



รายงานโครงการวิจัย

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบชั้น

แบบมีปฏิกิริยาเคมี

(Computational fluid dynamics simulation of stage fluidized bed reactor
with chemical reaction)

โดย

นางสาวชนานันท์ โรจนรุ่งเรืองพร 5832916323

นางสาวศุภรดา วินัยพานิช 5832968023

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

โครงการและรายงานการวิจัยเพื่อเสริมประสบการณ์ ปีการศึกษา 2561

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CU-IR)
are the senior project authors' files submitted through the faculty.

CHULALONGKORN
UNIVERSITY
INTELLECTUAL
REPOSITORY

Computational fluid dynamics simulation of stage fluidized bed reactor
with chemical reaction

Chananun Rojanarungruengporn

Suparada Winaipanich

A project Submitted in Partial Senior Project Subject (2306499)

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

ชื่อโครงการ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้น
แบบมีปฏิกิริยาเคมี

ชื่อนิติผู้ทำโครงการ นางสาวชนานันท์ โรจนรุ่งเรืองพร
นางสาวศุภรดา วินัยพานิช

อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เถลิงสินสุวรรณ

ภาควิชา เคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อ

ปัจจุบันภาวะโลกร้อน ทวีความรุนแรงมากขึ้นซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการที่มีแก๊สเรือนกระจก
ในบรรยากาศมากเกินไป แก๊สเรือนกระจกตัวหนึ่งที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้
เชื้อเพลิงเพื่อนำพลังงานมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์

งานวิจัยนี้ได้จำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบดั้งเดิม
และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้น โดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสองมิติ
ร่วมกับทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาคของแข็ง เพื่อศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการกำจัด
คาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด โดยใช้ตัวดูดซับของแข็งโพแทสเซียมคาร์บอเนต
และเพื่อพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้นให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น
สำหรับผลของตัวแปรดำเนินการ พบว่า ขนาดของอนุภาคของแข็งไม่มีผลต่อการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์
ความเร็วของของไหล อัตราการหมุนเวียนของแข็ง อุณหภูมิของของไหล ส่งผลต่อการกำจัด
คาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลของตัวแปรออกแบบ พบว่า
มุมกรวย ความกว้างชั้น ความสม่ำเสมอของชั้น และระยะห่างระหว่างชั้น ส่งผลต่อการกำจัด
คาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ กล่าวโดยสรุป การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดเป็นแบบชั้น
สามารถส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบดั้งเดิม

คำสำคัญ: การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบชั้น, ปฏิกิริยาเคมี

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิติ *ชนานันท์ โรจนรุ่งเรืองพร*

สาขาวิชา เคมีวิศวกรรม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก..... *เบญจพล เถลิงสินสุวรรณ*

Title Computational fluid dynamics simulation of stage fluidized bed reactor with chemical reaction

Student name Chananun Rojanarungruengporn
Suparada Winaipanich

Advisor Assoc. Prof. Dr. Benjapon Chalermssinsuwan

Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University,

Academic Year 2018

ABSTRACT

Nowadays, global warming is a serious environmental issue which is caused by the emission of greenhouse gases to the atmosphere. The important greenhouse gas is carbon dioxide which is mainly produced by burning fossil fuels in industrial and human activities.

In this study, the conventional fluidized bed reactor and the stage fluidized bed reactor were simulated by using a two-dimensional computational fluid dynamics simulation with the kinetic theory of granular flow concept. The purposes of this study were to study the parameters that had an effect on carbon dioxide removal in fluidized bed reactor by using the potassium carbonate solid sorbents and to develop the suitable model for stage fluidized bed reactor to increase the carbon dioxide removal. The effect of operating parameters showed that particle diameter did not affect on carbon dioxide removal. Gas inlet velocity, solid mass flux and gas inlet temperature had significant affect on carbon dioxide removal in fluidized bed reactor. The effect of designing parameters showed that that cone angle, width of stage, distance between stages and number of stages affected on carbon dioxide removal in fluidized bed reactor. In summary, the development of a stage fluidized bed reactor could give higher carbon dioxide removal efficiency than conventional fluidized bed reactor.

Keywords: Computational fluid dynamics simulation, Stage fluidized bed reactor, Chemical reaction

Department of Chemical Technology

Major: Chemical Engineering

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Chananun Rojanarungruengporn

Benjapon Chalermssinsuwan

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนระดับปริญญาตรี เพื่อสร้างเสริมประสบการณ์ประจำปีการศึกษา 2561 ของภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โครงการการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบชั้นแบบมีปฏิกิริยาเคมีสำเร็จจุล่งไปได้ด้วยดี เพราะความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดการทำโครงการ

ขอขอบคุณคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิค ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการพร้อมทั้งคำแนะนำต่าง ๆ ในการใช้เครื่องมืออย่างปลอดภัย

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องทุกคนในภาควิชาที่ได้ให้คำปรึกษาและกำลังใจตลอดการทำโครงการ และขอขอบคุณนายภฤติน ก่อเกิด และนายชัยวัฒน์ โสอนุช ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้องในครอบครัว ที่ได้เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกสิ่งทุกอย่างเสมอมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย	2
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย	3
บทที่ 2	4
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ฟลูอิดส์เบด	4
2.1.1 ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบด เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	4
2.1.2 ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบด เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	5
2.1.3 ช่วงการไหล (Regime)	5
2.1.4 การจัดหมวดหมู่ของอนุภาคของ Geldart	8
2.2 ฟลูอิดส์เบดแบบชั้น	9
2.3 การจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD)	9
2.3.1 ระเบียบวิธี (Methodology)	10
2.3.2 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization method)	10

2.4 ปฏิกริยาเคมี (Chemical reaction)	14
2.5 การออกแบบการทดลอง (Experimental design)	15
2.5.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k	15
2.5.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3	15
2.5.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA)	17
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	18
บทที่ 3	20
วิธีดำเนินงานวิจัย	20
3.1 การศึกษาแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย	23
3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Numerical model)	23
3.1.2 การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test)	28
3.1.3 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinetic model)	29
3.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบขึ้น	31
3.2.1 กรณีศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ	31
3.2.2 กรณีศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ	31
บทที่ 4	35
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	35
4.1 การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย	35
4.1.1 การหาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Numerical model)	35
4.1.2 การหาแบบจำลองทางจลนศาสตร์	38
4.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์	41
4.3 การศึกษาผลของตัวแปรออกแบบที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์	57
บทที่ 5	74
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	74
5.1 สรุปผลการวิจัย	74
5.1.1 การหาแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัย	74
5.1.2 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ภายใน เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด	74

5.1.3 ผลของตัวแปรออกแบบต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ภายใน เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไตซ์เบดแบบขึ้น	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	76
รายการอ้างอิง	77

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^3	16
ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง	23
ตารางที่ 3 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 ของการทดลองกรณีศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ	33
ตารางที่ 4 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 ของการทดลองกรณีศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ	34
ตารางที่ 5 ตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในการหาแบบจำลองการไหล	37
ตารางที่ 6 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการจำลอง	41
ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการกำจัด คาร์บอนไดออกไซด์ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ	43
ตารางที่ 8 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 ของการศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ และค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการจำลอง	58
ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ของการศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ	59

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชันจากทฤษฎี	8
รูปที่ 2 การแบ่งประเภททฤษฎีของแข็งตามวิธีการของ Geldart	8
รูปที่ 3 ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม	11
รูปที่ 4 แผนภาพเค้าร่างของท่อโรเซออร์ที่จะใช้จำลอง	21
รูปที่ 5 เครื่องปฏิกรณ์คาร์บอนเซชัน	22
รูปที่ 6 การแบ่งพื้นที่การคำนวณ	29
รูปที่ 7 เปรียบเทียบเซลล์การคำนวณในตัวแปรค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกน	36
รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่ความสูงต่าง ๆ ในช่วงเวลา 0-80 วินาที	36
รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกนระหว่างงานวิจัยปัจจุบัน กับงานวิจัยที่ผ่านมา	37
รูปที่ 10 ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าที่แตกต่างกัน	39
รูปที่ 11 ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับเซลล์การคำนวณที่แตกต่างกัน	39
รูปที่ 12 สัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์	40
รูปที่ 13 ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับตัวแปรดำเนินการที่แตกต่างกัน	42
รูปที่ 14 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด	43
รูปที่ 15 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 40 วินาที	45
รูปที่ 16 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 60 วินาที	46
รูปที่ 17 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 80 วินาที	47
รูปที่ 18 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่เวลา 40 วินาที	48
รูปที่ 19 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่เวลา 60 วินาที	49

รูปที่ 20 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่เวลา 80 วินาที	50
รูปที่ 21 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 40 วินาที	51
รูปที่ 22 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 60 วินาที	52
รูปที่ 23 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 80 วินาที	53
รูปที่ 24 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่เวลา 40 วินาที	54
รูปที่ 25 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่เวลา 60 วินาที	55
รูปที่ 26 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่เวลา 80 วินาที	56
รูปที่ 27 ผลของตัวแปรออกแบบที่มีต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์	59
รูปที่ 28 ผลของอันตรกิริยาระหว่างมุมกรวย (E) และความสม่ำเสมอระหว่างชั้น (G) ที่มีต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์	60
รูปที่ 29 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความกว้างชั้น (F) และความสม่ำเสมอระหว่างชั้น (G) ที่มีต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์	61
รูปที่ 30 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่เวลา 40 วินาที	62
รูปที่ 31 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่เวลา 60 วินาที	63
รูปที่ 32 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่เวลา 80 วินาที	64
รูปที่ 33 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่เวลา 40 วินาที	65

รูปที่ 34 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่เวลา 60 วินาที	66
รูปที่ 35 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่เวลา 80 วินาที	67
รูปที่ 36 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่เวลา 40 วินาที	68
รูปที่ 37 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่เวลา 60 วินาที	69
รูปที่ 38 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่เวลา 80 วินาที	70
รูปที่ 39 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่เวลา 40 วินาที	71
รูปที่ 40 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่เวลา 60 วินาที	72
รูปที่ 41 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่เวลา 80 วินาที	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สภาวะโลกร้อน คือ ภาวะที่อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง ภาวะโลกร้อนอาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝน ระดับน้ำทะเล และมีผลกระทบอย่างกว้างขวางต่อพืช สัตว์ และมนุษย์ ในปัจจุบันสภาวะโลกร้อนทวีความรุนแรงมากขึ้นซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการที่มีแก๊สเรือนกระจกในบรรยากาศมากเกินไป แก๊สเรือนกระจกตัวหนึ่งที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อนำพลังงานมาใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ จากปัญหาของการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ จึงมีการนำเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งจะใช้ตัวดูดซับของแข็งดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการ หลักการของฟลูอิดไคซ์ชัน คือ การทำให้ของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายกับของไหล โดยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดจะมีอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ในท่อที่มีรูพรุนบริเวณฐาน เมื่อทำการป้อนของไหลเข้ามาในท่อจากทางด้านล่างผ่านรูพรุนบริเวณฐานของไหลจะไปสัมผัสกับอนุภาคของแข็ง ที่อัตราการไหลของของไหลค่าหนึ่ง จะทำให้ของแข็งในท่อเริ่มเกิดการผสมกัน ที่สภาวะนี้อนุภาคของแข็งแต่ละเม็ดจะถูกแยกออกจากกันและเคลื่อนที่หมุนวนอยู่ในท่อ อนุภาคของแข็งจะอยู่ในสภาพไร้น้ำหนักและมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับของไหล เพื่อที่จะปรับปรุงกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้นำเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขั้นมาใช้ เพื่อลดการไหลย้อนกลับของอนุภาคของแข็ง และเพิ่มพื้นที่พื้นที่สัมผัสระหว่างวัฏภาคภายในเครื่องปฏิกรณ์ช่วยเพิ่มโอกาสให้คาร์บอนไดออกไซด์สัมผัสกับตัวดูดซับได้ดียิ่งขึ้น โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตเนื่องจากโพแทสเซียมคาร์บอเนตมีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี ต้นทุนต่ำ และสามารถนำมาผ่านกระบวนการฟื้นฟูนำกลับมาใช้ในระบบได้ใหม่ เพื่อที่จะประหยัดเงินทุน และเวลา โดยไม่จำเป็นต้องสร้างโมเดลต้นแบบ ไม่จำเป็นต้องเตรียมห้องทดสอบ และติดตั้งเพื่อการทดลองการศึกษาพฤติกรรม การเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขั้น จึงทำการศึกษาด้วยการจำลองกระบวนการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยใช้ในการวิเคราะห์และคาดการณ์ผลของอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขั้น ร่วมกับการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ของโพแทสเซียมคาร์บอเนต เพื่อนำผลที่ได้ไปออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบขั้นให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไอซ์เบดแบบขั้น
- 2) ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมและการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไอซ์เบดแบบขั้น
- 3) เพื่อเสนอแนวทางการปรับปรุง และพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไอซ์เบดแบบขั้นให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่สูงขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) การจำลองพลศาสตร์ของไหลและปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไอซ์เบด แบบที่ยังไม่ได้ปรับปรุง ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เพื่อหาแบบจำลองที่สามารถทำนายผลของอุทกพลศาสตร์ได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา
- 2) นำแบบจำลองที่ได้จากข้อ 1) มาทำการปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไอซ์เบดแบบมีปฏิกิริยาเคมี โดยการทำให้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไอซ์เบดแบบขั้น ด้วยวิธีเพิ่มขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์มุมของชั้น ความกว้างชั้น ระยะห่างระหว่างชั้น และความความสม่ำเสมอของชั้นในเครื่องปฏิกรณ์ รวมถึงเปลี่ยนแปลงอัตราเร็วของของไหล อัตราการหมุนเวียนของแข็ง ขนาดของอนุภาคของแข็ง และอุณหภูมิของของไหล

1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1) แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ 2 มิติ
- 2) แบบจำลองการไหลเป็นการไหลแบบ 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคแก๊ส และภูมิภาคของแข็ง

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) (Chalerm-sinsuwan, 2017) เป็นสาขาหนึ่งของวิชากลศาสตร์ของไหลที่ใช้ระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข และขั้นตอนวิธีต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบการไหลและปฏิกิริยาเคมี โปรแกรมที่เป็นที่นิยมใช้ ได้แก่ โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS CFX และ ANSYS FLUENT

ฟลูอิดเบดแบบชั้น (Phupanit, 2015) คือ เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการแบ่งเป็นชั้น เพื่อลดการไหลย้อนกลับของของแข็ง เป็นการเพิ่มระยะเวลาที่ของแข็งอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากชั้นในแต่ละชั้นในเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้แก๊สสัมผัสกับอนุภาคของแข็งอยู่ตลอดเวลา

อุทกพลศาสตร์ คือ สาขาวิชาย่อยของวิชากลศาสตร์ของไหล ที่ศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหลในพื้นที่หรือปริมาตรที่สนใจ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถนำแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ทำนายพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบชั้น
- 2) ทราบผลของตัวแปรดำเนินการ และตัวแปรออกแบบที่มีผลต่อการดำเนินการเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบชั้น
- 3) สามารถนำความรู้การใช้โปรแกรมจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (ANSYS FLUENT) ไปประยุกต์ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ หรือกระบวนการอื่น ๆ ในพลศาสตร์อุตสาหกรรมได้

1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย

ก. แผนการศึกษา :

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น
 - เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบชั้น
 - แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบชั้น
 - ชนิด และคุณสมบัติของตัวดูดซับของแข็งที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบชั้น
 - ตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบชั้น
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรม ANSYS FLUENT
3. ออกแบบการทดลองโดยกำหนดตัวแปรที่เหมาะสมตามที่สมมุติฐานไว้
4. เริ่มทำการทดลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT
5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองและนำเสนอแนวทางปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบชั้นที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น
6. สรุปผล จัดทำรายงาน เขียนวิทยานิพนธ์ และ บทความทางวิชาการ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟลูอิดไชน์เบด

ฟลูอิดไชน์เบด เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีแบบหลายเฟส ภายในเครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้ของไหลจะถูกส่งผ่านอนุภาคของแข็งที่ความเร็วสูง เพื่อให้ของแข็งมีพฤติกรรมการเคลื่อนที่เหมือนของไหล

ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน (Center, 2011) เป็นเครื่องปฏิกรณ์เคมีรูปแบบหนึ่งที่ภายในมีอนุภาคของแข็ง หรือของไหลซึ่งอาจจะเป็นของเหลว หรือแก๊สก็ได้ มีอันตรกิริยาระหว่างกัน ส่วนใหญ่ของไหลจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์แล้วสัมผัสกับอนุภาคของแข็ง ทำให้ของแข็งมีพฤติกรรมการเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล นอกจากนี้ เครื่องปฏิกรณ์ยังมีกลไกในการแยกอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่ หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่สมบูรณ์และป้อนกลับเข้าสู่กระบวนการอีกครั้ง เครื่องปฏิกรณ์มีองค์ประกอบหลักได้แก่ ท่อไรเซอร์ (Riser) เป็นท่อสูงก่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมี ไชโคลน (Cyclone) เป็นอุปกรณ์สำหรับทำหน้าที่แยกอนุภาคของแข็งออกจากแก๊ส โดยอาศัยหลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงโน้มถ่วง ท่อดาวเนอร์ (Downer หรือ Downcomer) และท่อป้อนกลับ (Return system) เป็นบริเวณที่ของแข็งที่ยังมีขนาดใหญ่ที่ถูกแยกโดยไชโคลนไหลผ่านและจะถูกป้อนกลับไปในท่อไรเซอร์

2.1.1 ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

1. มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็งสูง และมีการกวนผสมภายใน (Internal mixing) สูง ส่งผลให้แก๊สและอนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่ปั่นป่วนภายในกระบวนการอยู่ตลอด
2. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็งที่เฉพาะเจาะจง คือ อนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงและต่ำจะอยู่ที่บริเวณด้านล่างและด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ ตามลำดับ
3. เป็นตัวกลางถ่ายโอนความร้อนที่ดี มีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิภายในเบด และมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูง
4. สามารถใช้งานเครื่องได้อย่างต่อเนื่อง โดยที่เติมของแข็งเข้าไปหรือปล่อยของแข็งออกจากเครื่องโดยไม่ต้องหยุดระบบ
5. เป็นกระบวนการที่ต้องการพลังงานในการดำเนินการต่ำ เพราะมีแรงต้านทานภายในกระบวนการ (Friction) ที่ต่ำ

2.1.2 ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์เบดแบบนิ่ง

1. มีการแตกหัก หรือลดขนาดของอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเกิดการชนกันเองของอนุภาคของแข็ง
2. มีการสึกกร่อนของผนังเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเกิดการชน และเสียดสีของอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนที่กับผนังเครื่องปฏิกรณ์
3. กระบวนการมีข้อจำกัด อนุภาคของแข็งจะหลุดออกจากกระบวนการที่ความเร็วของไหลป้อนเข้ากระบวนการสูง ทำให้เวลาที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคของแข็งมีค่าน้อย
4. มีการตกกลับของอนุภาคของแข็งบริเวณผนัง ทำให้อนุภาคเกิดการรวมเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลลดลง
5. ไม่สามารถใช้งานกับอนุภาคของแข็งที่เปราะหรือเหนียว เพราะจะเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคขนาดใหญ่

2.1.3 ช่วงการไหล (Regime)

พฤติกรรมการไหลหรือการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์จะเปลี่ยนไปเมื่อความเร็วของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนแปลงไป (Chalerm sin suwan, 2017) ซึ่งรูปแบบของช่วงการไหลสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1.3.1 เบดนิ่ง (Fixed bed)

ลักษณะการไหลแบบนี้ยังไม่ถือว่าเป็นช่วงการไหลของฟลูอิดไชน์ อัตรการป้อนหรือความเร็วของของไหลป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์จะยังไม่เพียงพอที่ทำให้อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัวหรือมีลักษณะเด่น คือ อนุภาคของแข็งในกระบวนการจะไม่มีเคลื่อนที่ สมการของ Ergun (1952) จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณความดันตกของการไหลของของไหลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งอันประกอบไปด้วยสองพจน์ คือ ความดันสูญเสียเนื่องจากความหนืดของของไหล และความดันสูญเสียเนื่องจากพลังงานจลน์ของของไหล

$$\frac{\Delta p}{L} g_c = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu U_0}{(\phi d_p)^2} + \frac{1.75(1-\varepsilon)\rho_f U_0^2}{\varepsilon^3 \phi d_p} \quad (2.1)$$

เมื่อ ΔP คือ ความดันตกคร่อมเบด
 L คือ ความสูงของเบด

g_c	คือ แรงโน้มถ่วงของโลก
μ	คือ ความหนืดของของไหล
ρ_f	คือ ความหนาแน่นของของไหล
U_0	คือ ความเร็วป้อนเข้ากระบวนการ
d_p	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง
ε	คือ สัดส่วนช่องว่างโดยปริมาตรภายในกระบวนการ

2.1.3.2 ฟลูอิดซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Blubbing fluidized bed)

ลักษณะการไหลแบบนี้เริ่มถือว่าเป็นช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน ความเร็วเริ่มต้นที่อนุภาคของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์เริ่มขยับตัว เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity; U_{mf}) มีลักษณะเด่น คือ จะเริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้น ลักษณะการเกิดฟองแก๊สจะแตกต่างกันไปตามขนาดของอนุภาคของแข็ง ซึ่งสมการของ Ergun มีสมมุติฐานว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดกระบวนการฟลูอิดเซชันจะคำนวณจากภาวะที่แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งมีค่าเท่ากับแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง (W)

แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็ง = ความดันลด (Δp) \times พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับการไหล (A)

แรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของอนุภาคของแข็ง = ปริมาตรของเบด (V) \times สัดส่วนโดยปริมาตรของเบด (ε_s) \times น้ำหนักจำเพาะของเบด ($\rho_s - \rho_f$)

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_f) \frac{g}{g_c} \quad (2.2)$$

เมื่อ g/g_c คือ อัตราส่วนระหว่างค่าแรงโน้มถ่วงต่อค่าคงที่การแปลงแรงโน้มถ่วง

L_{mf} คือ ความสูงของเบดที่ภาวะความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (เมตร)

ε_{mf} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของช่องว่างที่ภาวะความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันสามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$\frac{1.75}{\phi \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right)^2 + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\phi^2 \varepsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_f}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g}{\mu^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ ε_{mf} คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของช่องว่างที่ภาวะความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

กรณีอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก หรือ $Re_{mf} < 20$

$$U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2 (\rho_s - \rho_f) g \varepsilon_{mf}^3}{150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (2.4)$$

กรณีอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ หรือ $Re_{mf} > 1000$

$$U_{mf}^2 = \frac{\phi d_p (\rho_s - \rho_f)}{1.75 \rho_f} g \varepsilon_{mf}^3 \quad (2.5)$$

2.1.3.3 ฟลูอิดไคซ์เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidized bed)

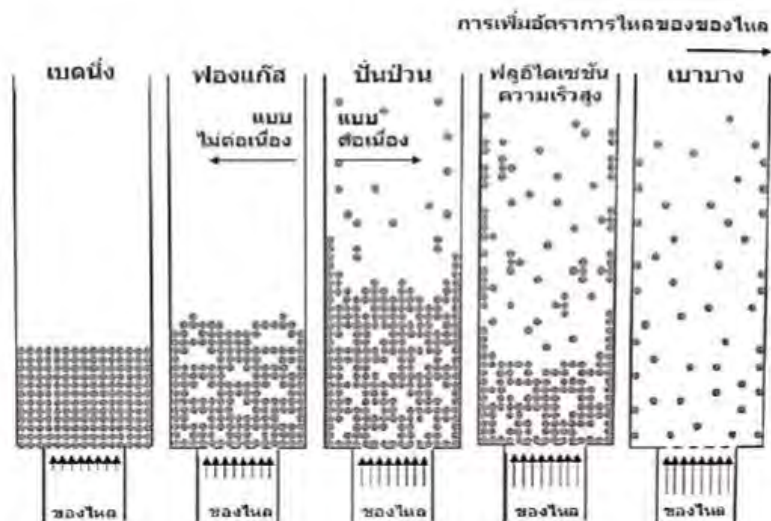
ลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้ามีค่าอยู่ระหว่างความเร็วสองค่า คือ ความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวดแกว่งในกระบวนการมีค่าสูงที่สุดและความเร็วที่ทำให้ขนาดของความดันกวดแกว่งมีค่าต่ำที่สุดจนเข้าสู่ภาวะคงตัว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะแตกอย่างรวดเร็วเนื่องจากความเร็วที่สูงขึ้นจนดูคล้ายกับไม่มีฟองแก๊สในกระบวนการ โดยลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์จะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่ชัดเจน คือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่นที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางที่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์

2.1.3.4 ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟลูอิดไคซ์ชันความเร็วสูง (Fast fluidization fluidized bed)

ลักษณะการไหลแบบนี้เกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้ามีค่ามากกว่าความเร็วขนส่ง (Transport velocity) ที่บริเวณกลางเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่เบาบางและเคลื่อนที่ขึ้นตามทิศทางการไหลของของไหลแต่ที่บริเวณผนังเครื่องปฏิกรณ์จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่นและเคลื่อนที่ลงสวนทิศทางการไหลของของไหล รวมเรียกลักษณะการไหลเฉพาะแบบนี้ว่า การไหลแบบแกนใน - วงนอก (Core-annulus flow)

2.1.3.5 ฟลูอิดไคซ์เบดแบบเบาบาง (Pneumatic transport fluidized bed)

ลักษณะการไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นหลังจากความเร็วของไหลป้อนเข้ามีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการขนส่งด้วยลม (Minimum pneumatic transport velocity) อนุภาคของแข็งทั้งหมดจะถูกพาออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์โดยจะเคลื่อนที่แยกจากกันเป็นอนุภาคของแข็งเดี่ยวกระจายตัวอยู่ในกระแสของไหล ซึ่งจะมีสัดส่วนระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหลอยู่ที่ประมาณ 1 ต่อ 20 หรือมีปริมาณของไหลในเครื่องปฏิกรณ์อยู่สูงมาก

