

แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการคืนสภาพ
ตัวดูดซับในฟลูอิดไอซ์เบต



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL OF CO₂ ADSORPTION AND SORBENT REGENERATION IN FLUIDIZED BED

Mr. Chattan Sakaunnaporn



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการดูดซับ
คาร์บอนไดออกไซด์และการคืนสภาพตัวดูดซับในฟลูอิดซ์
เบด

โดย

นายฉัททันต์ สงวนนภาพร

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. สรัล ศาลากิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร. บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

ฉันทันต์ สวงวนภาพร : แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และการคืนสภาพตัวดูดซับในฟลูอิดิซเบด (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL OF CO₂ ADSORPTION AND SORBENT REGENERATION IN FLUIDIZED BED) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศ. ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุรณ์, 102 หน้า.

ในปัจจุบัน ภาวะโลกร้อนได้สร้างผลกระทบต่อโลกในหลายๆ ด้าน ทั้งนี้มีสาเหตุหลักมาจากการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศในปริมาณมาก ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในแก๊สเรือนกระจก โดยถ้ามีแก๊สชนิดนี้ในชั้นบรรยากาศมากจะส่งผลให้โลกมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น การควบคุมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนออกสู่บรรยากาศจึงถือเป็นเรื่องสำคัญที่ควรจะต้องถูกพิจารณา สำหรับการศึกษางานวิจัยนี้จะสนใจในส่วนของเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดหลังการเผาไหม้ โดยจะศึกษาในส่วนของการควบคุมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนออกสู่บรรยากาศด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซเบดแบบหมุนเวียน งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่ออธิบายรูปแบบการไหลของกระบวนการในท่อไรเซอร์และท่อดาวเนอร์โดยจะทำการหาแบบจำลองและปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดลองจริงจากงานวิจัยต่างๆ ศึกษาปัจจัยดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยระเบียบวิธีการทดลอง Central Composite Design ผลจากการศึกษาพบว่า ในท่อไรเซอร์ขนาดเซลล์คำนวณที่เหมาะสม คือ 10,000 เซลล์ และในท่อดาวเนอร์ขนาดเซลล์คำนวณที่เหมาะสมคือ 8,000 เซลล์ และปฏิกิริยาเคมีแบบ Equilibrium ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากที่สุด และผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์อย่างมีนัยสำคัญ คือ ฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้า และอุณหภูมิระบบ เนื่องจากค่า p-value ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีค่าน้อยกว่า 0.05 โดยฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้าให้ผลเชิงบวก คือ เมื่อฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้าสูงขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น แต่อุณหภูมิระบบให้ผลเชิงลบ คือ เมื่ออุณหภูมิระบบสูงขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง ส่วนผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ด้วยอุณหภูมิ คือ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และอุณหภูมิระบบ โดยความเร็วแก๊สป้อนเข้าให้ผลเชิงลบ และอุณหภูมิระบบให้ผลเชิงบวก ส่วนผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ด้วยความดัน คือ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และความดันระบบ โดยทั้งความดัน และความเร็วแก๊สป้อนเข้าให้ผลเชิงลบ

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5871927623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS, CIRCULATING FLUIDIZED BED REACTOR, CENTRAL COMPOSITE DESIGN, ANOVA

CHATTAN SAKAUNNAPAPORN: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL OF CO₂ ADSORPTION AND SORBENT REGENERATION IN FLUIDIZED BED. ADVISOR: ASSOC. PROF. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D., CO-ADVISOR: PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., 102 pp.

At present, global warming has a major impact on the world in many ways due to the releasing of carbon dioxide into the atmosphere. The property of carbon dioxide is high specific heat capacity which then makes the heat to be collected and accumulated. When the atmosphere has a lot of carbon dioxide, it causes the temperature to increase. Therefore, the control of carbon dioxide before releasing to the atmosphere is important. This study focuses on clean technology from post-combustion process by carbon dioxide capture using circulating fluidized bed reactor. This research developed a computational fluid dynamics model with the chemical reaction to describe the hydrodynamics of the riser and downer and studied the effect of operating parameters on carbon dioxide removal percentage in riser and carbon dioxide mass fraction at downer outlet by using central composite experimental design. From the results, it was found that riser mesh cells of 10,000 cells and downer mesh cells of 8,000 cells with chemical equilibrium reaction model were accurately used to predict the results comparing with the experimental results. According to experimental design, the p-value was used for the statistical testing. If the p-value is lower than 0.05, the factor significantly affects the interested response. From the results, it could be summarized that solid circulation rate and temperature had significantly affected on the carbon dioxide removal percentage in riser. When increasing the solid circulation rate and temperature, the carbon dioxide removal percentage was higher and lower, respectively. Also, the inlet gas velocity and temperature had significantly affected on carbon dioxide mass fraction at downer outlet by using regenerate sorbent with temperature. When the inlet gas velocity and temperature were higher, carbon dioxide mass fraction was lower and higher, respectively. In addition, the inlet gas velocity and pressure had significantly affected on carbon dioxide mass fraction at downer outlet by using regenerate sorbent with pressure. When the inlet gas velocity and pressure were higher, carbon dioxide mass fraction was lower.

Department: Chemical Technology

Field of Study: Chemical Technology

Academic Year: 2016

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการคืนสภาพตัวดูดซับในฟลูอิด์เบดฉบับนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะให้งานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช ทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมทั้งบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการงานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ น้อง รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลัง ที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	5
บทที่ 2	7
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	7
2.1.1 ฟลูอิดไอเซชัน	7
2.1.2 ประเภทของฟลูอิดไอเซชัน.....	7
2.1.3 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดไอเซชัน (Fluidization flow regimes)	7
2.1.4 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart	11

2.1.5 ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed: CFB).....	12
2.1.6 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	13
2.1.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มสำหรับการไหลของของไหล	14
2.1.8 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์.....	18
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3	22
แบบจำลองคณิตศาสตร์และวิธีการสร้างแบบจำลองการไหล	22
3.1 แบบจำลองการไหล.....	22
3.2 การสร้างแบบจำลองการไหล	22
3.3 การจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT.....	23
3.4 สมมติฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และกระบวนการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์.....	27
3.5 สมการอนุรักษ์พื้นฐาน (Fluent, Inc, 2002).....	27
3.5.1 สมการอนุรักษ์มวล	27
3.5.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม	27
3.5.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน	28
3.5.4 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ.....	28
3.5.5 สมการพลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็ง	29
3.5.6 แบบจำลองสัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคของ EMMS.....	29
(Energy Minimization Multi-Scale, βgs).....	29
3.5.7 สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Homogeneous (Park และคณะ, 2006).....	30
3.5.8 สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Deactivation (Park และคณะ, 2006).....	30
3.5.9 สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Equilibrium (Kongkittisupchai และคณะ, 2013).....	30

3.6 ขั้นตอนการทดลอง	31
บทที่ 4	36
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	36
4.1 ผลของขนาดเซลล์คำนวณและเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียร.....	36
4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	38
4.3 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์	39
4.4 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยอุณหภูมิในท่อ ดาวเนอร์	42
4.5 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดันในท่อ ดาวเนอร์	44
บทที่ 5	73
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
5.1 สรุปผลการวิจัย	73
5.1.1 การหาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เหมาะสมในงานวิจัย	73
5.1.2 การหาแบบจำลองของปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมในงานวิจัย	73
5.1.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์	74
5.1.4 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วย อุณหภูมิในท่อดาวเนอร์	74
5.1.5 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วย ความดันในท่อดาวเนอร์	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
รายการอ้างอิง	77
ภาคผนวก ก	80

ญ

หน้า

ภาคผนวก ข..... 82

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 102



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2. 1 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดเซชันแบบต่างๆ [12]..... 8

รูปที่ 2. 2 ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส [13] 8

รูปที่ 2. 3 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart [14] 11

รูปที่ 2. 4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน [26]..... 13

รูปที่ 2. 5 ตัวอย่างความสอดคล้องของฟลักซ์การแพร่ตลอดโดเมน 15

รูปที่ 2. 6 การกระจายของคุณสมบัติ ϕ ที่ค่าเลขเพคเลตต่างๆ กัน 16

รูปที่ 2. 7 การประมาณค่าแบบต้นลมกรณีการไหลมีทิศทาง +u 17

รูปที่ 2. 8 การประมาณค่าแบบแผนวิธี QUICK..... 18

รูปที่ 3. 1 (ก) รูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายในระบบสองมิติของท่อไรเซอร์ และดาวเนอร์ (ข)
ตัวอย่างเซลล์คำนวณที่ถูกสร้างด้วยโปรแกรม Gambit 2.2.30 23

รูปที่ 4. 1 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสูงของท่อไรเซอร์ที่พื้นที่การ
คำนวณต่างๆ 48

รูปที่ 4. 2 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสูงของท่อดาวเนอร์ที่พื้นที่การ
คำนวณต่างๆ 49

รูปที่ 4. 3 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ต่อเวลาที่
ใช้ในการจำลองที่ขนาดเซลล์คำนวณ 10,000 เซลล์ 50

รูปที่ 4. 4 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ต่อเวลา
ที่ใช้ในการจำลองที่ขนาดเซลล์คำนวณ 8,000 เซลล์..... 51

รูปที่ 4. 5 ความดันลดต่อตำแหน่งความสูงในท่อไรเซอร์ (0.52 เมตร, 2.27 เมตร, 4.07 เมตร
และ 5.87 เมตร ตามลำดับ) 52

รูปที่ 4. 6 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสูงของท่อไรเซอร์ที่ขนาดเซลล์
คำนวณ 10,000 เซลล์ เวลาในการจำลอง 80 วินาที 53

รูปที่ 4. 7 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (ก) ผลของความเร็วแก๊ส ป้อนเข้า (ข) ผลของฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า (ค) ผลของอุณหภูมิระบบ (ง) ผลของสัดส่วนโดยมวล ไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า	55
รูปที่ 4. 8 พื้นผิวตอบสนองของร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อโรเซออร์ เมื่อฟลักซ์ ของแข็งป้อนเข้าและอุณหภูมิระบบแตกต่างกัน.....	56
รูปที่ 4. 9 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อ ดาวเนอร์ (ก) ผลของอุณหภูมิระบบ (ข) ผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ค) ผลของฟลักซ์ของแข็ง ป้อนเข้า.....	58
รูปที่ 4. 10 พื้นผิวตอบสนองของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาว เนอร์ เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้าและอุณหภูมิระบบแตกต่างกัน	59
รูปที่ 4. 11 พื้นผิวตอบสนองของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาว เนอร์ เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้าและฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้าแตกต่างกัน	60
รูปที่ 4. 12 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อ ดาวเนอร์ (ก) ผลของความดันเกจ (ข) ผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ค) ผลของฟลักซ์ของแข็ง ป้อนเข้า.....	62
รูปที่ 4. 13 (ก) คอนทัวร์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกรณีศึกษาที่ 4 (ปฏิกิริยาการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยาการคืนสภาพตัวดูดซับ ตามลำดับ) (ข) คอนทัวร์ของอัตราการ เกิดปฏิกิริยาเคมีของกรณีศึกษาที่ 11 (ปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยาการ คืนสภาพตัวดูดซับ ตามลำดับ).....	64
รูปที่ 4. 14 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความดันระบบ และความเร็วแก๊สป้อนเข้าต่อค่าสัดส่วน โดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์.....	65
รูปที่ 4. 15 พื้นผิวตอบสนองของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาว เนอร์ เมื่อความดันเกจ และความเร็วแก๊สป้อนเข้าแตกต่างกัน	66

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3. 1 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการจำลองกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์	25
ตารางที่ 3. 2 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการจำลองกระบวนการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์	26
ตารางที่ 3. 3 ข้อมูลการจำลองในการหาเซลล์การคำนวณที่เหมาะสม	32
ตารางที่ 3. 4 ข้อมูลการจำลองผลของตัวแปรดำเนินการต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์	33
ตารางที่ 3. 5 ข้อมูลการจำลองผลของตัวแปรดำเนินการต่อการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ (กระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับโดยใช้อุณหภูมิ)	34
ตารางที่ 3. 6 ข้อมูลการจำลองผลของตัวแปรดำเนินการต่อการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ (กระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับโดยใช้ความดัน).....	35
ตารางที่ 4. 1 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์	67
ตารางที่ 4. 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตัวแปรตอบสนองเป็นร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (A คือ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า B คือ ฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้า C คือ อุณหภูมิระบบ และ D คือ สัดส่วนโดยมวลไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า)	68
ตารางที่ 4. 3 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ด้วยอุณหภูมิ	69
ตารางที่ 4. 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ด้วยอุณหภูมิ (A คือ อุณหภูมิระบบ B คือ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และ C คือ ฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้า)	70
ตารางที่ 4. 5 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ด้วยความดัน.....	71
ตารางที่ 4. 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ (A คือ ความดันเกจ B คือ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และ C คือ ฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้า).....	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบัน ภาวะโลกร้อนได้สร้างผลกระทบต่อโลกในหลายๆ ด้าน ทั้งนี้มีสาเหตุหลักมาจากการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศในปริมาณมาก ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหนึ่งในแก๊สเรือนกระจก โดยถ้ามีแก๊สชนิดนี้ในชั้นบรรยากาศมากจะส่งผลให้โลกมีอุณหภูมิเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการควบคุมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนออกสู่บรรยากาศจึงถือเป็นเรื่องสำคัญที่ควรจะต้องถูกพิจารณา

เทคโนโลยีในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 วิธีการหลัก ได้แก่ เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ ถ่านหินก่อนที่จะถูกปล่อยออกสู่สภาพแวดล้อม และเทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน (Oxy-fuel) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ ถ่านหินด้วยการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนการใช้อากาศที่มีออกซิเจนเพียง 21 เปอร์เซ็นต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ถ่านหินและลดมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ สำหรับการศึกษางานวิจัยนี้จะสนใจในส่วนของเทคโนโลยีถ่านหินสะอาดหลังการเผาไหม้ โดยจะศึกษาในส่วนของการควบคุมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนออกสู่บรรยากาศด้วยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีความพยายามทดลองใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [1] เพราะเป็นอุปกรณ์ที่มีการกระจายตัวอนุภาคของแข็งและอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอทั่วถึงตลอดทั้งเครื่องปฏิกรณ์ และเหมาะสมใช้งานกับระบบที่มีการดำเนินการแบบต่อเนื่อง [2] นอกจากนี้ ยังได้มีการศึกษาค้นคว้าการเพิ่มประสิทธิภาพและหาภาวะที่เหมาะสมต่อการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาผลของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีผลต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบด [3] และผลของปริมาณไอน้ำของแก๊สป้อนเข้าที่มีผลต่อการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบด [4]

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน เป็นเครื่องปฏิกรณ์เคมีรูปแบบหนึ่งที่ภายในมีการสัมผัสหรืออันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลเกิดขึ้น โดยอนุภาคของแข็งจะมีพฤติกรรมการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียนมีการดำเนินการที่มีความต่อเนื่อง โดยมีส่วนประกอบหลักดังนี้ ท่อไรเซอร์ ท่อดาวเนอร์ ท่อป้อนกลับ และไซโคลน หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ คือ ของไหลตัวกลางจะไหลผ่านอนุภาคของแข็งและเกิดการสัมผัสกันระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็งภายในท่อไรเซอร์เกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น เมื่อความเร็วของไหลมีความเหมาะสม อนุภาคของแข็งจะเปลี่ยนพฤติกรรมการเคลื่อนที่จนมีลักษณะคล้ายกับของไหลเกิดเป็นช่วงการไหลแบบต่างๆ [5] เมื่ออนุภาคของแข็งเคลื่อนมาถึงด้านบนสุดของท่อไรเซอร์ อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนออกจากท่อไรเซอร์โดยไหลมาผ่านไซโคลน ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับทำหน้าที่แยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊สโดยอาศัยหลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วง อนุภาคของแข็งจะถูกแยกโดยไซโคลนและตกลงมาในท่อดาวเนอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เกิดปฏิกิริยาการทำให้คืนสภาพให้กับอนุภาคของแข็งเพื่อให้สามารถนำอนุภาคของแข็งกลับมาใช้งานใหม่ได้ อนุภาคเหล่านี้จะถูกป้อนกลับเข้าไปในกระบวนการใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของท่อไรเซอร์ผ่านท่อป้อนกลับ ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน นอกจากจะทำการหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการภายในท่อไรเซอร์การหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการทำให้คืนสภาพอนุภาคของแข็งภายในท่อดาวเนอร์ก็เป็นสิ่งจำเป็นเช่นกัน เนื่องจากการดำเนินการดังกล่าวเป็นภาวะดำเนินการแบบต่อเนื่อง และจะต้องมีการนำอนุภาคของแข็งกลับมาใช้ใหม่ตลอดเวลา การทำให้คืนสภาพอนุภาคของแข็งจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ด้วยเช่นกัน

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เป็นแบบจำลองที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่างๆ เพื่อใช้ในการศึกษารูปแบบการไหลของของไหล มีหลักการพื้นฐาน คือ กฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎการอนุรักษ์พลังงาน โดยแบ่งโดเมนการคำนวณเป็นปริมาตรควบคุมขนาดเล็กและแก้สมการอนุพันธ์โดยวิธีการเชิงตัวเลข [6] แบบจำลองนี้จะช่วยทำให้ผู้ใช้งานเข้าใจถึงอุทกพลศาสตร์ของกระบวนการ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียนด้วยการใช้ทฤษฎีจลน์ของการไหลสำหรับอนุภาค (Kinetic theory of granular flow) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่พัฒนามาจากทฤษฎีจลน์ของแก๊ส เพื่ออธิบายการไหลของอนุภาคแบบสุ่มที่เกิดจากกลศาสตร์ของไหล [7] อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่มีการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่ออธิบายรูปแบบ

การไหลของกระบวนการในท่อไรเซอร์ และท่อดาวเนอร์โดยจะทำการหาแบบจำลองและปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดลองจริงจากงานวิจัยต่างๆ ศึกษาปัจจัยดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับ นำผลลัพธ์มาวิเคราะห์ผลตัวแปรเชิงลึกเพื่อปรับปรุงและออกแบบระบบการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อไรเซอร์และท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในฟลูอิด์เบด
2. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในฟลูอิด์เบด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองในระบบสองมิติของท่อไรเซอร์ และท่อดาวเนอร์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในกระบวนการได้แก่ ปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และปฏิกิริยาการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์
2. ผลของตัวแปรแบบจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง
3. ผลของตัวแปรดำเนินการจะถูกนำมาวิเคราะห์โดยวิธีการพื้นผิวผลตอบ

1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ อุทกพลศาสตร์ วิธีการพื้นผิวผลตอบ กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อไรเซอร์และดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดในระบบสองมิติที่สามารถทำนายอุทกพลศาสตร์ ปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยาการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง
2. ได้แนวทางในการจำลองกระบวนการเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

3. ได้ทราบผลของตัวแปรดำเนินการ ที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด
4. ได้นักวิชาการ/นักวิจัยรุ่นใหม่ที่มีความสนใจและชำนาญการด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
5. ได้ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการหรือวารสารการประชุมวิชาการ อย่างน้อยจำนวน 1 ฉบับ

1.6 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ประมวลความรู้ที่เกี่ยวข้องทั้งในส่วนของการทดลองจริงและการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดและเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนสำหรับกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับ
2. ออกแบบการศึกษาแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และกระบวนการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.035 เมตร ความสูง 6.00 เมตร สำหรับท่อไรเซอร์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร ความสูง 1.28 เมตร สำหรับท่อดาวเนอร์ โดยอ้างอิงจาก Yi และคณะ [8]
3. พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของท่อไรเซอร์และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับของท่อดาวเนอร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเชิงพาณิชย์ ANSYS FLUENT โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยขนาดกระบวนการ ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ (K_2CO_3) อัตราส่วนของแก๊สป้อนเข้าเช่นเดียวกับการทดลองจริงของ Yi และคณะ [8] และใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของ Park และคณะ [9] ขั้นตอนแรกเริ่มจากหาขนาดของพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมจากขนาดพื้นที่การคำนวณ 4,000 8,000 12,000 และ 16,000 เซลล์และทดสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับผลการทดลองจริง [8] ได้แก่ ความดันลดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของท่อไรเซอร์ และร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ ขั้นตอนต่อมา จะทำการ

พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณการทำให้คืบสภาพตัวดูดซับของท่อดาวเนอร์ ซึ่งจะใช้ค่าสัดส่วนของแข็งที่ได้จากบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์เป็นตัวแปรต้นในกระบวนการ โดยใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาการทำให้คืบสภาพตัวดูดซับของ Kongkitisupchai และ Gidaspow [10] และหาขนาดของพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมจากขนาดพื้นที่การคำนวณ 4,000 8,000 12,000 และ 16,000 เซลล์ และทดสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองกับผลการทดลองจริง [8] ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่งขาออกท่อดาวเนอร์

4. หาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และการทำให้คืบสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology) สำหรับตัวแปรที่จะทำการศึกษาแยกเป็น ศึกษาผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้า อุณหภูมิระบบ สัดส่วนโดยปริมาตรของไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า และปริมาณของแข็งป้อนเข้าต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างความดัน ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และปริมาณของแข็งป้อนเข้าต่อการทำให้คืบสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และปริมาณของแข็งป้อนเข้าต่อการทำให้คืบสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์
5. ประมวล วิเคราะห์ สรุปผลการทดลองเขียนบทความวิจัย และวิทยานิพนธ์

1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ข้อจำกัดของการวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีการดำเนินการวิจัย และขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

บทที่ 2 ฟลูอิดเซชัน ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน วิถีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม สำหรับการไหลของของไหล กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์และการคืบสภาพตัวดูดซับ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 แบบจำลองการไหล การสร้างแบบจำลองการไหล การจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT สมมติฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และกระบวนการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ สมการอนุรักษ์พื้นฐาน และขั้นตอนการทดลอง

บทที่ 4 ผลของขนาดเซลล์คำนวณและเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียร การเปรียบเทียบผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยอุณหภูมิในท่อดาวเนอร์ และผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดันในท่อดาวเนอร์

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ฟลูอิดิเซชัน

ฟลูอิดิเซชัน เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายกับของไหล โดยของไหลที่ใช้เป็นได้ทั้งแก๊ส และของเหลว หลักการคือ ของไหลจะไหลผ่านมาทางด้านล่างของหอตลอดที่บรรจุของแข็ง แล้วไหลผ่านบริเวณที่บรรจุของแข็งออกส่วนบนของหอตลอด เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลมากขึ้น ของแข็งจะเริ่มขยับ และลอยตัวขึ้นอย่างอิสระ ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติและพฤติกรรมคล้ายของไหล พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของแข็งในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหล ส่งผลให้เกิดช่วงการไหลแบบต่างๆ ดังนี้ ฟลูอิดิเซชันแบบฟองแก๊ส ฟลูอิดิเซชันแบบปั่นป่วน ฟลูอิดิเซชันแบบความเร็วสูง และฟลูอิดิเซชันแบบเบาบาง [11]

2.1.2 ประเภทของฟลูอิดิเซชัน

ฟลูอิดิเซชัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ฟลูอิดิเซชันแบบสองวัฏภาคและฟลูอิดิเซชันแบบสามวัฏภาค

2.1.2.1 ฟลูอิดิเซชันแบบสองวัฏภาค (Two-phase fluidization) คือ ในหอตลอดจะประกอบด้วยสองวัฏภาคคือ ของแข็งกับของไหล ของไหลนี้อาจจะเป็นแก๊สหรือของเหลวก็ได้ ดังนั้นฟลูอิดิเซชันแบบสองวัฏภาค ยังแบ่งออกได้อีก 2 ประเภท คือ

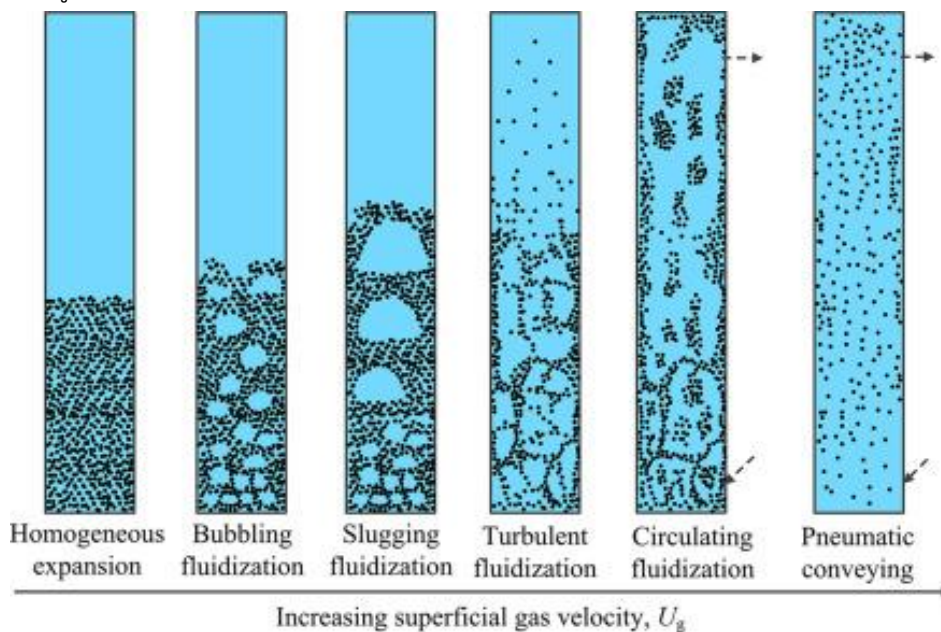
- ฟลูอิดิเซชันของแก๊ส
- ฟลูอิดิเซชันของเหลว

2.1.2.2 ฟลูอิดิเซชันแบบสามวัฏภาค (Three-phase fluidization) คือ ในหอตลอดจะประกอบไปด้วยสามวัฏภาคอยู่พร้อมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ในส่วนของระบบฟลูอิดิเซชันสามวัฏภาคบ่อยครั้งมักเกิดปัญหาการที่ของเหลวในระบบทำให้อนุภาคของของแข็งเกิดการจับและเกาะตัวกันขึ้น น้ำหนักของอนุภาคที่เกิดการเกาะตัวกันจะมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้กระบวนการเกิดฟลูอิดิเซชันเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์

2.1.3 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดิเซชัน (Fluidization flow regimes)

ช่วงการไหลของฟลูอิดิเซชันรูปแบบต่างๆ เกิดจากพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของแข็งในระบบที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเร็วของของไหล โดยความเร็วของของไหลจะต้องมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ (Minimum fluidization velocity: u_{mf}) ซึ่ง

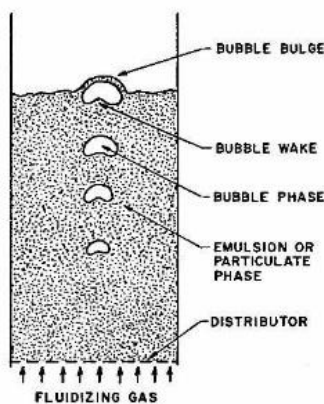
สามารถแบ่งช่วงการไหลตามความเร็วของของไหลที่เปลี่ยนแปลงไปเรื่อยจากความเร็วต่ำไปความเร็วสูง ดังแสดงรูปที่ 2.1



รูปที่ 2. 1 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดเซชันแบบต่างๆ [12]

2.1.3.1 ฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊ส (Bubbling fluidization)

พฤติกรรมการไหลแบบพองแก๊สเป็นช่วงแรกหลังจากที่ของแข็งประพุดิตัวคล้ายของไหล โดยสังเกตได้จากการมีพองแก๊สเกิดขึ้นในระบบ ซึ่งพองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแก๊สและของแข็ง พองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผสมกับอนุภาคของแข็ง และเคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนจนกระทั่งถึงผิวหน้าของเบด พองแก๊สจะเกิดการแตกตัว ของแข็งที่ติดไปกับพองแก๊สจะตกลงมายังผิวหน้าเบดอีกครั้งโดยแรงโน้มถ่วง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2. 2 ฟลูอิดเซชันแบบพองแก๊ส [13]

สำหรับขนาดอนุภาคที่ต่างกัน ลักษณะการเกิดฟองแก๊สในช่วงการไหลนี้ก็จะมีความแตกต่างกันไป กล่าวคือ สำหรับอนุภาคที่อยู่ใน Geldart A เมื่อความเร็วของแก๊สมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ จะมีการขยายตัวของเบดที่สูง และเมื่อความเร็วของแก๊สมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองแก๊ส (U_{mb}) จะเกิดฟองแก๊สขึ้นในระบบ [14] สำหรับอนุภาคที่อยู่ใน Geldart B และ D เมื่อความเร็วของแก๊สมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่ แต่การผสมกันของของแข็งสำหรับ Geldart B จะเกิดได้ดีกว่า Geldart D เนื่องจากขนาดอนุภาคของ Geldart D ใหญ่กว่า Geldart B [14] สำหรับอนุภาค Geldart C เป็นอนุภาคที่เกิดฟลูอิดไลเซชันได้ยาก เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็ก และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันสูงทำให้เกิดฟองแก๊สได้ยาก [14] สำหรับการคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชันแสดงในสมการดังต่อไปนี้

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

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

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

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

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

สำหรับ C_1 และ C_2 ยังสามารถอ้างอิงจากงานวิจัยต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ค่า C_1 และ C_2 จากงานวิจัยต่างๆ

งานวิจัย	C_1	C_2
Wen และ Yu [15]	33.7	0.0408
Saxena และ Vogel [16]	25.28	0.0571
Babu และคณะ [17]	25.25	0.0651
Grace [18]	27.2	0.0408
Chitester และคณะ [19]	28.7	0.0494

และ Abrahamsen และ Geldart [20] 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

ε_{mf} คือ สัดส่วนปริมาตรของวัฏภาคแก๊สที่ภาวะต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน (-)

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

2.1.3.2 ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidization)

ฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส ในช่วงการไหลนี้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะมีการรวมตัวและแตกออกจากกันอย่างรวดเร็ว ไม่สามารถเห็นได้ชัดเจนเหมือนในช่วง ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส [21] ซึ่งในช่วงนี้ยังคงมีสิ่งๆที่เหมือนกับฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส คือ อนุภาคของแข็งจะสามารถสัมผัสกับแก๊สภายในระยะความสูงหนึ่งเท่านั้น โดยจะมีของแข็งที่ลอยหลุดไปกับแก๊สปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น โดยภายในฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วนมีลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุภาคของแข็ง 2 แบบด้วยกัน ได้แก่ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่รวมกันหนาแน่น (Dense phase) และ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง (Dilute phase) ซึ่งความเร็วที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะอยู่ในช่วงความเร็วของแก๊สระหว่าง u_c และ u_k โดยสามารถหาได้จากสมการของ Bi และคณะ [22]

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

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

2.1.3.3 ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization)

ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง เป็นช่วงการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเร็วของแก๊สมากกว่าช่วงการไหลแบบปั่นป่วน อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่จนไม่สามารถระบุชี้ชัดผิวหน้าด้านบนของเบตได้ ซึ่งหมายถึงอนุภาคของแข็งจะหลุดออกไปกับของไหลบริเวณด้านบนของหอตลอด ในช่วงการไหลนี้มีลักษณะเด่นคือ อนุภาคของแข็งจะมีการรวมตัวกันเป็นจำนวนมากบริเวณผนังของหอตลอด และจะรวมตัวกันเบาบางบริเวณตรงกลางของหอตลอด เรียกการไหลลักษณะนี้ว่า Core-annulus flow [23] ซึ่งความเร็วที่ต่ำที่สุดที่ระบบเริ่มเข้าช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (u_{tr}) ถูกนำเสนอโดย Perales และคณะ [24] มีความสัมพันธ์ดังนี้

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

2.1.3.4 ฟลูอิดเซชันแบบเบาบาง (Pneumatic transport fluidization)

ฟลูอิดเซชันแบบเบาบาง เป็นช่วงการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเร็วของแก๊สมากกว่าช่วงการไหลความเร็วสูง ส่งผลให้อนุภาคของแข็งลอยสู่ด้านบนของหอตลอด และทำให้ผลต่างความ

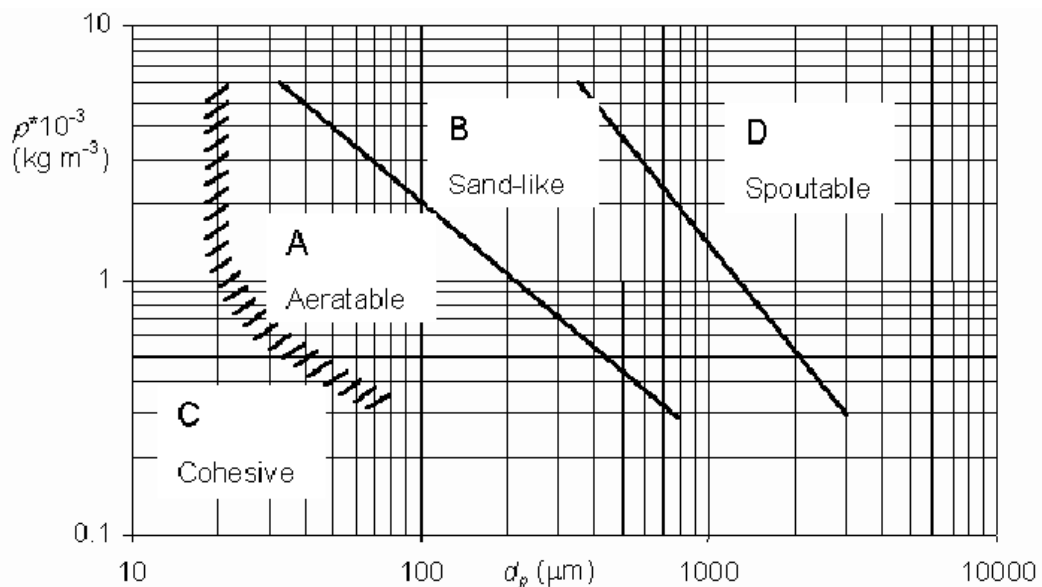
ต้นระหว่างด้านล่างและด้านบนของหอยทอลองมีค่าน้อยมากเนื่องจากปริมาณของแข็งในระบบมีค่าน้อย ซึ่งความเร็วต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบเบาบาง (u_{mp}) ถูกเสนอโดย Bi และ Fan [25] มีความสัมพันธ์ดังนี้

