluidized bed using computational fluid dynamics

ชนนิกานต์ ธีระพานิชกุล^{1,2}, เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ^{1,2} และ พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์^{1,2,*}

Chonnikan Tirapanichayakul^{1,2}, Benjapon Chalermssinsuwan^{1,2} and Pornpote Piumsomboon^{1,2,*}

¹ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

² ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*ติดต่อ E-mail: pornpote.p@chula.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 02-218-7676

บทคัดย่อ

เนื่องจากจำนวนประชากรโลกเพิ่มขึ้นและคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นทำให้มีความต้องการพลังงานมากขึ้น ส่งผลให้ต้องผลิตพลังงานมากขึ้นโดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้า นำมาซึ่งการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากสู่บรรยากาศ เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้ายังเป็นเชื้อเพลิงฐานคาร์บอน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปัจจัยหลักต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในงานวิจัยนี้ทำการพัฒนาแบบจำลองพลวัตสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้ด้วยตัวดูดซับของแข็งโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) พิจารณากระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในไรเซอร์ของฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยใช้โปรแกรมจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำเร็จรูป ANSYS FLUENT จากนั้น ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรดำเนินการ อันได้แก่ อัตราการป้อนเข้าของแก๊สที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ และ อัตราการป้อนตัวดูดซับ ประเมินผลกระทบที่มีต่อร้อยละการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นำผลจากแบบจำลองมาวิเคราะห์และสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนเข้าของแก๊สที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ และ อัตราการป้อนตัวดูดซับ (ตัวแปรอิสระ) กับ ร้อยละการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ตัวแปรตาม) เพื่อใช้ในการคาดการณ์ร้อยละการดูดซับเมื่อตัวแปรอิสระเปลี่ยนไป

คำสำคัญ: การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, กระบวนการดูดซับ, ฟลูอิดิซ์เบดแบบหมุนเวียน, ตัวดูดซับของแข็ง

Abstract

Due to the increasing in population and better quality of life, more energy supply is demand. Consequently, more energy, especially electricity, has to be produced. Leading to more CO₂ is releasing to the atmosphere, since most of the fuel used in the electricity production are carbon-based fuels. CO₂ is the major contributor to the climate change problem. In this research, a dynamics model of solid sorbent, Na₂CO₃, carbon dioxide capture process has been developed for a post combustion. Considering the CO₂ adsorption taking place in a riser of a circulating fluidized bed, the model was developed by using commercial computational fluid dynamics program so called ANSYS FLUENT. Then, the operating parameters, which are the inlet flue gas velocity and the inlet solid sorbent velocity, are changed to observe the impact on the percentage of carbon dioxide adsorption. The simulation results are analyzed and employed for developing an empirical model relating the inlet flue gas velocity and the inlet solid sorbent velocity (independent variables) to the percentage of carbon dioxide adsorption (dependent variable). The model is to estimate the adsorption activities when the input variables change.

Keywords: Carbon dioxide capture, Adsorption, Circulating fluidized bed, Solid sorbent.

บทนำ

ในปัจจุบันทั่วโลกประสบกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศเป็นอย่างมาก เนื่องจากโรงงานอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และโรงงานอื่น ๆ โดยเฉพาะโรงงานไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการเผาไหม้เพิ่มขึ้น ซึ่งแก๊สที่ปล่อย ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้สภาพอากาศและฤดูกาลมีการเปลี่ยนแปลง ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นจากประมาณ 280 ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร ในช่วงปี พ.ศ. 2393 มาเป็นประมาณ 412 ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตรในปี พ.ศ. 2561 ซึ่งคาดการณ์ได้ว่าในปี พ.ศ. 2643 ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะสูงถึง 800 ส่วนในล้านส่วนโดยปริมาตร [1] เทคโนโลยีการดักจับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) เป็นกระบวนการกำจัดแก๊สที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้ เชื้อเพลิง จึงได้รับความสนใจเนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตภายในโรงงาน เทคโนโลยีนี้มี หลากหลายวิธี เช่น การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการใช้เมมเบรน (Membranes) การแยกโดยการลดอุณหภูมิต่ำ ยิ่งยวด (Cryogenic separation) การแยกโดยการดูดซับด้วยสารละลายของเหลว (Absorption) และการแยกโดยการดูด ซับด้วยตัวดูดซับของแข็ง (Adsorption) [2,3,4,5] การแยกด้วยการดูดซับโดยใช้สารละลายโมโนเอทาโนลามีน (MEA) มี ประสิทธิภาพสูงในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่มีข้อเสียคือต้องใช้พลังงานสูงในการคืนสภาพตัวดูดซับ (Regeneration) สารละลายมีราคาแพงและทำให้เกิดการกัดกร่อน [6] ดังนั้น จึงเกิดแนวคิดใหม่สำหรับ เทคโนโลยีการดักจับด้วยตัวดูดซับของแข็งในกลุ่มโลหะแอลคาไลแทน มีงานวิจัยหลายชิ้นที่เปลี่ยนแปลงมาใช้ตัวดูดซับ ของแข็งโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และ พบว่า ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูด ซับสูง ราคาต่ำและสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งเหมาะกับการดักจับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ [7,8] โดยปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการดูดซับแสดงดังสมการ (1) [9]



โดยความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้จากโรงงานไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลมีค่าประมาณร้อยละ 10-20 ขึ้นกับชนิดของเชื้อเพลิง [10] ภายหลังจากการดูดซับ ตัวดูดซับจะถูกนำไปคืนสภาพในช่วงอุณหภูมิ 120-200 องศาเซลเซียส [7] ดังนั้น ตัวดูดซับที่คืนสภาพได้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงเหมาะสมกว่าเนื่องจากช่วยลดการใช้พลังงานความร้อนที่ใช้ในระบบ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เป็นการใช้วิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการอนุกรมมวล โมเมนตัม พลังงาน และองค์ประกอบ เพื่อใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของไหล อุณหภูมิ ความดัน ความเร็ว และตัวแปรอื่น ๆ [11] โดยที่เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ถ่ายโอนความร้อนและมวลได้ดี เนื่องจากสภาพภายในเครื่องปฏิกรณ์ส่งเสริมให้เกิดการสัมผัสได้ดีระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลในระบบ กระบวนการประกอบด้วย ท่อไรเซอร์ ท่อดาวเนอร์ ท่อป้อนกลับ และไซโคลน จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น ความเร็ว ความเข้มข้นของสารในแก๊สต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [12,13] อัตราการป้อนแก๊สแห้ง องค์ประกอบของไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า และอัตราการไหลมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตัวดูดซับของแข็ง (Solid sorbent flux) [14] ในงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในไรเซอร์ของปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและนำผลจากการจำลองมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วป้อนเข้าของแก๊สที่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ ความเร็วการป้อนตัวดูดซับ และร้อยละการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ประกาศตัวแปร

A	สัมประสิทธิ์ความถี่ (frequency factor) (ลูกบาศก์เมตร/กิโลโมล วินาที)
C_p	ค่าความจุความร้อนที่ความดันคงที่ (จูล/กิโลกรัม เคลวิน)
C	ความเข้มข้น (โมลาร์)
C_D	สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่สำหรับแบบจำลอง Gidaspow (-)
C_{DO}	สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่สำหรับแบบจำลอง EMMS (-)
d_s	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)
e_{ss}	สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็ง (-)
g	แรงโน้มถ่วง (เมตร/วินาที ²)
$g_{o,ss}$	ฟังก์ชันการกระจายตัวในแนวรัศมี (-)
h	เอนทาลปีเฉพาะ (specific enthalpy) (จูล/กิโลกรัม)
\bar{I}	Unit tensor (-)
k	ค่าคงที่อัตรา (ลูกบาศก์เมตร/กิโลโมล วินาที)
K_{pq}	สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างอนุภาคแก๊ส และของแข็ง (กิโลโมล/ลูกบาศก์เมตร วินาที)
p	ความดัน (กิโลปาสกาล)
Q_{gs}	ความเข้มข้นในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเฟส (จูล/ลูกบาศก์เมตร วินาที)

r	อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (กิโลโมล/ลูกบาศก์เมตร วินาที)
R	ค่าคงที่ของแก๊ส (จูล/กิโลโมล เคลวิน)
Re_k	เรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับแบบจำลอง EMMS (-)
Re_s	เรย์โนลด์นัมเบอร์สำหรับแบบจำลอง Gidaspow (-)
S	Source term (จูล/ลูกบาศก์เมตร วินาที)
t	เวลา (วินาที)
T	อุณหภูมิ (เคลวิน)
v	ความเร็ว (เมตร/วินาที)
X	สัดส่วนมวล (-)
ϵ	สัดส่วนช่องว่าง (-)
$\epsilon_{s,max}$	สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคของแข็งที่มากที่สุด (-)
ϕ_{gs}	ความไม่แน่นอนของพลังงานที่แลกเปลี่ยนระหว่างเฟสแก๊ส และของแข็ง (กิโลกรัม/เมตร วินาที ³)
γ_s	Collisional dissipation of solid phase fluctuating energy (กิโลกรัม/เมตร วินาที ³)
κ_s	ความไม่แน่นอนของพลังงานการนำความร้อนของเฟสของแข็ง (กิโลกรัม/เมตร วินาที)
μ	ความหนืด (กิโลกรัม/เมตร วินาที)
θ_s	Granular temperature (ตารางเมตร/วินาที ²)
ρ	ความหนืด (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
\bar{T}	Stress tensor (ปาสคาล)
ξ_s	ความหนืดรวม (กิโลกรัม/เมตร วินาที)