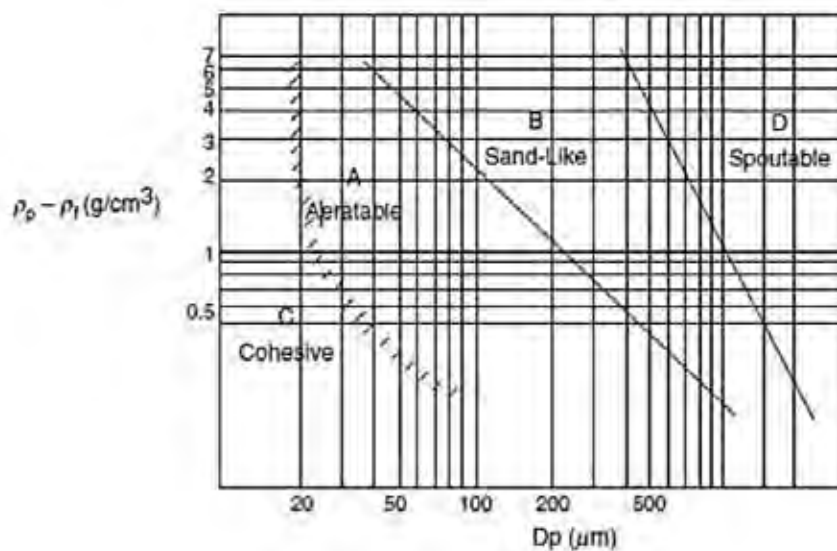


รูปที่ 1 ช่วงการไหลของฟลูอิดเซชันจากทฤษฎี

(เบญจพล เถлимสินสุวรรณ, 2017)

2.1.4 การจัดหมวดหมู่ของอนุภาคของ Geldart

ลักษณะการไหลที่เกิดภายในกระบวนการฟลูอิดเซชันขึ้นอยู่กับประเภทของอนุภาคของแข็ง โดยวิธีการที่นิยมใช้ในการแบ่งประเภทอนุภาคของแข็ง คือ วิธีการของ Geldart ซึ่งแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งจากความสัมพันธ์ของผลต่างความหนาแน่นอนุภาคของแข็งและของไหลและขนาดอนุภาคของแข็ง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การแบ่งประเภทอนุภาคของแข็งตามวิธีการของ Geldart

(<http://article.sciencepublishinggroup.com/journal/248/2481051/image005.jpg>)

กลุ่ม A อนุภาคของแข็งมีขนาดเล็ก หรือมีความหนาแน่นต่ำ โดยที่ความหนาแน่นต่ำกว่า 1400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดกระบวนการฟลูอิดไลเซชันได้ดี แต่จะเกิดการขยายตัวก่อนช่วงหนึ่งที่จะเริ่มเกิดฟองแก๊สในกระบวนการ

กลุ่ม B เป็นกลุ่มที่อนุภาคมีลักษณะคล้ายทราย อนุภาคของแข็งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40-500 ไมโครเมตร และความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งอยู่ในช่วง 1400-4000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดกระบวนการฟลูอิดไลเซชันได้ดีมาก จะเริ่มเกิดฟองแก๊สในกระบวนการได้ทันที

กลุ่ม C อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะมีขนาดเล็กมาก แรงกระทำระหว่างอนุภาคของแข็งจึงมีค่าใกล้เคียงกับแรงดึงดูดของโลกที่กระทำต่ออนุภาคของแข็งนั้น อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดกระบวนการฟลูอิดไลเซชันได้ยาก

กลุ่ม D อนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่มาก และมีความหนาแน่นสูง จึงต้องการความเร็วที่สูงมากในการเกิดฟลูอิดไลเซชัน

2.2 ฟลูอิดไลเซชันแบบขั้น

ฟลูอิดไลเซชันแบบขั้น คือ เครื่องปฏิกรณ์ที่มีการแบ่งเป็นชั้น เพื่อลดการไหลย้อนกลับของของแข็ง เนื่องจากชั้นในแต่ละชั้นของเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้แก๊สสัมผัสกับอนุภาคของแข็งใหม่อยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา

2.3 การจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD)

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นวิธีวิเคราะห์กระบวนการด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาศัยความสามารถของคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ โปรแกรมที่เป็นที่นิยมใช้ได้แก่ โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS CFX และ ANSYS FLUENT ซึ่งโปรแกรม ANSYS CFX และ ANSYS FLUENT สามารถทำการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลได้ในระยะเวลาไม่นาน ทำให้กระบวนการที่ออกแบบมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบดั้งเดิม ปัจจุบันการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันด้านวิศวกรรม เนื่องจากช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบ พัฒนา ปรับปรุง และทำให้เห็นภาพของการไหลชัดเจนขึ้นผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์เพียงเครื่องเดียว และยังช่วยต่อการเรียนการศึกษา โดยลักษณะการไหลของของไหลแต่ละชนิดถูกกำหนดด้วยชุดสมการคณิตศาสตร์หลักที่อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย 3 สมการ คือ สมการอนุรักษ์มวล (Continuity Equations) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum Equations) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Equations)

2.3.1 ระเบียบวิธี (Methodology)

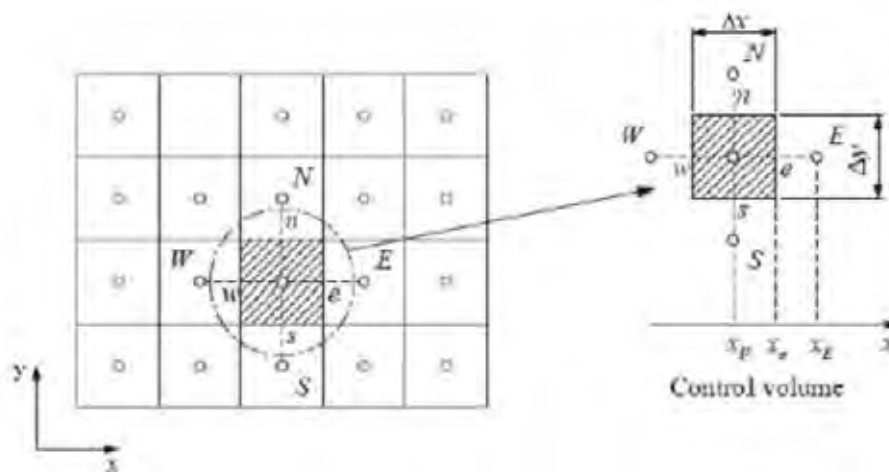
สำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีระเบียบวิธีการพื้นฐานในการคำนวณ ดังต่อไปนี้

1. กำหนดปัญหาที่จะศึกษาเป็นรูปทรงหรือเรขาคณิต (ขอบเขตทางกายภาพ)
2. แบ่งปริมาตรของไหลออกเป็นเซลล์แบบโครงตาข่าย (Grid)
3. กำหนดสมการสำหรับการจำลองแบบกายภาพ เช่น สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน เป็นต้น
4. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) โดยจะเกี่ยวข้องกับสมบัติและพฤติกรรมการไหลของของไหล ณ ขอบเขตนั้น ๆ ของปัญหาที่ทำการศึกษา สำหรับปัญหาแบบไม่คงตัว (Transient) จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) เช่น การกำหนดสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเริ่มต้น อุณหภูมิของผนัง เป็นต้น
5. แก้สมการอนุรักษ์โดยอาศัยระเบียบวิธีทำซ้ำ (Iteration) เพื่อให้ได้ผลเฉลยของระบบ
6. วิเคราะห์ผล และแสดงภาพสำหรับผลเฉลยที่ได้ เช่น เวกเตอร์ความเร็วของของไหล หรือ กราฟคอนทัวร์

2.3.2 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization method)

การเลือกใช้ระเบียบวิธีการแบ่งช่วงนั้นต้องระมัดระวังเรื่องเสถียรภาพเพื่อให้ได้ผลเฉลยซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการแก้ระบบสมการเชิงเส้นโดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) การแก้สมการโดยอาศัยระเบียบวิธีวิเคราะห์ (Analytical methods) โดยวิธีที่นิยมใช้ในการแบ่งช่วงปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้น ได้แก่ ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่แบ่งขอบเขตปัญหาออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ (Control volume) แล้วอินทิเกรตสมการอนุรักษ์บนปริมาตรควบคุมด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ดังรูปที่ 3 โดยในการแก้ปัญหาการพา (Convection) และการแพร่ (Diffusion) ของของไหลจะมีจุดเริ่มต้นจากสมการพื้นฐานของการไหล ซึ่งสามารถแสดงสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations) ในรูปทั่วไปของตัวแปร ϕ ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (2.6)$$



รูปที่ 3 ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Patankar, 1980)

สมการนี้เป็นสมการอนุพันธ์ย่อยพื้นฐานที่จะนำมาใช้ในการแก้สมการ โดยเทอมแรกเป็นเทอมที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เทอมที่สอง คือ เทอมจากการพา เทอมที่สาม คือ เทอมจากการแพร่กระจาย และเทอมสุดท้าย คือ เทอมที่เหลืออื่น ๆ (Source term) ซึ่งสมการในรูปอนุพันธ์จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นสมการพีชคณิตที่สามารถคำนวณได้ง่ายขึ้น โดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม ด้วยการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมได้เป็น

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV + \int_{CV} \text{div}(\rho\phi u) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.7)$$

ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองการไหลในระบบสองมิติ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & \int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} dV + \int_{CV} \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} dV \\ & = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) dV + \int_{CV} S_\theta dV \end{aligned} \quad (2.8)$$

จากนั้นทำการแยกพิจารณาการอินทิเกรตทีละเทอม โดยกำหนดให้ $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$ และ $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$ นำตัวแปรดังกล่าวแทนค่ากลับไปในเทอมต่าง ๆ

แทนกลับในเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาแสดงได้ดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV = \rho^0 \phi_p \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.9)$$

แทนกลับในเทอมของการพาแสดงได้ดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} (\rho \phi u) dV = (\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = F_e \phi_e - F_w \phi_w \quad (2.10)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} (\rho \phi u) dV = (\rho u A)_n \phi_n - (\rho u A)_s \phi_s = F_n \phi_n - F_s \phi_s \quad (2.11)$$

แทนกลับในเทอมของการแพร่กระจายแสดงได้ดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (2.12)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_s = D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S) \quad (2.13)$$

และแทนกลับในเทอมที่เหลืออื่น ๆ (Source term) แสดงได้ดังนี้

$$\int_{CV} S_\phi dV = S_\phi dV \quad (2.14)$$

เมื่อ F คือ สัมประสิทธิ์ของการพา ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\rho u A$

D คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\Gamma A / \delta$

ค่าของตัวแปร ϕ บนผิวปริมาตรควบคุมในเทอมของการพาที่อยู่ในสมการ จะสามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วย Discretization scheme ต่าง ๆ เช่น First order upwind differencing scheme Power-law differencing scheme และ Hybrid differencing scheme โดยรายละเอียดแต่ละวิธี Discretization มีดังต่อไปนี้

1. First order upwind differencing scheme

เป็นการแก้ปัญหาที่เกิดจากการสมมติว่าค่าคงที่ของการพาคงที่ Interface (ϕ_e) เกิดจากค่าเฉลี่ยระหว่างค่าทั้งสองด้าน โดยคิดว่าเทอมการแพร่กระจายไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนในเทอมของการพาจะคำนวณโดยสมมติฐานว่า ค่าของตัวแปร ϕ ที่ Interface มีค่าเท่ากับ Grid point ของผิวปริมาตรควบคุมด้านต้นกระแสการไหล (Upstream) นั่นคือ

$$\phi_e = \phi_p \quad \text{เมื่อ} \quad F_e > 0$$

$$\phi_e = \phi_E \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0$$

$$\phi_w = \phi_w \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0$$

$$\phi_w = \phi_p \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0$$

โดยค่า ϕ_n และ ϕ_s ก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้น สามารถเขียนสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปได้เป็น

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + a_s \phi_s + a_n \phi_n + S_\phi V \quad (2.15)$$

$$a_n = \max[-F_n, 0]$$

$$a_s = \max[F_s, 0]$$

$$a_e = \max[-F_e, 0]$$

$$a_w = \max[F_w, 0]$$

$$a_p = a_n + a_e + a_s + a_w + (F_n - F_s + F_e - F_w) \quad (2.16)$$

เมื่อ $\max[A, B]$ คือ ค่าสูงสุดที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าของ A กับ B

จากสมการ จะสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ จะไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้ ทำให้ผลเฉลยที่ได้มีค่าเป็นไปตามลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นจริง และทำให้สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ได้ โดยที่ผลเฉลยลู่ออกเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

2. Second order upwind scheme

จะทำการประมาณค่าโดยใช้การประมาณแบบเชิงเส้นของค่าที่ต้นกระแสการไหลโดยจะให้ความแม่นยำที่สูงกว่าแบบ First order upwind scheme และจะทำให้การลู่เข้าหาผลเฉลยดีกว่า เนื่องจากมีการใช้จุดของค่าที่นำมาคำนวณสูงขึ้น

$$\phi_e = \frac{3}{2} \phi_p - \frac{1}{2} \phi_w \quad \text{เมื่อ} \quad F_e > 0 \quad (2.17)$$

$$\phi_e = \frac{3}{2} \phi_e - \frac{1}{2} \phi_{EE} \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0 \quad (2.18)$$

$$\phi_w = \frac{3}{2} \phi_w - \frac{1}{2} \phi_{WW} \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0 \quad (2.19)$$

$$\phi_w = \frac{3}{2} \phi_p - \frac{1}{2} \phi_e \quad \text{เมื่อ} \quad F_w < 0 \quad (2.20)$$

3. Power-law differencing scheme

เป็นวิธีที่ให้ค่าผลเฉลยใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับปัญหาหนึ่งมิติสูงกว่าวิธีการอื่น ๆ โดยเป็นการประมาณแบบโพลิโนเมียล สามารถเขียนสมการพีชคณิตได้เป็น

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + a_s \phi_s + a_n \phi_n + S_\phi V \quad (2.21)$$

$$a_n = D_n \max[0, (1 - 0.1 |F_n / D_n|)^5] + \max[-F_n, 0]$$

$$a_s = D_s \max[0, (1 - 0.1 |F_s / D_s|)^5] + \max[-F_s, 0]$$

$$\begin{aligned}
a_E &= D_e \max[0, (1 - 0.1 |F_e/D_e|)^5] + \max[-F_e, 0] \\
a_W &= D_w \max[0, (1 - 0.1 |F_w/D_w|)^5] + \max[-F_w, 0] \\
a_P &= a_N + a_E + a_S + a_W + (F_n - F_S + F_e - F_W)
\end{aligned} \tag{2.22}$$

4. Hybrid differencing scheme

เป็นการรวบรวมข้อดีของวิธี First order upwind differencing scheme และ Central differencing scheme โดยเลือกใช้ค่าจาก Central differencing scheme ซึ่งมีความถูกต้องสูง เนื่องจากเป็น Second order scheme และตรงที่ Central differencing scheme ทำนายค่าได้ไม่ถูกต้อง ($Pe = F/D > 2$ และ $Pe < -2$) จะเปลี่ยนมาใช้ค่าจาก First order upwind differencing ซึ่งมีความเสถียรสูง เนื่องจากเป็น First order scheme เขียนสมการพีชคณิตได้เป็น

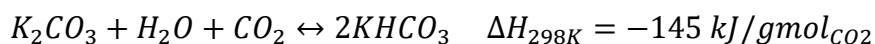
$$\begin{aligned}
a_P \phi_P &= a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S \phi V \\
a_N &= \max[-F_n D_n - \frac{F_n}{2}, 0] \\
a_S &= \max[-F_s D_s + \frac{F_s}{2}, 0] \\
a_E &= \max[-F_e D_e - \frac{F_e}{2}, 0] \\
a_W &= \max[-F_w D_w + \frac{F_w}{2}, 0] \\
a_P &= a_N + a_E + a_S + a_W + (F_n - F_S + F_e - F_W)
\end{aligned} \tag{2.23}$$

หลังจากเลือกระเบียบวิธีการแบ่งช่วงแล้ว แทนค่าทั้งหมดลงในสมการก็จะได้ ระบบสมการที่พร้อมจะนำไปคำนวณค่าต่อไป

2.4 ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction)

ปฏิกิริยาเคมี คือ กระบวนการที่เกิดจากการที่สารเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วส่งผลให้เกิดสารใหม่ขึ้นมาซึ่งมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม โดยมีสารเริ่มต้นปฏิกิริยาเรียกว่า ตัวทำปฏิกิริยา (Reactant) ซึ่งจะมีเพียงตัวเดียวหรือมากกว่า 1 ตัวก็ได้ มาเกิดปฏิกิริยากัน และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งก่อตัวขึ้นมาเป็นสารใหม่ที่เรียกว่า ผลิตภัณฑ์ (Product) ในที่สุด สารผลิตภัณฑ์บางตัวอาจมีคุณสมบัติทางเคมีที่ต่างจากสารตั้งต้นเพียงเล็กน้อย แต่ในขณะเดียวกันสารผลิตภัณฑ์บางตัวอาจจะแตกต่างจากสารตั้งต้นโดยสิ้นเชิง

โดยปฏิกิริยาการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยตัวดูดซับของแข็งของโพแทสเซียมคาร์บอเนตในเครื่องปฏิกรณ์คาร์บอเนชัน อธิบายดังนี้



และสามารถหาอัตราของปฏิกิริยาการดูดซับได้ ดังสมการต่อไปนี้

$$r = -k_{reaction} C_{CO_2} C_{H_2O} \varepsilon_s \quad (2.25)$$

$$k_{reaction} = k_0 \exp(-(-3609)/RT_g) \quad (2.26)$$

เมื่อ C_{CO_2} คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

C_{H_2O} คือ ความเข้มข้นของไอน้ำ

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

2.5 การออกแบบการทดลอง (Experimental design)

ในทางปฏิบัติของการออกแบบการทดลองมักเกี่ยวข้องกับกรณีที่ต้องการศึกษาผลของตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวแปรขึ้นไป การออกแบบการทดลอง (Samruamphianskun, 2011) ที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบนี้ จะสามารถใช้จำนวนการทดลองที่ต่ำ แต่ยังสามารถให้ข้อมูลเทียบเท่าการทดลองแบบทีละตัวแปร เมื่อเทียบที่ ผลการทดลองเท่า ๆ กัน

2.5.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีตัวแปรที่ต้องการศึกษา k ตัวแปร ซึ่งในแต่ละตัวแปรจะ ประกอบด้วยค่า 2 ระดับ คือ ค่าระดับสูง แทนด้วย + และค่าระดับต่ำ แทนด้วย - หรือ + แทนการมี และ - แทนการไม่มีของตัวแปรนั้น ๆ โดยใน 1 เพลทเคตที่สมบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้ประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล โดยสามารถที่จะศึกษาผลของอันตรกิริยาที่มีต่อผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากตัวแปรเหล่านี้ได้

2.5.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^3 เป็นการออกแบบการทดลองที่มีตัวแปรที่สนใจศึกษา 3 ตัวแปร ในแต่ละตัวแปรประกอบไปด้วย 2 ระดับ คือระดับสูง และระดับต่ำ รวมทั้งหมด 8 การทดลอง ดังตารางที่ 1

ค่าคอนทราสต์ (Contrast) คือ ค่าที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่เราสนใจหรือปัจจัยหลัก โดยที่ค่านั้นจะมีเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลงทั้งบวกและลบ ซึ่งถูกกำหนดไว้เนื่องมาจากการคูณกันของ

แต่ละคอลัมน์ในแต่ละแถว เช่น เครื่องหมายของคอลัมน์ AB นั้นจะเกิดจากผลคูณของเครื่องหมายในคอลัมน์ A และ B คูณกันของแต่ละแถวและค่าคอนทราสต์สามารถคำนวณออกมาได้

ตารางที่ 1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^3

Run	A	B	C	Combination
1	-	-	-	1
2	+	-	-	a
3	-	+	-	b
4	+	+	-	ab
5	-	-	+	ac
6	+	-	+	ac
7	-	+	+	bc
8	+	+	+	abc

ตัวอย่างการพิจารณาการประมาณผลหลัก

$$A = \frac{1}{4n} [-1 + a - b + ab - c + ac - bc + abc] \quad (2.27)$$

ตัวอย่างการพิจารณาการประมาณผลของอันตรกิริยา

$$AB = \frac{1}{4n} [1 - a - b + ab + c - ac - bc + abc] \quad (2.28)$$

การประมาณผลต่าง ๆ สามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ ดังนี้

$$AB\dots K = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB\dots K}) \quad (2.29)$$

จากนั้น หาค่าผลรวมกำลังสองสำหรับผลแต่ละตัว ดังนี้

$$SSA_{B\dots K} = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB\dots K})^2 \quad (2.30)$$

นำค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดไปทำการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) หาค่า F_0 หรือค่า p-value เพื่อวิเคราะห์ผลว่าตัวแปรใดมีผลต่อค่าตอบสนองสูงที่สุด โดยการวิเคราะห์แบบ 2^k นี้ต้องทำการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่ได้ว่ามีกระจายตัวเป็นแบบปกติ ไม่มีรูปแบบและความแปรปรวนคงที่หรือไม่ เพื่อแสดงถึงความถูกต้องของการวิเคราะห์ที่ได้ทำไป

2.5.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็น ส่วนประกอบย่อย ๆ จะได้ว่า Total corrected sum of square คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.31)$$

ซึ่งค่าที่ได้จะใช้สำหรับวัดความแปรปรวนของข้อมูล โดยการนำ SS_T มาหารด้วยระดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) ที่เหมาะสม คือ $N-1$ เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด จะทำให้ได้ค่าความแปรปรวนของข้อมูล

ความแปรปรวนทั้งหมดที่ได้จาก Total corrected sum of square สามารถแบ่งออกเป็น ส่วนของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ย รวมกับผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายใต้ระดับกับค่าเฉลี่ยระดับนั้น ๆ ค่าของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตเฉลี่ยของแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม คือ ตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับ ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับ คือ ความผิดพลาดสุ่ม (Random error) ดังนั้น สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$SS_T = SS_{Treatment} + SS_E \quad (2.32)$$

เมื่อ $SS_{Treatment}$ คือ ผลรวมกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับ ซึ่งหาได้จาก

$$SS_{Treatment} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.33)$$

โดยจะมีลำดับขั้นความเสรีเท่ากับ ระดับของค่าเฉลี่ย $a-1$ และ SS_E เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากความผิดพลาด มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $N-a$ ซึ่งเมื่อทำการนำค่าของผลรวมกำลังสองของแต่ละตัว (Sum of square) หารด้วยระดับขั้นความเสรีของตัวเองจะได้เป็น Mean square (MS) ดังสมการ

$$MS_{Treatment} = \frac{SS_{Treatment}}{a-1} \quad (2.34)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{N-1} \quad (2.35)$$

จากสมการค่า Mean square error ทำการหาอัตราส่วน F_0 เพื่อทำการทดสอบ F (F test) ซึ่งเป็นการทดสอบสมมติฐานความเท่ากันของความแปรปรวนของประชากรแบบปกติ 2 กลุ่ม โดยมีวิธีคำนวณดังสมการต่อไปนี้

$$F_0 = \frac{MSTreatment}{MSE} \quad (2.36)$$

ผลที่ได้จะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลักหรือ H_0 ก็ต่อเมื่อ $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$ และสรุปว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งสอง ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่า $F_0 < F_{\alpha, a-1, N-a}$ ผลสรุปที่ได้ก็จะกลับกัน คือ แสดงว่าข้อมูลไม่ได้มีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งสอง หรือใช้การตรวจสอบจากค่า p-value โดยค่านี้ถูกกำหนดให้มีค่า 0.05 หรือมีค่าความเชื่อมั่นประมาณ 95% ซึ่งนิยามของ p-value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างต่ำที่จะทำให้ค่านี้มีค่าสูงกว่าหรือเท่ากับค่าที่สังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง และสามารถหาได้จากค่า F และระดับชั้นความเสรี ดังนั้น p-value จึงแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่น ๆ ได้ โดยจะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 เมื่อค่า p-value < 0.05

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jiang และคณะ (Jiang, 2012) ศึกษาการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบสองชั้นเพื่อเตรียมไธเมทิลออกซาเลตจากแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยเครื่องปฏิกรณ์มีความกว้าง 0.2 เมตร ความสูง 0.75 เมตร และความสูงของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.15 เมตร ในแต่ละชั้นพบว่าการไหลของอนุภาคของแข็งในชั้นล่างมีความรุนแรงสูงกว่าชั้นบน เนื่องจากชั้นล่างใช้ตัวกระจายอากาศที่มีอัตราส่วนรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งจะช่วยลดการเกิดการไหลย้อนกลับของอนุภาคของแข็ง และเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาค และความดันให้มีความสม่ำเสมอ นอกจากนี้ การถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบสองชั้นจะมีความสม่ำเสมอกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

Zhu และคณะ (Zhu, 2014) ศึกษาผลการไหลและการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาของปฏิกิริยาไธเมทิลออกซาเลตในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบต 3 ประเภท คือ ฟลูอิด์เบตแบบนิ่ง ฟลูอิด์เบตแบบ 2 ชั้น และฟลูอิด์เบตแบบหมุนเวียน ด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยพบว่าเกิดการกระจายตัวของอนุภาคอย่างสม่ำเสมอในฟลูอิด์เบตแบบหมุนเวียน และฟลูอิด์เบตแบบ 2 ชั้น อีกทั้งการกระจายตัวของสารต่าง ๆ จะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม ในฟลูอิด์เบตแบบหมุนเวียน และฟลูอิด์เบตแบบ 2 ชั้น อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยามีความเฉื่อยมากกว่าในฟลูอิด์เบตแบบนิ่ง

Mohanty และคณะ (Mohanty, 2009) ศึกษาผลของตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดซ์เบดแบบหลายชั้นที่มีการไหลของของไหลแบบสวนทางกันร่วมกับท่อดาวเนอร์ (Downer) โดยจะพิจารณาจากอุทกพลศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างแก๊สกับของแข็งที่มีอยู่ในระบบ โดยพบว่าความดันลดภายในระบบ จะมีค่าสูงที่สุดเมื่ออัตราการไหลของแก๊สมีค่าต่ำ และจะส่งผลให้อัตราเร็วของของแข็งมีค่าสูงที่สุด ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้จะมียุทธศาสตร์ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดเพื่อควบคุมมลพิษจากแก๊ส

