

การจำลองซีเอฟดีของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง



นายรติกร ศรอำพล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CFD SIMULATION OF FUEL REACTOR IN CHEMICAL LOOPING COMBUSTION

Mr. Ratikorn Sornumpol



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองซีเอฟดีของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง
โดย	นายรติกร ศรอำพล
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

รติกร ศรอำพล : การจำลองซีเอฟดีของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง (CFD SIMULATION OF FUEL REACTOR IN CHEMICAL LOOPING COMBUSTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์วงปฏิริยาเคมีฝั่งเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงขึ้น โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent เพื่อจำลองภาวะการไหลแบบไม่เกิดปฏิริยาเคมี (Cold flow) พบว่าพฤติกรรมอุทกพลศาสตร์จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลการทดลอง ผลการทดลองพบว่าตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกนคือ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า สมบัติทางกายภาพของของแข็ง ขนาดอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ความสูงเบตเริ่มต้น อัตราการไหลระหว่างขนาดอนุภาคและความสูงเบตเริ่มต้น อัตราการไหลระหว่างขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของแข็ง อัตราการไหลระหว่างขนาดอนุภาคและความเร็วแก๊สป้อนเข้า และอัตราการไหลระหว่างความสูงเบตเริ่มต้นและความเร็วแก๊สป้อนเข้า และตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีคือ ขนาดอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ความสูงเบตเริ่มต้น อัตราการไหลระหว่างขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของแข็ง และอัตราการไหลระหว่างความเร็วแก๊สป้อนเข้าและความสูงเบตเริ่มต้น จากนั้นเพิ่มแบบจำลองปฏิริยาเคมีระหว่างโลหะ निकเกิลออกไซด์และแก๊สเชื้อเพลิงโดยใช้แบบจำลองแบบแกนกลางหดตัว (Shrinking core model) เพื่อศึกษาการเดินระบบเมื่อเกิดปฏิริยาเคมี จากการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการเมื่อเกิดปฏิริยาเคมีพบว่า ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง โดยภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงมากที่สุดคือ ขนาดอนุภาค 150 ไมครอน อัตราส่วนความสูงเบตเริ่มต้นต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ 0.75 เท่า อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า 873 K และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

ภาควิชา เคมีเทคนิค

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5572233623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS / OPERATING PARAMETER / CHEMICAL LOOPING COMBUSTION / FUEL REACTOR

RATIKORN SORNUMPOL: CFD SIMULATION OF FUEL REACTOR IN CHEMICAL LOOPING COMBUSTION. ADVISOR: ASSOC. PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D., pp.

In this work, mathematical model of fuel reactor in chemical looping was developed by CFD using ANSYS FLUENT. The cold flow model was simulated for understanding its hydrodynamic behavior. It was found that the results was consistent with the experimental data. The results showed that gas velocity, particle density, particle diameter, initial bed height and the interaction between particle diameter and initial bed height; between particle diameter and particle density; between particle diameter and gas velocity and between initial bed height and gas velocity had affected on standard deviation of solid volume fraction in axial direction. For the radial direction, the results showed that particle diameter, particle density, initial bed height and the interaction between particle diameter and particle density and between initial bed height and gas velocity had affected on standard deviation of solid volume fraction in radial direction. For hot flow model when the chemical reaction took place, shrinking core model was used to express the conversion of nickel oxide with fuel gas. The operating parameter that had affected on syngas conversion was gas velocity. The parameters that affected on optimum condition for obtaining maximum syngas conversion were nickel oxide particle diameter 150 micron, ratio of initial bed height to diameter column 0.75, syngas temperature 873 K and 1.5 times of minimum fluidization velocity.

Department: Chemical Technology

Field of Study: Chemical Technology

Academic Year: 2014

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์การจำลองซีเอฟดีของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิงฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทางผู้จัดทำขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักและ ผศ. ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะ ข้อคิดเห็นในงานวิจัยนี้ตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธारा กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบและให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอบคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนการศึกษาจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจเป็นอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และกักเก็บ (Carbon capture and storage technology)	6
2.2 การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิง (Chemical-looping combustion)	7
2.3 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment).....	8
2.3.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2k.....	8
2.3.2 การออกแบบ 2 ⁴	9
2.3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	11
2.3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย.....	14
2.4 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD).....	16

2.4.1	ขั้นตอนการแก้ปัญหา.....	16
2.4.2	การแบ่งโดเมนของการไหลออกเป็นส่วนย่อยๆ (Discretization).....	18
2.4.3	ปัญหาการแพร่กระจายความร้อน (Heat diffusion).....	21
2.4.4	ปัญหาการพาและการแพร่กระจายความร้อน (Heat convection and heat diffusion).....	22
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1	การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง.....	32
3.1.1	การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model).....	32
3.1.1.1	สมการอนุรักษ์ (Conservation equations).....	33
3.1.1.1.1	สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equations)	33
3.1.1.1.2	สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equations).....	34
3.1.1.1.3	สมการอนุรักษ์พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของแข็ง (Fluctuating kinetic energy conservation equation)..	35
3.1.1.1.4	สมการอนุรักษ์พลังงาน	35
3.1.1.1.5	สมการอนุรักษ์การไหลและสปีชีส์	36
3.1.1.2	สมการเสริม (Constitutive equations).....	36
3.1.2	การทดสอบความเป็นอิสระของจำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณ (Grid independency test)	39
3.2	การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่ส่งผลต่อดัชนีการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟองแก๊ส.....	40
3.3	การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี.....	42

3.3.1 การทดสอบความเป็นอิสระของจำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณ (Grid independency test)	43
3.4 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction model)	43
3.5 ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) ที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง	46
3.5.1 การกำหนดคุณสมบัติของแต่ละวัสดุภาคที่ใช้ในการจำลองภาวะ	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	54
4.1 การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟองแก๊ส	54
4.1.1 ผลการคำนวณเซลล์ที่เหมาะสมกับการคำนวณ (Grid independency test) และหาเวลาที่ภาวะคงตัว (Steady state)	54
4.1.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลอง	56
4.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่ส่งผลต่อดัชนีการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟอง	59
4.3 การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกิริยาเคมี	73
4.3.1 ผลการคำนวณเซลล์ที่เหมาะสมกับการคำนวณ (Grid independency test) และหาเวลาที่ภาวะคงตัว (Steady state)	73
4.3.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลอง	75
4.4 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง	76
4.4.1 การหาเวลาที่ภาวะเสมือนคงตัว (Quasi steady state)	76
4.4.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	90
5.1 สรุปผลการวิจัย	90
5.1.1 การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟองแก๊ส	90

5.1.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) ที่ส่งผลต่อดัชนี การผสมในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบฟองแก๊ส.....	90
5.1.3 การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี	92
5.1.4 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายใน เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
.....	94
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก.....	99
ภาคผนวก ข.....	101
ภาคผนวก ค.....	105
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	112



สารบัญตาราง

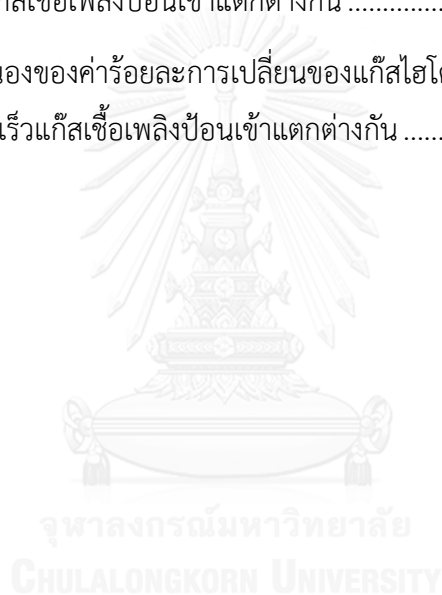
ตารางที่ 2.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^4	9
ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพองแก๊ส.....	41
ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลอง 2^4 ของการศึกษาตัวแปรดำเนินการ กรณีไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ..	42
ตารางที่ 3.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยา และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา	44
ตารางที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาอวอเตอร์แก๊สชิฟต์	46
ตารางที่ 3.5 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้ว่างปฏิกิริยาเคมีในการไหลแบบไม่เกิดปฏิกิริยา (Cold flow)	50
ตารางที่ 3.6 ภาวะขอบที่ใช้ในแบบจำลองอุทกพลศาสตร์เครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้ว่างปฏิกิริยาเคมี.....	52
ตารางที่ 3.7 ภาวะขอบที่ใช้ในแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้ว่างปฏิกิริยาเคมีแบบเกิดปฏิกิริยาเคมี	52
ตารางที่ 3.8 การออกแบบการทดลอง 2^4 ของการศึกษาตัวแปรดำเนินการ กรณีเกิดปฏิกิริยาเคมี.....	53
ตารางที่ 4.1 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล 2^4 ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการและค่าดัชนีการผสมในแนวแกนและแนวรัศมี.....	60
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของของแข็งในแนวแกนเป็นคำตอบสนอง	64
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของของแข็งในแนวรัศมีเป็นคำตอบสนอง	65
ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล 2^4 ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการและค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง	78
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นตัวแปรตอบสนอง.....	81
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวแปรตอบสนอง.....	82

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิง (Chemical looping combustion)	7
รูปที่ 2.2 ปฏิริยาการเผาไหม้ในวงปฏิริยาเคมี (Chemical looping combustion).....	8
รูปที่ 2.3 Box plot , Scatter diagram	14
รูปที่ 2.4 โดเมนของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตแบบหมุนเวียน ฝั่งโรเซอร์	17
รูปที่ 2.5 เงื่อนไขขอบเขตการไหลในท่อ (Flow in pipe)	18
รูปที่ 2.6 การแบ่งปริมาตรออกเป็นเซลล์เล็กๆ ก่อนทำการอินเกรตรอบๆ Control Volume .	19
รูปที่ 2.7 การแบ่งโดเมนของของการแพร่กระจายความร้อนออกเป็นเซลล์	21
รูปที่ 2.8 การทำ Finite volume ของปริมาตรควบคุม ที่มีทั้งการแพร่กระจายความร้อนและการแพร่ความร้อน (Heat convection and heat diffusion)	23
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตแบบพอง ในงานวิจัย ของ Jung และคณะ (2012).....	31
รูปที่ 3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี ในงานวิจัยของ Johansson และคณะ (2003) (ก) แบบจำลอง 2 มิติ (ข) ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ	32
รูปที่ 3.3 แสดงการแบ่งเซลล์จำนวน (ก) 1,900 (ข) 7,500 (ค) 30,000 เซลล์.....	39
รูปที่ 3.4 แสดงการแบ่งเซลล์จำนวน (ก) 8,334 (ข) 17,732 (ค) 35,979 เซลล์.....	43
รูปที่ 3.5 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเริ่มต้น ในเครื่องเผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี.....	49
รูปที่ 4.1 ค่าสัดส่วนของของแข็ง ในแนวรัศมีเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตแบบพองแก๊ส ที่ความสูง 0.14 เมตร ที่จำนวนเซลล์ต่างๆ.....	55
รูปที่ 4.2 ค่าความดันลดคร่อมเบต ที่ระยะเวลา 0-25 วินาที.....	56
รูปที่ 4.3 ความเร็วของของแข็งแนวแกน ตามแนวรัศมี ที่ความสูง 0.14 เมตร	57
รูปที่ 4.4 อุณหภูมิแกรนูลาร์ ตามแนวรัศมี ที่ความสูง 0.14 เมตร	57
รูปที่ 4.5 ความเร็วของของแข็งในแนวแกนที่ความสูง 0.14 เมตร ที่เวลาช่วง 20-28 วินาที....	58
รูปที่ 4.6 ความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูง 0.14 เมตร ที่เวลาช่วง 20-27 วินาที.....	58

รูปที่ 4.7 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคของแข็งที่ เวลา 20 วินาที.....	62
รูปที่ 4.8 ผลของตัวแปรหลักและผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยา ระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความสูงเบตเริ่มต้น (B) (ค) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความหนาแน่นของแข็ง (C) (ง) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D) (จ) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ความ สูงเบตเริ่มต้น (B) และความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D).....	66
รูปที่ 4.9 ผลของตัวแปรหลักและผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยา ระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความหนาแน่นของแข็ง (C) (ค) ผลของอันตรกิริยา ระหว่าง ความสูงของเบตเริ่มต้น (B) และความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D).....	68
รูปที่ 4.10 (ก) พื้นที่ผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนของสัดส่วนโดยปริมาตร ของของแข็ง เมื่อขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของแข็งแตกต่างกัน (ข) พื้นที่ผิวตอบสนองของ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง เมื่อความสูงเบตเริ่มต้น และขนาดอนุภาคของแข็งแตกต่างกัน (ค) พื้นที่ผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานใน แนวแกนของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง เมื่อขนาดอนุภาคของแข็งและความเร็วแก๊สป้อนเข้า แตกต่างกัน.....	72
รูปที่ 4.11 (ก) พื้นที่ผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวรัศมีของสัดส่วนโดยปริมาตร ของของแข็ง เมื่อขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของแข็งแตกต่างกัน (ข) พื้นที่ผิวตอบสนองของ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวรัศมีของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง เมื่อความสูงเบตเริ่มต้น และความเร็วแก๊สป้อนเข้าแตกต่างกัน.....	73
รูปที่ 4.12 ค่าความดันสมบูรณ์ ของ เครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกริยาเคมี ฝั่งเครื่องปฏิกรณ์ อากาศ ตลอดแนวความสูงเครื่อง ที่จำนวนเซลล์ต่างๆ.....	74
รูปที่ 4.13 ค่าความดันสมบูรณ์ฝั่งเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ที่ระยะเวลา 0-25 วินาที.....	74
รูปที่ 4.14 ค่าความดันตลอดแนวความสูงเครื่องอากาศ.....	75
รูปที่ 4.15 ค่าความดันตลอดแนวความสูงเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง.....	76
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิของแก๊สที่ทางออกเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ที่กรณีต่างๆ ช่วงเวลา 0 – 40 วินาที.....	77

- รูปที่ 4.17 คอนทัวร์โมลฟลักซ์คาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ 25 วินาที (ก) กรณี 13 (ข) กรณี 2... 79
- รูปที่ 4.18 (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของโลหะ निकเกิดออกไซด์ และ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า (ค) ผลของอันตรกิริยาระหว่างความสูงเบดเริ่มต้น และ อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า 83
- รูปที่ 4.19 (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของโลหะ निकเกิดออกไซด์ และ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า..... 85
- รูปที่ 4.20 พื้นผิวตอบสนองของค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ก) เมื่อขนาดอนุภาคของ निकเกิดออกไซด์และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าแตกต่างกัน (ข) เมื่อความสูงเบดเริ่มต้นและอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าแตกต่างกัน 88
- รูปที่ 4.21 พื้นผิวตอบสนองของค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจน เมื่อขนาดอนุภาคของ निकเกิดออกไซด์และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าแตกต่างกัน 89



บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศของโลกได้ก่อให้เกิดปัญหาปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นี้ส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมในชีวิตประจำวันของมนุษย์ทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม และการเผาไหม้ของรถยนต์ ซึ่งล้วนเป็นสาเหตุหลักในการทำให้อุณหภูมิบนพื้นผิวโลกสูงขึ้น ทั้งยังทำให้เกิดปัญหาอื่นๆ ตามมาอีกมากมาย ประชาคมโลก นักวิชาการ และนักวิทยาศาสตร์ได้รณรงค์ลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก ลดการใช้พลังงานฟอสซิลหันมาใช้พลังงานหมุนเวียน ร่างกฎหมายควบคุมปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจก และนำเทคโนโลยีการดักจับหรือแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น การดูดซับด้วยสารละลายเอมีน การดูดซับด้วยสารที่มีความพรุนสูง อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีเหล่านี้มีข้อจำกัด เรื่อง ต้นทุนค่าใช้จ่ายสูง เทคโนโลยีดักจับที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ที่กำลังได้รับความสนใจอยู่ คือ การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง ซึ่งมีประสิทธิภาพการเผาไหม้สูง ไม่มีค่าใช้จ่ายในการแยก และยังได้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง และมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [1]

ความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาการเผาไหม้โดยทั่วไปและการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง การเผาไหม้ทั่วไปจะเป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงตั้งต้น ซึ่งในที่นี้คือ เชื้อเพลิงกับแก๊สออกซิเจน จากอากาศ ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีการคายความร้อน หรือพลังงานออกมาจากกระบวนการ การเผาไหม้ในกระบวนการเคมีคอลลูบิงขั้นตอนแรก เชื้อเพลิงจะเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้กับออกซิเจนที่ได้มาจากโลหะออกไซด์ ในกระบวนการ ที่เป็นสารประกอบของโลหะที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เมื่อผ่านการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว วัสดุของแข็งจะเปลี่ยนรูปกลายเป็นโลหะบริสุทธิ์ หรือออกไซด์ของโลหะที่มีปริมาณของออกซิเจนลดลง โดยแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีจะยังคงเป็นไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเดิม ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะเกิดการควบแน่นภายในอุปกรณ์คอนเดนเซอร์ที่ติดตั้งไว้ และแยกตัวออกจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูง และพร้อมจะส่งต่อไปเก็บหรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นสารเคมีตัวอื่นต่อไป ข้อดีของกระบวนการนี้ที่ดีกว่ากระบวนการอื่นที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน คือ เป็นการหลีกเลี่ยงการสัมผัสกันโดยตรงของเชื้อเพลิงกับอากาศที่จะส่งผลให้ประสิทธิภาพทางความร้อนที่ได้ลดลง และเป็นการเผาไหม้ที่มีการแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกโดยกลไกภายในกระบวนการเอง ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการแยกแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้ โลหะบริสุทธิ์หรือออกไซด์ของโลหะที่มีปริมาณออกซิเจนลดลงถูกนำเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อากาศ เพื่อทำ

ปฏิกิริยากับออกซิเจนใหม่อีกครั้งและจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นออกไซด์ของโลหะเดิมที่พร้อมจะนำไปป้อนกลับเข้าสู่กระบวนการเป็นวัฏจักร

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นการใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยทำการวิเคราะห์ปัญหาพลศาสตร์ของไหล โดยกำหนดรูปทรงทางเรขาคณิตของปัญหาที่ทำการศึกษา และแบ่งปริมาตรนั้นออกเป็นปริมาตรย่อย แล้วใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้น ด้วยภาษาคอมพิวเตอร์แก้สมการแบบจำลองทางกายภาพ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล สมการความต่อเนื่องและสมการพลังงาน กำหนดเงื่อนไขขอบเขต เมื่อคำนวณแบบจำลองด้วย วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่เลือกไว้ด้วยการทำซ้ำ โปรแกรมจะทำการแก้สมการด้วยระเบียบวิธี Finite volume method จนกระทั่งคำตอบเข้าสู่ และได้มาซึ่งคำตอบที่ถูกต้อง ข้อดีของการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยคำนวณทำให้มีความสะดวกรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ ในการปรับปรุงออกแบบอุปกรณ์ทางวิศวกรรม การผสมในเครื่องปฏิกรณ์เคมี การถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และ วิเคราะห์ประสิทธิภาพของเครื่องได้ โดยที่ไม่ต้องลงทุนสร้างอุปกรณ์จริงๆทำให้ไม่มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้น [2]

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเคมีคอลลูบิงในระบบ 2 มิติและ 3 มิติ ที่ผ่านมายังไม่มีงานที่ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ และผลของตัวแปรดำเนินการ ได้แก่ ขนาดอนุภาค ความสูงเบดเริ่มต้น ความหนาแน่นของของแข็ง และ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า ตัวแปรเหล่านี้จะส่งผลต่อการผสมของของแข็งและแก๊ส และ หากภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง ร่วมกับวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ผลที่ได้จะนำไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในเคมีคอลลูบิงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) หาแบบจำลองภาวะอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงของกระบวนการเคมีคอลลูบิงในระบบสองมิติด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANSYS@FLUENT® และนำผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่ได้จากงานวิจัยของ Jung และคณะ และของ Johansson และคณะ
- 2) วิเคราะห์ผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์และการเกิดปฏิกิริยาภายในเคมีคอลลูบิง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) จำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงของกระบวนการเคมีคอลลูบึงเพื่อหาแบบจำลองที่ใช้ทำนายผลที่ได้จากการทดลองจริง
- 2) นำแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ในข้อแรกมาทำการศึกษาค่าของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) เพื่อทำนายพฤติกรรมของไหลที่ให้ผลการผสมที่ดีที่สุด
- 3) จำลองปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในวงปฏิริยาเคมีและศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ เพื่อหาภาวะที่ให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

- 1) แบบจำลองการไหลที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นแบบ 2 มิติ
- 2) งานวิจัยส่วนแรกเป็นการจำลองส่วนเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในระบบแบบกะ ในสถานะที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมี (cold flow)
- 3) งานวิจัยส่วนที่สองเป็นการจำลองทั้งระบบของกระบวนการเคมีคอลลูบึงในสถานะที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในระบบ (hot flow)
- 4) อนุภาคของแข็งในการจำลองมีขนาดและสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกันทั้งหมด

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ อุทกพลศาสตร์ การจำลองในระบบสองมิติ ตัวแปรดำเนินการ การไหลแบบหลายวัฏภาค

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้แบบจำลองกระบวนการที่สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ และ ทำนายปฏิกิริยาในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบึง ในระบบสองมิติ

ทราบถึงผลกระทบของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ และหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินการ

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้
 - การทดลองและการจำลองพฤติกรรมอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟองแก๊ส
 - การศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง
 - การออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ผลของตัวแปรต่างๆ ในเคมีคอลลูบิง
 - การทดลองและการจำลองปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟองแก๊ส
- 2) จำลองภาวะเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟองแก๊สด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสองมิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT เครื่องปฏิกรณ์ระบบ 2 มิติ มีขนาดสูง 0.4 เมตร กว้าง 0.155 เมตร และอนุภาคของแข็งที่ใช้มีขนาด 530 ไมโครเมตร ความหนาแน่นของแข็ง 2,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นอากาศ 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความสูงเบดเริ่มต้น 0.2 เมตร ความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.587 เมตรต่อวินาที ค่าสัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาค-อนุภาค 0.99 specularity coefficient 0.6 ตั้งค่าแบบจำลองแรงต้านของ Gidaspow และเลือก QUICK numerical scheme ตามงานวิจัยของ Loha และคณะ [3] สำหรับผลการทดลองที่จะนำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ ผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Jung และคณะ [4] โดยค่าผลการทดลองที่นำมาเปรียบเทียบได้แก่
 - ความเร็วของของแข็งในแนวแกน Y ในแนวรัศมี (Axial solid velocity in radial direction)
 - สัดส่วนปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี (Solid volume fraction in radial direction)
 - อุณหภูมิแกรนูลาร์ในแนวรัศมี (Granular temperature in radial direction)
 ในการจำลองจะทำการปรับขนาดกริดที่เหมาะสมกับการคำนวณที่สุด(Grid independency)
- 3) ออกแบบและวางแผนการทดลอง (Design of experiment) ทำการจำลองกระบวนการตามการทดลองที่ออกแบบไว้และวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance)
- 4) ออกแบบและวางแผนการทดลอง (Design of experiment) เลือกตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel conversion) ทำการจำลองกระบวนการตามการทดลองที่ออกแบบไว้และวิเคราะห์ผลกระทบของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่ออัตราการปฏิกิริยาเคมีในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance)

5) วิเคราะห์ผล สรุปผล เขียนรายงาน และวิทยานิพนธ์

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

- บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ข้อจำกัดของการวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย
- บทที่ 2 การดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และกักเก็บ การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบปิง การออกแบบการทดลอง(Design of experiment) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 ข้อมูลเบื้องต้นในการวิจัย การจำลองอุทกพลศาสตร์ในงานวิจัย การจำลองปฏิกิริยาเคมีในงานวิจัย ขั้นตอนการวิจัย
- บทที่ 4 ผลการหาแบบจำลองอุทกพลศาสตร์ที่เหมาะสม ผลของตัวแปรดำเนินการภายในเครื่องปฏิกิริยาเชื้อเพลิง ผลของตัวแปรดำเนินการต่อปฏิกิริยาเคมี
- บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

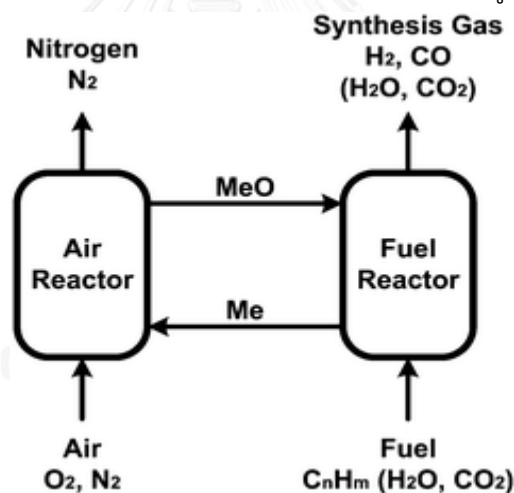
ปัจจุบันปัญหาสภาวะโลกร้อน (Global warming) ส่งผลกระทบต่อมนุษยชาติอย่างมาก สาเหตุเกิดจาก การเพิ่มขึ้นของปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ การขนส่ง และการผลิตจากภาคอุตสาหกรรม ซึ่งในปัจจุบัน เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานหลักของโลกอุตสาหกรรม โดยเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานที่ไม่สามารถ นำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Non-renewable energy) เราสามารถลดการปลดปล่อยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์เพื่อแก้ปัญหาภาวะโลกร้อน โดยรณรงค์ให้แต่ละประเทศนั้นหันมาใช้พลังงาน หมุนเวียน (Renewable energy) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและไม่มีวันหมดไป เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ เป็นต้น พลังงานหมุนเวียนเหล่านี้มีข้อดี คือ จะไม่ส่งผล กระทบต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ แต่ยังมีข้อเสีย คือ ไม่สามารถผลิตพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง และต้องใช้พื้นที่มากในการติดตั้ง แต่ในปัจจุบัน นักวิทยาศาสตร์ได้คิดค้นเทคโนโลยีที่จะสามารถลดการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยใช้ เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ [5]

2.1 เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และกักเก็บ (Carbon capture and storage technology)

เทคโนโลยีการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นเทคนิคที่สามารถดักจับการปลดปล่อย ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากเชื้อเพลิงฟอสซิลไว้ได้สูงถึง 90% ซึ่งการใช้พลังงานฟอสซิล เหล่านี้ส่วนใหญ่จะมาจากการผลิตกระแสไฟฟ้า และในอุตสาหกรรม เทคโนโลยีนี้ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน 1. การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้การดูดซับด้วยของแข็งและดูดซึมด้วยสารละลาย การแยกโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน เป็นต้น 2. การกักเก็บแก๊ส และขนส่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 3. การนำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลงไปเก็บไว้ในหลุมแก๊สธรรมชาติและน้ำมัน ซึ่งขั้นตอนแรก แก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกดักจับไว้จะถูกขนส่งผ่านท่อส่งแก๊สหรือ เรือขนส่ง แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หลายล้านตันจะถูกลำเลียงลงไปได้พื้นผิวโลกเพื่อป้องกันการปลดปล่อยสู่บรรยากาศโดยตรง นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังสามารถนำไปใช้เป็นก๊าซอัดเพื่อเพิ่มความดันในหลุมน้ำมัน (Oil and gas reservoir) เมื่อความดันในหลุมแก๊สธรรมชาติสูงขึ้น เครื่องสูบจะดึงเอาน้ำมันขึ้นมาได้มาก ขึ้น ซึ่งเป็นอีกเทคนิคหนึ่งในการเพิ่มกำลังการผลิตน้ำมันดิบในหลุมน้ำมันดิบ (Enhanced oil recovery) ได้อีกด้วย [6]

2.2 การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิง (Chemical-looping combustion)

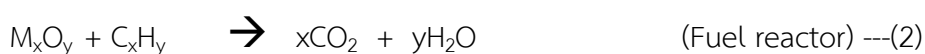
เป็นเทคนิคหนึ่งของการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ของแข็งทำปฏิกิริยาเพื่อดักจับแก๊สที่ทำปฏิกิริยากับของแข็ง เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Separation with sorbents/solvents) โดยหลักการของกระบวนการเทคโนโลยีวงปฏิกิริยาเคมี คือ การไม่ให้เกิดการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel gas) กับ แก๊สออกซิเจน (Oxygen) ซึ่งเป็นสารออกซิไดซ์ (Oxidized agent) โดยตรงซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดลง เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนในอากาศจะเกิดปฏิกิริยากับแก๊สเชื้อเพลิง หัวใจของกระบวนการนี้มีกุญแจสำคัญ คือ โลหะออกไซด์ (Metal oxide, M_xO_y) หรือโลหะออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์หรือโลหะออกไซด์ที่อะตอมของออกซิเจนลดลง (M_xO_{y-1}) โดยความจุแก๊สออกซิเจนของโลหะออกไซด์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุโลหะบริสุทธิ์ (M) การเกิดปฏิกิริยาเคมี จะเกิดขึ้นสองขั้นตอนต่อเนื่องกัน ในเครื่องปฏิกรณ์สองเครื่อง โดยมีโลหะออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนเป็นตัวหมุนเวียนออกซิเจนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองเครื่อง คือ ออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) และรีดิวเซอร์ (Reducer) หรือ เครื่องปฏิกรณ์อากาศและเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (Air reactor and fuel reactor) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การเผาไหม้แบบเคมีคอลลูปปิง (Chemical looping combustion) [7]

ซึ่งขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้ โลหะธาตุบริสุทธิ์ หรือโลหะออกไซด์ที่ถูกรีดิวซ์ จะส่งเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์อากาศ เพื่อทำปฏิกิริยากับอากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยออกซิเจนและไนโตรเจน โดยธาตุโลหะ หรือโลหะที่ถูกรีดิวซ์ จะทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์กับออกซิเจน ได้เป็นโลหะออกไซด์ (M_xO_y) โดยปฏิกิริยานี้จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) จะเกิดที่อุณหภูมิสูง ส่วนแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนที่เหลือจะถูกแยกโดยไซโคลน ออกจากโลหะออกไซด์ที่จะส่งต่อไปยังเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงเพื่อทำปฏิกิริยากับแก๊สเชื้อเพลิง โลหะออกไซด์จะถูกรีดิวซ์กลับไปเป็นธาตุ

โลหะบริสุทธิ์(M) หรือโลหะออกไซด์ที่ถูกรีดิวส์ (M_xO_{y-1}) ปฏิกิริยาที่เครื่องฝั่งนี้จะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) หรือ คายความร้อน (Exothermic reaction) ก็ได้ขึ้นกับชนิดของโลหะออกไซด์นั้น และได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็น ไอ้ น้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะสามารถแยกผลิตภัณฑ์ผสมนี้ได้ง่ายโดยผ่านการควบแน่น เพื่อดึงเอาน้ำออก ท้ายที่สุดก็จะได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ปฏิกิริยาในวงปฏิกิริยาเคมีทั้งสองเครื่อง [5, 6] แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาการเผาไหม้ในวงปฏิกิริยาเคมี (Chemical looping combustion)

2.3 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

การทดลองที่มีประสิทธิภาพ ควรเป็นการทดลองที่จะได้มาซึ่งข้อมูลที่มีความถูกต้อง และการลงทุนเพื่อทำการทดลองหนึ่งเพื่อทดสอบสมมุติฐานอะไรอย่างใดอย่างหนึ่งหรือ การศึกษาอิทธิพลของสิ่งทดลองที่มีต่อตัวแปรสังเกต นั้นควรจะมีต้นทุนต่ำ การทดลอง (Experiment) เป็นเครื่องบ่งชี้ถึงข้อมูลอย่างมีเหตุผลและช่วยตัดสินใจว่าจะทำการทดลองที่จะศึกษาปัจจัยที่ต้องการศึกษาต่อไปหรือไม่ การออกแบบการทดลองเป็นการวางแผนเพื่อศึกษาผลกระทบของสิ่งทดลองว่าจะส่งผลต่อกระบวนการอย่างไร หรือตัวแปรตอบสนองที่สนใจ ในการทดลองหนึ่งนั้นจะประกอบไปด้วย สิ่งทดลอง (Treatment) คือ สิ่งที่น่าสนใจจะศึกษาอิทธิพลที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง สิ่งทดลองร่วม (Treatment combination) ปัจจัย (Factor) เป็นลักษณะของสิ่งทดลอง ตัวแปรตอบสนอง หรือ ตัวแปรที่ถูกสังเกต (Response variable) และ ตัวแปรรบกวน (Noise variable) เป็นตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแต่ไม่ใช่ตัวแปรที่เราสนใจจะศึกษา ซึ่งส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อม [8]

2.3.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2k

การออกแบบการทดลอง Factorial design เป็นการวางแผนออกแบบการทดลองที่จะใช้ศึกษาผลกระทบต่างๆของปัจจัยที่จะศึกษาในกรณีที่มีปัจจัยสองปัจจัยหรือมากกว่า ซึ่งส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยการออกแบบการทดลองนั้นจะมีจำนวนปัจจัย k ปัจจัย และแต่ละปัจจัยมีระดับ 2 ระดับ ซึ่งเราจะกำหนดระดับของปัจจัยสูงต่ำเหล่านี้ด้วยสัญลักษณ์ เช่นสัญลักษณ์ระดับต่ำ แทนด้วย

(-) ระดับสูงแทนด้วย (+) และ จำนวนของสิ่งทดลองร่วม จะคำนวณได้เท่ากับ $2k$ สิ่งทดลองร่วมของ ปัจจัยต่างๆ (Treatment combination)

2.3.2 การออกแบบ 2^4

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^4 นี้ คือการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 4 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ได้จำนวนสิ่งทดลอง และสิ่งทดลองร่วม มีระดับสูง ระดับต่ำ รวมทั้งหมด 16 การทดลอง ดัง ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^4

Run	A	B	C	D	Combination
1	-	-	-	-	1
2	+	-	-	-	A
3	-	+	-	-	B
4	+	+	-	-	ab
5	-	-	+	-	C
6	+	-	+	-	ac
7	-	+	+	-	bc
8	+	+	+	-	abc
9	-	-	-	+	D
10	+	-	-	+	ad
11	-	+	-	+	bd
12	-	-	+	+	cd
13	+	+	-	+	abd
14	+	-	+	+	acd
15	-	+	+	+	bcd
16	+	+	+	+	abcd

ในการพิจารณาการประมาณค่าผลกระทบจากปัจจัยจะสามารถคำนวณได้จากค่าคอนทราสต์ (Contrast) ของการทดลองร่วมปัจจัยนั่นเอง สำหรับนิยาม ของ ค่าคอนทราสต์ คือความแตกต่างระหว่างผลรวมของค่าตอบสนองของค่าสูง (+) และ ค่าตอบสนองของค่าต่ำ (-) นั่นเอง แสดงดังสมการ

$$\text{Contrast} = \text{ผลรวมค่าตอบสนองของค่าสูง (+1)} - \text{ผลรวมค่าตอบสนองของค่าต่ำ (-1)} \quad (2.1)$$

ค่าคอนทราสต์ของตัวแปรหลัก (Main factor) เช่นตัวแปร A

แสดงดังตัวอย่างการประมาณผลของตัวแปรหลัก

$$A = \frac{1}{8n} [a - 1 - b + ab - c + ac - bc + abc - d + ad - bd - cd + abd + acd - bcd + abcd]$$

ตัวอย่างของการประมาณผลอันตักิริยาสองตัวแปร AB

$$AB = \frac{1}{8n} [1 - a - b + ab + c - ac - bc + abc + d - ad - bd + cd + abd - acd - bcd + abcd]$$

ตัวอย่างของการประมาณผลอันตักิริยาสามตัวแปร ABC

$$ABC = \frac{1}{8n} [a - 1 + b - ab + c - ac - bc + abc - d - ad + bd + cd + abd - acd - bcd + abcd]$$

ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการทั่วไปได้ว่า

$$AB\dots K = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB\dots K}) \quad (2.2)$$

หลังจากนั้นจะคำนวณทำการหาค่าผลรวมของกำลังสอง (Sum square ; SS) สำหรับผลแต่ละตัวคือ

$$SS_{AB\dots K} = \frac{1}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB\dots K})^2 \quad (2.3)$$

สุดท้ายก็นำค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดไปทำการใส่ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) หาค่า F_0 หรือค่า p-Value วิเคราะห์ผลว่าตัวแปรตัวใดที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสร้างกราฟ ค่า Residual และ ค่าที่สังเกตได้ ซึ่งค่า Residual ที่ได้ควรมีการกระจายตัวแบบสุ่ม แสดงถึงความสม่ำเสมอของข้อมูล

