

แบบจำลองพลวัตและระบบการควบคุมการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูอิด์เบดโดยใช้
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

DYNAMIC MODEL AND CONTROL SYSTEM OF CARBON DIOXIDE CAPTURE IN FLUIDIZED
BED USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS



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 2018

Copyright of Chulalongkorn University

ชื่อนิกานต์ ธิระพานิชยกุล : แบบจำลองพลวัตและระบบการควบคุมการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์
 ในฟลูอิดไธซ์เบดโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ . (DYNAMIC MODEL AND CONTROL
 SYSTEM OF CARBON DIOXIDE CAPTURE IN FLUIDIZED BED USING COMPUTATIONAL
 FLUID DYNAMICS) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.เบญจ
 พล เถлимสินสุวรรณ

เนื่องจากจำนวนประชากรโลกเพิ่มขึ้นและคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นทำให้มีความต้องการพลังงานมากขึ้น ส่งผลให้ต้องผลิตพลังงานมากขึ้นโดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้า นำมาซึ่งการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณ มากสู่บรรยากาศเนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้ายังเป็นเชื้อเพลิงฐานคาร์บอน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น ปัจจัยหลักต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในงานวิจัยนี้ทำการพัฒนาแบบจำลองพลวัตสำหรับกระบวนการ ดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้ด้วยตัวดูดซับของแข็งโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ใน ไรเซอร์ของฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยใช้โปรแกรมจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำเร็จรูป ANSYS FLUENT จากนั้น ทำการปรับตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ องค์กรประกอบของแก๊สเผาไหม้ที่ ป้อนเข้า อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ประเมินผลกระทบต่อสัดส่วน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออก ด้วยเหตุนี้ระบบควบคุมจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการปรับปรุง กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ตัวแปรควบคุม คือ สัดส่วนแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออก และตัวแปรปรับค่าได้ คือ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ในขณะที่ตัว แปรรบกวน คือ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า สัดส่วน ของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ดำเนินการต่างๆ และสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกถูกวิเคราะห์ และสร้างระบบควบคุมด้วย โปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB จากนั้นจึงนำระบบควบคุมพีไอดีมาใช้ในแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ด้วยการเขียนภาษาคอมพิวเตอร์ในระบบไฟล์ประยุกต์ใช้ระบบไฟล์โลคัล (UDF) และทดสอบสมรรถนะของระบบ ควบคุมเมื่อตัวแปรรบกวนเปลี่ยนแปลง

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6072039023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Carbon dioxide capture, Adsorption, Computational fluid dynamics, Dynamic model, Controller

Chonnikan Tirapanichayakul : DYNAMIC MODEL AND CONTROL SYSTEM OF CARBON DIOXIDE CAPTURE IN FLUIDIZED BED USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS.

Advisor: Prof. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D.

Due to the increasing in population, more energy supply is demanded. Consequently, more energy, especially electricity, has to be produced. Since most of the fuel used in the electricity production are carbon-based fuels. More CO₂ is releasing to the atmosphere. CO₂ is the major contributor to the climate change problem. In this research, a dynamics model of CO₂ capture process solid sorbent, Na₂CO₃, has been developed for post combustion, considering the CO₂ adsorption taking place in a riser of a circulating fluidized bed. The model was developed by using a commercial CFD program, ANSYS FLUENT. Then, the operating parameters, which were gas velocity, inlet gas composition, inlet gas temperature and solid circulation rate, were changed to observe the impact on the CO₂ content at outlet. The control system was needed for improving the CO₂ capture. In this study, the control variable was the CO₂ content at outlet and the manipulated variable was solid circulation rate. The disturbance variables were flue gas velocity, CO₂ content of inlet flue gas, H₂O content of inlet flue gas, inlet flue gas temperature. The relationships between the operating variables and the CO₂ content at outlet were analyzed and evaluated the control system using MATLAB. After that, the control parameters obtained from MATLAB were employed in the CFD model with UDF code. Then, the system was tested by changing the disturbances and the system responses were observed.

Field of Study: Chemical Technology

Academic Year: 2018

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ เรื่อง แบบจำลองพลวัตและระบบการควบคุมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในฟลูอิดเบดโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่ง และคำแนะนำต่าง ๆ จากหลายฝ่าย ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณบุคคลทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในงานวิจัยครั้งนี้ ดังต่อไปนี้

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ ที่คอยให้คำแนะนำทางด้านการวิจัย วิเคราะห์ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ ตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ในทุกขั้นตอน เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ประพันธ์ คูชลธारा กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และรศ.ดร.ธงชัย โรหิตะดิษฐ ศรินพคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ สำหรับเงินทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคุณสุชาติ กริแสง และคุณรัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง รวมทั้งเพื่อน รุ่นพี่ ทุกคนในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือทั้งในด้านการทำงาน และกำลังใจที่ได้รับอย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ในครอบครัวที่เป็นกำลังใจสำคัญ และให้การสนับสนุนในทุกๆสิ่งเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ชนนิกานต์ ธิระพานิชกุล

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัยนี้.....	3
1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎี.....	6
2.1.1 ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization).....	6
2.1.1.1 ประเภทของฟลูอิดิเซชัน.....	6

2.1.1.2	รูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชัน (Fluidization flow regimes).....	7
2.1.1.2.1	เบตนิ่ง (Fixed bed).....	7
2.1.1.2.2	ฟลูอิดเซชันเบตแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed)	7
2.1.1.2.3	ฟลูอิดเซชันเบตแบบสลัก (Slugging fluidized bed)	9
2.1.1.2.4	ฟลูอิดเซชันเบตแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed)	9
2.1.1.2.5	ฟลูอิดเซชันเบตแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed)	9
2.1.1.2.6	ฟลูอิดเซชันเบตแบบเบาบาง (Pneumatic transport fluidized bed)	10
2.1.2	ฟลูอิดเซชันเบตแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed: CFB).....	10
2.1.3	การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart	11
2.1.4	กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	12
2.1.4.1	การดักจับก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion).....	12
2.1.4.2	การดักจับระหว่างการเผาไหม้ (Oxy-fuel combustion)	12
2.1.4.3	การดักจับด้วยเคมีคอลลูปิง (Chemical looping combustion)	13
2.1.4.4	การดักจับหลังการเผาไหม้ (Post-combustion)	13
2.1.4.4.1	กระบวนการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	13
2.1.4.4.2	กระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	14
2.1.5	การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	14
2.1.5.1	ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-processor)	15
2.1.5.2	ขั้นตอนการคำนวณ (Solver).....	16
2.1.5.3	ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-processor).....	16
2.1.6	การจำลองพลวัต และระบบควบคุม (Dynamics and Control system)	16
2.2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	22
3.1 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น	22
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.2.1 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณก่อนการติดตั้งแบบจำลองพลวัตและระบบ ควบคุม.....	24
3.2.1.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (pre-processor)	24
3.2.1.1.1 การทดสอบสัดส่วนปริมาตรของแข็ง (solid volume fraction) .	25
3.2.1.1.2 การทดสอบปริมาตรควบคุม (mesh independent test).....	25
3.2.1.1.3 การทดสอบแบบจำลองจลนศาสตร์ (kinetics model)	25
3.2.1.2 ขั้นตอนการคำนวณ (solver)	25
3.2.1.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model).....	30
3.2.1.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (mass conservation equations).....	30
3.2.1.2.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservation equations).....	30
3.2.1.2.1.3 สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวัดแกว่ง (fluctuating kinetic energy conservation equations) ของภูมิภาคของแข็ง.....	31
3.2.1.2.1.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน (energy conservation equations).....	31
3.2.1.2.1.5 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ (species conservation equations).....	32
3.2.1.2.1.6 แบบจำลองสัมประสิทธิ์ต้านทานการเคลื่อนที่ ระหว่างภูมิภาค (interphase exchange coefficient model, K_{gs}).....	33

3.2.1.2.1.7 แบบจำลองจลนศาสตร์ (kinetic model) ของ Boonprasop และคณะ [14].....	34
3.2.1.2.2 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (post-processor).....	35
3.2.2 การจำลองแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุม.....	35
3.2.2.1 ขั้นตอนการออกแบบการจำลองพลวัตและระบบควบคุม.....	35
3.2.2.2 แบบจำลองในโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB.....	35
3.2.2.2.1 วิธีการทดสอบผลตอบสนองแบบขั้น (Step response test)	35
3.2.2.2.2 ฟังก์ชันส่งผ่าน (transfer function).....	37
3.2.2.2.3 ระบบควบคุมวงปิด (Closed-loop control system).....	37
3.2.2.2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยรูปภาพด้วยซอฟต์แวร์ Simulink.....	38
3.2.3 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหลังการติดตั้งแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุม.....	39
3.2.3.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (pre-processor)	39
3.2.3.2 ขั้นตอนการคำนวณ (solver).....	39
3.2.3.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (post-processor).....	39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	40
4.1 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณก่อนการติดตั้งระบบควบคุม	40
4.1.1 การทดสอบสัดส่วนปริมาตรของแข็ง (solid volume fraction)	40
4.1.2 การทดสอบปริมาตรควบคุม (mesh independent test).....	41
4.1.3 การทดสอบแบบจำลองจลนศาสตร์ (kinetics model).....	42
4.1.4 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแสดงตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	43
4.2 ผลการจำลองแบบจำลองพลวัตเชิงเส้นและระบบควบคุม	48
4.2.1 การทดสอบผลตอบสนองแบบขั้น (Step response test)	48
4.2.2 ฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer function).....	54

4.2.3 ระบบควบคุมวงปิด (Closed-loop control system)	55
4.3 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหลังการติดตั้งระบบควบคุม.....	60
4.3.1 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองระหว่างการจูนแบบ Auto-tuning และ Ziegler-Nichols	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	73
5.1.1 การศึกษาหาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เหมาะสมในงานวิจัย	73
5.1.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์.....	74
5.1.3 การศึกษาสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB	74
5.1.4 การศึกษาสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
บรรณานุกรม.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	87

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	ฟลูอิดไฮดรอลิก.....	6
รูปที่ 2.2	รูปแบบการไหลของฟลูอิดไฮดรอลิก.....	7
รูปที่ 2.3	เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบหมุนเวียน.....	11
รูปที่ 2.4	การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart.....	12
รูปที่ 2.5	การดูดซับด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลายเอมีน.....	13
รูปที่ 2.6	การดูดซับด้วยสารเคมีโดยใช้ตัวดูดซับของแข็งคาร์บอน.....	14
รูปที่ 2.7	ขั้นตอนและหลักการใช้งานวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	15
รูปที่ 2.8	โดเมนการคำนวณและปริมาตรควบคุม.....	15
รูปที่ 2.9	คอนทัวร์สัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็ง.....	16
รูปที่ 2.10	ระบบการควบคุม.....	17
รูปที่ 2.11	ผลของการปรับแต่งพจน์สัดส่วน.....	18
รูปที่ 2.12	ผลของการปรับแต่งพจน์ปริพันธ์.....	18
รูปที่ 2.13	ผลของการปรับแต่งอนุพันธ์.....	19
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูอิดไฮดรอลิก.....	23
รูปที่ 3.2	โดเมนการคำนวณสองมิติของแบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ก) ทางเข้าแก๊สเผาไหม้ (ข) ทางเข้าตัวดูดซับของแข็ง (ค) ทางออกของแก๊สเผาไหม้ที่ผ่านการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว และตัวดูดซับของแข็ง.....	24
รูปที่ 3.3	ตัวแปรอินพุตแบบขั้นหนึ่งหน่วย.....	36
รูปที่ 3.4	ผลตอบสนองของฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย.....	36
รูปที่ 3.5	ระบบควบคุมแบบปิด.....	37
รูปที่ 3.6	ระบบควบคุมแบบวงปิด.....	38
รูปที่ 3.7	แบบจำลองระบบควบคุมแบบปิดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	39
รูปที่ 4.1	สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ความสูงต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์.....	41

รูปที่ 4.2 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง 46
 เท่ากับ 159 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที 46

รูปที่ 4.3 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ 46
 เท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที 46

รูปที่ 4.4 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งคงที่ 47

รูปที่ 4.5 ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พิจารณาที่
 บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีที่ 5 47

รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่
 ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีที่ 1-4 เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง 52

รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่
 ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีที่ 5-8 เมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งเปลี่ยนแปลง 52

รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่
 ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีที่ 9-12 เมื่อสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า
 เปลี่ยนแปลง 53

รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่
 ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีที่ 13-16 เมื่อสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง 53

รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่
 ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีที่ 17-20 เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง 54

รูปที่ 4.11 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมแบบวงปิดของกระบวนการดักจับแก๊ส
 คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง 56

รูปที่ 4.12 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมแบบวงปิด และฟังก์ชันส่งผ่านของกระบวนการดักจับ
 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง 57

รูปที่ 4.13 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมแบบวงปิด แสดงฟังก์ชันส่งผ่านของกระบวนการดักจับ
 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง และระบบควบคุมพีไอดี 57

รูปที่ 4.14 ค่าตัวแปรรบกวนแต่ละชนิดที่ช่วงเวลาต่าง ๆ 58

รูปที่ 4.15 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง และสัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ	59
รูปที่ 4.16 สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับมากกว่า 1200 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที.....	62
รูปที่ 4.17 สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับต่ำกว่า 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที.....	62
รูปที่ 4.18 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ	63
รูปที่ 4.19 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ ของแข็ง เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	63
รูปที่ 4.20 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่อสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	64
รูปที่ 4.21 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	64
รูปที่ 4.20 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่อสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	65
รูปที่ 4.21 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ	65
รูปที่ 4.22 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่ออุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ	66
รูปที่ 4.23 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่ออุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ	66
รูปที่ 4.24 ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	67
รูปที่ 4.25 สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้	67
ที่ป้อนเข้าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ	67
รูปที่ 4.26 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่อตัวแปรครบถ้วนแต่ละชนิด	68

เปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่างๆ.....	68
รูปที่ 4.27 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อตัวแปรครบถ้วนแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	68
รูปที่ 4.30 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่อตัวแปรครบถ้วนแต่ละชนิด.....	69
เปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่างๆ.....	69
รูปที่ 4.31 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกเฉลี่ย 5 วินาทีของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อตัวแปรครบถ้วนแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ.....	69
รูปที่ 4.32 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง และสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกที่ช่วงเวลาต่าง ๆ เมื่อ (ก) ความเร็วของแก๊สเผาไหม้เปลี่ยนแปลง (ข) สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง (ค) สัดส่วนไอน้ำของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง และ (ง) อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง.....	71
รูปที่ 4.33 (ก) การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรครบถ้วนต่าง ๆ (ข) อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง และสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกที่ช่วงเวลาต่าง ๆ	72

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่า C_1 และ C_2 จากงานวิจัยต่างๆ	8
ตารางที่ 3.1 กรณีการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์.....	28
ตารางที่ 3.2 กรณีการศึกษาวิธีการทดสอบผลตอบสนองแบบขั้น.....	29
ตารางที่ 4.1 ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนของอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งต่างๆ ...	41
ตารางที่ 4.2 ค่าความดันที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์ของปริมาตรควบคุมขนาดต่างๆ.....	42
ตารางที่ 4.3 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อคุณแบบจำลองจลนศาสตร์ด้วย สัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่ภาวะเสมือนคงตัว (20-40 วินาที).....	43
ตารางที่ 4.4 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อตัวแปรดำเนินการเปลี่ยนแปลง พิจารณา ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์.....	45
ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขของกรณีที่ 1-4 เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง	49
ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขของกรณีที่ 5-8 เมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งเปลี่ยนแปลง	50
ตารางที่ 4.8 เงื่อนไขของกรณีที่ 13-16 เมื่อสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง	51
ตารางที่ 4.9 เงื่อนไขของกรณีที่ 17-20 เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เปลี่ยนแปลง.....	51
ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าผลรวมสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน (IAE) ระหว่างการจูนระบบ ควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติ และแบบ Ziegler-Nichols	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันทั่วโลกประสบกับปัญหาทางภูมิอากาศเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นของโรงงานอุตสาหกรรม เกษตรกรรม และโรงงานอื่น ๆ โดยเฉพาะโรงงานไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการเผาไหม้ ซึ่งแก๊สที่ปล่อยก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม จนทำให้เกิดภาวะโลกร้อนขึ้น ส่งผลอย่างรุนแรงต่อสภาพอากาศมากที่สุดคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่ใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion) [1] เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบเผาไหม้กับออกซิเจนบริสุทธิ์ (Oxyfuel) [2] เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปิง (Chemical looping combustion) [3] และเทคโนโลยีสุดท้ายที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) [4] ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดแก๊สที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยใช้อุปกรณ์และเทคโนโลยีที่ทันสมัยนิยมใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในโรงไฟฟ้า เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องเปลี่ยนกระบวนการผลิตภายในโรงงาน โดยกระบวนการนี้รวมถึงการดักจับด้วยสารละลายของเหลว หรือกระบวนการการดูดซึม (Absorption) ที่นิยมใช้สารละลายโมโนเอทานอลามีนในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เทคโนโลยีนี้เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายแต่มีข้อเสียคือต้องใช้พลังงานสูงในการคืนสภาพตัวดูดซึม (Regeneration) และทำให้อุปกรณ์เกิดการกัดกร่อน แต่การดักจับด้วยตัวดูดซับของแข็ง (Adsorption) เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากใช้พลังงานน้อย ดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ มีความสามารถในการดูดซับสูง และสามารถคืนสภาพตัวดูดซับได้ดี ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้กระบวนการดูดซับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดเพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังกระบวนการเผาไหม้โดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำโซเดียมคาร์บอเนต มาใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ตัวดูดซับมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูง ราคาต่ำ และสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าร้อยละ 90 อันเหมาะแก่การนำมาใช้ในเทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ [5, 6]

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เป็นการใช้วิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการอนุกรมมวล โมเมนตัมพลังงาน และองค์ประกอบ เพื่อหาคำตอบและนำผลการคำนวณมาวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของไหล อุณหภูมิ ความดัน ความเร็ว และตัวแปรอื่น ๆ ด้วยการสร้างปริมาตรเล็ก ๆ ขึ้นในระบบที่ศึกษาโดยใช้การแบ่งช่วงด้วยวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite volume) และ แก้สมการภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต โดยใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการคำนวณให้เกิดประสิทธิภาพ รวมทั้ง มี

ความแม่นยำมากยิ่งขึ้นก่อนนำไปใช้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม [7] ซึ่งแบบจำลองนี้จะทำให้เข้าใจอุทกพลศาสตร์ของกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีความพยายามทดลองนำกระบวนการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาผลของความเร็ว ความเข้มข้นของสารแต่ละชนิดในแก๊สต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ [8, 9] และผลของอัตราการป้อนแก๊สแห่งองค์ประกอบของไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า และอัตราการไหลมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตัวดูดซับของแข็ง (Solid sorbent flux) ต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [10]

แบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมแบบการจูนอัตโนมัติ เป็นการควบคุมเอาต์พุตของกระบวนการที่ต้องการควบคุม โดยในกระบวนการประกอบด้วยตัวแปรควบคุม ตัวแปรปรับค่าได้ และตัวแปรรบกวน งานวิจัยที่ผ่านมาได้นำแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมมาใช้ในการควบคุมร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดที่มีตัวแปรควบคุมคือร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวแปรปรับค่าได้คือ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ค่าที่กำหนด โดยที่ตัวแปรรบกวนคือ อัตราการไหลของแก๊สและองค์ประกอบในแก๊ส ผลจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรรบกวนพบว่า ระบบควบคุมที่จำลองมีความสามารถในการปฏิบัติการที่มีขนาดใหญ่ได้ดีเนื่องจากการควบคุมแบบจำลองทำงานได้ดี [11] แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวข้องกับการนำระบบควบคุมมาทำงานร่วมกับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาแบบจำลองโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งจะทำให้ผลมีความสอดคล้องกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในหน่วยปฏิบัติการมากยิ่งขึ้น เพื่อคำนวณร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูอิดไชน์เบดที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะอุทกพลศาสตร์ที่เปลี่ยนไป รวมถึงการพัฒนาแบบจำลองมาใช้ควบคุมหน่วยปฏิบัติการ ในการพัฒนาระบบควบคุมต้องศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และนำผลมาวิเคราะห์เพื่อปรับปรุงแบบจำลองพลวัตสำหรับระบบควบคุมและการควบคุม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองเชิงพลวัตและระบบควบคุมสำหรับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูอิดไชน์เบด โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
2. เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ ต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูอิดไชน์เบด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลกระทบต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ ในช่วง 1-2 เมตรต่อวินาที และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ในช่วง 159-477 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที แล้วจึงศึกษาการทดสอบการตอบสนองแบบขั้น (Step response test) โดยกำหนดให้ตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (ในช่วง 1-2 เมตรต่อวินาที) อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (ในช่วง 159-477 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที) สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ในช่วง ร้อยละ 10-20 โดยโมล) และไอน้ำ (ในช่วง ร้อยละ 10-20 โดยโมล) ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ (ในช่วง 313.15 – 353.15 เคลวิน) จากนั้น นำผลของตัวแปรดำเนินการแต่ละตัวมาหาฟังก์ชันส่งผ่านของระบบ (Transfer function) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบของการบ่งบอกลักษณะของระบบ (System Identification) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB สุดท้ายนำสมการที่ได้ไปใช้สร้างแบบจำลองพลวัตสำหรับการควบคุมและระบบควบคุมในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเชิงพาณิชย์ ANSYS FLUENT

1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. จำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยแบบจำลอง 2 มิติ
2. แบบจำลองที่พิจารณาเฉพาะด้านไรเซอร์ของหน่วยปฏิบัติการ

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการดูดซับ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ แบบจำลองพลวัต และระบบควบคุม

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

ได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่นำแบบจำลองพลวัต และระบบการควบคุมมาใช้ในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบต ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหมาะสมแม้เกิดผลกระทบจากตัวแปรดำเนินการต่างๆ ต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และทราบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

1.7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ประมวลผลความรู้ที่เกี่ยวข้องทั้งในส่วนของการทดลองจริง และการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ รวมถึงแบบจำลองพลวัตและระบบการควบคุมกระบวนการ

2. ออกแบบการศึกษากระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบแบบจำลองพลวัต และระบบควบคุมของท่อไรเซอร์ของกระบวนการฟลูอิดเบตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร ความสูง 2 เมตร โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ Chalerm sin suwan และคณะ [12] และของ Thummakul และคณะ [13]

3. พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของท่อไรเซอร์ในฟลูอิดเบต โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ANSYS FLUENT เริ่มจากการสร้างแบบจำลองของกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยขนาดกระบวนการ ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ (Na_2CO_3) อัตราส่วนแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ Boonprasop และคณะ [14] จากนั้น หาขนาดของพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมจากขนาดพื้นที่การคำนวณ 3,000 6,000 9,000 และ 12,000 เซลล์ และทดสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ได้จากการจำลองกับผลการทดลองของ Chalerm sin suwan และคณะ [12] ทำการเปรียบเทียบจลนศาสตร์ของปฏิกิริยากับ Boonprasop และคณะ [14] และ Kongkitisupchai และคณะ [15] ขั้นตอนต่อมา ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า ในช่วง 1-2 เมตรต่อวินาที และอัตราการป้อนตัวดูดซับในช่วง 159-477 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการ กับร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

4. ศึกษาการทดสอบการตอบสนองแบบขั้น (Step response test) โดยกำหนดให้ตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (ในช่วง 1-2 เมตรต่อวินาที) อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (ในช่วง 159-477 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที) สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ในช่วงร้อยละ 10-20 โดยโมล) และไอน้ำ (ในช่วงร้อยละ 10-20 โดยโมล) ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ (ในช่วง 313.15 – 353.15 เคลวิน) เพื่อหาฟังก์ชันส่งผ่านของระบบ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบของการบ่งบอกลักษณะของระบบ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB

5. ทำการสร้างแบบจำลองพลวัต และระบบควบคุมจากความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ โดยให้ตัวแปรควบคุมคือสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออก ตัวแปรปรับค่าได้ คือ

อัตราการป้อนตัวดูดซับ และตัวแปรบวกคือ ความเร็วของแก๊สแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอุณหภูมิของ แก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และนำแบบจำลองมาใช้ในการควบคุมการดักจับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยการเขียนภาษาคอมพิวเตอร์ในระบบไฟล์ประยุกต์ใช้ระบบไฟล์โลคัล (User defined format: UDF) เพื่อนำไฟล์ไปใช้เป็นคำสั่งในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิง คำนวณเชิงพาณิชย์ ANSYS FLUENT ต่อไป

6. ประมวล วิเคราะห์ สรุปผลการทดลองเขียนบทความวิจัย และ วิทยานิพนธ์

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 ที่มา และความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตงานวิจัย ข้อจำกัดของ งานวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินงาน วิจัย และลำดับขั้นตอนการนำเสนองานวิจัย

บทที่ 2 ฟลูอิดเซชัน ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ กระบวนการดูดซับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ แบบจำลองพลวัต และระบบควบคุม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น ขั้นตอนการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ขั้นตอน การจำลองพลวัต และระบบควบคุม

บทที่ 4 ผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ผลของ การทดสอบการตอบสนองแบบขั้น และผลการจำลองพลวัต และระบบควบคุม

บทที่ 5 สรุปผลจากการวิจัยและข้อเสนอแนะ

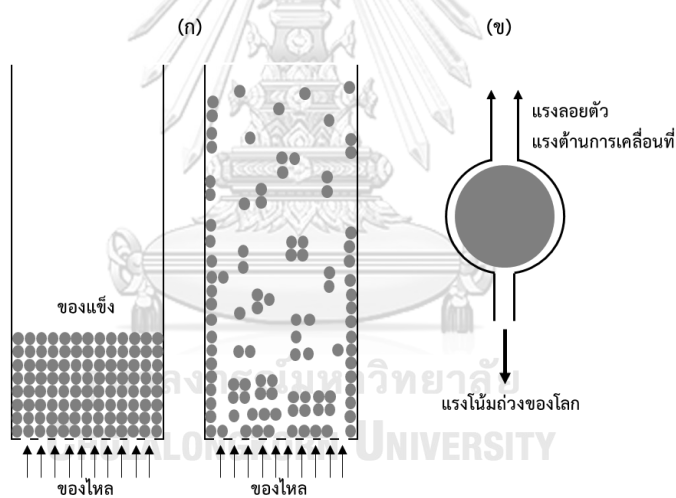
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization)

ฟลูอิดิเซชัน เป็นการสภาวะที่อนุภาคมีพฤติกรรมคล้ายของไหลรูปแบบการไหลเกิดจากการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล โดยอนุภาคของแข็งจะถูกบรรจุอยู่ในท่อที่มีช่องเล็กๆ บริเวณฐาน เมื่อทำการป้อนของไหลผ่านช่องเล็กๆ ดังกล่าวเข้ามาภายในท่อจนมีอัตราการไหลของไหลเหมาะสมค่าหนึ่งที่ทำให้อนุภาคของแข็งภายในท่อเริ่มผสมกันและเคลื่อนที่หมุนวนอยู่ในภายในท่อและมีคุณสมบัติคล้ายของไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดกระบวนการฟลูอิดิเซชันจะเรียกว่า เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิเซชัน โดยแรงที่กระทำต่ออนุภาคของแข็งประกอบด้วยแรงลอยตัวและแรงต้านการเคลื่อนที่ (ที่มีทิศขึ้น) และแรงโน้มถ่วงของโลก (ที่มีทิศลง) ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ข) [16]



รูปที่ 2.1 ฟลูอิดิเซชัน [16]

2.1.1.1 ประเภทของฟลูอิดิเซชัน

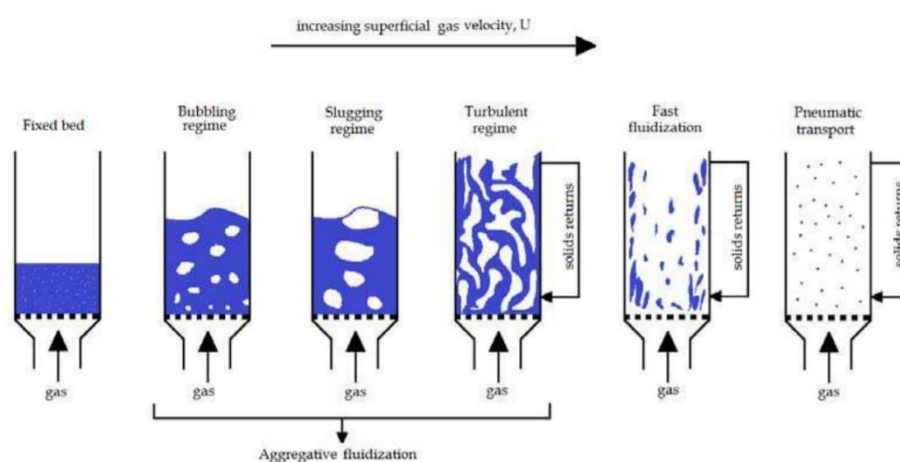
สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ดังนี้

