

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโรเตอร์สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบอุณหภูมิต่ำ
คงที่



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION OF NONISOTHERMAL CARBON
DIOXIDE CAPTURE RISER



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

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโรเตอร์สำหรับ ตักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบอนุกรมไม่คงที่
โดย	น.ส.อมลวรรณ ศรีวิชัย
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เถลิ้มสินสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เถลิ้มสินสุวรรณ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)	
.....	กรรมการ
(ดร.ธีรวัฒน์ เสมอ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)	



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

อมลวรรณ ศรีวิชัย : การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของไรเซอร์สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบอนุกรมไม่คงที่. (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION OF NONISOTHERMAL CARBON DIOXIDE CAPTURE RISER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

ภาวะโลกร้อนเป็นปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น สาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของแก๊สเรือนกระจก โดยเฉพาะอย่างยิ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการเผาไหม้ที่ถูกปลดปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนออกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเทคโนโลยีที่ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ที่ได้รับความสนใจทั้งระดับการทดลองและระดับอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย คือ การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนและใช้ตัวดูดซับชนิดของแข็ง ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ หอไรเซอร์ที่ใช้ในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และหอดาวเนอร์ที่ใช้ในการฟื้นฟูหรือคืนสภาพตัวดูดซับ ในการศึกษาจึงมุ่งเน้นในส่วนของหอไรเซอร์ พบว่า ความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ยังไม่ดีพอเนื่องจากอุณหภูมิถึงสมดุลปฏิกิริยาเคมี งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของหอไรเซอร์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนแบบอนุกรมไม่คงที่ จากผลการศึกษาพบจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณและเวลาจำลองที่เหมาะสม คือ จำนวนเซลล์การคำนวณ 400,000 เซลล์และเวลาในการคำนวณ 100 วินาทีตามลำดับ นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของตัวแปรกระบวนการต่าง ๆ ต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์ ประกอบด้วย อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น ขนาดท่อน้ำหล่อเย็น และลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากอุณหภูมิจะส่งผลให้สมดุลการดูดซับเปลี่ยนไป

สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6172095223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Computational fluid dynamic model, Circulating fluidized bed riser,
Carbon dioxide capture

Amolwan Sornvichai : COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION OF
NONISOTHERMAL CARBON DIOXIDE CAPTURE RISER. Advisor: Assoc. Prof.
BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D. Co-advisor: Prof. PORNPOTE
PIUMSOMBOON, Ph.D.

Global warming is the phenomenon where the global average temperature is rising due to the increasing of greenhouse gas, especially carbon dioxide (CO₂), in the atmosphere. The main source of CO₂ is the flue gas from the combustion process. Thus, it is necessary to control the amount of CO₂ before emitting to the atmosphere. The post-combustion CO₂ capture technology has been widely given an attention in both laboratory and industry. The CO₂ capture using solid sorbent in circulating fluidized bed reactor is the beneficial alternative as the solid sorbent can adsorb CO₂ in the riser and can regenerate in the downer. This study then focused on the riser as the adsorption process was the main consideration. However, CO₂ capture capacity is limited due to the equilibrium at the specific system temperature. This study developed the computational fluid dynamics model of the nonisothermal circulating fluidized bed riser which included effect of the cooling water tube. The simulation procedure found the suitable grid number and simulation time as 400,000 cells and 100 s, respectively. In addition, the effects of operating parameters on CO₂ capture capacity consisting of cooling water temperature, flow rate of cooling water, distance between cooling stage, diameter of cooling tube and configuration of cooling tubes in riser were investigated. The results showed that the temperature had an effect on CO₂ capture because of the equilibrium system shifting.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของโรเตอร์สำหรับดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบบอนุภูมิภาคไม่คงที่ สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยผู้จัดทำได้รับความอนุเคราะห์ และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน จึงขอขอบพระคุณทุกท่าน ไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางและกระบวนการทำงานตลอดการทำงานวิจัย รวมไปถึงสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการซื้ออุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อจัดทำชุดวิจัยที่เพียบพร้อมเพื่อให้ผู้จัดทำสามารถทำงานวิจัยได้อย่างสะดวก และสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ เสมอ และ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษา รวมถึงค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในงานวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมทั้งบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณพี่สุชาติ กริแสง และ ดร.รัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาด้านวิชาการ และขอขอบคุณ สมาชิกทุกคนของห้องปฏิบัติการ Cybernetics และ Fluidization ที่ให้การสนับสนุน และคำปรึกษา ตลอดจนถึง พี่นง ฤกษ์ และน้อง ๆ ที่เป็นกำลังใจให้แก่ผู้วิจัยเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลัง ที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนในด้านต่าง ๆ แก่ผู้จัดทำเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

อมลวรรณ ศรีวิชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ข้อยกเว้นของงานวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความของงานวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.8 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย	5
บทที่ 2	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.1.1 ภาวะโลกร้อน	6
2.1.2 แหล่งกำเนิดแก๊สเรือนกระจก	6
2.1.3 การเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตไฟฟ้า.....	7
2.1.4 การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	7
2.1.5 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	8

2.1.6	กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	12
2.1.7	การดูดซับ	14
2.1.8	ฟลูอิดไอเซนซ์	17
2.1.9	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	27
2.2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3	34
3.1	ข้อมูลเบื้องต้นในงานวิจัย	34
3.2	การสร้างแบบจำลอง	34
3.3	การศึกษาแบบจำลองในงานวิจัยแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี	37
3.4	การศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการ (Operating Parameters).....	42
บทที่ 4	47
4.1	พลศาสตร์ของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา (Cold Flow).....	47
4.1.1	การหาจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณ	48
4.1.2	การหาเวลาที่เหมาะสมในการคำนวณ	51
4.2	พลศาสตร์ของระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยา	53
4.2.2	ผลของตัวแปรกระบวนการต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	59
4.2.2.1	ผลของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น	61
4.2.2.2	ผลของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	66
4.2.2.3	ผลของระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์	71
4.2.2.4	ผลของขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์	76
4.2.2.5	ผลของลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์	82
บทที่ 5	87
5.1	สรุปผลงานวิจัย	87

5.1.1 ผลที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่ไม่มี การเกิดปฏิกิริยา.....	87
5.1.2 ผลที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่มี การเกิดปฏิกิริยา.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ	88
บรรณานุกรม.....	94
ภาคผนวก.....	95
ประวัติผู้เขียน.....	97



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภาคการผลิตไฟฟ้า.....	8
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์	12
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอนุภาคของแข็งด้วยวิธีการของ Geldart.....	20
ตารางที่ 4 ค่า C_1 และ C_2 สำหรับการคำนวณความเร็วต่ำสุด.....	23
ตารางที่ 5 ค่า C_1 และ C_2 สำหรับการคำนวณค่าความเร็วส่งผ่าน	24
ตารางที่ 6 รายละเอียดตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย	35
ตารางที่ 7 การแบ่งจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณที่เหมาะสม.....	41
ตารางที่ 8 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการศึกษา.....	42
ตารางที่ 9 อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการศึกษา.....	43
ตารางที่ 10 ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซอ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	43
ตารางที่ 11 ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซอ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	44
ตารางที่ 12 กรณีศึกษา 21 กรณี.....	45
ตารางที่ 13 ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซอ์ที่ใช้ในการศึกษา.....	71
ตารางที่ 14 ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซอ์.....	77

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้.....	9
รูปที่ 2 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์.....	10
รูปที่ 3 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้	11
รูปที่ 4 การจำแนกประเภทอนุภาคของแข็งด้วยวิธีการของ Geldart	19
รูปที่ 5 ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน	21
รูปที่ 6 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน	26
รูปที่ 7 ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง.....	30
รูปที่ 8 แผนภาพของหอไรเซอร์แบบ 3 มิติที่ใช้ในการจำลอง	36
รูปที่ 9 ลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์แบบต่างๆ	44
รูปที่ 10 ความสูงที่ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลอง	48
รูปที่ 11 การกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่ได้จากการจำลองโดยใช้เซลล์ในการ คำนวณที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 200,000 300,000 400,000 และ 500,000 เซลล์.....	50
รูปที่ 12 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งในไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด ที่ใช้จำนวนเซลล์การคำนวณที่ 400,000 เซลล์.....	50
รูปที่ 13 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในหอไรเซอร์	51
รูปที่ 14 สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ความสูง $h/H = 0.1732$	52
รูปที่ 15 สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ความสูง $h/H = 0.2281$	52
รูปที่ 16 สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ความสูง $h/H = 0.2828$	53
รูปที่ 17 ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ.....	55
รูปที่ 18 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	56
รูปที่ 19 คอนทัวร์สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนต.....	57
รูปที่ 20 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	58

รูปที่ 21	คอนทัวร์สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต.....	58
รูปที่ 22	สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	59
รูปที่ 23	เส้นโค้งสมดุลโพแทสเซียมคาร์บอเนตของปฏิกิริยาการดูดซับ.....	60
รูปที่ 24	ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	63
รูปที่ 25	สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิต่างๆ ของท่อน้ำหล่อเย็น.....	64
รูปที่ 26	สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่อุณหภูมิต่างๆ ของท่อน้ำหล่อเย็น.....	64
รูปที่ 27	คอนทัวร์อุณหภูมิแก๊สที่อุณหภูมิท่อน้ำหล่อเย็นต่างๆ ที่เวลาในการจำลอง 100 วินาที.....	65
รูปที่ 28	ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ.....	68
รูปที่ 29	คอนทัวร์อุณหภูมิแก๊สที่อัตราการไหลน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ.....	68
รูปที่ 30	สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ.....	69
รูปที่ 31	สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ.....	70
รูปที่ 32	ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิไม่คงที่.....	72
รูปที่ 33	ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ระยะห่างต่าง ๆ.....	73
รูปที่ 34	สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น.....	74
รูปที่ 35	สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น.....	75
รูปที่ 36	ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิไม่คงที่.....	76
รูปที่ 37	ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ ระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น (ก) $h/H = 0.1732$ (ข) $h/H = 0.2281$ (ค) $h/H = 0.2828$	79
รูปที่ 38	คอนทัวร์แสดงอุณหภูมิของแก๊สที่ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ เวลาการจำลอง 100 วินาที.....	79
รูปที่ 39	คอนทัวร์แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรที่ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ เวลาการจำลอง 100 วินาที.....	80
รูปที่ 40	สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ.....	81
รูปที่ 41	สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ.....	81

รูปที่ 42 ลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิตั้งที่..... 82

รูปที่ 43 ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับลักษณะการจัดเรียง
 ท่อน้ำหล่อเย็น (ก) $h/H = 0.1732$ (ข) $h/H = 0.2281$ (ค) $h/H = 0.2828$ 85

รูปที่ 44 ลักษณะการเรียงท่อแบบ (ก) แนวเดียวกัน (ข) แบบสลับ 85

รูปที่ 45 เวกเตอร์ความเร็วของแก๊สในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิตั้งที่ 86



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยรวมของประเทศไทยในปี 2563 มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับช่วงเดียวกันของปีก่อน เนื่องมาจากปัญหาการแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) ที่มีการแพร่ระบาดอย่างรุนแรงตั้งแต่ช่วงปลายเดือนมกราคม 2563 เป็นต้นมา ส่งผลให้ประเทศไทยมีการลดการใช้งานคมนาคมขนส่งภายในประเทศ แต่ในทางกลับกันพบว่าภาคการผลิตไฟฟ้ามีส่วนการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าภายในประเทศที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นของภาคการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหิน ส่งผลกระทบต่อปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเป็นตัวการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้น ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้ที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวได้รับความสนใจค่อนข้างมากทั้งด้านอุตสาหกรรมและงานวิจัย เพื่อใช้ในการลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ [1]

เทคโนโลยีที่ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีหลายวิธี เช่น การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion) การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบใช้ออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิง (Oxyfuel Combustion) และการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) [2] งานวิจัยนี้ สนใจการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ ซึ่งจะใช้ตัวดูดซับชนิดของแข็งเป็นตัวดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการใช้ตัวดูดซับชนิดของแข็ง มีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการดักจับด้วยวิธีอื่น ๆ คือ สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง มีความคงทน สามารถจัดเก็บและฟื้นฟูได้ง่าย โดยการเพิ่ม-ลดอุณหภูมิหรือความดัน [3] จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมในการนำมาใช้ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ เนื่องจากเป็นตัวดูดซับของแข็งที่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูง [4] นอกจากนี้ยังพบว่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งภายใต้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized Bed Reactor) มีส่วนช่วยทำให้เกิดการดูดซับได้ดีขึ้น เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดมีหลักการทำงาน คือ ของแข็งจะเกิดการประพุดตัว

คล้ายของไหลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ส่งผลให้เกิดการผสมที่สูงทำให้อนุภาคของตัวดูดซับของแข็งสามารถสัมผัสกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีอีกด้วย

เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยส่วนประกอบหลักที่ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และคืนสภาพตัวดูดซับ 2 ส่วน คือ หอดูดซับหรือหอไรเซอร์ (Riser) และหอคืนสภาพหรือหอดาวเนอร์ (Downer) หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต เริ่มจากการป้อนแก๊สไอเสียหลังการเผาไหม้เข้าไปในส่วนของหอไรเซอร์ที่บรรจุตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต จากนั้นแก๊สไอเสียจะเกิดปฏิกิริยากับตัวดูดซับชนิดของแข็งได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต (KHCO_3) แก๊สสะอาดที่ผ่านการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้วจะถูกส่งออกสู่ชั้นบรรยากาศ ส่วนของแข็งโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตจะถูกส่งไปยังหอดาวเนอร์เพื่อทำการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และคืนสภาพของแข็งโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตเป็นของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตด้วยการใช้อุณหภูมิ จากนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ จะถูกนำไปกักเก็บ ส่วนของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตจะถูกส่งกลับไปยังหอไรเซอร์เพื่อทำการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป [5] จากข้อมูลข้างต้นพบว่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ จึงมีการนำกระบวนการดังกล่าวมาศึกษาโดยใช้โปรแกรมคำนวณทางคอมพิวเตอร์ในการทำนายประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์อาศัยความสามารถของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ โดยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจะคำนวณด้วยชุดสมการอนุรักษ์ (Conservation Equations) ประกอบด้วยสมการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation) ในการวิเคราะห์ด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีปัจจัยที่จำเป็น 3 ประการ คือ สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) ภาวะขอบเขต (Boundary Condition) และลักษณะรูปทรง (Geometry) [6] จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษากระบวนการ

ดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนในส่วนของหอไรเซอร์และหอดาวเนอร์ ซึ่งปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเกิดในส่วนของหอไรเซอร์ แต่พบว่าประสิทธิภาพการดักจับที่ได้ยังมีประสิทธิภาพต่ำ [7] [8] เนื่องจากอุณหภูมิในหอไรเซอร์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตถึงจุดสมดุลปฏิกิริยายาเคมี ทำให้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตไม่สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยมีการใส่ท่อให้น้ำหล่อเย็นลงในหอไรเซอร์เพื่อลดอุณหภูมิในหอไรเซอร์ รวมถึงศึกษาตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิไม่คงที่

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิไม่คงที่
- 2) ศึกษาผลกระทบของตัวแปรกระบวนการ ต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิไม่คงที่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) จำลองพลศาสตร์ของหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิไม่คงที่ในระบบสามมิติ เพื่อหาแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมที่สุด โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Boonprasop และคณะ [7] [8]
- 2) จำลองพลศาสตร์ของหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิไม่คงที่จากกระบวนการหลังการเผาไหม้และศึกษาตัวแปรกระบวนการ คือ อุณหภูมิของน้ำขาเข้า อัตราการไหลของน้ำขาเข้า ระยะห่างระหว่างท่อให้น้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ ลักษณะการจัดเรียงท่อให้น้ำหล่อเย็น และขนาดของท่อให้น้ำหล่อเย็น ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

1.4 ข้อยกเว้นของงานวิจัย

- 1) ทำการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบสามมิติเท่านั้น
- 2) ทำการจำลองในส่วนของหอดูดซับหรือหอไรเซอร์เท่านั้น

1.5 คำจำกัดความของงานวิจัย

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน หอไรเซอร์แบบอนุภูมิภาคไม่คงที่ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบสามมิติ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการและผลของตัวแปรกระบวนการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน

1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 1) ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ภายในหอไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน
- 2) วางแผนและออกแบบการทดลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์แบบอนุภูมิภาคไม่คงที่ ซึ่งมีฐานรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด กว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร และสูง 100 เซนติเมตร นอกจากนี้มีการใส่ท่อทองแดงสำหรับน้ำหล่อเย็นในหอไรเซอร์ ชนิดของตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ คือ โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตบนตัวรองรับแกมมา-อลูมินา ($K_2CO_3/\gamma-Al_2O_3$) โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Boonprasop และคณะ [7] [8] และใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็ง โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตจากงานวิจัยของ Kongkitisupchai และคณะ [9]
- 3) พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยหอไรเซอร์แบบอนุภูมิภาคไม่คงที่ในระบบสามมิติด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดลองของ Boonprasop และคณะ [7] [8]
- 4) ศึกษากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับชนิดของแข็ง โดยการป้อนแก๊สไอเสียหลังการเผาไหม้เข้าไปในหอไรเซอร์แบบอนุภูมิภาคไม่คงที่ รวมถึงศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการ คือ อนุภูมิภาคของน้ำขาเข้า อัตราการไหลของน้ำขาเข้า ระยะห่างระหว่างท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ ลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็น และขนาดของท่อน้ำหล่อเย็น ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์

5) วิเคราะห์ผล สรุปผลการทดลอง เขียนบทความวิจัย และวิทยานิพนธ์

1.8 ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัยประกอบด้วยเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ข้อจำกัดของงานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัย และ ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับภาวะโลกร้อน แหล่งกำเนิดแก๊สเรือนกระจก การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยี การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ การดูดซับ ฟลูอิดเซชัน พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น สมการอนุรักษ์พื้นฐาน ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง และการจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง

บทที่ 4 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งในหอไรเซอร์ประกอบการทดสอบปริมาตรควบคุมที่ใช้ในการคำนวณและเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะเสถียรคงตัว การเปรียบเทียบผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณกับผลการทดลองจริง และผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ภาวะโลกร้อน

ปัจจุบันทั่วโลกประสบกับปัญหาสภาวะภูมิอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลง และมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น อันเนื่องมาจากภาวะโลกร้อน (Global Warming) สาเหตุหลักของปัญหาเกิดจากการเพิ่มขึ้นของแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse Gas) ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับและกักเก็บความร้อนที่สะท้อนจากโลกสู่ชั้นบรรยากาศ โดยผลจากการที่อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกสูงขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) ซึ่งส่งผลกระทบต่อดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ทั้งทางตรงและทางอ้อม [10]

2.1.2 แหล่งกำเนิดแก๊สเรือนกระจก

แก๊สเรือนกระจกมีทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและที่เกิดจากการดำเนินกิจกรรมของมนุษย์ ซึ่งแก๊สเรือนกระจกมีคุณสมบัติเด่น คือ สามารถดูดซับรังสีความร้อนได้ดี แก๊สเรือนกระจกประกอบไปด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สมีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) สารซีเอฟซี (CFC) และโอโซน (O_3) เป็นต้น [11] โดยแหล่งกำเนิดของแก๊สที่กล่าวมาข้างต้นมีที่มา ดังนี้

- 1) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีที่มาจาก การเผาไหม้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงโรงงานอุตสาหกรรม การเผาป่าใช้พื้นที่สำหรับอยู่อาศัย การปศุสัตว์ และการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น
- 2) แก๊สมีเทนมีที่มาจาก การย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต จากการทำนาข้าว ปศุสัตว์ และการเผาไหม้มูลชีวภาพ การเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทถ่านหิน น้ำมัน และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น
- 3) แก๊สไนตรัสออกไซด์มีที่มาจาก การย่อยสลายของซากสิ่งมีชีวิตโดยแบคทีเรีย ซึ่งแก๊สไนตรัสออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากอุตสาหกรรมที่ใช้กรดไนตริกในกระบวนการผลิต เช่น อุตสาหกรรมผลิตเส้นใยไนลอน อุตสาหกรรมเคมีและพลาสติก เป็นต้น
- 4) สารซีเอฟซีมีที่มาจาก โรงงานอุตสาหกรรม และอุปกรณ์เครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ตู้เย็น และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน การลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศจึงเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อน โดยงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศจากภาคการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงถ่านหิน

2.1.3 การเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตไฟฟ้า

การเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตไฟฟ้า ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะโรงไฟฟ้าถ่านหิน เนื่องจากเป็นโรงไฟฟ้าที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับประเทศไทย มีต้นทุนต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าถูกที่สุด สำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหินที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทย คือ โรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งใช้ถ่านหินลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะมาใช้ในการผลิตไฟฟ้า

สำหรับขั้นตอนในการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินมีดังนี้ ถ่านหินจะถูกส่งเข้าสู่ไซโล โดยระบบสายพานลำเลียง และป้อนเข้าสู่ตัวบดถ่านหิน ให้เป็นเม็ดขนาดเล็กลง ให้ง่ายต่อการเผาไหม้เพื่อใช้ในการต้มน้ำในหม้อต้ม (Boiler) ทำให้เกิดไอน้ำที่มีความดันสูง ซึ่งไอน้ำที่มีความดันสูงจะอัดตัวกันอยู่ในท่อที่เชื่อมโยงใบพัดกังหัน (Turbine) เพื่อขับใบพัดกังหันให้หมุนสร้างกระแสไฟฟ้าออกมา ส่วนอากาศเสียจากการเผาไหม้ที่ส่งออกมาประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และเถ้า (Ash) โดยอากาศเสียดังกล่าวจะถูกนำไปกำจัดต่อไป [12]

2.1.4 การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สาเหตุหลักของภาวะโลกร้อนเกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรมการใช้ชีวิตของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่สำคัญของการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [12] โดยสถานการณ์การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้พลังงานภายในประเทศไทยของปี 2563 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเดียวกัน (มกราคม-มิถุนายน) ของปี 2562 ประเทศไทยมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในภาคการผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยสาเหตุการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่กล่าวมาข้างต้นเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากมีการความต้องการในการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 1 การปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภาคการผลิตไฟฟ้า [13]

	2561	2562	(ม.ค. - มิ.ย.)		การเปลี่ยนแปลง (%)		
			2560	2561	2561	2562	2563
น้ำมันสำเร็จรูป	0.2	0.1	0.08	0.06	-27.9	-8.9	-25.5
ถ่านหินลิกไนต์	36.8	34.9	17.8	18.4	0.3	-5.2	3.1
ก๊าซธรรมชาติ	57.0	59.4	30.4	28.2	-1.4	4.2	-7.4
รวม	93.9	94.4	48.3	46.6	-0.8	0.5	-3.6

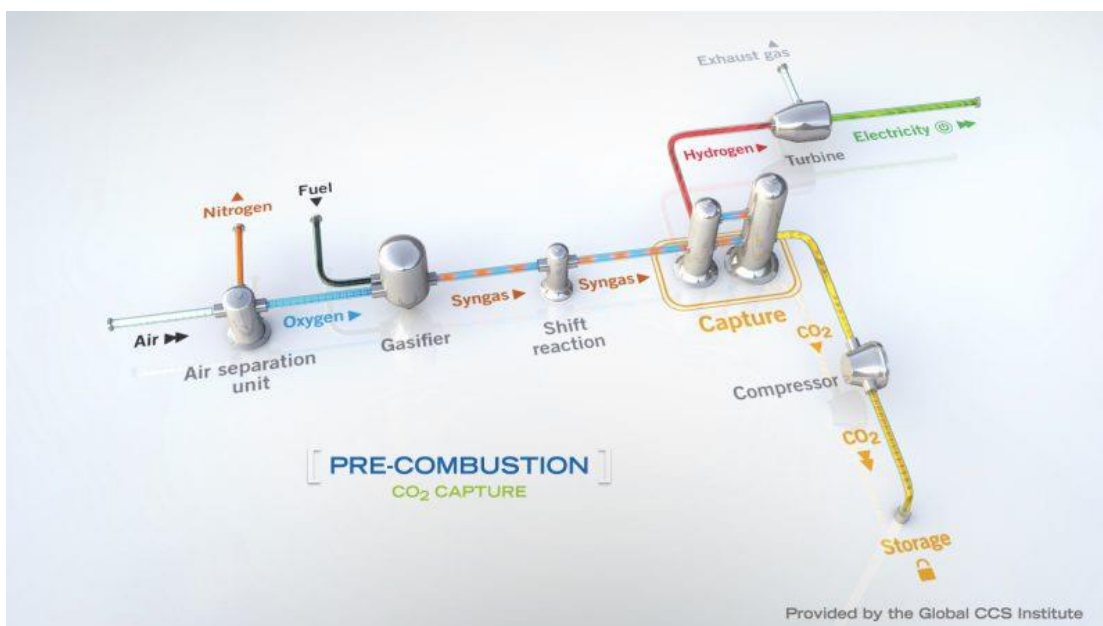
จากรายงานการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคการผลิตไฟฟ้า พบว่าผู้ผลิตไฟฟ้าต่างมุ่งเน้นในการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าให้สูงขึ้นและมีความพยายามในการลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ โดยมีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาปรับใช้ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนสำคัญคือ 1. ขั้นตอนก่อนการเผาไหม้เชื้อเพลิง (Pre-combustion) 2. ขั้นตอนระหว่างการเผาไหม้เชื้อเพลิง (Combustion) และ 3. ขั้นตอนหลังการเผาไหม้เชื้อเพลิง (Post-combustion)

2.1.5 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ Capture) คือ การนำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งสามารถทำได้ในทุกขั้นตอนของการเผาไหม้ จึงเป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญในการลดปริมาณการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ โดยเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประกอบด้วย 3 วิธี

2.1.5.1 การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion Capture)

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีที่แปรสภาพเชื้อเพลิงให้อยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรเจน (H₂) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ด้วยปฏิกิริยาแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) หรือกระบวนการเปลี่ยนสภาพ (Reforming) โดยหลังจากทำการปรับคุณสมบัติให้เหมาะสมก่อนนำไปกักเก็บหรือใช้งาน ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนจะถูกนำไปเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ ส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกส่งไปทำการอัดและกักเก็บในพื้นที่กักเก็บ [14] [15]

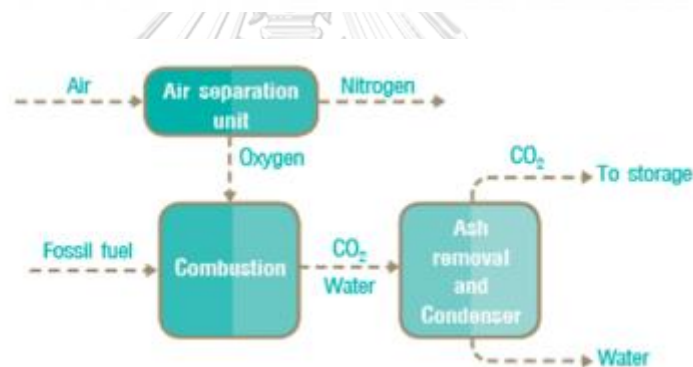
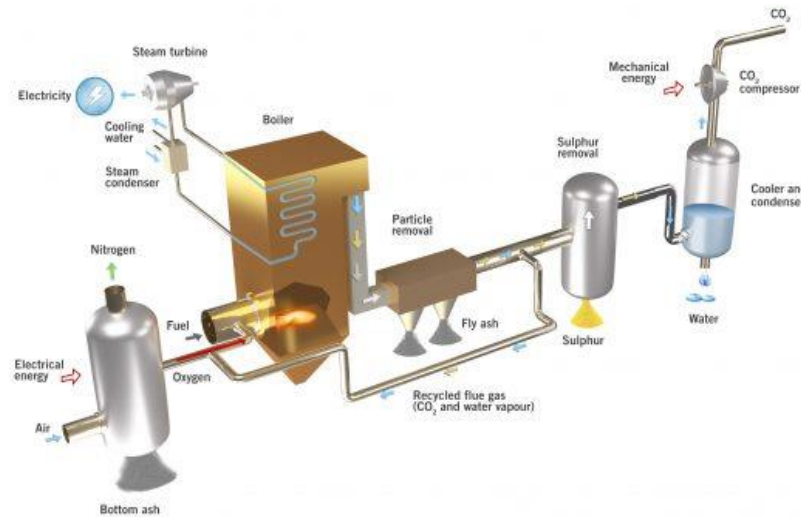


รูปที่ 1 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ [14] [15]

2.1.5.2 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบใช้ออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิง (Oxyfuel Combustion Capture) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ออกซิเจนเพียงอย่างเดียวในการเผาไหม้ โดยมีการแยกไนโตรเจน (N_2) ในอากาศออก ทำให้เหลือแต่ออกซิเจน (O_2) เพื่อใช้ในการเผาไหม้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการเผาไหม้จะทำให้เกิดเพียงไอน้ำ (H_2O) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งง่ายต่อการแยก โดยเมื่อแยกน้ำออกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะได้ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริสุทธิ์และสามารถส่งไปเก็บหรือใช้งานต่อได้ทันที [14] [15]

O₂/CO₂ recycle (oxyfuel) combustion capture



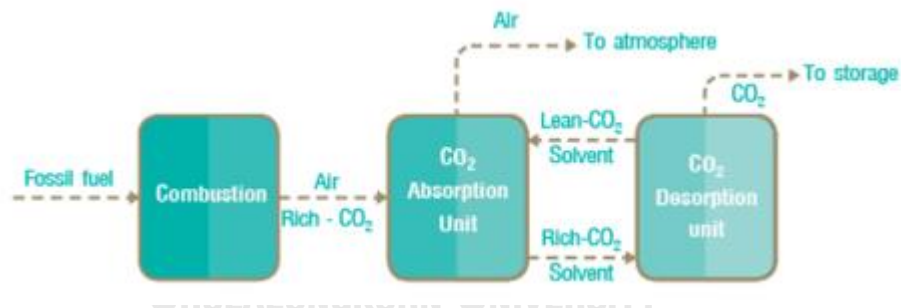
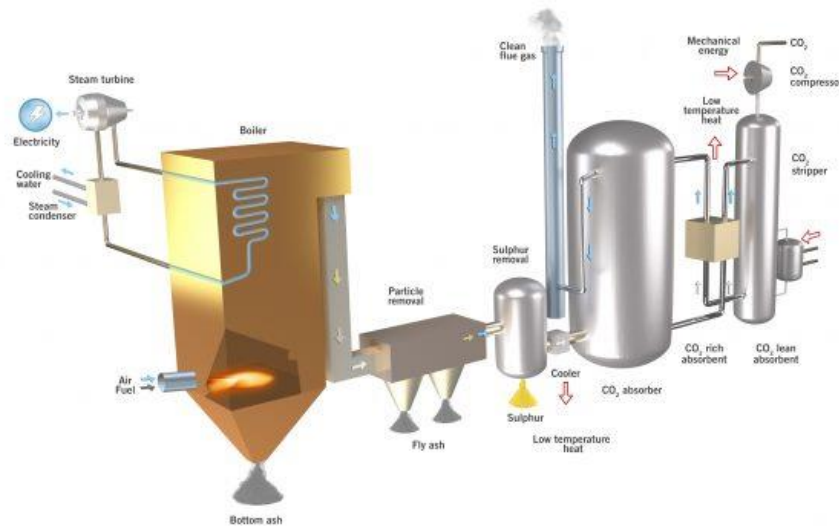
รูปที่ 2 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบใช้ออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิง [14] [15]