2.3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นวิธีหนึ่งที่ทดสอบสมมติฐานเพื่อใช้วิเคราะห์ความแตกต่างของสิ่งทดลองสองกลุ่มขึ้นไป โดยวิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวน จึงเรียกว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ผลการทดลองที่ได้ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน มาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ ซึ่ง ก็คือ ผลรวมของค่าความแปรปรวนทุกอิทธิพลมารวมกัน

ตัวอย่าง ผลรวมของค่าความแปรปรวนของอิทธิพลหลัก (Sum of square of treatment) สามารถ เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่าย คือ

$$SS_{Treatment} = \frac{1}{bcdn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{abcdn} \quad (2.4)$$

ส่วนประกอบย่อยๆ ของ การวิเคราะห์ความแปรปรวน ประกอบไปด้วย ผลรวมค่าความแปรปรวนของอิทธิพล A (SS_A) ผลรวมค่าความแปรปรวนของอิทธิพล B (SS_B) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพล C (SS_C) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพล D (SS_D) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง A และ B (SS_{AB}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง A และ C (SS_{AC}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย B และ C (SS_{BC}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง B และ D (SS_{BD}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง A และ D (SS_{AD}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง B และ D (SS_{BD}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง C และ D (SS_{CD}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง A B และ C (SS_{ABC}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง A C และ D (SS_{ACD}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง B C และ D (SS_{BCD}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง A B และ D (SS_{ABD}) ผลรวมความแปรปรวนของอิทธิพลร่วมระหว่าง A และ B C และ D (SS_{ABCD})

ผลรวมความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อน (SS_E) และเมื่อนำผลรวมของความแปรปรวนของอิทธิพลย่อยเหล่านี้มารวมกัน สุดท้ายจะได้ว่า Total Corrected Sum of Square

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.5)$$

ค่านี้จะใช้สำหรับวัดความแปรผันทั้งหมดของข้อมูล และหาร SS_T ด้วย $N-1$ หรือ ระดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) โดย N คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด สุดท้ายจะได้ ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของอิทธิพลทั้งหมด (Mean square error of total of sum square)

$$MS_T = \frac{SS_T}{N-1} \quad (2.6)$$

โดยความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล ซึ่งวัดจาก Total Corrected Sum of Square จะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละปัจจัยกับค่าเฉลี่ยรวม รวมกับ ผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน ผลรวมกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Sum of square error) นั้นหาได้จากการนำ Total Corrected Sum of Square หักลบออกด้วยผลรวมค่าความแปรปรวนของอิทธิพลย่อยและอิทธิพลร่วมทุกตัว

$$SS_T = SS_{Treatment} + SS_E \quad (2.7)$$

$$SS_E = SS_{Treatment} - SS_T$$

ซึ่ง $SS_{Treatment}$ เรียกว่า ผลรวมกำลังสองที่เกิดเนื่องจากอิทธิพลแต่ละตัวนั่นเอง ซึ่งหาได้จากสมการ 2.4 ที่เคยกล่าวไว้ โดยผลรวมกำลังสองที่เกิดจากอิทธิพลแต่ละตัวจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ ระดับของค่าเฉลี่ย $a - 1$ และ SS_E เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อน มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $N-a$ ซึ่งเมื่อทำการนำค่าของผลรวมกำลังสอง (Sum of Square) ของแต่ละตัวหารด้วยระดับขั้นความเสรีของตัวเองจะได้เป็น ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของอิทธิพลนั้น (Mean square error of treatment) ดังสมการ

$$MS_{Treatment} = \frac{SS_{Treatment}}{a - 1} \quad (2.8)$$

และค่า ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของความคลาดเคลื่อน (Mean square error) เป็น

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a} \quad (2.9)$$

จากนั้นหาอัตราส่วน F_0 ซึ่งเป็นการทดสอบสมมติฐานความแตกต่างกันของความแปรปรวนของตัวอย่างสองกลุ่ม โดยคำนวณได้ดังนี้

$$F_0 = \frac{MS_{Treatment}}{MS_E} \quad (2.10)$$

การทดสอบ F-test มีสมมติฐาน คือ กลุ่มตัวอย่างสองกลุ่มนี้เป็นอิสระกัน (Independent) สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

สมมติฐาน 1 $H_0 : \mu_1 = \mu_2$

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ หรือ

สมมติฐาน 2 $H_0 : \mu_1 = \mu_2$

$H_1 : \mu_1 > \mu_2$ หรือ

สมมติฐาน 3 $H_0 : \mu_1 = \mu_2$

$H_1 : \mu_1 < \mu_2$

ขั้นแรก คำนวณหาว่ากลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมีความแปรปรวนแตกต่างกันหรือไม่ ด้วยสูตร F-test มีสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

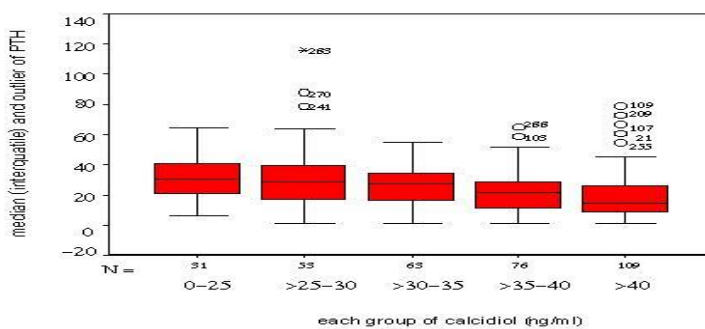
$$F_o = \frac{MS_{Treatment}}{MS_E}$$

คำนวณด้วยสูตร พิจารณาค่า F_0 ถ้าค่า $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$ แสดงว่าค่าที่คำนวณได้ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (Significant $> \alpha$) นั่นคือปฏิเสธ H_0 แสดงว่าความแปรปรวนของทั้งสองกลุ่ม

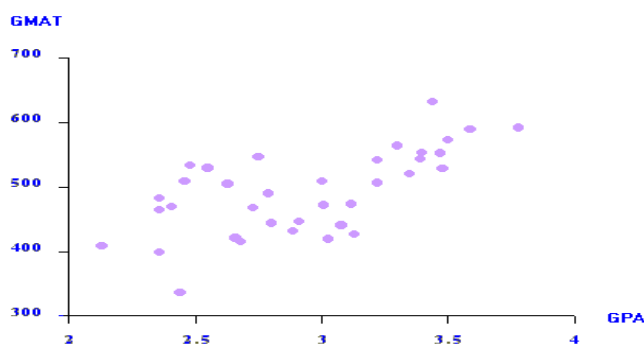
เท่ากันหรือไม่มีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของความแปรปรวน แต่ถ้าค่า $F_0 < F_{\alpha, a-1, N-a}$ แสดงว่าค่าที่คำนวณได้นั้นมีความสำคัญทางสถิติ (Significant $< \alpha$) นั่นคือ ยอมรับ H_0 ข้อมูลมีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนทั้งสองกลุ่ม หากเราต้องการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานนั้น เราจะสนใจว่า สมมติฐานหลัก (Null hypothesis) ถูกยอมรับหรือปฏิเสธ ถ้าถูกยอมรับนั้นก็แปลว่า สมมติฐานเป็นจริง หรือแปลว่าสมมติฐานนั้นไม่เป็นจริง ถ้าถูกปฏิเสธ จึงมีการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ เพื่อที่จะบอกยอมรับหรือปฏิเสธ Null hypothesis เรียกว่า Probability Value (P-Value) ส่วนใหญ่แล้ว p-value จะถูกกำหนดไว้ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือ p-value = 0.05 การทดสอบสมมติฐานนั้นจะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 เมื่อค่า p-value < 0.05

2.3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย

หลังจากทำการทดลอง และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อทำการตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นสุดท้ายคือการสรุปผลการทดลองที่ได้ ซึ่งโดยส่วนมากจะแสดงอยู่ในรูปของกราฟ เช่น Box plot , Scatter diagram แสดงดังรูป ที่ 2.3 (ก) Box plot (ข) Scatter diagram



(ก) Box plot



(ข) Scatter diagram

รูปที่ 2.3 Box plot , Scatter diagram

แต่อย่างไรก็ตามในบางกรณี อาจใช้วิธีการนำเสนอในรูปแบบอื่นได้ เช่น การสร้างแบบจำลองถดถอย (Regression model)

ปัจจัยส่วนใหญ่ในการทดลอง จะแบ่งออกเป็น สองประเภท คือ ปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative) และ ปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative) ในที่นี้ ปัจจัยเชิงปริมาณ ระดับของปัจจัยนั้นสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของระดับค่าเชิงตัวเลขได้ เช่น อุณหภูมิ ความดัน และเวลา แต่หากเป็นปัจจัยเชิงคุณภาพระดับของปัจจัยนั้นไม่สามารถแสดงให้อยู่ในรูปเชิงตัวเลขได้ เช่น ผู้ปฏิบัติการ (Operator) และ ชนิดของวัตถุดิบ (Batch of raw material) สมมุติว่าการทดลองหนึ่ง ต้องการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย ซึ่งประกอบไปด้วยทั้ง ปัจจัยเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และแสดงผลให้อยู่ในรูปกราฟที่เคยกล่าวมา ซึ่งก็ไม่อาจไม่เหมาะสมเท่าใดนัก ดังนั้น เราอาจสร้างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนี้ให้อยู่ในรูปแบบสมการเอมพิริคัล (Empirical model) วิธีการพิตสมการเอมพิริคัลนี้เรา เรียกว่า การสร้างแบบจำลองถดถอย เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรสองตัว เมื่อตัวแปรมีความสัมพันธ์กัน คือ ตัวแปรที่เป็นค่าประมาณการ (X) และ ตัวแปรตอบสนอง (Y) แนวโน้มของกราฟจะมีแนวโน้มเดียวกัน แสดงว่ามีความสัมพันธ์กัน หากทราบค่าของตัวแปรหนึ่งจะทำนายค่าของตัวแปรอีกตัวหนึ่งได้ แต่ถ้าไม่มีความสัมพันธ์กัน แนวโน้มของกราฟจะไม่ไปทางเดียวกัน โดยรูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression model) แสดงดังสมการข้างล่าง

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (2.11)$$

Y เป็นตัวแปรตาม X เป็นตัวแปรอิสระ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) β_1 และ β_2 คือค่าคงที่และค่า β_0 จะเป็นจุดตัดของสมการถดถอย และ ε ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทำได้โดย การสร้างกราฟระหว่างค่าเศษตกเหลือ (Residual) กับค่าที่ได้จากการทำนาย (Predicted value) ถ้าแบบจำลองที่ได้มีความสัมพันธ์กัน กราฟระหว่างค่าเศษตกเหลือและค่าที่ได้จากการทำนายการกระจายตัวของข้อมูลจะไม่มีรูปแบบเฉพาะ (Random) และสามารถตรวจสอบได้อีกวิธี โดยการหาค่า R^2 (R-squared) ซึ่งเป็นค่าตัวสถิติที่ใช้วัดว่าแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลมากน้อยอย่างไร ซึ่งค่า R-squared จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1 ยิ่งค่า R-Squared สูงๆ หมายความว่าแบบจำลองนั้นมีความเหมาะสมกับข้อมูล ถึงแม้ R-Squared มีค่าสูง ก็ไม่ได้หมายความว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับข้อมูลเสมอไป

เพราะ Residual plot อาจได้รูปแบบการกระจายของข้อมูลที่ไม่ไร้รูปแบบ (Non-random) ซึ่งจะทำให้ได้ตัวแบบจำลองที่ไม่ดี ดังนั้นในการวิเคราะห์สมการถดถอย ควรจะวิเคราะห์ R-Squared และ Residual plot ควบคู่กันไปด้วย

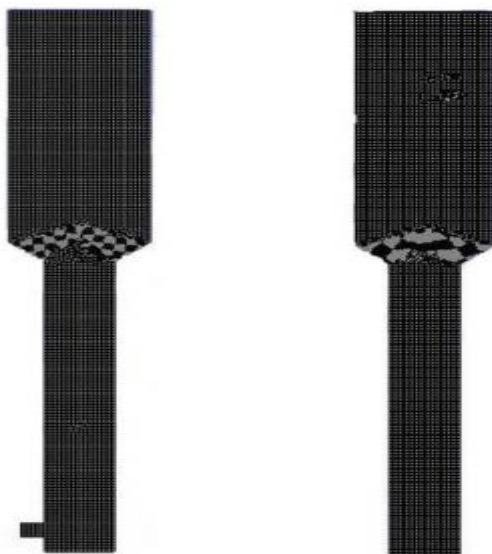
2.4 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เป็นการวิเคราะห์เพื่อแก้ปัญหาพลศาสตร์ของไหล เพื่อหาความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ วิเคราะห์พฤติกรรมของไหลในอุปกรณ์ หรือ ในระบบ โดยนำระเบียบวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical methods) และ การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ซึ่งสมการเหล่านี้จะประกอบไปด้วย 3 สมการหลัก คือ สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservative of momentum) สมการอนุรักษ์พลังงาน (Conservative of energy) และสมการความต่อเนื่อง หรือสมการอนุรักษ์มวล (Conservative of mass) ซึ่งชุดสมการเหล่านี้จะมีความสอดคล้องกับการไหลของของไหลจริง โดยมีหลักการพื้นฐานในการพิจารณาของไหลที่มีความต่อเนื่องให้อยู่ในลักษณะเป็นช่วง (discrete) ข้อดีของพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือลดค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลองในห้องปฏิบัติการจริง การออกแบบอุปกรณ์ทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น การออกแบบอากาศยานยนต์ เมื่อรถยนต์เคลื่อนที่นั้นจะมีอากาศที่ไหลผ่านมาปะทะที่รถยนต์ เนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านหลังคาร์ดยนต์มีความเร็วสูงกว่าอากาศที่ไหลผ่านใต้ ท้องรถยนต์ ดังนั้นอากาศเหนือหลังคาร์ดจึงมีความดันต่ำกว่าอากาศใต้ท้องรถ ความแตกต่างของความดันนี้ทำให้เกิด แรงยก (Lift) และการหมุนวนของอากาศขึ้น (Vortex) การหมุนวนของอากาศที่เกิดขึ้นที่ส่วนท้ายของรถยนต์ อากาศที่หมุนวนนี้เองที่ทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถยนต์ หากเราต้องออกแบบรูปร่างของรถยนต์อย่างไรให้ให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่น้อยที่สุด ซึ่งหากทำการออกแบบปรับและดัดแปลงใหม่ และทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าจากการทดลองอีก อาจจะต้องใช้เวลานานหลายเดือนในการสร้างตามแบบที่ออกแบบไว้ และ เสียค่าใช้จ่ายในการทำการทดลองแต่ละครั้งสูง จากค่าแรงงานคนและค่าอุปกรณ์ในการทดลอง ซึ่งพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ [2]

2.4.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหา

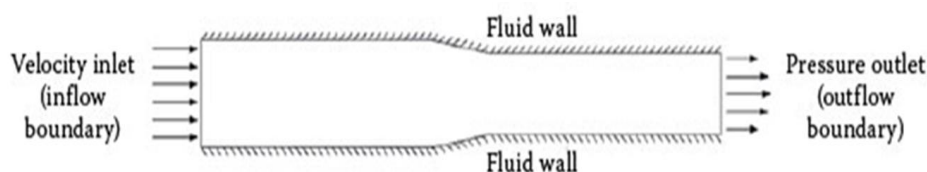
ขั้นตอนการแก้ปัญหาสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดลักษณะรูปร่างของปัญหา การกำหนดรูปร่างของปัญหาทางวิศวกรรม ซึ่ง ระดับความยาก การแก้ปัญหานั้นจะขึ้นอยู่กับ รูปร่างที่มีลักษณะรูปแบบซับซ้อน ก็จะแก้ปัญหาลำบาก
2. การแบ่งช่วงของโดเมนปริภูมิ (Spatial Domain) แบ่งออกเป็นเซลล์ต่างๆ ลักษณะเป็นโครงตาข่าย (Grid) แสดงดังตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.4 การแบ่งเซลล์ในลักษณะโครงตาข่ายของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์ เบริดแบบหมุนเวียนในระบบสองมิติ ฝั่งไรเซอร์ (Riser-2D) [9]



รูปที่ 2.4 โดเมนของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์ เบริดแบบหมุนเวียน ฝั่งไรเซอร์ [9]

3. การกำหนดสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations) ที่เป็นสมการอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายการไหลของของไหลตามความจริง ซึ่งระบบสมการ ประกอบไปด้วย สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน การที่จะแก้สมการได้ ต้องเข้าใจความหมายเชิงกายภาพของเทอมต่างๆ ในสมการก่อน จึงจะนำไปสู่การแก้ปัญหามีความถูกต้อง
4. การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) การแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตนั้นส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของของไหล และสมบัติของของไหล ในการวิเคราะห์ปัญหาที่ภาวะไม่คงตัว (transient) จะต้องกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial conditions) ด้วย ยกตัวอย่างเช่น การแก้ปัญหการไหลของของไหลในท่อ ต้องมีการกำหนด เงื่อนไขขอบ Boundary condition ดังนี้ Velocity inlet , Fluid wall และ Pressure outlet และตั้งเงื่อนไข ตรงผนัง เป็นผนังแบบไม่ลื่นไถล (No slip) ดังรูป ที่ 2.5



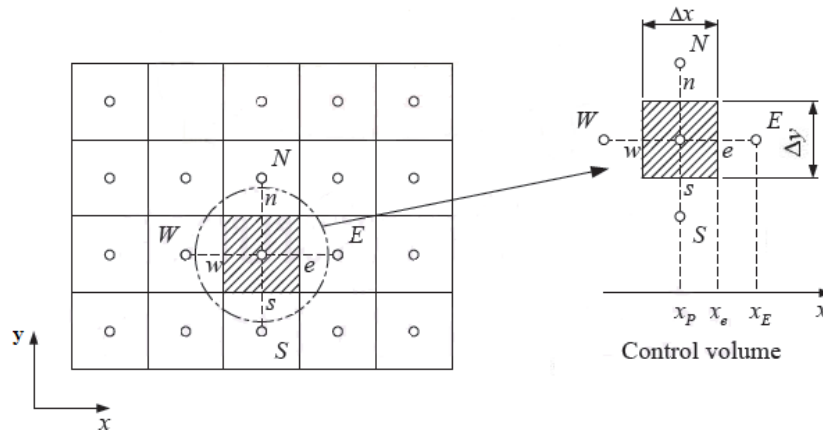
รูปที่ 2.5 เงื่อนไขขอบเขตการไหลในท่อ (Flow in pipe) [10]

5. การแก้ระบบสมการอนุพันธ์ย่อย ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยใช้ระเบียบวิธีการซ้ำ (Iteration)
6. การแสดงผลการแก้สมการให้อยู่ในรูปของ คอนทัวร์ 3 มิติ และเวกเตอร์ของความเร็วของของไหล เพื่อง่ายต่อการตีความและทำความเข้าใจความหมายเชิงกายภาพของระบบ

2.4.2 การแบ่งโดเมนของการไหลออกเป็นส่วนย่อยๆ (Discretization)

เป็นการแบ่งโดเมนของการไหลออกเป็นตารางเล็กๆ และทำการแก้ระบบสมการทางพีชคณิต (system of algebraic equations) โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข วิธีการเทคนิคการแบ่งโดเมนออกเป็นเซลล์ย่อยๆ (discretization) ที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหการไหลของของไหล ในโปรแกรมเชิงพาณิชย์ที่ขายตามท้องตลาดในปัจจุบัน เช่น ANSYS FLUENT คือระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) ทำได้โดยการแบ่งโดเมนออกเป็นเซลล์ย่อยๆ และกำหนดตัวไม่ทราบค่า (Unknown) ตรงกลางเซลล์ และทำการอินทิเกรตสมการเชิงอนุพันธ์นั้นๆ บน ปริมาตรควบคุม (Control volume) ดังแสดงดังรูปที่ 2.6 นั้นแล้วใช้วิธีการประมาณ เปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการเชิงเส้น (System of Algebra) ซึ่งในสมการการไหลของของไหลจะมีทั้งพจน์การแพร่กระจายและการพาของของไหลรวมอยู่ด้วยกัน (convection-diffusion) ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มนี้ เราจะนำมาใช้กับสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation) สมการที่ 2.12 ในรูปแบบของ ตัวแปร ϕ ซึ่งตัวแปรนี้ ซึ่งตัวแปรนี้อาจแทนด้วย อุณหภูมิ ความเร็ว ความเข้มข้น เป็นต้น

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



รูปที่ 2.6 การแบ่งปริมาตรออกเป็นเซลล์เล็กๆ ก่อนทำการอินทิเกรตรอบๆ Control Volume [11]

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y}}_{\text{Convection Terms}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)}_{\text{Diffusion Terms}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source Term}} \quad (2.13)$$

กรณีนี้ที่พิจารณาระบบที่มีการแพร่กระจายความร้อนและการพาความร้อน พจน์แรกซ้ายมือ คือ พจน์ของการพาของของไหล (Convection term) พจน์แรกทางขวามือ พจน์ของการแพร่กระจาย (Diffusion term) พจน์ที่สอง คือ Source term ขั้นตอนการเปลี่ยนสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิต โดยการอินทิเกรตปริมาตรควบคุม

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dV + \int_{cv} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) dV = \int_{cv} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV + \int_{cv} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dV + \int_{cv} S_\phi dV \quad (2.14)$$

หลังจากนั้นทำการ แปลงพจน์ $dV = A dx$ และ อินทิเกรตปริมาตรควบคุมที่ละพจน์จะได้ว่า ทำการอินทิเกรตทีละเทอม โดยกำหนดให้ $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$ $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$ สุดท้ายจะได้เทอมของการพาของจากการควบคุมพื้นฐานทั้ง สองแกน x และ y

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dV = (\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = F_e \phi_e - F_w \phi_w \quad (2.15)$$

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) dV = (\rho v A)_n \phi_n - (\rho v A)_s \phi_s = F_n \phi_n - F_s \phi_s \quad (2.16)$$

เทอมของการแพร่กระจาย

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (2.17)$$

$$\int_{cv} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} A \right)_s = D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S) \quad (2.18)$$

Source term

$$\int_{cv} S_\phi dV = S_\phi V \quad (2.19)$$

เมื่อ A_e , A_w , A_n , A_s แทนพื้นที่การและการนำความร้อนของ ตำแหน่งรอบๆปริมาตรควบคุม ขอบ e,w,n,s ของเซลล์

สัญลักษณ์ F และ D แทน สัมประสิทธิ์ของการพาและการนำความร้อน ตามลำดับ

$$F = \rho u A \quad \text{ซึ่งแทนสัมประสิทธิ์การพาความร้อน}$$

U หรือ v แทนความเร็วซึ่ง เป็นปริมาณเวกเตอร์ อาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ โดย u แทนความเร็ว ในแนวแกน x และ y แทนความเร็วในแนวแกน y

$$D = \Gamma \frac{A}{\delta} \quad \text{ซึ่งแทนสัมประสิทธิ์การนำความร้อน}$$

การนำความร้อน สัญลักษณ์ Γ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ดังนั้นจึงมี ค่าเป็นบวกเสมอ

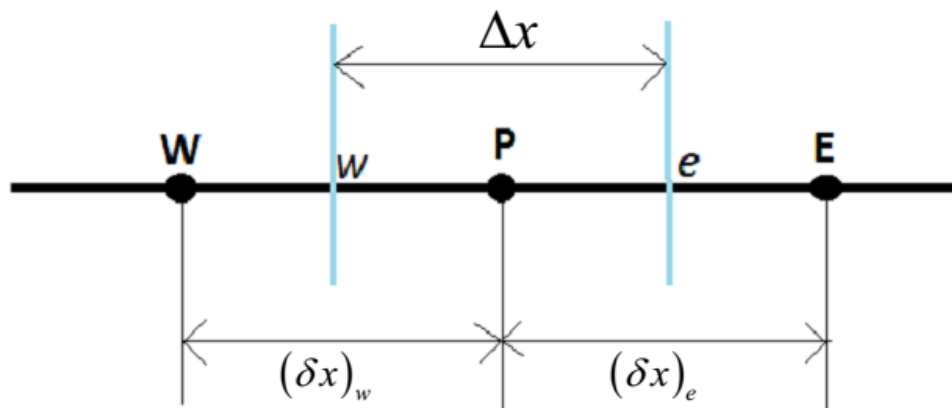
2.4.3 ปัญหาการแพร่กระจายความร้อน (Heat diffusion)

การแก้ปัญหาการแพร่กระจายความร้อนในระบบหนึ่งมิติ ด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม เริ่มต้นจากสมการควบคุมพื้นฐาน สมการที่ 2.14 กรณีที่เป็นการแพร่กระจายความร้อน และ ϕ แทนด้วย อุณหภูมิ(T)

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

สมการมีแค่เทอมการแพร่ ดังนั้นจึง ลดรูปเหลือเป็น $\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{dT}{dx} \right) + S = 0$

ทำการ discretization รอบปริมาตรควบคุม ดังรูป ที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การแบ่งโดเมนของการแพร่กระจายความร้อนออกเป็นเซลล์ [11]

การแบ่งโดเมนออกเป็นเซลล์ จุด P และเส้นรอบจุด P มีความยาว Δx เซลล์ด้านซ้ายและขวา คือ เซลล์ W และ E ตามลำดับ และทำการอินทิเกรตรอบปริมาตรควบคุม ซึ่งจะได้ว่า

$$\int_w^e \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{dT}{dx} \right) + S \right] dx = 0 \quad (2.20)$$

$$\left(\Gamma \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(\Gamma \frac{dT}{dx} \right)_w + \int_w^e S dx = 0 \quad (2.21)$$

สมการนี้เป็นไปตามกฎอนุรักษ์พลังงาน โดยฟลักซ์ความร้อนที่เข้ามาทางด้านขวาของเซลล์ และออกทางด้านซ้ายของเซลล์ และพจน์ ต้นกำเนิดความร้อนภายในเซลล์ (Source term) ทั้งหมดรวมกัน ต้องมีค่าเป็นศูนย์ เทอม ค่าการเปลี่ยนแปลง (gradient) สองพจน์แรก ในสมการสามารถหาค่า

โดยประมาณได้โดย $\left(\frac{dT}{dx}\right)_e = \frac{T_E - T_P}{\Delta x}$ และ $\left(\frac{dT}{dx}\right)_w = \frac{T_P - T_W}{\Delta x}$ และพจน์ Source term

อินทิเกรตรอบปริมาตรควบคุม จะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิตได้ดังนี้

$$\int_w^e S dx = \int_w^e (S_C + S_P T) dx = S_C \Delta x + S_P \int_w^e T dx = (S_C + S_P T_P) \Delta x$$

ดังนั้นสุดท้าย การแก้ปัญหาค่าการแพร่กระจายความร้อน (Heat diffusion) จะสามารถเปลี่ยนสมการให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิตได้ว่า

$$\frac{\Gamma_e (T_E - T_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w (T_P - T_W)}{(\delta x)_w} + (S_C + S_P T_P) \Delta x = 0 \quad (2.22)$$

หรือเขียนให้อยู่ในรูปสมการ discretization ได้ $a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + b$

โดยที่ $a_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e}$, $a_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}$, $b = S_C \Delta x$

$$a_P = a_E + a_W - S_P \Delta x$$

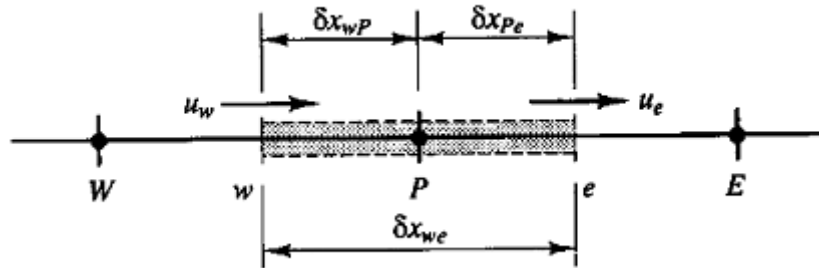
ในปัญหานี้หากเรารู้ เงื่อนไขสภาวะเริ่มต้น (Initial condition) ในที่นี้คือ อุณหภูมิ ที่ปลายขอบด้านซ้าย และปลายขอบด้านขวา ก็จะสามารถแก้หาคำตอบได้ [11]

2.4.4 ปัญหาการพาและการแพร่กระจายความร้อน (Heat convection and heat diffusion)

คราวนี้มาพิจารณาปัญหาที่มีการไหลของของไหลในระบบหนึ่งมิติ ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเกิดปรากฏการณ์การถ่ายโอนความร้อน สองแบบพร้อมกัน สมการจะพิจารณาทั้งหมด การพาและการแพร่กระจาย

ความร้อนตาม สมการที่ 2.13 จะได้ว่า $\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + S_\phi$ ซึ่งในท้ายที่สุดแล้วทำการอินทิเกรตรอบปริมาตรควบคุม และจัดรูปสมการสุดท้ายจะได้ตามสมการที่เคยได้พิสูจน์ไว้แล้วได้

เป็นสมการ ที่ 2.23 และสมมุติว่าระบบไม่สามารถผลิตความร้อนได้เอง จึงละเทอมต้นกำเนิดความร้อนภายในเซลล์ทิ้งไป จะเหลือสมการดังนี้



รูปที่ 2.8 การทำ Finite volume ของปริมาตรควบคุม ที่มีทั้งการแพร่กระจายความร้อนและการพาความร้อน (Heat convection and heat diffusion) [11]

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV \quad (2.23)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) dV = (\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = F_e \phi_e - F_w \phi_w \quad (2.24)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w = D_e (\phi_e - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_w) \quad (2.25)$$

$$(\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w \quad (2.26)$$

สำหรับการประมาณค่าขอบที่ตำแหน่งต่างๆ แสดงดังนี้ $\left(\frac{d\phi}{dx} \right)_e = \frac{\phi_P - \phi_E}{\Delta x}$ และ

$$\left(\frac{d\phi}{dx} \right)_w = \frac{\phi_w - \phi_P}{\Delta x}, \quad \phi_e = \frac{\phi_P + \phi_E}{2} \quad \text{และ} \quad \phi_w = \frac{\phi_P + \phi_W}{2}$$

จัดให้อยู่ในรูปสมการ discretization ได้ว่า

$$F_e \phi_e - F_w \phi_w = D_e (\phi_e - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_w) \quad (2.27)$$

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W \quad (2.28)$$

หากพิจารณาสมการที่กล่าวมาทั้งหมด ϕ เป็นตัวแปรที่อยู่รอบๆ ปริมาตรควบคุมทั้งขอบทางซ้ายและขวา การจะคำนวณนั้นต้องทำการประมาณค่าทั้งใช้วิธีการถัวเฉลี่ยทั้งทางด้านซ้ายและด้านขวาของเซลล์ เป็นต้น การหาค่าของตัวแปร ϕ บนผิวปริมาตรควบคุมในเทอมของการพาที่อยู่ ในสมการ จะสามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วย Numerical scheme ต่างๆ เช่น Central differencing scheme , First order upwind differencing scheme , Power-law differencing scheme และ Hybrid differencing scheme โดยรายละเอียดของแต่ละวิธี Discretization มีดังต่อไปนี้ [2, 11]

1) Central differencing scheme หรือวิธีหาผลต่างแบบตรงกลาง ถัวเฉลี่ยค่า ϕ ทั้งขอบทางด้านซ้ายของเซลล์ และทางด้านขวา เขียนเป็นสมการประมาณค่าได้ ดังนี้

$$\phi_w = \frac{(\phi_P + \phi_W)}{2}, \quad \phi_e = \frac{(\phi_E + \phi_P)}{2}, \quad \phi_n = \frac{(\phi_N + \phi_P)}{2}, \quad \phi_s = \frac{(\phi_P + \phi_N)}{2}$$

2) First order upwind differencing scheme

เป็นวิธีแก้ไข้ปัญหาที่เกิดจากวิธี Central differencing scheme ซึ่งเป็นการถัวเฉลี่ยที่จุดขอบของเซลล์กับจุด P นั้นไม่ได้นำทิศทางของการไหลเข้ามาพิจารณาเลย ดังนั้นหลักการของวิธี upwind จะให้ความสำคัญของทิศทางกรไหลเข้ามาพิจารณาด้วย รูปที่ 2.8 ของไหลไหลจากซ้ายไปขวาค่า ϕ ที่ขอบของเซลล์ P ก็จะได้จากการกำหนดค่าให้เท่ากับ ϕ ที่จุดกึ่งกลางเซลล์ ซึ่งไม่ใช่การถัวเฉลี่ยเหมือนวิธีผลต่างแบบตรงกลาง และวิธีนี้จะใช้เฉพาะกับพจน์การพาความร้อนเท่านั้น

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

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

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

$$\phi_w = \phi_P \quad \text{เมื่อ} \quad F_w < 0$$

สามารถเขียนสมการพีชคณิตของสมการ discretization ของการพาและการแพร่กระจายความร้อน
ได้ว่า

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_\phi V \quad (2.29)$$

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

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

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

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

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

$$a_P = a_N + a_S + a_E + a_W + (F_n - F_s + F_e - F_w) \quad (2.30)$$

3) Second order upwind scheme

Second order upwind scheme เป็นการประมาณค่า ϕ โดยใช้การประมาณเชิงเส้นของค่าที่ต้น
กระแสของการไหลต้นน้ำ วิธีนี้จะให้ความแม่นยำสูงกว่า First order upwind scheme เพราะได้มี
การนำจุดของค่าที่นำมาใช้คำนวณมากขึ้น ดังนี้

$$\phi_e = \frac{3}{2} \phi_P - \frac{1}{2} \phi_W \quad \text{เมื่อ} \quad F_e > 0 \quad (2.31)$$

$$\phi_e = \frac{3}{2} \phi_E - \frac{1}{2} \phi_{EE} \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0 \quad (2.32)$$

$$\phi_w = \frac{3}{2} \phi_W - \frac{1}{2} \phi_{WW} \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0 \quad (2.33)$$

$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_P - \frac{1}{2}\phi_E \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0 \quad (2.34)$$

4) Power-law differencing scheme

วิธีนี้เป็นวิธีการประมาณพจน์การแพร่กระจายความร้อน แบบโพลีโนเมียล และจะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ Pe (Peclet number) มีค่ามากกว่า 10 และสามารถเขียนสมการพีชคณิตได้เป็น โดยที่ $Pe = \frac{F}{D}$

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_\phi V \quad (2.35)$$

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

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

$$a_E = D_e \max\left[0, (1 - 0.1|F_e / D_e|)^5\right] + \max[-F_e, 0]$$

$$a_W = D_w \max\left[0, (1 - 0.1|F_w / D_w|)^5\right] + \max[F_w, 0]$$

$$a_P = a_N + a_S + a_E + a_W + (F_n - F_s + F_e - F_w) \quad (2.36)$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shuai และคณะ [12] จำลองกระบวนการเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง โดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจำลองปฏิกิริยาเคมี และอุทกพลศาสตร์ เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงแบบฟองแก๊สในเคมีคอลลูบิง แบบ 2 มิติ ซึ่งได้ทำการป้อนแก๊สมีเทน ทำปฏิกิริยากับ โลหะนิกเกิลออกไซด์ (NiO) โดยใช้ เบนโทไนต์ เป็นตัวรองรับ อนุภาคขนาด 120 ไมครอน ความสูงเบดเริ่มต้น 0.25 เมตร จำลองในเครื่องปฏิกรณ์ ความสูง 0.8 เมตร ความกว้าง 0.25 เมตร ความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.1 เมตรต่อวินาที โดย ช่วง 0 - 2 วินาที จะตั้งค่าให้ป้อนแก๊สไนโตรเจนก่อนเพื่อป้องกันการลู่ออกจากกรณีการเกิดปฏิกิริยา หลังจากนั้นก็จะปรับสัดส่วนแก๊สผสมเป็น มีเทน 0.9 และ ไนโตรเจน 0.1 ผลจากการพล็อตส่วนของแก๊สทั้งหมดเทียบกับเวลา พบว่าเมื่อป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าระบบช่วง 2 วินาทีแรก การเปลี่ยนเป็นมีเทน ไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นเพิ่มขึ้นในช่วง 2-3วินาที หลังจากเวลา

3.5 วินาที สัดส่วนของมีเทนนั้นมีค่าแกว่งอยู่ในช่วง 0.249 คาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 0.372 อนุภาคน้ำ 0.301 และค่าการเปลี่ยนของมีเทนคำนวณได้ที่ ร้อยละ 68

Shuai และคณะ [13] ได้ทำการจำลองกระบวนการเคมีคอลลูบิงในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง โดยศึกษาพฤติกรรมอุทกพลศาสตร์เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แก๊สมีเทนเป็นเชื้อเพลิง ทำปฏิกิริยากับโลหะ NiO โดยใช้แบบจำลองแรงต้านการไหล EMMS (energy minimization multiscale) ทำนายสัดส่วนของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเทียบกับแบบจำลองแรงต้าน Ergun และ Wen-Yu ผลการทดลองจริงพบว่า แบบจำลองแรงต้าน EMMS ให้ผลค่าสัดส่วนโมลของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ใกล้เคียงมากกว่าของ Ergun