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

เมื่อ G_s คือ ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของหอยทอลอง (เมตร)

2.1.4 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart



รูปที่ 2. 3 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart [14]

พฤติกรรมการไหลของอนุภาคของแข็งในระบบฟลูอิดเซชันจะมีพฤติกรรมต่าง ๆ กันออกไป ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของแข็งชนิดนั้นๆ เช่น ความหนาแน่น ขนาด เป็นต้น จากรูปที่ 2.3 เป็นการจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart ซึ่งการจำแนกด้วยวิธีนี้จะแยกประเภทของอนุภาคโดยใช้ความหนาแน่น และขนาดอนุภาคเฉลี่ย โดยจะแบ่งได้ทั้งหมด 4 ประเภท ดังนี้

Group A อนุภาคในกลุ่มนี้สามารถเกิดฟลูอิดเซชันได้ง่ายที่ความเร็วแก๊สต่ำ เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ ทำให้แก๊สสามารถผ่านได้ง่าย

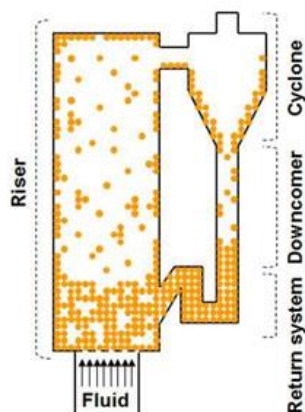
Group B อนุภาคในกลุ่มนี้จะมีลักษณะคล้ายกับทราย ที่ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน จะมีฟองแก๊สเกิดขึ้นด้วย และขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเร็วก๊าซป้อนเข้า

Group C อนุภาคในกลุ่มนี้จะมีขนาดเล็กมาก ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก จะไม่เกิดฟองแก๊สขึ้นสำหรับการใช้อนุภาคในกลุ่มนี้ เนื่องจากอนุภาคมักจับตัวกันเป็นก้อนด้วยแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่สูง

Group D อนุภาคในกลุ่มนี้จะมีขนาดใหญ่ และความหนาแน่นสูง ทำให้ต้องใช้ปริมาณของไหลมากถึงจะสามารถทำให้ของแข็งเกิดฟลูอิดเซชันได้

2.1.5 ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed: CFB)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียน เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกพัฒนาจากระบบฟลูอิดเซชันในช่วงที่มีการไหลตั้งแต่ช่วงฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูงเป็นต้นไป ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาของการหลุดลอยออกของอนุภาคของแข็ง และเพิ่มประสิทธิภาพมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเดิม โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งกระบวนการทางกายภาพเช่น การอบแห้ง การแยกขนาดอนุภาคของแข็ง เป็นต้น และกระบวนการทางเคมี ได้แก่ กระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ การผลิตแก๊สจากเชื้อเพลิงแข็ง เป็นต้น เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันแบบหมุนเวียนมีส่วนประกอบหลักดังนี้ ท่อไรเซอร์ ไสโคลอน ท่อดาวเนอร์ และท่อป้อนกลับ มีหลักการทำงานคือ ของไหลจะไหลผ่านอนุภาคของแข็งจากทางด้านล่างของท่อไรเซอร์ และเมื่อของไหลมีความเร็วที่เหมาะสม อนุภาคของแข็งจะมีพฤติกรรมคล้ายของไหล ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ต้องการให้อนุภาคของแข็งมีช่วงการไหลแบบความเร็วสูง เพราะจะทำให้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่มาถึงด้านบนสุดของท่อไรเซอร์ และเคลื่อนตัวมายังไซโคลน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแยกแก๊สกับอนุภาคออกจากกัน โดยใช้หลักการของแรงโน้มถ่วงและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หลังจากนั้น อนุภาคจะตกลงมายังส่วนของท่อดาวเนอร์ที่ทำหน้าที่คืนสภาพให้กับอนุภาคให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง โดยจะส่งกลับท่อไรเซอร์ผ่านท่อป้อนกลับ จึงส่งผลให้อนุภาคเกิดการหมุนเวียนเป็นการดำเนินการแบบต่อเนื่อง แสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีข้อดีคือ มีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งตลอดแนวความสูงของเครื่อง และมีการสัมผัสกันของอนุภาคของแข็งกับของไหลสูง ส่งผลให้มีการกระจายตัวของความร้อนอย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้คือ ต้องลงทุนในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์มากขึ้น เนื่องจากได้มีการเพิ่มในส่วนของไซโคลน ท่อดาวเนอร์ และท่อป้อนกลับ และมีความซับซ้อนในการออกแบบมากขึ้น ทั้งยังมีโอกาสที่อนุภาคจะเกิดการสึกกร่อนและแตกหักเพราะการชนกันมากขึ้น



รูปที่ 2. 4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน [26]

2.1.6 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) คือ สาขาหนึ่งในกลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มีพื้นฐานของกฎการอนุรักษ์มวล กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม และกฎการอนุรักษ์พลังงาน และใช้กระบวนการเชิงตัวเลข โดยแบ่งโดเมนการคำนวณเป็นปริมาตรควบคุมขนาดเล็กและแก้สมการอนุพันธ์โดยวิธีการเชิงตัวเลข [6] ซึ่งใช้ในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวกับการไหลของของไหล ระเบียบวิธีสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดขอบเขตทางกายภาพหรือรูปทรงของปัญหาที่ต้องการศึกษา
2. แบ่งโดเมนการคำนวณเป็นปริมาตรควบคุมขนาดเล็ก
3. กำหนดสมการสำหรับการจำลอง
4. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)
5. แก้สมการควบคุมโดยอาศัยระเบียบวิธีการทำซ้ำ (Iteration)
6. วิเคราะห์ผลเฉลยที่ได้

สำหรับการแก้ระบบสมการจากสมการพื้นฐานต่างๆ ซึ่งเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้น (Partial differential equation) นั้นยากต่อการหาผลเฉลยแม่นยำ จึงต้องเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปที่สามารถแก้ระบบสมการได้ง่ายขึ้นโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เรียกว่า ระเบียบวิธีแบ่งช่วง(Discretization) มีดังต่อไปนี้

1. ระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume Method) คือ การเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นปริมาตรควบคุมแบบเป็นช่วง และอาศัยการอินทิเกรตเพื่อให้ได้ปริมาตรที่มีการอนุรักษ์
2. ระเบียบวิธีอีลีเมนต์สี่เหลี่ยม (Finite Element Method) คือ การเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์โดยจะทำการแบ่งเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย และใช้วิธีสร้างสมการประมาณค่าขึ้น

ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้เกิดการกำจัดสมการเชิงอนุพันธ์อย่างสมบูรณ์ ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อน

3. ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) คือ การเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์โดยการประมาณค่าด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ที่ตำแหน่งจุดต่างๆ บนกริด

2.1.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มสำหรับการไหลของของไหล

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มสำหรับระบบของไหลเป็นการพิจารณาให้ของไหลมีลักษณะเป็นปริมาตรควบคุมขนาดเล็กระดับอนุพันธ์ ดังนั้น ในการจะแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีนี้จึงต้องอาศัยวิธีการอินทิเกรตในการแก้ปัญหา สำหรับปัญหาการไหลของของไหลกระบวนการที่เกิดขึ้นในระบบจะมีทั้งการพา และการแพร่ โดยปกติแล้วการพาจะเกิดขึ้นควบคู่ไปกับการแพร่เสมอ คือ จะเป็นกระบวนการที่สามารถส่งคุณสมบัติของการไหลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุม แต่การพานั้นเกิดขึ้นได้เมื่อตัวกลางมีการเคลื่อนตัวหรือมีความเร็วเท่านั้น ส่วนการแพร่เกิดขึ้นได้เสมอไม่ว่าตัวกลางจะเคลื่อนตัวหรือไม่ก็ตาม โดยปกติแล้วการวิเคราะห์ปัญหาการไหลมักพิจารณาทั้งการพาและการแพร่ควบคู่กันไป ซึ่งสมการของปัญหาการพาและการแพร่แบบคงตัว จะเริ่มจากสมการการควบคุมพื้นฐาน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปของตัวแปร ϕ ได้ดังนี้

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (2.11)$$

จากสมการ (2.11) พจน์ด้านซ้ายมือของสมการหมายถึงการพาสุทธิ พจน์ที่ 1 ด้านขวามือหมายถึงการแพร่สุทธิ และพจน์ที่ 2 ด้านขวามือหมายถึงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ ϕ ในปริมาตรควบคุมที่กำลังพิจารณาและหลังจากได้สมการในรูปอนุพันธ์ ทำการอินทิเกรตสมการที่ (2.11) บนปริมาตรควบคุมแล้วแปลงให้อยู่ในรูปการอินทิเกรตพื้นผิวควบคุม ได้เป็นดังนี้

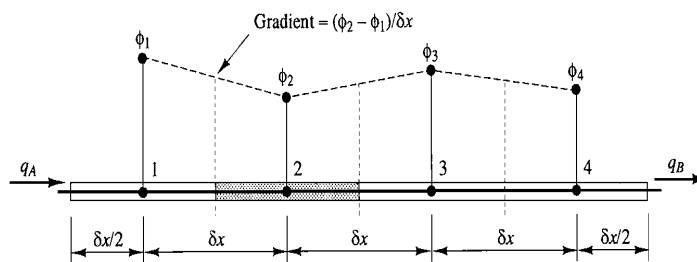
$$\int_A \bar{n} \cdot (\rho \bar{u} \phi) dA = \int_A \bar{n} \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.12)$$

สำหรับการหาค่า ϕ จะใช้ระเบียบวิธีทางตัวเลข ซึ่งการคำนวณจะได้ความแม่นยำนั้น แผนวิธีประมาณค่ามีส่วนเกี่ยวข้องอย่างยิ่ง ซึ่งแผนวิธีประมาณค่าที่ดีควรมีองค์ประกอบพื้นฐาน 3 อย่าง คือ (1) การอนุรักษ์ (2) การจำกัดขอบเขต และ (3) การขนส่ง

2.1.7.1 การอนุรักษ์

การอินทิเกรตสมการการพาและการแพร่บนปริมาตรควบคุมของตัวแปรใดก็ตาม ฟลักซ์ที่ผ่านออกจากปริมาตรควบคุมด้านหนึ่งๆ จะต้องเท่ากับฟลักซ์ที่ผ่านด้านนั้นเข้าสู่ปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดกัน เพื่อให้มีความสอดคล้องกับสมการอนุรักษ์ เช่น การแพร่แบบคงตัว 1 มิติตามรูปที่ 2.5 กำหนดให้ q_A เป็นฟลักซ์ที่ไหลเข้าโดเมน และ q_B เป็นฟลักซ์ที่ไหลออกจากโดเมน จากนั้นประยุกต์

วิธีประมาณค่าเข้ากับปริมาตรควบคุมเพื่อหาค่าฟลักซ์การแพร่ที่ผ่านปริมาตรควบคุมทั้งสิ้น จากรูปที่ 2.5 จะพิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 2 จะได้ว่า ฟลักซ์ที่ผ่านด้านขวาหรือด้าน w ของปริมาตรควบคุมมีค่าเป็น $\Gamma_{w2}(\phi_2 - \phi_1)/\delta x$ และ ฟลักซ์ที่ผ่านเข้าด้านซ้ายหรือด้าน e ของปริมาตรควบคุมมีค่าเป็น $\Gamma_{e2}(\phi_3 - \phi_2)/\delta x$ จากหลักอนุรักษ์จะได้ว่าผลรวมของฟลักซ์สุทธิที่ผ่านปริมาตรควบคุมแต่ละอันจะเท่ากับฟลักซ์สุทธิที่ผ่านโดเมนหรือขอบของปริมาตรควบคุมที่ 1 และ 4 นั้นเอง ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างความสอดคล้องของฟลักซ์การแพร่ตลอดโดเมน

$$\begin{aligned} & \left[\Gamma_{e1} \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{\delta x} - q_A \right] + \left[\Gamma_{e2} \frac{(\phi_3 - \phi_2)}{\delta x} - \Gamma_{w2} \frac{(\phi_2 - \phi_1)}{\delta x} \right] \\ & + \left[\Gamma_{e3} \frac{(\phi_4 - \phi_3)}{\delta x} - \Gamma_{w3} \frac{(\phi_3 - \phi_2)}{\delta x} \right] + \left[q_B - \Gamma_{w4} \frac{(\phi_4 - \phi_3)}{\delta x} \right] = q_B - q_A \end{aligned} \quad (2.13)$$

เมื่อ $\Gamma_{e1} = \Gamma_{w2}$, $\Gamma_{e2} = \Gamma_{w3}$ และ $\Gamma_{e3} = \Gamma_{w4}$ จะได้ผลรวมของพจน์ด้านซ้ายเท่ากับผลรวมของพจน์ด้านขวา คือ $q_B - q_A$ เป็นไปตามหลักความอนุรักษ์คือ ผลรวมของฟลักซ์สุทธิของแต่ละปริมาตรควบคุมจะเท่ากับฟลักซ์ที่ผ่านโดเมนหรือฟลักซ์สุทธิที่ขอบโดเมน

2.1.7.2 การจำกัดขอบเขต

หลังจากทำการประยุกต์สมการดิฟเฟอเรนเชียลเข้ากับทุกจุดต่อภายในโดเมนจนครบ ผลที่ได้คือชุดของสมการพีชคณิตที่มีจำนวนสมการเท่ากับจำนวนจุดต่อ เพื่อใช้หาผลเฉลยของตัวแปรที่จุดต่อต่างๆ การแก้ชุดสมการให้ได้ผลเฉลยที่มีความถูกต้องนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีการที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการที่ได้รับการยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายคือวิธีการทำซ้ำ วิธีการดังกล่าวนี้เหมาะสมสำหรับใช้แก้หาผลเฉลยของชุดสมการที่มีขนาดใหญ่ ขั้นตอนของวิธีทำซ้ำเริ่มจากการสมมติค่าให้กับตัวแปรไม่ทราบค่า ϕ เพื่อแทนในสมการ จากนั้นกระบวนการทำซ้ำจะค่อยๆ ปรับแก้ค่า ϕ ดังกล่าวจนกระทั่งได้ค่าที่ลู่อเข้าสู่คำตอบที่ต้องการ โดย Scarborough [27] ได้เสนอว่ากระบวนการทำซ้ำจะลู่อเข้าสู่คำตอบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควรอยู่ภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\frac{\sum |a_{nb}|}{|a'_p|} \leq 1 \quad (2.14)$$

เมื่อ a'_p คือ สัมประสิทธิ์สุทธิของจุดต่อกลาง P ซึ่ง $a'_p = a_p - S_p$

$\sum |a_{nb}|$ คือ ผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์ของจุดต่อข้างเคียง

ถ้าชุดของสมการใดที่มีเงื่อนไขเป็นไปตามข้อบังคับ (2.14) แล้ว เมทริกซ์ของชุดสมการนั้นจะมีความเด่นชัดในแนวทแยง และจะเป็นเมทริกซ์ที่สามารถหาผลเฉลยได้เสมอ

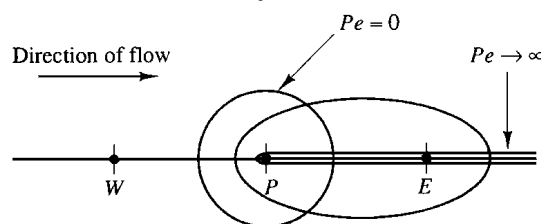
2.1.7.3 การขนส่ง

กระบวนการขนส่งคุณสมบัติที่นั้นเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือการขนส่งเนื่องจากการพา และการขนส่งเนื่องจากการแพร่ ซึ่งการขนส่งแบบใด จะส่งผลมากหรือน้อยพิจารณาได้จากค่าเลขเพคเล็ท (Peclet number) ซึ่งเป็นพจน์ไร้มิติที่ใช้วัดความสัมพันธ์ของการพาและการแพร่ ดังนี้

$$Pe = \frac{F_e}{D} = \frac{\rho u A}{\Gamma A / \delta x} \quad (2.15)$$

เมื่อ δx คือ ความยาวลักษณะเฉพาะ (Characteristic length) (ความกว้างเซลล์)

จากรูปที่ 2.6 แสดงเส้นคอนทัวร์ของ ϕ ที่ค่าเพคเล็ทต่างๆ เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของค่า ϕ ที่จุดต่อ P หรือจุดต่อต้นกระแส (Upstream node) และจุด E หรือจุดต่อปลายกระแส (Downstream node) หากการไหลเป็นผลที่เกิดจากการแพร่เพียงอย่างเดียวค่า $Pe = 0$ ซึ่งหมายถึงของไหลนั้นหยุดนิ่งอยู่กับที่ และการขนส่งคุณสมบัติ ϕ จะกระจายตัวออกไปเท่าๆ กัน และจุด E จะเริ่มได้รับผลกระทบก็ต่อเมื่อค่า Pe มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้การไหลเป็นผลที่เกิดจากการพาเพียงอย่างเดียวค่า $Pe \rightarrow \infty$ รูปร่างของเส้นคอนทัวร์จะมีลักษณะถูกยืดออกจนเป็นเส้นแบนราบ

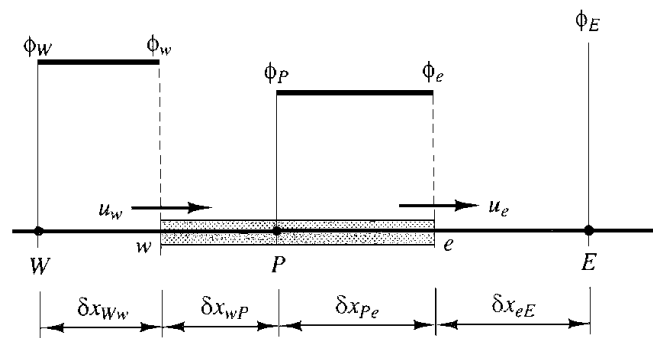


รูปที่ 2. 6 การกระจายของคุณสมบัติ ϕ ที่ค่าเลขเพคเลตต่างๆ กัน

2.1.7.4 แผนวิธีผลต่างต้นลม (Upwind Differencing Scheme: UDS)

แผนวิธีผลต่างต้นลมได้ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาข้อจำกัดของระเบียบวิธีทางตัวเลขแบบวิธีผลต่างกลางที่ค่าสัมประสิทธิ์มีโอกาสเป็นลบ ซึ่งเกิดจากทิศทางการไหลไม่เป็นไปในลักษณะเดียวกัน จากรูปที่ 2.7 แสดงจุดต่อต่างๆ ที่ใช้สำหรับหาค่าที่ด้านของปริมาตรควบคุม เมื่อการไหลมี

ทิศทางจาก w ไปหา e สำหรับแผนวิธีผลต่างต้นลม ค่า ϕ ที่ด้าน w ของปริมาตรควบคุมที่ถูกแรง จะได้รับผลกระทบ มาจากค่าที่จุดต่อ W ฉะนั้นการประมาณค่า ϕ ที่ด้าน w ให้มีค่าเท่ากับ ϕ ที่จุดต่อ W ซึ่งเป็นจุดต่อที่อยู่ต้นกระแส ซึ่งแผนวิธีดังกล่าวนี้จึงสามารถกำกับทิศทางการไหลให้เป็นอันหนึ่งอันเดียวกันได้



รูปที่ 2.7 การประมาณค่าแบบต้นลมกรณีการไหลมีทิศทาง +u

เมื่อการไหลมีทิศทางบวกจะได้ค่า $u_w > 0$ และ $u_e > 0$ เพราะฉะนั้นจึงได้ $F_w > 0$ และ $F_e > 0$ ตามลำดับ จากแผนวิธีผลต่างต้นลมจะได้ดังนี้

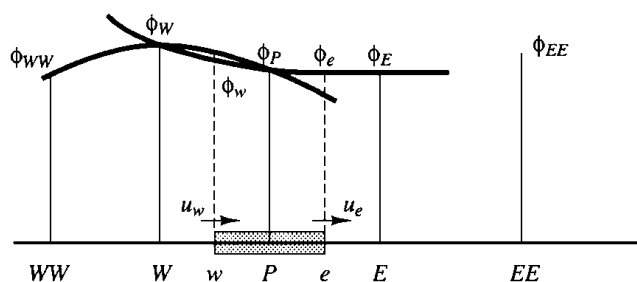
$$\phi_w = \phi_W \quad (2.16)$$

$$\phi_e = \phi_P \quad (2.17)$$

จากสมการที่ได้กล่าวไปจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จะไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้ ทำให้สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ได้โดยผลเฉลยจะลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

2.1.7.5 แผนวิธีผลต่างต้นกระแสก้ำลังสองหรือแผนวิธี QUICK

Leonard [28] ได้นำเสนอแผนวิธีผลต่างต้นกระแสก้ำลังสอง หลักการของแผนวิธีนี้คือจะใช้การประมาณค่าในช่วงแบบก้ำลังสองถ่วงน้ำหนัก (Upstream-weighted quadratic interpolation) โดยใช้จุดต่อ 3 จุดที่อยู่ต้นกระแสเพื่อหาค่าต่างๆ ที่ด้านของปริมาตรควบคุม ค่าคุณสมบัติ ϕ ที่ด้านของปริมาตรควบคุมหาได้จากฟังก์ชันก้ำลังสอง ฟังก์ชันนี้มีโปรไฟล์ซึ่งลากผ่านจุดต่อวงเล็บ (Blanking nodes) 2 จุด เนื่องจากส่วนของเส้นโปรไฟล์ที่อยู่ระหว่างจุดตัดทั้งสองนี้มีลักษณะโค้งคล้ายวงเล็บ จึงเรียกจุดต่อวงเล็บ และจุดต่อที่อยู่ต้นกระแสนี้ 1 จุด ที่อยู่ถัดออกไปจากจุดต่อวงเล็บรวมเป็น 3 จุด ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การประมาณค่าแบบแผนวิธี QUICK

การหาค่าคุณสมบัติ ϕ หากกำหนดให้ระยะห่างระหว่างกริดสม่ำเสมอ ค่า ϕ ที่ด้านของปริมาตรควบคุมซึ่งอยู่ระหว่างจุดต่อวงเล็บทั้งสองจุดต่อ คือจุดต่อ i (จุดต่อ P) จุดต่อ $i-1$ (จุดต่อ W หรือ E) และจุดต่อต้นกระแสน $i-2$ (จุดต่อ WW หรือ EE) หาได้ตามสูตรต่อไปนี้

$$\phi_{face} = \frac{6}{8}\phi_{i-1} + \frac{3}{8}\phi_i - \frac{1}{8}\phi_{i-2} \quad (2.18)$$

2.1.8 กระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

เทคโนโลยีในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์แบ่งออกเป็น 3 วิธีการหลัก ได้แก่

1. เทคโนโลยีในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังจากกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (Gasification) โดยจะทำการเปลี่ยนน้ำ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกแยกออก และไฮโดรเจนจะถูกใช้เพื่อผลิตต่อไป
2. เทคโนโลยีในการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์หลังการเผาไหม้ผ่านหินก่อนที่จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ ตัวอย่างเช่น การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบหมุนเวียน วิธีนี้จะเป็นการนำแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้มาแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกด้วยตัวดูดซับของแข็ง และแยกแก๊สสะอาดกับตัวดูดซับด้วยการใช้ไซโคลน
3. เทคโนโลยีการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการเผาไหม้ด้วยออกซิเจน (Oxy-fuel) เป็นการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาไหม้ผ่านหินด้วยการใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์แทนการใช้อากาศที่ประกอบด้วยออกซิเจนเพียง 21 เปอร์เซ็นต์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ผ่านหิน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ

ไอน้ำเท่านั้น และลดการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ จากความร้อนที่แก๊สไนโตรเจนสะสมไว้

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yi และคณะ [8] ศึกษาการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ภาวะดำเนินการแบบต่อเนื่องของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) พบว่า ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับภายในท่อไรเซอร์ ได้แก่ ความเร็วของแก๊สป้อนเข้าในท่อไรเซอร์ อัตราการป้อนกลับของอนุภาคของแข็ง ปริมาณไอน้ำภายในแก๊สป้อนเข้าโดยพบว่า เมื่อความเร็วของแก๊สป้อนเข้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับลดลง เนื่องจาก เมื่อความเร็วของแก๊สป้อนเข้าเพิ่มขึ้นจะมีเวลาการสัมผัสกันระหว่างของแข็งกับของไหลลดลง และเมื่ออัตราการป้อนกลับของอนุภาคของแข็งลดลง ส่งผลให้ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับลดลงเพราะแก๊สกับอนุภาคของแข็งจะทำอันตรกิริยาระหว่างกันลดลงและจากปฏิกิริยาการดูดซับ $CO_2(g)+H_2O(g)+K_2CO_3(s) \rightleftharpoons 2KHCO_3(s) + Heat$ การดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยอนุภาคตัวดูดซับของแข็ง K_2CO_3 จะขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณไอน้ำ จึงเป็นเหตุให้เมื่อเพิ่มปริมาณไอน้ำ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าสูงขึ้น ทั้งนี้เกิดขึ้นตามหลักของสมดุลปฏิกิริยาเคมี

Guo และคณะ [29] ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิภายในท่อดาวเนอร์ และอัตราการไหลของไอน้ำขาเข้าของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกทำให้คืนสภาพ จากนั้น ทำการหาสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคตัวดูดซับของแข็งที่เกิดขึ้นผลที่ได้พบว่า เมื่ออุณหภูมิภายในท่อดาวเนอร์สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 120 – 200 องศาเซลเซียสเพราะปฏิกิริยาการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับของแข็งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไอน้ำ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เพราะการเกิดปฏิกิริยาการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับของแข็งไม่ขึ้นกับปริมาณของไอน้ำ จากผลการทดลองยังได้ทำการหาสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับของแข็ง โดยอ้างอิงจากสมการของ Avrami–Erofeyev ซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในอนุภาคของแข็ง และ สมการ Arrhenius โดยจะหาสมการจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของระบบกับอัตราส่วนของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกทำให้คืนสภาพของตัวดูดซับของแข็งต่อปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับได้สมการที่เหมาะสมคือ

$$k = 3.67 \times 10^{11} \exp\left(\frac{-79.13}{RT}\right) \quad (2.19)$$

Kongkitisupchai และ Gidaspow [10] ทำการศึกษาผลของความดันที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน ผลที่ได้พบว่า ภายในท่อโรเตอร์เมื่อเพิ่มความดันของแก๊สป้อนเข้าให้สูงขึ้นเปรียบเสมือนการเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำในระบบ ซึ่งเป็นการเพิ่มสารตั้งต้นในกระบวนการทำให้อนุภาคของแข็งสามารถดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้นและมีอุณหภูมิกระบวนการสูงขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จากนั้น อนุภาคของแข็งที่ผ่านการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกส่งไปยังท่อดาวเนอร์ซึ่งจะทำการลดความดันเพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกจากตัวดูดซับของแข็ง และมีอุณหภูมิกระบวนการลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับของแข็งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

Abbasi และ Arastoopour [30] สร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อศึกษาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด โดยใช้สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพ (Deactivation model) ในการศึกษาผลการดูดซับ ทำการเปรียบเทียบสมการดูดซับแบบต่างๆ [9] และทำการเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองจริงของ Yi และคณะ [8] เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง จากผลการทดลองพบว่า การเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพทำนายร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากกว่าสมการดูดซับอื่นๆ เพราะสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วยแบบจำลองการเสื่อมสภาพเป็นสมการที่พัฒนาขึ้นให้มีผลของทั้งปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการและมีผลการเสื่อมสภาพของอนุภาคของแข็งจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นปกคลุมบนผิวของตัวดูดซับของแข็ง

Lee และคณะ [31] ได้ทำการหาจลนศาสตร์สำหรับกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการใช้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนตขนาด 20 ไมโครเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดที่อุณหภูมิระหว่าง 50 ถึง 70 องศาเซลเซียส และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สป้อนเข้าไม่เกินร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก และตรวจสอบผลที่ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis: TGA) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับด้วยอนุภาคของแข็ง และนำไปใช้ในการหาค่าต่างๆ ในสมการจลนศาสตร์ที่อธิบายด้วย $r = kf(X)y_{CO_2}^n$ โดย $f(X)$ คือฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าค่า k ที่เหมาะสมคือ -17.43 กิโลจูลต่อโมล และ n ที่เหมาะสมคือ 0.49

Mahdi และคณะ [32] ได้ทำการจำลองกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้แบบจำลองจลนศาสตร์ 2 ชนิด ได้แก่ แบบที่มีความเข้มข้นของไอน้ำในสมการ และแบบที่ไม่มีเข้มข้นของไอน้ำในสมการ และเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออก

ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบตกับผลการทดลองจริง พบว่า สมการจลนศาสตร์ที่มีความเข้มข้นของไอน้ำในสมการ ส่งผลให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น เพราะปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อไรเซอร์มีค่าลดลง เมื่อเทียบกับสมการจลนศาสตร์ที่ไม่มี ความเข้มข้นของไอน้ำในสมการ และสามารถทำนายผลของความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากกว่า

Leina และคณะ [33] ทำการสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบ 3 มิติแบบ Eulerian-Eulerian สำหรับการทำนายอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นของอนุภาคที่รูปทรงไม่ปกติในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบตแบบ 2 ภูมิภาค คือ แก๊สและอนุภาคของแข็ง โดยทำการรวมแบบจำลองแรงต้านของ Ganser และ Ergun เข้าด้วยกัน และทำการเทียบผลของความดันลด การขยายตัวของเบต และค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งตามแนวรัศมีของเครื่องปฏิกรณ์ของการทดลองจริง จากผลการจำลอง พบว่า ค่าต่างๆ ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองจริง และพบว่า แบบจำลองที่ใช้สามารถทำนายความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไชน์เซชัน และสัดส่วนปริมาตรของแข็งได้แม่นยำอย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 3

แบบจำลองคณิตศาสตร์และวิธีการสร้างแบบจำลองการไหล

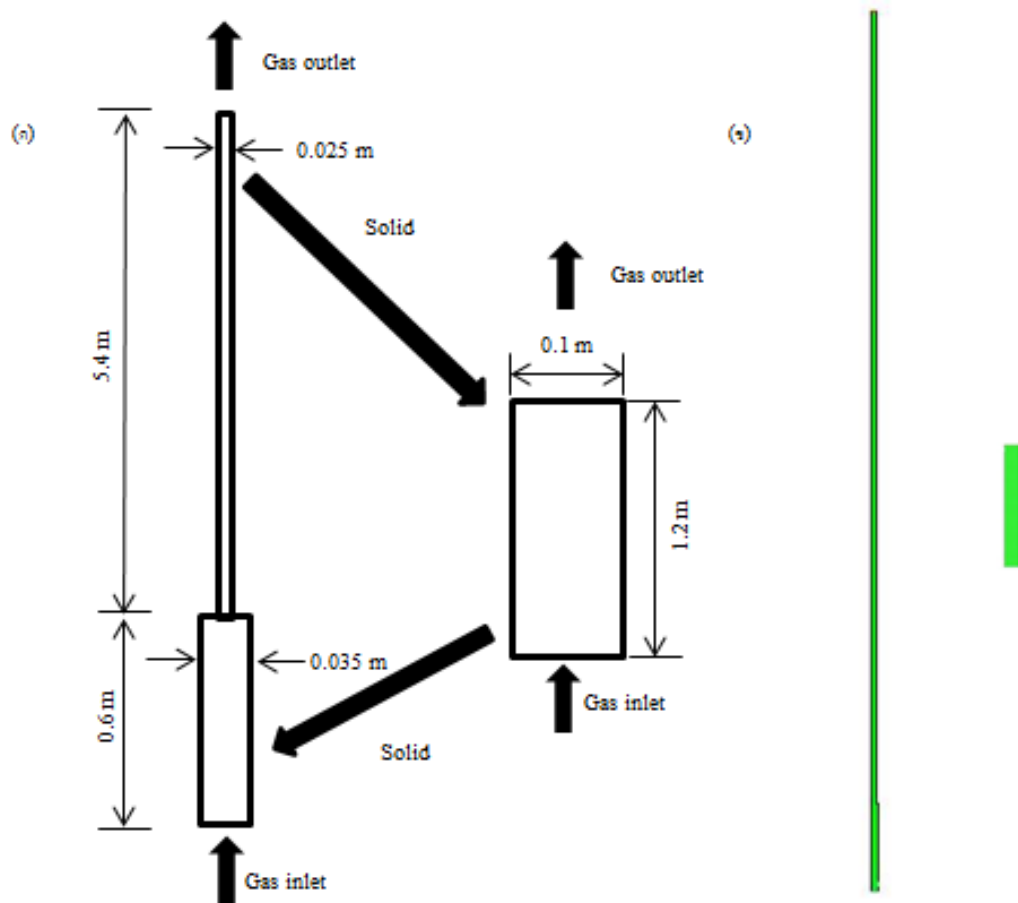
3.1 แบบจำลองการไหล

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อโรเซอรั และกระบวนการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ท่อโรเซอรั และท่อดาวเนอร์ ซึ่งได้มาจากข้อมูลการทดลองของ Yi และ คณะ (2007) โดยสมการที่ใช้ในแบบจำลอง ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน ทฤษฎีจลน์ของการไหลสำหรับอนุภาค และสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับ เพื่อใช้อธิบายอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในขอบเขตแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Gambit 2.2.30 เพื่อออกแบบท่อโรเซอรัขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.035 เมตร ความสูง 6.00 เมตร และท่อดาวเนอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร ความสูง 1.28 เมตร และใช้ ANSYS FLUENT 17.2 สำหรับจำลองปรากฏการณ์โดยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