ตัวอักษรห้อย

CO_2	คาร์บอนไดออกไซด์	q	เฟส
H_2O	ไอน้ำ	g	เฟสแก๊ส
Na_2CO_3	โซเดียมคาร์บอเนต	s	อนุภาคของแข็ง
$NaHCO_3$	โซเดียมไบคาร์บอเนต		

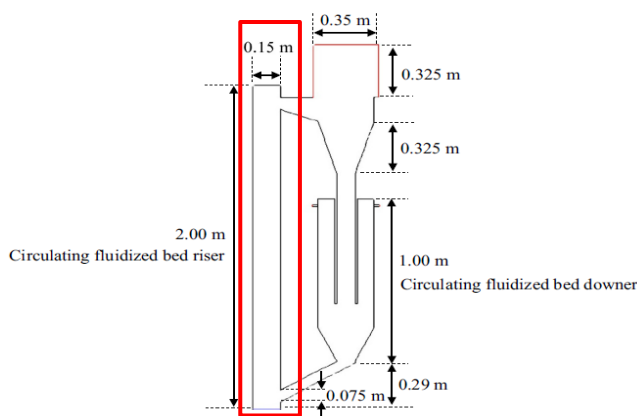
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเชิงพาณิชย์ ANSYS FLUENT รุ่น 19.0 ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของของไหลของฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1. ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน



รูปที่ 1 แสดงเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน

กระบวนการประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ ท่อไรเซอร์ ท่อดาวเนอร์ ไซโคลน และท่อป้อนกลับ [15] ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองตั้งการทดลองของ [16] โดยศึกษาเฉพาะท่อไรเซอร์สูง 2 เมตร มีทางเข้า 2 ทาง ด้านล่างท่อเป็นทางเข้าแก๊สเผาไหม้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร ด้านขวาล่างเป็นทางเข้าตัวดูดซับ และส่วนขาออกของแก๊ส และของแข็งอยู่ด้านขวาบน มีความกว้าง 0.075 เมตร กำหนดให้แก๊สเผาไหม้มีอุณหภูมิเริ่มต้นเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำอย่างละร้อยละ 15 โดยโมล แก๊สที่เหลือเป็นแก๊สไนโตรเจน ส่วนตัวดูดซับเริ่มต้นมีความหนาแน่น 2,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเท่ากับ 380 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ทำการเทียบผลปริมาณของสัดส่วนปริมาตรของแข็งกับผลจากการทดลองจริง [16]

2. ขั้นตอนปฏิบัติการเชิงตัวเลข

ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน 2 มิติ สร้างโดยโปรแกรม DESIGN MODULER และจัดการแบ่งขนาดช่องจากโปรแกรม MESHING ซึ่งแต่ละช่องเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมที่มีขนาดประมาณ 0.01 เมตร โดยตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในโปรแกรมได้สรุปไว้ดังตารางที่ 1 โดยจำนวนช่องเท่ากับ 6,000 เป็นจำนวนช่องที่ดีที่สุดเนื่องจากเมื่อเพิ่มจำนวนช่องแล้วไม่ทำให้ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งไม่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 1 ตัวแปรเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเชิงพาณิชย์ ANSYS FLUENT รุ่น 19.0

ชนิดการไหล	แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ
แบบจำลองแก๊ส และของแข็ง	Eulerian-Eulerian
ผลต่างช่วงของเวลา	0.001 วินาที
จำนวนการทำซ้ำสูงสุดต่อช่วงผลต่างเวลา	20
เกณฑ์การลู่เข้า	0.0001
การเชื่อมโยงความดัน ความเร็ว	SIMPLE
Specularity coefficient	0.1
Discretization scheme	First order upwind
สัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุด	0.6

3. แบบจำลองจลนศาสตร์ของการดูดซับ

ตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือโซเดียมคาร์บอเนตสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งสมการ (1) ซึ่งในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิด 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาเดินหน้าและย้อนกลับ ผลจากงานวิจัยของ [9] สมการจลนศาสตร์ของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง แสดงตั้งสมการ (2) และ (3)

$$r_{fw} = k_{fw}[CO_2]^{0.4}[H_2O]^{0.4}\varepsilon_s \quad ; \quad k_{fw} = 1 * 10^{-10} \left[e^{\frac{70}{RT}} \right] \quad (2)$$

$$r_{bw} = \left(\frac{1}{[CO_2]} \right)^{0.15} \left(\frac{1}{[H_2O]} \right)^{0.15} \varepsilon_s \quad ; \quad k_{bw} = 7.83 * 10^{-3} \left[e^{\frac{-0.000502}{RT}} \right] \quad (3)$$