ฟลูอิดิเซชันแบบสองวัฏภาค (Two phase fluidization) เป็นฟลูอิดิเซชันที่เกิดในระบบที่ประกอบด้วย 2 วัฏภาค นั่นคือ ของแข็งและของไหล ซึ่งของไหลสามารถเป็นได้ทั้งของเหลวหรือแก๊ส จึงแบ่งย่อยได้เป็น ฟลูอิดิเซชันแบบแก๊ส-ของแข็งและฟลูอิดิเซชันแบบของเหลว-ของแข็ง

ฟลูอิดเซชันแบบสามวัฏภาค (Three phase fluidization) เป็นฟลูอิดเซชันที่เกิดขึ้นในระบบที่ประกอบด้วย 3 วัฏภาค นั่นคือ ของแข็ง ของเหลวและแก๊ส

2.1.1.2 รูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชัน (Fluidization flow regimes)

พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชันได้ 6 ประเภทดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชัน [17]

2.1.1.2.1 เบดนิ่ง (Fixed bed)

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งยังไม่ถือว่าเป็นฟลูอิดเซชันเนื่องจากความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์น้อยเกินกว่าที่จะทำให้อนุภาคของแข็งที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการขยับตัว

2.1.1.2.2 ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่เริ่มมีพฤติกรรมไหล โดยความเร็วเริ่มต้นที่ทำให้อนุภาคของแข็งเริ่มขยับตัว เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf}) เมื่อของแข็งประพุดตัวคล้ายกับของไหล สามารถสังเกตได้จากการมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในระบบ โดยขนาดของฟองแก๊สจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคของแข็งภายในระบบ ซึ่งฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแก๊สและของแข็ง ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผสมกับอนุภาคของแข็ง และเคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบน ในขณะที่ฟองแก๊สเคลื่อนที่ไปด้านบนจะเกิดการรวมตัวกันทำให้ฟองแก๊สมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อฟองแก๊ส

มาถึงผิวหน้าของเบตจะเกิดการแตกตัว จากนั้น ของแข็งที่ติดไปกับฟองแก๊สจะตกลงมายังผิวหน้าเบตอีกครั้งด้วยแรงโน้มถ่วง

การคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชันแสดงดังในสมการต่อไปนี้

$$Re_{mf} = \sqrt{C_1^2 + C_2 Ar} - C_1 \quad (2.1)$$

$$Ar = g\rho(\rho_p - \rho)D_{sv}^3/\mu^2 \quad (2.2)$$

$$C_1 = 300(1 - \varepsilon_{mf})/7 \quad (2.3)$$

$$C_2 = \varepsilon_{mf}^3/1.75 \quad (2.4)$$

$$U_{mf} = Re_{mf}\mu/\rho D_{sv} \quad (2.5)$$

สำหรับ C_1 และ C_2 สามารถอ้างอิงจากงานวิจัยต่างๆ ดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่า C_1 และ C_2 จากงานวิจัยต่างๆ

งานวิจัย	C_1	C_2
Wen และ Yu [18]	33.7	0.0408
Saxena และ Vogel [19]	25.28	0.0571
Babu และคณะ [20]	25.25	0.0651
Grace [21]	27.2	0.0408
Chitester และคณะ [22]	28.7	0.0494

และ Abrahamsen และ Geldart [23] ได้เสนอวิธีในการประมาณค่า U_{mb} ดังนี้

$$\frac{U_{mb}}{U_{mf}} = \frac{2300\rho^{0.126}\mu^{0.523}\exp(0.176F_{45})}{D_{sv}^{0.8}g^{0.934}(\rho_p - \rho)^{0.934}} \quad (2.6)$$

เมื่อ Ar คือ ตัวเลขอาร์คิมิดีส (-)

ε_{mf} คือ สัดส่วนปริมาตรของวัฏภาคแก๊สที่ภาวะต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน (-)

U_{mb} คือ ความเร็วต่ำที่สุดของการเกิดฟองแก๊ส (เมตรต่อวินาที)

ρ คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

D_{sv} คือ ขนาดอนุภาคของวัฏภาคของแข็ง (เมตร)

μ คือ ความหนืดของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

F_{45} คือ สัดส่วนของแข็งที่มีขนาดน้อยกว่า 45 ไมโครเมตร (-)

2.1.1.2.3 ฟลูอิดไธซ์เบดแบบสลัก (Slugging fluidized bed)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบสลักเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดฟองแก๊สภายใน โดยฟองแก๊สขนาดเล็กที่เกิดขึ้นเกิดการรวมตัวกันจนทำให้ฟองแก๊สมีขนาดใหญ่ขึ้นจนมีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ มักเกิดกับเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก

2.1.1.2.4 ฟลูอิดไธซ์เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบปั่นป่วน เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส ซึ่งฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะแตกตัวอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้ามีค่าสูง จนทำให้เครื่องปฏิกรณ์ลักษณะนี้ไม่มีฟองแก๊สภายในระบบ โดยบริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์จะมีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น (Dense phase) ส่วนบริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์จะเป็นบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง (Dilute phase) ซึ่งความเร็วที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะอยู่ในช่วงความเร็วของแก๊สระหว่างความเร็วสุดท้ายที่เบดสามารถคงสภาพอยู่ในช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (U_c) และความเร็วต่ำที่สุดที่เบดของแข็งสามารถแสดงช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (U_k) โดยสามารถหาค่าได้จากสมการของ Bi และคณะ [24]

$$U_c = \frac{0.936\mu Ar^{0.472}}{D_{sv}\rho} \quad (2.7)$$

$$U_k = \frac{1.46\mu Ar^{0.472}}{D_{sv}\rho} \quad (2.8)$$

2.1.1.2.5 ฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟลูอิดไธซ์ชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟลูอิดไธซ์ชันความเร็วสูง เกิดขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลมีค่าสูงกว่าความเร็วขนส่ง (Transport velocity) โดยอนุภาคของแข็งจะเบาบางที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์ และเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของของไหล แต่ที่บริเวณผนังของเครื่องปฏิกรณ์มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่นและมีทิศการเคลื่อนที่สวนทางกับทิศการไหลของของไหล เรียกการไหลลักษณะนี้ว่าการไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annulus) flow [25] ซึ่งความเร็วที่ต่ำที่สุดที่ระบบเริ่มเข้าช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (U_{tr}) ถูกนำเสนอโดย Perales และคณะ [26] มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$U_{tr} = \frac{1.45\mu Ar^{0.484}}{\rho D_{sv}} \quad (2.9)$$

2.1.1.2.6 ฟลูอิดไคซ์เบดแบบเบาบาง (Pneumatic transport fluidized bed)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบเบาบาง เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้ามีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม ทำให้อนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ลอยสู่อากาศ และถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยอนุภาคเดี่ยวของของแข็งจะกระจายตัวอยู่ในกระแสของไหล ซึ่งความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม (U_{mp}) ถูกเสนอโดย Bi และ Fan [27] ดังสมการนี้

$$U_{mp} = 10.1(gD_{sv})^{0.347}(G_s/\rho)^{0.310}(D_{sv}/D)^{-0.139}Ar^{-0.021} \quad (2.10)$$

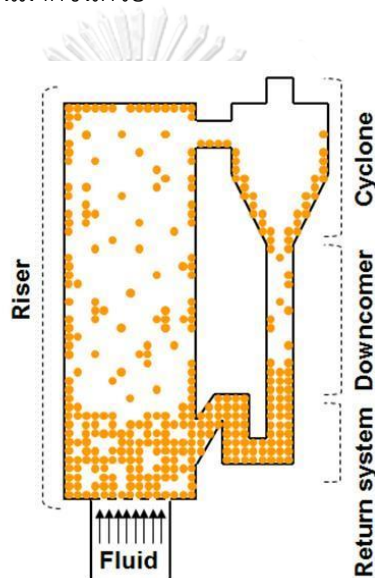
เมื่อ G_s คือ ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทดลอง (เมตร)

2.1.2 ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed: CFB)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบหมุนเวียนเป็นการประยุกต์รูปแบบการไหลของฟลูอิดไคซ์มาใช้งานโดยกระบวนการเกิดจากการสัมผัสกันระหว่างของไหลที่ป้อนมาในระบบกับอนุภาคของแข็งในช่วงการไหลตั้งแต่ช่วงฟลูอิดไคซ์แบบความเร็วสูงเป็นต้นไป โดยเมื่อของไหลมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity) ของอนุภาคของแข็ง อนุภาคของแข็งจะมีการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกอนุภาคของแข็งเกาะอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่มๆ เคลื่อนที่ขึ้นลง (Cluster phase) มีการสลายตัวและเกาะตัวกันเป็นกลุ่มๆ ซึ่งมีการกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ และอีกส่วนหนึ่งอนุภาคของแข็งกระจายตัวออกไปอย่างเบาบาง หรืออยู่ห่างกัน (Disperse phase) โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนจะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ได้แก่ ท่อโรเซออร์ ไซโคลน ท่อดาวเนอร์ และท่อป้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบนี้มีหลักการทำงานคือ ของไหลที่เข้ามาในระบบทางด้านล่างของท่อโรเซออร์จะไหลผ่านอนุภาคของแข็ง และเมื่อความเร็วของของไหลมีค่ามากกว่าค่าต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์ จะทำให้อนุภาคของแข็งเกิดการขยับ เมื่อความเร็วของของไหลเหมาะสมจะทำให้อนุภาคของแข็งประพติตัวเหมือนของไหล โดยอนุภาคของแข็งต้องมีความเร็วในช่วงการไหลแบบความเร็วสูง เพื่อให้อนุภาคของแข็งสามารถเคลื่อนที่มาถึงด้านบนสุดของท่อโรเซออร์และเคลื่อนที่ต่อไปยังไซโคลนได้ ไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งและของไหล (แก๊ส) ออกจากกัน ด้วยหลักการของแรงโน้มถ่วงและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง จากนั้น อนุภาคของแข็งที่ถูกแยกออกมาจะตกลงมายังส่วนท่อดาวเนอร์เป็นส่วนที่ทำหน้าที่คืนสภาพให้อนุภาค

ของแข็งสามารถนำกลับมาใช้งานได้ใหม่อีกครั้ง จากนั้น อนุภาคของแข็งจะถูกส่งกลับไปในส่วนท่อไรเซอร์โดยผ่านส่วนท่อป้อนกลับ หลักการดังกล่าวทำให้ระบบเกิดการหมุนเวียนจึงสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนคือ อนุภาคของแข็งมีการกระจายตัวตลอดแนวความสูงของเครื่อง และอนุภาคของแข็งกับของไหลมีการสัมผัสกันสูง ส่งผลให้การกระจายตัวของความร้อนเกิดอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเครื่องปฏิกรณ์ แต่ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้คือ ต้องลงทุนในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น เนื่องจากมีการเพิ่มส่วนไซโคลน ท่อดาวเนอร์ และท่อป้อนกลับ นอกจากนี้ ยังมีความซับซ้อนในการออกแบบมากขึ้น และมีโอกาสที่อนุภาคจะเกิดการสึกกร่อนและแตกหักจากการชนกันมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.3 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน [28]

2.1.3 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart

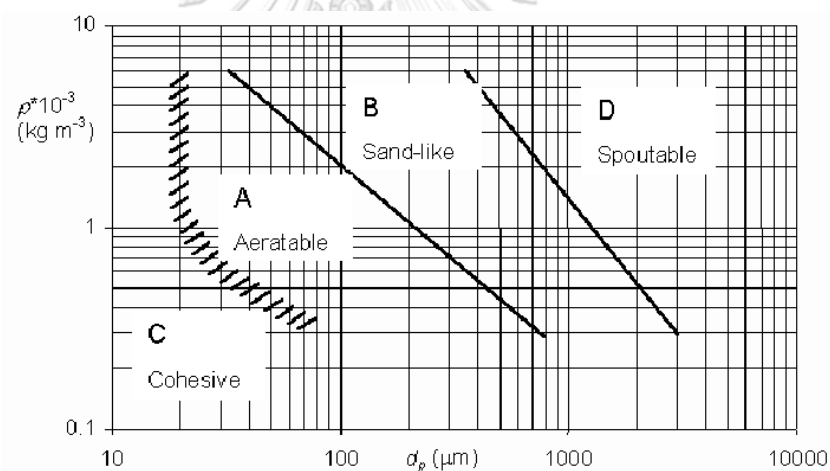
ในกระบวนการฟลูอิดไชน์คุณสมบัติของของแข็ง เช่น ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่น เป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากมีผลต่อสภาพการไหล การถ่ายโอนมวล พลังงานระหว่างอนุภาคของแข็งและแก๊ส โดยอนุภาคของแข็งในกระบวนการฟลูอิดไชน์สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มตามหลักการของ Geldart (Geldart Powder Classification) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

กลุ่ม A คือ Aeratable เป็นอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ สามารถเกิดฟลูอิดไชน์ได้ง่ายที่ความเร็วแก๊สต่ำ และเป็นฟลูอิดไชน์แบบสม่ำเสมอ โดยการเกิดฟลูอิดไชน์ของของแข็งกลุ่มนี้จะไม่เกิดฟองอากาศ

กลุ่ม B คือ Sandlike เป็นอนุภาคของแข็งที่มีลักษณะคล้ายทราย โดยขนาดของอนุภาคของแข็งอยู่ในช่วง $50 < d_p < 500$ ไมโครเมตร และความหนาแน่นอยู่ในช่วง $1.4 < \rho_s < 4.0$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยที่ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชันจะมีฟองแก๊สเกิดขึ้น และขนาดฟองแก๊สจะใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้า

กลุ่ม C คือ Cohesive เป็นอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมโครเมตร เกิดฟลูอิดเซชันได้ยากเนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูง และมักจับกันเป็นก้อน เช่น แป้ง ซีเมนต์ เป็นต้น

กลุ่ม D คือ Spoutable เป็นอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือความหนาแน่นสูง เกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก และมักเกิดช่องว่างของทางการไหลแก๊ส (Spouting) มักจะเกิดที่ด้านล่างของเบด เช่น เม็ดถั่วเขียว เม็ดกาแฟ เป็นต้น



รูปที่ 2.4 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart [29]

2.1.4 กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

2.1.4.1 การดักจับก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion)

อาศัยการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ได้จากกระบวนการ Gasification ออกมาก่อนที่จะมีการเผาไหม้ สามารถนำไปติดตั้งในแหล่งผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้เลย

2.1.4.2 การดักจับระหว่างการเผาไหม้ (Oxy-fuel combustion)

ใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ในการเผาไหม้

2.1.4.3 การดักจับด้วยเคมีคอลลูปปีง (Chemical looping combustion)

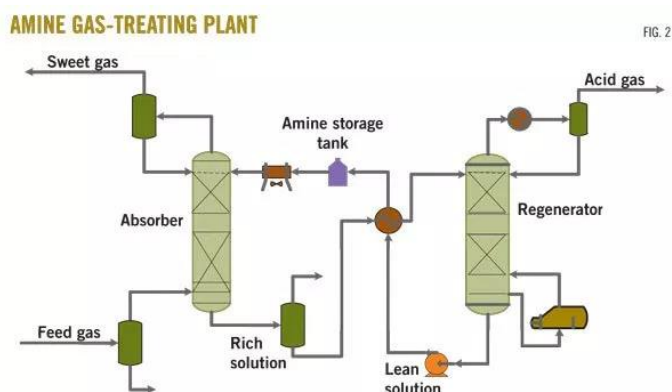
การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิลในออกซิเจนเกือบบริสุทธิ์ (ความเข้มข้นมากกว่าในอากาศ) เพื่อใช้ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายขึ้นในโรงงานไฟฟ้า

2.1.4.4 การดักจับหลังการเผาไหม้ (Post-combustion)

กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการนำระบบดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มาติดตั้งต่อจากกระบวนการเผาไหม้ เพื่อทำการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สเผาไหม้ วิธีการนี้ไม่สร้างผลกระทบต่อระบบเดิม ไม่ต้องสร้างระบบใหม่ เพียงแค่ขยายระบบมารับการดักจับแก๊สเผาไหม้ โดยกระบวนการนี้เหมาะสำหรับกระบวนการที่มีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลในการเผาไหม้ ดังนั้น เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้จึงเหมาะสมที่สุดกับกระบวนการที่มีการดำเนินการอยู่แล้ว เช่น กระบวนการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2.1.4.4.1 กระบวนการดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

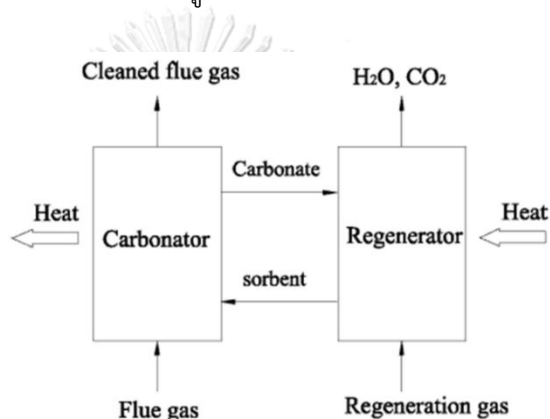
กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซึม โดยใช้สารละลายเอมีน นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมที่มีการเผาไหม้เชื้อเพลิง การแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากแก๊สธรรมชาติหรือแก๊สเชื้อเพลิง เป็นต้น ลักษณะการทำงานจะคล้ายกับการดักจับด้วยน้ำ เพียงแต่เปลี่ยนมาใช้สารละลายเอมีนแทน ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือ สารละลายเหล่านี้สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ และสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ถึงร้อยละ 99 แต่มีข้อเสีย คือ สารละลายเอมีนเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ราคาแพง และเกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์



รูปที่ 2.5 การดูดซับด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลายเอมีน [30]

2.1.4.4.2 กระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

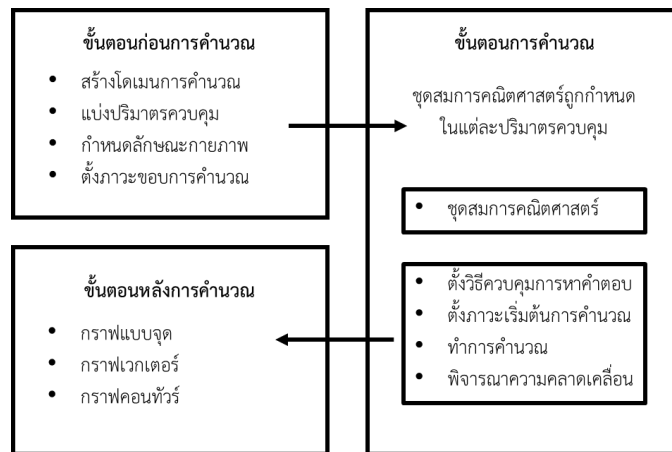
กระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับของแข็ง การดูดซับมีทั้งการดูดซับแบบทางกายภาพและทางเคมี โดยตัวดูดซับของแข็งทางกายภาพ เช่น ซิลิกาเจล ถ่านกัมมันต์ และซีโอไลต์ เป็นต้น สำหรับตัวดูดซับของแข็งทางเคมี ได้แก่ พวกละหะ อัลคาไลน์-คาร์บอเนต เช่น โพแทสเซียมคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต เป็นต้น ข้อดีของเทคโนโลยีนี้คือ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ราคาถูก ไม่ทำให้อุปกรณ์เกิดการสึกกร่อน และสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ แต่มีข้อเสีย คือ มีความสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่าสารละลายดูดซึม



รูปที่ 2.6 การดูดซับด้วยสารเคมีโดยใช้ตัวดูดซับของแข็งคาร์บอเนต [31]

2.1.5 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

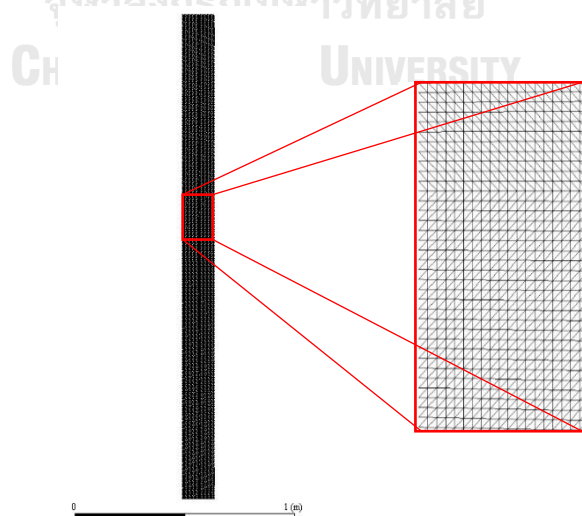
พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) คือ กลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มีพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม พลังงาน และองค์ประกอบ และใช้กระบวนการเชิงตัวเลขมาใช้ในการคำนวณโดยแบ่งพื้นที่การคำนวณออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ และแก้สมการอนุพันธ์โดยวิธีการเชิงตัวเลข ซึ่งการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพ ลดเวลาการดำเนินงาน ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ และสามารถศึกษาพฤติกรรมของของไหลที่ซับซ้อนได้เมื่อระบบยากต่อการดำเนินการในการทดลองจริง โดยในการศึกษางานวิจัยนี้ มีขั้นตอนการศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนก่อนการคำนวณ ขั้นตอนการคำนวณ และขั้นตอนหลังการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนและหลักการใช้งานวิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ [32]

2.1.5.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-processor)

ในการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเริ่มจากการสร้างแบบจำลองหรือพื้นที่การไหลของของไหลที่จะเข้ามาในระบบ เรียกว่า การสร้างโดเมนการคำนวณ จากนั้น โดเมนการคำนวณจะถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ โดยก่อนนำไปคำนวณจริง จะต้องทดสอบจำนวนปริมาตรควบคุมที่เหมาะสมในการคำนวณ (Mesh independent test) ซึ่งเป็นการทดสอบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนปริมาตรควบคุมแล้วผลของการคำนวณไม่เปลี่ยนแปลง โดยปริมาตรควบคุมนี้จะเป็นตัวแทนการเก็บข้อมูลการคำนวณต่อไป จากนั้นจะต้องมีการกำหนดลักษณะกายภาพของของไหลที่ต้องการ เช่น ขนาดอนุภาค ความหนาแน่น ความหนืด เป็นต้น แล้วจึงทำการตั้งค่าภาวะขอบการคำนวณ (Boundary conditions) ให้ทางเข้า ทางออก ผนังของระบบใกล้เคียงกับการทดลองจริง



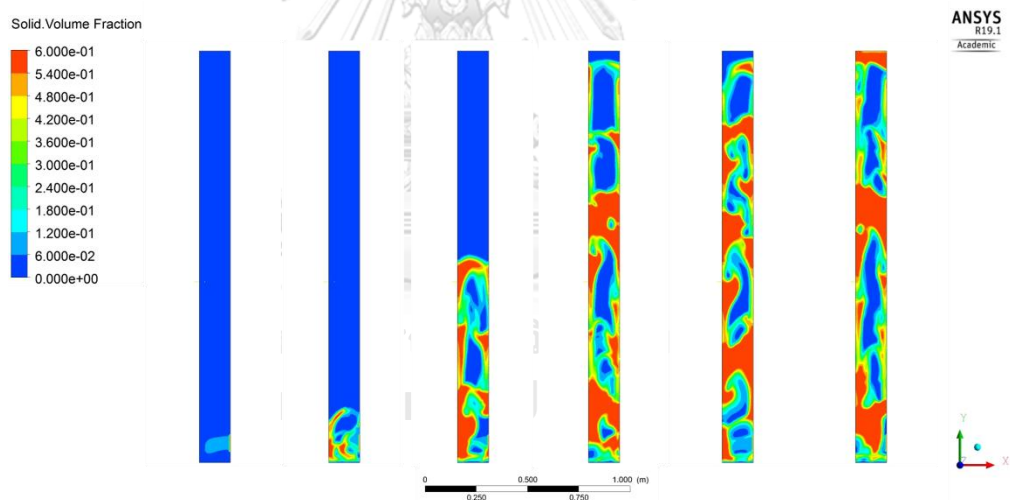
รูปที่ 2.8 โดเมนการคำนวณและปริมาตรควบคุม

2.1.5.2 ขั้นตอนการคำนวณ (Solver)

เมื่อสร้างโดเมนและตั้งค่าลักษณะกายภาพ ภาวะขอบการคำนวณแล้ว ในการคำนวณตัวแปรสมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องจะถูกกำหนดลงไปเป็นปริมาตรควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมคำตอบ โดยทำการแปลงสมการคณิตศาสตร์ในรูปอนุพันธ์ย่อยที่มีความซับซ้อนไปเป็นสมการทางพีชคณิต (Discretization) เพื่อให้สามารถคำนวณได้ง่ายในคอมพิวเตอร์ โดยการหาคำตอบด้วยวิธีการคำนวณซ้ำ (Iteration) เพื่อให้ผลลัพธ์ของการคำนวณที่มีความแม่นยำมากขึ้นและมีความคลาดเคลื่อนระหว่างครั้งของการคำนวณซ้ำอยู่ในค่าที่สามารถยอมรับได้ (Residual)

2.1.5.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (Post-processor)

เมื่อได้ผลลัพธ์จากการคำนวณแล้วจะนำผลลัพธ์ดังกล่าวมาแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้วิเคราะห์ได้ง่าย เช่น คอนทัวร์ (Contour plot) (โดยแถบสีจะแสดงถึงค่าข้อมูลช่วงต่างๆ) กราฟเส้น (Linear plot) และ กราฟเวกเตอร์ (Vector plot) เป็นต้น



รูปที่ 2.9 คอนทัวร์สัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็ง

2.1.6 การจำลองพลวัต และระบบควบคุม (Dynamics and Control system)

ตัวควบคุมพีไอดี (PID: proportional-integral-derivative controller) เป็นการปฏิบัติการทางคณิตศาสตร์สำหรับการควบคุมแบบรวมประกอบด้วย 3 พจน์ (1) สัดส่วน (Proportional) (2) ปริพันธ์หรืออินทิเกรต (Integral) และ (3) อนุพันธ์ (Derivative) ทั้ง 3 พจน์จะเป็นวิธีการประมวลผลเพื่อการควบคุมระบบให้สามารถตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ซึ่งกำหนดให้ $e(t)$ คือ สัญญาณความคลาดเคลื่อน (error signal) $C_o(t)$ คือ สัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมที่นำไปใช้ในการปรับตัวแปรขาเข้าระบบ K_p คือ ค่าคงตัวอัตราขยายเชิงสัดส่วน (proportional gain constant)

K_I คือ ค่าคงตัวอัตราขยายเชิงอินทิเกรต (integral gain constant) K_D คือ ค่าคงตัวอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (derivative gain constant) และ t คือ เวลา ดังแสดงในสมการที่ 2.11

$$Co(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

ซึ่งมีฟังก์ชันการส่งผ่าน (Transfer function) ของตัวควบคุมดังแสดงในสมการที่ 2.12 หรืออาจจะเขียนได้ดังสมการที่ 2.13 เมื่อ τ_I คือ ค่าคงตัวทางเวลาเชิงอินทิเกรต (integral time constant) และ τ_D คือ ค่าคงตัวทางเวลาเชิงอนุพันธ์ (derivative time constant)

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.12)$$

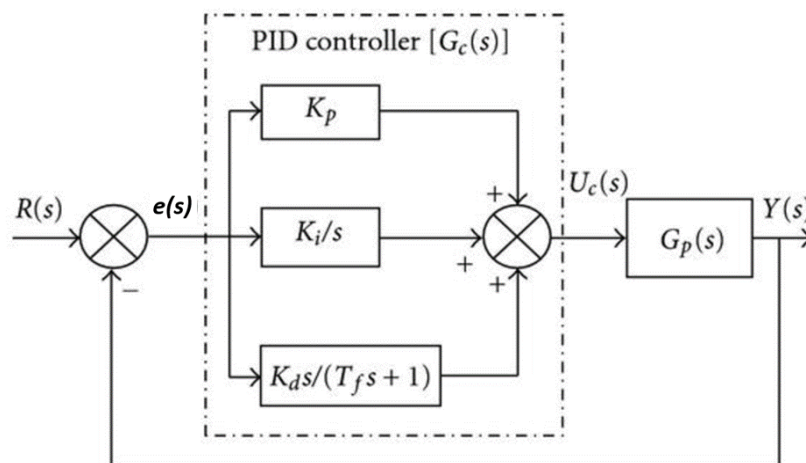
$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (2.13)$$

เมื่อ $K_p = K_c$

$$K_I = K_c / \tau_I$$

$$K_D = K_c \tau_D$$

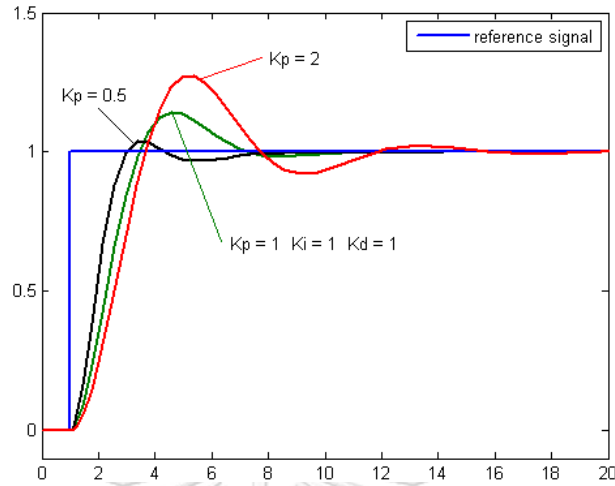
เมื่อพิจารณาระบบการควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.10 $G_c(s)$ จะนำสัญญาณความคลาดเคลื่อน $e(s)$ มาใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้สัญญาณควบคุม $U_c(s)$ แล้วจึงนำสัญญาณดังกล่าวไปใช้ในการปรับตัวแปรขาเข้ากระบวนการ $G_p(s)$ เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุต $Y(s)$ ที่สอดคล้องกับสัญญาณอินพุตอ้างอิง $R(s)$ [33]