3.2 การสร้างแบบจำลองการไหล

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Gambit 2.2.30 ในการสร้างแบบจำลองการไหลของท่อโรเซอรั และท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน ในระบบ 2 มิติ โดยอ้างอิงจากข้อมูลงานวิจัยของ Yi และคณะ (2007) ท่อโรเซอรัแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนที่ต้องการให้เกิดการผสมกันระหว่างอนุภาคกับของไหล หรือ Mixing zone มีความสูง 0.60 เมตร มีความกว้าง 0.035 เมตร และส่วนที่ต่อจาก Mixing zone คือส่วนที่ต้องการให้เกิดช่วงการไหลแบบความเร็วสูง หรือ Fast fluidization zone มีความสูง 5.40 เมตร มีความกว้าง 0.025 เมตร โดยแก๊สจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของท่อโรเซอรั และของแข็งจะถูกป้อนเข้าทางบริเวณด้านข้างของท่อโรเซอรัใน ส่วนของ Mixing zone มีขนาดความกว้างทางเข้า 0.03 เมตร ซึ่งทั้งแก๊สและของแข็งจะออกที่ทางออกด้านบนของท่อโรเซอรั จากนั้น สร้างเซลล์คำนวณทั้งหมด 4 ขนาดด้วยกัน ดังนี้ 5,000 10,000 15,000 และ 20,000 เซลล์ และท่อดาวเนอร์ มีความสูง 1.28 เมตร และมีความกว้าง 0.10 เมตร โดยแก๊สจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของท่อดาวเนอร์ มีขนาดทางเข้า 0.03 เมตร และจะออกทางด้านบนของท่อดาวเนอร์ ส่วนของแข็งจะถูกป้อนเข้าบริเวณด้านข้างของท่อดาวเนอร์มีขนาด

ทางเข้า 0.02 เมตร และออกทางด้านล่างของท่อดาวเนอร์ที่มีขนาด 0.04 เมตร จากนั้นสร้างเซลล์คำนวณทั้งหมด 4 ขนาดด้วยกัน ดังนี้ 4,000 8,000 12,000 และ 16,000 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3. 1 (ก) รูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายในระบบสองมิติของท่อไรเซอร์ และดาวเนอร์ (ข) ตัวอย่างเซลล์คำนวณที่ถูกสร้างด้วยโปรแกรม Gambit 2.2.30

3.3 การจำลองการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษากระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และกระบวนการทำให้คืนสภาพของตัวดูดซับของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบ 2 วัฏภาค คือ วัฏภาคแก๊สจะใช้เป็นแก๊สผสมระหว่าง คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และไนโตรเจน และวัฏภาคของแข็งจะใช้ตัวดูดซับคือ โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 98 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ท่อไรเซอร์จะเกิดกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยระบบจะป้อนแก๊สเข้าที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ และป้อนของแข็งเข้าที่บริเวณด้านข้างของท่อไรเซอร์ หลังจากนั้นของแข็ง และแก๊สจะออกจากระบบทางด้านบนของท่อไรเซอร์ ซึ่งสัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบของแก๊ส และของแข็งจากทางออกของท่อไรเซอร์จะเป็นค่าป้อนเข้าของท่อดาวเนอร์ ซึ่ง

จะถูกป้อนเข้าบริเวณด้านข้างของท่อดาวเนอร์ โดยบริเวณด้านล่างของท่อดาวเนอร์จะประกอบด้วยทางเข้าของแก๊สร้อนที่ประกอบด้วยไอน้ำ และไนโตรเจน และทางออกของแข็ง ซึ่งแก๊สจะออกจากระบบทางด้านบนของท่อดาวเนอร์ สำหรับการแก้ปัญหาจะเป็นการคำนวณแบบสองมิติ และในการคำนวณจะต้องทำการกำหนดค่าคุณสมบัติต่างๆ และภาวะขอบ (Boundary condition) รวมถึงค่าภาวะเริ่มต้น (Initial condition) เพื่อเป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นในการคำนวณ หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการแก้ปัญหาคาร์ไหล จากสมการการไหล และสมการเชิงสเกลาร์อื่นๆ โดยรายละเอียดของตัวแปรที่ใช้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2



ตารางที่ 3. 1 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการจำลองกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อ
ไรเซอร์

ของแข็งป้อนเข้า	แก๊สป้อนเข้า	ทางออก	ผนังท่อไรเซอร์
ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า = 21 กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสอง วินาที	ความเร็วแก๊สป้อนเข้า = 1 เมตรต่อวินาที		ไม่มีการสิ้นเปลือง สำหรับวัฏภาค แก๊ส
สัดส่วนปริมาตรของแข็ง ป้อนเข้า = 0.60	สัดส่วนปริมาตรของแข็ง ป้อนเข้า = 0.00	ความดัน ระบบ = 101,325 พาสคาล	
ฟลักซ์ของแก๊สตัวพา = 0.05 กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสอง วินาที			
สัดส่วนโดยมวลของ K_2CO_3 = 0.35 สัดส่วนโดยมวลของ $KHCO_3$ = 0.00 สัดส่วนโดยมวลของ Carbon = 0.65 ความหนาแน่นของของแข็ง = 1100 กิโลกรัมต่อเมตร กำลังสาม เส้นผ่านศูนย์กลางของ ของแข็ง = 98 ไมโครเมตร	สัดส่วนโดยมวลของ CO_2 = 0.10 สัดส่วนโดยมวลของ H_2O = 0.15 สัดส่วนโดยมวลของ N_2 = 0.75		
อุณหภูมิของแข็งป้อนเข้า = 80 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิของแข็งป้อนเข้า = 80 องศาเซลเซียส		

ตารางที่ 3. 2 รายละเอียดของตัวแปรที่ใช้ในการจำลองกระบวนการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อ
ดาวเนอร์

ของแข็งป้อนเข้า	แก๊สป้อนเข้า	ทางออก	ผนังท่อไรเซอร์
ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า = 100 กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสอง วินาที	ความเร็วแก๊สป้อนเข้า = 0.03 เมตรต่อวินาที	ความดัน ระบบ = 98,325 พาสคาล	ไม่มีการสิ้นเปลือง สำหรับวัฏภาค แก๊ส
สัดส่วนปริมาตรของแข็ง ป้อนเข้า = 0.60	สัดส่วนปริมาตรของแข็ง ป้อนเข้า = 0.00		
ฟลักซ์ของแก๊สตัวพา = 0.05 กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสอง วินาที			มีการสิ้นเปลือง บางส่วน สำหรับวัฏภาค ของแข็ง
สัดส่วนโดยมวลของ K_2CO_3 = 0.33 สัดส่วนโดยมวลของ $KHCO_3$ = 0.02 สัดส่วนโดยมวลของ Carbon = 0.65 ความหนาแน่นของของแข็ง = 1100 กิโลกรัมต่อเมตร กำลังสาม เส้นผ่านศูนย์กลางของ ของแข็ง = 98 ไมโครเมตร	สัดส่วนโดยมวลของ CO_2 = 0.00 สัดส่วนโดยมวลของ H_2O = 0.15 สัดส่วนโดยมวลของ N_2 = 0.85		
อุณหภูมิของแข็งป้อนเข้า = 200 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิของแข็งป้อนเข้า = 200 องศาเซลเซียส		

3.4 สมมติฐานสำหรับการพัฒนาแบบจำลองกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และกระบวนการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์

ในการศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นพัฒนาแบบจำลองในระบบสองมิติ สองภูมิภาค ได้แก่ แก๊ส และ ของแข็ง ในกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และกระบวนการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT 17.2 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรดำเนินการต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ มีตัวแปรตอบสนองคือ ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ มีตัวแปรตอบสนองคือ ความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากท่อดาวเนอร์ โดยมีสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองคือ

- แบบจำลองสองมิติ ในระบบคาร์ทีเซียน
- แก๊สในระบบประพืดตัวเป็นแก๊สอุดมคติแบบอัดไม่ได้
- การไหลของแก๊สทุกชนิดภายในระบบท่อไรเซอร์เป็นการไหลแบบความเร็วสูง และระบบท่อดาวเนอร์เป็นการไหลแบบพองแก๊ส
- อนุภาคของแข็งมีขนาด และความหนาแน่นคงที่
- เงื่อนไขขอบเขตของผนังท่อไรเซอร์ และท่อดาวเนอร์ คือ ไม่มีการสิ้นเปลืองสำหรับภูมิภาคแก๊ส และสิ้นเปลืองบางส่วนสำหรับภูมิภาคของแข็ง

3.5 สมการอนุรักษ์พื้นฐาน (Fluent, Inc, 2002)

3.5.1 สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

\vec{v} คือ ความเร็วของของไหล (เมตรต่อวินาที)

S_m คือ พจน์เพิ่มเติมกรณีที่มีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างภูมิภาค (กิโลกรัมต่อวินาที)

3.5.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + G_k + G_b + \vec{F} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.3)$$

เมื่อ	p	คือ ความดัน (พาสคัล)
	\bar{c}	คือ ความเค้นเทนเซอร์ (พาสคัล)
	\vec{g}	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
	\vec{F}	คือ แรงอื่นๆที่อาจเกิดจากแรงต้าน หรือแหล่งพลังงานอื่นๆ
	μ	คือ ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
	G_k	คือ พลังงานจลน์จากการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากเกรเดียนต์ของความเร็ว
	G_b	คือ พลังงานจลน์จากการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว

3.5.3 สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \vec{v}) = \nabla \cdot [(k + k_t)\nabla T] + S_h \quad (3.4)$$

เมื่อ

$$h = \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (3.5)$$

เมื่อ	h	คือ เอนทัลปี (จูลต่อเคลวิน)
	k	คือ ค่าการนำความร้อน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
	k_t	คือ ค่าการนำความร้อนที่เกิดจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (วัตต์ต่อเมตรเคลวิน)
	S_h	คือ ปริมาณความร้อนที่ได้จากแหล่งอื่นๆ ที่ถูกนิยามขึ้น

จากสมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงานจะถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการแก้สมการทั้งในส่วนของภูมิภาคแก๊ส และภูมิภาคของแข็ง

3.5.4 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ

3.5.4.1 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบภูมิภาคแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{g,i}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{g,i}) = -\nabla \cdot \vec{J}_{g,i} + R_{g,i} + S_{g,i} \quad (3.6)$$

3.5.4.2 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบภูมิภาคของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{s,i}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{s,i}) = -\nabla \cdot \vec{J}_{s,i} + R_{s,i} + S_{s,i} \quad (3.7)$$

เมื่อ	Y_i	คือ สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ (-)
	J_i	คือ ฟลักซ์การแพร่ขององค์ประกอบ (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)
	R_i	คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยา (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)

S_i คือ อัตราการเพิ่มขององค์ประกอบจากแหล่งอื่นๆ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)

3.5.5 สมการพลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็ง

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s \theta) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \theta) v_s \right] = (-\nabla P_s \bar{I} + \tau_s) \cdot \nabla v_s + \nabla \cdot (K_s \nabla \theta) - \gamma_s \quad (3.8)$$

เมื่อ θ คือ พลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็ง (เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง)

K_s คือ พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

γ_s คือ พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)

3.5.6 แบบจำลองสัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคของ EMMS (Energy Minimization Multi-Scale, β_{gs})

สำหรับ $\varepsilon_g \leq 0.74$

$$\beta_{gs} = 150 \frac{(1-\varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_g) \rho_g |v_g - v_s|}{d_p} \quad (3.9)$$

สำหรับ $\varepsilon_g > 0.74$

$$\beta_{gs} = \frac{3}{4} \frac{(1-\varepsilon_g) \varepsilon_g}{d_p} \rho_g |v_g - v_s| C_{D0} \omega(\varepsilon_g) \quad (3.10)$$

โดยสำหรับ $0.74 < \varepsilon_g \leq 0.82$

$$\omega(\varepsilon_g) = -0.5769 + \frac{0.0214}{4(\varepsilon_g - 0.7463)^2 + 0.0044} \quad (3.11)$$

สำหรับ $0.82 < \varepsilon_g \leq 0.97$

$$\omega(\varepsilon_g) = -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0040} \quad (3.12)$$

และสำหรับ $\varepsilon_g > 0.97$

$$\omega(\varepsilon_g) = -31.8295 + 32.8295 \varepsilon_g \quad (3.13)$$

3.5.7 สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Homogeneous (Park และคณะ, 2006)

$$R = \varepsilon_s k [K_2CO_3][CO_2][H_2O] \quad (3.14)$$

- เมื่อ k เท่ากับ 6×10^7 (เซนติเมตรกำลังหกต่อโมลกำลังสองวินาที)
 R คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (กิโลกรัมโมลต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)
 $[X]$ คือ ความเข้มข้นของสาร X (กิโลกรัมโมลต่อลูกบาศก์เมตร)

สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Homogeneous เป็นสมการที่อธิบายถึงสารทุกตัวในระบบ อยู่ในสภาวะเดียวกันหรือกลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งในสมการที่ (3.14) อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี จะขึ้นกับความเข้มข้นของไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และจากสมการ จะพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเกิดจากผลของความเข้มข้นของสารเคมีเป็นหลัก

3.5.8 สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Deactivation (Park และคณะ, 2006)

$$R = 2.44 \times 10^{-3} [CO_2] a \quad (3.15)$$

โดย
$$a = \exp \left[\frac{[1 - \exp(2.44 \times 10^{-3} \times \tau (1 - \exp(-1.42 \times 10^{-4} t)))]}{1 - \exp(-1.42 \times 10^{-4} t)} \right] \exp(-1.42 \times 10^{-4} t) \quad (3.16)$$

- เมื่อ τ คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นผิวที่สามารถดูดซับได้ต่ออัตราการไหลของแก๊ส (วินาทีต่อเมตร)

สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Deactivation เป็นสมการที่อธิบายถึงผลของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีที่ไปปกคลุมบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับ คาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ซึ่งทำให้ผลการจำลองที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น

3.5.9 สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Equilibrium (Kongkittisupchai และคณะ, 2013)

$$R = -k_{\text{reaction}} ([CO_{2,eq}] - [CO_2])([H_2O_{eq}] - [H_2O]) \quad (3.17)$$

โดย
$$k_{\text{reaction}} = 55.0 \exp\left(\frac{3609}{RT}\right) \quad (3.18)$$

$$[CO_{2,eq}] + [H_2O_{eq}] = \frac{P_{CO_2+H_2O,eq}}{RT} \quad (3.19)$$

สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Equilibrium เป็นสมการที่อธิบายถึงผลของปฏิกิริยาไปข้างหน้า และปฏิกิริยาย้อนกลับ ได้แก่ ปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยาการคืนสภาพตัวดูดซับ ซึ่งสมการนี้จะเป็นสมการที่ครอบคลุมทั้งในส่วนของท่อไรเซอร์ที่เกิดการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ และในส่วนของท่อดาวเนอร์ที่เกิดการคืนสภาพให้ตัวดูดซับ และจากสมการที่

(3.17) (3.18) และ (3.19) จะพบว่าสมการนี้จะขึ้นกับผลของอุณหภูมิระบบ ความดันระบบ และความเข้มข้นของสารเคมี ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั้งสิ้น

3.6 ขั้นตอนการทดลอง

ในการจำลองกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และกระบวนการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดในระบบสองมิติ โดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการสำเร็จรูป ANSYS FLUENT จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองกับการทดลองของ Yi และคณะ (2007) ได้แก่ ผลของความดันลดภายในท่อไรเซอร์ที่ตำแหน่งความสูงต่างๆ สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่งทางออกของท่อไรเซอร์ และสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่งทางออกของแก๊สของท่อดาวเนอร์ ซึ่งหลังจากที่ได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องแล้ว จะทำการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response surface methodology) สำหรับตัวแปรที่จะทำการศึกษาแยกเป็น ศึกษาผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้า อุณหภูมิระบบ สัดส่วนโดยปริมาตรของไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า และปริมาณของแข็งป้อนเข้าต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ โดยดูผลของตัวแปรตอบสนอง คือ สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่งทางออกของท่อไรเซอร์ และศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างความดัน ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และปริมาณของแข็งป้อนเข้าต่อการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และปริมาณของแข็งป้อนเข้าต่อการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ โดยดูผลของตัวแปรตอบสนอง คือ สัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ตำแหน่งทางออกของแก๊สในท่อดาวเนอร์ ซึ่งข้อมูลการจำลองในแต่ละการทดลองแสดงในตารางที่ 3.3 3.4 3.5 และ 3.6 ซึ่งช่วงที่ใช้ในการจำลองของตัวแปรดำเนินการ นำมาจากค่าสูงสุด และต่ำสุดจากการทดลองจริงของ Yi และคณะ (2007)

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลการจำลองในการหาเซลล์การคำนวณที่เหมาะสม

จำนวนการทดลอง	หอดทดลอง	จำนวนเซลล์การ คำนวณ (เซลล์)	ชั้นเวลา (วินาที)
1	ท่อไรเซอร์	5,000	0.001
2	ท่อไรเซอร์	10,000	0.001
3	ท่อไรเซอร์	15,000	0.001
4	ท่อไรเซอร์	20,000	0.001
5	ท่อดาวเนอร์	4,000	0.001
6	ท่อดาวเนอร์	8,000	0.001
7	ท่อดาวเนอร์	12,000	0.001
8	ท่อดาวเนอร์	16,000	0.001

หมายเหตุ ตารางที่ 3.3 ใช้ข้อมูลตัวแปรดำเนินการตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3. 4 ข้อมูลการจำลองผลของตัวแปรดำเนินการต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อ
ไรเซอร์

จำนวน การ ทดลอง	ความเร็วแก๊ส ป้อนเข้า (เมตรต่อ วินาที)	อัตราการป้อน ของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตร กำลังสองวินาที)	อุณหภูมิระบบ (องศาเซลเซียส)	สัดส่วนโดยมวลไอน้ำ ในแก๊สป้อนเข้า (-)
1	3	10	60	0.30
2	1	30	90	0.30
3	3	10	60	0.15
4	2	20	90	0.225
5	1	30	60	0.15
6	3	10	90	0.30
7	2	20	75	0.30
8	2	20	75	0.225
9	3	10	60	0.30
10	3	30	90	0.15
11	3	10	90	0.15
12	1	30	60	0.30
13	1	10	90	0.30
14	2	20	60	0.225
15	1	30	90	0.15
16	1	10	60	0.15
17	3	20	75	0.225
18	3	30	90	0.30
19	1	10	90	0.15
20	1	10	60	0.30
21	2	10	75	0.225

22	1	20	75	0.225
23	2	20	75	0.15
24	2	30	75	0.225
25	3	30	60	0.30

ตารางที่ 3. 5 ข้อมูลการจำลองผลของตัวแปรดำเนินการต่อการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อ
ดาวเนอร์ (กระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับโดยใช้อุณหภูมิ)

จำนวน การ ทดลอง	อุณหภูมิระบบ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (เมตรต่อวินาที)	อัตราการป้อนของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสอง วินาที)
1	160	0.600	100
2	160	0.315	100
3	160	0.315	80
4	200	0.315	100
5	200	0.030	80
6	120	0.315	100
7	160	0.030	100
8	120	0.030	80
9	120	0.030	120
10	200	0.600	80
11	200	0.030	120
12	120	0.600	120
13	200	0.600	120
14	120	0.600	80
15	160	0.315	120

ตารางที่ 3. 6 ข้อมูลการจำลองผลของตัวแปรดำเนินการต่อการทำให้คืนสภาพตัวดูดซับในท่อ
ดาวเนอร์ (กระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับโดยใช้ความดัน)

จำนวน การ ทดลอง	ความดันเกจ (พาสกาล)	ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (เมตรต่อวินาที)	อัตราการป้อนของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสอง วินาที)
1	-4,000	0.23	100
2	-4,000	0.13	100
3	-4,000	0.13	80
4	-5,000	0.13	100
5	-5,000	0.03	80
6	-3,000	0.13	100
7	-4,000	0.03	100
8	-3,000	0.03	80
9	-3,000	0.03	120
10	-5,000	0.23	80
11	-5,000	0.03	120
12	-3,000	0.23	120
13	-5,000	0.23	120
14	-3,000	0.23	80
15	-4,000	0.13	120

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ผลที่จะแสดงในส่วนนี้ ได้แก่ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสองมิติของกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยมีการคำนวณหาขนาดของเซลล์คำนวณที่เหมาะสม และเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียรคงตัว หลังจากนั้น นำผลการจำลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงของ Yi และคณะ [8] โดยมีการปรับเปลี่ยนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี คือ Homogeneous [9] Deactivation [9] และ Equilibrium [10] เพื่อให้การจำลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และครอบคลุมถึงกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ นอกจากนี้ ได้ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการดำเนินการที่มีผลต่อร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับในท่อไรเซอร์ และร้อยละโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากท่อดาวเนอร์ โดยผลแต่ละส่วนในงานวิจัยแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ผลของขนาดเซลล์คำนวณและเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียรคงตัว

สำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ขนาดของเซลล์คำนวณนั้นจะส่งผลอย่างมากต่อผลการคำนวณที่ได้จากการจำลอง ถ้าแบบจำลองที่ใช้ขนาดของเซลล์คำนวณที่มีความละเอียดต่ำ ค่าที่ได้จากการจำลองก็จะมีความแม่นยำต่ำ แต่เวลาที่ใช้ในการจำลองจะน้อย ส่วนแบบจำลองที่ใช้ขนาดของเซลล์คำนวณที่มีความละเอียดสูง ค่าที่ได้จากการจำลองก็จะมีความแม่นยำสูง แต่เวลาที่ใช้ในการจำลองจะมาก ดังนั้นการหาขนาดของเซลล์คำนวณที่มีความเหมาะสมในการจำลองจึงมีความจำเป็นอย่างมาก เพราะจะทำให้ได้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำสูงเหมือนกับขนาดของเซลล์คำนวณที่มีความละเอียดสูง และใช้เวลาในการจำลองน้อยเหมือนกับขนาดของเซลล์คำนวณที่มีความละเอียดต่ำ ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาผลของขนาดเซลล์คำนวณแตกต่างกัน 4 ค่า ในส่วนของท่อไรเซอร์ ได้แก่ 5,000 10,000 15,000 และ 20,000 เซลล์ และในส่วนของท่อดาวเนอร์ ได้แก่ 4,000 8,000 12,000 และ 16,000 เซลล์

รูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสูงของท่อไรเซอร์ที่ขนาดเซลล์คำนวณแตกต่างกัน 4 ค่า จากผลที่ได้จากการจำลองพบว่า ขนาดเซลล์คำนวณ 10,000 เซลล์ ให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกันกับผลการจำลองของขนาดเซลล์คำนวณ 15,000 และ 20,000 เซลล์ ซึ่งเป็นขนาดเซลล์คำนวณที่มีความละเอียดสูงกว่า และมีค่าแตกต่างจากผลที่ได้จากการจำลองด้วยขนาดเซลล์คำนวณ 5,000 เซลล์ซึ่งเป็นขนาดเซลล์คำนวณที่มีความละเอียดต่ำกว่า นั่นหมายความว่า ขนาดเซลล์คำนวณ 5,000 เซลล์ มีความละเอียด

ไม่เพียงพอต่อการใช้จำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในท่อไรเซอร์ ดังนั้นในการจำลองกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์จึงเลือกใช้ขนาดเซลล์คำนวณ 10,000 เซลล์ เนื่องจากให้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำ และใช้เวลาในการจำลองน้อย

รูปที่ 4.2 แสดงผลการจำลองค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสูงของท่อดาวเนอร์ที่ขนาดเซลล์คำนวณแตกต่างกัน 4 ค่า จากผลการจำลองพบว่า ขนาดเซลล์คำนวณ 8,000 เซลล์ ให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกันกับผลการจำลองของขนาดเซลล์คำนวณ 12,000 และ 16,000 เซลล์ และมีค่าแตกต่างจากผลที่ได้จากการจำลองด้วยขนาดเซลล์คำนวณ 4,000 เซลล์ ดังนั้น ในการจำลองกระบวนการคืบสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์จึงเลือกใช้ขนาดเซลล์คำนวณ 8,000 เซลล์ เนื่องจากให้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำ และใช้เวลาในการจำลองน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะพบว่าค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสูงของหอดูดจะมีค่าที่สวนทางกัน เพราะในส่วนของท่อไรเซอร์จะเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จึงลดลง ส่วนในท่อดาวเนอร์จะเกิดปฏิกิริยาการคืบสภาพตัวดูดซับ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่นำคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับ ทำให้เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจึงมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น

สำหรับการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง จะต้องมีการหาช่วงระยะเวลาที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเฉลี่ยค่าที่ได้จากการจำลอง ซึ่งต้องเป็นช่วงที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียรคงตัว จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณพบว่าในช่วงที่คาร์บอนไดออกไซด์ถูกป้อนเข้าในท่อ ไรเซอร์ ระบบจะยังมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง และจะค่อยๆ ลดลงตามเวลาเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการดูดซับระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และตัวดูดซับของแข็ง K_2CO_3 ขึ้น จนในช่วงเวลา 60 ถึง 80 วินาที ค่าเฉลี่ยสัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ เริ่มมีความปั่นป่วนภายในกระบวนการลดลง ดังนั้นในการจำลองของท่อไรเซอร์จึงเลือกใช้เวลาในการจำลองคือ 80 วินาที และค่าเฉลี่ยของผลการจำลองต่างๆ จะเฉลี่ยค่าจากช่วงเวลา 60 ถึง 80 วินาที

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณพบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการคืบสภาพตัวดูดซับ จึงทำให้ระบบมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น จนในช่วงเวลา 60 ถึง 80 วินาที ค่าเฉลี่ยสัดส่วนคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ เริ่มมีความปั่นป่วนภายในกระบวนการลดลง ดังนั้นในการจำลองของท่อดาวเนอร์จึงเลือกใช้เวลาในการจำลองคือ 80 วินาที และค่าเฉลี่ยของผลการจำลองต่างๆ จะเฉลี่ยค่าจากช่วงเวลา 60 ถึง 80 วินาที

4.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

จากผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อโรเซออร์ และกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ ผลการจำลองที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดลองจริงของ Yi และคณะ [8] โดยจะเริ่มจากการศึกษาในส่วนของท่อโรเซออร์เป็นอันดับแรก ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลของอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในท่อโรเซออร์คือ ความดันลดที่เกิดขึ้นต่อตำแหน่งความสูงต่างๆ ในท่อโรเซออร์ และเปรียบเทียบผลของการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์คือ ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อโรเซออร์ โดยรายละเอียดต่างๆ ของ ตัวแปรที่ใช้จะนำมาจากตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นค่าตัวแปรดำเนินการเดียวกันกับการทดลองจริง [8] จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงความดันลดที่เกิดขึ้นต่อตำแหน่งต่างๆ ในท่อโรเซออร์ (0.52 เมตร, 2.27 เมตร, 4.07 เมตร และ 5.87 เมตร ตามลำดับ) พบว่าผลที่ได้จากการจำลองมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับผลการทดลองจริง จึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการไหลในท่อโรเซออร์สามารถทำนายอุทกพลศาสตร์ได้ใกล้เคียงกันกับการทดลองจริง และจากรูปที่ 4.5 ยังพบว่าที่ตำแหน่งที่ 2.27 เมตร จะมีความดันลดเกิดขึ้นสูงกว่าตำแหน่งอื่นๆ เนื่องจากความดันลดที่ตำแหน่งนี้ รวมความดันลดอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของท่อโรเซออร์จากช่วง Mixing zone เป็นช่วง Fast fluidization zone ไปด้วย ทำให้ระบบมีความปั่นป่วนมากขึ้นในบริเวณนี้ จึงส่งผลให้มีความดันลดสูงกว่าบริเวณอื่นๆ หลังจากนั้นนำผลของอุทกพลศาสตร์นี้ไปจำลองร่วมกับปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จากผลการทดลองจริงของ Yi และคณะ [8] ได้ค่าสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อโรเซออร์อยู่ที่ 0.043 ซึ่งจากรูปที่ 4.1 จะพบว่าค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อโรเซออร์ของเซลล์คำนวณที่เหมาะสมจำนวน 10,000 เซลล์ โดยใช้สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Homogenous ให้ค่าใกล้เคียงกันกับผลการทดลองจริง จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ใช้สามารถทำนายการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างแม่นยำ หลังจากนั้นจึงนำแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมาทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองของสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบต่างๆ ได้แก่ สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Deactivation และสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Equilibrium จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสูงท่อโรเซออร์ พบว่าสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์แบบต่างๆ สามารถประยุกต์ใช้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อโรเซออร์ได้ดีพอๆกัน โดยสังเกตจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น และพบว่าที่บริเวณทางออกของท่อโรเซออร์มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกันกับผลการทดลองจริงของ Yi และคณะ [8] ทุกสมการอัตราการ

เกิดปฏิกิริยาเคมี นั้นหมายความว่าทุกสมการสามารถนำมาจำลองการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ได้อย่างมีความแม่นยำ หลังจากนั้นจะนำค่าสัดส่วนโดยมวลของทั้งวัฏภาคแก๊ส และวัฏภาคของแข็งที่ออกจากท่อไรเซอร์ นำมาเป็นค่าป้อนเข้าในท่อดาวเนอร์ต่อไป และใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Equilibrium เพราะเป็นเพียงสมการเดียวที่สามารถอธิบายได้ทั้งในส่วนของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ได้ หลังจากที่ได้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำจากท่อไรเซอร์แล้ว จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองในส่วนของท่อดาวเนอร์เป็นลำดับต่อมา โดยจะมุ่งเน้นที่ผลของการคืนสภาพตัวดูดซับเป็นหลัก ซึ่งค่าที่จะใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงคือ ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ โดยรายละเอียดตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองจะนำมาจากตารางที่ 3.2 จากผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.4 พบว่า ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์มีค่าประมาณ 0.30 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับการทดลองจริงของ Yi และคณะ [8] ซึ่งอยู่ที่ 0.25 ถึง 0.40 นั้นหมายความว่าค่าที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกันกับการทดลองจริง

4.3 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์

หลังจากได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ที่สามารถทำนายถึงผลของอุทกพลศาสตร์ และผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างแม่นยำ ในการนำไปประยุกต์สำหรับการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมต่างๆ นั้น สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ ค่าตัวแปรดำเนินการที่เหมาะสมในการดำเนินการของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งในงานวิจัยจะทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรดำเนินการทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ ความเร็วของแก๊สป้อนเข้า พลิกซ์ของแข็งป้อนเข้า อุณหภูมิระบบ และสัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองคือร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของท่อไรเซอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี Central Composite Design วิธีการออกแบบทดลองนี้จะทำให้ทราบถึงผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ และอาจได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการ โดยการจำลองค่าของตัวแปรดำเนินการทั้ง 4 ตัวแปร แสดงดังตารางที่ 3.4

จากตารางที่ 4.1 เป็นตารางแสดงผลการจำลองของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของท่อไรเซอร์ พบว่า ในกรณีศึกษาที่ 3 12 14 และ 25 ให้ค่าร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทั้ง 4 กรณีศึกษามีค่าอุณหภูมิระบบเท่ากันคือ 60 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่มีค่าอุณหภูมิระบบคือ 90 องศาเซลเซียส พบว่า ที่อุณหภูมิระบบ 90 องศาเซลเซียส ให้ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

ที่ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยอนุภาคของแข็ง (K_2CO_3) ที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน กล่าวคือ ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่ออุณหภูมิระบบมีค่าต่ำที่ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่จากตารางที่ 4.1 ยังไม่เพียงพอต่อการสรุปได้ว่าตัวแปรดำเนินการใดบ้างที่ส่งผลต่อร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องนำผลของตัวแปรดำเนินการที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า พลักซ์ของแข็งป้อนเข้า (B) อุณหภูมิระบบ (C) เป็นตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p-value ที่แสดงในตารางนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งตามทฤษฎีของการออกแบบการทดลองที่กำหนดค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวแปรใดที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ตัวแปรดำเนินการนั้นจะส่งผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง นั้นหมายความว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) สัดส่วนโดยมวลของไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า (D) และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ ไม่ส่งผลหรือส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อตัวแปรตอบสนอง แต่จากตารางที่ 4.2 จะสามารถบอกได้เพียงแค่ตัวแปรดำเนินการตัวใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเท่านั้น โดยไม่สามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการส่งผลในเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งต้องนำค่าที่ได้ในแต่ละการจำลองมาสร้างกราฟผลของตัวแปรดำเนินการจึงจะสามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการนั้นๆ ให้ผลเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของตัวแปรหลักต่อร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์จากแกนนอน เลข 1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าสูง เลข -1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าต่ำ และ เลข 0 แสดงถึงค่ากลางของตัวแปรดำเนินการ จากรูปที่ 4.7 (ก) แสดงถึงผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้าที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้ามีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเล็กน้อย จากตารางที่ 4.2 จะพบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้าไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าจะดูผลแนวโน้มอย่างคร่าวๆ จะเป็นดังนี้ เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้าสูงขึ้น จะทำให้อุณหภูมิของแข็ง และแก๊สเคลื่อนที่ไปยังทางออกของท่อไรเซอร์ได้เร็วขึ้น ส่งผลให้เวลาในการผสมกันระหว่างแก๊ส และของแข็งในท่อไรเซอร์ลดลง และยังทำให้เกิดบริเวณ Core annulus กว้างยิ่งขึ้น ส่งผลให้ร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง จากรูปที่ 4.7 (ข) แสดงถึงผลของพลักซ์ของแข็งป้อนเข้าที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า เมื่อพลักซ์ของแข็งป้อนเข้ามีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่ม พลักซ์ของแข็ง เปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการสัมผัสกันของแก๊ส และตัวดูดซับของแข็ง จึงทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ถูกดูดซับได้มากขึ้น จากรูปที่ 4.7 (ค) แสดงถึงผลของอุณหภูมิระบบที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า เมื่ออุณหภูมิระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละ

ละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เนื่องมาจากปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน นั่นหมายความว่า ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่ออุณหภูมิระบบมีค่าต่ำที่ยังคงอยู่ในช่วงที่ปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ จากรูปที่ 4.7 (ง) แสดงถึงผลของสัดส่วนโดยมวลไอน้ำในแก๊สป้อนเข้าที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ พบว่า เมื่อสัดส่วนโดยมวลไอน้ำในแก๊สป้อนเข้าสูงขึ้น ทำให้ร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากตารางที่ 4.2 จะพบว่า สัดส่วนโดยมวลไอน้ำในแก๊สป้อนเข้าไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าจะดูผลแนวโน้มอย่างคร่าวๆ จะเป็นดังนี้ เมื่อไอน้ำในระบบสูงขึ้น ส่งผลให้ไอน้ำมาเกาะที่พื้นผิวของตัวดูดซับของแข็งมากขึ้น ซึ่งไอน้ำจะเหนี่ยวนำให้คาร์บอนไดออกไซด์มาสัมผัสกับตัวดูดซับได้ดียิ่งขึ้น จึงส่งผลให้ร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเล็กน้อย

เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองไปใช้ออกแบบการทดลองจริงต่อไป จึงได้ทำการหาแบบจำลองการถดถอย (Regression model) และนำมาสร้างกราฟคอนทัวร์สามมิติ สำหรับสมการแบบจำลองการถดถอยของร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงในสมการที่ 4.1

$$Y = 64.02865 - 5.53336X_A + 13.31597X_B - 26.0317X_C + 3.276809X_D - 2.9642X_A^2 - 15.372X_B^2 + 3.4175X_C^2 + 4.2635X_D^2 + 0.0193X_A X_B + 4.839X_A X_C - 1.2728X_A X_D + 5.007X_B X_C + 8.249X_B X_D + 2.107X_C X_D \quad (4.1)$$

และสมการแบบจำลองการถดถอยของร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เฉพาะตัวแปรดำเนินการที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงในสมการที่ 4.2

$$Y = 64.02865 + 13.31597X_B - 26.0317X_C \quad (4.2)$$

เมื่อ Y คือ ร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์

X_A คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร A

X_B คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร B

X_C คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร C

X_D คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร D

เมื่อนำสมการแบบจำลองการถดถอยมาสร้างกราฟพื้นผิวดตอบสนอง (Response surface) ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งแสดงพื้นผิวดตอบสนองของร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้า และอุณหภูมิระบบแตกต่างกัน พบว่า เมื่อต้องการให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น จะต้องออกแบบระบบท่อไรเซอร์ให้มีการป้อนฟลักซ์ของแก๊สให้มีค่าสูง โดยยังสามารถดำเนินการแบบต่อเนื่องได้ และทำให้อุณหภูมิระบบมีค่าต่ำที่สุดในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ จึงจะทำให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงที่สุด

4.4 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยอุณหภูมิในท่อดาวเนอร์

หลังจากได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสำหรับกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ที่สามารถใช้จำลองผลของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์อย่างแม่นยำ และได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ สำหรับในการใช้งานในอุตสาหกรรม ปัจจุบันที่มีผลต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์พลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนนอกจากภาวะดำเนินการที่เหมาะสมในท่อไรเซอร์ คือ การคืนสภาพตัวดูดซับด้วยอุณหภูมิในท่อดาวเนอร์ เพื่อให้ตัวดูดซับสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยจะทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรดำเนินการทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ความเร็วของแก๊สป้อนเข้า พลิกซ์ของแก๊สป้อนเข้า และอุณหภูมิระบบ ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง คือ สัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากท่อดาวเนอร์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี Central Composite Design วิธีการออกแบบทดลองนี้จะทำให้ทราบถึงผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ และได้ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการ โดยการจำลองค่าของตัวแปรดำเนินการทั้ง 3 ตัวแปร แสดงดังตารางที่ 3.5

จากตารางที่ 4.3 เป็นตารางแสดงผลการจำลองของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของท่อดาวเนอร์ พบว่า ในกรณีศึกษาที่ 11 ให้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของท่อดาวเนอร์ที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 3 ให้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของท่อดาวเนอร์ต่ำที่สุด พบว่า กรณีที่ 11 มีค่าอุณหภูมิระบบสูงกว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้าต่ำกว่า และพลิกซ์ของแก๊สป้อนเข้าสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการคืนสภาพตัวดูดซับที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน กล่าวคือ ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่ออุณหภูมิระบบมีค่าสูงที่ยังไม่เกินในช่วงที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา และด้วยความเร็วแก๊สป้อนเข้าที่ต่ำทำให้แก๊สร้อนมีเวลาสัมผัสกับตัวดูดซับนานขึ้น แต่จากตารางที่ 4.3 ยังไม่เพียงพอต่อการสรุปได้ว่าตัวแปรดำเนินการใดบ้างที่ส่งผลต่อค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของท่อดาวเนอร์อย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องนำผลของตัวแปรดำเนินการที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อศึกษาหาผลของตัวแปรดำเนินการ และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต่อไป

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (B) เป็นตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์อย่างมีนัยสำคัญ และมีความสัมพันธ์แบบสมการกำลังสอง (B^2) เนื่องจากค่า p-value ที่แสดงในตารางนั้นมี

ค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งตามทฤษฎีของการออกแบบการทดลองที่กำหนดค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวแปรใดที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ตัวแปรดำเนินการนั้นจะส่งผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง นั้นหมายความว่า อุณหภูมิระบบ(A) พลิกซ์ของแก๊สป้อนเข้า (C) และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ ไม่ส่งผลหรือส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อตัวแปรตอบสนอง แต่จากตารางที่ 4.4 จะสามารถบอกได้เพียงแค่ตัวแปรดำเนินการตัวใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเท่านั้น โดยไม่สามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการส่งผลในเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งต้องนำค่าที่ได้ในแต่ละการจำลอง มาสร้างกราฟผลของตัวแปรดำเนินการจึงจะสามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการนั้นๆ ให้ผลเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 4.9 แสดงผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ จากแกนนอน เลข 1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าสูง เลข -1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าต่ำ และ เลข 0 แสดงถึงค่ากลางของตัวแปรดำเนินการ จากรูปที่ 4.9 (ก) แสดงถึงผลของอุณหภูมิระบบที่ส่งผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออก พบว่า เมื่ออุณหภูมิระบบสูงขึ้นทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับมีแนวโน้มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจากตารางที่ 4.4 จะพบว่า อุณหภูมิระบบไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลแนวโน้มอย่างคร่าวๆ จะเป็นดังนี้ ปฏิกริยาการคืนสภาพตัวดูดซับเป็นปฏิกริยาดูดความร้อน นั้นหมายความว่า ปฏิกริยาจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิระบบมีค่าสูงขึ้นแต่ไม่เกินช่วงที่เหมาะสมแก่การเกิดปฏิกริยา จากรูปที่ 4.9 (ข) แสดงถึงผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้าที่ส่งผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ พบว่า เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้ามีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำลง เพราะความเร็วแก๊สป้อนเข้าที่แตกต่างกัน จะส่งผลต่อเวลาที่แก๊สสัมผัสกับตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ ถ้าความเร็วแก๊สป้อนเข้ามีค่าต่ำ จะส่งผลให้แก๊สร้อนสัมผัสกับตัวดูดซับได้นานขึ้น และเกิดปฏิกริยาได้ดีขึ้น และจากรูปที่ 4.9 (ค) แสดงถึงผลของพลิกซ์ของแก๊สป้อนเข้าที่ส่งผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ พบว่า เมื่อพลิกซ์ของแก๊สป้อนเข้ามีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้สัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 4.4 จะพบว่า พลิกซ์ของแก๊สป้อนเข้าไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลแนวโน้มอย่างคร่าวๆ จะเป็นดังนี้ การเพิ่มพลิกซ์ของแก๊ส เปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการสัมผัสกันของแก๊ส และตัวดูดซับของแก๊ส จึงทำให้เกิดการปล่อยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงขึ้น

เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองไปใช้ออกแบบการทดลองจริง จะทำการหาแบบจำลองการถดถอย (Regression model) และนำมาสร้างกราฟคอนทัวร์สามมิติ สำหรับสมการแบบจำลองการถดถอยของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ แสดงในสมการที่

$$Y = 0.072596 + 0.0041X_A - 0.1236X_B + 0.01368X_C + 0.0159X_A^2 + 0.1186X_B^2 + 0.02109X_C^2 - 0.00393X_AX_B + 0.0003X_AX_C - 0.00052X_BX_C \quad (4.3)$$

และสมการแบบจำลองการถดถอยของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์เฉพาะตัวแปรดำเนินการที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงในสมการที่ 4.4

$$Y = 0.072596 - 0.1236X_B + 0.1186X_B^2 \quad (4.4)$$

เมื่อ Y คือ สัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์

X_A คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร A

X_B คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร B

X_C คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร C

เมื่อนำสมการแบบจำลองการถดถอยมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงถึงพื้นผิวตอบสนองของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้ากับอุณหภูมิระบบแตกต่างกัน และที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้ากับพลังค์ของแก๊สป้อนเข้าแตกต่างกัน พบว่า ถ้าต้องการให้คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับมากขึ้น จะต้องออกแบบระบบท่อดาวเนอร์ให้มีการป้อนแก๊สด้วยความเร็วแก๊สที่มีค่าประมาณความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไอเซชัน และพลังค์ของแก๊สที่มีค่าสูงเพียงพอ และอุณหภูมิระบบต้องมีค่าสูงที่สุดในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาการคืนสภาพตัวดูดซับ จึงจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์หลุดออกจากตัวดูดซับได้สูงที่สุด

4.5 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดันในท่อดาวเนอร์

หลังจากได้ทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ด้วยอุณหภูมิแล้ว ยังคงมีอีกหนึ่งวิธีที่ใช้ในการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยเช่นกัน คือ การคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดัน ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการประยุกต์จากสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ในส่วนของการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยอุณหภูมิ โดยใช้กฎของแก๊สในอุดมคติ เพื่อศึกษาถึงผลของการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดันอย่างง่าย เนื่องจากยังไม่มีงานวิจัยที่ทำการศึกษหาสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดัน ในงานวิจัยจะทำการศึกษาถึงผลของตัวแปรดำเนินการทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ความเร็วของแก๊สป้อนเข้า พลังค์ของแก๊สป้อนเข้า และความดันเกจ ที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองคือสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากท่อดาวเนอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธี Central Composite Design วิธีการออกแบบทดลองนี้จะทำให้ทราบถึงผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ อันตรกิริยาระหว่างตัวแปรดำเนินการ และได้

ความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งของตัวแปรดำเนินการ โดยการจำลองค่าของตัวแปรดำเนินการทั้ง 3 ตัวแปร แสดงดังตารางที่ 3.6

จากตารางที่ 4.5 เป็นตารางแสดงผลการจำลองของตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของท่อดาวเนอร์ด้วยความดัน พบว่า ในกรณีศึกษาที่ 11 ให้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของท่อดาวเนอร์ที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับกรณีศึกษาที่ 14 ให้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของท่อดาวเนอร์ต่ำที่สุด พบว่า กรณีที่ 11 มีความดันระบบเข้าใกล้สภาวะวิกฤตสูงกว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้าต่ำกว่า และฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้าสูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับกฎของแก๊สในอุดมคติ กล่าวคือ ความดัน แปรผันตรงกับปริมาณแก๊สในระบบ เมื่อความดันในระบบมีค่าต่ำ เปรียบเหมือนปริมาณแก๊สในระบบมีค่าต่ำด้วย ดังนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะออกจากตัวดูดซับมากขึ้น เพื่อให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล ตามกฎการแพร่ และด้วยความเร็วแก๊สป้อนเข้าที่ต่ำทำให้แก๊สมีเวลาสัมผัสกับตัวดูดซับนานขึ้น แต่จากตารางที่ 4.5 ยังไม่เพียงพอต่อการสรุปได้ว่าตัวแปรดำเนินการใดบ้างที่ส่งผลต่อค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของท่อดาวเนอร์อย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องนำผลของตัวแปรดำเนินการที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) เพื่อศึกษาหาผลของตัวแปรดำเนินการ และอันตรกิริยาระหว่างตัวแปรต่อไป

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ด้วยความดัน พบว่า ความดันเกจ (A) ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (B, B²) และอันตรกิริยาระหว่างความดันระบบ และความเร็วแก๊สป้อนเข้า (AB) เป็นตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า p-value ที่แสดงในตารางนั้นมีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งตามทฤษฎีของการออกแบบการทดลองที่กำหนดค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวแปรใดที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ตัวแปรดำเนินการนั้นจะส่งผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง นั้นหมายความว่า ฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้า (C) และอันตรกิริยาของฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้า ไม่ส่งผล หรือส่งผลเล็กน้อยต่อตัวแปรตอบสนอง แต่จากตารางที่ 4.6 จะสามารถบอกได้เพียงแค่ตัวแปรดำเนินการตัวใดมีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเท่านั้น โดยไม่สามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการส่งผลในเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งต้องนำค่าที่ได้ในแต่ละการจำลองมาสร้างกราฟผลของตัวแปรดำเนินการจึงจะสามารถบอกได้ว่าตัวแปรดำเนินการนั้นๆ ให้ผลเชิงบวกหรือเชิงลบต่อตัวแปรตอบสนอง

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ด้วยความดัน จากแกนนอน เลข 1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าสูง เลข -1 แสดงถึงค่าของตัวแปรดำเนินการค่าต่ำ และ เลข 0 แสดงถึงค่ากลางของตัวแปรดำเนินการจากรูปที่ 4.12 (ก) แสดงถึงผลของความดันเกจที่ส่งผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณ

ทางออก พบว่า เมื่อความดันเกจติดลบสูงขึ้นทำให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับได้สูงขึ้น เพราะเมื่อความดันเกจติดลบสูงขึ้น เปรียบเสมือนมีปริมาณสารในระบบต่ำลงตามหลักของสมการแก๊สในอุดมคติ ซึ่งในกรณีศึกษาคือปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และจากกฎการแพร่กล่าวคือสารจะแพร่จากความเข้มข้นสูงไปยังที่ที่ความเข้มข้นต่ำ ส่งผลให้ยังความเข้มข้นต่างกันมากขึ้นก็จะเกิดการแพร่ได้สูงขึ้น จากรูปที่ 4.12 (ข) แสดงถึงผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้าที่ส่งผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ พบว่า เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้ามีค่าสูงจะส่งผลให้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำลง เพราะความเร็วแก๊สป้อนเข้าที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อเวลาที่แก๊สสัมผัสกับตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ ถ้าความเร็วแก๊สป้อนเข้ามีค่าต่ำ จะส่งผลให้แก๊สสัมผัสกับตัวดูดซับได้นานขึ้น และเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น และจากรูปที่ 4.13 เป็นคอนทัวร์เปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีในกรณีศึกษาที่ 4 และ 11 ซึ่งจะเป็นการเปรียบเทียบผลของความเร็วก๊าซป้อนเข้าที่แตกต่างกัน แต่ความดันเกจคงที่ พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการคืนสภาพตัวดูดซับมีค่าใกล้เคียงกันโดยสังเกตได้จากแถบสี และมีค่ามากกว่าผลของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ทั้ง 2 กรณีศึกษา ดังนั้น ผลที่ทำให้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเปลี่ยนแปลง เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง คือเวลาที่แก๊สสัมผัสกับอนุภาคของแข็งแตกต่างกัน จากรูปที่ 4.12 (ค) แสดงถึงผลของ ฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้าที่ส่งผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ พบว่า เมื่อฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้ามีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้สัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกมีแนวโน้มสูงขึ้นด้วย จากตารางที่ 4.6 จะพบว่า ฟลักซ์ของแก๊สป้อนเข้าไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ แต่ถ้าจะดูผลแนวโน้มอย่างคร่าวๆ จะเป็นดังนี้ การเพิ่มฟลักซ์ของแก๊ส เปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการสัมผัสกันของแก๊ส และตัวดูดซับของแข็ง จึงทำให้เกิดการปล่อยปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ได้สูงขึ้น จากรูปที่ 4.14 แสดงถึงผลของอันตรกิริยาระหว่างความดันระบบ และความเร็วแก๊สป้อนเข้าที่มีผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ ซึ่งถ้าตัวแปรดำเนินการมีอันตรกิริยาระหว่างกัน เส้นกราฟจะเกิดการตัดกัน แต่เพราะค่า p-value มีค่าใกล้เคียงกับ 0.05 จึงเป็นเหตุให้เส้นกราฟตัดกันนอกช่วงที่ทำการพิจารณา หรือ เป็นอันตรกิริยาแบบอ่อน

เพื่อนำผลที่ได้จากการจำลองไปใช้ออกแบบการทดลองจริง จะทำการหาแบบจำลองการถดถอย (Regression model) และนำมาสร้างกราฟคอนทัวร์สามมิติ สำหรับสมการแบบจำลองการถดถอยของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ แสดงในสมการที่ 4.5

$$Y = 0.019984 + 0.01598X_A - 0.02731X_B + 0.00371X_C + 0.00124X_A^2 + 0.0189X_B^2 + 0.000694X_C^2 - 0.00636X_A X_B + 0.00216X_A X_C - 0.00229X_B X_C \quad (4.5)$$

และสมการแบบจำลองการถดถอยของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์เฉพาะตัวแปรดำเนินการที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ แสดงในสมการที่ 4.6

$$Y = 0.019984 + 0.01598X_A - 0.02731X_B + 0.0189X_B^2 - 0.00636X_A X_B \quad (4.6)$$

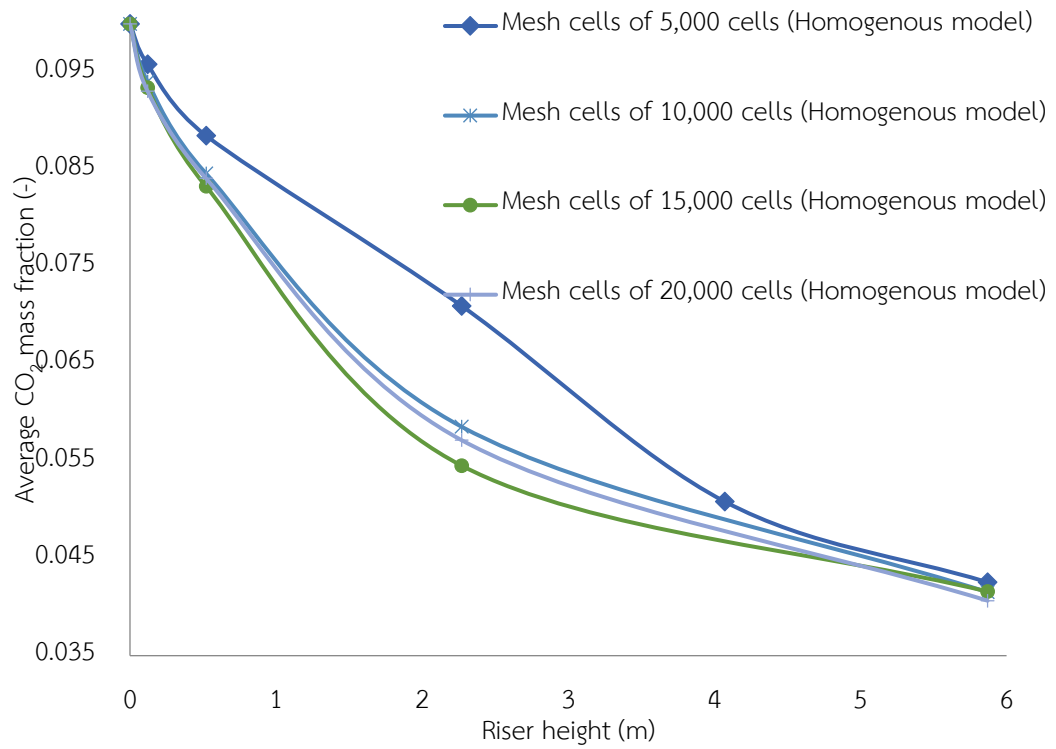
เมื่อ Y คือ สัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์

X_A คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร A

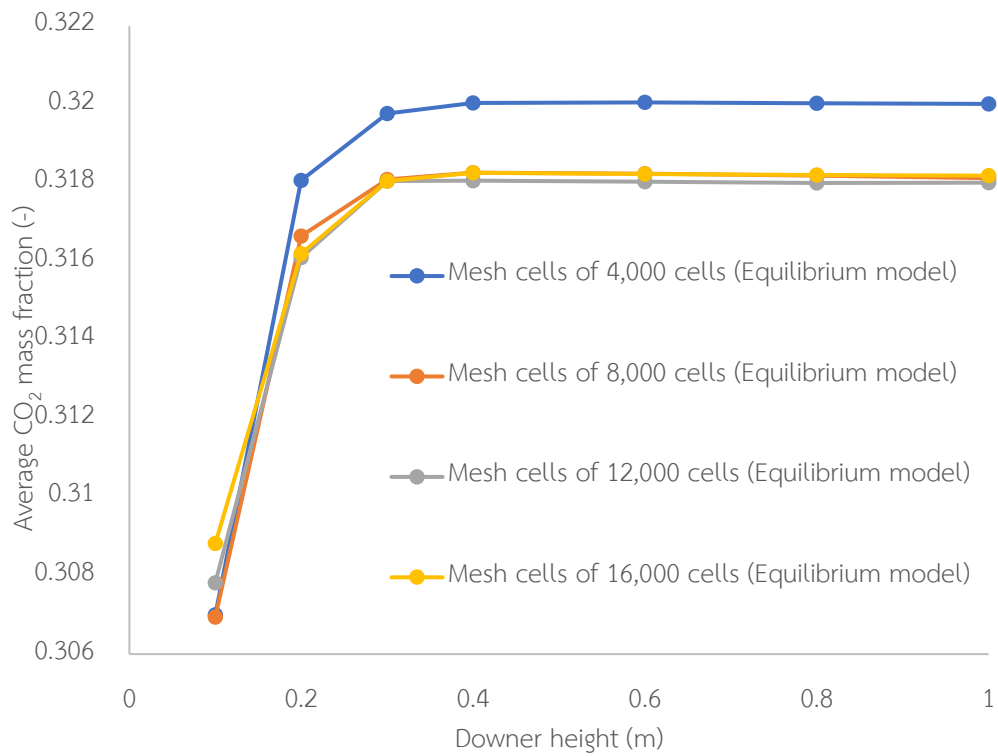
X_B คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร B

X_C คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร C

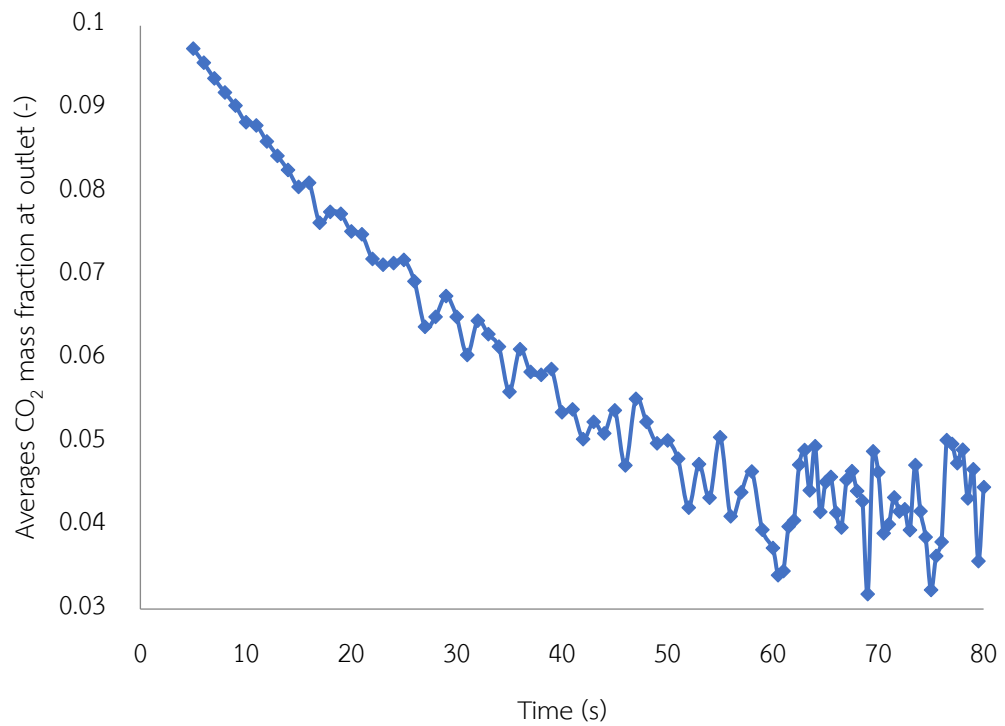
เมื่อนำสมการแบบจำลองการถดถอยมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) ดังแสดงในรูปที่ 4.15 แสดงถึงพื้นผิวตอบสนองของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้ากับความดันระบบแตกต่างกัน พบว่า ถ้าต้องการให้คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับมากขึ้น จะต้องออกแบบระบบท่อดาวเนอร์ให้มีการป้อนแก๊สด้วยความเร็วแก๊สที่มีค่าประมาณความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไอเซชัน และความดันเกจต้องมีค่าติดลบสูงที่สุดที่เครื่องปฏิบัติการสามารถปรับได้จึงจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์หลุดออกจากตัวดูดซับได้สูงที่สุด



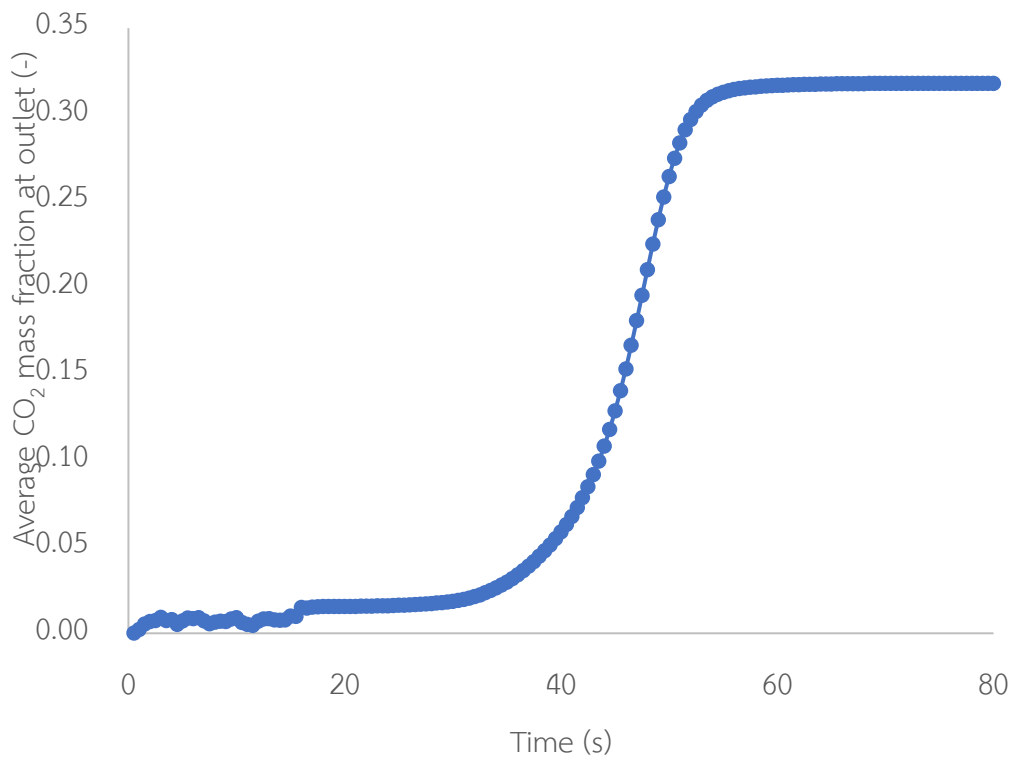
รูปที่ 4. 1 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสูงของท่อโรเซอร์ที่พื้นที่การคำนวณต่างๆ



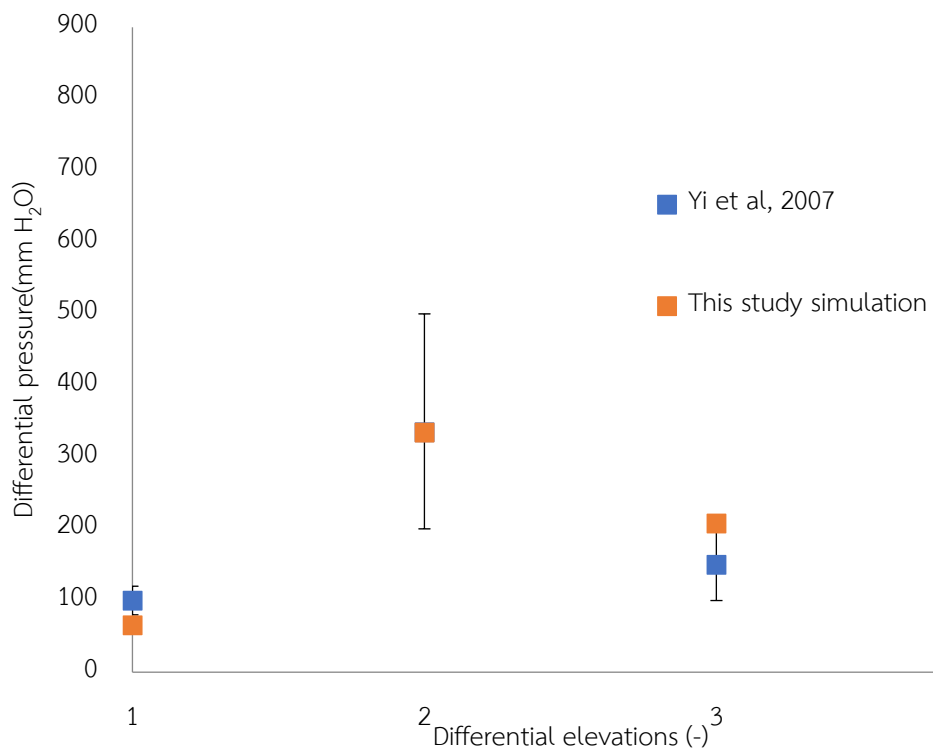
รูปที่ 4. 2 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสูงของท่อดาวเนอร์ที่พื้นที่การคำนวณต่างๆ



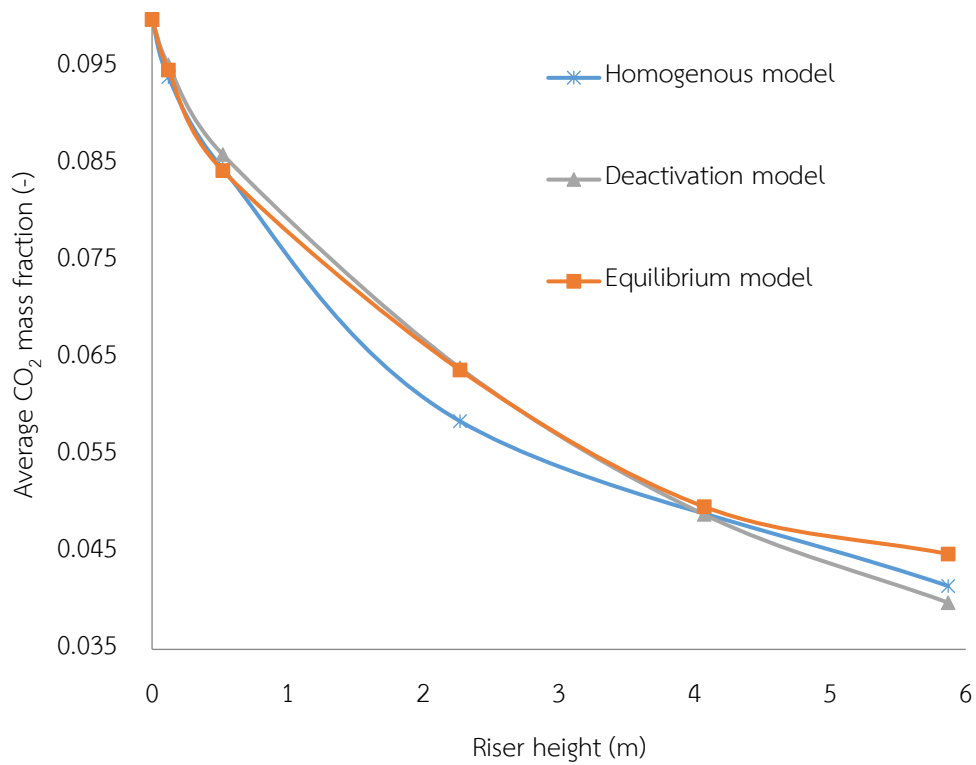
รูปที่ 4. 3 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อโรเตอร์ต่อเวลาที่ใช้ในการจำลองที่ขนาดเซลล์คำนวณ 10,000 เซลล์