Loha และคณะ [3] ศึกษาผลของแบบจำลองแรงต้าน และ แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วนต่อพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ โดยจะทำการเทียบกับผลการทดลองจริง ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟองแก๊สที่ไม่มีการพิจารณาผลของปฏิกิริยาเคมี หรือการไหลแบบ cold flow จากแบบจำลองแรงต้านที่เลือกมา 4 แบบ Gidaspow Syamlal EMMS และ McKeen ผลกราฟสัดส่วนของของแข็งในแนวรัศมีพบว่ามีเพียงแบบจำลองของ Gidaspow และ Syamlal เท่านั้นที่ได้ผลรูปแบบการไหล เป็นการไหลแบบแกนในวงนอก ผลของความเร็วอนุภาคในแนวแกน พบว่า แบบจำลอง Gidaspow ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองของ Jung et al. (2005) มากที่สุด ผล Granular temperature ในแนวรัศมีนั้น แบบจำลอง EMMS ให้ผลที่ใกล้เคียงที่สุด

Esmaili และ Mahinpey [14] จำลองระบบฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สในระบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อศึกษาผลของแบบจำลองแรงต้าน โดยตั้งวัตถุประสงค์ไว้ให้ ได้ผลต่างความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันในการทดลองกับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันในแบบจำลอง มีค่าเป็นศูนย์ และใช้แบบจำลองแรงต้าน 10 แบบที่ได้พัฒนาขึ้น Wen-Yu Gibilaro Gidaspow Syamlal Arastoopour RUC Di-Felice Hill Koch Ladd และ Zhang โดย ปรับค่าความเร็วเป็น 1.6 3.2 5.8 และ 7 U_{mf} ผลของความดันลด มีค่าแตกต่างกันทุกแบบ และแบบจำลองของ Di Felice ให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองจริงที่สุด ในส่วนของการขยายตัวของเบด แบบจำลอง Di Felice ก็ให้ผลที่ดีที่สุด

Ghaly และ MacDonald [15] ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่า residence time ของของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองแก๊สในห้องปฏิบัติการ ตัวแปรดำเนินการที่ศึกษา 5 ตัว คือ ขนาดอนุภาคทราย รูปร่างของแผ่นกระจายอากาศ มุมยกของแผ่นกระจายอากาศ ความสูงเบด เริ่มต้น และความเร็วแก๊สป้อนเข้า ที่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบการผสมและเวลาที่ทรายอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นการวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อลดความแปรปรวนจากการทดลอง ทำให้เห็นผลกระทบและผลกระทบร่วมกันของตัวแปรดำเนินการที่ชัดเจนและมีความถูกต้องเชื่อถือได้ พบว่า อนุภาคทรายละเอียดจะให้ residence

time นานกว่าทรายหยาบ การเพิ่มมุมเอียงของแผ่นกระจายอากาศแบบเว้า หรือ การลดมุมเอียงของแผ่นกระจายอากาศแบบนูนจะทำให้ค่า residence time เพิ่มขึ้น โดยการปรับมุมและชนิดแผ่นกระจายอากาศจะทำให้เกิดการลอยขึ้นและตกกลับลงมาที่ผนังทำให้เกิดการผสมทั่วถึงเป็นเนื้อเดียวกันของสารตั้งต้น ทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนของปฏิกิริยาเคมีที่สูงขึ้น ส่วนการเพิ่มความเร็วแก๊สป้อนเข้าจะทำให้ residence time ของอนุภาคทรายในเครื่องลดต่ำลง

Harichandan และ Shamim [16] ศึกษาพฤติกรรมอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง และปฏิกิริยาเคมีระหว่าง แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และ แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคโลหะออกไซด์และขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ โดยใช้ โปรแกรม ANSYS Fluent และได้นำผลคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงจากงานวิจัยของ Deng และคณะ [17] ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ กว้าง 0.25 เมตร สูง 1 เมตร และความสูงเบดเริ่มต้นที่บรรจุโลหะออกไซด์ไว้ที่ 0.4 เมตร เลือกใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k - \epsilon$ จากกราฟผลของสัดส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจน (สารตั้งต้น) และไอน้ำ (ผลิตภัณฑ์) กับเวลา ที่ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ 2 ตำแหน่ง ที่บริเวณก้นเครื่องปฏิกรณ์ $x = 0$ cm และที่ความสูง $x = 30$ cm พบว่ามีการแกว่งของก๊าซไฮโดรเจน และ ไอน้ำเกิดขึ้นซึ่งเกิดการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สและ ปฏิกิริยาเคมีรุนแรงที่เกิดขึ้นบริเวณเบดด้านล่างที่หนาแน่น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาเข้าสู่ภาวะเสมือนคงตัว (quasi steady state) หลังจาก 1 วินาที ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ รูปแบบของค่าสัดส่วนโดยโมลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เข้าสู่ภาวะคงตัวที่ 0.65 และ 0.35 ตามลำดับ หลังจากเวลา 3.8 วินาที ค่าสัดส่วนโดยโมลของแก๊สไฮโดรเจนและไอน้ำที่เกิดขึ้นบริเวณทางออกมีค่าค่อนข้างคงที่นั่นเป็นไปตามที่คาดไว้เพราะว่า บริเวณด้านบนบนเครื่องปฏิกรณ์มีสัดส่วนของโลหะออกไซด์อยู่น้อย โดยมีอัตราการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของแก๊สเชื้อเพลิงอยู่ ที่ร้อยละ 35

Sharma และคณะ [18] ศึกษาพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ ของผสมระหว่างชีวมวลอัดแท่งและถ่านชาร์ชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองแก๊ส ขนาด $0.45 \times 2 \times 0.38$ m (WxLxH) ทั้งในระบบ 2 มิติ และ 3 มิติ เพื่อศึกษาผลกระทบจากความเร็ว Superficial gas velocity ความหนาแน่นชีวมวล และ ขนาดอนุภาค ที่มีต่อการผสมและการแยกชั้นของอนุภาคชีวมวล การวิเคราะห์ทำโดยใช้แบบจำลองของ Euler-Euler จากผลการทดลองจะพบว่าเมื่อทำการเพิ่ม Superficial gas velocity จนกระทั่งเลยความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันแล้วจะทำให้เพิ่มการผสมกันระหว่างของแข็งและอนุภาคชีวมวล ผลคอนทอร์ที่ได้ พบว่าแบบจำลอง 2 มิติ และ 3 มิติ ให้รูปแบบการเกิดฟองอากาศ รวมถึงการกระจายตัวของชีวมวลไม่แตกต่างกัน การทดลองนี้ยังได้ศึกษาผลกระทบจาก ค่า Specularity coefficient ที่มีผลต่อการผสมกันและการแยกชั้นของของผสม

Mahalatkar และคณะ [19] จำลองอุทกพลศาสตร์การเผาไหม้ของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงรูปทรง Tapered/conical ในกระบวนการเคมีคอลลูบิง ที่ใช้ถ่านชาร์เป็นเชื้อเพลิง และใช้เหล็ก

ออกไซด์เป็นตัวพาออกซิเจนโดยทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขเทียบกับผลการทดลองจริง แบบจำลองนี้สามารถทำนายความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ

Guan และคณะ [20] จำลองกระบวนการเคมีคอลลูบิงในระบบ 3 มิติ ที่ ประกอบไปด้วย ไโรเซอร์ ดาวเนอร์ พอดซิล และ ไฮโคลน โดยศึกษาผลกระทบของ แบบจำลองแรงต้านของ Gidaspow Syamlal และ Yang ศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ พบว่า แบบจำลองแรงต้านของ Gidaspow Syamlal ใช้ทำนาย รูปแบบความดัน ได้ค่อนข้างแม่นยำ สอดคล้องกับผลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฝั่ ดาวเนอร์ ที่เดินระบบแบบ ฟองแก๊ส ส่วนฝั่ ไโรเซอร์ ค่าที่ได้ เบี่ยงเบนออกจากค่าการทดลองจริงทั้งหมด

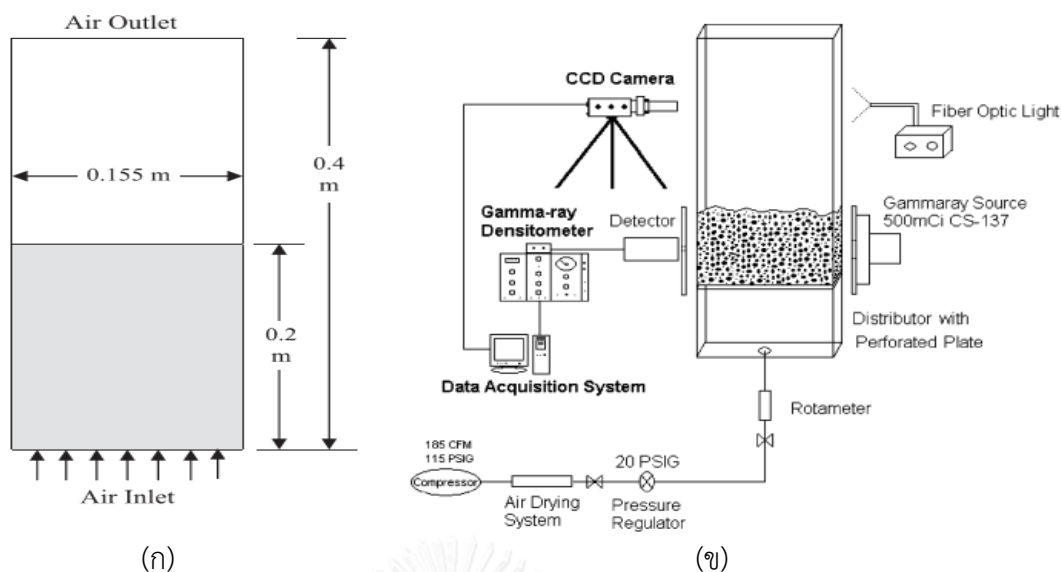
Deng และคณะ [17] จำลองกระบวนการเผาไหม้ในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT เพื่อศึกษาปฏิกิริยารีดักชัน ระหว่าง แคลเซียมซิลเฟต และแก๊สไฮโดรเจน และใช้แบบจำลองแรงต้านของ Wen & Yu และใช้แบบจำลอง Shrinking core อธิบายจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น โดยไม่มีการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้กับผลการทดลองจริง พบว่า สัดส่วนโมลของไอน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นและมีค่าแกว่งไปมาที่ตำแหน่งชั้นเบตหนาแน่น ซึ่งคาดว่าเกิดจากฟองแก๊สที่เกิดขึ้นในระบบ ส่วนผลสัดส่วนโมลไอน้ำที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าคงที่ อยู่ที่ 0.32

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การจำลองวิวัฒนาการไหลของแก๊สและของแข็งจะใช้แนวความคิดของออยเลอร์เลียนที่จะให้อุณหภูมิของแข็งนั้นประพฤติตัวมีสมบัติลักษณะคล้ายของไหลในระบบฟลูอิดไรซ์เบด ของแข็งและแก๊สจะประพฤติมีสมบัติเป็นของไหลเหมือนโมเลกุลแก๊สตามทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (Kinetic Theory of gas) นั่นเอง

การจำลองการไหลในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมีในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในงานวิจัยนี้ จะแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) และเดินระบบแบบกะ (Batch) แบบไม่มีการพิจารณาเกิดปฏิริยาเคมี (Cold flow) ของ Jung และคณะ (2005) [4] ส่วนที่สองเป็นการจำลองเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี (Chemical looping combustion) โดยพิจารณาการเกิดปฏิริยาเคมี (Hot flow) และเดินระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous) โดยจะทำการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model validation) จากงานของ Johansson และคณะ (2003) [21]

งานส่วนแรก เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองแก๊สระบบสองมิติ มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.155 เมตรและความสูง 0.4 เมตร ดังรูปที่ 3.1 อุณหภูมิของแข็งที่ใช้มีขนาด 530 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเมื่อพิจารณาอนุภาคนี้จากหลักการแบ่งชนิดของเจลดาร์ท (Geldart classification) อนุภาคจะจัดอยู่ Geldart group B ซึ่งอนุภาคลุ่มนี้เกิดฟลูอิดไรซ์ได้ง่ายและยังเกิดฟองขึ้นในระบบอีกด้วย ตัวแปรที่นำมาสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง มีความเร็วของของแข็งในแนวแกน (Solid velocity in axial direction) , ความเร็วของของแข็งในแนวรัศมี (Solid velocity in radial direction) , อุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular temperature) , ความเร็วของของแข็งในแนวแกนในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (Instantaneous lateral particle velocity) และ ความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (Instantaneous radial particle velocity)

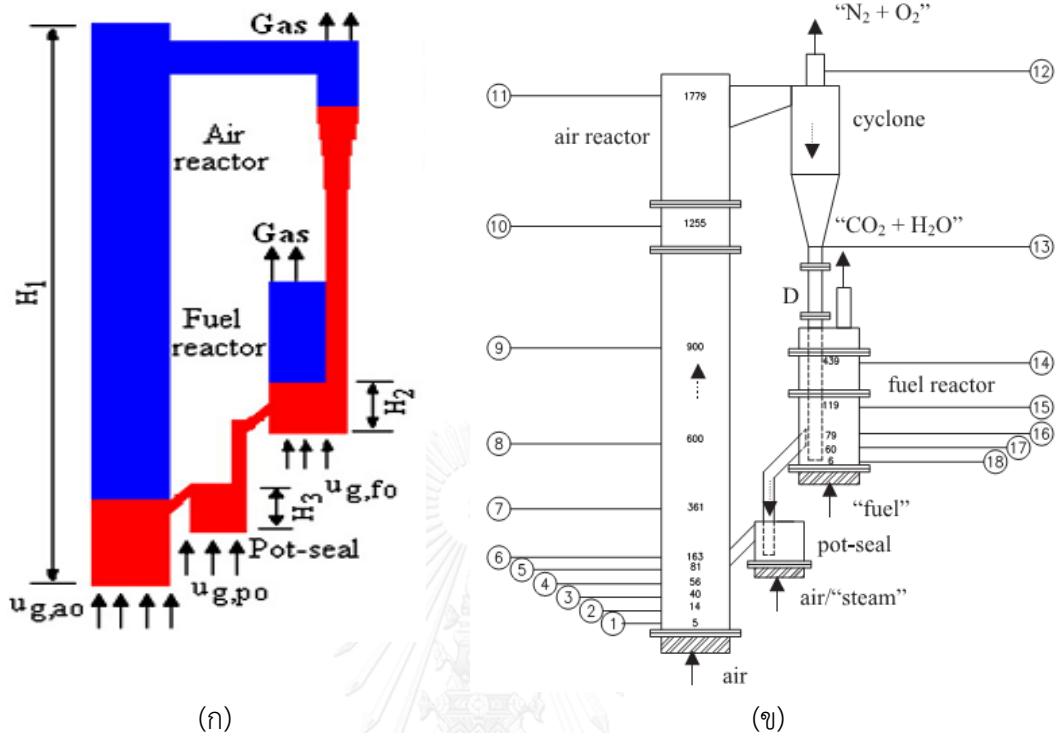


รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบพอง ในงานวิจัย ของ Jung และคณะ (2012) [4]
 (ก) แบบจำลอง 2 มิติ [3] (ข) ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการจริง [4]

งานส่วนที่สอง เครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมีระบบสองมิติ หรือ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน ที่มีส่วนประกอบทั้งหมด 4 ส่วนหลักๆ คือ โรเตอร์ ดาวเนอร์ พอตซีล และไซโคลน โรเตอร์ หรือ เครื่องปฏิกรณ์อากาศ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.19 เมตร ความสูง 1.9 เมตร ดาวเนอร์ หรือ เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.19 เมตร ความสูง 0.5 เมตร และระหว่างเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงและเครื่องปฏิกรณ์อากาศจะมี พอตซีล (Pot seal) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้แก๊สของทั้งสองเครื่องไหลเข้ามาผสมกันได้ พอตซีลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.14 เมตร และความสูง 0.15 เมตร ดาวคัมเมอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.04 เมตรดังรูปที่ 3.2 อนุภาคของแข็งที่ใช้มีขนาด 150 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 2,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตัวแปรที่นำมาสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลอง คือ ค่าความดันสมบูรณในแนวความสูง (Absolute pressure in axial direction) ของเครื่องปฏิกรณ์อากาศ และ เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ในงานวิจัยส่วนนี้จะตั้งสมมุติฐานไว้ว่า รูปทรงทางเรขาคณิตของไซโคลนไม่มีผลต่อการตกกลับลงมาของอนุภาคและความดันลดในเครื่องปฏิกรณ์

งานวิจัยในการทดลองนี้จะแบ่งหัวข้อการวิจัยออกเป็น 5 ส่วน คือ 1. การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบพอง เทียบกับงานวิจัย ของ Jung และคณะ [4] 2. การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่ส่งผลต่อดัชนีการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบพองแก๊ส 3. การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี เทียบกับงานวิจัย ของ Johansson และคณะ [21] 4. แบบจำลองการเกิดปฏิริยาเคมี

(Chemical reaction model) และ 5. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง



รูปที่ 3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกริยาเคมี ในงานวิจัยของ Johansson และคณะ (2003) [21] (ก) แบบจำลอง 2 มิติ [22] (ข) ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ [21]

3.1 การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบพอง

ในส่วนการสร้างแบบจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบพอง จะแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ การทดสอบความเป็นอิสระของจำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณ (Grid independency test) และ การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

3.1.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

แบบจำลองที่ใช้ในงานนี้จะใช้แนวคิดออยเลอร์-ออยเลอร์ แบบหลายวัฏภาค วัฏภาคของแก๊สและของแข็งจะพิจารณาให้เป็นของไหลที่ต่อเนื่องโดยใช้สมการ Navier-Stokes ทำการแก้สมการคู่ควบกันไประหว่างสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาคและความดัน และการไหลของของแข็งจะประยุกต์ใช้กับสมการเสริม โดยให้การเคลื่อนที่ของของแข็งเหมือนกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลแก๊ส โดยใช้ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส ดังนั้นสำหรับของแข็งจะใช้ทฤษฎีจลน์การไหลของแข็ง

(Kinetic Theory of Granular Flow: KTGF) สมการนี้จะใช้คำนวณความหนืดของของแข็งและความดันของของแข็ง การที่ของแข็งเคลื่อนที่แบบสุ่มและความเร็วไม่คงที่ไว้ทิศทางและไว้ระเบียบนี้ โมเลกุลของแข็งจะวิ่งกระทบกับผนังหรือเกิดการชนกันเองระหว่างอนุภาคบ้าง ทำให้เกิดการถ่ายโอนโมเมนตัมและมีการเปลี่ยนทิศทาง ตามกฎทรงพลังงานกรณีที่เป็นการชนแบบไม่สูญเสียพลังงานหรือการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) นั้น พลังงานจลน์ของโมเลกุลของของแข็งและความเร็วมีค่าคงที่ และอีกกรณีหนึ่งคือการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) ซึ่งการชนกันเองระหว่างอนุภาคและการชนกับผนังนั้นจะมีการถ่ายโอนพลังงานให้กันและสูญเสียพลังงานไป ทำให้ความเร็วลดลงและพลังงานจลน์ของของแข็งมีค่าลดลง โดยพลังงานที่สูญเสียไปจะอยู่ในรูปของพลังงานความร้อน

การคำนวณการไหลจะใช้ชุดสมการอนุรักษ์อันได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการอนุรักษ์พลังงาน และสมการสปีชีส์ของทั้งสองวัฏภาค การแก้สมการจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข เปลี่ยนสมการให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิตที่เคยอธิบายไว้แล้ว และกำหนดภาวะขอบเขตของแบบจำลอง เวกเตอร์ทิศทางและค่าของแรงดึงดูดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก อุณหภูมิที่สถานะเดินระบบ และความดันที่ความดันบรรยากาศ 101325 Pa

3.1.1.1 สมการอนุรักษ์ (Conservation equations)

ชุดสมการเหล่านี้ประกอบไปด้วย สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์พลังงาน และแบ่งออกเป็นสองชุด คือ ของของแข็งและของแก๊ส [23]

3.1.1.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equations)

วัฏภาคแก๊ส , g

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

วัฏภาคของแข็ง , s

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

ผลรวมของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งแก๊สเท่ากับหนึ่ง $\varepsilon_g + \varepsilon_s = 1$

ε_s คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาคของแข็ง (-)

ε_g คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาคแก๊ส (-)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_g คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

v_s คือ ความเร็วของวัฏภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที)

v_g คือ ความเร็วของวัฏภาคของแก๊ส (เมตรต่อวินาที)

t คือ เวลา (วินาที)

3.1.1.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equations)

วัฏภาคแก๊ส , g

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

วัฏภาคของแข็ง , s

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

τ_g คือ ความเค้นเทนเซอร์ของแก๊ส (ปาสคาล)

τ_s คือ ความเค้นเทนเซอร์ของของแข็ง (ปาสคาล)

P_g คือ ความดันของวัฏภาคแก๊ส(ปาสคาล)

P_s คือ ความดันของวัฏภาคของแข็ง(ปาสคาล)

β คือ แบบจำลองการต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสามวินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

3.1.1.1.3 สมการอนุรักษ์พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของของแข็ง (Fluctuating kinetic energy conservation equation)

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

I คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์ (-)

θ_s คือ พลังงานจลน์จากการกวัดแกว่งของอนุภาค (เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง)

κ_s คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

γ_s คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)

พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของอนุภาคหรืออุณหภูมิของอนุภาค (Granular temperature) จะถูกใช้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการคำนวณด้วยทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาค เช่น ความดันของอนุภาค และความหนืดของอนุภาค เป็นต้น

3.1.1.1.4 สมการอนุรักษ์พลังงาน

งานวิจัยนี้การคำนวณการถ่ายโอนความร้อนระหว่างภูมิภาคที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการอนุรักษ์พลังงานนี้

ภูมิภาคของแข็ง

$$\frac{\partial (\varepsilon_s \rho_s h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s v_s h_s) = -\varepsilon_s \frac{\partial P}{\partial t} + \tau_s : \nabla \cdot \tau_s \quad (3.6)$$

ภูมิภาคของแก๊ส

$$\frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g h_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g v_g h_g) = -\varepsilon_g \frac{\partial P}{\partial t} + \tau_g : \nabla \cdot \tau_g \quad (3.7)$$

h_g คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของแก๊ส (Specific enthalpy of gas)

h_s คือ ค่าเอนทัลปีจำเพาะของของแข็ง (Specific enthalpy of solid)

3.1.1.1.5 สมการอนุรักษ์การไหลและสปีชีส์

แบบจำลองที่ทำการแก้สมการอนุรักษ์การไหลและสปีชีส์นี้จะใช้คำนวณแต่ละองค์ประกอบของแก๊สแต่ละสปีชีส์ในวัฏภาคแก๊สตามสมการ

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g Y_i v) = -\nabla \varepsilon_g J_i + \varepsilon R_{i,h_o} + R_{i,het} \quad (3.8)$$

R_{i,h_o} คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาเคมีแบบเอกพันธ์ของสปีชีส์ i

$R_{i,het}$ คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธ์ของสปีชีส์ i

Y_i คือ สัดส่วนโดยมวลของสปีชีส์ i

J_i คือ ฟลักซ์การแพร่ของของสปีชีส์ i

โดยที่ J_i คือ ฟลักซ์ของการแพร่สปีชีส์ i ซึ่งคำนวณได้ดังสมการ ที่

$$J_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (3.9)$$

$D_{i,m}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของสปีชีส์ i

3.1.1.2 สมการเสริม (Constitutive equations)

ชุดสมการนี้จะนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมของวัฏภาคของแข็ง อธิบายความสัมพันธ์ ระหว่างค่าความหนืดของของแข็ง ความเค้น และความดัน

ความเค้นเทนเซอร์ (Stress tensor)

วิญภาคแก๊ส, g

$$\tau_g = \varepsilon_g \mu_g \left[\frac{1}{2} [\nabla \cdot v_g + (\nabla \cdot v_g)^T] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot v_g) \mathbf{I} \right] \quad (3.10)$$

วิญภาคของแข็ง, s

$$\tau_s = \varepsilon_s \mu_s [\nabla \cdot v_s + (\nabla \cdot v_s)^T] - \varepsilon_s \left(\xi_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot v_s \quad (3.11)$$

ξ_s คือ ความหนืดรวม (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)

สมการความดันของอนุภาคจะประกอบด้วยสองพจน์ พจน์ที่หนึ่งจะเกี่ยวข้องกับจลนศาสตร์ของอนุภาค และพจน์ที่สองจะเกี่ยวเนื่องกับการชนกันของอนุภาค

$$P_s = \varepsilon_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1 + e) \varepsilon_s^2 g_o \theta_s \quad (3.12)$$

g_o คือ ฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมีซึ่งจะมีค่ามากเมื่อสัดส่วนปริมาตรของแข็งมีค่า

เข้าใกล้สัดส่วนปริมาตรของแข็งขณะที่อัดตัวแน่น ($\varepsilon_{s,\max} = 0.60$)

$$g_o = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (3.13)$$

e คือ ค่าสัมประสิทธิ์การชน

$e = 1$ คือ การชนแบบยืดหยุ่นซึ่งจะไม่มีสูญเสียพลังงาน

$e = 0$ คือ การชนซึ่งจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดระหว่างการชน

$0 < e < 1$ คือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งจะสูญเสียพลังงานระหว่างการชน

ความหนืดเนื่องจากความเค้นจะประกอบด้วยพจน์ของจลนศาสตร์ การชน และแรงเสียดทานซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมของอนุภาคของแข็ง

$$\mu_s = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p g_o (1+e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} + \frac{10 \rho_s d_p \sqrt{\pi \theta}}{96(1+e) g_o \varepsilon_s} \left[1 + \frac{4}{5} \varepsilon_s g_o (1+e) \right]^2 \quad (3.14)$$

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)

ความหนืดรวมของอนุภาคเป็นตัววัดความต้านทานของอัดและการขยายตัว

$$\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_p g_o (1+e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.15)$$

พลังงานกวัตแวงเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (γ_s)

$$\gamma_s = 3 \varepsilon_s^2 \rho_s g_o \theta_s (1-e^2) \left[\frac{4}{d_p} \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \right] \quad (3.16)$$

พลังงานกวัตแวงเนื่องจากการนำ (κ_s)

$$\kappa_s = \frac{150 \rho_s d_p \sqrt{\theta_s \pi}}{384(1+e) g_o} \left[1 + \frac{6}{5} g_o \varepsilon_s (1+e) \right]^2 + 2 \varepsilon_s^2 \rho_s d_p g_o (1+e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.17)$$

แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแก๊สและของแข็งที่เลือกมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ แบบจำลองแรงต้านของ Gidaspow แบ่งช่วงการคำนวณ เป็น 2 ช่วง แบบเบาบางและหนาแน่น แบบจำลอง Wen และ Yu ใช้สำหรับทำนายในบริเวณที่มีสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเบาบางและช่วงความหนาแน่นของของแข็งหนาแน่น ใช้สมการ Ergun

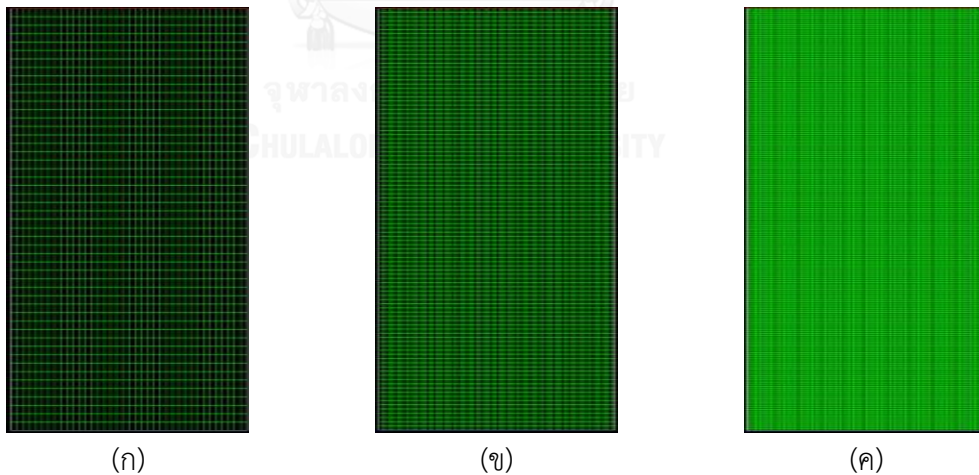
$$\varepsilon_g \leq 0.8, \beta_{gs} = 150 \frac{(1-\varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_g) \rho_g |v_g - v_s|}{d_p} \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_g > 0.8, \beta_{gs} = \frac{3}{4} \frac{(1-\varepsilon_g) \varepsilon_g}{d_p} \rho_g |v_g - v_s| C_{D0} \omega \varepsilon_g^{-2.65} \quad (3.19)$$

โดยที่ C_{D0} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (-)

3.1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของจำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณ (Grid independency test)

เนื่องจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นการคำนวณต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานซึ่งการทดลองนี้จะวัดความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณที่จะไม่ขึ้นกับจำนวนของเซลล์ เพื่อทำการหาขนาดจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและใช้เวลาน้อยที่สุด ในงานวิจัยส่วนแรกนี้ได้เลือกใช้เซลล์ที่มีระยะห่างของช่องกริดเท่ากัน (Uniform) ซึ่งค่าที่เลือกมานั้นมีทั้งหมด 1,900 เซลล์ (38x50) , 7,500 เซลล์ (75x100) และ 30,000 เซลล์ (150x200) แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการแบ่งเซลล์คำนวณ (ก) 1,900 (ข) 7,500 (ค) 30,000 เซลล์

3.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่ส่งผลต่อดัชนีการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟองแก๊ส

ในขั้นตอนนี้จะอธิบายการตั้งค่าแบบจำลองอย่างคร่าวๆ ซึ่งจะใช้โปรแกรม 2 โปรแกรม คือ GAMBIT และ ANSYS FLUENT

ขั้นตอนของโปรแกรม GAMBIT 1. สร้างรูปทรงแบบจำลอง (Geometry) 2. กำหนดจำนวนกริดที่ใช้ในการคำนวณ (Mesh) 3. กำหนดชนิดขอบเขต (Boundary) 4. กำหนดช่วงขอบเขต (Continuum type)

ขั้นตอนของโปรแกรม ANSYS FLUENT 1. เลือกสมการอนุรักษ์ (Conservation) และสมการเสริมที่ใช้ในการคำนวณ เลือกชนิดของแบบจำลองการไหล วัฏภาคเดียว หรือ หลายวัฏภาค (Multiphase) คำนวณที่สถานะคงตัว (Steady state) หรือสถานะไม่คงตัว (Unsteady state)

2. เลือกสารที่ใช้ในแบบจำลอง (Materials) 3. กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary condition) 4. กำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition) 5. กำหนดจำนวนรอบการคำนวณซ้ำ (Iteration)

ขั้นตอนการจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง จำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT มีการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3.1 [3]

โดยขั้นแรกจะทำการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ กับ ผลการทดลองจริงของ Jung และคณะ โดยกำหนดขั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Time step) 0.0001 วินาที คำนวณซ้ำ 20 ครั้งต่อหนึ่งเวลา ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด 20 วินาที ผลคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้นี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงแบบที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นในระบบ (Cold flow model) เพื่อหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่จะใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรม และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟองแก๊ส หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ไปวิเคราะห์ผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งต่อดัชนีการผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) โดยตัวแปรที่ทำการศึกษามีดังนี้

1. ของแข็งที่เลือกมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ นิกเกิลออกไซด์ ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยขนาดของอนุภาคที่เลือกมาศึกษาแบ่งเป็น 2 ขนาด คือ 0.00020 และ 0.00060 เมตร [24]

2. ความหนาแน่นของอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์ ที่ค่า 1,350 และ 2,350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [24]

3. ความสูงเบดเริ่มต้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ ที่อัตราส่วน 0.5 ถึง 0.75 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ [25]

4. ความเร็วแก๊สป้อนเข้า ป้อนเข้าด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ ที่ความเร็ว 1.5 ถึง 1.75 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน (Minimum fluidization velocity) [25]

การทดลองนี้จะออกแบบการทดลองแบบ 24 หรือมีการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง สรุปได้ดังตารางที่ 3.2 และตัวแปรตอบสนองที่จะมาใช้วัดระดับการผสม (Degree of mixing) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของของแข็งทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอเซชันแบบพองแก๊ส [3]

Description	Value
ความดันที่ใช้ดำเนินการ (Pa)	101325
ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3)	1.22
ความหนืดของแก๊ส ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)	1.82×10^{-5}
ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (kg/m^3)	2500
ขนาดอนุภาคของแข็ง (μm)	530
สัมประสิทธิ์การชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของแข็ง (-)	0.99
สัมประสิทธิ์การชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งและผนัง (-)	1
Specularity coefficient (-)	0.60
Solid inlet volume fraction at maximum packing limit (-)	0.63
ความเร็วแก๊สที่ป้อนเข้าระบบ (m/s)	0.59

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลอง 2^4 ของการศึกษาตัวแปรดำเนินการ กรณีไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี

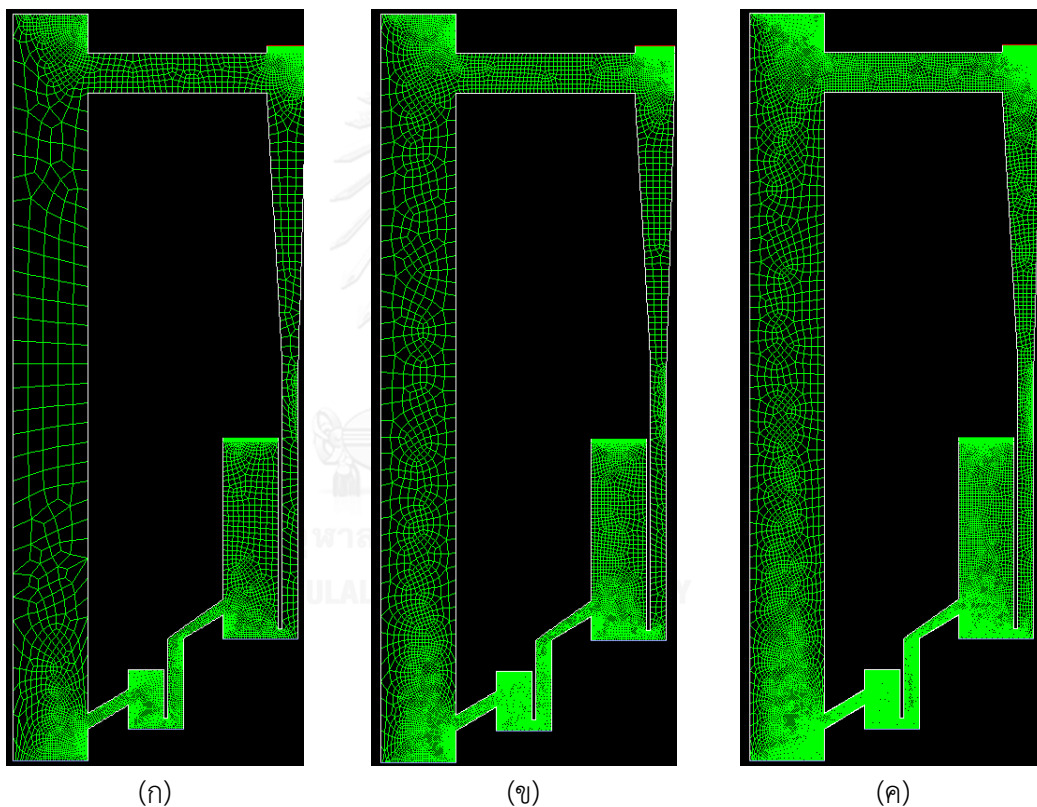
กรณี	ขนาดของอนุภาค (micron)	ความสูงเบด เริ่มต้น(m)	ความหนาแน่นของ ของแข็ง(kg/m ³)	ความเร็วแก๊ส ป้อนเข้า(m/s)
1	200	0.50D	1,300	1.5Umf
a	600	0.50D	1,300	1.5Umf
b	200	0.75D	1,300	1.5Umf
ab	600	0.75D	1,300	1.5Umf
c	200	0.50D	2,350	1.5Umf
ac	600	0.50D	2,350	1.5Umf
bc	200	0.75D	2,350	1.5Umf
abc	600	0.75D	2,350	1.5Umf
d	200	0.50D	1,300	1.75Umf
ad	600	0.50D	1,300	1.75Umf
bd	200	0.75D	1,300	1.75Umf
abd	600	0.75D	1,300	1.75Umf
cd	200	0.50D	2,350	1.75Umf
acd	600	0.50D	2,350	1.75Umf
bcd	200	0.75D	2,350	1.75Umf
abcd	600	0.75D	2,350	1.75Umf