รูปที่ 2.10 ระบบการควบคุม [33]

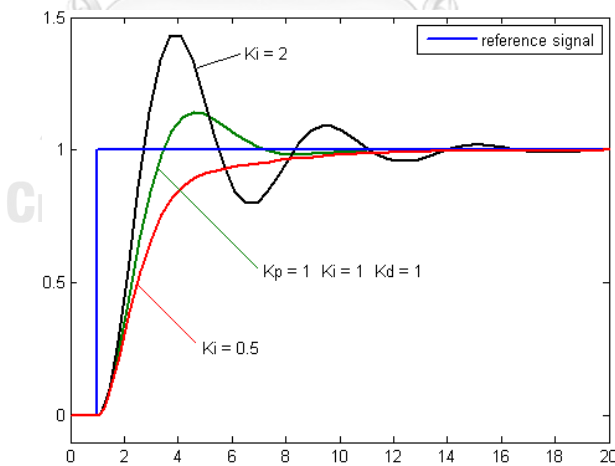
นอกจากนี้ การปรับแต่งค่าตัวแปรของระบบควบคุมพีไอดีให้ผลตอบสนองต่อการควบคุมที่แตกต่างกัน ในรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มค่าสัดส่วน K_p ให้มีค่าสูงขึ้นค่าความผิดพลาดก็จะ

เปลี่ยนแปลงมากขึ้นเช่นกัน การเพิ่มค่าสัดส่วนสูงเกินไปอาจจะส่งผลให้ระบบไม่เสถียรได้ แต่หากปรับค่าสัดส่วนให้มีค่าต่ำ จะทำให้ผลกระทบที่มีต่อระบบควบคุมน้อยตามไปด้วย



รูปที่ 2.11 ผลของการปรับแต่งพจน์สัดส่วน [34]

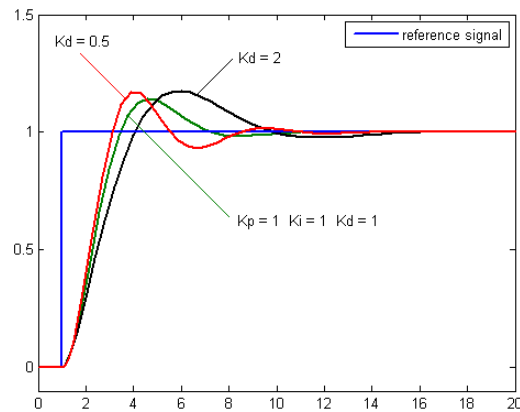
การปรับค่าพจน์ปริพันธ์เป็นส่วนที่เร่งให้กระบวนการเข้าสู่ค่าอ้างอิงและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงพจน์สัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม พจน์ปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดที่สะสมของช่วงเวลาค่าก่อนหน้า จึงสามารถทำให้การตอบสนองสูงกว่าค่าอ้างอิงที่ต้องการ และเกิดการหันเหไปทิศทางอื่น (Overshoot) ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ผลของการปรับแต่งพจน์ปริพันธ์ [34]

และพจน์สุดท้าย เมื่อปรับค่าพจน์อนุพันธ์ให้มากขึ้น จะเป็นการชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาต์พุตของระบบควบคุมและยังช่วยเพิ่มเสถียรภาพให้ระบบควบคุมได้ ดังนั้น พจน์

อนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากพจน์ปริพันธ์และทำให้ระบบมีเสถียรภาพของการรวมกันได้ดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ผลของการปรับแต่งอนุพันธ์ [34]

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Omell และคณะ [11] ได้ทำการพัฒนาการคำนวณสำหรับแบบจำลองพลวัตลดลำดับ (Dynamic reduced models: D-RMs) ให้เร็ว และมีความแม่นยำมากขึ้น แล้วนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการคำนวณระบบควบคุมเชิงการทำนายด้วยแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear model predictive control: NMPC) สำหรับควบคุมกระบวนการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แบบใช้เอมีนเป็นตัวดูดซับของแข็ง พบว่า เมื่อนำระบบควบคุมเชิงการทำนายด้วยแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นมาคำนวณแบบจำลองพลวัตลดอันดับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ชนิดแรกเป็นแบบจำลองที่คูณตัวแปร เพื่อกำจัดผลกระทบจากตัวแปรค้ำเคียง แล้วนำไปคำนวณแบบจำลองพลวัตแบบลดอันดับ (The decoupled A-B Net: DABNet) ส่วนชนิดที่ 2 เป็นการลดเวลา และพื้นที่ของแบบจำลองกระบวนการเริ่มต้น เพื่อปรับประสิทธิภาพในการคำนวณซึ่งยังคงกายภาพไว้ แล้วนำระบบควบคุมไม่เป็นเชิงเส้นทั้ง 2 ชนิด มาเปรียบเทียบกับระบบควบคุมเชิงการทำนายด้วยแบบจำลองเชิงเส้นในการดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีตัวแปรควบคุมคือร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวแปรปรับค่าได้คือ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่ทำให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึงค่าที่กำหนด เมื่อตัวแปรบวกรวมคือ อัตราการไหลของแก๊ส และองค์ประกอบในแก๊ส พบว่าระบบควบคุมชนิดที่ 2 ที่ใช้สมการแบบจำลองพลวัตลดอันดับในระบบควบคุมแบบจำลองเชิงการทำนายไม่เป็นเชิงเส้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าระบบควบคุมเชิงการทำนายด้วยแบบจำลองเชิงเส้นและระบบควบคุมเชิงการทำนายด้วยแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้นชนิดที่ 1 (The decoupled A-B

Net: DABNet) มีความทนทานในการปฏิบัติการที่มีขนาดใหญ่ได้ดีเนื่องจากการคาดการณ์แบบจำลองควบคุมทำงานได้ดี แต่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการคำนวณมากกว่า

Boonprasop และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการดูดซับที่โซเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวดูดซับของแข็งในฟลูอิดซ์เบดที่มีน้ำทำความเย็นภายใน เพื่อลดอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากปฏิกิริยา $\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{Na}_2\text{CO}_3(\text{s}) \rightleftharpoons 2\text{NaHCO}_3(\text{s}) + \text{Heat}$ โดยใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคที่ทั้งสมการของการดูดซับ $k_{fw} = 1 \times 10^{-10} [e^{70/RT}]$ และสมการที่คืนสภาพตัวดูดซับ $k_{bw} = 7.83 \times 10^{-3} [e^{-0.000502/RT}]$ พบว่า การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นที่หนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ได้ประมาณร้อยละ 67.32 โดยบริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์เป็นบริเวณที่เกิดการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นของเครื่องปฏิกรณ์โดยเทียบกับกราฟสมดุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในแต่ละชั้นพบว่า การเพิ่มจำนวนชั้นทำให้สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากกว่าร้อยละ 90

Liu และคณะ [35] ได้ทำการศึกษากลศาสตร์ของวาล์วโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อให้เข้าใจการปฏิบัติการจริงของเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งประกอบด้วย ท่อไรเซอร์ไซโคลน ท่อดาวเนอร์ และท่อป้อนกลับ โดยวาล์วจะอยู่ส่วนท่อป้อนกลับโดยทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของของแข็งจากกลศาสตร์ของวาล์ว และใช้แบบจำลองการเลื่อนช่อง (Sliding mesh model) เพื่อจำลองการเปิดปิดของวาล์ว ซึ่งศึกษา 3 ลักษณะคือ เปิด กึ่งปิด และปิด พบว่า กรณีที่เปิดวาล์ว จะพบของแข็งมากในท่อดาวเนอร์ ส่วนในท่อไรเซอร์จะพบที่บริเวณด้านล่างท่อไรเซอร์และบริเวณผนัง ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งที่ยังเหลือในระบบส่งผลให้สัดส่วนปริมาตรของแข็งยิ่งเพิ่มขึ้นโดยสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น แต่ถ้ายิ่งเพิ่มปริมาณของแข็งที่ยังเหลือในระบบ อัตราการไหลมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตัวดูดซับของแข็งจะเพิ่มขึ้นแต่มีส่วนที่ค่าคงที่ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกราฟรูปตัวเอสของสัดส่วนช่องว่างของของแข็งที่เกี่ยวกับการอุดตัน เมื่อทำการปิดวาล์วเป็นลักษณะกึ่งปิดวาล์ว พบว่า อัตราการไหลมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตัวดูดซับของแข็งจะเพิ่มขึ้นแต่มีส่วนที่ค่าคงที่ แต่สัดส่วนปริมาตรของของแข็งลดลงเล็กน้อย และเกิดการสะสมของของแข็งที่บริเวณด้านล่างท่อดาวเนอร์ ซึ่งเป็นการเพิ่มความดันเป็นแรงผลักดันให้ของแข็งจากท่อดาวเนอร์ย้อนกลับมาท่อไรเซอร์ และเมื่อทำการปิดวาล์วสัดส่วนปริมาตรของของแข็งลดลงจนกลายเป็นศูนย์ และสัดส่วนช่องว่างเพิ่มขึ้นจนกลายเป็นหนึ่งหรือไม่มีการย้อนกลับของของแข็ง

Gaspar และคณะ [36] ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของแบบจำลองที่เปลี่ยนไปกับข้อมูลแบบพลวัตของการดูดซึม (absorption) และการคายแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (desorption) เมื่อเปลี่ยนอัตราการป้อนเข้าของแก๊สแบบขั้น (step change) [37] โดยแก๊สมีองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 14.1 โดยโมล และน้ำร้อยละ 85.9 โดยโมล โดยใช้สารละลายมีโนเอทาโนลามีน (MEA) และ พิเพอราซีน (PZ) เป็นสารดูดซึม พบว่าเมื่ออัตราการป้อนแก๊สเข้าเปลี่ยนไป ผลของแบบจำลอง และข้อมูลแบบพลวัตให้ผลที่ใกล้เคียงกัน และจากการศึกษาการสร้างแบบจำลองเมื่ออัตราการป้อนแก๊สเข้าลดลงส่งผลให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าในเครื่องดูดซึมน้อยลง ในขณะที่ปริมาณสารละลายที่เข้ามาดูดซึมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเท่าเดิม ทำให้การดักจับเกิดได้ดีขึ้น และความร้อนในเครื่องต้มซ้ำ (Reboiler duty) เหลือมากขึ้น ซึ่งเมื่อต้องการควบคุมให้ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 90 ส่งผลให้อัตราการป้อนสารละลายดูดซึมต้องเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการป้อนแก๊สเปลี่ยนไป โดยเมื่ออัตราการป้อนแก๊สเพิ่มขึ้น อัตราการป้อนสารละลายดูดซึมต้องมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน

Luu และคณะ [38] ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย เอมินกับข้อมูลจากกระบวนการจริง และทำการวิเคราะห์ผลการควบคุม 3 แบบ คือ ระบบควบคุมพีไอดีแบบย้อนกลับ (PID feedback control) ระบบควบคุมพีไอดีแบบแคสเคด (Cascade-PID) และระบบควบคุมเชิงการทำนายด้วยแบบจำลอง (Model predictive control: MPC) เมื่อมีตัวแปรมารบกวนระบบ และหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบพบว่า ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของตัวดูดซึมเอมิน และประสิทธิภาพพลังงานเกี่ยวข้องกับความร้อนของเครื่องต้มซ้ำ จึงทำการสร้างวงควบคุมระบบจากความสัมพันธ์โดยตัวแปรควบคุมคือร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และประสิทธิภาพพลังงานส่วนตัวแปรปรับค่าได้คือ อัตราการไหลของตัวดูดซึมเอมิน และความร้อนของเครื่องต้มซ้ำ โดยให้อัตราการไหลของแก๊ส และสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้าเป็นตัวแปรรบกวนระบบ [39] เมื่อทำการปรับตัวแปรรบกวนแบบขั้น พบว่า ระบบควบคุมเชิงการทำนายด้วยแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการควบคุมและคงทนภายใต้ข้อจำกัดได้ดีกว่าอีก 2 ระบบ เมื่อควบคุมร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในสถานะเดียวกัน

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ข้อมูลงานวิจัยเบื้องต้น

การศึกษาและพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูอิดิโดซ์เบดแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ดังนี้

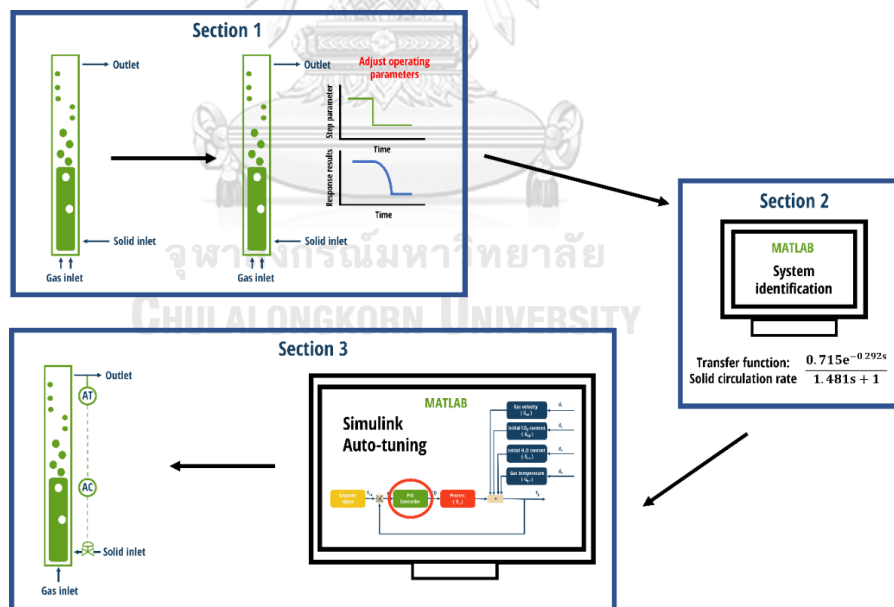
1. จำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณก่อนการติดตั้งแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุม
2. สร้างแบบจำลองพลวัต โดยใช้ผลจากข้อ 1. และพัฒนาระบบควบคุม
3. ติดตั้งระบบควบคุมและจำลองกระบวนการโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ส่วนแรกจะพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูอิดิโดซ์เบดโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 19.1 แบบจำลองเป็นแบบสองมิติ ซึ่งในการจำลองจะมีสภาวะคล้ายการทดลองในห้องปฏิบัติการจริง เนื่องจากแบบจำลองแก๊สการถ่ายโอนมวล พลังงาน และองค์ประกอบ ทำให้การจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สภาวะภายในเครื่องปฏิกรณ์มีสภาพเหมือนการทดลองในห้องปฏิบัติการจริงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในส่วนนี้จึงเริ่มจากการนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการจริงจากข้อมูลของงานวิจัยอื่นๆ เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้มาศึกษาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า สัดส่วนเริ่มต้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า สัดส่วนเริ่มต้นของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า ด้วยวิธีการทดสอบผลตอบสนองแบบขั้น (Step response test) โดยใช้โปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 19.1 ผลจากการตอบสนองจะถูกนำมาสร้างฟังก์ชันส่งผ่านของระบบในส่วนถัดไป ขณะที่ตัวแปรดำเนินการต่างๆ เปลี่ยนแปลงไป

ส่วนที่สองเป็นการนำผลการตอบสนองขณะตัวแปรดำเนินการต่างๆ เปลี่ยนแปลงไปจากส่วนแรกมาสร้างฟังก์ชันส่งผ่านของระบบ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบของการบ่งบอกลักษณะของระบบ (System identification toolbox) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB เมื่อได้ฟังก์ชันส่งผ่านของระบบแล้วกำหนดให้ตัวแปรในแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมเป็นดังนี้ ตัวแปรปรับค่าได้คือ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ตัวแปรรบกวนคือ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า

สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า สัดส่วนของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และตัวแปรควบคุมคือ ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นนำตัวแปรดังกล่าวมาสร้างระบบควบคุมแบบวงปิด (Close loop system) เพื่อหาตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสม โดยใช้ซอฟต์แวร์ Simulink วิธีการจูนแบบอัตโนมัติ (Auto-tuning) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB แล้วจึงนำค่าดังกล่าวมาเขียนโค้ดภาษาคอมพิวเตอร์ในระบบไฟล์ประยุกต์ใช้ระบบไฟล์โลคัล (User defined format: UDF) เพื่อนำไฟล์ไปใช้เป็นคำสั่งในโปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 19.1 ในส่วนที่สามต่อไป

ส่วนที่สามจะนำโค้ดในระบบไฟล์โลคัลมาใช้เป็นคำสั่งในโปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 19.1 เพื่อสร้างแบบจำลองพลวัต และระบบควบคุมสำหรับควบคุมสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำการศึกษาเมื่อตัวแปรรบกวน ได้แก่ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า สัดส่วนเริ่มต้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า สัดส่วนเริ่มต้นของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงไป เพื่อดูสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมที่สร้างขึ้นในโปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 19.1



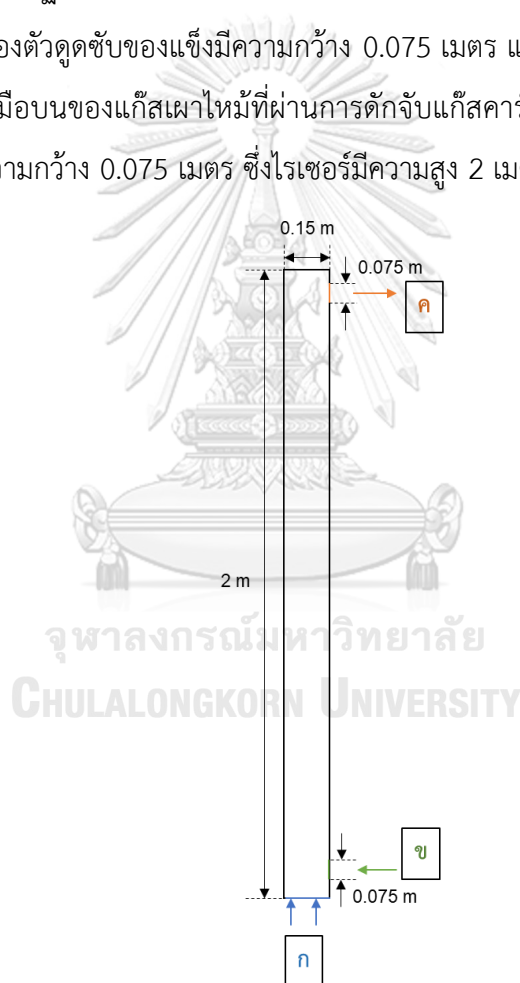
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในฟลูอิดซ์เบด

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณก่อนการติดตั้งแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุม

3.2.1.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (pre-processor)

ทำการสร้างรูปร่างพื้นที่การไหลสองมิติโดยอ้างอิงจากแบบจำลองจริงของ Thummakul และคณะ [13] เรียกว่า โดเมนการคำนวณ (computational domain) แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยใช้โปรแกรม Design Modeler จากนั้นแบ่งโดเมนการคำนวณให้เป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ โดเมนประกอบด้วยทางเข้า 2 ทาง คือทางเข้าของแก๊สเผาไหม้ด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ หรือ ไรเซอร์ (riser) มีความกว้าง 0.15 เมตร และทางเข้าทางด้านขวามือล่างของตัวดูดซับของแข็งมีความกว้าง 0.075 เมตร และทางออก 1 ทาง คือทางออกทางด้านขวามือบนของแก๊สเผาไหม้ที่ผ่านการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวดูดซับของแข็ง มีความกว้าง 0.075 เมตร ซึ่งไรเซอร์มีความสูง 2 เมตร



รูปที่ 3.2 โดเมนการคำนวณสองมิติของแบบจำลองการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (ก) ทางเข้าแก๊สเผาไหม้ (ข) ทางเข้าตัวดูดซับของแข็ง (ค) ทางออกของแก๊สเผาไหม้ที่ผ่านการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว และตัวดูดซับของแข็ง

3.2.1.1.1 การทดสอบสัดส่วนปริมาตรของแข็ง (solid volume fraction)

ทำการศึกษาอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งในแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็น 4 จำนวน ได้แก่ 159.0 238.5 318.0 และ 397.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร วินาที เนื่องจากการจำลองจะต้องป้อนตัวดูดซับของแข็งใหม่ตลอดเวลาทำให้จำเป็นต้องหาอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับการทดลองจริง เพื่อนำเงื่อนไขที่ได้ไปใช้ในการศึกษาต่อไป

3.2.1.1.2 การทดสอบปริมาตรควบคุม (mesh independent test)

ทำการแบ่งปริมาตรควบคุมด้วยโปรแกรม Meshing โดยทำการศึกษาโดเมนการคำนวณแบบ 2 มิติแบ่งช่องการคำนวณเป็น 4 จำนวน คือ 3,000 6,000 9,000 และ 12,000 เซลล์ เพื่อนำเอาปริมาตรควบคุมมาทำการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 19.1 และนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบ เพื่อเลือกปริมาตรควบคุมที่เหมาะสมที่ทำให้ผลของการคำนวณไม่เปลี่ยนแปลง และช่วยให้เวลาที่ใช้ในการคำนวณสั้นลง แต่ยังคงความถูกต้องในการคำนวณของแบบจำลอง

3.2.1.1.3 การทดสอบแบบจำลองจลนศาสตร์ (kinetics model)

หาค่าสัมประสิทธิ์เพื่อห้วงการอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้จากงานวิจัยของ Boonprasop และคณะ [14] แตกต่างจากที่เกิดขึ้นในการจำลอง อาจจะเป็นเพราะขนาดเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ไม่เท่ากัน ส่งผลให้การถ่ายโอนมวล และปัจจัยอื่นๆ ในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดไม่เท่ากัน โดยทำการคูณสัมประสิทธิ์ทั้งหมด 5 จำนวน คือ 0.080 0.100 0.125 0.150 และ 0.200 ด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 19.1 นำผลการจำลองมาเปรียบเทียบสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับงานวิจัยอื่นที่ใช้ตัวดูดซับของแข็งชนิดเดียวกัน เพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์สำหรับนำไปปรับค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

3.2.1.2 ขั้นตอนการคำนวณ (solver)

ทำการพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แบบ transient และใช้ time step size เท่ากับ 0.001 วินาที โดยกำหนดภาวะการดำเนินการ และภาวะขอบเขต (boundary condition) ดังนี้
ภาวะดำเนินการ (operating condition)

- แรงโน้มถ่วง (gravity force) = -9.81 m/s^2 (ในทิศแกน Y)

- อุณหภูมิอ้างอิง (reference temperature) = 298.15 เคลวิน
- ความดันอ้างอิง (reference pressure) = 101,325 ปาสคาล

ภาวะขอบเขต (boundary condition)

- ความเร็วแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า = 1.00 1.25 1.50 1.75 และ 2.00 เมตรต่อวินาที
- อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง = 159.0 238.5 318.0 397.5 และ 477.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตร วินาที
- No-slip condition at wall
- Specularity Coefficient = 0.9
- สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็ง (restitution coefficient) = 0.9

รูปแบบการจำลอง

- Eulerian-Eulerian approach
- Laminar model
- Phase coupled SIMPLE
- Maximum packing limit = 0.6
- Time step size = 0.001 s
- EMMS drag model

เมื่อได้อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งที่เหมาะสม นำมาหาปริมาณควบคุมแบบจำลองจลนศาสตร์ที่เหมาะสมกับการจำลองแล้ว ทำการออกแบบการจำลองเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยตัวแปรที่สนใจคือ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งทั้งสิ้น 25 กรณี แสดงดังตารางที่ 3.1

การศึกษาผลการตอบสนองของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ โดยใช้วิธีการทดสอบผลตอบสนองแบบขั้น (Step response test) โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่พัฒนาขึ้น โดยทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (79.5 159.0 238.5 397.5 477.0 และ 795.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที) ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (1.00 1.25 1.75 และ 2.00 เมตรต่อวินาที) สัดส่วนเริ่มต้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผา

ไหม้ที่ป้อนเข้า (ร้อยละ 10.0 12.5 17.5 และ 20.0 โดยโมล) สัดส่วนเริ่มต้นของไอน้ำใน
แก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (ร้อยละ 10.0 12.5 17.5 และ 20.0 โดยโมล) และอุณหภูมิของแก๊ส
เผาไหม้ป้อนเข้า (313.15 323.15 343.15 และ 353.15 เคลวิน) สำหรับกรณีฐานมีภาวะ
ขอบเขต ดังนี้ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (318.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)
ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (1.50 เมตรต่อวินาที) สัดส่วนเริ่มต้นของแก๊ส
คาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (ร้อยละ 15.0 โดยโมล) สัดส่วนเริ่มต้นของไ
อน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (ร้อยละ 15.0 โดยโมล) และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า
(333.15 เคลวิน) ทั้งสิ้น 20 กรณี แสดงดังตารางที่ 3.2



ตารางที่ 3.1 กรณีการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

กรณี	ความเร็วแก๊ส (เมตร/วินาที)	อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)
1	1.00	159.0
2	1.00	238.5
3	1.00	318.0
4	1.00	397.5
5	1.00	477.0
6	1.25	159.0
7	1.25	238.5
8	1.25	318.0
9	1.25	397.5
10	1.25	477.0
11	1.50	159.0
12	1.50	238.5
13	1.50	318.0
14	1.50	397.5
15	1.50	477.0
16	1.75	159.0
17	1.75	238.5
18	1.75	318.0
19	1.75	397.5
20	1.75	477.0
21	2.00	159.0
22	2.00	238.5
23	2.00	318.0
24	2.00	397.5
25	2.00	477.0

ตารางที่ 3. 2 กรณีการศึกษาวิธีการทดสอบผลตอบแทนแบบขั้น

กรณี	ตัวแปร				
	ความเร็วของ แก๊สเผาไหม้ (เมตรต่อวินาที)	อัตราการป้อนตัว ดูดซับของแข็ง (กิโลกรัมต่อ ตารางเมตรวินาที)	แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ ในแก๊สขาเข้า (% โดยโมล)	ไอน้ำในแก๊สเผา ไหม้ที่ป้อนเข้า (% โดยโมล)	อุณหภูมิ ของแก๊ส เผาไหม้ (เคลวิน)
1	1.00	318.00	15.00	15.00	333.15
2	1.25	318.00	15.00	15.00	333.15
3	1.75	318.00	15.00	15.00	333.15
4	2.00	318.00	15.00	15.00	333.15
5	1.50	159.00	15.00	15.00	333.15
6	1.50	238.50	15.00	15.00	333.15
7	1.50	397.50	15.00	15.00	333.15
8	1.50	477.00	15.00	15.00	333.15
9	1.50	318.00	10.00	15.00	333.15
10	1.50	318.00	12.50	15.00	333.15
11	1.50	318.00	17.50	15.00	333.15
12	1.50	318.00	20.00	15.00	333.15
13	1.50	318.00	15.00	10.00	333.15
14	1.50	318.00	15.00	12.50	333.15
15	1.50	318.00	15.00	17.50	333.15
16	1.50	318.00	15.00	20.00	333.15
17	1.50	318.00	15.00	15.00	313.15
18	1.50	318.00	15.00	15.00	323.15
19	1.50	318.00	15.00	15.00	343.15
20	1.50	318.00	15.00	15.00	353.15

3.2.1.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model)

3.2.1.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (mass conservation equations)

วิภูภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g) = 0 \quad (3.1)$$

วิภูภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (3.2)$$

เมื่อ	ε_g	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของวิภูภาคแก๊ส (-)
	ε_s	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของวิภูภาคของแข็ง (-)
	ρ_g	คือ	ความหนาแน่นของวิภูภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	ρ_s	คือ	ความหนาแน่นของวิภูภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	v_g	คือ	ความเร็วของวิภูภาคแก๊ส (เมตรต่อวินาที)
	v_s	คือ	ความเร็วของวิภูภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที)
	t	คือ	เวลา (วินาที)

โดย ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของวิภูภาคแก๊ส (ε_g) และของแข็ง (ε_s) มีค่ารวมกันเท่ากับ 1

3.2.1.2.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservation equations)

วิภูภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \varepsilon_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\varepsilon_g \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_g + \varepsilon_g \rho_g \vec{g} - K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (3.3)$$

วิภูภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \varepsilon_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\varepsilon_s \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_s - \nabla \cdot p_s + \varepsilon_s \rho_s \vec{g} + K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \quad (3.4)$$

เมื่อ	$\vec{\tau}_g$	คือ	ความเค้นเทนเซอร์ของแก๊ส (ปาสคาล)
	$\vec{\tau}_s$	คือ	ความเค้นเทนเซอร์ของของแข็ง (ปาสคาล)
	p_g	คือ	ความดันของแก๊ส (ปาสคาล)
	p_s	คือ	ความดันของแข็ง (ปาสคาล)
	K_{gs}	คือ	แบบจำลองต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวิภูภาคแก๊ส-ของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)
	\vec{g}	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

3.2.1.2.1.3 สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวัดแกว่ง (fluctuating kinetic energy conservation equations) ของภูมิภาคของแข็ง

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \varepsilon_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \varepsilon_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-\nabla p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (\kappa_s \nabla \theta_s) - \gamma_s + \phi_{gs} \quad (3.5)$$