Nouri และคณะ (Nouri, 2018) ศึกษาพฤติกรรมการไหลของ 2 วัฏภาค ซึ่งประกอบไปด้วยของแข็ง และแก๊สในท่อโรเซออร์แบบ 2 ชั้น โดยส่วนล่างของท่อโรเซออร์จะมีขนาดใหญ่กว่าส่วนบนของท่อโรเซออร์ โดยใช้วิธีการจำลองแบบออยเลอร์-ออยเลอร์ (Euler-Euler) พบว่าในช่วงแรกของท่อโรเซออร์จะมีการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากโดยเฉพาะที่ส่วนล่าง และส่วนที่เหลือจะค่อย ๆ ลดลงตามแนวของท่อโรเซออร์ นอกจากนี้ เมื่อความสูงของท่อโรเซออร์ลดลง จะส่งผลให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลง และอัตราการไหลต่ำลงซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น

Chang และคณะ (Chang, 2015) ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของไหล และพฤติกรรมการดักจับ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน พบว่าความเร็วของแก๊ส และอนุภาค มีความแตกต่างกันอย่างมากภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบด นอกจากนี้กระบวนการดูดซับ คาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบด และประสิทธิภาพ การจับตัวของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลของแก๊สมีค่าต่ำ ส่งผลให้อัตราการไหลของตัวดูดซับมีค่าสูง ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้จะมียุทธศาสตร์ต่อการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดเพื่อกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

บทที่ 3

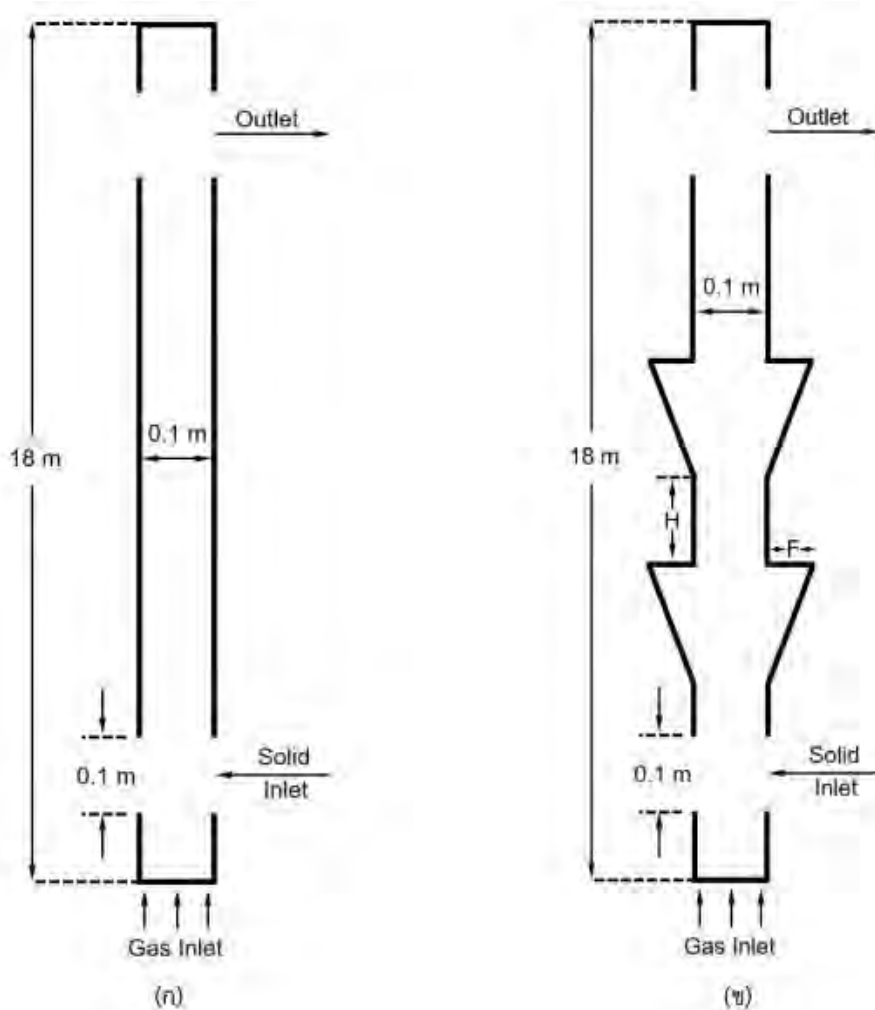
วิธีดำเนินงานวิจัย

การจำลองอุทกพลศาสตร์ของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดสำหรับงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ในส่วนแรกนั้นจะเป็นการจำลองภายในท่อโรเตอร์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดของการทดลองของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015) โดยท่อโรเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร และความสูง 18 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 (ก) อนุภาคของแข็งที่ใช้คือทรายซิลิกา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 89 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 2951 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์ จัดอยู่ในกลุ่ม B ตามวิธีจำแนกอนุภาคแบบ Geldart ของไหลและอนุภาคของแข็งจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างและด้านข้างด้วยความเร็ว 8.6 และ 0.2 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ค่าของผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบคือ ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคของแข็ง (Volume fraction) ในแนวแกน รวมไปถึงหาแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดลองของ Zhang และคณะ (2015)

ในส่วนที่สองเป็นการจำลองเป็นการจำลองภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบมีปฏิริยาเคมีของการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนตตามการทดลองของ Nouri และคณะ (Nouri, 2018) แผนผังการจำลองของเครื่องปฏิกรณ์คาร์บอเนชันแบบสองมิติแสดงในรูปที่ 5 ประกอบด้วยเครื่องปฏิกรณ์คาร์บอเนชันแบบฟลูอิดไอเซชันความเร็วสูง (มีความสูง 5.4 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.025 เมตร) และพื้นที่ผสมในส่วนล่าง (ความสูง 0.6 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.035 เมตร) ความหนาแน่นและเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคเฉลี่ยของตัวดูดซับของแข็งในระบบคือ 1100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 0.098 มิลลิเมตร ตามลำดับ ตัวแปรที่ใช้การดำเนินงานโดยละเอียดถูกนำมาใช้จากสภาวะพื้นฐานของ Yi และคณะ (Yi, 2007) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ค่าของผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบคือร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์คาร์บอเนชัน เพื่อหาแบบจำลองทางจลนศาสตร์ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดลองของ Nouri และคณะ (Nouri, 2018)

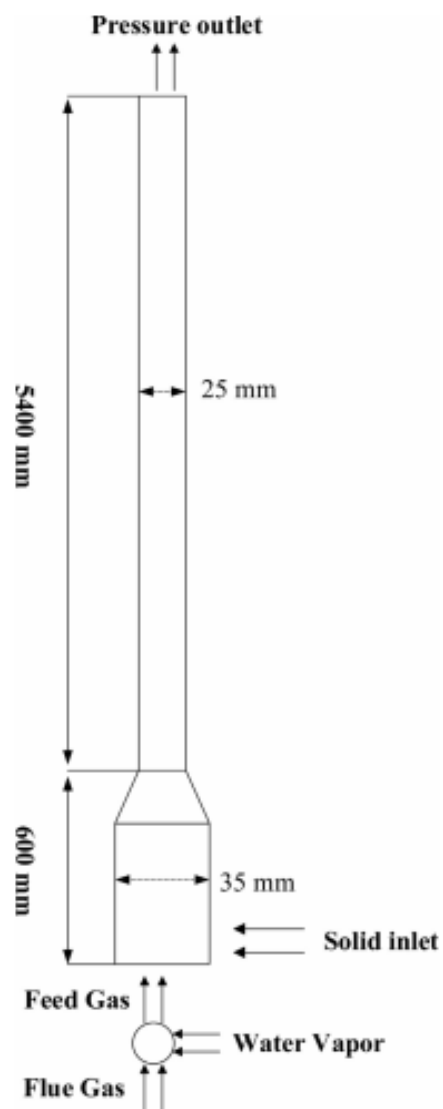
ในส่วนที่สามจะเป็นการจำลองอุทกพลศาสตร์ของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบมีปฏิริยาเคมี โดยทำการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) ประกอบด้วย อัตราเร็วของของไหล อัตราการหมุนเวียนของแข็ง ขนาดของอนุภาคของแข็ง และ อุณหภูมิของของไหล ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีแฟกทอเรียลแบบ 2^4

ในส่วนที่สี่จะเป็นการจำลองอุทกพลศาสตร์ของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบมีปฏิริยาเคมีที่ทำการปรับปรุงเป็นแบบขั้นโดยการติดตั้งชั้นภายในท่อโรเซออร์ จากรูป 4(ข) แสดงภาพเค้าร่างของท่อโรเซออร์ที่ทำการปรับปรุงเป็นแบบขั้น โดยทำการศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ ประกอบด้วย มุมของชั้น ความกว้างชั้น ระยะห่างระหว่างชั้น ความสม่ำเสมอของชั้นในเครื่องปฏิกรณ์ ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีแฟกทอเรียลแบบ 2^4



รูปที่ 4 แผนภาพเค้าร่างของท่อโรเซออร์ที่จะใช้จำลอง (ก) แบบยังไม่ได้รับการปรับปรุง

(ข) แบบที่ได้รับการปรับปรุงเป็นแบบขั้น



รูปที่ 5 เครื่องปฏิกรณ์คาร์บอนเนชัน

ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง

ตัวแปร	ค่า
เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (ไมโครเมตร)	98
ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	1100
ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)	0.6/5.4
เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)	0.035/0.025
อุณหภูมิแก๊สป้อนเข้า (เคลวิน)	353
อัตราการไหลของแก๊สแห้ง (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)	0.00079
มวลฟลักซ์ของของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)	21
องค์ประกอบในแก๊สป้อนเข้า (-)	9.6:19.6:70.8 (CO ₂ :H ₂ O:N ₂)
การแพร่ของแก๊ส (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)	0.1381:0.2178:0.2 (CO ₂ :H ₂ O:N ₂)

3.1 การศึกษาแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย

การหาแบบจำลองการไหลในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดที่เหมาะสมกับ งานวิจัยนี้ แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

1. การหาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Numerical model)
2. การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test)
3. การหาแบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinetic model)

3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Numerical model)

แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการของออยเลอร์-ออยเลอร์แบบหลายวัฏภาคในโปรแกรมสำเร็จรูปทางการค้า ANSYS FLUENT เพื่อพิจารณาพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้น วัฏภาคแก๊ส และวัฏภาคของแข็งจะถูกพิจารณาเป็นของไหลต่อเนื่อง (Continuum phase) ทั้งสองวัฏภาคจะถูกอธิบายในรูปของสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations) ประกอบไปด้วย สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ร่วมกับสมการอนุรักษ์เพิ่มเติมหรือทฤษฎีจลนศาสตร์การไหลของของแข็ง (kinetic theory granular flow: KTGF) (Gidaspow, 1994) โดยกำหนดภาวะขอบเขต (Boundary conditions) กำหนดภาวะเริ่มต้น (Initial conditions) กำหนดค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ในทิศทางติดลบของแกน Y และกำหนดค่าความดันแวดล้อมเท่ากับ 101.325 กิโลปาสกาล

3.1.1.1 สมการอนุรักษ์ (Conservation equations)

สมการอนุรักษ์ (Fluent, 2003) ที่ใช้ในแบบจำลองของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสมการ อนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของของแข็ง

3.1.1.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation)

วัฏภาคแก๊ส

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

วัฏภาคของแข็ง

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

โดยที่ผลรวมสัดส่วนเชิงปริมาตรเท่ากับหนึ่งหน่วย $\varepsilon_g + \varepsilon_s = 1$

เมื่อ ε_s คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาคของแข็ง (-)

ε_g คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาคของแก๊ส (-)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_g คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

v_s คือ ความเร็วของวัฏภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที)

v_g คือ ความเร็วของวัฏภาคของแก๊ส (เมตรต่อวินาที)

3.1.1.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equation)

วัฏภาคแก๊ส

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g v_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g v_g v_g) = \nabla \cdot \tau_g - \varepsilon_g \nabla P_g + \varepsilon_g \rho_g g - \beta(v_g - v_s) \quad (3.3)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\frac{\partial(\varepsilon_s \rho_s v_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s v_s v_s) = \nabla \cdot \tau_s - \varepsilon_s \nabla P_s + \varepsilon_s \rho_s g - \beta(v_g - v_s) \quad (3.4)$$

- เมื่อ τ_s คือ ความเค้นเทนเซอร์วิญภาคของแข็ง (ปาสคาล)
- τ_g คือ ความเค้นเทนเซอร์วิญภาคแก๊ส (ปาสคาล)
- P_s คือ ความดันของวิญภาคของแข็ง (ปาสคาล)
- P_g คือ ความดันของวิญภาคแก๊ส (ปาสคาล)
- β คือ แบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวิญภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)
- g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

3.1.1.1.3 สมการอนุรักษ์พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของวิญภาคของแข็ง (Fluctuating kinetic energy conservation equation)

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s \theta_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s v_s \theta_s) \right] = (-\nabla P_s I + \tau_s) : \nabla v_s + \nabla \cdot (K_s \nabla \theta) - \gamma_s + \phi_s \quad (3.5)$$

- เมื่อ I คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์ (-)
- θ_s คือ พลังงานกวัดแกว่งของอนุภาคของแข็ง (เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง)
- K_s คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
- γ_s คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)
- ϕ_s คือ การแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งระหว่างวิญภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อ เมตรวินาทีกำลังสาม)

พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของอนุภาคหรืออุณหภูมิของอนุภาค (Granular temperature) จะถูกใช้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการคำนวณด้วยทฤษฎีของอนุภาค เช่น ความดันของอนุภาค และความหนืดของอนุภาค เป็นต้น

3.1.1.2 สมการเสริม (Constitutive equation)

พลังงานของอนุภาคซึ่งสัมพันธ์กับการชน และการเคลื่อนไหวเนื่องจากการกวัดแกว่งของอนุภาค ถูกนำมาอธิบายถึงพฤติกรรมของวิญภาคของแข็ง

ความเค้นเทนเซอร์ (Stress tensor)

วิญภาคแก๊ส

$$\tau_g = \varepsilon_g \mu_g \left[\frac{1}{2} \left[\nabla \cdot v_g + (\nabla \cdot v_g)^T \right] - \frac{3}{2} (\nabla \cdot v_g) I \right] \quad (3.6)$$

วิฤภาคของแข็ง

$$\tau_s = \varepsilon_s \mu_s [\nabla \cdot v_s + (\nabla \cdot v_s)^T] - \varepsilon_s \left(\xi_s - \frac{3}{2} \mu_s \right) \nabla \cdot v_s \quad (3.7)$$

เมื่อ ξ_s คือ ความหนืดรวม (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)

ความดันของอนุภาคจะประกอบด้วยสองพจน์ พจน์ที่หนึ่งเกี่ยวข้องกับการชนกันของอนุภาค ซึ่งจะมีผลสูงในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูง และพจน์ที่สองจะเกี่ยวข้องกับการชนศาสตร์ ซึ่งจะมีผลสูงในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคต่ำ

$$P_s = 2\rho_s(1+e)\varepsilon_s^2 g_0 \theta_s + \varepsilon_s \rho_s \theta_s \quad (3.8)$$

เมื่อ g_0 คือ ฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมีซึ่งจะมีค่าสูง เมื่อสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีค่าเข้าใกล้สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งขณะที่อัดตัวแน่น ($\varepsilon_{s,max} = 0.6$)

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (3.9)$$

ความหนืดเนื่องจากความเค้นจะประกอบด้วยพจน์ของการชนศาสตร์ การชน และแรงเสียดทานซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมของอนุภาคของแข็ง

$$\mu_s = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p g_0 (1+e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} + \frac{10\rho_s d_p \sqrt{\pi\theta}}{96(1+e)g_0\varepsilon_s} \left[1 + \frac{4}{5} \varepsilon_s g_0 (1+e) \right]^2 \quad (3.10)$$

เมื่อ e คือ Restitution Coefficient

$e = 1$ คือ การชนแบบยืดหยุ่นซึ่งจะไม่มี การสูญเสียพลังงาน

$e = 0$ คือ การชนซึ่งจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดระหว่างการชน

$0 < e < 1$ คือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งจะสูญเสียพลังงานระหว่างการชน

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)

สำหรับการบีบอัด และการขยายตัวของอนุภาคของแข็งจะใช้ความหนืดรวมของอนุภาคเป็นตัวแสดง ความต้านทานของอนุภาค (ξ_s)

$$\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_p g_0 (1+e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (γ_s)

$$\gamma_s = 3\varepsilon_s^2 \rho_s d_p g_0 \theta_s (1 - e^2) \left[\frac{4}{d_p} \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \right] \quad (3.12)$$

พลังงานการกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (K_s)

$$K_s = \frac{150 \rho_s d_p \sqrt{\theta_s \pi}}{384(1+e)g_0} \left[1 + \frac{6}{5} \varepsilon_s g_0 (1+e) \right]^2 + 2\varepsilon_s^2 \rho_s d_p g_0 (1+e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.13)$$

3.1.1.3 แบบจำลองสัมประสิทธิ์ต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (Interphase exchange coefficient model, β_{gs})

แบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคในงานวิจัยนี้ ได้แก่ Energy minimization multi scale (EMMS) ซึ่งพัฒนาโดย Yang และ คณะ (Yang, 2004) โดยจากการวิจัยของ Chalermssinsuwan และคณะ (B. Chalermssinsuwan, P. Kuchonthara, and P. Piumsomboon, 2010; B. Chalermssinsuwan, P. Piumsomboon, and D. Gidaspow, 2009) พบว่าแบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบ EMMS นั้นเหมาะกับการจำลองการไหลภายใต้ช่วงการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization) เนื่องจากแบบจำลองต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคนี้จะคำนึงถึงผลของการเกิดกลุ่มก้อนของอนุภาคขึ้นภายในกระบวนการ

$$\beta = \frac{4}{3} C_{D0} \varepsilon_s \varepsilon_g |v_g - v_s| \varepsilon_g^{-2.65} H_D / d_p \quad (3.14)$$

$$C_{D0} = \frac{24(1+0.15p^{0.687})}{Re_p} \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p < 1000 \quad (3.15)$$

$$C_{D0} = 0.44 \quad \text{เมื่อ} \quad Re_p \geq 1000 \quad (3.16)$$

$$Re_p = \varepsilon_g \rho_g |v_g - v_s| \rho_g / \mu_g \quad (3.17)$$

$$H_D = a Re^b, |u_{slip}| \leq 16 \quad \text{เมื่อ} \quad \varepsilon_{mf} \leq \varepsilon_g \leq \varepsilon_{max} \quad (3.18)$$

เมื่อ $0.43 \leq \varepsilon_g \leq 0.465$

$$\begin{aligned} a &= 26335.59866\varepsilon_g^4 + 43405.41562\varepsilon_g^3 - 26794.07386\varepsilon_g^2 + 7346.44587\varepsilon_g - 755.0395 \\ b &= 12005.12029\varepsilon_g^4 - 20097.52652\varepsilon_g^3 + 12611.77237\varepsilon_g^2 - 3515.97321\varepsilon_g + 367.41655 \end{aligned} \quad (3.19)$$

เมื่อ $0.465 \leq \varepsilon_g \leq 0.571$

$$a = 0.00597 + \frac{0.55209}{(1 + (\varepsilon_g/0.48088))^{34.39521}}$$

$$b = 0.54198 + \frac{0.58097}{(1 + (\varepsilon_g/0.4978))^{24.94209}} \quad (3.20)$$

เมื่อ $0.571 \leq \varepsilon_g \leq 0.955$

$$a = 0.434 + \frac{2.37729}{(1 + \exp(-(\varepsilon_g - 0.99918)/0.00534))} \times \left(1 - \frac{1}{(1 + \exp(-(\varepsilon_g - 0.99918)/0.000904336))}\right)$$

$$b = 0.38464 - \frac{1.1738}{(1 + \exp(-(\varepsilon_g - 0.999545)/0.00848))} \times \left(1 - \frac{1}{(1 + \exp(-(\varepsilon_g - 0.999545)/0.00441))}\right) \quad (3.21)$$

เมื่อ $0.997 \leq \varepsilon_g \leq 1$

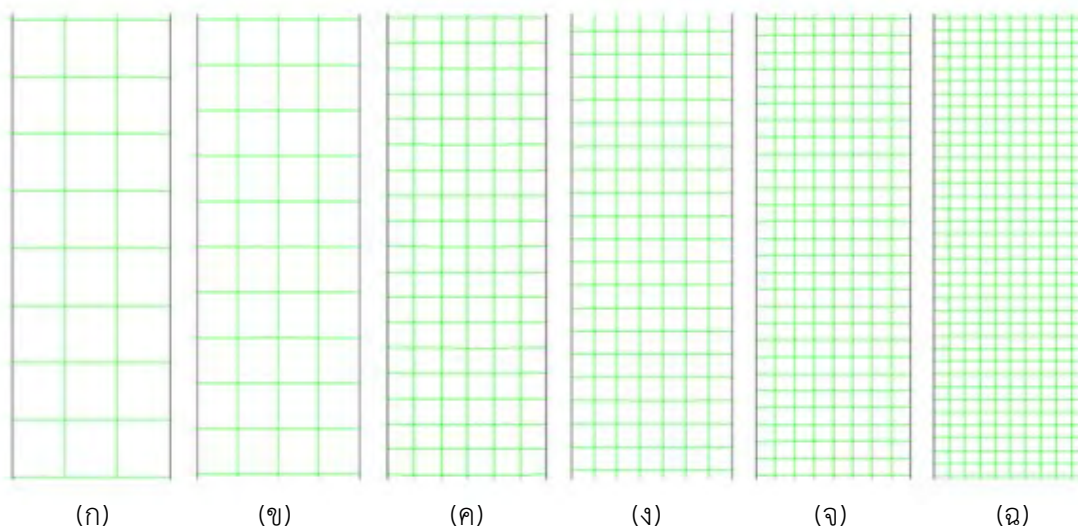
$$a = 1$$

$$b = 0 \quad (3.22)$$

เมื่อ C_{DO} คือ สัมประสิทธิ์การต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (-)
 H_D คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)

3.1.2 การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test)

พื้นที่การคำนวณในงานวิจัยนี้ใช้พื้นที่การคำนวณแบบมีระยะห่างไม่เท่ากัน (Non-uniform grid) จำนวน 6 ค่า ดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงพื้นที่การคำนวณในแต่ละขนาดที่ได้ทำการศึกษา ได้แก่ 1500 3000 6000 9000 12000 และ 18000 พื้นที่การคำนวณ โดยในการหาจำนวนพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมนั้นจะทำการเพิ่มปริมาณพื้นที่การคำนวณสูงขึ้น การคำนวณจะเข้าสู่ค่าตอบค่า ๆ หนึ่ง เนื่องจากการคำนวณค่าในปริมาตรควบคุมเล็ก ๆ นั้น จะมีความละเอียดสูงขึ้น แต่ก็ใช้เวลาในการคำนวณสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 6 การแบ่งพื้นที่การคำนวณ (ก) 1500 (ข) 3000 (ค) 6000 (ง) 9000 (จ) 12000 และ (ฉ) 18000

3.1.3 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinetic model)

แบบจำลองการคำนวณของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ประกอบด้วยอุทกพลศาสตร์ของการไหลของสองวัฏภาค การถ่ายโอนมวลสาร และจลนศาสตร์ของการดูดซับ

3.1.3.1 สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations)

แบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการของของออยเลอร์-ออยเลอร์แบบสองวัฏภาค ร่วมกับทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาคของแข็งได้ถูกใช้งาน แบบจำลองการคำนวณของกระบวนการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ประกอบด้วยอุทกพลศาสตร์ของการไหลของสองวัฏภาค การถ่ายโอนมวลสาร และจลนศาสตร์ของการดูดซับ

3.1.3.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equation)

3.1.3.1.2 สมการการถ่ายเทมวล (Mass transfer equation) ของคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ

ถูกอธิบายดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_g \rho_g X_{g,j}) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g X_{g,j}) = \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g D_j \nabla X_{g,j}) + S_{g,j} \quad (3.23)$$

เมื่อ $X_{g,j}$ คือ สัดส่วนมวลขององค์ประกอบในวัฏภาคแก๊ส

D_j คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบในวัฏภาคแก๊ส

3.1.3.1.3 สมการอนุรักษ์องค์ประกอบ (species conservation equation)

องค์ประกอบคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และ โพแทสเซียมไฮโดรเจน

คาร์บอเนต

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q Y_i) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q Y_i) = \alpha_q r \quad (3.24)$$

เมื่อ q คือ วัฏภาค Y_i คือ สัดส่วนมวลขององค์ประกอบ (-) r คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (กิโลโมลต่อลูกบาศก์เมตรวินาที) α_q คือ สัดส่วนมวลของวัฏภาค (-) \vec{v}_q คือ ความเร็วของวัฏภาค (เมตรต่อวินาที)

3.1.3.1.4 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equations)

3.1.3.1.5 สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation)

3.1.3.1.6 สมการจลศาสตร์ (Kinetic equation)



$$r = -k_{reaction} C_{CO_2} C_{H_2O} \varepsilon_s \quad (3.26)$$

$$k_{reaction} = k_0 \exp(-(-3609)/RT_g) \quad (2.27)$$

เมื่อ C_{CO_2} คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ C_{H_2O} คือ ความเข้มข้นของไอน้ำ R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

3.1.3.2 สมการเสริม (Constitutive equation)

3.1.3.2.1 ความเค้นเฉือน (Shear stresses)

3.1.3.2.2 สัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนอนุภาคของแข็งและของเหลว (fluid-solid particle

exchange coefficient, K_{sg})

$$K_{sg} = \frac{3}{4} C_{D0} \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \omega(\alpha) \quad \text{เมื่อ } \alpha_g \geq 0.74 \quad (3.28)$$

$$K_{sg} = 150 \frac{(1-\alpha_g)^2 \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad \text{เมื่อ } \alpha_g < 0.74 \quad (3.29)$$

$$\omega(\alpha) = -0.5760 + \frac{0.0214}{4(\alpha_g - 0.7463)^2 + 0.0044} \quad \text{เมื่อ } 0.74 \leq \alpha_g < 0.82 \quad (3.30)$$

$$\omega(\alpha) = -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\alpha_g - 0.7789)^2 + 0.0040} \quad \text{เมื่อ } 0.82 \leq \alpha_g \leq 0.97 \quad (3.31)$$

$$\omega(\alpha) = -31.8295 + 32.8295\alpha_g \quad \text{เมื่อ } \alpha_g > 0.97 \quad (3.32)$$

3.1.3.2.3 สัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient, β)