2.1.5.3 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion Capture)

การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีที่แยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้อื่น ๆ ก่อนนำไปกักเก็บ โดยวิธีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้สามารถทำได้หลากหลายเทคนิค ประกอบด้วย เทคนิคการดูดซับ เทคนิคการดูดซึม เทคนิคโครโอเจนิค เทคนิคการเลือกผ่านโดยใช้เมมเบรน เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีที่นำแก๊สหลังกระบวนการเผาไหม้มาบำบัดก่อนปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ โดยจะมีส่วนของหอดูดซับ เพื่อใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกก่อนนำไปกักเก็บหรือใช้งาน

ต่อไป โดยในปัจจุบันเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ไม่กระทบกับกระบวนการผลิตเดิม

Post-combustion capture (absorption process)



รูปที่ 3 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ [14] [15]

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะพบว่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำได้หลายวิธี ในที่นี้ได้ยกมา 3 วิธี คือการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยออกซิเจนบริสุทธิ์ และการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแต่ละวิธีจะมีลักษณะการทำงานที่ที่เหมาะสมกับการใช้งานที่แตกต่างกัน โดยแต่ละวิธีนั้นมีข้อดี-ข้อเสียดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีการดักจับ	ข้อดี	ข้อเสีย
การดักจับก่อนการเผาไหม้	<ul style="list-style-type: none"> - มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง - สามารถใช้เทคนิคการแยกได้หลายวิธี 	<ul style="list-style-type: none"> - เกิดความร้อนสูงจากการดักจับ ซึ่งส่งผลกระทบต่อเครื่องมือและอุปกรณ์
การดักจับแบบใช้ออกซิเจนเป็นเชื้อเพลิง	<ul style="list-style-type: none"> - มีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงมาก สามารถใช้เทคนิคการแยกได้หลายวิธี 	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าใช้จ่ายสูง - ใช้แก๊สออกซิเจนจำนวนมาก - สูญเสียพลังงานในการลดอุณหภูมิในการรีไซเคิลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
การดักจับหลังการเผาไหม้	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถติดตั้งเพิ่มเข้าไปในกระบวนการเดิมได้ง่าย - ใช้กับกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินที่มีอยู่แล้วในปัจจุบันได้ 	<ul style="list-style-type: none"> - ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดักจับได้มีปริมาณที่ต่ำ จึงต้องใช้เทคนิคการแยกที่มีประสิทธิภาพสูง

จากที่ได้กล่าวมา จะพบว่าเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีที่สามารถทำได้โดยไม่กระทบต่อกระบวนการผลิต มีความซับซ้อนน้อย มีความคุ้มค่า และเป็นที่ยอมรับในการนำมาใช้ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้มาใช้ในการศึกษา [16]

2.1.6 กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมก่อนนำไปกักเก็บหรือใช้งาน ในที่นี้เป็นกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น ความดันของแก๊ส ปริมาณของแก๊สผสม ปริมาณแก๊สที่ต้องการแยก ความว่องไวของสารปนเปื้อน เป็นต้น โดยการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมสามารถทำได้หลากหลายกระบวนการดังนี้

2.1.6.1 การแยกด้วยการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารถูกดูดซับ (Adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งการดูดซับจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (Interface) โดยในกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีการดูดซับ 2 ส่วน คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) โดยหลักการทำงานของกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซับ นิยมใช้ตัวดูดซับของแข็งในการแยก เช่น โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นต้น โดยแก๊สผสมจะสัมผัสกับตัวดูดซับของแข็ง ตัวดูดซับของแข็งจะทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกด้วยการควบแน่นเพื่อนำไปกักเก็บหรือใช้งานต่อไป [17] [18]

2.1.6.2 การแยกด้วยการดูดซึม (Absorption)

การดูดซึมเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวล ซึ่งนิยมใช้กำจัดสารพิษที่เป็นแก๊สออกจากแก๊สผสม โดยการสัมผัสกับของเหลว ในกระบวนการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีการดูดซึม 2 ส่วน คือ การดูดซึมทางกายภาพ (Physical Absorption) และการดูดซึมทางเคมี (Chemical Absorption) โดยหลักการทำงานของกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการดูดซึม นิยมใช้สารละลายเอมีนในการแยก เช่น โมโนเอทานอลเอมีน (MEA) เมทิลไดเอทานอลามีน (MDEA) เป็นต้น โดยแก๊สผสมจะสัมผัสกับสารละลายเอมีนและเกิดปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยปฏิกิริยาสะเทินกรดเบสเกิดผลิตภัณฑ์เป็นเกลือคาร์บอเนตและน้ำ จากนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออกด้วยการควบแน่นเพื่อนำไปกักเก็บหรือใช้งานต่อไป

2.1.6.3 การแยกด้วยโครโอเจนิค (Cryogenics)

การแยกด้วยโครโอเจนิคเป็นกระบวนการที่นิยมใช้งานในกรณีที่แก๊สผสมมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 50 โดยหลักการทำงานของกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยโครโอเจนิค คือ การแยกสารประกอบที่มีจุดเดือดต่างกัน ซึ่งสารประกอบจะถูกลดอุณหภูมิจนกระทั่งแยกในวัฏภาคที่แตกต่างกัน การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการนี้จะทำให้ได้ไอน้ำที่บริสุทธิ์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะของเหลว ทำให้ง่ายต่อการนำไปกักเก็บหรือใช้งานต่อไป

2.1.6.4 การแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane)

เยื่อเลือกผ่านเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกสารผสมออกจากกัน ด้วยกลไกการซึมแพร่ผ่าน (Solution-diffusion) สารจะซึมแพร่ผ่านเยื่อเลือก โดยใช้ความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร ซึ่งสารที่สามารถผ่านเข้าไปในเยื่อเลือกได้จะแพร่จากตำแหน่งที่มีความเข้มข้นสูงไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า โดยกระบวนการซึมผ่านจะแตกต่างกันไปตามขนาดอนุภาคของสาร และแรงดันที่ให้แก่ระบบ โดยกลไกการซึมผ่านประกอบด้วย 3 ส่วน คือ การดูดซับ (Sorption) การแพร่ (Diffusion) และการคายซับ (Desorption) ทำให้สามารถแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สผสมได้เพื่อนำไปกักเก็บหรือใช้งานต่อไป

กระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 4 กระบวนการ คือ การแยกด้วยการดูดซับ การแยกด้วยการดูดซึม การแยกด้วยโครโอเจนิค และการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน มีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แต่ละแบบ ซึ่งพบว่าการแยกด้วยการดูดซับ เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ตัวดูดซับของแข็งสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ พลังงานในการฟื้นฟูต่ำ และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการแยกด้วยการดูดซับของแข็งมาใช้ในการศึกษา

2.1.7 การดูดซับ (Adsorption)

กระบวนการดูดซับเกิดได้จากแรงระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับผิวของตัวดูดซับ โดยสามารถจำแนกแรงออกได้เป็น 2 ชนิด คือ แรงกายภาพ และแรงเคมี ดังนั้นการดูดซับจึงสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.1.7.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

การดูดซับทางกายภาพจะอาศัยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion

Force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) โดยพบว่าแรงดังกล่าวไม่มีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยจึงสามารถกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวของตัวดูดซับได้ง่าย โดยการดูดซับชนิดนี้สามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิปกติและจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วทันทีที่โมเลกุลเคลื่อนที่ มาสัมผัสบริเวณผิวหน้าตัวดูดซับ แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิหรือเพิ่มความดันจะทำให้ความสามารถของการดูดซับลดลง เนื่องมาจากตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซับ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การคายซับ (Desorption) ซึ่งเป็นวิธีการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่อีก

2.1.7.2 การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของตัวถูกดูดซับเดิม โดยการดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับที่แข็งแรง เกิดพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับและเป็นแบบเฉพาะเจาะจง คือ ขึ้นกับชนิดของตัวถูกดูดซับและผิวหน้าของตัวดูดซับ พันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่มีความแข็งแรง จึงทำให้การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากตัวดูดซับนั้นทำได้ยาก เนื่องจากองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี

2.1.7.3 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการถ่ายโอนมวล (Mass Transfer) จากแก๊สไปยังของแข็ง โดยการเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้น 3 ระยะ

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle Diffusion หรือ Pore Diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุนระหว่างตัวดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเกาะติดบนผิวด้วยแรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน [19] [20]

2.1.7.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ในขณะที่มีการดูดซับเกิดขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ คือ ธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

2.1.7.4.1 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับธรรมชาติของโมเลกุล ประกอบด้วย พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับ และเคมีที่ผิวหน้า เป็นต้น

- 1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นการดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้โครงสร้างของรูพรุนยังมีส่วนช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น
- 2) ขนาดของตัวดูดซับ ในกรณีที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุนพื้นที่ผิวในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อตัวดูดซับมีขนาดเล็กลง แต่หากตัวดูดซับมีรูพรุนมากความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับขนาดของรูพรุน
- 3) เคมีที่ผิวหน้า การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะมีสมบัติที่มีผลต่อตัวดูดซับ หากหมู่ฟังก์ชันในการเกิดปฏิกิริยาตัวดูดซับไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาด้วยได้จะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

2.1.7.4.2 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวถูกดูดซับ ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ประกอบด้วย น้ำหนักและขนาดโมเลกุล ผลของความเป็นกรด-ด่าง และผลของอุณหภูมิ เป็นต้น

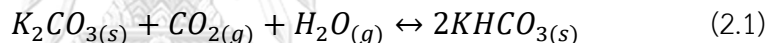
- 1) น้ำหนักและขนาดโมเลกุล เมื่อน้ำหนักและขนาดโมเลกุลเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มน้ำหนักและขนาดโมเลกุลจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง
- 2) ผลของความเป็นกรด-ด่าง มีผลต่อการละลายของตัวถูกดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับแตกต่างกัน
- 3) อุณหภูมิ มีผลต่ออัตราเร็วและความสามารถในการดูดซับ เนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิ แต่ความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูงและมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic Reaction)

2.1.7.5 สมดุลการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินต่อไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคายซับ ระบบจะเข้าสู่สภาวะสมดุล นอกจากนี้สมดุลการดูดซับยังมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดซับอีกด้วย [19] [20]

2.1.7.6 ตัวดูดซับของแข็ง

ตัวดูดซับของแข็งในปัจจุบันนิยมใช้คาร์บอนของโลหะแอลคาไลน์สำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากแก๊สเสีย เช่น การดูดซับด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอนเนต การดูดซับด้วยตัวดูดซับโซเดียมคาร์บอนเนต การดูดซับด้วยตัวดูดซับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกให้การดูดซับด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอนเนต เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสามารถในการเกิดการดูดซับที่อุณหภูมิต่ำและสามารถฟื้นฟูได้ที่อุณหภูมิต่ำ จึงมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้ดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ โดยปฏิกิริยาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะแสดงดังสมการที่ 2.1 [21]



จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าในปัจจุบันมีหลายวิธีสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความเหมาะสมกับการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง คือ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน เนื่องจากมีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งและอุณหภูมิได้ดี

2.1.8 ฟลูอิดไคเซชัน (Fluidization)

ในปัจจุบันกระบวนการฟลูอิดไคเซชัน (Fluidization) มีการใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการอุตสาหกรรม เช่น กระบวนการทางปิโตรเคมี ชีวเคมี และไฟฟ้าเคมี เป็นต้น หลักการของฟลูอิดไคเซชันคือ สภาวะที่อนุภาคของแข็งถูกเปลี่ยนให้มีพฤติกรรมคล้ายของไหล เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลที่มีความเร็วต่ำอนุภาคของแข็งจะอยู่ในสภาวะเบตนิ่งจนกระทั่งมีการเพิ่มความเร็วพอที่จะทำให้ของแข็งเกิดการขยับและเริ่มเคลื่อนที่ ทำให้เกิดสภาวะเบตขยายตัว หากเพิ่มความเร็วจนกระทั่งอนุภาคของแข็งสามารถลอยตัวได้อย่างอิสระในลักษณะการประพุดิตัวเหมือนของไหล เรียกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคเซชัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วของของไหลมีผลทำให้ของแข็งมีการประพุดิตัวที่แตกต่างกัน [22]

2.1.8.1 ประเภทของฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชันเป็นกระบวนการที่สามารถแบ่งลักษณะการทำงานของภายในระบบ ออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- 1) ฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาค (Two-phase Fluidization) ฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาคจะประกอบไปด้วยวัฏภาค 2 วัฏภาค คือวัฏภาคของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลอาจเป็นแก๊สหรือของเหลวก็ได้
- 2) ฟลูอิดเซชันแบบสามวัฏภาค (Three-phase Fluidization) ฟลูอิดเซชันแบบสามวัฏภาคจะประกอบไปด้วยวัฏภาค 3 วัฏภาค คือ วัฏภาคของแข็ง ของเหลวและแก๊ส

2.1.8.2 การจำแนกอนุภาคของแข็งด้วยวิธีการของ Geldart

ในการจำแนกอนุภาคของแข็งด้วยวิธีการของ Geldart สามารถจัดเรียงตามความสัมพันธ์ของผลต่างความหนาแน่นและขนาดอนุภาคของแข็งดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มประกอบด้วย [23]

2.1.8.2.1 การจำแนกประเภทอนุภาคของแข็งของ Geldart กลุ่ม A

อนุภาคของแข็งกลุ่ม A เป็นกลุ่มอนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก อนุภาคของแข็งชนิดนี้สามารถทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ดี แต่จะเกิดการขยายตัวก่อนช่วงหนึ่งที่จะเริ่มเกิดฟองแก๊สในระบบ

2.1.8.2.2 การจำแนกประเภทอนุภาคของแข็งของ Geldart กลุ่ม B

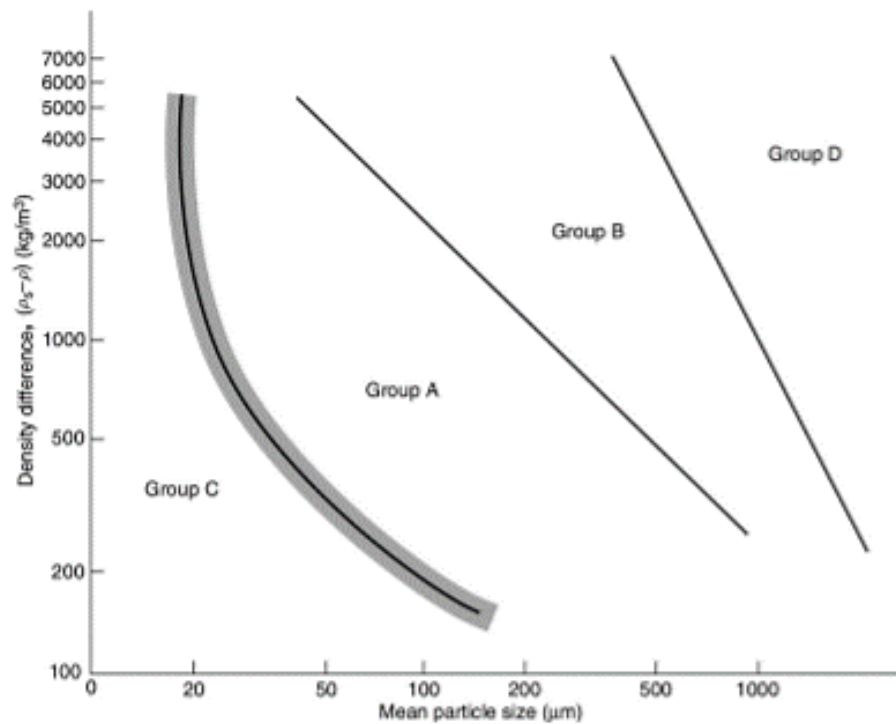
อนุภาคของแข็งกลุ่ม B เป็นกลุ่มอนุภาคของแข็งที่มีลักษณะคล้ายทราย มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1,400-4,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 40-500 ไมโครเมตร อนุภาคของแข็งชนิดนี้สามารถเกิดกระบวนการฟลูอิดเซชันได้ดีมาก และเริ่มเกิดฟองแก๊สในระบบได้ทันที

2.1.8.2.3 การจำแนกประเภทอนุภาคของแข็งของ Geldart กลุ่ม C

อนุภาคของแข็งกลุ่ม C เป็นกลุ่มอนุภาคของแข็งที่มีการยึดเกาะได้ดี มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กมากทำให้มีความละเอียดสูง อนุภาคของแข็งชนิดนี้สามารถเกิดกระบวนการฟลูอิดไอเซชันได้ยาก เนื่องจากแรงยึดเกาะของอนุภาคมีค่าสูงกว่าแรงดันจากของไหล

2.1.8.2.4 การจำแนกประเภทอนุภาคของแข็งของ Geldart กลุ่ม D

อนุภาคของแข็งกลุ่ม D เป็นกลุ่มอนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ อนุภาคของแข็งชนิดนี้การเกิดฟองแก๊สจะเกิดได้ช้ากว่ากลุ่มอื่น เนื่องจากมีช่องว่างระหว่างอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้อากาศไหลผ่านขึ้นมาได้ง่าย



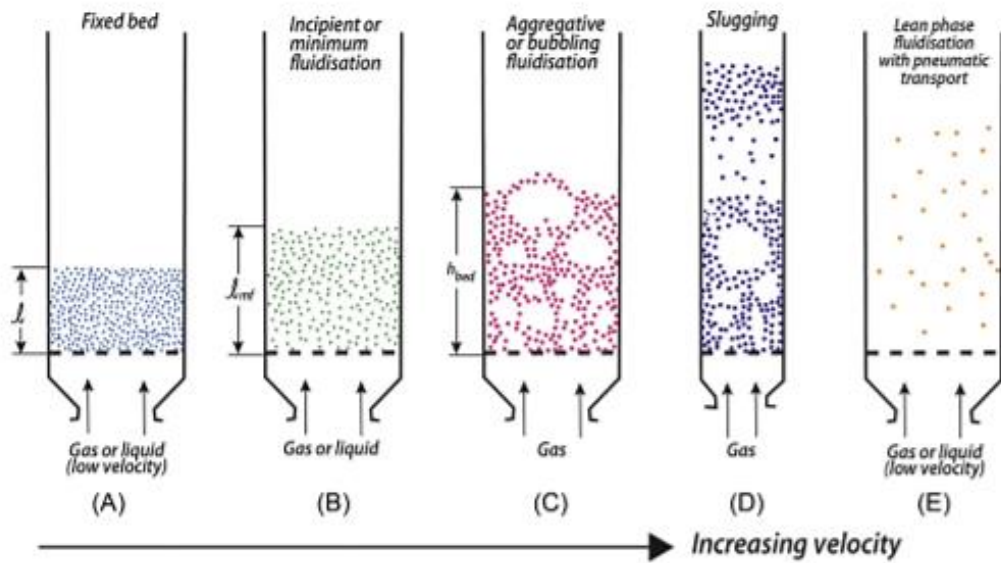
รูปที่ 4 การจำแนกประเภทอนุภาคของแข็งด้วยวิธีการของ Geldart [23]

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของอนุภาคของแข็งด้วยวิธีการของ Geldart [23]

คุณสมบัติ \ กลุ่ม	กลุ่ม A	กลุ่ม B	กลุ่ม C	กลุ่ม D
ตัวอย่างประเภทของแข็ง	ของแข็งมวลเบา	ทราย	เม็ดกาแฟ, กรวด	แป้ง, ผงแก้ว
ขนาดอนุภาค (ความหนาแน่น = 2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	20-90 ไมครอน	90-650 ไมครอน	< 20 ไมครอน	> 20 ไมครอน
พฤติกรรมการเกิด ฟลูอิดเซชัน	เกิดได้ดี	เกิดได้ดีมาก	เกิดได้ยาก	เกิดได้ช้า
การขยายตัวของเบด	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	ต่ำ
ขนาดการเกิดฟองแก๊ส	ขนาดใหญ่	ไม่แน่นอน	ไม่เกิด	ไม่แน่นอน
การผสมกันของวัสดุ	สูง	ปานกลาง	ต่ำมาก	ต่ำ
การผสมของอากาศ	สูง	ปานกลาง	ต่ำมาก	ต่ำ

2.1.8.3 ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน (Regime of Fluidization)

การเกิดฟลูอิดเซชันนั้นมีหลายตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟลูอิดเซชัน เช่น ความเร็ว ความหนาแน่นของของไหลและขนาดของของแข็ง เป็นต้น เมื่อมีการให้ความเร็วที่แตกต่างกันจะส่งผลให้พฤติกรรมการไหลหรือการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในระบบเปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยอนุภาคของแข็งที่บรรจุภายในระบบจะเปลี่ยนสถานะจากอนุภาคของแข็งที่อยู่นิ่งเป็นอนุภาคของแข็งที่มีสถานะคล้ายของไหล เมื่อมีของไหลไหลผ่านสัมผัสอนุภาคของแข็ง บริเวณที่อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่อยู่จะเรียกว่า เบด (Bed) ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นได้โดยการอัดของไหลที่มีทิศทางการไหลตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วง (Gravity Force, g) ซึ่งของไหลอาจเป็นของเหลว แก๊ส หรือของเหลวกับแก๊สก็ได้ [24]



รูปที่ 5 ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน [24]

2.1.8.3.1 เบนิ่ง (Fixed Bed)

ระบบที่มีลักษณะแบบเบนิ่งยังไม่ถือว่าเป็นรูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชัน เนื่องจากอนุภาคของแข็งภายในระบบไม่มีการเคลื่อนที่ ซึ่งภายในระบบเมื่อมีของไหลเคลื่อนที่ผ่านเบดที่วางนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหล กระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศทาง การไหล (Drag Force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (Pressure Drop) ตกคร่อมเบดไว้ ความดันตกคร่อมเบดตลอดแนวความสูงของเบดนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Ergun Equation [25] ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3(\phi d_p)^2} + \frac{1.75\rho_g U^2(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3(\phi d_p)^2} \quad (2.2)$$

เมื่อ	ΔP	คือ	ความดันลด (พาสคาล)
	L	คือ	ระยะทางของท่อ (เมตร)
	μ	คือ	ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
	U	คือ	ความเร็วที่ป้อนเข้า (เมตรต่อวินาที)
	ε	คือ	สัดส่วนช่องว่างโดยปริมาตร (-)

ϕ	คือ	ค่าความเป็นทรงกลม (-)
d_p	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)
ρ_g	คือ	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

2.1.8.3.2 ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubble Fluidization)

ระบบที่มีลักษณะแบบฟองแก๊สเริ่มถือได้ว่าเป็นรูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชัน เนื่องจากเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลเบดนิ่งจนถึงค่าหนึ่ง ที่อนุภาคของแข็งในระบบเริ่มขยับ การไหลแบบเบดนิ่งจะเปลี่ยนเป็นรูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส เรียกค่าความเร็วนี้ว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum Fluidization Velocity, U_{mf}) ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อแก๊สมีค่าความเร็วมากกว่า U_{mf} ของแข็งในระบบจะประพุดิตัวคล้ายของไหล และจะสามารถสังเกตได้จากฟองแก๊สที่เกิดขึ้นภายในระบบ ฟองแก๊สจะเริ่มเกิดที่บริเวณด้านล่างของเบดและเมื่อเคลื่อนที่ไปยังด้านบนจะเกิดการแตกออก ทำให้ของแข็งตกกลับลงมาตามแรงโน้มถ่วง โดยค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันถูกเสนอด้วยความสัมพันธ์ของ Wen และ Yu [26] ดังแสดงในสมการที่ 2.3-2.7

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad (2.3)$$

$$Ar = g\rho(\rho_p - \rho)D_{sv}^3/\mu^2 \quad (2.4)$$

$$C_1 = 300(1 - \varepsilon_{mf})/7 \quad (2.5)$$

$$C_2 = \varepsilon_{mf}^3/1.75 \quad (2.6)$$

$$U_{mf} = Re_{mf}\mu/\rho D_{sv} \quad (2.7)$$

เมื่อ	Ar	คือ	ตัวเลขไร้มิติหน่วยอาร์คิมิดีส (-)
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

D_{sv} คือ ขนาดอนุภาคของวัสดุของแข็ง (เมตร)

ϵ_{mf} คือ สัดส่วนปริมาตรของวัสดุแก๊สที่ภาวะต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (-)

ตารางที่ 4 ค่า C_1 และ C_2 สำหรับการคำนวณความเร็วต่ำสุด

งานวิจัย	C_1	C_2
Wen และ Yu [27]	33.70	0.0408
Saxena และ Vogel [27]	25.28	0.0571
Babu และคณะ [27]	25.25	0.0651
Grace [27]	27.20	0.0408
Chitester และคณะ [27]	28.70	0.0494

2.1.8.3.3 ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent Fluidization)

ระบบที่มีลักษณะแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าสู่ระบบอยู่ในช่วงความเร็วช่วงต่อ (Transition Velocity, U_c) และความเร็ววิกฤต (Critical Velocity, U_k) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Bi [28] ดังแสดงในสมการที่ 2.8-2.9 ลักษณะฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีการรวมตัวกันและแตกตัวอย่างรวดเร็ว เสมือนไม่มีฟองแก๊สเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากรูปแบบการไหลแบบฟองแก๊สเป็นรูปแบบการไหลแบบปั่นป่วน โดยสามารถแบ่งลักษณะอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นในระบบได้ 2 ส่วน คือ อนุภาคของแข็งหนาแน่น (Dense Phase) มักอยู่ส่วนบริเวณด้านล่าง และอนุภาคของแข็งเบาบาง (Dilute Phase) มักอยู่ส่วนบริเวณด้านบน

$$u_c = \frac{0.936\mu Ar^{0.472}}{D_{sv}\rho} \quad (2.8)$$

$$u_k = \frac{1.46\mu Ar^{0.472}}{D_{sv}\rho} \quad (2.9)$$

2.1.8.3.4 ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast Fluidization)

ระบบที่มีลักษณะแบบความเร็วสูงจะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้าสู่ระบบมากกว่าความเร็วขนส่ง (Transport Velocity, U_t) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Perales [29] ดังแสดงในสมการที่ 2.10 ซึ่งลักษณะอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นจะเบาบางที่บริเวณส่วนกลางของระบบ และเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของของไหล แต่จะหนาแน่นบริเวณผนังของระบบ และ

เคลื่อนที่ขึ้นสวนทิศทางการไหลของของไหล เรียกว่าพฤติกรรมลักษณะนี้ว่า การไหลแบบแกนในวงนอก (Core-annulus Flow)

$$Re_{tr} = C_1 Ar^{C_2} \quad (2.10)$$

ตารางที่ 5 ค่า C_1 และ C_2 สำหรับการคำนวณค่าความเร็วส่งผ่าน

งานวิจัย	C_1	C_2
Lee และ Kim [30]	2.916	0.354
Perales และ คณะ [30]	1.415	0.438
Bi และ Fan [30]	2.28	0.419
Adánez และ คณะ [30]	2.078	0.458
Tsukada และ คณะ [30]	1.806	0.458

2.1.8.3.5 ฟลูอิดเซชันแบบเบาบาง (Pneumatic Transport Fluidization)

ระบบที่มีลักษณะแบบจะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มีค่าสูงกว่าช่วงการไหลแบบความเร็วสูง ซึ่งช่วงการไหลแบบเบาบางอนุภาคของแข็งจะถูกพาออกไปจากระบบ จึงนิยมใช้ในการขนถ่ายอนุภาคของแข็งด้วยแก๊ส ซึ่งความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบเบาบาง (Minimum Pneumatic Transport Velocity, U_{mp}) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Bi และ Fan [31] ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$u_{mp} = 10.1(gD_{sv})^{0.347} (G_s/\rho)^{0.310} (D_{sv}/D)^{-0.139} Ar^{-0.021} \quad (2.11)$$

เมื่อ G_s คือ ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทดลอง (เมตร)

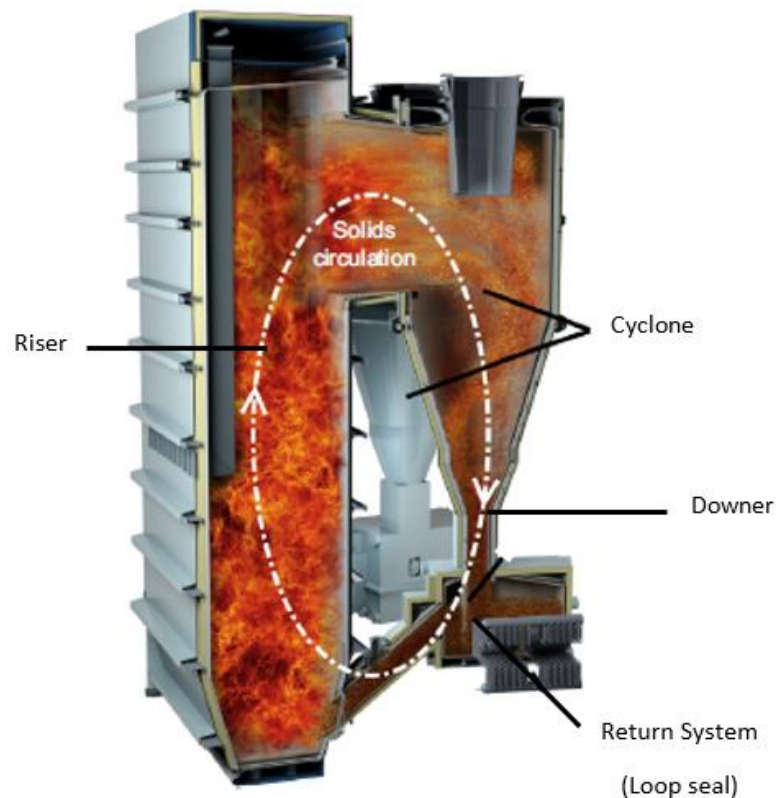
2.1.8.4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันแบบ (Fluidized Bed Reactor)

ฟลูอิดเซชันแบบเป็นรูปแบบหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและงานวิจัยในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Reactor) สาเหตุที่เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียนมีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานภายใต้กระบวนการดักจับ