3.3 การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกิริยาเคมี

ในส่วนการหาแบบจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกิริยาเคมีจะทำการทดสอบความเป็นอิสระของจำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณ (Grid independency test)

3.3.1 การทดสอบความเป็นอิสระของจำนวนกริดที่เหมาะสมในการคำนวณ (Grid independency test)

เนื่องจากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นการคำนวณต้องใช้ระยะเวลาค่อนข้างนานซึ่งการทดลองนี้จะวัดความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณที่จะไม่ขึ้นกับจำนวนของเซลล์ เพื่อทำการหาขนาดจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องและใช้เวลาน้อยที่สุด ในงานวิจัยส่วนแรกนี้ได้เลือกใช้เซลล์ที่มีระยะห่างของช่องกริดไม่เท่ากัน (Non-Uniform) ซึ่งค่าที่เลือกมานั้นมีทั้งหมด 8,334 เซลล์, 17,732 เซลล์ และ 35,979 เซลล์ แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงการแบ่งเซลล์คำนวณ (ก) 8,334 (ข) 17,732 (ค) 35,979 เซลล์

3.4 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction model)

เนื่องจากงานวิจัยนี้การจำลองภาวะการไหลในส่วนที่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีนั้น จะต้องทำการเขียนโปรแกรมเพิ่มชุดสมการที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยมีปฏิกิริยาออกซิเดชันของแก๊สออกซิเจนกับโลหะนิกเกิล ปฏิกิริยารีดักชันของแก๊สเชื้อเพลิงกับโลหะนิกเกิลออกไซด์ แก๊สเชื้อเพลิง มี

องค์ประกอบสัดส่วนร้อยละโดยปริมาตร คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ 44.5 % ไฮโดรเจน 22.22 % คาร์บอนไดออกไซด์ 11.11 % และ ไอน้ำ 22.22% อ้างอิงจากงานวิจัยของ Wang และคณะ [26] และปฏิกิริยาอวอเทอร์แก๊สชิฟต์ (Water gas shift) เนื่องมาจากในปฏิกิริยานี้แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ปฏิกิริยาเคมีแบบเอกพันธ์ (Homogenous reactions) และ ปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous reactions) ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Rate constant) นั้น อ้างอิงจากงานวิจัยของ Wang และคณะ [27] แสดงดังตารางที่ 3.3 และเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ โลหะออกไซด์จะถูกออกซิไดซ์ด้วยแก๊สเชื้อเพลิงและรีดิวซ์ด้วยออกซิเจนกลับเป็นโลหะออกไซด์อีกครั้ง ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยแก๊สเชื้อเพลิงในฝั่งเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน (Endothermic reaction) หรือคายความร้อน (Exothermic reaction) ก็ได้ขึ้นกับชนิดของโลหะออกไซด์ และปฏิกิริยารีดักชันด้วยแก๊สออกซิเจนในฝั่งเครื่องปฏิกรณ์อากาศเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction) ในงานวิจัยนี้เลือกแบบจำลองแกนกลางหดตัว (Shrinking core model, SCM) มาใช้ในการจำลองการเกิดปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการเผาไหม้แบบวงปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัฏภาคของแข็งและแก๊สซึ่งเป็นปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ โดยสมการจะแสดงดังนี้

$$(-r)_j = \frac{\alpha_p Y_{NiO}}{r_{g,NiO}} k_j C^n \quad (mol\ m^{-3}\ s^{-1}) \quad (3.20)$$

โดย j , C , n และ r_g สัญลักษณ์เหล่านี้คือ จำนวนของปฏิกิริยาเคมี ($j=1,2$) , ความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิง , อันดับของปฏิกิริยา (Order of reaction) และรัศมีเฉลี่ยของอนุภาค निकิลออกไซด์ตามลำดับ และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยานั้นสมมุติว่าให้เป็นไปตามสมการ Arrhenius ขึ้นกับอุณหภูมิ α_p สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง และ Y_i คือ สัดส่วนโดยโมลของโลหะออกไซด์ [28]

ตารางที่ 3.3 อัตราการเกิดปฏิกิริยา และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา [27]

	H2	CO	O2
$k_0(mol^{1-n}m^3n^{-2}s^{-1})$	0.15	0.059	0.84
$E_0(kJ/mol)$	5	5	22
n	0.4	0.6	0.7

สมการปฏิกิริยาเคมีฝั่งเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 3 ปฏิกิริยา

- 1).
$$H_2(g) + NiO(s) \longrightarrow Ni(s) + H_2O(g)$$

$$\Delta H_{r1} = -2.1 \text{ kJ / mol}$$

ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์
- 2).
$$CO(g) + NiO(s) \longrightarrow Ni(s) + CO_2(g)$$

$$\Delta H_{r2} = -43.3 \text{ kJ / mol}$$

ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์
- 3).
$$CO(g) + H_2O(g) \longleftrightarrow CO_2(g) + H_2$$

$$\Delta H_{r2} = -41.1 \text{ kJ / mol}$$

ปฏิกิริยาเอกพันธ์

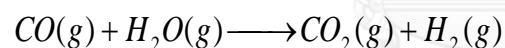
สมการปฏิกิริยาเคมีฝั่งเครื่องปฏิกรณ์อากาศ 1 ปฏิกิริยา

- 4).
$$O_2(g) + 2Ni(s) \longrightarrow 2NiO(s)$$

$$\Delta H_{r2} = -479 \text{ kJ / mol}$$

ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

สำหรับปฏิกิริยาที่ (2) เป็นปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ คือ ปฏิกิริยาอวตอร์แกสิฟต์



$$\Delta H_{r4} = -41.09 \text{ kJ / mol}$$

เขียนเป็นสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า (Forward rate) และค่าคงที่สมดุล ได้

$$r(\text{kmol} / \text{m}^3 \cdot \text{s}) = d[CO] / dt = k_0 e^{-E/RT} [H_2]^\alpha [CO_2]^\beta \quad (3.21)$$

$$K_{eq} = \exp(-4.33 + 4577.8/T)$$

เมื่อเขียนเป็นสมการที่สภาวะสมดุลเคมี (Chemical equilibrium)

$$r = d[CO] / dt = k_0 e^{-E/RT} [H_2]^\alpha [CO_2]^\beta - \frac{1}{K_{eq}} e^{-Ea/RT} [H_2O][CO](\text{kmol} / \text{m}^3 \cdot \text{s}) \quad (3.22)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์และสมการ นั้นอ้างอิงจากงานวิจัย ของ Bustamante และคณะ [29] ดังตารางที่

ตารางที่ 3.4 ค่าสัมประสิทธิ์ของปฏิกิริยาอวเตอรแก๊สซิปต์ [29]

$k_0(\text{mol}^{1-n}\text{m}^{3n-2}\text{s}^{-1})$	2.17×10^{-7}
$E_0(\text{kJ/mol})$	192.9
α	1/2
β	1

การเขียนสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีทั้ง เอกพันธ์และวิวิธพันธ์ เพิ่มลงไปใน ANSYS FLUENT นั้นต้องเขียนโดยใช้โปรแกรมภาษา C ลงในฟังก์ชันเพิ่มเติม User Define Function (UDF) รายละเอียดของการเขียนฟังก์ชันอยู่ใน ภาคผนวก ค

3.5 ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) ที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

3.5.1 การกำหนดคุณสมบัติของแต่ละวัสดุภาคที่ใช้ในการจำลองภาวะ

ขั้นตอนการจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง หลังจากสร้างรูปทรงทางเรขาคณิตของแบบจำลองด้วยโปรแกรม GAMBIT แล้วจะทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT มีการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในแบบจำลองทั้งนี้ ทั้งภาวะการไหลแบบไม่เกิดปฏิกิริยา (Cold flow) และภาวะการไหลแบบเกิดปฏิกิริยา จะใช้คุณสมบัติทางกายภาพแต่ละวัสดุภาคเหมือนกัน แสดงดังตารางที่ 3.5 และสำหรับแบบจำลองการไหลแบบไม่เกิดปฏิกิริยา (Cold flow) จะกำหนดวัสดุภาคแก๊ส ประกอบไปด้วยอากาศที่มีองค์ประกอบประกอบด้วย ไนโตรเจนร้อยละ 71 % โดยมวล ออกซิเจน 22 % โดยมวล แก๊สเฉื่อย อื่นๆ 1 % และ วัสดุภาคของแข็งกำหนดเป็นนิกเกิลออกไซด์ (NiO:NiAlO₄) และแบบจำลองการไหลแบบเกิดปฏิกิริยาเคมี (Hot flow) วัสดุภาคแก๊สประกอบด้วย แก๊สออกซิเจน , แก๊สไนโตรเจน , น้ำ , แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ , แก๊สไฮโดรเจน , แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ วัสดุภาคของแข็ง ประกอบด้วย นิกเกิล (Ni) และนิกเกิลออกไซด์ (NiO:NiAlO₄)

3.5.2 การกำหนดภาวะขอบที่ใช้ในการจำลองภาวะ

ในการจำลองอุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ในการเผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี โดยจะกำหนดภาวะขอบที่ใช้ในการจำลองโดยกำหนด ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสองในทิศทางติดลบแกน Y (แกน Y ทำมุมตั้งฉากกับพื้นผิวโลก) และค่าความดันในระบบเท่ากับ 101325 Pa อุณหภูมิในระบบ 300 K กรณีระบบการไหลแบบไม่เกิดปฏิริยา และอุณหภูมิในระบบ 773 K และ 873 K สำหรับกรณีระบบการไหลแบบเกิดปฏิริยา โดยภาวะขอบสรุปไว้ดังตารางที่ 3.6 และ 3.7

สมมุติฐานที่ใช้ในกรณีศึกษาการไหลแบบไม่เกิดปฏิริยาเคมี (Cold flow) ภายในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี

1. แบบจำลองการไหลสองวัฏภาคแก๊สและของแข็ง เป็นแบบ 2 มิติ กำหนดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสองในทิศทางลบของแกน Y
2. ของแข็งที่ใช้ในแบบจำลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนกันหมด
3. ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์อากาศจะถูกบดด้วยอากาศความเร็ว 1.1 เมตรต่อวินาที และทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะถูกบดเข้าด้วยอากาศความเร็ว 0.19 เมตรต่อวินาที ทางเข้าพอดซิลจะบดอากาศที่ความเร็ว 0.087 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะมีนิกเกิลออกไซด์อัดตัวอยู่ในเครื่องทั้งสอง ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งเริ่มต้น 0.45 ความดันบริเวณทางออกของไซโคลนและความดันที่ทางออกเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ
4. ที่ผนังกำหนดให้ผนังของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นสภาวะที่ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวปกติของของไหลตั้งค่าเป็นเงื่อนไขไม่ลื่นไถล (Non-slip condition) หรือความเร็วเท่ากับศูนย์ ค่าสัมประสิทธิ์การชนกันระหว่างอนุภาคของแข็ง เท่ากับ 0.95 ค่าสัมประสิทธิ์การชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งและผนังเท่ากับ 0.95 และค่าสัมประสิทธิ์สเปคูลาริตี เท่ากับ 0.6
5. จำนวนเซลล์ทั้งหมดในการจำลองภาวะการไหล เท่ากับ 8,334 เซลล์ 17,732 เซลล์ และ 35,979 เซลล์
6. รูปทรงทางเรขาคณิตของไซโคลนไม่มีผลต่อความเร็วการตกกลับลงมาของอนุภาคและความดันลดในเครื่องปฏิกรณ์

จากนั้นจะทำการสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองคณิตศาสตร์ กับ ผลการทดลองจริงของ Johansson และคณะ [21] โดยกำหนดขั้นเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Time step) 0.001 วินาที คำนวณซ้ำ 20 ครั้งต่อหนึ่งเวลา ใช้เวลาคำนวณทั้งหมด 30 วินาที ผลคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้นี้จะถูก

นำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงแบบที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นในระบบ (Cold flow model) เพื่อหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่จะใช้สำหรับอธิบายพฤติกรรม และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง หลังจากนั้นจะนำแบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ไปวิเคราะห์ผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง เครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (Fuel reactor) โดยตัวแปรที่ทำการศึกษามีดังนี้

1. ของแข็งที่เลือกมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ นิกเกิลออกไซด์ ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยขนาดของอนุภาคที่ศึกษา คือ 0.00015 และ 0.000175 เมตร [21]
2. อุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิง ที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง 773 และ 873 K [30]
3. ความสูงเบดเริ่มต้น ที่อัตราส่วน 0.75 ถึง 1 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง [25]
4. ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า ที่ป้อนเข้าด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ ที่ความเร็ว 1.25 ถึง 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชัน (Minimum fluidization velocity) [31]

สมมุติฐานที่ใช้ในกรณีศึกษาการไหลแบบเกิดปฏิกิริยาเคมี (Hot flow) ภายในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกรณ์เคมี

1. แบบจำลองการไหลสองวัฏภาคแก๊สและของแข็ง เป็นแบบ 2 มิติ กำหนดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสองในทิศทางลบของแกน Y
2. ของแข็งที่ใช้ในแบบจำลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและคุณสมบัติทางกายภาพเหมือนกันหมด

3. ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์อากาศจะถูกป้อนด้วยอากาศความเร็ว 1.73 เมตรต่อวินาที โดยมีสัดส่วนโดยมวลของออกซิเจนร้อยละ 0.22 และไนโตรเจน 0.78 โดยมวล ทางเข้าเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าด้วยแก๊สเชื้อเพลิง ที่มีองค์ประกอบ คาร์บอนมอนอกไซด์ 0.445 % ไฮโดรเจน 0.2222 คาร์บอนไดออกไซด์ 0.111 % และ ไอน้ำ 0.222 % โดยปริมาตร อ้างอิงจากงานวิจัยของ Wang และคณะ [26] ทางเข้าพอดซิลจะป้อนแก๊สไนโตรเจนที่ 100 % โดยมวล ซึ่งจะมิเน็กออกไซด์อัดตัวอยู่ในเครื่องเผาไหม้แบบวงปฏิกรณ์เคมีมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งเริ่มต้น 0.45 ค่าความดันบริเวณทางออกของไซโคลอนมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ และความดันที่ทางออกเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงมีค่าเท่ากับ -800 Pa สาเหตุที่ตั้งค่าที่ความดันติดลบที่ทางออก เพราะต้องการให้แก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแก๊สเชื้อเพลิงที่ทำปฏิกิริยากันนั้น ถูกดูดออกจากเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ไม่เกิดการรั่วไหลกลับไปยังพอดซิลและดาวคัมเมอร์ อ้างอิงจากงานของ Gullichsen [32]

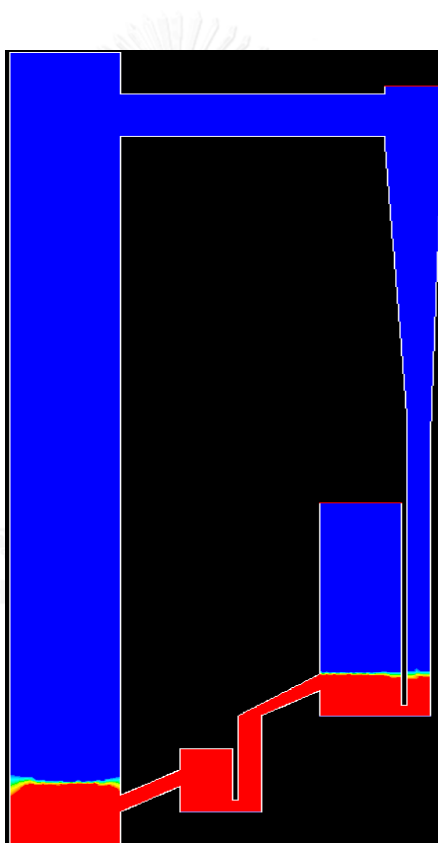
4. ที่ผนังกำหนดให้ผนังของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นสภาวะที่ความเร็วในแนวสัมผัสและความเร็วในแนวปกติของแก๊สตั้งเงื่อนไข ไม่ลื่นไถล (Non-slip condition) หรือความเร็วเท่ากับศูนย์ ค่า

สัมประสิทธิ์การชนกันระหว่างอนุภาคของแข็ง เท่ากับ 0.95 ค่าสัมประสิทธิ์การชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งและผนังเท่ากับ 0.95 และค่าสัมประสิทธิ์สเปควลาริตี เท่ากับ 0.6

5. กำหนดให้อุณหภูมิ ภายในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี และ ที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง และ ไฮโดรเจนมีค่าเท่ากันทั้งหมดในแต่ละกรณีที่ตั้งศึกษานั้นๆ

6. รูปทรงทางเรขาคณิตของไฮโดรเจนไม่มีผลต่อความเร็วการตกกลับลงมาของอนุภาคและความดันลดในเครื่องปฏิกรณ์

การทดลองนี้จะออกแบบการทดลองแบบ 2^4 หรือมีการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง สรุปได้ดังตารางที่ 3.8 และตัวแปรตอบสนองที่จะมาใช้ อัตราการเกิดปฏิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง



รูปที่ 3.5 คอนทัวร์แสดงสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งเริ่มต้น ในเครื่องเผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี

ตารางที่ 3.5 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้ว่องปฏิกิริยาเคมีในการไหลแบบไม่เกิดปฏิกิริยา (Cold flow) [22]

คำอธิบาย	หน่วย	ข้อมูลจากการทดลอง	ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง
ความสูงเครื่องปฏิกรณ์อากาศ	m	1.9	1.9
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของแข็ง	mm	0.15	0.15
ความหนาแน่นของของแข็ง	Kg/m ³	2,600	2,600
ฟลักซ์ของของแข็ง	Kg/m ² s	26.0-162.5	89.07
อุณหภูมิที่ใช้เดินระบบ	°C	20	30
ความหนาแน่นของแก๊ส	Kg/m ³	1.18	1.17
ความหนืดของแก๊ส	Pa.S	1.81×10 ⁻⁵	1.82×10 ⁻⁵
ความเร็วแก๊สป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์อากาศ	m/s	0.75-1.15	1.1
ความเร็วแก๊สป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง	m/s	0.09-0.31	0.19
ความเร็วแก๊สป้อนเข้าพอดซีล	m/s	0.065-0.097	0.087
สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาค-อนุภาค	-	ไม่มี	0.95
สัมประสิทธิ์การชนระหว่างอนุภาค-ผนัง	-	ไม่มี	0.95

คำอธิบาย	หน่วย	ข้อมูลจากการทดลอง	ข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลอง
น้ำหนักของของแข็งทั้งหมดในเครื่อง	kg	9.0	Case1 : 9 kg Case2 : 15 kg
ความสูงเบดฟิ่งเครื่องปฏิกรณ์อากาศ	cm	ไม่มี	Case1 : 15 cm (4.9kg) Case2 : 25 cm (8.3kg)
ความสูงเบด ฟิ่งเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง	cm	ไม่มี	Case1 : 10 cm (3.2kg) Case2 : 15 cm (5.0kg)
ความสูงเบดในพอทซีล	cm	ไม่มี	Case1 : 3 cm (0.9kg) Case2 : 5 cm (1.7kg)
สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งเริ่มต้น	-	-	0.45
Time steps	sec	ไม่มี	1×10^{-5}
แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค	-	-	Gidaspow drag model

ตารางที่ 3.6 ภาวะขอบที่ใช้ในแบบจำลองอุทกพลศาสตร์เครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้วงปฏิริยาเคมี [22]

Boundary condition	Values
Gas velocity in Pot seal	0.087 m/s
Gas velocity in air reactor	1.1 m/s
Pressure gauge	
Outlet of fuel reactor	0 Pa
Outlet of cyclone	0 Pa

ตารางที่ 3.7 ภาวะขอบที่ใช้ในแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้วงปฏิริยาเคมีแบบเกิดปฏิริยาเคมี

Boundary condition	Values
Gas velocity in Pot seal	0.087m/s
Gas velocity in air reactor	1.73 m/s
Pressure gauge	
Outlet of fuel reactor (Hot flow)	-800 Pa
Outlet of cyclone	0 Pa

ตารางที่ 3.8 การออกแบบการทดลอง 2^4 ของการศึกษาตัวแปรดำเนินการ กรณีเกิดปฏิกิริยาเคมี

กรณี	ขนาดของอนุภาค (micron)	ความสูงเบดใน เครื่องปฏิกรณ์ เชื้อเพลิง(m)	อุณหภูมิแก๊ส เชื้อเพลิง ป้อนเข้า (K)	ความเร็วแก๊ส เชื้อเพลิงป้อนเข้า (m/s)
1	150	0.75D	773	1.25Umf
a	175	0.75D	773	1.25Umf
b	150	1.0D	773	1.25Umf
ab	175	1.0D	773	1.25Umf
c	150	0.75D	873	1.25Umf
ac	175	0.75D	873	1.25Umf
bc	150	1.0D	873	1.25Umf
abc	175	1.0D	873	1.25Umf
d	150	0.75D	773	1.5Umf
ad	175	0.75D	773	1.5Umf
bd	150	1.0D	773	1.5Umf
abd	175	1.0D	773	1.5Umf
cd	150	0.75D	873	1.5Umf
acd	175	0.75D	873	1.5Umf
bcd	150	1.0D	873	1.5Umf
abcd	175	1.0D	873	1.5Umf

บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะแสดงผลที่ได้ใน บทที่ 3 ได้แก่ การจำลองการคำนวณเชิงอุทกพลศาสตร์แบบสองมิติ ภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงในการเผาไหม้แบบเคมีคอลลูบิง โดยการหาขนาดของเซลล์คำนวณ การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test) ที่สามารถทำนายค่าได้ถูกต้องและใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุด และการหาเวลาที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) เพื่อนำผลคำนวณเชิงตัวเลขที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ซึ่งผลการจำลองกระบวนการไหลแบบไม่เกิดปฏิกิริยา (Cold flow) นี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบดแบบฟองแก๊สระบบแบบกะ (Batch operation) ของ Jung และคณะ [4] และมีการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลกระทบต่อขบวนการผสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบดแบบฟองแก๊ส การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์วงปฏิกิริยาเคมีระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous operation) ของ Johansson และคณะ [21] สุดท้ายยังมีการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

4.1 การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบดแบบฟองแก๊ส

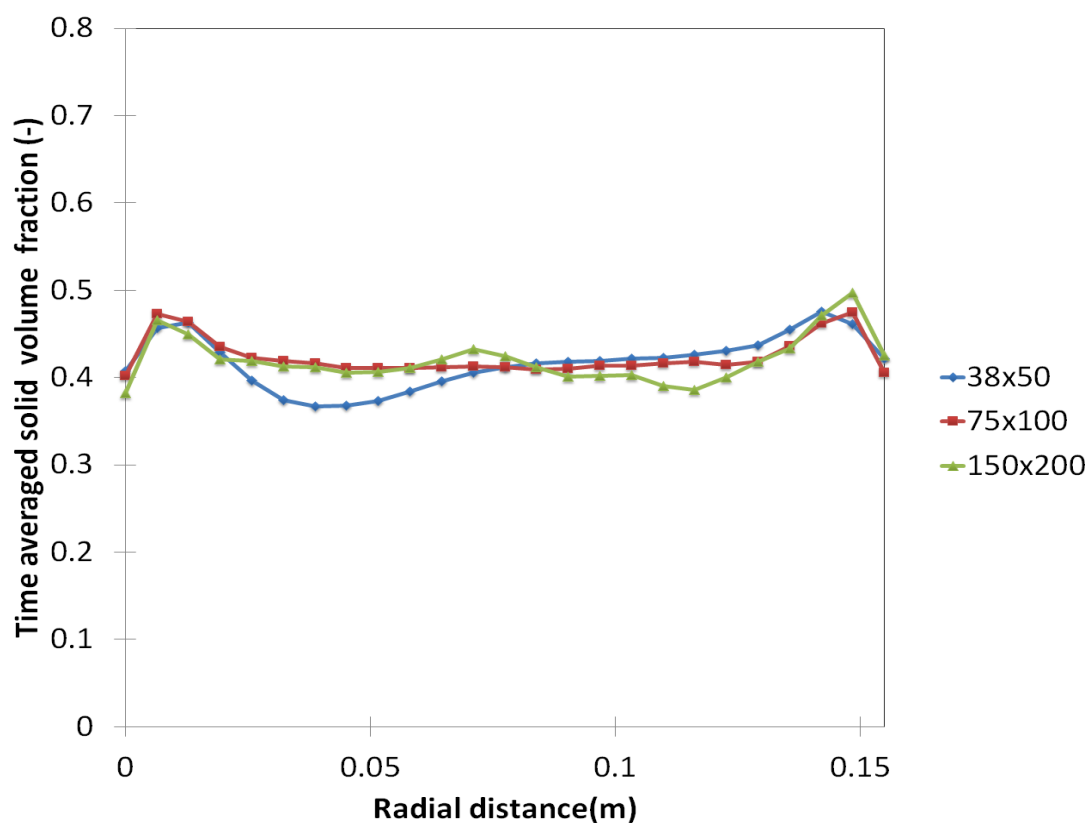
4.1.1 ผลการคำนวณเซลล์ที่เหมาะสมกับการคำนวณ (Grid independency test) และหาเวลาที่ภาวะคงตัว (Steady state)

ในการคำนวณขนาดเซลล์ที่เหมาะสมกับการคำนวณนั้น โดยจำนวนเซลล์นั้นจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของคำตอบที่ได้ หากจำนวนเซลล์น้อย หรือกริดไม่ละเอียดพอจะทำให้คำตอบที่ได้นั้นมีความคลาดเคลื่อนออกจากคำตอบที่ถูกต้อง หากจำนวนเซลล์มาก หรือกริดมีความละเอียดสูงคำตอบที่ได้ก็จะมีคำตอบที่แม่นยำมากขึ้น แต่ก็ต้องใช้เวลาในการคำนวณนานขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงต้องหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมไปใช้ในงานวิจัยส่วนถัดๆไป ในงานวิจัยนี้จะใช้จำนวนเซลล์ ทั้งหมด 3 ค่า 1,900 เซลล์ (38x50) 7,500 เซลล์ (75x100) และ 30,000 เซลล์ (150x200)

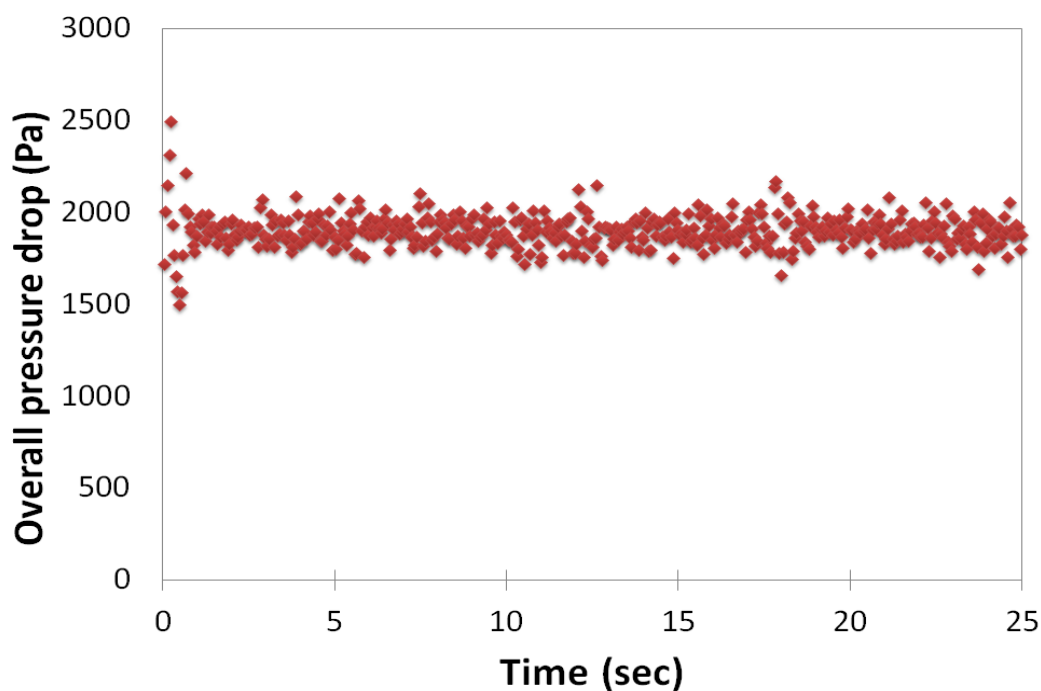
รูปที่ 4.1 แสดงผลการจำลองค่าสัดส่วนของของแข็ง ในแนวนอนมีเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบดแบบฟองแก๊ส ที่ความสูง 0.14 เมตร จะเห็นได้ว่าที่จำนวนเซลล์ 1,900 เซลล์นั้นมีค่าค่อนข้างคลาดเคลื่อนออกจาก 7,500 และ 30,000 จำนวนเซลล์ ค่อนข้างมาก แสดงว่า จำนวนเซลล์ 1,900 เซลล์นั้น ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำนายอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบดแบบฟอง และ

พิจารณา ที่ 7,500 และ 30,000 เซลล์ นั้น ค่าที่ได้มีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงเลือกจำนวนเซลล์ที่ 7,500 เซลล์ (75x100) มาใช้ในงานวิจัยถัดไป

ในการคำนวณหาค่าตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ต่างๆในการทดลองนั้น ต้องมีการหาช่วงเวลา ที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว หรือ ภาวะที่ระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Steady state) เพื่อจะทำการเฉลี่ยค่าตัวแปรที่จะหาเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลคำนวณเชิงตัวเลขและผลการทดลองในห้องปฏิบัติการจริง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.2 แสดงความผันผวนคร่อมเบด ที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งพบว่าความผันผวนจะมีค่าลดลงและแกว่งไปมา ตั้งแต่เวลา 0-25 วินาที และความผันผวนคร่อมเบดเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่ 5 วินาที เป็นต้นไป ดังนั้น จึงเลือก ช่วงเวลา 5-20 วินาที มาหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์ทุกตัว



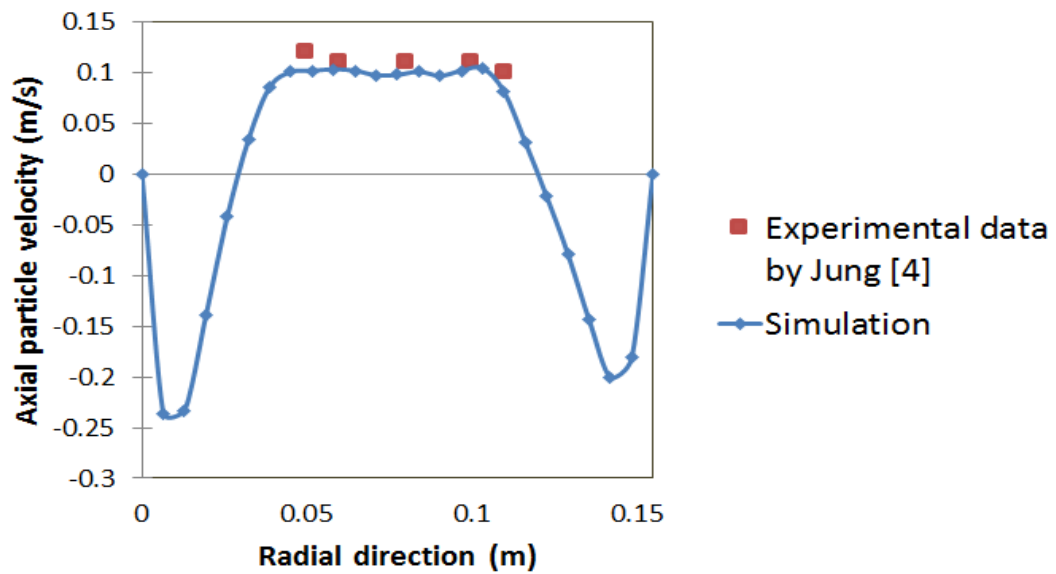
รูปที่ 4.1 ค่าสัดส่วนของของแข็ง ในแนวรัศมีเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองแก๊ส ที่ความสูง 0.14 เมตร ที่จำนวนเซลล์ต่างๆ



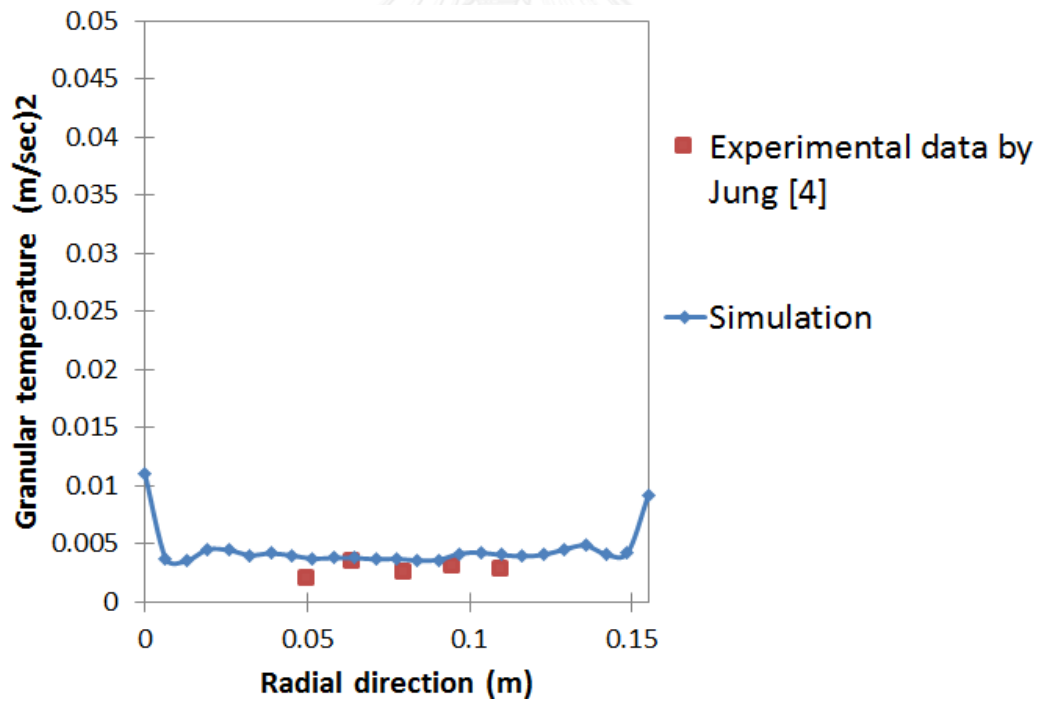
รูปที่ 4.2 ค่าความดันลดคร่อมเบด ที่ระยะเวลา 0-25 วินาที

4.1.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลอง

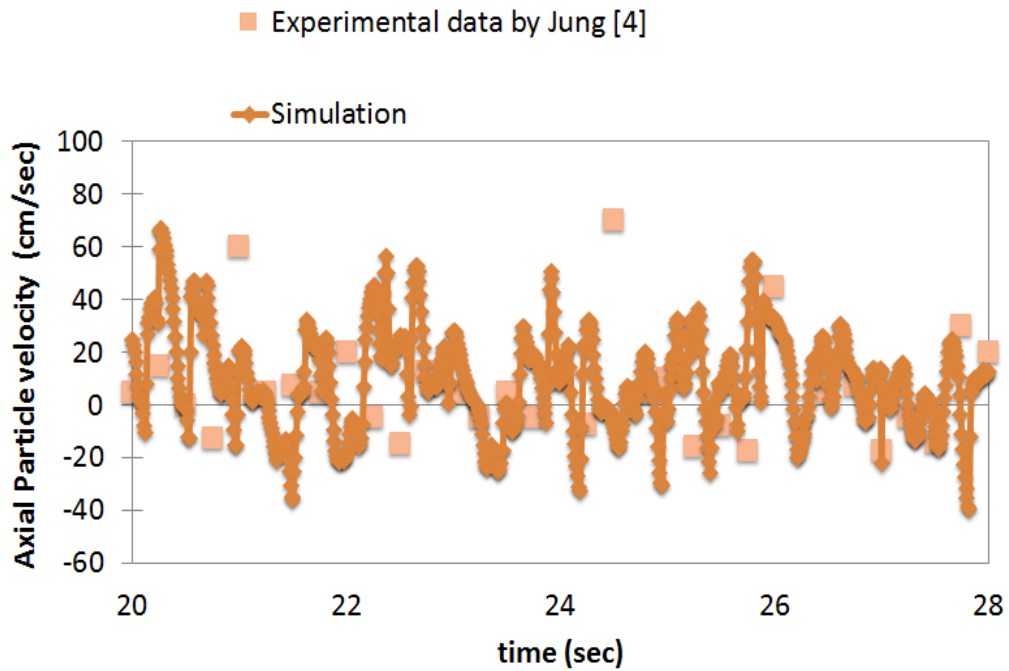
ผลการจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง เทียบกับผลการทดลองของ Jung และคณะ พบว่า ผลจากการใช้แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคของ Gidaspow ให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับการทดลอง [4] แสดงดังรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงความเร็วของของแข็งแนวแกน ในแนวรัศมีของเครื่องปฏิกรณ์ที่ความสูง 0.14 เมตร จะเห็นได้ว่าอนุภาคของแข็งมีความเร็วมากกว่าบริเวณแกนกลางเครื่องและความเร็วมีค่าลดลงบริเวณผนังเครื่องปฏิกรณ์ หากสังเกตค่าสัดส่วนของของแข็ง ในแนวรัศมีที่ความสูง 0.14 เมตร จะพบว่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งจะมีค่ามากกว่าบริเวณผนังเครื่องและเบาบางบริเวณแกนกลางเครื่อง ซึ่งเป็นลักษณะการไหลที่เรียกว่า การไหลแบบแกนในวงนอก (Core-annulus) ผลการเปรียบเทียบ อื่นๆ เช่น อุณหภูมิแกรนูลาร์ ในแนวรัศมี ที่ความสูง 0.14 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.4 ความเร็วของของแข็งในแนวแกนที่ความสูง 0.14 เมตร ที่เวลาช่วง 20-30 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.5 และความเร็วของของแข็งแนวรัศมีที่ความสูง 0.14 เมตร ที่เวลา 20-30 วินาที แสดงดังรูปที่ 4.6 จะพบว่าผลการทำนายพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้นสามารถทำนายผลการทดลองได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ดังนั้น จึงเลือกใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ชุดนี้เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการในการทดลองขั้นต่อไป