3.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบขึ้น

3.2.1 กรณีศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ

มีตัวแปรที่ทำการศึกษา 4 ตัวแปร คือ

1. อุณหภูมิของของไหล (A) ในงานวิจัยนี้ศึกษาที่อุณหภูมิ 50 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ (Thummakul, 2017)
2. ขนาดของอนุภาคของแข็ง (B) ในงานวิจัยนี้ศึกษาขนาดที่ 70 และ 150 ไมโครเมตร เป็นค่าสูงสุดตามการแบ่งประเภท Geldart ประเภท A และ เป็นค่าสูงสุดตามการแบ่งประเภท Geldart ประเภท B ตามลำดับ
3. อัตราเร็วของของไหล (C) ในงานวิจัยนี้ศึกษาที่ความเร็ว 6 และ 10 เมตรต่อวินาที เป็นค่าต่ำและสูงตามงานวิจัยของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015)
4. อัตราการหมุนเวียนของแข็ง (D) ในงานวิจัยนี้ศึกษาอัตราการหมุนเวียนของแข็งที่ป้อนเข้าท่อโรเตอร์ที่ 400 และ 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที เป็นค่าต่ำและสูงกว่าในงานวิจัยของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015)

3.2.2 กรณีศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ

มีตัวแปรที่ทำการศึกษา 4 ตัวแปร คือ

1. มุมกรวย (E) ในงานวิจัยนี้ศึกษามุมที่ 60 และ 80 องศา เพื่อศึกษาการกองของอนุภาคของแข็งในกระบวนการ
2. ความกว้างชั้น (F) ในงานวิจัยนี้ศึกษาความกว้างที่ 0.05 และ 0.1 เมตร เป็นครึ่งหนึ่งและสองเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อโรเตอร์แบบเดิม

3. ความสม่ำเสมอระหว่างชั้น (G) จะกำหนดโดยการเพิ่มจำนวนชั้นภายในท่อโรเซอร์ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาที่ 2 และ 4 ชั้น เป็นค่าเท่ากับ และสูงกว่าในงานวิจัยของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015)
4. ระยะห่างระหว่างชั้น (H) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระยะห่างที่ 1.0 และ 1.7 เมตร เป็นค่าที่ทำให้ทุกชั้นอยู่ในส่วนล่างของท่อโรเซอร์

สำหรับจำนวนกรณีศึกษาใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เมื่อ k คือจำนวนตัวแปร ดังนั้นจำนวนการจำลองที่เหมาะสมจึงเท่ากับ $2^4 = 16$ กรณีศึกษา สำหรับกรณีศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ ดังตารางที่ 3 และ 16 กรณีศึกษาสำหรับกรณีศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ ดังตารางที่ 4 โดยแต่ละตัวแปรเป็นอิสระต่อกัน ในการเปรียบเทียบผลการจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้นกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดที่ไม่ได้รับการปรับปรุง ตัวแปรที่นำมาพิจารณา คือ ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด

ตารางที่ 3 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 ของการทดลองกรณีศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ

กรณี	อุณหภูมิของ ของไหล (องศา เซลเซียส) (A)	ขนาดของอนุภาค ของแข็ง (ไมโครเมตร) (B)	อัตราเร็วของ ของไหล (เมตรต่อ วินาที) (C)	อัตราการหมุนเวียน ของแข็ง (กิโลกรัมต่อ ตารางเมตรวินาที) (D)
1	50	70	6	400
2	50	70	6	800
3	50	70	10	400
4	50	70	10	800
5	50	150	6	400
6	50	150	6	800
7	50	150	10	400
8	50	150	10	800
9	70	70	6	400
10	70	70	6	800
11	70	70	10	400
12	70	70	10	800
13	70	150	6	400
14	70	150	6	800
15	70	150	10	400
16	70	150	10	800

ตารางที่ 4 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 ของการทดลองกรณีศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ

กรณี	มุมกรวย (องศา) (E)	ความกว้างชั้น (เมตร) (F)	ความสม่ำเสมอ ระหว่างชั้น (ชั้น) (G)	ระยะห่างระหว่างชั้น (เมตร) (H)
17	60	0.05	2	1.0
18	60	0.05	2	1.7
19	60	0.05	4	1.0
20	60	0.05	4	1.7
21	60	0.10	2	1.0
22	60	0.10	2	1.7
23	60	0.10	4	1.0
24	60	0.10	4	1.7
25	80	0.05	2	1.0
26	80	0.05	2	1.7
27	80	0.05	4	1.0
28	80	0.05	4	1.7
29	80	0.10	2	1.0
30	80	0.10	2	1.7
31	80	0.10	4	1.0
32	80	0.10	4	1.7

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

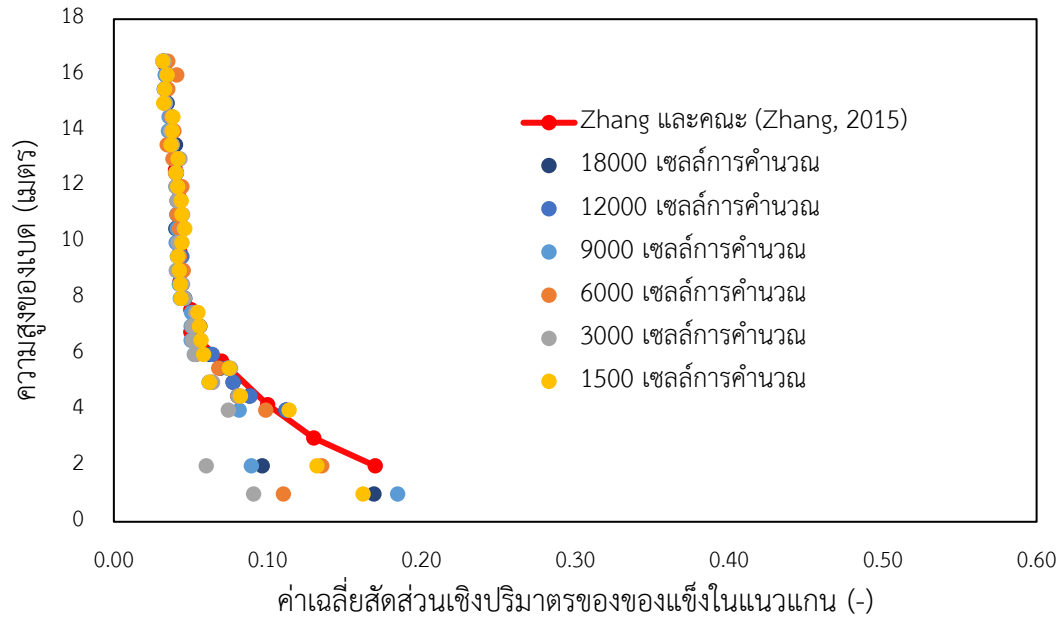
4.1 การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.1 การหาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (Numerical model)

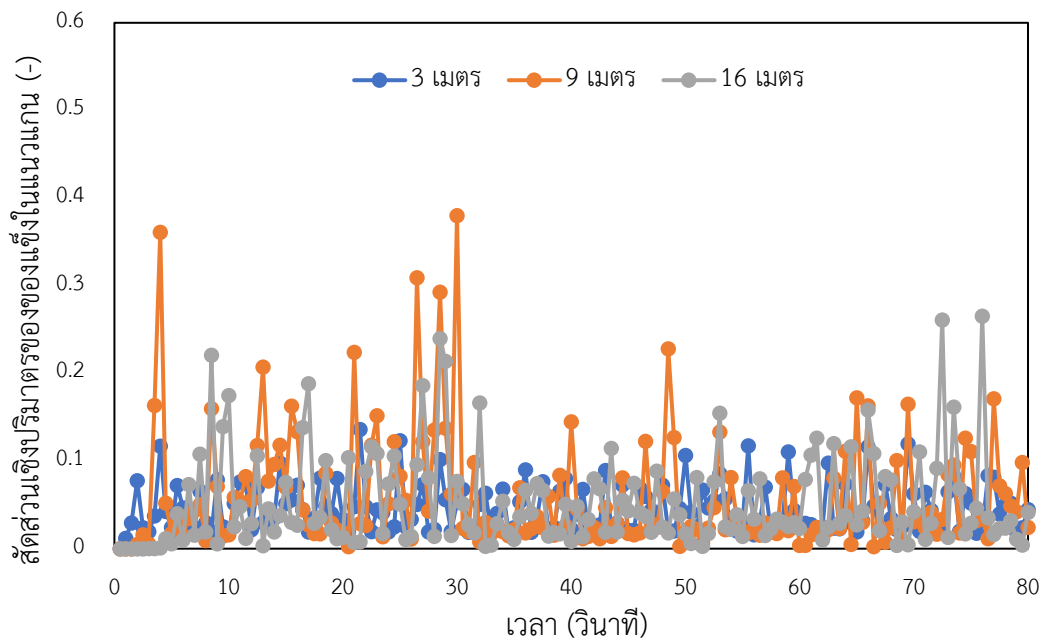
การหาแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test) ที่ใช้เวลาในการคำนวณต่ำที่สุดที่ยังให้ค่าที่ทำนายถูกต้อง และการหาค่าตัวแปรดำเนินการต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015)

ในการหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมนั้นได้ใช้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกนโดยจำนวนเซลล์การคำนวณที่นำมาศึกษา ได้แก่ จำนวนเซลล์การคำนวณที่มีขนาด 1500 3000 6000 9000 12000 และ 18000 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ โดยจะมีค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่ใกล้เคียงกันตั้งแต่บริเวณกลางท่อไรเซอร์เป็นต้นไปในทุกเซลล์การคำนวณ แต่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์จะพบว่าเซลล์การคำนวณ 12000 และ 18000 เซลล์ ที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Zhang ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มเซลล์การคำนวณไปจนถึง 18000 เซลล์ ใช้เพียงแค่ 12000 เซลล์ ก็เพียงพอ เนื่องจากต้องการเวลาที่ใช้ในการคำนวณต่ำที่สุด ซึ่งการหาพื้นที่การคำนวณ 12000 เซลล์ ได้ใช้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกนในช่วงเวลาที่ 40-80 วินาที เป็นช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่สถานะเสมือนคงตัว (Quasi steady state) เนื่องจากค่าที่ได้มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง (แกว่งในช่วงที่คงที่) ดังแสดงในรูปที่ 8

การหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เหมาะสมโดยการปรับค่าความเร็วของแก๊สขาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์ การคืนสภาพ อัตราการหมุนเวียนของแข็ง ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง ดังตารางที่ 5 เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015) โดยเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าหลังจากการปรับค่าต่าง ๆ ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015)



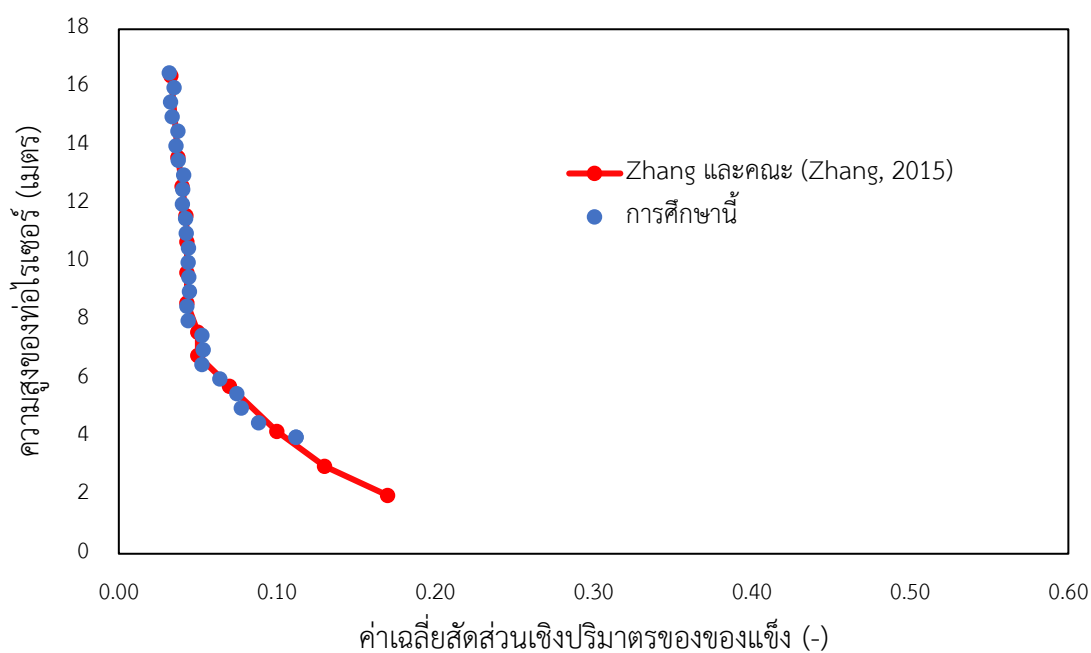
รูปที่ 7 เปรียบเทียบเซลล์การคำนวณในตัวแปรค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกน



รูปที่ 8 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่ความสูงต่าง ๆ ในช่วงเวลา 0-80 วินาที

ตารางที่ 5 ตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในการหาแบบจำลองการไหล

ตัวแปร	
อัตราการหมุนเวียนของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)	670.6
Specularity coefficient (-)	0.005
สัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็ง (-)	0.57
ความเร็วแก๊สขาเข้าท่อไรเซอร์ (เมตรต่อวินาที)	8.6



รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวแกนระหว่างงานวิจัยปัจจุบัน
กับงานวิจัยที่ผ่านมา

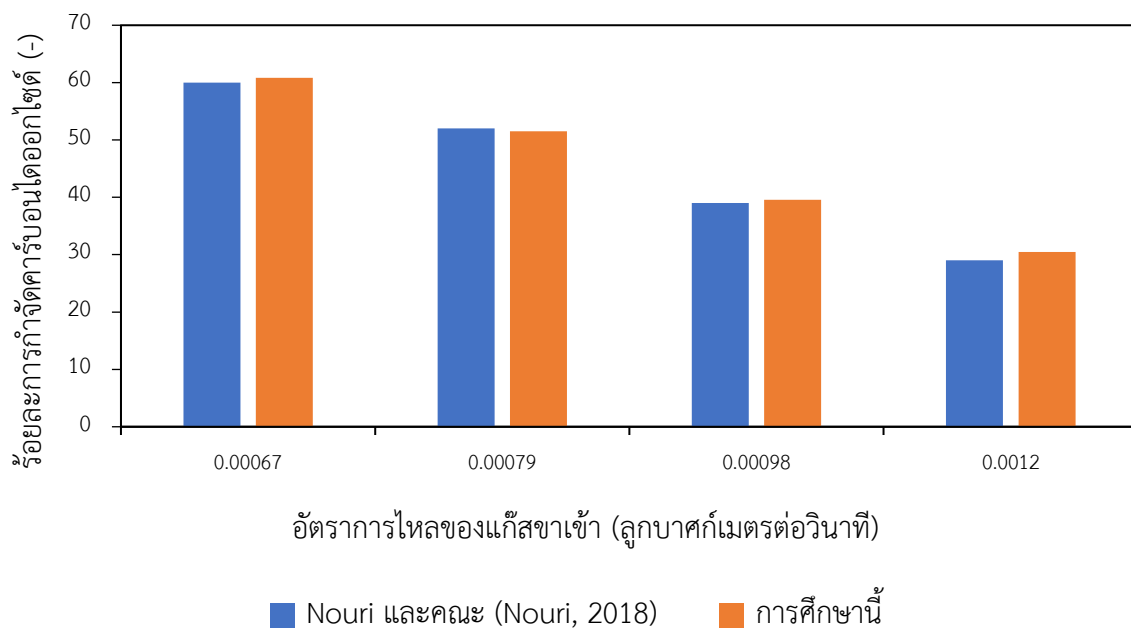
4.1.2 การหาแบบจำลองทางจลนศาสตร์

การหาแบบจำลองทางจลนศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การหาค่าค่าคงที่อัตรา การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test) ที่ใช้เวลาในการคำนวณต่ำที่สุดที่ยังให้ค่าที่ทำนายถูกต้อง เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Nouri และคณะ (Nouri, 2018) และการหาลักษณะการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวแปรดำเนินการของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015)

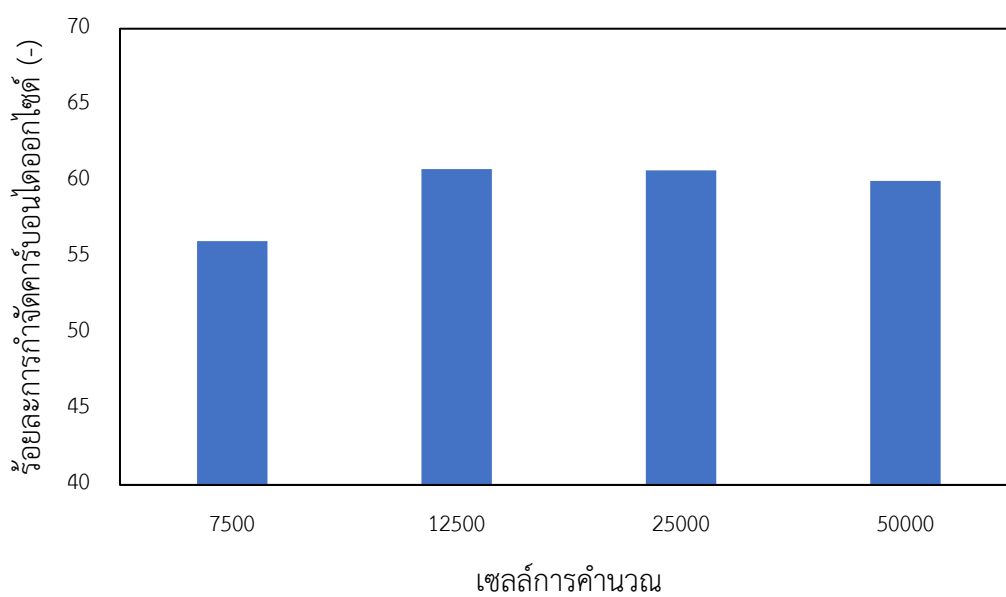
การหาแบบจำลองทางจลนศาสตร์ที่เหมาะสมโดยการปรับค่าคงที่อัตรา เพื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Nouri และคณะ (Nouri, 2018) โดยเปรียบเทียบค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราการไหลของแก๊สขาเข้า 4 ค่า ได้แก่ 0.00067 0.00079 0.00098 0.0012 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าหลังจากการปรับค่าค่าคงที่อัตรา ได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Nouri และคณะ (Nouri, 2018)

การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมนั้นได้ใช้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อัตราการไหลของแก๊สขาเข้า 0.00067 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที เป็นกรณีศึกษา โดยจำนวนเซลล์การคำนวณที่นำมาศึกษา ได้แก่ จำนวนเซลล์การคำนวณที่มีขนาด 7500 12500 25000 30000 และ 50000 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 11 จะพบว่ามีเซลล์การคำนวณ 12500 เซลล์ เป็นต้นไปมีร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Nouri และคณะ (Nouri, 2018) ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มเซลล์การคำนวณไปจนถึง 25000 เซลล์ ใช้เพียงแค่ 12500 เซลล์ ก็เพียงพอ เนื่องจากต้องการเวลาที่ใช้ในการคำนวณต่ำที่สุด ซึ่งการหาพื้นที่การคำนวณ 12500 เซลล์ ในช่วงเวลาที่ 40-80 วินาที เป็นช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) เนื่องจากค่าสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้ มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังแสดงในรูปที่ 12

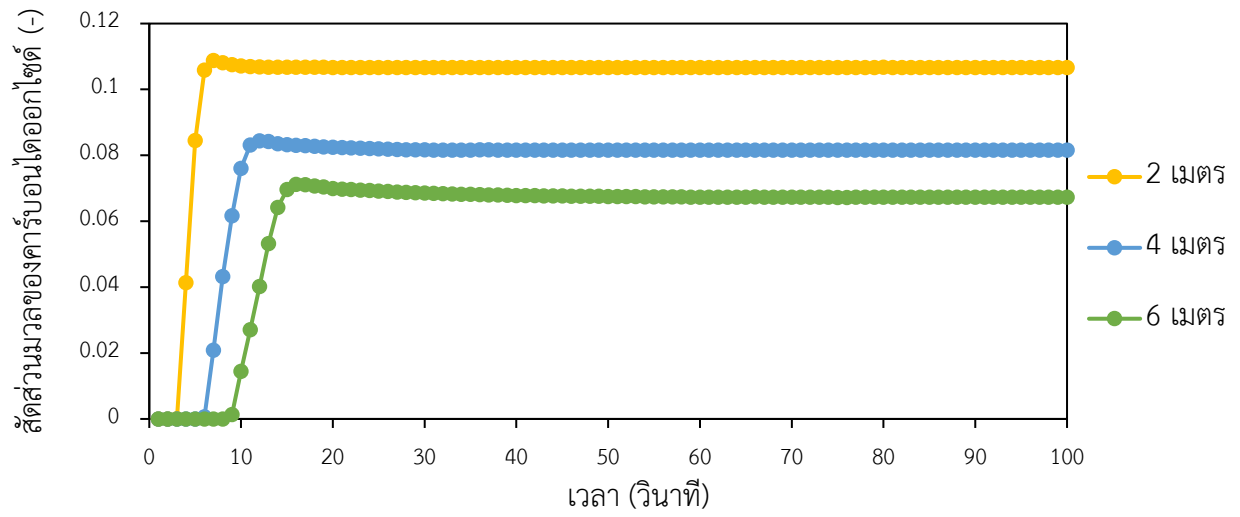
การหาลักษณะการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ตัวแปรดำเนินการของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015) แสดงดังตารางที่ 5 โดยการใช้แบบจำลองทางจลนศาสตร์และพื้นที่การคำนวณที่ได้มาจากขั้นตอนก่อนหน้า เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 10 ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับอัตราการไหลของแก๊สขาเข้าที่แตกต่างกัน



รูปที่ 11 ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับเซลล์การคำนวณที่แตกต่างกัน

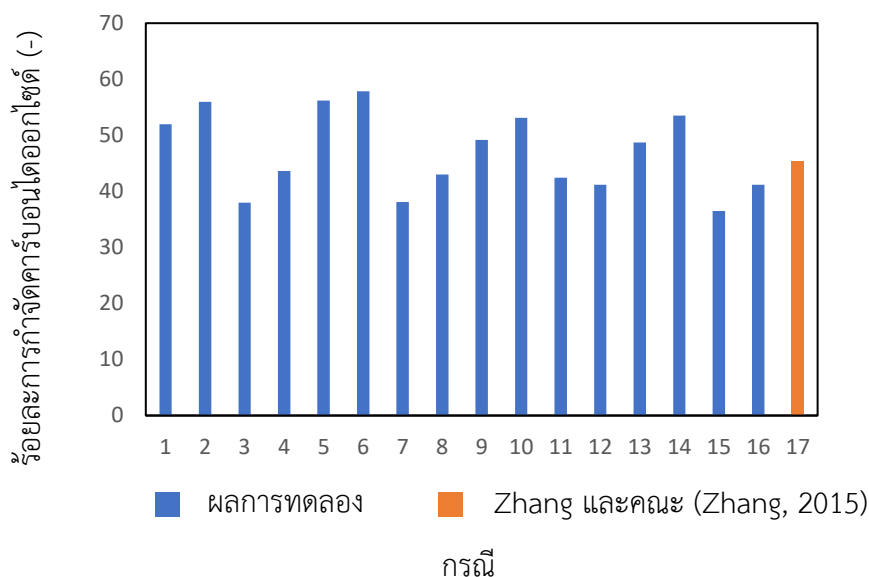


รูปที่ 12 สัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์

4.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์

ตารางที่ 6 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการจำลอง

กรณี	อุณหภูมิของ ของไหล (องศา เซลเซียส) (A)	ขนาดของ อนุภาค ของแข็ง (ไมโครเมตร) (B)	อัตราเร็วของ ของไหล (เมตรต่อ วินาที) (C)	อัตราการหมุนเวียน ของแข็ง (กิโลกรัม ต่อตารางเมตร วินาที) (D)	ร้อยละการกำจัด คาร์บอนไดออกไซด์ (-)
1	50	70	6.0	400.0	51.97
2	50	70	6.0	800.0	55.94
3	50	70	10.0	400.0	38.00
4	50	70	10.0	800.0	43.61
5	50	150	6.0	400.0	56.21
6	50	150	6.0	800.0	57.85
7	50	150	10.0	400.0	38.07
8	50	150	10.0	800.0	43.03
9	70	70	6.0	400.0	49.15
10	70	70	6.0	800.0	53.10
11	70	70	10.0	400.0	42.44
12	70	70	10.0	800.0	41.19
13	70	150	6.0	400.0	48.74
14	70	150	6.0	800.0	53.53
15	70	150	10.0	400.0	36.50
16	70	150	10.0	800.0	41.17
17	80	100	8.6	670.6	45.34



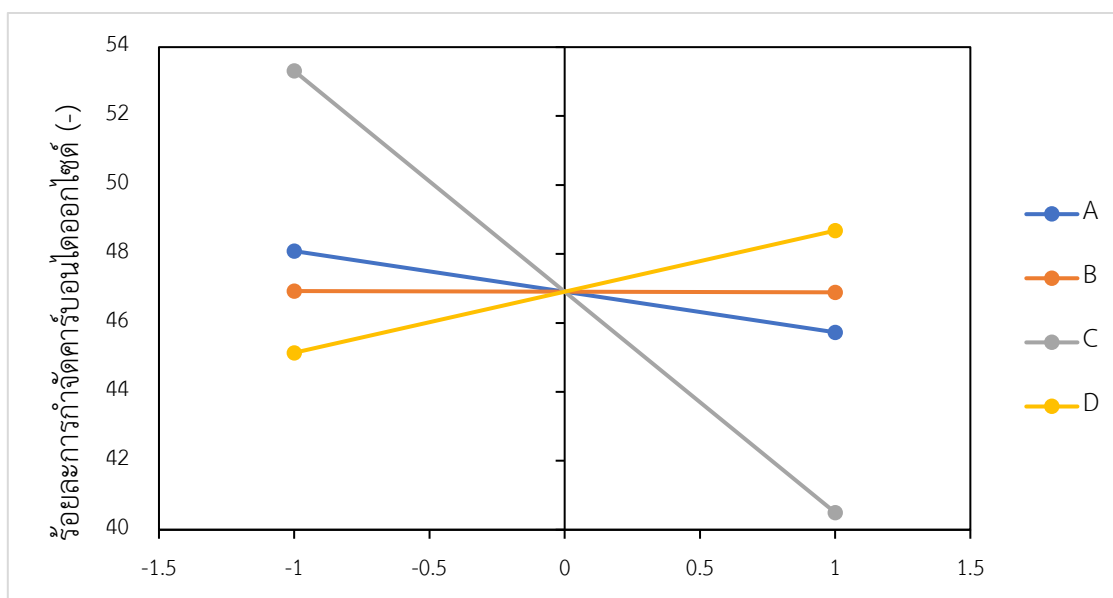
รูปที่ 13 ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับตัวแปรดำเนินการที่แตกต่างกัน