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งเป็นตัวดูดซับ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนจะทำงานภายใต้ภาวะเบดแบบความเร็วสูงหรือเบดแบบส่งผ่าน ทำให้มีข้อได้เปรียบหลายอย่างเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ทั่ว ๆ ไป เช่น เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลสูง ส่งผลทำให้ช่องว่างอากาศภายในระบบลดลง มีการกระจายตัวของความร้อนสม่ำเสมอทั้งในแนวความสูงและรัศมีของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนจะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วน ประกอบไปด้วย หอดูดซับหรือหอไรเซอร์ ไซโคลน หอคินสภาพหรือหอดาวเนอร์ และท่อป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 6

2.1.8.4.1 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

- 1) หอดูดซับหรือหอไรเซอร์ (Riser) คือ ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ภายในหอไรเซอร์จะบรรจุตัวดูดซับของแข็ง โดยในส่วนนี้ อนุภาคของแข็งและของไหลจะสัมผัสกัน ซึ่งของไหลจะถูกป้อนเข้าด้านล่างของหอไรเซอร์และเคลื่อนที่ผ่านอนุภาคของแข็งจนเกิดฟลูอิดไคซ์ชัน เมื่ออนุภาคเคลื่อนมาด้านบนสุดของไรเซอร์ จะถูกส่งผ่านไปยังไซโคลนต่อไป
- 2) ไซโคลน (Cyclone) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่แยกของแข็งและของไหลออกจากกัน โดยของไหลจะหลุดออกทางด้านบนของไซโคลนโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ในขณะที่อนุภาคของแข็งจะตกกลับมาทางด้านล่างภายในดาวเนอร์ เพื่อทำการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับของแข็งต่อไป
- 3) หอคินสภาพหรือหอดาวเนอร์ (Downer) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่แยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับของแข็งและคินสภาพอนุภาคของแข็งเพื่อให้กลับมาใช้งานใหม่ได้อีกครั้ง
- 4) ท่อป้อนกลับ (Loop Seal) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ป้อนอนุภาคของแข็งที่ออกมาจากหอดาวเนอร์ให้กลับเข้าสู่ไรเซอร์ผ่านท่อป้อนกลับ เพื่อนำตัวดูดซับของแข็งที่ผ่านการคินสภาพแล้วมาใช้งานในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป



รูปที่ 6 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน [31]

2.1.8.4.2 ข้อดี-ข้อเสียของการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

- 1) มีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งและของไหลสูง อนุภาคของแข็งที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง อนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ด้านบน ทำให้สามารถแยกอนุภาคออกจากกันได้ง่าย
- 2) จากคุณสมบัติการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็ว และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
- 3) คุณสมบัติที่ประพุดิตัวคล้ายกับของไหล ทำให้สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ และสามารถเติมของของแข็งเข้าสู่ระบบหรือปล่อยออกจากระบบ
- 4) สามารถใช้ในการขนส่งอนุภาคจากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งได้

ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน

- 1) อาจมีการสึกกร่อนของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเกิดการชนกัน และการเสียดสีของอนุภาคกับเครื่องปฏิกรณ์
- 2) ไม่เหมาะกับอนุภาคที่เปราะบางเพราะอาจทำให้เกิดการแตกหักเสียหายง่าย และอนุภาคที่มีการรวมกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อน
- 3) ในกรณีที่มีการให้ความเร็วที่สูงอาจทำให้เกิดการหลุดออกของอนุภาคจากส่วนของหอโรเซออร์

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น พบว่ารูปแบบการไหลมีผลต่อความสามารถในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยรูปแบบการไหลทั้ง 5 แบบ คือ เบนนิ่ง ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง และฟลูอิดเซชันแบบเบาบาง พบว่ารูปแบบการไหลฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สหรือปั่นป่วนมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากข้อได้เปรียบเรื่องการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งและการเกิดฟองแก๊สทำให้เกิดการผสมที่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ดี

2.1.9 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นเทคนิคที่ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหล การถ่ายเทความร้อน การเกิดปฏิกิริยาเคมีและปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับของไหล โดยการใช้เทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นการนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการแก้ไขปัญหา ทำให้ในปัจจุบันพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเริ่มเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์หรือแก้ไขปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหลได้อย่างไม่ยุ่งยาก นอกจากนี้ยังประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ในการออกแบบ พัฒนา หรือปรับปรุงแก้ไขปัญหา ซึ่งพฤติกรรมของของไหลสามารถอธิบายด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการจำลองปรากฏการณ์ต่าง ๆ ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยชุดสมการอนุรักษ์ (Conservation Equations) ซึ่งประกอบด้วย 3 สมการหลัก คือสมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum Equation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy Equation) ทั้งนี้การวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณยังมีปัจจัยและองค์ประกอบที่สำคัญอีก 3 ส่วน คือสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ที่ใช้ในการอธิบายความเป็นจริงของปัญหา ถัดมาคือเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ของปัญหาที่

ทำการศึกษา และสุดท้ายคือรูปร่าง (Geometry) ซึ่งเป็นลักษณะรูปร่างของปัญหา โดยทั้ง 3 องค์ประกอบนี้หากมีส่วนใดส่วนหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ผลลัพธ์มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย [32] โดยสมการพื้นฐานที่ใช้ในการจำลองสามารถอธิบายด้วยสมการอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งในบางกรณีจำเป็นต้องมีสมการเพิ่มเติมเข้ามาช่วยอธิบายเพื่อให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นให้ครอบคลุม

2.1.9.1 ระเบียบวิธี (Methodology)

ระเบียบวิธีการสำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีขั้นตอนที่สำคัญ 6 ขั้นตอน ประกอบไปด้วย การกำหนดรูปทรงทางเรขาคณิต การแบ่งปริมาตรของของไหล การกำหนดสมการสำหรับจำลองแบบจำลอง การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และวิธีการวิเคราะห์ผล

การกำหนดรูปทรงทางเรขาคณิต คือ การกำหนดรูปทรงของปัญหาที่ทำการศึกษา เช่น การศึกษาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นในขั้นตอนนี้จะพิจารณาส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน

การแบ่งปริมาตรของของไหล คือ การแบ่งปริมาตรของของไหลออกเป็นเซลล์เพื่อใช้ในการคำนวณ โดยในการแบ่งเซลล์ในการคำนวณสามารถแบ่งออกได้หลายชนิด เช่น การแบ่งออกเป็นโครงตาข่ายแบบไม่มีโครงสร้างแน่นอน (Unstructured Mesh) เป็นต้น

การกำหนดสมการสำหรับจำลองแบบจำลอง คือ การกำหนดสมการที่จะใช้ในการศึกษา สำหรับการเคลื่อนที่ การอนุรักษ์มวล ซึ่งในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของของไหลมักเกี่ยวข้องกับสมการความต่อเนื่อง สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต คือ การกำหนดเงื่อนไขที่มักเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของของไหล และสมบัติของของไหล โดยเงื่อนไขขอบเขตในการศึกษาสำหรับปัญหาแบบไม่คงที่ (Transient) ต้องคำนึงถึงการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) ด้วย

วิธีการวิเคราะห์ผล คือ การสร้างผลเฉลยที่ต้องการจากการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้น จากการทำนายด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบของเส้นกราฟ เส้นแสดงรูปร่าง หรือเวกเตอร์ เป็นต้น

2.1.9.2 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization Method)

ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง เป็นการแก้ไขสมการด้วยระเบียบวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Solution) มาหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ให้อยู่ในรูปของระบบสมการพีชคณิต (Arithmetic Equation) โดยการเลือกใช้ระเบียบวิธีการแบ่งช่วงซึ่งผ่านการแบ่งออกเป็นช่วงขนาดเล็ก (Discretization) สำหรับวิธีการแบ่งช่วงปัญหาในพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณประกอบไปด้วย 4 แบบ ประกอบด้วย ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม ระเบียบวิธีอีลีเมนต์สี่เหลี่ยม ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีอีลีเมนต์ขอบเขต [33]

ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) เป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์และโปรแกรมสำหรับงานวิจัย โดยสมการควบคุมจะถูกแก้โดยพิจารณาให้เป็นปริมาตรควบคุมแบบเป็นช่วง (Discrete Control Volumes) และอาศัยการอินทิกรัลเข้าช่วยเพื่อทำการแบ่งปริมาตรออกเป็นช่วง

ระเบียบวิธีอีลีเมนต์สี่เหลี่ยม (Finite Element Method) เป็นระเบียบวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างของของแข็ง แต่ระเบียบวิธีอีลีเมนต์สี่เหลี่ยมก็สามารใช้ได้กับของไหลเช่นเดียวกัน

ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) เป็นระเบียบวิธีที่มีความง่ายในการเขียนโปรแกรม แต่มีข้อเสีย คือต้องสร้างโครงตาข่ายที่มีโครงสร้าง (Structure Mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณและต้องการการแปลงระบบพิกัดสำหรับรูปทรงที่มีความซับซ้อน

ระเบียบวิธีอีลีเมนต์ขอบเขต (Boundary Element Method) เป็นระเบียบวิธีที่จะพิจารณาขอบเขตของของไหล โดยในการพิจารณาจะทำการแบ่งออกเป็นโครงตาข่ายพื้นผิว (Surface Mesh) เพื่อใช้ในการคำนวณ

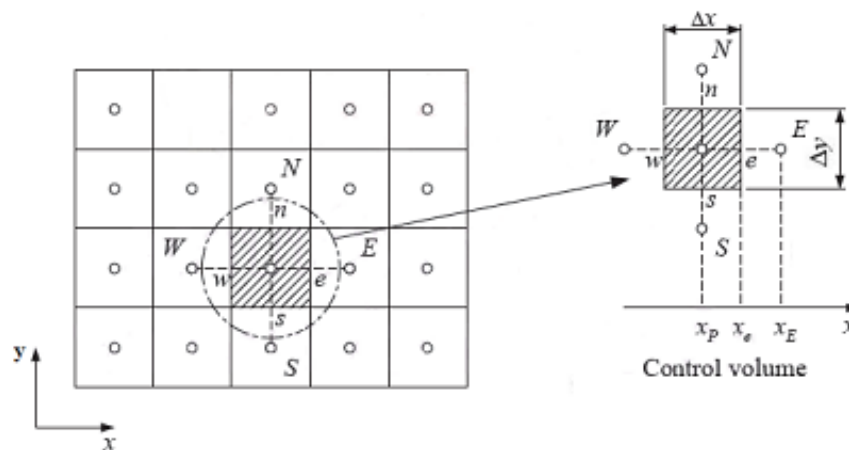
จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม เป็นรูปแบบที่นิยมในการแบ่งปัญหาของปริมาตรที่สนใจออกเป็นช่วง (Control Volume) ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมมาใช้ในการวิจัย โดยลักษณะการแบ่งระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยมแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งในการแก้ปัญหาจะใช้การพาความร้อน (Convection) และการแพร่ (Diffusion) ซึ่งมีจุดเริ่มต้นจากสมการพื้นฐาน

ของการไหล โดยสามารถแสดงสมการการควบคุมพื้นฐาน (Governing Equation) ในรูปตัวแปร ϕ ดังแสดงในสมการที่ 2.12 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรทั่วไปกับเวลา เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้น หรือเอนทัลปี [34]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 เมื่อทำการอินทิเกรตปริมาตรควบคุมทั้งหมดจะได้

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \text{div}(\rho\phi u) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.13)$$



รูปที่ 7 ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม [35]

2.1.9.3 ซอฟต์แวร์ (Software)

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมักจะถูกใช้ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับของไหล ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาซอฟต์แวร์สำเร็จรูปเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT ในการศึกษา

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ju และ Lee [36] ทำการศึกษาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งเป็นโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) จากปฏิกิริยาในสมการที่ 2.1



เป็นตัวดูดซับและเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์เบด (Fluidized Bed Reactor) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ หอดูดซับภายใต้รูปแบบการไหลแบบความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed Reactor) หอดูดซับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่าง 0.035 เมตร ด้านบน 0.025 เมตร ความสูง 6.0 เมตร และหอคืนสภาพภายใต้รูปแบบการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling Fluidized Bed Reactor) หอคืนสภาพที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 1.280 เมตร จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความเข้มข้นของน้ำในแก๊สขาเข้าหอดูดซับ ส่งผลให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วขาเข้าหอดูดซับ ส่งผลให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าสัดส่วนโดยปริมาตรของเชิงบริเวณทางเข้าของหอดูดซับมีค่ามากกว่า 0.25 และบริเวณทางออกของหอดูดซับมีค่า 0.01

Wang และคณะ [37] ทำการศึกษาผลของความเร็วการไหลของแก๊ส (Superficial Gas Velocity, U_p) ในฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed) ซึ่งประกอบด้วยสามส่วน คือ หอดูดซับ (Riser) ไซโคลน (Cyclone) และ ดิปเพลก (Dipleg) ลักษณะของหอดูดซับมีพื้นที่หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด 0.058 เมตร สูง 1.200 เมตร ส่วนของไซโคลนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.070 เมตร สูง 0.230 เมตร และ ดิปเพลก มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.020 เมตร สูง 0.955 เมตร ทำการจำลองด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อนำแบบจำลองที่ได้มาใช้ในการทำนายการกระจายตัวของของแข็ง เวลาที่ของแข็งอยู่ในเบด และการผสมที่เกิดขึ้นภายในหอดูดซับ โดยในการจำลองจะใช้ความเร็วการไหลของแก๊สที่ 5.5, 6.0, 6.5 และ 7.0 เมตรต่อวินาที พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วการไหลของแก๊สส่งผลให้การกระจายตัวของอนุภาคตามแนวแกนหอดูดซับดีขึ้น และลดเวลาที่อนุภาคของแข็งใช้ในหอดูดซับ ซึ่งเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการผสมและการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอดูดซับ

Dietrich และคณะ [38] ทำการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบใหม่ที่ทำงานแบบสลับอุณหภูมิ (Temperature Swing Adsorption, TSA) ประกอบด้วย หอดูดซับ (Adsorber) และหอคืนสภาพ (Desorber) เพื่อใช้ในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการใส่ชั้น (Stage) ลงไปในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรซ์เบด พบว่าการใส่ชั้นทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในฟลูอิดไรซ์เบดได้ดี เพิ่มการสัมผัสกันระหว่างแก๊สและอนุภาคของแข็ง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้มากกว่าร้อยละ 90 ของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สไอเสียที่มีอยู่ร้อยละ 8 โดยปริมาตร นอกจากนี้การเพิ่มขึ้น

ของอุณหภูมิต่ำในการดูดซับ ทำให้ความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงร้อยละ 25 คือ จากร้อยละ 7.4 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 5.5 โดยน้ำหนัก

Thummakul และคณะ [39] พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดภายใต้รูปแบบการไหลแบบหมุนวนปั่นป่วน (Circulating-turbulent Fluidized Bed Regime) ซึ่งพบว่าช่วงการไหลที่เหมาะสมกับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด คือ ระหว่างช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Fluidized Bed Regime) ที่มีลักษณะเด่น คือ ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะแตกออกอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเร็วที่สูง และช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed Regime) ที่มีลักษณะเด่น คือ อุณหภูมิของแข็งสามารถเคลื่อนที่ในแนวแกนได้มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของแข็งและแก๊สสัมผัสกันได้มากขึ้น ช่วงการไหลนี้จะรวมข้อดีของทั้งสองช่วงการไหลเข้าไว้ด้วยกัน เรียกว่าช่วงการแบบปั่นป่วนหมุนเวียน (Circulating-turbulent Fluidized Bed Regime) ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ช่วงการไหลดังกล่าว สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าร้อยละ 93.4 โดยตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คือ ความเร็วแก๊สขาเข้า ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ และความเข้มข้นของไอน้ำ

Nouri และคณะ [40] ทำการศึกษาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสองมิติของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดในช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed Regime) โดยมีตัวดูดซับชนิดของแข็งเป็นโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) และใช้แบบจำลองของออยเลอร์เลียน (Eulerian) ร่วมกับทฤษฎีจลนศาสตร์การไหลของอนุภาคของแข็ง (Kinetic Theory of Granular Flow, KTGF) ในการสร้างแบบจำลองที่ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ส่วนบนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 เมตร สูง 5.4 เมตร และเครื่องปฏิกรณ์ส่วนล่างเป็นบริเวณที่เกิดการผสม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.035 เมตร สูง 0.6 เมตร รวมเป็นความสูง 6.0 เมตร เพื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความสูง 3.0 เมตร พบว่า เครื่องปฏิกรณ์ที่มีความสูง 6.0 เมตร และ 3.0 เมตร มีประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการฟลักซ์เชิงมวล (Mass Flux) ของตัวดูดซับมีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าความสูงของเครื่องปฏิกรณ์

Ghadirian และคณะ [41] ทำการศึกษาแรงต้านอากาศ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการอธิบายพลศาสตร์ของระบบการไหลของแก๊ส-ของแข็ง แรงต้านอากาศเป็นแรงกระทำระหว่างของไหลและ

อนุภาค โดยได้พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลของค่านวมแบบสองมิติของอนุภาคกลุ่ม Geldart B ภายใต้ระบบฟลูอิด์เบดในช่วงการไหลระหว่างช่วงการไหลแบบเบดนิ่ง (Fixed Bed) และ ช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling Fluidized Bed) โดยใช้ทฤษฎีจลนการไหลของอนุภาคของแข็ง (Kinetic Theory of Granular Flow, KTGF) และได้้นำสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแก๊ส-ของแข็ง แบบ Energy Minimization Multi-scale (EMMS) มาสร้างแบบจำลอง เปรียบเทียบกับการใช้สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแก๊ส-ของแข็ง แบบ Homogeneous ของ Syamlal O'Brien และการทดลองของ Krishna พบว่า สัดส่วนของแข็ง (Solid Volume Fraction) และการขยายตัวของเบด (Bed Expansion) ที่ได้จากการจำลองด้วย EMMS มีค่าสอดคล้องกับการทดลอง



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ข้อมูลเบื้องต้นในงานวิจัย

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ในงานวิจัยนี้จะจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่การจำลองในส่วนหอดูดซับหรือหอไรเซอร์ จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่ง คือ การจำลองพลศาสตร์ของไหลในระบบ 3 มิติของหอไรเซอร์ที่ไม่มีปฏิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยของ Boonprasop และคณะ [7] [8] ส่วนที่สอง คือ การจำลองพลศาสตร์ของไหลในระบบ 3 มิติของหอไรเซอร์ที่มีปฏิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สมการอัตราการเกิดปฏิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตของ Kongkitisupchai และคณะ [9] ผลที่ได้จากการจำลองทั้งสองส่วนนี้จะช่วยให้สามารถทราบถึงประสิทธิภาพและภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดสำหรับปฏิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตภายในหอไรเซอร์แบบอนุกรมหมุมไม่คงที่

3.2 การสร้างแบบจำลอง

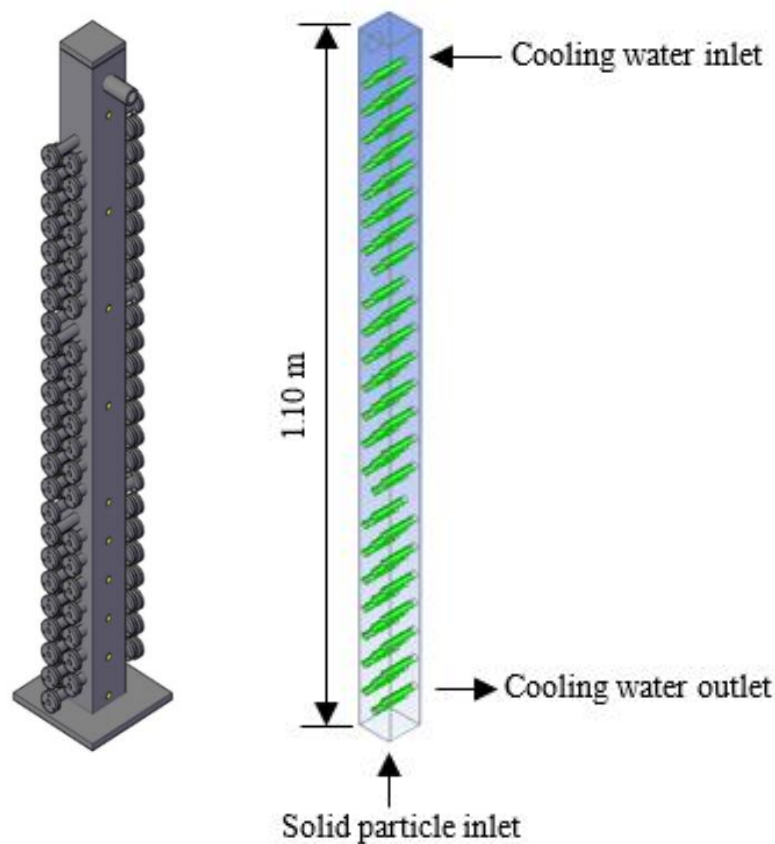
ในงานวิจัยนี้จะเริ่มจากการสร้างรูปทรงทางเรขาคณิตของหอไรเซอร์ที่ใช้ในการศึกษาผ่านการออกแบบด้วย Design Modeler เพื่อใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 3 มิติ โดยการออกแบบรูปทรงทางเรขาคณิตของหอไรเซอร์อ้างอิงจากงานวิจัยของ Boonprasop และคณะ [7] [8] และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT 2019 R3 ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลที่เกิดขึ้นภายในหอไรเซอร์ โดยแบบจำลอง 3 มิติมีลักษณะฐานรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดกว้าง 0.05 เมตร ยาว 0.05 เมตร สูง 1 เมตร และมีการใส่ท่อทองแดงเพื่อใช้เป็นท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์จำนวน 66 ท่อ โดยแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ชั้นละ 22 ท่อ นอกจากนี้ระบบที่ทำการศึกษาระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตจะเป็นการจำลองแบบ 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคแก๊สและภูมิภาคของแข็ง โดยภูมิภาคแก๊สจะเป็นแก๊สผสมระหว่าง คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไอน้ำ (H_2O) และไนโตรเจน (N_2) ส่วนภูมิภาคของแข็งจะใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 380 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 3,560 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเริ่มจากการป้อนแก๊สผสมเข้าทางด้านล่างของหอไรเซอร์ จากนั้นตัวดูดซับของแข็งที่ถูกบรรจุอยู่ภายในหอไรเซอร์จะเกิดปฏิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สมการที่ใช้ในแบบจำลองพลศาสตร์

ของไหลเชิงคำนวณประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน สมการอนุรักษ์องค์ประกอบวิภาค สมการสัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวิภาค และสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง โพลีเอทิลีนคาร์บอนเตแสดงในสมการที่ 3.1-3.16 เพื่อใช้ในการอธิบายพลศาสตร์ของไหลและประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นภายในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิต่ำที่ไม่คงที่ โดยรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยจะแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 6 รายละเอียดตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ($K_2CO_3/KHCO_3/Al_2O_3$)	3,560 /3,560 /3,900	กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร
สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคของแข็งเริ่มต้น ($K_2CO_3/KHCO_3/Al_2O_3$)	0.137/0.01/0.89	-
สัดส่วนของอนุภาคของแข็งเริ่มต้น	0.6	-
เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง	380	ไมโครเมตร
ความหนาแน่นของแก๊ส ($CO_2/H_2O/N_2$)	1.788 /0.554 /1.138	กิโลกรัมต่อ ลูกบาศก์เมตร
สัดส่วนโดยมวลของแก๊สที่ป้อนเข้าหอดูดซับ ($CO_2/H_2O/N_2$)	0.292035/0.119469/0.588496	-
ความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้าหอดูดซับ	25	ลิตรต่อนาที
อุณหภูมิของแก๊สที่ป้อนเข้าหอดูดซับ	333	เคลวิน

การจำลองส่วนแรกจะเป็นการศึกษาเพื่อหารูปแบบการไหลและการกระจายตัวของสัสด่วนของแข็งที่สอดคล้องกับการทดลองสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งภายใต้สภาวะที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในระบบ โดยลักษณะของหอโรเซออร์ที่ใช้ในการศึกษาจะแสดงดังรูปที่ 8 แสดงแผนภาพของหอโรเซออร์ในระบบ 3 มิติที่ใช้ในการจำลอง ซึ่งแบบจำลองที่มีรูปแบบการไหลและการกระจายตัวของสัสด่วนของแข็งที่สอดคล้องกับการทดลองในส่วนนี้จะนำไปใช้ในการทำนายประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป หลังจากที่ได้แบบจำลองที่สอดคล้องกับผลการทดลองแล้ว ในส่วนที่สองจะศึกษาผลกระทบของตัวแปรกระบวนการต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอโรเซออร์ โดยตัวแปรกระบวนการที่ใช้ในการศึกษา ประกอบไปด้วย อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น ขนาดท่อน้ำหล่อเย็น และลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซออร์ เพื่อหาสภาวะดำเนินการที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตภายใต้หอโรเซออร์ที่ดีที่สุด



รูปที่ 8 แผนภาพของหอโรเซออร์แบบ 3 มิติที่ใช้ในการจำลอง

3.3 การศึกษาแบบจำลองในงานวิจัยแบบไม่มีปฏิกิริยาเคมี

ในการศึกษาแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งภายในหอโรเซออร์ โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมี เพื่อหารูปแบบการไหลและการกระจายตัวของสัณฐานของแข็งที่สอดคล้องกับการทดลอง ซึ่งในการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับผลการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย การหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม (Mathematic of Model) การแบ่งจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณที่เหมาะสม (Grid Independency Test) และตัวแทนของเวลาที่เหมาะสมในการคำนวณ (Time Independency Test)

3.3.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ (Mathematic Model)

แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการศึกษาระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งภายในหอโรเซออร์ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT 2019 R3 ในการคำนวณระบบที่ต้องการศึกษาจะประกอบไปด้วยวิถุภาค 2 วิถุภาค คือวิถุภาคแก๊สและของแข็ง ในงานวิจัยนี้จึงใช้ระเบียบวิธีการของออยเลอร์-ออยเลอร์ (Eulerian- Eulerian Method) เพื่ออธิบายผลของการไหลที่เกิดขึ้น และใช้ชุดสมการอนุรักษ์ร่วมกับทฤษฎีจลนการไหลของแข็ง (Kinetic Theory of Granular Flow, KTGF) [33] ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายการไหลและการชนกันของอนุภาคที่เกิดขึ้นในระบบที่ทำการศึกษา มาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการจำลองนี้

3.3.1.1 สมการอนุรักษ์พื้นฐาน (Conservation Equations) [33]

1) สมการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation Equations)

วิถุภาคแก๊ส

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \vec{v}_g) = S_{m,g} \quad (3.1)$$

วิถุภาคของแข็ง

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_s \vec{v}_s) = S_{m,s} \quad (3.2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

\vec{v} คือ ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)

S_m คือ พจน์เพิ่มเติมกรณีที่มีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาค
(กิโลกรัมต่อวินาที)

g คือ วัฏภาคแก๊ส (-)

s คือ วัฏภาคของแข็ง (-)

2) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Conservation Equations)

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}_g) + \rho_g \vec{g} + \vec{F}_g \quad (3.3)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}_s) + \rho_s \vec{g} + \vec{F}_s \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.5)$$

เมื่อ

p คือ ความดัน (พาสคัล)

$\bar{\tau}$ คือ ความเค้นเทนเซอร์ (พาสคัล)

\vec{F} คือ แรงอื่น ๆ ที่อาจเกิดจากแรงต้าน หรือแหล่งพลังงานอื่น ๆ

(กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาทีกำลังสอง)

3) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Equations)

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g h_g) + \nabla \cdot (\rho_g h_g \vec{v}_g) = \nabla \cdot [(k_g + k_{t,g}) \nabla T_g] + S_{h,g} \quad (3.6)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s h_s) + \nabla \cdot (\rho_s h_s \vec{v}_s) = \nabla \cdot [(k_s + k_{t,s}) \nabla T_s] + S_{h,s} \quad (3.7)$$

เมื่อ

$$h_q = \int_{T_{ref}}^T C_{p,q} dT_q \quad (3.8)$$

เมื่อ	h	คือ เอนทัลปี (จุลต่อเคลวิน)
	k	คือ ค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
	k_t	คือ ค่าการนำความร้อนที่เกิดจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
	S_h	คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากแหล่งอื่นๆ ที่ถูกนิยามขึ้น (วัตต์)
	q	คือ วัฏภาค (-)

โดยชุดสมการอนุรักษ์พื้นฐานที่ประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน จะถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแก้สมการในระบบวัฏภาคทั้งแก๊สและของแข็ง นอกจากนี้ยังมีการนำสมการเสริม ซึ่งประกอบด้วยสมการอนุรักษ์องค์ประกอบวัฏภาค สมการพลังงานจลน์การแกว่งของของแข็ง

3.3.1.2 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบวัฏภาค

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{g,i}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{g,i}) = -\nabla \cdot \vec{J}_{g,i} + R_{g,i} + S_{g,i} \quad (3.9)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{s,i}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{s,i}) = -\nabla \cdot \vec{J}_{s,i} + R_{s,i} + S_{s,i} \quad (3.10)$$

เมื่อ	i	คือ องค์ประกอบ (-)
	Y	คือ สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ (-)
	J	คือ ฟลักซ์การแพร่ขององค์ประกอบ (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)
	R	คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)
	S	คือ อัตราการเพิ่มขององค์ประกอบจากแหล่งอื่น ๆ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)

3.3.1.3 สมการพลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็ง

วิภูภาคของแข็ง

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s \theta) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \theta) v_s \right] = (-\nabla P_s \bar{I} + \tau_s) \cdot \nabla v_s + \nabla \cdot (K_s \nabla \theta) - \gamma_s \quad (3.11)$$

เมื่อ θ คือ พลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็ง

(เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง)

K_s คือ พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการนำ
(กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

γ_s คือ พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชนแบบไม่
ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)

ε_s คือ สัดส่วนของแข็ง

3.3.1.4 แบบจำลองสัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวิภูภาค Wen&Yu [27]

$$\beta_{gs} = \frac{3(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{4d_p} \rho_g |v_g - v_s| C_{D0} \varepsilon_g^{-2.65} \quad (3.12)$$

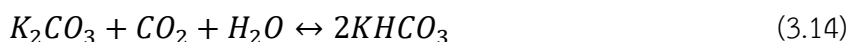
$$C_{D0} = \frac{24}{Re} (1 + 0.15(1 - \varepsilon_g) Re^{0.687}) \quad (3.13)$$

เมื่อ C_{D0} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวิภูภาค (-)

Re คือ ตัวเลขไร้นหน่วยเรย์โนลด์ (-)

3.3.1.5 สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมี

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาเป็นตัวดูดซับ
ของแข็งในกระบวนการ โดยมีสมการดังนี้



และนำเสนอสมการการเกิดปฏิกิริยาจากงานวิจัยของ Kongkitisupchai และคณะ [9] ที่รวมอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและย้อนกลับของการใช้ตัวดูดซับมาปรับใช้ในระบบไฟล์ประยุกต์ (User-defined Function) ดังสมการต่อไปนี้

$$r = k[CO_2]^{0.4}[H_2O]^{0.4} \quad (3.15)$$

$$k = 1 * 10^{-10} \exp\left(\frac{70}{RT}\right) \quad (3.16)$$

3.3.2 การแบ่งจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณที่เหมาะสม (Grid Independency Test)

