

การจำลองซีเอฟดีของฟลูอิดไดซ์เบดแก๊ส-ของแข็งสำหรับอนุภาคผสม



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 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CFD SIMULATION OF GAS-SOLID FLUIDIZED BED FOR MIXED PARTICLES

Mr. Thanatepon Tangpattanatana



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองซีเอฟดีของฟลูอิดส์เบดแก๊ส-ของแข็งสำหรับ
	อนุภาคผสม
โดย	นายธเนศพล ตั้งพัฒน์ธนา
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธारा)

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

ธเนศพล ตั้งพัฒนา : การจำลองซีเอฟดีของฟลูอิด์เบดแก๊ส-ของแข็งสำหรับอนุภาคผสม (CFD SIMULATION OF GAS-SOLID FLUIDIZED BED FOR MIXED PARTICLES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศ. ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, 106 หน้า.

ฟลูอิด์เบดแบบแก๊ส-ของแข็งเป็นรูปแบบหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลายในอุตสาหกรรม เนื่องจากข้อดีของการมีพื้นที่ผิวสัมผัสกันระหว่างแก๊ส-ของแข็งที่สูง ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารและความร้อนได้ดี ในงานวิจัยนี้ศึกษาระบบฟลูอิด์เบดสำหรับของผสมอนุภาคของแข็ง (Mixed particles) ในระบบสองมิติ และหาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่เหมาะสมสำหรับระบบดังกล่าว รวมทั้งวิเคราะห์ผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อนของระบบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) นอกจากนี้ ทำการเปรียบเทียบตัวแปรตอบสนองที่บอกถึงการผสม ประกอบด้วย สัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมี สัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน อุณหภูมิแกรนูลลาร์ และดัชนีการผสม จากผลการศึกษาพบว่า แบบจำลอง EMMS นั้นให้ผลที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมากที่สุด สำหรับผลของตัวแปรดำเนินการต่อระบบอนุภาคผสมระหว่างถ่านหินและทราย พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถ่านหิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทราย และปริมาณทรายเริ่มต้น เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังทำการศึกษถึงอุทกพลศาสตร์ที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการเติมฝุ่นถ่านหินเข้าสู่ระบบ พบว่า การเติมฝุ่นถ่านหินจะทำให้ระบบเกิดฟลูอิด์เซชันมากขึ้น และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับปริมาณฝุ่นถ่านหินนั้นจะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการถ่ายโอนความร้อนของระบบ สำหรับการเปรียบเทียบตัวแปรตอบสนองต่อการผสมเป็นการเปรียบเทียบบนสมมติฐานที่ว่า การผสมที่ดีย่อมส่งผลทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนที่ดี จากผลการเปรียบเทียบ พบว่า อุณหภูมิแกรนูลลาร์ ให้แนวโน้มที่ใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมากที่สุด หรืออาจกล่าวได้ว่า ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ นั้นมีความเหมาะสมที่สุดจากการเปรียบเทียบ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนนั้นมีความสัมพันธ์อย่างง่ายเท่านั้น กล่าวคือ ถ้ารู้แนวโน้มของอุณหภูมิแกรนูลลาร์ จะสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนได้ในเบื้องต้น

ภาควิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
ปีการศึกษา	2558	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5772011823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: MIXED PARTICLES / CFD / FLUIDIZED BED REACTOR

THANATEPON TANGPATTANATANA: CFD SIMULATION OF GAS-SOLID FLUIDIZED BED FOR MIXED PARTICLES. ADVISOR: ASSOC. PROF. BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D., CO-ADVISOR: PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., 106 pp.

Gas-solid fluidized beds have widely used in various industrial applications due to many advantages of the technology such as excellent gas-solid particle contacting, which then has a good effect on mass and heat transfers. The purposes of this study were to investigate a CFD model for mixed particles in a two-dimensional fluidized bed system and analyze the effect of operating parameters on heat transfer in the system by using ANOVA. In addition, the mixing parameters including radial-dispersion coefficient, axial-dispersion coefficient, granular temperature and mixing index were compared. The results showed that EMMS model was relatively consistent with the experiment than the other models. The effect of operating parameters on mixing between coal and sand showed that inlet gas velocity, sand diameter, coal diameter and initial sand height were statistically significant on heat transfer coefficient. Furthermore, the effect of adding coal dust into system on the hydrodynamics was studied. The fluidization behavior was higher when coal dust was added. Both coal dust diameter and inventory were statistically significant to heat transfer. A comparison of mixing parameters, based on the assumption that good heat transfer is resulting from good mixing, showed that granular temperature gave relatively similar trend to heat transfer more than the other parameters. However, the relation between granular temperature and heat transfer is just a basic relationship. In other word, if granular temperature trend is known, the heat transfer trend is predicted.

Department:	Chemical Technology	Student's Signature
Field of Study:	Chemical Technology	Advisor's Signature
Academic Year:	2015	Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์การจำลองซีเอฟดีของฟลูอิดซ์เบดแก๊ส-ของแข็งสำหรับอนุภาคผสม ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เณลิมสินสุวรรณ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอด การทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ทนุอดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาคณะศึกษาศาสตร์มหาวิทยาลัยเพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา ประจำปี 2557

ขอขอบคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาทุกคนที่ได้เชื้อเหลือและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ ดร.วีรยา จิรติลิก หัวหน้านักวิจัยของหน่วยงาน DARC ที่ได้ให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยและขอบคุณบริษัท National Power Supply (NPS) ที่ได้ให้การสนับสนุนข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้องทุกคนในภาควิชาที่ได้ให้คำปรึกษาและกำลังใจตลอดจากทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณนายรัชชานนท์ เปี่ยมใจสว่าง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการเขียนโค้ดภาษาซี เพื่อใช้ในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้อง ในครอบครัว ที่ได้เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกสิ่งทุกอย่างเสมอมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ข้อยกเว้นของงานวิจัย	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์ซ์เบด (Fluidized bed reactor).....	6
2.1.1 เบด (Bed).....	7
2.1.2 ช่วงการไหลของฟลูอิดไต์ซ์เบด (Regimes of fluidization).....	7
2.1.3 ข้อดี-ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์ซ์เบดเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น	9
2.2 การผสมและการแยกชั้น (Mixing and segregation)	10
2.2.1 การผสมแบบสมบูรณ์ (Perfect mixing).....	11

2.2.2 การผสมแบบสุ่ม (Random mixing).....	11
2.2.3 การแยกชั้น (Segregation).....	11
2.2.4 กลไกการผสมและการแยกชั้น (Mechanism of mixing and segregation).....	11
2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมและการแยกชั้น	12
2.3 ระบบอนุภาคผสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด.....	13
2.3.1 การเผาไหม้ของถ่านหิน (Coal combustion).....	13
2.3.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้	13
2.4 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD modeling).....	14
2.4.1 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization method).....	14
2.4.2 วิธีแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการ SIMPLE.....	17
2.5 การออกแบบการทดลอง (Experimental design).....	20
2.5.1 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลแบบ 2^k	20
2.5.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลแบบ 2^4	20
2.5.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1 ข้อมูลเบื้องต้นในงานวิจัย.....	26
3.2 การจำลองอุทกพลศาสตร์.....	27
3.2.1 การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test).....	27
3.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model).....	29
3.2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equations).....	29
3.2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equations).....	30

3.2.2.3	สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวัดแกว่ง (Fluctuating kinetic energy conservation equation) ของวัฏภาคของแข็ง	30
3.2.2.4	สมการเสริม (Constitutive equations).....	31
3.2.2.5	แบบจำลองสัมประสิทธิ์ต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (Interphase exchange coefficient model, β_{gs}).....	32
3.2.2.5.1	แบบจำลอง Wen and Yu	33
3.2.2.5.2	แบบจำลอง Gidaspow	33
3.2.2.5.3	แบบจำลอง Syamlal-O'Brien	33
3.2.2.5.4	แบบจำลอง Energy minimization multi scale (EMMS).....	34
3.3	การจำลองปฏิกิริยาเคมี	35
3.4	ตัวแปรอธิบายพฤติกรรมการผสม (Mixing parameters).....	37
3.4.1	อุณหภูมิแกรนูลลาร์ (Granular temperature, θ).....	37
3.4.2	สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient).....	38
3.4.3	ดัชนีการผสม (Mixing index).....	39
3.4.4	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer coefficient).....	39
3.5	ขั้นตอนการจำลอง	39
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	42
4.1	อุทกพลศาสตร์ของระบบอนุภาคผสมสองชนิดที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา (Cold flow).....	42
4.1.1	ผลของพื้นที่การคำนวณและเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียรคงตัว	42
4.1.2	ผลของแบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค	44
4.1.3	ผลของความเร็วดังอุทกพลศาสตร์และพฤติกรรมการผสม.....	47
4.1.4	ผลของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมและการกระจายตัวของอนุภาค	52
4.2	อุทกพลศาสตร์ของระบบอนุภาคผสมสองชนิดที่มีการเกิดปฏิกิริยา (Hot flow).....	55
4.2.1	ผลของพื้นที่การคำนวณและเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียรคงตัว	56

4.2.2 ผลของแบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาค.....	56
4.2.3 ผลของปฏิกิริยาเคมีและจลนศาสตร์.....	58
4.2.4 ผลของตัวแปรดำเนินการต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์อนุภาคผสมสอง ชนิด	60
4.3 อุทกพลศาสตร์ของระบบอนุภาคผสมสามชนิดที่มีการเกิดปฏิกิริยา (Hot flow).....	81
4.3.1 ผลของตัวแปรดำเนินการต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์อนุภาคผสมสาม ชนิด	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	95
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	95
5.1.1 การหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับระบบอนุภาคผสม.....	95
5.1.2 การหาแบบจำลองปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสม.....	95
5.1.3 ผลของตัวแปรดำเนินการต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์และพฤติกรรม การผสม.....	96
5.1.4 ผลของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมและการกระจายตัว.....	96
5.2 ข้อเสนอแนะ	97
รายการอ้างอิง	98
ภาคผนวก ก	102
ภาคผนวก ข	104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	106

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ค่าการขยายตัวของหน้าเบด (Bed expansion) สำหรับแบบจำลองที่แตกต่างกัน	45
ตารางที่ 4.2 ค่าของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้าแตกต่างกัน	53
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบการขยายตัวของหน้าเบดและความดันลดของแบบจำลองที่แตกต่าง กันกับผลการทดลอง	57
ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการแสดงภาวะ และผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัวที่ได้จากการจำลอง	62
ตารางที่ 4.5 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน	68
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ตามแนวรัศมี	74
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ตามแนวแกน	75
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นอนุกรมเทย์เลอร์	75
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นดัชนีการผสม	75
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอน ความร้อน	76
ตารางที่ 4.11 การออกแบบการทดลองแบบ 2^2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการแสดงภาวะ และผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัวที่ได้จากการจำลอง	82
ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ในแนวรัศมีกรณีที่มีอนุภาคของแข็งสามองค์ประกอบ	90
ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตัว ในแนวแกนกรณีที่มีอนุภาคของแข็งสามองค์ประกอบ	90
ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นอนุกรมเทย์เลอร์กรณีที่มี อนุภาคของแข็งสามองค์ประกอบ	91

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นดัชนีการผสมกรณีที่มี อนุภาคของแข็งสามองค์ประกอบ.....	91
ตารางที่ 4.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอน ความร้อนกรณีที่มีอนุภาคของแข็งสามองค์ประกอบ	91



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟองแก๊ส (ก) และเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน (ข).....	6
รูปที่ 2.2 แสดงช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน	9
รูปที่ 2.3 แสดงการผสมของอนุภาคของแข็ง (ก) การผสมแบบสมบูรณ์ (ข) การผสมแบบสุ่ม (ค) การแยกชั้น.....	10
รูปที่ 2.4 (ก) ฟองแก๊สเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าของเบด (ข) ฟองแก๊สเกิดการแตกตัวที่บริเวณผิวหน้าของเบด (ค) อนุภาคของแข็งที่อยู่บริเวณรอบๆ ฟองแก๊สเคลื่อนที่ลงมาแทนที่ของฟองแก๊ส.....	12
รูปที่ 2.5 ปริมาตรควบคุมแสดงวิธีการแบ่งช่วงของสมการควบคุม	15
รูปที่ 2.6 วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLE.....	19
รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบสองมิติที่ใช้ในการจำลอง (ก) เครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัยส่วนที่หนึ่ง (ข) เครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัยส่วนที่สองและสาม	27
รูปที่ 3.2 พื้นที่การคำนวณที่ใช้ในส่วนที่หนึ่ง (ก) 4000 (ข) 8000 (ค) 12000 และ (ง) 16000 เซลล์.....	28
รูปที่ 3.3 พื้นที่การคำนวณที่ใช้ในส่วนที่สองและสาม (ก) 4000 (ข) 8000 และ (ค) 12000 เซลล์... ..	28
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งต่อความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ที่พื้นที่การคำนวณต่างๆ	43
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของความดันลด (Pressure drop) ที่เวลาต่างๆ	44
รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างอากาศตามแนวความสูงของไรเซอร์	45
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายการกระจายตัวของอนุภาคจากการทดลองที่เวลา (ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที และ (จ) 10 วินาที ตามลำดับ	46
รูปที่ 4.5 คอนทัวร์การกระจายตัวของอนุภาคของแบบจำลอง EMMS ที่เวลา (ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที และ (จ) 10 วินาที ตามลำดับ	46
รูปที่ 4.6 คอนทัวร์การกระจายตัวของอนุภาคของแบบจำลอง Syamlal-O'brien ที่เวลา (ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที และ (จ) 10 วินาที ตามลำดับ	46

รูปที่ 4.7 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ก) โพลทแซม และ (ข) เจ็ดแซม	47
รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของอนุภาคโพลทแซมและเจ็ดแซมตามแนวความสูงที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที.....	48
รูปที่ 4.9 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของอนุภาคโพลทแซมและเจ็ดแซมที่ความสูง 0.3 เมตร สำหรับความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ก) 0.125 (ข) 0.25 (ค) 0.50 (ง) 0.75 และ (จ) 1.00 เมตรต่อวินาที.....	49
รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของความเร็วในแนวรัศมี (X-velocity) ตามแนวความสูงต่างๆ ที่ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.50 เมตรต่อวินาที (ก) โพลทแซม (ข) เจ็ดแซม	50
รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของความเร็วในแนวแกน (Y-velocity) ตามแนวความสูงต่างๆ ที่ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.50 เมตรต่อวินาที (ก) โพลทแซม (ข) เจ็ดแซม	51
รูปที่ 4.12 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของอนุภาคโพลทแซมและเจ็ดแซมตามระยะความสูง สำหรับความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ก) 0.125 (ข) 0.25 (ค) 0.50 (ง) 0.75 และ (จ) 1.00 เมตรต่อวินาที.....	52
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของช่องว่างอากาศที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้าต่างกัน (ก) 0.125 (ข) 0.25 (ค) 0.50 (ง) 0.75 และ (จ) 1.00 เมตรต่อวินาที.....	55
รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของทรายตามแนวความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ ที่พื้นที่การคำนวณต่างๆ.....	56
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของทรายสำหรับแบบจำลองที่แตกต่างกัน (ก) EMMS (ข) Gidaspow (ค) Wen-Yu และ (ง) Syamlal-O'Brien model	58
รูปที่ 4.16 อุณหภูมิของแก๊สจากการเผาไหม้ที่ระยะเวลาต่างๆ.....	59
รูปที่ 4.17 คอนทัวร์อุณหภูมิ (เคลวิน) ของแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ ที่เวลา 150 วินาที.....	59
รูปที่ 4.18 คอนทัวร์การกระจายตัวของถ่านหิน (ก) กรณีศึกษาที่ 3 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 14 ที่เวลา 150 วินาที ตามลำดับ.....	63
รูปที่ 4.19 คอนทัวร์การกระจายตัวของถ่านหิน (ก) กรณีศึกษาที่ 7 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 16 ที่เวลา 150 วินาที ตามลำดับ.....	63

รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3	64
รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 14	65
รูปที่ 4.22 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 7	66
รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 16	67
รูปที่ 4.24 อุณหภูมิของแก๊ส (เคลวิน) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ของ (ก) กรณีศึกษาที่ 15 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 10 ที่เวลา 150 วินาที	70
รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของถ่านหินภายในเครื่องปฏิกรณ์ (ก) กรณีศึกษาที่ 15 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 10 ที่เวลา 150 วินาที	71
รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 15	72
รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 10	73
รูปที่ 4.28 ผลของตัวแปรหลักและผลอันตรกิริยาต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมี สำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสมสององค์ประกอบ (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยา ACD- และ (ค) ผลของอันตรกิริยา ACD+	77
รูปที่ 4.29 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกนสำหรับระบบ อนุภาคของแข็งผสมสององค์ประกอบ	78
รูปที่ 4.30 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์สำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสมสอง องค์ประกอบ	78
รูปที่ 4.31 ผลของตัวแปรหลักและผลอันตรกิริยาต่อค่าดัชนีการผสมสำหรับระบบอนุภาค ของแข็งผสมสององค์ประกอบ (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยา AB (ค) ผลของอันตรกิริยา AC และ (ง) ผลของอันตรกิริยา AD	79

รูปที่ 4.32 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสำหรับระบบอนุภาค ของแข็งผสมสององค์ประกอบ.....	80
รูปที่ 4.33 คอนทิวอร์สตัดส่วนโดยปริมาตรของถ่านหิน (Coal) ของกรณี (ก) 18 (ข) 19 (ค) 20 (ง) 21 (จ) 22 และ (ฉ) 23 ตามลำดับ.....	84
รูปที่ 4.34 คอนทิวอร์สตัดส่วนโดยปริมาตรของทราย (Sand) ของกรณี (ก) 18 (ข) 19 (ค) 20 (ง) 21 (จ) 22 และ (ฉ) 23 ตามลำดับ.....	85
รูปที่ 4.35 คอนทิวอร์สตัดส่วนโดยปริมาตรของฝุ่นถ่านหิน (Coal dust) ของกรณี (ก) 18 (ข) 19 (ค) 20 (ง) 21 และ (จ) 22 ตามลำดับ.....	86
รูปที่ 4.36 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 18.....	86
รูปที่ 4.37 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 19.....	87
รูปที่ 4.38 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 20.....	87
รูปที่ 4.39 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 21.....	88
รูปที่ 4.40 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 22.....	88
รูปที่ 4.41 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 23.....	89
รูปที่ 4.42 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมีสำหรับระบบ อนุภาคของแข็งผสมสามองค์ประกอบ	92
รูปที่ 4.43 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกนสำหรับระบบ อนุภาคของแข็งผสมสามองค์ประกอบ	92
รูปที่ 4.44 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าอุณหภูมิแก๊สสำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสม สามองค์ประกอบ	93

รูปที่ 4.45 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าดัชนีการผสมสำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสม สามองค์ประกอบ	93
รูปที่ 4.46 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสำหรับระบบอนุภาค ของแข็งผสมสามองค์ประกอบ	94



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟลูอิดไรซ์เบดเป็นรูปแบบหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลายไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการแตกสลายของไฮโดรคาร์บอน (Cracking of hydrocarbons) การเผาไหม้ของถ่านหิน (Coal combustion) และการผลิตแก๊สของถ่านหิน (Coal gasification) เป็นต้น เนื่องจากข้อดีของการมีพื้นที่ผิวการสัมผัสกันระหว่างแก๊ส-ของแข็งที่สูงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารและความร้อนได้ดี [1] องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้จะประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็งหรือเบด (Bed) ถูกบรรจุอยู่ในโดยมีแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Distributor plate) อยู่ทางด้านล่างทำหน้าที่รองรับอนุภาคของแข็งและกระจายอากาศ จากนั้นทำการป้อนตัวกลางในการเคลื่อนที่ซึ่งจะเป็นแก๊สหรืออากาศผ่านทางด้านล่างของแผ่นรองรับ ซึ่งในตอนแรกนั้นอนุภาคของแข็งจะอยู่ในสภาพหยุดนิ่ง (Fixed bed) จนกระทั่งความเร็วของอากาศนั้นเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งอนุภาคของแข็งนั้นจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ซึ่งความเร็วต่ำสุดที่ทำให้อนุภาคของแข็งเม็ดแรกนั้นเกิดการเคลื่อนที่ที่จะเรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) โดยรูปแบบการไหลนั้นจะถูกแบ่งตามความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้นแบ่งออกเป็น 4 ช่วงคือ ช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling) ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (Fast fluidization) และช่วงการไหลแบบขนส่งด้วยลม (Pneumatic transport) ตามลำดับ [2] กระบวนการฟลูอิดไรเซชันนั้นถูกนำมาใช้งานเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมเพื่อให้เกิดการผสมของอนุภาค

การจำลองระบบฟลูอิดไรซ์เบดส่วนมากจะสมมุติให้มีอนุภาคเพียงชนิดเดียว (Mono-disperse) หรืออนุภาคของแข็งนั้นจะมีช่วงของการกระจายตัวของขนาดและความหนาแน่นที่แคบจนกระทั่งอนุภาคของแข็งนั้นจะมีสมบัติที่ใกล้เคียงกัน ทำให้สามารถใช้ค่า Sauter mean diameter เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) [3] แต่อย่างไรก็ตาม ในอุตสาหกรรมเช่น การเผาไหม้ถ่านหิน รูปแบบของฟลูอิดไรซ์เบดจะเป็นระบบที่มีอนุภาคขนาดต่างกัน (Poly-disperse) ซึ่งจะมีช่วงของการกระจายตัวที่กว้างส่งผลทำให้มีอุทกพลศาสตร์ที่แตกต่างจากระบบที่มีอนุภาคเพียงชนิดเดียว โดยอนุภาคที่เคลื่อนที่จมลงสู่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์จะเรียกว่า เจ็ตแซม (Jetsam) ขณะที่อนุภาคที่เคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนจะเรียกว่า โฟลทแซม (Flotsam) การผสม (Mixing) หรือการแยกชั้น (Segregation) เป็นกลไกที่สำคัญที่เกิดขึ้นซึ่งจะส่งผลดีหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน เช่น

การแยกชั้นนั้นเหมาะสำหรับการคัดแยกหรือแบ่งประเภท (Classifiers) ซึ่งอนุภาคของแข็งจะถูกคัดแยกตามขนาด รูปร่าง หรือความหนาแน่น ในขณะที่การผสมนั้นเป็นกระบวนการที่สำคัญเพื่อให้องค์ประกอบต่าง ๆ เกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างสม่ำเสมอ เร่งการถ่ายโอนความร้อน และการถ่ายโอนมวลระหว่างวัฏภาค [1, 4] ค่าที่สามารถบอกถึงประสิทธิภาพในการผสมได้คือ ดัชนีการผสม (Mixing index) อุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular temperature) สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient) และความเร็วนอนุภาคของแข็งในแนวแกนตามแนวรัศมี (Solid velocity in axis) [2, 5, 6] เป็นต้น ค่าที่บอกการถ่ายโอนความร้อนคือ อัตราการถ่ายโอนความร้อน (Rate of heat transfer) และสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer coefficient) [7] เป็นต้น

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) [2, 6, 8] เป็นแขนงหนึ่งของวิชากลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanics) ที่ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical) และขั้นตอนวิธี (Algorithm) ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับของไหล ตลอดจนวิเคราะห์ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่สำหรับระบบแก๊ส-ของแข็งซึ่งจะถูกพิจารณาผ่านสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation) 3 สมการได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation) ชุดสมการเหล่านี้จะถูกแสดงในรูปสมการคณิตศาสตร์ โดยการจำลองนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบสองและสามมิติ เพื่อที่จะเข้าใจพฤติกรรมของไหลมากยิ่งขึ้นจึงมีการนำทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาคของแข็ง (Kinetic theory granular flow, KTGF) มาใช้ โดยทฤษฎีนี้มาจากพื้นฐานของทฤษฎีจลน์ของแก๊สควบรวมกับทฤษฎีพลังงานจลน์ของการกวัดแกว่งของของแข็ง (Solid fluctuating kinetic energy) และการชนกันของอนุภาคของแข็ง (Solid collision)

ปัจจุบันการศึกษาระบบพลูอิดส์เบดสำหรับของผสมอนุภาคของแข็งแบบสององค์ประกอบ (Binary mixture) ด้วยวิธีการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นยังมีการศึกษาที่น้อย ส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาผลของตัวแปรต้น เช่น ความเร็ว ความดัน และขนาดอนุภาค เป็นต้น ต่ออุทกพลศาสตร์ภายในกระบวนการ อย่างไรก็ตาม การศึกษาในด้านการผสมและการถ่ายโอนความร้อนรวมทั้งการประยุกต์ใช้งานระบบนี้ยังมีการศึกษาที่จำกัด [4, 9] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการพัฒนาแบบจำลองของระบบพลูอิดส์เบดแก๊ส-ของแข็งสำหรับอนุภาคผสมเพื่อตอบปัญหาข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. พัฒนาแบบจำลองของระบบพลูอิดส์เบดแก๊ส-ของแข็งสำหรับอนุภาคผสม

2. ศึกษาผลของอนุภาคผสมต่ออุทกพลศาสตร์ ลักษณะการผสมและการถ่ายโอนความร้อนในกระบวนการ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. จำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ระบบอนุภาคผสมสององค์ประกอบเพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองของ Oweyemi และคณะ [4]
2. จำลองอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ระบบอนุภาคผสมสององค์ประกอบโดยมีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ภายในระบบ ทำการหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดโดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับข้อมูลจริงและทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) ต่อพฤติกรรมการผสมและการเผาไหม้ที่เกิดขึ้น
3. นำแบบจำลองที่ได้จากข้อที่สองมาประยุกต์ใช้กับระบบที่มีอนุภาคผสมสามองค์ประกอบและทำการศึกษาอุทกพลศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเติมอนุภาควิภาคที่สามเข้าสู่ระบบ

1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

1. ทำการจำลองอุทกพลศาสตร์ในระบบ 2 มิติเท่านั้น
2. ทำการจำลองในส่วนเครื่องปฏิกรณ์ของระบบเท่านั้น

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย

อุทกพลศาสตร์ ลักษณะการผสม ระบบอนุภาคผสม การเผาไหม้ การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แบบจำลองรูปแบบของระบบฟลูอิดเบดแก๊ส-ของแข็งสำหรับอนุภาคผสมในระบบสองมิติ
2. อิทธิพลของอนุภาคผสมต่ออุทกพลศาสตร์ ลักษณะการผสมและการถ่ายโอนความร้อนในกระบวนการ

1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง กับ กระบวนการฟลูอิดเซชัน ระบบอนุภาคผสมสองและสามชนิด ปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นสำหรับระบบการเผาไหม้ของถ่านหิน วิธีการพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณรวมถึงการใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT

2. จำลองอุทกพลศาสตร์ของระบบอนุภาคผสมสองชนิดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 และ 350 ไมครอน ซึ่งอนุภาคทั้งสองชนิดนั้นมีความหนาแน่นที่เท่ากัน คือ 2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT ด้วยระบบ 2 มิติ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 เมตร และสูง 0.6 เมตร ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้รับจากการจำลองกับงานวิจัยของ Oweyemi และคณะ [4] เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับระบบอนุภาคผสม รวมทั้งวิเคราะห์ผลของอุทกพลศาสตร์และลักษณะการผสม
3. จำลองอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคผสมสองชนิด ได้แก่ ถ่านหินและทราย ซึ่งมีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 8 เมตรและมีความสูง 20 เมตร ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้รับจากการจำลองกับข้อมูลของบริษัท NPS และทำการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) ต่ออุทกพลศาสตร์และลักษณะการผสมของระบบ รวมทั้งเปรียบเทียบตัวแปรที่ใช้ทำนายการผสมซึ่งประกอบไปด้วย สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient) อุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular temperature) และดัชนีการผสม (Mixing index)
4. จำลองระบบจากข้อที่สาม มาศึกษาอุทกพลศาสตร์ ลักษณะการผสมและการถ่ายโอนความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีการเติมฝุ่นถ่านหิน (Coal dust) เข้าสู่ระบบ
5. วิเคราะห์ผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ของระบบ เปรียบเทียบตัวแปรที่ใช้ในการทำนายการผสมของระบบ
6. ประมวล วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง เขียนบทความและวิทยานิพนธ์

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์งานวิจัย ขอบเขตงานวิจัย ข้อจำกัดของงานวิจัย คำจำกัด ความที่ใช้ในงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ วิธีดำเนินงานวิจัย และลำดับขั้นตอนการนำเสนอผลงานวิจัย

บทที่ 2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบต การผสมและการแยกชั้น ระบบอนุภาคผสม การออกแบบการทดลอง (Experimental design) การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 ข้อมูลเบื้องต้นในงานวิจัย การจำลองอุทกพลศาสตร์ การจำลองปฏิกิริยาเคมี ตัวแปรอธิบายพฤติกรรมผสม และขั้นตอนการจำลอง

- บทที่ 4 อุทกพลศาสตร์ของระบบอนุภาคผสมสองชนิดที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา อุทกพลศาสตร์
ของระบบอนุภาคผสมสองชนิดที่มีการเกิดปฏิกิริยา และอุทกพลศาสตร์ของระบบ
อนุภาคผสมสามชนิดที่มีการเกิดปฏิกิริยา
- บทที่ 5 สรุปผลจากการวิจัยและข้อเสนอแนะ

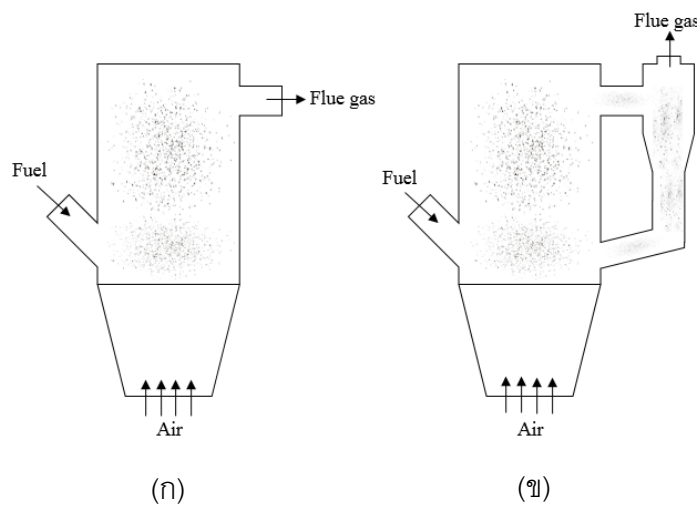


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบด (Fluidized bed reactor)

ฟลูอิดไธซ์เบดเป็นรูปแบบหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลายไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการแตกสลายของไฮโดรคาร์บอน (Cracking of hydrocarbons) การเผาไหม้ของถ่านหิน (Coal combustion) และการผลิตแก๊สของถ่านหิน (Coal gasification) เป็นต้น เนื่องจากข้อดีของการมีพื้นที่ผิวการสัมผัสกันระหว่างแก๊ส-ของแข็งที่สูงส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารและความร้อนได้ดี [2, 10] องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้จะประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็งหรือเบด (Bed) ถูกบรรจุอยู่ภายในโดยมีแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Distributor plate) อยู่ทางด้านล่างทำหน้าที่รองรับอนุภาคของแข็งและกระจายอากาศ จากนั้นทำการป้อนตัวกลางในการเคลื่อนที่ซึ่งจะเป็นแก๊สหรืออากาศผ่านทางด้านล่างของแผ่นรองรับ ซึ่งในตอนแรกนั้นอนุภาคของแข็งจะอยู่ในสภาพหยุดนิ่ง (Fixed bed) จนกระทั่งความเร็วของอากาศนั้นเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งอนุภาคของแข็งนั้นจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า ฟลูอิดไธเซชัน ในกระบวนการดังกล่าวนี้ของแข็งจะมีพฤติกรรมเหมือนของไหล รูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับระบบแก๊ส-ของแข็งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบหลัก คือ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed reactor) และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed reactor)



รูปที่ 2.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟองแก๊ส (ก) และเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน (ข)

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed reactor) รูปที่ 2.1(ก) อนุภาคของแข็งหรือเบดจะมีการเคลื่อนที่คล้ายฟองแก๊สเมื่อทำการป้อนอากาศเข้ามาที่ด้านล่าง ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียนรูปที่ 2.1(ข) จะมีส่วนของไซโคลน (Cyclone) และท่อป้อนกลับ (Return leg) เพิ่มเข้ามาเพื่อให้อนุภาคที่หลุดออกจากท่อโรเตอร์นั้นถูกป้อนกลับเข้าสู่ระบบ โดยความเร็วของอากาศที่ทำการป้อนเข้าสู่ระบบนั้นจะใช้ความเร็วที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองแก๊สเกือบ 3 เท่า ช่วงการไหลที่เกิดขึ้นจากความเร็วดังกล่าวนี้จะเป็นแบบฟลูอิดไรซ์ชันความเร็วสูง (Fast fluidization) จากลักษณะดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารและพลังงานความร้อนที่สูง อุณหภูมิภายในหม้อไอน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนนั้นจะอยู่ระหว่าง 800-950 °C เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดการเผาไหม้และดักจับแก๊สซัลเฟอร์ ได้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด [11]

2.1.1 เบด (Bed)

เบด หมายถึง พื้นที่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ถูกครอบคลุมด้วยอนุภาคของแข็ง ไม่ว่าอนุภาคของแข็งนั้นจะมีการเคลื่อนที่หรือหยุดนิ่ง ซึ่งจะมีระดับตั้งแต่แผ่นกระจายอากาศ (Air distributor plate) จนไปถึงผิวหน้าของอนุภาค [12]

2.1.2 ช่วงการไหลของฟลูอิดไรซ์ชัน (Regimes of fluidization)

ฟลูอิดไรซ์ชันเป็นกระบวนการที่อนุภาคของแข็งนั้นประพฤติตัวทางกายภาพคล้ายของไหลเมื่อแก๊สไหลผ่านอนุภาคของแข็งเหล่านั้น โดยพฤติกรรมการไหลของอนุภาคของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดสามารถจำแนกออกเป็นช่วงการไหลต่างๆ ตามความเร็วที่เพิ่มขึ้นของแก๊ส ได้แก่ ช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling) ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ช่วงการไหลแบบฟลูอิดไรซ์ชันความเร็วสูง (Fast fluidization) และช่วงการไหลแบบขนส่งอนุภาค (Pneumatic) ซึ่งแต่ละช่วงนั้นจะมีลักษณะที่เฉพาะตัวแตกต่างกันไป [2, 10, 13]

ในตอนเริ่มต้นนั้นอนุภาคของแข็งจะอยู่ในภาวะหยุดนิ่ง (Fixed bed) โดยของไหลนั้นจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็งด้วยความเร็วที่ต่ำจนกระทั่งความเร็วของแก๊สนั้นเพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งซึ่งทำให้อนุภาคของแข็งนั้นเกิดการเคลื่อนที่ โดยจะเรียกความเร็วดังกล่าวว่า ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรซ์ชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) สำหรับการทดลองการหาค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไรซ์ชันจะหาจากความดันลด (Pressure drop) ที่ตกคร่อมเบด ณ ตำแหน่งนี้ความดันลดนั้นจะมีค่าสูงที่สุด โดยสามารถคำนวณหาค่าความเร็วดังกล่าวได้จากสมการของ Ergun equation (1952) Wen-Yu (1966) และ Grace (1982) [14, 15]

ช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling) นั้นจะสามารถบอกได้ด้วยค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองแก๊ส (Minimum bubbling velocity, U_{mb}) ซึ่งความเร็วดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นภายในเบด โดยความเร็วดังกล่าวนี้จะพบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมากกับสมบัติของอนุภาคของแข็ง (Particle properties) สำหรับอนุภาคในกลุ่มเจลดาร์ด A พบว่า ค่า U_{mb} จะมีค่าที่มากกว่า U_{mf} เนื่องจากอนุภาคในกลุ่มดังกล่าวจะมีขนาดที่เล็กจึงทำให้มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคนั้นมีค่าที่สูง ขณะที่ค่า U_{mb} จะมีค่าเท่ากับ U_{mf} สำหรับอนุภาคในกลุ่มเจลดาร์ด B และ D โดยค่า U_{mb} นั้นสามารถคำนวณได้จาก Geldart และ Abrahamsen (1978) [15]

$$U_{mb} = 33d_p \left(\frac{\rho_g}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (2.1)$$

จากการคำนวณด้วยสมการข้างบนสำหรับอนุภาคในกลุ่มเจลดาร์ด B และ D ค่าความเร็ว U_{mb} จะต้องมีค่าเท่ากับ U_{mf} เมื่อทำการเพิ่มความเร็วขึ้นไปอีกฟองแก๊สจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและเมื่อฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่เทียบเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์จะเรียกพฤติกรรมดังกล่าวว่าสลัก (Slugging) โดยความเร็วต่ำสุดในการเกิดสลัก (Minimum slugging velocity, U_{ms}) นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของ Stewart และ Davidson (1967) [15]

$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07\sqrt{gD} \quad (2.2)$$

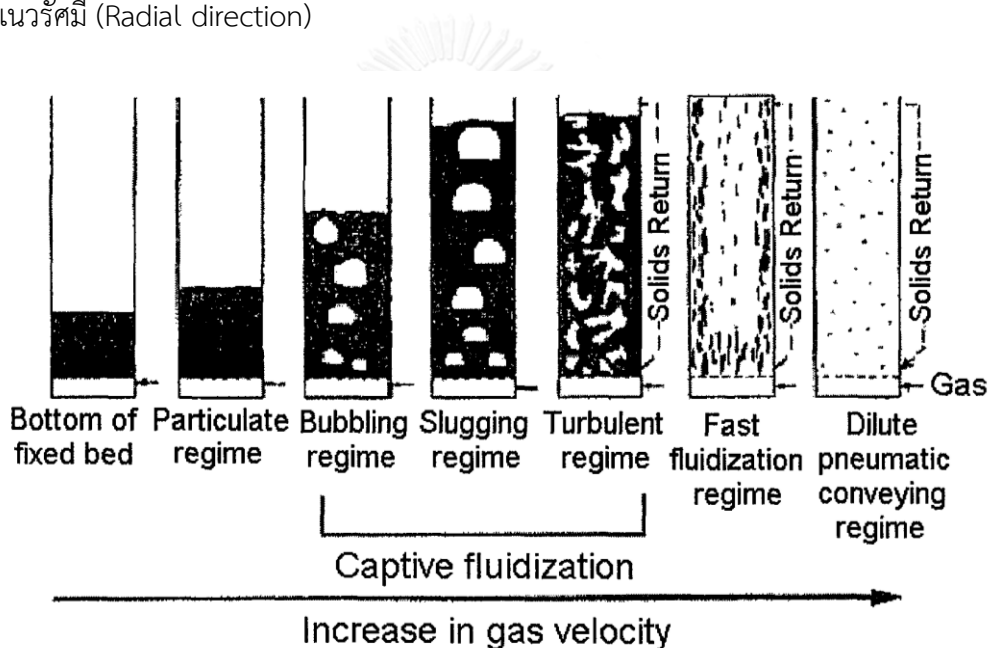
อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมสลักนั้นจะพบในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แคบ ($H/D < 1$) เท่านั้น ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่จะไม่พบลักษณะดังกล่าวเนื่องจากฟองแก๊สนั้นไม่สามารถที่จะมีขนาดที่ใหญ่เทียบเท่ากับขนาดคอลัมน์ได้

ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) จะเกิดในภาวะที่แก๊สนั้นมีความเร็วที่สูงซึ่งที่ภาวะดังกล่าวนี้จะมีอนุภาคของแข็งหลุดออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (Minimum turbulent velocity, U_c) นั้นฟองแก๊สที่เกิดขึ้นภายในระบบจะมีลักษณะที่ไม่แน่นอนอีกทั้งจะมีการเกิดขึ้นของฟองแก๊สและการแตกออกของฟองแก๊สอย่างรวดเร็ว (ไม่มีฟองแก๊สขนาดใหญ่เกิดขึ้น) ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงอนุภาคของแข็งหนาแน่น (Dense zone) จะพบที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ และช่วงอนุภาคเบาบาง (Dilute zone) จะพบที่บริเวณด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์

$$U_c = 0.463Ar^{0.145}\sqrt{gD_t} \quad (2.3)$$

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g d_p^3}{\mu_g^2} \quad (2.4)$$

ค่าความเร็วสูงสุดสำหรับช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะเรียกว่า ความเร็วในการขนส่ง (Transport velocity, U_{tr}) ที่ความเร็วเหนือ U_{tr} นี้จะเป็นช่วงการไหลแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization) ซึ่งจะมีการหลุดออกของอนุภาคของแข็งเป็นจำนวนมาก โดยช่วงการไหลแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูงนั้นจะถูกนำมาใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed) อนุภาคที่หลุดออกจากระบบจะถูกดักจับด้วยไซโคลน (Cyclone) แล้วป้อนกลับเข้าสู่ระบบอีกรอบ ที่ช่วงการไหลแบบนี้อุณหภูมิของแข็งจะเกิดการผสมที่ดีในแนวแกน (Axial direction) และแนวรัศมี (Radial direction)



รูปที่ 2.2 แสดงช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน [16]

2.1.3 ข้อดี-ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น

ข้อดี

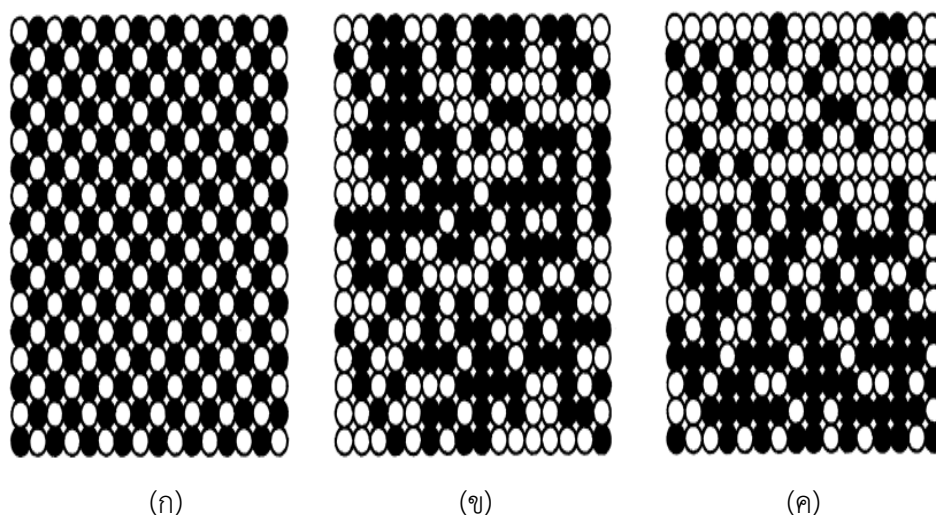
- มีการถ่ายโอนความร้อนได้ดีและสามารถทำการควบคุมอุณหภูมิได้ไม่ยาก ดังนั้นจะช่วยลดปฏิกิริยาข้างเคียง (Side reactions) ที่ไม่ต้องการและทำให้ได้ผลผลิตที่ดี (Yield)
- มีการสัมผัสกันระหว่างแก๊สและอนุภาคของแข็งที่สูง ส่งผลทำให้ระบบการเผาไหม้เกิดปฏิกิริยาได้ดี
- สามารถใช้ในการขนส่งอนุภาค รวมทั้งใช้แยกอนุภาคที่มีความแตกต่างกันได้

ข้อเสีย

- เกิดการสึกกร่อน (Erosion) ของผนังเครื่องปฏิกรณ์เนื่องมาจากการชนของอนุภาค
- อนุภาคของแข็งมีแนวโน้มการแตกหักเนื่องมาจากการชนกันภายในเครื่องปฏิกรณ์
- ค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานมีค่าที่สูง

2.2 การผสมและการแยกชั้น (Mixing and segregation)

ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดการผสมของอนุภาคนั้นจะเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของฟองแก๊ส อย่างไรก็ตาม ในภาวะที่ดำเนินการนั้นอาจจะมีการแยกชั้นของอนุภาคเกิดขึ้น (Segregation) โดยทั้งการผสมและการแยกชั้นนั้นต่างมีทั้งข้อดีและข้อเสียขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะนำไปใช้งาน การผสมนั้นจะมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคกับอนุภาครวมทั้งการผสมระหว่างอนุภาคกับแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ การผสมกันอย่างรวดเร็วของอนุภาคภายในเครื่องปฏิกรณ์จะทำให้เกิดภาวะที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอโดยตลอด ขณะที่การแยกชั้นนั้นมีความสำคัญสำหรับกระบวนการแยกประเภท (Classifier) โดยอนุภาคของแข็งจะถูกแยกตามความแตกต่างของความหนาแน่นและขนาด สำหรับการผสมกันระหว่างอนุภาคของแข็งนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ [17] ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการผสมของอนุภาคของแข็ง (ก) การผสมแบบสมบูรณ (ข) การผสมแบบสุ่ม (ค) การแยกชั้น [17]

2.2.1 การผสมแบบสมบูรณ์ (Perfect mixing)

เป็นรูปแบบการผสมที่อนุภาคของแข็งผสมจะมีสัดส่วนที่เท่ากันในทุกๆ ตำแหน่ง ซึ่งลักษณะการผสมแบบสมบูรณ์นั้นไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริงโดยจะใช้เป็นภาวะในอุดมคติที่ใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2.2.2 การผสมแบบสุ่ม (Random mixing)

การผสมแบบสุ่มเป็นรูปแบบการผสมที่ใกล้เคียงกับการผสมแบบสมบูรณ์มากที่สุด ลักษณะเด่นของการผสมแบบสุ่มคือจะมีความน่าจะเป็นในการพบของแข็งแต่ละชนิดเท่ากันหมดในทุกๆ ตำแหน่งของผสม อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนการผสมกันของอนุภาคนั้นอาจไม่จำเป็นต้องเท่ากันเสมอไปขึ้นอยู่กับแต่ละระบบลักษณะของการผสมแบบสุ่มไม่สามารถเกิดได้เองตามธรรมชาติ เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องผสมของแข็งเพื่อที่จะทำให้ก่อให้เกิดการผสมแบบสุ่ม

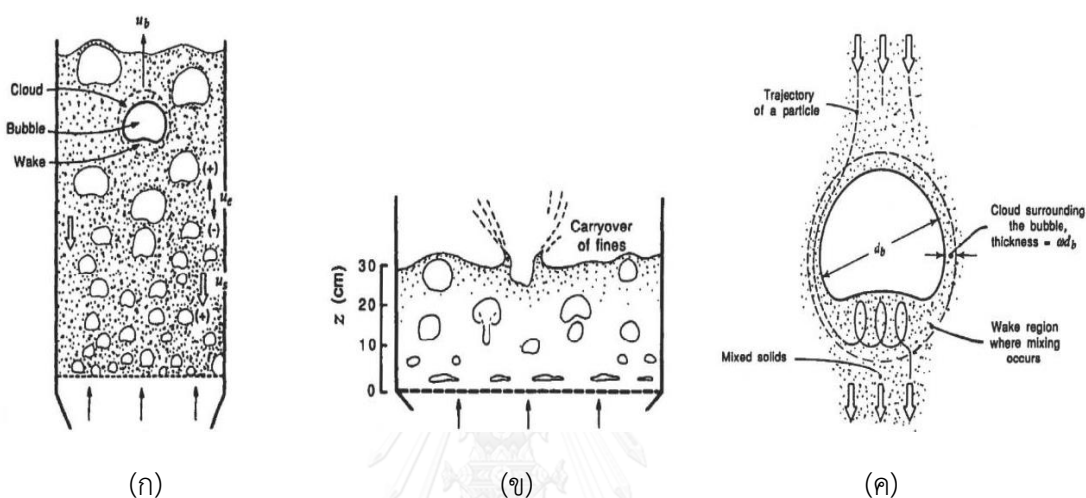
2.2.3 การแยกชั้น (Segregation)

การแยกชั้น คือ การที่จะพบองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งมากกว่าของอีกองค์ประกอบหนึ่งเสมอ ซึ่งเป็นลักษณะการผสมที่ส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตเพราะจะทำให้คุณภาพของสารตั้งต้นไม่มีความสม่ำเสมอ การแยกชั้นเป็นรูปแบบของการผสมที่สามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เห็นได้จากในเหมืองแร่ที่มักจะพบแร่ที่มีองค์ประกอบเดียวกันมีลักษณะทางกายภาพที่คล้ายคลึงกันอยู่ในบริเวณเดียวเสมอ

2.2.4 กลไกการผสมและการแยกชั้น (Mechanism of mixing and segregation)

จากงานวิจัยของ Rowe และคณะ [18] พบว่า ฟองแก๊สนั้นเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการผสมของอนุภาคเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนภายในเบตนั้นทำให้เกิดการผสมและการแยกชั้น ซึ่งสามารถแบ่งกลไกออกได้เป็น 3 กระบวนการ คือ 1. ฟองแก๊สจะมีการก่อตัวขึ้นที่บริเวณทางเข้าของอากาศ (Air inlet) ของเครื่องปฏิกรณ์เนื่องมาจากแรงของอากาศทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน 2. ฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัวที่บริเวณผิวหน้าของเบตและเนื่องมาจากฟองแก๊สนั้นมีจะลักษณะที่เรียกว่า Wake หรือ Stagnant zone อยู่บริเวณด้านล่างภายในฟองเป็นผลทำให้เกิดการพาอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนจึงทำให้เกิดการผสมในแนวแกน (Axial mixing) โดยกลไกที่เกิดขึ้นนี้ทำให้อนุภาคที่บริเวณด้านล่างของเบตนั้นมีโอกาสผสมกับอนุภาคที่อยู่ด้านบน 3. ในทางตรงกันข้ามการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สนั้นจะส่งผลทำให้เกิดช่องว่าง (Void) ในบริเวณที่ฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านซึ่งช่องว่างดังกล่าวนี้จะทำให้อนุภาคที่อยู่บริเวณใกล้เคียงเคลื่อนที่ลงมาแทนที่บริเวณใต้ฟองแก๊สซึ่งอนุภาคของแข็งเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกชั้น โดย

การผสมและการแยกชั้นจะเกิดขึ้นพร้อมๆ กันและที่ภาวะสมดุล ผลของกระบวนการจะวัดได้จากความแตกต่างของความเข้มข้นในแนวแกน (Concentration gradient in axial direction) การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของอากาศจะทำให้ฟองแก๊สเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและช่วยทำให้เกิดการผสมตลอดทั้งคอลัมน์ สำหรับระบบอนุภาคผสมนั้นอนุภาคที่มีแนวโน้มเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างจะเรียกว่าเจ็ตแซม (Jetsam) และอนุภาคที่มีแนวโน้มเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนจะเรียกว่าฟลอตแซม (Flotsam)



รูปที่ 2.4 (ก) ฟองแก๊สเคลื่อนที่ขึ้นสู่ผิวหน้าของเบด (ข) ฟองแก๊สเกิดการแตกตัวที่บริเวณผิวหน้าของเบด (ค) อนุภาคของแข็งที่อยู่บริเวณรอบๆ ฟองแก๊สเคลื่อนที่ลงมาแทนที่ของฟองแก๊ส [19]

2.2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมและการแยกชั้น

โดยปกติมุมมองที่เรามักต่อระบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบแก๊ส-ของแข็งนั้น คือ เป็นระบบที่มีการผสมที่ดี อย่างไรก็ตาม ในระบบที่มีอนุภาคมากกว่าหนึ่งประเภท ความแตกต่างระหว่างอนุภาคทั้งสองชนิดนั้นอาจเกิดขึ้น โดยทั่วไปการแยกชั้นนั้นจะเป็นผลมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นเป็นหลัก นอกจากนี้ อาจเป็นผลมาจากปัจจัยอื่น ได้แก่ 1. อัตราส่วนของความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Bed aspect ratio, H/D_c) 2. อัตราส่วนน้ำหนักขององค์ประกอบที่แยกชั้นภายในเบด 3. สมบัติของระบบฟลูอิดไรซ์เบดซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับสมบัติของอนุภาคของแข็ง ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ ภาวะดำเนินการ เช่น ความเร็วของแก๊สที่ทำการป้อนสู่ระบบ เป็นต้น ตำแหน่งของแผ่นกั้น (Baffle) แผ่นกระจายอากาศ (Distributor plate) เป็นต้น

2.3 ระบบอนุภาคผสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดสำหรับเผาไหม้ (Fluidized bed combustion) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการใช้งานกันอย่างมากมายเนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบการเผาไหม้แบบอื่นๆ โดยจะเป็นระบบที่ประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็งหลายชนิดอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ เชื้อเพลิงอาจจะเป็นถ่านหินหรือชีวมวลจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบที่บริเวณด้านบนและอากาศจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบที่บริเวณด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ภายในระบบการเผาไหม้นั้นจะนิยมใช้ทรายเป็นตัวกลาง (Medium) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของเชื้อเพลิงและเกิดการผสมที่ดีระหว่างตัวกลาง เชื้อเพลิงและอากาศ ส่งผลทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และเกิดการถ่ายโอนความร้อนที่ดี

2.3.1 การเผาไหม้ของถ่านหิน (Coal combustion)

ถ่านหินนั้นเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีปริมาณมากและเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญซึ่งถูกนำมาใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดี โดยวิธีการเผาไหม้ถ่านหินนั้นเป็นวิธีที่นิยมวิธีหนึ่ง เนื่องมาจากมีการถ่ายโอนมวลสารและพลังงานที่สูงส่งผลให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้มีค่าสูง การเผาไหม้นั้นเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างรวดเร็วของเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตาม กลไกการเผาไหม้ของถ่านหินนั้นเป็นกลไกที่มีความซับซ้อนและยังไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนแต่สามารถแบ่งแบบคร่าวๆ ได้ 2 ขั้นตอน [20, 21] คือ

1. กลไกการเผาไหม้ของสารระเหย (Combustion of volatile matter) เมื่อถ่านหินถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ความร้อนจากทราย (เบด) จะทำให้ถ่านหินมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลทำให้สารระเหยเริ่มแพร่ออกมาจากถ่านหินจากนั้นจะเริ่มติดไฟ ขณะที่ถ่านหินที่เหลือยู่จะยังมีลักษณะที่เป็นสีดำเรียกว่าถ่านชาร์ (Char) เนื่องจากความแตกต่างขององค์ประกอบถ่านหิน (Composition) ระยะเวลาที่ใช้เผาไหม้สารระเหย (Devolatilization time) และผลผลิต (Yield) ส่งผลทำให้กลไกที่เกิดขึ้นนั้นยังไม่มี การเข้าใจอย่างชัดเจน

2. กลไกการเผาไหม้ของคาร์บอน (Combustion of carbon) หลังจากสารระเหยนั้นถูกเผาไหม้ ถ่านชาร์นั้นจะเกิดการเผาไหม้เนื่องจากอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เพิ่มสูงขึ้น โดยการเผาไหม้นั้นจะเกิดการแพร่ของออกซิเจนไปยังผิวของถ่านชาร์ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านชาร์นั้นจะมีขนาดที่หดเล็กลงเรื่อยๆ (Shrinking core model)

2.3.2 ประสิทธิภาพการเผาไหม้

ประสิทธิภาพการเผาไหม้นั้นจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลักอย่าง ได้แก่ ตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) และ ตัวแปรที่เกิดจากออกแบบ (Design parameters)

ตัวแปรดำเนินการ คือ ภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการดำเนินการ เช่น ความเร็วแก๊สป้อนเข้า ขนาดของเบดและเชื้อเพลิง ความสูงของเบด อุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งตัวแปรดังกล่าวนี้สามารถที่จะปรับเปลี่ยนค่าได้

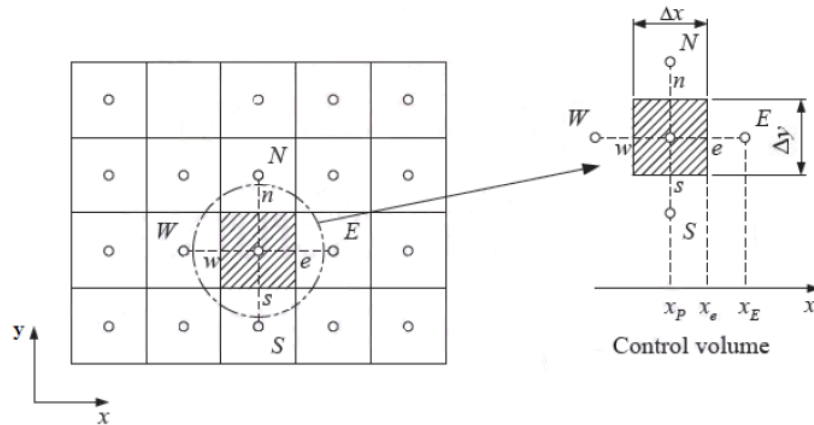
ตัวแปรจากการออกแบบ คือ ผลจากการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ เช่น ความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ ตำแหน่งการป้อนเชื้อเพลิง และตำแหน่งการป้อนอากาศ เป็นต้น

2.4 แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD modeling)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD) เป็นแขนงหนึ่งของวิชาพลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanics) ที่ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical) และขั้นตอนวิธี (Algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมในช่วงที่ผ่านมาเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพคอมพิวเตอร์อีกและมีราคาที่ถูกกว่าในอดีต นอกจากนี้การใช้งานแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นยังมีความซับซ้อนในการใช้งานที่ลดน้อยลงกว่าในอดีตที่ผ่านมาโดยแบบจำลองดังกล่าวนี้ถูกใช้เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหล การถ่ายโอนความร้อน และปฏิกิริยาในการเผาไหม้ของระบบแก๊ส-ของแข็งการแก้ปัญหาจะถูกพิจารณาผ่านสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation) 3 สมการได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy conservation) ชุดสมการเหล่านี้จะถูกแสดงในรูปสมการคณิตศาสตร์ โดยการจำลองนั้นสามารถทำได้ทั้งแบบสองและสามมิติ เพื่อที่จะเข้าใจพฤติกรรมการไหลมากยิ่งขึ้นจึงมีการนำทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาคของแข็ง (Kinetic theory granular flow, KTGF) มาใช้ โดยทฤษฎีนี้มาจากพื้นฐานของทฤษฎีจลน์ของแก๊สควบรวมกับทฤษฎีพลังงานจลน์ของการกวัดแกว่งของของแข็ง (Solid fluctuating kinetic energy) และการชนกันของอนุภาคของแข็ง (Solid collision)

2.4.1 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization method)

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการปริมาตรควบคุม (Control volume method) ถูกนำมาใช้เพื่อทำการเปลี่ยนสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations) เป็นสมการพีชคณิต (Algebraic equations) เพื่อแก้ปัญหา โดยวิธีการปริมาตรควบคุมนั้นจะเป็นบริเวณที่เราสนใจซึ่งจะมีภาวะขอบเขต (Boundary condition) ที่มีการเปลี่ยนแปลงของมวล โมเมนตัม และพลังงาน รูปที่ 2.5 แสดงปริมาตรควบคุมของบริเวณที่เราสนใจ



รูปที่ 2.5 ปริมาตรควบคุมแสดงวิธีการแบ่งช่วงของสมการควบคุม [22]

การพิจารณาสำหรับระเบียบการแบ่งช่วงสำหรับของไหลจะแบ่งออกเป็นเทอมของการพา (Convective) และการแพร่ (Diffusion) โดยทำการแก้สมการอนุรักษ์บนปริมาตรควบคุมที่ถูกแบ่ง สมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation) ในรูปของตัวแปร ϕ ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (2.5)$$

สมการ (2.5) นี้คือ สมการการเคลื่อนที่ในรูปตัวแปร ϕ ซึ่งเทอมทางฝั่งซ้ายจะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาและเทอมของการพา ขณะที่เทอมทางขวามือเทอมของการแพร่และเทอมที่เหลืออื่น (Source term) โดยสมการนี้จะเริ่มจุดเริ่มต้นในการคำนวณเมื่อทำการอินทิเกรต ปริมาตรควบคุมทั้งหมดจะแสดงได้ดังสมการ (2.6)

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

ในงานวิจัยนี้ทำการจำลองการไหลในระบบสองมิติ สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} dV + \int_{CV} \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x} \right) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.7) วิเคราะห์แยกทีละเทอม กำหนดให้ $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$ และ $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$ นำตัวแปรดังกล่าวแทนค่ากลับไปในเทอมต่างๆ

แทนกลับในเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาแสดงได้ดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) dV = \rho^0 \phi_P \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.8)$$

แทนกลับในเทอมของการพาแสดงได้ดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} dV = (\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w = F_e \phi_e - F_w \phi_w \quad (2.9)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial y} dV = (\rho u A)_n \phi_n - (\rho u A)_s \phi_s = F_n \phi_n - F_s \phi_s \quad (2.10)$$

แทนกลับในเทอมของการแพร่แสดงได้ดังนี้

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w = D_e (\phi_E - \phi_P) - D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (2.11)$$

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV = \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_n - \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_s = D_n (\phi_N - \phi_P) - D_s (\phi_P - \phi_S) \quad (2.12)$$

และแทนกลับในเทอมที่เหลืออื่น (Source term) แสดงได้ดังนี้

$$\int_{CV} S_\phi dV = S_\phi V \quad (2.13)$$

เมื่อ F คือ สัมประสิทธิ์ของการพา $(\rho u A)$ และ D คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่ $(\Gamma A / \delta)$

จากสมการที่แสดงมานั้นเราสามารถหาค่า ϕ บนปริมาตรควบคุมได้จาก Discretization scheme แบบต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Upwind differencing scheme วิธีการดังกล่าวนี้จะพิจารณาทิศทางการเคลื่อนที่ของไหลทำให้มีความแม่นยำและความถูกต้อง ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ First order upwind differencing scheme และ Second order upwind differencing scheme

1. First order upwind differencing scheme

เนื่องจากวิธีการแบบ Center differencing scheme มีตัวแปรบางตัวที่ทำให้ค่าเป็นลบส่งผลให้ผลเฉลยที่ได้จากการคำนวณนั้นไม่ลู่เข้าค่าใดค่าหนึ่ง วิธีการนี้จึงแก้ไขโดยไม่คิดเทอมของการแพร่ ในขณะที่เทอมของการพานั้นจะคำนวณค่า ϕ จาก Interface ให้มีค่าเท่ากับที่จุดของ Grid point ของผิวปริมาตรควบคุมต้นทางของกระแสการไหล (Upstream) ข้อดีคือ มีการลู่เข้าของคำตอบที่มากกว่า แสดงได้ดังสมการ

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

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

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

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

โดยที่ค่าของตัวแปร ϕ_n และ ϕ_s สามารถหาได้ในทำนองเดียวกัน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + a_s \phi_s + a_n \phi_n + S_\phi V \quad (2.14)$$

$$\text{เมื่อ} \quad a_n = \max[-F_n, 0]$$

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

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

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

ที่ $\max[A, B]$ คือ ค่าสูงสุดของการเปรียบเทียบระหว่างค่า A และ B

2. Second order upwind differencing scheme

ใช้หลักการเช่นเดียวกับวิธี First order upwind differencing scheme คือ

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

$$\phi_e = \frac{3}{2} \phi_e - \frac{1}{2} \phi_{ee} \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0$$

$$\phi_w = \frac{3}{2} \phi_w - \frac{1}{2} \phi_{ww} \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0$$

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

2.4.2 วิธีแก้ปัญหาด้วยวิธีการ SIMPLE

การแก้ปัญหแบบนี้ SIMPLE หรือ Semi-Implicit Method for Pressure-Linked equations นั้นมีลำดับขั้นตอนการคิดดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีการนี้จะช่วยให้ค่าความเร็วและความดันนั้นมีความสัมพันธ์กันตามสมการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม ในระหว่างการคำนวณเพื่อแก้ปัญหเราสามารถเลือกความเร็วในการเร่งอัตราการลู่เข้าหาคำตอบจาก Iteration ถึง

Iteration ด้วยเทคนิค Relaxation โดยเทคนิคดังกล่าวนั้นถูกใช้เพื่อหลีกเลี่ยงการลู่ออก (Divergence) ระหว่าง Iteration สมการแสดงค่าตัวแปร Relaxation แสดงได้ดังนี้

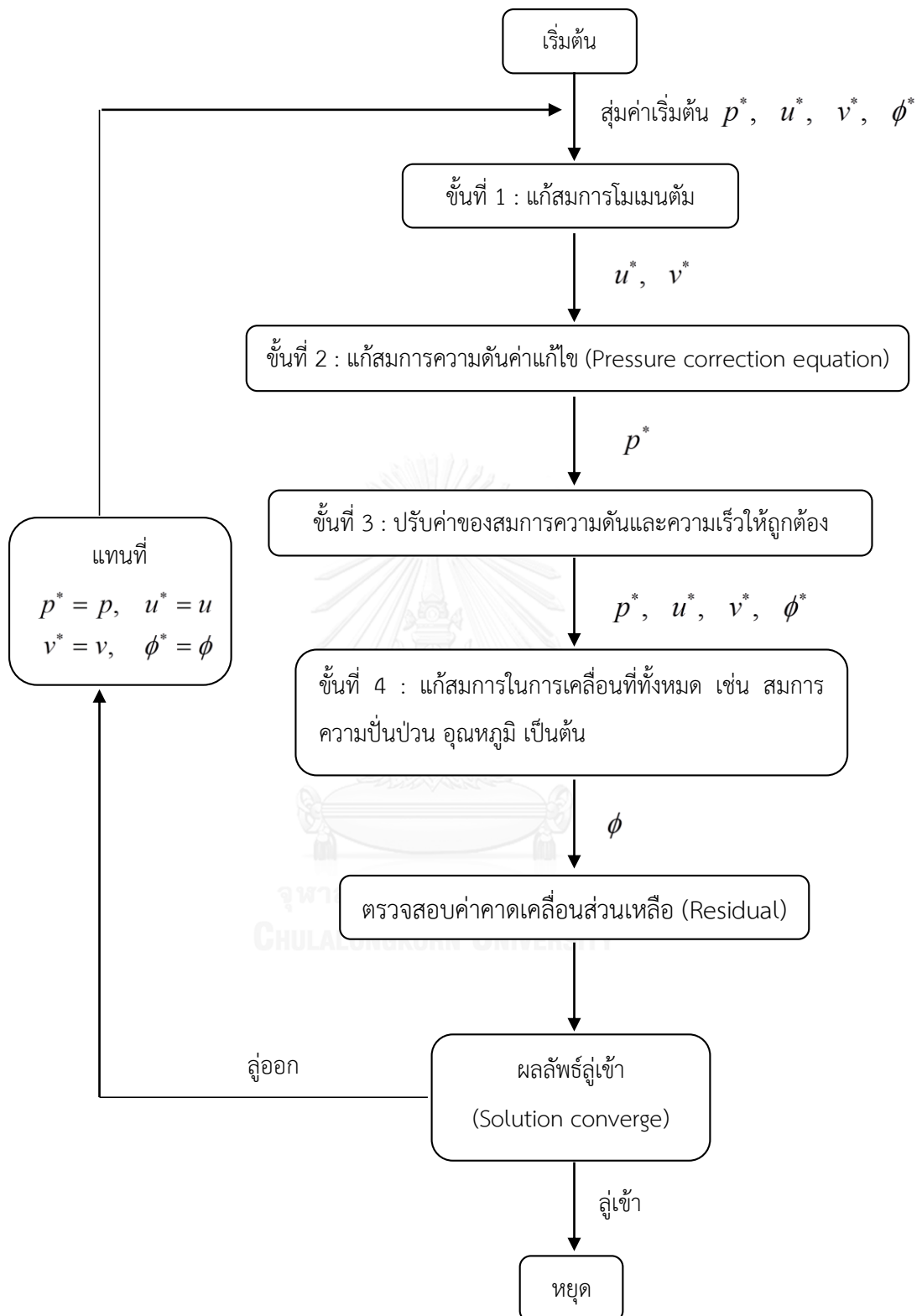
$$\phi = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi \quad (2.15)$$

เมื่อ ϕ_{old} คือ ตัวแปรจากการคำนวณในครั้งที่แล้ว

α คือ Relaxation factor ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

โดยทั่วไปการแก้สมการนั้นจะเป็นแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) จึงเป็นเรื่องที่สำคัญที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ ϕ ในแต่ละครั้งของการ Iteration ซึ่งสามารถทำได้โดยการลดค่า Relaxation factor เพื่อให้ผลลัพธ์นั้นเกิดการลู่เข้า (Convergence)





รูปที่ 2.6 วิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธี SIMPLE

2.5 การออกแบบการทดลอง (Experimental design)

2.5.1 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลแบบ 2^k

วิธีการแฟกทอเรียลนั้นถูกนำมาใช้ออกแบบการทดลองที่ต้องการศึกษาผลของตัวแปรที่สนใจหลายๆตัว การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลแบบ 2^k นั้นจะเป็นการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรที่เราสนใจหรือผลของอิทธิพลของแต่ละปัจจัย (k) ซึ่งจะใช้สัญลักษณ์เป็นตัวอักษรแทนปัจจัยแต่ละตัว เช่น A B C เป็นต้น โดยทั่วไปจะกำหนดให้ตัวแปรแต่ละตัวนั้นมีค่าอยู่ที่ 2 ระดับ (นิยมกำหนดเป็นค่าสูง-ต่ำของปัจจัยแต่ละตัว) เช่น a1 และ a2 สำหรับปัจจัย A และ b1 b2 สำหรับปัจจัย B ซึ่งจะทำให้การจัดกลุ่มให้อยู่ในรูปของทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment combination) การทดลองทั้งหมดนั้นจะคำนวณจาก $2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$ ข้อดีของการออกแบบด้วยวิธีแฟกทอเรียล คือ จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์อิทธิพลของแต่ละปัจจัย (Main effect) และอิทธิพลร่วมของแต่ละตัวแปร (Interaction effect) ได้

2.5.2 การออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลแบบ 2^4

งานวิจัยนี้นั้นได้ทำการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลแบบ 2^4 หรือ 16 การทดลองประกอบไปด้วยปัจจัยของ ความเร็วอากาศ (A) ขนาดอนุภาคถ่านหิน (B) ขนาดอนุภาคทราย (C) และปริมาณทรายเริ่มต้น (D) โดยแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วยค่าสูงและค่าต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ค่าคอนทราสต์ (Contrast) คือ ค่าที่บอกถึงการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่เราสนใจหรือปัจจัยหลัก โดยที่ค่านั้นจะมีเครื่องหมายการเปลี่ยนแปลงทั้งบวกและลบซึ่งถูกกำหนดไว้เนื่องมาจากการคูณกันของแต่ละคอลัมน์ในแต่ละแถว ตัวอย่าง เช่น เครื่องหมายของคอลัมน์ AB นั้นจะเกิดจากผลคูณของเครื่องหมายในคอลัมน์ A และ B คูณกันของแต่ละแถวและค่าคอนทราสต์สามารถคำนวณออกมาได้

ตัวอย่างการประมาณค่าปัจจัยหลักหรือตัวแปรที่สนใจ

$$A = \frac{1}{8n} \begin{bmatrix} a-1-b+ab-c+ac-bc+abc-d+ad \\ -bd+abd-cd+acd-bcd+abcd \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ตัวอย่างการประมาณค่าอิทธิพลร่วมของแต่ละปัจจัยหลักหรืออันตรกิริยา

$$AB = \frac{1}{8n} \begin{bmatrix} -a-1-b+ab-c-ac-bc+abc-d-ad \\ -bd+abd-cd-acd-bcd+abcd \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

จากตัวอย่างข้างต้นสามารถสรุปเป็นสูตรทั่วไป ดังนี้

$$AB\dots K = \frac{2}{n2^k}(\text{contrast}_{AB\dots K}) \quad (2.18)$$

ค่าผลรวมกำลังสองของตัวแปรแต่ละตัว

$$SS_{AB\dots K} = \frac{1}{n2^k}(\text{contrast}_{AB\dots K})^2 \quad (2.19)$$

2.5.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการทดสอบสมมติฐานเพื่อเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป โดยทำการวิเคราะห์ผลรวมกำลังสองของความต่างระหว่างค่าต่างๆ กับค่าเฉลี่ย หรือที่เรียกว่าผลรวมกำลังสอง (Sum of squares) โดยกำหนดให้

$$SS_T = SS_{Treatment} + SS_E \quad (2.20)$$

เมื่อ

SS_T = ผลรวมของความแปรปรวนทั้งหมด (Total sum of squares)

$SS_{Treatment}$ = ผลรวมความแปรปรวนกำลังสองระหว่างกลุ่ม (Treatment sum of square)

SS_E = ผลรวมความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน (Error sum of squares)

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.21)$$

$$SS_{Treatment} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.22)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (2.23)$$

จากสมการที่กล่าวไปข้างต้นเพื่อทำการทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนของแต่ละระดับจะคำนวณหาค่า F_0 หรือ F-test แสดงได้ดังนี้

$$F_0 = \frac{MS_{Treatment}}{MS_E} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$MS_{Treatment}$ = ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean squares between treatment)

MS_E = ค่าเฉลี่ยของความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อน (Mean squares error)

N = จำนวนข้อมูลที่ทำกรวิเคราะห์

a = จำนวนปัจจัย

$$MS_{Treatment} = \frac{SS_{Treatment}}{a-1} \quad (2.25)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{N-a} \quad (2.26)$$

การพิจารณาค่า F_0 ที่ได้จากการคำนวณ ถ้า $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$ แสดงว่าค่าที่ได้นั้นไม่มีนัยสำคัญทางสถิติหรือกล่าวได้ว่าจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (Null hypothesis, H_0) นำไปสู่การยอมรับสมมติฐานแย้ง (Alternative hypothesis, H_1) ในทางตรงกันข้ามถ้า $F_0 < F_{\alpha, a-1, N-a}$ แสดงว่าค่าที่คำนวณนั้นมีนัยสำคัญทางสถิติหรือจะยอมรับสมมติฐานหลัก นอกจากนี้ การวิเคราะห์ยังสามารถใช้ค่า P-value ได้เช่นเดียวกัน โดยทั่วไปค่านี้จะถูกกำหนดให้มีค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้น ถ้า P-value < 0.05 จะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก

ตารางที่ 2.1 แสดงการทดลองจากการออกแบบด้วยวิธีแฟกทอเรียล 2^4

Run	Factor level				Combination
	A	B	C	D	
1	-	-	-	-	1
2	+	-	-	-	A
3	-	+	-	-	B
4	+	+	-	-	AB
5	-	-	+	-	C
6	+	-	+	-	AC
7	-	+	+	-	BC
8	+	+	+	-	ABC
9	-	-	-	+	D
10	+	-	-	+	AD
11	-	+	-	+	BD
12	+	+	-	+	ABD
13	-	-	+	+	CD
14	+	-	+	+	ACD
15	-	+	+	+	BCD
16	+	+	+	+	ABCD

หมายเหตุ เครื่องหมายบวก (+) หมายถึง ค่าสูง เครื่องหมายลบ (-) หมายถึง ค่าต่ำ ของแต่ละปัจจัย

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhong และคณะ [1] ทำการศึกษาอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) ของอนุภาคผสม 2 ชนิดที่มีความหนาแน่นและขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันภายในฟลูอิด์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาคือ ออยเลอร์เลียน (Eulerian) ร่วมกับทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาคของแข็งโดยศึกษาภาวะขอบเขต (Boundary condition) ของผนังต่อการผสมหรือการแยกชั้น ซึ่งตัวแปรที่สำคัญคือ Restitution coefficient และ Specularity coefficient โดยทำนายการผสมจากความเข้มข้นของเจ็ตแซม (Jetsam concentration) และการกระจายตัวของความเร็วเจ็ตแซม (Jetsam velocity distribution) จากการศึกษาพบว่า Restitution coefficient มีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยต่อพฤติกรรมการผสมหรือการแยกชั้นของอนุภาคระบบสององค์ประกอบ

(Binary mixture) แต่อย่างไรก็ตาม Specularity coefficient จะมีผลต่อการทำนายการกระจายตัวของความเร็วเจ็ตแชนม์ โดยการแยกชั้น (Segregation) จะไม่สามารถทำนายได้สำหรับกรณีที่มีค่า Specularity coefficient มีค่าน้อย (0, 0.0005) กล่าวคือเกิดการผสมที่ดี (Well mixed) เพราะอนุภาคเกิดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างผนังที่น้อย

Chalerm sinuwan และคณะ [2] พัฒนาแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสองและสามมิติของอนุภาคที่อยู่ในกลุ่ม Geldart-A ภายในระบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed) โดยใช้แบบจำลองของออยเลอร์เลียน (Eulerian) ร่วมกับทฤษฎีจลนการไหลของอนุภาคของแข็ง (KTGF) และใช้สัมประสิทธิ์แรงต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแก๊ส-ของแข็ง EMMS แบบดัดแปลง เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองสองมิติ สามมิติและผลการทดลอง พบว่า ค่าของความสูงเบด (Bed height) อัตราส่วนการกระจายของเบด (Bed expansion ratio) และสัดส่วนของของแข็ง (Solid volume fraction) ที่ได้จากการจำลองแบบสองและสามมิตินั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้พบว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบปั่นป่วน (Turbulent granular temperature) จะมีค่าที่สูงที่สุดในบริเวณด้านบนของเบด เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สที่เกิดขึ้น ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient) ของแก๊สจะมีความมากกว่าของแข็งและการกระจายตัวจะเกิดในแนวแกน (Axial dispersion) มากกว่าแนวรัศมี (Radial dispersion) เพราะเป็นทิศทางหลักของการเคลื่อนที่

Zhou และ Wang [9] ทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการผสม (Mixing) หรือการแยกชั้น (Segregation) ของอนุภาคสองชนิดซึ่งมีขนาดและความหนาแน่นที่แตกต่างกันภายในท่อไรเซอร์ ซึ่งเป็นการไหลแบบไม่มีปฏิกริยา (Cold flow) โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัฏภาคแก๊ส-ของแข็งของ Gidaspow Beetstra และ Extension of EMMS เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลอง EMMS จะให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองมากที่สุด นอกจากนี้ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลอง KTGF ที่พัฒนาโดย Chao (2011) [23] ที่ทำการเพิ่มฟังก์ชันความหนาแน่น (Density function) กับแบบจำลอง KTGF ของ Syamlal (1987) [24] ตัวแปรตอบสนองที่ถูกนำมาเปรียบเทียบคือ การกระจายตัวของเบดตามแนวแกน (Axial bed distribution) จากผลการจำลองพบว่า KTGF ที่พัฒนาโดย Chao (2011) [23] มีค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลอง

Lungu และคณะ [5] ศึกษาแบบจำลองการกระจายตัวแบบสององค์ประกอบของระบบแก๊ส-ของแข็ง โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัฏภาคแก๊ส-