ข้อมูลจากตารางที่ 6 ถูกนำมารายงานผลเป็นกราฟแท่งดังรูปที่ 13 ซึ่งแสดงค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับตัวแปรดำเนินการที่แตกต่างกัน เทียบกับผลการทดลองของ Zhang และคณะ ค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบด มีค่าสูงที่สุด และต่ำที่สุดในกรณีศึกษาที่ 6 และ 15 ตามลำดับ ซึ่งมีอุณหภูมิของของไหลคือ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ขนาดของอนุภาคของแข็งคือ 150 ไมโครเมตร อัตราเร็วของของไหลคือ 6 และ 10 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และอัตราการหมุนเวียนของแข็ง 800 และ 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015) แสดงอยู่ในกรณีศึกษาที่ 17 พบว่าผลของตัวแปรดำเนินการ ในกรณีศึกษาที่ 1 2 5 6 9 10 13 และ 14 มีร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับที่สูงกว่า และในกรณีศึกษาที่ 3 4 7 8 11 12 15 และ 16 มีร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าผลการทดลองของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015)

ตารางที่ 7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของ การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ

Source of variation	SS	df	MS	F ₀	p-value
Model	728.7068	3	242.9023	55.41	< 0.0001
A	22.1951	1	22.1951	5.06	0.0440
C	656.3282	1	656.3282	149.72	< 0.0001
D	50.1835	1	50.1835	11.45	0.0054
Residual	52.6058	12	4.3838		
Total	781.3126	15			

ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) โดยใช้ตัวแปรตอบสนอง เป็นค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด จากตารางที่ 7 พบว่า ตัวแปร A หรืออุณหภูมิของของไหล ตัวแปร C หรืออัตราเร็วของของไหล ตัวแปร D หรืออัตราการหมุนเวียนของแข็ง เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองต่อค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดซ์เบด เนื่องจากมีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05



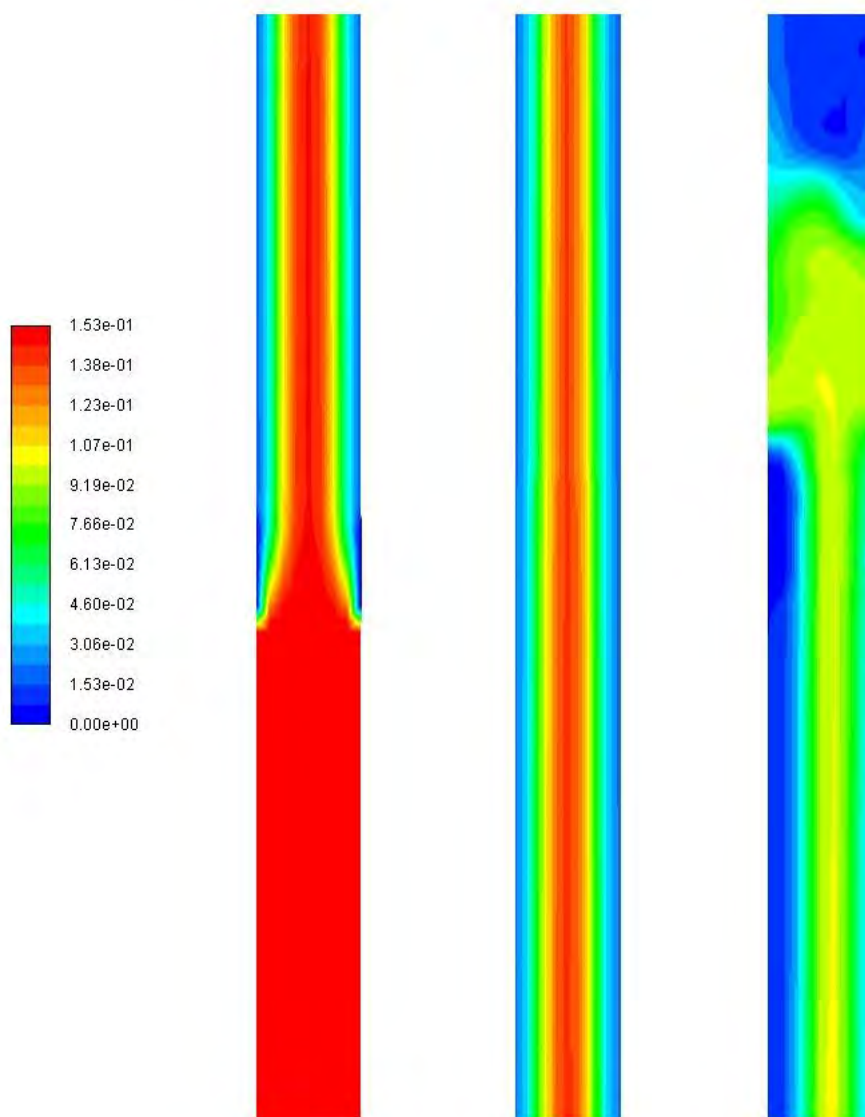
อุณหภูมิของของไหล (A), ขนาดของอนุภาคของแข็ง (B),
อัตราเร็วของของไหล (C), อัตราการหมุนเวียนของแข็ง (D)

รูปที่ 14 ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบด

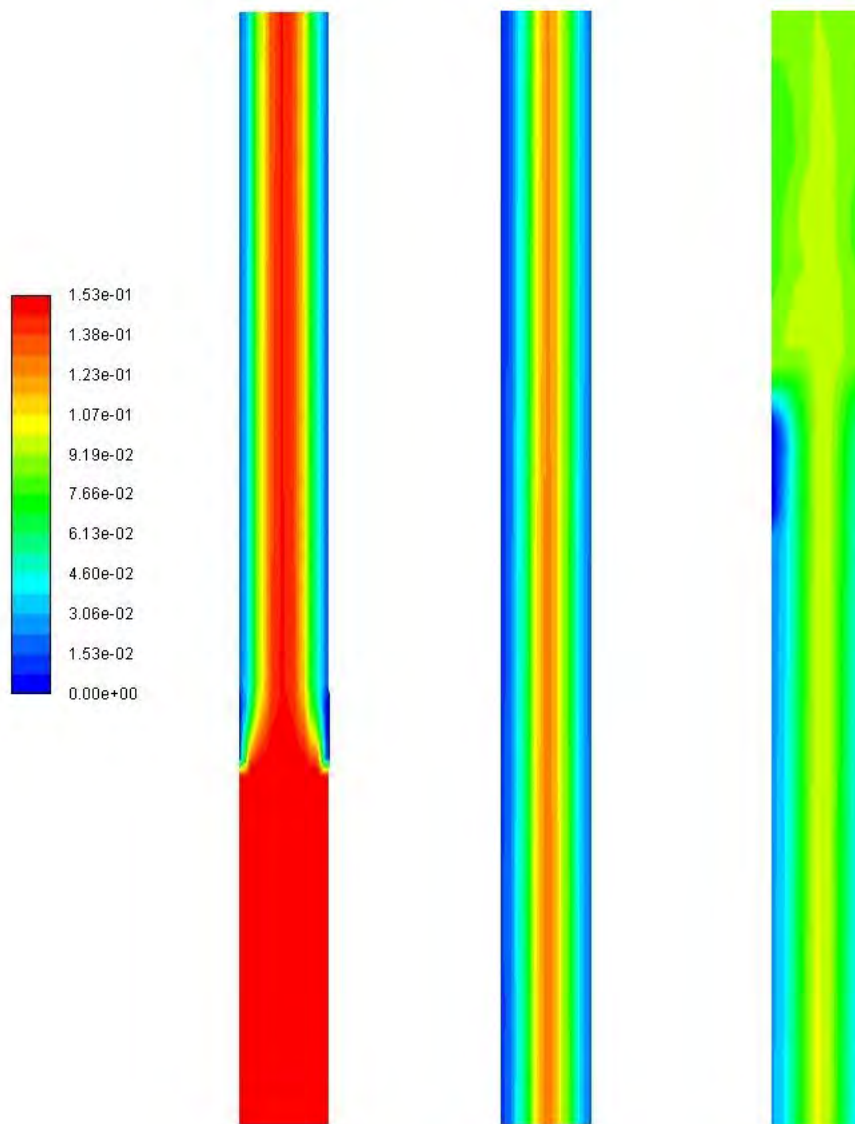
รูปที่ 14 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบด พบว่าตัวแปร A หรืออุณหภูมิของของไหลมีผลต่อตัวแปรตอบสนองนี้เชิงลบคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของของไหล จะทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดมีค่าต่ำลง เนื่องจากปฏิกิริยา การดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนต เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน การเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ปฏิกิริยาผันกลับเกิดได้ดีขึ้น จึงเป็นสาเหตุทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ตัวแปร B หรือขนาดอนุภาคของของแข็งไม่มีผลต่อค่าตอบสนองนี้ ถึงแม้การลดขนาดอนุภาคของแข็งจะนำไปสู่ การเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างวัฏภาคของแข็งและวัฏภาคแก๊ส แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับของ คาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวดูดซับโพแทสเซียมคาร์บอเนต เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ซึ่งอัตราการเกิดปฏิกิริยา ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณความเข้มข้นของไอน้ำเป็นหลัก ดังนั้นขนาดอนุภาค ของของแข็งจึงไม่มีผลต่อค่าตอบสนองนี้ ตัวแปร C หรือความเร็วของของไหลมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ในเชิงลบ การเปลี่ยนแปลงความเร็วของของไหลสามารถเปลี่ยนแปลงระบบอุทกพลศาสตร์ภายในระบบได้ การเพิ่มความเร็วของของไหลจะลดร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากความเร็วของของไหล ที่สูงขึ้นหมายถึงเวลาที่ของไหลอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดที่สั้นลง ซึ่งจะส่งผลให้การกำจัด คาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ในทางกลับกัน ตัวแปร D หรืออัตราการหมุนเวียนของแข็งมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ในเชิงบวก เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนเวียนของแข็งจะทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไธซ์เบดมีค่าสูงขึ้น เนื่องจาก อัตราการหมุนเวียนของแข็งที่สูงขึ้น จะเพิ่มปริมาณของตัวดูดซับ และ การคงอยู่ของของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบด ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้ ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

รูปที่ 15 16 และ 17 แสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไธซ์เบด ของกรณีศึกษาที่ 6 แถบระดับสีแสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งระดับสีแดงแสดง ค่าสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด และระดับสีน้ำเงินแสดงค่าสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ ต่ำสุด สัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต่ำกว่าอยู่ติดกับผนังเครื่องปฏิกรณ์เนื่องจากการรวมตัวของ อนุภาคของแข็งซึ่งสังเกตเห็นได้จากรูปที่ 15 16 และ 17 ซึ่งแสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของตัวดูดซับ ของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบด ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 40 60 และ 80 วินาที ตามลำดับ รูปที่ 18 19 และ 20 แสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์ เบดของกรณีศึกษาที่ 15 ที่เวลา 40 60 และ 80 วินาทีตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 6 สังเกตเห็นได้ว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดในกรณีที่ 15 มีความเข้มข้น สูงกว่ากรณีที่ 6 ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากสัดส่วนปริมาตรของตัวดูดซับของแข็งที่มีค่าต่ำกว่าในกรณีที่ 6 ซึ่ง

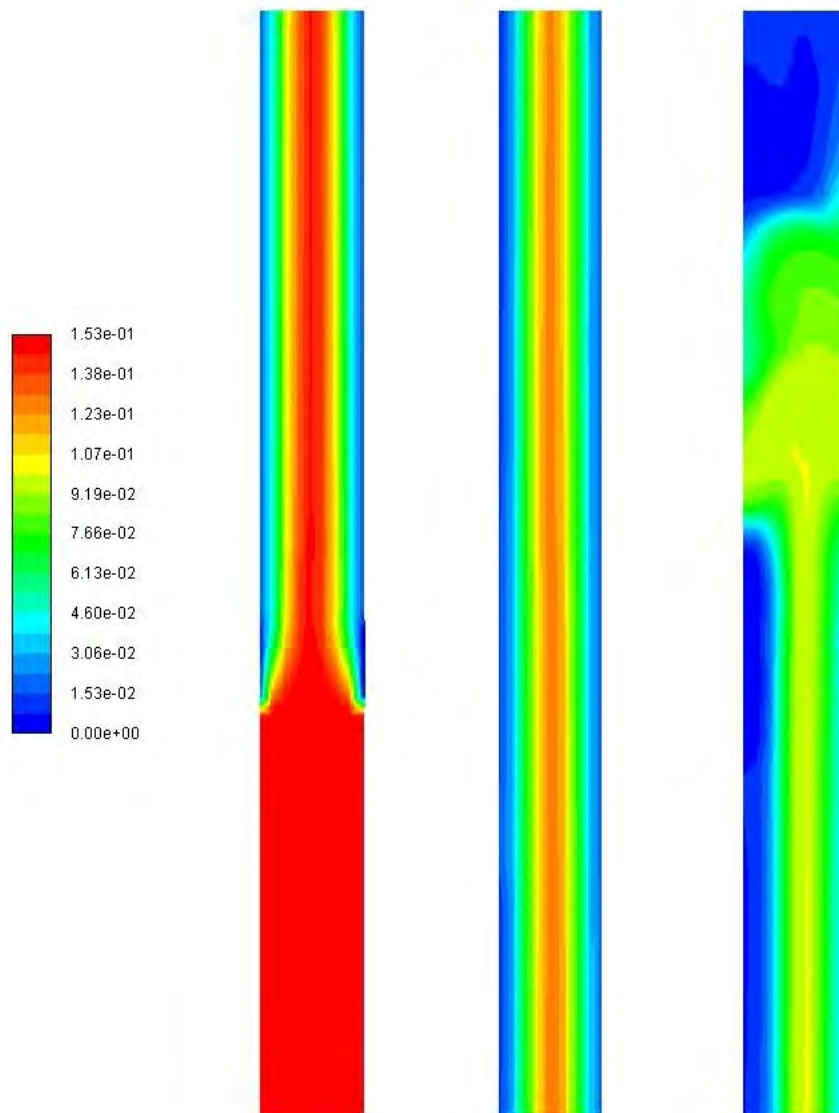
สังเกตเห็นได้จากรูปที่ 21 22 และ 23 ซึ่งแสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบต ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่เวลา 40 60 และ 80 วินาที ตามลำดับ และ รูปที่ 22 23 และ 24 ซึ่งแสดงคอนทัวร์ของสัดส่วน ปริมาตร ของ ตัวดูดซับ ของ แข็ง ภายใน เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบต ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่เวลา 40 60 และ 80 วินาที ตามลำดับ



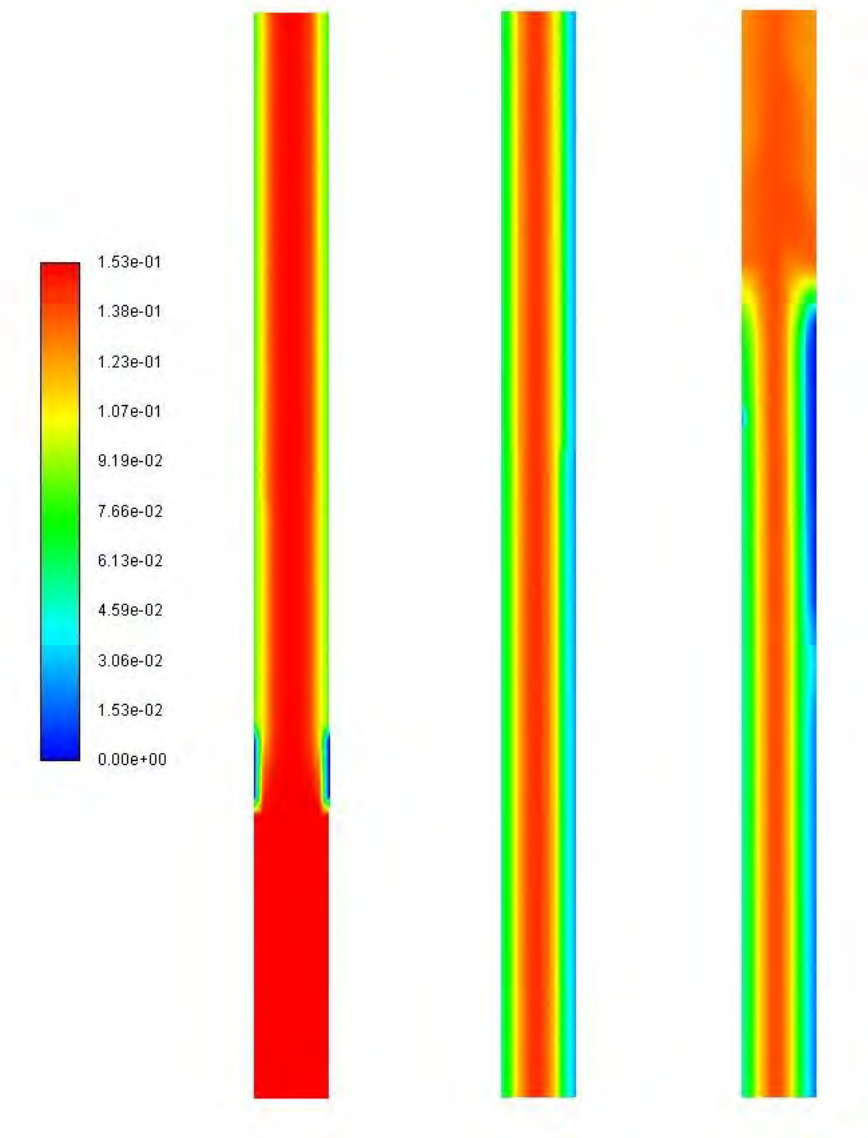
รูปที่ 15 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบต ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 40 วินาที



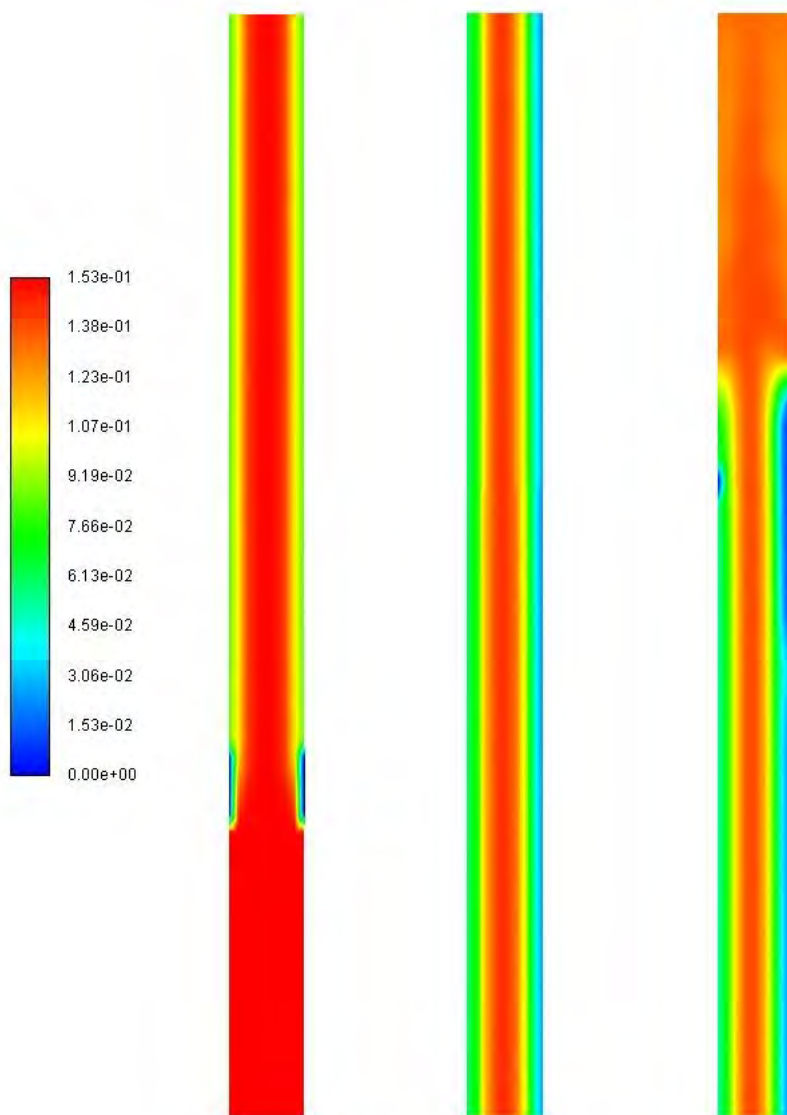
รูปที่ 16 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด
ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 60 วินาที



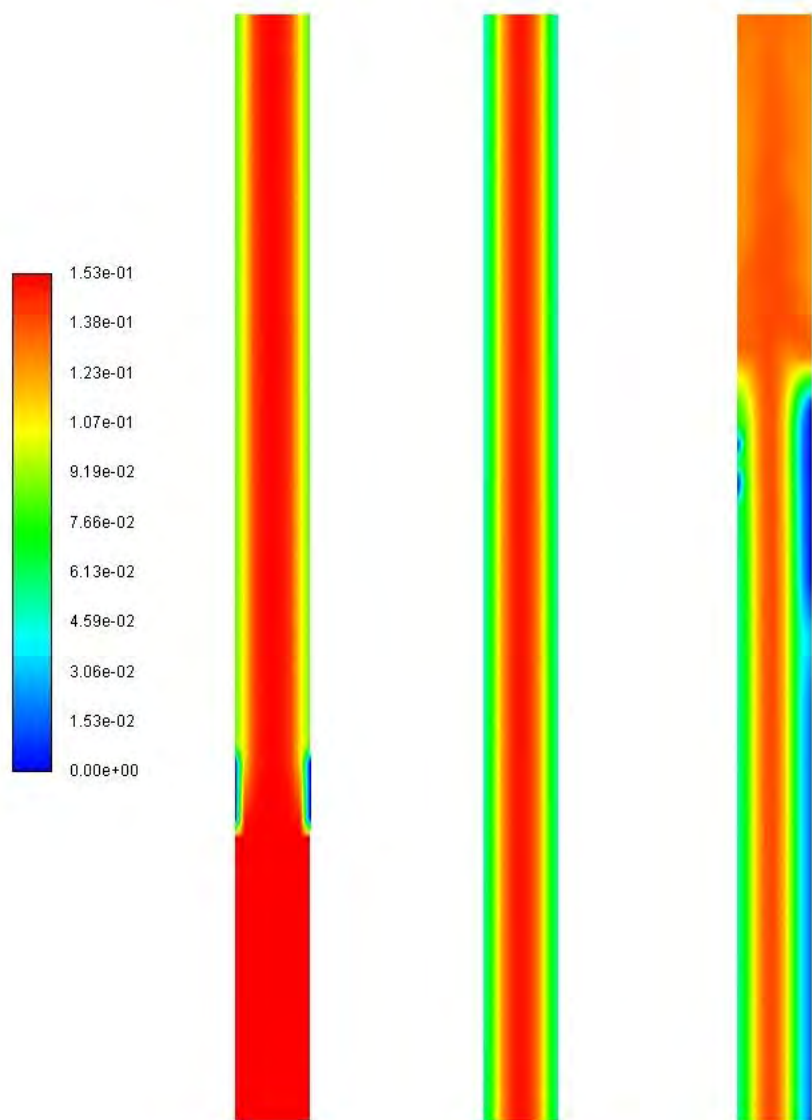
รูปที่ 17 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา
ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 80 วินาที



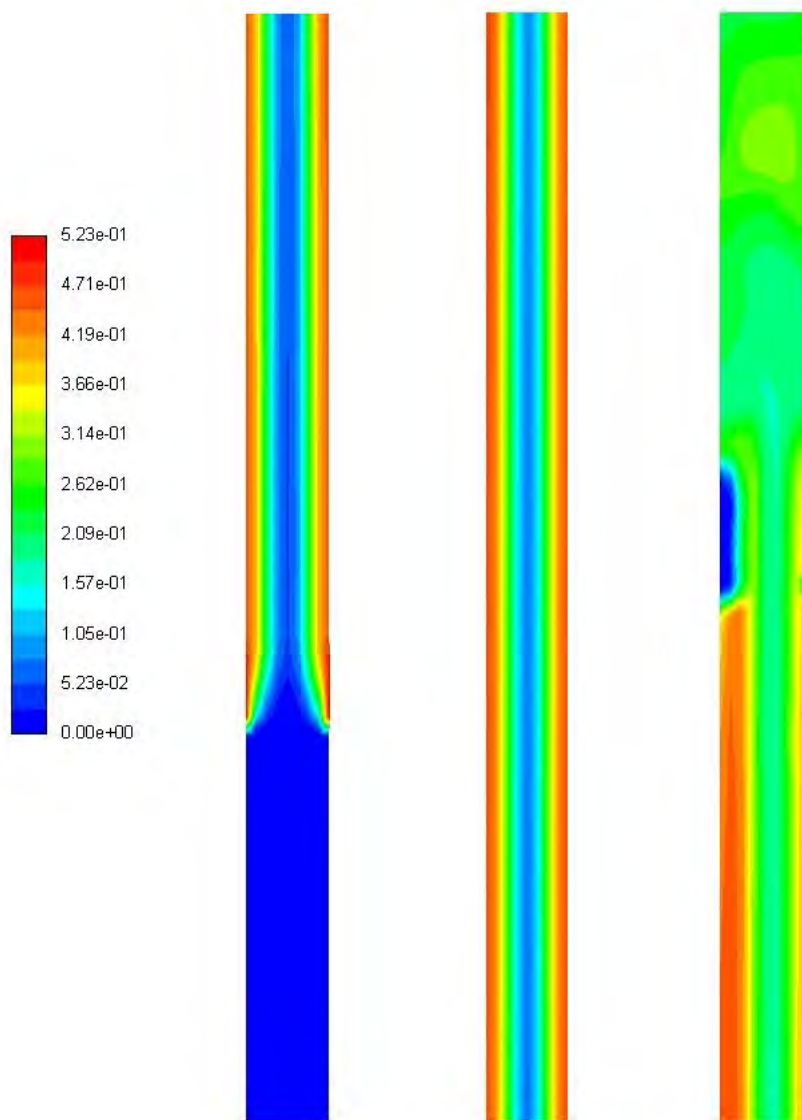
รูปที่ 18 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมา
ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 40 วินาที