4. สมการอนุรักษ์ (Conservation equations)

สมการอนุรักษ์มวลของเฟส q โดยกำหนดให้ q = s, g สำหรับอนุภาคของแข็ง และแก๊ส ตามลำดับตั้งสมการ (4)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_q \rho_q) + \nabla \cdot (\varepsilon_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad ; \quad \sum_{q=1}^n \varepsilon_q = 1 \quad (4)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมของเฟสแก๊ส และอนุภาคของแข็งดังแสดงในสมการ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_g \varepsilon_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \varepsilon_g \rho_g \vec{g} - K_{gs} (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \varepsilon_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\varepsilon_s \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_s - \nabla p_s + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} + K_{gs} (\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (6)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานกวัดแกว่งสำหรับเฟสของแข็งที่แสดงตั้งในสมการ (7)

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \varepsilon_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \varepsilon_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-\nabla p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (\kappa_s \nabla \theta_s) - \gamma_s + \phi_{gs} \quad (7)$$

สมการอนุรักษ์พลังงานของเฟส q (q = s, g) แสดงตั้งในสมการ (8)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_q \rho_q h_q) + \nabla \cdot (\varepsilon_q \rho_q \vec{v}_q h_q) = -\varepsilon_q \frac{\partial p_q}{\partial t} + \bar{\tau}_q : \nabla \vec{v}_q + S_q + \bar{Q}_{gs}; \quad h_q = \int c_{p,q} dT_{q*} \quad (8)$$

สมการอนุรักษ์สปีชีส์ของเฟส q (s, g) และชนิดของสาร i (i = N₂, CO₂, H₂O, Na₂CO₃, NaHCO₃) ตั้งสมการ (9)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_q \rho_q X_i) + \nabla \cdot (\varepsilon_q \rho_q \vec{v}_q X_i) = -\nabla \varepsilon_q J_i + r \quad (9)$$

5. สมการความสัมพันธ์รวมกัน (Constitutive equations)

เทนเซอร์ความเครียด ความเค้นของเฟสแก๊ส ($\bar{\tau}_g$) และอนุภาคของแข็ง ($\bar{\tau}_s$) สมการ (10) และ (11) ตามลำดับ

$$\bar{\tau}_g = \varepsilon_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) - \varepsilon_g \left(\frac{2}{3} \mu_g \right) \nabla \cdot \vec{v}_g \bar{I} \quad (10)$$

$$\bar{\tau}_s = \varepsilon_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) - \varepsilon_s \left(\xi_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (11)$$

โดยที่ μ_s คือ ความเครียดเฉือนของของแข็ง กำหนดให้ $\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin}$

$\mu_{s,col}$ คือ ความหนืดของการชนกัน กำหนดให้ $\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$

$\mu_{s,kin}$ คือ ความหนืดจลนศาสตร์ กำหนดให้ $\mu_{s,kin} = \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \varepsilon_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \varepsilon_s (1 + e_{ss})\right]^2$

ความหนืดรวม (ξ_s) สามารถหาได้จาก $\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$

ความดันของของแข็ง $p_s = \varepsilon_s \rho_s \theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \varepsilon_s^2 g_{0,ss} \theta_s$ (12)

ฟังก์ชันการกระจายตัวในแนวรัศมี $g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{-1}$ (13)

สัมประสิทธิ์การแพร่ $\kappa_s = \frac{150 d_s \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384 (1 + e_{ss}) g_0} \left[1 + \frac{6}{5} (1 + e_{ss}) \varepsilon_s g_{0,ss}\right]^2 + 2 \rho_s \varepsilon_s^2 d_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss} \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$ (14)

collisional dissipation of solid phase fluctuating energy (γ_s) ดังแสดงในสมการ (15)

$\gamma_s = \frac{12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \varepsilon_s^2 \theta_s^{3/2}$ (15)

การแลกเปลี่ยนพลังงานสำหรับเฟสแก๊สและอนุภาคของแข็ง $\phi_{gs} = -3 K_{gs} \theta_s$ (16)

สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างแก๊ส และอนุภาคของแข็งของ Gidaspow : K_{gs} ดังสมการ (17) และ (18)

สำหรับ $\varepsilon_g \geq 0.8$ จะได้ว่า $K_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \varepsilon_g^{-2.65}$ (17)

สำหรับ $\varepsilon_g < 0.8$ จะได้ว่า $K_{gs} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_g \varepsilon_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s}$ (18)

โดยที่สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ (C_D) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_s) ดังแสดงในสมการ (19)