ของแข็ง ระหว่าง Gidaspow และ EMMS ซึ่งอนุภาคของแข็งในระบบนั้นจะมีขนาด 200 และ 350 ไมครอน โดยมีความหนาแน่นเท่ากันคือ 2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำการเปรียบเทียบผลการจำลอง กับผลการทดลอง พบว่าแบบจำลอง EMMS นั้นจะสามารถทำนายความสูงของเบด (Bed height) และสัดส่วนช่องว่าง (Voidage) ได้สอดคล้องกับผลการทดลองมากกว่า และระดับความละเอียดของพื้นที่การคำนวณ (Grid independent) ที่ใช้นั้นมีผลต่อความแม่นยำในการทำนาย นอกจากนี้พบว่า Specularity coefficient นั้นมีผลต่อการผสมภายในฟลูอิดเบดซึ่งดูได้จากดัชนีการผสม (Mixing index) โดยค่า Specularity coefficient ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ฟองแก๊สในระบบลดลงส่งผลให้ค่าดัชนีการผสมนั้นลดลง

Chang และคณะ [7] ศึกษาการถ่ายโอนความร้อนในระบบฟลูอิดเบดสำหรับของผสม อนุภาคของแข็งแบบสององค์ประกอบด้วยวิธีการจำลอง พบว่า การถ่ายโอนความร้อนส่วนใหญ่ในระบบจะเกิดแบบการพาความร้อน (Convection) ขณะที่การถ่ายโอนความร้อนเนื่องมาจากการชนกันระหว่างอนุภาค (Particle-particle heat transfer) จะมีอัตราส่วนของการถ่ายโอนความร้อนอยู่ในช่วง 1.27-3.09% และรูปแบบการถ่ายโอนความร้อนดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นบริเวณเบดหนาแน่น (Dense zone) นอกจากนี้ ยังพบว่า เมื่อความเร็วของแก๊สสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอนุภาค (Particle-particle heat exchange coefficient, h_{sp}) มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องมาจากเกิดการเคลื่อนที่แบบปั่นป่วน (Turbulence) ทำให้ความถี่ในการชนกันระหว่างอนุภาคสูงขึ้นจึงเป็นเหตุให้ค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอนุภาคมีค่าที่สูงขึ้น

Sun และคณะ [25] ศึกษาลักษณะการกวัดแกว่งของอนุภาค (Particle fluctuation) ของอนุภาคของแข็งที่มีการผสมแบบสององค์ประกอบในฟลูอิดเบดแบบแก๊ส-ของแข็ง โดยเปรียบเทียบค่าสัดส่วนโดยปริมาตร (Volume fraction) และอุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular temperature) กับผลการทดลองเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) ของแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองนั้นสามารถทำนายค่าได้ใกล้เคียงกับการทดลอง นอกจากนี้ พบว่า อุณหภูมิแกรนูลาร์แบบราบเรียบ (Laminar granular temperature) ของเจ็ตแซม (Jetsam) และฟลอตแซม (Flotsam) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงการกวัดแกว่ง (Oscillation) ของแต่ละอนุภาคจะมีค่าที่สูงบริเวณผนังและมีค่าที่ต่ำบริเวณตรงของเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของฟองแก๊ส และจากการตรวจสอบค่าของพลังงานสเปกตรัมแบบปั่นป่วน (Turbulent energy spectrum) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ตำแหน่งต่างๆ พบว่า ที่บริเวณตรงกลางของเบดนั้นจะมีค่าพลังงานที่สูง ซึ่งเป็นการยืนยันถึงการเคลื่อนที่ของฟองแก๊ส

บทที่ 3

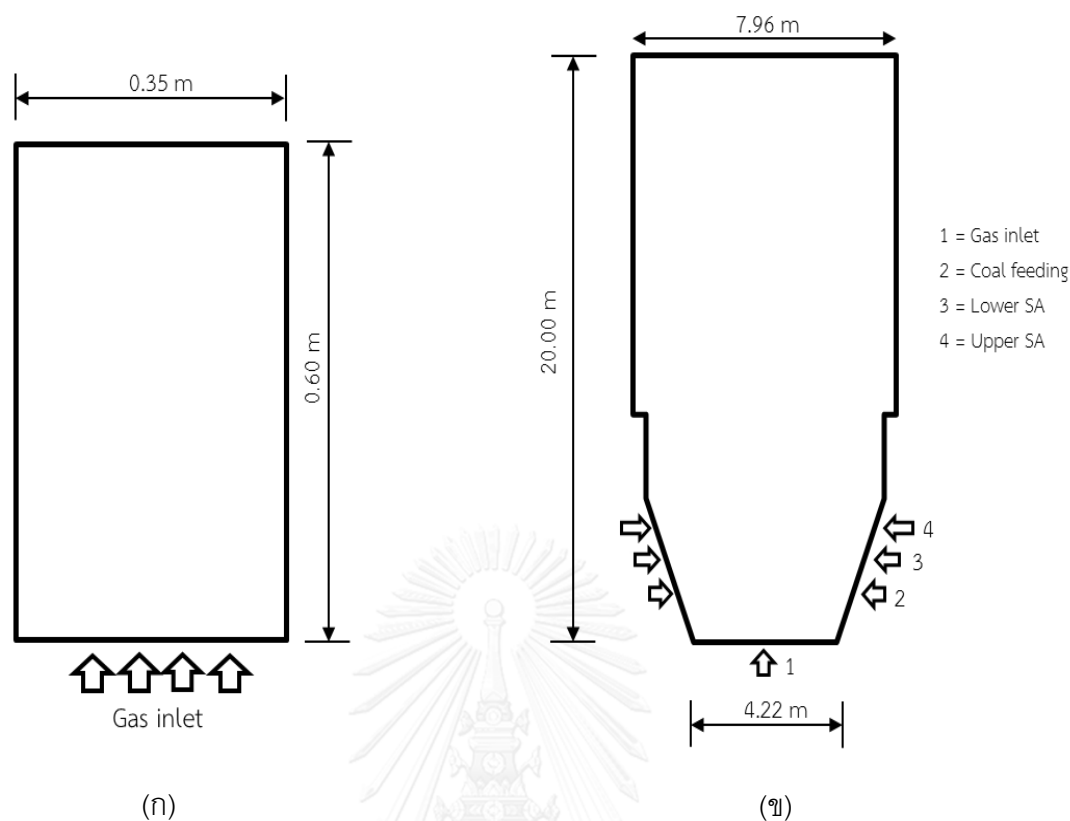
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ข้อมูลเบื้องต้นในงานวิจัย

การจำลองอุทกพลศาสตร์ของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตสำหรับงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ในส่วนแรกนั้นจะเป็นการจำลองระบบผสมอนุภาคสองชนิดซึ่งมีความหนาแน่นที่เท่ากัน (2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) แต่มีขนาดที่แตกต่างกัน (200 และ 350 ไมครอน) ภายในท่อโรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.35 เมตร และมีความสูง 0.6 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.1 (ก) โดยจะทำการจำลองในระบบที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา (Cold flow condition) และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดลองของ Oweyemi คณะ [4] โดยพิจารณาจากการขยายตัวของหน้าเบต (Bed expansion) จากนั้นทำการศึกษาอุทกพลศาสตร์และการผสมที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องมาจากความเร็วที่แตกต่างกันของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

ในส่วนที่สองจะเป็นการจำลองอุทกพลศาสตร์ของไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตแบบหม้อไอน้ำที่ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.876 เมตร และมีความสูง 20 เมตร แสดงดังรูปที่ 3.2 (ข) โดยภายในระบบนั้นจะประกอบไปด้วยถ่านหินและทรายซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 700 และ 180 ไมครอน ตามลำดับ และมีความหนาแน่น 2000 และ 2659 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร การจำลองจะดำเนินการในภาวะที่มีปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Combustion reaction) เกิดขึ้น ซึ่งจะทำให้การเปรียบเทียบผลการขยายตัวของหน้าเบตและความดันตกที่ตกคร่อมเบต (Pressure drop) กับผลการทดลองจริงของบริษัท NPS จากนั้นทำการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) ประกอบไปด้วย ความเร็วของแก๊สที่ป้อนสู่ระบบ ขนาดของถ่านหิน และปริมาณของทรายที่ใช้เป็นเบต ทำการออกแบบผลการทดลอง (Design of experiment) โดยใช้วิธีแฟกทอเรียลแบบ 2^4 ตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษา คือ อุทกพลศาสตร์ ลักษณะการผสม และการถ่ายโอนความร้อน

ในส่วนที่สามจะเป็นการจำลองอุทกพลศาสตร์ของไหลซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาคของแข็ง 3 ชนิด โดยเป็นการนำระบบในส่วนที่สองมาทำการเติมอนุภาคของฝุ่นถ่านหิน (Coal dust) ซึ่งมีความหนาแน่น 45 ไมครอน และ 2000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ เข้าสู่ระบบแล้วทำการศึกษาอุทกพลศาสตร์และลักษณะการผสมที่เปลี่ยนแปลงไปจากผลของการเติมฝุ่นถ่านหิน ปริมาณ 5 และ 10 ตันต่อวัน



รูปที่ 3.1 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอดีซ์แบบสองมิติที่ใช้ในการจำลอง

(ก) เครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัยส่วนที่หนึ่ง (ข) เครื่องปฏิกรณ์สำหรับงานวิจัยส่วนที่สองและสาม

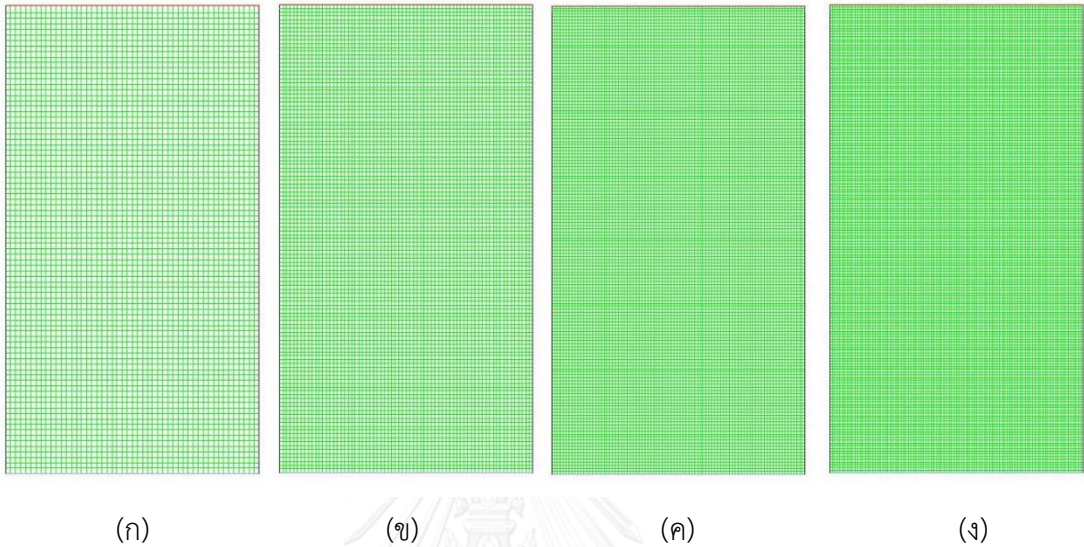
3.2 การจำลองอุทกพลศาสตร์

การจำลองแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมสำหรับระบบนั้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ การหาพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณ (Grid independence) และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

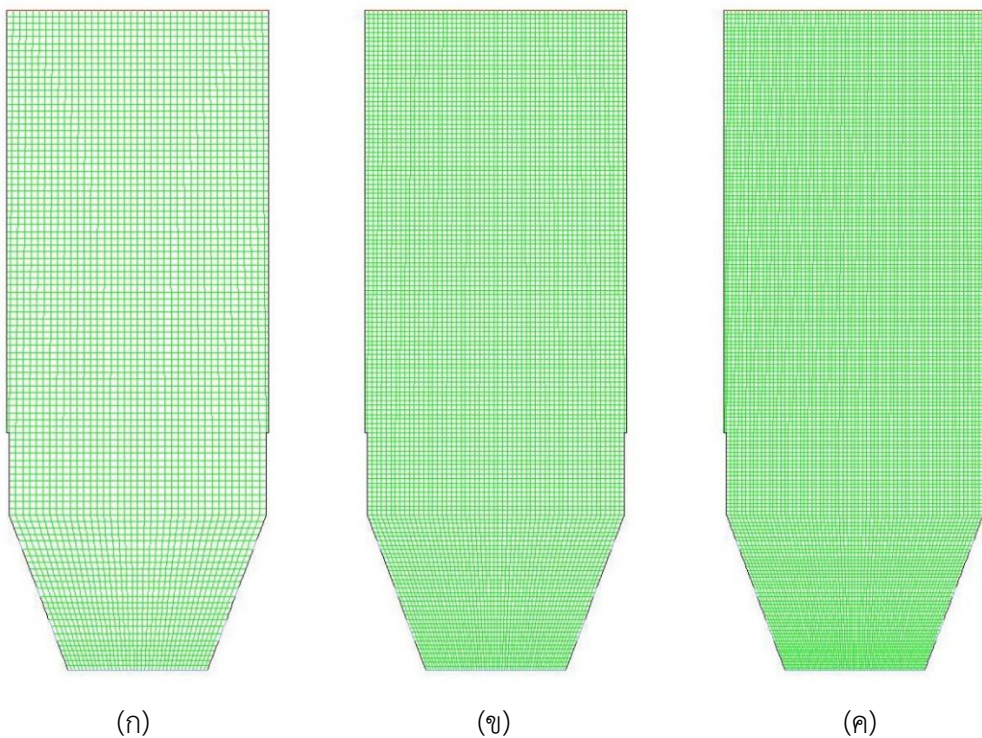
3.2.1 การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test)

ขนาดพื้นที่การคำนวณนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณซึ่งถ้าหากขนาดพื้นที่การคำนวณนั้นมีปริมาณที่ไม่เพียงพอหรือหยาบเกินไป (Coarse grid) จะส่งผลทำให้ผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความแม่นยำที่ลดลง ในทางตรงกันข้ามถ้าหากมีพื้นที่การคำนวณที่มากเกินไปหรือละเอียดเกินไป (Fine grid) การคำนวณนั้นจะใช้ระยะเวลาที่นานเกินไปอีกทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นการหาขนาดพื้นที่การคำนวณจะต้องมีความเหมาะสม (Optimum grid) เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยผลลัพธ์นั้นจะต้องมีค่าที่แม่นยำและใช้ระยะเวลาที่เหมาะสม สำหรับงานวิจัยนี้การหาขนาดพื้นที่

การคำนวณนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก โดยในส่วนแรกจะประกอบไปด้วยพื้นที่การคำนวณขนาด 4000 8000 12000 และ 16000 เซลล์ ในส่วนที่สองจะประกอบไปด้วย 4000 8000 และ 12000 เซลล์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 พื้นที่การคำนวณที่ใช้ในส่วนที่หนึ่ง (ก) 4000 (ข) 8000 (ค) 12000 และ (ง) 16000 เซลล์



รูปที่ 3.3 พื้นที่การคำนวณที่ใช้ในส่วนที่สองและสาม (ก) 4000 (ข) 8000 และ (ค) 12000 เซลล์

3.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

ในกระบวนการฟลูอิดเซชันอนุภาคของแข็งนั้นจะถูกระงับให้มีพฤติกรรมเหมือนของไหลซึ่งแรงหลัก (Primary forces) ที่กระทำที่กระทำต่ออนุภาคหนึ่งเม็ดนั้นจะประกอบไปด้วย แรงลอยตัว (Buoyant force) แรงโน้มถ่วง (Gravity force) และแรงต้านทานการเคลื่อนที่ (Gas-solid drag force) นอกจากนี้ยังมีแรงกระทำที่เกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาค (Solid-solid drag force) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการของออยเลอร์-ออยเลอร์ (Eulerian-Eulerian method) เพื่อพิจารณาพฤติกรรมของไหลที่เกิดขึ้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้จะกำหนดให้แต่ละวัฏภาคเป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuum phase) โดยจะทำการแก้สมการของแต่ละวัฏภาคแยกกันตามสมบัติทางกายภาพ ซึ่งสมการที่ใช้นั้นจะเป็นสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations) ประกอบไปด้วย สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน ร่วมกับสมการอนุรักษ์เพิ่มเติมหรือทฤษฎีจลนศาสตร์ของของแข็ง (kinetic theory granular flow, KTGF)

3.2.2.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equations)

วัฏภาคแก๊ส ,

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

วัฏภาคของแข็ง ,

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

เมื่อ

ε_g คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคแก๊ส (-)

ε_s คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคของแข็ง (-)

ρ_g คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

\mathbf{v}_g คือ ความเร็วของวัฏภาคแก๊ส (เมตรต่อวินาที)

\mathbf{v}_s คือ ความเร็วของวัฏภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที)

t คือ เวลา (วินาที)

โดย ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของวัฏภาคแก๊ส (ε_g) และของแข็ง (ε_s) จะมีค่ารวมกันเท่ากับ 1

3.2.2.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equations)

วิญภาคแก๊ส ,

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

วิญภาคของแข็ง ,

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

เมื่อ

τ_g คือ ความเค้นเทนเซอร์ของแก๊ส (ปาสคาล)

τ_s คือ ความเค้นเทนเซอร์ของของแข็ง (ปาสคาล)

p_g คือ ความดันของวิญภาคแก๊ส (ปาสคาล)

p_s คือ ความดันของวิญภาคของแข็ง (ปาสคาล)

β_{gs} คือ แบบจำลองต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวิญภาคแก๊ส-ของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสามวินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

3.2.2.3 สมการอนุรักษ์พลังงานเนื่องจากการกวัดแกว่ง (Fluctuating kinetic energy conservation equation) ของวิญภาคของแข็ง

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

เมื่อ

I คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์ (-)

θ_s คือ พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของอนุภาค (เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง)

K_s คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

γ_s คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)

ϕ_s คือ การแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของอนุภาคระหว่างวิญภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)

3.2.2.4 สมการเสริม (Constitutive equations)

สมการเสริมถูกนำมาใช้เพื่อช่วยในการแก้สมการของตัวแปรที่อยู่ในเทอมของสมการอนุพันธ์ข้างต้น ซึ่งความเค้นเทนเซอร์ของทั้งสองวัฏภาคสามารถแสดงได้ดังนี้

วัฏภาคแก๊ส ,

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

วัฏภาคของแข็ง ,

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

เมื่อ

ξ คือ ความหนืดรวม (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)

สมการความดันของอนุภาค (Solid pressure) นั้นจะประกอบไปด้วย 2 เทอม คือ สมการจลนศาสตร์และสมการเนื่องจากการชนกันของอนุภาค ซึ่งค่าของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็ง (Solid volume fraction) นั้นจะต้องมีค่าที่น้อยกว่าค่าสูงสุดในการอัดตัว (Maximum packing)

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

เมื่อ

g_0 คือ ฟังก์ชันการกระจายตัวในแนวรัศมีของอนุภาคของแข็ง (-)

e คือ ค่า Restitution coefficient ระหว่างอนุภาคของแข็ง (-)

ความหนืดภายในระบบประกอบไปด้วยความหนืดจากการชน ($\mu_{s,col}$) ความหนืดจากจลนศาสตร์ ($\mu_{s,kin}$) และความหนืดรวม (ξ_s) เนื่องมาจากความต้านทานการกดอัด (Compression) และการขยายตัว (Expansion) ของอนุภาคของแข็ง สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \quad (3.9)$$

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

$$\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_p g_0 (1+e) \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.11)$$

ฟังก์ชันการกระจายตัวตามแนวรัศมี (Radial distribution function) เป็นความน่าจะเป็นการชนกันระหว่างอนุภาคของแข็ง เมื่อสัดส่วนของอนุภาคของแข็งในการอัดตัวนั้นมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.6

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (3.12)$$

เมื่อ

$\varepsilon_{s,max}$ คือ การอัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นที่สุดของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็ง พลังงานจลน์การกวัดแกว่งเนื่องมาจากการนำถูกกำหนดโดยค่าพลังงานการแพร่กระจายของอนุภาคขนาดเล็ก

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

อัตราการกระจายตัวของพลังงานจลน์การกวัดแกว่งที่เกิดจากการชนกันของอนุภาคของแข็งที่ไม่ยืดหยุ่น แสดงดังนี้

$$\gamma_s = 3\varepsilon_s^2 \rho_s g_0 \theta (1-e^2) \left[\frac{4}{d_p} \left(\frac{\theta}{\pi} \right) \right] \quad (3.14)$$

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

ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองต้านทานการเคลื่อนที่ทั้งหมด 4 แบบจำลอง โดยแบบจำลองดังกล่าวนี้เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่จะใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งในของไหล

3.2.2.5.1 แบบจำลอง Wen and Yu

เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากผลการทดลองของ Richardson และ Zaki ซึ่งเหมาะกับระบบที่เบาบาง [15]

$$\beta_{gs} = \frac{3(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{4d_p} \rho_g |v_g - v_s| C_{D0} \varepsilon_g^{-2.65} \quad (3.15)$$

$$C_{D0} = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15(1-\varepsilon_g)\text{Re}^{0.687}) \quad (3.16)$$

เมื่อ

C_{D0} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (-)

Re คือ ตัวเลขไร้นิติเรย์โนลด์ (-)

3.2.2.5.2 แบบจำลอง Gidaspow

เป็นแบบจำลองที่เกิดจากการรวมกันของสมการ Ergun รวมกับ Wen-Yu ซึ่งแบบจำลองนี้จะเหมาะกับระบบที่มีทั้งช่วงหนาแน่น (Dense zone) และเบาบาง (Dilute zone) [15]

$$\beta_{gs} = \begin{cases} 150 \frac{\varepsilon_s (1-\varepsilon_g) \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{\varepsilon_s \rho_g |v_g - v_s|}{d_p}, & \varepsilon_g \leq 0.80 \\ \frac{3}{4} C_{D0} \rho_g \frac{(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{d_p} |v_g - v_s| C_{D0} \varepsilon_g^{-2.65}, & \varepsilon_g > 0.80 \end{cases} \quad (3.17)$$

และ $\text{Re} < 1000$; $C_{D0} = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15\text{Re}^{0.687})$; $\text{Re} = \frac{\varepsilon_g \rho_g d_p |v_g - v_s|}{\mu_g}$ (3.18)

$$\text{Re} \geq 1000; C_{D0} = 0.44 \quad (3.19)$$

3.2.2.5.3 แบบจำลอง Syamlal-O'Brien

เป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาสำหรับอนุภาคทรงกลมที่กระจายตัวอยู่ในของไหลและมีการตัดแปลงเทอมของความเร็ว (Relative velocity correlation) โดยที่ v_r นั้นเป็นความเร็วสุดท้ายของอนุภาคภายในระบบ (Terminal velocity) [15]

$$\beta_{gs} = \frac{3\varepsilon_s \varepsilon_g \rho_g}{4v_{r,s}^2 d_p} C_{D0} |\vec{v}_s - \vec{v}_g| \quad (3.20)$$

$$C_{D0} = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{\frac{\text{Re}_s}{v_{r,s}}}} \right)^2 \quad (3.21)$$

เมื่อ

v_r คือ ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที)

d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)

3.2.2.5.4 แบบจำลอง Energy minimization multi scale (EMMS)

เป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนาโดย Li และ Kwauk เหมาะสมกับอนุภาคในกลุ่มเจลดาร์ดเอและปี โดยแนวคิดของสมการจะพิจารณาผลของการเกิดฟองและการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค (Clusters) [15]

$$\beta_{gs} = \begin{cases} 150 \frac{\varepsilon_s (1 - \varepsilon_g) \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{\varepsilon_s \rho_g |v_g - v_s|}{d_p}, \varepsilon_g \leq 0.74 \\ \frac{3}{4} C_D \rho_g \frac{(1 - \varepsilon_g) \varepsilon_g}{d_p} |v_g - v_s| \omega(\varepsilon_g), \varepsilon_g > 0.74 \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\text{เมื่อ } 0.74 < \varepsilon_g < 0.82, \quad \omega(\varepsilon_g) = -0.5769 + \frac{0.0214}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0044} \quad (3.23)$$

$$0.82 < \varepsilon_g < 0.97, \quad \omega(\varepsilon_g) = -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0040} \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_g > 0.97, \quad \omega(\varepsilon_g) = -31.8295 + 32.8295 \varepsilon_g \quad (3.25)$$

$$\text{และ } \text{Re} < 1000, \quad C_{D0} = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}) \quad (3.26)$$

$$\text{Re} = \frac{d_p \rho_g \varepsilon_g |v_g - v_s|}{\mu_g} \quad (3.27)$$

$$\text{Re} \geq 1000, \quad C_{D0} = 0.44 \quad (3.28)$$

เมื่อ

$\omega(\varepsilon_g)$ คือ ค่าปรับแก้ไข (Correlation factor)

3.3 การจำลองปฏิกิริยาเคมี

การจำลองปฏิกิริยาเคมีในงานวิจัยนี้จะเป็นการเผาไหม้ของถ่านหินภายในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะมีทรายทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการรับความร้อน (Bed medium) ช่วยถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ โดยทำให้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและสมบูรณ์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous reactions) และปฏิกิริยาวิวิพันธ์ (Heterogeneous reactions) โดยอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและสมการที่เกิดขึ้นนำมาจากงานวิจัยของ Shuai และคณะ [26] แสดงได้ดังนี้



ตารางที่ 3.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี

สมการ	Reaction rate (mol m ⁻³ s ⁻¹)	Reaction rate constant
3.29	$R_1 = k_1 Y_{rawc}$	$k_1 = A_e \exp\left(\frac{-E_a}{RT_g}\right)$
3.30	$R_2 = k_2 \left(\frac{Y_{O_2} \rho_g}{M_{O_2}}\right)^{0.8} \left(\frac{Y_{CH_4} \rho_g}{M_{CH_4}}\right)^{0.7}$	$k_2 = 1.58 \times 10^{10} \exp\left(\frac{-24343}{T_g}\right)$
3.31	$R_3 = k_3 \left(\frac{Y_{C_2H_6} \rho_g}{M_{C_2H_6}}\right) \left(\frac{Y_{O_2} \rho_g}{M_{O_2}}\right)$	$k_3 = 1.585 \times 10^{10} \exp\left(\frac{-24157}{T_g}\right)$

สมการ	Reaction rate (mol m ⁻³ s ⁻¹)	Reaction rate constant
3.32	$R_4 = (k_4 Y_{CO} Y_{H_2O}^{0.5}) \left(\frac{17.5 Y_{O_2}}{1 + 24 Y_{O_2}} \right) \left(\frac{P}{RT_g} \right)^{1.8}$	$k_4 = 3 \times 10^{10} \exp \left(\frac{-6.699 \times 10^7}{RT_g} \right)$
3.33	$R_5 = k_5 \left(\frac{Y_{O_2} \rho_g}{M_{O_2}} \right) \left(\frac{Y_{H_2} \rho_g}{M_{H_2}} \right)^{1.5}$	$k_5 = 1.63 \times 10^9 T_g^{1.5} \exp \left(\frac{-3420}{T_g} \right)$
3.34	$R_6 = \left(\frac{6 \alpha_{s1} \rho_{s1} Y_c}{d_{s1} \rho_c} \right) k_6 Y_{O_2}$	$k_6 = \frac{RT_{s1} / M_c}{(1/k_{cr}) + (1/k_{cd})},$ $k_{cr} = 8910 \exp \left(\frac{-1.4947 \times 10^8}{RT_{s1}} \right),$ $k_{cd} = \frac{Sh \phi \left(D_g + \frac{\mu_g}{\rho_g Sc_t} \right) M_c}{d_{s1} R_g T_g}$
3.35	$R_7 = \frac{k_7 Y_{CO_2} Y_c}{1 + k_{7,CO_2} Y_{CO_2} + k_{7,CO} Y_{CO}}$	$k_7 = 3.1785 \times 10^{10} \exp \left(\frac{-2.68 \times 10^8}{RT_{s1}} \right),$ $k_{7,CO_2} = 66 \exp \left(\frac{-2.55 \times 10^7}{RT_{s1}} \right),$ $k_{7,CO} = 120 \exp \left(\frac{-2.55 \times 10^7}{RT_{s1}} \right)$

เมื่อ

- R_i คือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยา i (โมลต่อลูกบาศก์เมตรวินาที)
- k_i คือ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา i (หน่วยขึ้นอยู่กับลำดับของปฏิกิริยา)
- Y_i คือ สัดส่วนมวลของสปีชีส์ i (-)
- C_i คือ ความเข้มข้นโดยโมลของสปีชีส์ i (โมลต่อลูกบาศก์เมตร)
- M_i คือ มวลโมเลกุลของสปีชีส์ i (กรัมต่อโมล)
- E_a คือ พลังงานก่อกัมมันต์ (กิโลจูลต่อโมล)
- ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- ρ_c คือ ความหนาแน่นของถ่านหิน (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
- T_g คือ อุณหภูมิของแก๊ส (เคลวิน)

- T_{s1} คือ อุณหภูมิของถ่านหิน (เคลวิน)
- P คือ ความดันของแก๊ส (ปาสคาล)
- α คือ สัดส่วนปริมาตร (-)
- D_g คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊ส (เมตรกำลังสองต่อวินาที)
- Sh คือ Sherwood number (-)
- Sc คือ Schmidt number (-)
- R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (จูลต่อโมลเคลวิน)
- μ คือ ความหนืด (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

หมายเหตุ

สำหรับปฏิกิริยาลำดับที่หนึ่ง k จะมีหน่วย หนึ่งส่วนวินาที

สำหรับปฏิกิริยาลำดับที่สอง k จะมีหน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมลวินาที

สำหรับปฏิกิริยาลำดับที่สาม k จะมีหน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตรกำลังสองต่อโมลกำลังสองวินาที

3.4 ตัวแปรอธิบายพฤติกรรมผสม (Mixing parameters)

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมผสมที่เกิดขึ้นโดยใช้ตัวแปรที่แตกต่างกัน 3 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิแกรนูลลาร์ สัมประสิทธิ์การกระจายตัว และดัชนีการผสม ในการทำนายการผสมที่เกิดขึ้น

3.4.1 อุณหภูมิแกรนูลลาร์ (Granular temperature, θ)

สำหรับระบบฟลูอิดไรต์แบบพองแก๊สค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ อุณหภูมิแกรนูลลาร์แบบราบเรียบ (Laminar granular temperature) เกิดจากการกวัดแกว่งของอนุภาคแต่ละอนุภาค (Oscillation particle) สามารถหาค่าได้จากการแก้สมการพลังงานจลน์ของการกวัดแกว่ง (Kinetic fluctuation energy equation) อุณหภูมิแกรนูลลาร์แบบปั่นป่วน (Turbulent granular temperature) เกิดจากการรวมกลุ่มกันของอนุภาค (Particle cluster) โดยสามารถหาค่าได้จากการคำนวณความเร็วในแนวแกนของอนุภาค ซึ่งค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ทั้งสองแบบสามารถบอกถึงอุทกพลศาสตร์ลักษณะการผสมหรือการแยกชั้นได้ การคำนวณอุณหภูมิแกรนูลลาร์แบบราบเรียบสามารถคำนวณได้จากอุณหภูมิแกรนูลลาร์แบบดั้งเดิม (Classical granular temperature, θ_l) เป็นการคำนวณความปั่นป่วนด้วยการคำนวณเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct numerical computation) ในขณะที่อุณหภูมิแกรนูลลาร์แบบปั่นป่วนคำนวณจากค่าเฉลี่ยของ

Normal Reynolds stresses ซึ่งเป็นการเฉลี่ยของความเร็วในทิศทางต่างๆ สำหรับระบบสองมิติ แสดงได้ดังนี้

$$\theta_{turbulent} = \frac{2}{3} \overline{u'_x u'_x} + \frac{1}{3} \overline{u'_y u'_y} \quad (3.29)$$

เมื่อ

u'_x คือ ความเร็วกวัดแกว่งของอนุภาคในทิศแนวรัศมี (เมตรต่อวินาที)

u'_y คือ ความเร็วกวัดแกว่งของอนุภาคในทิศแนวแกน (เมตรต่อวินาที)

3.4.2 สัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวนั้นจะมี 2 แบบคล้ายกับอนุกรมกรนูลลาร์ คือ แบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนโดยแบบราบเรียบนั้นจะคำนวณจากค่าอนุกรมกรนูลลาร์หารด้วยความถี่หลักสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$D_{particle} \approx \frac{\theta_l}{f} \quad (3.30)$$

เมื่อ

θ_l คือ อนุกรมกรนูลลาร์แบบดั้งเดิม (เมตรกำลังสองต่อวินาที)

f คือ ความถี่หลัก (รอบต่อวินาที)

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวแบบปั่นป่วน (D_i) สามารถคำนวณได้จากค่า Normal Reynolds stresses และ Lagrangian integral time scale (T_L) โดยตัวห้อย “i” นั้นจะหมายถึง ทิศทางของค่าสัมประสิทธิ์สำหรับในแนวรัศมี (X) และแนวแกน (Y) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$D_i = \overline{v'_i v'_i T_L} \quad (3.31)$$

$$T_L = \int_0^{\infty} \frac{\overline{v'_i(t) v'_i(t+t')}}{\overline{v'_i v'_i}} dt \quad (3.32)$$

เมื่อ

v'_i คือ ความเร็วกวัดแกว่งของอนุภาคในทิศ “i” (เมตรต่อวินาที)

T_L คือ Lagrangian integral time scale (วินาที)

3.4.3 ดัชนีการผสม (Mixing index)

ค่าดัชนีการผสมในงานวิจัยนี้ใช้สมการของ Wachem และคณะ [27] ซึ่งเป็นการคำนวณอัตราส่วนของอนุภาคเจ็ดแซมที่บริเวณด้านบนของเบต (คิดเป็น 25% ของทั้งหมด) ต่ออนุภาคเจ็ดแซมทั้งหมดโดยค่าดัชนีการผสมจะมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยหากมีค่าเท่ากับ 1 จะหมายถึงเกิดการผสมอย่างสมบูรณ์ (Perfect mixing) และถ้ามีค่าเท่ากับ 0 หมายถึงอนุภาคเกิดการแยกชั้น (Segregation) สมการสามารถแสดงได้ดังนี้

$$M = \frac{\mathcal{E}_{jet,top25\%}}{\mathcal{E}_{jet,overall}} \quad (3.33)$$

เมื่อ

$\mathcal{E}_{jet,top25\%}$ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคเจ็ดแซมที่ด้านบนปริมาณ 25% (-)

$\mathcal{E}_{jet,overall}$ คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคเจ็ดแซมทั้งหมด (-)

3.4.4 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนนี้จะคำนวณจากกลไกการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาความร้อนซึ่งเป็นรูปแบบการถ่ายโอนที่เกิดขึ้นเป็นหลักซึ่งสามารถนำมาใช้อธิบายการประสิทธิภาพการผสมสำหรับระบบการเผาไหม้ได้ จากความจริงที่ว่าระบบที่มีการผสมและการกระจายตัวที่ดีของเชื้อเพลิงเกิดการเผาจะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมีค่าที่สูง

$$q = hA(\Delta T) \quad (3.34)$$

เมื่อ

q คือ อัตราการถ่ายโอนความร้อน (วัตต์)

h คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (วัตต์ต่อเมตรกำลังสองเคลวิน)

A คือ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน (เมตรกำลังสอง)

ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใดๆ กับอุณหภูมิอ้างอิง (เคลวิน)

3.5 ขั้นตอนการจำลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT 14.0 และจำลองในระบบ 2 มิติ โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก โดยส่วนที่ 1 จะหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับระบบอนุภาคผสมสองชนิดและศึกษาผลของความเร็วที่แตกต่างกันต่อแนวโน้มของตัวแปรตอบสนองที่บอกถึงการ

ผสมกันของอนุภาคของแข็ง ส่วนที่ 2 จะนำแบบจำลองที่ได้จากส่วนแรกมาใช้กับระบบการเผาไหม้ซึ่งประกอบไปด้วยถ่านหินและทรายพร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง นอกจากนี้ยังศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลแบบ 2^4 และส่วนที่ 3 จะเป็นการศึกษาต่อยอดมาจากส่วนที่สองเนื่องมาจากฝุ่นถ่านหินนั้นเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (Byproduct) ที่เกิดมาจากการบดถ่านหินรวมทั้งจากการเผาไหม้ ดังนั้นงานในส่วนนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฝุ่นถ่านหินเหล่านี้กลับมาใช้งาน โดยทำการจำลองระบบซึ่งประกอบไปด้วยอนุภาค ทราย ถ่านหิน และฝุ่นถ่านหิน ทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟกทอเรียลแบบ 2^2 รายละเอียดในการจำลองแต่ละส่วนแสดงดังนี้

1. การจำลองอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคผสม 2 ชนิด ได้แก่ โพลทแซม (ความหนาแน่น 2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 200 ไมครอน) และ เจ็ดแซม (ความหนาแน่น 2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 350 ไมครอน) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูง เท่ากับ 0.35 และ 0.6 เมตร ตามลำดับ ในส่วนนี้จะเป็นการจำลองในภาวะอุณหภูมิห้องและไม่มีการเกิดปฏิกิริยา (Cold flow) โดยจะศึกษาผลของความเร็วกว่าที่แตกต่างกันต่ออุทกพลศาสตร์และพฤติกรรมการผสม โดยภาวะการจำลองต่างๆ ของส่วนที่หนึ่งแสดงดังนี้

ภาวะในการดำเนินการ (Operating condition)

- แรงโน้มถ่วง (Gravity force) = -9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (ในทิศ Y)
- อุณหภูมิอ้างอิง (Temperature reference) = 288.16 องศาเซลเซียส
- ความดันอ้างอิง (Pressure reference) = 101325 ปาสคาล

ภาวะขอบเขต (Boundary condition)

- ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (Primary air velocity) = 0.25 เมตรต่อวินาที (Base case)
- อุณหภูมิของเบด (Bed temperature) = 298 เคลวิน
- อุณหภูมิของอากาศ (Air temperature) = 298 เคลวิน
- Specularity coefficient ระหว่างอนุภาคและผนัง = 0.01
- Restitution coefficient ระหว่างอนุภาคของแข็ง = 0.90

ภาวะขาออก (Outlet condition)

- ความดันเกจ (Gauge pressure) = 0 ปาสคาล

2. การจำลองอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคผสม 2 ชนิด ได้แก่ ทราย และถ่านหิน ซึ่งอนุภาคทั้งสองนั้นมีขนาดและความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ในส่วนนี้ทำการจำลอง ในภาวะที่มีการเกิดปฏิกิริยา (Hot flow) อุณหภูมิของแก๊สป้อนเข้าสู่ระบบ คือ 673 เคลวิน และถ่านหินถูกป้อนเข้าสู่ระบบที่อุณหภูมิห้อง โดยจะทำการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ ได้แก่ ความเร็วของอากาศ ขนาดของถ่านหิน ขนาดของทราย และปริมาตรของทรายที่แตกต่างกันต่ออุทกพลศาสตร์และพฤติกรรมผสม

3. การจำลองอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคผสม 3 ชนิด โดยนำระบบในส่วนที่สองมาการศึกษาผลของการเติมอนุภาคฝุ่นถ่านหิน (Coal dust) เข้าสู่ระบบ เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์และพฤติกรรมผสมและการถ่ายโอนความร้อน โดยตัวแปรดำเนินการที่ศึกษา คือ ปริมาณและขนาดของฝุ่นถ่านหิน