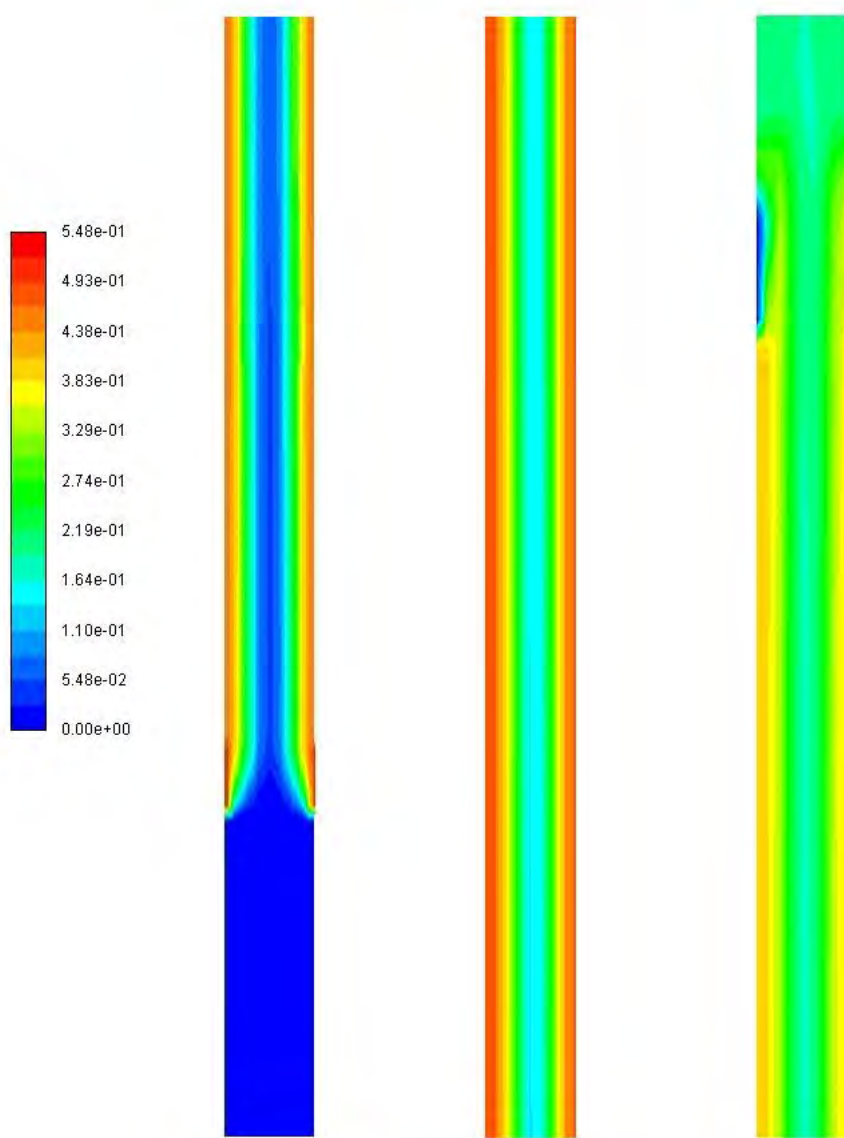
รูปที่ 19 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาของกรณีศึกษาที่ 15 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 60 วินาที



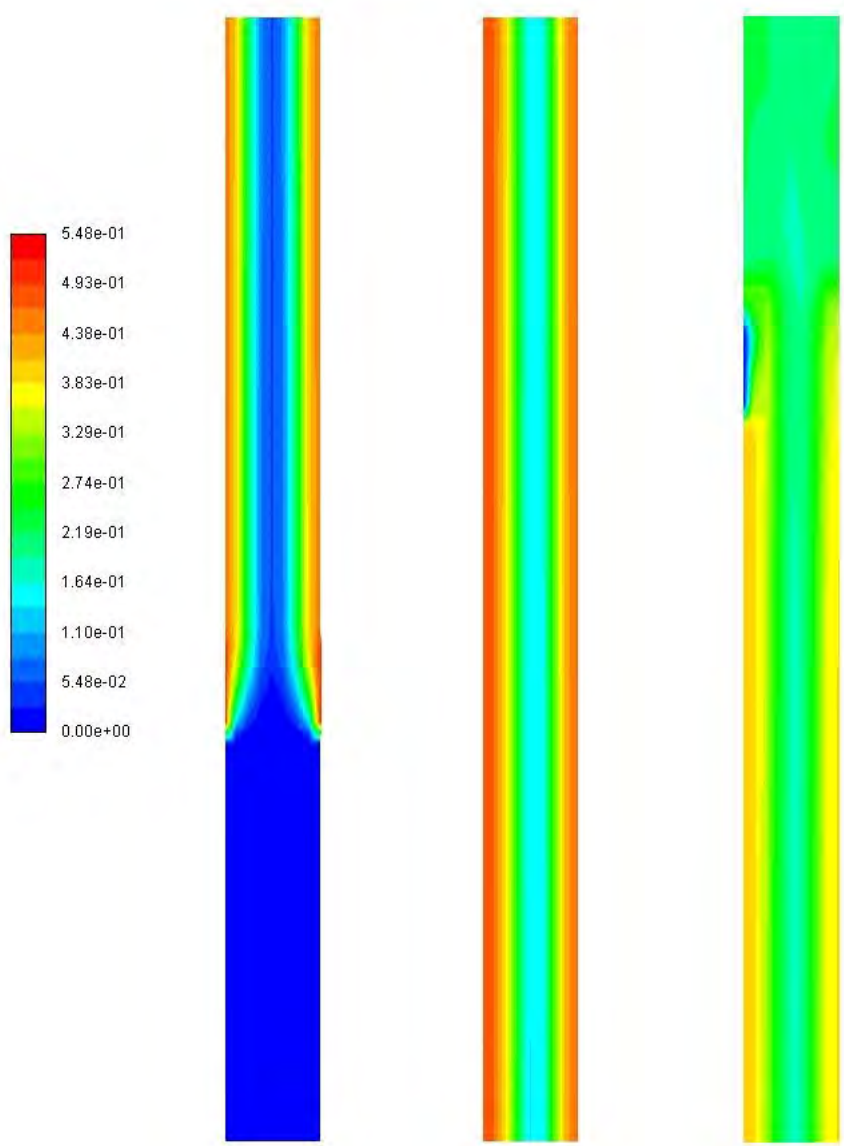
รูปที่ 20 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาของกรณีศึกษาที่ 15 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 80 วินาที



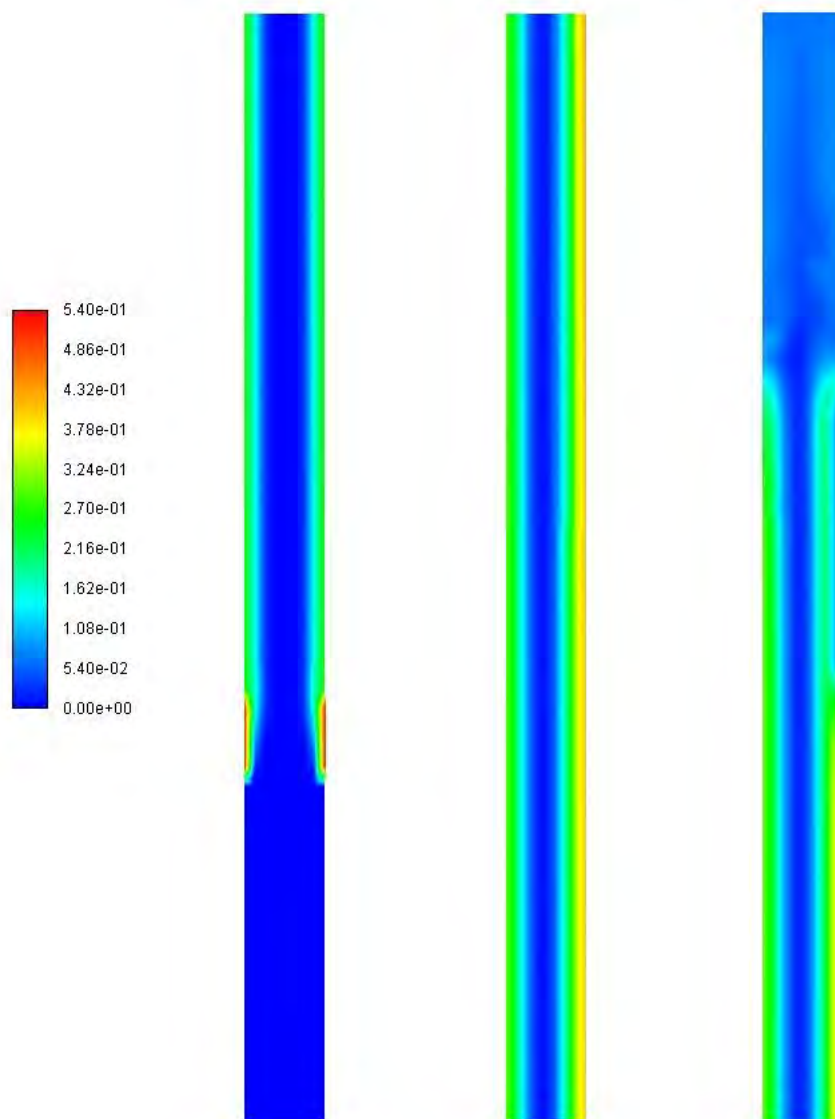
รูปที่ 21 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด
ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 40 วินาที



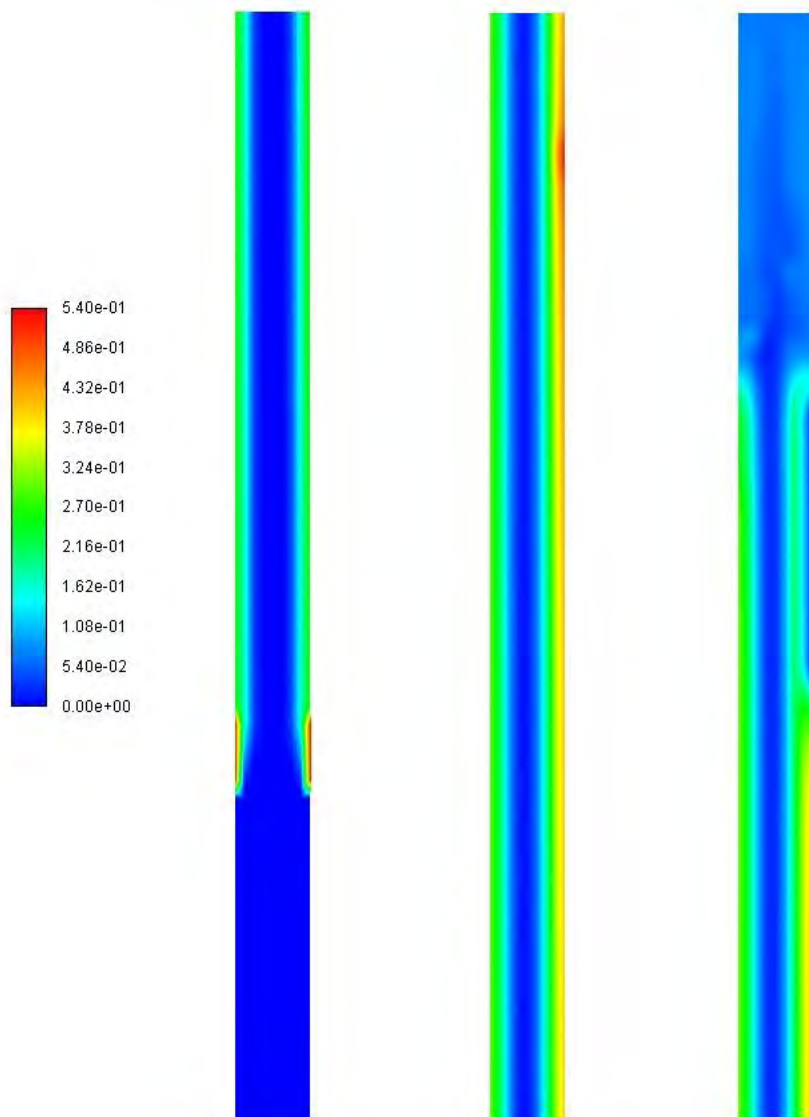
รูปที่ 22 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิโดซ์เบด
ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 60 วินาที



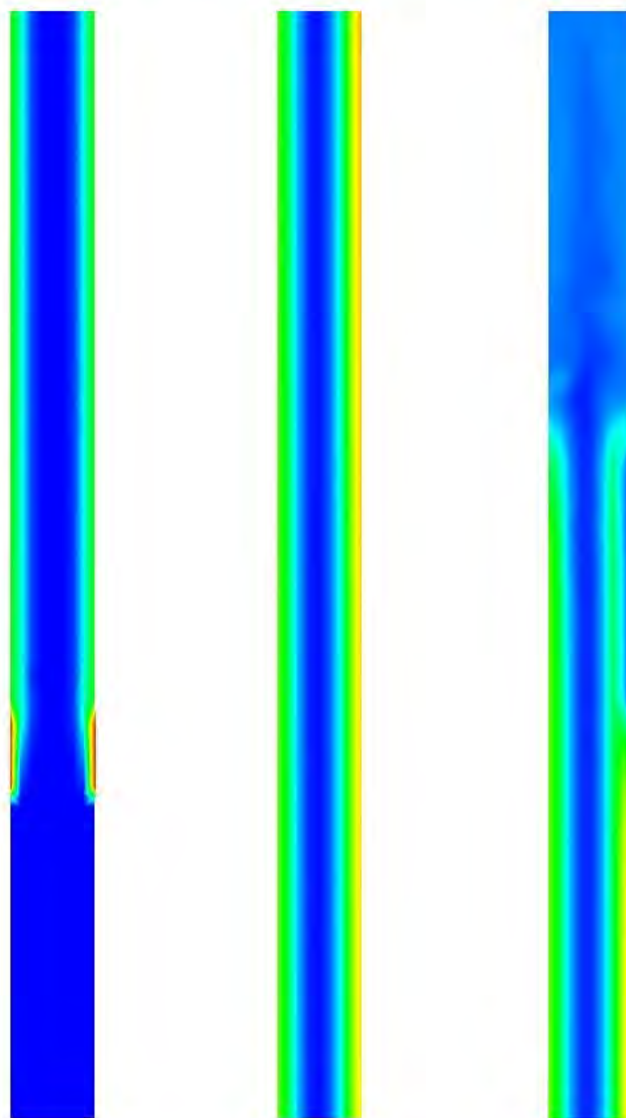
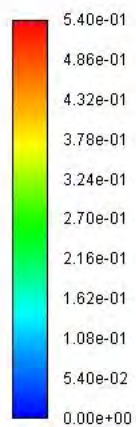
รูปที่ 23 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์เบด
ของกรณีศึกษาที่ 6 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 80 วินาที



รูปที่ 24 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาณตัวดัดของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด
ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 40 วินาที



รูปที่ 25 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด
ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 60 วินาที



รูปที่ 26 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด
ของกรณีศึกษาที่ 15 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 80 วินาที

4.3 การศึกษาผลของตัวแปรออกแบบที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์

จากตารางที่ 8 พบว่า ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงที่สุด และต่ำที่สุดในกรณีศึกษาที่ 32 และ 20 ตามลำดับ ซึ่งมีมุมกรวยคือ 80 และ 60 องศา ตามลำดับ ความกว้างชั้นคือ 0.1 และ 0.05 เมตร ตามลำดับ ความสม่ำเสมอระหว่างชั้นคือ 4 ชั้น และระยะห่างระหว่างชั้นคือ 1.7 เมตร ซึ่งร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงหมายความว่า ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดซับสูงขึ้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 16 ที่ยังไม่ได้รับการปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด พบว่า ในกรณีศึกษาที่ 31 และ 32 ที่ได้รับการปรับปรุงให้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบชั้นมีร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในระดับที่สูงกว่า

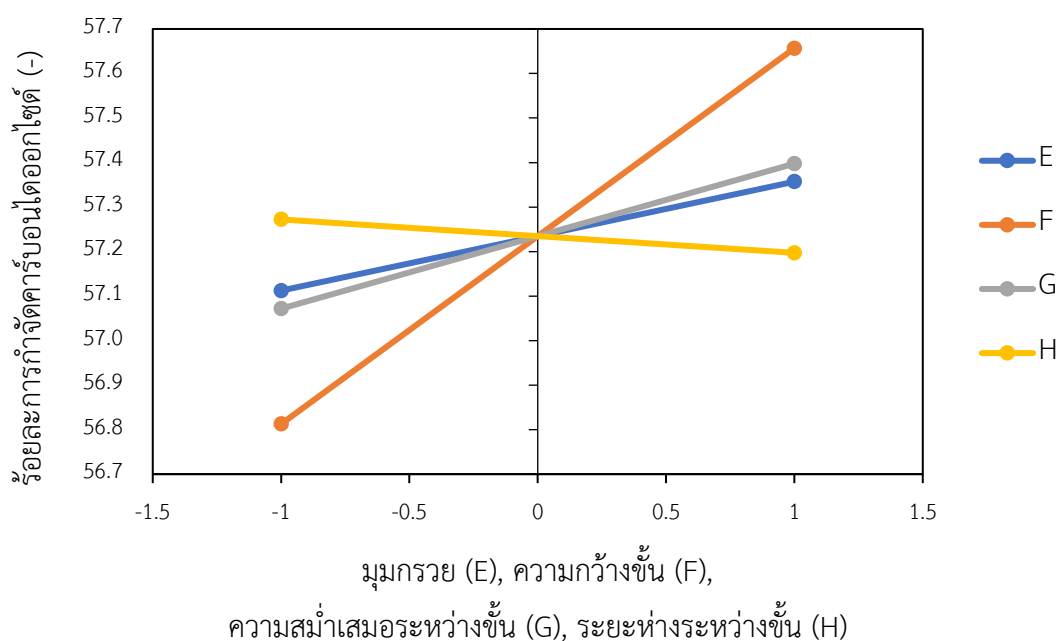
ตารางที่ 8 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 ของการศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ และค่าตัวแปรตอบสนอง
ที่ได้จากการจำลอง

กรณี	มุมกรวย (องศา)	ความกว้าง ชั้น (เมตร)	ความสม่ำเสมอ ระหว่างชั้น (ชั้น)	ระยะห่างระหว่าง ชั้น (เมตร)	ร้อยละการกำจัด คาร์บอนไดออกไซด์ (-)
	(E)	(F)	(G)	(H)	(-)
17	60	0.05	2	1.0	57.04
18	60	0.05	2	1.7	56.94
19	60	0.05	4	1.0	56.40
20	60	0.05	4	1.7	56.38
21	60	0.10	2	1.0	57.27
22	60	0.10	2	1.7	57.27
23	60	0.10	4	1.0	57.81
24	60	0.10	4	1.7	57.78
25	80	0.05	2	1.0	57.13
26	80	0.05	2	1.7	56.71
27	80	0.05	4	1.0	57.00
28	80	0.05	4	1.7	56.89
29	80	0.10	2	1.0	57.08
30	80	0.10	2	1.7	57.13
31	80	0.10	4	1.0	58.43
32	80	0.10	4	1.7	58.47

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ของ การศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ

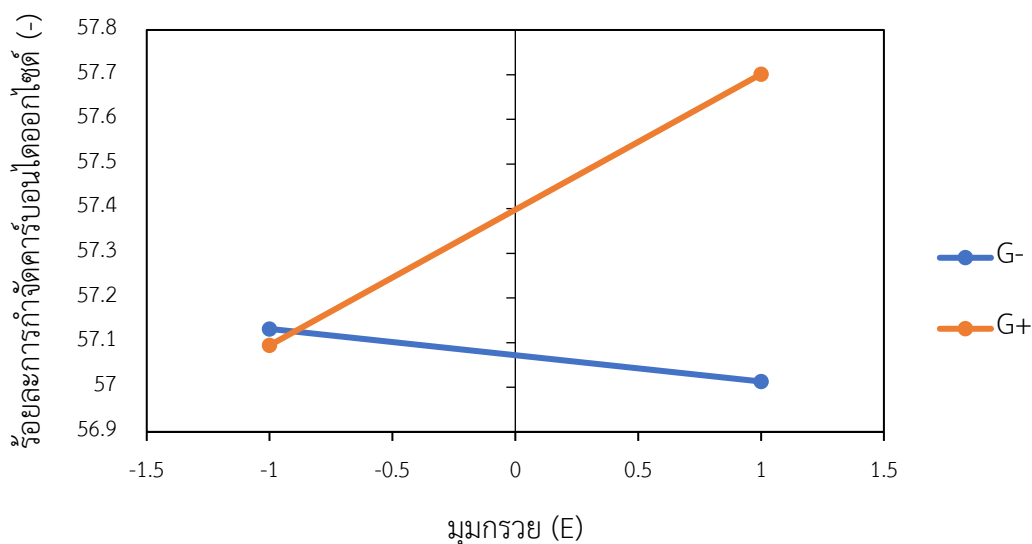
Source of variation	SS	df	MS	F ₀	p-value
E	0.2395	1	0.2395	21.33	0.0010
F	2.8506	1	2.8506	253.84	< 0.0001
G	0.4244	1	0.4244	37.79	0.0001
EG	0.5259	1	0.5259	46.83	< 0.0001
FG	1.4958	1	1.4958	133.19	< 0.0001
Residual	0.1123	10	0.0112		
Total	5.6484	15			

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนโดยใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ จากตารางที่ 9 พบว่า ตัวแปร E หรือมุมกรวย ตัวแปร F หรือความกว้างชั้น ตัวแปร G หรือความสม่ำเสมอ ระหว่างชั้น อันตรกิริยาระหว่างมุมกรวย และความสม่ำเสมอระหว่างชั้น (EG) และอันตรกิริยาระหว่างความ กว้างชั้น และความสม่ำเสมอระหว่างชั้น (EG) เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองร้อยละการกำจัด คาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากมีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05



รูปที่ 27 ผลของตัวแปรออกแบบที่มีต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

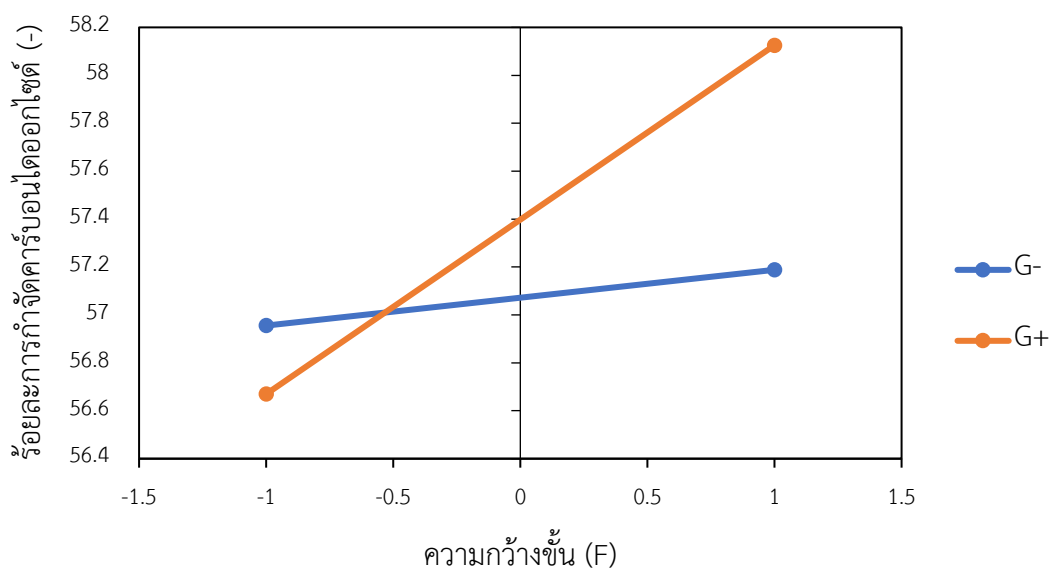
จากรูปที่ 27 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ตัวแปร E หรือ มุมกรวยมีผลต่อตัวแปรตอบสนองนี้เชิงบวกคือ เมื่อเพิ่มมุมกรวยทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มมุมกรวยทำให้เกิดการสะสมของบริเวณกรวย ของแข็งไหลวนในชั้น และ ตกกลับลงมาได้ อีกทั้งทำให้เวลาที่ของแข็งอยู่เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ตัวแปร F หรือความกว้างชั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนองนี้เชิงบวกคือ เมื่อเพิ่มความกว้างชั้นทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากความเร็วของของไหลที่อยู่ในชั้นต่ำลง เมื่อความเร็วของของไหลต่ำลงจะส่งผลให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เพราะความเร็วของของไหลที่ต่ำลงหมายถึงเวลาที่ของไหลอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ตัวแปร G หรือ ความสม่ำเสมอระหว่างชั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนองนี้เชิงบวก เมื่อเพิ่มจำนวนชั้นในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากการส่งเสริมให้เกิดพื้นที่การผสมมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ตัวแปร H หรือระยะห่างระหว่างชั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนองนี้เชิงลบคือ เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างชั้นทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำลง



รูปที่ 28 ผลของอันตรกิริยาระหว่างมุมกรวย (E) และความสม่ำเสมอระหว่างชั้น (G) ที่มีต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

รูปที่ 28 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร E หรือมุมกรวย และตัวแปร G หรือความสม่ำเสมอระหว่างชั้นที่มีต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าความสม่ำเสมอระหว่างชั้นมีค่าสูง (+) การเพิ่มขึ้น

ของมุมกรวยจะให้ผลเชิงบวก หมายความว่าเมื่อความสม่ำเสมอระหว่างชั้นมีค่าสูง การเพิ่มมุมกรวยจะทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น ขณะที่ความสม่ำเสมอระหว่างชั้นมีค่าต่ำ (-) การเพิ่มขึ้นของมุมกรวยจะให้ผลเชิงลบ หมายความว่าเมื่อความสม่ำเสมอระหว่างชั้นมีค่าต่ำ การเพิ่มมุมกรวยจะทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำลง



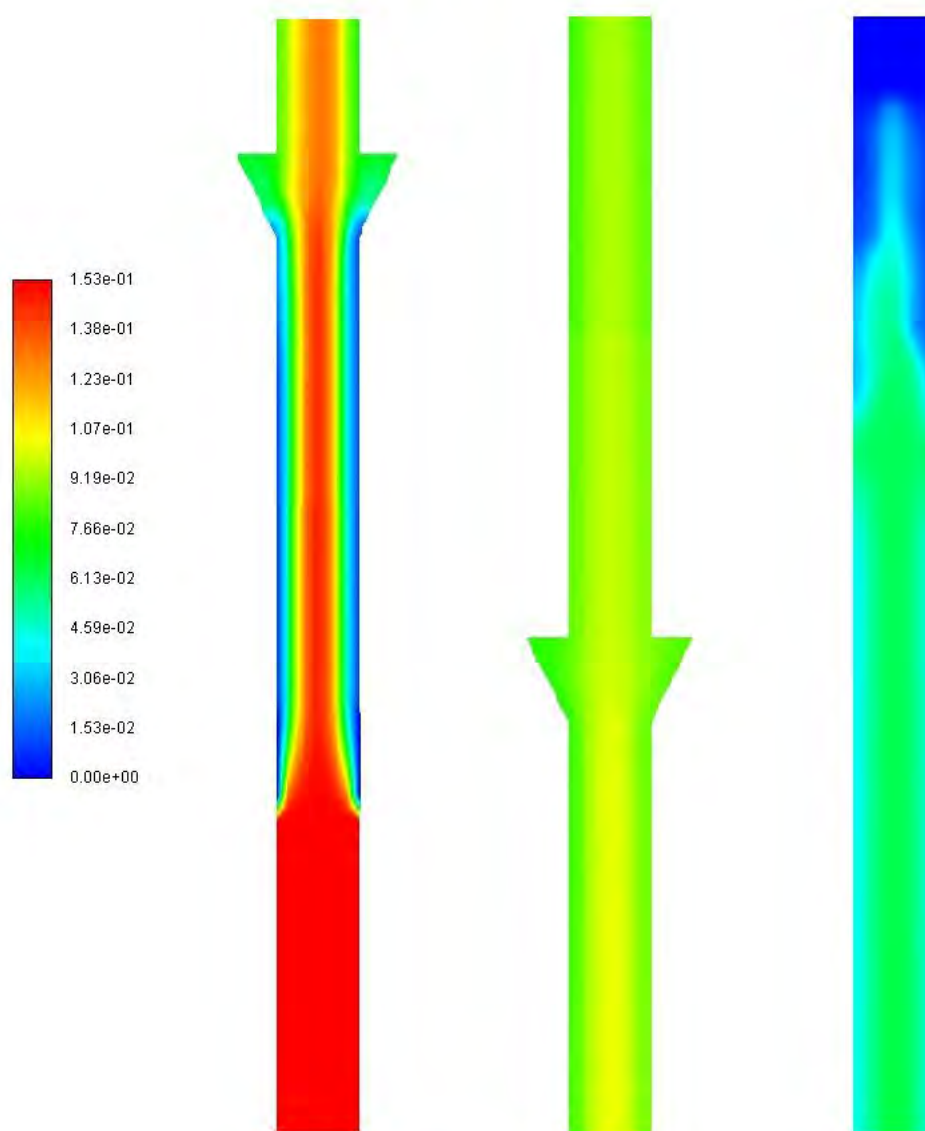
รูปที่ 29 ผลของอันตรกิริยาระหว่างความกว้างชั้น (F) และความสม่ำเสมอระหว่างชั้น (G)

ที่มีต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์

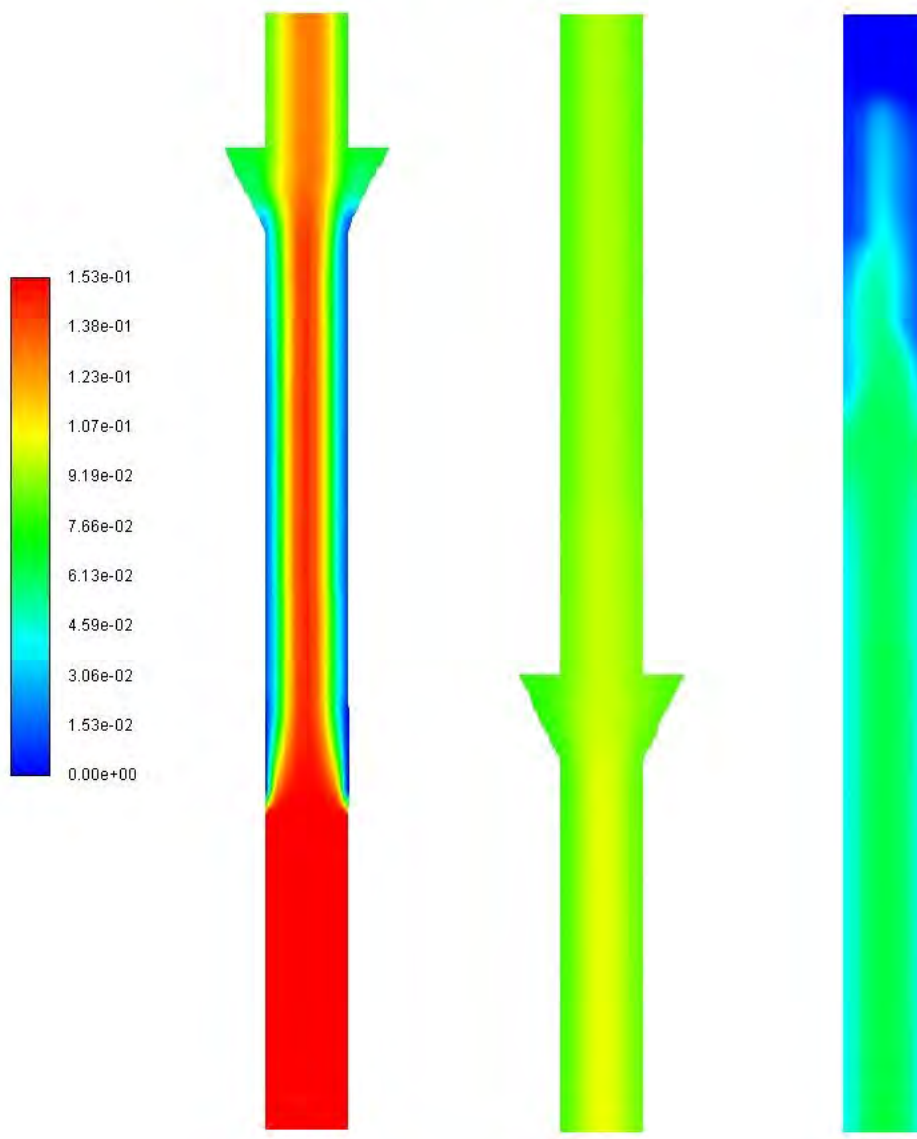
รูปที่ 29 ผลของอันตรกิริยาระหว่างตัวแปร F หรือความกว้างชั้น และตัวแปร G หรือความสม่ำเสมอระหว่างชั้นที่มีต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่า ไม่ว่าจะความสม่ำเสมอระหว่างชั้นจะเป็นค่าสูง (+) หรือค่าต่ำ (-) เมื่อเพิ่มความกว้างชั้นจะส่งผลเชิงบวกต่อค่าตอบสนองนี้ หมายความว่าเมื่อความสม่ำเสมอระหว่างชั้นมีค่าสูงหรือต่ำ และเพิ่มความกว้างชั้นจะทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เมื่อตัวแปร G เป็นค่าสูง เมื่อเพิ่มตัวแปร F จะให้ผลเชิงบวกสูงกว่า เมื่อเทียบกับตัวแปร G ที่มีค่าต่ำ เพราะตัวแปร G ที่มีค่าสูงมีความชันของกราฟสูงกว่าตัวแปร C ที่มีค่าต่ำ

รูปที่ 30 31 และ 32 แสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดของกรณีศึกษาที่ 20 ที่เวลา 40 60 และ 80 วินาทีตามลำดับ โดยแถบระดับสีแดงแสดงค่าสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด และระดับสีน้ำเงินแสดงค่าสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุด ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 32 สัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ของกรณีศึกษาที่ 20 มีค่าสูงกว่า เนื่องจากมุมกรวยมีขนาดเล็กกว่าทำให้มีการสะสมของบริเวณกรวย และของแข็งไหลวนในชั้นต่ำลง อีกทั้งทำให้เวลาที่ของแข็งอยู่เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดลดลง ซึ่งเป็นการลดอัตราการเกิดปฏิกิริยา

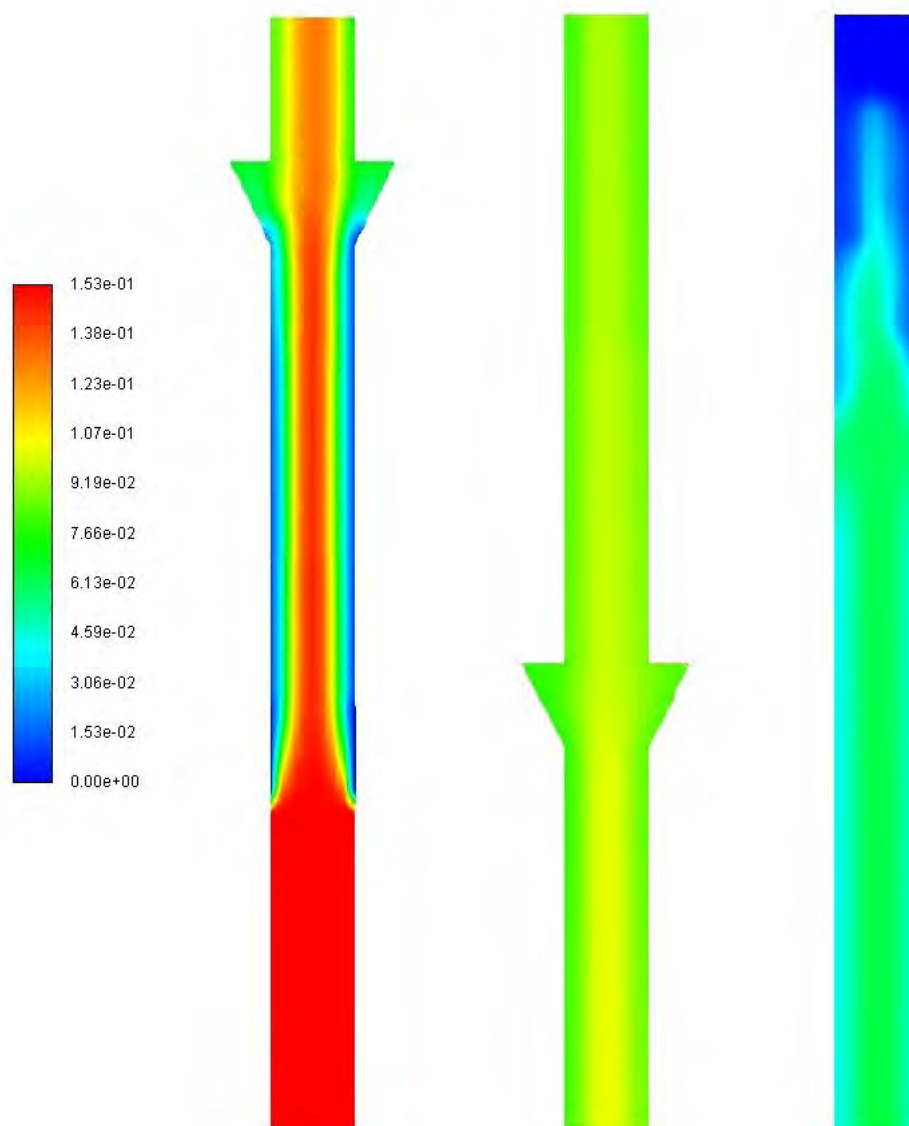
จึงส่งผลให้สัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีศึกษาที่ 20 มีค่าสูงกว่า โดยสังเกตได้จากรูปที่ 30 31 และ 32 ที่ความสูง 9 เมตร กลางเครื่องปฏิกรณ์มีบริเวณระดับสีเหลืองมากกว่าในรูปที่ 33 34 และ 35 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์ โดยสังเกตได้จากรูปที่ 36 37 และ 38 แสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นของกรณีศึกษาที่ 20 ที่เวลา 40 60 และ 80 วินาทีตามลำดับ และรูปที่ 39 40 และ 41 แสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นของกรณีศึกษาที่ 32 ที่เวลา 40 60 และ 80 วินาทีตามลำดับ



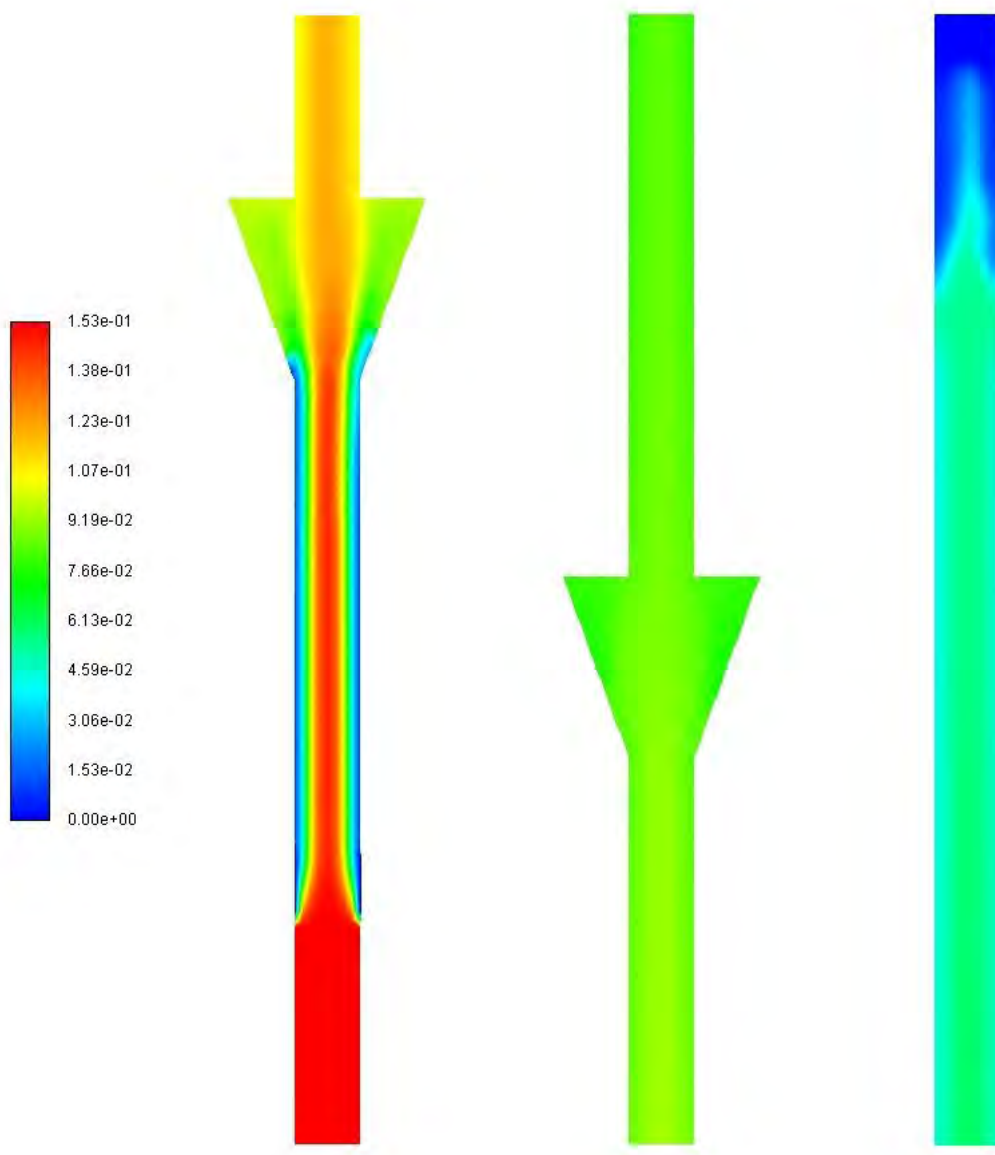
รูปที่ 30 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้นของกรณีศึกษาที่ 20 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 40 วินาที



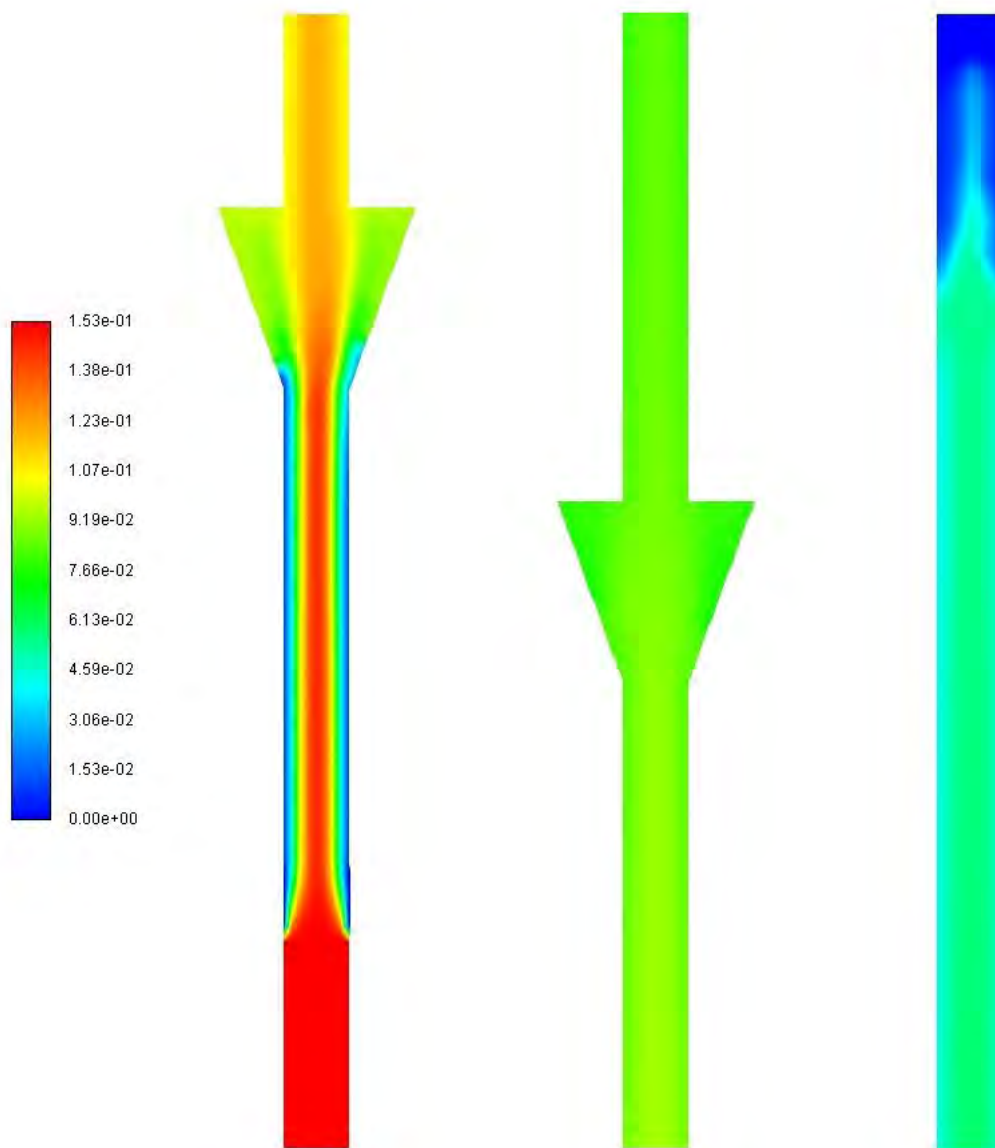
รูปที่ 31 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแบบขึ้น
ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 60 วินาที



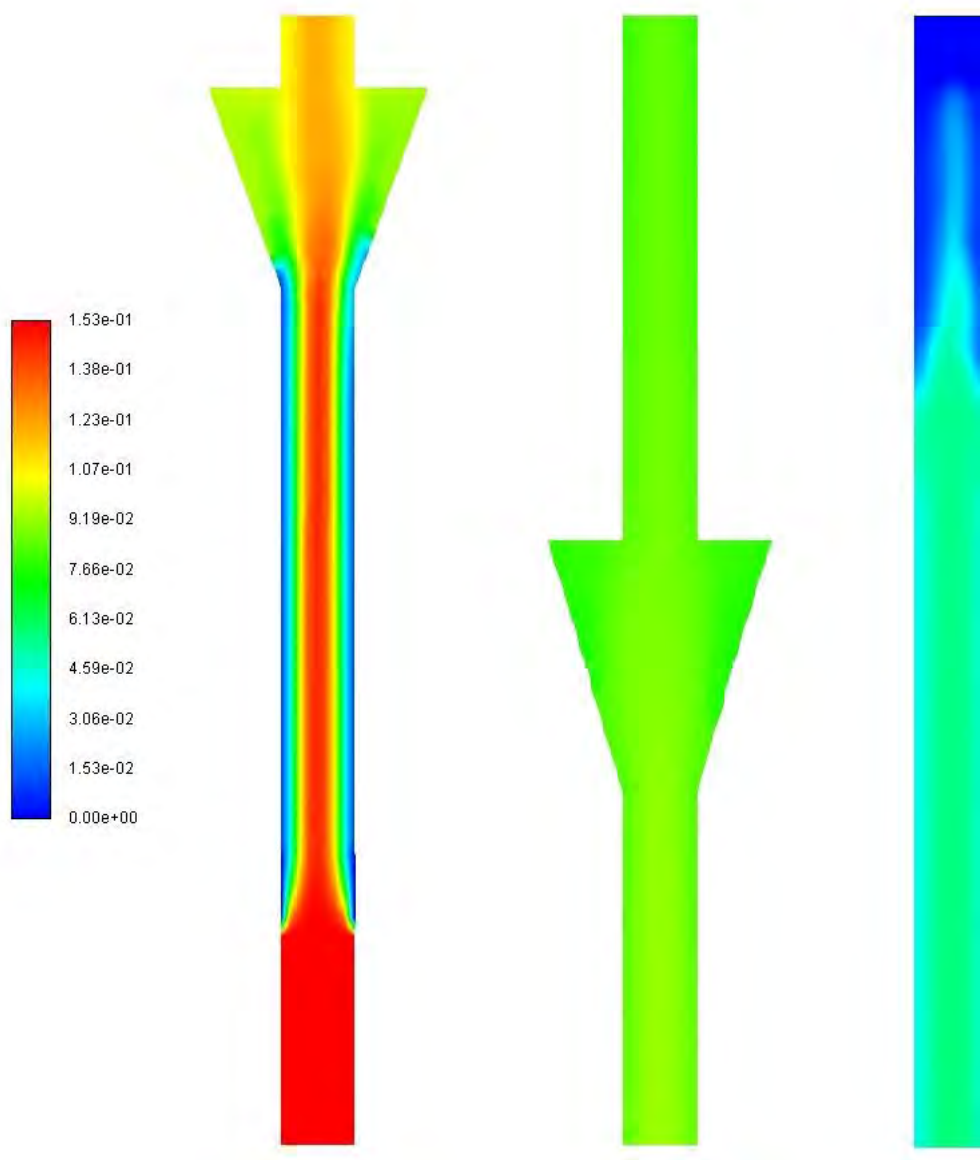
รูปที่ 32 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบขึ้น
ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 80 วินาที



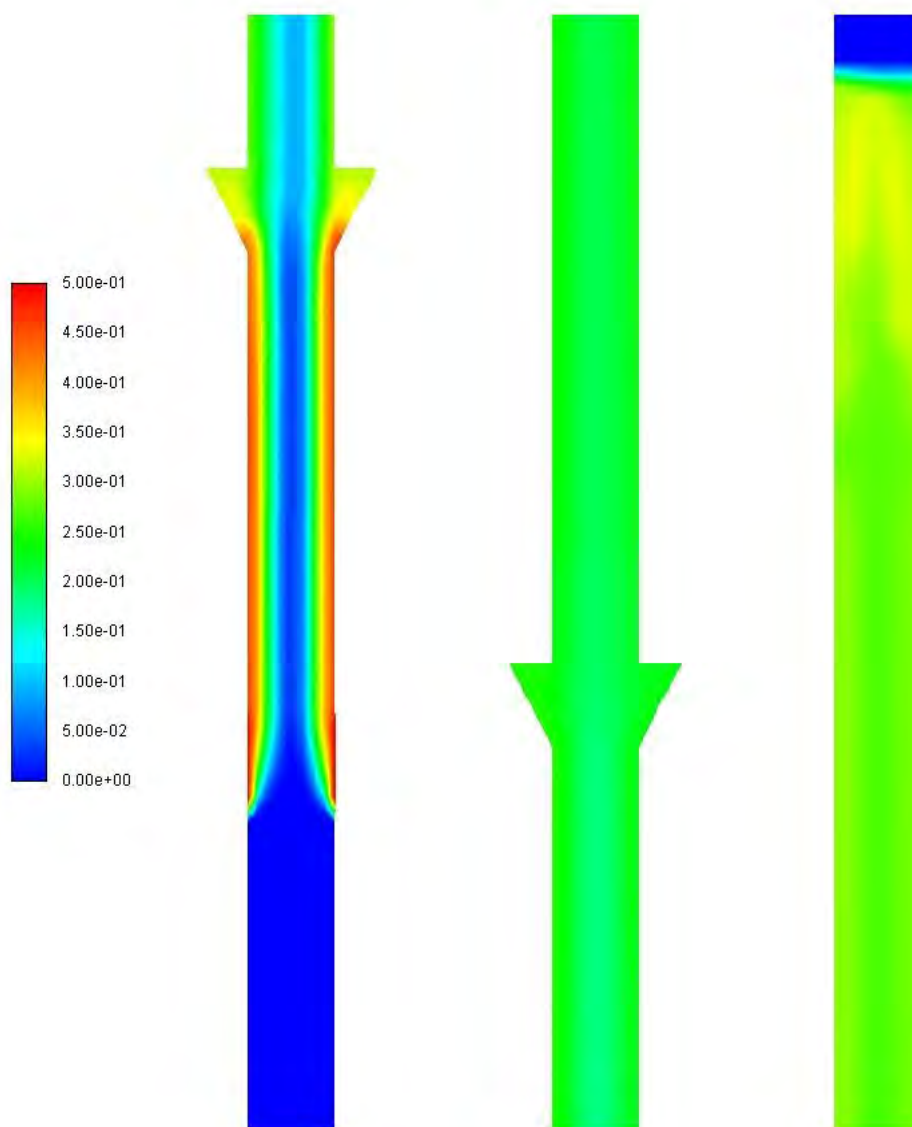
รูปที่ 33 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์พลาสมาแบบชั้น
ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 40 วินาที