เมื่อ	\bar{I}	คือ	เทนเซอร์เอกลักษณ์ (-)
	θ_s	คือ	พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของอนุภาค (ตารางเมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
	κ_s	คือ	พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
	γ_s	คือ	พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)
	ϕ_{gs}	คือ	พลังงานกวัดแกว่งแลกเปลี่ยนระหว่างเฟสแก๊สและอนุภาค (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)

พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำถูกกำหนดโดยค่าพลังงานการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดเล็ก

$$\kappa_s = \frac{150 d_s \rho_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384 (1 + e_{ss}) g_0} \left[1 + \frac{6}{5} (1 + e_{ss}) \varepsilon_s g_{0,ss} \right]^2 + 2 \rho_s \varepsilon_s^2 d_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss} \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

อัตราการกระจายตัวของพลังงานจลน์การกวัดแกว่งที่เกิดจากการชนกันของอนุภาคของของแข็งที่ไม่ยืดหยุ่น เป็นดังแสดงในสมการที่ 3.7

$$\gamma_s = \frac{12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \varepsilon_s^2 \theta_s^{3/2} \quad (3.7)$$

เมื่อ	$g_{0,ss}$	คือ	ฟังก์ชันการกระจายตัวในแนวรัศมี (-)
	ε_s	คือ	สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็ง (-)
	e_{ss}	คือ	สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็ง (-)
	d_s	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)

3.2.1.2.1.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน (energy conservation equations)

ภูมิภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g h_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g h_g) = -\varepsilon_g \frac{\partial p_g}{\partial t} + \bar{\tau}_g : \nabla \vec{v}_g + S_g + \vec{Q}_{gs} \quad (3.8)$$

ภูมิภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s h_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s h_s) = -\varepsilon_s \frac{\partial p_s}{\partial t} + \bar{\tau}_s : \nabla \vec{v}_s + S_s + \vec{Q}_{gs} \quad (3.9)$$

- เมื่อ h_g คือ เอนทัลปีของวัฏภาคแก๊ส (จุดต่อเคลวิน)
 โดยกำหนดให้ $h_g = \int c_{p,g} dT_g$
- h_s คือ เอนทัลปีของวัฏภาคของแข็ง (จุดต่อเคลวิน)
 โดยกำหนดให้ $h_s = \int c_{p,s} dT_s$
- S คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากแหล่งอื่นๆ ที่นิยามขึ้น
 (จุดต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)
- \bar{Q}_{gs} คือ ความเข้มข้นในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเฟส
 (จุดต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)

3.2.1.2.1.5 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ (species conservation equations)

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g X_i) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g \vec{v}_g X_i) = -\nabla \varepsilon_g J_i + r \quad (3.10)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s X_i) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \vec{v}_s X_i) = -\nabla \varepsilon_s J_i + r \quad (3.11)$$

- เมื่อ X_i คือ สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ (-)
- J_i คือ ฟลักซ์การแพร่ขององค์ประกอบ (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)
- r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)

โดยความเค้นเทนเซอร์ของทั้งสองวัฏภาคในการแก้สมการอนุรักษ์สามารถหาได้ดังนี้

วัฏภาคแก๊ส

$$\bar{\tau}_g = \varepsilon_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) - \varepsilon_g \left(\frac{2}{3} \mu_g \right) \nabla \cdot \vec{v}_g \bar{I} \quad (3.11)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\bar{\tau}_s = \varepsilon_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) - \varepsilon_s \left(\xi_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (3.12)$$

- เมื่อ ξ_s คือ ความหนืดรวม (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

- μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

จากการแก้สมการที่ (3.11) และ (3.12) ตัวแปรที่อยู่ในพจน์สามารถหาได้ดังนี้

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} \quad (3.13)$$

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.14)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{10\rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96\varepsilon_s(1+e_{ss})g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \varepsilon_s (1 + e_{ss})\right]^2 \quad (3.15)$$

$$\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

$$g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^{-1} \quad (3.17)$$

เมื่อ	$\mu_{s,col}$	คือ	ความหนืดของการชนกัน (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
	$\mu_{s,kin}$	คือ	ความหนืดจลนศาสตร์ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
	$g_{0,ss}$	คือ	ฟังก์ชันการกระจายตัวในแนวรัศมี (-)
	$\varepsilon_{s,max}$	คือ	การอัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นที่สุดของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง
	e_{ss}	คือ	สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาคของแข็ง (-)
	d_s	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)

ซึ่งสมการความดันของอนุภาค (solid pressure) ประกอบด้วย 2 พจน์ คือสมการจลนศาสตร์และสมการเนื่องจากการชนกันของอนุภาค ซึ่งค่าของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งต้องมีค่าน้อยกว่าค่าสูงสุดในการอัดตัว

$$p_s = \varepsilon_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1 + e_{ss})\varepsilon_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (3.18)$$

3.2.1.2.1.6 แบบจำลองสัมประสิทธิ์ต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (interphase exchange coefficient model, K_{gs})

แบบจำลอง Energy-minimization multi-scale (EMMS)

แบบจำลอง EMMS เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำ และเสถียรภาพในการจำลองการไหลภายในของระบบหลายวัฏภาคที่มีความซับซ้อนได้ดี โดยใช้แนวคิดการรวมกลุ่มของอนุภาคภายในการไหลแบบปั่นป่วนของระบบแก๊ส-ของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบด

$$\text{สำหรับ } \varepsilon_g \geq 0.74 \text{ จะได้ว่า } K_{gs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \omega(\varepsilon) \quad (3.19)$$

$$\text{สำหรับ } \varepsilon_g < 0.74 \text{ จะได้ว่า } K_{gs} = 150 \frac{(1-\varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_s^2} + 1.75 \frac{\rho_g \varepsilon_s |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad (3.20)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ (C_{DO}) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re_k) ดังแสดงในสมการ (3.21) ถึง (3.26)

$$\text{เมื่อ } Re_k < 1000; \quad C_{DO} = \frac{24}{Re_k} (1 + 0.15 Re_k^{0.687}) \quad (3.21)$$

$$Re_k = \frac{\rho_g d_s \varepsilon_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{\mu_g} \quad (3.22)$$

$$Re_k \geq 1000; \quad C_{DO} = 0.44 \quad (3.23)$$

$$\text{และ } 0.74 \leq \varepsilon_g < 0.82; \quad \omega(\varepsilon) = -0.5760 + \frac{0.0214}{4(\varepsilon_g - 0.7463)^2 + 0.0044} \quad (3.24)$$

$$0.82 \leq \varepsilon_g \leq 0.97; \quad \omega(\varepsilon) = -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0040} \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_g > 0.97; \quad \omega(\varepsilon) = -31.8295 + 32.8295\varepsilon_g \quad (3.26)$$

3.2.1.2.1.7 แบบจำลองจลนศาสตร์ (kinetic model) ของ Boonprasop และคณะ [14]

สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของตัวดูดซับของแข็ง คือโซเดียมคาร์บอเนต ดังสมการ ปฏิกิริยาสมดุล 3.27 จะได้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า และย้อนกลับดังแสดงในสมการ 3.28 และ 3.29 ตามลำดับ



$$r_{fw} = k_{fw} [CO_2]^{0.4} [H_2O]^{0.4} \varepsilon_{Na_2CO_3}; \quad k_{fw} = 1 * 10^{-10} \left[e^{\frac{70}{RT}} \right] \quad (3.28)$$

$$r_{bw} = k_{bw} \left(\frac{1}{[CO_2]} \right)^{0.15} \left(\frac{1}{[H_2O]} \right)^{0.15} \varepsilon_{NaHCO_3}; \quad k_{bw} = 7.83 * 10^{-3} \left[e^{\frac{-0.000502}{RT}} \right] \quad (3.29)$$

เมื่อ r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)

k คือ ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยา (ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมลวินาที)

f_w คือ ปฏิกิริยาไปข้างหน้า

b_w คือ ปฏิกิริยาย้อนกลับ

$[CO_2]$ คือ ความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

$[H_2O]$ คือ ความเข้มข้นของไอน้ำ (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)

$\varepsilon_{Na_2CO_3}$ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของโซเดียมคาร์บอเนต (-)

ε_{NaHCO_3} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (-)

R คือ ค่าคงตัวของแก๊ส (กิโลจูลต่อโมลเคลวิน)

T คือ อุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยา (เคลวิน)

สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบสมดุลข้างต้น เป็นสมการที่สามารถอธิบายถึงผลของปฏิกิริยาไปข้างหน้า และปฏิกิริยาย้อนกลับ ได้แก่ ปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยาการคืนสภาพตัวดูดซับ ซึ่งสมการนี้จะเป็นสมการที่

ครอบคลุมทั้งในส่วนของท่อโรเซอร์ที่เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และในส่วนของท่อดาวเนอร์ที่เกิดการคืนสภาพให้ตัวดูดซับ ซึ่งจะขึ้นกับผลของอุณหภูมิระบบ และความเข้มข้นของสารเคมี ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั้งสิ้น

3.2.1.2.2 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (post-processor)

แสดงผลลัพธ์การคำนวณในรูปแบบของรูปคอนทัวร์ เปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้กับการทดลองจริงของงานวิจัยอื่นๆ ได้แก่ สัดส่วนปริมาตรของแข็ง ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ และแบบจำลองจลนศาสตร์ เมื่อได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับการทดลองแล้ว ทำการจำลอง โดยปรับเปลี่ยนตัวแปรที่ศึกษาแล้วจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย

3.2.2 การจำลองแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุม

เมื่อได้ผลการตอบสนองแบบขั้นจากโปรแกรมประยุกต์ ANSYS Fluent 19.1 ในหัวข้อ

3.2.1 แล้วจึงได้นำผลการตอบสนองเหล่านั้นมาหาฟังก์ชันส่งผ่านของระบบ และวงการควบคุมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB

3.2.2.1 ขั้นตอนการออกแบบการจำลองพลวัตและระบบควบคุม

1. นำข้อมูลการทดสอบการตอบสนองแบบขั้นในแต่ละภาวะมาหาฟังก์ชันส่งผ่านของระบบ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบของการบ่งบอกลักษณะของระบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB

2. นำฟังก์ชันส่งผ่านของตัวแปรแต่ละชุดมาสร้างแบบจำลองวงควบคุมแบบป้อนกลับในซอฟต์แวร์ Simulink ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB

3. หาค่าตัวแปรในระบบควบคุมพีไอดีด้วยซอฟต์แวร์ Simulink โดยใช้วิธีการจูนแบบอัตโนมัติ

4. นำค่าพีไอดีมาเขียนภาษาคอมพิวเตอร์ในระบบไฟล์ประยุกต์ใช้ระบบไฟล์โลคัล (User defined format: UDF) เพื่อนำไฟล์ไปใช้เป็นคำสั่งในโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเชิงพาณิชย์ ANSYS Fluent 19.1 ต่อไป

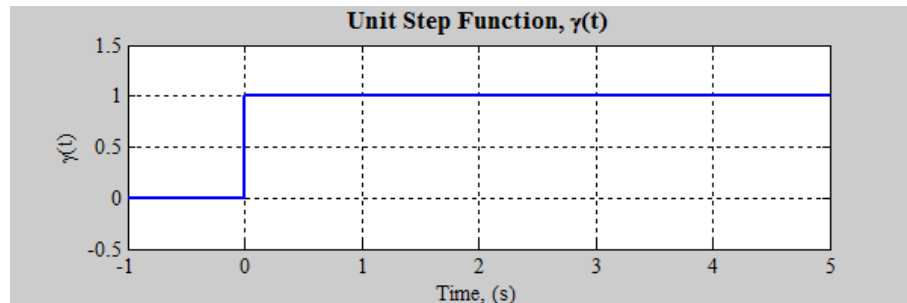
3.2.2.2 แบบจำลองในโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB

3.2.2.2.1 วิธีการทดสอบผลตอบสนองแบบขั้น (Step response test)

ในการทดสอบตัวแปรอินพุตมักนิยมใช้วิธีการตอบสนองแบบขั้นหนึ่งหน่วย (unit step response function) โดยมีฟังก์ชันของตัวแปรอินพุต ในโดเมนเวลาดังสมการ (3.30) และ ในลาปลาซโดเมนดังสมการ (3.31) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

$$\gamma(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\Gamma(s) = \frac{1}{s} \quad (3.31)$$



รูปที่ 3.3 ตัวแปรอินพุตแบบขั้นหนึ่งหน่วย [40]

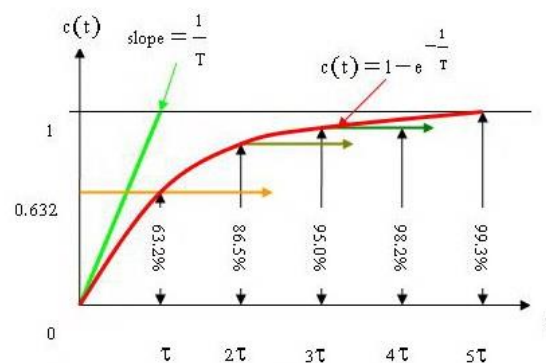
การตอบสนองในระบบที่มีภาวะเริ่มต้นที่เวลาเท่ากับ 0 มีค่าอินพุตเท่ากับ 0 จากนั้นเมื่อตัวแปรอินพุตเพิ่ม 1 หน่วย จึงเรียกรับการตอบสนองแบบขั้นหนึ่งหน่วย ซึ่งระบบที่มีโพลอันดับที่หนึ่งเป็นองค์ประกอบจะมีฟังก์ชันส่งผ่าน ดังนี้

$$H(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.32)$$

โดยผลตอบสนองของระบบนี้ เมื่อให้ตัวแปรอินพุตเป็นการตอบสนองแบบขั้นหนึ่งดังนี้

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{K}{s(s+1/\tau)} \right] = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{K}{s} - \frac{K\tau}{\tau s + 1} \right] = K(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.33)$$

ซึ่งมีผลการตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับระบบอันดับที่หนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไป τ วินาที การตอบสนองเพิ่มค่าขึ้นเป็นร้อยละ 63.2 ของค่าท้ายสุด เมื่อเวลาผ่านไป $2\tau, 3\tau, 4\tau, 5\tau$ วินาที โดยระดับของการตอบสนองค่อยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 86.5, 95.0, 98.2 และ 99.3 ของค่าท้ายสุด ตามลำดับ ซึ่งในทางวิศวกรรม ระบบอันดับที่หนึ่งให้การตอบสนองที่สมบูรณ์เมื่อเวลาผ่านไป 5τ วินาทีหรือ 5 เท่าของค่าคงที่เวลาของระบบนั่นเอง



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองของฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย [41]

3.2.2.2 ฟังก์ชันส่งผ่าน (transfer function)

ฟังก์ชันส่งผ่าน (transfer function) คือ ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุต (output signal) ต่อสัญญาณอินพุต (input signal) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยฟังก์ชันส่งผ่านสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้ สมมติให้ตัวควบคุม C ระบบ P ตัวตรวจจับ F เป็นเชิงเส้น และไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (ฟังก์ชันส่งผ่านของ $C(s)$, $P(s)$ และ $F(s)$ ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา) และ ฟังก์ชันส่งผ่านของ $C(s)$, $P(s)$ และ $F(s)$ หาได้ดังนี้

$$Y(s) = P(s)U(s) \quad (3.34)$$

$$U(s) = C(s)E(s) \quad (3.35)$$

$$E(s) = R(s) - F(s)Y(s) \quad (3.36)$$

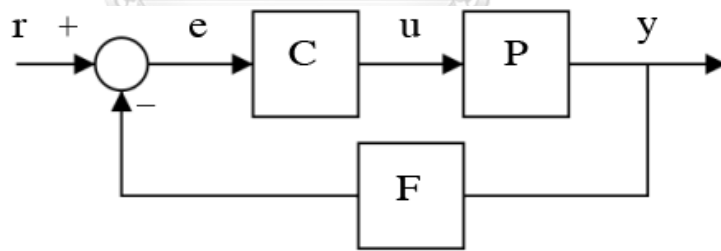
จะได้ว่า

$$Y(s) = \left(\frac{P(s)C(s)}{1+F(s)P(s)C(s)} \right) R(s) = H(s)R(s) \quad (3.37)$$

โดยที่

$$H(s) = \frac{P(s)C(s)}{1+F(s)P(s)C(s)} \quad (3.38)$$

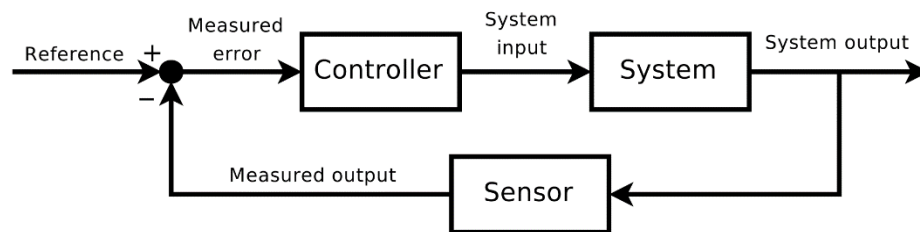
ซึ่ง $H(s)$ เรียกได้ว่าเป็นฟังก์ชันส่งผ่านของระบบวงปิดของระบบ (closed-loop transfer function)



รูปที่ 3.5 ระบบควบคุมแบบปิด [42]

3.2.2.2.3 ระบบควบคุมวงปิด (Closed-loop control system)

เนื่องจากระบบควบคุมแบบวงเปิดมีปัญหาด้านเสถียรภาพของระบบเพราะไม่มีการป้อนกลับของสัญญาณขาออก ซึ่งไม่เหมาะกับการใช้งานหลายอย่าง จึงมีความต้องการที่จะออกแบบระบบควบคุมที่สามารถตรวจจับความคลาดเคลื่อนระหว่างสัญญาณขาออกและสัญญาณอ้างอิงได้ จึงได้มีการคิดค้นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control systems) หรือระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed loop control systems) ขึ้นมาเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นกับระบบควบคุมแบบวงเปิด โดยมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.6

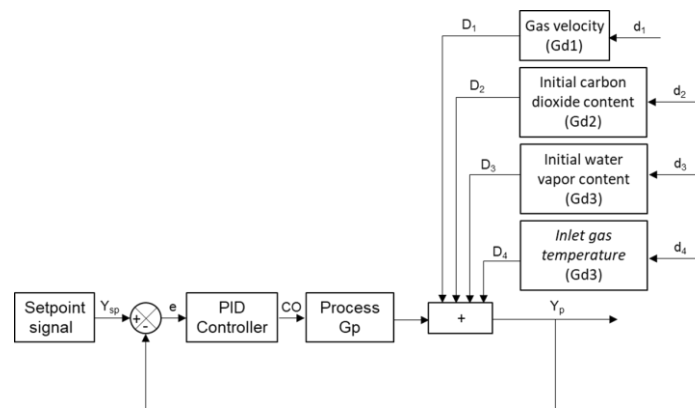


รูปที่ 3.6 ระบบควบคุมแบบวงปิด [42]

หลักการควบคุมป้อนกลับ (Feedback control systems) เป็นหลักการพื้นฐานที่ใช้ในการควบคุมระบบพลวัตอย่างแพร่หลาย ในภาพเป็นการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) เพราะสัญญาณจากเซนเซอร์ (Measured error) จะถูกนำไปหักล้างจากสัญญาณอ้างอิง (Reference input) เพื่อที่จะทำไปสร้างสัญญาณความคลาดเคลื่อน (Measured error) (ผลต่างระหว่างค่าที่ผู้ออกแบบต้องการและสัญญาณจากตัวตรวจจับ (Sensor)) ซึ่งจะนำไปป้อนสู่ตัวควบคุม (Controller) และตัวควบคุมจะสร้างสัญญาณควบคุม (System input หรือ Control signal) ป้อนสู่ระบบพลวัต (Plant, Dynamic systems) หลังจากนั้น จะนำสัญญาณขาออกของระบบพลวัต (ที่วัดได้จากตัวตรวจจับ) มาป้อนสู่ระบบป้อนกลับต่อไปเช่นนี้เรื่อย ๆ

3.2.2.2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยรูปภาพด้วยซอฟต์แวร์ Simulink

Simulink เป็นซอฟต์แวร์ใช้งานในโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB เพื่อใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยรูปภาพ ซึ่งใช้เครื่องมือสร้างแบบจำลอง การเขียนแบบ และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ข้อมูล โดยสามารถทำแบบจำลองด้วยรูปภาพได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนั้น Simulink ยังประกอบด้วยไลบรารีบล็อกพื้นฐานและขั้นสูงเฉพาะสาขาวิชา ทั้งระบบเชิงเส้น (Linear System) ระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear System) ระบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous-time) ระบบเวลาแบบตัวอย่าง (Sample time) และระบบไฮบริด (Hybrid) ซึ่ง Simulink สนับสนุนการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ได้ขณะที่เลียนแบบระบบอยู่ ทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองระบบได้ทันที ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์นี้ในการสร้างระบบควบคุมวงปิด โดยกำหนดให้ฟังก์ชันส่งผ่านของอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งเป็นฟังก์ชันส่งผ่านของกระบวนการ $G_p(s)$ และฟังก์ชันส่งผ่านของตัวแปรกระบวนการคือความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า $G_{d1}(s)$ สัดส่วนเริ่มต้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า $G_{d2}(s)$ สัดส่วนเริ่มต้นของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า $G_{d3}(s)$ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ป้อนเข้า $G_{d4}(s)$ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบจำลองระบบควบคุมแบบปิดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

3.2.3 การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหลังการติดตั้งแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุม

3.2.3.1 ขั้นตอนก่อนการคำนวณ (pre-processor)

นำผลที่ได้จากการทดสอบระบบควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ Simulink ในโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB มาใช้ในแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อติดตั้งระบบควบคุม และมีการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรขาเข้า อาทิ ความเข้มข้นแก๊สขาเข้า อุณหภูมิ หรือ อัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ โดยการเขียนโค้ดเพิ่มลงในระบบไฟล์โค้ด

3.2.3.2 ขั้นตอนการคำนวณ (solver)

แก้สมการทางคณิตศาสตร์ ดังหัวข้อ 3.2.1.2.1 ร่วมกับสมการตัวควบคุมพีไอดีที่อยู่ในโค้ด ดังแสดงในสมการที่ 2.11 เพื่อให้การดักแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีตัวควบคุมพีไอดีจากการเขียนโค้ดในโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT ทำงานได้ใกล้เคียงกับการทดลองในห้องปฏิบัติการจริง โดยมีตัวแปรปรับค่าได้คือ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ตัวแปรควบคุมคือ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออก และตัวแปรรบกวนคือสัดส่วนแก๊สขาเข้า อุณหภูมิ และอัตราการไหลของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า

3.2.3.3 ขั้นตอนหลังการคำนวณ (post-processor)

แสดงผลลัพธ์การคำนวณในรูปแบบของรูปคอนทัวร์ และกราฟเชิงเส้น แสดงผลของการปรับเปลี่ยนตัวแปรรบกวนที่ส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ สัดส่วนเริ่มต้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า สัดส่วนเริ่มต้นของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า เมื่อได้ระบบควบคุมโดยการปรับอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งจากแบบจำลองพลวัต และระบบควบคุมที่เขียนด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ใช้ระบบไฟล์โค้ดแล้วจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณก่อนการติดตั้งระบบควบคุม ผลการจำลองแบบจำลองพลวัตเชิงเส้นและระบบควบคุม และผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหลังการติดตั้งแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุม

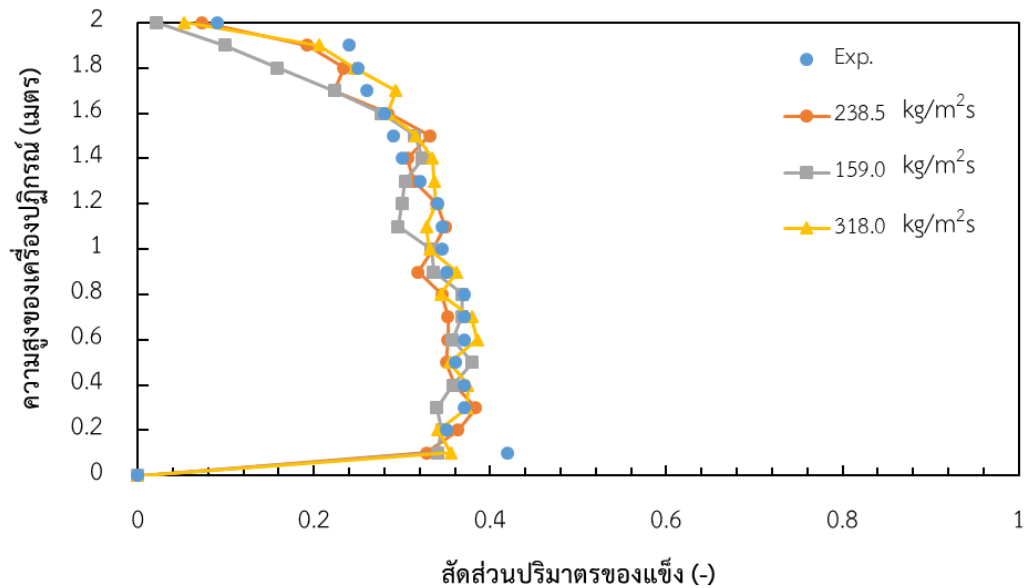
4.1 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณก่อนการติดตั้งระบบควบคุม

จากการจำลองกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT 19.1 ด้วยโดเมนการคำนวณแบบสองมิติ ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องจากการทดสอบสัดส่วนปริมาตรของแข็ง ปริมาตรควบคุม และแบบจำลองจลนศาสตร์ เมื่อได้แบบจำลองที่ใกล้เคียงกับการทดลองแล้ว ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

4.1.1 การทดสอบสัดส่วนปริมาตรของแข็ง (solid volume fraction)

เนื่องจากงานวิจัยนี้ ทำศึกษาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งกำหนดให้ตัวดูดซับของแข็งถูกป้อนเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ตลอดเวลา แต่ในการทดลองจริงที่รายงานในงานวิจัยอื่น กำหนดปริมาณตัวดูดซับของแข็งให้คงที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ก่อนจะเริ่มการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องเทียบความถูกต้องกับการทดลองของ Chalerm sinuwan และคณะ [12] โดยทำการทดสอบสัดส่วนปริมาตรของแข็งจากการปรับอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งเป็น 3 ค่า ได้แก่ 159.0 238.5 และ 318.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรตามลำดับ ทำการจำลองหาค่าโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เมื่อพิจารณาสัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ความสูงต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่า ที่อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งทั้ง 3 ค่ามีความใกล้เคียงกับการทดลอง จึงพิจารณาจากค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (Sum square error: SSE) ของอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งต่างๆ ทั้ง 3 ค่า เทียบกับค่าจากการทดลองจริง [12] ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า ที่อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งมีค่าเท่ากับ 238.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยที่สุด

เพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความใกล้เคียงกับการทดลองจริง งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งมีค่าเท่ากับ 238.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาทีในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณต่อไป



รูปที่ 4.1 สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ความสูงต่างๆ ของเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ 4.1 ค่าความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนของอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งต่างๆ

อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (kg/m ² s)	Sum square error
159.0	11976.25
238.5	1937.87
318.0	2686.78

4.1.2 การทดสอบปริมาตรควบคุม (mesh independent test)

เพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องแม่นยำและใช้เวลาในการคำนวณอย่างเหมาะสม ได้ทำการทดสอบหาปริมาตรควบคุมที่เหมาะสม โดยแบ่งปริมาตรควบคุม (mesh) ออกเป็น 4 ขนาด ได้แก่ 3,000 6,000 9,000 และ 12,000 เซลล์ ตามลำดับ นำปริมาตรควบคุมทั้ง 4 ขนาดมาจำลองแบบจำลองพลศาสตร์เชิงคำนวณ เมื่อพิจารณาความดันที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์เฉลี่ยภาวะเสมือนคงตัว เปรียบเทียบผลการจำลองของปริมาตรควบคุมทั้ง 4 ขนาด เพื่อหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาตรควบคุมขนาด 3,000 และ 6,000 เซลล์ มีค่าความดันที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์ แตกต่างกับขนาด 9,000 และ 12,000 เซลล์ ซึ่งเป็นผลจากเซลล์การคำนวณไม่ละเอียดพอ และพบว่าเมื่อใช้ปริมาตรควบคุมขนาด 9,000 และ 12,000 เซลล์ ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน

เพื่อให้ได้ปริมาตรควบคุมที่มีขนาดที่เหมาะสม ใช้ทรัพยากรในการคำนวณไม่มาก และมีความแม่นยำในการทำนายผล งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ปริมาตรควบคุมขนาด 9,000 เซลล์ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณต่อไป

ตารางที่ 4.2 ค่าความดันที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์ของปริมาตรควบคุมขนาดต่างๆ

ปริมาตรควบคุม (เซลล์)	ความดันที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์ (ปาสกาล)	ความคลาดเคลื่อน (%)
3,000	105,896.49	-
6,000	106,717.46	0.78
9,000	106,546.34	0.16
12,000	106,516.80	0.03
16,000	106,574.95	0.06

4.1.3 การทดสอบแบบจำลองจลนศาสตร์ (kinetics model)