โดยภาวะการจำลองต่างๆ ของส่วนที่สองและสามแสดงดังนี้

ภาวะในการดำเนินการ (Operating condition)

- ความดันลดของเบดโดยเฉลี่ย = 4800 ปาสคาล
- แรงโน้มถ่วง (Gravity force) = -9.81 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง (ในทิศ Y)
- อุณหภูมิอ้างอิง (Temperature reference) = 288.16 องศาเซลเซียส
- ความดันอ้างอิง (Pressure reference) = 101325 ปาสคาล

ภาวะขอบเขต (Boundary condition)

- ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (Primary air velocity) = 1.327 เมตรต่อวินาที (Base case)
- Lower secondary air = 12 เมตรต่อวินาที
- Upper secondary air = 16 เมตรต่อวินาที
- อัตราการป้อนถ่านหิน (Coal feed rate) = 2.078 กิโลกรัมต่อวินาที
- อุณหภูมิของเบด (Bed temperature) = 673 เคลวิน
- อุณหภูมิของอากาศ (Air temperature) = 673 เคลวิน
- Specularity coefficient ระหว่างอนุภาคและผนัง = 0.01
- Restitution coefficient ระหว่างอนุภาคของแข็ง = 0.90

ภาวะขาออก (Outlet condition)

- ความดันเกจ (Gauge pressure) = 0 ปาสคาล

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ผลการวิจัยจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ในส่วนแรกเป็นการศึกษาระบบอนุภาคผสมสองชนิดที่มีความหนาแน่นเท่ากันแต่มีขนาดที่แตกต่างกัน ในส่วนที่สองเป็นระบบที่มีอนุภาคสองชนิดที่มีความหนาแน่นและขนาดที่แตกต่างกันรวมทั้งมีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ ในส่วนที่สามเป็นระบบที่มีอนุภาคผสมที่แตกต่างกันสามชนิดและมีการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้ โดยระดับการผสมนั้นจะรายงานในค่าของ สัมประสิทธิ์การกระจายตัว อุณหภูมิเกรนูลลาร์ และดัชนีการผสม

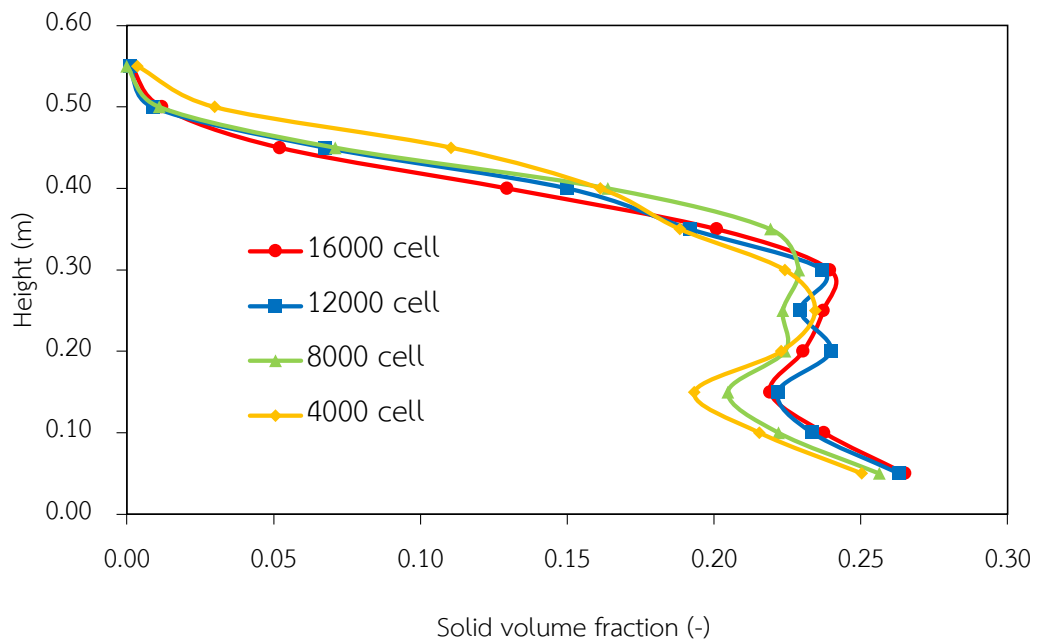
4.1 อุทกพลศาสตร์ของระบบอนุภาคผสมสองชนิดที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยา (Cold flow)

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของความเร็วที่แตกต่างกันต่ออุทกพลศาสตร์และพฤติกรรมการผสม ภายในท่อไรเซอร์โดยทำการเปรียบเทียบผลจากการจำลองกับงานวิจัยของ Oweyemi และคณะ [4] โดยอนุภาคเม็ดแข็งจะมีความหนาแน่นและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ 350 ไมครอน ตามลำดับ ขณะที่โฟลทแฮมจะมีขนาด 200 ไมครอน (อนุภาคทั้งสองชนิดนี้มีลักษณะเป็นทรงกลม)

4.1.1 ผลของพื้นที่การคำนวณและเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสถียร

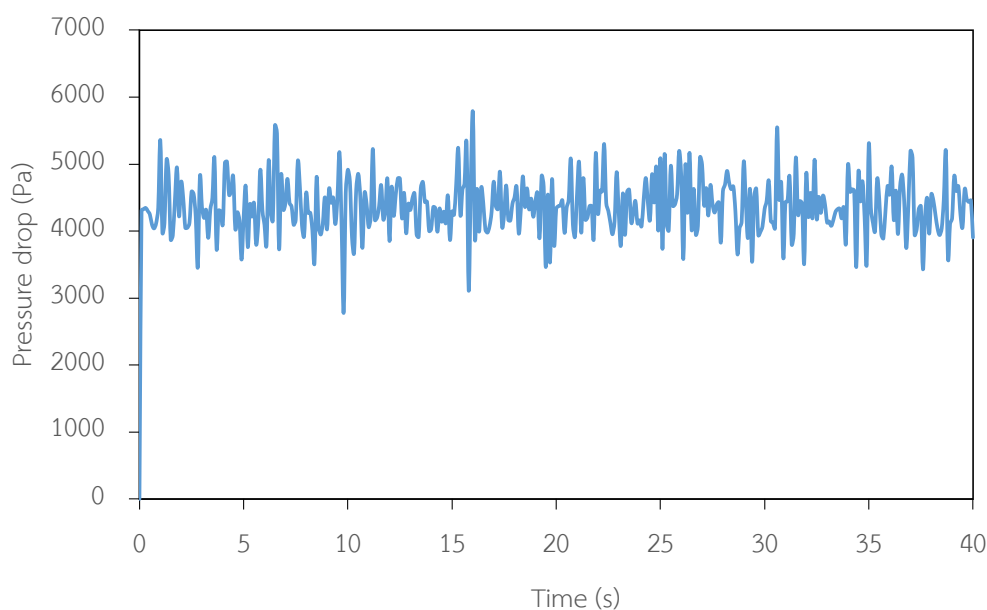
ขนาดพื้นที่การคำนวณจะส่งผลโดยตรงต่อผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองขนาดพื้นที่การคำนวณที่ไม่ละเอียด (Coarse grid) จะส่งผลทำให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำที่ลดน้อยลงขณะที่ขนาดพื้นที่การคำนวณที่ละเอียดมาก (Fine grid) จะทำให้ใช้ระยะเวลาในการจำลองที่นานเกินไปและสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นการหาขนาดพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Optimum grid) จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและใช้ระยะเวลาที่เหมาะสม

รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็งที่ได้จากการจำลองโดยใช้ขนาดพื้นที่การคำนวณที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 4000 8000 12000 และ 16000 เซลล์ จากกราฟจะเห็นว่า การกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของแข็งที่ได้จากพื้นที่การคำนวณ 4000 และ 8000 เซลล์ นั้นจะมีลักษณะที่กว้าง ขณะที่พื้นที่การคำนวณที่เพิ่มขึ้นเป็น 12000 และ 16000 เซลล์ ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคเริ่มมีค่าที่ไม่แตกต่างกัน อนุภาคจะมีความหนาแน่นที่บริเวณด้านล่างและค่อยๆ เบาบางลงตามระยะความสูงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ในส่วนที่หนึ่งนี้จะทำการเลือกใช้ขนาดพื้นที่การคำนวณ 12000 เซลล์ ในการจำลองต่อไป



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคของแข็งต่อความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ที่พื้นที่การคำนวณต่างๆ

เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดนั้นไม่มีภาวะคงตัว (Steady state) ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลจึงต้องทำการหาภาวะเสมือนคงตัว (Quasi steady state) ของระบบเพื่อใช้เป็นตัวแทนของอุณหพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในระบบ จากกราฟที่ 4.2 แสดงค่าความดันลด (Pressure drop) ที่ระยะเวลาต่างๆ ในช่วงแรกค่าความดันลดจะมีลักษณะที่กวัดแกว่งเนื่องมาจากอนุภาคภายในระบบถูกทำให้เกิดการกระจายตัวโดยอากาศหรือเกิดกระบวนการฟลูอิดไลเซชัน จนกระทั่งช่วงเวลาที่ 20-40 วินาที ค่าการกวัดแกว่งของความดันลดมีลักษณะที่ค่อนข้างคงตัวสาเหตุของการกวัดแกว่งของความดันลด เนื่องมาจากในระบบมีการเกิดขึ้นและการแตกออกของฟองแก๊สตลอดเวลา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ช่วงระยะเวลาที่ 20-40 วินาที เป็นตัวแทนของระบบในการคำนวณค่าต่างๆ โดยจะทำการคำนวณเฉลี่ยค่าที่ละ 0.1 วินาที ในช่วงระยะเวลาดังกล่าว

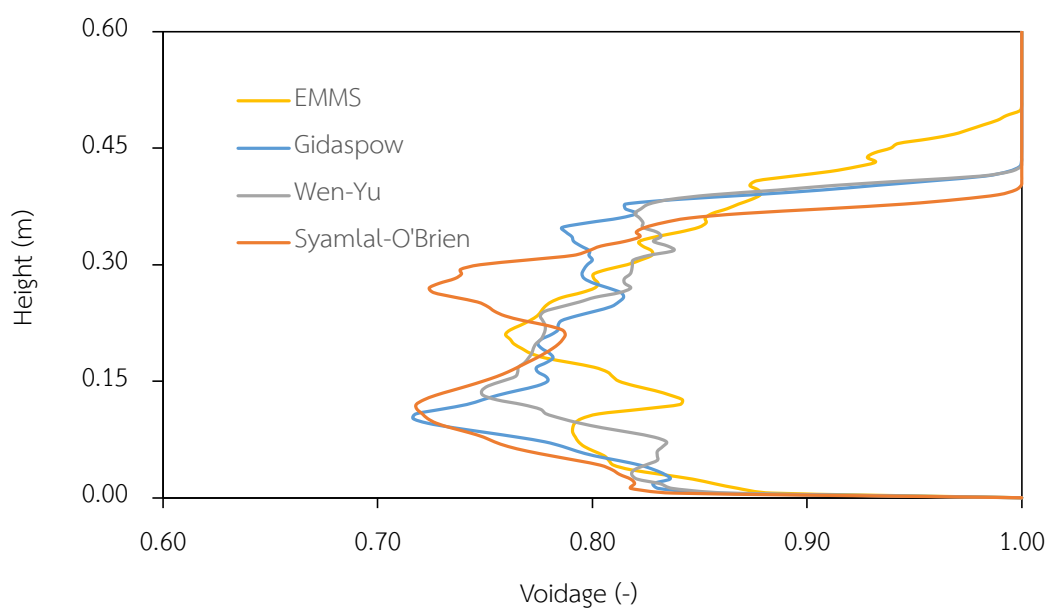


รูปที่ 4.2 การกระจายตัวของความดันลด (Pressure drop) ที่เวลาต่างๆ

4.1.2 ผลของแบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค

หลังจากที่เราทราบภาวะเสมือนคงตัวของระบบแล้วในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแก๊ส-ของแข็ง (Drag models) เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับระบบ โดยแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองได้แก่ แบบจำลอง Wen-Yu แบบจำลอง Gidaspow แบบจำลอง Syamlal'O'Brien และ แบบจำลอง Energy Minimization Multi-Scale (EMMS) รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะการกระจายตัวของช่องว่างอากาศ (Voidage) ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงช่วงการไหลที่เกิดขึ้นได้ พบว่า ช่วงการไหลที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบฟองแก๊ส (Bubbling regime) โดยบริเวณด้านล่างนั้นจะมีช่องว่างอากาศที่น้อยหรืออนุภาคจะมีความหนาแน่นมาก (Dense zone) ในขณะที่ด้านบนจะมีช่องว่างอากาศที่มากหรือมีอนุภาคที่เบาบาง (Dilute zone) การคำนวณการขยายตัวของหน้าเบด (Bed expansion) แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่า ผลจากการจำลองด้วยแบบจำลอง Syamlal-O'Brien และ แบบจำลอง EMMS นั้นให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดแต่เมื่อพิจารณาภาพถ่ายจากการทดลองเปรียบเทียบกับภาพคอนทราสต์ที่ได้จากการจำลอง (รูปที่ 4.4-4.6) จะเห็นได้ว่า คอนทราสต์ของแบบจำลอง EMMS นั้นจะมีความใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าโดยเบดจะมีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและจะสังเกตเห็นฟองแก๊ส (Bubbles) เกิดขึ้นภายในเบดรวมทั้งมีการแตกตัว (Eruption) ของฟองแก๊สบริเวณผิวหน้าเบด (Bed surface) เนื่องมาจากแบบจำลอง EMMS

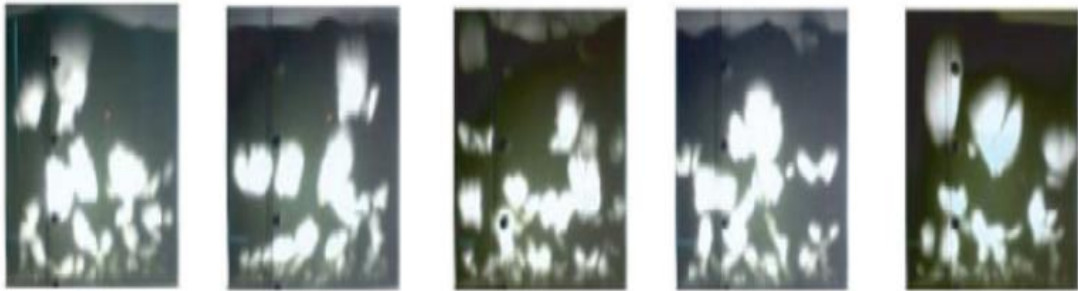
นั้นจะพิจารณาอิทธิพลของฟองแก๊สและการเกิดคลัสเตอร์ (Clusters) ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lungu และคณะ [5] ซึ่งทำการเปรียบเทียบแบบจำลองด้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแก๊ส-ของแข็ง สำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสมสองชนิด พบว่า แบบจำลอง EMMS ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงผลการทดลองมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลอง EMMS สำหรับการศึกษาดูทกพลศาสตร์ต่อไป



รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างอากาศตามแนวความสูงของโรเตอร์

ตารางที่ 4.1 ค่าการขยายตัวของหน้าเบด (Bed expansion) สำหรับแบบจำลองที่แตกต่างกัน

Drag model	Bed expansion (m)
EMMS model	0.360
Gidaspow model	0.384
Wen-Yu model	0.384
Syamlal-O'brien model	0.360
Experiment [4]	0.365



(ก)

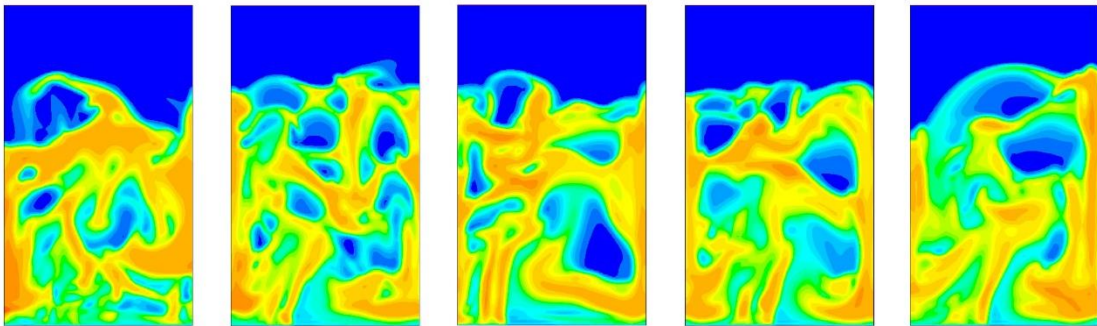
(ข)

(ค)

(ง)

(จ)

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายการกระจายตัวของอนุภาคจากการทดลองที่เวลา (ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที และ (จ) 10 วินาที ตามลำดับ [4]



(ก)

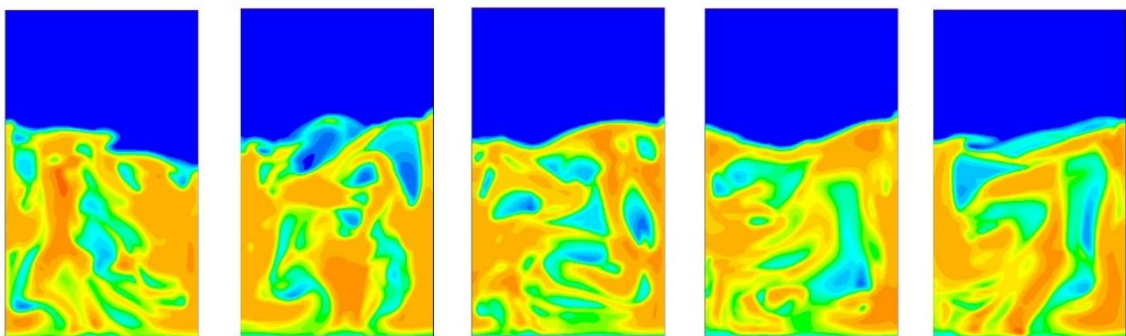
(ข)

(ค)

(ง)

(จ)

รูปที่ 4.5 คอนทัวร์การกระจายตัวของอนุภาคของแบบจำลอง EMMS ที่เวลา (ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที และ (จ) 10 วินาที ตามลำดับ



(ก)

(ข)

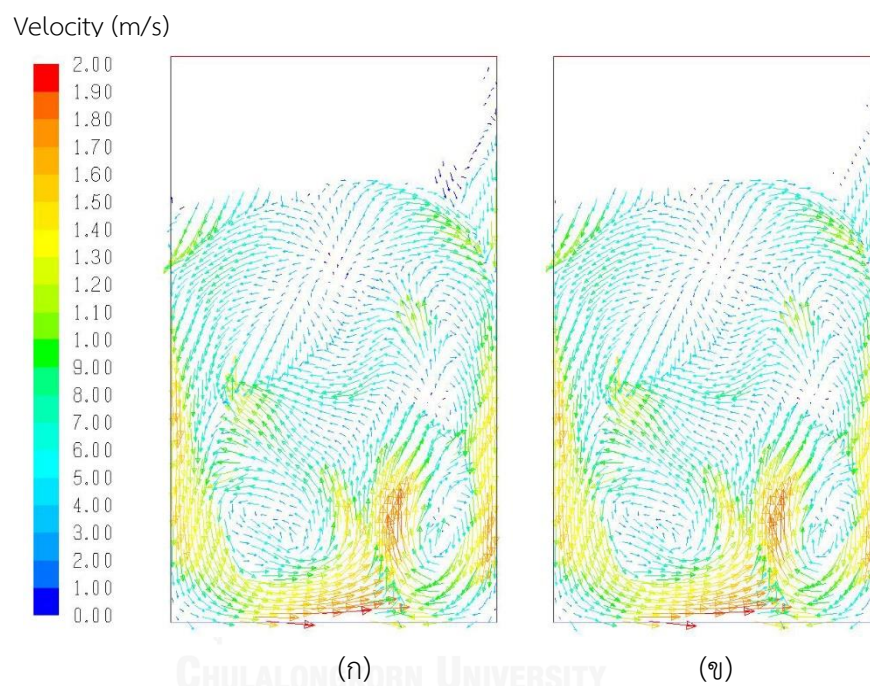
(ค)

(ง)

(จ)

รูปที่ 4.6 คอนทัวร์การกระจายตัวของอนุภาคของแบบจำลอง Syamlal-O'brien ที่เวลา (ก) 2 วินาที (ข) 4 วินาที (ค) 6 วินาที (ง) 8 วินาที และ (จ) 10 วินาที ตามลำดับ

ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคโพลทแซมและเจ็ตแซมแสดงดังรูปที่ 4.7 แสดงเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้งสองชนิด พบว่า มีการเคลื่อนที่แบบหมุนวน (Circulate flow) เกิดขึ้นภายในระบบเนื่องมาจากมีอนุภาคบางส่วนเคลื่อนที่ขึ้นไปสู่ผิวหน้าด้านบนแล้วตกกลับสู่ด้านล่างบริเวณผนังซึ่งจะมาปะทะกับอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ขึ้นจึงทำให้เกิดการหมุนวน นอกจากนี้จะเห็นว่าอนุภาคทั้งสองมีพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่คล้ายกันเนื่องมาจากที่อนุภาคทั้งสองมีความหนาแน่นเท่ากัน ถึงแม้ว่าจะมีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามอนุภาคทั้งสองชนิดนั้นก็จัดอยู่ในกลุ่มเจลดาร์ตบีเหมือนกันจึงทำให้มีอุทกพลศาสตร์ที่คล้ายกัน

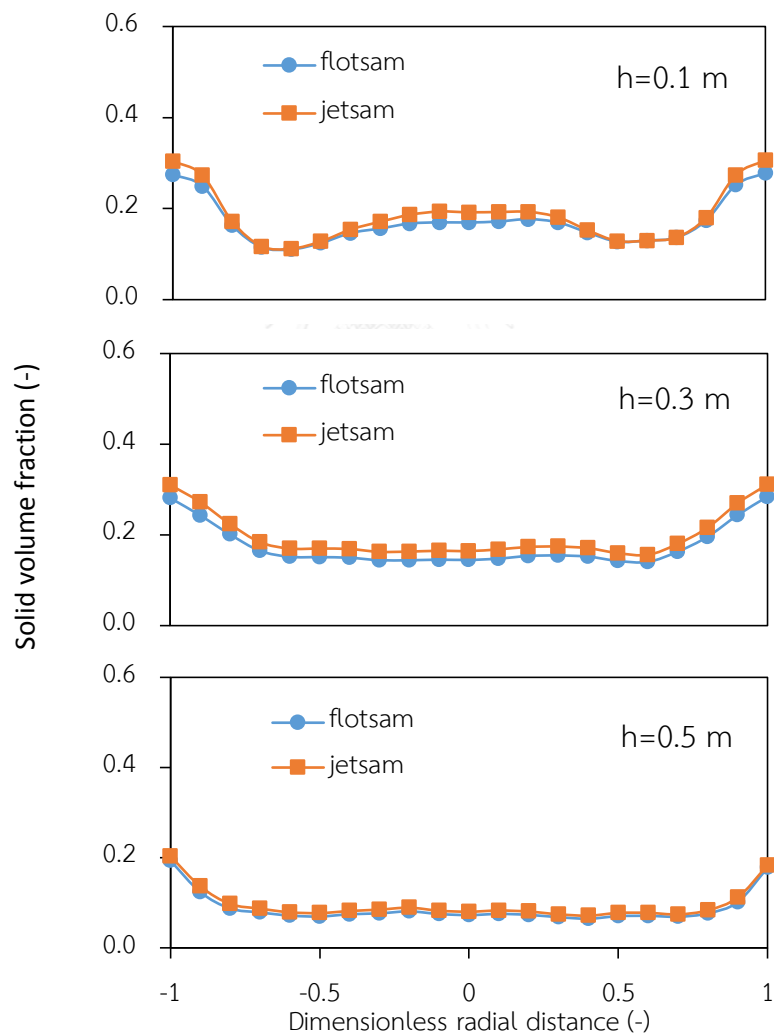


รูปที่ 4.7 เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ก) โพลทแซม และ (ข) เจ็ตแซม

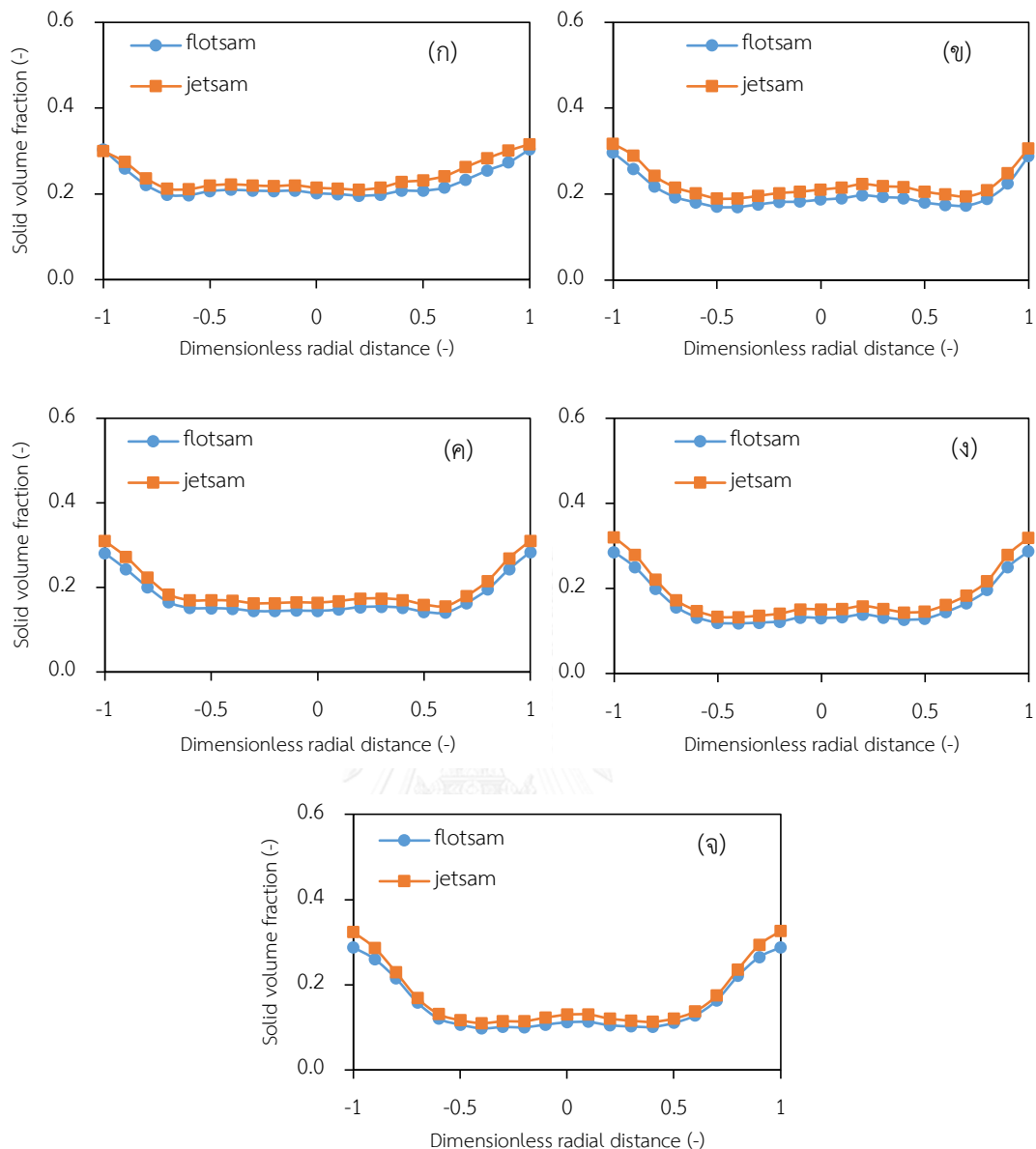
4.1.3 ผลของความเร็วต่ออุทกพลศาสตร์และพฤติกรรมผสม

ในส่วนนี้ทำการศึกษาผลของความเร็วที่แตกต่างกัน 5 ความเร็ว ได้แก่ 0.125 0.25 0.50 0.75 และ 1.00 เมตรต่อวินาที เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์และตัวแปรตอบสนองต่อการผสมและการกระจายตัวประกอบด้วย อุณหภูมิแก๊รูลลาร์ สัมประสิทธิ์การกระจายตัว และดัชนีการผสมโดยการคำนวณจะพิจารณาจากอนุภาคเจ็ตแซม เพราะ เป็นอนุภาคที่มีปริมาณสูงและมีขนาดใหญ่ที่สุดในระบบ รูปที่ 4.8 แสดงผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที ต่อการกระจายตัวของโพลทแซมและเจ็ตแซมตามแนวรัศมีที่ความสูงต่างๆ พบว่า อนุภาคจะมีปริมาณลดลงตามความสูงและอนุภาคทั้งสองชนิดนั้นมีลักษณะการกระจายตัวที่คล้ายกันโดยมีลักษณะแบบ Annulus core

structure กล่าวคืออนุภาคจะมีสัดส่วนโดยปริมาตรที่เบาบางบริเวณตรงกลางแต่จะหนาแน่นที่บริเวณใกล้กับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้ที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้าอื่นๆ จะมีลักษณะแบบ Annulus core structure เช่นกัน โดยความเร็วที่เพิ่มสูงขึ้นจะมีแนวโน้มการเกิด Annulus core structure ที่มากขึ้น (รูปที่ 4.9) ลักษณะที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้จากผลของคลัสเตอร์ (Clusters) หรือกลุ่มก้อนที่เกิดการรวมตัวของอนุภาค เมื่ออนุภาคบริเวณตรงกลางเบตนั้นถูกแรงจากแก๊สมากระทำส่งผลให้อนุภาคนั้นไม่มีความเสถียร อนุภาคจึงเคลื่อนที่ไปยังบริเวณผนัง แต่เนื่องจากอนุภาคและผนังนั้นมีแรงกระทำซึ่งกันและกันจึงทำให้อนุภาคนั้นอยู่ในภาวะสมดุลจึงทำให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคเข้าด้วยกัน



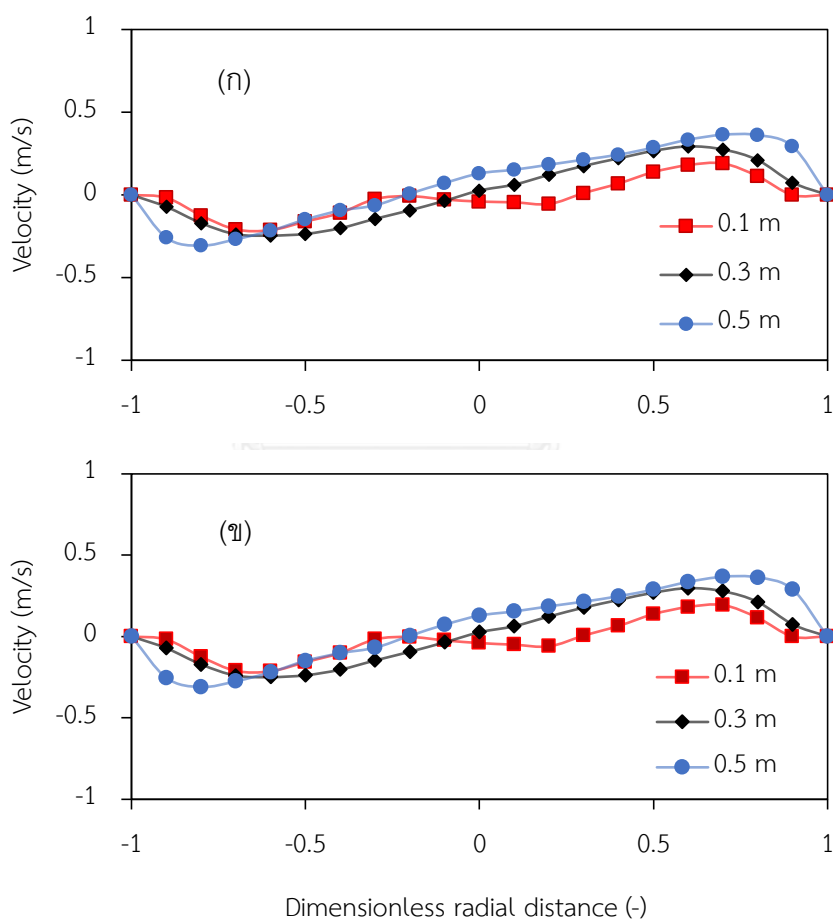
รูปที่ 4.8 การกระจายตัวของอนุภาคโฟลตแซมและเจ็ตแซมตามแนวความสูงที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที



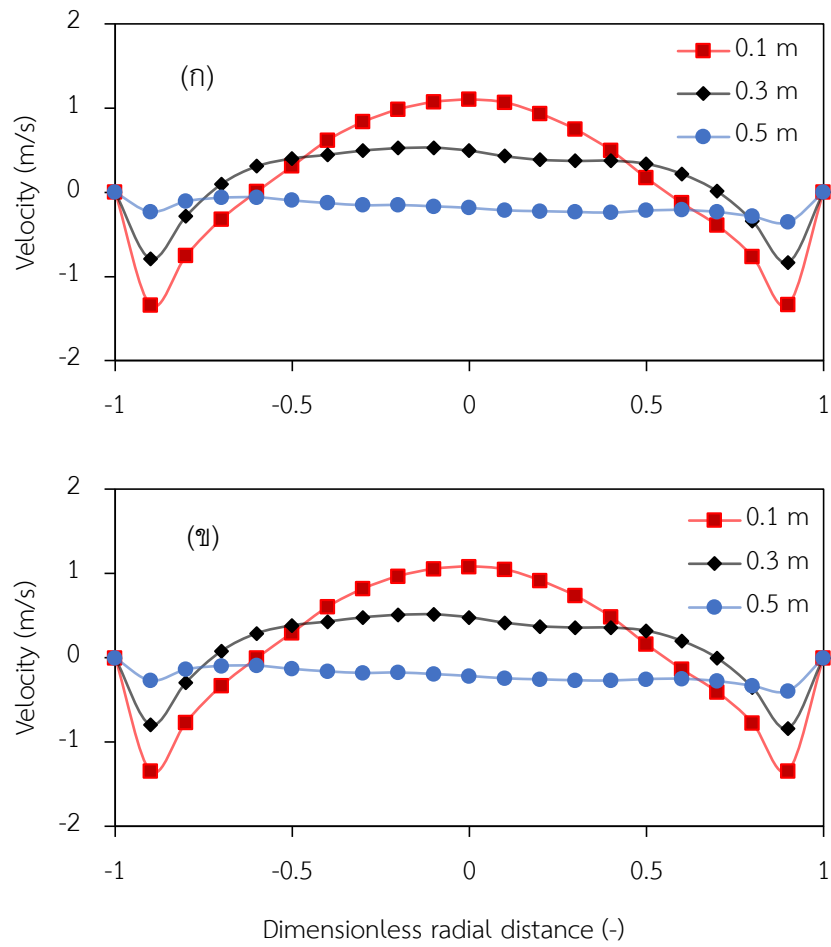
รูปที่ 4.9 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของอนุภาคโฟลทแซมและเจ็ตแซมที่ความสูง 0.3 เมตร สำหรับความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ก) 0.125 (ข) 0.25 (ค) 0.50 (ง) 0.75 และ (จ) 1.00 เมตรต่อวินาที

เมื่อพิจารณาความเร็วของอนุภาคในทิศทาง X (รูปที่ 4.10) จะสังเกตเห็นว่าความเร็วของอนุภาคนั้นมีค่าที่กวัดแกว่ง (ค่าความเร็วนั้นมีค่าที่เป็นบวก (+) และลบ (-) โดย ค่าที่เป็นบวก หมายถึง อนุภาคมีเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา ในทางตรงกันข้ามค่าลบ หมายถึง อนุภาคมีเคลื่อนที่ไปด้านซ้าย) ซึ่งค่าความเร็วในแนวรัศมีมีค่าสูงหมายถึงอนุภาคนั้นมีการกระจายตัวที่ดี ลักษณะดังกล่าวนี้มีความสำคัญสำหรับระบบที่มีการเผาไหม้ เนื่องจากถ้าการกวัดแกว่งในแนวรัศมีมีค่าต่ำ หมายถึงอนุภาคนั้นมีการกระจุกตัวกันเป็นกลุ่มก้อนหรือทำให้เกิดจุดอับ (Hot spot) ส่งผลให้การเผาไหม้นั้นมี

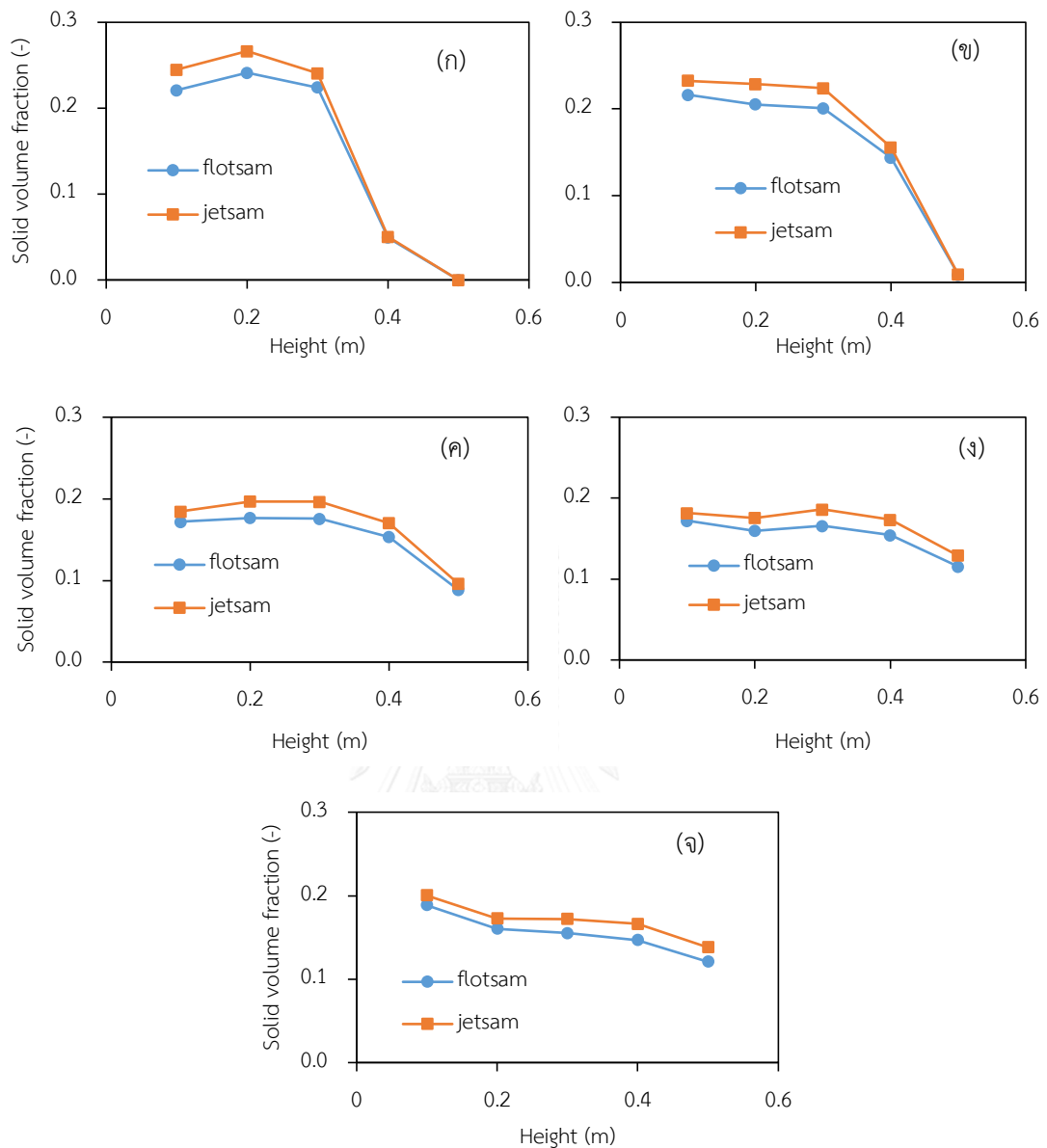
ค่าที่ต่ำ ในขณะที่ความเร็วของอนุภาคในทิศทาง Y (รูปที่ 4.11) พบว่า อนุภาคบริเวณตรงกลางเบดจะเคลื่อนที่ขึ้นสู่บริเวณด้านบน (ค่าความเร็วเป็นบวก) และจะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างที่บริเวณผนัง (ค่าความเร็วติดลบ) ลักษณะที่เกิดขึ้นดังกล่าวบ่งบอกถึงการเกิดการผสมย้อนกลับ (Back mixing) เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วของอนุภาคทั้ง 2 ทิศทาง พบว่า โดยทั่วไปความเร็วในแกน Y นั้นจะมีค่าที่มากกว่าความเร็วในแนวแกน X เนื่องจากทิศ Y นั้นเป็นทิศทางหลักในการเคลื่อนที่ของอนุภาค [6] นอกจากนี้เมื่อทำการเพิ่มความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (รูปที่ 4.12) พบว่า อนุภาคจะมีการกระจายตัวที่เพิ่มขึ้นตามความสูงในแนวแกน (Vertical direction) ขณะที่การกระจายตัวในแนวรัศมี (Radial direction) นั้นจะลดลง เนื่องจากอนุภาคส่วนใหญ่จะเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางหลัก



รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของความเร็วในแนวรัศมี (X-velocity) ตามแนวความสูงต่างๆ ที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที (ก) โพลทแซม (ข) เจ็ตแซม



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวของความเร็วในแนวแกน (Y-velocity) ตามแนวความสูงต่างๆ ที่ความเร็ว
แก๊สป้อนเข้า 0.5 เมตรต่อวินาที (ก) โพลทแซม (ข) เจ็ดแซม



รูปที่ 4.12 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของอนุภาคโฟลตแซมและเจ็ตแซมตามระยะความสูง สำหรับความเร็วแก๊สป้อนเข้า (ก) 0.125 (ข) 0.25 (ค) 0.50 (ง) 0.75 และ (จ) 1.00 เมตรต่อวินาที

4.1.4 ผลของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมและการกระจายตัวของอนุภาค

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาแนวโน้มของตัวแปรตอบสนองเมื่อความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบเปลี่ยนไป (0.125-1.00 เมตรต่อวินาที) โดยตัวแปรตอบสนองที่ศึกษาประกอบไปด้วย สัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีและแนวแกน อุณหภูมิแกนอนุคลาร์ และดัชนีการผสม การคำนวณนั้นจะเป็นการเฉลี่ยค่าที่ความสูงในช่วง 0.1-0.5 เมตร อ้างอิงจากอนุภาคเจ็ตแซม ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองนั้นสรุปไว้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้าแตกต่างกัน

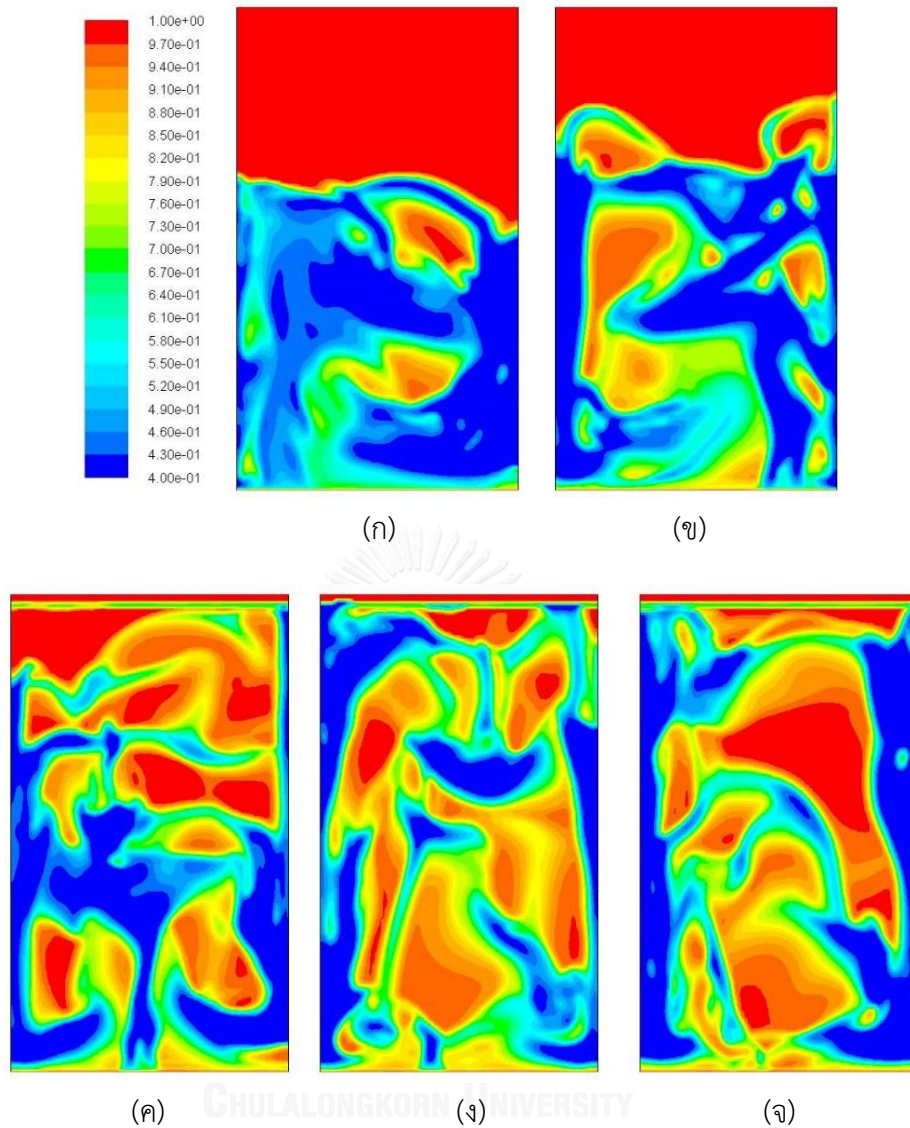
Run	Velocity (m/s)	D_x (m^2/s)	D_y (m^2/s)	θ (m^2/s^2)	MI (-)
1	0.125	0.018	0.026	0.053	0.876
2	0.250	0.012	0.032	0.108	0.914
3	0.500	0.012	0.042	0.170	0.971
4	0.750	0.012	0.052	0.204	0.984
5	1.000	0.008	0.057	0.160	0.912

จากตารางที่ 4.2 ผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้าที่แตกต่างกันต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Dispersion coefficient) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมี (Radial direction, D_x) มีค่าที่ลดลงเมื่อความเร็วของแก๊สป้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มสูงขึ้น เนื่องมาจากอนุภาคส่วนใหญ่ภายในระบบมีการเคลื่อนที่ในแนวแกนมากขึ้นเนื่องจากเป็นทิศทางหลักในการเคลื่อนที่ของแก๊ส ในทางตรงกันข้าม ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน (Axial direction, D_y) จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบซึ่งจากผลที่เกิดขึ้นนี้ให้ผลที่สอดคล้องกับค่าที่ลดลงของค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมี โดยทั่วไปเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวของทั้ง 2 ทิศทางพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนจะมีค่าที่มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมี [28, 29] จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนจะมีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีในทุกๆ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า

ผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้าต่ออุณหภูมิแกรนูลลาร์ (Total granular temperature, θ) พบว่า อุณหภูมิแกรนูลลาร์จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่ระบบ เพราะความเร็วที่สูงขึ้นส่งผลทำให้ฟองแก๊สเกิดการรวมตัวและการแตกตัวอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว จนกระทั่งที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้าเท่ากับ 0.75 เมตรต่อวินาที จะเป็นภาวะที่อุณหภูมิแกรนูลลาร์มีค่าสูงสุด จากนั้น ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์จะลดลงเมื่อความเร็วของแก๊สป้อนเข้าสู่ระบบมีค่า 1.00 เมตรต่อวินาที สาเหตุที่อุณหภูมิแกรนูลลาร์มีค่าลดลงเนื่องจากที่ความเร็ว 1.00 เมตรต่อวินาที นั้นจะพบว่าอนุภาคส่วนใหญ่จะมีปริมาณหนาแน่นที่สูงบริเวณผนังและบริเวณตรงกลางจะเบาบาง ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์มีค่าที่ลดลง (รูปที่ 4.13 (จ) สังเกตจากสีของภาพคอนทัวร์ที่แสดงซึ่งสีน้ำเงินจะบ่งบอกว่าบริเวณดังกล่าวนั้นมีอนุภาคที่หนาแน่นและสีแดงจะบอกถึงภูมิภาคอากาศหรือบริเวณที่ไม่มีอนุภาคของแข็ง การที่อนุภาคของแข็งมีอยู่รวมตัวกันอย่างหนาแน่นบริเวณผนังจะทำให้ความเร็วของอนุภาคของแข็งมีค่าที่ลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์มีค่าที่ลดลง)

ผลของความเร็วแก๊สป้อนเข้าต่อค่าดัชนีการผสม (Mixing index, MI) พบว่า เมื่อเพิ่มความเร็วจาก 0.125 เมตรต่อวินาที เป็น 0.75 เมตรต่อวินาที ค่าดัชนีการผสมนั้นจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามความเร็ว อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มความเร็วจาก 0.75 เมตรต่อวินาที ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงความเร็ว 1.00 เมตรต่อวินาที พบว่า ค่าดัชนีการผสมนั้นจะมีค่าที่ลดลง โดยสาเหตุที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ ช่วงความเร็ว 0.125-0.75 เมตรต่อวินาที นั้นช่วงการไหลที่เกิดขึ้น คือ ช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling regime) ขณะที่ในช่วงความเร็ว 0.75-1.00 เมตรต่อวินาที นั้นอนุภาคจะมีช่วงการไหลเป็นแบบฟลูอิดไลเซชันความเร็วสูง (Fast fluidization) ส่งผลให้อนุภาคนั้นไม่มีหน้าเบตอีกทั้งเกิดการหมุนวน (Circulate flow) ของอนุภาคขึ้นจึงทำให้ดัชนีการผสมมีค่าที่ลดลง

จากผลการจำลองที่ผ่านมาจะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วแก๊สป้อนเข้าสู่ระบบส่งผลทำให้การผสมเกิดได้ดีขึ้นผ่านกลไกการเกิดของฟองแก๊ส อย่างไรก็ตาม ที่ความเร็วแก๊สมีค่าสูงทำให้อนุภาคนั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกตัวขึ้น ลักษณะการแยกตัว (Segregation) สำหรับระบบนี้จะเกิดการแยกตัวในแนวรัศมี โดยมีลักษณะที่อนุภาคของแข็งหนาแน่นบริเวณผนังและเบาบางบริเวณตรงกลาง เพราะว่า อนุภาคของแข็งไม่สามารถเคลื่อนที่หลุดออกจากท่อโรเตอร์ได้ ดังนั้น เมื่อความเร็วแก๊สป้อนเข้าสูงขึ้นอนุภาคจึงเคลื่อนที่ไปยังบริเวณผนัง สำหรับแนวโน้มของตัวแปรที่ใช้ทำนายการผสมพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีจะมีค่าที่ลดลงเมื่อความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนจะมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้น และค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์กับค่าดัชนีการผสมจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตามความเร็วแก๊สจนถึงค่าๆ หนึ่งจากนั้นค่าจะลดลง จากผลที่ได้ในเบื้องต้นทำให้เราทราบถึงแนวโน้มของค่าตัวแปรแต่ละตัวที่ใช้ในการทำนายการผสม อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถเปรียบเทียบได้ว่าตัวแปรไหนมีความเหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไลซ์เบด ดังนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบตัวแปรแต่ละตัวให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้นจะทำการศึกษาและแสดงผลที่ได้ในส่วนต่อไป



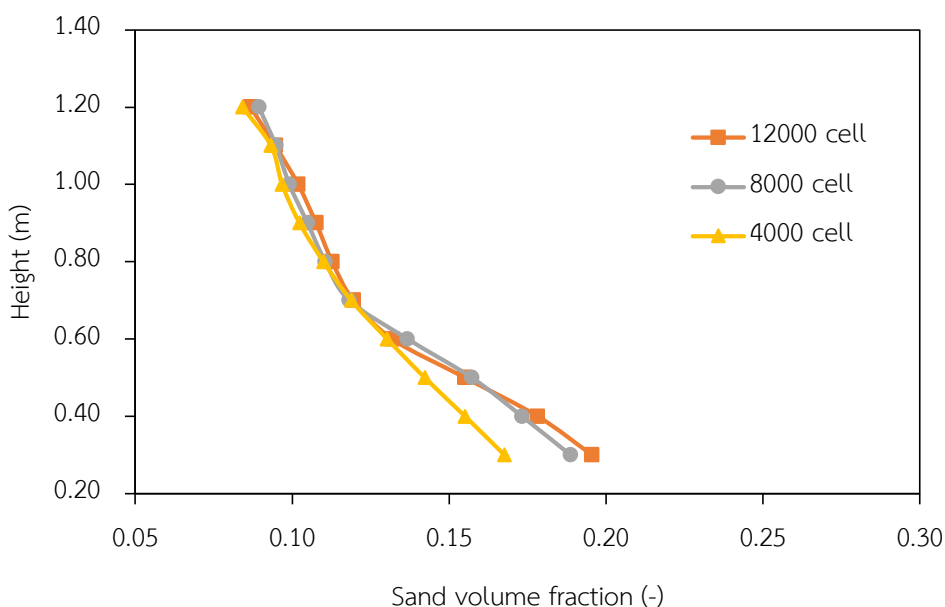
รูปที่ 4.13 การกระจายตัวของช่องว่างอากาศที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้าต่างกัน (ก) 0.125 (ข) 0.25 (ค) 0.50 (ง) 0.75 และ (จ) 1.00 เมตรต่อวินาที

4.2 อุทกพลศาสตร์ของระบบอนุภาคผสมสองชนิดที่มีการเกิดปฏิกิริยา (Hot flow)

ในส่วนนี้จะทำการศึกษาระบบของหม้อไอน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed boiler) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งภายในระบบนั้นประกอบไปด้วย ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเผาไหม้และทรายเป็นตัวกลางช่วยในการถ่ายโอนความร้อน

4.2.1 ผลของพื้นที่การคำนวณและเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะเสมือนคงตัว

เช่นเดียวกับการจำลองในส่วนที่ผ่านมาจะต้องหาขนาดพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมเสียก่อน โดยขนาดพื้นที่การคำนวณที่ทำการเปรียบเทียบประกอบไปด้วย 4000 8000 และ 12000 เซลล์ โดยทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของทรายตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 4.14 จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าขนาดพื้นที่การคำนวณ 8000 และ 12000 เซลล์ นั้นจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันโดยมีลักษณะที่หนาแน่นของอนุภาคบริเวณด้านล่างของและค่อยๆ เบาบางลงตามระยะความสูงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นขนาดพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัย คือ 8000 เซลล์ เพราะจะใช้ระยะเวลาในการคำนวณที่เร็วที่สุดรวมทั้งให้ผลลัพธ์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดพื้นที่การคำนวณ โดยภาวะเสมือนคงตัวของระบบจะเกิดขึ้นตั้งแต่ 120 วินาที (รูปที่ 4.16)



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวของสัดส่วนโดยปริมาตรของทรายตามแนวความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ที่พื้นที่การคำนวณต่างๆ

4.2.2 ผลของแบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค

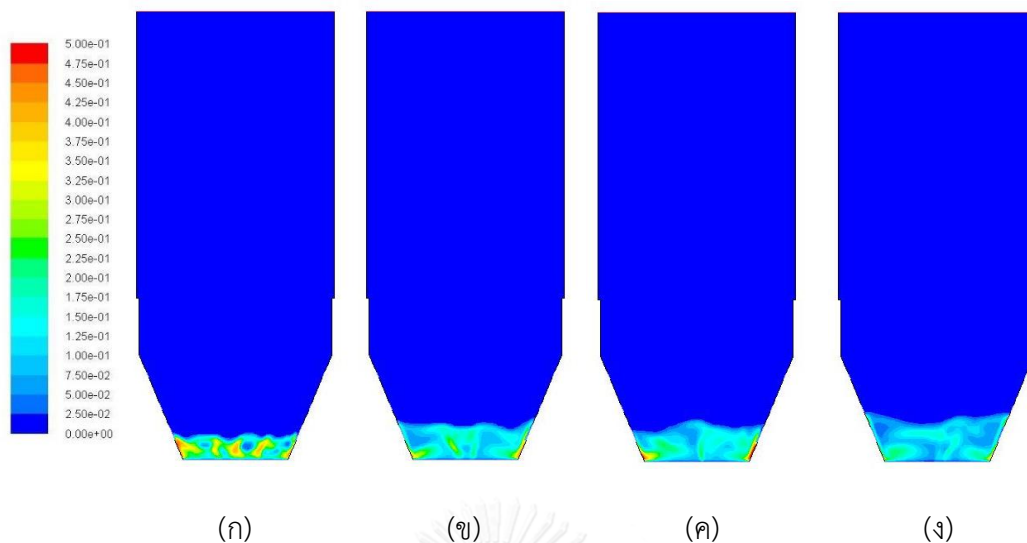
ในส่วนที่สองนี้จะใช้แบบจำลองเช่นเดียวกับในส่วนที่หนึ่ง คือ แบบจำลอง EMMS สำหรับอนุภาคทั้งสองชนิดในระบบ (ทรายและถ่านหิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 180 และ 700 ไมครอน ตามลำดับ) โดยเริ่มต้นในระบบจะมีแต่อนุภาคทรายเพียงอย่างเดียวจากนั้นทำการป้อนอากาศเข้าสู่

ระบบจนกระทั่งทรายมีภาวะเสมือนคงตัวจึงทำการป้อนถ่านหินเข้าสู่ระบบ โดยมีภาวะการจำลองต่างๆ แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.5

ข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลจากการจำลองกับผลการทดลอง คือ การกระจายตัวของหน้าเบต และความดันลด ซึ่งเป็นข้อมูลจากโรงไฟฟ้า National power supply (NPS) ผลลัพธ์จากการจำลองแต่ละแบบแสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่า แบบจำลอง EMMS นั้นให้ผลของการขยายตัวของหน้าเบตและความดันลดที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ในขณะที่แบบจำลองชนิดอื่นๆ จะให้ผลที่สูงเกินกว่าผลการทดลอง เนื่องมาจากแบบจำลอง EMMS นั้นจะพิจารณาผลของการเกิดคลัสเตอร์ (Clusters) หรือการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคภายในระบบ ในขณะที่แบบจำลองอื่นๆ จะไม่พิจารณาผลของคลัสเตอร์ รูปที่ 4.15 แสดงการกระจายตัวของทรายภายในระบบ โดยรูปที่ 4.15 (ก) จะสังเกตเห็นบริเวณสีเหลืองเข้มบริเวณตรงกลางเบตซึ่งหมายความว่าบริเวณดังกล่าวมีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค ขณะที่แบบจำลองอื่นๆ อนุภาคจะกระจายตัวที่ค่อนข้างเบาบาง (Dilute)

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบการขยายตัวของหน้าเบตและความดันลดของแบบจำลองที่แตกต่างกันกับผลการทดลอง

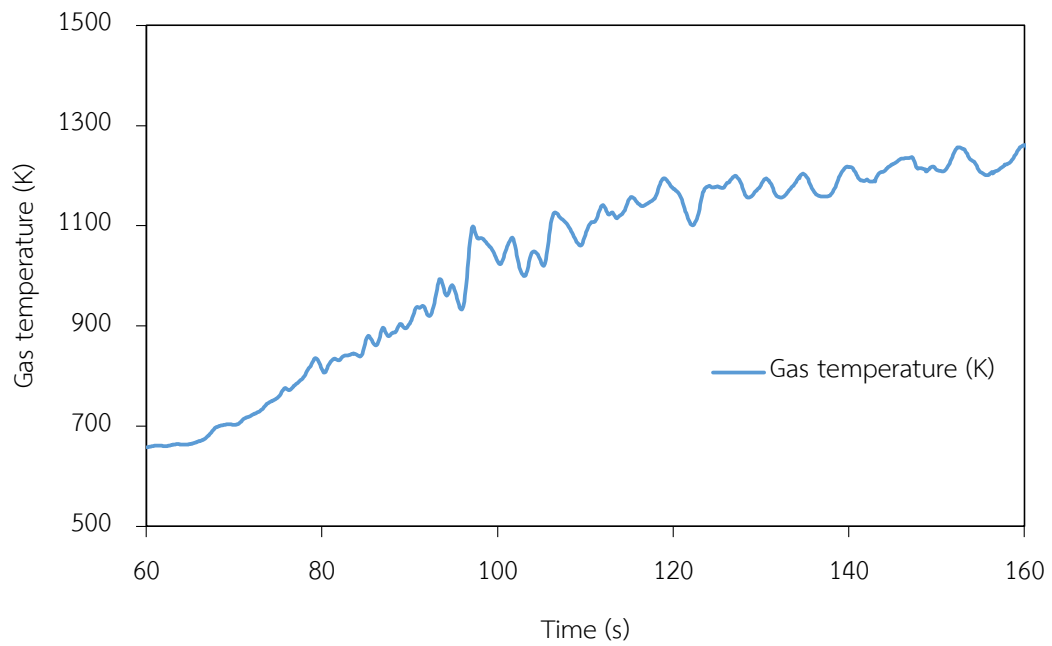
Drag model	Bed expansion (m)	Pressure drop (Pa)
EMMS model	0.87	4859.28
Gidaspow model	1.23	6976.40
Wen-Yu model	1.23	7131.78
Syamlal-O'brien model	1.17	6865.45
Experiment	0.90	4800.00



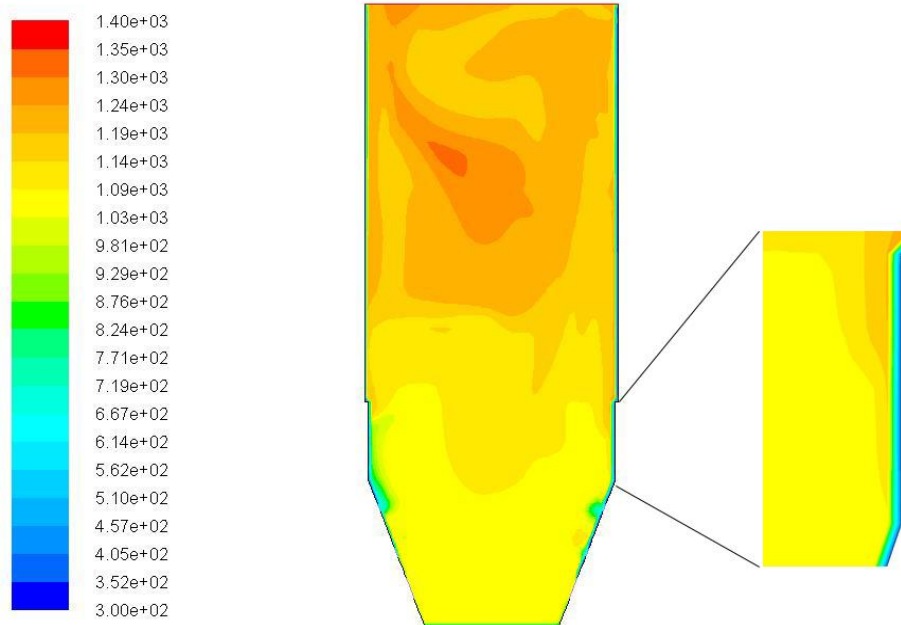
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของทรายสำหรับแบบจำลองที่แตกต่างกัน (ก) EMMS (ข) Gidaspow (ค) Wen-Yu และ (ง) Syamlal-O'Brien model

4.2.3 ผลของปฏิกิริยาเคมีและจลนศาสตร์

เนื่องจากในส่วนนี้มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีการเผาไหม้ (Combustion) ของถ่านหิน ทรายและอากาศ โดยปฏิกิริยาเคมีและจลนศาสตร์นั้นอ้างอิงมาจากงานวิจัย Shuai และคณะ [26] รูปที่ 4.16 แสดงอุณหภูมิของแก๊สจากการเผาไหม้โดยทำการวัดค่าที่ตำแหน่งขาออก (Outlet) โดยช่วงแรกอุณหภูมินั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนกระทั่งคงตัวในช่วงเวลา 140-160 วินาที โดยมีค่าเฉลี่ยคือ 1219 เคลวิน ซึ่งผลที่ได้นั้นมีค่าที่สอดคล้องกับการทดลองคือจะมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 1123-1223 เคลวิน รูปที่ 4.17 คอนทัวร์แสดงอุณหภูมิของแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่เวลา 150 วินาที จากภาพจะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิจะมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และที่ด้านล่างบริเวณโคนจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าด้านบนเล็กน้อยเนื่องจากบริเวณด้านล่างนั้นมีการป้อนอากาศจาก Lower และ Upper secondary air นอกจากนี้ที่บริเวณผนังจะมีอุณหภูมิที่ลดลงเนื่องมาจากการถ่ายโอนความร้อนสู่ภายนอก ระบบ ดังนั้นแบบจำลองการเผาไหม้ของงานวิจัย Shuai [26] นั้นมีพฤติกรรมที่ถูกต้องสอดคล้องกับผลการทดลอง แบบจำลองดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้สำหรับปฏิกิริยาการเผาไหม้ภายในระบบต่อไป



รูปที่ 4.16 อุณหภูมิของแก๊สจากการเผาไหม้ที่ระยะเวลาต่างๆ



รูปที่ 4.17 คอนทัวร์อุณหภูมิ (เคลวิน) ของแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ ที่เวลา 150 วินาที

4.2.4 ผลของตัวแปรดำเนินการต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์อนุภาคผสมสองชนิด

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อระบบหม้อไอน้ำของเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของแข็งผสมระหว่างทรายและถ่านหินที่มีขนาดและความหนาแน่นที่แตกต่างกัน อิทธิพลของตัวแปรดำเนินการที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเร็วแก๊สป้อนเข้า ขนาดถ่านหิน ขนาดทราย และปริมาณความสูงทราย โดยทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีแฟคทอเรียลแบบ 2^4 พร้อมทั้งค่ากลาง (Mean) โดยพิจารณาตัวแปรตอบสนอง 3 ตัวแปร ได้แก่ สัมประสิทธิ์การกระจายตัว อุณหภูมิแกรนูลลาร์ และดัชนีการผสม ซึ่งแต่ละตัวแปรจะบอกถึงการผสมและการกระจายตัว โดยการคำนวณจะพิจารณาจากถ่านหิน เพราะว่า เป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีปริมาณสูงที่สุดในระบบ

จากการศึกษาที่ได้แสดงไปก่อนหน้านี้ของการกระจายตัวของอนุภาคผสมและตัวแปรที่ทำนายระดับการผสม จึงมีแนวคิดที่จะเปรียบเทียบตัวแปรที่ใช้ในการทำนายการกระจายตัวและการผสมว่าตัวแปรมีความเหมาะสมมากที่สุด จากสมมติฐานที่ว่าระบบที่มีการกระจายตัวและการผสมที่ดีนั้นจะเกิดการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำการเปรียบเทียบแนวโน้มของตัวแปรที่ใช้ในการทำนายกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer coefficient) ว่าตัวแปรใดให้ผลไปในทิศทางเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

ภาวะการจำลองค่าของตัวแปรดำเนินการทั้ง 4 ตัวแปร และผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัว แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า กรณีศึกษาที่ 14 ภาวะความเร็วแก๊สป้อนเข้า 2.65 เมตรต่อวินาที อนุภาคถ่านหินขนาด 500 ไมครอน อนุภาคทรายขนาด 250 ไมครอน และความสูงทรายเริ่มต้น 0.7 เมตร จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีและแนวแกนมีค่าสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่า อนุภาคถ่านหินภายในระบบนั้นมีการกระจายตัวที่ดี นอกจากนี้ กรณีศึกษาที่ 14 ยังให้ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ที่สูงที่สุด ในขณะที่กรณีศึกษาที่ 3 ภาวะความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.66 เมตรต่อวินาที อนุภาคถ่านหินขนาด 1000 ไมครอน อนุภาคทรายขนาด 200 ไมครอน และความสูงทรายเริ่มต้น 0.5 เมตร จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมี สัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแกน และอุณหภูมิแกรนูลลาร์ที่ต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่า มีการกระจายตัวที่ไม่ดีของอนุภาคถ่านหิน เมื่อพิจารณาค่าดัชนีการผสม พบว่า กรณีศึกษา 16 จะให้ค่าดัชนีการผสมสูงที่สุด และกรณีศึกษา 7 ให้ค่าดัชนีการผสมที่ต่ำที่สุด

จากผลการจำลองข้างต้นจะพบว่า โดยส่วนมากค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีนั้นจะมีค่าที่สูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน ซึ่งแนวโน้มที่ได้นั้นจะแตกต่างจากงานวิจัย

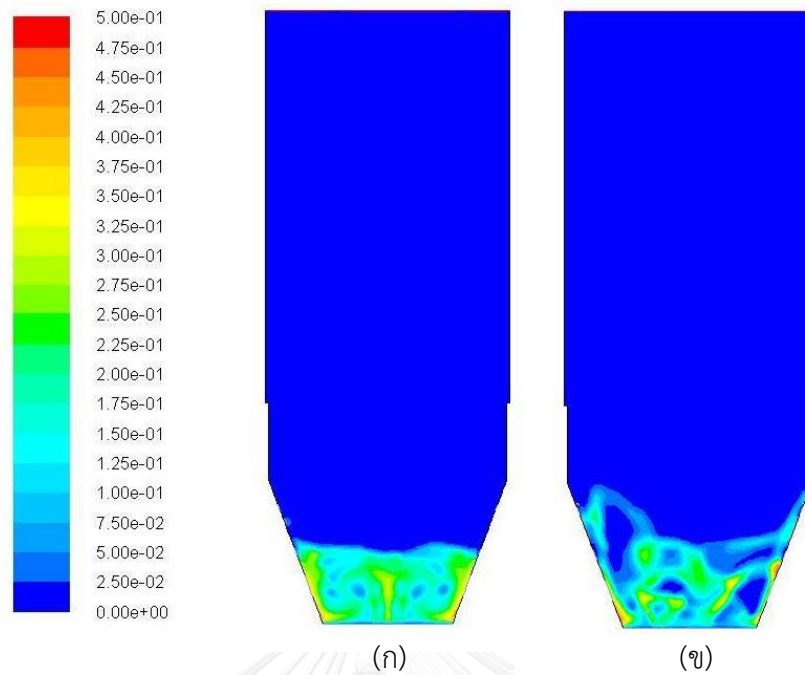
ของ [28, 29] ที่รายงานว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีมักจะมีค่าที่น้อยกว่าในแนวแกน เพราะว่า ทิศแนวแกนนั้นเป็นทิศทางการเคลื่อนที่หลัก สาเหตุที่ทำให้ค่าที่ได้จากงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยของคนอื่น เนื่องมาจากในระบบนั้นจะมีการป้อนอากาศที่บริเวณด้านข้างทั้งสองฝั่ง (Lower and upper secondary air) ด้วยความเร็วสูงจึงเป็นเหตุทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีมีค่าที่สูง จากภาพคอนทัวร์ที่แสดง (รูปที่ 4.18 และ 4.19) จะเห็นว่ามีการเกิดฟองแก๊สเกิดขึ้นภายในเบต เนื่องมาจากช่วงการไหลที่เกิดขึ้นนั้นเป็นแบบฟองแก๊ส (Bubbling) ซึ่งจะมีฟองแก๊สเกิดขึ้นปริมาณสูง จากงานวิจัยของ Chalerm-sinsuwan และคณะ [2] รายงานว่า ระบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคเบตที่มีฟองแก๊สปริมาณสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีที่สูง ตัวแปรตอบสนองสัมประสิทธิ์การกระจายตัวและอุณหภูมิแกรนูลลาร์ให้ผลลัพธ์ที่ได้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องมาจากทั้งสองตัวแปรมีพื้นฐานการคำนวณมาจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาคในทิศทาง X และ Y ในขณะที่ดัชนีการผสมนั้นคำนวณมาจากอัตราส่วนของสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาค จึงทำให้แนวโน้มที่ได้นั้นแตกต่างสองตัวแปรก่อนหน้านี้

จากผลข้างต้นของแต่ละกรณีศึกษาที่แตกต่างกันจึงได้เลือกกรณีศึกษา 3 7 14 และ 16 ซึ่งให้ค่าสูงต่ำของแต่ละตัวแปรตอบสนองมาศึกษาต่อ รูปที่ 4.18 (ก) คอนทัวร์การกระจายตัวถ่านหินกรณีศึกษาที่ 3 พบว่า ถ่านหินจะมีความหนาแน่นที่บริเวณผนังของทั้งสองฝั่งของเครื่องปฏิกรณ์ (สังเกตจากสีเหลืองที่แสดงในภาพ) และรูปที่ 4.20 แสดงการกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมีที่มีความสูงต่างๆ พบว่า อนุภาคทั้งสองมีรูปแบบการกระจายตัวที่แตกต่างกันโดยทรายจะมีลักษณะที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ขณะที่ถ่านหินนั้นจะมีการกระจายตัวที่ไม่ดี โดยมีการรวมกลุ่มกันของอนุภาคบริเวณผนังและกึ่งกลางของเครื่องปฏิกรณ์ รูปที่ 4.18 (ข) คอนทัวร์การกระจายตัวถ่านหินกรณีศึกษาที่ 14 พบว่า อนุภาคจะมีการกระจายตัวค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งในแนวแกนและรัศมี เมื่อพิจารณารูปที่ 4.21 จะเห็นว่าถ่านหินและทรายมีลักษณะการกระจายตัวที่คล้ายคลึงกันและมีความสม่ำเสมอในแต่ละความสูง รูป 4.19 (ก) คอนทัวร์การกระจายตัวถ่านหินกรณีศึกษาที่ 7 จะเห็นได้ชัดเจนว่าถ่านหินมีการรวมกันอย่างหนาแน่นบริเวณผนังซึ่งเกิดเป็นจุดอับโดยเป็นสาเหตุทำให้การเผาไหม้นั้นไม่มีประสิทธิภาพ และจากรูปที่ 4.22 การกระจายตัวของอนุภาคถ่านหินและทรายจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกัน โดยถ่านหินจะมีการรวมกลุ่มกันอย่างหนาแน่นในตำแหน่งต่างๆ ภายในเบตขณะที่ทรายจะมีปริมาณที่หนาแน่นบริเวณผนัง รูปที่ 4.19 (ข) คอนทัวร์การกระจายตัวถ่านหินกรณีศึกษาที่ 16 จะเห็นว่าถ่านหินมีการฟุ้งกระจายที่บริเวณหน้าเบต แต่จะพบว่าถ่านหินบางส่วนจะอยู่แบบรวมตัวกัน (สังเกตจากบริเวณสีเหลือง หมายถึง บริเวณที่มีถ่านหินรวมตัวกันอย่างหนาแน่น)

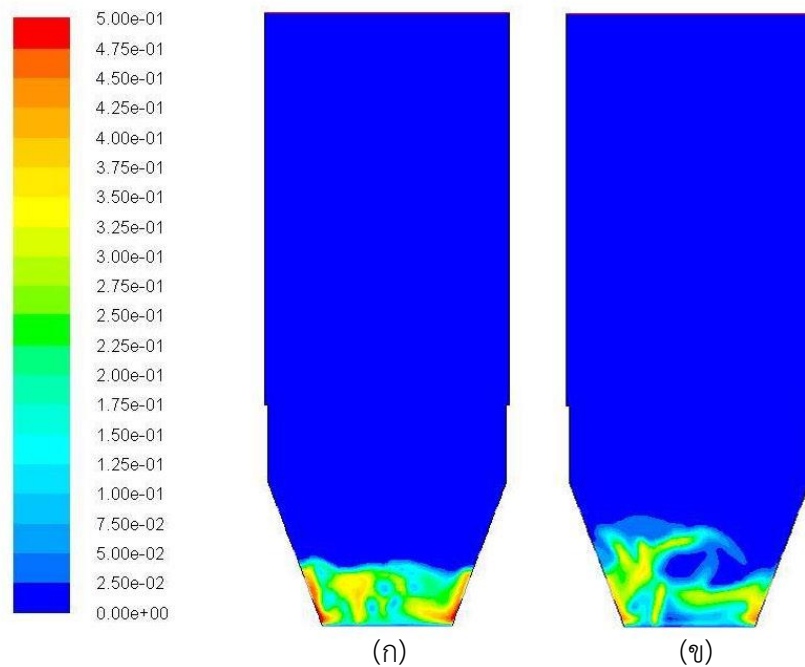
และจากรูปที่ 4.23 พบว่า ถ่านหินและทรายมีการกระจายตัวที่คล้ายกัน โดยมีปริมาณที่หนาแน่นบริเวณผนังและค้อยๆ เบบางลงบริเวณตรงกลางของเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการแสดงภาวะและผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัวที่ได้จากการจำลอง