$C_D = \frac{24}{Re_s} [1 + 0.15 (Re_s)^{0.687}]$; $Re_s = \frac{\rho_g d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g}$ (19)

สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างของไหล และอนุภาคของแข็งของ EMMS ; K_{gs} ดังสมการ (20) และ (21)

สำหรับ $\varepsilon_g \geq 0.74$ จะได้ว่า $K_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \omega(\varepsilon)$ (20)

สำหรับ $\varepsilon_g < 0.74$ จะได้ว่า $K_{gs} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_g \varepsilon_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s}$ (21)

โดยที่สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ (C_{DO}) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_k) ดังแสดงในสมการ (22) ถึง (26)

$Re_k < 1000$; $C_{DO} = \frac{24}{Re_k} (1 + 0.15 Re_k^{0.687})$; $Re_k = \frac{\rho_g d_s \varepsilon_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g}$ (22)

$Re_k \geq 1000$; $C_{DO} = 0.44$ (23)

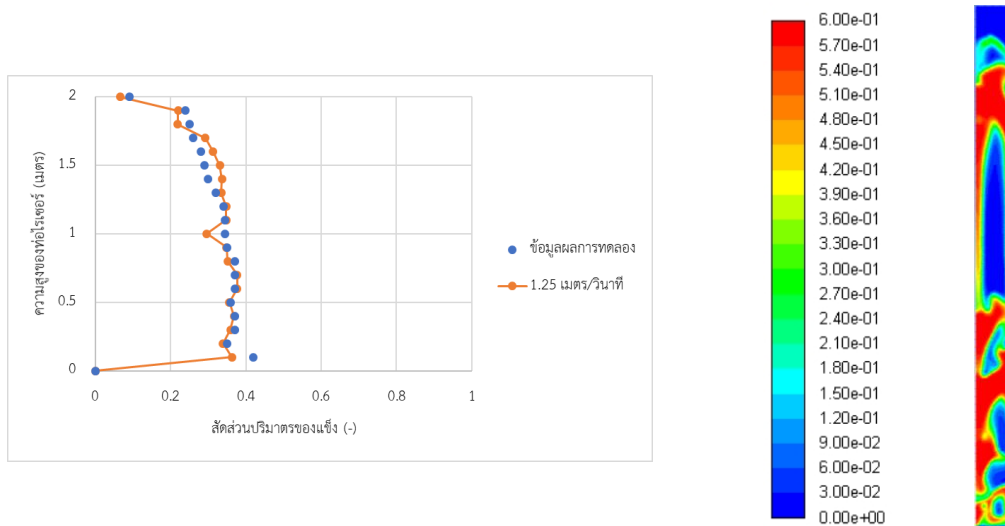
เมื่อ $0.74 \leq \varepsilon_g < 0.82$; $\omega(\varepsilon) = -0.5760 + \frac{0.0214}{4(\varepsilon_g - 0.7463)^2 + 0.0044}$ (24)

เมื่อ $0.82 \leq \varepsilon_g < 0.97$; $\omega(\varepsilon) = -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0040}$ (25)

เมื่อ $\varepsilon_g > 0.97$; $\omega(\varepsilon) = -31.8295 + 32.8295 \varepsilon_g$ (26)

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของอุทกพลศาสตร์ในแบบจำลองกับสภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำโดยเปรียบเทียบผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ความสูงต่าง ๆ ของท่อโรเซอร์จากแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง ในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองท่อโรเซอร์ 2 มิติเมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 1.25 เมตรต่อวินาทีและความเร็วของตัวดูดซับของแข็งมีค่าเท่ากับ 0.2 เมตรต่อวินาทีกับผลจากการทดลอง [16] จากรูปพบว่าแบบจำลองให้ผลสอดคล้องกับการทดลอง



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนปริมาตรของแข็งกับความสูงของท่อโรเซอร์ และ ภาพสัดส่วนปริมาตรของแข็งภายในท่อโรเซอร์

จากนั้น นำแบบจำลองที่ได้มาตรวจสอบจลนศาสตร์ปฏิกิริยาซึ่งกำหนดค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้สมการ (2) และ (3) พบว่า การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ดีกว่าค่าที่รายงานในงานวิจัย [9],[17] เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาในสมการที่ (2) และ (3) เป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าในเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณมากเมื่อเทียบกับการใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ส่งผลให้เมื่อนำสมการดังกล่าวมาใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ที่เล็กลง ที่มีอัตราการป้อนเข้าของแก๊สเผาไหม้น้อยลง แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเกิดได้ดีเท่ากับเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลที่มากเกินไปจริง ส่งผลให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูง จึงทำการปรับผลการทดลองโดยคูณผลจากแบบจำลองด้วยสัมประสิทธิ์เพื่อหาค่าปฏิกิริยาให้น้อยลง เพื่อลดการถ่ายโอนมวลในระบบโดยให้ได้ผลที่สอดคล้องกับผลที่รายงานในงานวิจัยที่ใช้ตัวดูดซับของแข็งไซเตียมคาร์บอเนต ซึ่งค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงร้อยละ 67.32-82.00 [9],[17] จากการพิจารณาผลจากแบบจำลอง พบว่าเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเท่ากับ 0.15 ให้ค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับรายงานวิจัย

ทำการศึกษาผลการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเร็วของแก๊สเผาไหม้ ในช่วง 1-2 เมตรต่อวินาที และความเร็วของตัวดูดซับของแข็งในช่วง 0.15-0.3 เมตรต่อวินาที จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ดังแสดงผลในตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาผลจากแบบจำลองจะพบว่าที่ความเร็วของแก๊สเผาไหม้เท่ากัน การเพิ่มความเร็วของตัวดูดซับ

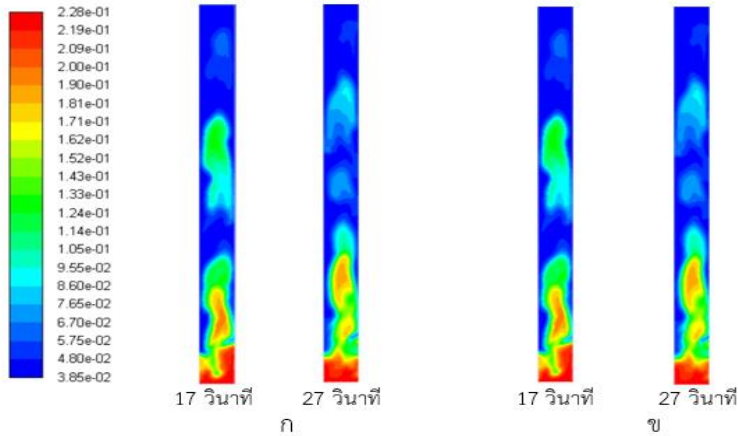
ส่งผลให้ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณตัวดูดซับของแข็งที่เข้าท่อโรเตอร์มีมากขึ้นแต่ปริมาณแก๊สเผาไหม้ที่เข้ามาในท่อโรเตอร์มีเท่าเดิมทำให้สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น สำหรับกรณีที่ความเร็วของตัวดูดซับของแข็งคงที่ การเพิ่มความเร็วของแก๊สเผาไหม้ส่งผลให้ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าท่อโรเตอร์มีมากขึ้นแต่ตัวดูดซับของแข็งมีปริมาณเท่าเดิม ทำให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำได้น้อยลง อย่างไรก็ตาม กรณีที่ 1 ให้ผลที่แตกต่างกรณีอื่นๆ เนื่องจากความเร็วของแก๊สเผาไหม้และตัวดูดซับของแข็งที่ป้อนเข้าท่อโรเตอร์มีค่าน้อย ส่งผลให้ความสามารถในการพาตัวดูดซับของแข็งเคลื่อนที่ขึ้นไปในท่อโรเตอร์ช้าลง ทำให้แก๊สเผาไหม้และตัวดูดซับของแข็งมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยากันได้นานขึ้นจึงทำให้กรณีที่ 1 มีค่าร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากกว่ากรณีที่ 2

ตารางที่ 2 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละกรณี

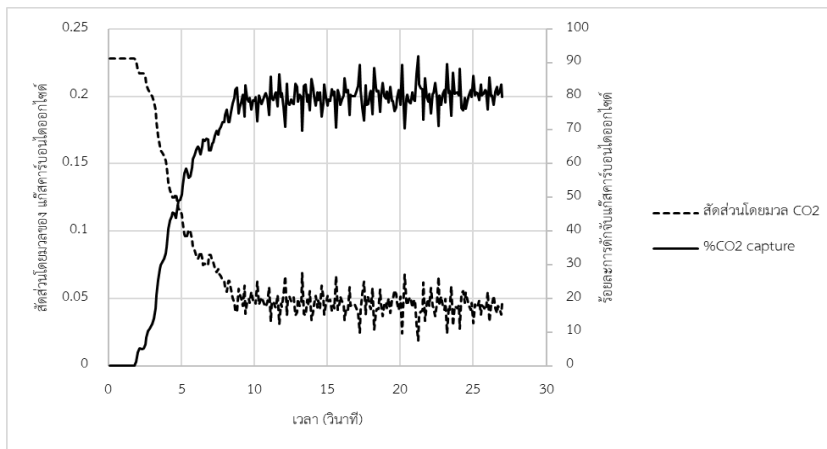
กรณี	ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ (เมตร/วินาที)	ความเร็วของตัวดูดซับของแข็ง (เมตร/วินาที)	ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
1	1	0.15	79.84
2	1	0.2	79.36
3	1	0.25	80.17
4	1	0.3	80.51
5	1.25	0.15	69.58
6	1.25	0.2	70.13
7	1.25	0.25	73.36
8	1.25	0.3	73.57
9	1.75	0.15	55.84
10	1.75	0.2	58.23
11	1.75	0.25	58.72
12	1.75	0.3	59.41
13	2	0.15	49.93
14	2	0.2	52.25
15	2	0.25	53.47
16	2	0.3	54.57