การแบ่งจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณที่เหมาะสม ทำได้โดยการเพิ่มหรือลดปริมาณของจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะทราบได้ว่าจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณเหมาะสมหรือไม่ โดยสามารถดูได้จากการลู่อู่เข้าสู่ค่าตอบ การที่ปริมาณของจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณที่สูง จะส่งผลให้การคำนวณที่เกิดขึ้นมีความละเอียดและแม่นยำมากขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณของจำนวนเซลล์ที่สูงจะทำให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณสูงขึ้นตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการแบ่งเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณ เพื่อหาจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณที่เหมาะสมที่สุดในการศึกษา ซึ่งจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณประกอบไปด้วย 200,000 300,000 400,000 และ 500,000 เซลล์ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การแบ่งจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณที่เหมาะสม

การทดลอง	จำนวนเซลล์การคำนวณ (เซลล์)	ขนาดขั้นเวลา (วินาที)	จำนวนขั้นเวลา (ขั้น)
1	200,000	0.001	100,000
2	300,000	0.001	100,000
3	400,000	0.001	100,000
4	500,000	0.001	100,000

3.3.3 เวลาที่เหมาะสมในการคำนวณ (Time Independency Test)

การหาเวลาที่เหมาะสมในการคำนวณ คือ การหาช่วงที่ระบบมีการคงตัวหรือเสมือนคงตัว ซึ่งมีความสำคัญต่อการจำลองเป็นอย่างมาก เนื่องจากในการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองจะใช้ชุดข้อมูลจากตัวแทนของเวลาที่มีความเหมาะสม ซึ่งเวลาที่เหมาะสมในการคำนวณจะส่งผลให้การวิเคราะห์ที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น

3.4 การศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการ (Operating Parameters)

ในส่วนที่สองของการศึกษาจะเป็นการศึกษาผลกระทบของตัวแปรกระบวนการต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์ ซึ่งจะนำแบบจำลองที่ได้จากส่วนที่หนึ่งมาทำการศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการประกอบด้วย อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น ขนาดท่อน้ำหล่อเย็น และลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์

1) อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (Cooling Water Temperature)

อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นในการดำเนินการจะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 278 เคลวิน และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 298 เคลวิน ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการศึกษา

กรณี	อุณหภูมิของน้ำในการดำเนินการ (เคลวิน)
พื้นฐาน (Base Case)	298
1	293
2	288
3	283
4	278

2) อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (Flow Rate of Cooling Water)

อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นในการดำเนินการ จะมีค่าสูงสุดเท่ากับ 2.99×10^{-1} ลูกบาศก์เมตร/วินาที และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.99×10^{-3} ลูกบาศก์เมตร/วินาที ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการศึกษา

กรณี	อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)
พื้นฐาน (Base Case)	1.50×10^{-01}
1	2.99×10^{-01}
2	2.99×10^{-02}
3	1.50×10^{-02}
4	2.99×10^{-03}

3) ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซอร์ (Distance between Cooling Stage in Riser)

ระยะห่างระหว่างชุดท่อภายในหอโรเซอร์ จะมีระยะห่างน้อยที่สุดเท่ากับ $h/H = 0.0074$ และมีระยะห่างมากที่สุดเท่ากับ $h/H = 0.0474$ ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซอร์ที่ใช้ในการศึกษา

กรณี	ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น
พื้นฐาน (Base Case)	$h/H = 0.0274$
1	$h/H = 0.0074$
2	$h/H = 0.0174$
3	$h/H = 0.0374$
4	$h/H = 0.0474$

4) ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซอร์ (Diameter of Cooling Tube in Riser)

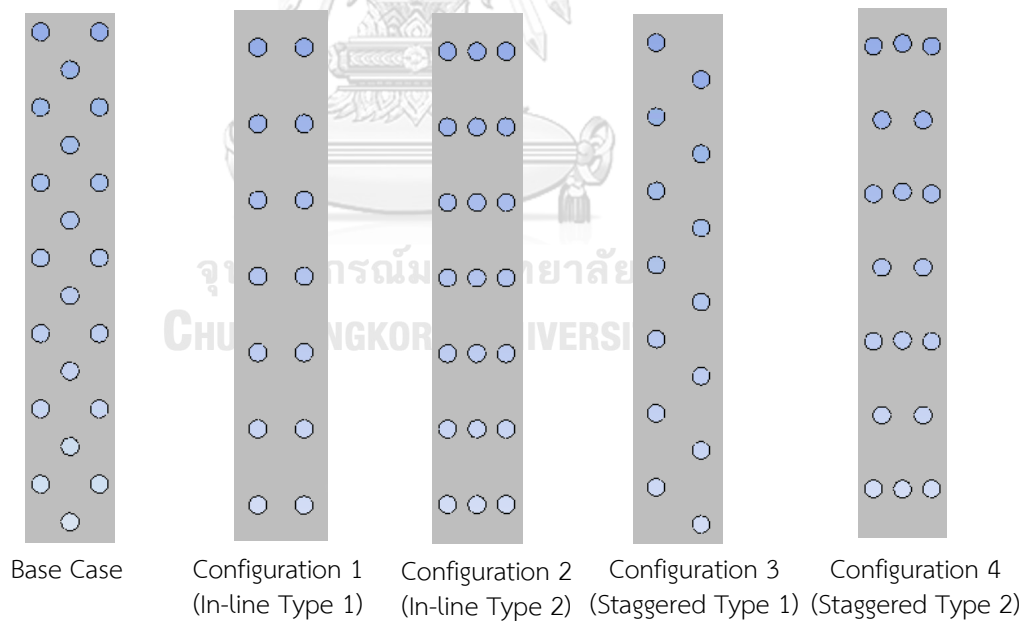
ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซอร์ จะมีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ $1/8$ นิ้ว และมีขนาดใหญ่ที่สุดเท่ากับ $5/8$ นิ้ว ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ขนาดของท่อหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ที่ใช้ในการศึกษา

กรณี	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก (นิ้ว)
พื้นฐาน (Base Case)	3/8
1	1/8
2	1/4
3	1/2
4	5/8

5) ลักษณะการจัดเรียงท่อหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ (Configuration of Cooling Tubes in Riser)

ลักษณะการจัดเรียงท่อหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ จะมีลักษณะการจัดเรียงแตกต่างกัน 5 รูปแบบ โดยแบ่งเป็นแบบ In-line 2 กรณี และ Staggered 2 กรณี



รูปที่ 9 ลักษณะการจัดเรียงท่อหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์แบบต่าง ๆ

ในการศึกษาเพื่อหาภาวะในการดำเนินการที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอโรเซอรัด้วยดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต จากตัวแปรกระบวนการดังกล่าวนี้ สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 21 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 12 ซึ่งมีตัวแปรตอบสนอง (Response) คือ ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ (%CO₂ Removal) ดังในสมการที่ 3.17

$$\%CO_2 \text{ removal} = \frac{\text{Mass fraction of } CO_2(\text{in}) - \text{Mass fraction of } CO_2(\text{out})}{\text{Mass fraction of } CO_2(\text{in})} \times 100 \quad (3.17)$$

ตารางที่ 12 กรณีศึกษา 21 กรณี

กรณีศึกษา	อุณหภูมิของน้ำ (เคลวิน)	อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)	ระยะห่างระหว่างชุดท่อ	ขนาดของท่อ (นิ้ว)	ลักษณะการจัดเรียงท่อ
1	298	1.50×10^{-01}	0.0274	3/8	-
2	293	1.50×10^{-01}	0.0274	3/8	-
3	288	1.50×10^{-01}	0.0274	3/8	-
4	283	1.50×10^{-01}	0.0274	3/8	-
5	278	1.50×10^{-01}	0.0274	3/8	-
6	298	2.99×10^{-01}	0.0274	3/8	-
7	298	2.99×10^{-02}	0.0274	3/8	-
8	298	1.50×10^{-02}	0.0274	3/8	-
9	298	1.50×10^{-01}	0.0274	3/8	-
10	298	1.50×10^{-01}	0.0074	3/8	-
11	298	1.50×10^{-01}	0.0174	3/8	-
12	298	1.50×10^{-01}	0.0374	3/8	-
13	298	1.50×10^{-01}	0.0474	3/8	-
14	298	1.50×10^{-01}	0.0274	1/8	-
15	298	1.50×10^{-01}	0.0274	1/4	-
16	298	1.50×10^{-01}	0.0274	1/2	-

กรณีศึกษา	อุณหภูมิของน้ำ (เคลวิน)	อัตราการไหลของน้ำ (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)	ระยะห่างระหว่างชุดท่อ	ขนาดของท่อ (นิ้ว)	ลักษณะการจัดเรียงท่อ
17	298	1.50×10^{-01}	0.0274	5/8	-
18	298	1.50×10^{-01}	0.0274	3/8	1
19	298	1.50×10^{-01}	0.0274	3/8	2
20	298	1.50×10^{-01}	0.0274	3/8	3
21	298	1.50×10^{-01}	0.0274	3/8	4



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

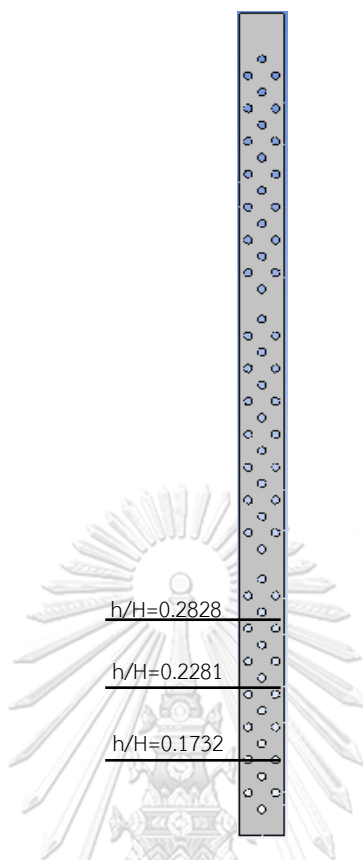
ในงานวิจัยส่วนนี้จะแสดงผลที่ได้จากการจำลองที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดไรเซอร์แบบอนุกรมหมุมไม่คงที่แบบ 3 มิติ ในระบบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีและมีปฏิกิริยาเคมี โดยผลการจำลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย

- 1) พลศาสตร์ของระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่ไม่มีเกิดการเกิดปฏิกิริยา (Cold Flow)
- 2) พลศาสตร์ของระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยา (Hot Flow)

ผลที่ได้จากการศึกษาทั้ง 2 ส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลของภาวะในการดำเนินการที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตในส่วนไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบอนุกรมหมุมไม่คงที่ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

4.1 พลศาสตร์ของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่ไม่มีเกิดการเกิดปฏิกิริยา (Cold Flow)

ในส่วนนี้เป็นการจำลองกระบวนการระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่ไม่มีเกิดการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เพื่อดูพฤติกรรมของของไหลและอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นในหอไรเซอร์แบบอนุกรมหมุมไม่คงที่ โดยทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยของ Boonprasop และคณะ [7] [8] ที่ความสูง $h/H = 0.1732$, $h/H = 0.2281$ และ $h/H = 0.2828$ ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยภาวะในการดำเนินการที่ใช้มีค่าความเร็วของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 25 ลิตรต่อนาที อนุภาคของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นเท่ากับ 380 ไมโครเมตร และ 3,560 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 10 ความสูงที่ใช้ในการเปรียบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลอง

4.1.1 การหาจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการคำนวณ (Grid Independency Test)

สำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ จำนวนเซลล์นั้นจะส่งผลโดยตรงต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง ซึ่งเซลล์ในการจำลองที่ไม่ละเอียด (Coarse Grid) ผลที่ได้จากการจำลองอาจลู่ออกจากคำตอบ (Divergence) หรือผลการจำลองมีความถูกต้องแม่นยำต่ำ ในขณะที่เซลล์ในการจำลองที่ละเอียด (Fine Grid) ผลที่ได้จากการจำลองจะลู่เข้าสู่คำตอบ (Convergence) หรือผลการจำลองจะมีความถูกต้องแม่นยำสูงมากขึ้น แต่จะทำให้ใช้ระยะเวลาในการจำลองที่นานขึ้นไปด้วย ทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้นการหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสม (Optimum Grid Number) จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ผลการจำลองที่ได้มีความแม่นยำและใช้เวลาที่เหมาะสมในการคำนวณ

ในรูปที่ 11 แสดงการกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่ได้จากการจำลองโดยใช้เซลล์ในการคำนวณที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 200,000 300,000 400,000 และ 500,000 เซลล์ ตามลำดับ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการใช้เซลล์การคำนวณ 200,000 เซลล์ นั้นผลการจำลอง

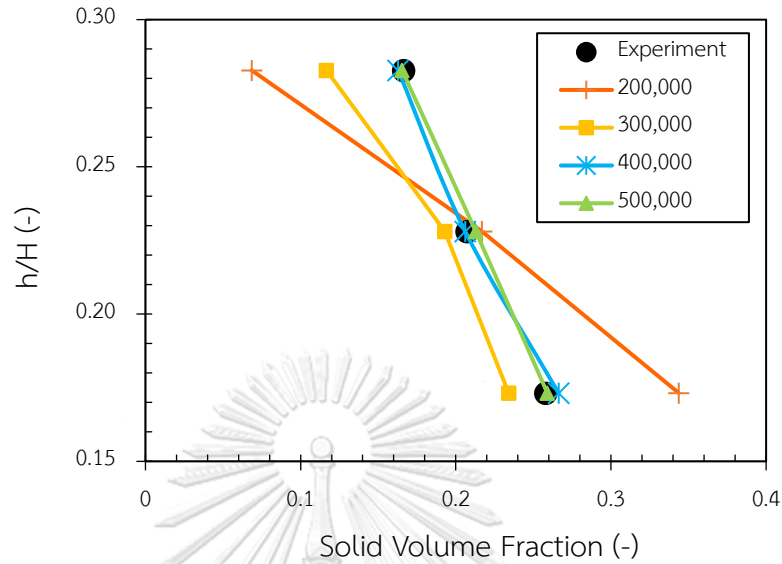
จะมีลักษณะที่กว้างที่สุด เมื่อเทียบกับเซลล์การคำนวณ 300,000 400,000 และ 500,000 เซลล์ ดังนั้น เซลล์การคำนวณ 200,000 เซลล์ จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับการจำลองนี้ เนื่องจากเซลล์การคำนวณมีความละเอียดไม่เพียงพอ ทำให้ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการยังมีความแม่นยำไม่มากพอ เมื่อพิจารณาจำนวนเซลล์การคำนวณเป็น 300,000 เซลล์ และ 400,000 เซลล์ พบว่าที่ความสูง $h/H = 0.2828$ ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ได้ยังไม่มี ความแม่นยำมากพอ และเมื่อพิจารณาจำนวนเซลล์การคำนวณเป็น 500,000 เซลล์ จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันกับเซลล์การคำนวณจำนวน 400,000 เซลล์ และได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังนั้นจำนวนเซลล์การคำนวณที่เหมาะสมในการจำลอง คือ 400,000 เซลล์ เนื่องจากใช้ทรัพยากรในการคำนวณน้อยกว่าและมีผลการจำลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Boonprasop และคณะ [7] [8] จึงเลือกใช้จำนวนเซลล์การคำนวณที่ 400,000 เซลล์ในการจำลองต่อไป

ในรูปที่ 12 แสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดเบดโรเซออร์แบบอนุกรมไม่คงที่ ที่ใช้จำนวนเซลล์การคำนวณที่ 400,000 เซลล์ โดยมาตราส่วนคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งจะแสดงปริมาณที่มีอยู่ของของแข็ง ซึ่งสีแดงจะแสดงถึงค่าสูงสุดและสีน้ำเงินจะแสดงค่าต่ำสุดในช่วง 0.6 ถึง 0 โดยสามารถกล่าวได้ว่าบริเวณสีแดงมีปริมาณของแข็งสูงสุดและลดลงตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าที่เวลา 10 วินาที ของแข็งจะเกิดฟลูอิดและหน้าเบดมีการขยายตัวบริเวณด้านล่างของหอโรเซออร์ เมื่อเวลาในการจำลองผ่านไป จะเห็นว่าเริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในระบบและในรูปที่ 13 แสดงให้เห็นพฤติกรรมภายในหอโรเซออร์เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตเห็นฟองแก๊สเกิดขึ้นใกล้กับบริเวณที่น้ำหล่อเย็นเป็นจำนวนมาก เมื่อคำนวณหาค่าความเร็วในการเกิดฟลูอิดไฮเซชัน พบว่าอยู่ในช่วงความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮเซชันแบบฟองแก๊ส โดยค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไฮเซชันจะคำนวณจากความสัมพันธ์ของ Wen และ Yu ดังแสดงในสมการที่ 4.1

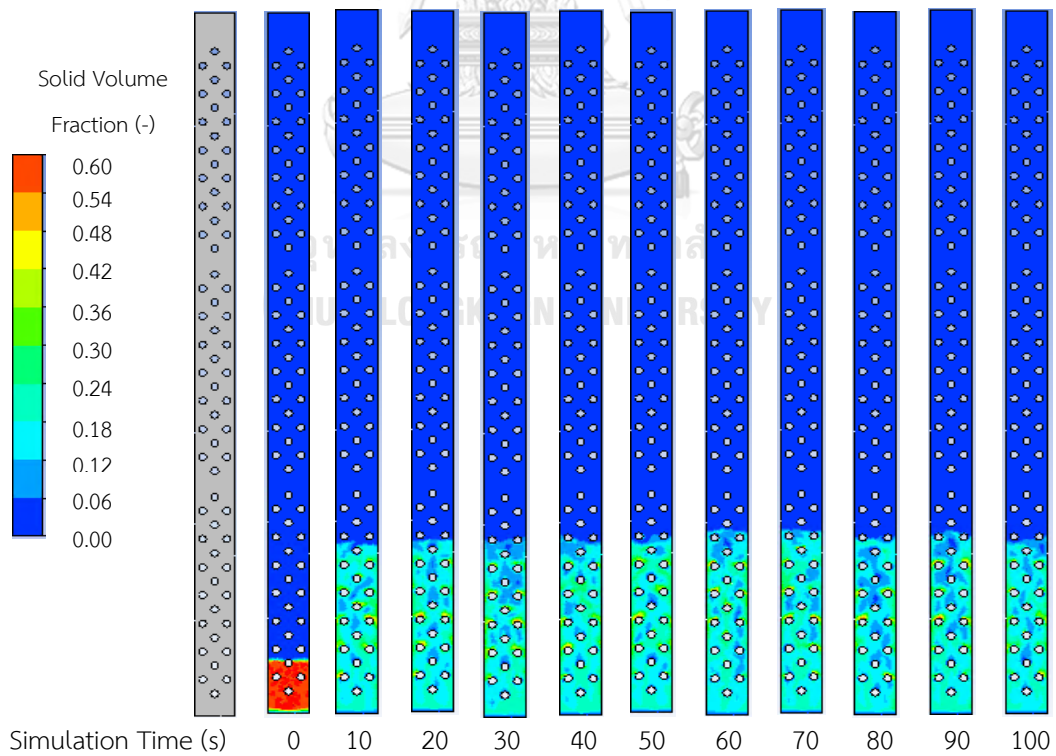
$$U_{mf} = Re_{mf}\mu/\rho D_{sv} \quad (4.1)$$

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบว่าช่วงการไหลที่เกิดขึ้นเป็นช่วงการไหลแบบฟองแก๊สซึ่งช่วงการไหลแบบฟองแก๊สจะทำให้เกิดการผสมได้ดีระหว่างเฟสของแข็งและเฟสแก๊ส

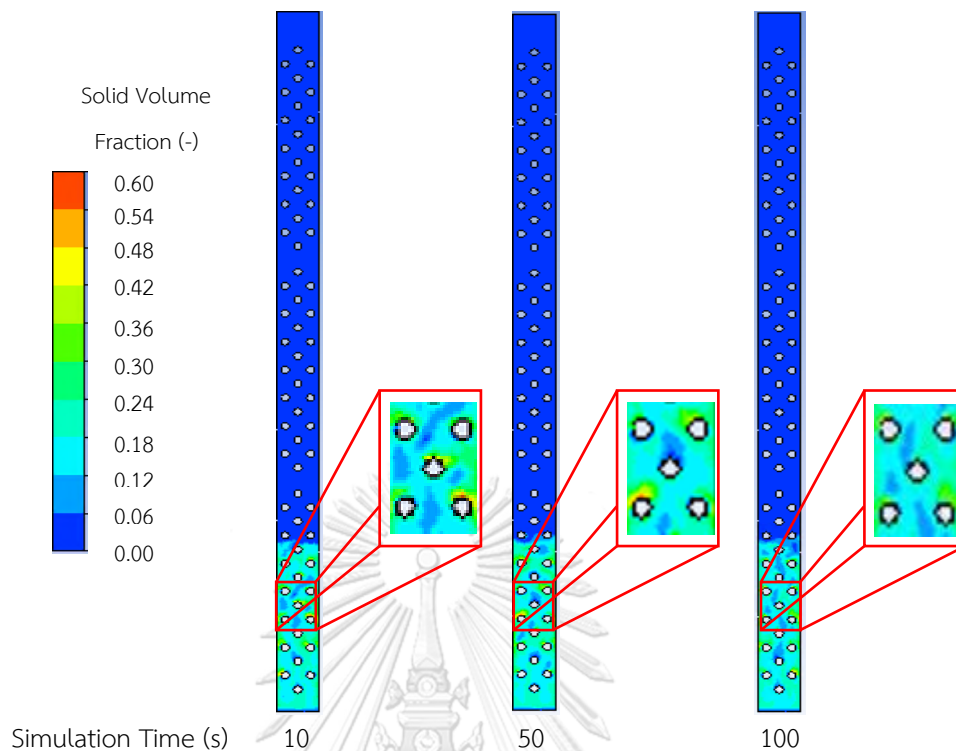
ในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรเซชันแบบอนุกรมไม่คงที่



รูปที่ 11 การกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่ได้จากการจำลองโดยใช้เซลล์ในการคำนวณที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 200,000 300,000 400,000 และ 500,000 เซลล์



รูปที่ 12 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งในโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรเซชันที่ใช้จำนวนเซลล์การคำนวณที่ 400,000 เซลล์

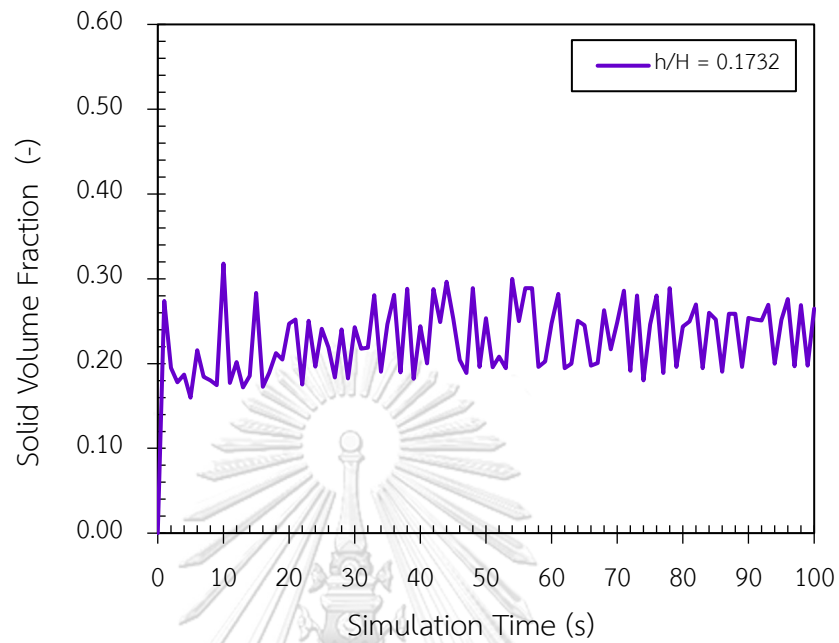


รูปที่ 13 พฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในหอโรเซออร์

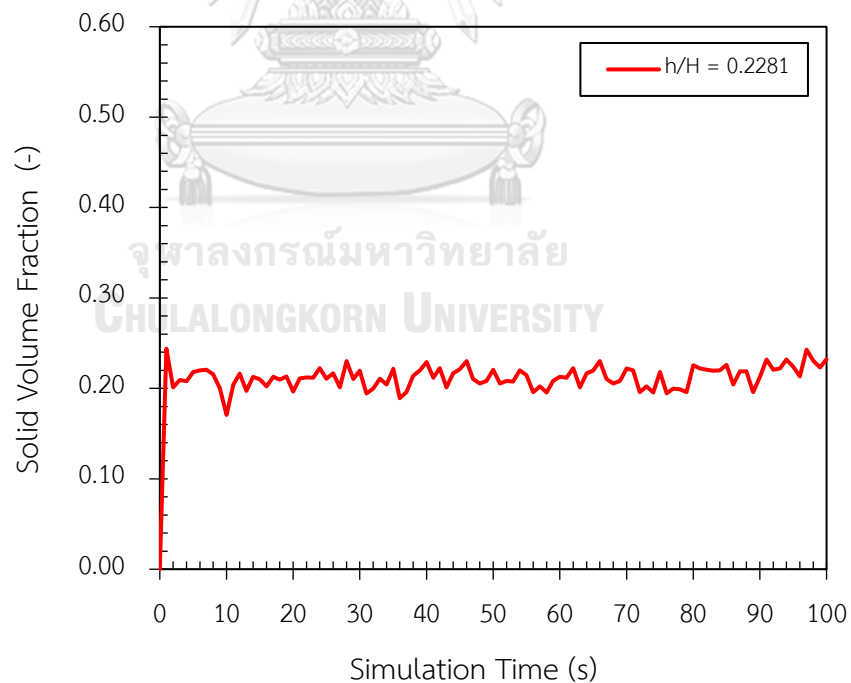
4.1.2 การหาเวลาที่เหมาะสมในการคำนวณ (Time Independency Test)

การเกิดฟลูอิดเซชันในโรเซออร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบอนุกรมไม่คงที่นั้น เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อน เนื่องจากภายในเครื่องปฏิกรณ์อนุภาคของแข็งจะเกิดการเคลื่อนที่ตลอดเวลา จึงเป็นการยากที่ระบบจะเข้าสู่ภาวะคงตัว (Steady State) ดังนั้นการหาเวลาที่เหมาะสมในการจำลอง จึงมีความสำคัญในการใช้เป็นตัวแทนของชุดข้อมูลในการทำนายพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการจำลองจึงต้องมีการหาภาวะเสมือนคงตัว (Quasi-steady State) ของระบบเพื่อใช้เป็นตัวแทนของพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในระบบ จากรูปที่ 14-16 แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง (Solid Volume Fraction) ที่ความสูง $h/H = 0.1732$ 0.2281 และ 0.2828 ในระยะเวลาการจำลอง 0 ถึง 100 วินาที พบว่าในช่วงแรกของการจำลองที่เวลา 0-20 วินาที ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งจะมีการกวัดแกว่ง เนื่องจากอนุภาคของแข็งภายในระบบช่วงแรกเกิดขยายตัวของเบดโดยแก๊สเพื่อให้เกิดกระบวนการฟลูอิดเซชันภายในระบบ ที่เวลาในการจำลอง 20-60 วินาที ค่าของสัดส่วนปริมาตรของแข็งมีค่ากวัดแกว่งเพียงเล็กน้อย จึงนับได้เป็นภาวะเสมือนค่าคงตัว สังเกตได้จากลักษณะการกวัดแกว่งที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าว เนื่องจากในระบบมีการเกิดขึ้นของฟองแก๊สและแตกตัวตลอดเวลา จึงเพิ่มช่วงเวลาในการจำลองออกไปจนถึง 100 วินาที

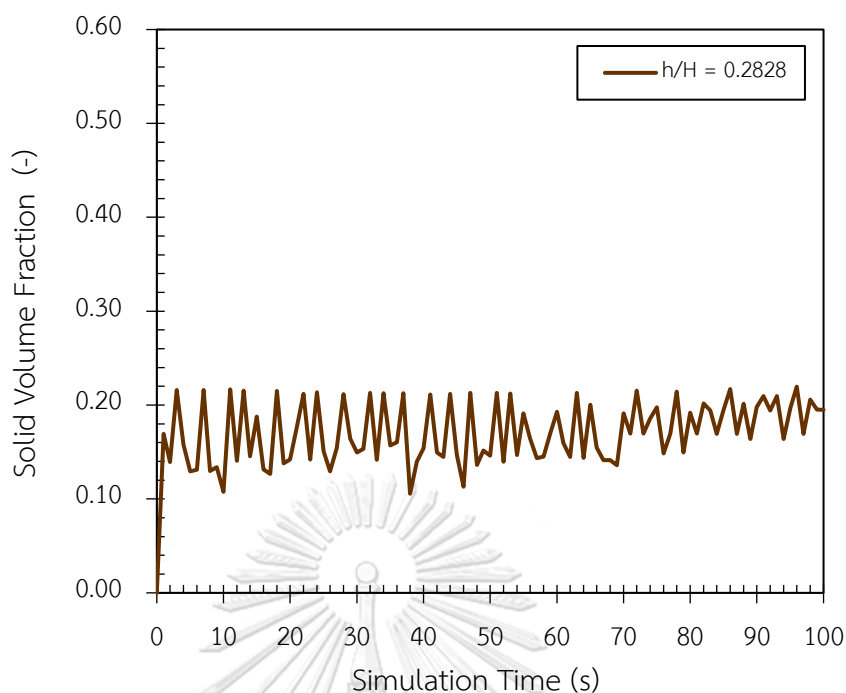
เพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียรเหมือนคนตัวที่สมบูรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ช่วงเวลาในการจำลองที่ 60-100 วินาที เป็นตัวแทนของระบบในการคำนวณค่าต่าง ๆ ต่อไป



รูปที่ 14 สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ความสูง $h/H = 0.1732$



รูปที่ 15 สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ความสูง $h/H = 0.2281$



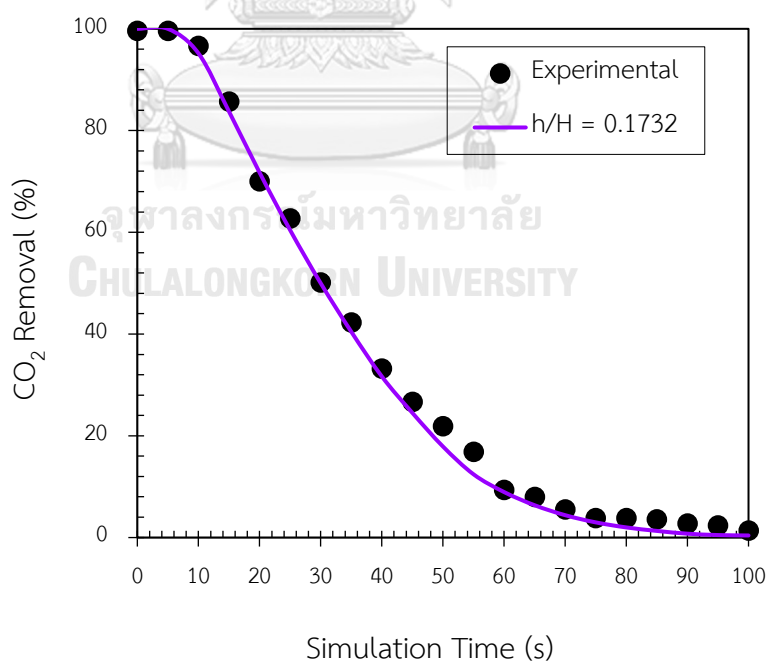
รูปที่ 16 สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ความสูง $h/H = 0.2828$