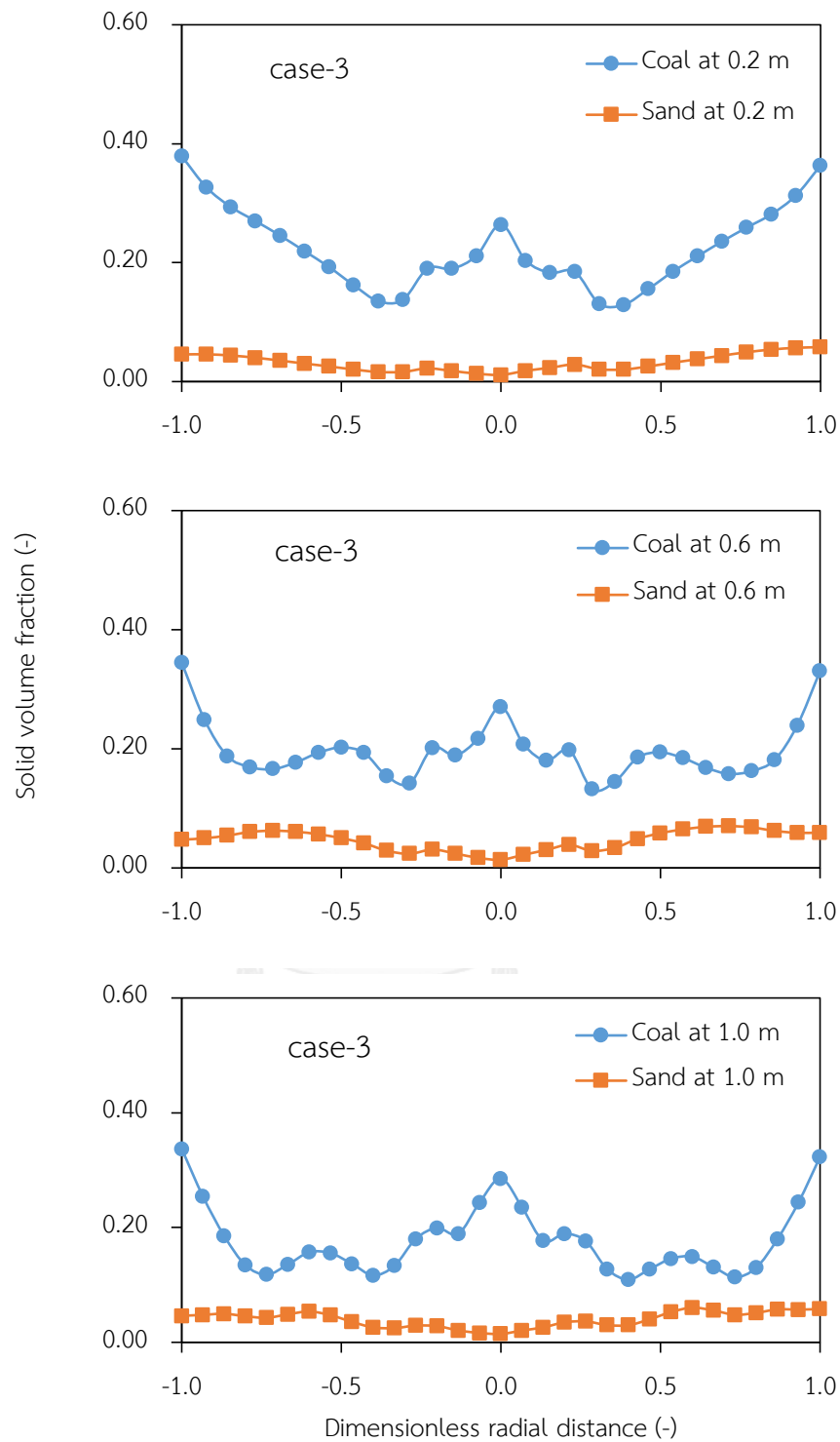
Case	Gas velocity (m/s)	Coal diameter (μm)	Sand diameter (μm)	Initial sand height (m)	D_x (m^2/s)	D_y (m^2/s)	Granular temperature (m^2/s^2)	Mixing index (-)
	(A)	(B)	(C)	(D)				
1	0.66	500	200	0.5	0.069	0.059	0.114	0.024
2	2.65	500	200	0.5	0.719	0.524	1.545	0.118
3	0.66	1000	200	0.5	0.018	0.027	0.050	0.001
4	2.65	1000	200	0.5	0.957	0.425	1.580	0.255
5	0.66	500	250	0.5	0.248	0.165	0.164	0.000
6	2.65	500	250	0.5	2.715	0.663	2.414	0.297
7	0.66	1000	250	0.5	0.419	0.269	0.161	0.000
8	2.65	1000	250	0.5	0.886	0.792	2.222	0.325
9	0.66	500	200	0.7	0.096	0.050	0.134	0.258
10	2.65	500	200	0.7	0.889	0.719	1.436	0.137
11	0.66	1000	200	0.7	0.417	0.176	0.204	0.186
12	2.65	1000	200	0.7	0.765	0.683	1.875	0.506
13	0.66	500	250	0.7	0.168	0.107	0.252	0.015
14	2.65	500	250	0.7	4.799	1.134	2.824	0.584
15	0.66	1000	250	0.7	0.070	0.076	0.199	0.003
16	2.65	1000	250	0.7	2.090	0.816	2.817	0.886
17 (mean)	1.66	750	225	0.6	1.297	0.755	1.732	0.341



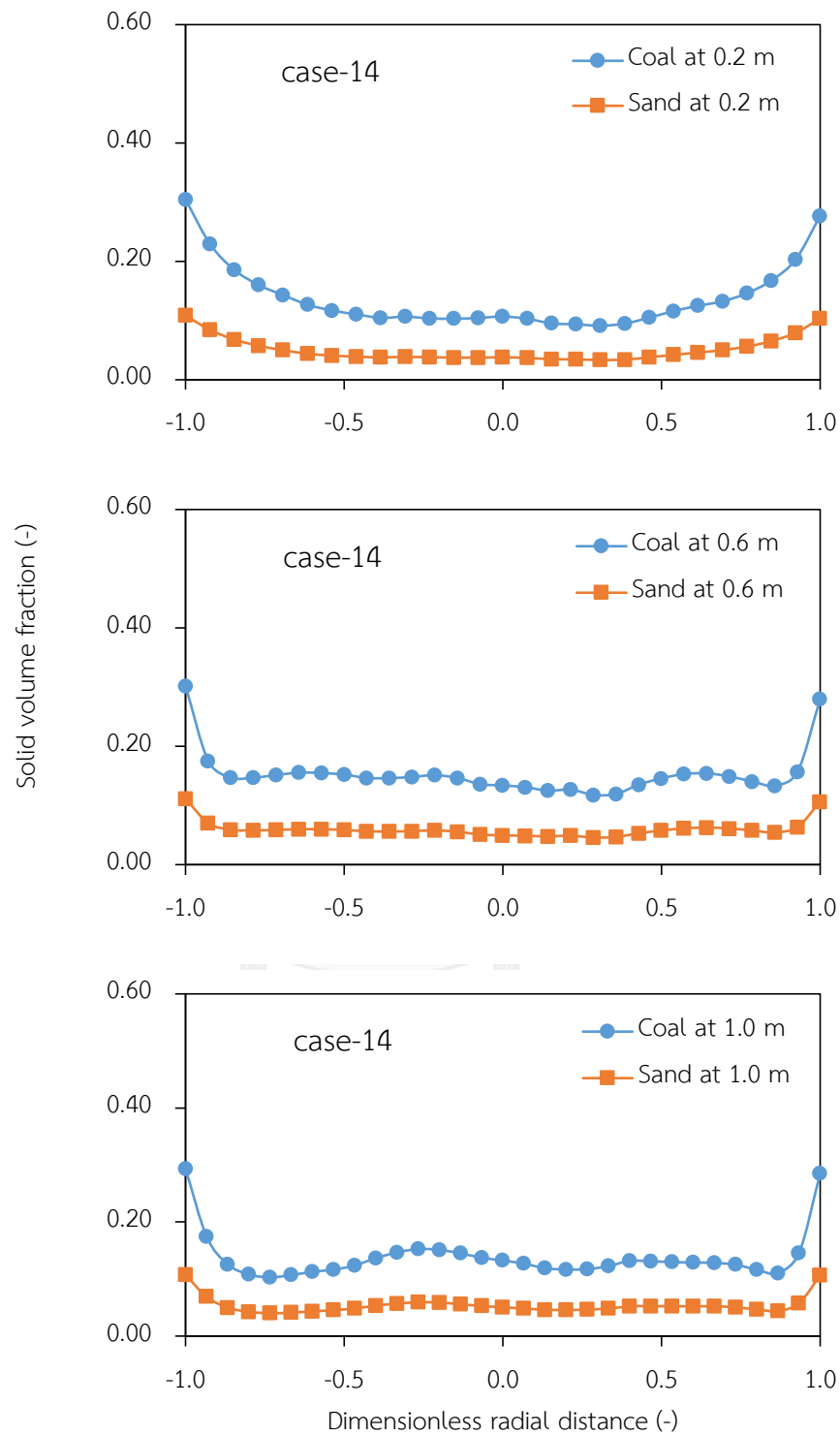
รูปที่ 4.18 คอนทัวร์การกระจายตัวของถ่านหิน (ก) กรณีศึกษาที่ 3 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 14 ที่เวลา 150 วินาที ตามลำดับ



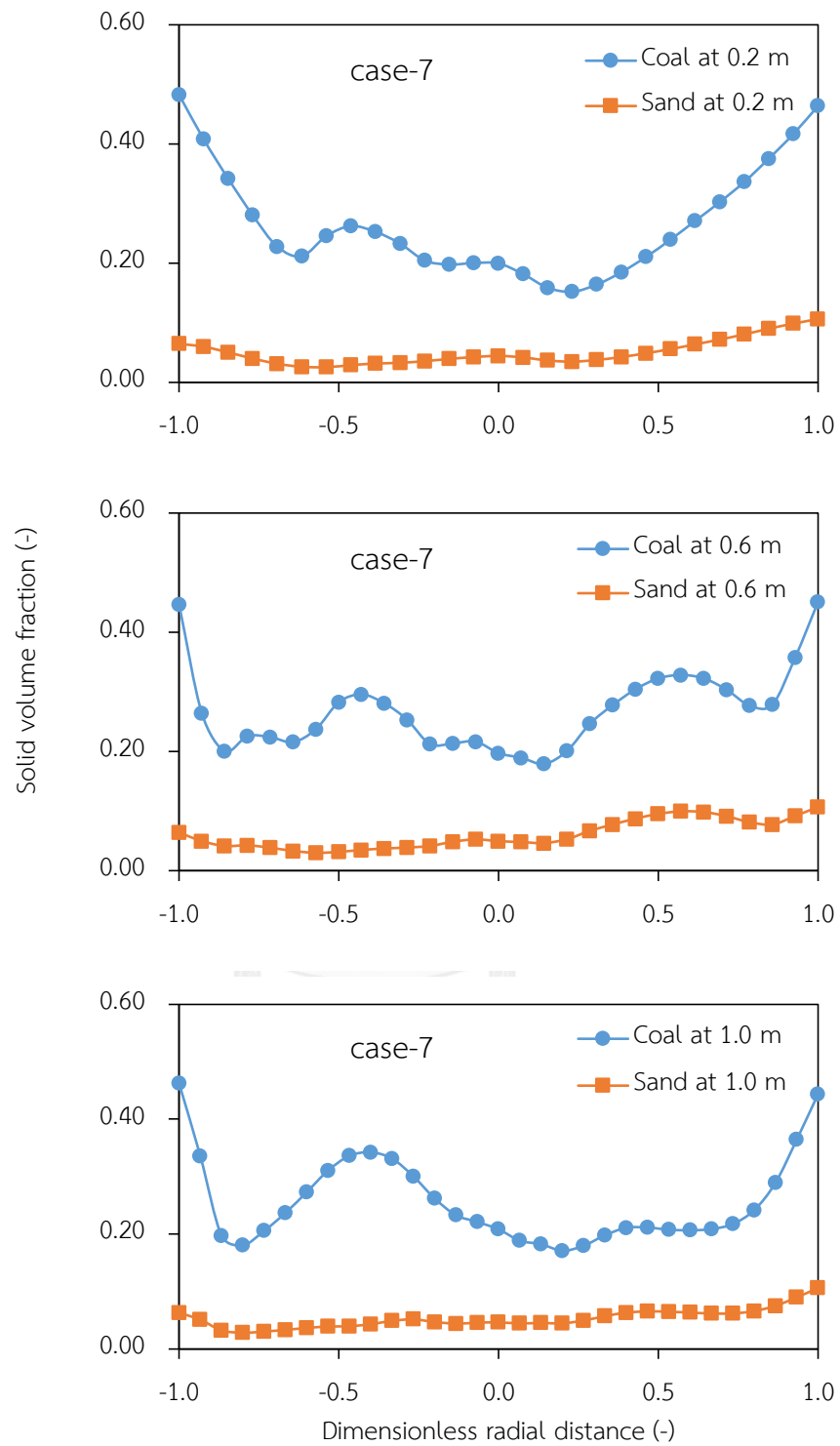
รูปที่ 4.19 คอนทัวร์การกระจายตัวของถ่านหิน (ก) กรณีศึกษาที่ 7 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 16 ที่เวลา 150 วินาที ตามลำดับ



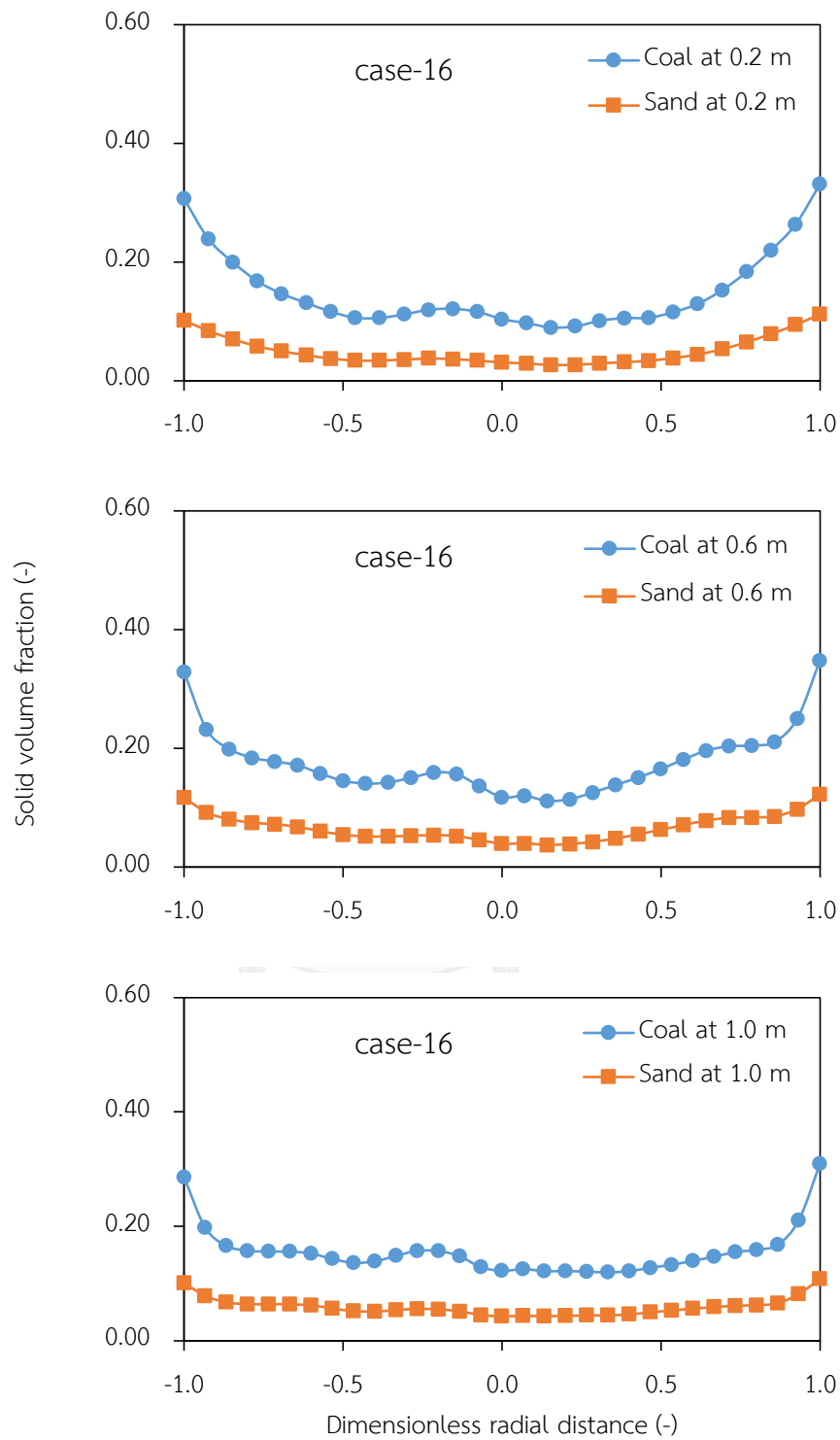
รูปที่ 4.20 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 3



รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 14



รูปที่ 4.22 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 7



รูปที่ 4.23 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวนอนรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 16

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบตัวแปรตอบสนองต่อการผสมที่ได้แสดงไปข้างต้น จากสมมติฐานที่ว่า การผสมและการกระจายตัวที่ดีของอนุภาคของแข็งในระบบเผาไหม้ย่อมส่งผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่ดี ในส่วนนี้จึงทำการเปรียบเทียบแนวโน้มของตัวแปรดังกล่าวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน โดยตารางที่ 4.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer coefficient) ของทั้ง 17 กรณี แสดงค่าไว้ดังนี้

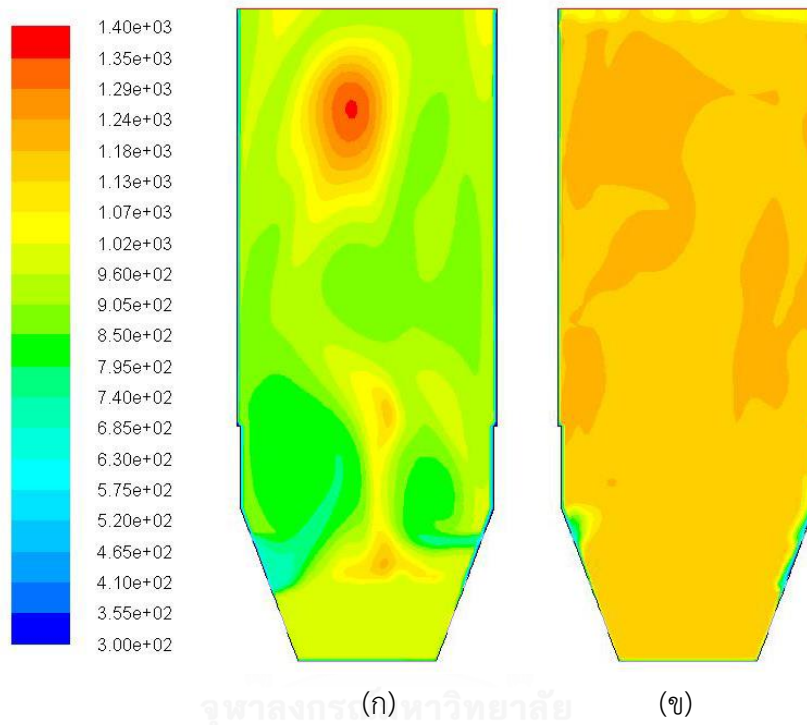
ตารางที่ 4.5 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

Case	Gas velocity (m/s)	Coal diameter (μm)	Sand diameter (μm)	Initial sand height (m)	Heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{k}$)
1	0.66	500	200	0.5	1007
2	2.65	500	200	0.5	15260
3	0.66	1000	200	0.5	385
4	2.65	1000	200	0.5	8005
5	0.66	500	250	0.5	289
6	2.65	500	250	0.5	6177
7	0.66	1000	250	0.5	323
8	2.65	1000	250	0.5	2142
9	0.66	500	200	0.7	2359
10	2.65	500	200	0.7	31346
11	0.66	1000	200	0.7	844
12	2.65	1000	200	0.7	9615
13	0.66	500	250	0.7	332
14	2.65	500	250	0.7	6632
15	0.66	1000	250	0.7	286
16	2.65	1000	250	0.7	3143
17 (mean)	1.66	750	225	0.6	2495

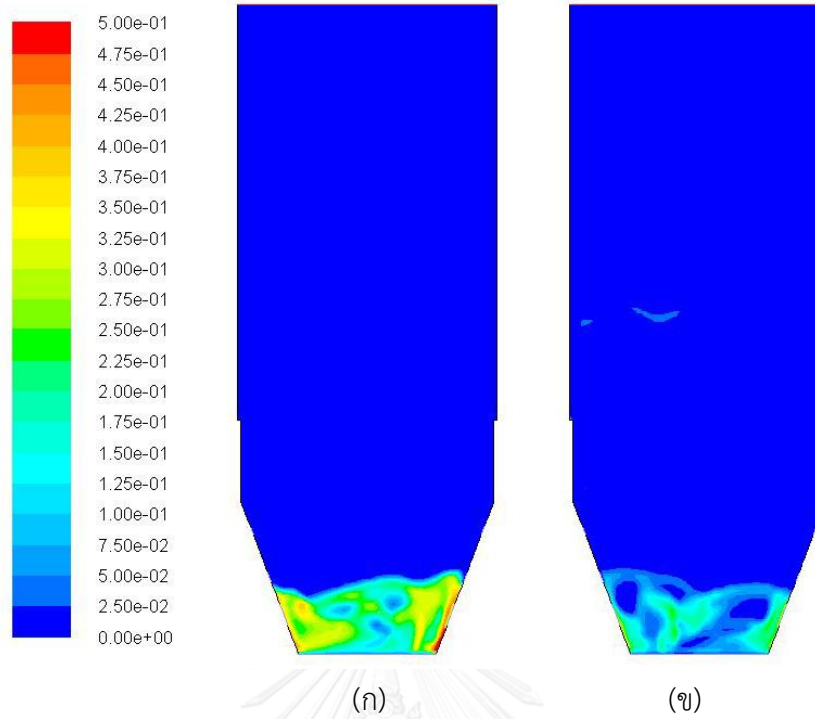
จากตารางที่ 4.5 พบว่า กรณีศึกษาที่ 15 ที่ภาวะความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.66 เมตรต่อวินาที ขนาดถ่านหิน 1000 ไมครอน ขนาดทราย 250 ไมครอน และความสูงทรายเริ่มต้น 0.7 เมตร เป็นภาวะที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนต่ำที่สุด คือ 286 วัตต์ต่อเมตรกำลังสองเคลวิน อีกทั้งอุณหภูมิของแก๊สภายในระบบนั้นมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอตลอดแนวความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 (ก) เมื่อพิจารณาภาพคอนทัวร์การกระจายตัวของถ่านหินจากรูปที่ 4.25 (ก) จะเห็นว่าถ่านหินมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ มีการรวมกลุ่มกันบริเวณผนังทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดการเผาไหม้โดยไม่มีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาการกระจายตัวตามแนวรัศมีของถ่านหินและทรายที่ความสูงต่างๆ (รูปที่ 4.26) พบว่า ถ่านหินและทรายมีพฤติกรรมกระจายตัวที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน อีกทั้งถ่านหินมีการรวมกลุ่มกันอย่างหนาแน่นบริเวณผนังทำให้การผสมกันระหว่างอนุภาคทั้งสองนั้นเกิดได้ไม่ดีนัก ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจึงมีค่าที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับแนวโน้มที่ทำนายจากค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมี ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ และค่าดัชนีการผสม พบว่า ค่าการผสมที่ทำนายจากแต่ละตัวแปร มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำของแต่ละตัวแปรนั้นๆ

สำหรับกรณีศึกษา 10 ที่ภาวะความเร็วแก๊สป้อนเข้า 2.65 เมตรต่อวินาที ขนาดถ่านหิน 500 ไมครอน ขนาดทราย 200 ไมครอน และความสูงทรายเริ่มต้น 0.7 เมตร เป็นภาวะที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงที่สุด คือ 31346 วัตต์ต่อเมตรกำลังสองเคลวิน รูปที่ 4.24 (ข) แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิแก๊สภายในระบบ จะเห็นว่าอุณหภูมิของแก๊สจะมีค่าที่ค่อนข้างสม่ำเสมอทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์ อีกทั้งการกระจายตัวของถ่านหิน (รูปที่ 4.25 ข) มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ (สีคอนทัวร์นั้นมีโทนสีเป็นสีเดียวกันทั้งหมดสำหรับถ่านหิน) ทำให้ไม่เกิดจุดอับขึ้น อีกทั้งการกระจายตัวของถ่านหินมีตำแหน่งการกระจายตัวที่ใกล้กับบริเวณ Lower และ Upper secondary air ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเผาไหม้สูง รูปที่ 4.26 แสดงการกระจายตัวของถ่านหินและทราย พบว่า อนุภาคทั้งสองมีพฤติกรรมกระจายตัวที่คล้ายกัน (เส้นกราฟมีลักษณะที่คล้ายกัน) ในทุกๆ ความสูง หรืออาจกล่าวได้ว่าการผสมกันของอนุภาคภายในระบบเกิดขึ้นได้ดีส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมีค่าที่สูง เมื่อเปรียบเทียบกับแนวโน้มที่ทำนายจากค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมี ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ และค่าดัชนีการผสม พบว่า ค่าการผสมที่ทำนายจากแต่ละตัวแปร มีค่าอยู่ในเกณฑ์เฉลี่ยกึ่งกลางค่อนข้างสูงของตัวแปรต่างๆ และถ้าหากค่าที่ทำนายของแต่ละตัวแปร มีค่าสูง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจะมีค่าที่ลดลง

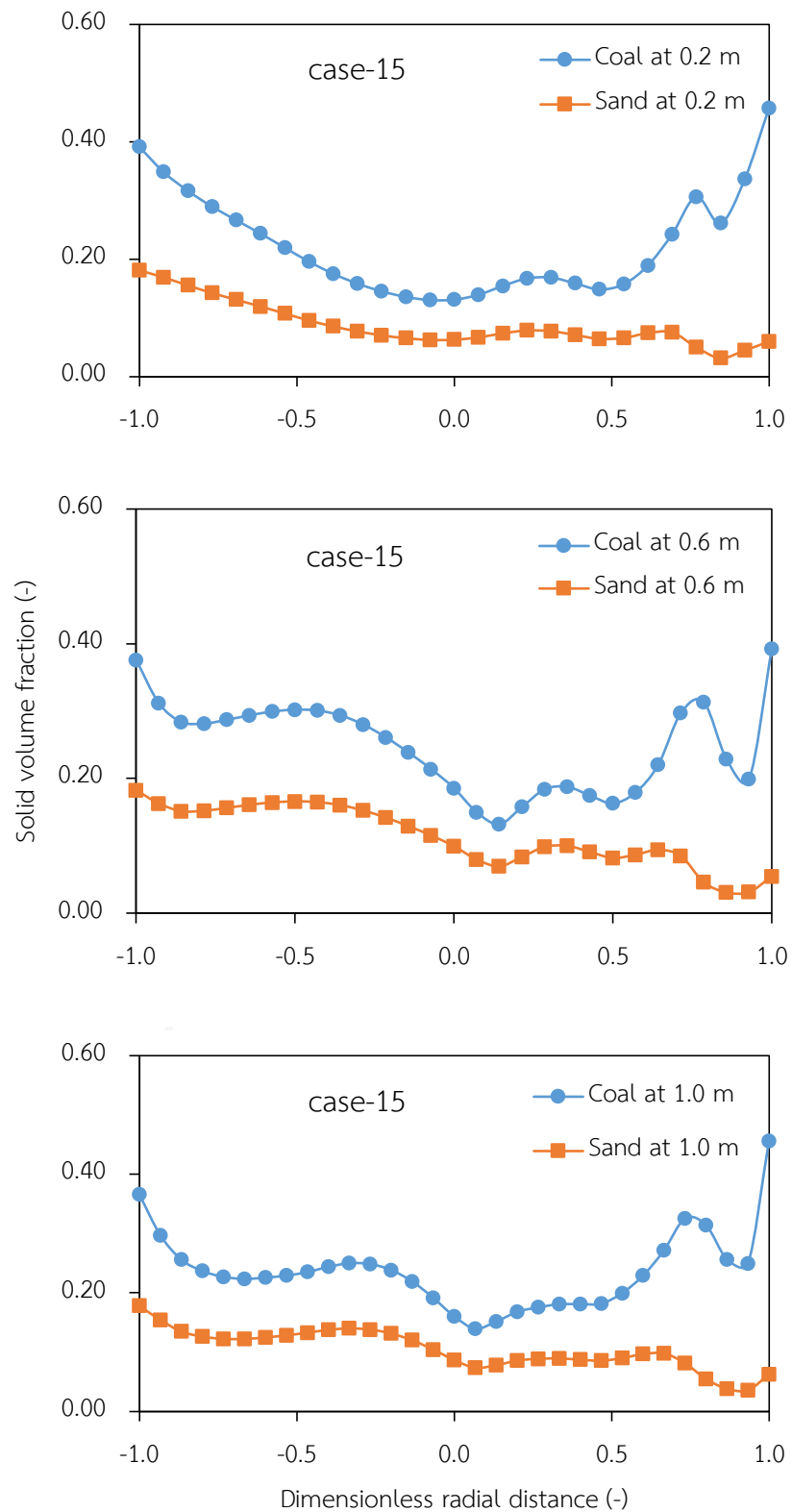
จากผลที่เกิดขึ้นของการทำนายการผสมด้วย สัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมี สัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน อุณหภูมิแกรนูลลาร์ และดัชนีการผสม สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่า ค่าที่ได้จากการทำนายของตัวละตัวแปร ควรที่จะมีค่าอยู่ตรงกลางค่อนไปทางค่าสูงของตัวแปรต่างๆ ซึ่งจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่สูงหรือเกิดการผสมที่ดี



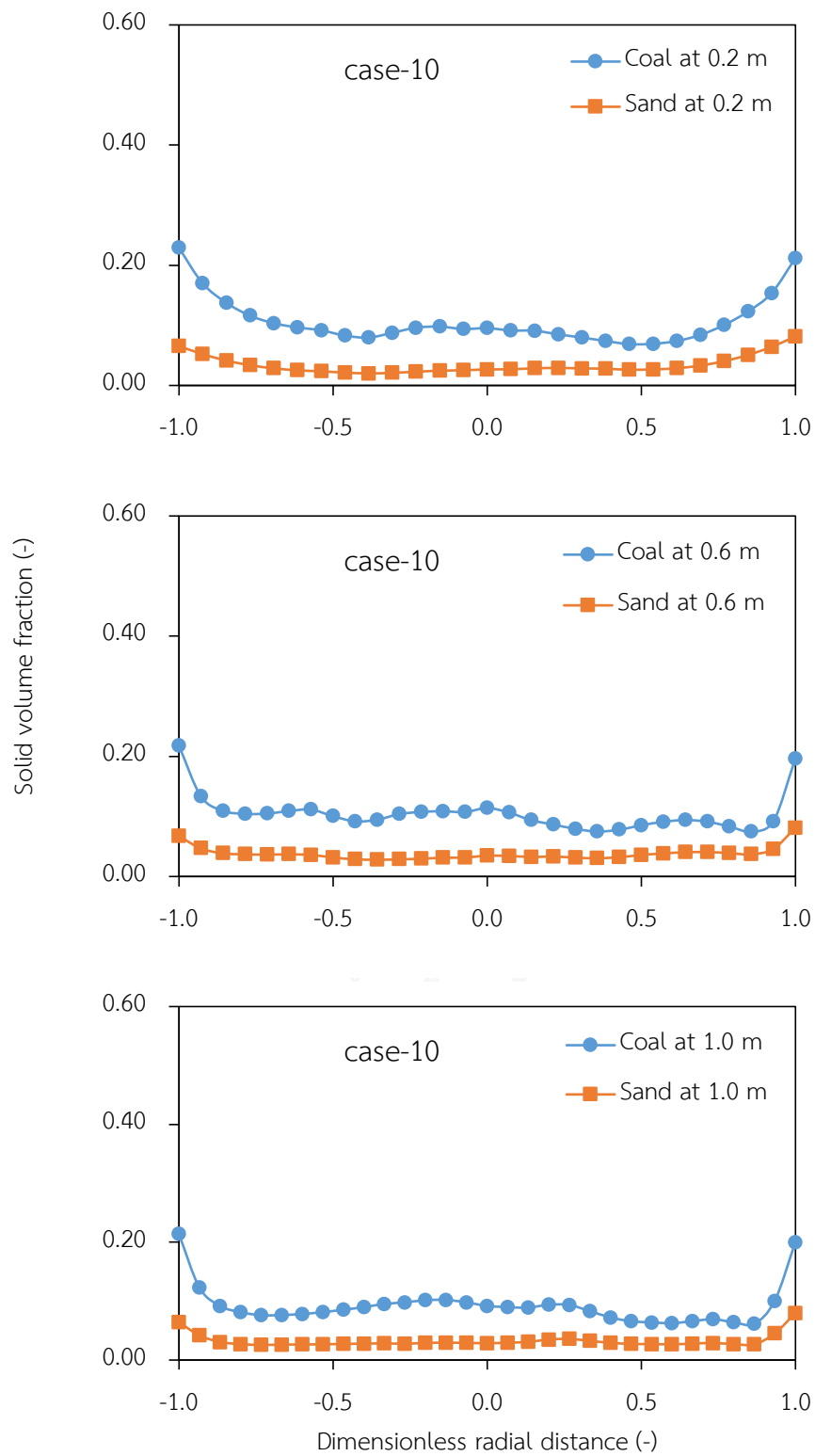
รูปที่ 4.24 อุณหภูมิของแก๊ส (เคลวิน) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ของ (ก) กรณีศึกษาที่ 15 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 10 ที่เวลา 150 วินาที



รูปที่ 4.25 การกระจายตัวของถ่านหินภายในเครื่องปฏิกรณ์ (ก) กรณีศึกษาที่ 15 และ (ข) กรณีศึกษาที่ 10 ที่เวลา 150 วินาที



รูปที่ 4.26 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 15



รูปที่ 4.27 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 10

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรตอบสนองทั้ง 5 ตัวแปร พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย (C) และอันตรกิริยาระหว่างความเร็วแก๊สป้อนเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรายและความสูงทรายเริ่มต้น (ACD) เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมี เนื่องจากค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95% เนื่องจากมีผลของอันตรกิริยาของ ACD นั้นมีความสูงทรายเริ่มต้น (D) เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้น การวิเคราะห์จึงต้องนำตัวแปรดำเนินการ D เข้ามาวิเคราะห์ด้วยแสดงดังตารางที่ 4.6 ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกนแสดงดังตารางที่ 4.7 พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย (C) มีค่า P-value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ส่วนค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย (C) และความสูงทรายเริ่มต้น (D) เป็นตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ ตารางที่ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์ของดัชนีการผสม พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย (C) ความสูงทรายเริ่มต้น (D) อันตรกิริยาระหว่างความเร็วแก๊สป้อนเข้าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านหิน (AB) อันตรกิริยาระหว่างความเร็วแก๊สป้อนเข้าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย (AC) และ อันตรกิริยาระหว่างความเร็วแก๊สป้อนเข้าและความสูงทรายเริ่มต้น (AD) เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านหิน (B) นั้นมีผลในเทอมอันตรกิริยาจึงถูกนำมาพิจารณา และสุดท้ายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนแสดงดังตารางที่ 4.10 พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย (B) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย (C) และความสูงทรายเริ่มต้น (D) เป็นตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อค่าดังกล่าว

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมี

Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
A	22.687	1	22.687	53.116	< 0.0001
C	3.191	1	3.191	7.470	0.0195
D	0.461	1	0.461	1.079	0.3211
ACD	3.160	1	3.160	7.399	0.0199
Error	4.698	11	0.427		
Total	35.437	16			

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกน

Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
A	16.326	1	16.326	65.697	< 0.0001
C	1.403	1	1.403	5.647	0.0335
Error	3.231	13	0.249		
Total	22.090	16			

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นอุณหภูมิแกนูล่าร์

Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
A	27.645	1	27.645	413.107	< 0.0001
C	1.007	1	1.007	15.046	0.0022
D	0.456	1	0.456	6.814	0.0228
Error	0.803	12	0.067		
Total	31.176	16			

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นดัชนีการผสม

Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
A	85.863	1	85.863	110.066	< 0.0001
B	2.245	1	2.245	2.878	0.1282
C	14.612	1	14.612	18.730	0.0025
D	32.200	1	32.200	41.276	0.0002
AB	7.782	1	7.782	9.976	0.0134
AC	29.275	1	29.275	37.527	0.0003
AD	19.502	1	19.502	24.998	0.0011

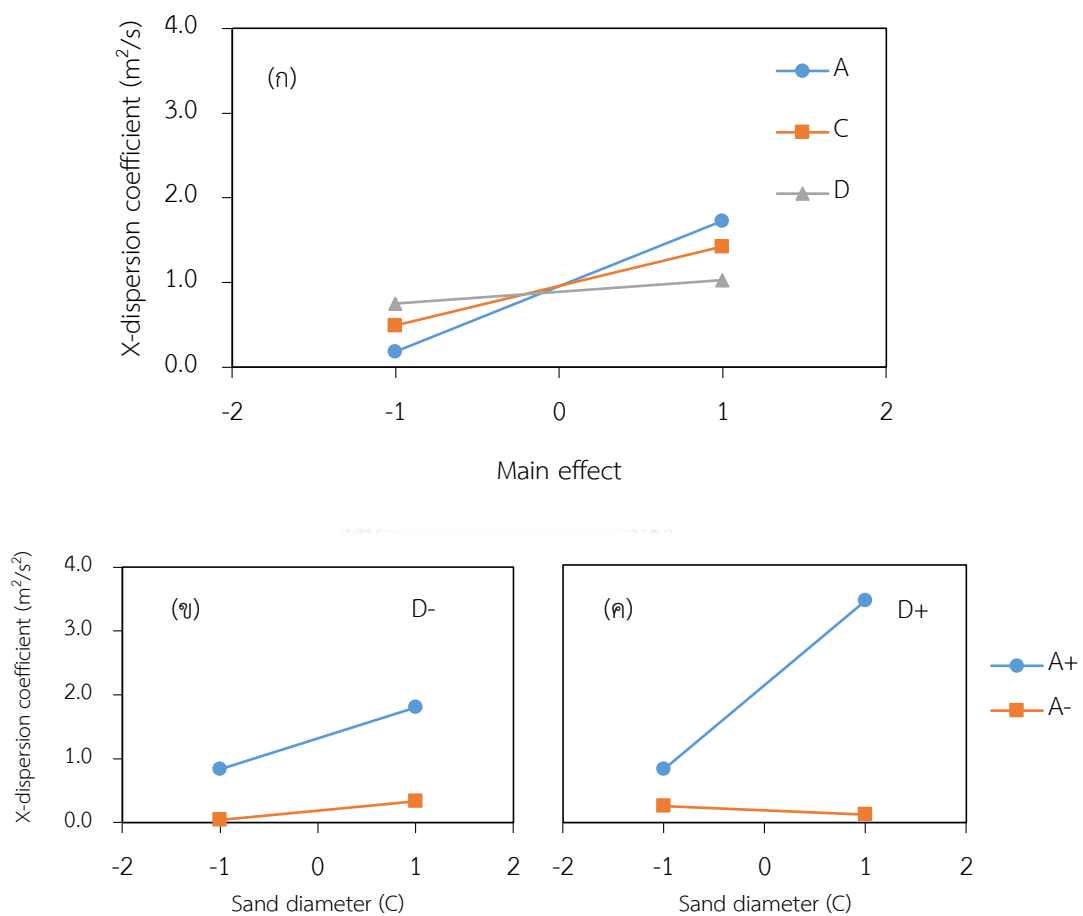
Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
Error	6.241	8	0.780	Error	6.241
Total	203.081	16			

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

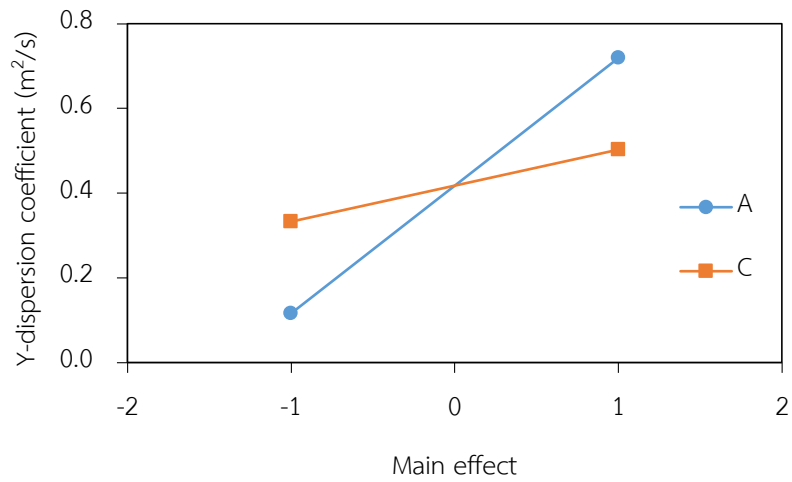
Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
A	33.449	1	33.449	326.778	< 0.0001
B	2.829	1	2.829	27.634	0.0003
C	5.777	1	5.777	56.435	< 0.0001
D	0.499	1	0.499	4.871	0.0495
Error	1.126	11	0.102		
Total	43.810	16			