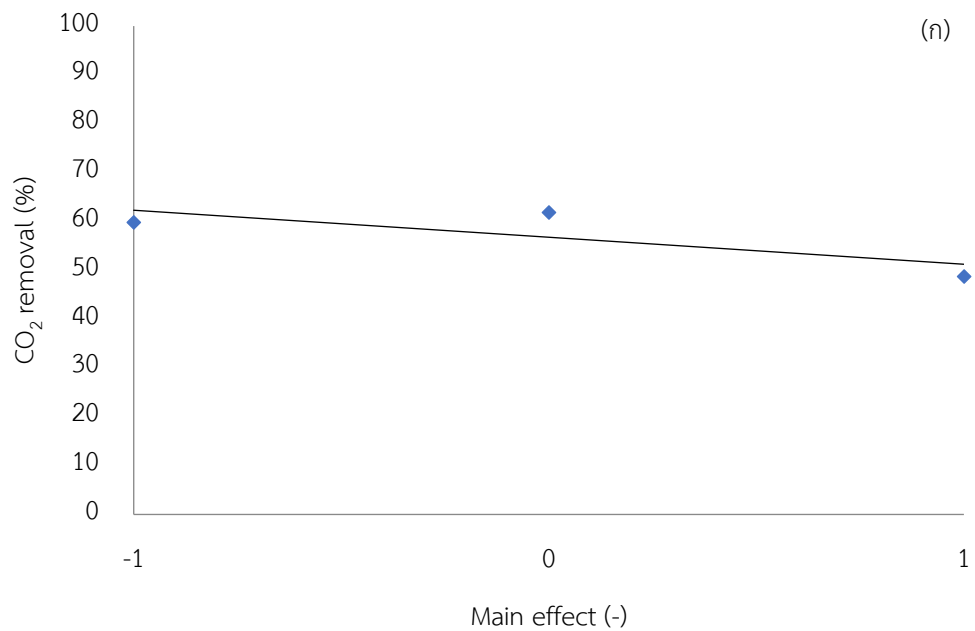
รูปที่ 4. 4 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ต่อเวลาที่ใช้ในการจำลองที่ขนาดเซลล์คำนวณ 8,000 เซลล์

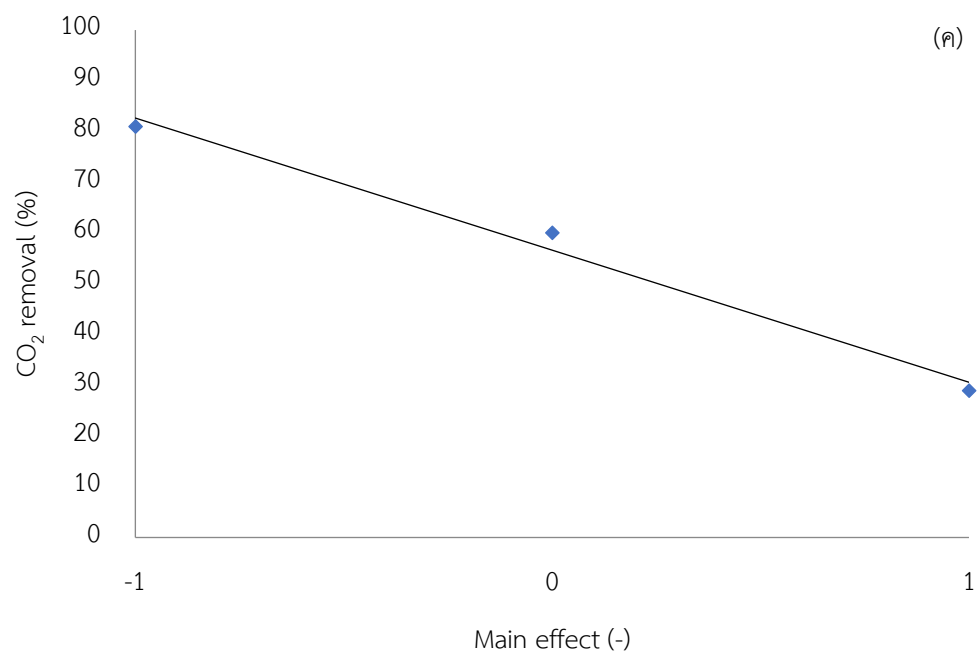
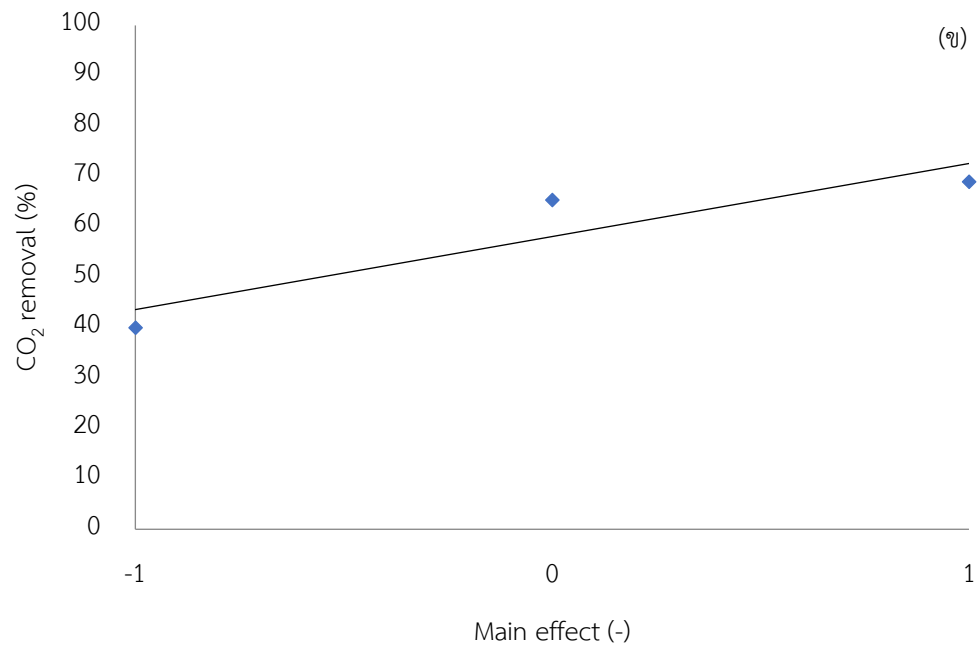


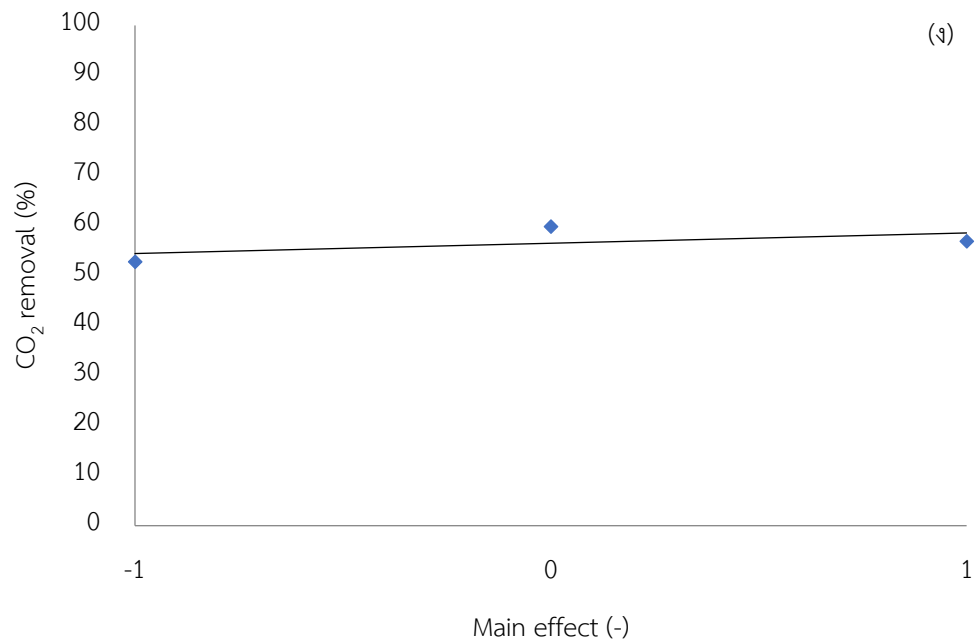
รูปที่ 4. 5 ความดันลดต่อตำแหน่งความสูงในท่อไรเซอร์ (0.52 เมตร, 2.27 เมตร, 4.07 เมตร และ 5.87 เมตร ตามลำดับ)



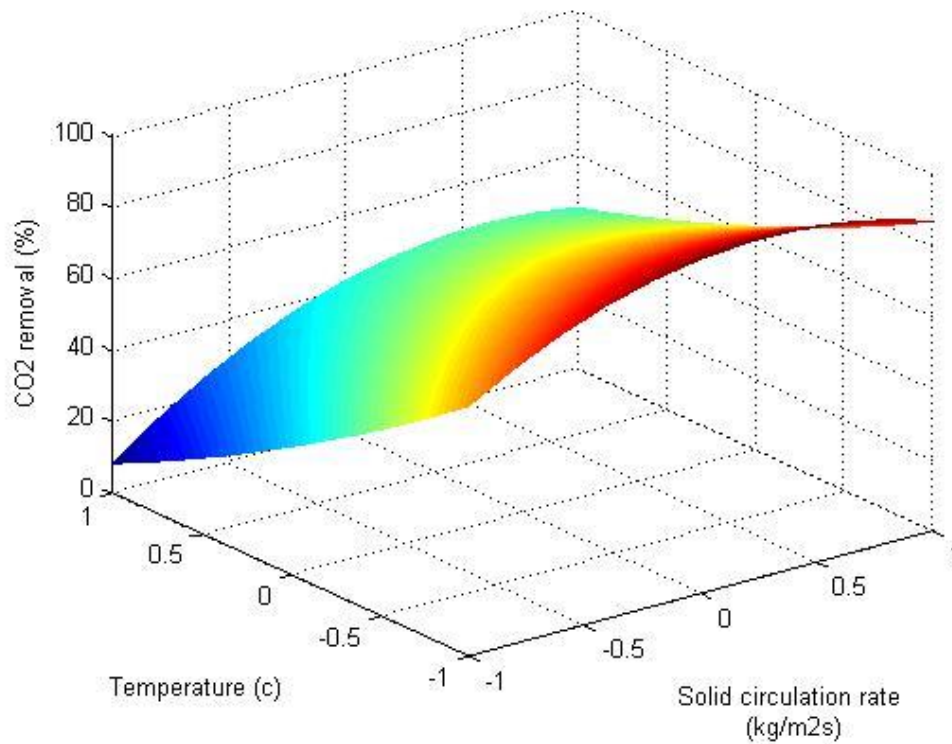
รูปที่ 4. 6 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อความสูงของท่อโรเซอร์ที่ขนาดเซลล์คำนวณ 10,000 เซลล์ เวลาในการจำลอง 80 วินาที



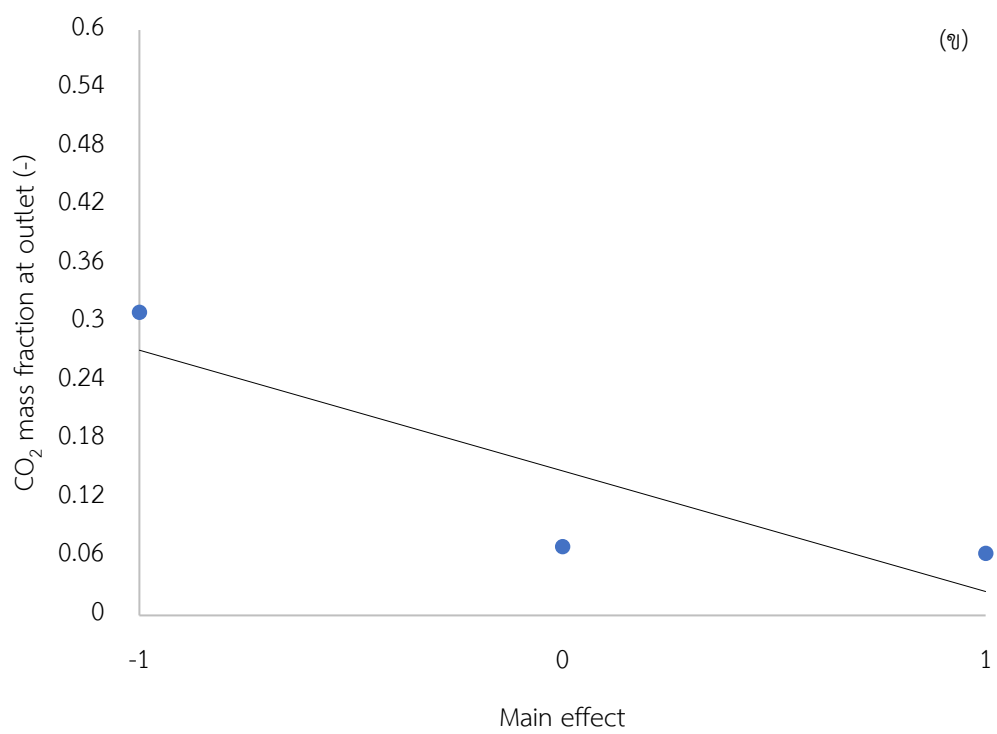
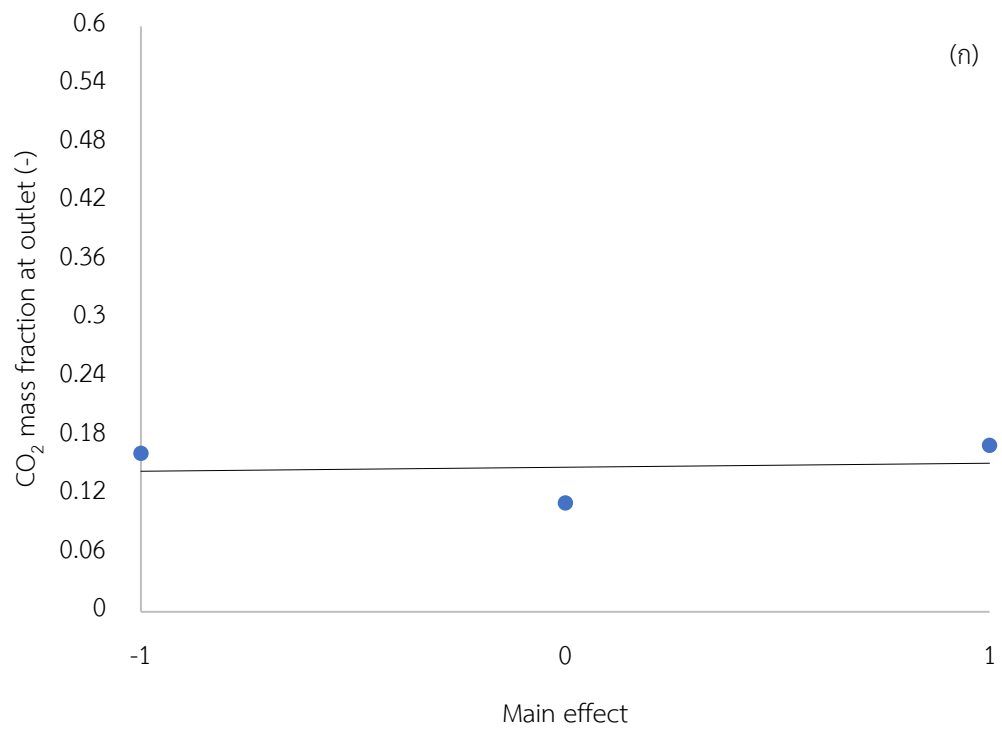


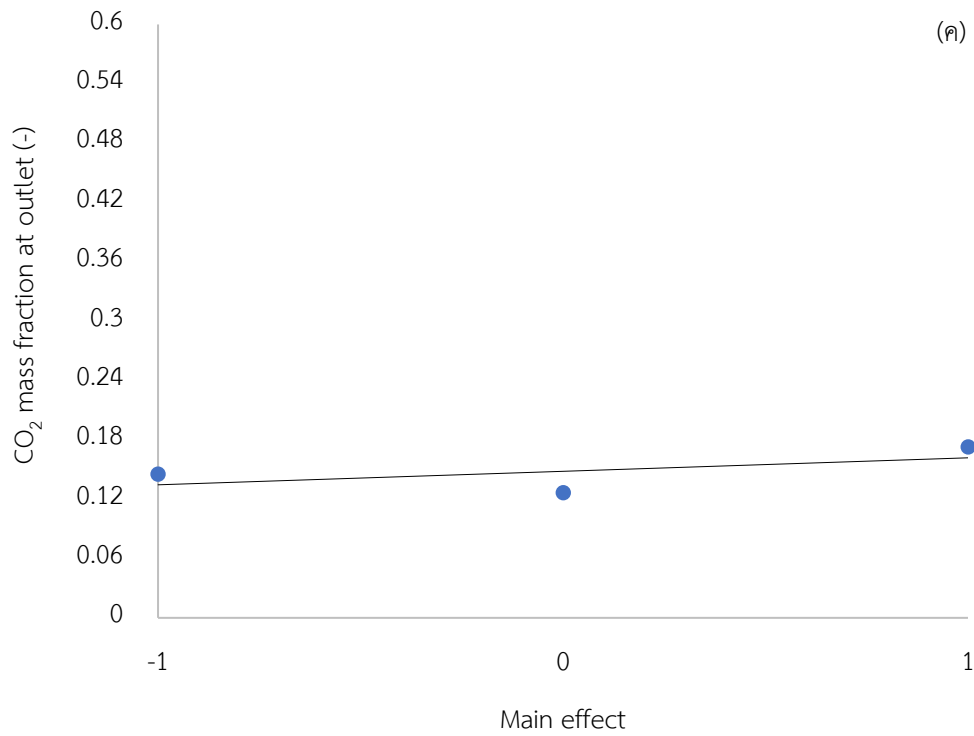


รูปที่ 4. 7 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (ก) ผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ข) ผลของฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า (ค) ผลของอุณหภูมิระบบ (ง) ผลของสัดส่วนโดยมวลไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า

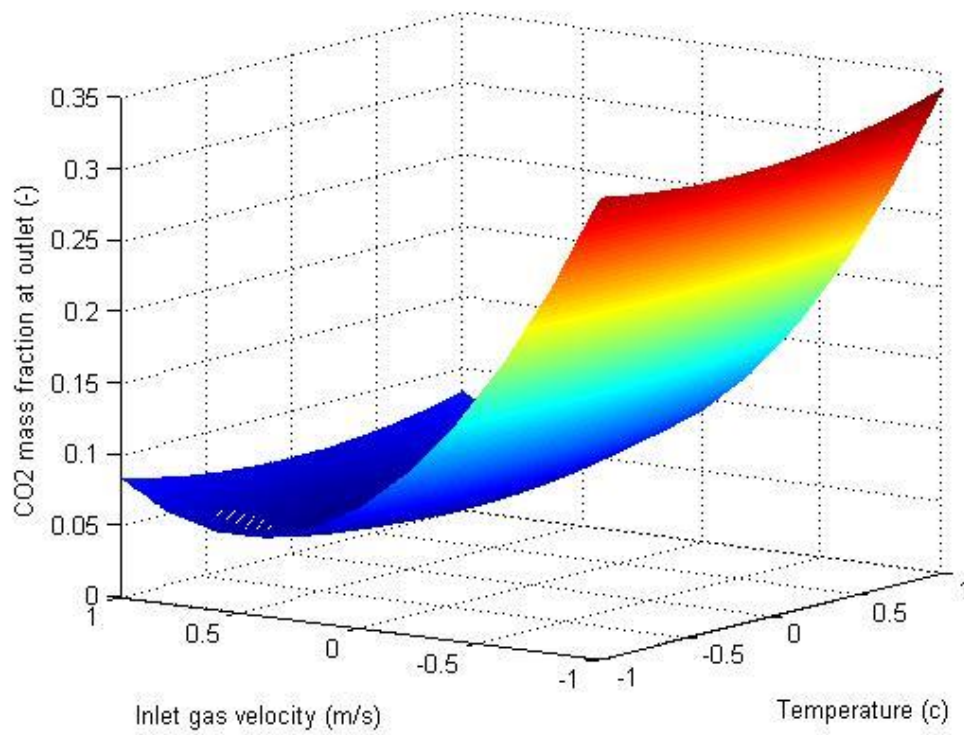


รูปที่ 4. 8 พื้นผิวตอบสนองของร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อโรเตอร์ เมื่อฟลักซ์ของแข็ง
ป้อนเข้าและอุณหภูมิระบบแตกต่างกัน

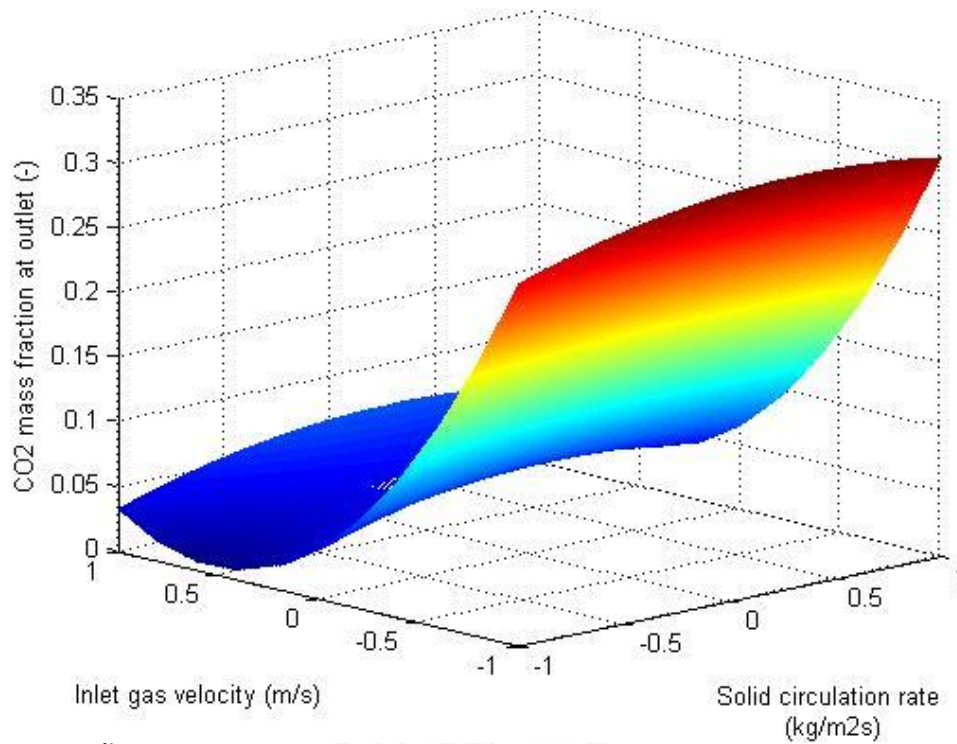




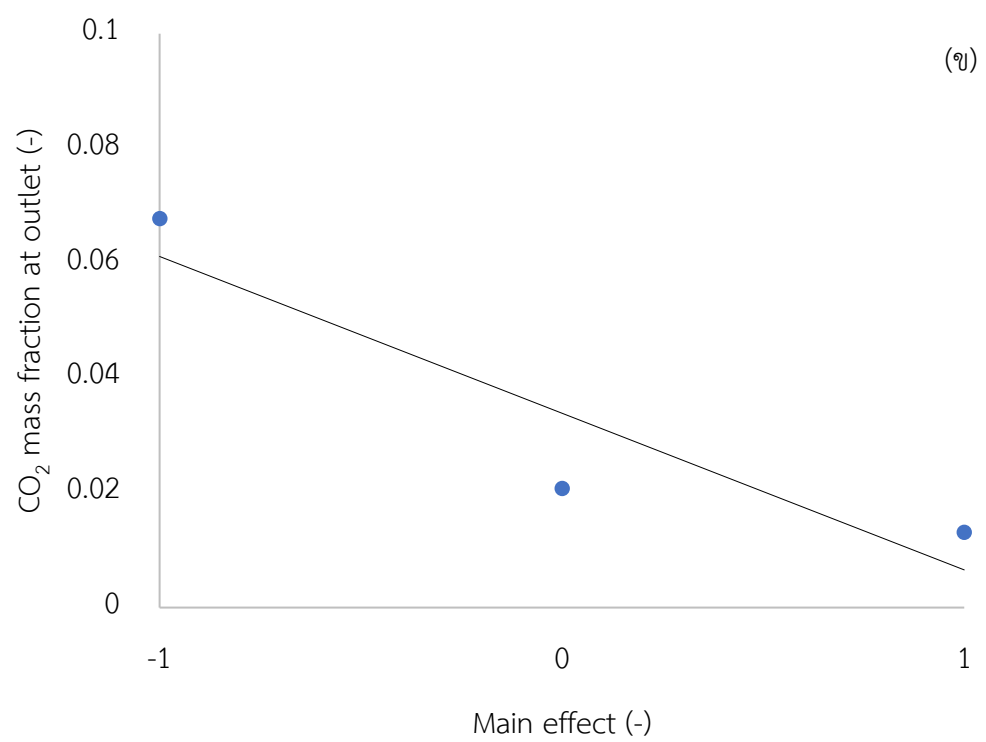
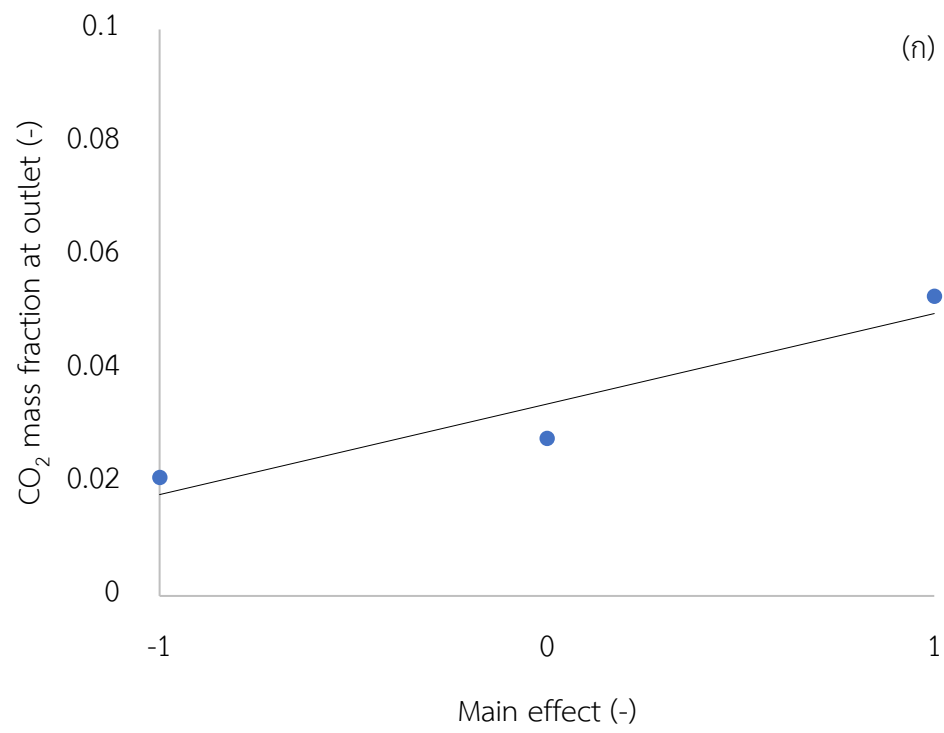
รูปที่ 4. 9 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อ
ดาวเนอร์ (ก) ผลของอุณหภูมิระบบ (ข) ผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ค) ผลของฟลักซ์ของแข็ง
ป้อนเข้า

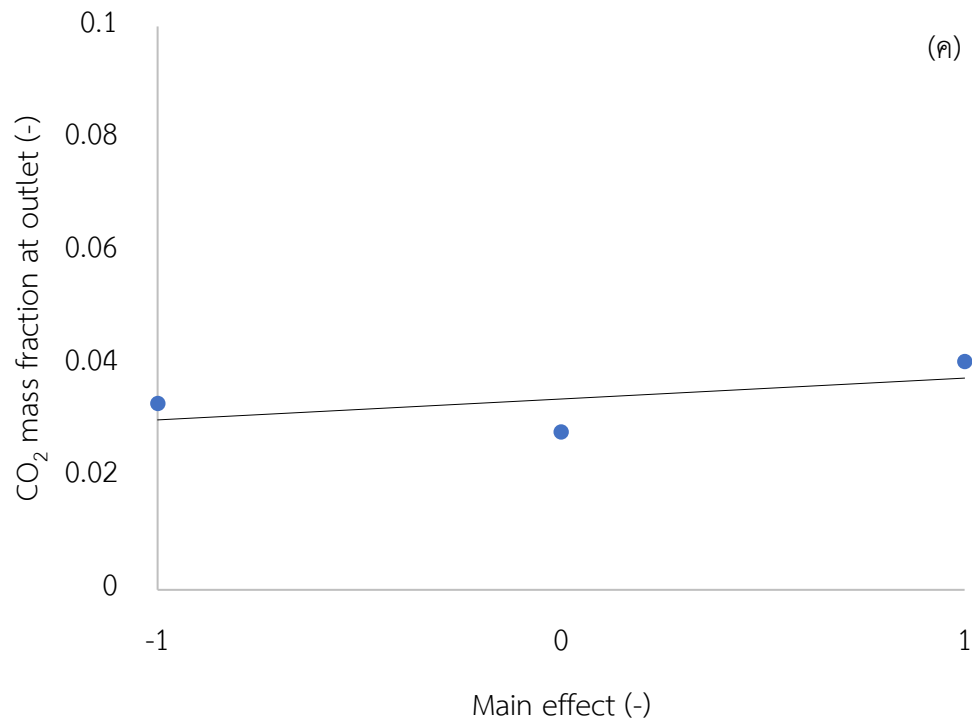


รูปที่ 4. 10 พื้นผิวตอบสนองของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์
เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้าและอุณหภูมิระบบแตกต่างกัน

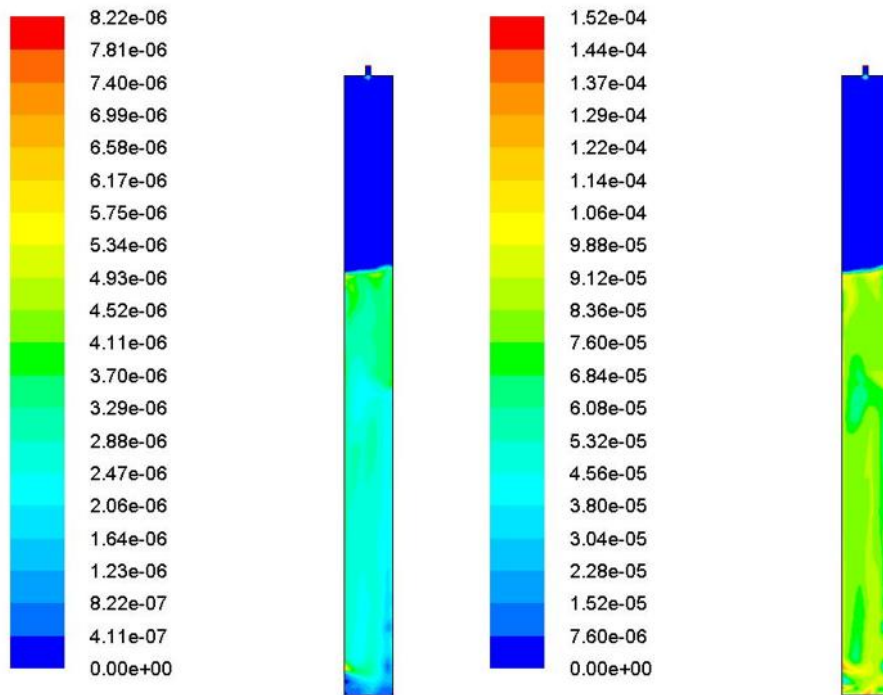


รูปที่ 4. 11 พื้นผิวตอบสนองของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์
เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้าและฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้าแตกต่างกัน



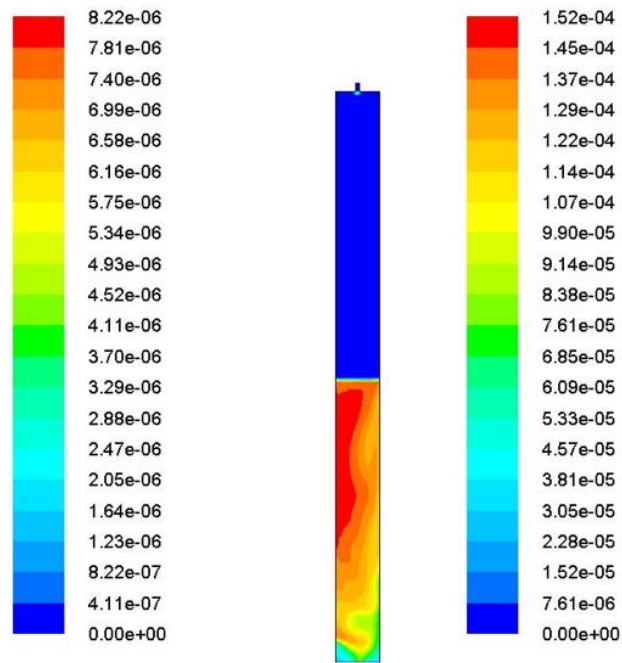


รูปที่ 4. 12 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อ
ดาวเนอร์ (ก) ผลของความดันเกจ (ข) ผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ค) ผลของฟลักซ์ของแก๊ส
ป้อนเข้า