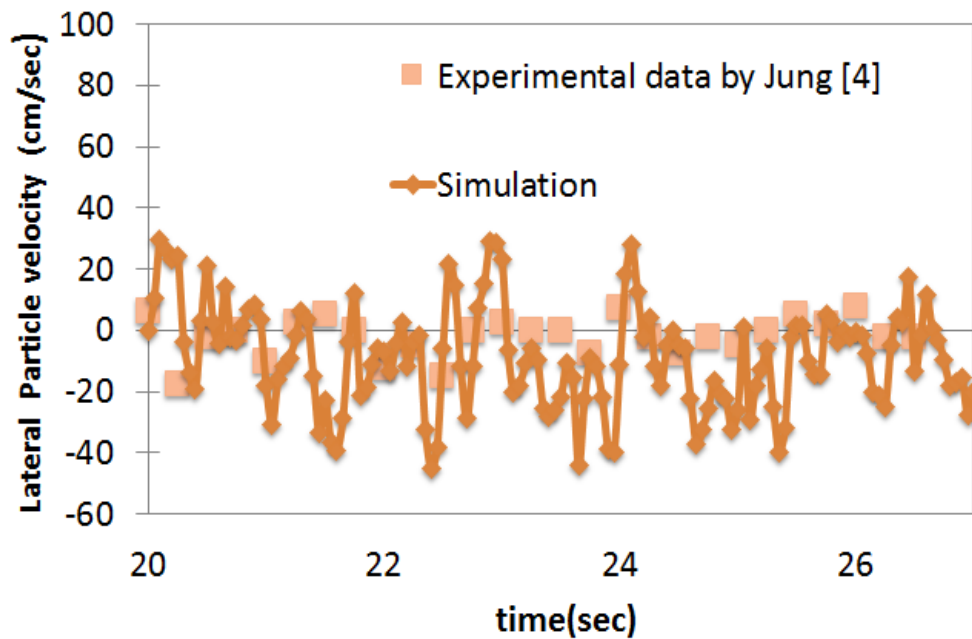
รูปที่ 4.3 ความเร็วของของแข็งแนวแกน ตามแนวรัศมี ที่ความสูง 0.14 เมตร



รูปที่ 4.4 อุณหภูมิแกรนูลาร์ ตามแนวรัศมี ที่ความสูง 0.14 เมตร



รูปที่ 4.5 ความเร็วของของแข็งในแนวแกนที่ความสูง 0.14 เมตร ที่เวลาช่วง 20-28 วินาที



รูปที่ 4.6 ความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูง 0.14 เมตร ที่เวลาช่วง 20-27 วินาที

4.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่ส่งผลต่อดัชนีการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบฟอง

เนื่องมาจากปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous reaction) การที่จะเกิดปฏิกิริยาได้ดี และอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูง แก๊สและของแข็งที่เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีการสัมผัสกันที่ทั่วถึงและมีเวลาสัมผัสกัน (Contact time) ที่นานมากพอเพื่อที่จะให้เกิดการถ่ายโอนมวลระหว่างผ่านฟิล์มต้านทานระหว่างเฟส (film resistance in mass transfer) จนกระทั่งสารตั้งต้นคู่ นั้นเกิดปฏิกิริยากันได้อย่างสมบูรณ์ ในการทดลองส่วนนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ และ ศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการที่จะส่งผลต่อดัชนีการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ ทั้งแนวแกนและแนวรัศมี และหาการกระจายตัวของของแข็งที่มีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งตัวแปรที่เลือกมาศึกษามีทั้งหมด 4 ตัวแปร คือ ขนาดอนุภาคของแข็ง (Particle diameter) ความหนาแน่นของของแข็ง (Bulk density) , อัตราส่วนของความสูงเบดเริ่มต้น ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ (Ratio of initial static bed height to column diameter) และ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (Fluidization velocity) ซึ่งจะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง และจะพิจารณาตัวแปรตอบสนอง (Response surface) ทั้งหมด 2 ตัวแปร คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนและแนวรัศมีของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (Standard deviation of solid volume fraction in axial and radial directions) หรือเรียกว่าเป็นตัวชี้วัดการกระจายตัวของของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ (Mixing index) ซึ่งหากเกิดการกระจายตัวของของแข็งในเครื่องไม่มีความสม่ำเสมอ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่าสูง แต่กลับกัน หากการกระจายตัวมีความสม่ำเสมอของอนุภาคของแข็งและแก๊สเป็นเนื้อเดียวกัน ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานก็จะมีค่าต่ำ ซึ่งการกระจายตัวของของแข็งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงภายในเครื่องปฏิกรณ์

ผลการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ ทั้ง 4 ตัวแปร และ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนและแนวรัศมีของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งหากพิจารณาในแนวแกน พบว่า กรณีที่ 14 ที่ใช้ขนาดอนุภาคของของแข็ง 0.0006 เมตร อัตราส่วนระหว่างความสูงเบดเริ่มต้น ต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.5 เท่า ความหนาแน่นของของแข็ง 2,350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความเร็วแก๊ส 1.75 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน จะให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนที่มีค่าต่ำที่สุด แสดงว่ากรณีนี้จะให้การกระจายตัวของของแข็งที่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันภายในเครื่องปฏิกรณ์ตลอดแนวความสูง ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยากับแก๊สที่ป้อนเข้ามาได้อย่างสมบูรณ์ และ กรณีที่ 7 ใช้ขนาดอนุภาคของของแข็ง 0.0002 เมตร อัตราส่วนระหว่างความสูงเบดเริ่มต้น ต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.75 เท่า ความหนาแน่นของของแข็ง 2,350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความเร็วแก๊ส 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน

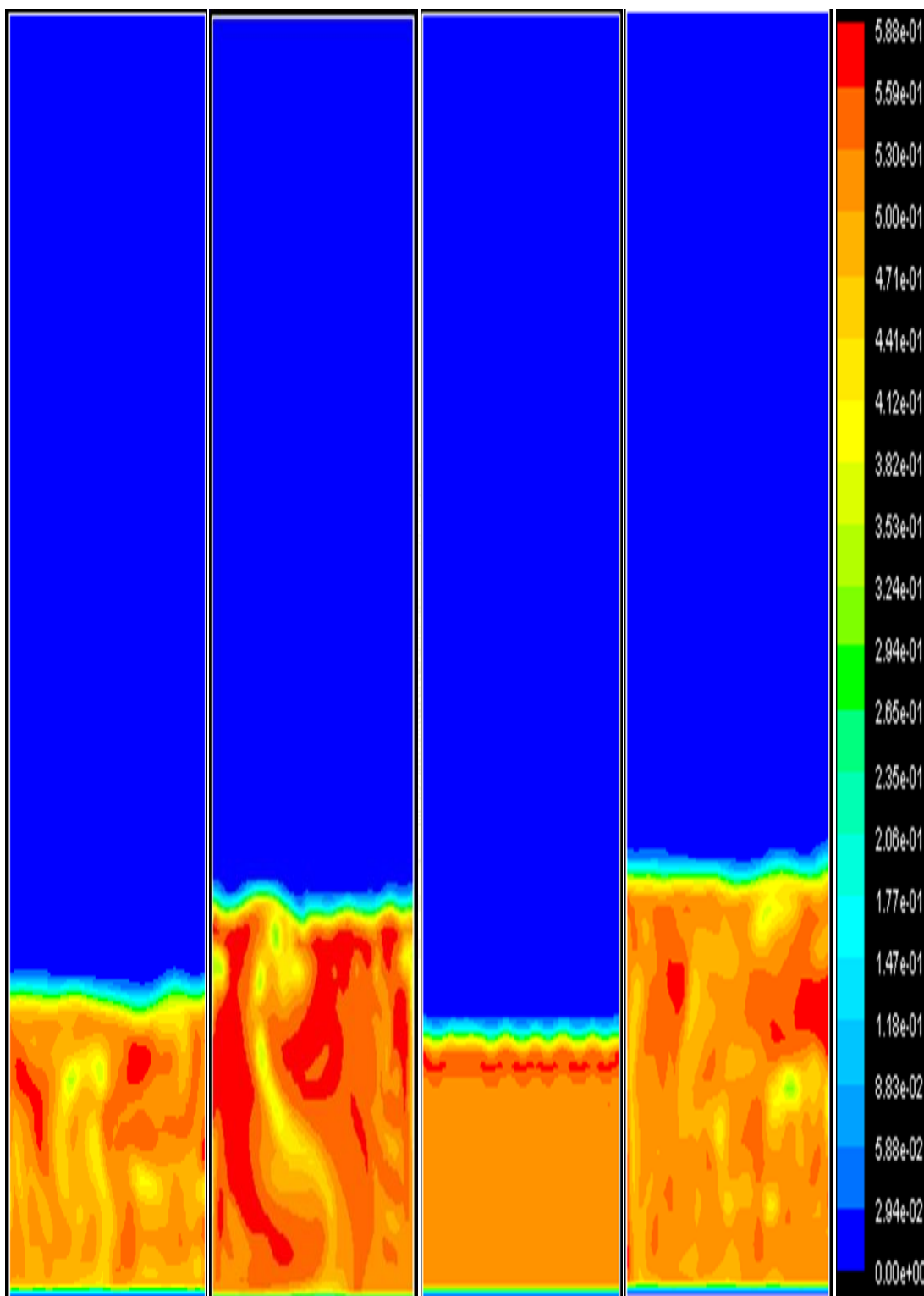
ชั้น จะให้ค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนที่มีค่าสูงที่สุด ซึ่งตามความหมายเชิงกายภาพ คือ ของแข็งมีการรวมตัวกันอยู่ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งในเครื่องปฏิกรณ์ การผสมกันของอนุภาคของแข็ง ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวความสูงเครื่องปฏิกรณ์ หากมองในมุมของปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogenous reactions) นั่นคือเกิดจุดอับนิ่ง (Dead zone) ขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์นั่นเอง ทำให้สารตั้งต้นที่เป็นของไหลทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นอีกตัวที่เป็นของไหลได้ไม่หมด ในปฏิกิริยาวิวิธพันธ์นั้น จะทำให้ของแข็งที่บริเวณนั้นบางส่วนไม่เกิดปฏิกิริยากับก๊าซสารตั้งต้นที่ป้อนเข้ามา ซึ่งผลที่ตามมาจะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยน (Conversion) ของแก๊สที่เป็นสารตั้งต้นน้อยลง

ตารางที่ 4.1 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล 2^4 ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการและค่าดัชนีการผสมในแนวแกนและแนวรัศมี

Case	A (micron)	B (m)	C (kg/m ³)	D (m/s)	SD axial direction	SD radial direction
1	200	0.50D	1,300	1.5Umf	0.1844	4.29E-05
2	600	0.50D	1,300	1.5Umf	0.1774	4.51E-04
3	200	0.75D	1,300	1.5Umf	0.2449	1.17E-03
4	600	0.75D	1,300	1.5Umf	0.2334	1.01E-03
5	200	0.50D	2,350	1.5Umf	0.1846	4.66E-03
6	600	0.50D	2,350	1.5Umf	0.1701	5.72E-04
7	200	0.75D	2,350	1.5Umf	0.2464	3.94E-03
8	600	0.75D	2,350	1.5Umf	0.2235	3.40E-03
9	200	0.50D	1,300	1.75Umf	0.1800	8.35E-04
10	600	0.50D	1,300	1.75Umf	0.1687	3.04E-04
11	200	0.75D	1,300	1.75Umf	0.2377	2.17E-03
12	600	0.75D	1,300	1.75Umf	0.2223	2.29E-03
13	200	0.50D	2,350	1.75Umf	0.1817	1.96E-03
14	600	0.50D	2,350	1.75Umf	0.1594	1.67E-03
15	200	0.75D	2,350	1.75Umf	0.2400	6.42E-03
16	600	0.75D	2,350	1.75Umf	0.2072	3.69E-03

ส่วนกรณีศึกษาการผสมในแนวรัศมีจากตารางที่ 4.1 จะพบว่า กรณีที่ 1 ขนาดอนุภาคของของแข็ง 0.0002 เมตร อัตราส่วนระหว่างความสูงเบตเริ่มต้น ต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.5 เท่า ความหนาแน่นของของแข็ง 1,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความเร็วแก๊ส 1.5 เท่าของความเร็วดำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน นั้นจะให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีที่มีค่าต่ำที่สุด นั้นหมายถึงการกระจายตัวของของแข็งในแนวรัศมีมีค่าสม่ำเสมอ และกรณีที่ 4 ขนาดอนุภาคของของแข็ง 0.0006 เมตร อัตราส่วนระหว่างความสูงเบตเริ่มต้น ต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.75 เท่า ความหนาแน่นของของแข็ง 1,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความเร็วแก๊ส 1.5 เท่าของความเร็วดำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน จะได้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งสูงสุด นั่นคือ การกระจายตัวของของแข็งในแนวรัศมีมีค่าลดลงหากเทียบกับ กรณีที่ 1 ที่มีการกระจายตัวสม่ำเสมอดีที่สุด

ดังนั้นจึงเลือกค่าตัวแปรตอบสนอง ทั้ง 2 ค่า คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีและแนวแกน ในแต่ละกรณีที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละกรณี มาสร้างคอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่เวลา 20 วินาที เพื่อแสดงการกระจายตัวของของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบตแบบพอง ดังรูปที่ 4.7 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคของแข็ง (ก) กรณีที่ 14 (ข) กรณีที่ 7 (ค) กรณีที่ 1 (ง) กรณีที่ 4 และหากจะอธิบาย โดยเปรียบเทียบค่าดัชนีการผสมในแนวแกน ด้วย คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคของแข็งระหว่าง กรณี 14 และ 7 จากคอนทัวร์จะสังเกตเห็นว่าเบต ของกรณี ที่ 7 มีสีแดงเข้มมากกว่า 14 ในความหมายเชิงกายภาพ คือ มีอนุภาคของแข็งอยู่อย่างหนาแน่นที่บริเวณนั้น ทำให้หากคิดค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคของแข็งในแนวแกนทั้งสองกรณีแล้ว กรณี 14 จะมีค่าน้อยกว่ากรณี 7 ทำให้ค่าการกระจายตัวของของแข็งในแนวแกนมีค่าต่ำที่สุด หากเทียบกันทั้ง 4 กรณี และอธิบายค่าดัชนีการผสมในแนวรัศมี ระหว่างกรณี 1 และ 4 จากคอนทัวร์จะสังเกตเห็นว่า กรณีที่ 1 สีส้มมีความสม่ำเสมอกันทั่วทั้งเบต แต่ กรณี 4 สีแดงเข้มปนอยู่ด้วยเล็กน้อย ทำให้การกระจายตัวของของแข็งทั้งในแนวรัศมีและแนวแกนของกรณี 1 นั้นมีค่าต่ำกว่ากรณี 4 ทั้งหมด ซึ่งผลการคำนวณด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งนั้นก็สอดคล้องกับผลคอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคของแข็ง



(ก) กรณี 14 (acd) (ข) กรณี 7 (bc) (ค) กรณี 1 (1) (ง) กรณี 4 (abc)

รูปที่ 4.7 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของอนุภาคของแข็งที่ เวลา 20 วินาที

ในการวิเคราะห์ส่วนสุดท้ายของการศึกษานี้ เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance , ANOVA) จากการนำค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง ในแนวรัศมีและแนวแกนภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบพองแก๊สไปสร้างตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน ซึ่งผลได้ว่าตัวแปรดำเนินการที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญคือ ตัวแปรดำเนินการหลัก ทั้ง 4 ตัว ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) ความสูงเบด (B) ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (C) ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D) อันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของแข็งและความสูงเบด(AB) อันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของแข็งและความหนาแน่นของแข็ง (AC) อันตรกิริยาระหว่างความสูงเบดและความเร็วแก๊สป้อนเข้า (BD) อันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของแข็งและความเร็วแก๊สป้อนเข้า (AD) ตัวแปรเหล่านี้มีผลนัยสำคัญเพราะ ค่า p-value < 0.05 ซึ่งตามทฤษฎี ถ้าตัวแปรใดที่มีค่า p-value ต่ำกว่า 0.05 โดยกำหนด ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตัวแปรนั้นจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติ หรือมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เรียงลำดับผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกนจากมากไปน้อยดังนี้ เฉพาะตัวแปรหลัก ความสูงเบด เริ่มต้น ขนาดอนุภาคของแข็ง ความเร็วแก๊สป้อนเข้า และ ความหนาแน่นของของแข็ง

กล่าวโดยสรุป คือ ผลของตัวแปรหลักทุกตัว และ อันตรกิริยาทุกคู่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน และการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี ซึ่งจากการวิเคราะห์จะได้ว่าตัวแปรดำเนินการที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญคือ ตัวแปรดำเนินการหลัก ทั้ง 3 ตัว ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) ความสูงเบด (B) ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (C) อันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของแข็งและความหนาแน่นของแข็ง (AC) และ อันตรกิริยาระหว่างความสูงเบดและความเร็วแก๊สป้อนเข้า (BD) มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี โดยเรียงลำดับผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีจากมากไปน้อยดังนี้ เฉพาะตัวแปรหลัก ความหนาแน่นของแข็ง ความสูงเบด เริ่มต้น และ ขนาดอนุภาคของแข็ง ในกรณีการวิเคราะห์ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีเนื่องจาก อันตรกิริยาระหว่างความสูงเบดและความเร็วแก๊สป้อนเข้า (BD) มี ค่า p-value < 0.05 จึงต้องนำผลกระทบจากตัวแปรหลักทั้งสองตัวนี้ ความสูงเบด (B) ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D) มาพิจารณาร่วมด้วย

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของของแข็งในแนวแกน เป็นค่าตอบสนอง

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	0.014411836	10	0.001441184	1272.4279	< 0.0001
A	0.001185081	1	0.001185081	1046.3133	< 0.0001
B	0.012605676	1	0.012605676	11129.611	< 0.0001
C	8.05506E-05	1	8.05506E-05	71.11853	0.0004
D	0.000286456	1	0.000286456	252.91303	< 0.0001
AB	4.72656E-05	1	4.72656E-05	41.731045	0.0013
AC	0.000139831	1	0.000139831	123.45712	0.0001
AD	4.19256E-05	1	4.19256E-05	37.016334	0.0017
BD	1.27806E-05	1	1.27806E-05	11.284075	0.0201
ABC	6.63063E-06	1	6.63063E-06	5.8542104	0.0602
ACD	5.64063E-06	1	5.64063E-06	4.9801346	0.0760
Residual	5.66313E-06	5	1.13263E-06		
Cor Total	0.014417499	15			

R-Squared 0.9996

Adj R-Squared 0.9988

Pred R-Squared 0.9960

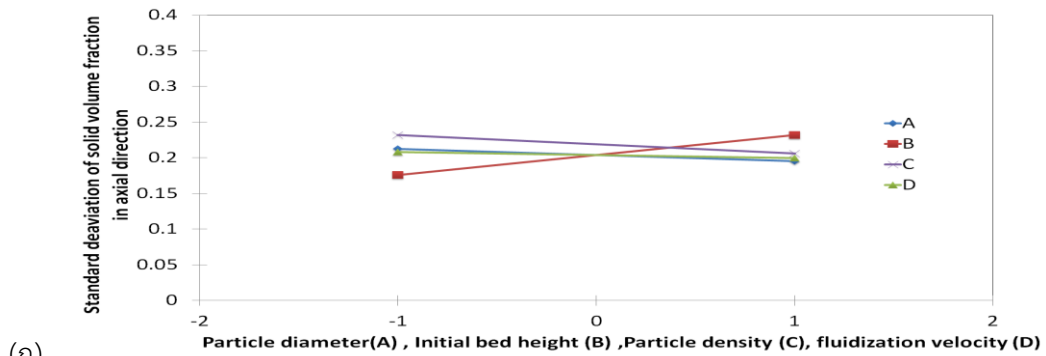
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของของแข็งในแวนอร์คมี เป็นค่าตอบสนอง

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	4.85662E-05	12	4.04719E-06	20.140708	0.0153
A	3.81313E-06	1	3.81313E-06	18.975963	0.0224
B	1.15517E-05	1	1.15517E-05	57.48658	0.0048
C	2.03381E-05	1	2.03381E-05	101.21186	0.0021
D	1.04709E-06	1	1.04709E-06	5.2108236	0.1067
AC	3.50167E-06	1	3.50167E-06	17.425966	0.0250
AD	5.62757E-08	1	5.62757E-08	0.2800545	0.6333
BC	8.01428E-07	1	8.01428E-07	3.9882837	0.1397
BD	2.25518E-06	1	2.25518E-06	11.222832	0.0441
ABC	6.56769E-08	1	6.56769E-08	0.3268392	0.6076
ABD	1.4214E-06	1	1.4214E-06	7.0735608	0.0764
BCD	4.68232E-07	1	4.68232E-07	2.3301452	0.2243
ABCD	3.24639E-06	1	3.24639E-06	16.155587	0.0277
Residual	6.02837E-07	3	2.00946E-07		
Cor Total	4.91691E-05	15			

R-Squared 0.9877

Adj R-Squared 0.9387

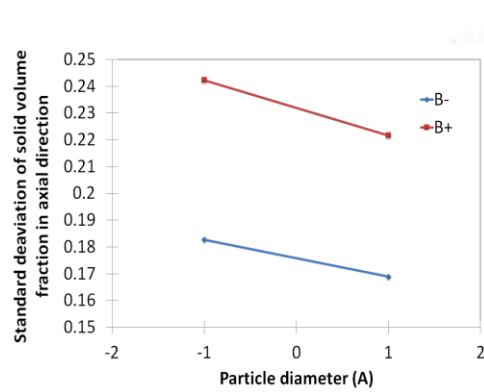
Pred R-Squared 0.6513



(ก)

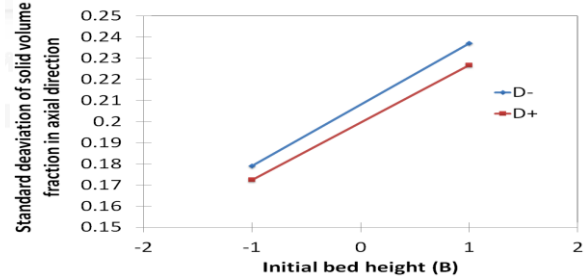
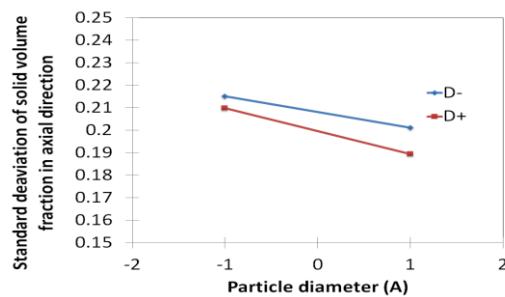
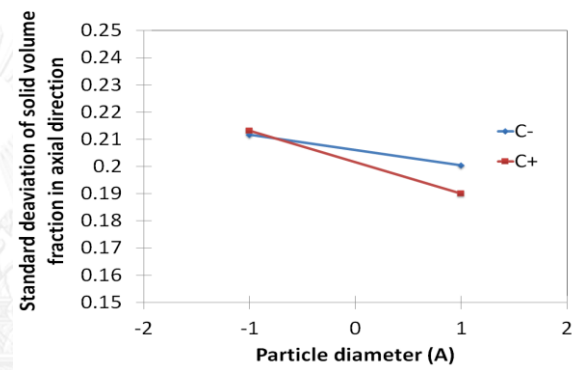
(ข)

(ค)



(ง)

(จ)



รูปที่ 4.8 ผลของตัวแปรหลักและผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความสูงเบตเริ่มต้น (B) (ค) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความหนาแน่นของแข็ง (C) (ง) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D) (จ) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ความสูงเบตเริ่มต้น (B) และความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D)

รูปที่ 4.8 เป็นกราฟแสดงผลของตัวแปรหลักและผลของอันตรกิริยา รูป 4.8 (ก) ผลของตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน โดยจะเห็นว่าตัวแปร B ให้ค่าตัวแปรตอบสนองเพิ่มขึ้น คือ การเพิ่มความสูงเบตเริ่มต้นจะมีผลทำให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกนเพิ่มขึ้นหรือความสม่ำเสมอของของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง อธิบายได้ว่าการเพิ่มปริมาณของแข็งให้มากขึ้นในระบบ และเมื่อทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน ทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของอนุภาคของแข็งมากขึ้นในแนวแกน ความสม่ำเสมอของอนุภาคของแข็งลดลง ตัวแปรที่เหลืออีก 3 ตัวแปร A C D นั้นมีค่าตัวแปรตอบสนองที่ลดลง การเพิ่มขนาดอนุภาคของแข็ง ความหนาแน่นของของแข็ง และความเร็วแก๊สป้อนเข้า มีผลทำให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกนลดลง อธิบายได้ว่าการเพิ่มความเร็วแก๊สป้อนเข้าจะทำให้เกิดการกระแสนหมุนวน (Circulation) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของฟองอากาศ ทำให้อนุภาคของแข็งเกิดการหมุนวนรอบฟองอากาศขึ้น การเพิ่มขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของแข็งจะลดโอกาสที่อนุภาคจะเกิดการรวมตัวของอนุภาคเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นความสม่ำเสมอของของแข็งในระบบในแนวแกนจะมีมากขึ้น

รูป 4.8 (ข) ผลของคู่อันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความสูงเบตเริ่มต้น (B) ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน พบว่า เมื่อความสูงเบตเริ่มต้นมีค่าสูงและขนาดอนุภาคมีค่าต่ำ จะมีผลให้ค่าตอบสนองมีค่าลดลงคือความสม่ำเสมอของของแข็งในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น และถ้าความสูงเบตเริ่มต้นมีค่าต่ำ และ ขนาดอนุภาคมีค่าสูง ก็จะมีผลให้ค่าตอบสนองมีค่าลดลงมากขึ้นเช่นกันคือมีค่าความสม่ำเสมอในแนวแกนมีมากขึ้นกว่าเดิม อธิบายได้จากผลของขนาดอนุภาค เมื่อขนาดใหญ่ขึ้นโอกาสการรวมตัวกันของอนุภาคก็จะลดลง

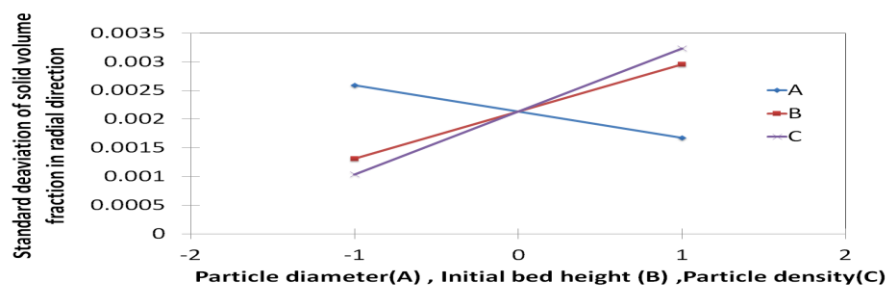
รูป 4.8 (ค) ผลของคู่อันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความหนาแน่นของแข็ง (C) ที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน เมื่อความหนาแน่นของแข็งมีค่าต่ำ (-) และ เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาค (+) จะมีผลให้ค่าตอบสนองลดลงหรือ ค่าดัชนีการผสมในแนวแกนเพิ่มขึ้น และเมื่อความหนาแน่นของแข็งมีค่าสูง (+) และ ขนาดอนุภาคมีค่าสูง (+) พบว่ามีผลให้ค่าตอบสนองลดลงมากขึ้น หรือ ให้ค่าดัชนีการผสมในแนวแกนมากกว่าเดิม

รูป 4.8 (ง) ผลของคู่อันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D) ที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน พบว่า เมื่อค่าความเร็วแก๊สป้อนเข้ามีค่าต่ำ (-) และ ขนาดอนุภาคของแข็งมีค่าสูง (+) จะมีผลให้ค่าตอบสนองลดลงหรือความสม่ำเสมอของแข็งในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้น กลับกัน ถ้าความเร็วแก๊สป้อนเข้ามีค่าสูง (+) และขนาดอนุภาคของแข็งมีค่าสูง (+) จะมีผลทำให้ค่าตอบสนองลดลงมากขึ้น การผสมกัน

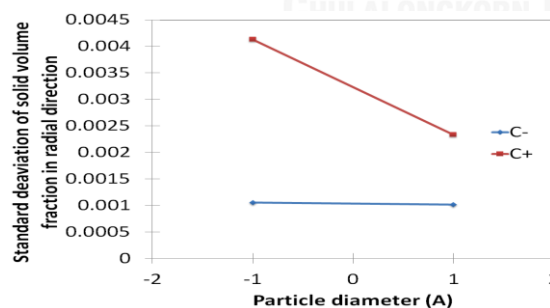
เป็นเนื้อเดียวกันของแข็งในระบบมีค่าสูงชันกว่าเดิม อธิบายได้ว่าผลของกระแสหมุนวนของฟองอากาศที่ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น

รูป 4.8 (จ) ผลของคู่อันตรกิริยาระหว่าง ความสูงเบตเริ่มต้น (B) และความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D) ที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน จะได้ว่าความเร็วแก๊สป้อนเข้าเริ่มต้นมีค่าสูง (+) และ ความสูงเบตเริ่มต้นมีค่าสูง (+) จะมีผลให้ตัวแปรตอบสนองมากขึ้น หรือ ค่าดัชนีการผสมในแนวแกนมีค่าลดลง ส่งผลให้ ความสม่ำเสมอของแข็งในแนวแกนจะลดลงและ ความเร็วแก๊สป้อนเข้ามีค่าต่ำ (-) และ เพิ่มความสูงเบตให้มีค่าสูง (+) ก็มีผลทำให้ตัวแปรตอบสนองมากขึ้นเช่นเดียวกันและมีผลมากกว่าเดิม หรือ ความสม่ำเสมอของแข็งในแนวแกนลดลงมากกว่าเดิม ซึ่งอธิบายได้ว่า ผลจากปริมาณของแข็งที่เพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของแข็งในแนวแกนมากขึ้น และ ในกรณีความเร็วแก๊สป้อนเข้าตัวแปรเดียวจะมีผลทำให้ ค่าดัชนีการผสมในแนวแกนเพิ่มขึ้น จากรูป (จ) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มความสูงของแข็งและเพิ่มความเร็วแก๊ส จะมีค่าดัชนีการผสมดีกว่าการเพิ่มความสูงของแข็งเพียงอย่างเดียว

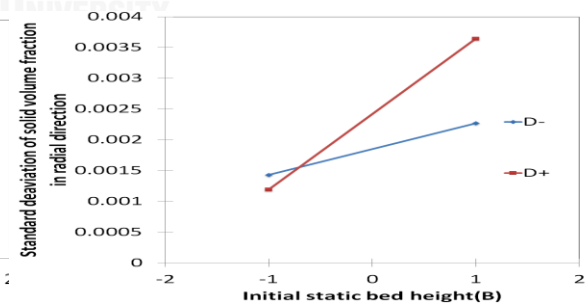
(ก)



(ข)



(ค)



รูปที่ 4.9 ผลของตัวแปรหลักและผลของอันตรกิริยาที่มีผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความหนาแน่นของแข็ง (C) (ค) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ความสูงของเบตเริ่มต้น (B) และความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D)

รูปที่ 4.9 แสดงผลของตัวแปรหลักและผลของอันตรกิริยา

รูป 4.9 (ก) ผลของตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี ซึ่งจากผลจะเห็นได้ว่า ผลของขนาดอนุภาค (A) มีผลให้ตัวแปรตอบสนองลดลง เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคของแข็งจะมีผลทำให้ดัชนีการผสมในแนวรัศมีค่าสูงขึ้น และตัวแปร 2 ตัวที่เหลือ ความสูงเบตเริ่มต้น (B) และความหนาแน่นของแข็ง (C) มีผลทำให้ตัวแปรตอบสนองเพิ่มขึ้นทั้งหมด ทำให้ดัชนีการผสมในแนวรัศมีลดลง

รูป 4.9 (ข) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคของแข็ง (A) และความหนาแน่นของแข็ง (C) ที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี พบว่า เมื่อความหนาแน่นของของแข็งมีค่าสูง และขนาดอนุภาคมีค่าต่ำ นั้นจะมีตัวแปรตอบสนองมีค่าลดลงจะทำให้ความสม่ำเสมอของของแข็งในแนวรัศมี มีค่ามากขึ้น

รูป 4.9 (ค) ผลของอันตรกิริยาระหว่าง ความสูงเบตเริ่มต้น (B) และความเร็วแก๊สป้อนเข้า (D) ที่ส่งผลต่อค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี ผลการทดลองพบว่า เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้า (+) และ ความสูงเบตเริ่มต้นมีค่าสูง (+) พบว่ามีผลทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าเพิ่มขึ้นหรือ ให้ค่าดัชนีการผสมในแนวรัศมีลดลง และเมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้ามีค่าต่ำ (-) และ เมื่อเพิ่มความสูงเบตเริ่มต้น(+) จะมีผลทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิมหรือ ค่าดัชนีการผสมในแนวรัศมีลดลงมากขึ้น

หลังจากนั้นทำการหาแบบจำลองสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression model) เพื่อนำไปใช้ในการหาภาวะเหมาะสมที่สุดในการเดินระบบ และสะดวกในการนำไปใช้เป็นสมการสหสัมพันธ์ (Correlation) ในงานวิจัยต่อไป ตัวแปรตอบสนองที่เราศึกษาในงานวิจัยนี้มี 2 ตัวแปร คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีและแนวแกน ได้ สมการแบบจำลอง สองสมการดังนี้ สมการ (4.1) คือแบบจำลองถดถอยสำหรับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน (Standard deviation of solid volume fraction in axial direction) และสมการที่ (4.2) ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี (Standard deviation of solid volume fraction in radial direction)

$$Y_1 = 0.2 - 0.008356 X_A + 0.028X_B - 0.001994X_C - 0.004481X_D - 0.001469X_A X_B - 0.003206 X_A X_C - 0.001369 X_A X_D \quad (4.1)$$

$$Y_2 = 0.002162 - 0.0004882 X_A + 0.0008497X_B + 0.001127X_C - 0.0004678X_A X_C + 0.000375X_B X_D - 0.0004504 X_A X_B X_C X_D \quad (4.2)$$