เมื่อได้อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง และขนาดของปริมาตรควบคุมที่เหมาะสมแล้ว ทำการจำลองโดยใช้ภาวะในการจำลองเช่นเดียวกับการทดลองจริงของ Chalerm sinuswan และคณะ [12] เพื่อทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองจลนศาสตร์ที่ใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของ Boonprasop และคณะ [14] โดยนำสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวมาใช้ในแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ พบว่า การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ เกิดดีกว่าในงานวิจัยอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้เป็นอัตราการเกิดปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีภาวะอุทกพลศาสตร์ต่างกัน ส่งผลให้เมื่อนำสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวมาใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ที่อาจมีอุทกพลศาสตร์ไม่เหมือนเดิม ทำให้การถ่ายโอนมวล ความร้อนและปัจจัยอื่น ๆ แตกต่างกัน จึงทำการปรับอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยคุณแบบจำลองจลนศาสตร์ด้วยสัมประสิทธิ์ทั้งหมด 5 ค่า ได้แก่ 0.080 0.100 0.125 0.150 และ 0.200 เพื่อหาค่าปฏิกิริยาให้ต่ำลง เพื่อให้ได้ผลที่สอดคล้องกับผลที่รายงานในงานวิจัยที่ใช้ตัวดูดซับของแข็งโซเดียมคาร์บอเนต [14, 15] ซึ่งควรมีค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงร้อยละ 67.0-82.0 โดยพบว่า เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเท่ากับ 0.125 จะให้ค่าการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงที่สอดคล้องกับรายงานวิจัยอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

เพื่อให้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง งานวิจัยนี้จึงปรับค่าจลนศาสตร์ปฏิกิริยาเคมีด้วยการคูณสัมประสิทธิ์ที่มีค่าเท่ากับ 0.125 และนำไปใช้ในการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณต่อไป

ตารางที่ 4.3 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อคุณแบบจำลองจลนศาสตร์ด้วยสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่ภาวะเสมือนคงตัว (20-40 วินาที)

สัมประสิทธิ์ (-)	การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)
0.080	55.16
0.100	63.63
0.125	68.33
0.150	72.32
0.200	77.47
1.000	98.90

4.1.4 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแสดงตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นั่นคือ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ทำการจำลองกระบวนการโดยปรับเปลี่ยนความเร็วของแก๊สเผาไหม้ ในช่วง 1-2 เมตรต่อวินาที อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ในช่วง 159.0 – 477.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที จากแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า กรณีที่ 5 ที่ความเร็วของแก๊สเผาไหม้เท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งเท่ากับ 477 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ค่าร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 79.16 นอกจากนี้ พบว่าเมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งคงที่ การเพิ่มความเร็วของแก๊สเผาไหม้ส่งผลให้ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเนื่องจากการเพิ่มความเร็วของแก๊สเผาไหม้ เปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าเครื่องปฏิกรณ์ แต่ตัวดูดซับของแข็งมีปริมาณเท่าเดิม ทำให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำได้น้อยลง แต่กรณีที่ความเร็วของแก๊สเผาไหม้เท่ากัน การเพิ่มอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งส่งผลให้ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณตัวดูดซับของแข็งที่เข้าเครื่องปฏิกรณ์มีมากขึ้นแต่ปริมาณแก๊สเผาไหม้ที่เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์มีเท่าเดิมทำให้สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3

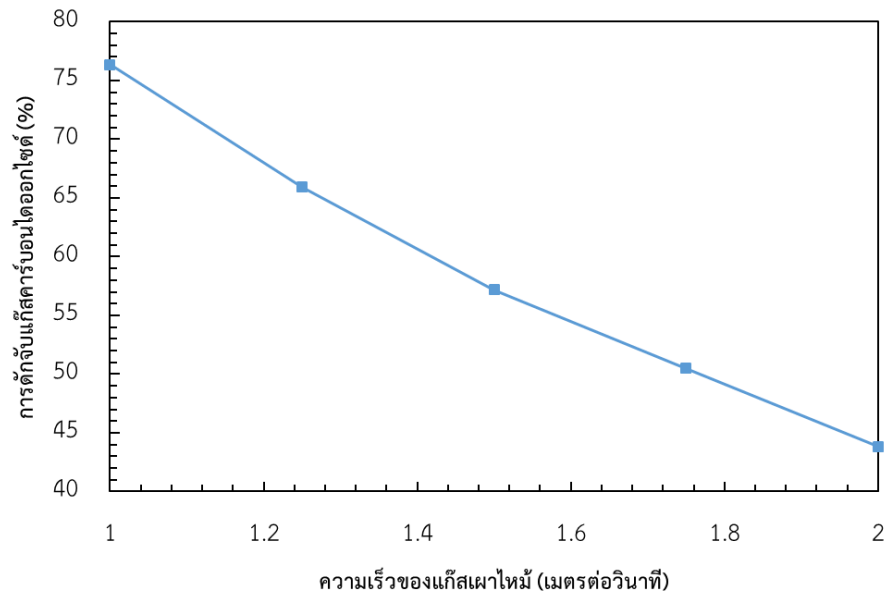
เมื่อพิจารณากรณี ที่ 5 จากรูปที่ 4.4 แสดงคอนทัวร์สัดส่วนโดยมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำตั้งแต่เริ่มเกิดการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จนกระทั่งระบบเสมือนคงตัว พบว่า ในช่วงแรกมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากตลอดทั้งเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นป้อนแก๊สเผาไหม้ และตัวดูดซับของแข็ง จากนั้น เมื่อเวลา 2 วินาที เกิดกระบวนการดักจับ

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าระบบเสมือนคงตัว เกิดในช่วงเวลา 20 ถึง 40 วินาที ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำจะมีมากในบริเวณด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเป็นบริเวณที่ป้อนแก๊สเผาไหม้เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำจะค่อยๆ ลดลงตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของตัวดูดซับของแข็ง และเมื่อพิจารณาที่บริเวณทางออกท่อไรเซอร์ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีที่ 5 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากับร้อยละ 15 โดยโมล เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 วินาที เกิดปฏิกิริยาดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเหลือประมาณร้อยละ 3 โดยโมล และเสมือนคงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เริ่มจากร้อยละ 0 และเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 79.16 ดังแสดงในรูปที่ 4.5

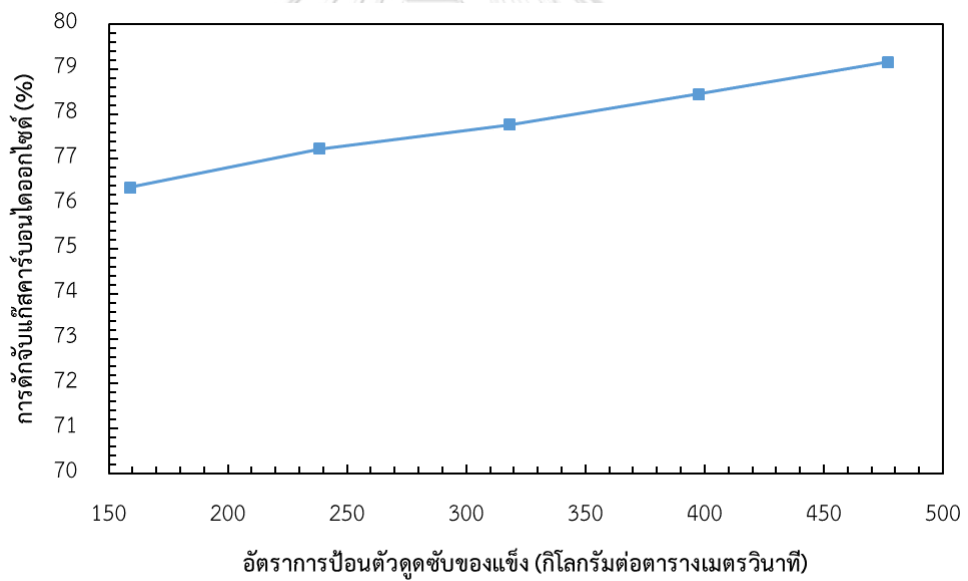


ตารางที่ 4.4 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อตัวแปรดำเนินการเปลี่ยนแปลง พิจารณาที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์

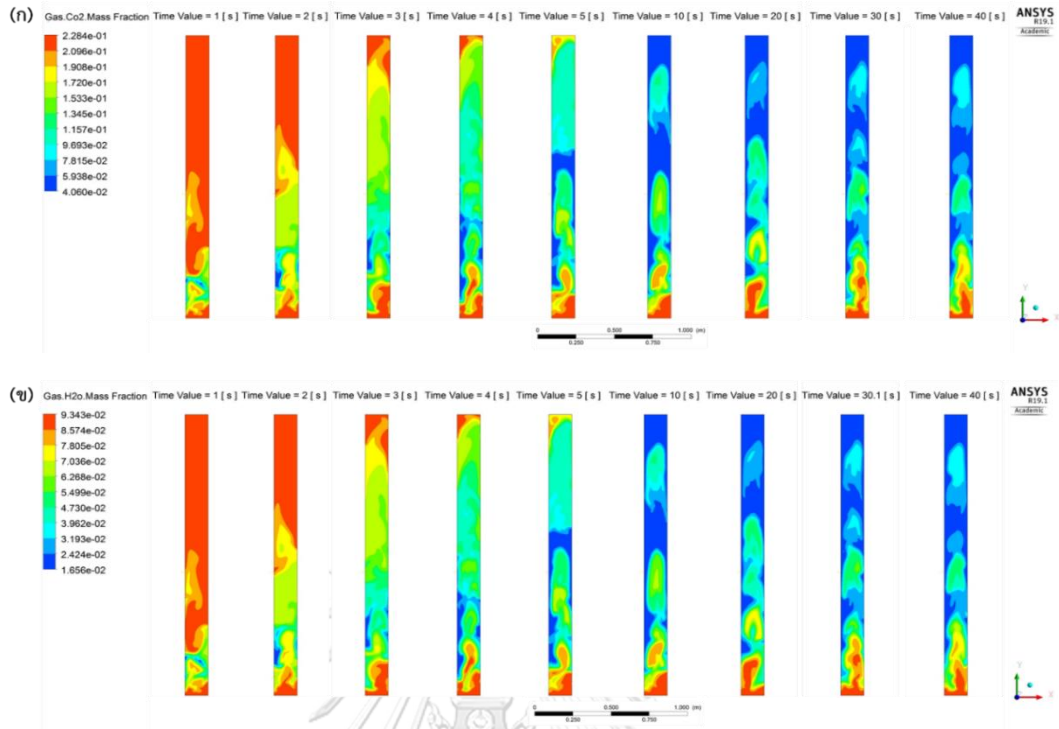
กรณี	ความเร็วแก๊ส (เมตร/วินาที)	อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)	การดักจับแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ (%)
1	1.00	159.0	76.37
2	1.00	238.5	77.23
3	1.00	318.0	77.76
4	1.00	397.5	78.44
5	1.00	477.0	79.16
6	1.25	159.0	65.91
7	1.25	238.5	67.64
8	1.25	318.0	68.78
9	1.25	397.5	70.36
10	1.25	477.0	71.65
11	1.50	159.0	57.20
12	1.50	238.5	59.99
13	1.50	318.0	61.02
14	1.50	397.5	62.71
15	1.50	477.0	63.25
16	1.75	159.0	50.50
17	1.75	238.5	52.43
18	1.75	318.0	54.10
19	1.75	397.5	55.44
20	1.75	477.0	56.44
21	2.00	159.0	43.84
22	2.00	238.5	46.35
23	2.00	318.0	48.65
24	2.00	397.5	49.71
25	2.00	477.0	50.85



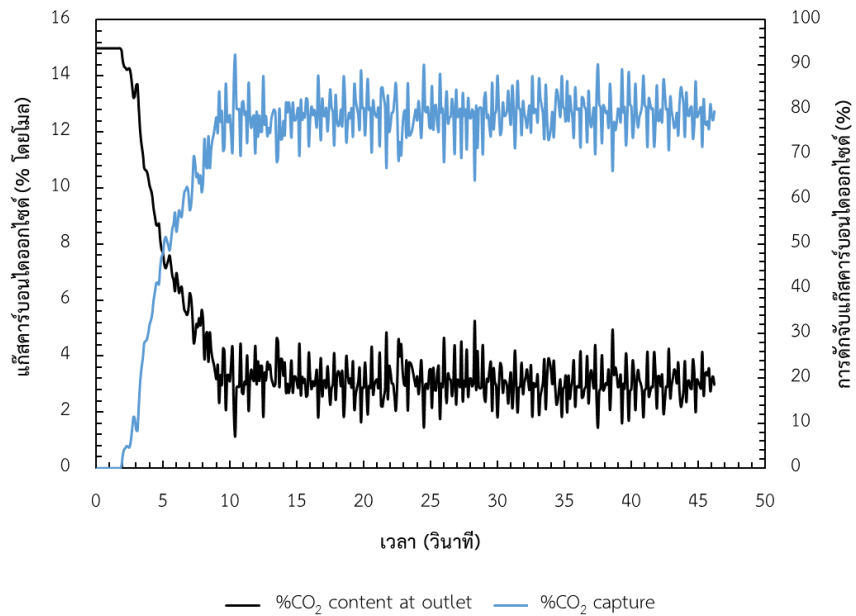
รูปที่ 4.2 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เท่ากับ 159 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที



รูปที่ 4.3 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ เท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.4 ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งคงที่



รูปที่ 4.5 ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พิจารณาที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีศึกษาที่ 5

4.2 ผลการจำลองแบบจำลองพลวัตเชิงเส้นและระบบควบคุม

เพื่อศึกษาการตอบสนองของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงไป จึงปรับเปลี่ยนตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT 19.1 แล้วจึงนำผลการตอบสนองไปทำการทดสอบการตอบสนองแบบขั้นเพื่อหาฟังก์ชันส่งผ่าน และสร้างแบบจำลองระบบควบคุมแบบวงปิด ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB

4.2.1 การทดสอบผลตอบสนองแบบขั้น (Step response test)

จากหัวข้อ 4.1 ได้ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และหาตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นั่นคือ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง แต่เมื่อศึกษาเพิ่มเติมในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน ยังมีตัวแปรดำเนินการอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้แก่ สัดส่วนองค์ประกอบในแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า จึงศึกษาตัวแปรดำเนินการต่างๆ เพิ่มเติม โดยกำหนดให้ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ อยู่ในช่วง 1-2 เมตรต่อวินาที [13] สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า อยู่ในช่วงร้อยละ 10-20 โดยโมล [43] สัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า อยู่ในช่วงร้อยละ 10-20 โดยโมล [5, 15, 44] อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า อยู่ในช่วง 40-80 องศาเซลเซียส [5, 13] และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง อยู่ในช่วง 159.0-477.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ทำการศึกษาผลการตอบสนองเมื่อตัวแปรดำเนินการแต่ละตัวเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในตารางที่ 4.5-4.9 ด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT 19.1 โดยกำหนดให้กรณีพื้นฐานเป็น ดังนี้

ความเร็วของแก๊สเผาไหม้	1.5 เมตรต่อวินาที
สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า	ร้อยละ 15 โดยโมล
สัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า	ร้อยละ 15 โดยโมล
อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า	333.15 เคลวิน
อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง	318 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการพบว่า เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเพิ่มขึ้นทำให้ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง การเพิ่มความเร็วเปรียบเสมือนการเพิ่มแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น แต่ตัวดูดซับของแข็งที่เข้ามามีปริมาณเท่าเดิม ทำให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง ในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยตัวดูดซับของแข็งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งกระบวนการจะสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่อุณหภูมิไม่สูง ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงทำให้สมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งทำให้ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณตัวดูดซับของแข็งเข้าเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น ทำให้สมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น (ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ลดลง) ดังแสดงในรูปที่ 4.6-4.10

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขของกรณีที่ 1-4 เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง

ตัวแปรดำเนินการ	ลำดับการทดลอง			
	1	2	3	4
ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ (เมตรต่อวินาที)	1.00	1.25	1.75	2.00
อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)	318.00	318.00	318.00	318.00
ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า โดยโมล (-)	15.00	15.00	15.00	15.00
ร้อยละไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าโดยโมล (-)	15.00	15.00	15.00	15.00
อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ (เคลวิน)	333.15	333.15	333.15	333.15
การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	77.76	68.78	54.10	48.65

ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขของกรณีที่ 5-8 เมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งเปลี่ยนแปลง

ตัวแปรดำเนินการ	ลำดับการทดลอง			
	5	6	7	8
ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ (เมตรต่อวินาที)	1.50	1.50	1.50	1.50
อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)	159.00	238.50	397.50	477.00
ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ ป้อนเข้าโดยโมล (-)	15.00	15.00	15.00	15.00
ร้อยละไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าโดยโมล (-)	15.00	15.00	15.00	15.00
อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ (เคลวิน)	333.15	333.15	333.15	333.15
การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	57.20	59.99	62.71	63.25

ตารางที่ 4.7 เงื่อนไขของกรณีที่ 9-12 เมื่อสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง

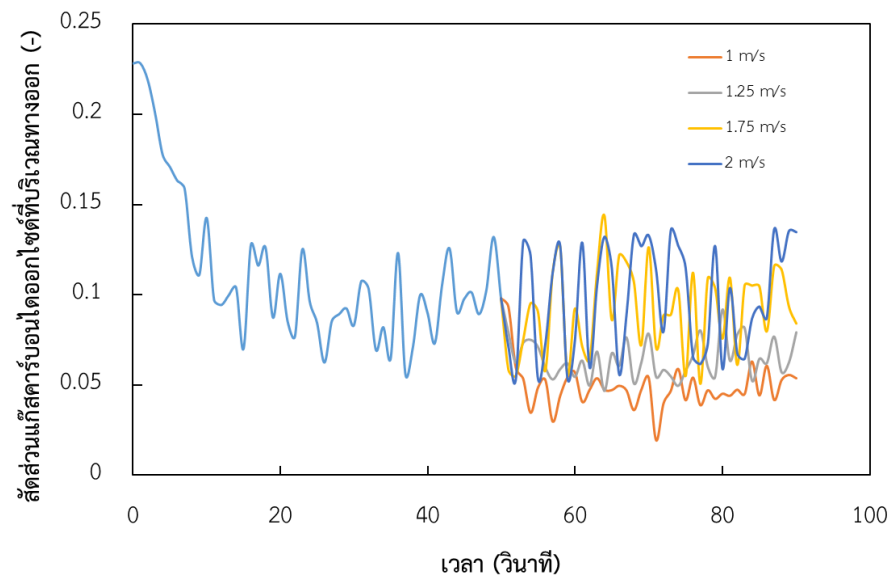
ตัวแปรดำเนินการ	ลำดับการทดลอง			
	9	10	11	12
ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ (เมตรต่อวินาที)	1.50	1.50	1.50	1.50
อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)	318.00	318.00	318.00	318.00
ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ ป้อนเข้าโดยโมล (-)	10.00	12.50	17.50	20.00
ร้อยละไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าโดยโมล (-)	15.00	15.00	15.00	15.00
อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ (เคลวิน)	333.15	333.15	333.15	333.15
การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	76.08	69.65	56.72	49.69

ตารางที่ 4.8 เงื่อนไขของกรณีที่ 13-16 เมื่อสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง

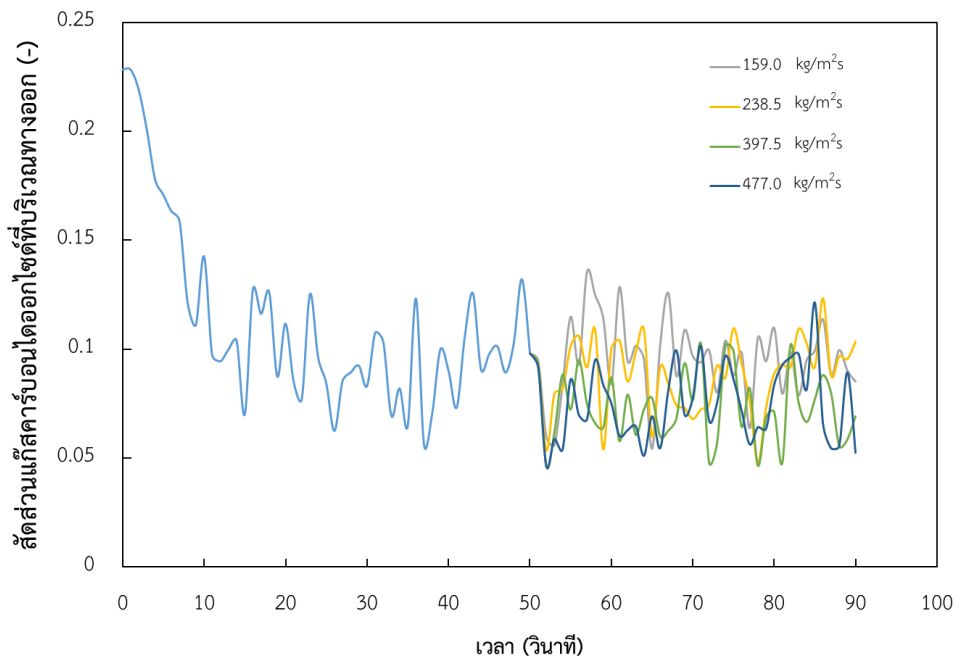
ตัวแปรดำเนินการ	ลำดับการทดลอง			
	13	14	15	16
ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ (เมตรต่อวินาที)	1.50	1.50	1.50	1.50
อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)	318.00	318.00	318.00	318.00
ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ ป้อนเข้าโดยโมล (-)	15.00	15.00	15.00	15.00
ร้อยละไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าโดยโมล (-)	10.00	12.50	17.50	20.00
อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ (เคลวิน)	333.15	333.15	333.15	333.15
การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	45.61	57.01	71.50	77.60

ตารางที่ 4.9 เงื่อนไขของกรณีที่ 17-20 เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เปลี่ยนแปลง

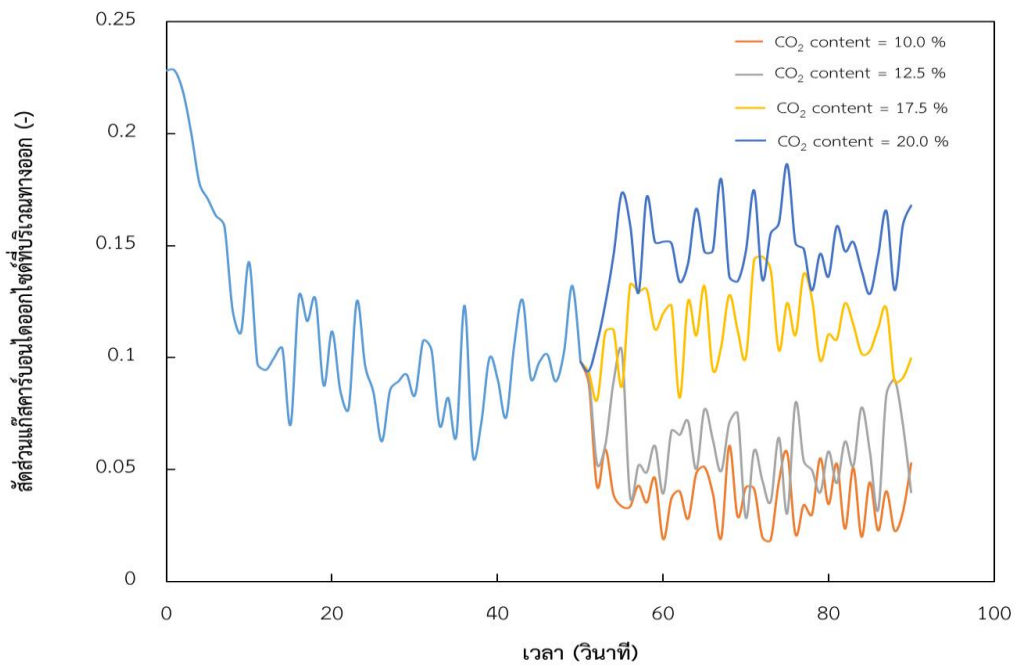
ตัวแปรดำเนินการ	ลำดับการทดลอง			
	17	18	19	20
ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ (เมตรต่อวินาที)	1.50	1.50	1.50	1.50
อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)	318.00	318.00	318.00	318.00
ร้อยละแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ ป้อนเข้าโดยโมล (-)	15.00	15.00	15.00	15.00
ร้อยละไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าโดยโมล (-)	15.00	15.00	15.00	15.00
อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ (เคลวิน)	313.15	323.15	343.15	353.15
การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (%)	92.04	75.81	21.53	0.00



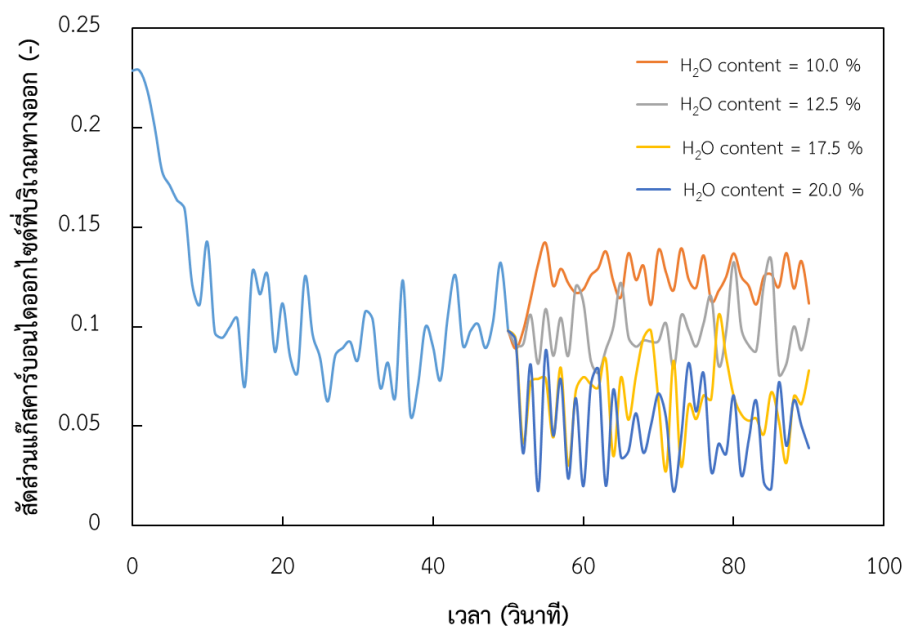
รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณี 1-4 เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง



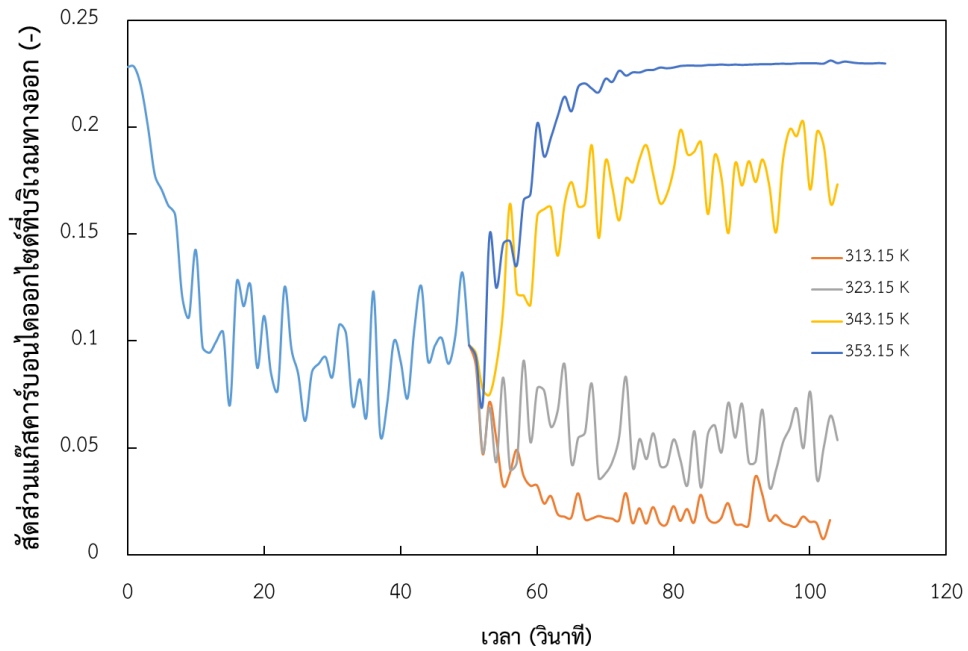
รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณี 5-8 เมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีที่ 9-12 เมื่อสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณีที่ 13-16 เมื่อสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองพิจารณาคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ที่
ช่วงเวลาต่าง ๆ ของกรณี 17-20 เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง
4.2.2 ฟังก์ชันส่งผ่าน (Transfer function)

ผลการตอบสนองจากหัวข้อ 4.2.1 ด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT 19.1 สามารถนำมาแปลงเป็นฟังก์ชันส่งผ่านระหว่างตัวแปรควบคุมคือ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกกับตัวแปรดำเนินการแต่ละตัวนั่นคือ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง (G_p) ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (G_{d1}) สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (G_{d2}) สัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (G_{d3}) และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า (G_{d4}) โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบของการบ่งบอกลักษณะของระบบ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB ได้ตั้งแสดงในสมการ 4.1-4.5

$$G_p = \frac{0.715e^{-0.292s}}{1.481s+1} \quad (4.1)$$

$$G_{d1} = \frac{0.050e^{-0.362s}}{4.105s+1} \quad (4.2)$$

$$G_{d2} = \frac{0.361e^{-0.354s}}{1.769s+1} \quad (4.3)$$

$$G_{d3} = \frac{1.089e^{-0.225s}}{0.931s+1} \quad (4.4)$$

$$G_{d4} = \frac{0.000347e^{-1.987s}}{6.776s+1} \quad (4.5)$$

จากสมการข้างต้นพบว่า การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วของแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเป็นไปได้ช้า สืบเนื่องจากพจน์ของเวลาของการตอบสนองของ