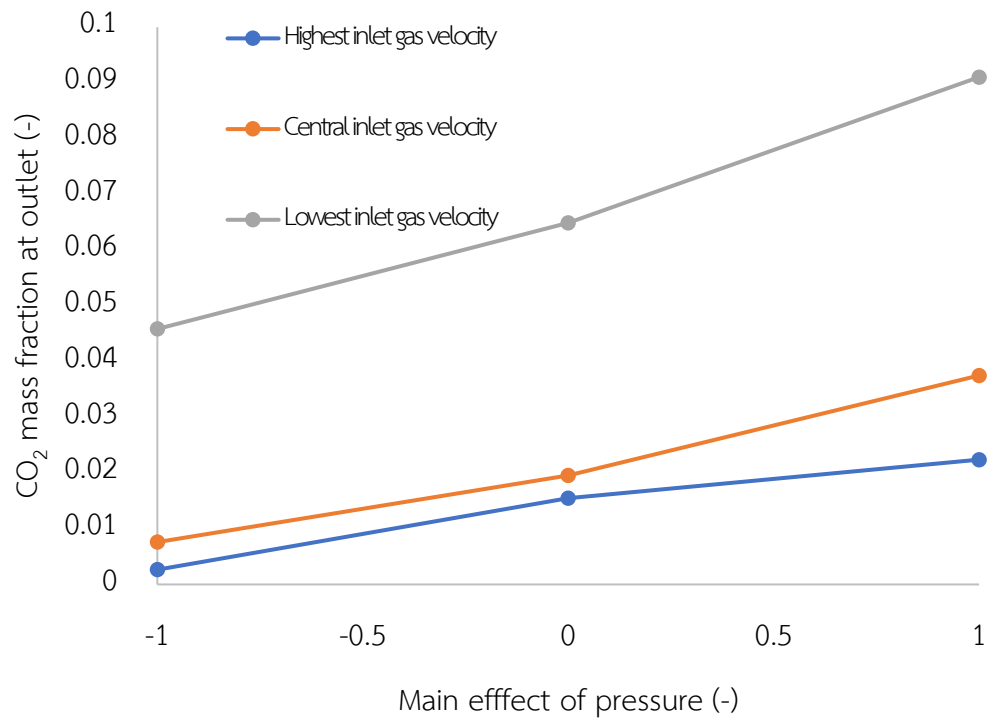
(ก)



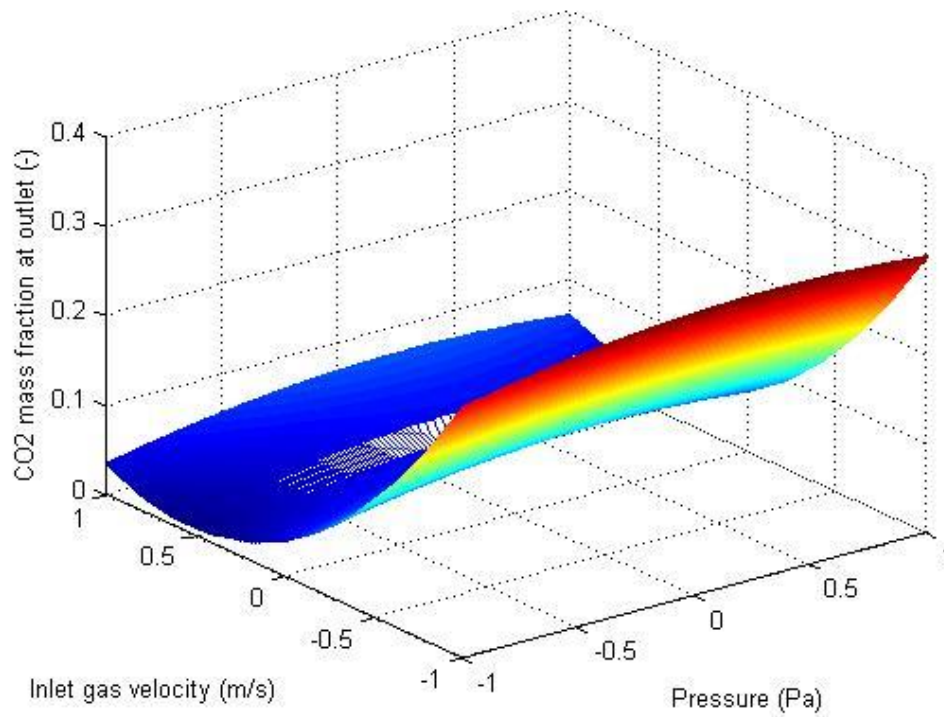


(ข)

รูปที่ 4. 13 (ก) คอนทัวร์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกรณีศึกษาที่ 4 (ปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยาการคืนสภาพตัวดูดซับ ตามลำดับ) (ข) คอนทัวร์ของอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกรณีศึกษาที่ 11 (ปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยาการคืนสภาพตัวดูดซับ ตามลำดับ)



รูปที่ 4. 14 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความดันระบบ และความเร็วแก๊สป้อนเข้าต่อค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์



รูปที่ 4. 15 พื้นผิวตอบสนองของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์
เมื่อความดันแก๊ส และความเร็วก๊าซป้อนเข้าแตกต่างกัน

ตารางที่ 4. 1 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อโรเซอร์

จำนวนการทดลอง	ความเร็วแก๊ส ป้อนเข้า (เมตรต่อวินาที)	อัตราการป้อนของแข็ง ของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	อุณหภูมิระบบ (องศาเซลเซียส)	สัดส่วนโดยมวลไอน้ำ ในแก๊ส ป้อนเข้า (-)	ร้อยละคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับ (%)
1	3	10	60	0.30	43.83
2	1	30	90	0.30	46.32
3	3	10	60	0.15	99.78
4	2	20	90	0.225	33.84
5	1	30	60	0.15	95.61
6	3	10	90	0.30	11.73
7	2	20	75	0.30	76.35
8	2	20	75	0.225	69.84
9	3	10	60	0.30	34.37
10	3	30	90	0.15	38.92
11	3	10	90	0.15	8.74
12	1	30	60	0.30	97.15
13	1	10	90	0.30	18.21
14	2	20	60	0.225	99.11
15	1	30	90	0.15	34.10
16	1	10	60	0.15	73.78
17	3	20	75	0.225	45.44
18	3	30	90	0.30	55.55
19	1	10	90	0.15	12.74
20	1	10	60	0.30	85.19

21	2	10	75	0.225	11.25
22	1	20	75	0.225	74.76
23	2	20	75	0.15	58.29
24	2	30	75	0.225	84.12
25	3	30	60	0.30	99.89

ตารางที่ 4. 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตัวแปรตอบสนองเป็นร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (A คือ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า B คือ ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า C คือ อุณหภูมิระบบ และ D คือ สัดส่วนโดยมวลไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า)

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	18990.54	14.00	1356.47	3.03	0.0418
A	551.13	1.00	551.13	1.23	0.2929
B	3191.67	1.00	3191.67	7.14	0.0234
C	12197.72	1.00	12197.72	27.28	0.0004
D	193.27	1.00	193.27	0.43	0.5258
A ²	22.38	1.00	22.38	0.05	0.8275
B ²	601.79	1.00	601.79	1.35	0.2730
C ²	29.75	1.00	29.75	0.07	0.8017
D ²	46.29	1.00	46.29	0.10	0.7543
AB	0.01	1.00	0.01	0.00	0.9972
AC	374.68	1.00	374.68	0.84	0.3816
AD	25.92	1.00	25.92	0.06	0.8146
BC	401.19	1.00	401.19	0.90	0.3659
BD	1088.86	1.00	1088.86	2.43	0.1497
CD	71.08	1.00	71.08	0.16	0.6985
Residual	4471.81	10.00	447.18		
Cor Total	23462.35	24.00			

ตารางที่ 4. 3 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ด้วยอุณหภูมิต่ำ

จำนวนการทดลอง	อุณหภูมิต่ำ (องศาเซลเซียส)	ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (เมตรต่อวินาที)	อัตราการป้อนของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	สัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ (-)
1	160	0.6	100	0.0594
2	160	0.315	100	0.0860
3	160	0.315	80	0.0056
4	200	0.315	100	0.0868
5	200	0.03	80	0.3107
6	120	0.315	100	0.0835
7	160	0.03	100	0.3162
8	120	0.03	80	0.2940
9	120	0.03	120	0.3073
10	200	0.6	80	0.0589
11	200	0.03	120	0.3252
12	120	0.6	120	0.0691
13	200	0.6	120	0.0713
14	120	0.6	80	0.0579
15	160	0.315	120	0.0907

ตารางที่ 4. 4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนโดยมวล
คาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ด้วยอุณหภูมิ (A คือ อุณหภูมิระบบ B คือ
ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และ C คือ ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า)

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	0.201769	9	0.022419	46.4825	0.0003
A	0.000169	1	0.000169	0.3502	0.5797
B	0.152967	1	0.152967	317.1593	< 0.0001
C	0.001863	1	0.001863	3.8632	0.1065
A2	0.000651	1	0.000651	1.3488	0.2979
B2	0.036143	1	0.036143	74.9371	0.0003
C2	0.001144	1	0.001144	2.3724	0.1841
AB	0.000123	1	0.000123	0.2555	0.6347
AC	0.000001	1	0.000001	0.0015	0.9707
BC	0.000002	1	0.000002	0.0046	0.9487
Residual	0.002412	5	0.000482		
Cor Total	0.204180	14			

ตารางที่ 4. 5 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ด้วยความดัน

จำนวนการทดลอง	ความดันเกจ (พาสคาล)	ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (เมตรต่อวินาที)	อัตราการป้อนของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที)	สัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ (-)
1	-4,000	0.23	100	0.0155
2	-4,000	0.13	100	0.0147
3	-4,000	0.13	80	0.0121
4	-5,000	0.13	100	0.0375
5	-5,000	0.03	80	0.0819
6	-3,000	0.13	100	0.0076
7	-4,000	0.03	100	0.0649
8	-3,000	0.03	80	0.0461
9	-3,000	0.03	120	0.0456
10	-5,000	0.23	80	0.0229
11	-5,000	0.03	120	0.1002
12	-3,000	0.23	120	0.0029
13	-5,000	0.23	120	0.0219
14	-3,000	0.23	80	0.0024
15	-4,000	0.13	120	0.0319

ตารางที่ 4. 6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตัวแปรตอบสนองเป็นสัดส่วนโดยมวล
คาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ (A คือ ความดันเกจ B คือ ความเร็วแก๊ส
ป้อนเข้า และ C คือ ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า)

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	0.01184950	9	0.00131661	31.91720917	0.0007
A	0.00255360	1	0.00255360	61.90434261	0.0005
B	0.00745836	1	0.00745836	180.8052206	< 0.0001
C	0.00013764	1	0.00013764	3.336686354	0.1273
A2	0.00000398	1	0.00000398	0.096536835	0.7686
B2	0.00091800	1	0.00091800	22.25411279	0.0053
C2	0.00000124	1	0.00000124	0.030061943	0.8692
AB	0.00032385	1	0.00032385	7.850786079	0.0379
AC	0.00003741	1	0.00003741	0.906921683	0.3847
BC	0.00004186	1	0.00004186	1.014798364	0.36
Residual	0.00020625	5	0.00004125		
Cor Total	0.01205575	14			

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อคือ 1. การหาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เหมาะสมในงานวิจัย 2. การหาแบบจำลองของปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมในงานวิจัย 3. การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ 4. การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยอุณหภูมิในท่อดาวเนอร์ 5. การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดันในท่อดาวเนอร์

5.1.1 การหาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เหมาะสมในงานวิจัย

การหาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เหมาะสมในงานวิจัย จะทำให้งานวิจัยที่ศึกษาให้ผลการจำลองที่มีความแม่นยำ และใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง ดังนั้นก่อนที่จะทำการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่างๆ จำเป็นต้องหาขนาดของเซลล์คำนวณที่เหมาะสม และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งในงานวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ แบบจำลองการไหลที่เหมาะสมในท่อไรเซอร์ และแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมในท่อดาวเนอร์ พบว่า ขนาดของเซลล์คำนวณที่เหมาะสมในท่อไรเซอร์มีขนาด 10,000 เซลล์ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสมือนคงตัวอยู่ในช่วงเวลา 60-80 วินาที และขนาดของเซลล์คำนวณที่เหมาะสมในท่อดาวเนอร์มีขนาด 8,000 เซลล์ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสมือนคงตัวอยู่ในช่วงเวลา 60-80 วินาที โดยทั้งสองส่วนจะทำการเทียบกับผลการทดลองจริงของ Yi และคณะ [8]

5.1.2 การหาแบบจำลองของปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสมในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกใช้สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั้งหมด 3 แบบด้วยกัน คือ แบบจำลอง Homogenous แบบจำลอง Deactivation และแบบจำลอง Equilibrium จากผลการจำลองพบว่าทั้ง 3 สมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสามารถใช้ทำนายค่าร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริงของ Yi และคณะ [8] และสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบ Equilibrium เป็นเพียงสมการเดียวที่สามารถใช้ทำนายผลของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกของท่อดาวเนอร์ได้ใกล้เคียงกับการทดลองจริงของ Yi และคณะ [8] โดยหากในงานวิจัยจำเป็นต้องศึกษาทั้งในส่วนของท่อไรเซอร์ และท่อดาวเนอร์พร้อมกัน แบบจำลองสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสม คือ แบบจำลอง Equilibrium เพราะเป็น

แบบจำลองที่สามารถทำนายการไหลได้ทั้งในส่วนของการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และกระบวนการคืบสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์

5.1.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์

จากผลการจำลองตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ โดยใช้ตัวแปรดำเนินการทั้งหมด 4 ตัวแปรด้วยกัน ดังนี้ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า พลังค์ของแก๊สป้อนเข้า อุณหภูมิระบบ และสัดส่วนโดยมวลไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า แบ่งเป็นกรณีศึกษาทั้งหมด 25 กรณี พบว่า กรณีศึกษาที่ 25 ที่ใช้ค่าความเร็วแก๊สป้อนเข้า 3 เมตรต่อวินาที พลังค์ของแก๊สป้อนเข้า 30 กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที อุณหภูมิระบบ 60 องศาเซลเซียส และสัดส่วนโดยมวลไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า 30 เปอร์เซ็นต์ ได้ค่าร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด และกรณีศึกษาที่ 11 ที่ใช้ค่าความเร็วแก๊สป้อนเข้า 3 เมตรต่อวินาที พลังค์ของแก๊สป้อนเข้า 10 กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที อุณหภูมิระบบ 90 องศาเซลเซียส และสัดส่วนโดยมวลไอน้ำในแก๊สป้อนเข้า 15 เปอร์เซ็นต์ ได้ค่าร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และ ผลของตัวแปรหลัก คือ พลังค์ของแก๊สป้อนเข้า และอุณหภูมิระบบ มีผลต่อร้อยละการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ โดยพลังค์ของแก๊สป้อนเข้าให้ผลเชิงบวก แต่อุณหภูมิระบบให้ผลเชิงลบ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ทำให้ได้แบบจำลองการถดถอยเพื่อความสะดวกต่อการนำผลในงานวิจัยนี้ไปออกแบบการทดลองต่อไปในอนาคต และจากกราฟพื้นผิวดตอบสนอง พบว่า ในการทำให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงที่สุด ควรจะกำหนดพลังค์ของแก๊สป้อนเข้าที่มีค่าสูงที่สุด แต่ยังคงสามารถดำเนินการแบบต่อเนื่องได้ และกำหนดอุณหภูมิระบบให้ต่ำที่สุดที่ยังอยู่ในช่วงที่ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดได้

5.1.4 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืบสภาพตัวดูดซับด้วยอุณหภูมิในท่อดาวเนอร์

จากผลการจำลองตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืบสภาพตัวดูดซับด้วยอุณหภูมิในท่อดาวเนอร์โดยใช้ตัวแปรดำเนินการทั้งหมด 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า พลังค์ของแก๊สป้อนเข้า และอุณหภูมิระบบ แบ่งเป็นกรณีศึกษาทั้งหมด 15 กรณี พบว่า กรณีศึกษาที่ 11 ที่ใช้ค่าความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.03 เมตรต่อวินาที พลังค์ของแก๊สป้อนเข้า 120 กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที และอุณหภูมิระบบ 200 องศาเซลเซียส ได้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด และกรณีศึกษาที่ 3 ใช้ค่าความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.315 เมตรต่อวินาที พลังค์ของแก๊สป้อนเข้า 80 กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที และอุณหภูมิระบบ 160 องศาเซลเซียส ได้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และผลของตัวแปรหลัก

คือ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า มีผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกท่อดาวเนอร์ อย่างมีนัยสำคัญ โดยความเร็วแก๊สป้อนเข้าให้ผลเชิงลบ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ทำให้ได้แบบจำลองการถดถอยเพื่อความสะดวกต่อการนำผลในงานวิจัยนี้ไปออกแบบการทดลองต่อไปในอนาคต และจากกราฟพื้นผิวตอบสนอง ถ้าต้องการให้คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับมากขึ้น จะต้องออกแบบระบบท่อดาวเนอร์ให้มีการป้อนแก๊สด้วยความเร็วแก๊สที่มีค่าประมาณความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดเซชัน และฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าสูงเพียงพอ และอุณหภูมิระบบต้องมีค่าสูงที่สุดในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาการคืนสภาพตัวดูดซับ จึงจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์หลุดออกจากตัวดูดซับได้สูงที่สุด

5.1.5 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดันในท่อดาวเนอร์

จากผลการจำลองตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดันในท่อดาวเนอร์โดยใช้ตัวแปรดำเนินการทั้งหมด 3 ตัวแปรด้วยกัน ได้แก่ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า และความดันแก๊จ แบ่งเป็นกรณีศึกษาทั้งหมด 15 กรณี พบว่า กรณีศึกษาที่ 11 ที่ใช้ค่าความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.03 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า 120 กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที และความดันแก๊จ -5,000 พาสคาล ได้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุด และกรณีศึกษาที่ 14 ใช้ค่าความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.23 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์ของแข็งป้อนเข้า 80 กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสองวินาที และความดันแก๊จ -3,000 พาสคาล ได้ค่าสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และผลของตัวแปรหลัก คือ ความดันแก๊จ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และอันตรกิริยาระหว่างความดันแก๊จกับความเร็วแก๊สป้อนเข้า มีผลต่อสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณทางออกท่อดาวเนอร์อย่างมีนัยสำคัญ โดยความดันแก๊จให้ผลเชิงบวก และความเร็วแก๊สป้อนเข้าให้ผลเชิงลบ จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ทำให้ได้แบบจำลองการถดถอยเพื่อความสะดวกต่อการนำผลในงานวิจัยนี้ไปออกแบบการทดลองต่อไปในอนาคต และจากกราฟพื้นผิวตอบสนอง ถ้าต้องการให้คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากตัวดูดซับมากขึ้น จะต้องออกแบบระบบท่อดาวเนอร์ให้มีการป้อนแก๊สด้วยความเร็วแก๊สที่มีค่าประมาณความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดเซชัน และฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าสูงเพียงพอ และความดันแก๊จต้องมีค่าติดลบสูงที่สุด จึงจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์หลุดออกจากตัวดูดซับได้สูงที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการไหลแบบสองมิติของกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์ และกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ ซึ่งในงานวิจัยได้ทำการศึกษาสองระบบนี้แยกกัน โดยเริ่มจากในส่วนของท่อไรเซอร์เป็นลำดับแรก และใช้ผลบริเวณ

ทางออกของท่อไรเซอร์เป็นค่าป้อนเข้าในท่อดาวเนอร์ต่อไป เนื่องจากงานวิจัยที่ทำการศึกษาก่อน
จำลองกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับในท่อดาวเนอร์ด้วยสมการปฏิกิริยาเคมียังไม่มีการศึกษาค้นคว้า
มาก่อน จึงยังไม่สามารถจำลองการดำเนินการแบบต่อเนื่องที่เกิดขึ้นพร้อมกันทั้งในส่วนของท่อไรเซอร์
และท่อดาวเนอร์ ดังนั้นอาจต้องมีการจำลองการไหลทั้งในส่วนของท่อไรเซอร์ และท่อดาวเนอร์พร้อม
กัน และทำการหาสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดันที่ถูกต้องจาก
การทดลองจริงเพื่อให้การดำเนินการของกระบวนการมีความสมบูรณ์ และผลการจำลองมีความ
แม่นยำมากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

1. Chang, J., et al., *Computational investigation of solid sorbent carbon dioxide capture in a fluidized bed reactor*. Powder Technology, 2015. 275: p. 94-104.
2. Bi, H. and J. Zhu, *Static instability analysis of circulating fluidized beds and concept of high-density risers*. AIChE Journal, 1993. 39(8): p. 1272-1280.
3. Coppola, A., et al., *Fluidized bed calcium looping: The effect of SO₂ on sorbent attrition and CO₂ capture capacity*. Chemical Engineering Journal, 2012. 207–208: p. 445-449.
4. Ayobi, M., S. Shahhosseini, and Y. Behjat, *Computational and experimental investigation of CO₂ capture in gas–solid bubbling fluidized bed*. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2014. 45(2): p. 421-430.
5. Jaiboon, O.-a., et al., *Effect of flow patterns/regimes on CO₂ capture using K₂CO₃ solid sorbent in fluidized bed/circulating fluidized bed*. Chemical Engineering Journal, 2013. 219: p. 262-272.
6. Anderson, J.D., *Computational fluid dynamics: the basics with applications*. 1995. McGrawhill Inc.
7. Liu, H., Y. Guo, and W. Lin, *Simulation of shock-powder interaction using kinetic theory of granular flow*. Powder Technology, 2015. 273: p. 133-144.
8. C. Yi, S.J., Y. Seo, J. Lee, C. Ryu, *Continuous operation of the potassium-based dry sorbent CO₂ capture process with two fluidized-bed reactors*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2007. 1: p. 31–36.
9. Park, S.-W., et al., *Carbonation kinetics of potassium carbonate by carbon dioxide*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2006. 12(4): p. 522-530.
10. Kongkitisupchai, S. and D. Gidaspow, *Carbon dioxide capture using solid sorbents in a fluidized bed with reduced pressure regeneration in a downer*. Aiche Journal, 2013. 59(12): p. 4519-4537.
11. Kunii, D. and O. Levenspiel, *Circulating fluidized-bed reactors*. Chemical Engineering Science, 1997. 52(15): p. 2471-2482.

12. Wang, W. and Y. Chen, *Mesoscale Modeling*. Advances in Chemical Engineering, 2015. 47: p. 193-277.
13. Dille, J.C., *Particle ejection mechanisms due to bubble eruptions in fluidized beds*. 1981.
14. Grace, J.R. and H. Bi, *Introduction to circulating fluidized beds*, in *Circulating fluidized beds*. 1997, Springer. p. 1-20.
15. Wen, C. and Y. Yu, *A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity*. AIChE Journal, 1966. 12(3): p. 610-612.
16. Saxena, S. and G. Vogel, *The measurement of incipient fluidization velocities in a bed of coarse dolomite at temperature and pressure*. Trans. Inst. Chem. Eng, 1977. 55(3): p. 184-189.
17. Babu, S., B. Shah, and A. Talwalkar. *Fluidization correlations for coal gasification materials-minimum fluidization velocity and fluidized bed expansion ratio*. in *AIChE Symp. Ser.* 1978.
18. Grace, J., *Fluidized bed hydrodynamics*. Handbook of multiphase systems, 1982. 5.
19. Chitester, D.C., et al., *Characteristics of fluidization at high pressure*. Chemical Engineering Science, 1984. 39(2): p. 253-261.
20. Abrahamsen, A. and D. Geldart, *Behavior of Gas-Fluidized Beds of Fine Powders. Pt. 2. Voidage of the Dense Phase in Bubbling Beds*. Powder Technology, 1980. 26(1): p. 47-55.
21. Jiradilok, V., D. Gidaspow, and R.W. Breault, *Computation of gas and solid dispersion coefficients in turbulent risers and bubbling beds*. Chemical Engineering Science, 2007. 62(13): p. 3397-3409.
22. Bi, H. and J. Grace, *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): p. 261-271.
23. Takeuchi, H., et al., *A quantitative definition and flow regime diagram for fast fluidization*. Powder technology, 1986. 47(2): p. 195-199.
24. Perales, J., et al., *On the transition from bubbling to fast fluidization regimes*. Circulating fluidized bed technology III, 1991. 73.

25. Bi, H. and L. Fan. *Regime transition in gas-solid circulating fluidized beds*. in *AIChE Annual Meeting, Los Angeles, Calif., Nov. 1991*.
26. Chalermsoonsuwan, B., P. Piumsomboon, and D. Gidaspow, *Kinetic theory based computation of PSRI riser: Part I—Estimate of mass transfer coefficient*. *Chemical Engineering Science*, 2009. 64(6): p. 1195-1211.
27. Scarborough, J.B., *Numerical mathematical analysis*. 1966: Oxford and IBH Publishing.
28. Leonard, B.P., *A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation*. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 1979. 19(1): p. 59-98.
29. Guo, Y., et al., *CO₂ capture and sorbent regeneration performances of some wood ash materials*. *Applied Energy*, 2015. 137: p. 26-36.
30. Abbasi, E. and H. Arastoopour, *CFD simulation of CO₂ sorption in a circulating fluidized bed using deactivation kinetic model*. 2011.
31. Lee, D.K., et al., *Kinetic expression for the carbonation reaction of K₂CO₃/ZrO₂ sorbent for CO₂ capture*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013. 52(26): p. 9323-9329.
32. Ayobi, M., S. Shahhosseini, and Y. Behjat, *Computational and experimental investigation of CO₂ capture in gas–solid bubbling fluidized bed*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014. 45(2): p. 421-430.
33. Hua, L., et al., *Eulerian–Eulerian simulation of irregular particles in dense gas–solid fluidized beds*. *Powder Technology*, 2015. 284: p. 299-311.

ภาคผนวก ก

การคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน (minimum fluidization velocity, U_{mf})

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

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

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

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

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

ϵ_{mf} คือ สัดส่วนปริมาตรของวัฏภาคแก๊สที่ภาวะต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน (-)

ρ คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

D_{sv} คือ ขนาดอนุภาคของวัฏภาคของแข็ง (เมตร)

μ คือ ความหนืดของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

ตัวอย่างการคำนวณการหาค่า U_{mf} ในท่อดาวเนอร์

กำหนดให้	ϵ_{mf}	= 0.6
	ρ	= 0.5548 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
	ρ_p	= 1,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
	D_{sv}	= 9.8×10^{-5} เมตร
	μ	= 1.34×10^{-5} กิโลกรัมต่อเมตรวินาที
	g	= 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

เพราะฉะนั้น

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

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

$$Ar = 9.81 \times 0.5548 \times \frac{(1,100 - 0.5548) (9.8 \times 10^{-5})^3}{(1.34 \times 10^{-5})^2} = 29.29$$

$$Re_{mf} = \sqrt{17.14^2 + 0.123 \times 29.29} - 17.14 = 0.104$$

$$U_{mf} = \frac{0.104 \times 1.34 \times 10^{-5}}{0.5548 \times 9.8 \times 10^{-5}} = 0.026 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (Fast fluidization velocity, U_{tr})

$$U_{tr} = \frac{1.45 \mu Ar^{0.484}}{\rho D_{sv}} \quad (ก6)$$

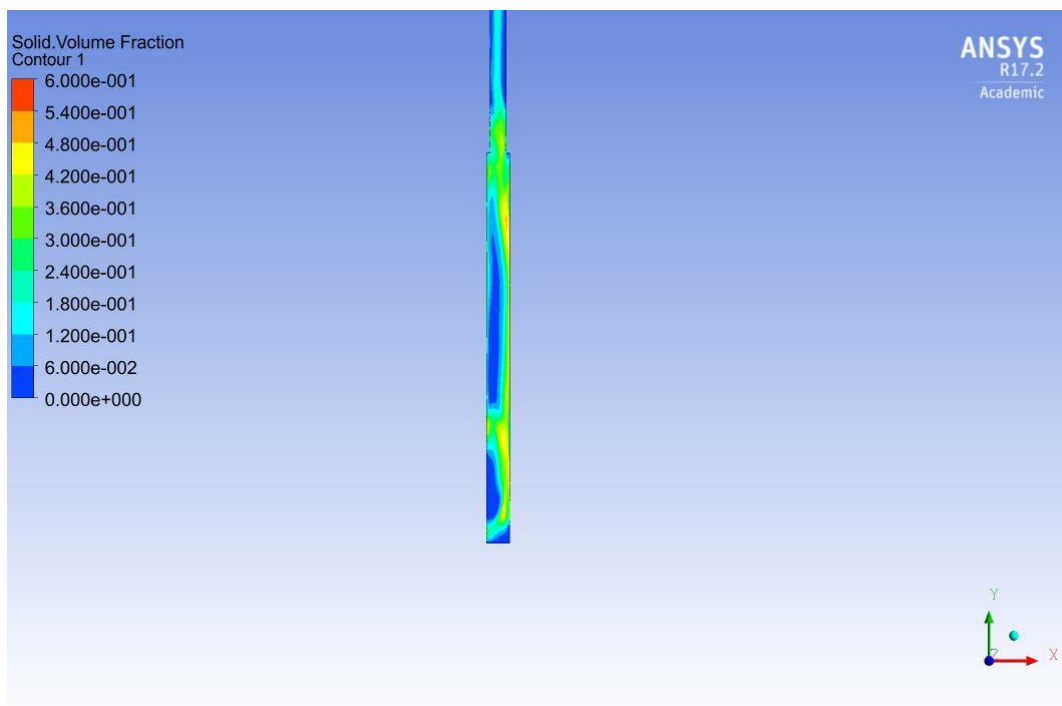
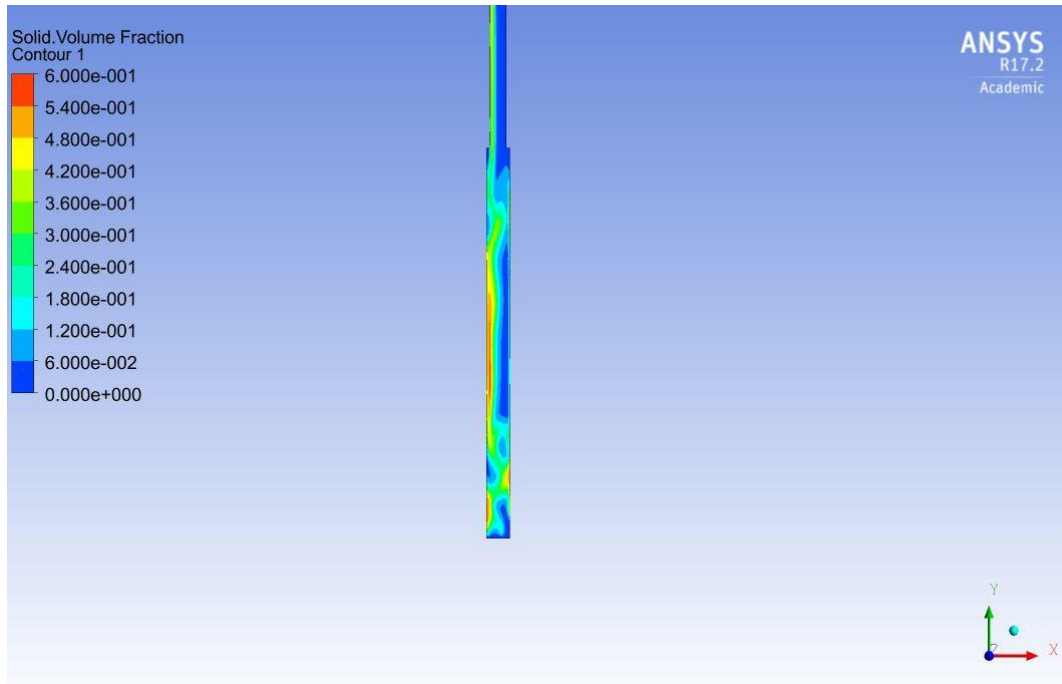
ตัวอย่างการคำนวณการหาค่า U_{tr}

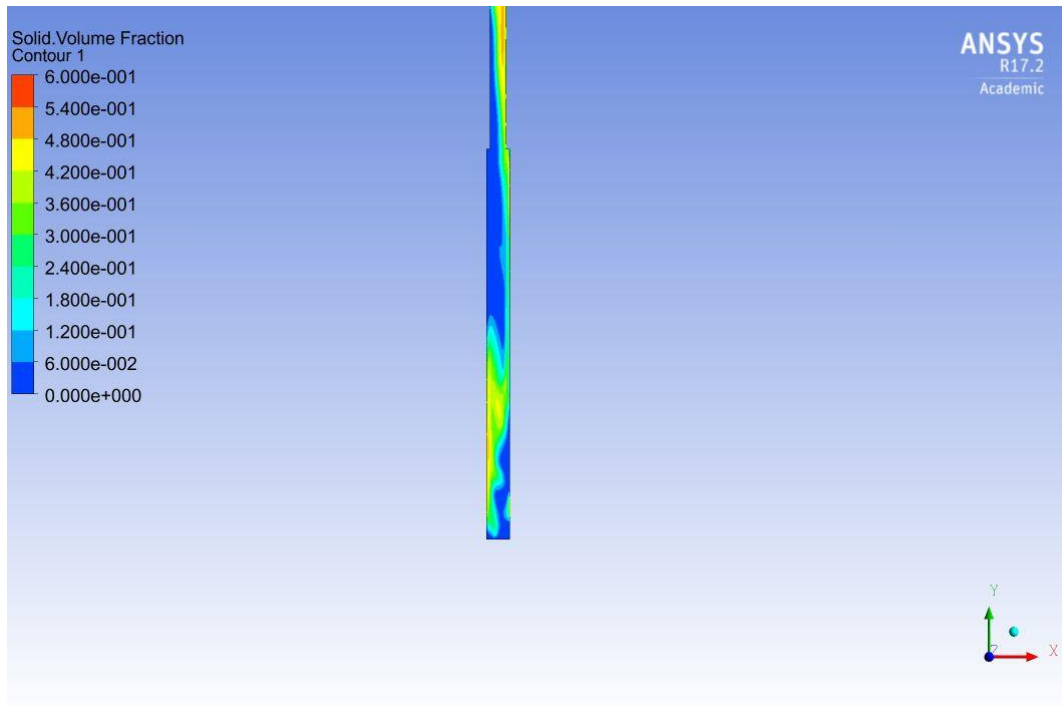
$$U_{tr} = \frac{1.45 \times 1.34 \times 10^{-5} \times 29.29^{0.484}}{0.5548 \times 9.8 \times 10^{-5}} = 1.83 \text{ เมตรต่อวินาที}$$