4.2 พลศาสตร์ของระบบการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยา (Hot Flow)

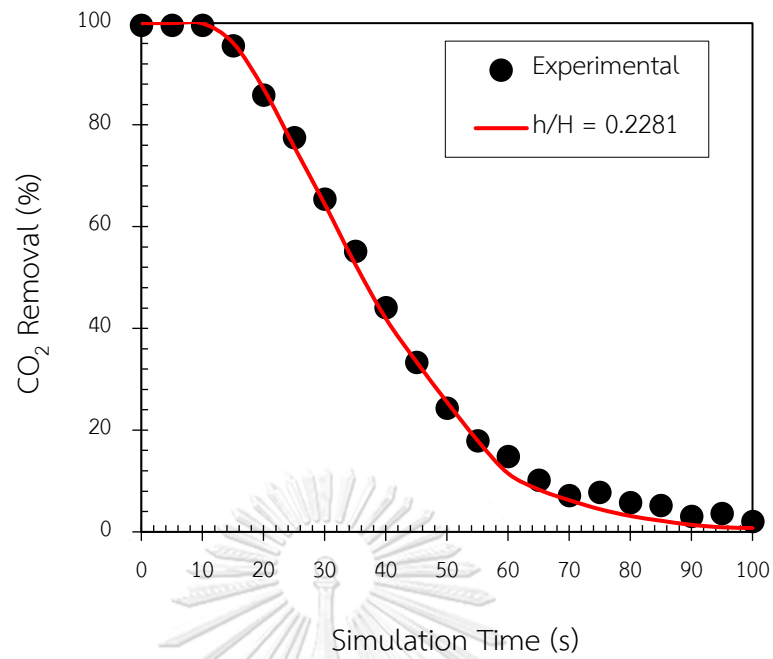
ในส่วนนี้เป็นการศึกษาพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในหอไรเซออร์แบบอนุกรมที่มีไม่คงที่แบบ 3 มิติ ในระบบที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยใช้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ตัวดูดซับชนิดของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตจากงานวิจัยของ Kongkitisupchai และคณะ [9] แสดงในสมการที่ 3.14-3.16 เพื่อหาแบบจำลองที่สำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สอดคล้องกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ Boonprasop และคณะ [7] [8] โดยใช้ร้อยละของ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ (%CO₂ Removal) แสดงในสมการที่ 3.17 และ รายละเอียดต่าง ๆ ของตัวแปรดำเนินการที่นำมาใช้ในการจำลองดังแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่ง กรณีสึกษาที่ 1 เป็นค่าตัวแปรดำเนินการเดียวกับการทดลองจริง

4.2.1 ผลของแบบจำลองที่เกิดปฏิกิริยาเคมี

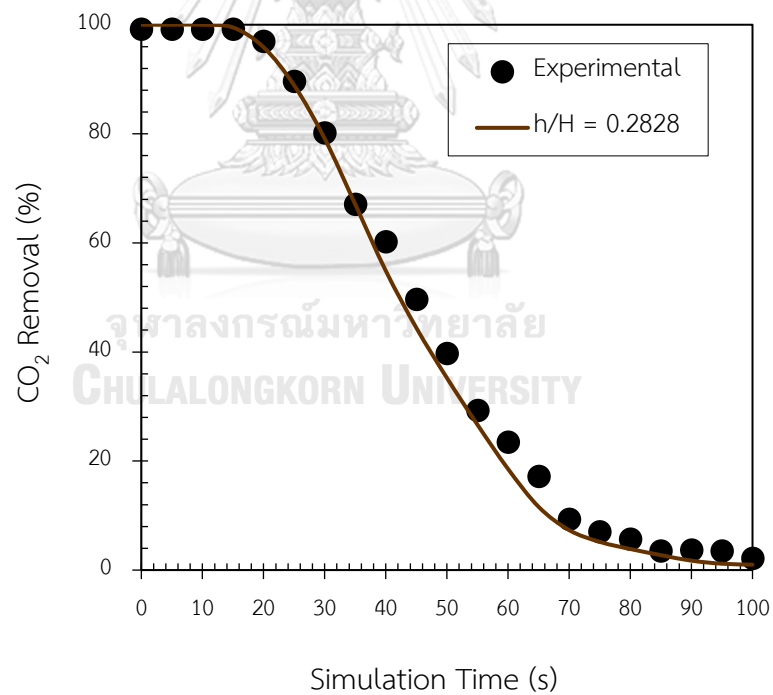
จากรูปที่ 17 แสดงร้อยละของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ สำหรับแบบจำลองที่ใช้อุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็น 298 เคลวิน ที่ตำแหน่งต่างๆ ของหอไรเซออร์ ซึ่งในการจำลองเพื่อดูผลศาสตร์การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะรายงานผลการจำลองที่นำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ จากการจำลองพบว่าค่าร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ได้จากการจำลองมีค่าสอดคล้องกับผลการทดลอง ซึ่งจากรูปดังกล่าวจะพบว่าจุดสีดำ คือ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ได้จากการทดลอง ส่วนเส้นสีม่วง สีแดง และสีน้ำตาล คือ ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ได้จากการจำลองที่ความสูง $h/H = 0.1732$ 0.2281 และ 0.2828 จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตในหอไรเซออร์แบบอนุกรมมีไม่คงที่ สามารถนำไปใช้ในการทำนายการเกิดปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในภาวะดำเนินการอื่นได้ เพื่อหาภาวะดำเนินการที่เพิ่มประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



(ก)



(ข)

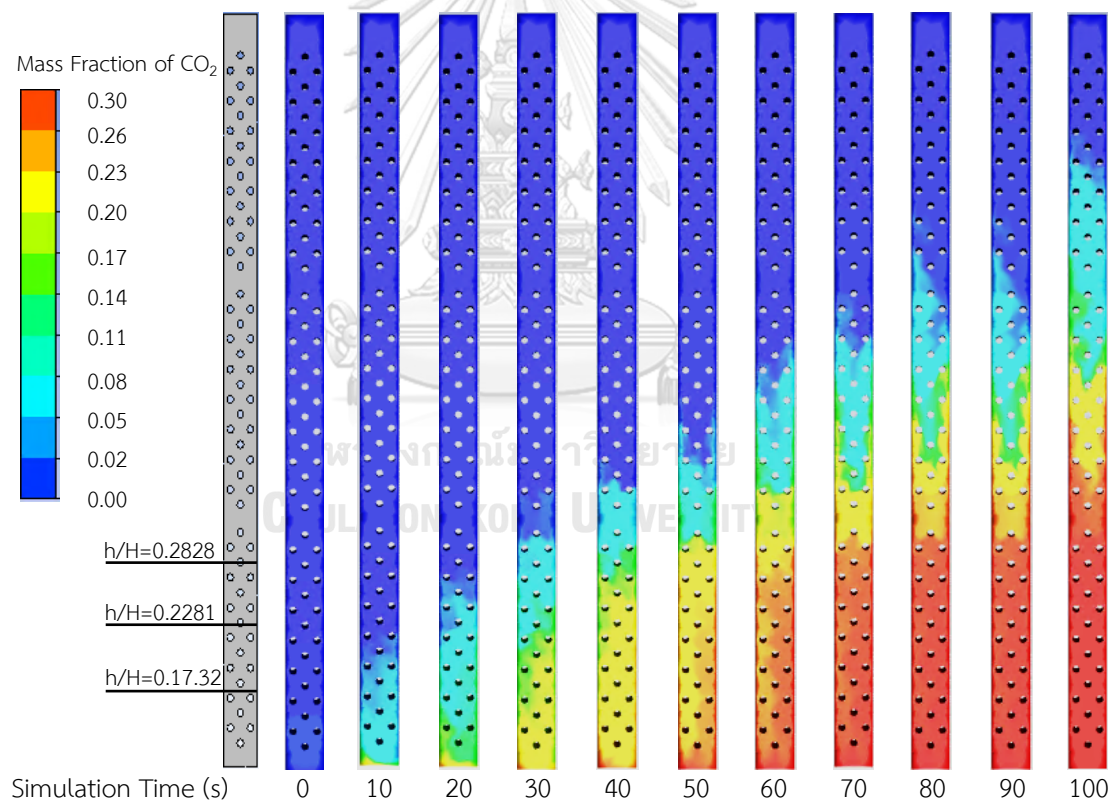


(ค)

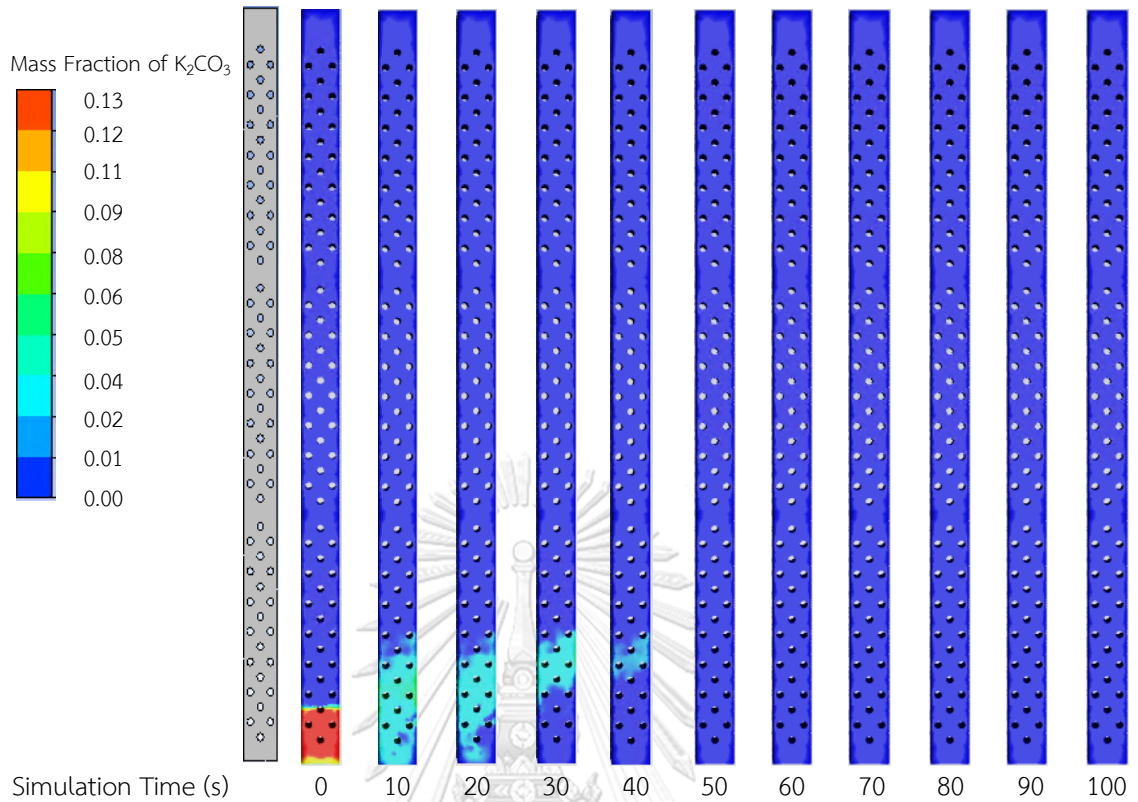
รูปที่ 17 ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ

(ก) $h/H = 0.1732$ (ข) $h/H = 0.2281$ (ค) $h/H = 0.2828$

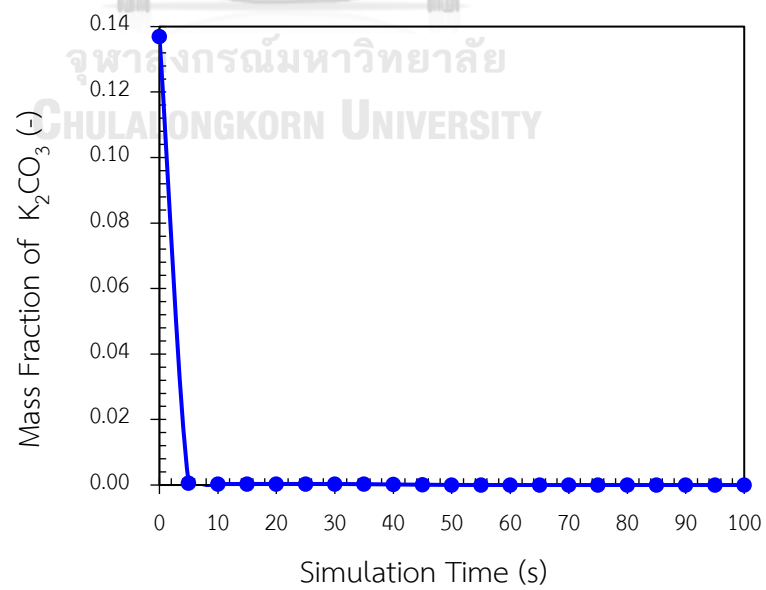
จากรูปที่ 18 แสดงถึงคอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับแบบจำลองที่ใช้อุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็น 298 เคลวิน โดยจากผลการจำลองจะสังเกตเห็นว่าช่วงแรกของการจำลองปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในหอไรเซอร์มีปริมาณที่น้อย เนื่องจากในช่วงแรกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดปฏิกิริยาเคมีกับตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต เปลี่ยนเป็นโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต จากรูปที่ 19-20 แสดงคอนทัวร์สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ช่วงเวลาต่าง ๆ และรูปที่ 21-22 แสดงคอนทัวร์สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเวลาการจำลองผ่านไปปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตเกิดปฏิกิริยาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับต่อไป



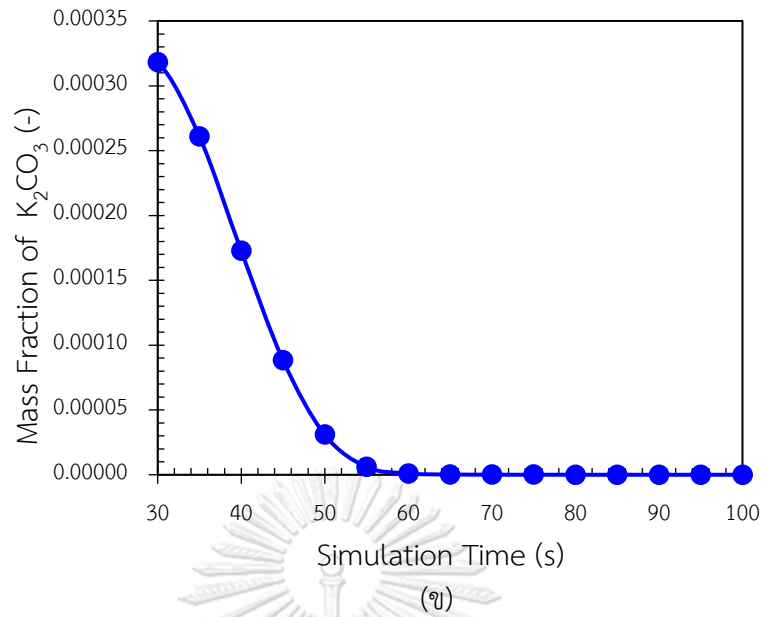
รูปที่ 18 คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
สำหรับแบบจำลองที่ใช้อุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็น 298 เคลวิน



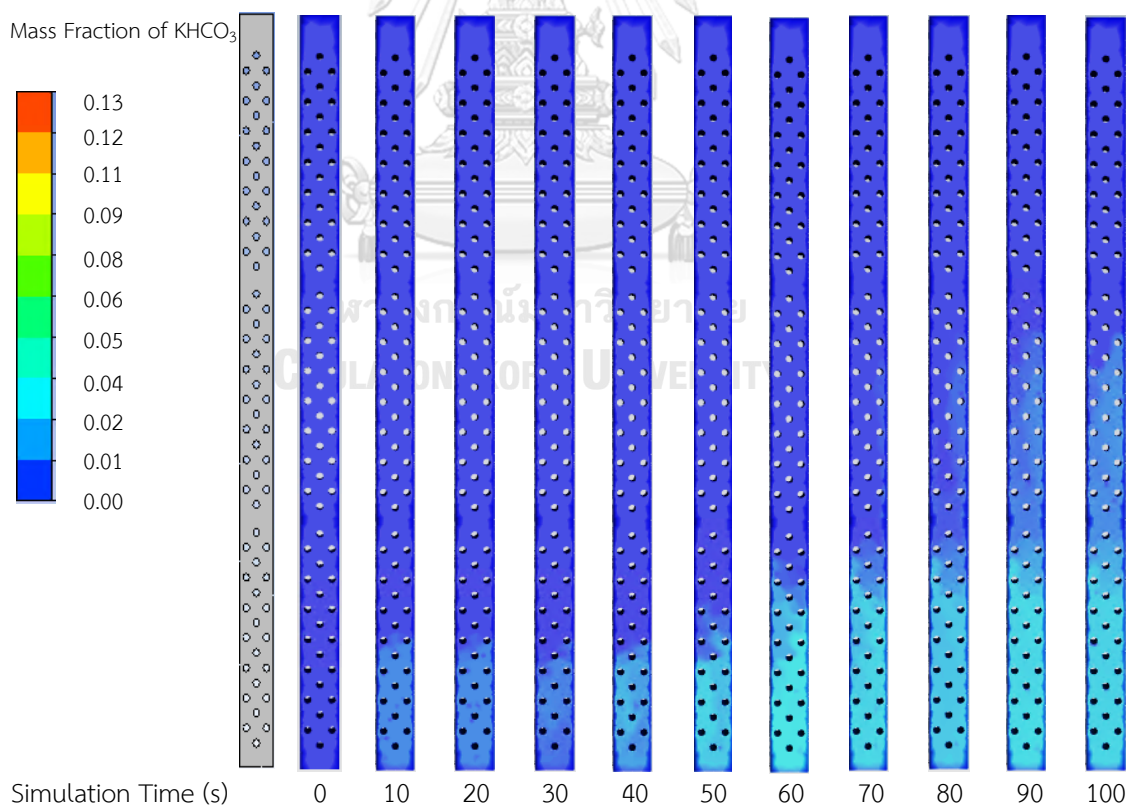
รูปที่ 19 คอนทัวร์สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนต
สำหรับแบบจำลองที่ใช้อุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็น 298 เคลวิน



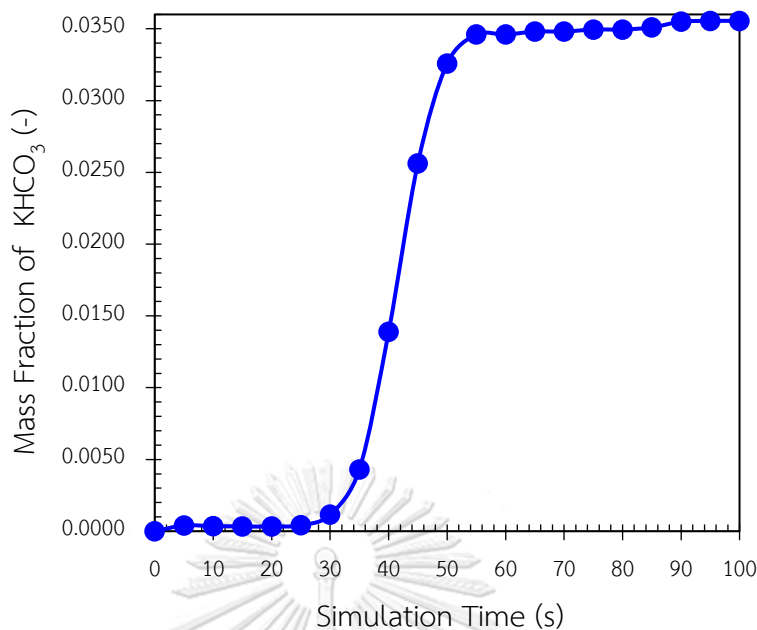
(ก)



รูปที่ 20 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ช่วงเวลาต่าง ๆ
 (ก) ที่เวลาการจำลอง 0 ถึง 100 วินาที (ข) ที่เวลาการจำลอง 30 ถึง 100 วินาที



รูปที่ 21 คอนทัวร์สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต
 สำหรับแบบจำลองที่ใช้อุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็น 298 เคลวิน

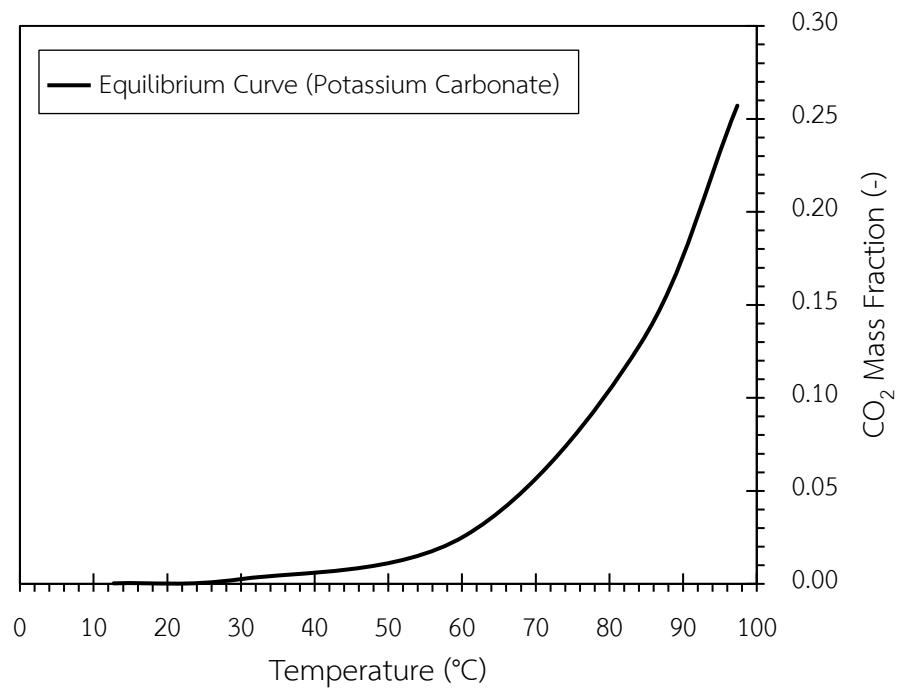


รูปที่ 22 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่ช่วงเวลาต่าง ๆ

หลังจากที่ได้แบบจำลองการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในหอโรเซออร์ที่มีความแม่นยำแล้ว ในส่วนถัดไปจะเป็นการนำแบบจำลองที่ได้มาทำการศึกษาตัวแปรกระบวนการที่ภาวะดำเนินการต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.7

4.2.2 ผลของตัวแปรกระบวนการต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ในส่วนนี้ จะเป็นการศึกษาผลของตัวแปรกระบวนการต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต ซึ่งประกอบด้วย 5 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น ขนาดท่อน้ำหล่อเย็น และลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซออร์ ซึ่งแต่ละตัวแปรส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตแตกต่างกัน รูปที่ 23 แสดงเส้นโค้งสมดุลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตของปฏิกิริยาการดูดซับ จากรูปพบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

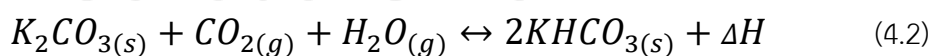


รูปที่ 23 เส้นโค้งสมดุลโพแทสเซียมคาร์บอเนตของปฏิกิริยาการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [9]

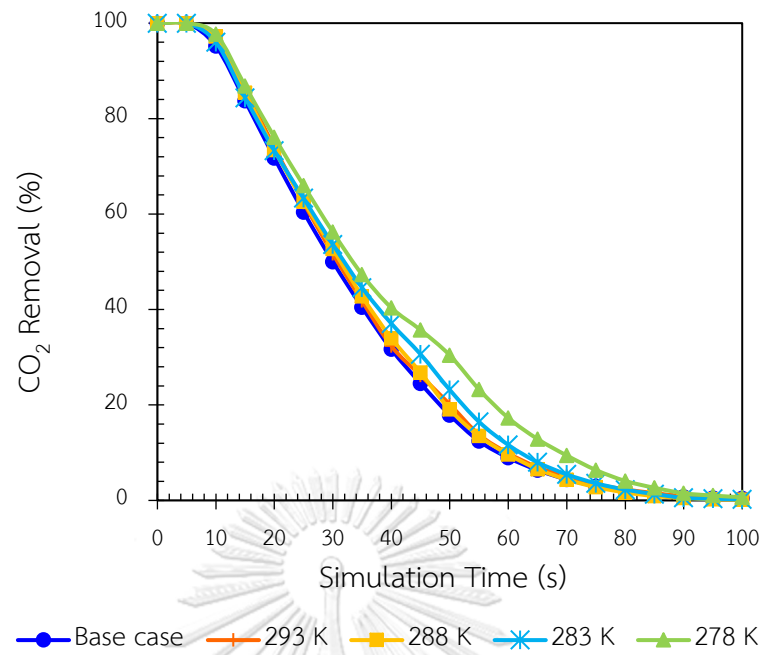


4.2.2.1 ผลของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น

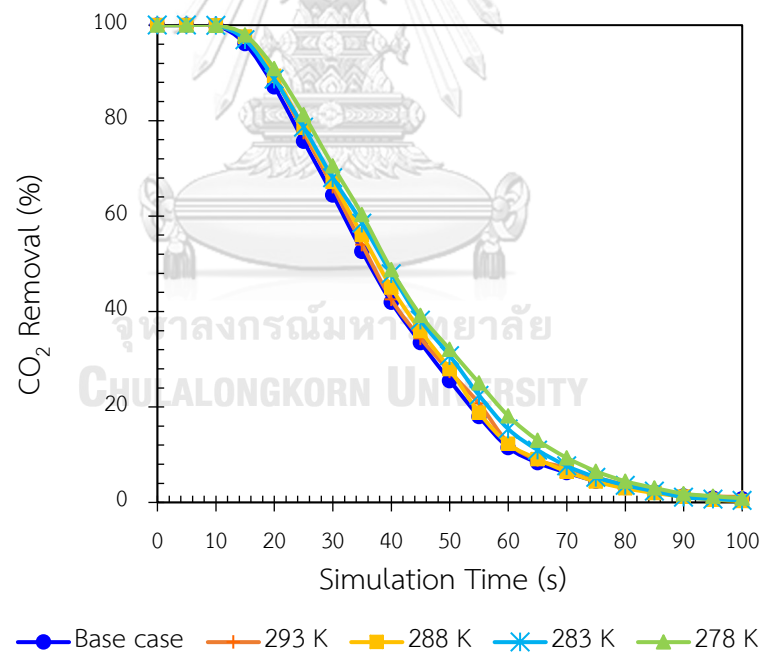
ในการศึกษาเพื่อหาประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุด จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากหลายตัวแปรเพื่อใช้ในการสรุปผล การศึกษาผลของอุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็นจะช่วยให้สามารถเข้าใจถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นอย่างดี โดยค่าอุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็นจะประกอบไปด้วย 298 K, 293 K, 288 K, 283 K และ 278 K จากผลของร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ได้จากการจำลองนั้นจะแสดงดังรูปที่ 24 (ก. ข. และ ค.) พบว่าร้อยละการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลาที่ใช้ในการจำลองที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนอุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็น อุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็นที่ต่ำ จะส่งผลให้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าอุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็นที่สูง เนื่องจากผลของความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นแรงขับในการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลของสัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต แสดงดังรูปที่ 25-26 อุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็นจะทำให้สมดุลของการดูดซับเปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิภายในหอไรเซอร์ต่ำลงดังแสดงในรูปที่ 27 จึงส่งผลให้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามสมการที่ 4.2 ที่สารตั้งต้น คือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต และไอน้ำ เกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้เปลี่ยนรูปเป็นของแข็งผลิตภัณฑ์โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต



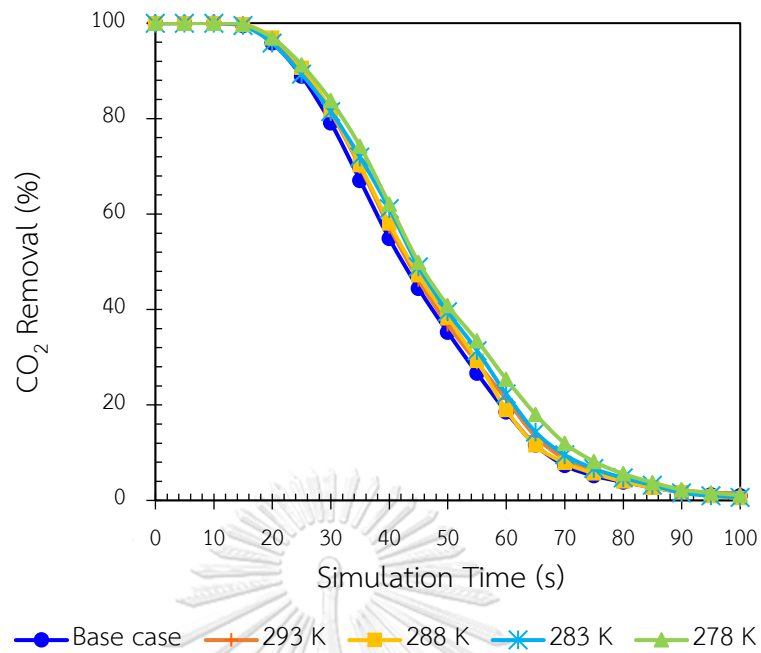
จึงอาจกล่าวได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเคมีสำหรับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนไป เมื่อภายในหอไรเซอร์มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ จึงทำให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น



(ก)

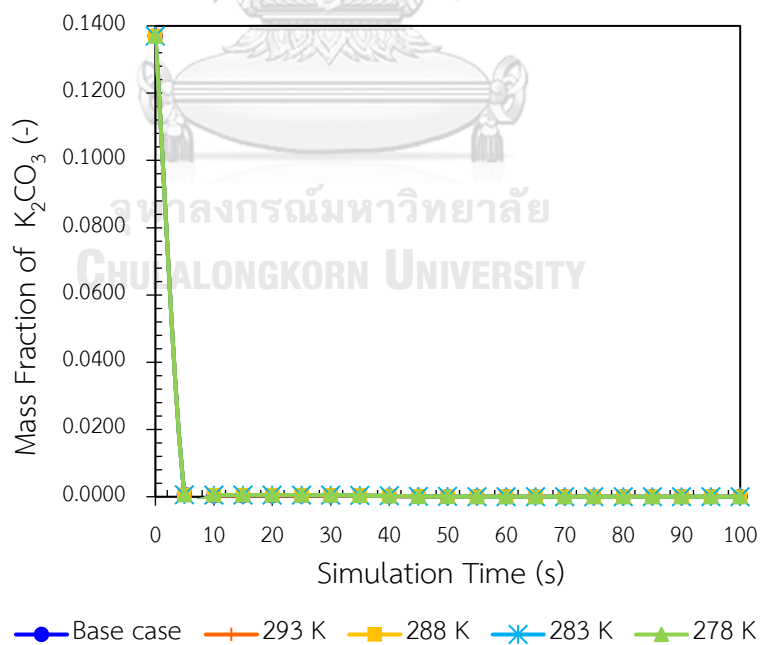


(ข)