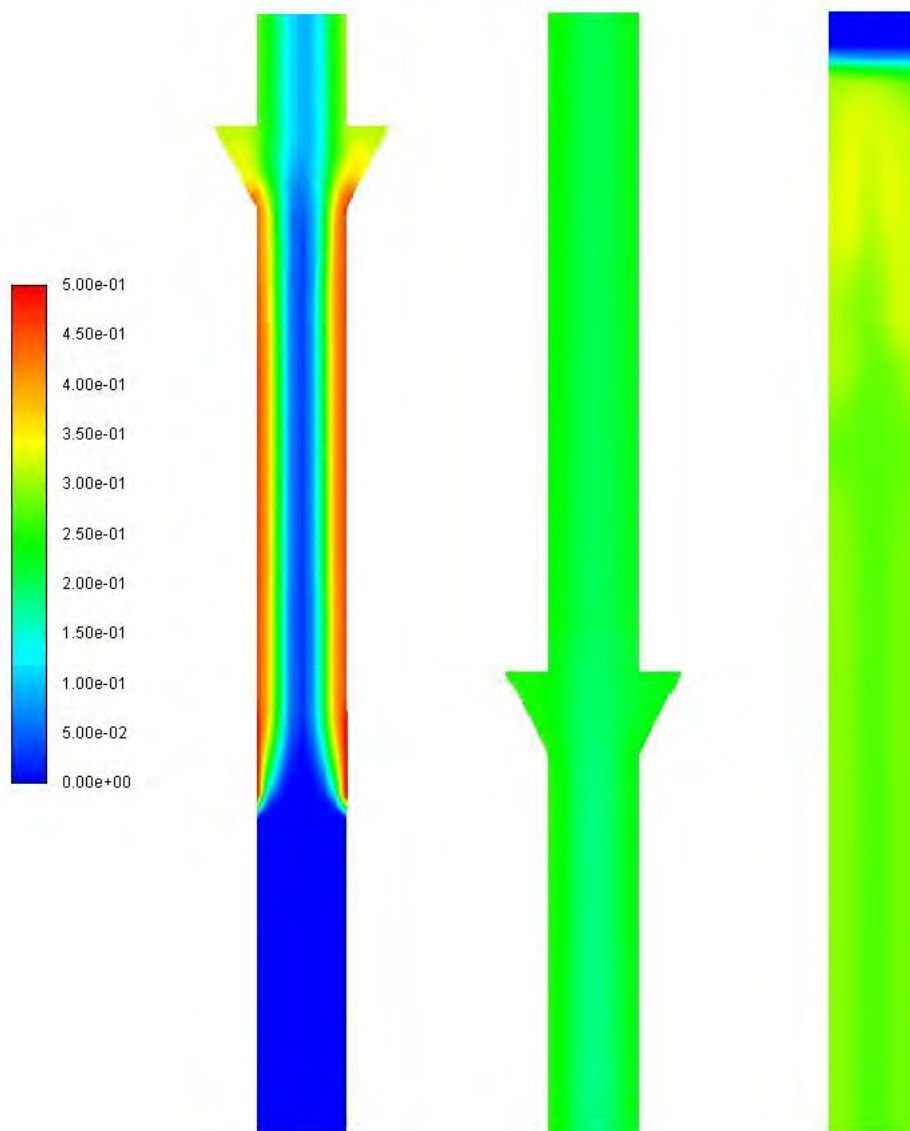
รูปที่ 34 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น
ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 60 วินาที



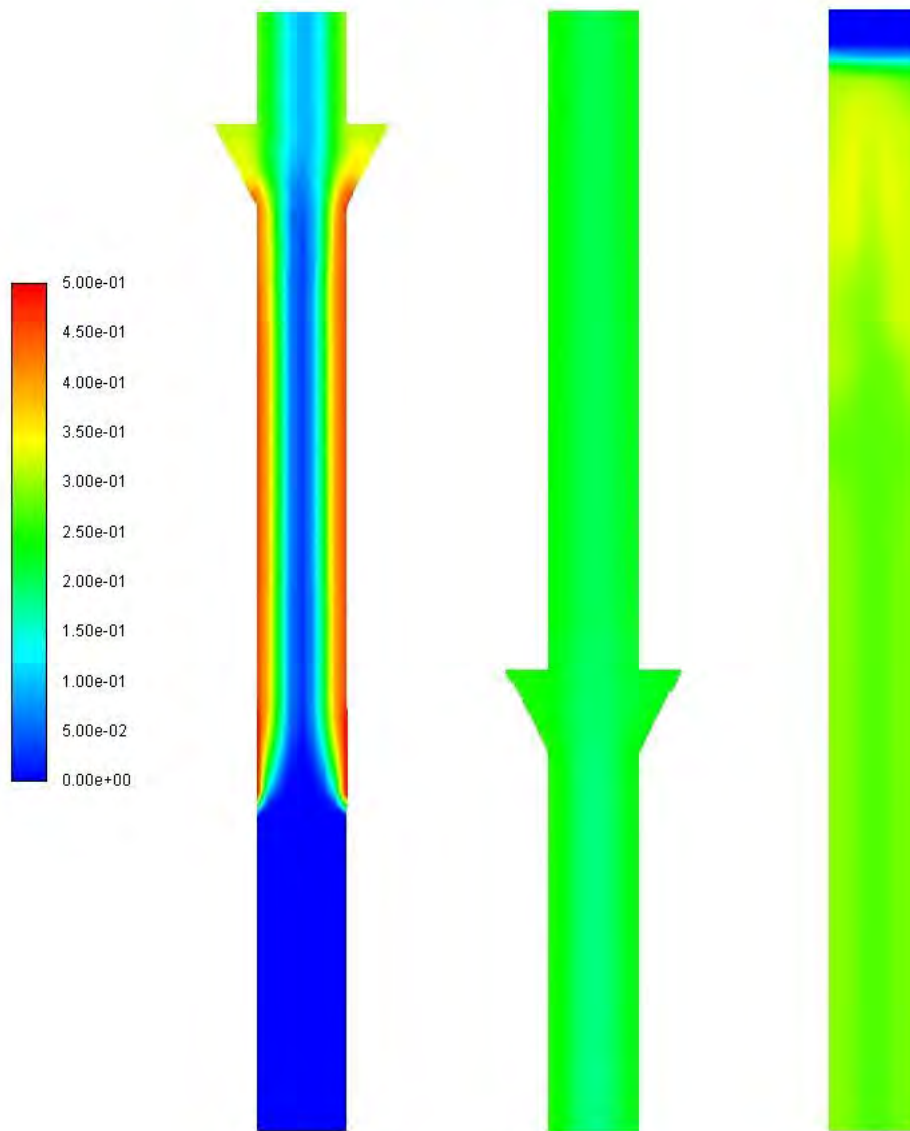
รูปที่ 35 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนมวลของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบขึ้น
ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 80 วินาที



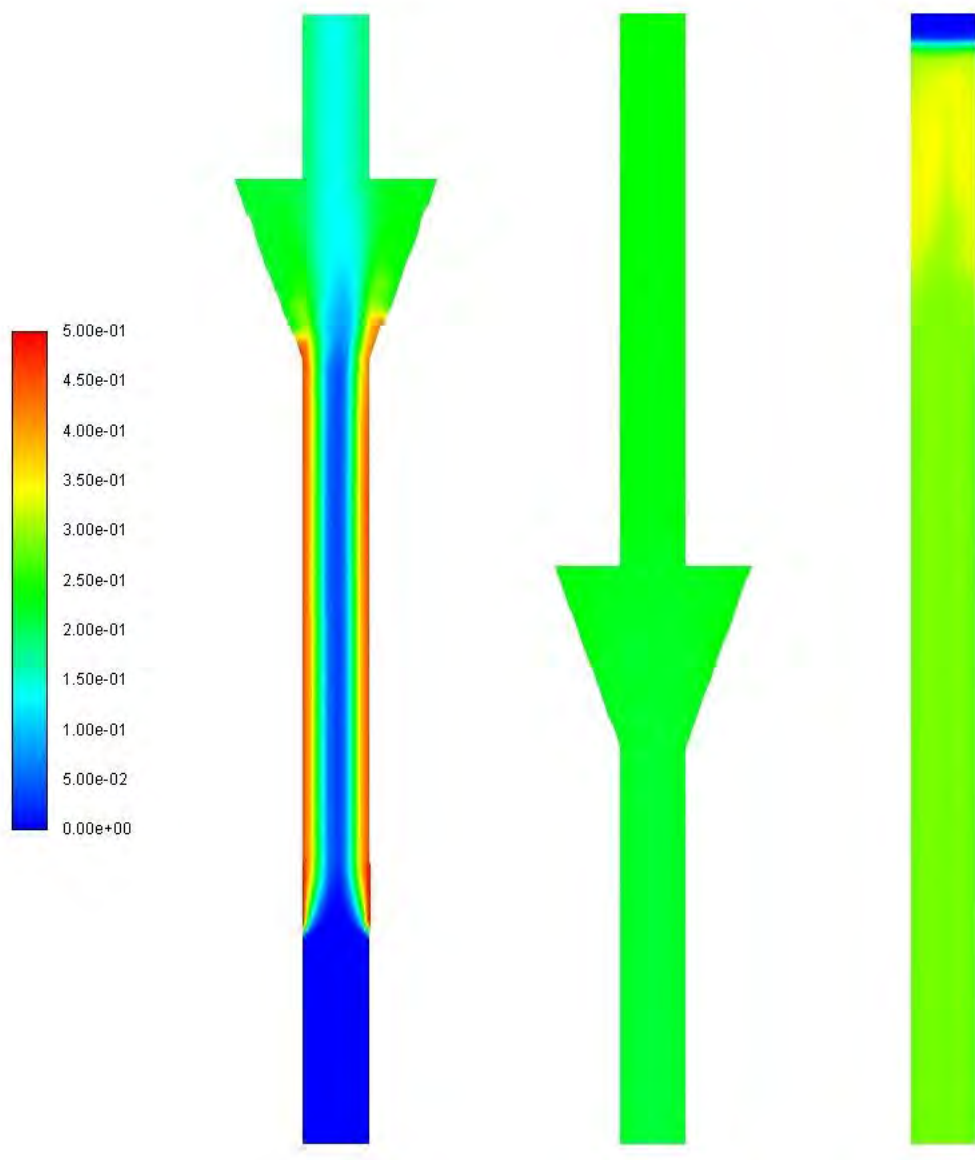
รูปที่ 36 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้น
ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 40 วินาที



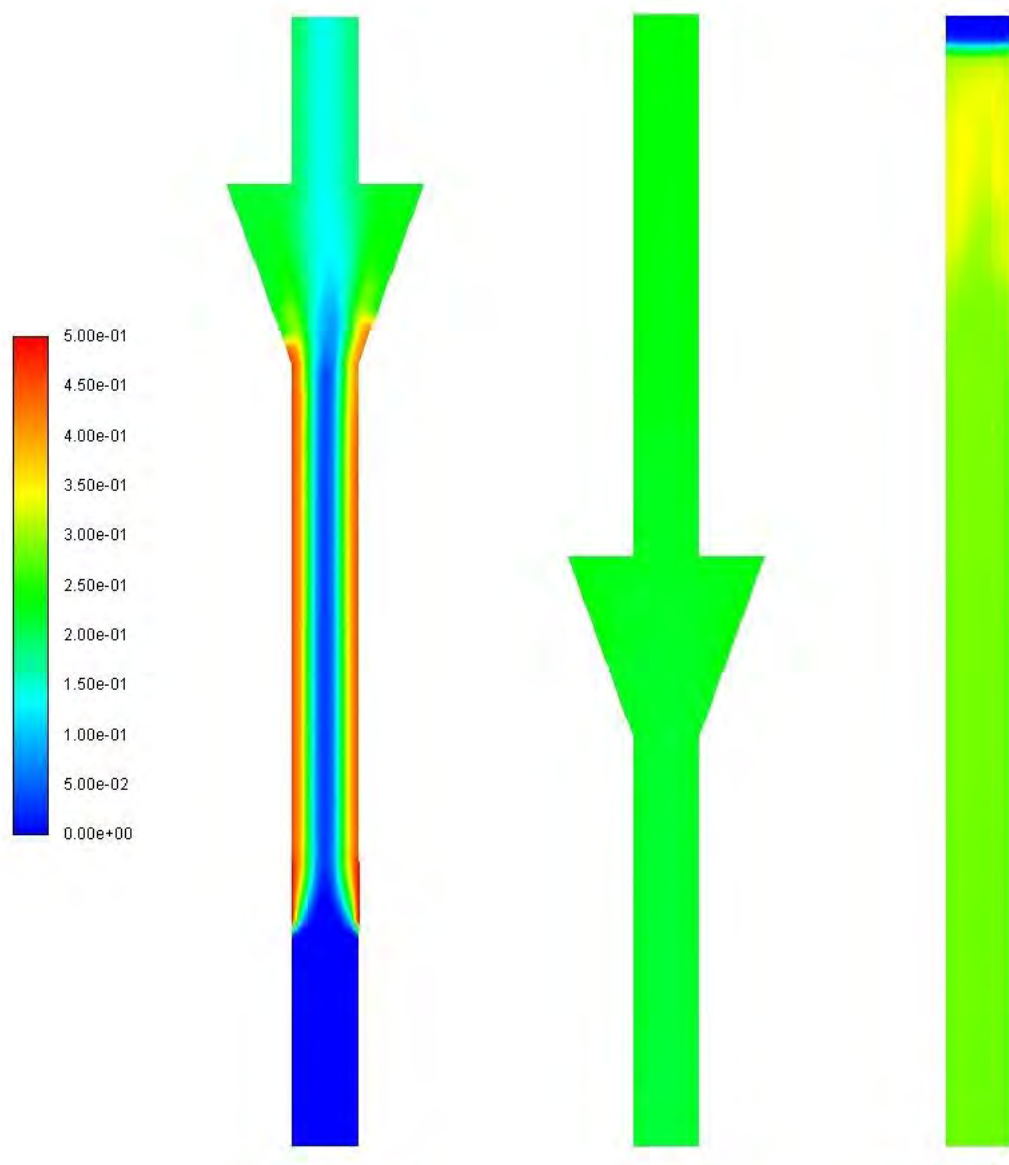
รูปที่ 37 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้น
ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 60 วินาที



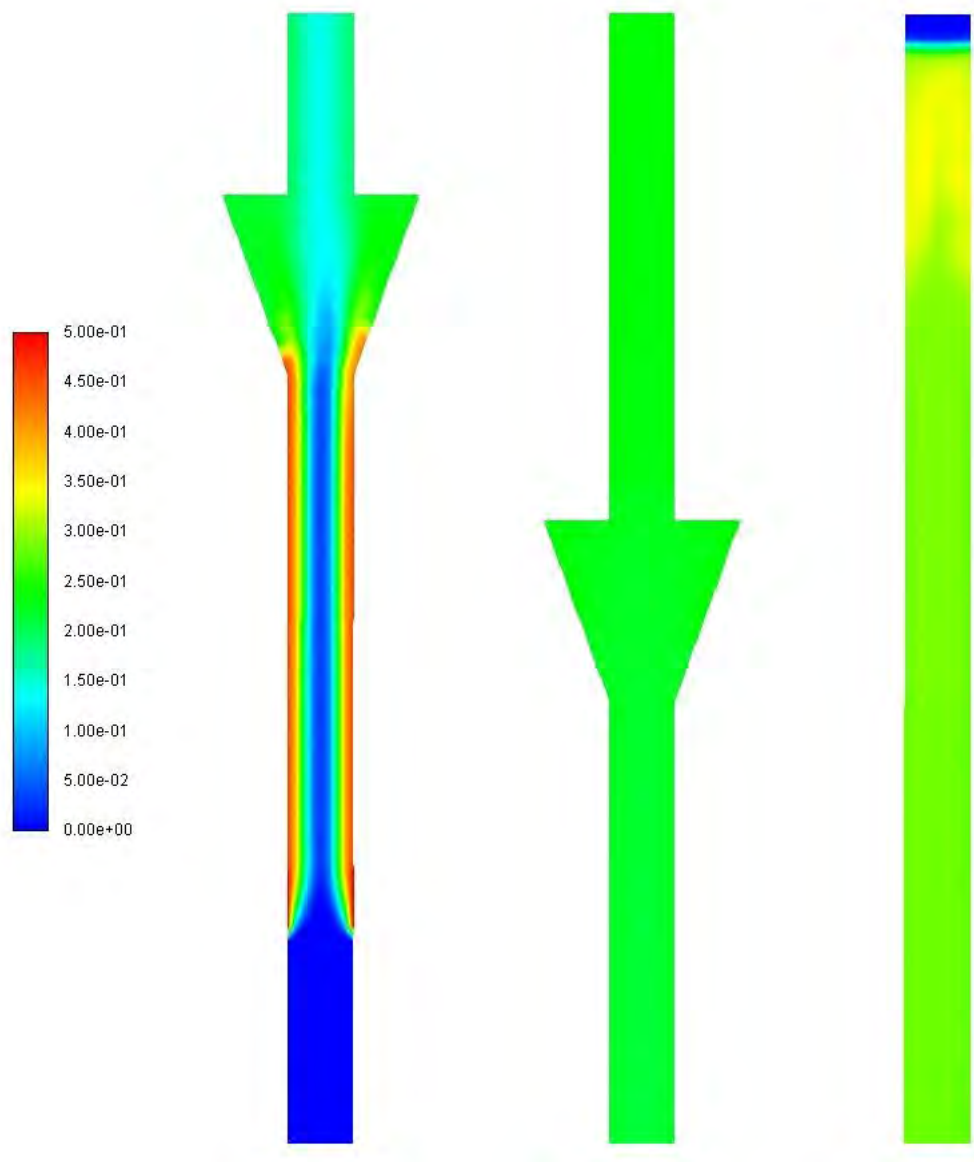
รูปที่ 38 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้น
ของกรณีศึกษาที่ 20 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 80 วินาที



รูปที่ 39 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบชั้น
ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 40 วินาที



รูปที่ 40 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบชั้น
ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 60 วินาที



รูปที่ 41 คอนทาร์แสดงสัดส่วนปริมาตรตัวดูดซับของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบชั้น
ของกรณีศึกษาที่ 32 ที่ความสูง (ก) 2 เมตร (ข) 9 เมตร (ค) 16 เมตร ที่เวลา 80 วินาที

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยของการศึกษาร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบขึ้นด้วยการจำลองกระบวนการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ การหาแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัย ผลของตัวแปรดำเนินการต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด และผลของตัวแปรออกแบบต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบขึ้น

5.1.1 การหาแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมที่ใช้ในงานวิจัย

1. การจำลองการไหลในการวิจัยใช้ค่าเฉลี่ยที่เวลา 40-80 วินาที เนื่องจากเป็นเวลาที่ระบบเข้าสู่สถานะเสมือนคงตัว (Quasi steady state)
2. พื้นที่เซลล์การคำนวณที่เหมาะสมที่ใช้ในการวิจัย คือ 12000 เซลล์การคำนวณ
3. ได้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบขึ้นที่สอดคล้องกับผลการทดลองโดยใช้อัตราการหมุนเวียนของแข็งเท่ากับ 670.6 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ค่าสัมประสิทธิ์ Specularity เท่ากับ 0.005 สัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็งเท่ากับ 0.57 และความเร็วแก๊สเข้าเท่ากับ 8.6 เมตรต่อวินาที
4. ได้แบบจำลองจลนศาสตร์ที่สอดคล้องกับผลการทดลองของ Nouri และคณะ (Nouri, 2018) โดยใช้เซลล์การคำนวณ 12500 เซลล์

5.1.2 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด

1. ค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงที่สุด คือ กรณีศึกษาที่ 6 ซึ่งมีอุณหภูมิของของไหลคือ 50 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาคของแข็งคือ 150 ไมโครเมตร อัตราเร็วของของไหลคือ 6 เมตรต่อวินาที และอัตราการหมุนเวียนของแข็ง 800 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที
2. ค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำที่สุด คือ กรณีศึกษาที่ 15 ซึ่งมีอุณหภูมิของของไหลคือ 70 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาคของแข็งคือ 150 ไมโครเมตร

อัตราเร็วของของไหลคือ 10 เมตรต่อวินาที และอัตราการหมุนเวียนของแข็ง 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

3. ค่าร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ในกรณีศึกษาที่ 1 2 5 6 9 10 13 และ 14 มีร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าผลการทดลองของ Zhang และคณะ (Zhang, 2015)
4. อุณหภูมิของของไหล ความเร็วของของไหล อัตราหมุนเวียนของแข็ง ส่งผลต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหล หรืออุณหภูมิของของไหลจะส่งผลให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มอัตราหมุนเวียนของแข็งจะส่งผลให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น
5. ขนาดของอนุภาคของแข็งไม่มีผลต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณความเข้มข้นของไอน้ำเป็นหลัก

5.1.3 ผลของตัวแปรออกแบบต่อร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบขึ้น

1. ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงที่สุด คือ กรณีศึกษาที่ 32 ซึ่งมี มุมกรวยคือ 80 องศา ความกว้างชั้นคือ 0.10 เมตร ความสม่ำเสมอระหว่างชั้นคือ 4 ชั้น และ ระยะห่างระหว่างชั้นคือ 1.7 เมตร
2. ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำที่สุด คือ กรณีศึกษาที่ 20 ซึ่งมี มุมกรวยคือ 60 องศา ความกว้างชั้นคือ 0.05 เมตร ความสม่ำเสมอระหว่างชั้นคือ 4 ชั้น และ ระยะห่างระหว่างชั้นคือ 1.7 เมตร
3. ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้นในทุกกรณีศึกษาสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบขึ้น เทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบปกติ
4. มุมกรวย ความกว้างชั้น และความสม่ำเสมอระหว่างชั้น ส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ คือ เมื่อมุมกรวย ความกว้างชั้น และความสม่ำเสมอระหว่างชั้นมีค่าสูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น
5. ระยะห่างระหว่างชั้น ส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบขึ้น คือ เมื่อระยะห่างระหว่างชั้นสูงขึ้นส่งผลให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำลง
6. เมื่อความสม่ำเสมอระหว่างชั้นมีค่าสูง (+) การเพิ่มมุมกรวยจะทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงขึ้น

7. ไม่ว่าความสม่ำเสมอระหว่างชั้นจะเป็นค่าสูง (+) หรือค่าต่ำ (-) การเพิ่มความกว้างชั้นจะทำให้ร้อยละการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองพลศาสตร์ในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบสองมิติ ซึ่งหากต้องการศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลที่ละเอียดกว่านี้ต้องการจำลองแบบสามมิติ แบบจำลองอีเอ็มเอ็มเอส (EMMS) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาให้มีความเหมาะสมกับอนุภาคที่มีขนาดจัดอยู่ในกลุ่ม Geldart กลุ่ม B หากต้องการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอนุภาคขนาดอื่น อาจจะทำการพัฒนาแบบจำลองอีเอ็มเอ็มเอส (EMMS) ให้มีความเหมาะสมครอบคลุมกับอนุภาคของแข็งในหลายช่วงขนาด

รายการอ้างอิง

หนังสือ ตารา และเอกสาร (ภาษาอังกฤษ)

M. Nouri, G. Rahpaima, M.M. Nejad, M. Imani (2018). Computational simulation of CO₂ capture process in a fluidized-bed reactor. *Computers and Chemical Engineering* 108, 1–10.

B. Chalermsoonsuwan, P. Piumsomboon and D. Gidaspow (2009). Kinetic theory based computation of PSRIriser: Part I-Estimate of mass transfer coefficient. *Chemical Engineering Science* 64, 1196-1211.

Fluent. (2003). *Fluent 6.2.16 User's Guide [Electronic Documentation]*

D. Gidaspow (1994). *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description*. Boston: Academic Press.

C.W. Jiang, Z.W. Zheng, Y.P. Zhu, Z.H. Luo (2012). Design of a two-stage fluidized bed reactor for preparation of diethyl oxalate from carbon monoxide. *Chemical Engineering Research and Design* 90, 915-925.

K. Mahalik, Y.K. Mohanty, K.C. Biswal, G.K. Roy, J.N. Sahu (2015). Statistical modeling and optimization of a multistage gas-solid fluidized bed for removing pollutants from flue gases. *Particuology* 22, 72-81.

C.R. Mohanty, B.C. Meikap (2009). Pressure drop characteristics of a multi-stage counter-current fluidized bed reactor for control of gaseous pollutants. *Chemical Engineering and Processing* 48, 209-216.

S.V. Patankar (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere.

J. Phupanit (2015). Computational fluid dynamics simulation of hydrodynamics and methanol to olefins reaction in stage fluidized bed reactor. Master's Thesis, Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University.

T. Samruamphianskun (2011). Effect of ring baffles on hydrodynamics and mixing in a riser of circulating fluidized bed reactor using cfd simulation. Master's Thesis, Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University. 91

T. Thummakul, D. Gidaspow, P. Piumsomboon and B. Chalermsoonsuwan (2017). CFD simulation of CO₂ sorption on K₂CO₃ solid sorbent in novel high flux circulating-turbulent

fluidized bed riser: Parametric statistical experimental design study. *Applied Energy*, 190, 122-134.

N. Yang, W. Wang, W. Ge, L. Wang and J. Li (2004). Simulation of Heterogeneous Structure in a Circulating Fluidized-Bed Riser by combining the two-Fluid model with the EMMS Approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43, 5548-5561.

Y. Zhang, Q. Ma, X. Xu, Y. Xiao, F. Lei (2015). Numerical study of gas-solid flow behavior in a two-stage high-density riser using EMMS-based drag model. *Chemical Engineering and Processing* 98, 71-85.

Y.P. Zhu, F.Z. Xiao, Z.H. Luo (2014). A CFD simulation study to evaluate the flow and catalytic hydrogenation of dimethyl oxalate in a packed bed, a two-stage fluidized bed, and a circulating fluidized bed. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering* 9, 280-292.

J. Chang, K. Zhang, Y. Yang, B. Wang, Q. Sun, 2015. Computational investigation of solid sorbent carbon dioxide capture in a fluidized bed reactor. *Powder Technology* 275, 94-104.

หนังสือ ตารา และเอกสาร (ภาษาไทย)

เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ. (2560). ฟลูอิดิเซชัน (FLUIDIZATION). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เว็บไซต์

<http://article.sciencepublishinggroup.com/journal/248/2481051/image005.jpg>, Access online: April 17th, 2019.

Center, C. I. C. (Producer). (2011, 17 Apr 2019). Circulating Fluidized Bed. Retrieved from <http://www.chulapedia.chula.ac.th/index.php/ฟลูอิดิเซชันแบบหมุนเวียน>

<https://th.wikipedia.org/wiki/ปฏิกิริยาเคมี>, Access online: April 17th, 2019.