สมการที่ 4.2 และ 4.5 ที่มีค่ามากกว่าฟังก์ชันส่งผ่านของตัวแปรดำเนินการอื่น นอกจากนี้การตอบสนองของอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าอาจช้ากว่าตัวแปรอื่น เนื่องจากพจน์หน่วงเวลามีค่ามาก ดังแสดงในสมการที่ 4.5

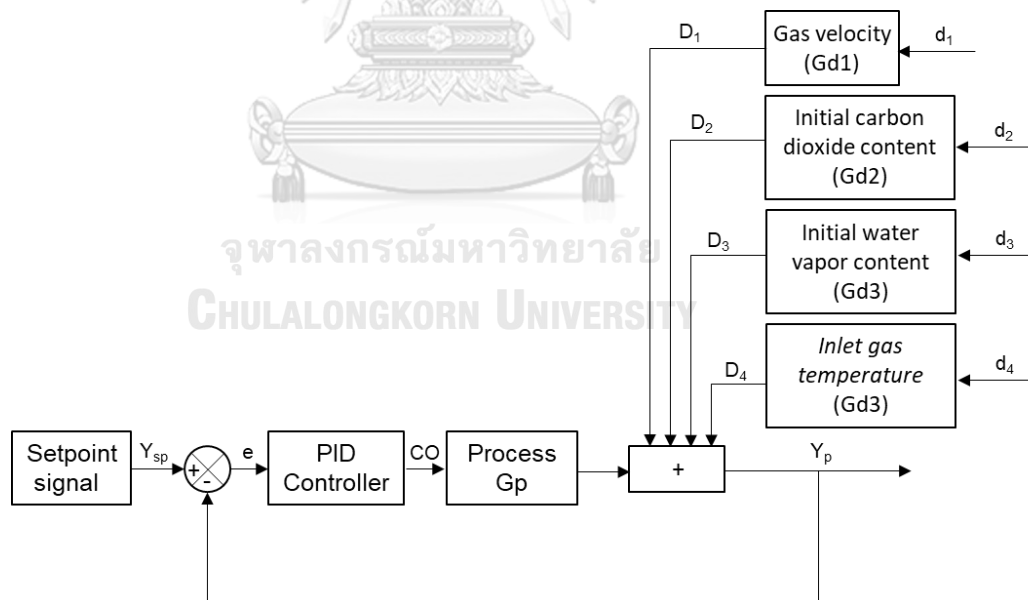
4.2.3 ระบบควบคุมวงปิด (Closed-loop control system)

เพื่อศึกษาระบบควบคุมกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถสร้างแบบจำลองกระบวนการอย่างง่าย ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB ซึ่งในกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง กำหนดให้ตัวแปรปรับค่าได้คือ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เนื่องจากตัวแปรดังกล่าว สามารถควบคุมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายด้วยการปรับวาล์วที่ป้อนตัวดูดซับของแข็งเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ ตัวแปรกระบวนการคือ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนของค์ประกอบ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า เนื่องจากในกระบวนการผลิตแก๊สเผาไหม้ได้จากการผลิตไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการต้นน้ำ ดังนั้นแก๊สเผาไหม้ที่ถูกส่งมายังกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงยากต่อการควบคุม และสุดท้ายกำหนดให้ตัวแปรควบคุมคือร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อกำหนดตัวแปรในระบบควบคุมได้แล้ว จึงนำฟังก์ชันส่งผ่านของแต่ละตัวแปรดำเนินการที่ได้จากหัวข้อ 4.2.2 มาสร้างระบบควบคุมแบบวงปิด โดยใช้ซอฟต์แวร์ Simulink ของโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB ในการสร้างระบบควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

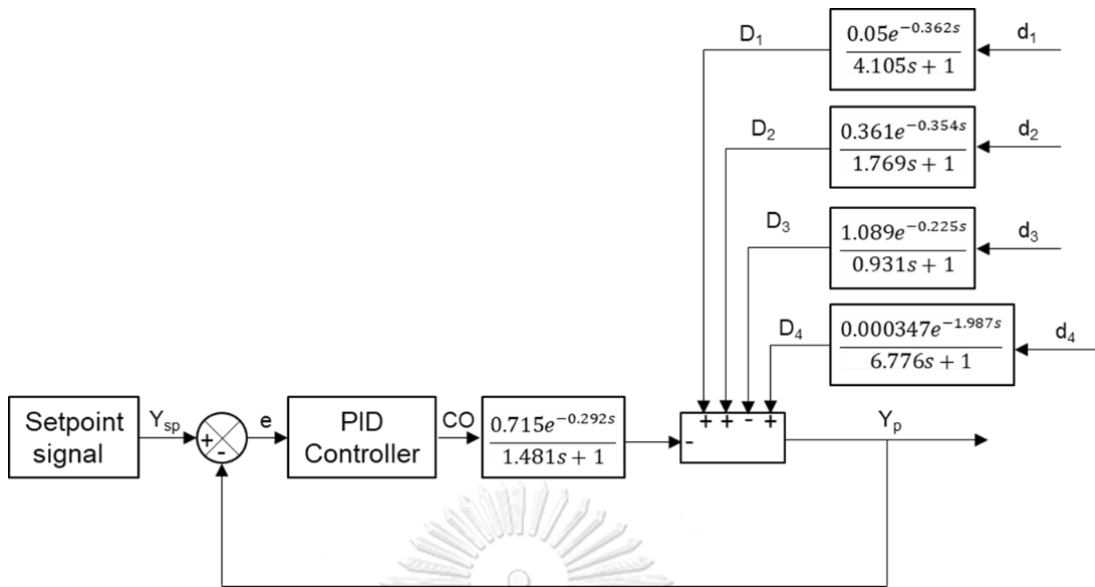
เมื่อได้แบบจำลองระบบควบคุมแบบวงปิดดังรูปที่ 4.12 ทำการหาตัวแปรของระบบควบคุมพีไอดี โดยใช้ฟังก์ชันการจูนอัตโนมัติ (auto tuning) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB ซึ่งทำให้ได้ค่า K_p K_i และ K_d คือ -0.226 - 0.218 และ -0.019 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าค่าอัตราการขยายส่วนที่ได้เป็นค่าลบ เนื่องจากระบบควบคุมนี้มีรูปแบบการดำเนินการโดยตรง (direct action mode)

จากนั้นทำการศึกษาสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเปลี่ยนตัวแปรกระบวนการ ได้แก่ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า ซึ่งช่วงเวลาก่อน 100 วินาทีระบบยังไม่มีเปลี่ยนแปลง จะเห็นได้ว่าตัวแปรกระบวนการทุกตัวแปรยังคงอยู่ที่ค่าเริ่มต้น นั่นคือ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 1.5 เมตรต่อวินาที สัดส่วนโดยมวลแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 0.228 (ร้อยละ 15 โดยโมล) สัดส่วนไอน้ำโดยมวลในแก๊สเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 0.0934 (ร้อยละ

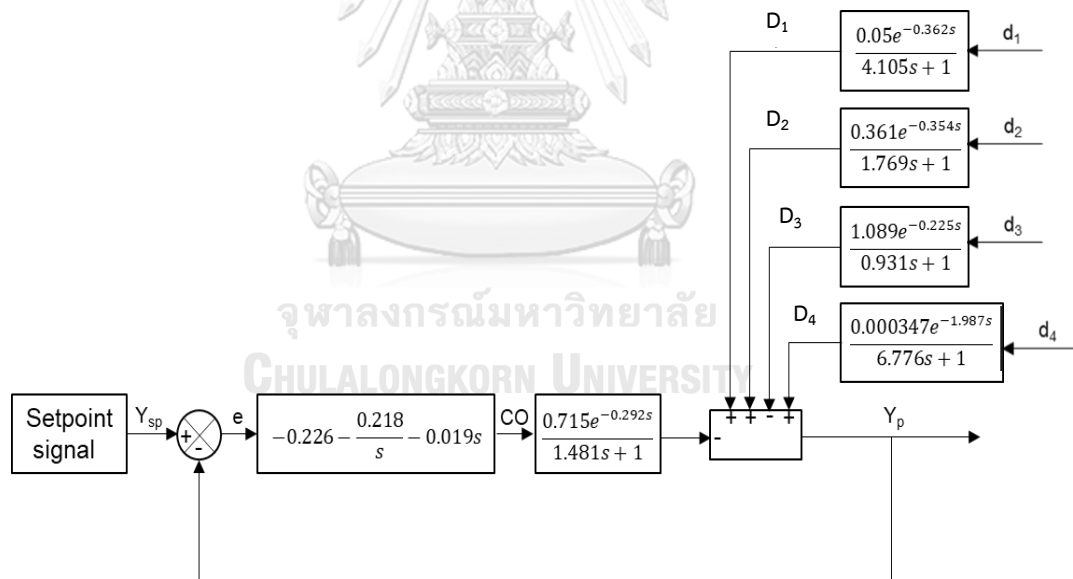
15 โดยโมล) และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 333.15 เคลวิน (60 องศาเซลเซียส) จากนั้นที่เวลา 100 วินาที ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ลดลง 0.5 เมตรต่อวินาที ที่เวลา 200 วินาที สัดส่วนโดยมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเพิ่มขึ้น 0.05 ที่เวลา 300 วินาที สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเพิ่มขึ้น 0.01 และที่เวลา 400 วินาที อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าลดลง 20 เคลวิน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 พบว่าระบบควบคุมพีไอดีสามารถควบคุมให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออก มีค่าตามที่ตั้งไว้ นั่นคือประมาณร้อยละ 4 โดยโมล โดยการปรับอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งดังแสดงในรูป 4.15 จะเห็นได้ว่าเมื่อลดความเร็วของแก๊สเผาไหม้ ส่งผลให้อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งลดลง แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแก๊สเผาไหม้ ส่งผลให้อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งเพิ่มขึ้นและ เมื่อเพิ่มสัดส่วนของไอน้ำของแก๊สเผาไหม้ ส่งผลให้อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งลดลงเพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออก มีค่าตามที่กำหนดไว้ และเมื่อลดอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ส่งผลให้อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งลดลงเพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกมีค่าตามที่กำหนด รูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อตัวแปรกระบวนการแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงไป โดยการปรับอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง



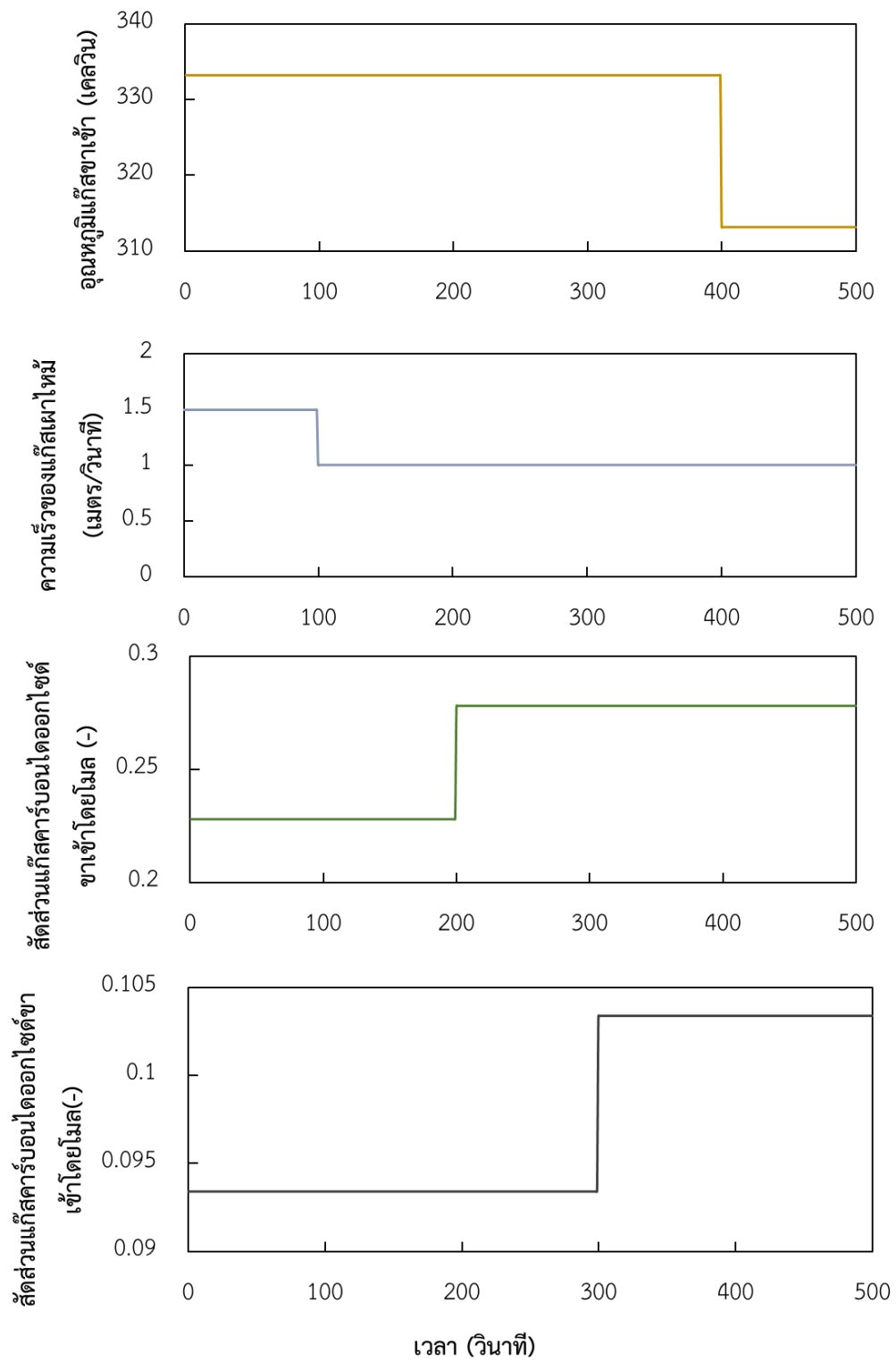
รูปที่ 4.11 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมแบบวงปิดของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง



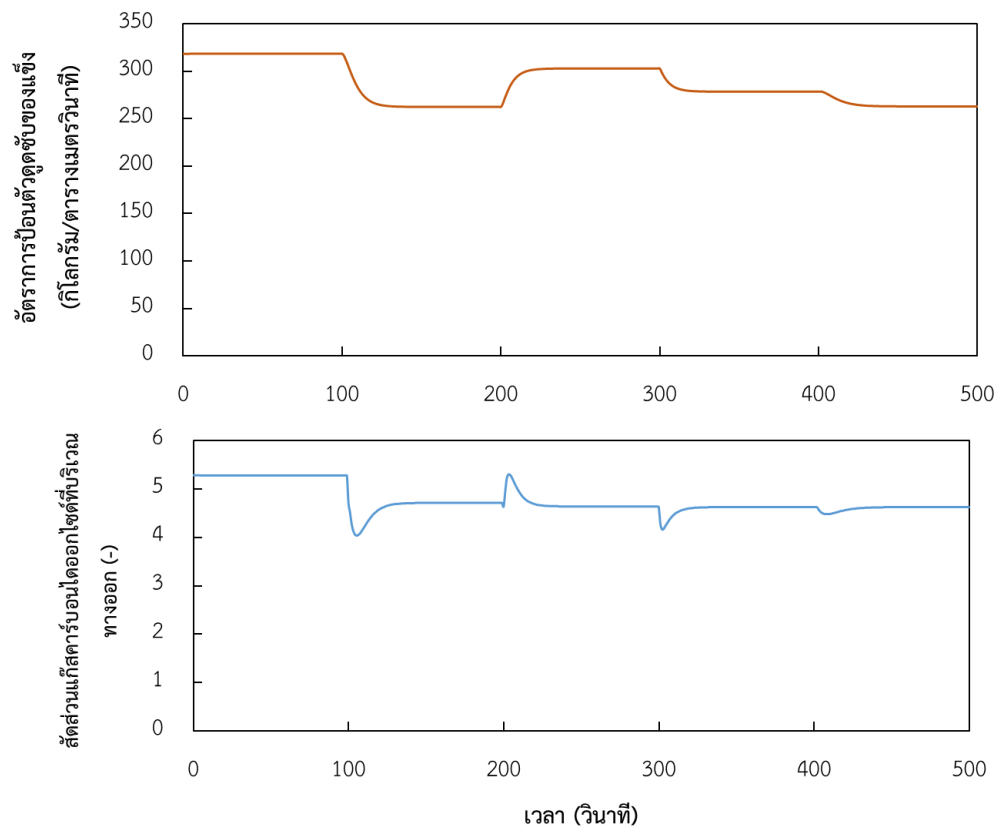
รูปที่ 4.12 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมแบบวงปิด และฟังก์ชันส่งผ่านของกระบวนการดักจับ
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง



รูปที่ 4.13 แผนภาพแบบจำลองระบบควบคุมแบบวงปิด แสดงฟังก์ชันส่งผ่านของกระบวนการดักจับ
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง และระบบควบคุมพีไอดี



รูปที่ 4.14 ค่าตัวแปรรบกวนแต่ละชนิดที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



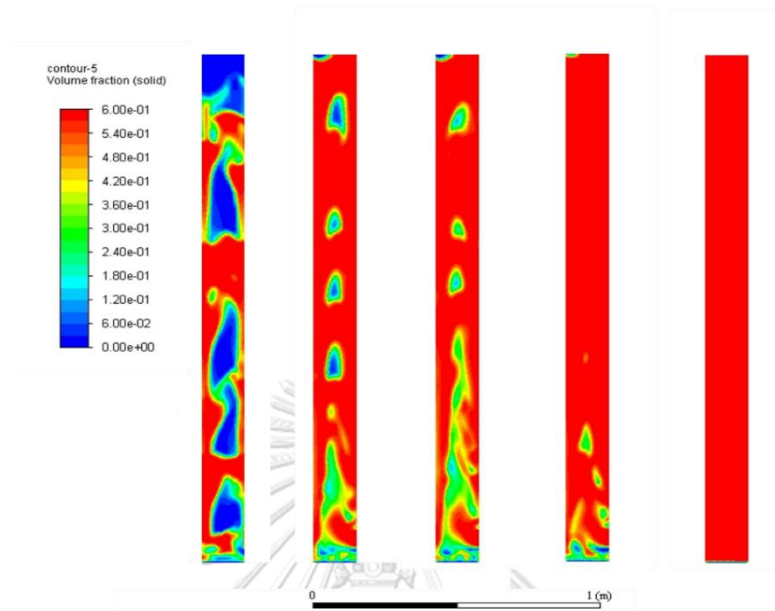
รูปที่ 4.15 อัตราการใช้พลังงาน และสัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงเวลาต่าง ๆ

4.3 ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหลังการติดตั้งระบบควบคุม

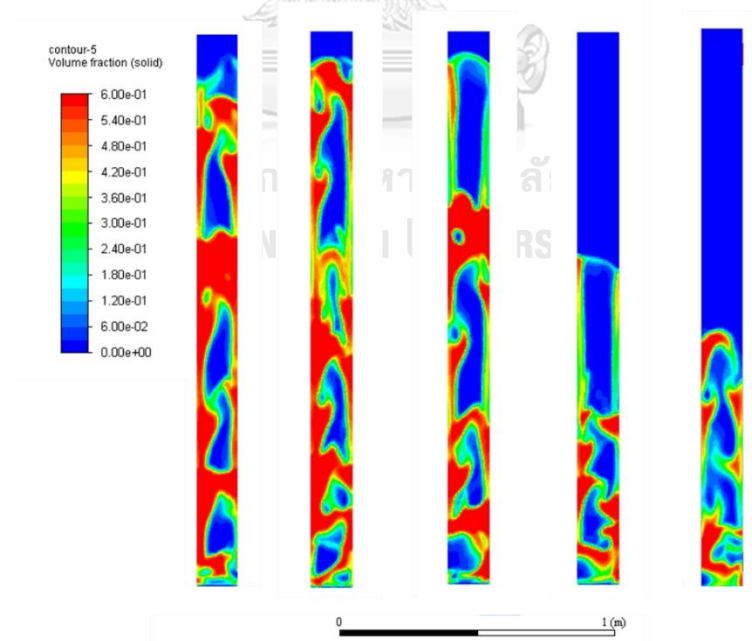
ค่า K_p K_i และ K_d จากการจูนแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB คือ -0.226 -0.218 และ -0.019 ตามลำดับ ทำการเขียนภาษาคอมพิวเตอร์ด้วยระบบไฟล์ประยุกต์ใช้ระบบไฟล์โลคัล (UDF) ดังแสดงในภาคผนวก ก เพื่อใช้เป็นคำสั่งในการปรับเปลี่ยนอัตราป้อนตัวดูดซับเพื่อดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT โดยแบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงแรก จะทำการเขียนคำสั่งในการปรับเปลี่ยนตัวแปรรอบวน ได้แก่ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ โดยนำเสนอผลแยกกันเพื่อดูสมรรถนะในการควบคุมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อแยกปรับตัวแปรรอบวนแต่ละชนิด โดยเริ่มจากการปรับเปลี่ยนให้อุณหภูมิในระบบจาก 333.15 เคลวิน เป็น 328.15 เคลวิน และเริ่มใช้ระบบควบคุมตั้งแต่วันที่ 50 เป็นต้นไป โดยในช่วง 50 ถึง 75 วินาที ระบบมีการปรับอัตราการป้อนตัวดูดซับ เพื่อให้สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 67 และจากนั้นที่เวลา 75 วินาที และที่ 110 วินาที ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรรอบวนแต่ละชนิด จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า การควบคุมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแบบจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ที่สร้างขึ้นมีข้อจำกัด คือไม่สามารถป้อนตัวดูดซับของแข็งเกิน 1200 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาทีได้ เพราะจะทำให้มีปริมาณตัวดูดซับของแข็งในระบบมีมากเกินไปจนระบบไม่สามารถดำเนินการได้จริง และไม่สามารถป้อนตัวดูดซับของแข็งน้อยกว่า 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที เพราะจะทำให้ปริมาณตัวดูดซับของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์มีน้อยเกินไป จนมีตัวดูดซับไม่พอที่จะรักษาระดับการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ตามเป้าหมายได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดข้อจำกัดดังกล่าวไว้เป็นเงื่อนไขของการควบคุม นอกจากนี้พบว่าจากข้อจำกัดที่กล่าวมาทำให้ระบบไม่สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เต็มประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามลำดับ จึงจำเป็นต้องจำกัดช่วงของตัวแปรรอบวนที่เข้ามาในระบบ โดยกำหนดให้ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้อยู่ในช่วง 1.25 ถึง 1.5 เมตรต่อวินาที สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้อยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.23 โดยมวล สัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ ในช่วง 0.09 ถึง 0.11 โดยมวล และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ในช่วง 326.15 ถึง 329.15 เคลวิน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ถึง 4.23 จากรูปที่ 4.18 ในวินาทีที่ 50 ถึง 75 วินาที อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงจาก 333.15 เคลวิน เป็น 328.15 เคลวิน ทำให้อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งที่เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณเพิ่มขึ้น เพื่อให้สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 67 ซึ่งการตอบสนองเมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้เพิ่มขึ้น ระบบควบคุมจะทำการปรับให้อัตราการป้อนตัวดูดซับเพิ่มขึ้นเพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ที่บริเวณขาออกมีค่าตามที่กำหนด และเมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ลดลง อัตราการป้อนตัวดูดซับจะลดลงเนื่องจากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามาในระบบมีต่ำลง ดังนั้นการลดอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งจะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกมีค่าตามที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 จากนั้นในรูปที่ 4.20 และ 4.21 สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้เพิ่มขึ้น ระบบควบคุมจะทำการปรับให้อัตราการป้อนตัวดูดซับเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับระบบเพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณขาออกมีค่าตามที่กำหนด และเมื่อสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ลดลง อัตราการป้อนตัวดูดซับจะลดลงเนื่องจากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์มีน้อยลง ทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกมีค่าตามที่กำหนด ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการปรับแก๊สเผาไหม้ และเมื่อพิจารณาสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ การเพิ่มสัดส่วนไอน้ำส่งผลให้ระบบควบคุมจะทำการลดอัตราการป้อนตัวดูดซับ เพื่อลดสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณไอน้ำในช่วงที่ศึกษา เป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [8, 10] สังเกตจากสมการ 3.28 จึงทำให้สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้น แต่เมื่อสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ลดลง อัตราการป้อนตัวดูดซับจะลดลงเพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกมีค่าตามที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 และเมื่ออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้เพิ่มขึ้น พบว่าความสามารถในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำได้ต่ำลง เนื่องจากการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จะสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีที่ภาวะอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นระบบควบคุมจึงทำการปรับอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น เพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกมีค่าตามที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 และเมื่อสั่งให้มีการปรับเปลี่ยนตัวแปรครบถ้วนทั้ง 4 ตัวแปรด้วยไฟล์คำสั่ง UDF พร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ถึง 4.29 พบว่าระบบควบคุมมีสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี สามารถควบคุมให้ระบบดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 67 ดังที่กำหนด (ดังแสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน) โดยจะเห็นได้ว่า สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกอยู่ในช่วงที่ระบบสามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 67 ดังแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับการแยกปรับตัวแปรครบถ้วนแยกไฟล์ดังอธิบายข้างต้น ด้วยเหตุนี้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการที่ติดตั้งระบบควบคุม และกระบวนการที่ไม่ติดตั้งระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31 จะเห็นได้ว่าระบบที่มีการติดตั้งระบบควบคุม (เส้นสีเหลือง ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31) มีสมรรถนะในการควบคุมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้สามารถดักจับ

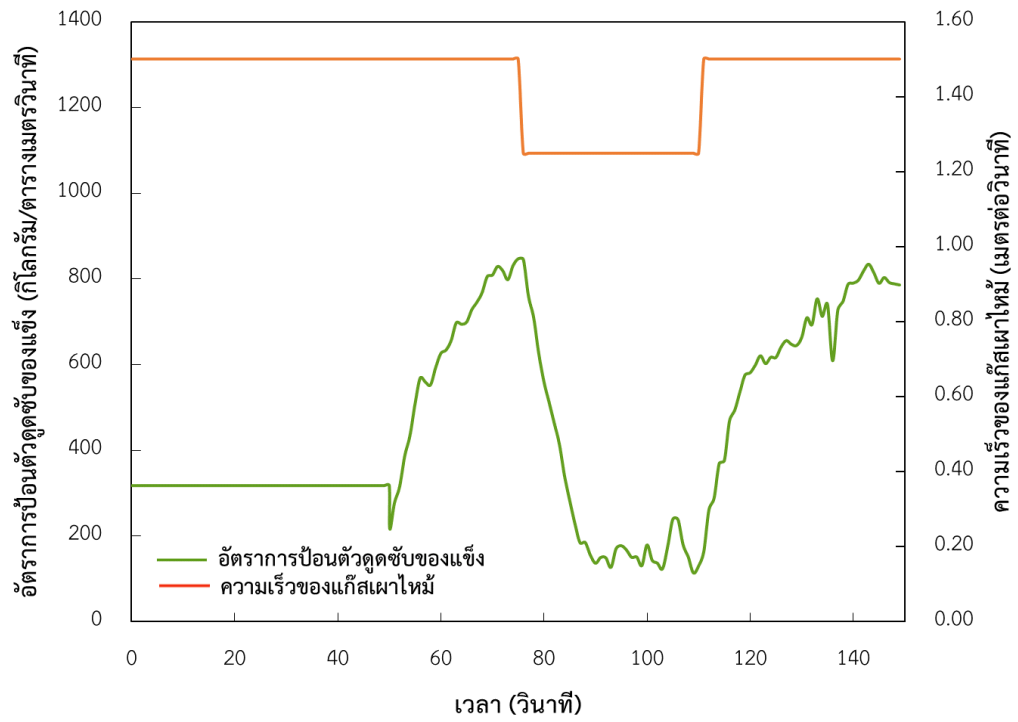
ได้ร้อยละ 67 (เส้นสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31) ได้มากกว่าในกระบวนการที่ไม่มีการติดตั้งระบบควบคุม (เส้นสีแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.30 และ 4.31) เมื่อมีตัวแปรมารบกวน



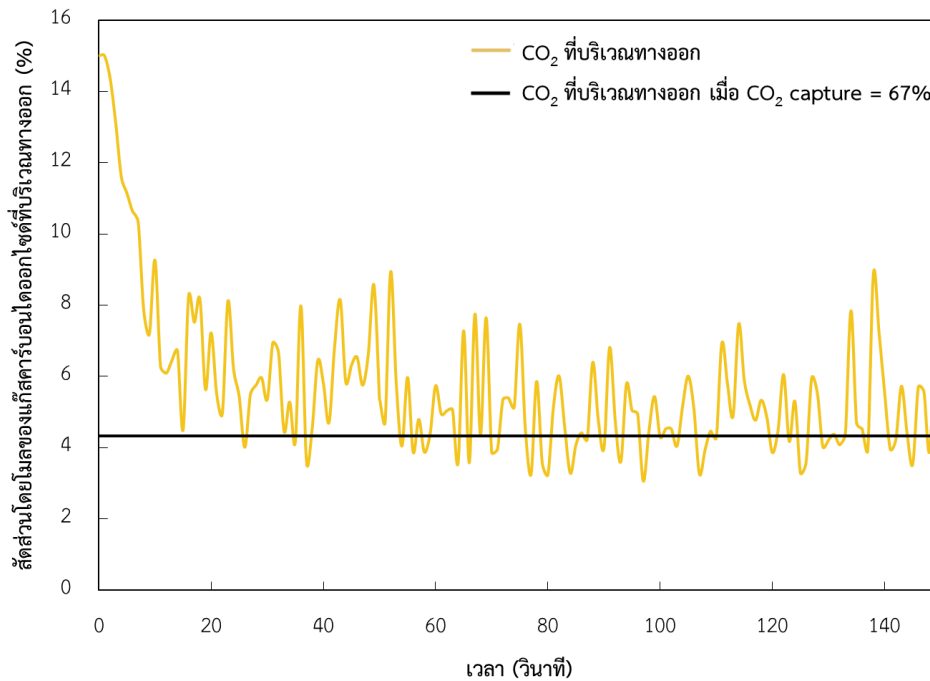
รูปที่ 4.16 สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับมากกว่า 1200 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที