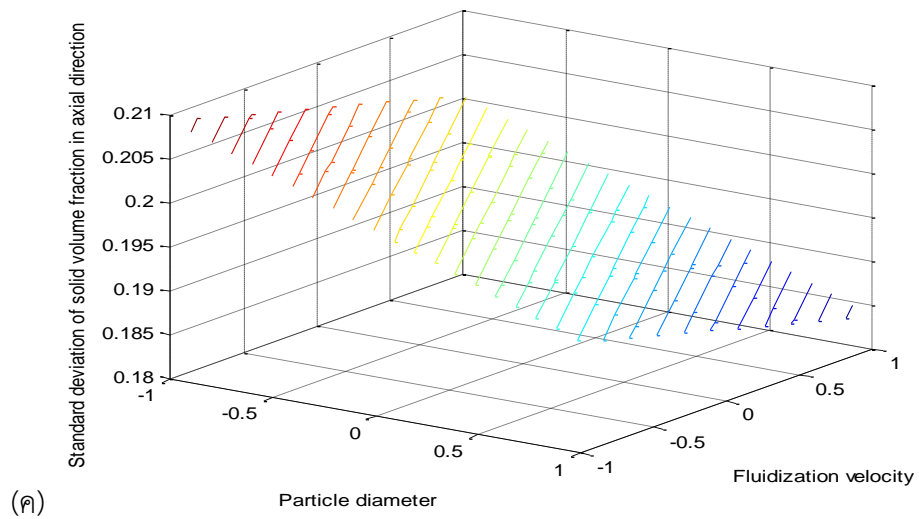
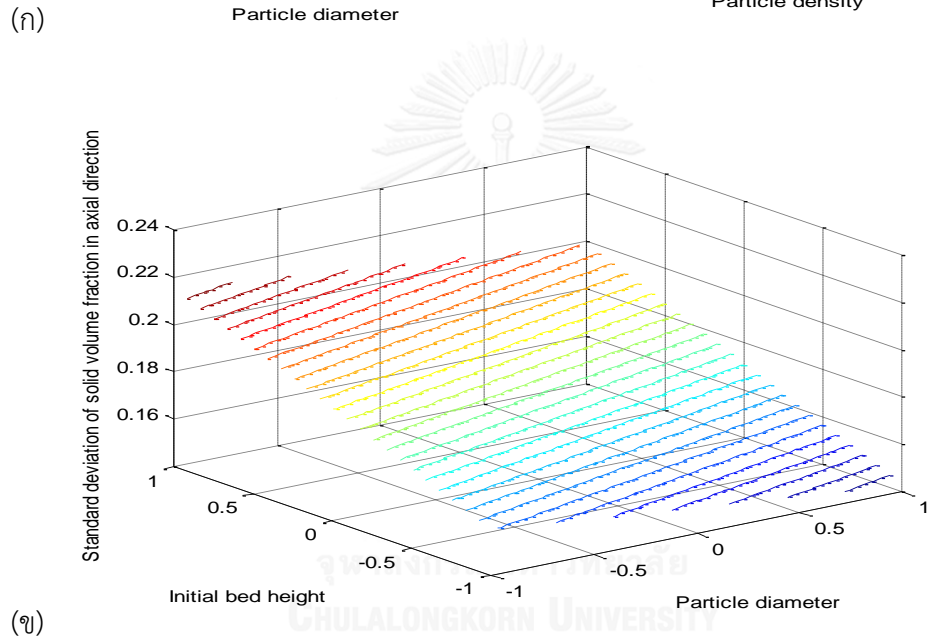
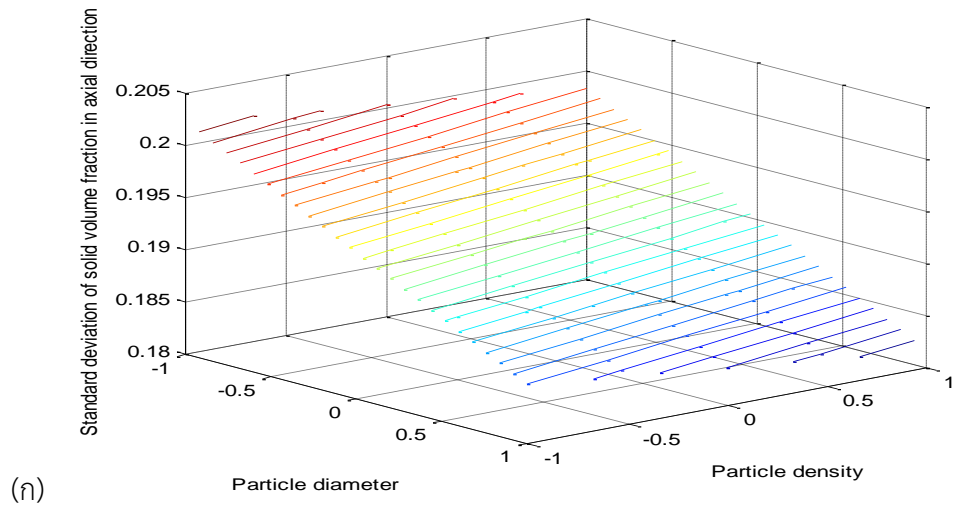
กำหนดให้

Y_1 คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน

Y_2 คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี

$X_A X_B X_C X_D$ คือค่ารหัสเข้าตัวแปร (Coded variable) A B C D

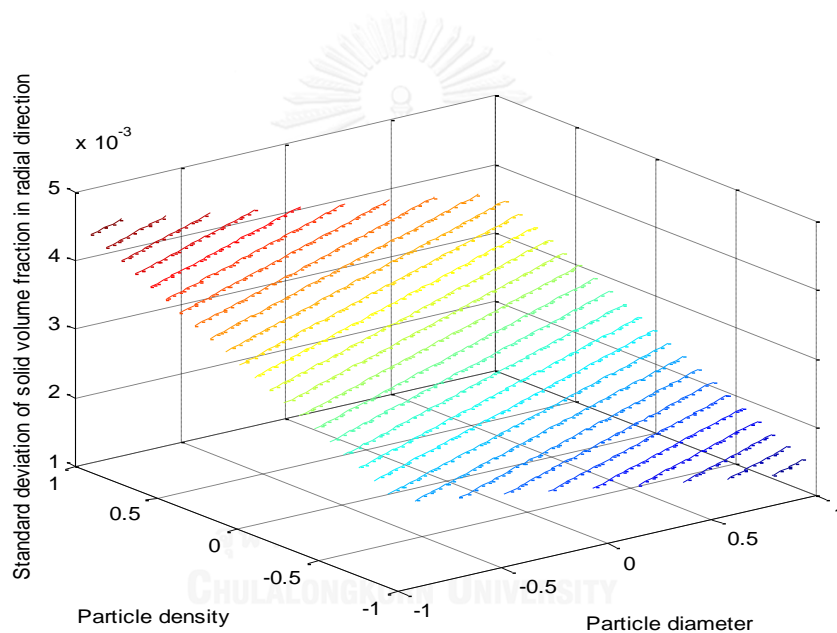
หลังจากนั้นทำการทดสอบความถูกต้องของเศษส่วนตกค้าง (Residual) ว่ามีการกระจายตัวแบบ ไม่มีรูปแบบ และมีความแปรปรวนคงที่ เพื่อทดสอบว่าแบบจำลองสมการถดถอยที่ได้มานั้นมีความถูกต้อง ซึ่งแสดงไว้อยู่ใน ภาคผนวก ข1 และ ข2 และเมื่อแบบจำลองที่ได้เหมาะสมน่าเชื่อถือแล้ว จึงเริ่มทำการสร้างพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface) จากแบบจำลองสมการถดถอยนี้ แสดงดังรูป ที่ 4.10 แสดงกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง ของ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกน รูป 4.10 (ก) แสดง ขนาดอนุภาคของแข็งและความหนาแน่นของแข็งต่างๆกัน พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ดัชนีการผสมในแนวแกนดีที่สุด ที่ความหนาแน่นของของแข็ง 2,350 kg/m³ และขนาดอนุภาค 0.0006 เมตร จะให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกนต่ำที่สุดหรือการผสมในแนวแกนดีที่สุด รูป 4.10 (ข) ขนาดอนุภาคของแข็งและความสูงเริ่มต้นของของแข็งต่างๆกัน พบว่าขนาดอนุภาค 0.0006 เมตร และ ที่อัตราส่วนความสูงเบดเริ่มต้นต่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.5 เท่า จะให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกนต่ำที่สุดหรือการผสมในแนวแกนดีที่สุด รูป 4.10 (ค) ขนาดอนุภาคของแข็งและความเร็วแก๊สป้อนเข้าต่างๆกัน พบว่าขนาดอนุภาค 0.0006 เมตร และ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า 1.75 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน จะให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกนต่ำที่สุดหรือการผสมในแนวแกนดีที่สุด



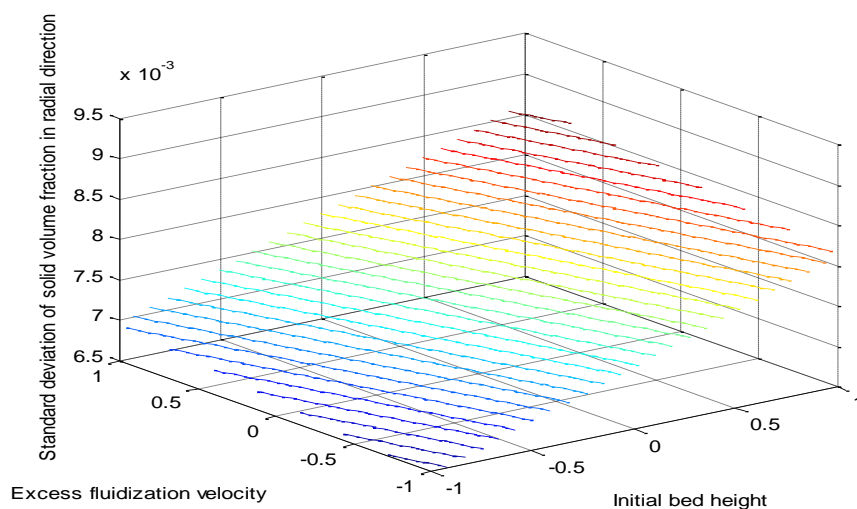
รูปที่ 4.10 (ก) พื้นที่ผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง เมื่อขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของของแข็งแตกต่างกัน

(ข) พื้นที่ผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง เมื่อความสูงเบดเริ่มต้นและขนาดอนุภาคของแข็งแตกต่างกัน

(ค) พื้นที่ผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง เมื่อขนาดอนุภาคของแข็งและความเร็วแก๊สป้อนเข้าแตกต่างกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 (ก) พื้นที่ผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวรัศมีของสัปดาห์โดย ปริมาตรของของแข็ง เมื่อขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของของแข็งแตกต่างกัน

(ข) พื้นที่ผิวตอบสนองของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวรัศมีของสัปดาห์โดย ปริมาตรของของแข็ง เมื่อความสูงเบดเริ่มต้นและความเร็วแก๊สป้อนเข้าแตกต่างกัน

รูปที่ 4.11 แสดงกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง ของ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัปดาห์โดย ปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี รูปที่ 4.11 (ก) ขนาดอนุภาคของแข็งและความหนาแน่นของแข็ง ต่างๆกัน ที่ความหนาแน่นของของแข็ง $1,300 \text{ kg/m}^3$ และขนาดอนุภาค 0.0006 เมตร จะให้ค่าส่วน เบี่ยงเบนมาตรฐานของสัปดาห์โดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีต่ำที่สุดหรือการผสมในแนวรัศมีดี ที่ที่สุด

รูปที่ 4.11 (ข) ความเร็วแก๊สป้อนเข้าและความสูงเริ่มต้นของแข็งต่างๆกัน พบว่าที่อัตราส่วน ความสูงเบดเริ่มต้นต่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.5 เท่า และ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า 1.5 เท่า ของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน จะให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัปดาห์โดยปริมาตร ของของแข็งในแนวรัศมีต่ำที่สุดหรือการผสมในแนวรัศมีดีที่สุด

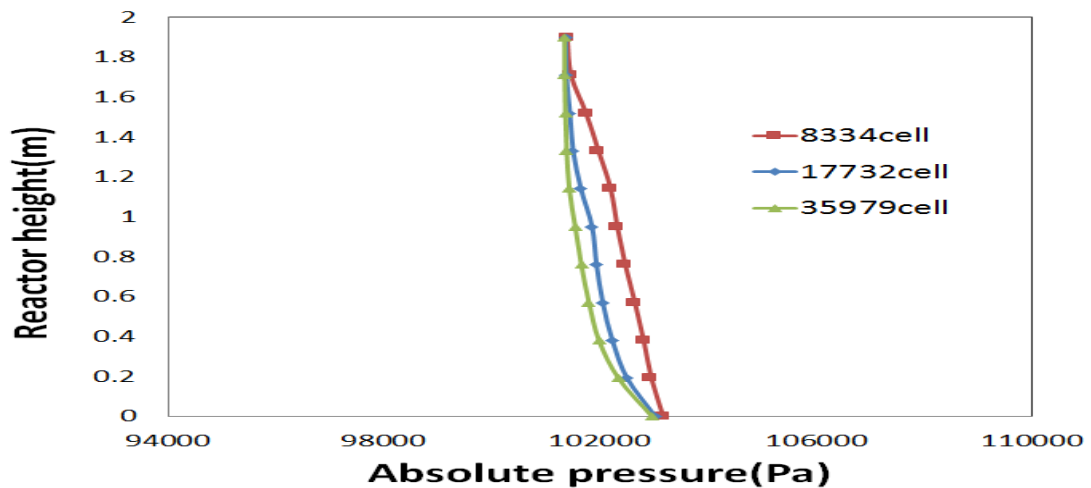
4.3 การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี

4.3.1 ผลการคำนวณเซลล์ที่เหมาะสมกับการคำนวณ (Grid independency test) และหาเวลาที่ภาวะคงตัว (Steady state)

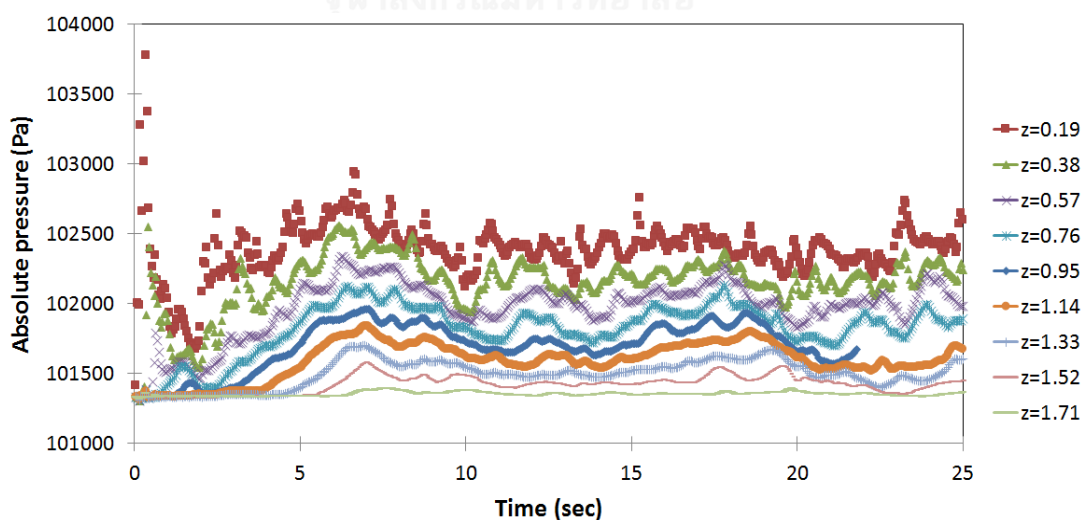
ในการทดลองนี้จะหาจำนวนเซลล์ที่เหมาะสมไปใช้ในงานวิจัยส่วนศึกษาผลกระทบของตัว แปรดำเนินการต่อ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงต่อไป ซึ่งในงานวิจัยส่วนนี้จะใช้จำนวน เซลล์ ทั้งหมด 3 ค่า $8,334$ เซลล์ $17,732$ เซลล์ และ $35,979$ เซลล์

รูปที่ 4.12 แสดงผลการจำลองค่าความดันสมบูรณ์ (Absolute pressure) ของเครื่อง ปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมีฝั่งเครื่องปฏิกรณ์อากาศตลอดแนวความสูง จะเห็นได้ว่าที่จำนวน เซลล์ $8,334$ เซลล์นั้นมีค่าค่อนข้างคลาดเคลื่อนออกจาก $17,732$ และ $35,979$ เซลล์ ค่อนข้างมาก แสดงว่า จำนวนเซลล์ $8,334$ เซลล์นั้น ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำนายอุทกพลศาสตร์ในเครื่อง ปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟองแก๊ส และพิจารณา ที่ $17,732$ และ $35,979$ เซลล์ นั้น ค่าที่ได้มีค่าที่ ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจึงเลือกจำนวนเซลล์ที่ $17,732$ เซลล์ มาใช้ในงานวิจัยส่วนถัดไป

สำหรับการหาช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว หรือ ภาวะที่ระบบไม่ขึ้นกับเวลา (Steady state) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.13 แสดงความดันสมบูรณ์ ที่ระยะเวลาต่างๆ ซึ่งพบว่าความดันสมบูรณ์มีค่าลดลงและแกว่งไปมา ตั้งแต่เวลา 0-25 วินาที และความดันสมบูรณ์เริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่ 15 วินาทีเป็นต้นไป ดังนั้น จึงเลือก ช่วงเวลา 15-25 วินาที มาหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรทางอุทกพลศาสตร์



รูปที่ 4.12 ค่าความดันสมบูรณ์ ของ เครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี ฝั่งเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ตลอดแนวความสูงเครื่อง ที่จำนวนเซลล์ต่างๆ

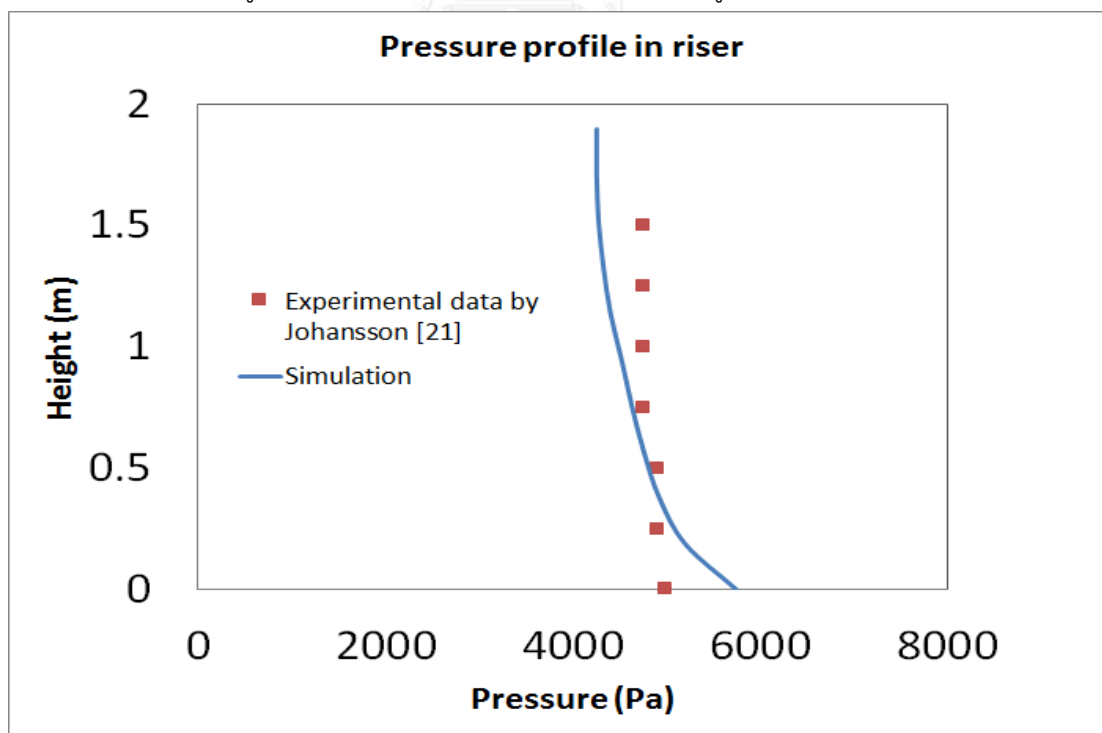


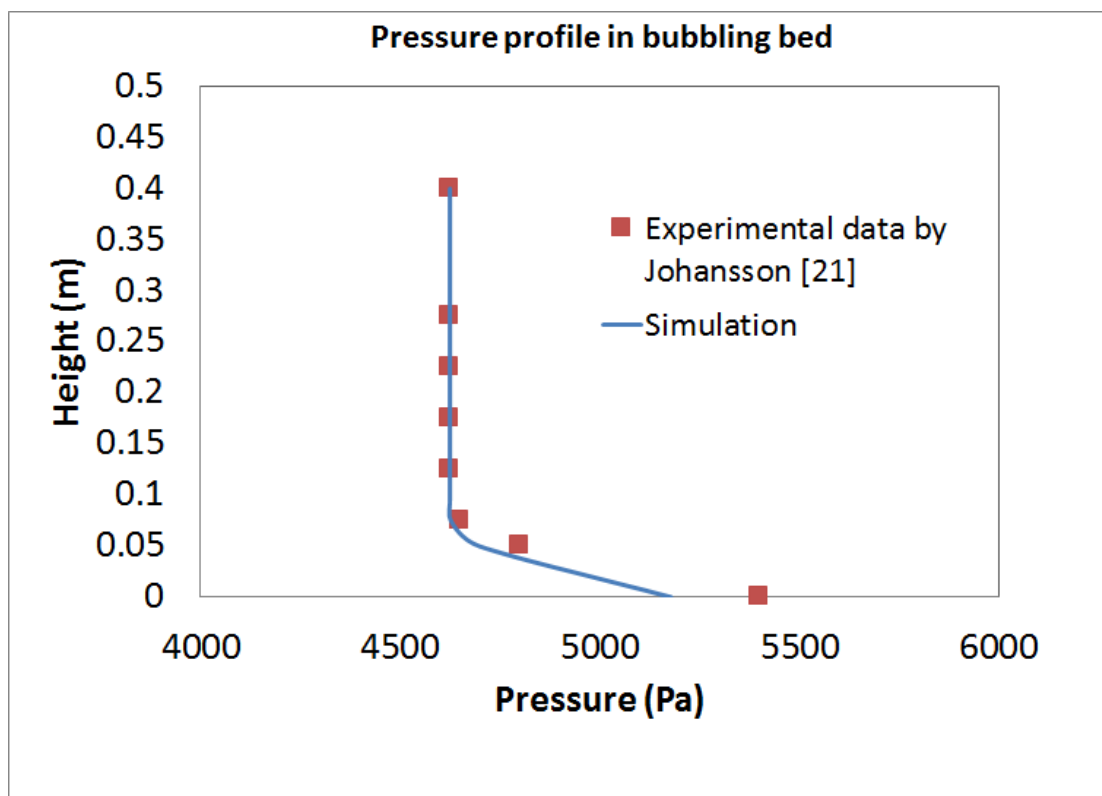
รูปที่ 4.13 ค่าความดันสมบูรณ์ฝั่งเครื่องปฏิกรณ์อากาศ ที่ระยะเวลา 0-25 วินาที

4.3.2 การเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการทดลอง

ผลการจำลองการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมีกรณการไหลแบบไม่เกิดปฏิริยา เทียบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการจริงพบว่า ผลจากการใช้แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคของ Gidaspow นั้นสามารถให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการทดลองของ Johansson และคณะ [21] แสดงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงความดันตลอดแนวความสูงเครื่องปฏิกรณ์อากาศ และรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงความดันตลอดแนวความสูงเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง พบว่าผลการทำนายพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์นั้น ความดันลดฝั่งเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่ความดันตลอดแนวความสูงเครื่องปฏิกรณ์อากาศไม่สอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการนั้น อธิบายได้จากผลของการเลือกใช้แบบจำลองแรงต้านระหว่างวัฏภาค (Drag model) ดังนั้น จึงเลือกใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ชุดนี้เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

รูปที่ 4.14 ค่าความดันตลอดแนวความสูงเครื่องอากาศ



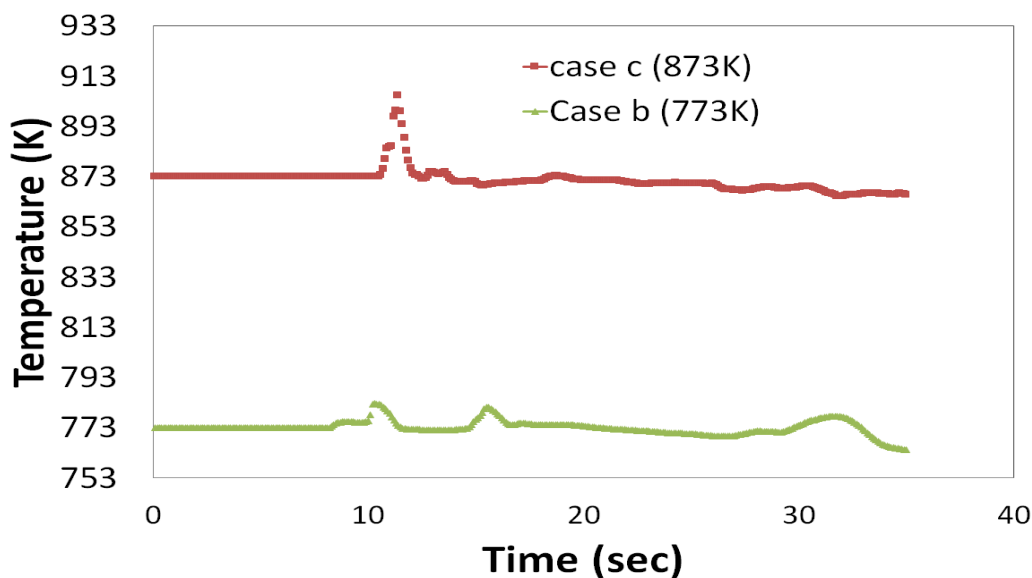


รูปที่ 4.15 ค่าความดันตลอดแนวความสูงเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

4.4 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง

4.4.1 การหาเวลาที่ภาวะเสมือนคงตัว (Quasi steady state)

การศึกษาในส่วนนี้จะศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง การหาช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสมือนคงตัว (quasi steady state) แสดงดังรูปที่ 4.16 แสดงอุณหภูมิแก๊สที่ เวลา 0 - 35 วินาที พบว่า กรณี ที่อุณหภูมิดำเนินการ 873 K อุณหภูมิมีค่าแกว่งไปมาน้อยมากไม่เกิน 10 K และ อุณหภูมิดำเนินการ 773 K อุณหภูมิมีค่าแกว่งไปมาน้อยมากไม่เกิน 20 K ดังนั้นในการหาค่าเฉลี่ยของค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงทุกกรณี จะหาในช่วงเวลาที่ 25 - 35 วินาที ในการคำนวณต่อไป สาเหตุที่อุณหภูมิที่ทางออกของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นน้อย เพราะที่อุณหภูมิสูง ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟต์จะมีค่าลดลงทำให้ปฏิกิริยาผันกลับ ปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟต์จึงเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนส่วนใหญ่ และปฏิกิริยารีดักชันระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและโลหะออกไซด์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน [33]



รูปที่ 4.16 อุณหภูมิของแก๊สที่ทางออกเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ที่กรณีต่างๆ ช่วงเวลา 0 – 40 วินาที

4.4.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง

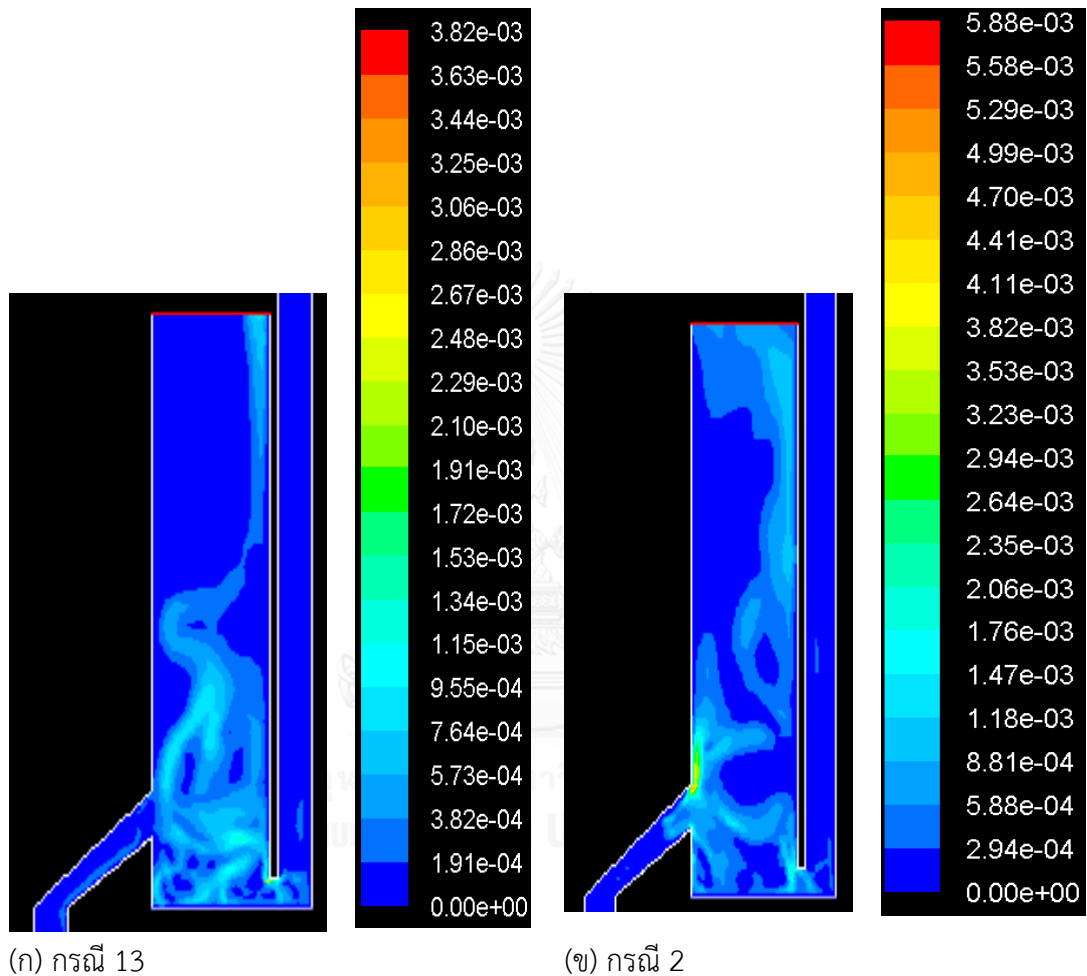
การศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการที่จะส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง จะศึกษาร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และ แก๊สไฮโดรเจน ซึ่งตัวแปรที่เลือกมาศึกษามีทั้งหมด 4 ตัวแปร คือ ขนาดอนุภาคของแข็ง (Particle diameter) , อัตราส่วนของความสูงเบดเริ่มต้น ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ (Ratio of initial static bed height to column diameter) อุณหภูมิเชื้อเพลิงแก๊สป้อนเข้า (Syngas temperature) และ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าป้อนเข้า (Fluidization velocity) ซึ่งจะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง และจะพิจารณาตัวแปรตอบสนอง (Response surface) ทั้งหมด 2 ตัวแปร คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Conversion of carbonmonoxide) และ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจน (Conversion of hydrogen) ซึ่งผลของตัวแปรดำเนินการและค่าตัวแปรตอบสนองจากการจำลองปฏิกิริยาเคมี แสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่า กรณีที่ 13 ที่ใช้ขนาดอนุภาคของของแข็ง 0.00015 เมตร อัตราส่วนระหว่างความสูงเบดเริ่มต้น ต่อ เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.75 เท่า อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า 873 K และความเร็วแก๊ส 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน จะให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนสูงที่สุด และกรณีที่ 2 ใช้ขนาดอนุภาคของของแข็ง 0.000175 เมตร อัตราส่วนระหว่างความสูงเบดเริ่มต้น ต่อ

เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.75 เท่า อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิง 773 K และความเร็วแก๊ส 1.25 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน จะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล 2⁴ ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการและค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง

กรณี	ขนาดของอนุภาค (micron)	ความสูงเบดเริ่มต้นในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง (m)	อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า (K)	ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า(m/s)	ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (-)	ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจน (-)
1	150	0.75D	773	1.25Umf	44.381	42.221
2	175	0.75D	773	1.25Umf	34.462	34.357
3	150	1.0D	773	1.25Umf	69.676	68.746
4	175	1.0D	773	1.25Umf	64.402	60.104
5	150	0.75D	873	1.25Umf	48.781	47.722
6	175	0.75D	873	1.25Umf	84.177	83.855
7	150	1.0D	873	1.25Umf	54.540	53.765
8	175	1.0D	873	1.25Umf	72.622	71.748
9	150	0.75D	773	1.5Umf	72.420	71.775
10	175	0.75D	773	1.5Umf	58.761	73.106
11	150	1.0D	773	1.5Umf	84.054	83.836
12	175	1.0D	773	1.5Umf	63.882	62.514
13	150	0.75D	873	1.5Umf	85.840	85.533
14	175	0.75D	873	1.5Umf	72.802	71.944
15	150	1.0D	873	1.5Umf	85.201	86.591
16	175	1.0D	873	1.5Umf	49.464	48.374

จากนั้นจึงเลือกค่าตัวแปรตอบสนอง ทั้ง 2 ค่า คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงทั้งสองชนิด ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์และ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจน ในแต่ละกรณีที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุด มาสร้างคอนทัวร์ของโมลฟลักซ์ (Mole flux) ของ แก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ ที่เวลา 25 วินาที เพื่อเปรียบเทียบกัน ของกรณี 13 และ 2 ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 คอนทัวร์โมลฟลักซ์คาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ 25 วินาที (ก) กรณี 13 (ข) กรณี 2

(ก) กรณี 13 คอนทัวร์ของโมลฟลักซ์ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่าโมลฟลักซ์ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่บริเวณทางออกของเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงมีค่าค่อนข้างลดลงมากจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับโลหะนิกเกิลออกไซด์ บริเวณที่มีสีฟ้าอ่อนที่บริเวณทางออกคือแสดงว่าโมลฟลักซ์ต่ำหรือ กิโลโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์ต่อตารางเมตรวินาทีลดลงมาก แต่ก็ยังมีเหลือหลุดออกไปจากเครื่องปฏิกรณ์เล็กน้อย อธิบายได้จากผลกระทบบรรวมของอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าและความเร็วแก๊สป้อนเข้า เมื่ออุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีค่ามากขึ้น

และความเร็วแก๊สที่เพิ่มขึ้นทำให้ จำนวนโมลของแก๊สเชื้อเพลิงที่จะทำปฏิกิริยามีค่าสูงขึ้น อธิบายผลของการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์จากแบบจำลองอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบแกนกลางหัดตัวจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น และผลของการเพิ่มอุณหภูมิสูงทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูง ขณะเดียวกันเมื่อเทียบกับรูปที่ 4.17 (ข) กรณี 2 คอนทัวร์ของโมลฟลักซ์ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ พบว่าโมลฟลักซ์ของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่หลุดไปบริเวณทางออกเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงมีค่อนข้างมาก สังเกตจากคอนทัวร์ที่เป็นสีฟ้าอ่อนคือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีโมลฟลักซ์ต่ำกว่า 10^{-4} กิโลโมลต่อตารางเมตรวินาที นั่นคือแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดหลุดออกไปมากกว่าเมื่อเทียบกับกรณี 13 ซึ่งอธิบายได้จากผลของอนุภาคโลหะ निकเกิดออกไซด์เมื่ออนุภาคนิกเกิดออกไซด์มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและอนุภาคโลหะออกไซด์ลดลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดี

จากตารางที่ 4.5 เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลกระทบจากตัวแปรดำเนินการ ตัวแปรตอบสนองคือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจะพบว่า ตัวแปรหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือ $p\text{-value} < 0.05$ มีตัวแปรความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าระบบ (D) อันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคนิกเกิดออกไซด์ และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าระบบ (AD) อันตรกิริยาระหว่างความสูงเบดเริ่มต้นและอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า (BC) และอันตรกิริยาร่วมระหว่างขนาดอนุภาคนิกเกิดออกไซด์ อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าและความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า (ACD) ส่งผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ภายในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกิริยาเคมี ส่วนตัวแปรตอบสนองอีกตัวที่ศึกษาคือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจน จากตารางที่ 4.6 เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลกระทบจากตัวแปรดำเนินการ ตัวแปรตอบสนองคือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจน จะพบว่า ตัวแปรหลักที่มีผลคือ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าระบบ (D) และอันตรกิริยาระหว่าง ขนาดอนุภาคนิกเกิดออกไซด์ และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าระบบ (AD) และอันตรกิริยาร่วมระหว่างขนาดอนุภาคนิกเกิดออกไซด์ อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าและความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า (ACD)

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์
เป็นตัวแปรตอบสนอง

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	3704.24	12	308.69	10.39	0.0394
A	139.96	1	139.96	4.71	0.1184
B	96.12	1	96.12	3.24	0.1699
C	259.11	1	259.11	8.72	0.0599
D	655.13	1	655.13	22.05	0.0183
AB	125.89	1	125.89	4.24	0.1317
AC	201.11	1	201.11	6.77	0.0803
AD	868.67	1	868.67	29.24	0.0124
BC	609.63	1	609.62	20.52	0.0201
BD	179.99	1	179.99	6.06	0.0908
CD	81.03	1	81.03	2.73	0.1972
ACD	468.89	5	468.89	15.78	0.0285
BCD	18.7	1	18.70	0.63	0.4855
Residual	89.14	3	29.71		
Cor Total	3793.38	15			