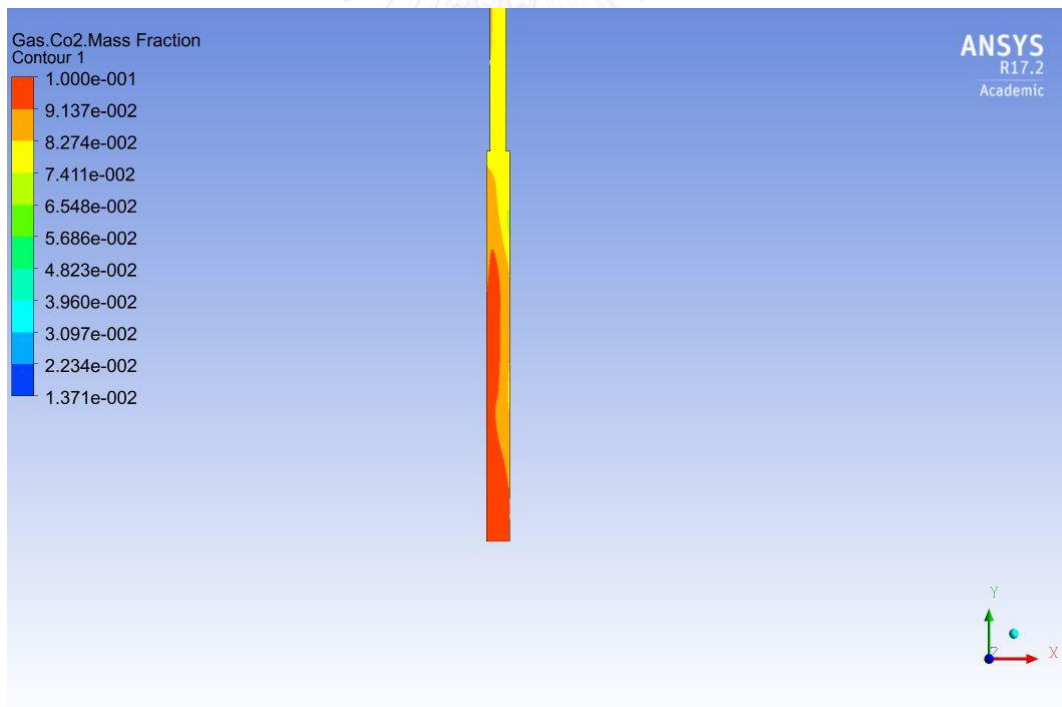
ภาคผนวก ข

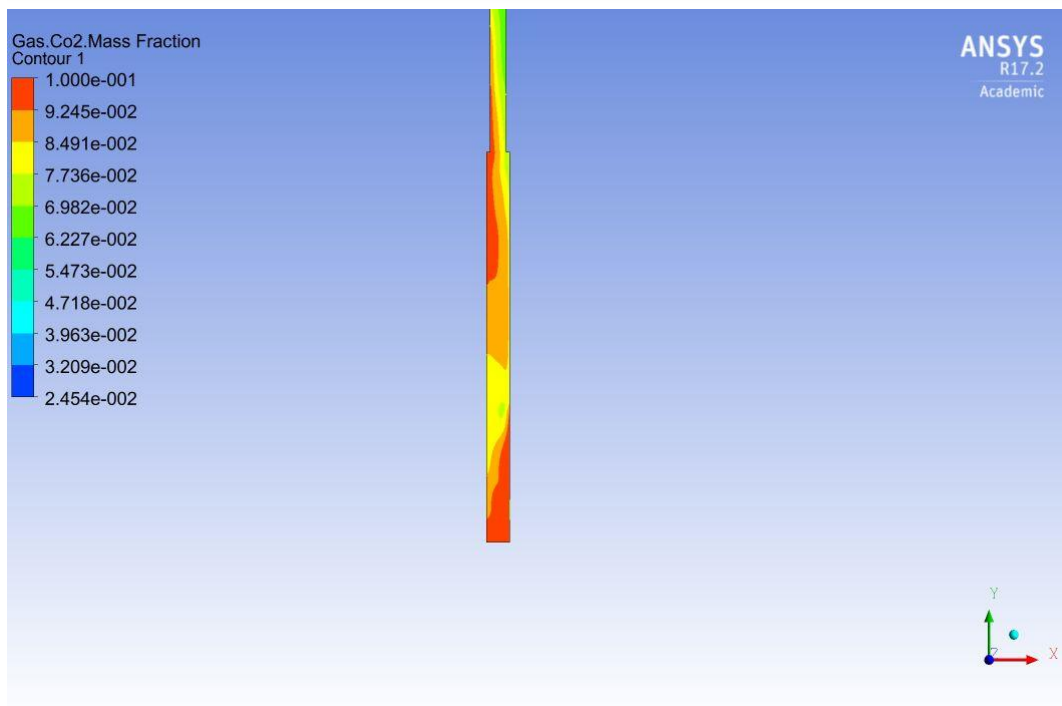
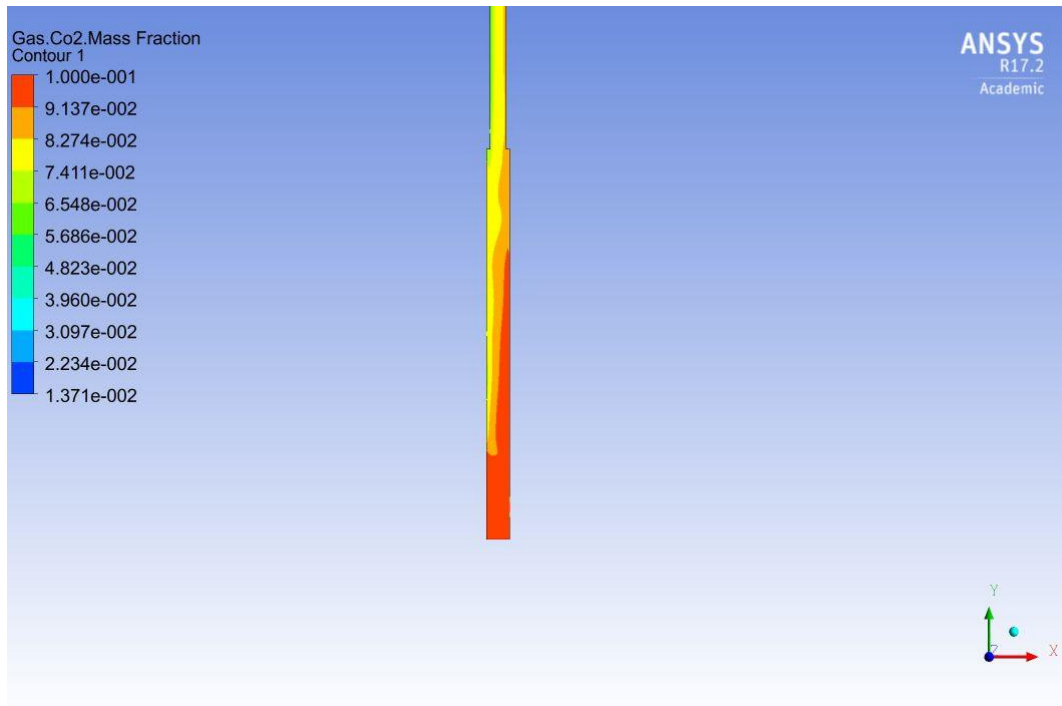
คอนทัวร์รูปภาพเพิ่มเติมขนาดเซลล์คำนวณและเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียรของตัวท่อโรเตอร์



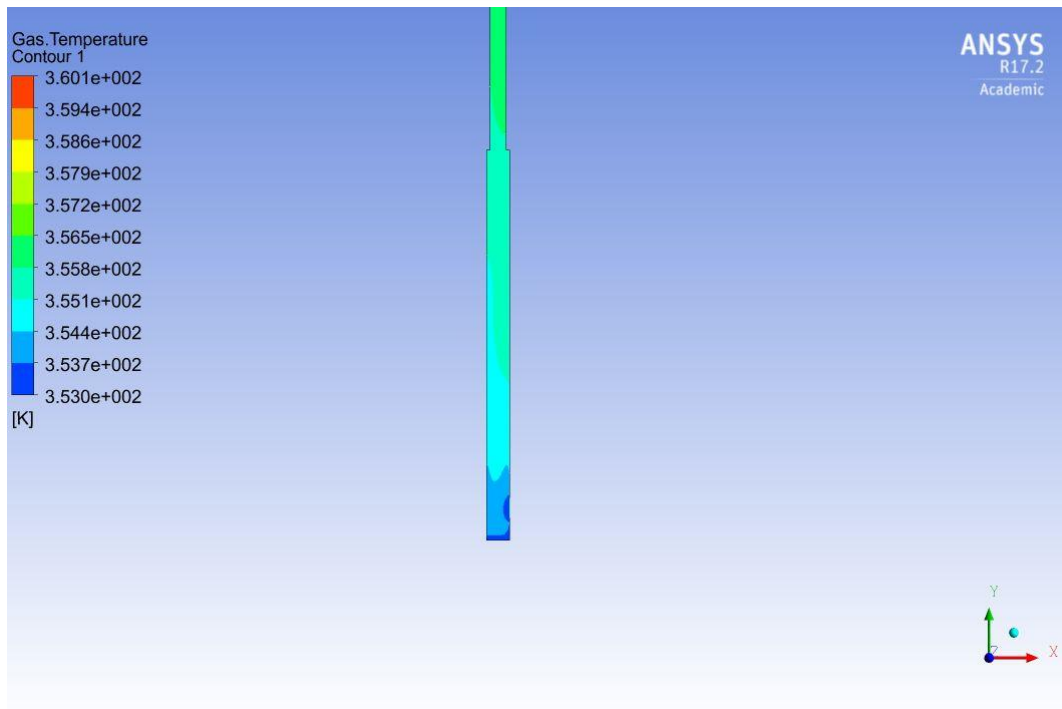
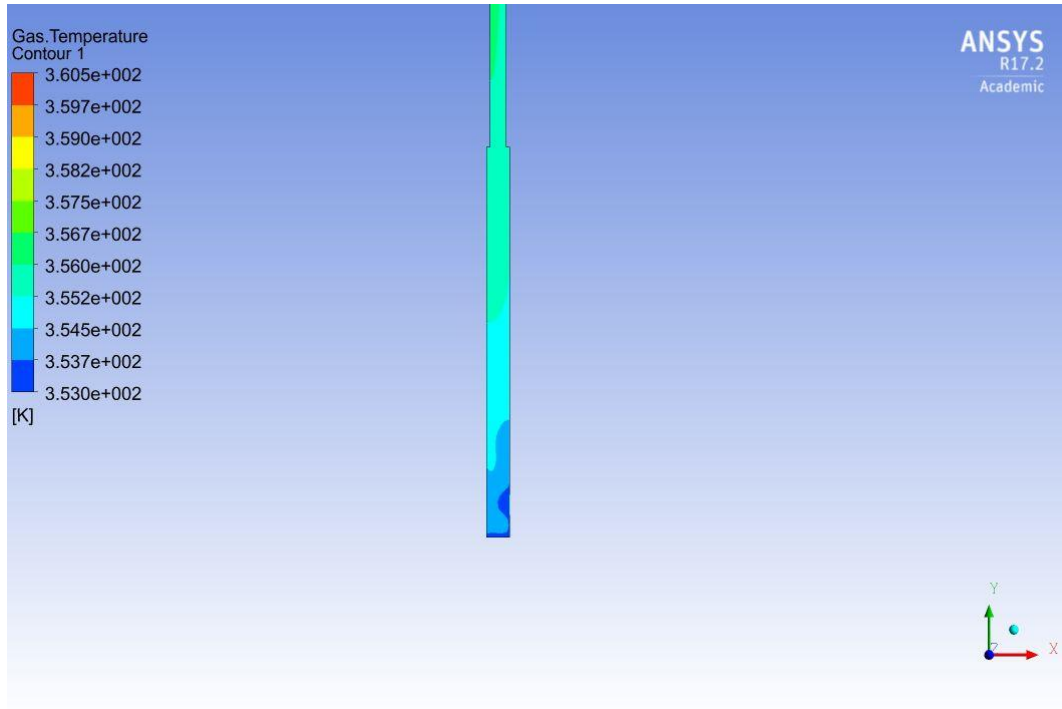


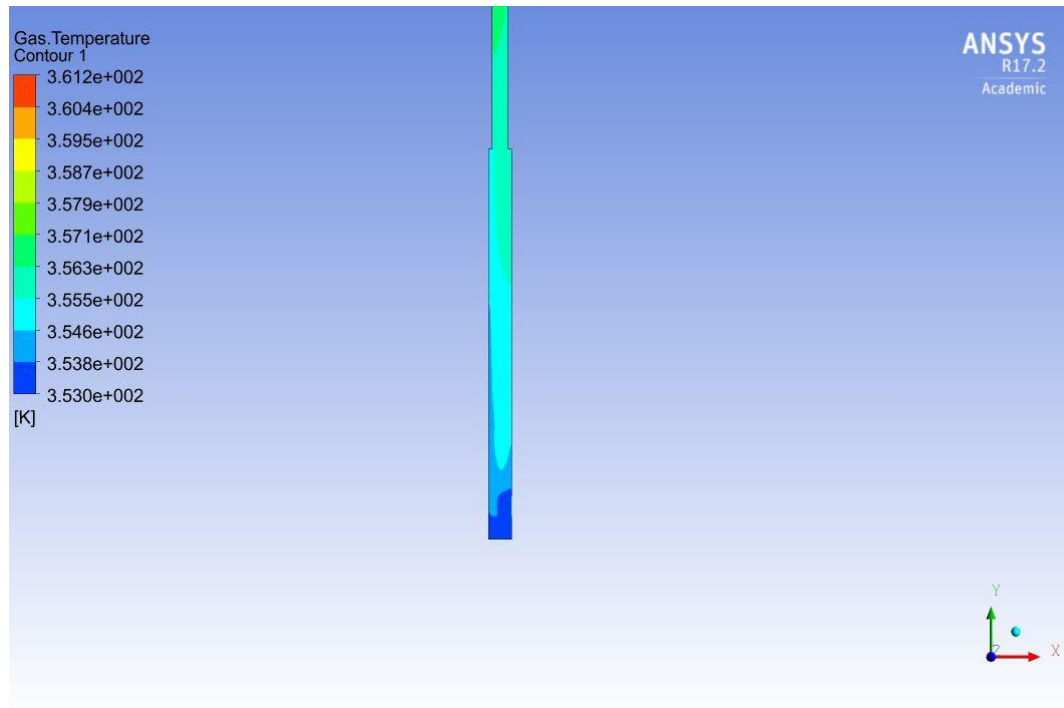
(f)





(9)

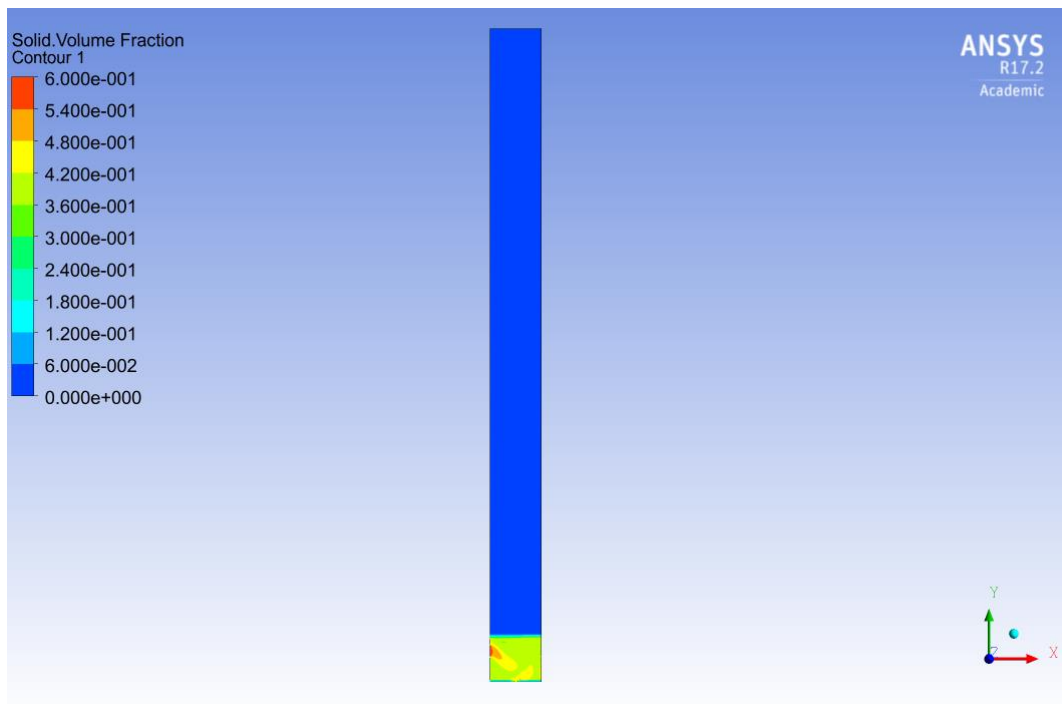
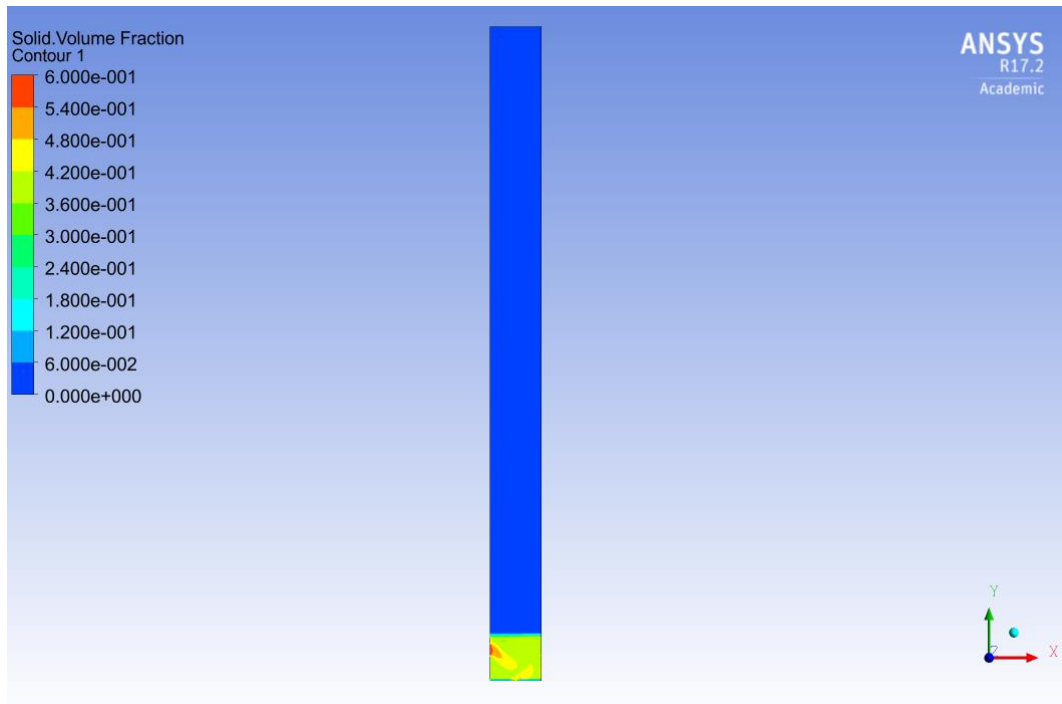


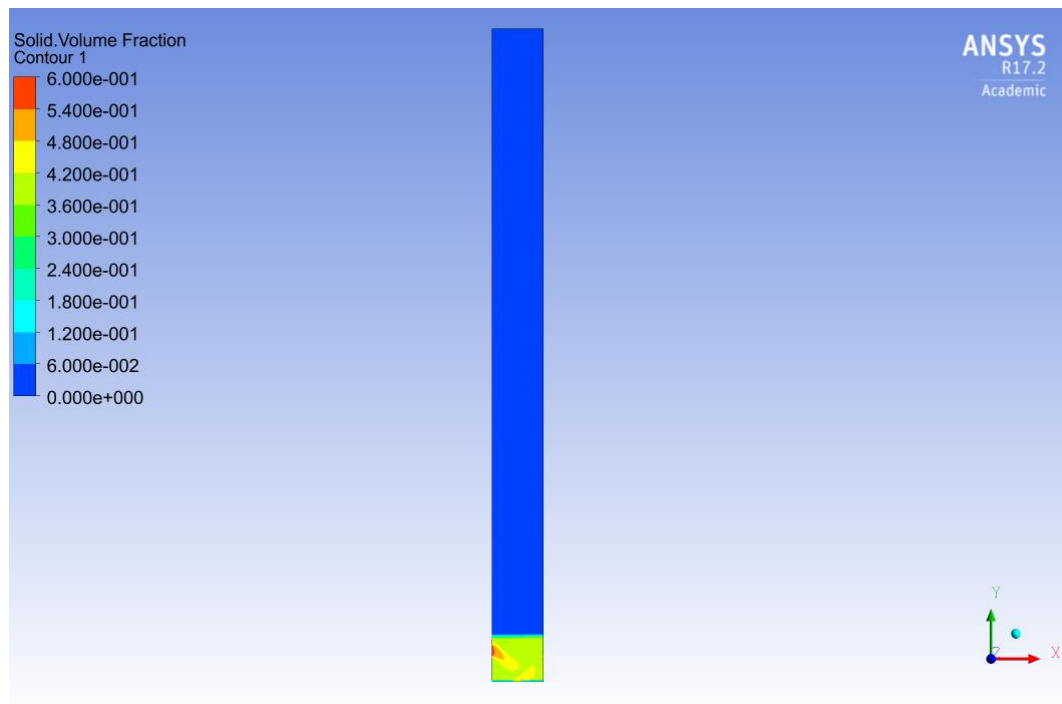


(ค)

รูปข 1 (ก) คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็ง (ข) คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวล
คาร์บอนไดออกไซด์ (ค) คอนทัวร์ของอุณหภูมิแก๊สที่ขนาดเซลล์คำนวณ 10,000 เซลล์ของท่อไรเซอร์
เวลา 60 70 80 ตามลำดับ

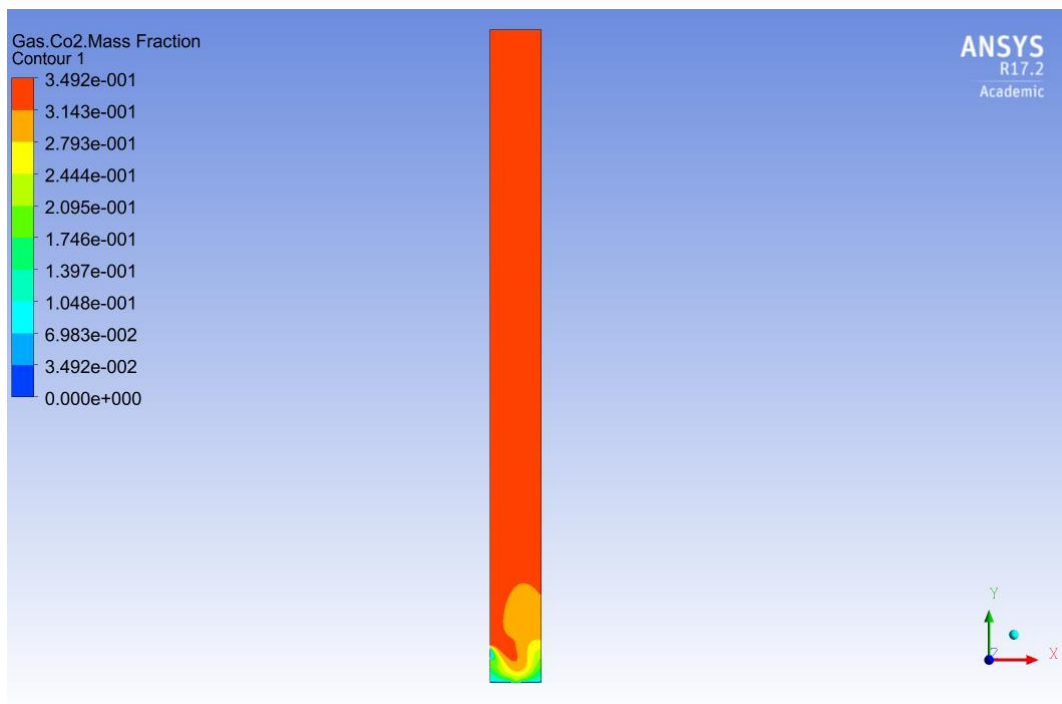
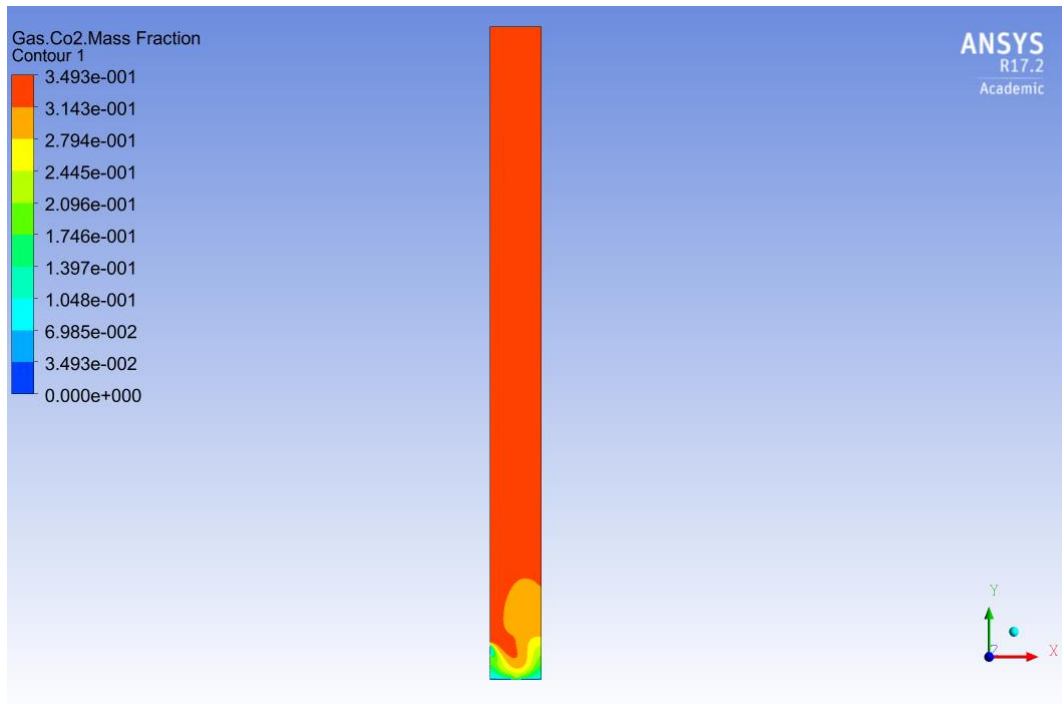
คอนทัวร์รูปภาพเพิ่มเติมขนาดเซลล์คำนวณและเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียรของท่อดาวเนอร์

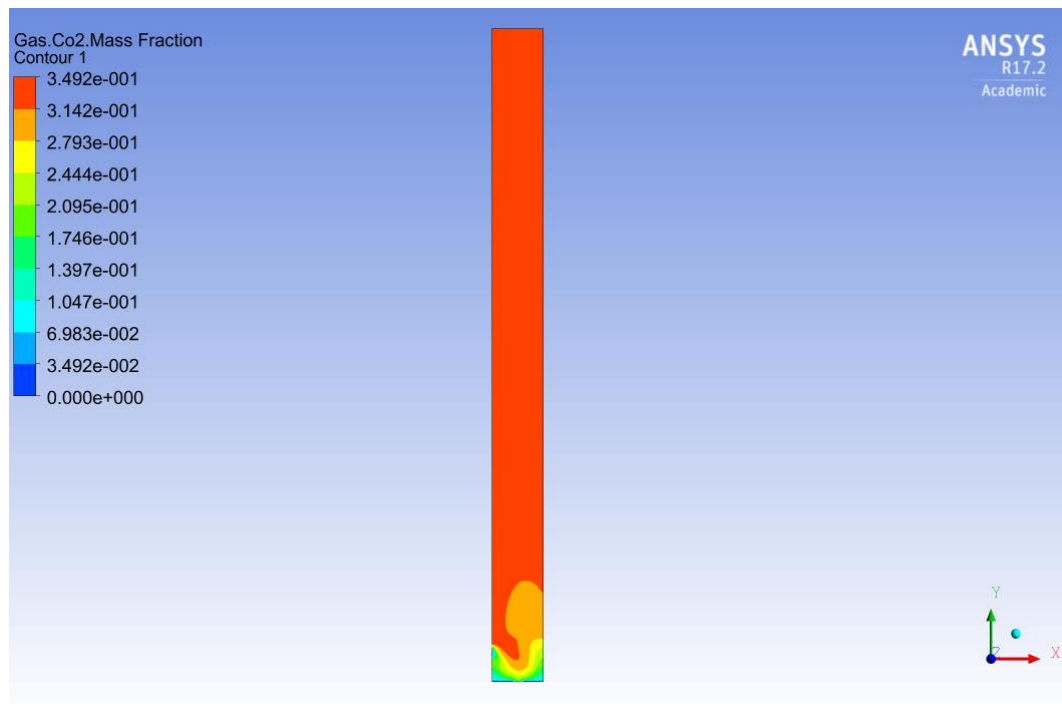


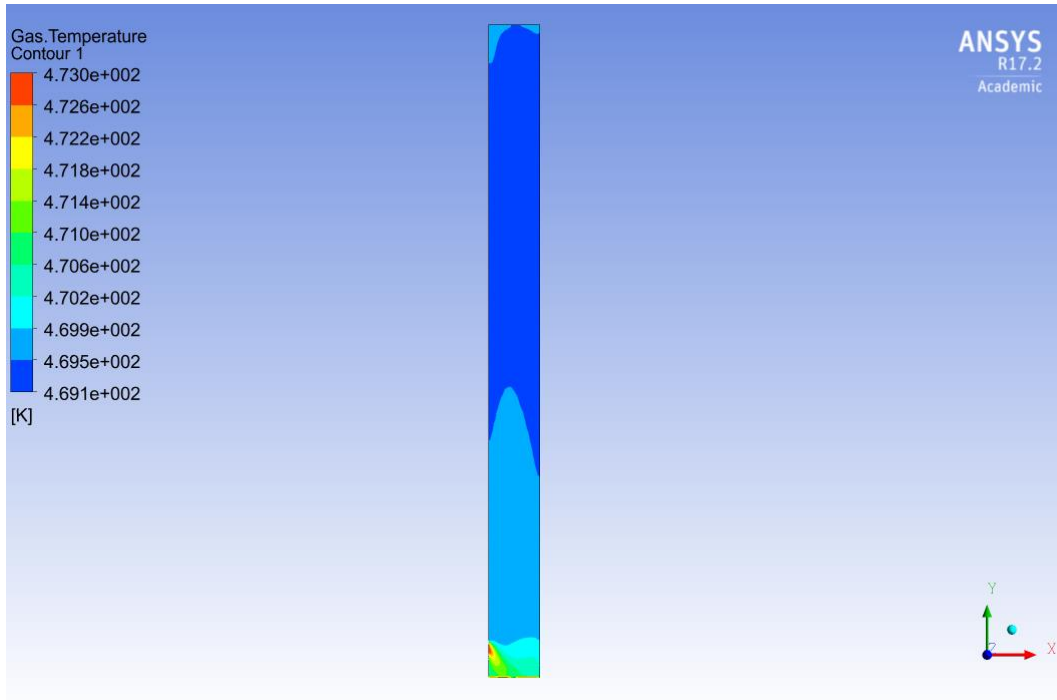


(ก)