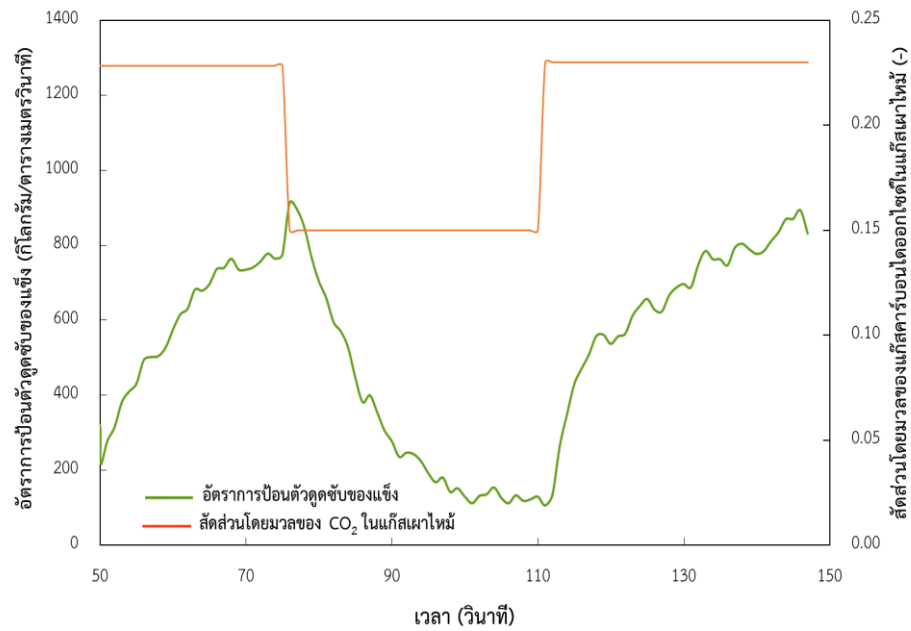
รูปที่ 4.17 สัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเมื่ออัตราการป้อนตัวดูดซับต่ำกว่า 100 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที



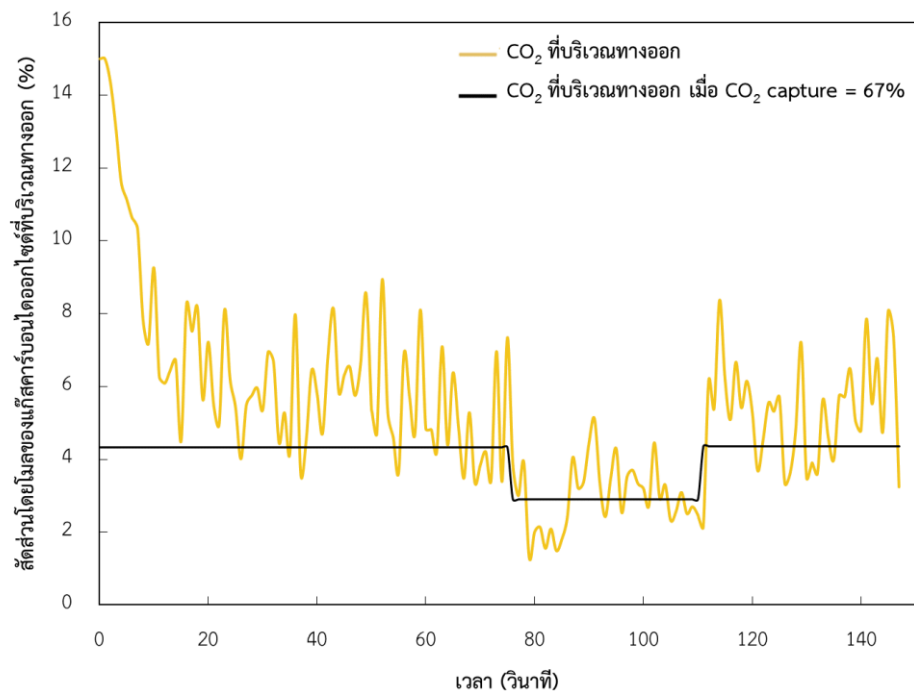
รูปที่ 4.18 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



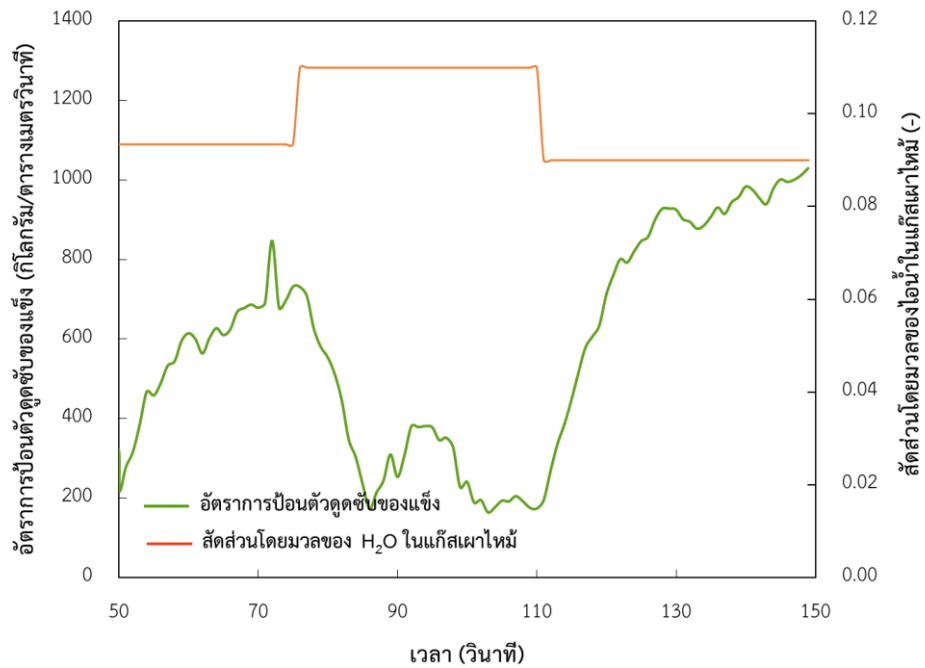
รูปที่ 4.19 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ ของแข็ง เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



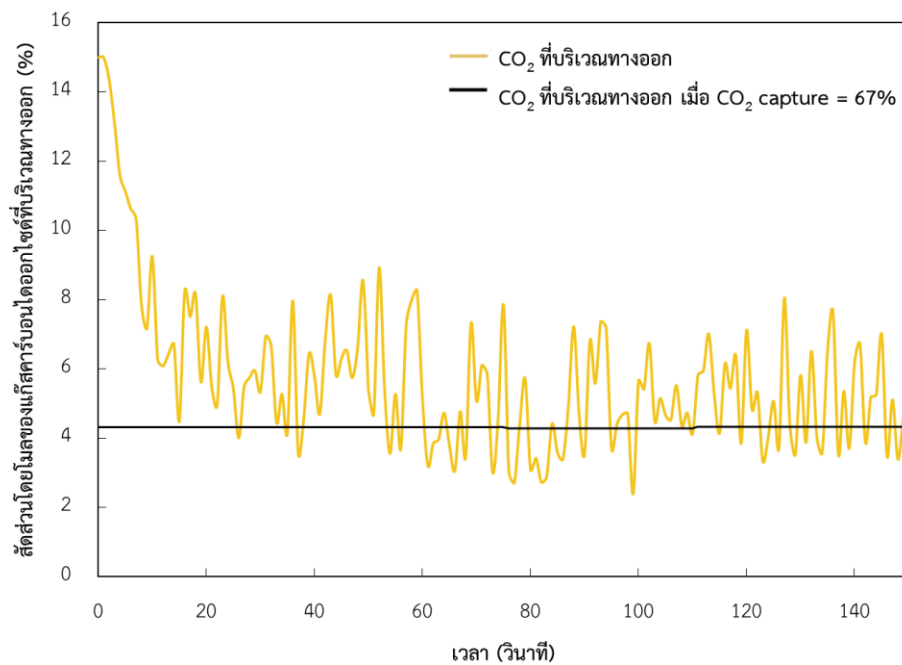
รูปที่ 4.20 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่อสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



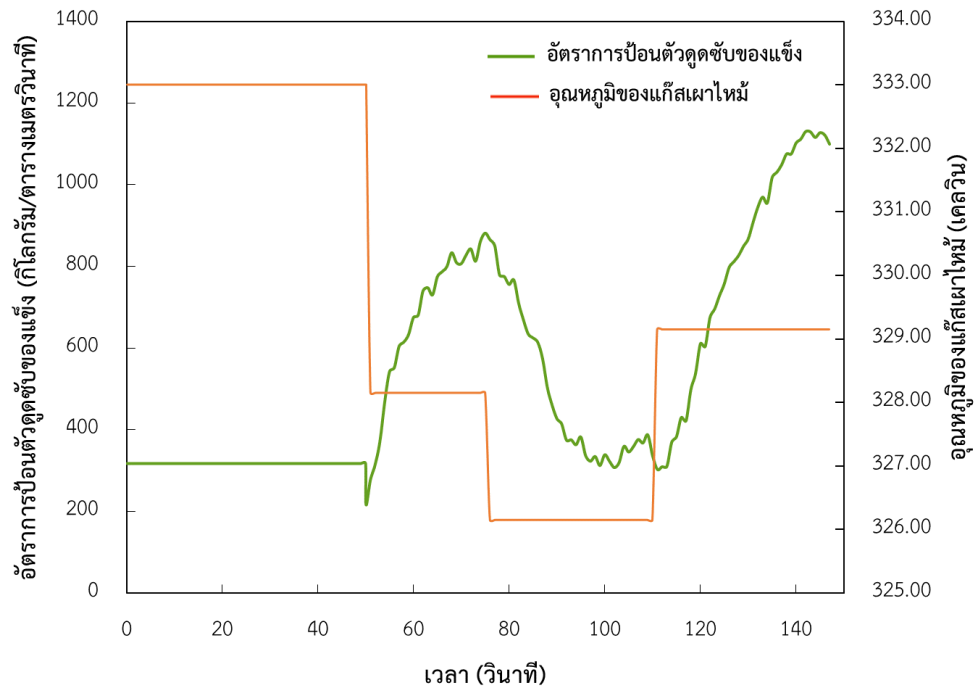
รูปที่ 4.21 สัดส่วนโดยมวลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อสัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



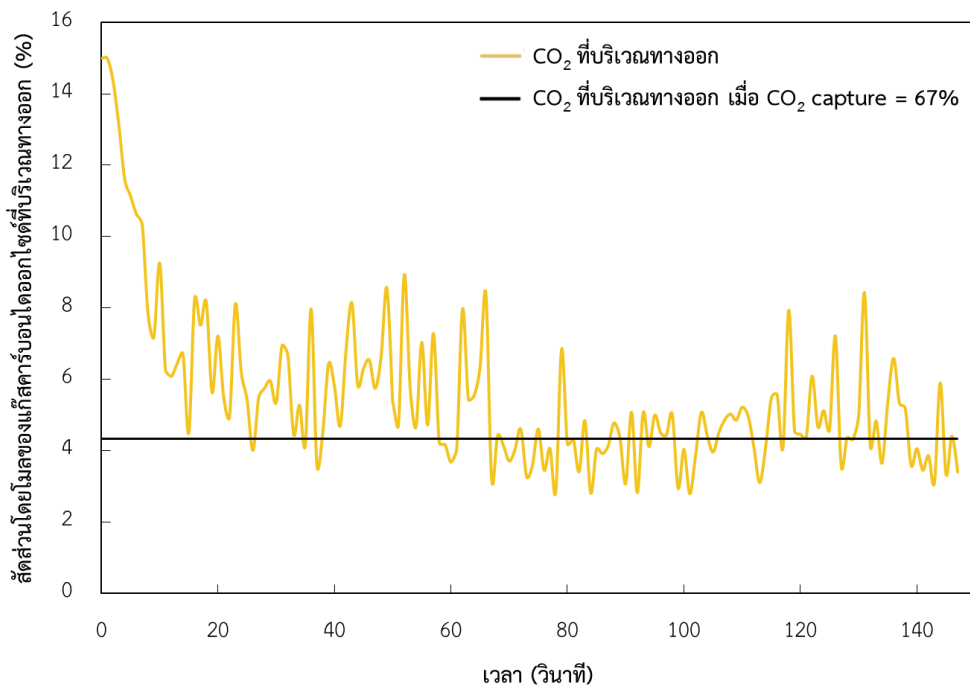
รูปที่ 4.22 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่อสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาต่าง ๆ



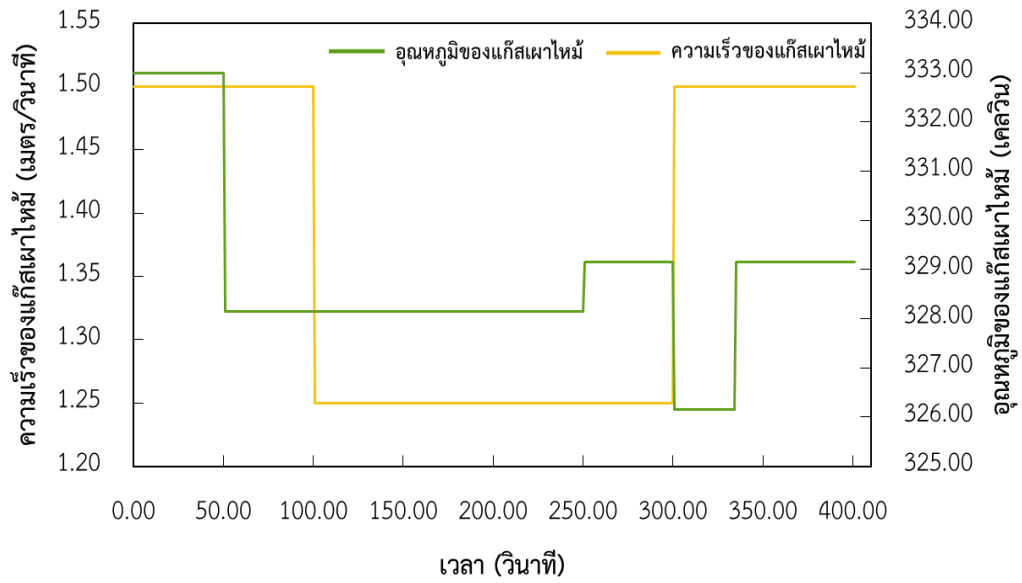
รูปที่ 4.23 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อสัดส่วนของไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาต่าง ๆ



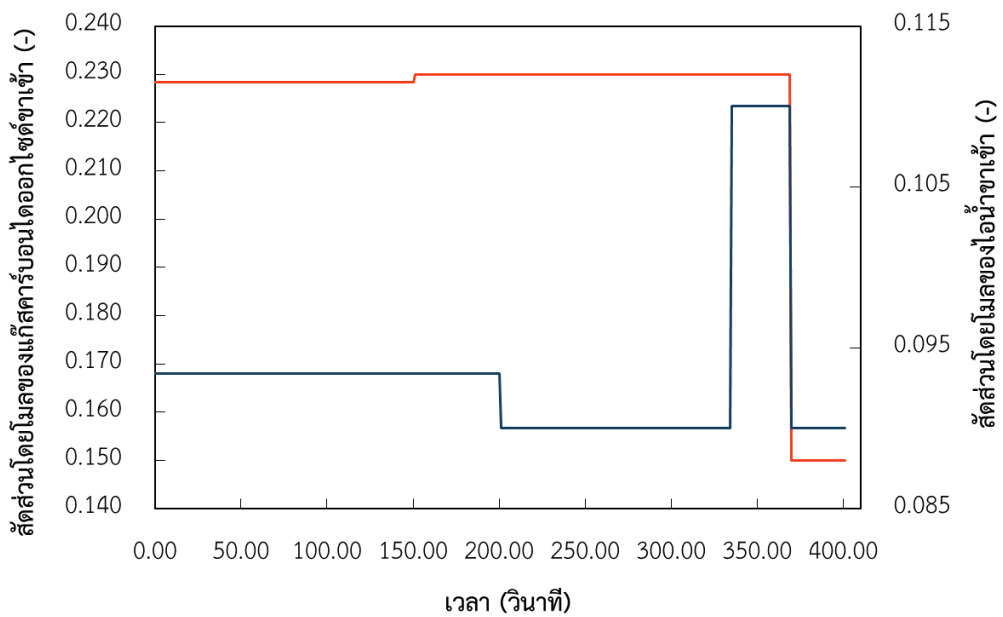
รูปที่ 4.24 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่ออุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



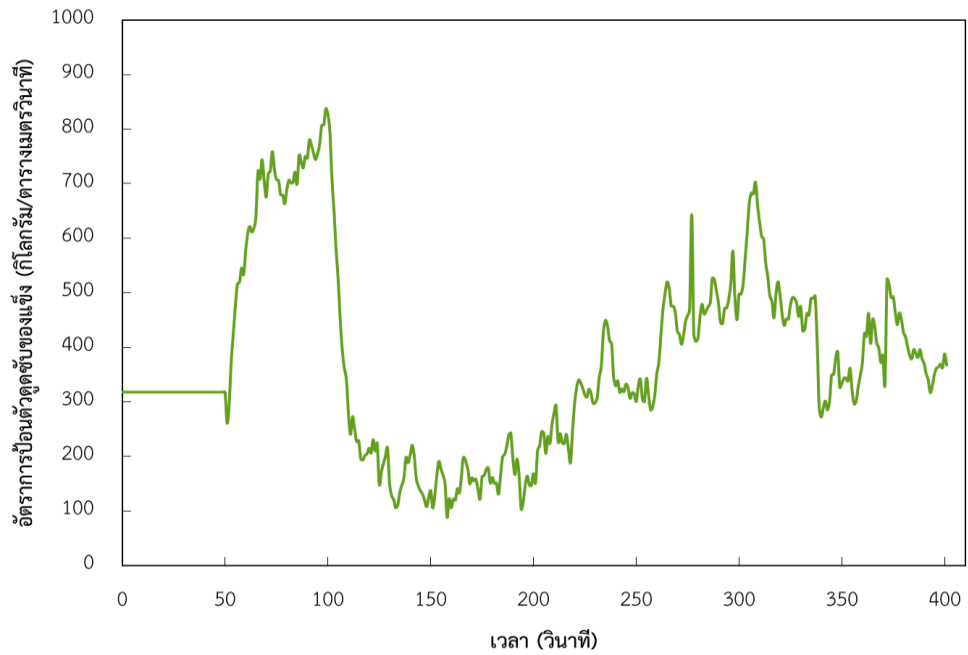
รูปที่ 4.25 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่ออุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



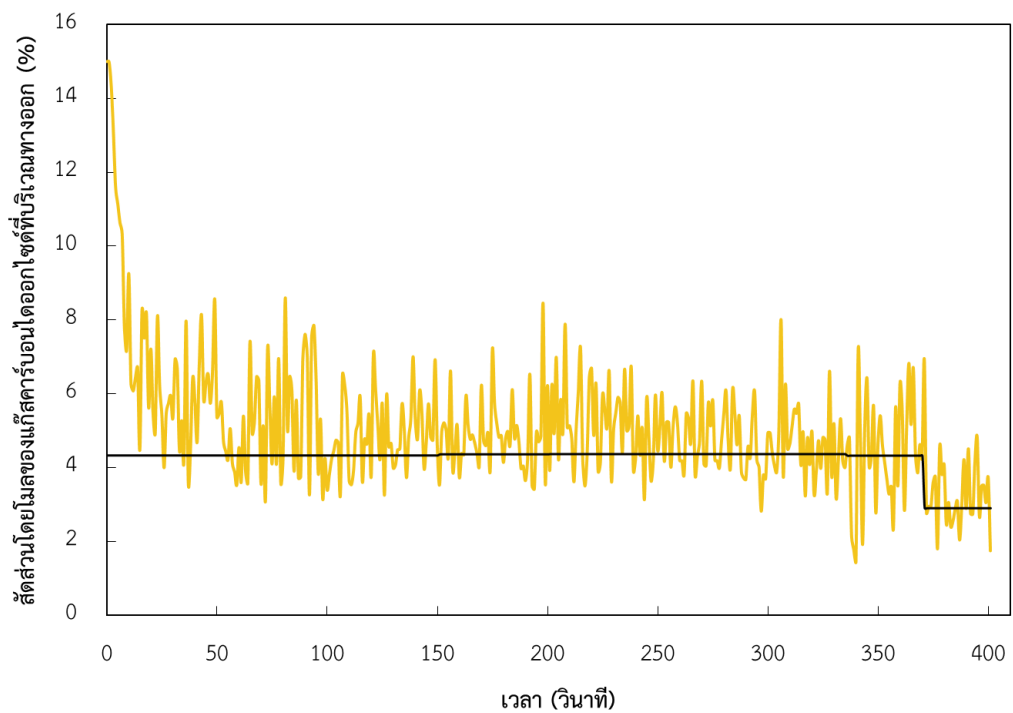
รูปที่ 4.26 ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิจากแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



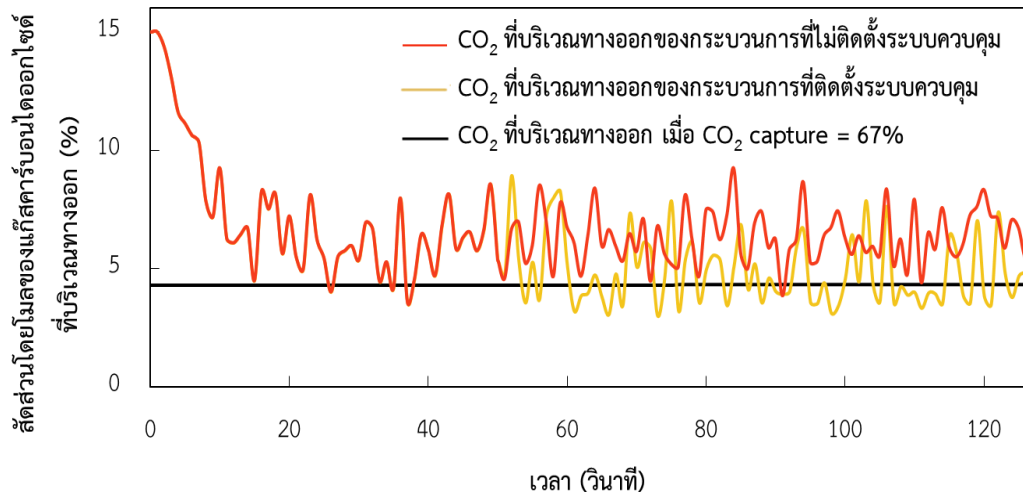
รูปที่ 4.27 สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



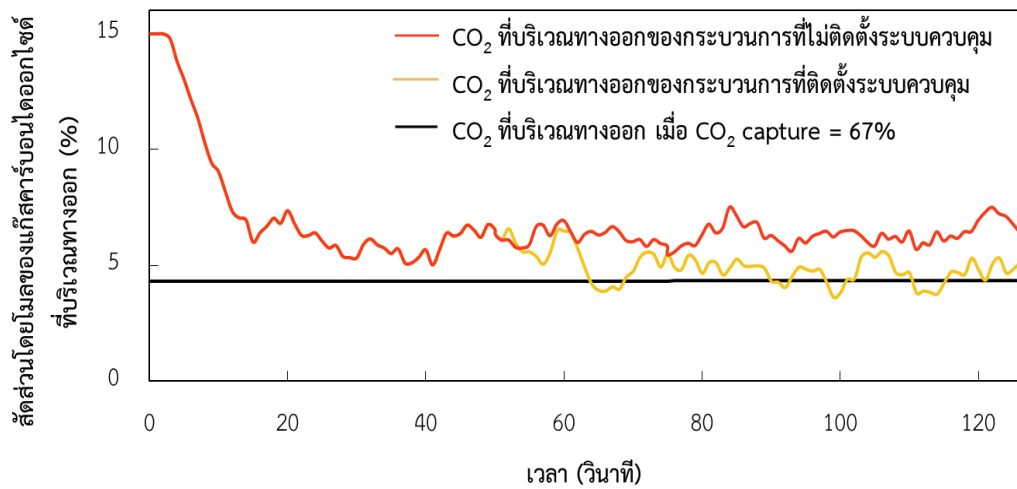
รูปที่ 4.28 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่อตัวแปรรอบวนแต่ละชนิด
เปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.29 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อตัว
แปรรอบวนแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 4.30 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง เมื่อตัวแปรบวกรวณแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่างๆ



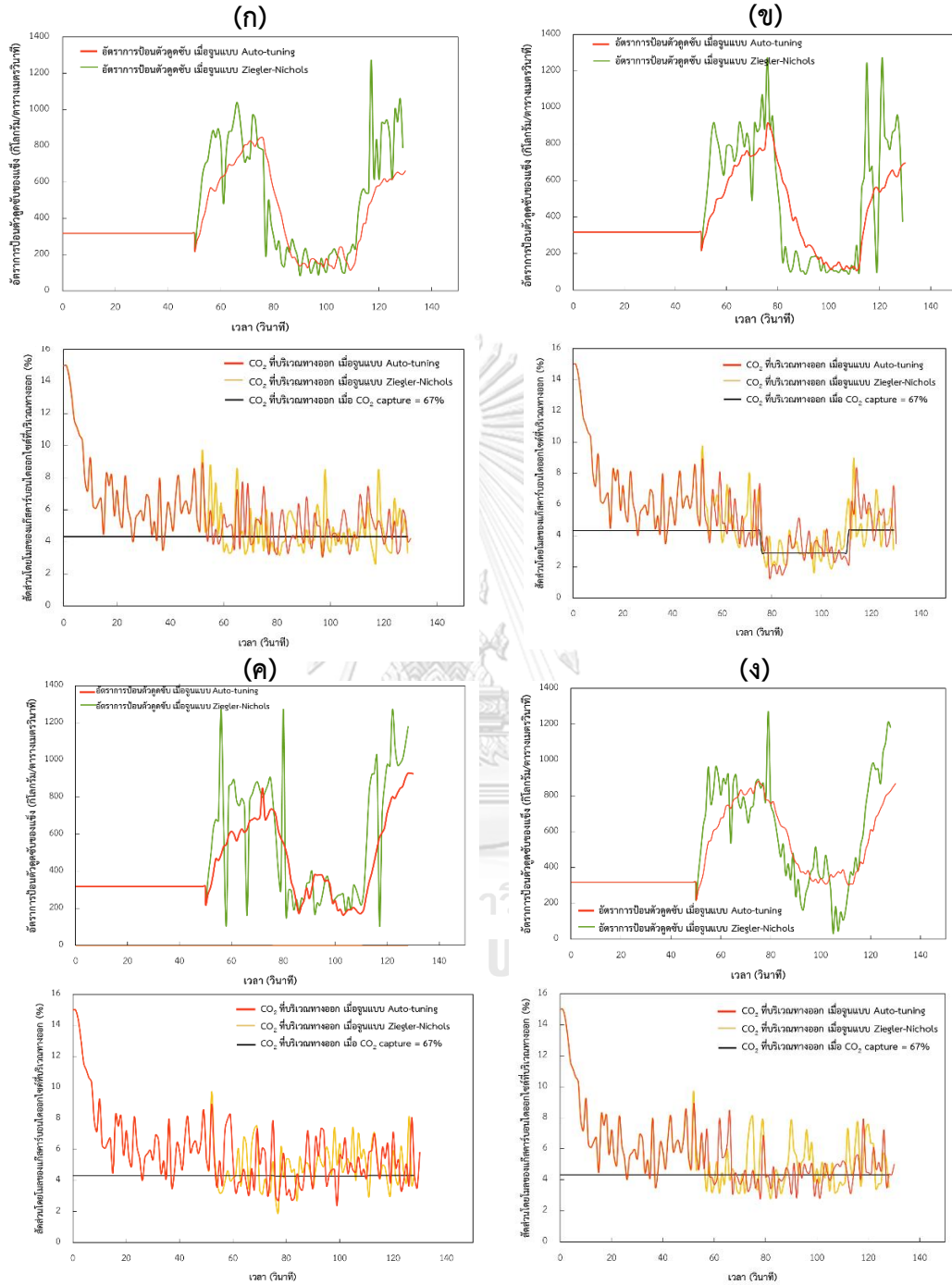
รูปที่ 4.31 สัดส่วนโดยโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกเฉลี่ย 5 วินาทีของเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อตัวแปรบวกรวณแต่ละชนิดเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่างๆ

4.3.1 การเปรียบเทียบผลของแบบจำลองระหว่างการจูนแบบ Auto-tuning และ Ziegler-Nichols