รูปที่ 4.28 แสดงผลของตัวแปรหลักและผลอันตรกิริยาต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมี (ก) ผลของตัวแปรหลัก พบว่า ตัวแปรความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทราย (C) และความสูงทรายเริ่มต้น (D) ให้ผลเชิงบวก กล่าวคือ เมื่อความเร็วของแก๊สป้อนเข้าสู่ระบบสูงขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรายใหญ่ขึ้น ความสูงของทรายเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมีมีค่าสูงขึ้น ในส่วนของอันตรกิริยา ACD- รูปที่ 4.28 (ข) ที่ภาวะความสูงทรายเริ่มต้นมีค่าต่ำ (D-) พบว่า เมื่อตัวแปร A มีค่าที่ต่ำ (-) หรือมีค่าสูง (+) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร C จะให้ผลในเชิงบวก อันตรกิริยา ACD+ รูปที่ 4.28 (ค) ที่ภาวะความสูงทรายเริ่มต้นมีค่าสูง (D+) พบว่า เมื่อตัวแปร A มีค่าต่ำ (-) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร C จะให้ผลในเชิงลบ ในทางตรงกันข้าม เมื่อตัวแปร A มีค่าสูง (+) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร C จะให้ผลในเชิงบวก รูปที่ 4.29 กราฟแสดงผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกน พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทราย (C) ให้ผลเชิงบวก รูปที่ 4.30 กราฟแสดงผลของตัวแปรหลักต่อค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทราย (C) และความสูงทรายเริ่มต้น (D) ให้ผลเชิงบวก รูปที่ 4.31 กราฟแสดงผลของตัวแปรหลักและอันตรกิริยาต่อดัชนีการผสม พบว่า ตัวแปรความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถ่านหิน (B) ขนาดเส้น

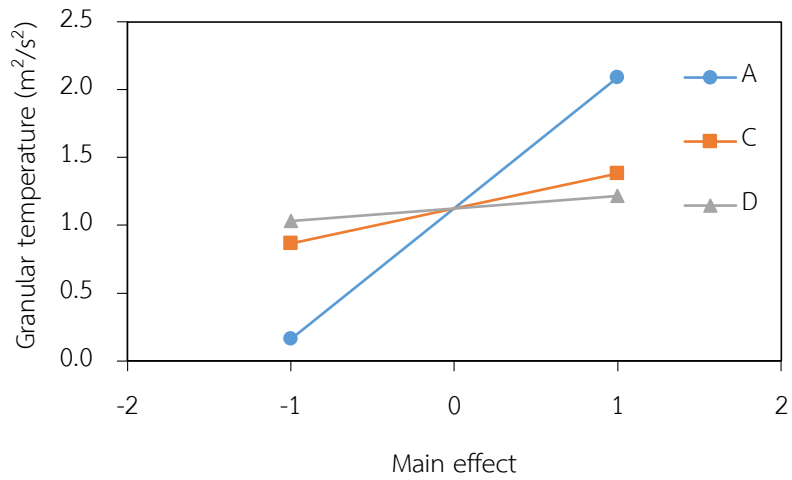
ผ่านศูนย์กลางทราย (C) และความสูงทรายเริ่มต้น (D) ทุกตัวแปรนั้นจะให้ผลเชิงบวก ในขณะที่ผลอันตรกิริยา AB เมื่อค่า A มีค่าสูงจะให้ผลเชิงบวก (+) และเมื่อ A มีค่าต่ำจะให้ผลเชิงลบ (-) ผลอันตรกิริยา AC นั้นให้แนวโน้มเช่นเดียวกับ AB กล่าวคือ เมื่อค่า A มีค่าสูงจะให้ผลเชิงบวก (+) และเมื่อ A มีค่าต่ำจะให้ผลเชิงลบ (-) ผลอันตรกิริยา AD พบว่า เมื่อค่า A มีค่าสูงจะให้ผลเชิงบวก (+) และเมื่อ A มีค่าต่ำจะให้ผลเชิงบวก (+)



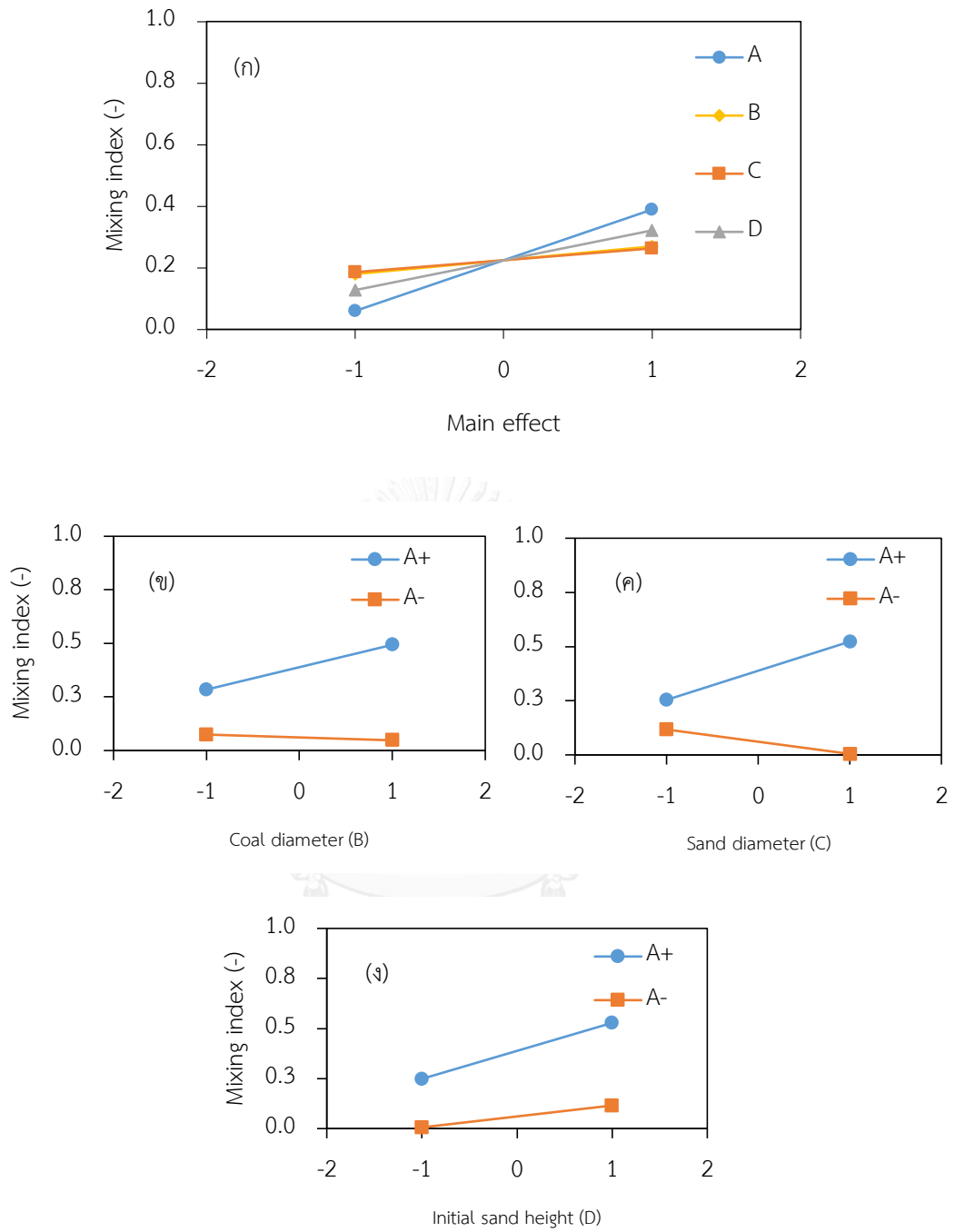
รูปที่ 4.28 ผลของตัวแปรหลักและผลอันตรกิริยาต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมี สำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสมสององค์ประกอบ (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยา ACD- และ (ค) ผลของอันตรกิริยา ACD+



รูปที่ 4.29 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกนสำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสมสององค์ประกอบ

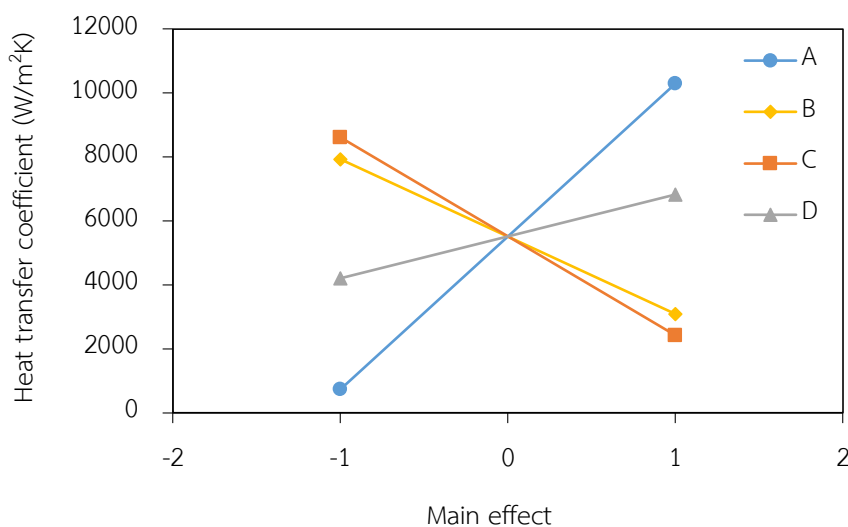


รูปที่ 4.30 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์สำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสมสององค์ประกอบ



รูปที่ 4.31 ผลของตัวแปรหลักและผลอันตรกิริยาต่อค่าดัชนีการผสมสำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสมสององค์ประกอบ (ก) ผลของตัวแปรหลัก (ข) ผลของอันตรกิริยา AB (ค) ผลของอันตรกิริยา AC และ (ง) ผลของอันตรกิริยา AD

จากผลของตัวแปรตอบสนองที่แตกต่างกันทั้งหมด 4 ตัวแปร พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย (C) จะเป็น 2 ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองทุก และให้ผลเชิงบวก เนื่องมาจากความเร็วแก๊สที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้อนุภาคในระบบนั้นสามารถกระจาย ตัวได้ดียิ่งขึ้นทำให้เกิดการผสมได้ดี ขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรายที่ใหญ่ขึ้นช่วยทำให้การ ผสมเกิดได้ดียิ่งขึ้น เพราะว่า ขนาดที่เพิ่มใหญ่ขึ้นของทรายจะเป็นการลดความแตกต่างของขนาด ระหว่างทรายและถ่านหินลงซึ่งเป็นการลดแนวโน้มของการเกิดการแยกชั้นลง (Segregation) เพื่อ เป็นการเปรียบเทียบตัวแปรตอบสนองแต่ละตัวให้ชัดเจนมากขึ้นจึงทำการเปรียบเทียบกับค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนโดยอาศัยความจริงที่ว่า การผสมที่ดีย่อมส่งผลเกิดการเผาไหม้ที่ดี ดังนั้นตัวแปรตอบสนองที่ดีควรที่จะให้แนวโน้มเช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน



รูปที่ 4.32 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสำหรับระบบอนุภาคของแข็ง ผสมสององค์ประกอบ

จากรูปที่ 4.32 พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า (A) และปริมาณทรายเริ่มต้น (D) จะให้ผลเชิง บวก เนื่องจาก ความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการกระจายตัวและการผสมที่ดีปฏิกิริยาการเผาไหม้จึงเกิด ได้ดี ปริมาณทรายเริ่มต้นที่มากขึ้นส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้น เพราะว่า ทรายภายในระบบทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (Medium) ช่วยในการถ่ายโอนความร้อน โดยปริมาณที่เพิ่ม มากขึ้นก็จะช่วยทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งให้แนวโน้มเหมือนงานวิจัยของ Mahanta และคณะ [30] เป็นทดลองเปรียบเทียบทรายปริมาณ 4 และ 7 กิโลกรัม ต่อการถ่ายโอน ความร้อน จากการศึกษา พบว่า ทรายปริมาณ 7 กิโลกรัม จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน

ที่มากกว่าทรายปริมาณ 4 กิโลกรัม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านหิน (B) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย (C) จะให้ผลเชิงลบ เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่ขึ้นจะเป็นการลดพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) ในการแลกเปลี่ยนความร้อนและการเกิดปฏิกิริยา

จากการเปรียบเทียบแนวโน้มของตัวแปรตอบสนองต่อการผสม ซึ่งประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมี ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกน อุณหภูมิแกรนูโลลาร์ และดัชนีการผสม เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน พบว่า ตัวแปรอุณหภูมิแกรนูโลลาร์ ให้แนวโน้มที่สอดคล้องมากที่สุด จากการวิเคราะห์ ANOVA จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญจากตัวแปรดำเนินการ A B C และ D โดยปราศจากผลของอันตรกิริยา โดยผลที่ทำนายด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมี และดัชนีการผสม จะมีผลของอันตรกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้อง ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน และอุณหภูมิแกรนูโลลาร์ จะไม่มีผลของอันตรกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้อง เมื่อพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกน พบว่า จะได้รับผลกระทบจากตัวแปรดำเนินการ A และ C ขณะที่อุณหภูมิแกรนูโลลาร์จะได้รับผลกระทบจาก A C และ D ซึ่งให้แนวโน้มที่ใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมากที่สุด หรืออาจกล่าวได้ว่า ค่าอุณหภูมิแกรนูโลลาร์ นั้นมีความเหมาะสมที่จะใช้ทำนายการผสมของระบบมากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามรัศมีและแนวแกนรวมถึงดัชนีการผสม อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิแกรนูโลลาร์กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนนั้นมีความสัมพันธ์อย่างง่ายเท่านั้น กล่าวคือ ถ้าเรารู้แนวโน้มของอุณหภูมิแกรนูโลลาร์เราจะสามารถทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนได้ในเบื้องต้น

4.3 อุทกพลศาสตร์ของระบบอนุภาคผสมสามชนิดที่มีการเกิดปฏิกิริยา (Hot flow)

ในส่วนที่สามของงานวิจัยจะเป็นการศึกษากระบวนการที่มีอนุภาคของแข็งทั้งหมด 3 ชนิด โดยนำระบบและภาวะของส่วนที่สองมาใช้แต่ทำการเพิ่มอนุภาคฝุ่นถ่านหิน (Coal dust) เข้าสู่ระบบ แนวคิดของงานวิจัยมาจากการที่ฝุ่นถ่านหินเป็นของเหลือจากการลำเลียงและการบดถ่านหิน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฝุ่นถ่านหินกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยการป้อนเข้าสู่หม้อกำเนิดไอน้ำโดยตรง เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ที่เปลี่ยนแปลงไป

4.3.1 ผลของตัวแปรดำเนินการต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์อนุภาคผสมสามชนิด

ทำการศึกษาโดยการออกแบบการทดลองด้วยวิธี 2^k แบบ 2^2 พร้อมทั้งค่ากลาง ปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ ขนาดของฝุ่นถ่านหิน (15 และ 75 ไมครอน) และปริมาณของฝุ่นถ่านหิน (5 และ

15 ตัน) เปรียบเทียบกับกรณีอ้างอิง (ไม่มีการเติมฝุ่นถ่านหิน) ดำเนินการที่ภาวะถ่านหินเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 700 ไมครอน ทรายขนาด 180 ไมครอน และความสูงทรายเริ่มต้น 0.61 เมตร ขณะที่ภาวะดำเนินการ ภาวะขอบเขต และภาวะขาออก ใช้เหมือนกับใน ส่วนที่ 2 แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.5

ตารางที่ 4.11 การออกแบบการทดลองแบบ 2^2 เพื่อศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการแสดงภาวะและผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนองแต่ละตัวที่ได้จากการจำลอง

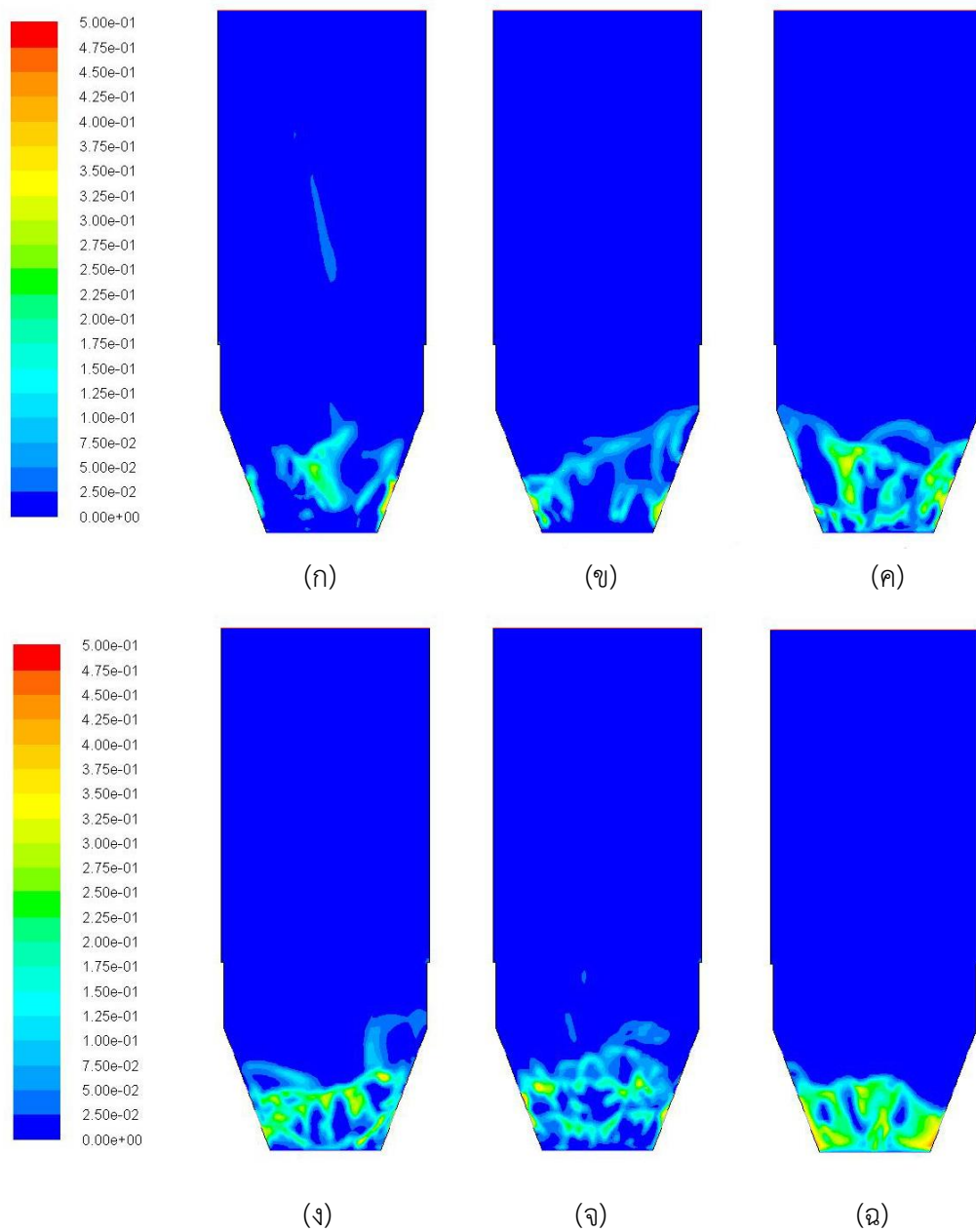
Case	Coal dust diameter (μm) (E)	Coal dust quantity (ton) (F)	D_x (m^2/s)	D_y (m^2/s)	θ (m^2/s^2)	MI (-)	h ($\text{W}/\text{m}^2\text{k}$)
18	15	5	1.884	2.530	0.602	0.845	2128
19	15	15	2.431	6.289	1.038	0.915	1829
20	75	5	0.076	0.086	0.685	0.494	4070
21	75	15	0.056	0.083	0.706	0.453	8330
22	45	10	0.080	0.110	0.814	0.893	15479
23 (อ้างอิง)	-	-	1.297	0.755	1.732	0.341	2072

จากตารางที่ 4.11 กรณีศึกษาที่ 18 และ 19 จะเห็นว่าเมื่อทำการเติมฝุ่นถ่านหินขนาด 15 ไมครอน ลงไปในปริมาณ 5 และ 15 ตัน ตามลำดับ จะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายโอนความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ขณะที่ค่าของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมทุกตัวจะมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อปริมาณฝุ่นถ่านหินในระบบเพิ่มสูงขึ้น เพราะวาระบบมีการเกิดฟลูอิดไอซ์มากขึ้น (ดังแสดงในรูปที่ 4.36 และ 4.37) เมื่อเปรียบเทียบค่าของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมของกรณีศึกษา 18 และ 19 กับกรณีที่ไม่มีการเติมฝุ่นถ่านหินหรือกรณีศึกษาที่ 23 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะว่าฝุ่นถ่านหินที่ใส่เข้าไปนั้นมีขนาดที่เล็กจึงลอยออกจากกระบอกซึ่งอาจมีระยะเวลาไม่เพียงพอสำหรับการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ภายในระบบ

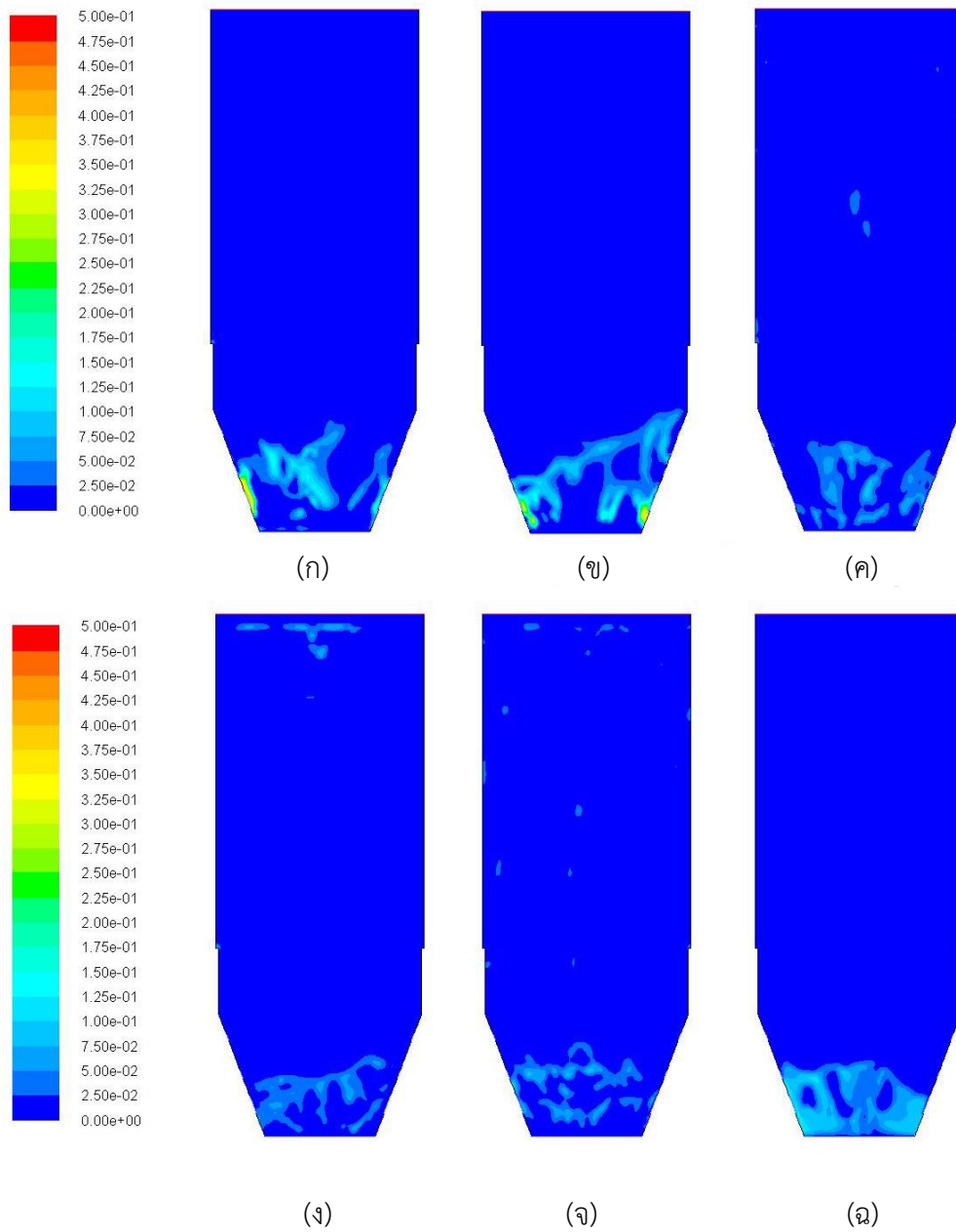
เมื่อพิจารณาตัวแปรตอบสนองต่อการผสม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมี ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกน และค่าดัชนีการผสมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเติมฝุ่นถ่านหินขนาด 15 ไมครอน เข้าสู่ระบบ (ทั้ง 5 และ 15 ตัน) ในทางตรงกันข้ามค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์จะมีค่าที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอ้างอิง กรณีศึกษาที่ 20 และ 21 เป็นการเติมฝุ่นถ่านหินขนาด 75 ไมครอน ปริมาณ 5 และ 15 ตัน ตามลำดับ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณฝุ่นถ่านหินมากขึ้น เพราะว่า ถ่านหินจะมีการกระจายตัวมากขึ้นในบริเวณที่เกิดการเผาไหม้หรือบริเวณ Lower และ Upper secondary air (รูปที่ 4.33 ค และ ง) โดยถ่านหินของกรณีศึกษาที่ 21 จะมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอมากกว่ากรณีศึกษาที่ 20 (รูปที่ 4.38 และ 4.39) เมื่อเปรียบเทียบค่าของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมของกรณีศึกษา 20 และ 21 กับกรณีที่ไม่มีการเติมฝุ่นถ่านหินหรือกรณีศึกษาที่ 23 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมีและแนวแกน และค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ มีแนวโน้มที่จะลดลง ขณะที่ค่าดัชนีการผสมนั้นจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอ้างอิง ขณะที่กรณีศึกษาที่ 22 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงสุด เพราะว่าขนาดฝุ่นถ่านหินและปริมาณ มีความเหมาะสมในการกระจายตัว ภาพคอนทัวร์และการกระจายตัวของอนุภาคของแข็ง จากรูปที่ 4.33 (จ) และ 4.40 ตามลำดับ จะเห็นว่าถ่านหินมีการกระจายที่สม่ำเสมอมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ เป็นสาเหตุทำให้สามารถถ่ายโอนความร้อนภายในระบบได้ดี

เมื่อพิจารณาคอนทัวร์สัดส่วนโดยปริมาตรของของแข็ง (Solid volume fraction) ของถ่านหินและทราย รูปที่ 4.33 และ 4.34 (ก และ ข) จะเห็นว่าหลังจากที่ทำการเติมฝุ่นถ่านหินไม่ว่าจะเป็น 5 ตัน หรือ 15 ตัน สำหรับถ่านหินขนาด 15 ไมครอน (กรณีศึกษาที่ 18 และ 19) จะส่งผลทำให้ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของถ่านหินในบริเวณด้านล่างมีค่าที่ลดลง โดยลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคแสดงดังรูปที่ 4.36 และ 4.37 จะเห็นว่าที่ความสูง 0.2 เมตร จะมีปริมาณอนุภาคของแข็งที่ต่ำ ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับภาพที่ได้จากคอนทัวร์ สาเหตุเกิดเนื่องมาจากขนาดของฝุ่นถ่านหินนั้นมีขนาดเล็กมาก (เมื่อพิจารณาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของฝุ่นถ่านหินจะจัดอยู่ในกลุ่มเจลดาร์ดเอ) จะไปช่วยทำให้ถ่านหินและทรายซึ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่านั้นลอยตัวได้สูงขึ้น โดยจากงานวิจัยของ Ajbar และคณะ [31] ที่ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของการเติมอนุภาคขนาดเล็กในกลุ่มเจลดาร์ดเอเข้าสู่ระบบฟลูอิดไชน์เบด พบว่า การเติมอนุภาคขนาดเล็กนั้นจะช่วยปรับปรุงทำให้เกิดการฟลูอิดไชน์ภายในกระบวนการให้สูงขึ้น ซึ่งผลการทดลองนั้นก็ให้ผลไปในทิศทางเดียวกับผลที่ได้จากการจำลอง นอกจากนี้ Mostafazadeh และคณะ [32] พบว่า การเติมอนุภาคที่มีขนาดเล็กเข้าไปนั้นจะ

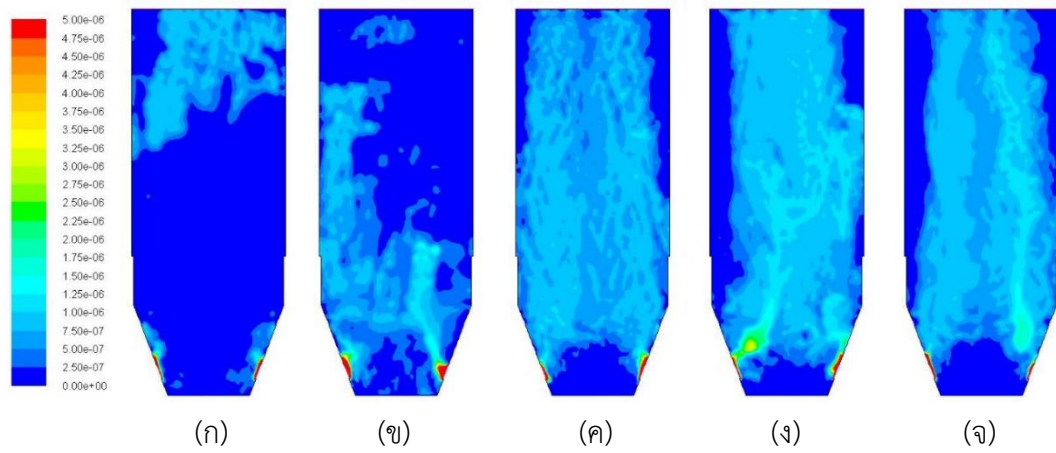
ช่วยให้การขยายตัวของหน้าเบด (Bed expansion) มีการขยายตัวที่สูงขึ้น เนื่องมาจากปริมาณของแข็งและค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Average diameter) นั้นจะมีค่าที่ลดลง ซึ่งส่งผลทำให้อนุภาคนั้นขยายตัวได้ง่ายขึ้น รูปที่ 4.35 แสดงภาพคอนทัวร์ของฝุ่นถ่านหินจะเห็นว่าฝุ่นถ่านหินที่ป้อนเข้าสู่ระบบนั้นจะลอยตัวขึ้นสู่ด้านบน



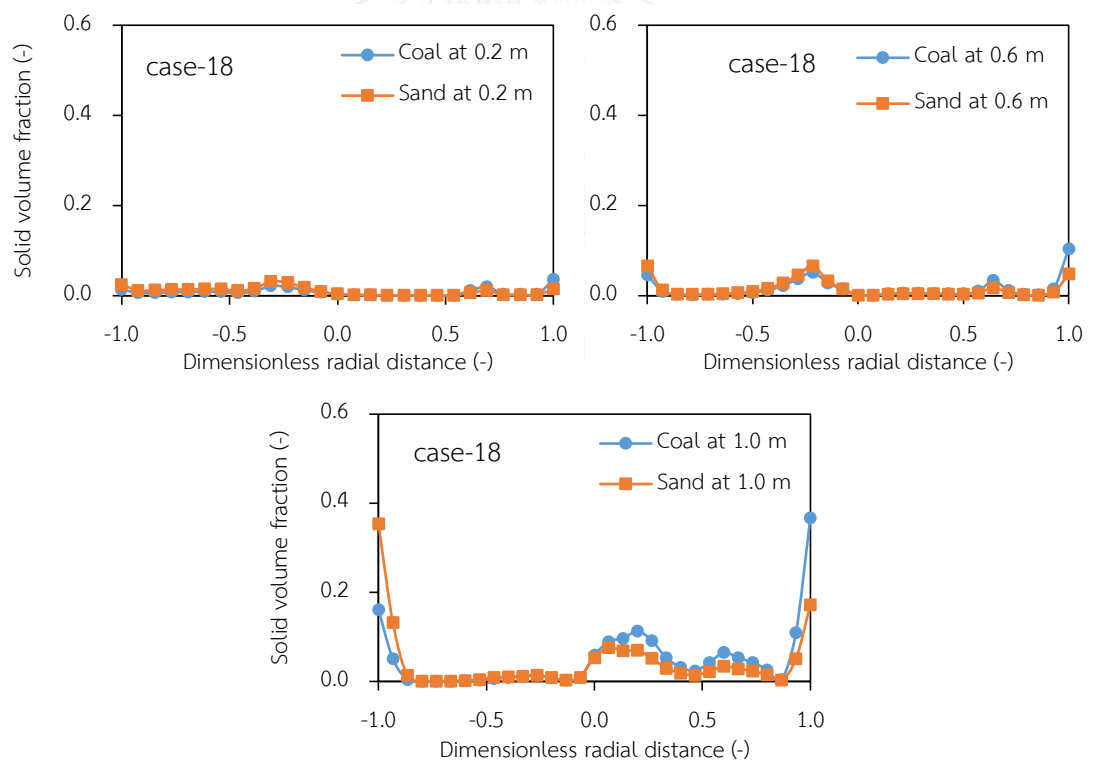
รูปที่ 4.33 คอนทัวร์สัดส่วนโดยปริมาตรของถ่านหิน (Coal) ของกรณี (ก) 18 (ข) 19 (ค) 20 (ง) 21 (จ) 22 และ (ฉ) 23 ตามลำดับ



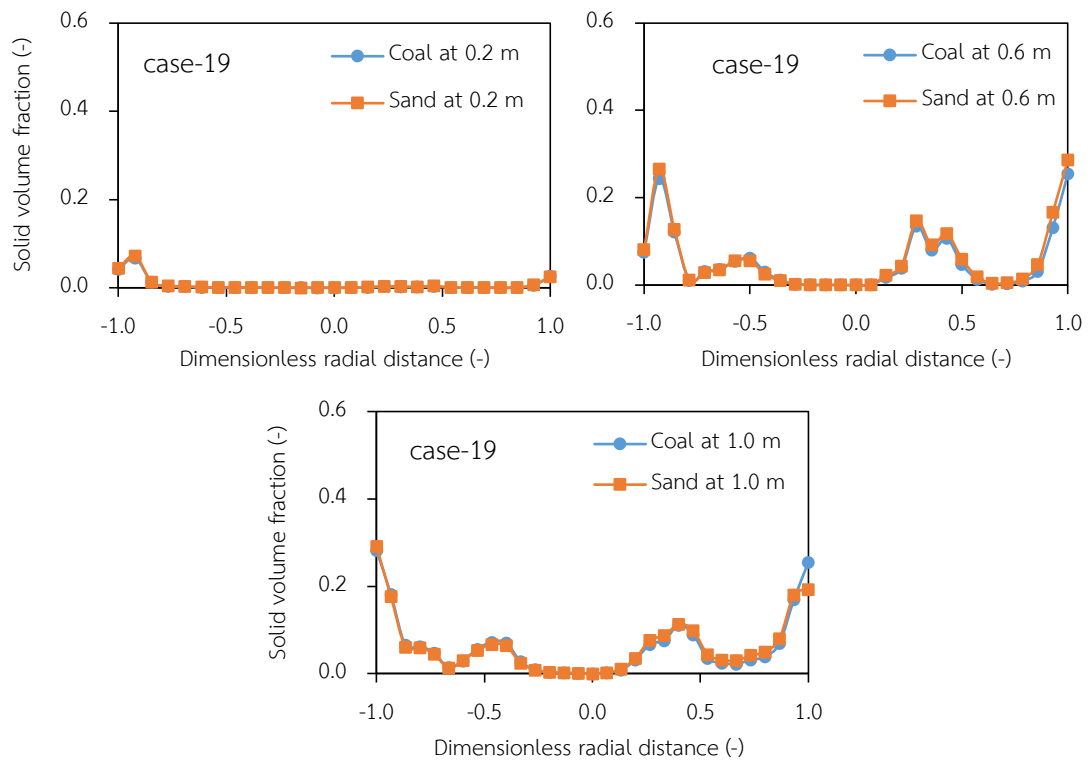
รูปที่ 4.34 คอนทัวร์สัต์ส่วนโดยปริมาตรของทราย (Sand) ของกรณี (ก) 18 (ข) 19 (ค) 20 (ง) 21 (จ) 22 และ (ฉ) 23 ตามลำดับ



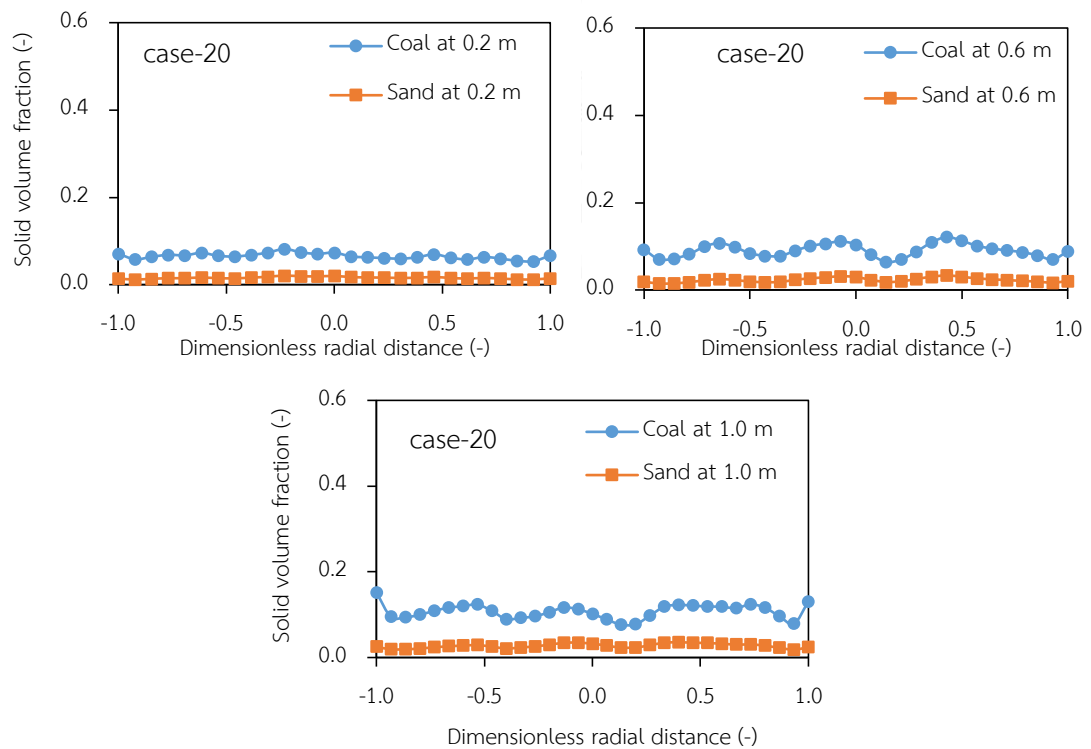
รูปที่ 4.35 คอนทัวร์สัดส่วนโดยปริมาตรของฝุ่นถ่านหิน (Coal dust) ของกรณีศึกษาที่ (ก) 18 (ข) 19 (ค) 20 (ง) 21 และ (จ) 22 ตามลำดับ