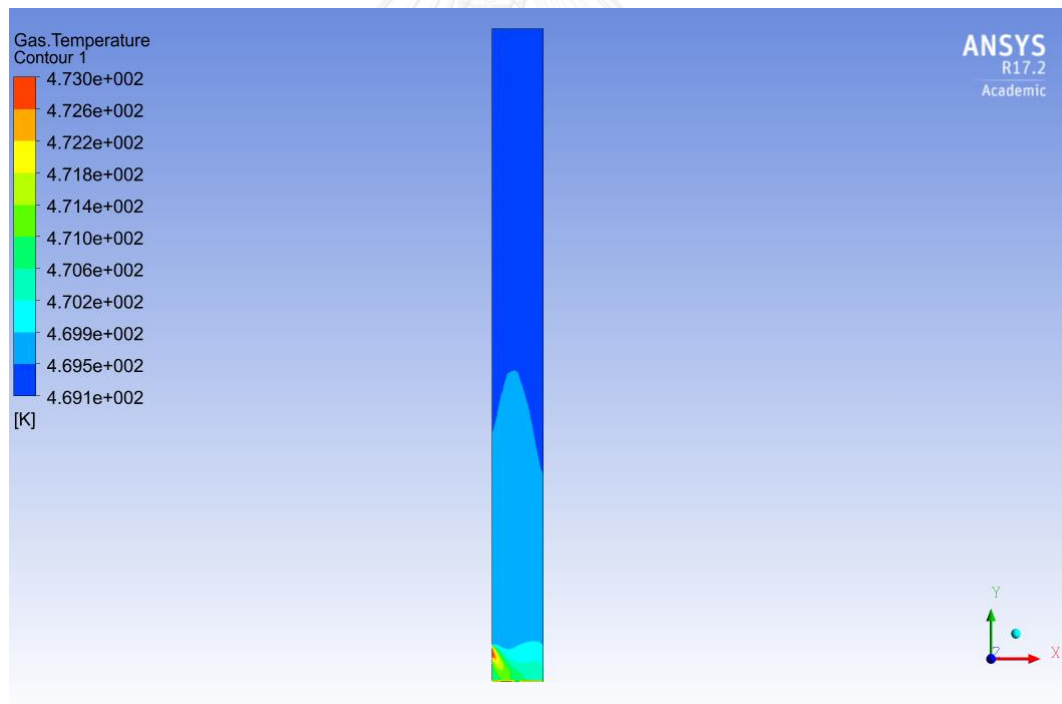


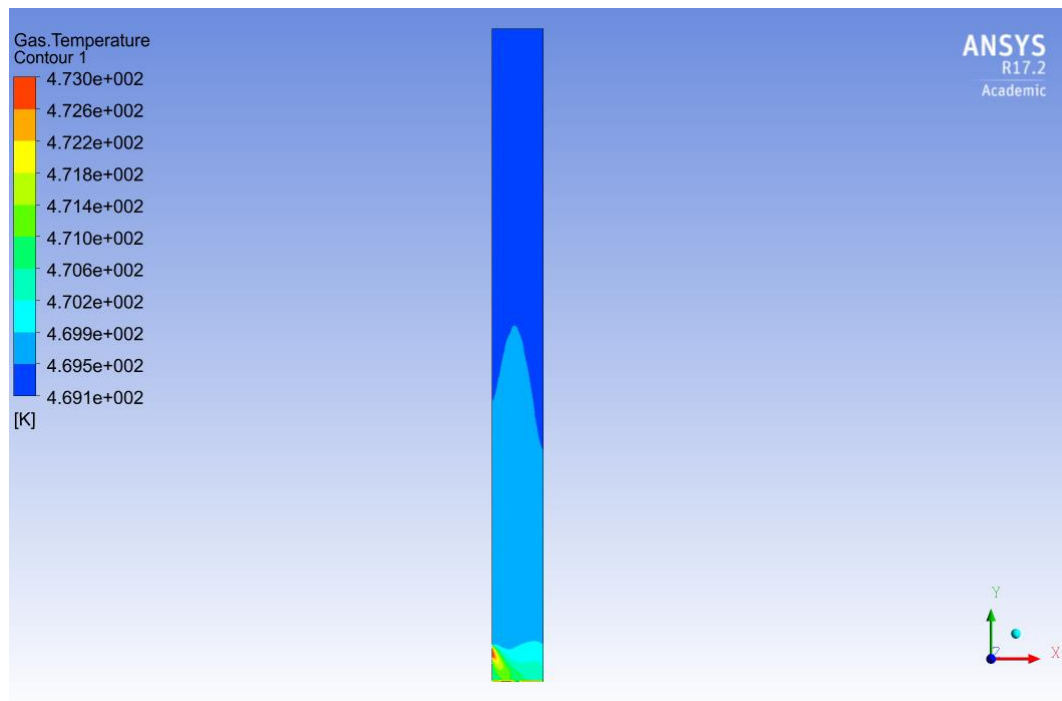






4

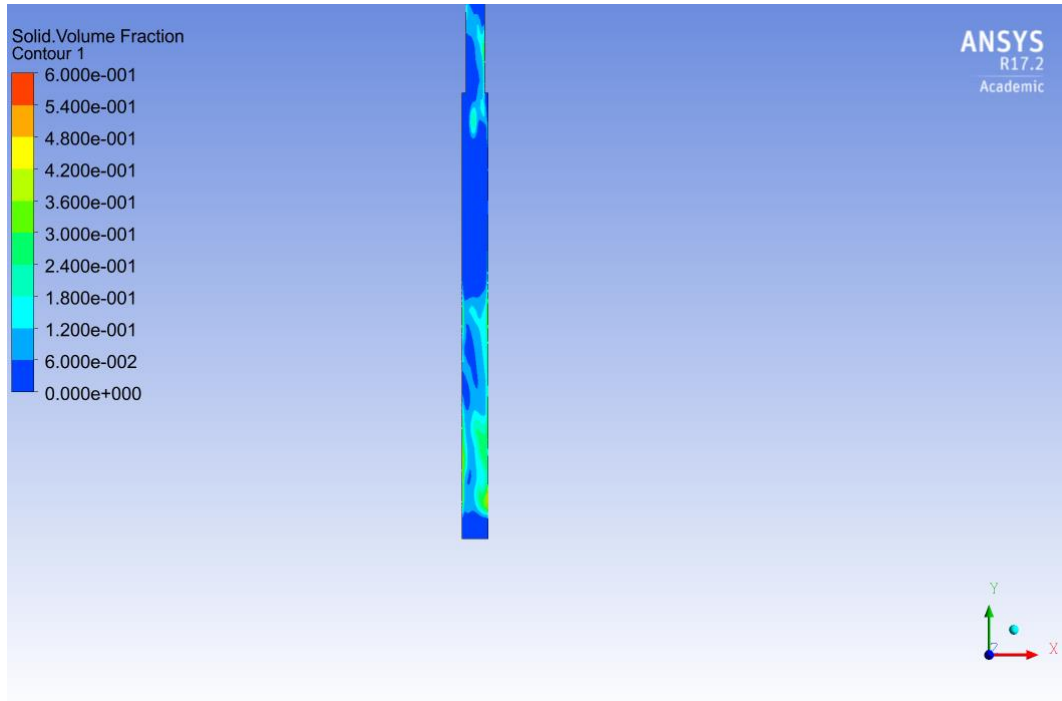




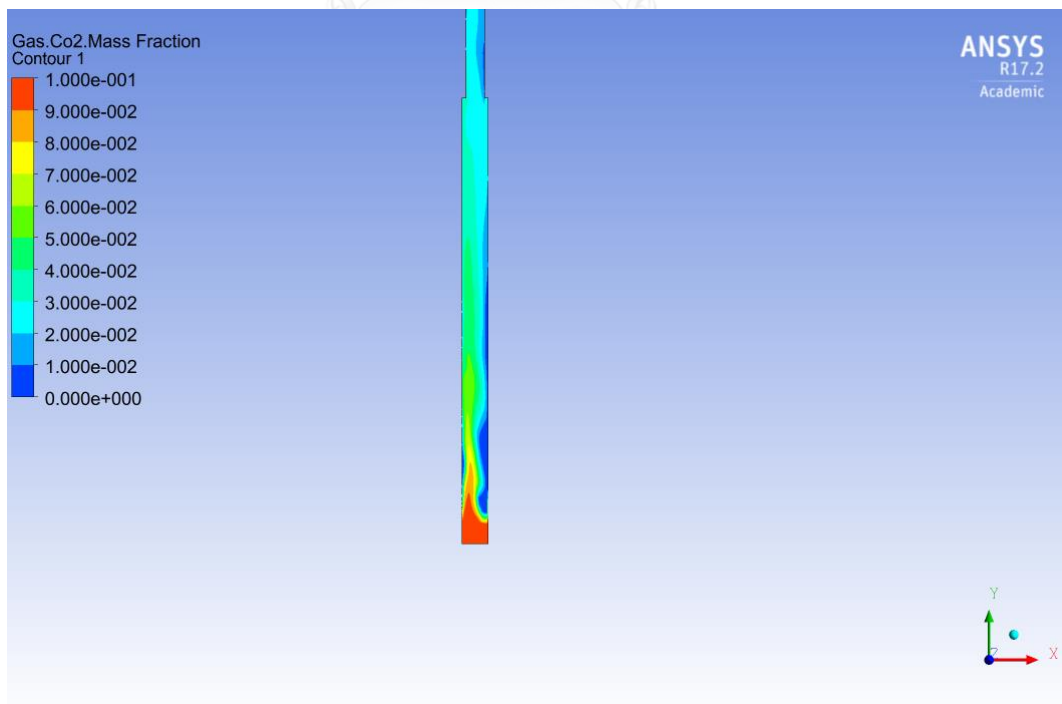
(ค)

รูปข 2 (ก) คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็ง (ข) คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวล
คาร์บอนไดออกไซด์ (ค) คอนทัวร์ของอุณหภูมิแก๊สที่ขนาดเซลล์คำนวณ 8,000 เซลล์ของท่อดาวเนอร์
เวลา 60 70 80 ตามลำดับ

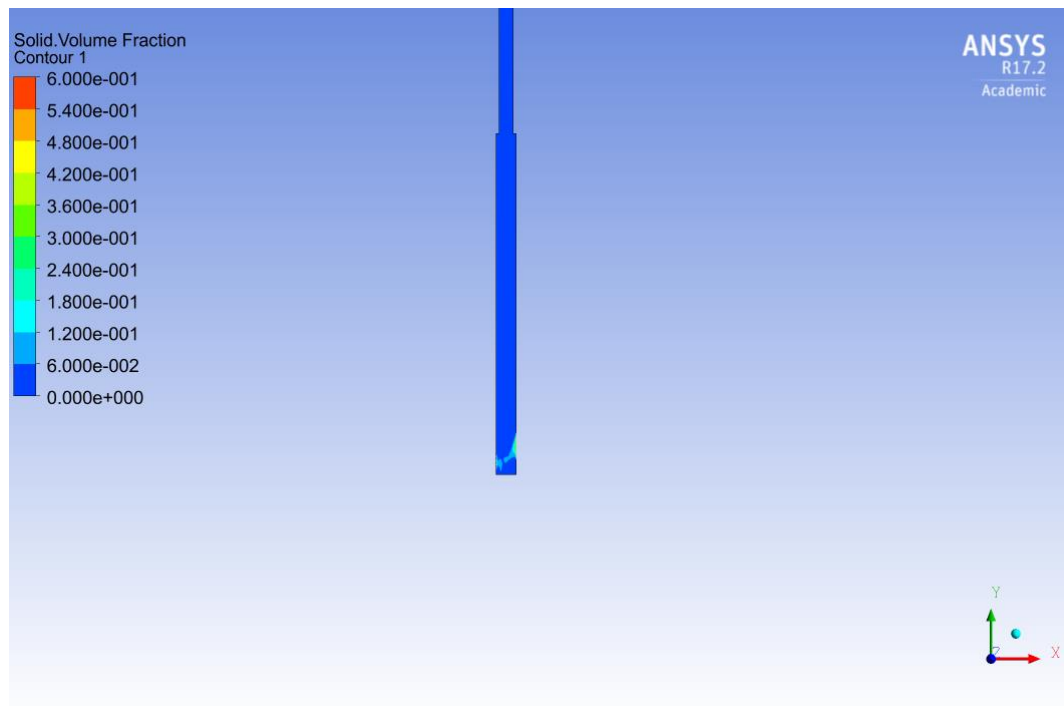
คอนทัวร์รูปภาพเพิ่มเติมของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์

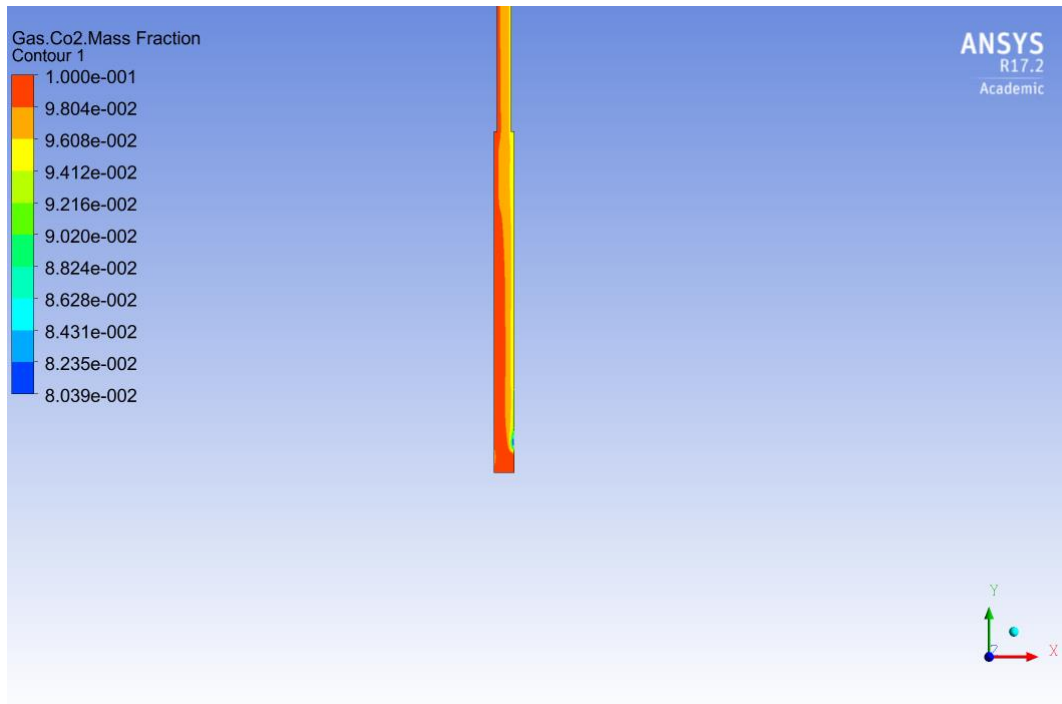


(ก)



(ข)

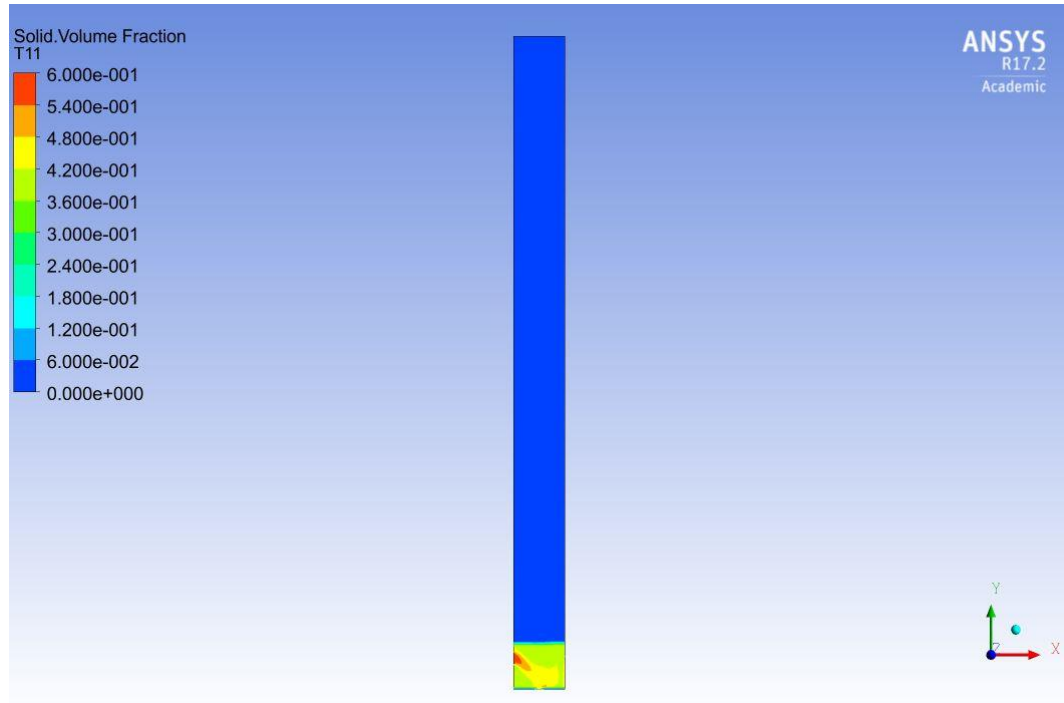




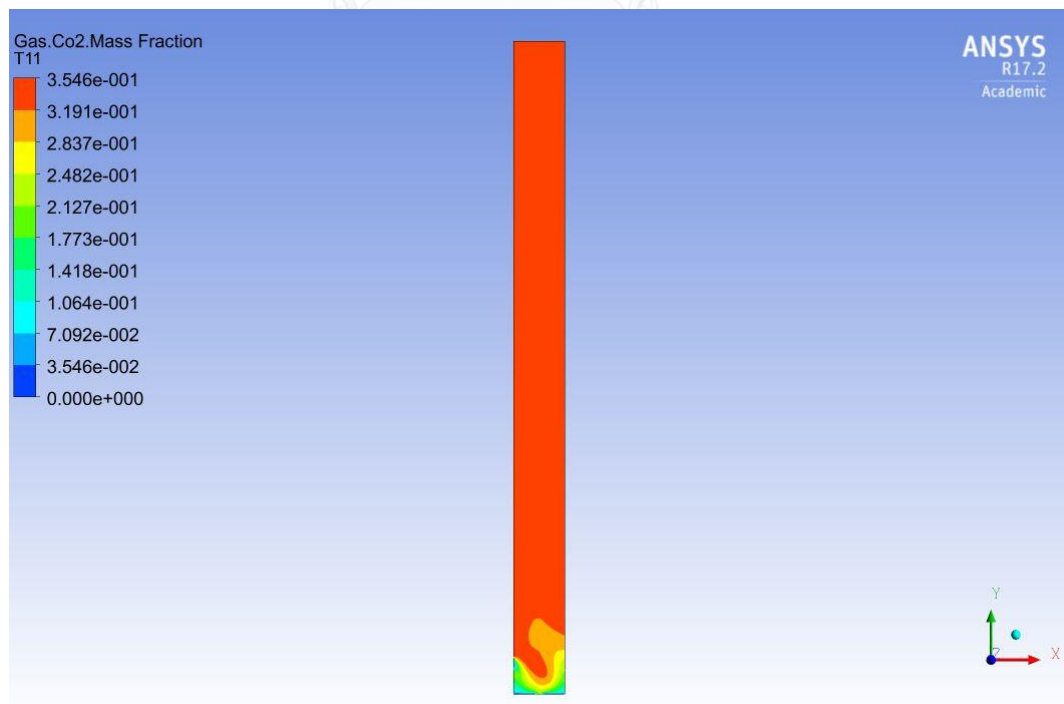
(ง)

รูป 3 (ก) คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งของกรณีศึกษาที่ 25 (ข) คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีศึกษาที่ 25 (ค) คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งของกรณีศึกษาที่ 11 (ง) คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีศึกษาที่ 11 จากผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในท่อไรเซอร์

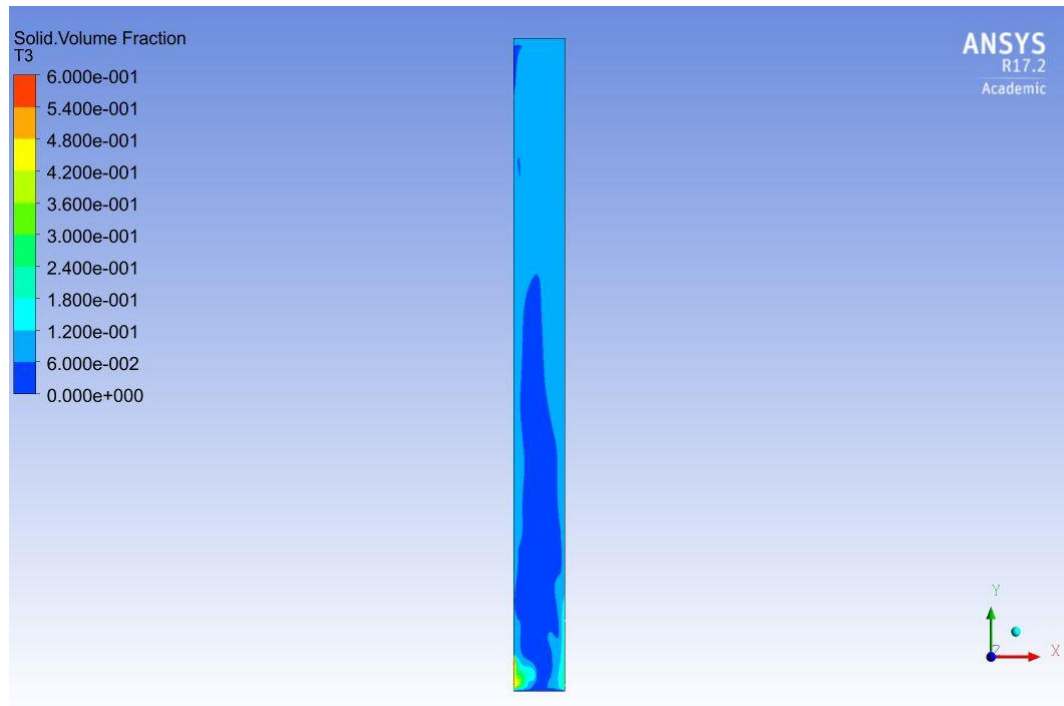
คอนทัวร์รูปภาพเพิ่มเติมของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยอุณหภูมิต่ำในท่อดาวเนอร์



(ก)

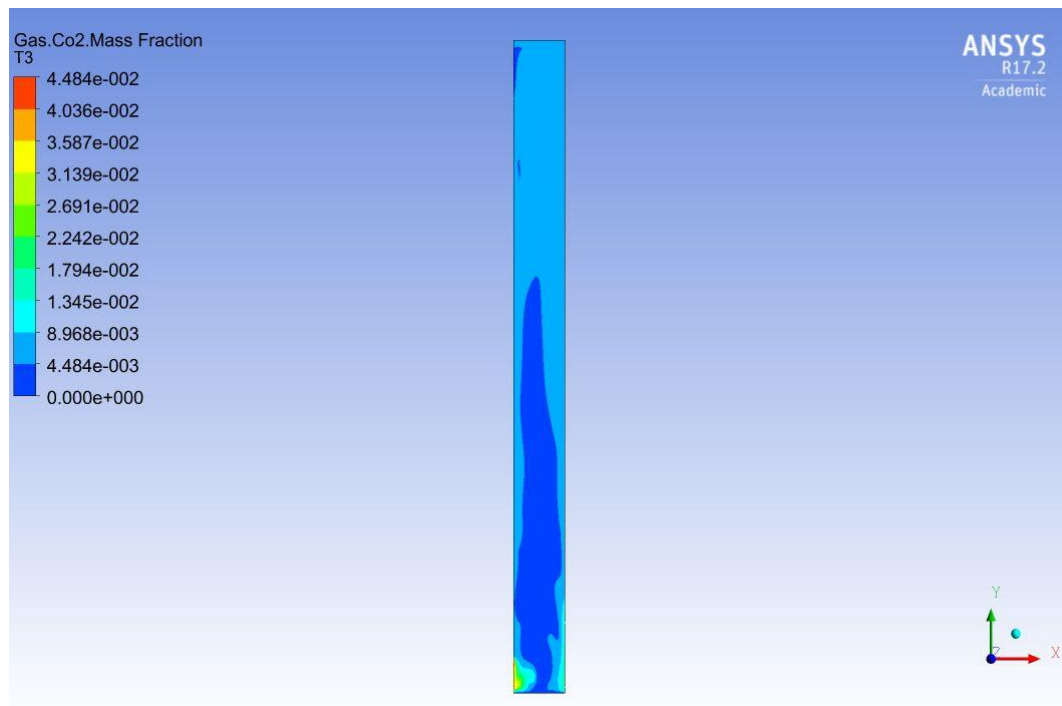


(ข)



(ค)

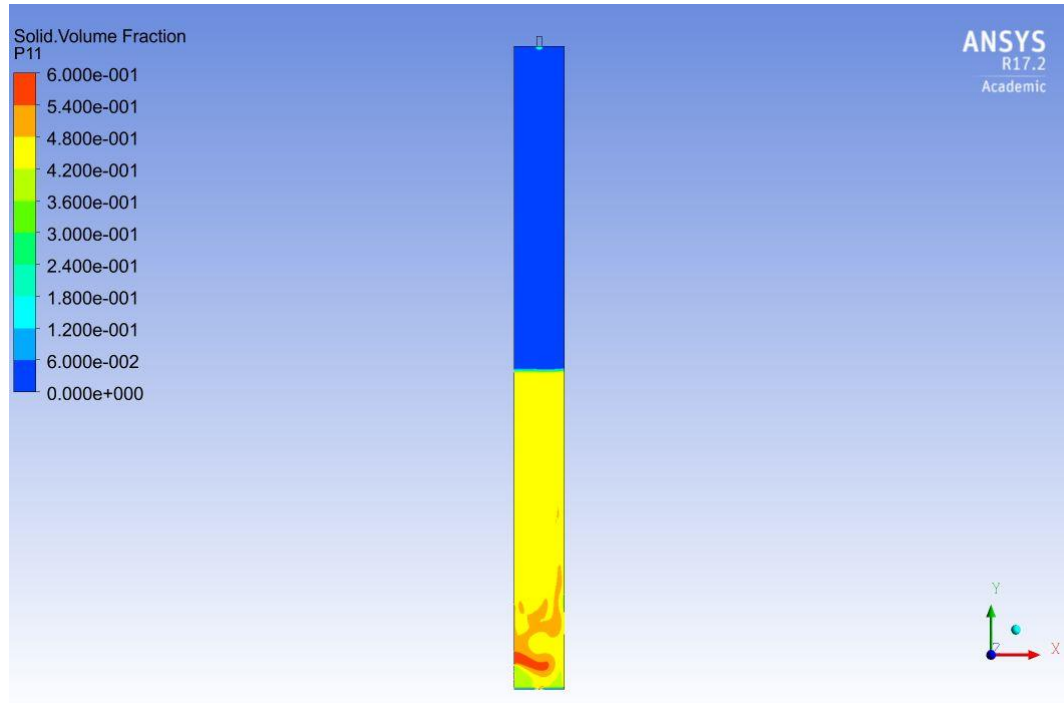




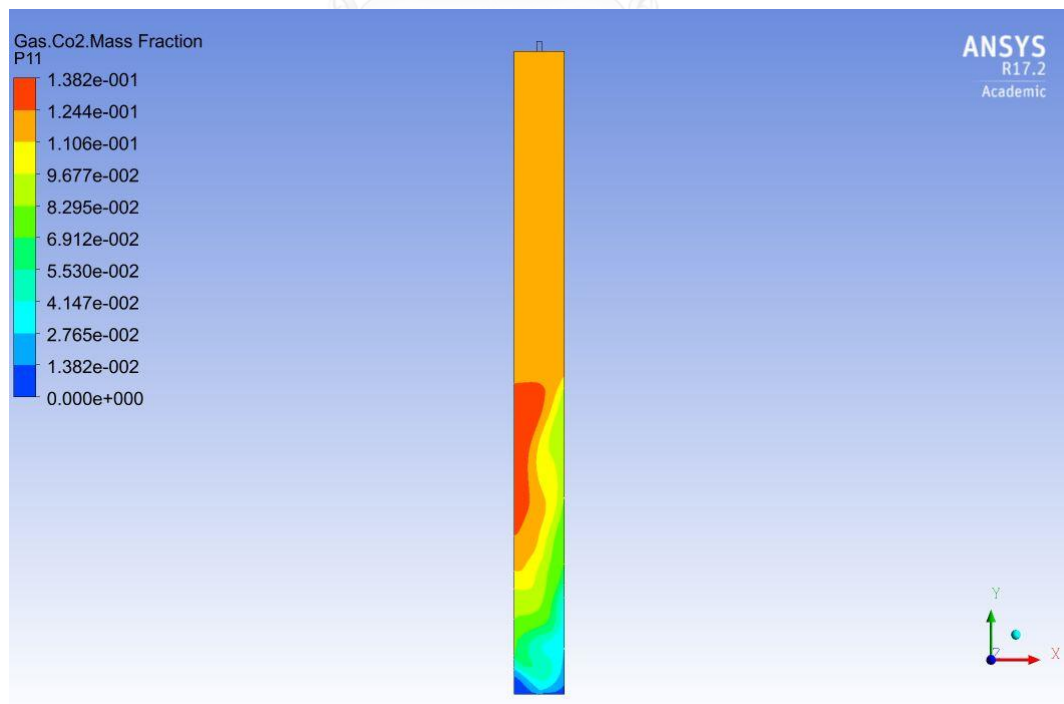
(ง)

รูปข 4 (ก) คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งของกรณีศึกษาที่ 11 (ข) คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีศึกษาที่ 11 (ค) คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งของกรณีศึกษาที่ 3 (ง) คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีศึกษาที่ 3 จากผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยอุณหภูมิในท่อดาวเนอร์

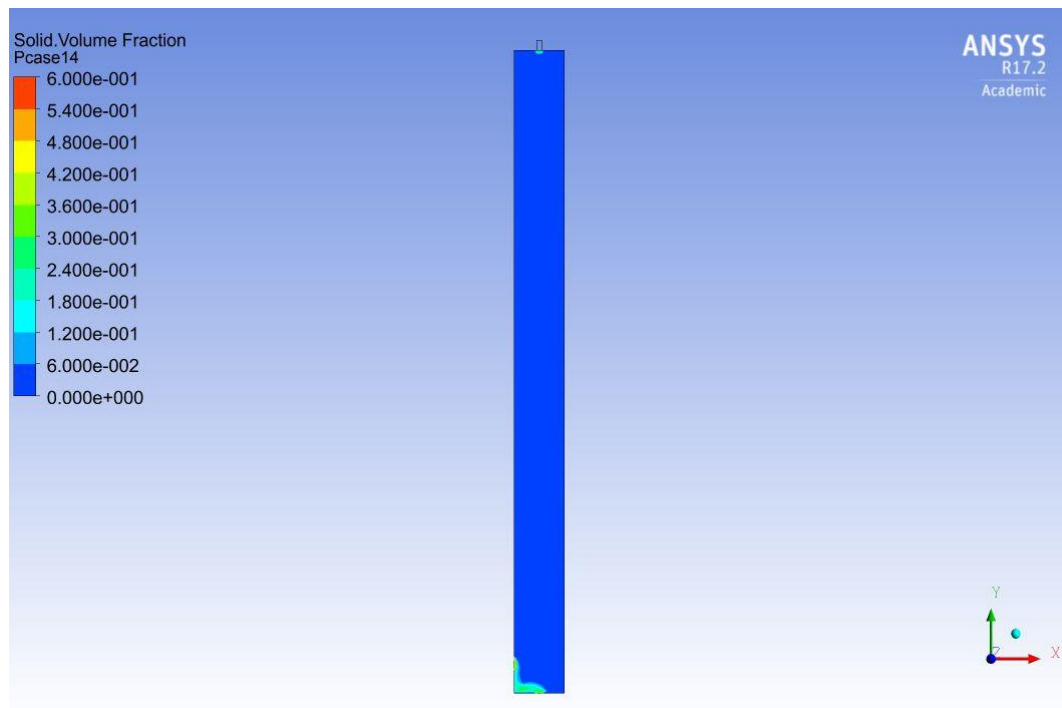
คอนทัวร์รูปภาพเพิ่มเติมของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดันในท่อดาวเนอร์



(ก)

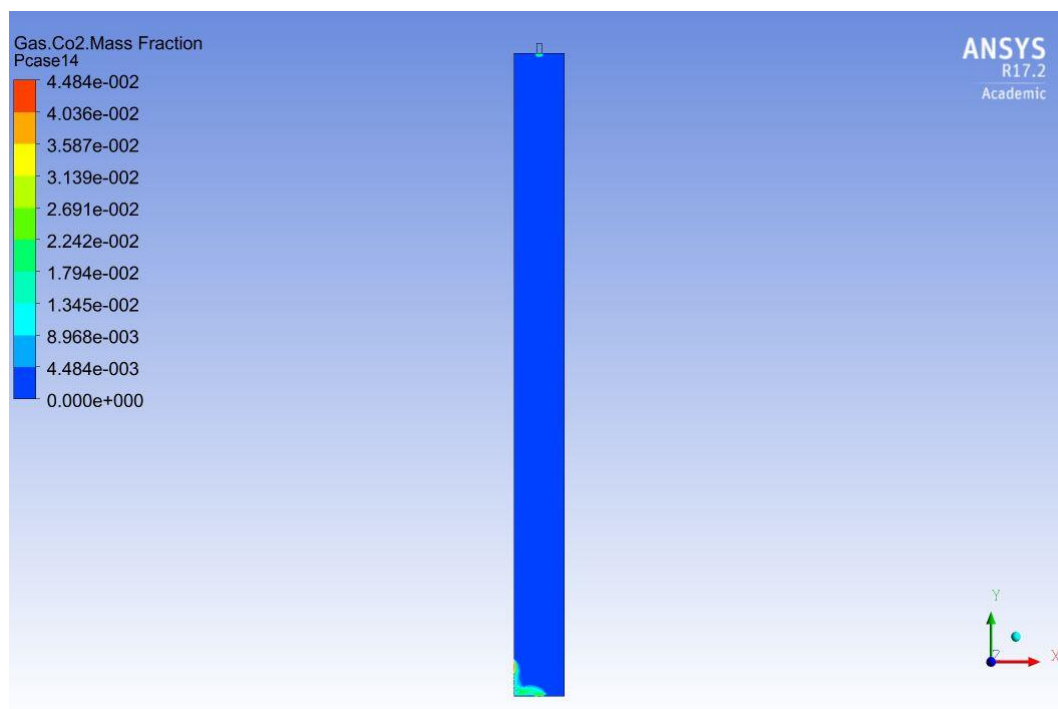


(ข)



(ค)





(ง)

รูป 5 คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งของกรณีศึกษาที่ 11 (ข) คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีศึกษาที่ 11 (ค) คอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งของกรณีศึกษาที่ 14 (ง) คอนทัวร์ของสัดส่วนโดยมวลคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีศึกษาที่ 14 จากผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่อกระบวนการคืนสภาพตัวดูดซับด้วยความดันในท่อดาวเนอร์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฉัททันต์ สงวนนภาพร เกิดเมื่อวันจันทร์ที่ 26 กรกฎาคม พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษาปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2558 ได้ตีพิมพ์และเข้าร่วมการนำเสนอผลงานทางวิชาการ ดังนี้

1. Sakaunnaporn, C., Piumsomboon, P., and Chalermssinsuwan, B. Normal Reynolds stress and solid diffusivity of solid particles in circulating-turbulent fluidized bed system using CFD simulation. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research 5(4) (2016) 260-263.
2. Sakaunnaporn, C., Piumsomboon, P., and Chalermssinsuwan, B. Computational fluid dynamics model of CO₂ capture in fluidized bed reactors: Operating parameter optimization. 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies (2017 AEDCEE), Bangkok, Thailand (2017).
3. Sakaunnaporn, C., Tritippayanon, R., Piumsomboon, P., and Chalermssinsuwan, B. 3k factorial statistical experimental design of CO₂ capture using K₂CO₃/Al₂O₃ solid sorbents in novel circulating fluidized bed reactor. The 5th Asian Conference on Innovative Energy & Environmental Chemical Engineering (ASCON-IEEChE), Yokohama, Japan (2016).