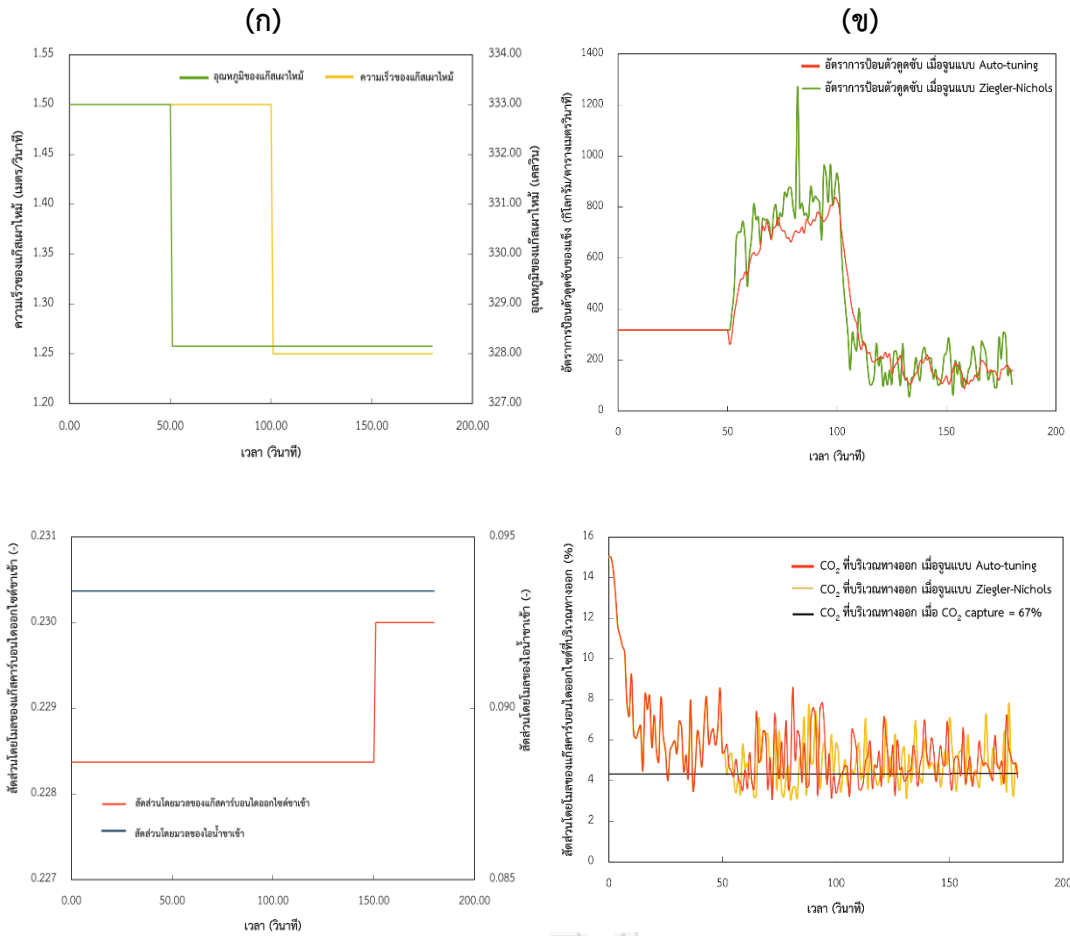
เมื่อได้ผลของแบบจำลองการจูนแบบอัตโนมัติแล้ว จึงทำการจูนอีกวิธี นั่นคือ การจูนระบบควบคุมแบบวงปิดแบบ Ziegler-Nichols [45] ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB แล้วจึงนำค่า Kp Ki และ Kd มาเขียนภาษาคอมพิวเตอร์ด้วยระบบไฟล์ประยุกต์ใช้ระบบไฟล์โลคัล เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT พบว่าเมื่อทำการจูนระบบควบคุมพีไอดี โดยใช้ซอฟต์แวร์ Simulink ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB ได้ค่า Kp Ki และ Kd คือ -0.376 -0.602 และ -3.765 ตามลำดับจะเห็นได้ว่าค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ค่ามีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการจูนแบบอัตโนมัติ ที่มี ค่า Kp Ki และ Kd คือ -0.226 -0.218 และ -0.019 ตามลำดับ ด้วยเหตุนี้เมื่อนำค่า Kp Ki และ Kd ไปใช้โดยปรับเปลี่ยนค่าในภาษาคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT ทำให้อัตราการป้อนตัวดูดซับของการจูนระบบควบคุมพีไอดีด้วยวิธี Ziegler-Nichols เปลี่ยนแปลงค่อนข้างรุนแรงเมื่อเทียบกับการใช้ค่าพารามิเตอร์ชุดเดิมในระบบควบคุมพีไอดี จากการสังเกตพบว่า การเพิ่มขึ้นของ Kp และ Ki ทำให้ระบบควบคุมสั่งการให้อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งเพิ่มขึ้น เพื่อให้สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้นั้นเร็วขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งอาจรวดเร็วเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33 การเพิ่ม Kd จะช่วยหน่วงการ Overshoot ของระบบแต่การเพิ่มค่ามากเกินไปก็ทำให้สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกเข้าสู่ค่าที่ต้องการช้าลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าเข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้ใกล้เคียงกับการจูนแบบอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33 เมื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองจากการจูนทั้ง 2 แบบแล้วจะเห็นได้ว่าการจูนแบบอัตโนมัติจึงดีกว่า เนื่องจากอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งไม่เปลี่ยนแปลงรุนแรงเกินไปทำให้อัตราการควบคุมดังกล่าวไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจริงระบบมีความเสถียรมากกว่า และสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกเข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้ใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับการจูนแบบ Ziegler-Nichols

พิจารณาค่าผลรวมสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน (Integrated Absolute Error, IAE) ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า ในกรณีแยกปรับเฉพาะสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสัดส่วนไอน้ำของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า ค่าผลรวมสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อนของการจูนแบบ Ziegler-Nichols มีค่าต่ำกว่า ซึ่งต่างจากอีก 3 กรณี แต่อย่างไรก็ตามการจูนระบบควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติมีสมรรถนะการควบคุมมากกว่าการจูนแบบ Ziegler-Nichols เมื่อพิจารณาจากอัตราการป้อนตัวดูด

ข้อของเชิงอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งไม่เปลี่ยนแปลงรุนแรงเกินไปทำให้เมื่อนำระบบควบคุมดังกล่าวไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจริงระบบมีความเสถียรมากกว่า



รูปที่ 4.32 อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง และสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกที่ช่วงเวลาต่าง ๆ เมื่อ (ก) ความเร็วของแก๊สเผาไหม้เปลี่ยนแปลง (ข) สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง (ค) สัดส่วนไอน้ำของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง และ (ง) อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.33 (ก) การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรกระบวนการต่าง ๆ (ข) อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง และ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกที่ช่วงเวลาต่าง ๆ ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าผลรวมสัมบูรณ์ของความคลาดเคลื่อน (IAE) ระหว่างการจูนระบบควบคุมพีไอดีแบบอัตโนมัติ และแบบ Ziegler-Nichols

ตัวแปรกระบวนการที่ปรับเปลี่ยน	IAE	
	การจูนระบบควบคุมพีไอดี	
	Auto-tuning	Ziegler-Nichols
สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า	49.31	41.86
สัดส่วนไอน้ำของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า	60.74	59.46
ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า	46.62	48.55
อุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า	39.38	62.48
ปรับตัวแปรกระบวนการทุกชนิด	66.16	66.81

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน 1. การศึกษาหาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เหมาะสมในงานวิจัย 2. การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ 3. การศึกษาสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB และ 4. การศึกษาสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT

5.1.1 การศึกษาหาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เหมาะสมในงานวิจัย

การศึกษามูลค่าการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็ง เพื่อให้งานวิจัยที่ศึกษาให้ผลการจำลองมีความแม่นยำ และใกล้เคียงกับการทดลองจริง ดังนั้นก่อนนำแบบจำลองไปศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ จำเป็นต้องหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสม หรือหาพื้นที่การคำนวณที่น้อยที่สุดที่ทำให้ผลการคำนวณตัวแปรต่างๆ ไม่เปลี่ยนแปลง และประหยัดเวลาที่ใช้ในการคำนวณ พบว่าจำนวนเซลล์คำนวณที่เหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์ คือ 9,000 เซลล์ และเมื่อหาอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งที่ทำให้ได้ผลใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น โดยทำการเทียบกับผลการทดลองจริงของ Chalerm-sinsuwan และคณะ [9] พบว่าที่อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งมีค่าเท่ากับ 238.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที มีค่าสอดคล้องกับงานวิจัยข้างต้นที่ทำการบรรจุตัวดูดซับของแข็งไว้คงที่

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของ Boonprasop และคณะ [10] จากผลการจำลองพบว่าสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดได้ดีเกินความเป็นจริงจึงทำการหว่านอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยการคูณสัมประสิทธิ์ พบว่าเมื่อสัมประสิทธิ์มีค่าเท่ากับ 0.125 ทำให้ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น โดยทำการเทียบกับผลการทดลองจริงของ Boonprasop และคณะ [10] และ Kongkitisupchai และคณะ [11]

5.1.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์

จากผลการจำลองตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้ตัวแปรดำเนินการทั้งหมด 5 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาเฉพาะความเร็วของแก๊สเผาไหม้ และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ทั้งหมด 25 กรณี พบว่า กรณีที่ 5 ที่ความเร็วของแก๊สเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 1 เมตรต่อวินาที และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งมีค่าเท่ากับ 477 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ได้ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด และกรณีศึกษาที่ 21 เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้มีค่าเท่ากับ 2 เมตรต่อวินาที และอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งมีค่าเท่ากับ 159 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ได้ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด จะเห็นได้ว่าตัวแปรทั้ง 2 ตัวแปรส่งผลต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และในส่วนที่สอง ทำการศึกษาตัวแปรดำเนินการทั้ง 5 ตัวแปรด้วยวิธีการทดสอบการตอบสนองแบบขั้น พบว่าความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าส่งผลกระทบต่อ การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ แปรผกผันกับสมรรถนะการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ การเพิ่มความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ทำให้สมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง ในทางกลับกัน อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง และสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ (ในช่วงที่ศึกษา) แปรผันตรงกับร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ กล่าวคือ การเพิ่มความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ส่งผลให้สมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

5.1.3 การศึกษาสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB

จากผลการสร้างแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB โดย การทดสอบการตอบสนองแบบขั้นและนำผลการตอบสนองมาสร้างฟังก์ชันส่งผ่านของตัวแปรดำเนินการ 5 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง สัดส่วน

คาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า สามารถนำมาสร้างระบบควบคุมแบบวงปิดได้ กำหนดให้ตัวแปรควบคุมคือ ร้อยละการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวแปรรบกวนคือ ความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และตัวแปรปรับค่าได้คือ อัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง พบว่า สามารถหาระบบควบคุมพีไอดี ด้วยการจูนแบบอัตโนมัติได้ นั่นคือ K_p มีค่าเท่ากับ -0.226 K_i มีค่าเท่ากับ -0.218 และ K_d มีค่าเท่ากับ -0.019 เมื่อลองปรับเปลี่ยนตัวแปรรบกวนแต่ละชนิดที่เวลาต่างๆ จะเห็นได้ว่าระบบสามารถควบคุมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยสังเกตจากสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกมีค่าตรงตามที่กำหนดไว้ แต่อาจเบี่ยงเบนออกจากค่าที่กำหนดไว้เล็กน้อยเมื่อตัวแปรรบกวนเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากฟังก์ชันส่งผ่านของแต่ละตัวแปรดำเนินการที่ใช้แทนกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีการลดความซับซ้อนของระบบเพื่อให้ง่ายต่อการจำลองเบื้องต้นมากขึ้นจึงทำให้บางช่วงที่เปลี่ยนแปลงตัวแปรรบกวน แล้วทำให้สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกเบี่ยงเบนจากที่กำหนดไว้ แต่ระบบควบคุมสามารถปรับให้สมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไปตามที่กำหนดได้ โดยการปรับอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง

5.1.4 การศึกษาสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT

จากผลการศึกษาสมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยการใส่คำสั่งภาษาคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างแบบจำลองพลวัตและระบบควบคุมด้วยโปรแกรมประยุกต์ ANSYS FLUENT พบว่าระบบควบคุมสามารถควบคุมให้สมรรถนะในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าร้อยละ 67 ตามที่กำหนดไว้ โดยการปรับอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็ง ซึ่งเมื่อปรับความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าเพิ่มขึ้น ระบบควบคุมทำการปรับอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งให้เพิ่มขึ้นเพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ แต่เมื่อความเร็วของแก๊สเผาไหม้ สัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สเผาไหม้ และอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้าลดลง ระบบควบคุมจะทำการปรับอัตราการป้อนตัวดูดซับของแข็งให้ลด เพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกมีค่าตามที่กำหนดไว้ ซึ่งตรงข้ามกับสัดส่วนไอน้ำในแก๊สเผาไหม้ที่ป้อนเข้า และพบว่ากระบวนการที่มีการติดตั้งระบบควบคุมมีสมรรถนะในการควบคุมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีกว่ากระบวนการที่ไม่มีการติดตั้งระบบควบคุม เมื่อมีตัวแปรมารบกวน

และเมื่อเปรียบเทียบการจูนระบบควบคุมพีไอดีระหว่างการจูนแบบอัตโนมัติ และการจูนแบบ Ziegler-Nichols พบว่าการจูนแบบอัตโนมัติดีกว่า เนื่องจากอัตราการป้อนตัวคูณของแข็งไม่เปลี่ยนแปลงรุนแรงเกินไปทำให้เมื่อนำระบบควบคุมดังกล่าวไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจริงระบบมีความเสถียรมากกว่า และสัดส่วนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกเข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้ใกล้เคียงกัน เมื่อเทียบกับการจูนแบบ Ziegler-Nichols

5.2 ข้อเสนอแนะ

แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของงานวิจัยนี้ สามารถนำไปช่วยในการออกแบบระบบควบคุมการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีความเหมาะสม โดยสามารถปรับเปลี่ยนเครื่องปฏิกรณ์ ตัวแปรกระบวนการต่างๆ และชนิดของระบบควบคุม ให้สอดคล้องกับโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มีข้อจำกัดของเครื่องปฏิกรณ์ และระบบควบคุมที่พีไอดีที่ไม่ซับซ้อน เนื่องจากเป็นการสร้างแบบจำลองระบบควบคุมแบบวงปิดที่ฟังก์ชันการส่งผ่านแบบลำดับหนึ่ง และไม่คิดผลกระทบระหว่างตัวแปรดำเนินการที่เปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งยังใช้ผลการตอบสนองที่นำมาสร้างฟังก์ชันส่งผ่านแบบอันดับหนึ่ง ซึ่งทำให้ผลลัพธ์ของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อน เพราะในระบบปฏิบัติการจริงมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นหากมีการพัฒนาการจำลองใหม่ที่พิจารณาถึงข้อจำกัดดังกล่าวเพิ่มเติม อาจทำให้การทดลองที่ได้มีความแม่นยำ และสมจริงมากขึ้น

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างชุดคำสั่งตัวควบคุมพีไอดี

```

#include "udf.h"
#include "math.h"
#include "stdio.h"
/*Execute every timestep*/
DEFINE_PROFILE(solid_inlet_profile,t,i)
{
    Domain *gas_domain = Get_Domain(2);
    Domain *solid_domain = Get_Domain(3);
    Thread *outlet_thread = Lookup_Thread(gas_domain,5);
    Thread *inlet_thread = Lookup_Thread(gas_domain,20);
    Thread *sinlet_thread = Lookup_Thread(solid_domain,21);
    Thread **pt;
    Thread *t0;
    face_t f;
    cell_t c0;
    real CO2mfrac_in = 0, CO2mfrac_out = 0, accumulate_co2 = 0, face_num =
0,avg_co2_out=0, avg_co2_in=0;
    real NV_VEC(vel_f), vel_mag=0, avg_co2_out_sp=0, solid_velocity_ss=0;
    real CO=0,error=0, delta_error=0, delT=0, Kp=0, Ki=0, Kd=0, derivative=0,
accumulate_co2_in=0;
    real s_flow_in, error_old, integral, s_flow_in_new;
    FILE *file1;
    FILE *file2;
    FILE *file3;
    FILE *file4;
    FILE *file5;
    FILE *file6;
    FILE *file7;

```

```

FILE *file8;
file1 = fopen("error.txt","a");
file2 = fopen("integral.txt","a");
file3 = fopen("derivative_data.txt","a");
file4 = fopen("mfrac_co2_out.txt","a");
file5 = fopen("mfrac_co2_out_sp.txt","a");
file6 = fopen("ControlOut.txt","a");
file7 = fopen("vsolid_ss.txt","a");
file8 = fopen("vsolid_in.txt","a");
/*Read CO2 mass frac out*/
begin_f_loop(f, outlet_thread)
{
    CO2mfrac_out = F_YI(f,outlet_thread,0);
    accumulate_co2 += CO2mfrac_out;
    face_num = face_num+1;
    error_old = F_UDMI(f, outlet_thread,0);
    integral = F_UDMI(f, outlet_thread,1);
}
end_f_loop(f, outlet_thread)
avg_co2_out = accumulate_co2/face_num;
/*Read CO2 mass frac in*/
face_num = 0;
begin_f_loop(f, inlet_thread)
{
    CO2mfrac_in = F_YI(f,inlet_thread,0);
    accumulate_co2_in += CO2mfrac_in;
    face_num = face_num+1;
}
end_f_loop(f, inlet_thread)
avg_co2_in = accumulate_co2_in/face_num;
/*desired Mass fraction of CO2 at outlet*/

```

```

avg_co2_out_sp = avg_co2_in - (0.67 * avg_co2_in);
/*solid velocity at steady state*/
solid_velocity_ss = 0.2;
delT = CURRENT_TIME - PREVIOUS_TIME;
/* PID controller*/
/* P term*/
error = avg_co2_out_sp - avg_co2_out;
/* D term*/
delta_error = error - error_old;
derivative = delta_error/delT;
/* I term*/
integral = integral + (error * delT);
/*control output*/
Kp = -0.22587;
Ki = -0.21854;
Kd = -0.01942;
CO = (Kp* error) + (Ki * integral) + (Kd * derivative);
/*solid velocity*/
s_flow_in = solid_velocity_ss + CO;
fprintf(file8, "solid_velocity_in: %.4e\n", s_flow_in);
fclose(file8);
    if(s_flow_in <= 0.1)
    {
        s_flow_in_new = 0.1;
        integral = integral - (error * delT);
    } else{
        if (s_flow_in < 1.2)
        {
            s_flow_in_new = s_flow_in;
        } else {
            s_flow_in_new = 1.2;

```



```

        integral = integral - (error * delT);
    }
}

/*user define memory error and integral*/
begin_f_loop(f, outlet_thread)
{
    F_UDMI(f, outlet_thread,0) = error;
    F_UDMI(f, outlet_thread,1) = integral;
    F_UDMI(f, outlet_thread,2) = derivative;
    F_UDMI(f, outlet_thread,3) = avg_co2_out;
    F_UDMI(f, outlet_thread,4) = avg_co2_out_sp;
    F_UDMI(f, outlet_thread,5) = CO;
    F_UDMI(f, outlet_thread,6) = solid_velocity_ss;
}
end_f_loop(f,outlet_thread)
/*write data to file*/
fprintf(file1, "error: %.4e\n", error);
fprintf(file3, "derivative: %.4e\n", derivative);
fprintf(file4, "avg_co2_out: %.4e\n", avg_co2_out);
fprintf(file5, "avg_co2_out_sp: %.4e\n", avg_co2_out_sp);
fprintf(file6, "CO: %.4e\n", CO);
fprintf(file7, "solid_velocity_ss: %.4e\n", solid_velocity_ss);
/*write data integral to file*/
fprintf(file2, "integral: %.4e\n", integral);
fclose(file1);
fclose(file3);
fclose(file4);
fclose(file5);
fclose(file6);
fclose(file7);
fclose(file2);

```

```
begin_f_loop(f,sinlet_thread)
{
    F_PROFILE(f,sinlet_thread,i) = s_flow_in_new;
}
end_f_loop(f,sinlet_thread)
```



บรรณานุกรม

1. Jiang G, Huang Q, Kenarsari SD, Hu X, Russell AG, Fan M, et al. A new mesoporous amine-TiO₂ based pre-combustion CO₂ capture technology. *Applied Energy*. 2015;147:10.
2. Bu C, Gómez-Barea A, Chen X, Leckner B, Liu D, Pallarès D, et al. Effect of CO₂ on oxy-fuel combustion of coal-char particles in a fluidized bed: Modeling and comparison with the conventional mode of combustion. *Applied Energy*. 2016;177:13.
3. Schnellmann MA, Heuberger CF, Scott SA, Dennis JS, Dowell NM. Quantifying the role and value of chemical looping combustion in future electricity systems via a retrosynthetic approach. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2018;73:15.
4. Chalerm-sinsuwan B, Piumsomboon P, Gidaspow D. A Computational Fluid Dynamics Design of a Carbon Dioxide Sorption Circulating Fluidized Bed. *AIChE Journal*. 2010;56(11):20.
5. Liang Y, Harrison DP, Gupta RP, Green DA, McMichael WJ. Carbon Dioxide Capture Using Dry Sodium-Based Sorbents. *Energy & Fuels*. 2004;18:7.
6. Nelson TO, Coleman LJI, Green DA, Gupta RP. The Dry Carbonate Process: Carbon dioxide recovery from power plant flue gas. *Energy Procedia*. 2009;1:7.
7. Anderson JD. *Computational fluid dynamics – The basics with applications*. New York: McGraw-Hill; 1995.
8. Ayobi M, Shahhosseini S, Behjat Y. Computational and experimental investigation of CO₂ capture in gas–solid bubbling fluidized bed. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014;45:10.
9. Chang J, Zhang K, Yang Y, Wang B, Sun Q. Computational investigation of solid sorbent carbon dioxide capture in a fluidized bed reactor. *Powder Technology*. 2015;275:11.
10. Nouri M, Rahpaima G, Nejad MM, Imani M. Computational simulation of CO₂ capture process in a fluidized-bedreactor. *Computers and Chemical Engineering*.

2018;108:10.

11. Omell BP, Ma J, Mahapatra P, Yu M, Lee A, Debangsu, et al. Advanced Modeling and Control of a Solid Sorbent-Based CO₂ Capture Process. IFAC-PapersOnLine. 2016;49:6.

12. Chalermssinsuwan B, Boonprasop S, Nimmanterdwong P, Piumsomboon P. Revised fluidization regime characterization in high solid particle concentration circulating fluidized bed reactor. International Journal of Multiphase Flow. 2014;66:12.

13. Thummakul T, Gidaspow D, Piumsomboon P, Chalermssinsuwan B. 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;190:13.

14. Boonprasop S, Gidaspow D, Chalermssinsuwan B, Piumsomboon P. CO₂ Capture in a Multistage CFB: Part I: Number of Stages. AIChE Journal. 2017;63:13.

15. Kongkitisupchai S, Gidaspow D. Carbon Dioxide Capture Using Solid Sorbents in a Fluidized Bed with Reduced Pressure Regeneration in a Downer. AIChE Journal. 2013;59:19.

16. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ. ฟลูอิดเซชัน. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2560.

17. Silva GG, Jiménez NP, Salazar OF. Fluid Dynamics of Gas – Solid Fluidized Beds In: Oh PHW, editor. Advanced Fluid Dynamics: InTech; 2012.

18. Wen CY, Yu YH. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity. AIChE Journal. 1966;12(3):3.

19. Saxena S, Vogel G. The measurement of incipient fluidization velocities in a bed of coarse dolomite at temperature and pressure. Trans Inst Chem Eng., 1977;55(3):6.

20. Babu SP, Shah B, Talwalkar A. Fluidization correlations for coal gasification materials: minimum fluidization velocity and bed expansion ratio. AIChE symposium. 1978;74(176):11.

21. Grace J. Fluidized Bed Hydrodynamics. In: Hetsroni G, editor. Handbook of Multiphase Systems. Washington: Hemisphere Publishing; 1982.

22. Chitester DC, Kornosky RM, Fan L-S, Danko JP. Characteristics of fluidization at high pressure. *Chemical Engineering Science*. 1984;39(2):9.
23. Abrahamsen A, Geldart D. Behavior of Gas-Fluidized Beds of Fine Powders. Part II. Voidage of the Dense Phase in Bubbling Beds. *Powder Technology*. 1980;26(1):9.
24. Bi H, Grace J. Effect of measurement method on the velocities used to demarcate the onset of turbulent fluidization. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*. 1995;57(3):11.
25. H.Takeuchi, T.Hirama, T.Chiba, J.Biswas, L.S.Leung. A quantitative definition and flow regime diagram for fast fluidization. *Powder technology*. 1986;47(2):5.
26. Perales JF, Coll T, Llop MF, Puigjaner L, Arnaldos J, Casal J. On the transition from bubbling to fast fluidization regimes. In: Basu P, Horio M, Hasatani M, editors. *Circulating fluidized bed technology III: Pergamon Press (Elsevier)*; 1991. p. 73-8.
27. Bi HT, Fan LS. Regime transitions in gas-solid circulating fluidized beds. *AIChE Annual Meeting*. Los Angeles 1991. p. 17-22.
28. Chalermssinsuwan B, Piumsomboon P, Gidaspow D. Kinetic theory based computation of PSRI riser: Part I—Estimate of mass transfer coefficient. *Chemical Engineering Science*. 2009;64(6):17.
29. Kunii D, Levenspiel O. *Fluidization Engineering*. Boston: Butterworth-Heinemann; 1991.
30. manager A. the Technologies of Natural Gas Sweetening 2018 [Available from: <https://www.arab-oil-naturalgas.com/the-technologies-of-natural-gas-sweetening/>].
31. Yu G, Zhao L, Chen J, Hull T, Dai B, Liu D, et al. Numerical Studies for the CO₂ Capture Process in a Fluidized-Bed Absorber. *Energy Fuels*. 2014;28(7):9.
32. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ. พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ : จากทฤษฎีสู่การประยุกต์. *Engineering Today*. 1002554. p. 50-4.
33. Rajinikanth V, Latha K. I-PD Controller Tuning for Unstable System Using Bacterial Foraging Algorithm: A Study Based on Various Error Criterion. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*. 2012;2012:10.
34. สารานุกรมเสรี ว. ระบบควบคุมพีไอดี 2561 [Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%9A%E0%B8%84%E0%B8%B8%E0%B8%A1%E0%B8%9E%>].

E0%B8%B5%E0%B9%84%E0%B8%AD%E0%B8%94%E0%B8%B5.

35. Liu C, Zhao M, Wang W, Li J. 3D CFD simulation of a circulating fluidized bed with on-line adjustment of mechanical valve. *Chemical Engineering Science* 2015;137:10.
36. Gaspara J, Gladisa A, Jørgensen JB, Thomsena K, Solmsa NV, Fosbøl PL. Dynamic Operation and Simulation of Post-Combustion CO₂ Capture. *Energy Procedia*. 2016;86:10.
37. Gaspar J, Jørgensen JB, Fosbøl PL. Control of a post-combustion CO₂ capture plant during process start-up and load variations. *IFAC-PapersOnLine* 2015;48:6.
38. Luu MT, Manaf NA, Abbas A. Dynamic modelling and control strategies for flexible operation of amine-based post-combustion CO₂ capture systems. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2015;39:13.
39. Nittaya T, Douglas PL, Croiset E, Sandoval LAR. Dynamic modelling and control of MEA absorption processes for CO₂ capture from power plants. *Fuel*. 2014;116:20.
40. Cheever E. The Unit Step Response 2019 [Available from: <https://lpsa.swarthmore.edu/Transient/TransInputs/TransStep.html>].
41. มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภา. การควบคุมอัตโนมัติ Automatic control [Available from: <http://me.neu-engineering.com/Control/control3.html>].
42. สารานุกรมเสรี ว. ทฤษฎีระบบควบคุม 2554 [Available from: <https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%97%E0%B8%A4%E0%B8%A9%E0%B8%8E%E0%B8%B5%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%9A%E0%B8%9A%E0%B8%84%E0%B8%A7%E0%B8%9A%E0%B8%84%E0%B8%B8%E0%B8%A1>].
43. Cebucean D, Cebucean V, Ionel I. CO₂ capture and storage from fossil fuel power plants. *Energy Procedia*. 2014;63:9.
44. Zhao C, Chen X, Zhao C. K₂CO₃/Al₂O₃ for capturing CO₂ in flue gas from power plants Part 1: carbonation behaviors of K₂CO₃/Al₂O₃. *Energy Fuels*. 2012;26:5.
45. Seborg DE, Edgar TF, Mellichamp DA. *Process Dynamics and Control*. The United States of America: John Wiley & Sons, Inc.; 2004.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชนนิกานต์ ธีระพาณิชย์กุล
วัน เดือน ปี เกิด	12 พฤษภาคม 2538
สถานที่เกิด	ปทุมธานี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	182/1 ม.4 ถ.รังสิต-นครนายก ต.รังสิต อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110
ผลงานตีพิมพ์	- International Journal: Two-Stage Liquefaction of Oil Palm Shell in Alkali Supercritical Ethanol–Water for Enhanced Bio-Oil Production. Springer (Waste and Biomass Valorization), 10:60 (2018), 1-10 - Proceeding : The relationship between operating parameters and the percentage of carbon dioxide capture in circulating fluidized bed using computational fluid dynamics, TIChE 2018, 185-197