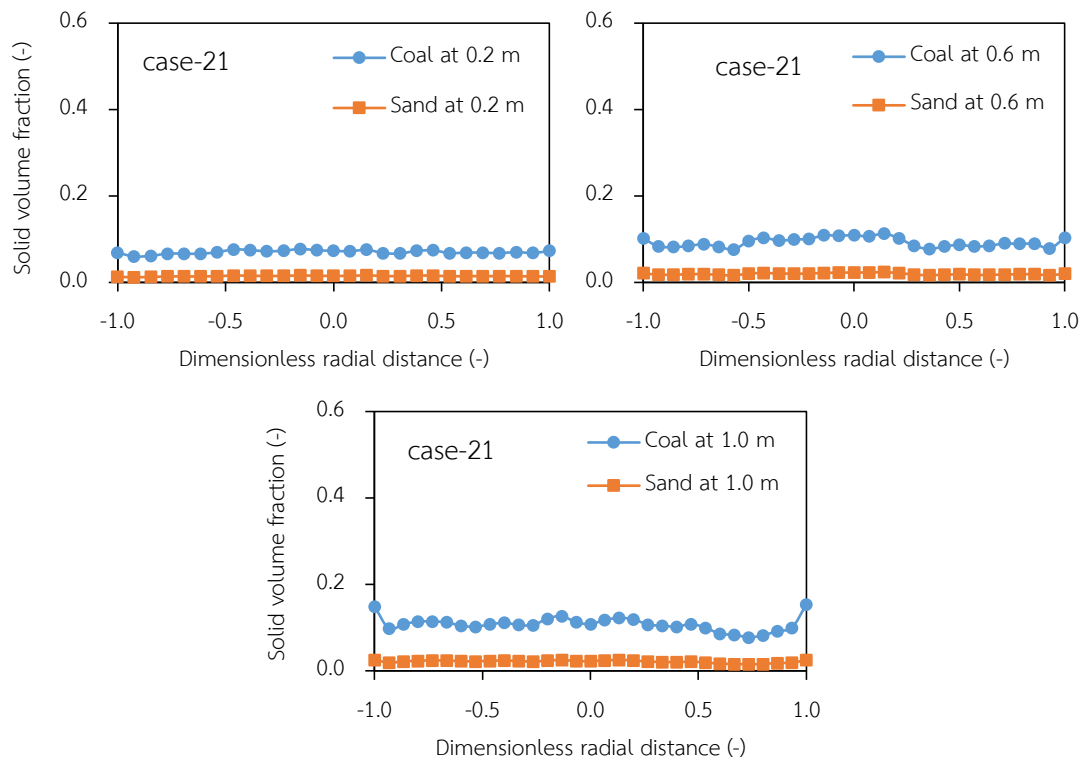
รูปที่ 4.36 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 18



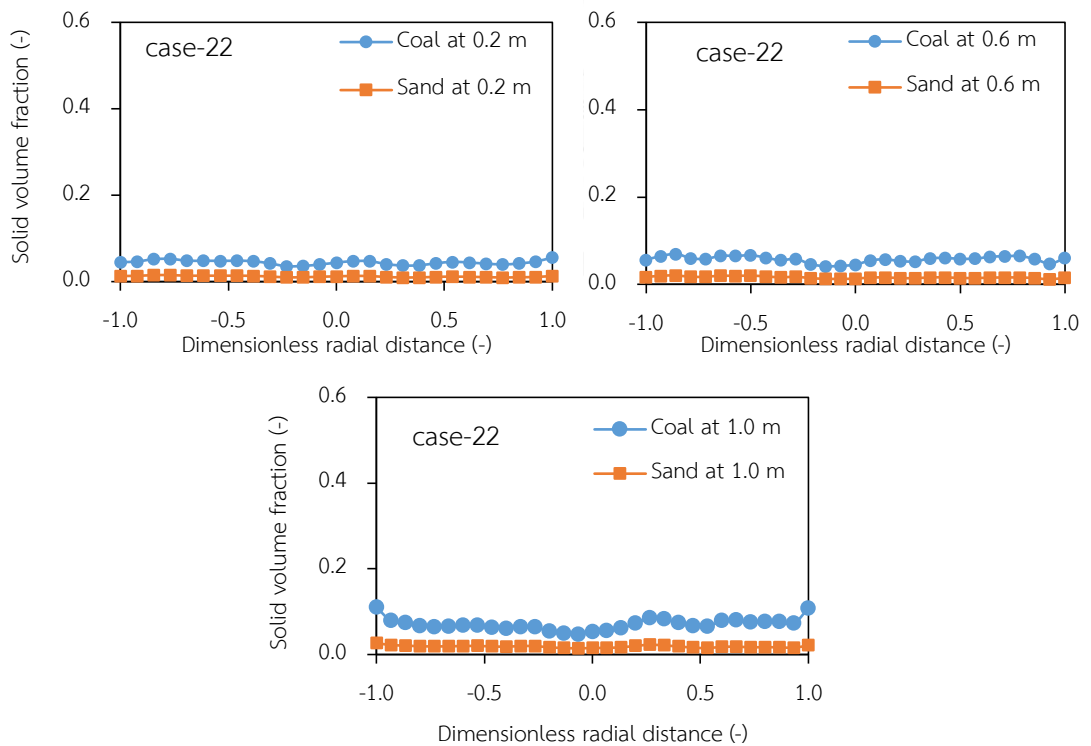
รูปที่ 4.37 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 19



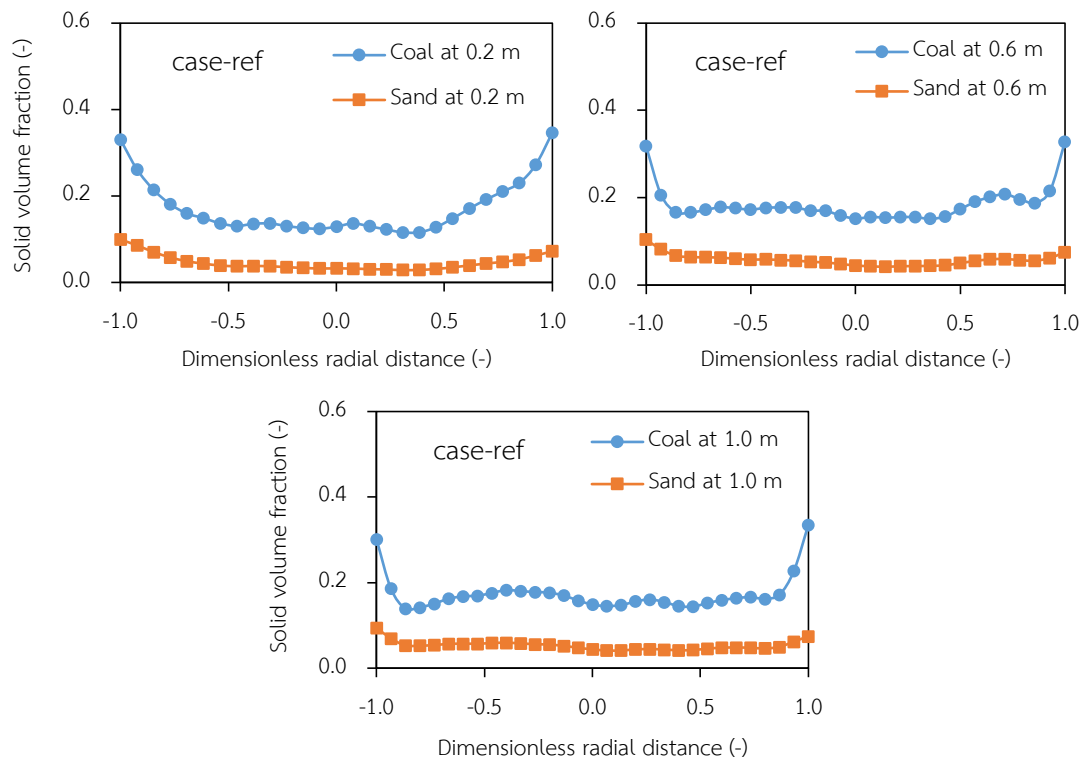
รูปที่ 4.38 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 20



รูปที่ 4.39 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 21



รูปที่ 4.40 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 22



รูปที่ 4.41 การกระจายตัวของถ่านหินและทรายในแนวรัศมี ที่ความสูงต่างๆ สำหรับกรณีศึกษาที่ 23

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ผลของตัวแปรตอบสนองทั้งหมด พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นถ่านหิน (E) ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมีดังแสดงในตารางที่ 4.12 และจากรูปที่ 4.42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะให้ผลเชิงลบ (-) หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นถ่านหินใหญ่ขึ้นส่งผลให้การกระจายตัวในแนวรัศมีลดลง เพราะ ขนาดที่ใหญ่ขึ้นทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.43 พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นถ่านหิน (E) ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ในแนวแกนแบบเชิงลบ (-) เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมี จากตารางที่ 4.14 พบว่าค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 สำหรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝุ่นถ่านหิน (E) และปริมาณฝุ่นถ่านหิน (F) อาจผลที่เกิดขึ้นสามารถตีความได้สองทาง คือ ทั้งขนาดและปริมาณฝุ่นถ่านหินนั้นมีผลทั้งคู่ต่อตัวแปรตอบสนองหรือทั้งสองปัจจัยนั้นไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองเลย จากรูปที่ 4.44 จะเห็นว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางฝุ่นถ่านหินนั้นให้ผลเชิงลบ (-) ขณะที่ปริมาณฝุ่นถ่านหินให้ผลเชิงบวก (+) จากตารางที่ 4.15 พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางถ่านหินส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าดัชนีการผสมและจากรูปที่ 4.45 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะให้ผลแบบเชิงลบ (-) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน จากตารางที่ 4.16 พบว่า ค่า P-value ของทั้งสองปัจจัยมีค่าที่มากกว่า 0.05 หมายความว่า ทั้งขนาด

และปริมาณของฝุ่นถ่านหินอาจจะมีผลหรือไม่มีผลทั้งคู่ต่อค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว จากรูปที่ 4.46 พบว่าปัจจัยทั้งสองนั้นจะให้ผลแบบเชิงบวก (+) ทั้งคู่

จากการพิจารณาแนวโน้มของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมแต่ละตัว พบว่า ค่าอุณหภูมิ แกรนูลลาร์ จะมีแนวโน้มที่บอกถึงการผสมได้ดีกว่าตัวแปรอื่นๆ โดยค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าที่ใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน กล่าวคือ ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์เป็นตัวแปรที่ทำนายการผสม ตัวแปรเดียวที่ได้รับผลกระทบจากตัวแปรดำเนินการ E และ F เหมือนกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีและแกนรวมทั้งค่าดัชนีการผสม ได้รับผลกระทบจากตัวแปรดำเนินการ E เท่านั้น) นอกจากนี้ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ควรที่จะมีค่าอยู่ตรงกลางค่อนข้างสูงของช่วงค่าตัวแปร โดยจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมีค่าที่สูง ถ้าหากค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์มีค่าที่น้อย หรือ สูงเกินไปจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนที่ต่ำ

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีกรณีที่มีอนุภาคของแข็งสามองค์ประกอบ

Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
E	2.295	1	2.295	306.024	0.0033
Error	0.015	2	0.007		
Total	2.669	4			

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวแกนกรณีที่มีอนุภาคของแข็งสามองค์ประกอบ

Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
E	2.804	1	2.804	71.595	0.0137
Error	0.078	2	0.039		
Total	3.298	4			

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นอุณหภูมิแก๊รูล่าร์กรณีที่มีอนุภาคของแข็งสามองค์ประกอบ

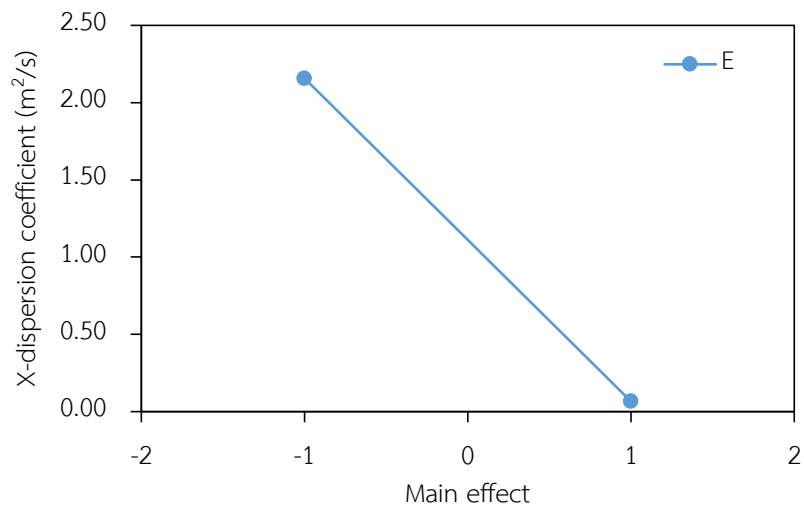
Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
E	0.003	1	0.003	0.248	0.7060
F	0.016	1	0.016	1.251	0.4645
Error	0.012	1	0.012		
Total	0.033	4			

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นดัชนีการผสมกรณีที่มีอนุภาคของแข็งสามองค์ประกอบ

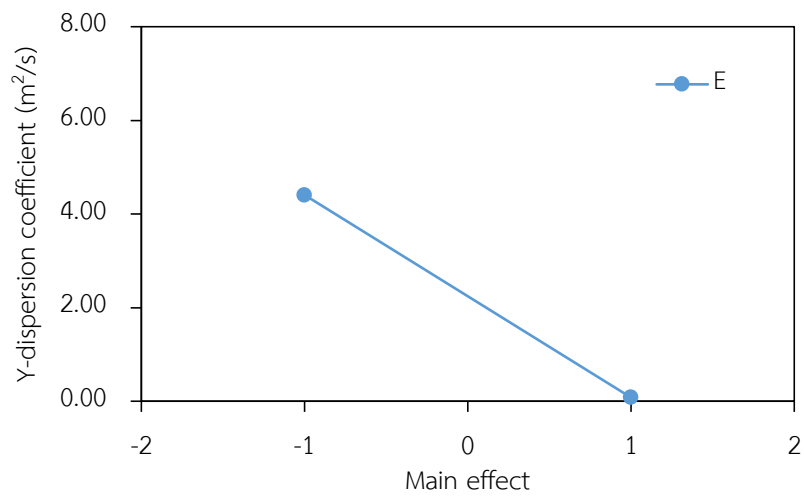
Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
E	0.072	1	0.072	111.830	0.0088
Error	0.001	2	0.001		
Total	0.090	4			

ตารางที่ 4.16 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนองเป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนกรณีที่มีอนุภาคของแข็งสามองค์ประกอบ

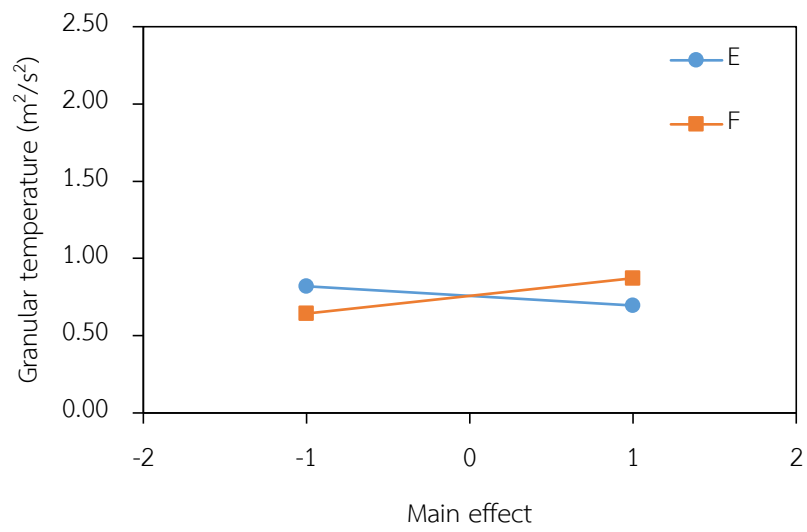
Source	Sum of squares	Df	Mean squares	F-value	P-value
E	0.221	1	0.221	6.217	0.2428
F	0.015	1	0.015	0.423	0.6328
Error	0.036	1	0.036		
Total	0.620	4			



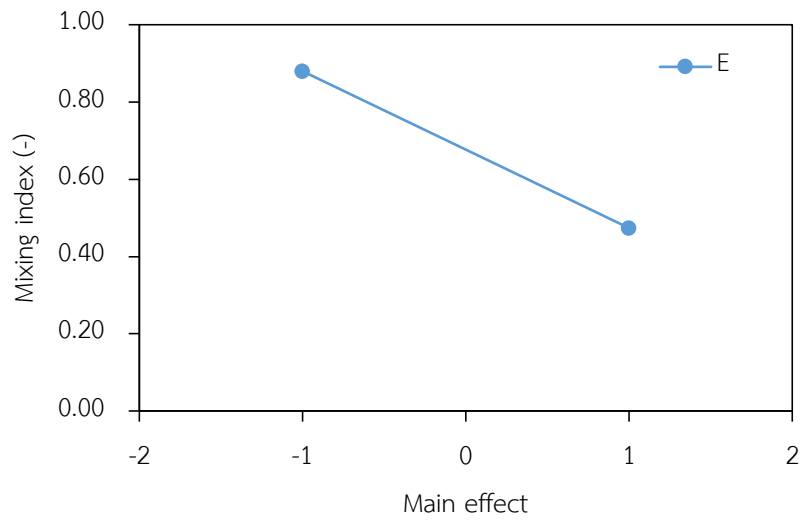
รูปที่ 4.42 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมีสำหรับระบบอนุภาค
ของแข็งผสมสามองค์ประกอบ



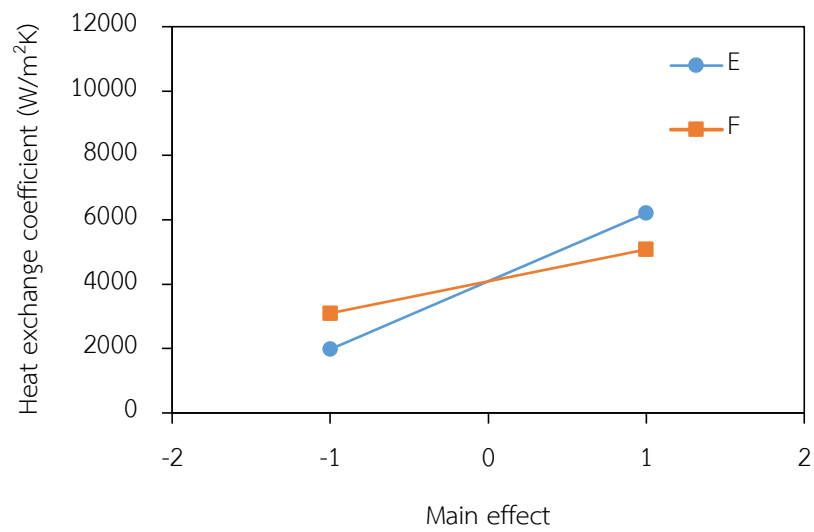
รูปที่ 4.43 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกนสำหรับระบบอนุภาค
ของแข็งผสมสามองค์ประกอบ



รูปที่ 4.44 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์สำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสมสามองค์ประกอบ



รูปที่ 4.45 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าดัชนีการผสมสำหรับระบบอนุภาคของแข็งผสมสามองค์ประกอบ



รูปที่ 4.46 ผลของตัวแปรหลักต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสำหรับระบบอนุภาคของแข็ง
ผสมสามองค์ประกอบ



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ 1. การหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับระบบอนุภาคผสม 2. การหาแบบจำลองปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสม 3. ผลของตัวแปรในการดำเนินการต่ออุทกพลศาสตร์และพฤติกรรมการผสม และ 4. ผลของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมและการกระจายตัว

5.1.1 การหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับระบบอนุภาคผสม

การหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแบบจำลองด้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแก๊ส-ของแข็ง (Interphase momentum exchange coefficient) ขั้นตอนแรกจำเป็นต้องหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมและภาวะเสมือนคงตัว ซึ่งในงานวิจัยส่วนที่หนึ่งจะใช้พื้นที่การคำนวณ 12000 เซลล์ และช่วงเวลา 20-40 วินาที ขณะที่ส่วนที่สองและสามจะใช้พื้นที่การคำนวณขนาด 8000 เซลล์ และช่วงเวลา 120-140 วินาที จากผลการศึกษา พบว่า แบบจำลอง EMMS นั้นสามารถใช้กับระบบที่มีขนาดเล็กและใหญ่ได้โดยให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองของ Oweyemi และคณะ [4] และ NPS มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง Wen-Yu Gidaspow และ Syamlal-O'Brien เนื่องจากแบบจำลอง EMMS นั้นจะพิจารณาผลของการเกิดคลัสเตอร์ (Clusters) นอกจากนี้ พบว่า ในระบบอนุภาคผสม 2 ชนิดที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกันจะมีพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่คล้ายกัน อีกทั้งมีการกระจายตามแนวรัศมีเป็นแบบ Annulus core structure ในขณะที่การกระจายตัวในแนวแกนจะมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งลดลงตามระยะความสูง

5.1.2 การหาแบบจำลองปฏิกิริยาเคมีที่เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้ใช้สมการปฏิกิริยาเคมีและจลนศาสตร์ของ Shuai และคณะ [26] สำหรับการเผาไหม้ของถ่านหินและฝุ่นถ่านหิน ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ภายในระบบที่ได้จากการจำลองและผลการทดลอง พบว่า แบบจำลองดังกล่าวให้ผลที่สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลอง

5.1.3 ผลของตัวแปรดำเนินการต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์และพฤติกรรมการผสม

จากผลการศึกษาตัวแปรดำเนินการในส่วนที่หนึ่ง พบว่า การเพิ่มขึ้นของความเร็วจะส่งผลให้การผสมเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งการผสมจะลดลง เพราะว่า อนุภาคจะมีพฤติกรรมการกระจายตัวที่เปลี่ยนแปลงไปโดยอนุภาคจะรวมตัวกันอย่างหนาแน่นบริเวณผนังทำให้การผสมกันลดลง จากผลการศึกษาตัวแปรดำเนินการในส่วนที่สอง พบว่า กรณีศึกษาที่ 10 ที่ภาวะความเร็วแก๊สป้อนเข้า 2.65 เมตรต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านหิน 500 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย 200 ไมครอน และความสูงของทรายเริ่มต้น 0.7 เมตร ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมีค่าสูงที่สุด ในขณะที่ภาวะความเร็วแก๊สป้อนเข้า 0.66 เมตรต่อวินาที ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านหิน 1000 ไมครอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทราย 250 ไมครอน และความสูงของทรายเริ่มต้น 0.5 เมตร ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมีค่าต่ำที่สุด จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่า ความเร็วแก๊สป้อนเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางหิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทราย และความสูงเริ่มต้นของทราย เป็นตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน ผลของตัวแปรดำเนินการในส่วนที่สาม พบว่า การเติมฝุ่นถ่านหินขนาด 15 ไมครอน นั้นจะไม่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเปลี่ยนแปลงมากนัก ไม่ว่าจะเติมในปริมาณ 15 หรือ 5 ตัน ขณะที่การเติมฝุ่นถ่านหินขนาด 75 ไมครอน นั้นจะส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ ANOVA พบว่า ค่า P-value ของทั้ง 2 ปัจจัยมีค่าที่มากกว่า 0.05 หมายความว่าทั้งสองปัจจัยนั้นอาจที่จะมีผลหรือไม่มีผลทั้งคู่

5.1.4 ผลของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมและการกระจายตัว

จากการศึกษาในส่วนที่หนึ่ง พบว่า เมื่อทำการเพิ่มความเร็วแก๊สป้อนเข้า ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในแนวรัศมีมีแนวโน้มที่จะลดลงตามความเร็วแก๊ส ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ขณะที่ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์และดัชนีการผสมมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่งจากนั้นจะลดลง ส่วนที่สองของงานวิจัยมีความต้องการที่จะทำการเปรียบเทียบตัวแปรตอบสนองต่อการผสมแต่ละตัว โดยทำการเปรียบเทียบตัวแปรตอบสนองต่อการผสมทั้ง 4 ตัวแปร ประกอบด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวแกน ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวตามแนวรัศมี อุณหภูมิแกรนูลลาร์ และดัชนีการผสม จากสมมติฐานที่ว่า การผสมที่ดีย่อมส่งผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาที่ดี ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจะเป็นตัวแปรที่ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบสมมติฐานดังกล่าว จากการเปรียบเทียบพบว่า อุณหภูมิแกรนูลลาร์มีแนวโน้มไปในทิศทาง

เดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่นๆ และค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ที่ค่ากลางค่อนข้างมากจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงที่สุด ส่วนที่สามทำการเปรียบเทียบเช่นเดียวกับส่วนที่สอง จากการเปรียบเทียบ พบว่า ค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ให้แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแปรอื่นๆ และค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ที่ค่ากลางค่อนข้างสูงจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงที่สุด อย่างไรก็ตามแนวโน้มดังกล่าวจะสังเกตได้ค่อนข้างชัดเจนสำหรับกรณีที่ภาวะความเร็วแก๊สป้อนเข้าแตกต่างกันแล้วให้ตัวแปรอื่นๆคงที่ ในขณะที่เมื่อทำการเปลี่ยนภาวะดำเนินการของตัวแปรต่างๆ แล้วให้ความเร็วแก๊สคงที่ แนวโน้มของอุณหภูมิแกรนูลลาร์จะไม่ไปในทิศทางเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนอย่างเห็นได้ชัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองอุทกพลศาสตร์ในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบสองมิติในส่วนของโรเตอร์ทั้งภาวะที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยา แบบจำลอง EMMS ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาให้มีความเหมาะสมกับอนุภาคที่มีขนาดจัดอยู่ในกลุ่มเจลดาร์ตบี ซึ่งขนาดอนุภาคฝุ่นถ่านหินที่ทำการศึกษาลงอยู่ในกลุ่มเจลดาร์ตเอ อาจที่จะทำการพัฒนาแบบจำลอง EMMS ให้มีความเหมาะสมครอบคลุมกับอนุภาคของแข็งในหลายช่วงขนาด นอกจากนี้แบบจำลองปฏิกิริยาเคมีที่พัฒนาโดย Shuai และคณะ [26] เป็นแบบจำลองที่ถูกพัฒนามาสำหรับถ่านหิน ดังนั้นการนำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้กับฝุ่นถ่านหินที่มีขนาดเล็กกว่ามากซึ่งอาจจะมีอุทกพลศาสตร์และกลไกการเผาไหม้ที่แตกต่างกันออกไป อาจที่จะต้องหาแบบจำลองการเผาไหม้ที่ถูกพัฒนาสำหรับอนุภาคขนาดเล็กเพื่อมาใช้กับฝุ่นถ่านหิน

รายการอ้างอิง

1. Zhong, H., et al., *CFD modeling the hydrodynamics of binary particle mixtures in bubbling fluidized beds: Effect of wall boundary condition*. Powder Technology, 2012. 230: p. 232-240.
2. Chalermsoonsuwan, B., D. Gidaspo, and P. Piumsoomboon, *Two- and three-dimensional CFD modeling of Geldart A particles in a thin bubbling fluidized bed: Comparison of turbulence and dispersion coefficients*. Chemical Engineering Journal, 2011. 171(1): p. 301-313.
3. Merzsch, M., S. Lechner, and H.J. Krautz, *Heat-transfer from single horizontal tubes in fluidized beds: Influence of tube diameter, moisture and diameter-definition by Geldart C fines content*. Powder Technology, 2013. 235: p. 1038-1046.
4. Owoyemi, O., L. Mazzei, and P. Lettieri, *CFD modeling of binary fluidized suspensions and investigation of role of particle-particle drag on mixing and segregation*. AIChE journal, 2007. 53(8): p. 1924-1940.
5. Lungu, M., et al., *A CFD study of a bi-disperse gas-solid fluidized bed: Effect of the EMMS sub grid drag correction*. Powder Technology, 2015. 280: p. 154-172.
6. Samruamphianskun, T., P. Piumsoomboon, and B. Chalermsoonsuwan, *Computation of system turbulences and dispersion coefficients in circulating fluidized bed downer using CFD simulation*. Chemical Engineering Research and Design, 2012. 90(12): p. 2164-2178.
7. Chang, J., et al., *CFD modeling of particle-particle heat transfer in dense gas-solid fluidized beds of binary mixture*. Powder Technology, 2012. 217: p. 50-60.
8. Wang, J. and Y. Liu, *EMMS-based Eulerian simulation on the hydrodynamics of a bubbling fluidized bed with FCC particles*. Powder Technology, 2010. 197(3): p. 241-246.
9. Zhou, Q. and J. Wang, *CFD study of mixing and segregation in CFB risers: Extension of EMMS drag model to binary gas-solid flow*. Chemical Engineering Science, 2015. 122: p. 637-651.

10. Chalermssinsuwan, B., et al., *Revised fluidization regime characterization in high solid particle concentration circulating fluidized bed reactor*. International Journal of Multiphase Flow, 2014. 66: p. 26-37.
11. Gómez, M., et al., *Reprint of "Experiences in sulphur capture in a 30 MWth Circulating Fluidized Bed boiler under oxy-combustion conditions"*. Applied Thermal Engineering, 2015. 74: p. 69-74.
12. Oke, O., P. Lettieri, and L. Mazzei, *An investigation on the mechanics of homogeneous expansion in gas-fluidized beds*. Chemical Engineering Science, 2015. 127: p. 95-105.
13. Chalermssinsuwan, B., D. Gidaspow, and P. Piumsomboon, *In-depth system parameters of transition flow pattern between turbulent and fast fluidization regimes in high solid particle density circulating fluidized bed reactor*. Powder Technology, 2014. 253: p. 522-536.
14. Niven, R.K., *Physical insight into the Ergun and Wen & Yu equations for fluid flow in packed and fluidised beds*. Chemical Engineering Science, 2002. 57(3): p. 527-534.
15. Yang, W.-c., *Handbook of fluidization and fluid-particle systems*. 2003: CRC press.
16. Choi, S., et al., *Catalytic cracking process using fast fluidization for the production of light olefins from hydrocarbon feedstock*. 2012, Google Patents.
17. Rhodes, M.J., *Introduction to particle technology*. 2008: John Wiley & Sons.
18. Rowe, P.N. and A.W. Nienow, *Particle mixing and segregation in gas fluidised beds. A review*. Powder Technology, 1976. 15(2): p. 141-147.
19. Kunii, D. and O. Levenspiel, *CHAPTER 6 - Bubbling Fluidized Beds*, in *Fluidization Engineering (Second Edition)*. 1991, Butterworth-Heinemann: Boston. p. 137-164.
20. La Nauze, R., *Fundamentals of coal combustion in fluidised beds*. Chemical engineering research & design, 1985. 63(1): p. 3-33.
21. Rajan, R.R. and C. Wen, *A comprehensive model for fluidized bed coal combustors*. AIChE Journal, 1980. 26(4): p. 642-655.
22. Patankar, S., *Numerical heat transfer and fluid flow*. 1980: CRC press.

23. Chao, Z., et al., *Derivation and validation of a binary multi-fluid Eulerian model for fluidized beds*. Chemical Engineering Science, 2011. 66(16): p. 3605-3616.
24. Syamlal, M., *The particle-particle drag term in a multiparticle model of fluidization*. 1987, EG and G Washington Analytical Services Center, Inc., Morgantown, WV (USA).
25. Sun, J., J. Wang, and Y. Yang, *CFD investigation of particle fluctuation characteristics of bidisperse mixture in a gas–solid fluidized bed*. Chemical Engineering Science, 2012. 82: p. 285-298.
26. Shuai, W., et al., *Predictions of coal combustion and desulfurization in a CFB riser reactor by kinetic theory of granular mixture with unequal granular temperature*. Fuel Processing Technology, 2014. 126: p. 163-172.
27. Van Wachem, B., et al., *CFD modeling of gas–fluidized beds with a bimodal particle mixture*. AIChE Journal, 2001. 47(6): p. 1292-1302.
28. Jiradilok, V., D. Gidaspow, and R.W. Breault, *Computation of gas and solid dispersion coefficients in turbulent risers and bubbling beds*. Chemical Engineering Science, 2007. 62(13): p. 3397-3409.
29. Jiradilok, V., et al., *Computation of turbulence and dispersion of cork in the NETL riser*. Chemical Engineering Science, 2008. 63(8): p. 2135-2148.
30. Mahanta, P., R.S. Patil, and M. Pandey, *Effect of Particle Size and Sand Inventory on Wall-to-Bed Heat transfer Characteristics of Circulating Fluidized Bed Riser*. Lecture Notes in Engineering and Computer Science, 2010.
31. Ajbar, A., K. Alhumazi, and M. Asif, *Improvement of the Fluidizability of Cohesive Powders through Mixing with Small Proportions of Group A Particles*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2005. 83(6): p. 930-943.
32. Mostafazadeh, M., H. Rahimzadeh, and M. Hamzei, *Numerical analysis of the mixing process in a gas–solid fluidized bed reactor*. Powder Technology, 2013. 239: p. 422-433.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

การคำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf})

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g d_p^3}{\mu_g^2} \quad (ก1)$$

$$\left(\frac{\rho_g d_p u_{mf}}{\mu_g} \right) = (C_1^2 + C_2 Ar)^{0.5} - C_1 \quad (ก2)$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$Ar = \frac{1.29(2500 - 1.29) * 9.81 * (0.00035)^3}{(1.85 * 10^{-5})^2} = 3961.28$$

$$u_{mf} = \left[(33.7^2 + 0.0408 * 3961.28)^{0.5} - 33.7 \right] * \left(\frac{1.85 * 10^{-5}}{1.29 * 2500} \right) = 0.095 \text{ m/s}$$

การคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Minimum turbulent velocity, U_c)

$$U_c = 0.463 Ar^{0.145} \sqrt{g D_t} \quad (ก3)$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$U_c = 0.463 * (3961.28)^{0.145} \sqrt{9.81 * 0.35} = 2.85 \text{ m/s}$$

การคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดช่วงการไหลแบบฟลูอิดเซชันความเร็วสูง (Minimum transport velocity, U_{tr})

$$U_{tr} = \frac{0.169 * Ar^{0.545} \left(\frac{D_t}{D_p} \right)^{0.3} \mu_g}{d_p \rho_g}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$U_{tr} = \frac{0.169 * (3961.28)^{0.545} * \left(\frac{0.35}{0.00035} \right)^{0.3} * (1.85 * 10^{-5})}{(0.00035) * (1.29)} = 5.03 \text{ m/s}$$

เมื่อ $Ar =$ ตัวเลขไร้นหน่วยอาร์คิมิดีส (-)

$D_t =$ เส้นผ่านศูนย์กลางเครื่องปฏิกรณ์ (เมตร)

$D_p =$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของแข็ง (เมตร)

$\rho_s =$ ความหนาแน่นอนุภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$\rho_g =$ ความหนาแน่นแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$g =$ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

$\mu_g =$ ค่าความหนืดของแก๊ส (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer coefficient, h)

$$q = hA\Delta T \quad (ก4)$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$h = \frac{10440260}{(7.96)(1199 - 673)} = 2495 \text{ W/m}^2\text{K}$$

เมื่อ $q =$ อัตราการถ่ายโอนความร้อน (วัตต์)

$h =$ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อน (วัตต์ต่อเมตรกำลังสองเคลวิน)

$A =$ พื้นที่ในการถ่ายโอนความร้อน (เมตรกำลังสอง)

$\Delta T =$ ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างแก๊สจากการเผาไหม้และอุณหภูมิของถ่านหิน (เคลวิน)

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข1 ค่าของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมที่ความเร็วแก๊สป้อนเข้าแตกต่างกัน ของส่วนที่หนึ่ง โดยคำนวณจากอนุภาคโฟลทแฮม

Case	Gas velocity (m/s)	D_x (m ² /s)	D_y (m ² /s)	θ (m ² /s ²)	MI (-)
1	0.125	0.018	0.026	0.053	0.903
2	0.250	0.012	0.032	0.109	0.922
3	0.500	0.012	0.043	0.169	0.982
4	0.750	0.012	0.053	0.204	0.995
5	1.000	0.009	0.058	0.160	0.916

ตารางที่ ข2 ค่าของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมที่ภาวะแตกต่างกัน ของส่วนที่สองโดยคำนวณจากอนุภาคทราย

Case	Gas velocity (m/s)	Coal diameter (μ m)	Sand diameter (μ m)	Initial sand height (m)	D_x (m ² /s)	D_y (m ² /s)	θ (m ² /s ²)	MI (-)
	(A)	(B)	(C)	(D)				
1	0.66	500	200	0.5	0.068	0.062	0.115	0.074
2	2.65	500	200	0.5	0.776	0.609	1.791	0.118
3	0.66	1000	200	0.5	0.024	0.029	0.052	0.037
4	2.65	1000	200	0.5	1.030	0.525	1.753	0.317
5	0.66	500	250	0.5	0.249	0.151	0.159	0.001
6	2.65	500	250	0.5	2.750	0.710	2.469	0.313
7	0.66	1000	250	0.5	0.428	0.208	0.150	0.000
8	2.65	1000	250	0.5	0.916	0.849	2.301	0.383
9	0.66	500	200	0.7	0.095	0.051	0.134	0.429

Case	Gas velocity (m/s) (A)	Coal diameter (μm) (B)	Sand diameter (μm) (C)	Initial sand height (m) (D)	D_x (m^2/s)	D_y (m^2/s)	θ (m^2/s^2)	MI (-)
10	2.65	500	200	0.7	0.910	0.988	1.562	0.194
11	0.66	1000	200	0.7	0.412	0.182	0.204	0.376
12	2.65	1000	200	0.7	0.811	0.764	2.003	0.551
13	0.66	500	250	0.7	0.168	0.107	0.252	0.019
14	2.65	500	250	0.7	4.797	1.170	2.851	0.611
15	0.66	1000	250	0.7	0.070	0.070	0.195	0.004
16	2.65	1000	250	0.7	2.121	0.845	2.860	0.929
17 (mean)	1.66	750	225	0.6	1.328	0.770	1.745	0.342

ตารางที่ ข3 ค่าของตัวแปรตอบสนองต่อการผสมที่ภาวะแตกต่างกัน ของส่วนที่สามโดยคำนวณจากอนุภาคทราย

Case	Coal dust diameter (μm) (E)	Coal dust quantity (ton) (F)	D_x (m^2/s)	D_y (m^2/s)	θ (m^2/s^2)	MI (-)
18	15	5	0.024	0.077	0.010	0.754
19	15	15	1.539	1.790	0.494	0.722
20	75	5	2.137	4.416	0.828	0.580
21	75	15	0.074	0.111	0.675	0.432
22	45	10	0.064	0.089	0.691	0.916
23 (อ้างอิง)	-	-	3.721	1.168	1.848	0.396

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนศพล ตั้งพัฒนา เกิดเมื่อวันอังคารที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2534 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2557 ได้มีผลงานทางด้านวิชาการดังนี้

1. International Conference - Topic "CFD MODELING OF BINARY MIXTURE HYDRODYNAMICS IN GAS-SOLID PARTICLE FLUIDIZED BED REACTOR SYSTEM". Advancement in Petroleum and Chemical Engineering Technology and Applications International Conference 2015 (APCETA 2015), Krabi, Thailand (2015)

2. International Journal - Tangpattanatana, T., Jiradilok, V., Piumsomboon, P., & Chalermssinsuwan, B. (2 0 1 6). CFD MODELING OF BINARY MIXTURE HYDRODYNAMICS IN GAS-SOLID PARTICLE FLUIDIZED BED REACTOR SYSTEM. Jurnal Teknologi, 78(6-5).