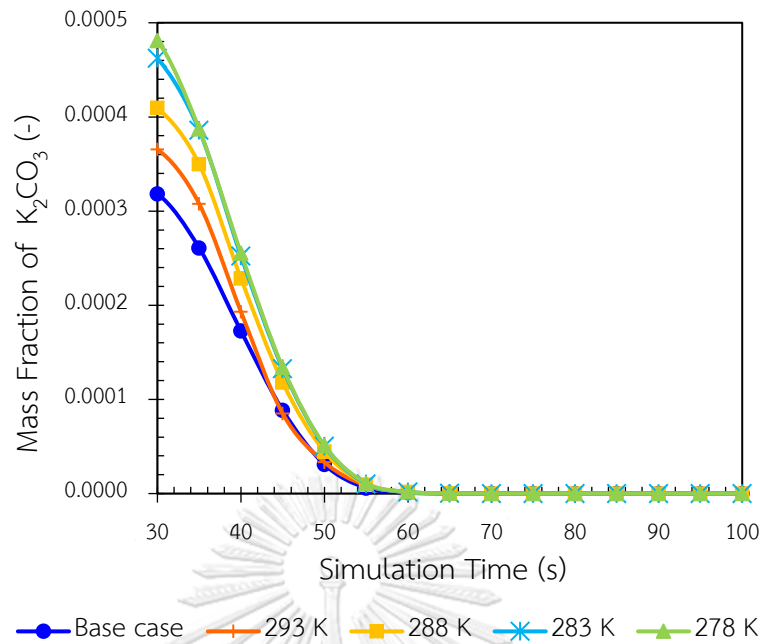


(ค)

รูปที่ 24 ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของท่อน้ำหล่อเย็น (ก) $h/H = 0.1732$ (ข) $h/H = 0.2281$ (ค) $h/H = 0.2828$



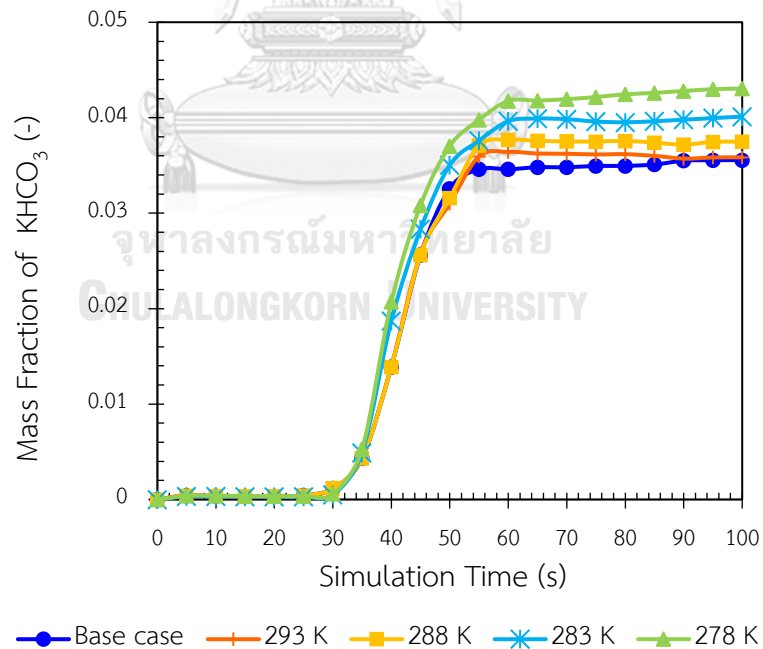
(ก)



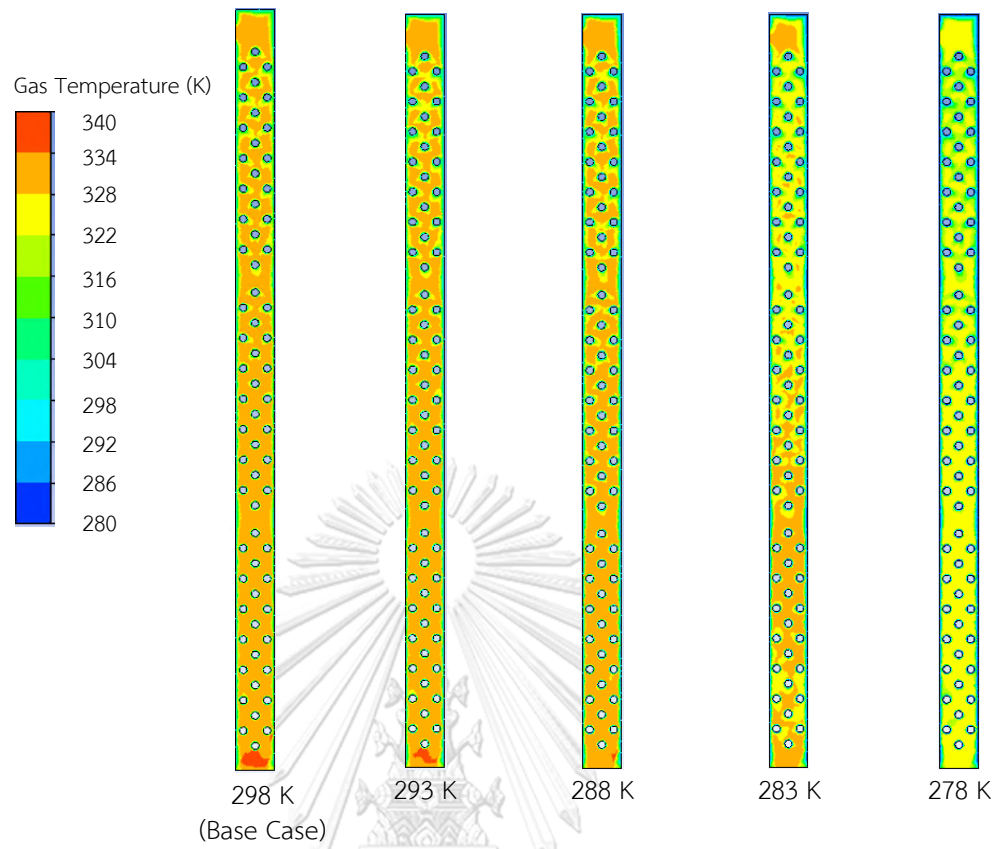
(ข)

รูปที่ 25 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของท่อน้ำหล่อเย็น

(ก) ที่เวลาการจำลอง 0 ถึง 100 วินาที (ข) ที่เวลาการจำลอง 30 ถึง 100 วินาที



รูปที่ 26 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของท่อน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 27 คอนทัวร์อุณหภูมิแก๊สที่อุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็นต่าง ๆ ที่เวลาในการจำลอง 100 วินาที

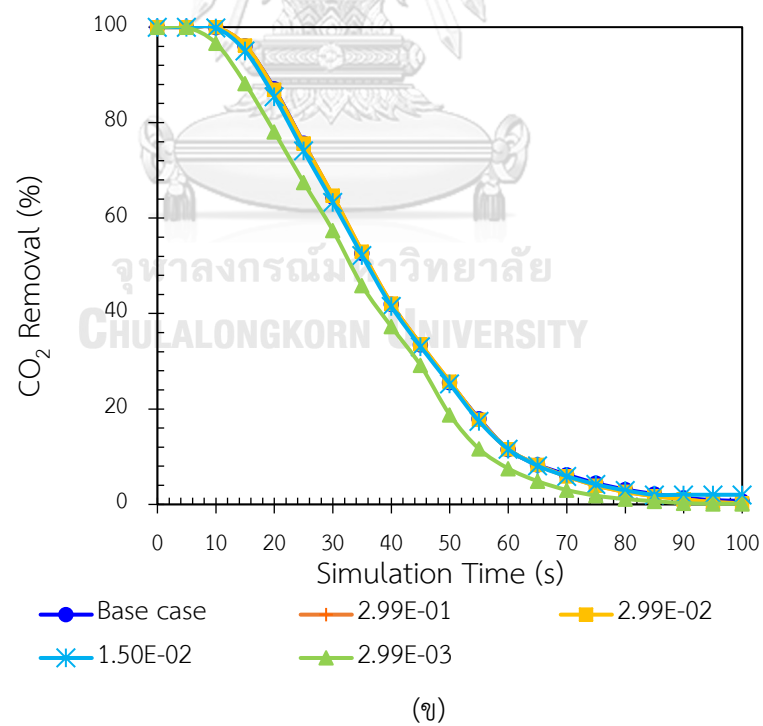
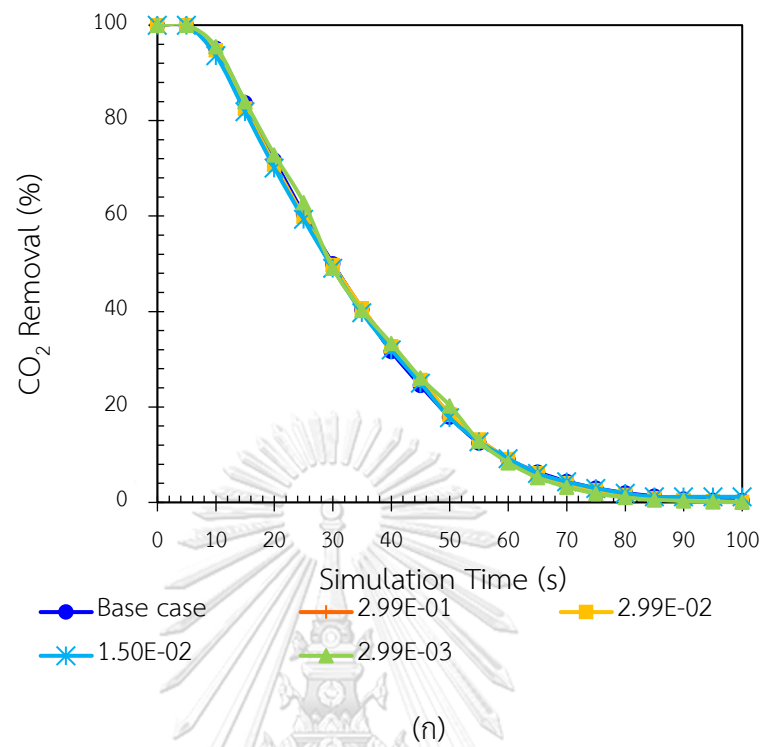
4.2.2.2 ผลของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น

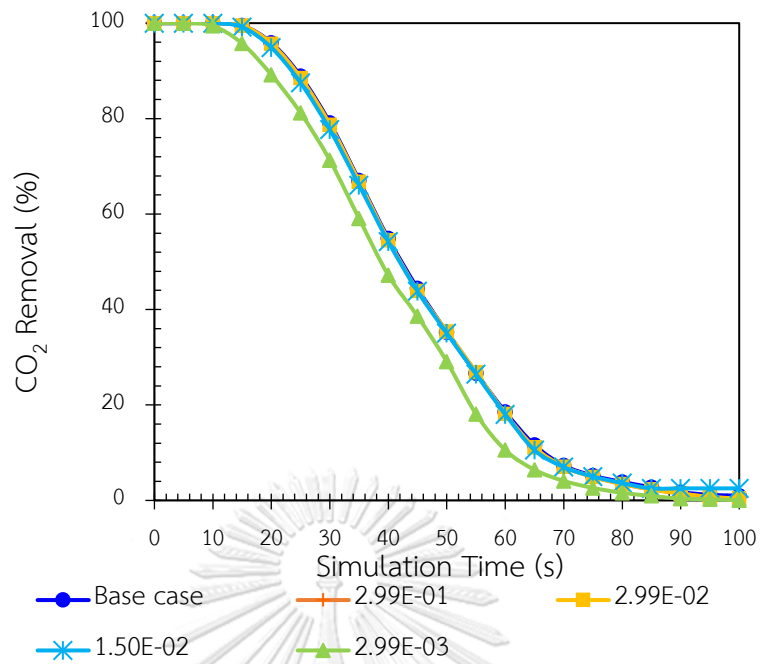
การจำลองในส่วนนี้จะเป็นการจำลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต โดยค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นจะประกอบไปด้วย 2.99×10^{-01} , 1.50×10^{-01} , 2.99×10^{-02} , 1.50×10^{-02} และ 2.99×10^{-03} ลูกบาศก์เมตร/วินาที ตามลำดับ จากรูปที่ 28 (ก. ข. และ ค.) จะพบว่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เกิดขึ้นภายในหอไรเซอร์แบบอนุกรมไม่คงที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการถ่ายโอนความร้อนที่อัตราการไหลที่แตกต่างกันในระบบจะมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Heat Transfer Coefficient, h) ตามสมการสหสัมพันธ์ของตัวเลขไร้หน่วยนัสเซิลท์ (Nusselt Number) ในสมการที่ 4.3-4.4

$$Nu = 1.86 \left(Re Pr \frac{D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_0} \right)^{0.14} \quad (4.3)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4.4)$$

จากการจำลองแสดงผลของร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับพบว่าร้อยละการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 2.99×10^{-01} , 1.50×10^{-01} , 2.99×10^{-02} และ 1.50×10^{-02} ลูกบาศก์เมตร/วินาที ให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่แตกต่างจากกรณีพื้นฐาน แต่ในกรณีศึกษาที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น คือ 2.99×10^{-03} ลูกบาศก์เมตร/วินาที พบว่าร้อยละการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าทุกกรณี เนื่องจากที่อัตราการไหลดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาอื่น ๆ ทำให้ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนต่ำลงแสดงในรูปที่ 29 นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปที่ 30-31 พบว่าที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น 2.99×10^{-03} ลูกบาศก์เมตร/วินาที ปริมาณของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในระบบต่ำลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพที่ต่ำลงด้วย

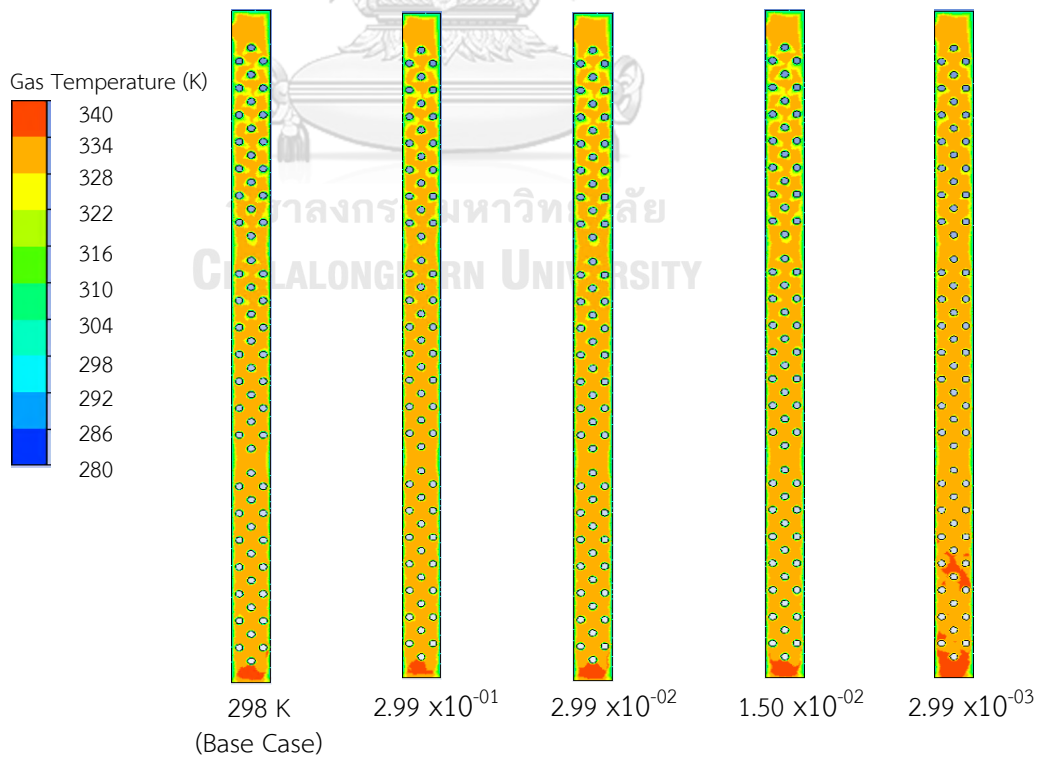




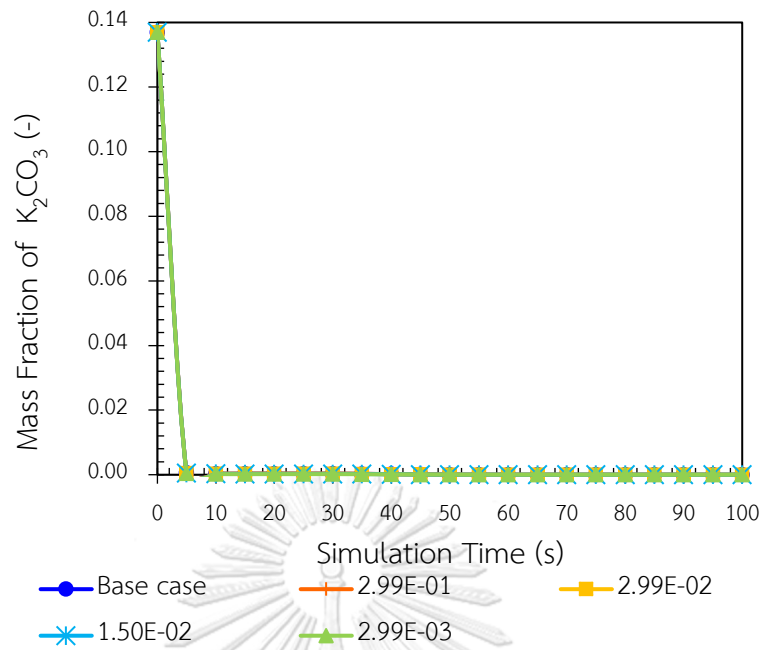
(ค)

รูปที่ 28 ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ

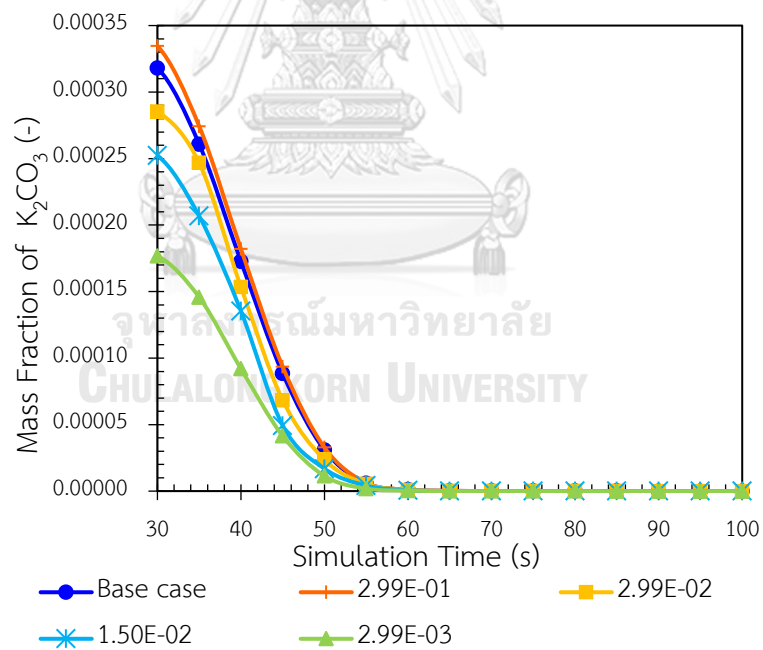
(ก) $h/H = 0.1732$ (ข) $h/H = 0.2281$ (ค) $h/H = 0.2828$



รูปที่ 29 คอนทัวร์อุณหภูมิแก๊สที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ

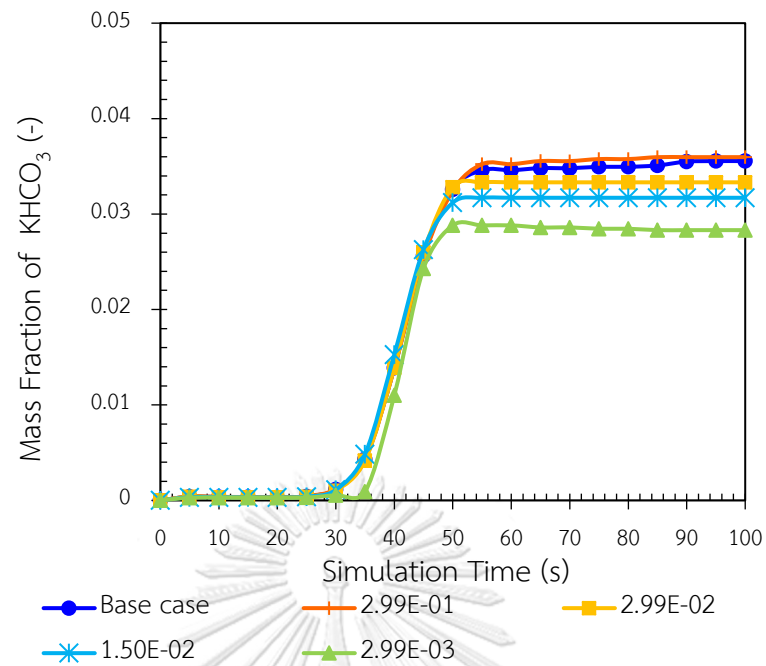


(ก)



(ข)

รูปที่ 30 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่อัตราการผลิตของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ
 (ก) ที่เวลาการจำลอง 0 ถึง 100 วินาที (ข) ที่เวลาการจำลอง 30 ถึง 100 วินาที



รูปที่ 31 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่อัตราการใช้ของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ

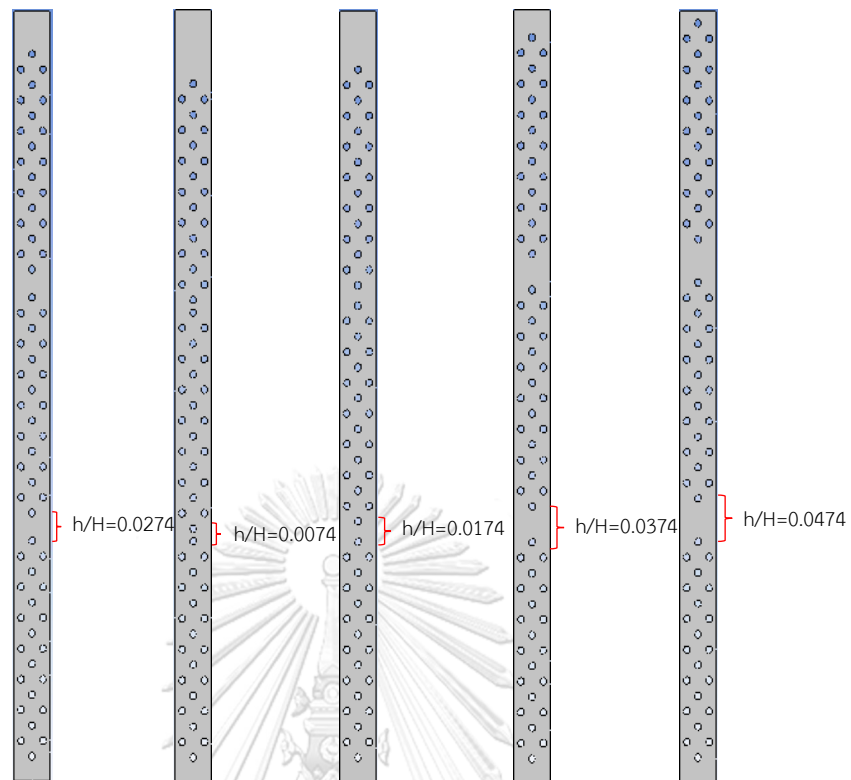
4.2.2.3 ผลของระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์

การจำลองในส่วนนี้จะเป็นการจำลองเพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต โดยระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นจะแสดงในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Number) ดังแสดงตารางที่ 13 และในรูปที่ 32 ซึ่งจะเห็นว่าระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นที่ต่ำที่สุดที่ทำให้ชุดท่อน้ำหล่อเย็นไม่สัมผัสกัน คือ $h/H = 0.0074$ และระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นที่สูงที่สุดที่ทำให้ชุดท่อน้ำหล่อเย็นสามารถบรรจุอยู่ในหอไรเซอร์ได้ คือ $h/H = 0.0474$

ตารางที่ 13 ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ที่ใช้ในการศึกษา

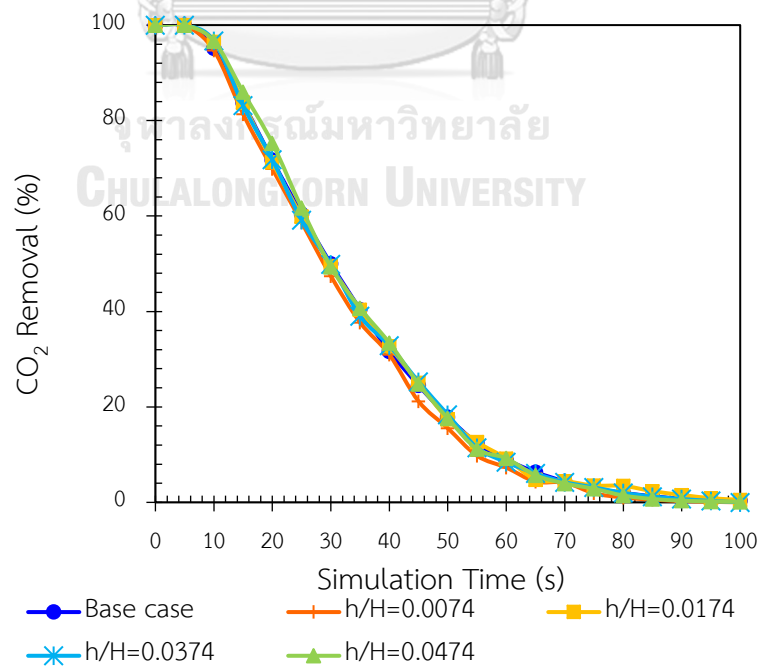
กรณี	ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น
พื้นฐาน (Base Case)	$h'/H' = 0.0274$
1	$h'/H' = 0.0074$
2	$h'/H' = 0.0174$
3	$h'/H' = 0.0374$
4	$h'/H' = 0.0474$

จากผลของร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ได้จากการจำลองนั้น จะแสดงดังรูปที่ 33 (ก. ข. และ ค.) พบว่าร้อยละการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกับกรณีพื้นฐาน เนื่องจากปฏิกิริยาในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่เกิดบริเวณด้านล่างของหอไรเซอร์ ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 12 แสดงคอนทัวร์สัดส่วนโดยปริมาตรที่เวลาการจำลอง 0 ถึง 100 วินาที พบว่าสัดส่วนของแข็งโดยปริมาตรเกิดการฟลูอิดไซในบริเวณด้านล่างของหอไรเซอร์เท่านั้น จึงทำให้เมื่อแก๊สไหลเข้ามาในหอไรเซอร์ จึงเกิดปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณดังกล่าว ดังนั้นเมื่อมีการปรับระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ของแบบจำลองสำหรับงานวิจัยนี้ จึงไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากบริเวณส่วนใหญ่ที่เกิดปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ได้ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น

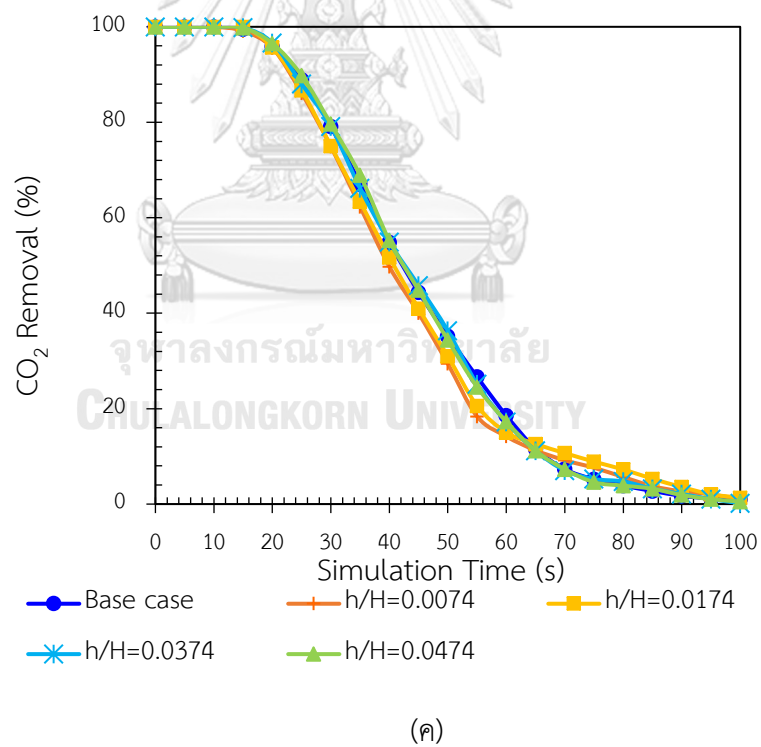
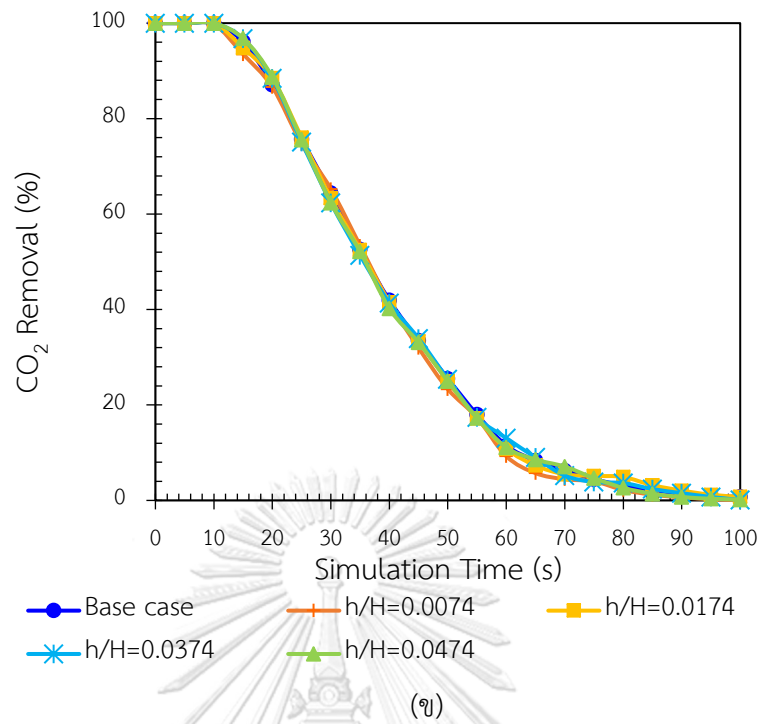