R-Squared 0.9765

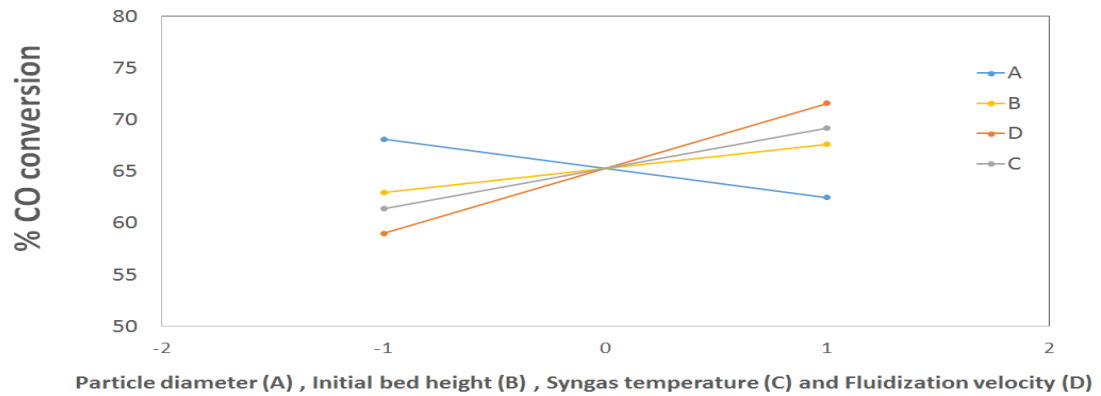
Adj R-Squared 0.8825

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวแปร
ตอบสนอง

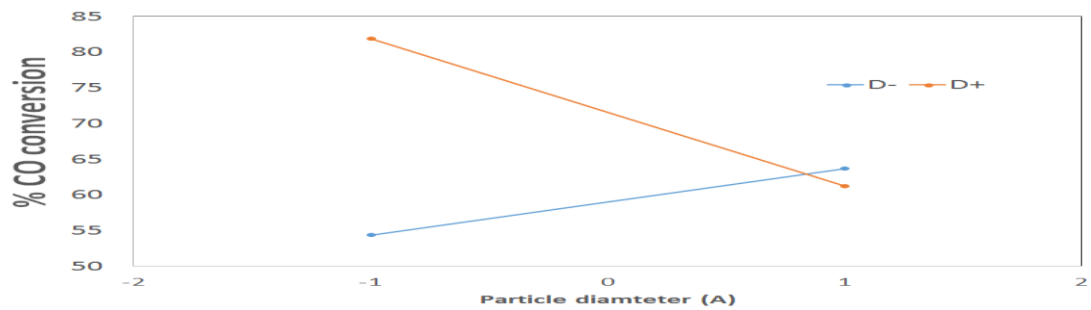
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	3944.53	13	303.43	9.73	0.0969
A	72.59	1	72.59	2.33	0.2666
C	173.99	1	173.99	5.58	0.1420
D	919.08	1	919.08	29.47	0.0323
AB	273.08	1	273.08	8.76	0.0977
AC	94.65	1	94.65	3.04	0.2236
AD	749.64	1	749.64	24.04	0.0392
BC	424.64	1	424.64	13.62	0.0662
BD	281.74	1	281.74	9.04	0.0951
CD	158.39	1	158.39	5.08	0.1530
ABD	50.63	1	50.63	1.62	0.3306
ACD	657.26	1	657.26	21.08	0.0443
BCD	74.23	4	74.23	2.38	0.2628
ABCD	14.61	1	14.61	0.47	0.5644
Residual	62.36	2	31.18		
Cor total	4006.89	15			

R-Squared 0.9844

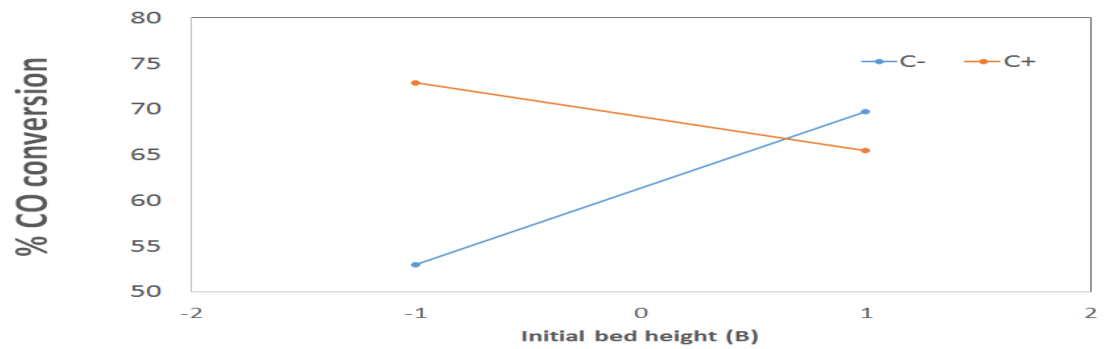
Adj R-Squared 0.8833



(ก)



(ข)



(ค)

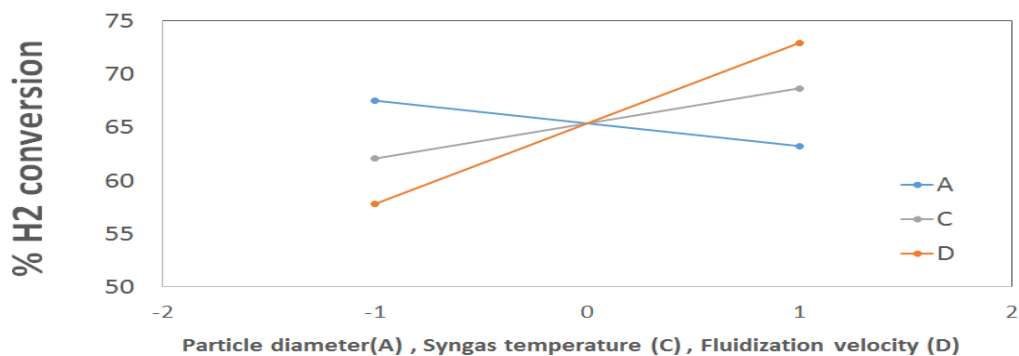
รูปที่ 4.18 (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของโลหะนิกเกิล ออกไซด์ และ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า (ค) ผลของอันตรกิริยาระหว่างความสูงเบดเริ่มต้น และ อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า

รูปที่ 4.18 (ก) กราฟที่แสดงผลของผลกระทบจากตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งพบว่าตัวแปร A ให้ผลเชิงลบ อธิบายได้ว่า การเพิ่มขนาดอนุภาคของโลหะออกไซด์จะเป็นการลดพื้นที่ผิวต่อปริมาตรลง จะไปลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและโลหะออกไซด์ลง ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกิริยาเคมีฝั่งเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงมีค่าลดลง ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงลดลงตามไปด้วย ส่วนผลกระทบจากความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า ความสูงเบดเริ่มต้น และอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้ามีผลเชิงบวก อธิบายได้ว่า การเพิ่มความเร็วแก๊สเข้าจะส่งผลต่อค่าอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา หากเทียบกับกฎอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี เปรียบเสมือนการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าเพิ่มขึ้น ผลของความสูงเบดเริ่มต้นก็อธิบายโดยใช้หลักการเดียวกันกับการเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงมีค่าเพิ่มขึ้น และตัวแปรสุดท้ายอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าคงที่ปฏิกิริยา เป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้สูงขึ้น ทั้งนี้แนวโน้มผลกระทบของตัวแปรหลักในงานวิจัยนี้ยังได้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [28] ซึ่งได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการ สองตัวแปร คือ ขนาดอนุภาค และความเร็วแก๊สป้อนเข้า ที่มีผลต่อสัดส่วนองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ที่บริเวณทางออกเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงแบบกะ (Batch fuel reactor) การเพิ่มขนาดอนุภาคโลหะออกไซด์และเพิ่มความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าจะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงมีค่าลดลง งานของ Harichandan และคณะ [16] เป็นการศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนที่เป็นสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงแบบกะ ได้แนวโน้มเดียวกับงานก่อนหน้า คือ การเพิ่มขนาดโลหะออกไซด์จะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าลดลง และการเพิ่มอุณหภูมิ การเพิ่มความสูงเบดเริ่มต้นจะทำให้ได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น Wang และคณะ [27] ได้ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าสัดส่วนองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ทางออกเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกิริยาเคมี (Chemical looping combustion) พบว่าการเพิ่มความเร็วแก๊สมีเทนจะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สมีเทนลดลง

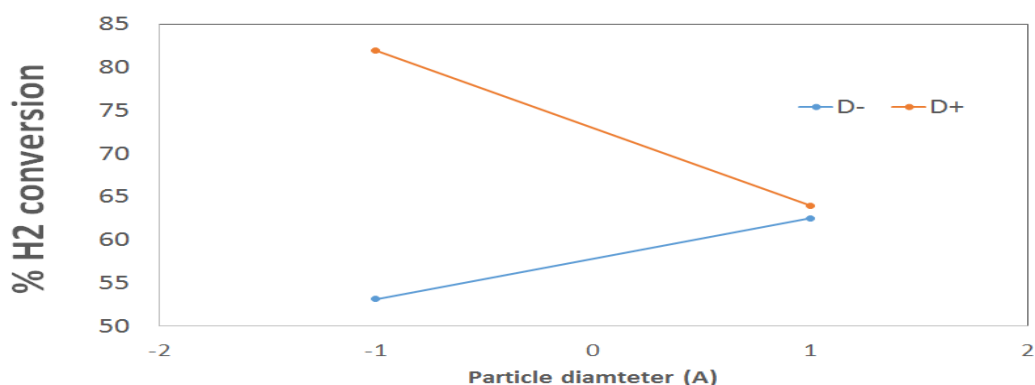
รูปที่ 4.18 (ข) กราฟแสดงผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของโลหะนิกเกิลออกไซด์ และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า ที่ค่าตัวแปร D ผลเชิงบวก และเมื่อค่าตัวแปร A เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลง และค่าตัวแปร D ผลเชิงลบ และเมื่อค่าตัวแปร A เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากผลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัส (Contact area) ระหว่าง แก๊สเชื้อเพลิง

และโลหะ निकเกิลออกไซด์ เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลง ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงลดลง และผลจากความเร็วแก๊สป้อนเข้าถ้าใช้ความเร็วแก๊สป้อนเข้าสูงจะทำให้สารตั้งต้นคู่ที่ทำปฏิกิริยากับแก๊สเชื้อเพลิง มีความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.18 (ค) กราฟแสดงผลกระทบของผลของอันตรกิริยาระหว่างความสูงเบตเริ่มต้น และอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า ที่ค่าตัวแปร C ผลเชิงบวกและเมื่อค่าตัวแปร B เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าลดลงและค่าตัวแปร C ผลเชิงลบและเมื่อค่าตัวแปร B เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น อธิบายได้จากผลของผลของปริมาณของโลหะออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้สารตั้งต้นคู่ที่ทำปฏิกิริยามีปริมาณมากขึ้นจากกฎอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จึงเพิ่มขึ้น และผลของอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้ามีผลต่อค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยาเคมี อุณหภูมิแก๊สป้อนเข้าสูงจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงจึงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของโลหะ निकเกิลออกไซด์ และ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า

รูปที่ 4.19 (ก) กราฟที่แสดงผลของผลกระทบจากตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งพบว่าตัวแปร A ให้ผลเชิงลบ อธิบายได้ว่า การเพิ่มขนาดอนุภาคของโลหะออกไซด์จะเป็นการลดพื้นที่ผิวต่อปริมาตร และลดพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สเชื้อเพลิงและโลหะออกไซด์ลง ส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกิริยาเคมีฝั่งเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงมีค่าลดลง ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนจึงลดลงตามไปด้วย ส่วนผลกระทบจากความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า และอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้ามีผลเชิงบวก อธิบายได้ว่า การเพิ่มความเร็วแก๊สเข้าจะส่งผลค่าอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น หากเทียบกับกฎอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี เปรียบเสมือนการเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยา จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าเพิ่มขึ้น และตัวแปรสุดท้ายอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า ซึ่งอุณหภูมิจะมีผลต่อค่าคงที่ปฏิกิริยา เป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้สูงขึ้น

รูปที่ 4.19 (ข) กราฟแสดงผลกระทบของอันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของโลหะนิกเกิลออกไซด์ และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า ที่ค่าตัวแปร D ผลเชิงบวก และเมื่อค่าตัวแปร A เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนมีค่าลดลง และค่าตัวแปร D ผลเชิงลบ และเมื่อค่าตัวแปร A เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากผลของขนาดอนุภาคที่มีผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัส (Contact area) ระหว่าง แก๊สเชื้อเพลิงและโลหะนิกเกิลออกไซด์ เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสลดลง ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนจึงลดลง และผลจากความเร็วแก๊สป้อนเข้าถ้าใช้ความเร็วแก๊สป้อนเข้าสูงจะทำให้สารตั้งต้นคู่ที่ทำปฏิกิริยากับแก๊สเชื้อเพลิง มีความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงขึ้น ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนจึงเพิ่มขึ้น

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้นำไปสร้างสมการถดถอยโดยมีค่าตัวแปรตอบสนองคือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนคือ สมการ (4.3) และสมการที่ (4.4) ตามลำดับ และทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการหาส่วนตกค้างจากแบบสมการแบบจำลองถดถอย ในภาคผนวก ข3 และ ข4 ซึ่งมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ เพราะมีการกระจายตัวอย่างไร้รูปแบบ และความแปรปรวนคงที่

$$Y_3 = 65.15 - 2.96 X_A + 2.45 X_B + 4.02 X_C + 6.4 X_D - 2.81X_A X_B + 3.55 X_A X_C - 7.37X_A X_D - 6.17 X_B X_C - 3.35X_B X_D - 2.25X_C X_D - 5.41X_A X_C X_D + 1.08 X_B X_C X_D \quad (4.3)$$

$$Y_4 = 65.38 - 2.13 X_A + 3.3 X_C + 7.58 X_D - 4.13X_A X_B + 2.43X_A X_C - 6.84 X_A X_D - 5.15 X_B X_C - 4.2 X_B X_D - 3.15 X_C X_D - 1.78 X_A X_B X_D - 6.41X_A X_C X_D + 2.15X_B X_C X_D + 0.96X_A X_B X_C X_D \quad (4.4)$$

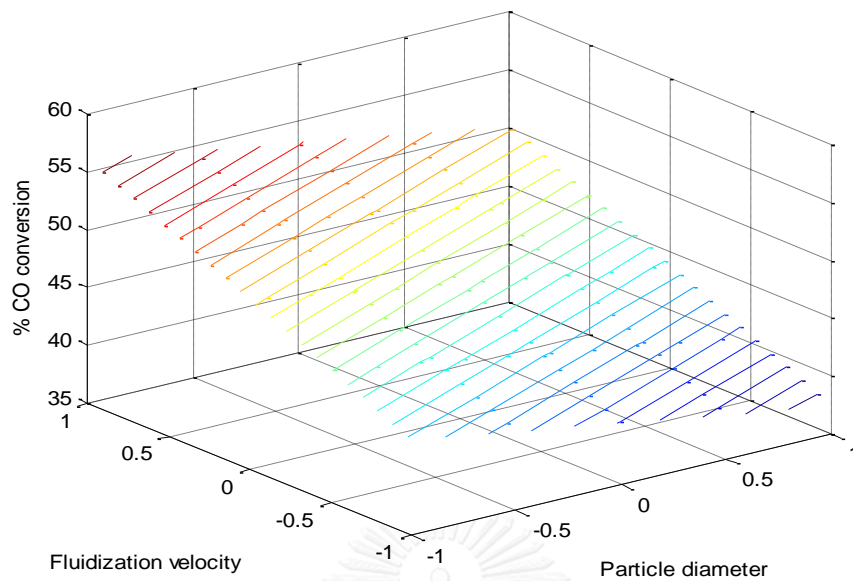
กำหนดให้

Y_3 คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์

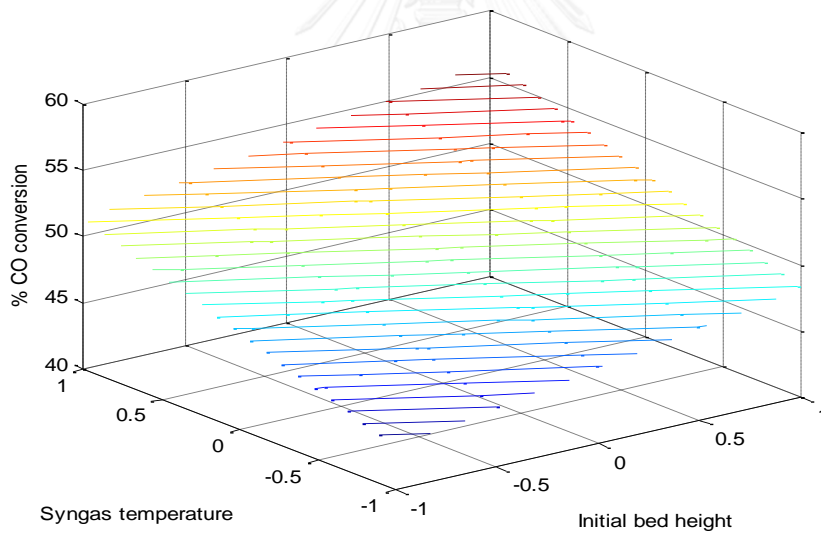
Y_4 คือ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจน

$X_A X_B X_C X_D$ คือค่ารหัสเข้าตัวแปร (Coded variable) A B C D

จากกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง (Response surface) ในรูปที่ 4.20 (ก) แสดงผลค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าขนาดอนุภาคของโลหะ निकเกิลออกไซด์ และ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วแก๊สป้อนเข้าและลดขนาดอนุภาคของโลหะ निकเกิลออกไซด์ จะส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากผลอันตกริยาร่วมระหว่างขนาดอนุภาคและความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า คือการลดขนาดอนุภาคของโลหะ निकเกิลออกไซด์และเพิ่มความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า จะเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ใช้ทำปฏิกิริยากับโลหะ निकเกิลออกไซด์ และการลดขนาดอนุภาค निकเกิลออกไซด์จะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค ค่าที่สภาวะเหมาะสม ที่ขนาดอนุภาค निकเกิลออกไซด์ 0.00015 เมตร และ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันจะให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุด และกราฟพื้นที่ผิวตอบสนอง ในรูปที่ 4.20 (ข) แสดงผลค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าความสูงเบดเริ่มต้น และ อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าพบว่าเมื่อเพิ่มความสูงเบดเริ่มต้น และเพิ่มอุณหภูมิแก๊สป้อนเข้าจะส่งผลให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งอธิบายได้จากผลอันตกริยาร่วมระหว่างความสูงเบดเริ่มต้นและอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า การเพิ่มอุณหภูมิของแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าจะเป็นการเพิ่มค่าคงที่ปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูงและการเพิ่มความสูงเบดเริ่มต้นทำให้สารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาเคมีมีปริมาณมากขึ้น ในรูปที่ 4.20

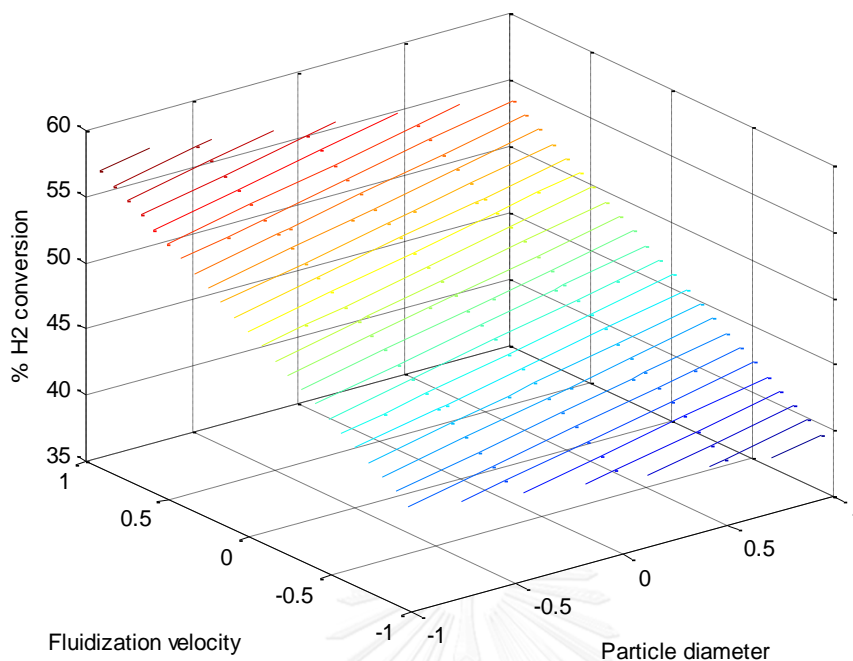


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.20 พื้นผิวตอบสนองของค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (ก) เมื่อขนาดอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าแตกต่างกัน (ข) เมื่อความสูงเบดเริ่มต้นและอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าแตกต่างกัน



รูปที่ 4.21 พื้นผิวตอบสนองของค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจน เมื่อขนาดอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าแตกต่างกัน

กราฟพื้นที่ผิวตอบสนองรูปที่ 4.21 แสดงผลค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจน เมื่อทำการเปลี่ยนค่าขนาดอนุภาคของโลหะนิกเกิลออกไซด์และ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าผลที่ได้นั้นมีแนวโน้มแบบเดียวกับ ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือ การลดขนาดอนุภาคโลหะนิกเกิลออกไซด์และเพิ่มความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า จะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนมากขึ้น ค่าที่สภาวะเหมาะสม ที่ขนาดอนุภาคนิกเกิลออกไซด์ 0.00015 เมตร และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันจะให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สไฮโดรเจนสูงที่สุด

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ 1. การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง 2. การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ที่ส่งผลต่อดัชนีการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง 3. การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิกิริยาเคมี 4. ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

5.1.1 การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพองแก๊ส

การหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่จะใช้อธิบายพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพองแก๊สได้นั้น จะต้องหาพื้นที่ในการคำนวณที่มีจำนวนเซลล์ 7,500 เซลล์ ซึ่งสามารถใช้ทำนายค่าได้ถูกต้องและใช้เวลาน้อยที่สุด และการหาค่าเฉลี่ยจะเวลาที่ใช้คำนวณเข้าสู่สภาวะคงตัว 5-20 วินาที เลือกใช้แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ของ Gidaspow drag model ใช้ค่า restitution coefficient between particle and particle เท่ากับ 0.99 restitution coefficient between particle and wall เท่ากับ 1 และค่า specularity coefficient เท่ากับ 0.6 จะคำนวณผลคำนวณเชิงตัวได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ของ Jung และคณะ (2012) [4] มากที่สุด

5.1.2 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) ที่ส่งผลต่อดัชนีการผสมในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพองแก๊ส

จากผลการจำลองเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพองแก๊ส พบว่ากรณีศึกษาทั้งหมด 16 กรณี กรณีศึกษาที่ให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่ต่ำที่สุด คือ กรณีศึกษาที่ 14 อนุภาคของแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0006 เมตร ความสูงเบดเริ่มต้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.5 เท่า ความหนาแน่นของแข็ง 2,350 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด์เซชัน 1.75 เท่า และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของของแข็ง ทั้งขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของแข็ง ความสูงของแข็งเริ่มต้น ความเร็วแก๊สป้อนเข้า อัตราการไหลระหว่างขนาดอนุภาคและความสูงของแข็งเริ่มต้น อัตรา

กิริยาระหว่างขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของแข็ง อันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคของแข็งและความเร็วแก๊สป้อนเข้า และอันตรกิริยาระหว่างความสูงเบดเริ่มต้นและความเร็วแก๊สป้อนเข้า ทั้งหมดล้วนมีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวแกนของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองแก๊ส และได้สมการถดถอยเชิงเส้นเพื่อความสะดวกในการนำสมการนี้ไปใช้งานวิจัยในอนาคตต่อไป และจากกราฟพื้นผิวตอบสนอง ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของนิกเกิลออกไซด์ กรณีที่ต้องการให้ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวแกนต่ำที่สุด จะต้องเลือกใช้อุณหภูมิของนิกเกิลออกไซด์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่น 2,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0006 เมตร จึงจะทำให้ดัชนีการผสมของแข็งในแนวแกนมีค่าต่ำที่สุด

สำหรับการผสมของอนุภาคของของแข็งในแนวรัศมี กรณีศึกษาที่ 1 อนุภาคของแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0002 เมตร ความสูงเบดเริ่มต้นต่อเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.5 เท่า ความหนาแน่นของแข็ง 1,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน 1.5 เท่า จะให้ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวรัศมีของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่ต่ำที่สุด และผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของของแข็ง ทั้งขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของแข็ง ความสูงของแข็งเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างขนาดอนุภาคและความหนาแน่นของแข็ง และอันตรกิริยาระหว่างความสูงของแข็งเริ่มต้นและความเร็วแก๊สป้อนเข้า มีผลต่อส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวรัศมีของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองแก๊ส สมการถดถอยเชิงเส้น และกราฟพื้นที่ตอบสนอง ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของนิกเกิลออกไซด์ กรณีที่ต้องการค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีต่ำที่สุด จะต้องเลือกใช้อุณหภูมิของโลหะนิกเกิลออกไซด์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพ ความหนาแน่น 1,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0002 เมตร จึงจะทำให้ดัชนีการผสมของแข็งในแนวแกนมีค่าต่ำที่สุด กรณีที่จะนำไปใช้งานจริงๆ ในระบบผู้ทำวิจัยเสนอว่า ควรจะเลือกกรณีศึกษาที่ 14 ไปใช้งาน เพราะจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวรัศมีจะพบว่า มีค่าที่น้อยมากในแต่ละกรณีซึ่งเป็นลักษณะเด่นเฉพาะของช่วงการไหลเบดแบบฟองแก๊สอยู่ แล้ว ผลต่างของค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวรัศมีในแต่ละกรณีมีค่าแตกต่างกันน้อยมากๆ จึงควรให้ความสำคัญกับดัชนีการผสมในแนวแกนแทน ดังนั้นสรุปสำหรับการเลือกอนุภาคของนิกเกิลออกไซด์ให้ได้ดัชนีการผสมที่ดีสุดในการเดินระบบควรเลือกใช้ นิกเกิลออกไซด์ ที่มีสมบัติทางกายภาพ ที่ความหนาแน่น 2,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0006 เมตร

5.1.3 การจำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมี

การหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่จะใช้อธิบายพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมีนั้น จะต้องหาพื้นที่ในการคำนวณที่มีจำนวนเซลล์ 17,732 เซลล์ ซึ่งสามารถใช้ทำนายค่าได้ถูกต้องและใช้เวลาอันน้อยที่สุด และการหาค่าเฉลี่ยจะเวลาที่ใช้คำนวณเข้าสู่ภาวะคงตัว 15-25 วินาที เลือกใช้แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ของ Gidaspow drag model ใช้ค่า restitution coefficient between particle and particle เท่ากับ 0.95 restitution coefficient between particle and wall เท่ากับ 0.95 และค่า specular coefficient เท่ากับ 0.6 จะคำนวณผลคำนวณเชิงตัวได้ใกล้เคียงกับผลการทดลอง ของ Johansson และคณะ (2013) [21] มากที่สุด ผลคำนวณเชิงตัวเลข ความดันลดฝั่งเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิงให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่ความดันลดตลอดแนวความสูงเครื่องปฏิกรณ์อากาศไม่สอดคล้องกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการนั้นเป็นเพราะ ผลของการเลือกใช้แบบจำลองแรงต้านระหว่างภูมิภาค (Drag model) หากต้องการจำลองในภาวะที่มีอนุภาคของแข็งระบบอยู่กันอย่างหนาแน่นควรเลือกใช้แบบจำลองแรงต้านการไหล EMMS (energy minimization multiscale)

5.1.4 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง

จากผลการศึกษาผลกระทบของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิริยาเคมีภายในเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง พบว่า กรณีที่ 13 ขนาดอนุภาคโลหะ निकิลออกไซด์ 0.00015 เมตร อัตราส่วนความสูงของแข็งเริ่มต้นต่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ 0.75 อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า 873 K และ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน นั้นจะให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และ แก๊สไฮโดรเจน สูงที่สุด และจากการวิเคราะห์ผลความแปรปรวนเพื่อศึกษา ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิง คือ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า อัตราการไหลระหว่างขนาดอนุภาคและความเร็วแก๊สป้อนเข้า อัตราการไหลระหว่างความสูงเบดเริ่มต้น และ อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิง ป้อนเข้าระบบ สำหรับการหาค่าที่เหมาะสม เมื่อขนาดอนุภาคของ निकิลออกไซด์และความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้าแตกต่างกัน ที่ขนาดอนุภาคนิกิลออกไซด์ 0.00015 เมตร อัตราส่วน ความสูงเบดเริ่มต้น ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 0.75 เท่า อุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า 873 K และ ความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงป้อนเข้า 1.5 เท่าของความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชันจะให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงสูงที่สุด ทั้งนี้หากพิจารณาสมการ แบบจำลอง

แกนกลางหดตัว (shrinking core model) จะพบว่าผลกระทบของตัวแปรหลักนั้นเป็นไปตามตัวแปรในสมการผลกระทบของตัวแปรหลักในงานวิจัยนี้ยังได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ [27] / [28] Harichandan และคณะ [16] Adenz และคณะ [34]

ในการเดินระบบเครื่องปฏิกรณ์เชื้อเพลิง ซึ่งช่วงการไหลอยู่ในช่วงรูปแบบการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling bed) นั้น หากต้องการค่าร้อยละการเปลี่ยนที่สูง ผู้ทำวิจัยแนะนำให้ใช้อุณหภูมิออกไซด์ขนาดเล็ก เพิ่มความเร็วแก๊สเชื้อเพลิงและเพิ่มอุณหภูมิแก๊สเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าระบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองอุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบดแบบฟองแก๊สเพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าดัชนีการผสมในแนวแกนและแนวรัศมี นั้นอาจต้องทำการจำลองเป็นระบบ 3 มิติ เพื่อที่จะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับระหว่างผลการจำลองในระบบ 2 มิติ และ 3 มิติว่ามีความแตกต่างกันของผลของตัวแปรดำเนินการมากน้อยเพียงใด ส่วนผลการจำลองเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมีนั้น เนื่องจากความยุ่งยากซับซ้อนในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และการใช้เวลาในการคำนวณที่ใช้เวลานาน ผู้วิจัยจึงเลือกที่จะจำลองในระบบ 2 มิติแทน การจำลองในระบบ 2 มิตินี้ไม่ได้คิดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับการทำงานของไซโคลนจริงๆ โดยอาจจะส่งผลกระทบต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนของแก๊สเชื้อเพลิงได้ ในการพัฒนางานวิจัยนี้ให้สมบูรณ์มากขึ้นจึงควรทำการจำลองเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมีในระบบ 3 มิติเพื่อเปรียบเทียบผลของตัวแปรดำเนินการว่าแตกต่างกับ 2 มิติ

รายการอ้างอิง

1. Stolten, D. and V. Scherer, *Efficient carbon capture for coal power plants*, ed. Edition. 2011, Weinheim: John Wiley & Sons. 640
2. Versteeg, H.K. and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamic*. 2 ed. 2007, England: Pearson Education. 503.
3. Loha, C., H. Chattopadhyay, and P.K. Chatterjee, *Assessment of drag models in simulating bubbling fluidized bed hydrodynamics*. *Chemical Engineering Science*, 2012. 75(0): p. 400-407.
4. Jung, J., D. Gidaspow, and I.K. Gamwo, *Measurement of Two Kinds of Granular Temperatures, Stresses, and Dispersion in Bubbling Beds*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005. 44(5): p. 1329-1341.
5. Li, B., et al., *Advances in CO₂ capture technology: A patent review*. *Applied Energy*, 2013. 102(0): p. 1439-1447.
6. Fan, L.S., *Chemical looping systems for fossil energy conversions*. 2010, New Jersey: John Wiley & Sons. 448.
7. Ryden, M., et al., *NiO supported on Mg-ZrO₂ as oxygen carrier for chemical-looping combustion and chemical-looping reforming*. *Energy & Environmental Science*, 2009. 2(9): p. 970-981.
8. Montgomery, D.C., *DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS*. 5 th ed. 2001: John Wiley & Sons. 680.
9. Patra, C., *CFD SIMULATIONS OF FLUIDIZED BED BIOMASS GASIFICATION*, in *Chemical Engineering*. 2010, National Institute of Technology, Rourkela. p. p. 81.
10. Dogan, T., et al., *Simulation of Laminar Pipe Flows : Mechanics of Fluids and Transport Processes CFD PRELAB 1*, T.U.o. Iowa, Editor. 2010.
11. Patankar, S.V., *Numerical Heat transfer and fluid flow*. computational methods in mechanics and thermal sciences. 1980, New York: McGRAW-HILL BOOK COMPANY. 205.

12. Shuai, W., et al., *Hydrodynamic simulation of fuel-reactor in chemical looping combustion process*. Chemical Engineering Research and Design, 2011. 89(9): p. 1501-1510.
13. Wang, S., et al., *Simulation of the Chemical Looping Reforming Process in the Fuel Reactor with a Bubble-Based Energy Minimization Multiscale Model*. Energy & Fuels, 2013. 27(8): p. 5008-5015.
14. Esmaili, E. and N. Mahinpey, *Adjustment of drag coefficient correlations in three dimensional CFD simulation of gas–solid bubbling fluidized bed*. Advances in Engineering Software, 2011. 42(6): p. 375-386.
15. Yas, *Mixing Patterns and Residence Time Determination in a Bubbling Fluidized Bed System*. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2012. 5(2): p. 170-183.
16. Harichandan, A.B. and T. Shamim, *CFD analysis of bubble hydrodynamics in a fuel reactor for a hydrogen-fueled chemical looping combustion system*. Energy Conversion and Management, 2014. 86(0): p. 1010-1022.
17. Deng, Z., et al., *Numerical simulation of chemical looping combustion process with CaSO₄ oxygen carrier*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2009. 3(4): p. 368-375.
18. Sharma, A., et al., *CFD modeling of mixing/segregation behavior of biomass and biochar particles in a bubbling fluidized bed*. Chemical Engineering Science, 2014. 106(0): p. 264-274.
19. Mahalatkar, K., et al., *CFD simulation of a chemical-looping fuel reactor utilizing solid fuel*. Chemical Engineering Science, 2011. 66(16): p. 3617-3627.
20. Guan, Y., et al., *Three-dimensional CFD simulation of hydrodynamics in an interconnected fluidized bed for chemical looping combustion*. Powder Technology, 2014. 268(0): p. 316-328.
21. Johansson, E., et al., *Gas leakage measurements in a cold model of an interconnected fluidized bed for chemical-looping combustion*. Powder Technology, 2003. 134(3): p. 210-217.