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่า กรณีที่ 4 ที่ความเร็วของแก๊สเผาไหม้เท่ากับ 1 เมตรต่อวินาทีและความเร็วของตัวดูดซับของแข็งเท่ากับ 0.3 เมตรต่อวินาที ค่าร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดเท่ากับ 80.51 จากรูปที่ 3 แสดงแผนภาพของสัดส่วนโดยมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำสำหรับระบบคงตัวเสมือน ณ เวลา 17 และ 27 วินาที พบว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำจะมีมากในบริเวณด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์เนื่องจากการป้อนแก๊สเผาไหม้เข้ามาและปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำจะค่อยๆ ลดน้อยลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวดูดซับของแข็ง ส่วนรูปที่ 4 แสดงร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พิจารณาที่บริเวณทางออกท่อโรเตอร์ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกสัดส่วนโดยมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่า

เท่ากับ 0.228 เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที เกิดปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้สัดส่วนโดยมวลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเหลือ 0.045 และเสมือนคงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เริ่มจากร้อยละ 0 และเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 80.51 ดังรูป



รูปที่ 3 แผนภาพสัดส่วนโดยมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ก) และไอน้ำ (ข) ที่เวลา 17 และ 27 วินาทีของกรณีที่ 4



รูปที่ 4 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พิจารณาที่บริเวณทางออกท่อไรเซอร์ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีที่ 4

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 2 ไปสร้างสมการความสัมพันธ์ ระหว่าง ตัวแปรดำเนินการ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้และความเร็วของตัวดูดซับ กับ ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในสมการ (27) และ (28) ตามลำดับ สมการทั้งสองใช้ได้ในช่วงความเร็วแก๊สเผาไหม้อยู่ในช่วง 1–2 เมตรต่อวินาที และความเร็วของตัวดูดซับอยู่ในช่วง 0.15–0.3 เมตรต่อวินาที เมื่อนำมาประมาณค่าจะได้ผลดังตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าเกิดร้อยละความผิดพลาดของทั้งสมการที่ (27) และ (28) เนื่องจากสมการที่ได้เป็นสมการเส้นตรง ทำให้ผลข้อมูลบางจุดมีความคลาดเคลื่อนออกจากสมการ จนเกิดร้อยละความผิดพลาดขึ้น โดยสมการที่ (27) และ (28) สามารถนำไปใช้ในการทำนายความเร็วของตัวดูดซับของแข็ง และความเร็วของแก๊สเผาไหม้ตามลำดับ เพื่อใช้ควบคุมร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้ตรงกับค่าที่ต้องการเมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ ในสมการที่ (27) และความเร็วของตัวดูดซับของแข็ง ในสมการที่ (28) เปลี่ยนไป

$$v_s = -2.665 + 0.738v_g + 0.02723 \%CO_2 capture \quad (27)$$

$$v_g = 3.712 + 0.8097v_s - 0.03657 \%CO_2 capture \quad (28)$$

ตารางที่ 3 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแบบจำลองกับผลที่ได้จากสมการความสัมพันธ์

กรณี	\bar{v}_g (เมตร/วินาที)	%CO2 capture	\bar{v}_s (เมตร/ วินาที)	จากการคำนวณ		ร้อยละความ ผิดพลาด (27)	ร้อยละความ ผิดพลาด (28)
				\bar{v}_s (เมตร/วินาที)	\bar{v}_g (เมตร/วินาที)		
1	1.00	79.84	0.15	0.25	0.91	-64.74	8.64
2	1.00	79.36	0.2	0.23	0.97	-16.93	2.81
3	1.00	80.17	0.25	0.26	0.98	-2.46	1.76
4	1.00	80.51	0.3	0.27	1.01	11.62	-1.08
5	1.25	69.58	0.15	0.15	1.29	-1.37	-3.13
6	1.25	70.13	0.2	0.17	1.31	16.46	-4.75
7	1.25	73.36	0.25	0.26	1.23	-2.03	1.47
8	1.25	73.57	0.3	0.26	1.26	13.03	-1.15
9	1.75	55.84	0.15	0.15	1.79	2.01	-2.37
10	1.75	58.23	0.2	0.21	1.74	-6.08	0.32
11	1.75	58.72	0.25	0.23	1.77	9.80	-0.97
12	1.75	59.41	0.3	0.24	1.78	18.61	-1.85
13	2.00	49.93	0.15	0.17	2.01	-13.74	-0.37
14	2.00	52.25	0.2	0.23	1.96	-16.87	1.84
15	2.00	53.47	0.25	0.27	1.96	-6.76	2.04
16	2.00	54.57	0.3	0.30	1.96	1.00	2.04