$h/H = 0.0274$ $h/H = 0.0074$ $h/H = 0.0174$ $h/H = 0.0374$ $h/H = 0.0474$
 (Base Case)

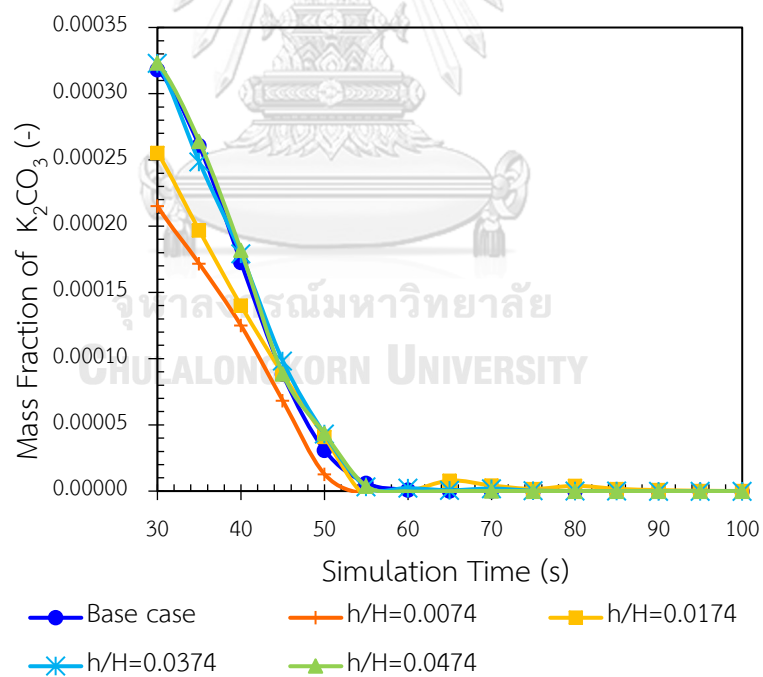
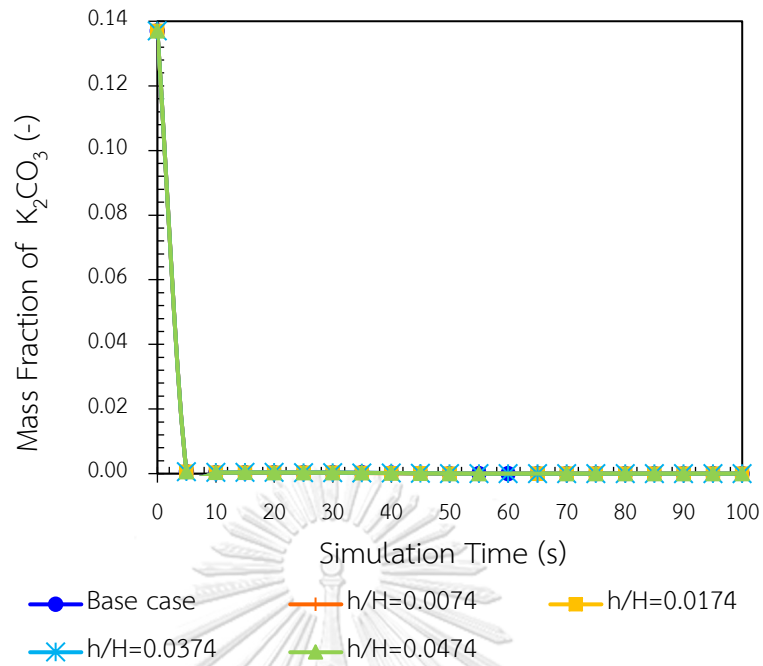
รูปที่ 32 ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซอ์แบบอนุกรมไม่คงที่



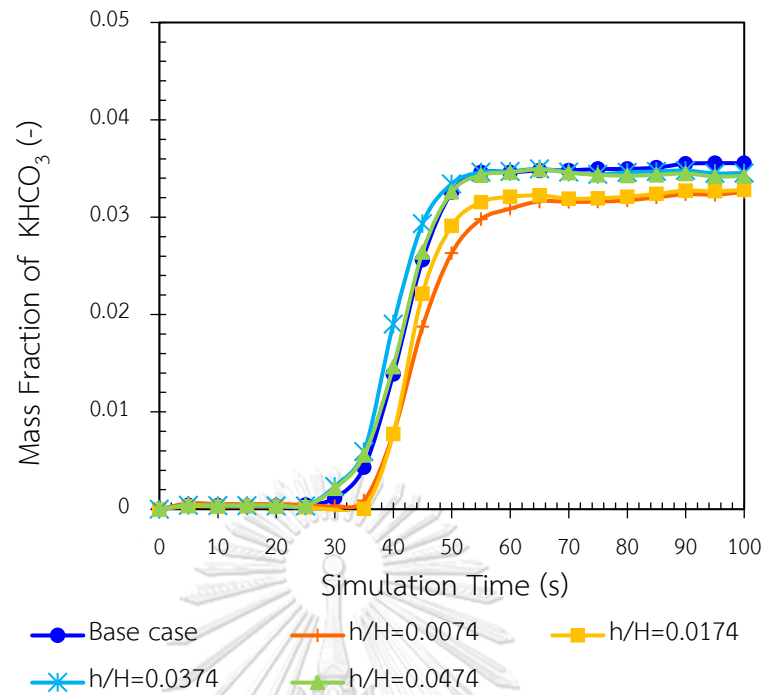
(ก)



รูปที่ 33 ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น (ก) $h/H = 0.1732$ (ข) $h/H = 0.2281$ (ค) $h/H = 0.2828$



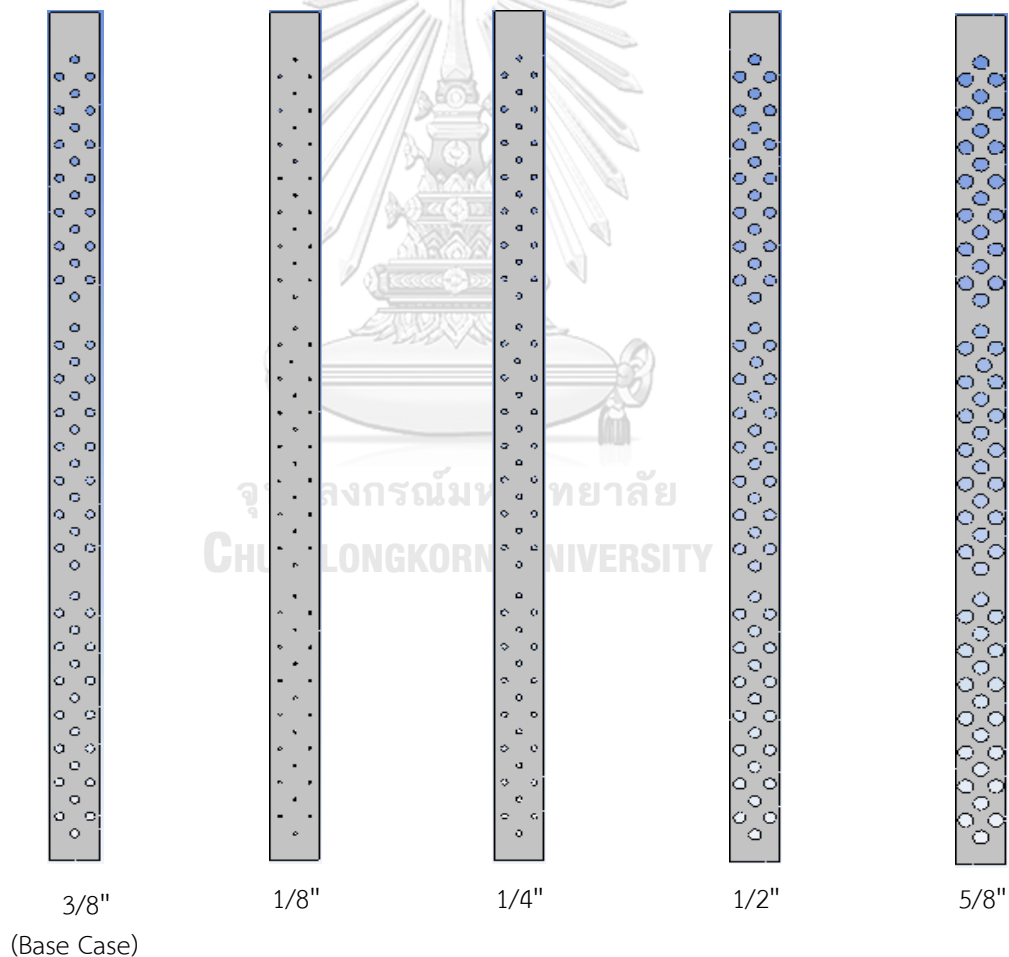
รูปที่ 34 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น
 (ก) ที่เวลาการจำลอง 0 ถึง 100 วินาที (ข) ที่เวลาการจำลอง 30 ถึง 100 วินาที



รูปที่ 35 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่ระยะห่างต่าง ๆ ระหว่างชุดพ่นน้ำหล่อเย็น

4.2.2.4 ผลของขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์

การจำลองในส่วนนี้จะเป็นการจำลองเพื่อศึกษาผลของขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต ซึ่งท่อน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการทดลองทำมาจากวัสดุทองแดง ซึ่งมีคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนได้ดี โดยขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นที่นำมาใช้ในการจำลองประกอบด้วย 1/8", 1/4", 3/8", 1/2" และ 5/8" ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 36 และตารางที่ 14 แสดงหมายเลขรหัสท่อทองแดงที่ใช้ในการศึกษา (Manufacturer Part Number) ซึ่งจะเห็นว่าขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นที่เล็กที่สุดที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเพื่อนำมาใช้ในการจำลอง คือ 1/8" และขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นที่ใหญ่ที่สุดที่จำหน่ายในท้องตลาดที่สามารถบรรจุอยู่ในหอไรเซอร์เพื่อนำมาใช้ในการจำลอง คือ 5/8"



รูปที่ 36 ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์แบบอณูภูมิภาคไม่คงที่

ตารางที่ 14 ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์

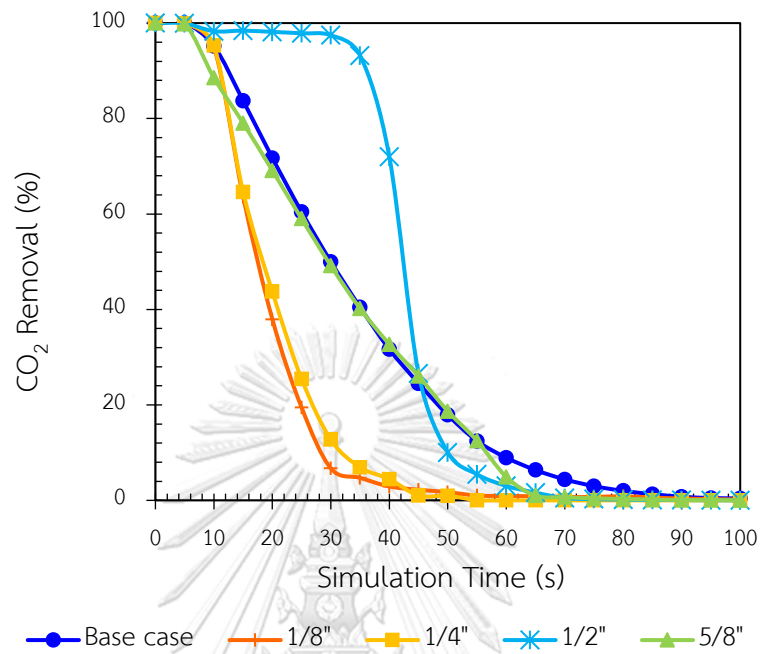
กรณี	Part No.	เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก (นิ้ว)
พื้นฐาน (Base Case)	A185-6	3/8
1	A185-2	1/8
2	A185-4	1/4
3	A185-8	1/2
4	A185-10	5/8

จากผลของร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ได้จากการจำลองนั้น จะแสดงดังรูปที่ 37 (ก. ข. และ ค.) พบว่าร้อยละการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีศึกษาที่ใช้ขนาดท่อน้ำหล่อเย็น 1/8" และ 1/4" มีประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่ากรณีศึกษาที่ใช้ท่อน้ำหล่อเย็นขนาด 3/8", 1/2" และ 5/8" เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำมีขนาดที่เล็กทำให้พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนต่ำลงที่จำนวนท่อเท่าเดิม ส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิในหอไรเซอร์ต่ำลง เมื่อพิจารณาที่กรณีศึกษาที่ใช้ท่อน้ำหล่อเย็นขนาด 3/8", 1/2" และ 5/8" จะพบว่าเมื่อท่อน้ำหล่อเย็นมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของแก๊สภายในหอไรเซอร์ต่ำลงแสดงในรูปที่ 38 ส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิในหอไรเซอร์สูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ตามสมการที่ 4.4

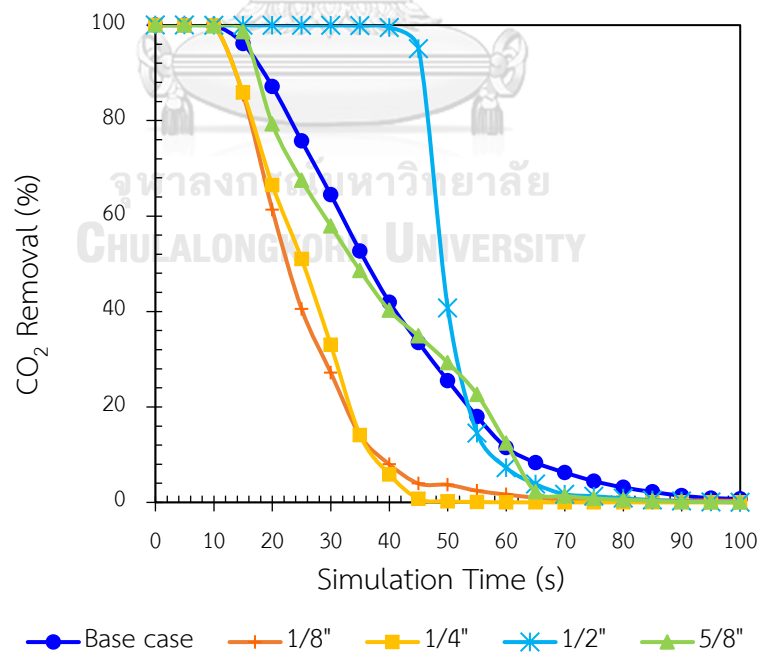
$$q = hA_s(T - T_\infty) \quad (4.4)$$

แต่พบว่าหากขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นมีขนาดใหญ่เกินไป จะส่งผลให้เกิดการขัดขวางการสัมผัสกันระหว่างตัวดูดซับและแก๊สทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง โดยพิจารณาสัดส่วนโดยปริมาตรที่เกิดขึ้นในหอไรเซอร์แสดงในรูปที่ 39 จะพบว่าที่กรณีศึกษาที่ใช้ท่อน้ำหล่อเย็นขนาด 5/8" ปริมาณของของแข็งจะอยู่บริเวณด้านล่างเท่านั้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวดูดซับและแก๊สต่ำลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตแสดงในรูปที่ 40-41 จะพบว่าที่กรณีศึกษาที่ใช้ท่อน้ำหล่อเย็นขนาด 1/2" ส่งผลให้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มี

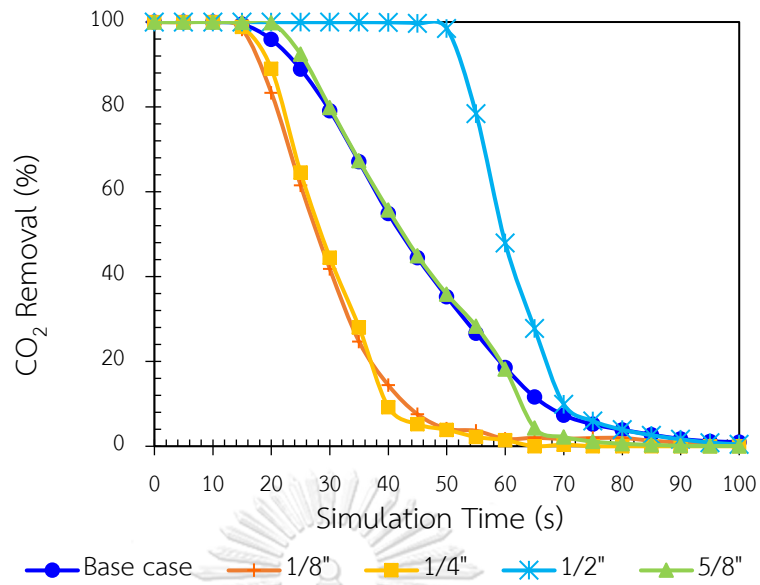
ประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีและขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นไม่ไปขัดขวางการกระจายตัวของตัวดูดซับ



(ก)

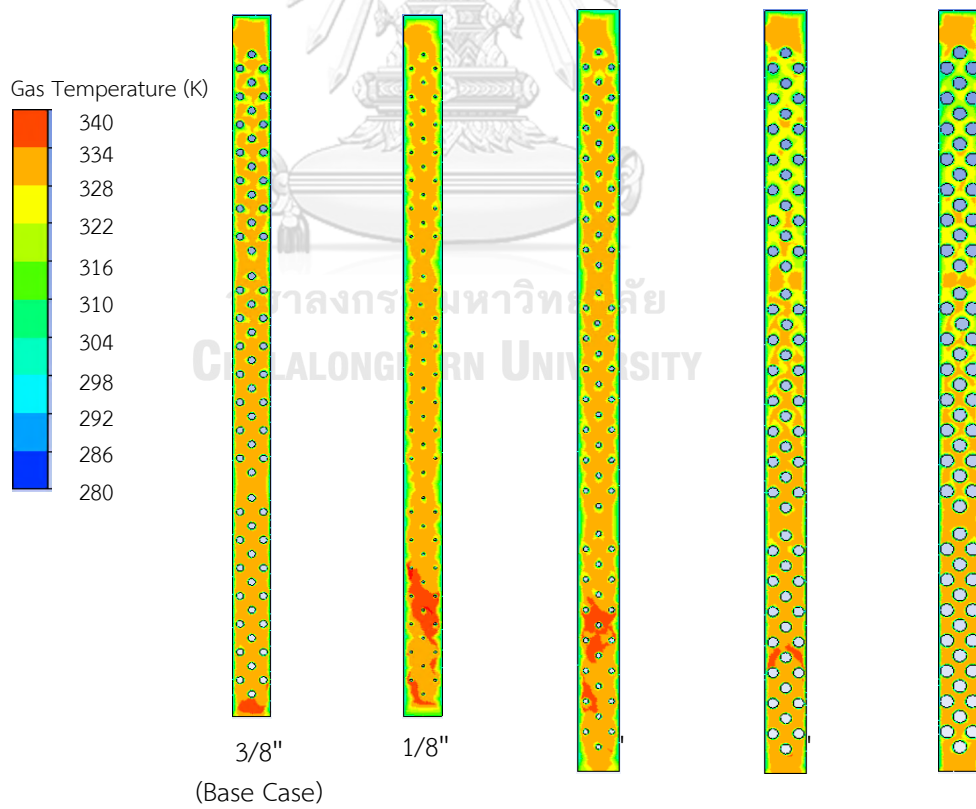


(ข)

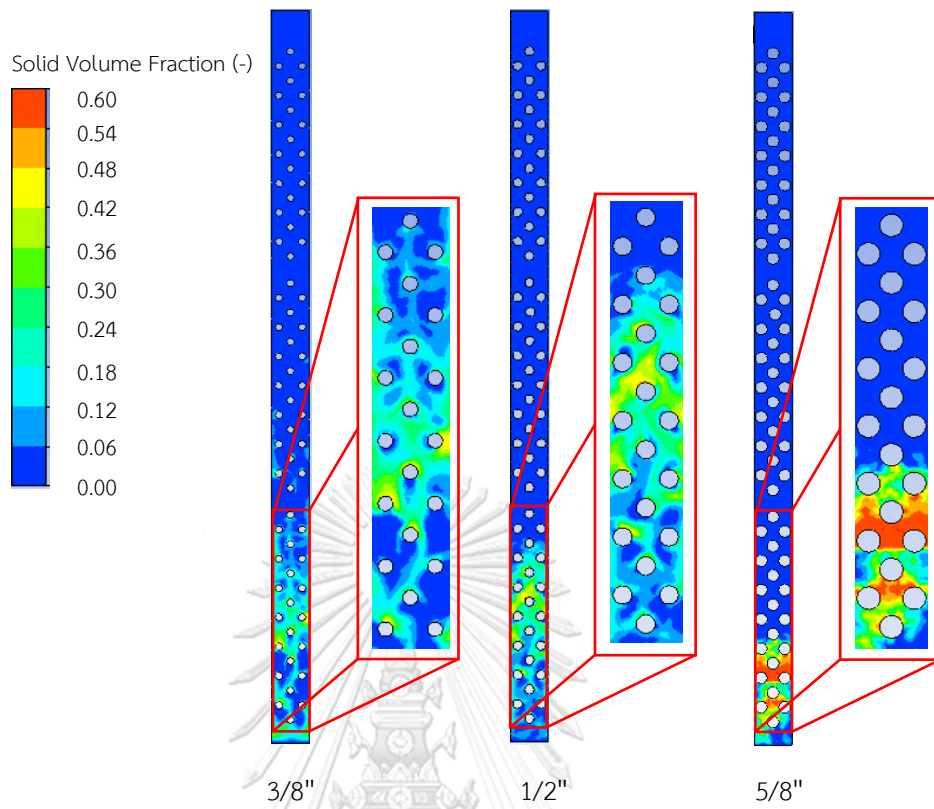


(ค)

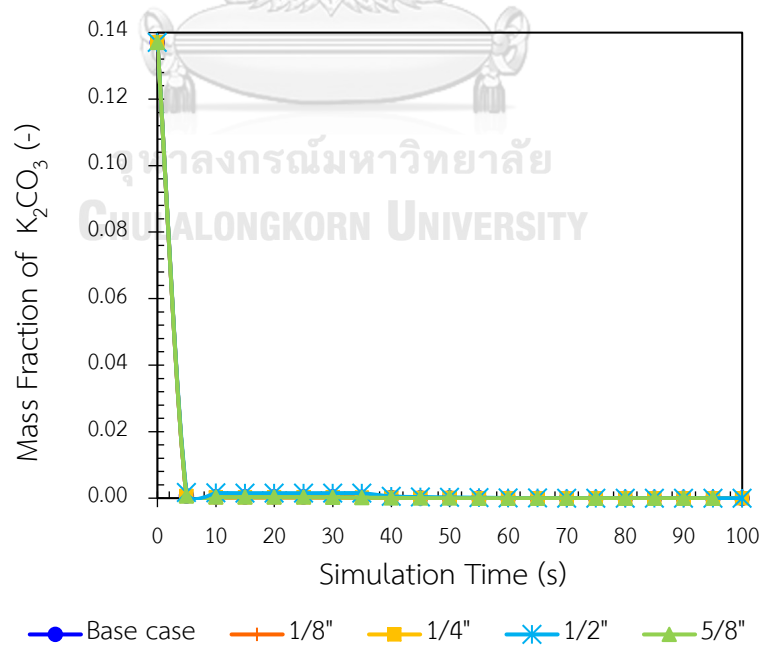
รูปที่ 37 ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ ระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น (ก) $h/H = 0.1732$ (ข) $h/H = 0.2281$ (ค) $h/H = 0.2828$



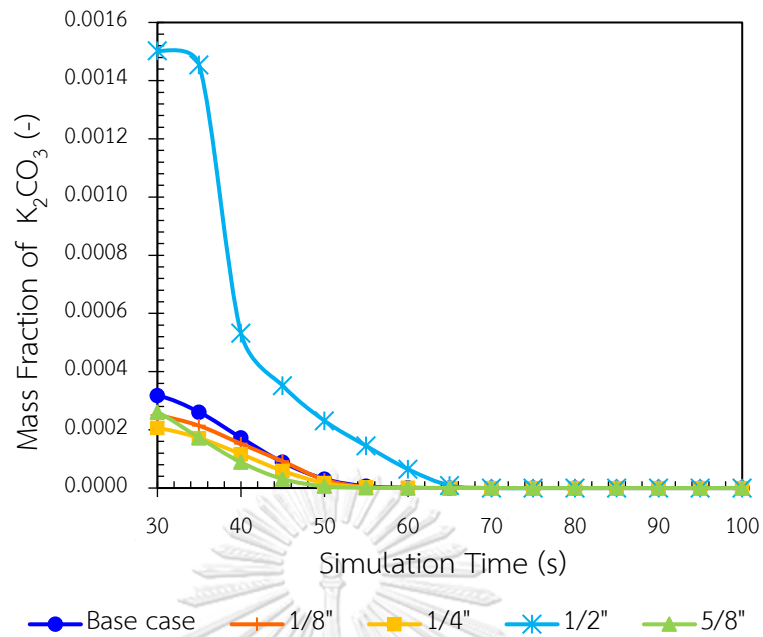
รูปที่ 38 คอนทัวร์แสดงอุณหภูมิของแก๊สที่ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ เวลาการจำลอง 100 วินาที



รูปที่ 39 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรที่ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ เวลาการจำลอง 100 วินาที

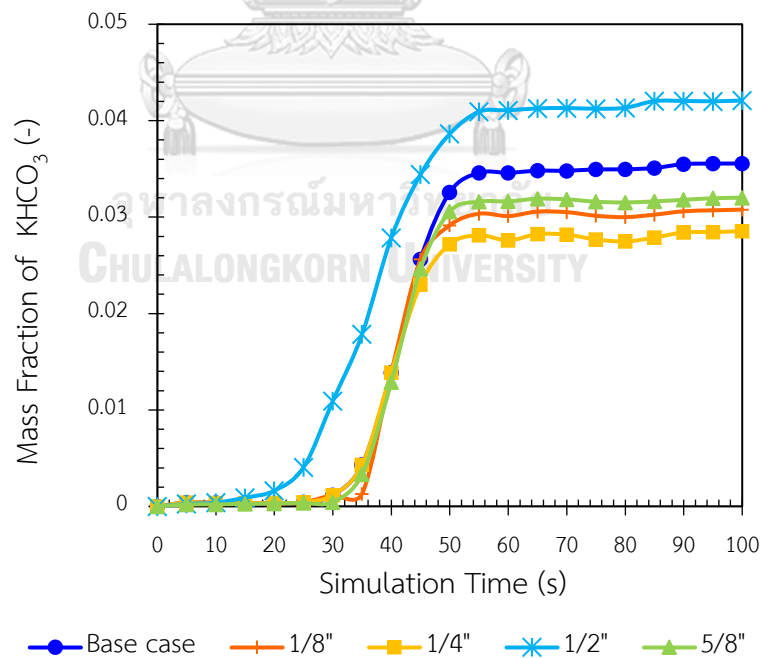


(ก)



(ข)

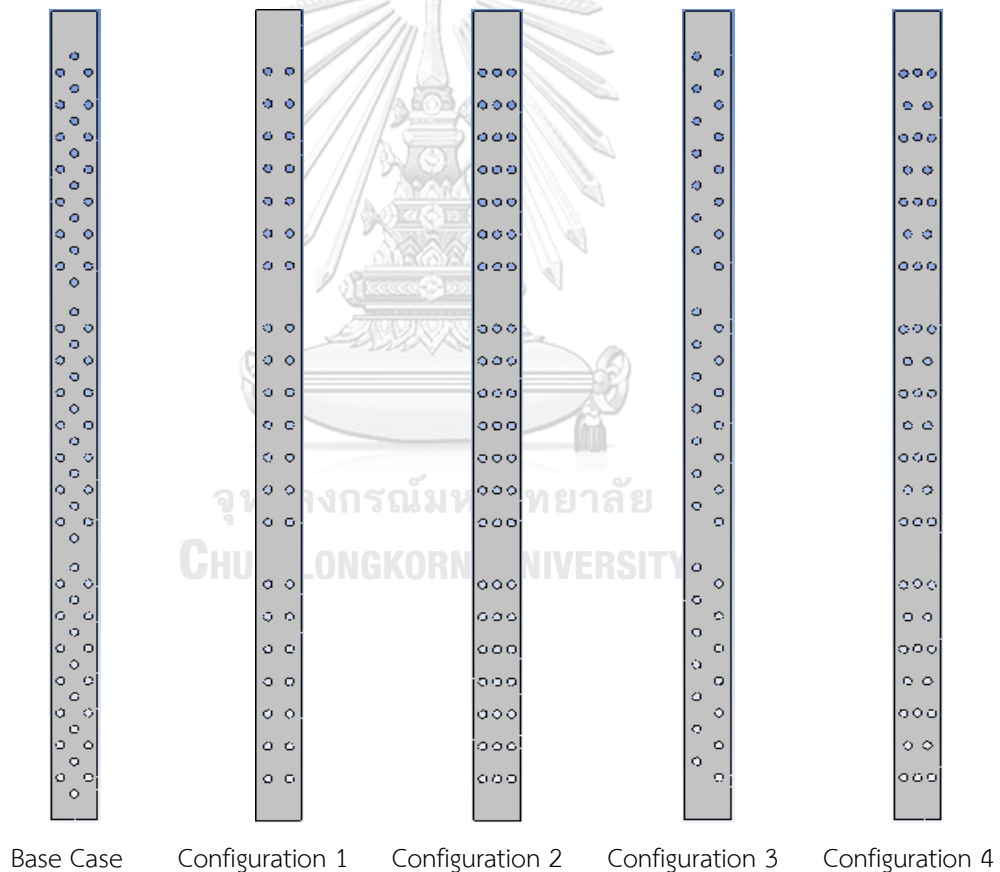
รูปที่ 40 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ
(ก) ที่เวลาการจำลอง 0 ถึง 100 วินาที (ข) ที่เวลาการจำลอง 30 ถึง 100 วินาที



รูปที่ 41 สัดส่วนโดยมวลของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนตที่ขนาดของท่อน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ

4.2.2.5 ผลของลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์

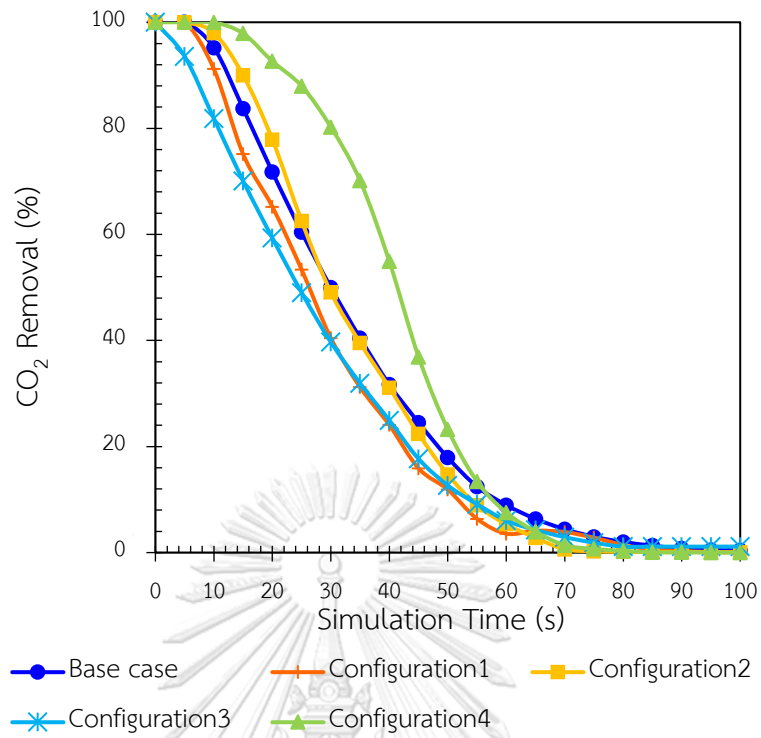
การจำลองในส่วนนี้จะเป็นการจำลองเพื่อศึกษาผลของลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต โดยลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์จะแบ่งเป็น 2 แบบ คือ ลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นในแนวเดียวกัน (In-line) และลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นแบบสลับ (Staggered) โดยแต่ละแบบจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 42 ซึ่งลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นแบบดังกล่าว จะส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อนของท่อน้ำหล่อเย็นที่อยู่แถวท้าย ๆ เนื่องจากความปั่นป่วนของของไหลที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อของไหลยิ่งไหลผ่านท่อมากแถวขึ้น ซึ่งความปั่นป่วนนี้จะส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การพาความร้อน



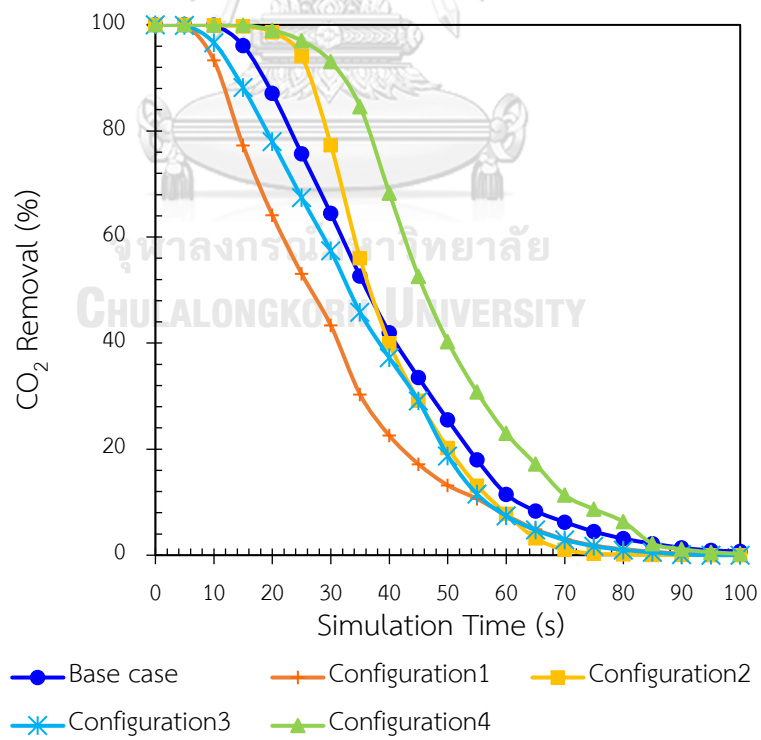
รูปที่ 42 ลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์แบบอุณหภูมิต่างกัน

โดยลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซอร์ส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อนในกระบวนการ จากผลของร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่ได้จากการจำลองนั้นจะแสดงดังรูปที่ 43 (ก ข และ ค) พบว่าร้อยละการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่กรณีศึกษาลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 1 และ 3 มีร้อยละการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นที่ต่ำกว่ากรณีพื้นฐาน ส่วนกรณีศึกษาลักษณะการจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นแบบที่ 2 และ 4 จะสังเกตเห็นว่าประสิทธิภาพการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์นั้นสูงกว่ากรณีพื้นฐาน เนื่องจากปัจจัยของจำนวนท่อน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการออกแบบภายในหอไรเซอร์

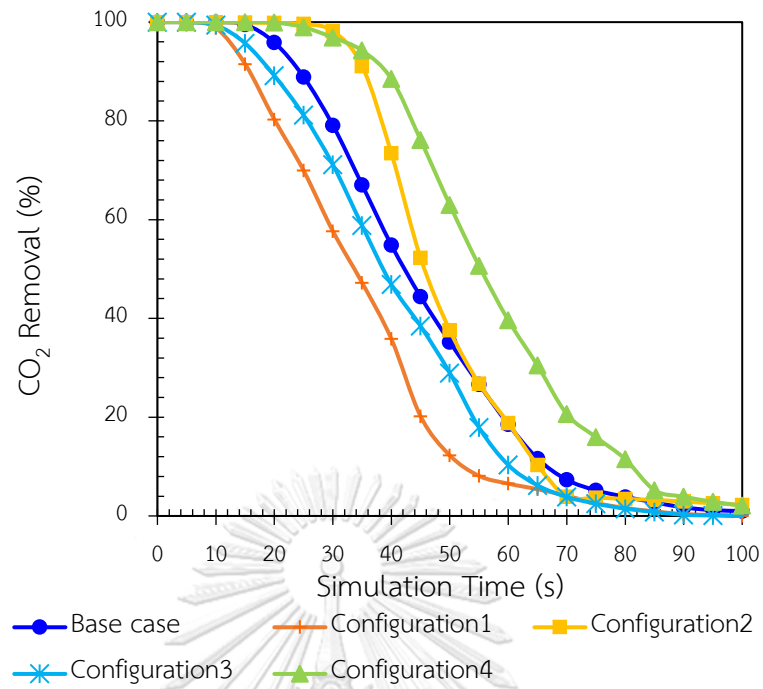
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่รูปแบบการจัดเรียงและลักษณะการไหลของแก๊สในหอไรเซอร์แสดงในรูปที่ 44 พบว่า การจัดเรียงชุดท่อน้ำหล่อเย็นแบบสลับจะส่งผลให้แก๊สที่ไหลเข้าไปยังหอไรเซอร์จะปะทะกับท่อน้ำหล่อเย็นในแถวด้านล่างก่อนและไปรวมกันในบริเวณส่วนหลังของท่อน้ำหล่อเย็น บริเวณส่วนกลางของชุดท่อน้ำหล่อเย็นชุดแรก (Stage 1) ทำให้ความเร็วของแก๊สลดลง เนื่องจากมีการขวางการไหลของตัวท่อน้ำหล่อเย็น ส่งผลให้ความเร็วของแก๊สสัมผัสกับผิวท่อน้ำหล่อเย็น และแก๊สบางส่วนจะเกิดการเปลี่ยนทิศทางไปปะทะกับท่อน้ำหล่อเย็นส่วนอื่น ทำให้มีการหมุนวนของอากาศเกิดขึ้น ดังรูปที่ 45 แสดงให้เห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจากท่อน้ำหล่อเย็นกับแก๊สบริเวณรอบท่อน้ำหล่อเย็นเกิดได้ดีกว่าบริเวณอื่น ๆ ทำให้การจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นแบบสลับสามารถลดอุณหภูมิภายในหอไรเซอร์ได้ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้สูงขึ้น



(ก)

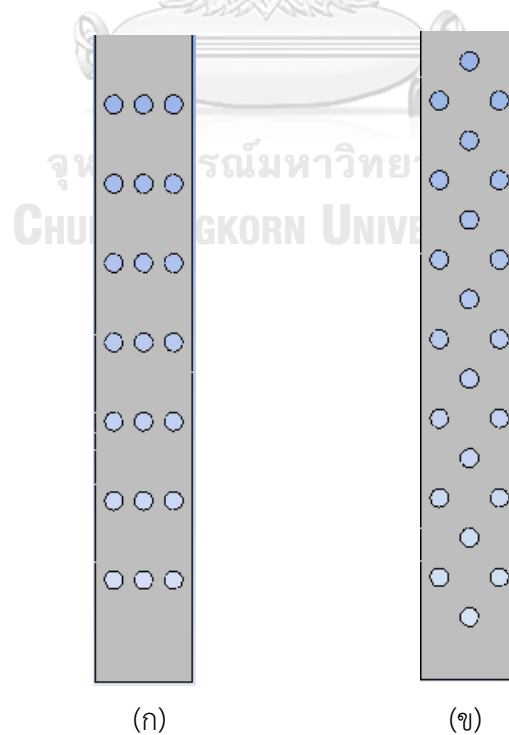


(ข)

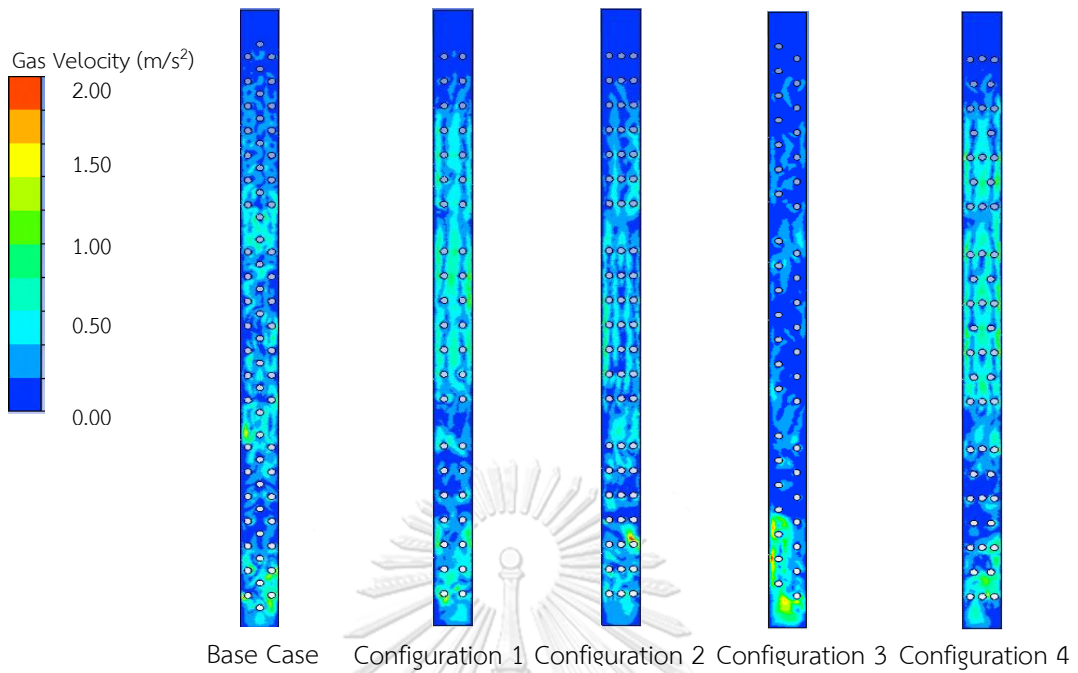


(ค)

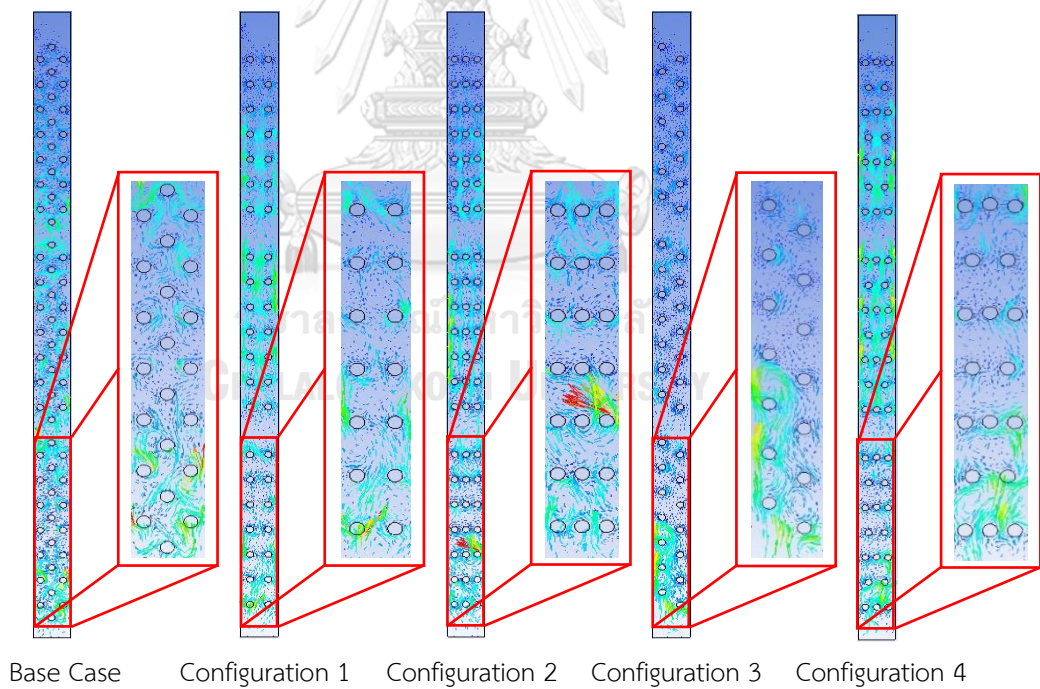
รูปที่ 43 ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับลักษณะการจัดเรียง
 ท่อน้ำหล่อเย็น (ก) $h/H = 0.1732$ (ข) $h/H = 0.2281$ (ค) $h/H = 0.2828$



รูปที่ 44 ลักษณะการเรียงท่อแบบ (ก) แนวเดียวกัน (ข) แบบสลับ



(ก)



(ข)

รูปที่ 45 เวกเตอร์ความเร็วของแก๊สในหอโรเซออร์แบบอนุกรมไม่คงที่

(ก) คอนทัวร์ความเร็วของแก๊สภายในหอโรเซออร์แบบอนุกรมไม่คงที่

(ข) เวกเตอร์ความเร็วแสดงลักษณะการไหลของแก๊ส

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีและมีปฏิกิริยาเคมีในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดโรเซออร์แบบอนุกรมหมุมไม่คงที่ เพื่อหาภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

5.1.1 ผลที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่ไม่มี การเกิดปฏิกิริยา

ในขั้นตอนการศึกษาแบบจำลอง 3 มิติของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่ไม่มี การเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น จะเป็นการศึกษาพลศาสตร์ของอนุภาคของแข็ง โดยใน การศึกษาอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องมีการศึกษาแบบจำลองที่มีความสอดคล้องกับการทดลอง เพื่อนำไปใช้ในการจำลอง พบว่าที่เซลล์ในการคำนวณเท่ากับ 400,000 เซลล์ จะให้ผลการจำลองที่ ใกล้เคียงกับเซลล์ในการคำนวณที่สูงกว่า รวมถึงสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งการหาเซลล์ ในการคำนวณที่เหมาะสมจะช่วยลดระยะเวลาในการคำนวณและทำให้ผลการคำนวณที่ได้มีความ แม่นยำ การหาช่วงเวลาที่เหมาะสมเข้าสู่ภาวะเสถียรของตัว ทำให้ทราบถึงช่วงเวลาที่สามารถนำมาใช้เป็น ตัวแทนชุดข้อมูลในการคำนวณเพื่อนำไปทำการวิเคราะห์ โดยพบว่าระบบจะเข้าสู่ภาวะเสถียรของตัวที่ เวลามากกว่า 60 วินาที แต่เพื่อความแม่นยำในการคำนวณจึงเพิ่มช่วงเวลาในการจำลองออกไปจนถึง 100 วินาที เพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียรของตัวที่สมบูรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ช่วงเวลาใน การจำลองที่ 60-100 วินาที

5.1.2 ผลที่ได้จากการจำลองพลศาสตร์ของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบที่มี การเกิดปฏิกิริยา

ในการหาภาวะในการดำเนินการที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้น ตัวแปรอิสระที่นำมาศึกษาจะประกอบด้วย อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ระยะห่างระหว่างชุดท่อน้ำหล่อเย็น ขนาดท่อน้ำหล่อเย็น และลักษณะ การจัดเรียงท่อน้ำหล่อเย็นภายในหอโรเซออร์ โดยตัวแปรตอบสนองที่นำมาใช้ในการรายงานผลสำหรับ งานวิจัยนี้ คือ ร้อยละของปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ

จากการศึกษา พบว่าอุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็นที่ต่ำจะส่งผลให้ตัวดูดซับของแข็ง โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตมีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่าอุณหภูมิที่น้ำหล่อเย็นที่สูง เนื่องจากผลของความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นแรงผลักดันในการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี สำหรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น พบว่าอัตราการไหลที่ต่ำจะส่งผลให้ตัวดูดซับของแข็ง โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตมีประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลงไปด้วย เนื่องจากความสามารถการถ่ายเทความร้อนที่ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตมีประสิทธิภาพลดลง สำหรับระยะห่างระหว่างชุดที่น้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซออร์ พบว่าในกรณีของแบบจำลองที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ไม่แตกต่างจากกรณีพื้นฐาน เนื่องจากบริเวณส่วนใหญ่ที่เกิดปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ได้ระยะห่างระหว่างชุดที่น้ำหล่อเย็น สำหรับขนาดของที่น้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซออร์ พบว่าเมื่อที่น้ำหล่อเย็นมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในหอไรเซออร์ต่ำลง ส่งผลให้ความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิในหอไรเซออร์ดีขึ้น แต่พบว่าหากขนาดของที่น้ำหล่อเย็นมีขนาดใหญ่เกินไป จะส่งผลให้เกิดการขัดขวางการสัมผัสกันระหว่างตัวดูดซับและแก๊ส ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ลดลง สำหรับลักษณะการจัดเรียงที่น้ำหล่อเย็นภายในหอไรเซออร์ พบว่าปัจจัยของจำนวนที่น้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการออกแบบภายในหอไรเซออร์ ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่การไหลของแก๊สในหอไรเซออร์ พบว่าแก๊สที่ไหลเข้าไปยังหอไรเซออร์จะปะทะกับที่น้ำหล่อเย็นในแถวด้านล่างก่อนและไปรวมกันในบริเวณส่วนหลัง ส่งผลให้ความเร็วของแก๊สสัมผัสกับผิวที่น้ำหล่อเย็น แสดงว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนจากที่น้ำหล่อเย็นให้กับแก๊สบริเวณรอบที่น้ำหล่อเย็นเกิดได้ดีกว่าบริเวณอื่นๆ จากผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองจากตัวแปรกระบวนการทั้ง 5 ตัว แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากอุณหภูมิที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับจะทำให้ตัวดูดซับของแข็งไม่สามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ต่อ ดังนั้นอุณหภูมิในหอไรเซออร์ที่ลดลงจะทำให้สมดุลของการดูดซับเปลี่ยนไป ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็งมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองพลศาสตร์สำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยดูดซับของแข็ง โพลีเอทิลีนคาร์บอนเนตในหอไรเซออร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบด เป็นการศึกษากระบวนการดูด

ชัดเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ยังต้องมีการศึกษาในส่วนของการคืนสภาพตัวดูดชัดให้กับตัวดูดชัดของแข็ง เพื่อให้ผลที่ได้เป็นผลที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการดูดชัดได้จริง สำหรับการจำลองสามมิติผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองจริง แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ได้ยังมีข้อจำกัดบางประการ ได้แก่ การจำลองในระบบแบบ 2 ภูมิภาค (แก๊สและของแข็ง) ส่งผลให้การถ่ายโอนความร้อนของท่อน้ำหล่อเย็นที่ได้ยังไม่สมจริงเท่าที่ควร ดังนั้นหากแบบจำลองต่อไปสามารถพิจารณาถึงข้อจำกัดในส่วนนี้ได้ จะทำให้แบบจำลองมีความแม่นยำและสมจริงมากขึ้น



บรรณานุกรม

1. ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการใช้พลังงานปี 2563. 2563. p. 1-7.
2. Samanta, A., et al., *Post-Combustion CO₂ Capture Using Solid Sorbents: A Review*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012. 51(4): p. 1438-1463.
3. Langeroudi, E.G., et al., *Grafted Amine/CO₂ Interactions in (Gas-)Liquid-Solid Adsorption/Absorption Equilibria*. The Journal of Physical Chemistry C, 2009. 113(52): p. 21866-21876.
4. Hayashi, H., 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.
5. Tijani, M.M., E. Mostafavi, and N. Mahinpey, *Process simulation and thermodynamic analysis of a chemical looping combustion system using methane as fuel and NiO as the oxygen carrier in a moving-bed reactor*. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2019. 144: p. 107636.
6. Michelsen, B., et al., *Two-dimensional airflow modeling underpredicts the wind velocity over dunes*. Scientific Reports, 2015. 5(1): p. 16572.
7. S. Boonprasop, B.Chalermssinsuwan, and P. Piumsomboon, *Effect of the operating parameters on the CO₂ capture capacity of potassium carbonate supported on gamma alumina (K₂CO₃/γ-Al₂O₃) using conventional heat regeneration*. Chem. Eng, 2017. 78: p. 282-289.
8. S. Boonprasop, B.Chalermssinsuwan, and P. Piumsomboon, *Effect of operating parameters of potassium carbonate supported on gamma alumina (K₂CO₃/γ-Al₂O₃) on CO₂ capture capacity using depressurized regeneration*. Chem. Eng, 2018. 88: p. 215-225.
9. S. Kongkitisupchai and D. Gidaspow, *Carbon dioxide capture using solid sorbents in a fluidized bed with reduced pressure regeneration in a downer*. AIChE, 2013. 59(12): p. 4519-4537.

10. อนุรักษ์ นิมปีดิวัน และรุจิพรรณ สัมปันณา, ภาวะโลกร้อนกับสถานการณ์ด้านพลังงานของประเทศไทย., 2553: p. 105-109.
11. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ภาวะโลกร้อน. 2558: p. 90-98.
12. งานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, แผนปฏิบัติการลดแก๊สเรือนกระจกของประเทศ. 2563: p. 1-63.
13. กรมโยธาและแผนพลังงาน, การปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์. 2563: p. 1-8.
14. แหล่งกำเนิดแก๊สเรือนกระจก. แหล่งที่มา:
<https://sites.google.com/site/thermodynamiciineewtimes/home/kas-laea-sar-thi-mi-phl-tx-lok-rxn>.
15. *IEA, Enhanced coalbed methane recovery with CO₂ sequestration potential. 1998, Greenhouse Gas R&D Programme: Paris*
16. Thongthai, W., *Capture and Separation Technologies of CO₂ from Combustion of Fossil Fuel*. KKU Engineering, 2011. 38: p. 453-467.
17. Aaron, D., C.J.S.s. Tsouris, and technology, *Separation of CO₂ from flue gas: a review*. Separation Science and Technology, 2005. 40(1-3): p. 321-348.
18. Peters, L., et al., *CO₂ removal from natural gas by employing amine absorption and membrane technology—A technical and economical analysis*. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2011. 172(2-3): p. 952-960.
19. การดูดเคมีและฟิสิกส์. แหล่งที่มา:
<https://pradthana.wordpress.com/2008/04/13/adsorption-process/>.
20. Pradthana, P. *Adsorption Process* (กระบวนการดูดซับ). 2008; แหล่งที่มา:
<https://pradthana.wordpress.com/>.
21. Iruretagoyena, D., et al., *Influence of Alkali Metals (Na, K, and Cs) on CO₂ Adsorption by Layered Double Oxides Supported on Graphene Oxide*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015. 54(46): p. 1610-1618.
22. Kobayashi, T., et al., *DEM analysis on flow patterns of Geldart's group A particles in fluidized bed*. 2006. 43(10): p. 737-745.
23. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, ฟลูอิดเซชัน *Fluidization*. 2017: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
24. González, G., N.P. Jiménez, and O.F.J.A.F.D. Salazar, *Fluid Dynamics of Gas-Solid Fluidized Beds*. 2012.

25. Niven, R.K., *Physical insight into the Ergun and Wen & Yu equations for fluid flow in packed and fluidized beds*. Chemical Engineering Science, 2002. 57: p. 527-534.
26. Vejahati, F., et al., *CFD simulation of gas–solid bubbling fluidized bed: a new method for adjusting drag law*. 2009. 87(1): p. 19-30.
27. Kunii, D., O.J.I. Levenspiel, and E.C. Fundamentals, *bubbling bed model. model for flow of gas through a fluidized bed*. Fuel and Chemical Production, 1968. 7(3): p. 446-452.
28. Bi, H., J.J.T.C.E.J. Grace, and t.B.E. Journal, *Effect of measurement method on the velocities used to demarcate the onset of turbulent fluidization*. 1995. 57(3): p. 261-271.
29. Takeuchi, H., et al., *A quantitative definition and flow regime diagram for fast fluidization*. Powder Technology, 1986. 47(2): p. 195-199.
30. Perales, J., et al., *On the Transition from bubbling to fast fluidization regimes*. p. 73-78.
31. Hurskainen, M. and P. Vainikka, *Technology options for large-scale solid-fuel combustion*. Fuel Flexible Energy Generation, 2016: p. 177-199.
32. Chung, T., *Computational fluid dynamics*. 2010: Cambridge university press.
33. Patankar, S., *Numerical heat transfer and fluid flow*. 2018: Taylor & Francis.
34. Shu, C.-W.J.I.J.o.C.F.D., *High-order finite difference and finite volume WENO schemes and discontinuous Galerkin methods for CFD*. 2003. 17(2): p. 107-118.
35. Mansour, M., et al., *Impact of computational domain discretization and gradient limiters on CFD results concerning liquid mixing in a helical pipe*. Chemical Engineering and Processing, 2020. 383: p. 123-121.
36. Ju, Y. and C.-H.J.A.E. Lee, *Dynamic modeling of a dual fluidized-bed system with the circulation of dry sorbent for CO₂ capture*. Applied Energy, 2019. 241: p. 640-651.
37. Wang, S., et al., *Effect of superficial gas velocity on solid behaviors in a full-loop CFB*. Powder Technology, 2018. 333: p. 91-105.

38. Dietrich, F., et al., *Experimental study of the adsorber performance in a multi-stage fluidized bed system for continuous CO₂ capture by means of temperature swing adsorption*. Fuel Processing Technology, 2018. 173: p. 103-111.
39. Thummakul, T., et al., *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, 2017. 190: p. 122-134.
40. Nouri, M., et al., *Computational simulation of CO₂ capture process in a fluidized-bed reactor*. Computers & Chemical Engineering, 2018. 108: p. 1-10.
41. Ghadirian, E. and H.J.P.T. Arastoopour, *CFD simulation of a fluidized bed using the EMMS approach for the gas-solid drag force*. Powder Technology, 2016. 288: p. 35-44.



บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

1. ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน

ตัวอย่าง แก๊สที่มาจากกระบวนการหลังการเผาไหม้ ด้วยถ่านหินที่ความเร็วป้อนเข้า 0.167 เมตรต่อวินาที

1.1 ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad (ก1)$$

$$Ar = g\rho(\rho_p - \rho)D_{sv}^3/\mu^2 \quad (ก2)$$

$$C_1 = 300(1 - \varepsilon_{mf})/7 \quad (ก3)$$

$$C_2 = \varepsilon_{mf}^3/1.75 \quad (ก4)$$

$$U_{mf} = Re_{mf}\mu/\rho D_{sv} \quad (ก5)$$

วิธีการคำนวณ

$$C_1 = \frac{300(1 - 0.6)}{7} = 17.14$$

$$C_2 = \frac{0.6^3}{1.75} = 0.123$$

$$Ar = \frac{(9.81)(1.16)(3.650 - 1.16)(3.8 \times 10^{-4})^3}{(1.67 \times 10^{-5})^2} = 79.68$$

$$Re_{mf} = \sqrt{17.14^2 + 0.123(79.68)} - 17.14 = 0.313$$

$$U_{mf} = \frac{0.313(1.67 \times 10^{-5})}{1.16(3.8 \times 10^{-4})} = 0.012 \text{ m/s}$$

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. ความสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Heat Transfer Coefficient, h)

ตามสมการสหสัมพันธ์ของตัวเลขไรน์ฮอยล์ (Nusselt Number)

$$Nu = 1.86(RePr \frac{D}{L})^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_0}\right)^{0.14} \quad (ก6)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (ก7)$$

วิธีการคำนวณ

$$Nu = 1.86(5.34 \times 10^3 \times 9.65 \times 10^{-6} \frac{0.0095}{0.05})^{1/3} \left(\frac{0.0008891}{0.0008891}\right)^{0.14}$$

$$Nu = 6.09 \times 10^{-3}$$

$$h = \frac{6.09 \times 10^{-3}}{0.0095} \times 385$$

$$h = 2.46 \times 10^2$$

3. ประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

$$\%CO_2 \text{ removal} = \frac{\text{Mass fraction of } CO_2(\text{in}) - \text{Mass fraction of } CO_2(\text{out})}{\text{Mass fraction of } CO_2(\text{in})} \times 100 \quad (\text{ก8})$$

ตัวอย่าง แก๊สที่มาจากกระบวนการหลังการเผาไหม้ มีตัวแปร ดังนี้

สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ขาเข้า ณ เวลา 0 วินาที คือ 0.292035

สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความสูง ณ เวลา 20 วินาที $h/H = 17.32$ คือ 0.012

$$\%CO_2 \text{ removal} = \frac{0.292035 - 0.012}{0.292035} \times 100 = 58.90\%$$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 58.90

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อมลวรรณ ศรีวิชัย
วัน เดือน ปี เกิด	23 พฤศจิกายน 2538
สถานที่เกิด	ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์คณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	36/2 หมู่ที่ 2 ตำบลบ้านแพ้ว อำเภอบ้านแพ้ว จังหวัดสมุทรสาคร 74120
ผลงานตีพิมพ์	Sornvichai, A., Piemjaiswang, R., Piumsomboon, P., and Chalermssinsuwan, B. Computational Fluid Dynamic Model of Nonisothermal Circulating Fluidized Bed Riser for Carbon Dioxide Capture . Energy Reports (2020) Accepted Manuscript.
รางวัลที่ได้รับ	The excellence of the paper in the topic of Computational Fluid Dynamic Model of Nonisothermal Circulating Fluidized Bed Riser for Carbon Dioxide Capture (CPESE2020, Fukuoka, Japan) Best oral presentation in the topic of Computational Fluid Dynamic Model of Nonisothermal Circulating Fluidized Bed Riser for Carbon Dioxide Capture (CPESE2020, Fukuoka, Japan) Best poster presentation in the topic of Computational Investigation of Carbon Dioxide Capture in Circulating Fluidized Bed Reactor: Effect of Cooling Water Tube (PPC Symposium 2020, Bangkok, Thailand) Best poster presentation in the topic of Computational Fluid Dynamic Simulation of Stage Fluidized Bed Reactor (Petromat congress 2020, Bangkok, Thailand)