22. Shuai, W., et al., *Fluid dynamic simulation in a chemical looping combustion with two interconnected fluidized beds*. Fuel Processing Technology, 2011. 92(3): p. 385-393.
23. *FLUENT User's Guide*, in *FLUENT*. 2003.
24. Kolbeinsen, L., et al., *Chemical Looping Combustion - Reduction of nickel oxide/nickel aluminate with hydrogen*. 2003.
25. Escudero, D.R., *Bed height and material density*, in *Mechanical engineering*. 2010, Iowa State University. p. 117.
26. Wang, X., et al., *Multiphase Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of Chemical Looping Combustion Using a CuO/Al₂O₃ Oxygen Carrier: Effect of Operating Conditions on Coal Gas Combustion*. Energy & Fuels, 2011. 25(8): p. 3815-3824.
27. Wang, S., et al., *Numerical Simulation of Hydrogen Production via Chemical Looping Reforming in Interconnected Fluidized Bed Reactor*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014. 53(11): p. 4182-4191.
28. Wang, X., et al., *Three-dimensional simulation of a coal gas fueled chemical looping combustion process*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2011. 5(6): p. 1498-1506.
29. Bustamante, F., et al., *High-temperature kinetics of the homogeneous reverse water-gas shift reaction*. AIChE Journal, 2004. 50(5): p. 1028-1041.
30. Galvita, V.V., et al., *Catalyst-assisted chemical looping for CO₂ conversion to CO*. Applied Catalysis B: Environmental, 2015. 164(0): p. 184-191.
31. Jin, G.T., et al., *GAS AND SOLID MIXING IN A THREE PARTITIONED FLUIDIZED BED*, in *The 13 th International Conference on Fluidization - New Paradigm in Fluidization Engineering*. 2010.
32. Gullichsen, J., *Combined fluidizing and vacuum pump*. 1988, Google Patents.
33. Byron Smtj R J , M.L., Murthy Shekhar Shantha, *A Review of the Water Gas Shift Reaction Kinetics*. International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2010. 8.
34. Adánez, J., et al., *Chemical Looping Combustion in a 10 kWth Prototype Using a CuO/Al₂O₃ Oxygen Carrier: Effect of Operating Conditions on Methane*

Combustion. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006. 45(17): p. 6075-6080.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การคำนวณความเร็วที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Minimum turbulent fluidization velocity : U_c)

$$\frac{U_c}{\sqrt{gd_p}} = \left(\frac{\mu_{f20}}{\mu_f} \right)^{0.2} \left[K \left(\frac{\rho_{f20}}{\rho_f} \right) \left(\frac{\rho_{p-\rho_f}}{\rho_f} \right) \left(\frac{D_f}{d_p} \right) \right]^{0.27}$$

$$K = \left[\left(\frac{0.211}{D_f^{0.27}} \right) + \frac{2.42 \times 10^{-31}}{D_f^{1.27}} \right]^{1/0.27}$$

- D_f คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)
- ρ_{f20} คือ ความหนาแน่นของของแก๊ส ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- μ_{f20} คือ ความหนืดของของแก๊ส ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
- ρ_f คือ ความหนาแน่นของของแก๊ส ที่อุณหภูมิดำเนินการ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- μ_f คือ ความหนืดของของแก๊ส ที่อุณหภูมิดำเนินการ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
- d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)
- ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- g คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

- ที่อุณหภูมิ 773 K
- $\mu_f = 3.62 \times 10^{-5}$ กิโลกรัมต่อเมตรวินาที
- $\mu_{f20} = 1.8 \times 10^{-5}$ กิโลกรัมต่อเมตรวินาที
- $\rho_p = 2,600$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- $\rho_{f20} = 1.17$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- $\rho_f = 0.452443$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- $d_p = 150 \times 10^{-6}$ เมตร
- $g = 9.8$ เมตรต่อวินาทีกำลังสอง
- $D_f = 0.19$ เมตร

$$K = \left[\left(\frac{0.211}{0.19^{0.27}} \right) + \frac{2.42 \times 10^{-3}}{0.19^{1.27}} \right]^{1/0.27}$$

$$\frac{U_c}{\sqrt{9.8 \times 150 \times 10^{-6}}} = \left(\frac{1.8}{3.62} \right)^{0.2} \left[K \left(\frac{1.17}{0.452443} \right) \left(\frac{2600 - 0.452443}{0.452443} \right) \left(\frac{0.19}{150 \times 10^{-6}} \right) \right]^{0.27}$$

$$U_c = 1.0769012 \text{ m/s}$$

การคำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity : U_{mf})

$$u_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2}{150\mu} g(\rho_p - \rho_f) \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}}$$

$$Re = \frac{\rho_f d_p U}{\mu_f} < 10$$

ϕ = คือ ค่าความกลมของอนุภาค Sphericity (ไร้หน่วย)

d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_f คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ϵ_{mf} คือ สัดส่วนช่องว่างโดยปริมาตร (ไร้หน่วย)

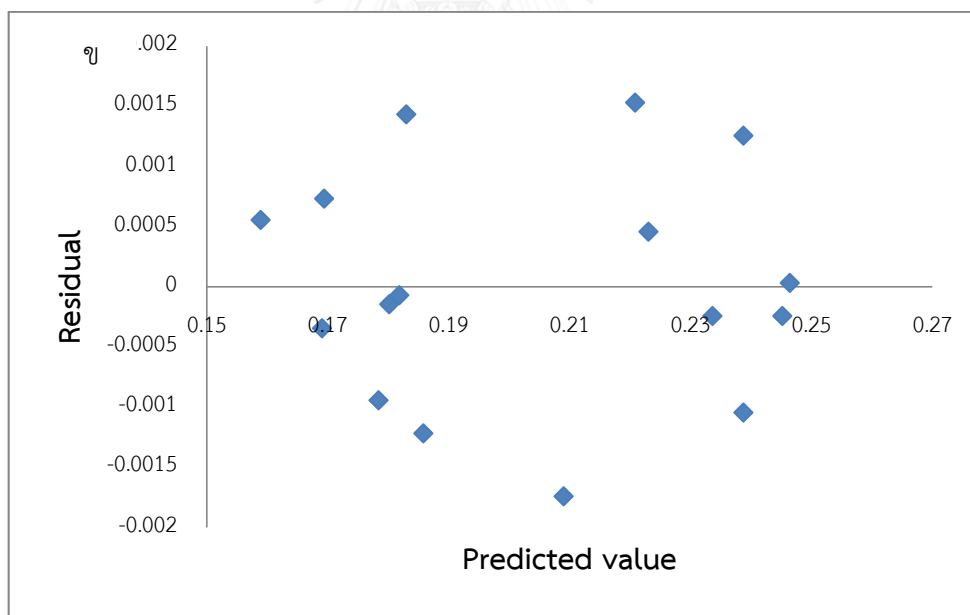
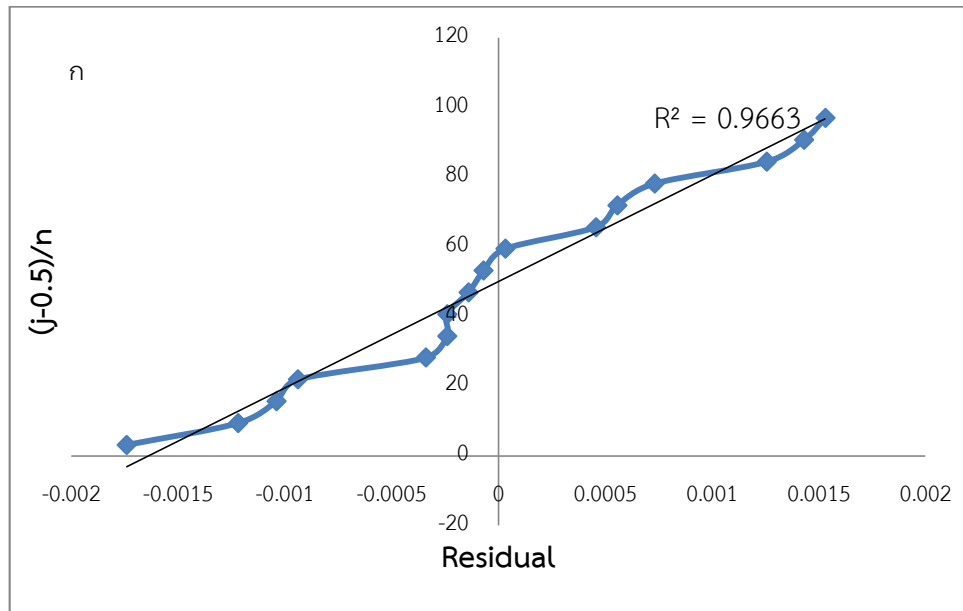
μ_f คือ ความหนืดของแก๊ส ที่อุณหภูมิดำเนินการ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

U คือ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (เมตรต่อวินาที)

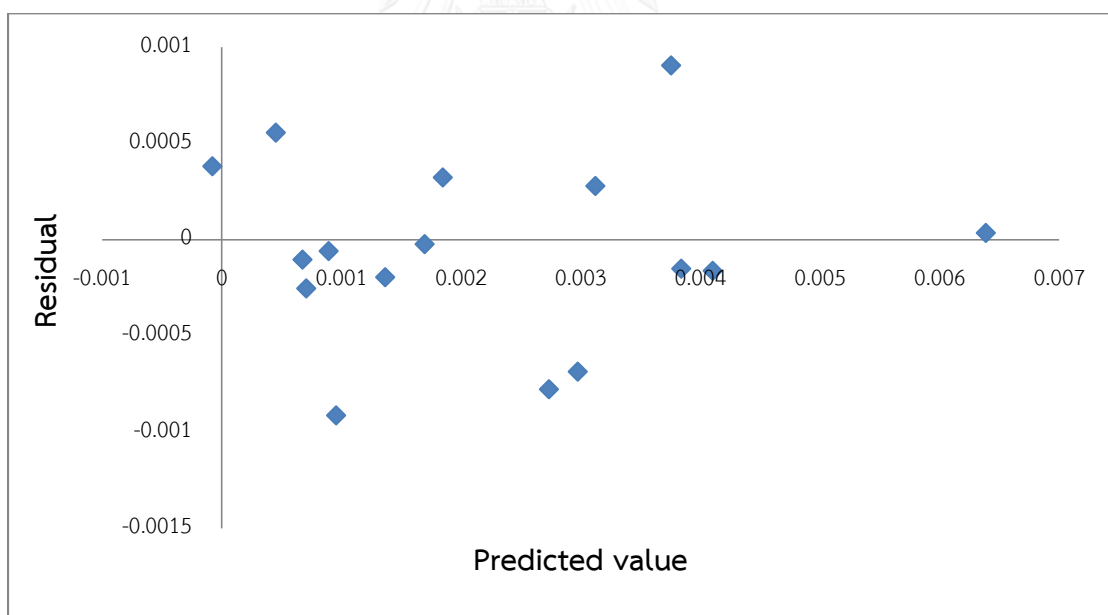
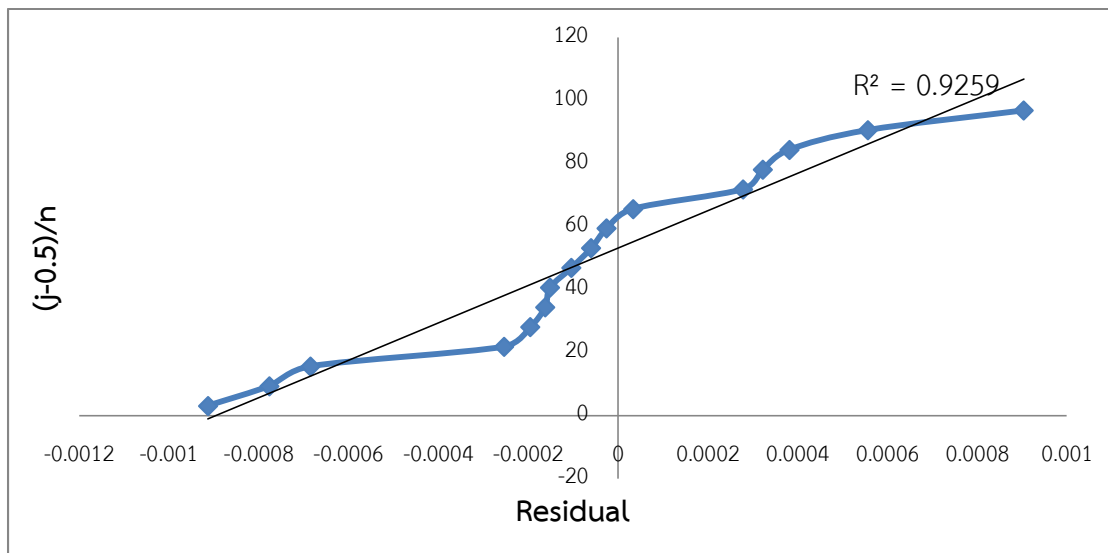
$$u_{mf} = \frac{(1 \times 0.0000150)^2}{150 \times 0.000018} \times 9.8 \times (2600 - 1.17) \frac{0.45^3}{1 - 0.45}$$

$$u_{mf} = 0.0785 \text{ m/s}$$

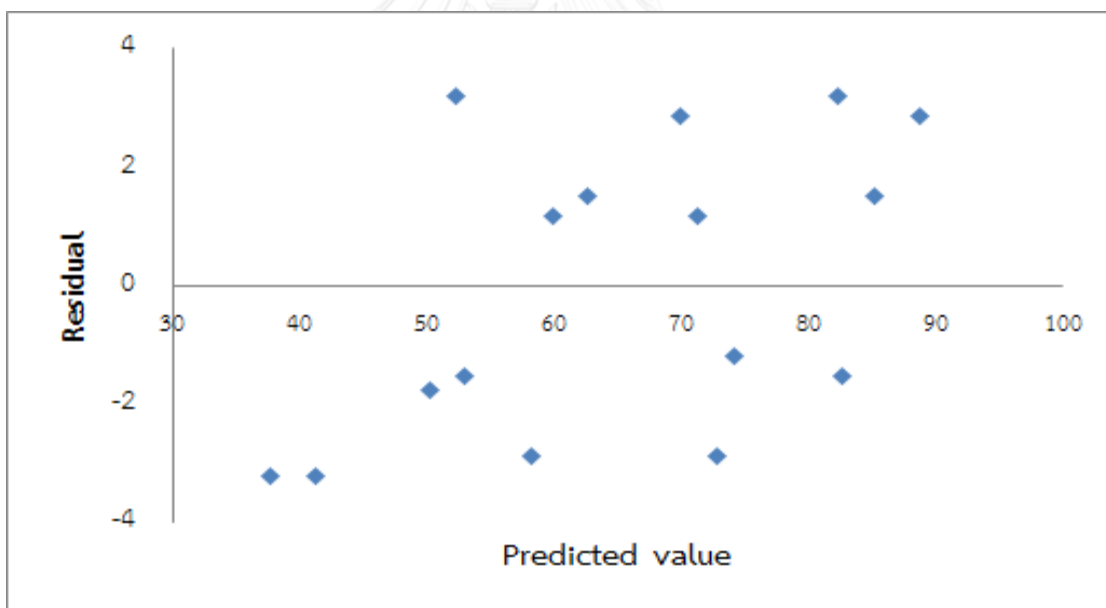
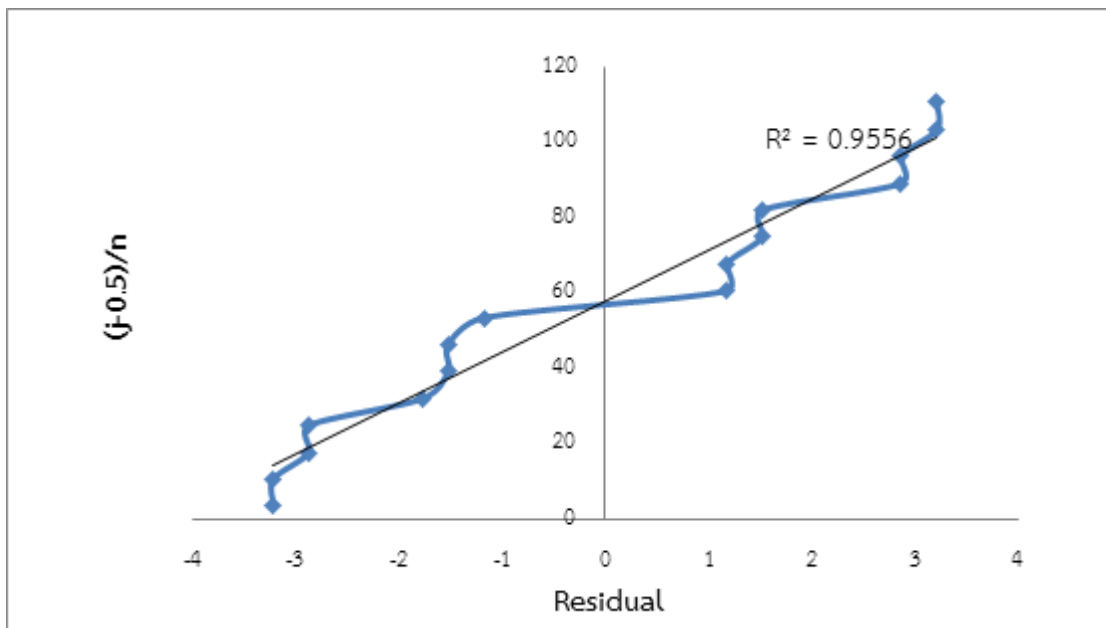
ภาคผนวก ข



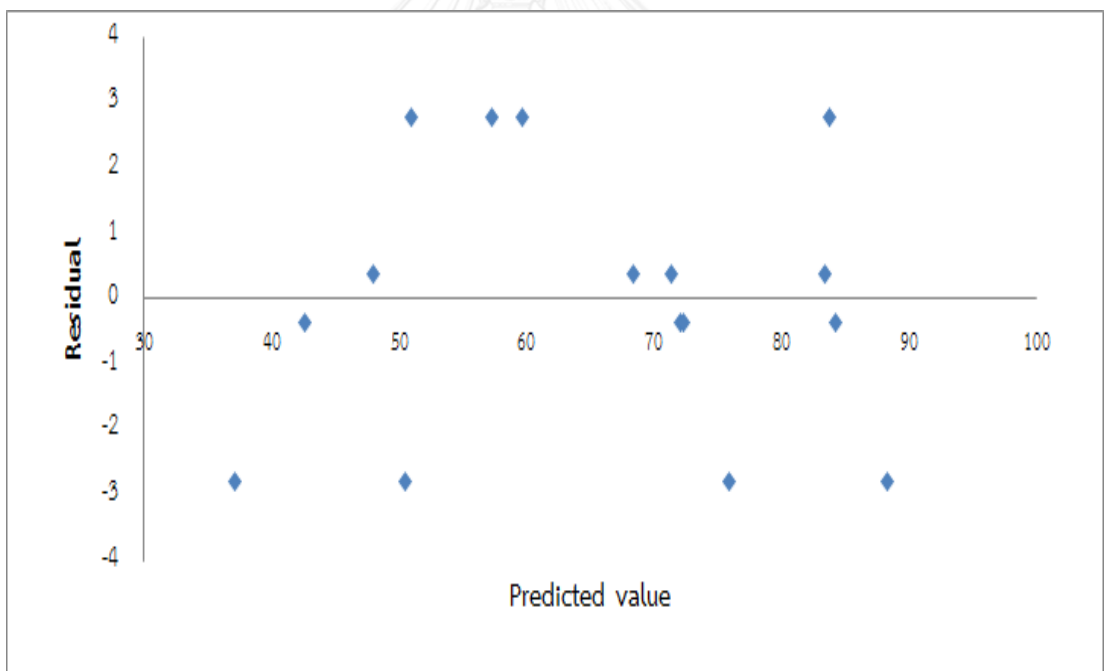
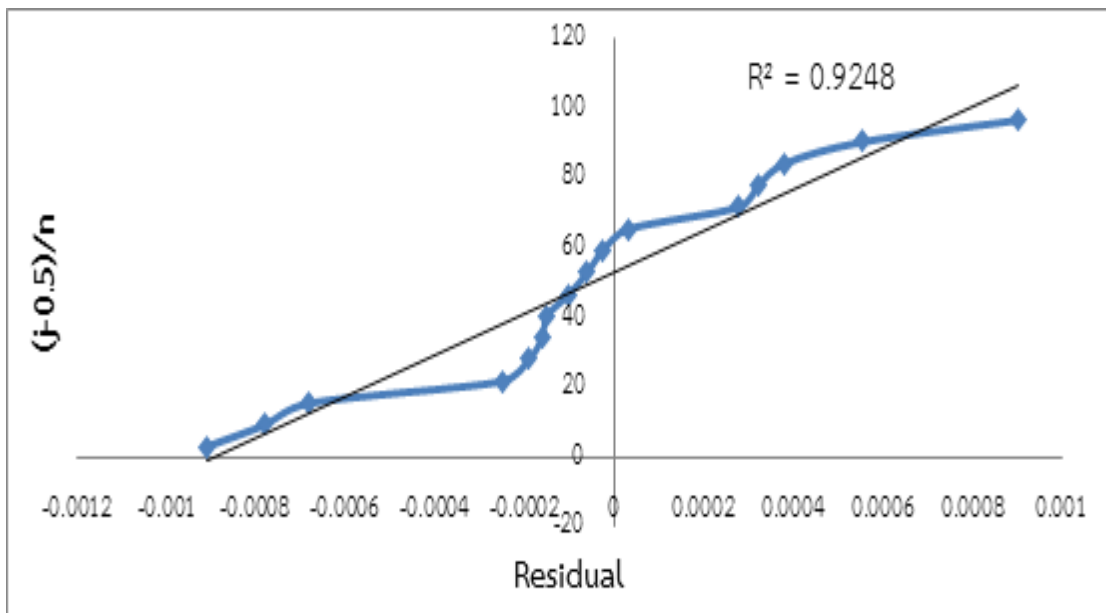
รูปที่ ข1(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าทำนายได้จาก สมการ (4.1)



รูปที่ ๒(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าทำนายได้จาก สมการ (4.2)



รูปที่ ข3(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าทำนายได้จาก สมการ (4.3)



รูปที่ ข4(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าทำนายได้จาก สมการ (4.4)

ภาคผนวก ค

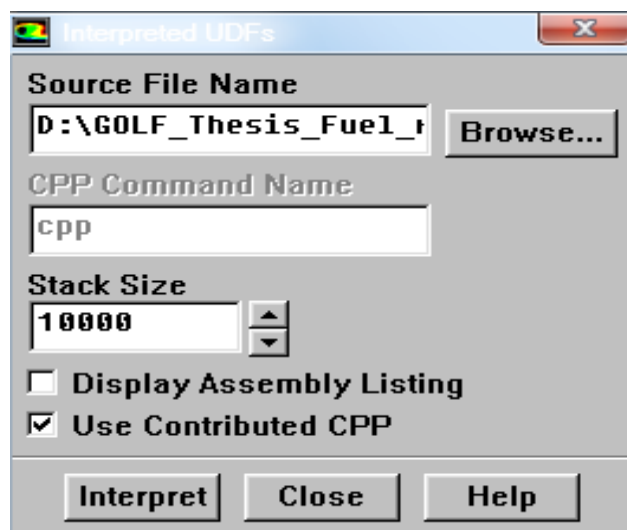
โปรแกรมเพิ่มเติมที่ใช้ในการจำลองภาวะบนโปรแกรม ANSYS FLUENT 6.3.26

งานวิจัยในส่วนนี้เป็นการจำลองภาวะของเครื่องปฏิกรณ์เผาไหม้แบบวงปฏิริยาเคมีในส่วนของ การคำนวณปฏิริยาเคมีนั้น สำหรับในงานวิจัยนี้จะมีทั้ง ปฏิริยาเคมีแบบวิวิธพันธ์ และปฏิริยาเคมีแบบเอกพันธ์ ซึ่งจะทำให้การเขียนฟังก์ชันเพิ่มเติม ในส่วนของปฏิริยาที่ 1 2 3 และ 4 ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในการจำลองการเกิดปฏิริยาเคมีด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT ผู้ใช้งานสามารถเขียนคำสั่ง และสมการนอกเหนือจากสมการพื้นฐานที่มีอยู่ในโปรแกรม ลงไปในโปรแกรมให้ทำการคำนวณอัตราการเกิดปฏิริยาเคมีได้

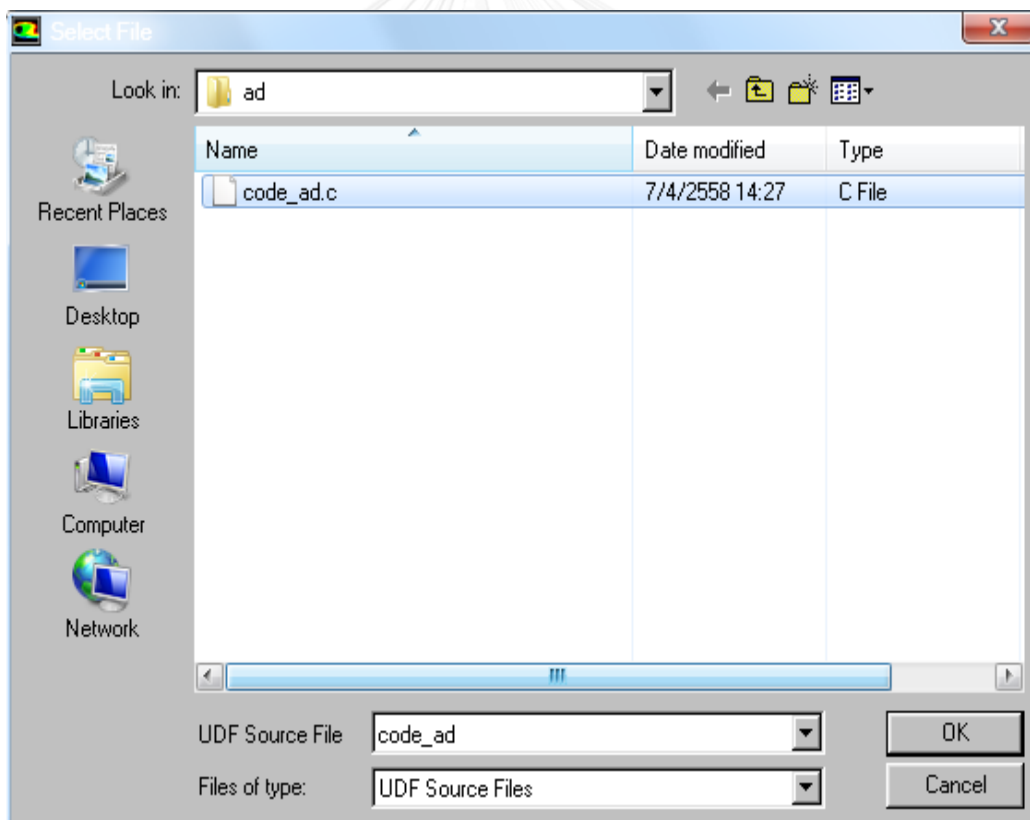
โปรแกรมที่ผู้ใช้งานเขียนขึ้นมาจะเรียกว่า User Define Function หรือ UDF ซึ่งการเขียนจะเขียนโดยใช้ภาษา C และใช้ฟังก์ชันที่ โปรแกรม ANSYS FLUENT กำหนดไว้ก่อนแล้ว ซึ่งคำสั่งเหล่านี้จะถูกเก็บไว้ใน udf.h ดังนั้นทุกครั้งที่ต้องการใช้คำสั่งจะต้องเขียนคำสั่ง #include udf.h ขึ้นต้นหัวข้อแฟ้ม UDF ทุกครั้ง ผู้ใช้สามารถเขียน UDF จากโปรแกรมแก้ไขข้อความ (Text Editor) หรือ โปรแกรมที่ใช้แปลโปรแกรมภาษา ซี (Dev C++) และต้องบันทึกแฟ้มนามสกุล C เช่น code_a.c หลังจากนั้นจะนำไปแปลโปรแกรม (Interpreted) ให้อยู่ในรูปของ udfconfig ซึ่งเป็น C Header File รายละเอียดการใช้งานนั้นสามารถศึกษาได้จาก คู่มือ Fluent User's Guide

ขั้นตอนการแปลโปรแกรมของรหัสต้นฉบับ

1. สร้างแฟ้มรหัสต้นฉบับของ UDF ใน Directory เดียวกับแฟ้มที่ใช้ดำเนินงานของ ANSYS FLUENT 6.3.26
2. เริ่มโปรแกรม ANSYS FLUENT ภายใน Directory เดียวกับแฟ้ม UDF
3. โหลดแฟ้มที่ต้องการใช้งานเข้าสู่โปรแกรม Fluent
4. เปิดหน้าต่างการแปลโปรแกรม UDF (Interpreted UDF) ในโปรแกรม ANSYS FLUENT
Define → User-Defined Functions → Interpreted
5. เลือกแฟ้มรหัสต้นฉบับที่หน้าต่าง Interpreted UDFs (รูปที่ ค1) โดยกดปุ่ม Browse ที่จะเป็นการเปิดหน้าต่างเลือกแฟ้ม (Select File) ขึ้นมา (รูปที่ ค2)



รูปที่ ค1 หน้าต่างการแปลโปรแกรม UDF (Interpreted UDFs)



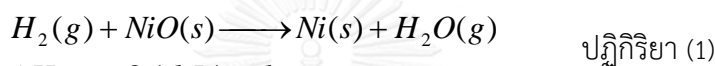
รูปที่ ค2 หน้าต่างเลือกแฟ้ม (Select File)

- เลือกแฟ้มที่ต้องการแปลโปรแกรม รหัสต้นฉบับ UDF แล้วกด Interpreted

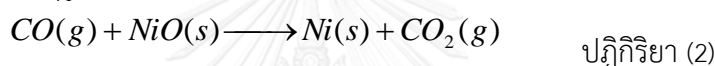
7. หลังจากทำการแปลแพ้มรหัทส และนำเข้ามาเรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้สามารถเรียกใช้งาน User define function จากหน้าต่างในโปรแกรม ANSYS FLUENT ในงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธ์โดยเลือกจาก

Define \longrightarrow Phase \longrightarrow Interaction

และทำการกำหนดสมการปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธ์ในหน้าต่าง Phase Interaction (รูป ค3) เลือก Reactions และทำการใส่สมการปฏิกิริยาเคมีลงไป ในส่วนของ Reaction Rate Function ให้เลือกแพ้มรหัทสที่เราทำการแปล โปรแกรม UDF ไว้ เช่น ปฏิกิริยาเคมีแบบวิวิธพันธ์แสดงดังปฏิกิริยาที่ (1) (2) (3) และ (4) โดยปฏิกิริยาที่ (1) เลือกแพ้มรหัทสเป็น Rate_CO ปฏิกิริยาที่ (2) เลือกแพ้มรหัทสเป็น Rate_H2 ปฏิกิริยาที่ (3) เลือกแพ้มรหัทสเป็น Rate_NiO และปฏิกิริยาที่ 4 เลือกแพ้มรหัทสเป็น Rate_Water_Gas



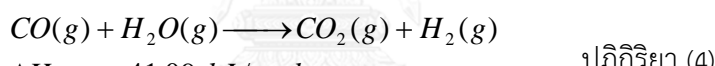
$$\Delta H_{r,1} = -2.1 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H_{r,2} = -43.3 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H_{r,2} = -479 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta H_{r,4} = -41.09 \text{ kJ/mol}$$

โดยสมการอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีแสดงตามลำดับดังนี้

$$(-r)_j = \frac{\alpha_p Y_{NiO}}{r_{g,NiO}} k_j C^n \quad (\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1})$$

โดย j , C , n และ r_g สัญลักษณ์เหล่านี้คือ จำนวนของปฏิกิริยาเคมี ($j=1,2,3,4$), ความเข้มข้นของแก๊สเชื้อเพลิง, อันดับของปฏิกิริยา (Order of reaction) และรัศมีเฉลี่ยของอนุภาค निकิลออกไซด์ตามลำดับ และค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยานั้นสมมุติว่าให้เป็นไปตามสมการ Arrhenius ขึ้นกับอุณหภูมิ α_p สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง และ Y_i คือ สัดส่วนโดยโมลของโลหะออกไซด์

	H ₂	CO	O ₂
$k_0(\text{mol}^{1-n} \text{m}^{3n-2} \text{s}^{-1})$	0.15	0.059	0.84
$E_0(\text{kJ/mol})$	5	5	22
n	0.4	0.6	0.7

แฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ ค4 ค5 ค6 และ ค7

Phase Interaction

Virtual Mass

Drag Lift Collisions Slip Heat Mass Reactions Surface Tension

Total Number of Heterogeneous Reactions 4

Reaction Name Rate_CO ID 1

Number of Reactants 2 Number of Products 2

Phase	Species	Stoich. Coefficient
tp	co	1
ts	nio	1

Phase	Species	Stoich. Coefficient
tp	co2	1
ts	ni	1

Reaction Rate Function Rate_CO

OK Cancel Help

รูปที่ ค3 หน้าต่างในการเพิ่มสมการปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Phase Interaction)

```

#include"udf.h"
DEFINE_HET_RXN_RATE(Rate_CO,c,t,hr,mw,yi,rr,rr_t)
{
Thread**pt = THREAD_SUB_THREADS(t);

Thread *tp = pt[0];
Thread *ts = pt[1];

real MW_ox_NiO,MW_red_Ni,m_ox,m_red,m_x_CO,MW_O2,X,a,dp ;
real T = C_T(c,tp);
MW_ox_NiO = 74.6928;
MW_red_Ni = 58.6934;
MW_O2 = 32.0;

dp = C_PHASE_DIAMETER(c,ts);

*rr = 0.0;

a = 0.059*exp(-5000/8.314/T);

m_ox = C_R(c,ts)*C_VOF(c,ts)*C_VOLUME(c,ts)*(yi[1][0]+yi[1][1]*MW_ox_NiO/MW_red_Ni);
m_red =C_R(c,ts)*C_VOF(c,ts)*C_VOLUME(c,ts)*(yi[1][0]*MW_red_Ni/MW_ox_NiO+yi[1][1]);
m = C_R(c,ts)*C_VOF(c,ts)*C_VOLUME(c,ts)*(yi[1][0]+yi[1][1]);

X=0.0;

X= (m-m_red)/(m_ox-m_red);

x_CO = C_R(c,tp)*C_VOF(c,tp)*yi[0][0]/28.0*1000;
if(C_VOF(c,ts)>1e-6&&(X)>0.0)
*rr=a*pow((x_CO),(0.6))*C_VOF(c,ts)*(yi[1][0]/MW_ox_NiO)/dp/2/1000;
else *rr=0.0;
}

```

รูปที่ ค4 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา Rate_CO

```

DEFINE_HET_RXN_RATE(Rate_H2,c,t,hr,mw,yi,rr,rr_t)
{
  Thread**pt = THREAD_SUB_THREADS(t);

  Thread *tp = pt[0];
  Thread *ts = pt[1];

  real MW_ox_NiO,MW_red_Ni,m_ox,m_red,m,x_H2,MW_O2,X,a ,dp;
  real T = C_T(c,tp);
  MW_ox_NiO = 74.6928;
  MW_red_Ni = 58.6934;
  MW_O2 = 32.0;

  dp = C_PHASE_DIAMETER(c,ts);

  *rr = 0.0;

  a = 0.15*exp(-5000/8.314/T);

  m_ox = C_R(c,ts)*C_VOF(c,ts)*C_VOLUME(c,ts)*(yi[1][0]+yi[1][1]*MW_ox_NiO/MW_red_Ni);
  m_red = C_R(c,ts)*C_VOF(c,ts)*C_VOLUME(c,ts)*(yi[1][0]*MW_red_Ni/MW_ox_NiO+yi[1][1]);
  m = C_R(c,ts)*C_VOF(c,ts)*C_VOLUME(c,ts)*(yi[1][0]+yi[1][1]);

  X=0.0;

  X= (m-m_red)/(m_ox-m_red);

  x_H2 = C_R(c,tp)*C_VOF(c,tp)*yi[0][1]/2*1000;
  if(C_VOF(c,ts)>1e-6&& (X)>0.0)
  *rr=a*pow((x_H2),(0.4))*C_VOF(c,ts)*(yi[1][0]/MW_ox_NiO)/dp/2/1000;
  else *rr=0.0;
}

```

รูปที่ ค5 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา Rate_H2

```

DEFINE_HET_RXN_RATE(Rate_NiO,c,t,hr,mw,yi,rr,rr_t)
(
  Thread**pt = THREAD_SUB_THREADS(t);

  Thread *tp = pt[0];
  Thread *ts = pt[1];

  real MW_ox_NiO,MW_red_Ni,m_ox,m_red,m,x_O2,MW_O2,X,a,dp ;
  real T = C_T(c,tp);
  MW_ox_NiO = 74.6928;
  MW_red_Ni = 58.6934;
  MW_O2 = 32.0;

  dp = C_PHASE_DIAMETER(c,ts);

  *rr = 0.0;

  a = 0.84*exp(-22000/8.314/T);

  m_ox = C_R(c,ts)*C_VOF(c,ts)*C_VOLUME(c,ts)*(yi[1][1]+yi[1][0]*MW_red_Ni/MW_ox_NiO);
  m_red = C_R(c,ts)*C_VOF(c,ts)*C_VOLUME(c,ts)*(yi[1][1]*MW_ox_NiO/MW_red_Ni+yi[1][0]);
  m = C_R(c,ts)*C_VOF(c,ts)*C_VOLUME(c,ts)*(yi[1][0]+yi[1][1]);

  X=0.0;

  X= (m-m_red)/(m_ox-m_red);

  x_O2 = C_R(c,tp)*C_VOF(c,tp)*yi[0][2]/32.0*1000;
  if(C_VOF(c,ts)>1e-6&&(X)>0.0)
  *rr=a*pow((x_O2),(0.7))*C_VOF(c,ts)*(yi[1][1]/MW_red_Ni)/dp/2/1000;
  else *rr=0.0;
)

```

รูปที่ ค6 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา Rate_NiO



```

DEFINE_HET_RXN_RATE(Rate_Water_Gas,c,t,hr,mw,yi,rr,rr_t)
(
  Thread **pt = THREAD_SUB_THREADS(t);
  Thread *tp = pt[0]; /* gas phase */
  real T = C_T(c,tp);
  real k , K_eq , x_H2 , x_CO , x_H2O , x_CO2;
  *rr = 0.0;
  k = 2.17E+7*exp(-192900./8.314/T);
  K_eq = exp(-4.33+4577.8/T);
  x_H2 = C_R(c,tp)*C_VOF(c,tp)*yi[0][1]/2.0; /*Concentration of CO in kmol/m3*/
  x_CO = C_R(c,tp)*C_VOF(c,tp)*yi[0][0]/28.0; /*Concentration of CO in kmol/m3*/
  x_CO2 = C_R(c,tp)*C_VOF(c,tp)*yi[0][3]/44.0; /*Concentration of H2O in kmol/m3*/
  x_H2O = C_R(c,tp)*C_VOF(c,tp)*yi[0][4]/18.0; /*Concentration of H2O in kmol/m3*/
  *rr= (-k*x_CO2*pow(x_H2,0.5))+(k/K_eq*x_CO*x_H2O);
)

```

รูปที่ ค7 แสดงแฟ้มรหัสที่ใช้ในการคำนวณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาRate_Water_Gas

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรติกร ศรีอำพล เกิดเมื่อวันอังคารที่ 26 มกราคม พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2555