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยชิ้นนี้ศึกษาผลของความเร็วของแก๊สเผาไหม้และความเร็วของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเนื่องจากมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามามากขึ้นแต่ปริมาณตัวดูดซับยังคงเท่าเดิม และเมื่อเพิ่มความเร็วของตัวดูดซับจะส่งผลให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีตัวดูดซับเข้ามาในระบบเพิ่มขึ้น และได้ใช้ข้อมูลเพื่อเขียนสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดำเนินการคือความเร็วของแก๊สเผาไหม้และความเร็วของตัวดูดซับได้กับร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สมการดังกล่าวจะนำไปใช้งานในการควบคุมกระบวนการต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับสถานที่ในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งคณาจารย์ นิสิตระดับมหาบัณฑิตและดุษฎีบัณฑิต ที่คอยช่วยเหลือรวมทั้งให้คำแนะนำในการทำวิจัยชิ้นนี้ และขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยี และวัสดุ สำหรับเงินทุนสำหรับการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] McGee M. Atmospheric CO₂ concentration. Retrieved from <<https://www.co2.earth/>> [2018 June 29].
- [2] Huang, A., Chen, L. H., Chen, C. H., Tsai, H. Y., & Tung, K. L. (2018). Carbon dioxide capture using an omniphobic membrane for a gas-liquid contacting process. *Journal of Membrane Science*, 556, 227–237.
- [3] Yousef, A. M., El-Maghlany, W. M., Eldrainy, Y. A., & Attia A. (2018). New approach for biogas purification using cryogenic separation and distillation process for CO₂ capture. *Energy*, 156, 328-351.
- [4] Vega, F., Cano, M., Camino, S., Navarrete, B., & Camino, J. A. (2018). Evaluation of the absorption performance of amine-based solvents for CO₂ capture based on partial oxy-combustion approach. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 73, 95–103.
- [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] Luis, P. (2016). Use of monoethanolamine (MEA) for CO₂ capture in a global scenario: Consequences and alternatives. *Desalination*, 380, 93–99.
- [7] Gupta, R. P., Green, D. A., & McMichael, W. J. (2004). Carbon Dioxide Capture Using Dry Sodium-Based Sorbents, *Energy & Fuels*, 18, 569-575.
- [8] Nelson, T. O., Coleman, L. J. I., Green, D. A., & Gupta R. P. (2009). The Dry Carbonate Process: Carbon dioxide recovery from power plant flue gas, *Energy Procedia*, 1, 1305–1311.
- [9] 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.
- [10] Cebrucean, D., Cebrucean, V., & Ionel, I. (2014). CO₂ Capture and Storage from Fossil Fuel Power Plants, *Energy Procedia*, 63, 18 – 26.
- [11] Anderson, J.D. (1995). *Computational fluid dynamics–The basics with applications*. McGraw-Hill: New York.
- [12] Ayobi, M., Shahhosseini, S., & Behjat, Y. (2014). Computational and experimental investigation of CO₂ capture in gas–solid bubbling fluidized bed, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45, 421–430.
- [13] 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.
- [14] Nouria, M., Rahpaimab, G., Nejada, M. M., & Imani, M. (2018). Computational simulation of CO₂ capture process in a fluidized-bed reactor, *Computers and Chemical Engineering*, 108, 1–10.
- [15] Thummakul, T., Gidaspow, D., Piumsomboon, P., & Chalermssinsuwan, B. (2017). CFD simulation of CO₂ sorption on K₂CO₃ solid sorbent in novel high flux circulating-turbulent fluidized bed riser: Parametric statistical experimental design study, *Applied Energy*, 190, 122–134.

- [16] Chalermssinsuwan, B., Boonprasop, S., Nimmanterdwong, P., & Piumsomboon, P. (2014). Revised fluidization regime characterization in high solid particle concentration circulating fluidized bed reactor, *International Journal of Multiphase Flow*, 66, 26–37.
- [17] Kongkitisupchai, S., & Gidaspow D. (2013). Carbon Dioxide Capture Using Solid Sorbents in a Fluidized, *AIChE Journal*, 59, 4519-4537.