

ผลของแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมในท่อไรเซอร์ของเครื่อง
ปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยการจำลองแบบซีเอฟดี

นายรัชชัย สํารวมเพียรสกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

EFFECT OF RING BAFFLES ON HYDRODYNAMICS AND MIXING IN A RISER OF
CIRCULATING FLUIDIZED BED REACTOR USING CFD SIMULATION

Mr. Thatchai Samruamphianskun

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีต่ออุทกพลศาสตร์และ
การผสมในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบ
หมุนเวียนโดยการจำลองแบบซีเอฟดี

โดย

นายรัชชัย ส้ารวมเพียรสกุล

สาขาวิชา

เทคโนโลยีเชื้อเพลิง

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุกษาท)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชดารา)

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

ธัชชัย สำรวมเพ็ญรสกุล: ผลของแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยการจำลองแบบซีเอฟดี. (EFFECT OF RING BAFFLES ON HYDRODYNAMICS AND MIXING IN A RISER OF CIRCULATING FLUIDIZED BED REACTOR USING CFD SIMULATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ.ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, 148 หน้า

งานวิจัยนี้ทำการจำลองภาวะท่อไรเซอร์แบบมีและไม่มีติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์และการผสมที่เกิดขึ้นด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณและใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อหาผลของปัจจัยต่างๆ ผลการจำลองพบว่า ค่าพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะค่าพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะ และอันตรกิริยาระหว่างพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะกับระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าความแปรปรวนของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี และระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ อันตรกิริยาระหว่างพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะกับระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ และ อันตรกิริยาระหว่างพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะกับจำนวนของแผ่นปะทะเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยรวมทั้งท่อไรเซอร์ ในส่วนของตัวแปรดำเนินการที่ส่งผลกระทบต่อค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ที่ติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนในกรณีศึกษาที่ให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์สูงสุด และกรณีศึกษาที่ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด นั้นเป็นตัวแปรเดียวกันคือ ค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้า และฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง และผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในการติดตั้งแผ่นปะทะทั้งสองกรณีพบว่า ตัวแปรที่ส่งผลสองลำดับแรกเป็นตัวแปรเดียวกันคือ ค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้า และอันตรกิริยาของความเร็วของแก๊สที่ทางเข้า-ขนาดของอนุภาคของแข็ง-ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง อีกทั้งพบว่า รูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวนมีผลต่อค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งและค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ จากผลการจำลองทั้งหมดจะได้รูปแบบในการใส่ แผ่นปะทะแบบวงแหวนพร้อมทั้งภาวะดำเนินการที่สามารถปรับปรุงอุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซอร์พร้อมทั้งแบบจำลองการถดถอยเพื่อความสะดวกในการนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้ออกแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนและหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมในอนาคต

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออนิสิต.....
 สาขาวิชา.....เทคโนโลยีเชื้อเพลิง.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5372256923: MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: RING BAFFLE/ CIRCULATING FLUIDIZED BED/ CFD SIMULATION

THATCHAI SAMRUAMPHIANSKUN: EFFECT OF RING BAFFLES ON HYDRODYNAMICS AND MIXING IN RISER OF CIRCULATING FLUIDIZED BED REACTOR USING CFD SIMULATION. ADVISOR: BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC.PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., 143 pp.

In this research, the risers of circulating fluidized bed reactors with and without ring baffle were simulated to study hydrodynamics and mixing by using computational fluid dynamics simulation and to examine factor effects by using design of experimental method. The results showed that baffle opening area and interaction between baffle opening area-space between baffles were the parameters that affected standard deviation of solid volume fraction in radial direction. Space between baffles, interaction between baffle opening area-space between baffles and interaction between baffle opening area-number were the parameters that affected average of solid volume fraction in the riser. The operating condition parameters that had an effect on the average of solid volume fraction in the riser for both ring baffle configuration with lowest standard deviation of radial solid volume fraction and highest averaged solid volume fraction in system cases were inlet gas velocity and solid mass flux but the first two operating condition parameters that had an effect on the standard deviation of solid volume fraction in radial direction were inlet gas velocity and interaction between inlet gas velocity-diameter of solid-density of solid. In addition, the shapes of ring baffle were also found to have an effect on the standard deviation of solid volume fraction in radial direction and average of solid volume fraction in the riser. From all simulation results, the optimum ring baffle configuration and operating condition which were improving hydrodynamics and mixing in riser was proposed. In addition, a regression model for predicting the gas-solid mixing was obtained for further using in the design stage of a circulating fluidized bed reactor.

Department : Chemical Technology

Field of Study : Fuel Technology

Academic Year : 2011

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ผลของแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยการจำลองแบบซีเอฟดีฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำด้านวิชาการ และข้อคิดเห็นต่างๆ ตลอดจนการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัยฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พฤษชาติ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อาจารย์ ดร. ประพันธ์ คุชฌาธา และ ดร. บุญรอด สัจจกุลนุกิจ ที่กรุณาเป็นกรรมการคุมสอบและให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ทูน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ที่ให้ทุนสนับสนุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ทุนการศึกษาจากคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

สุดท้ายขอกราบขอบคุณพระคุณบิดา มารดา ผู้อยู่เบื้องหลังที่เป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นแรงผลักดันจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	6
2.1.1 ช่วงการไหล (Regime).....	6
2.1.2 ข้อดีข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง.....	9
2.2 การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart.....	10
2.3 สิ่งกีดขวางภายใน (internal).....	11
2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment).....	12
2.4.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k	12
2.4.2 การออกแบบ 2^5	14

	หน้า
2.4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA).....	16
2.4.4 การสร้างแบบจำลองการถดถอย.....	18
2.5 การจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD).....	19
2.5.1 ระเบียบวิธี (Methodology).....	20
2.5.2 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization method).....	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
3.1 การศึกษาแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model).....	33
3.1.2 การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test).....	39
3.2 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน (Ring baffle configuration).....	39
3.3 การศึกษาผลของตัวแปรการดำเนินการ (Operating condition).....	43
3.4 การศึกษาผลของรูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวน.....	45
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	46
4.1 การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
4.2 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อโรเตอร์.....	53
4.2.1 การออกแบบการทดลอง.....	53
4.2.2 อุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics).....	59
4.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อโรเตอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน.....	78
4.3.1 การออกแบบการทดลอง.....	78
4.3.2 อุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics).....	90
4.4 การศึกษาผลของรูปร่างแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อโรเตอร์.....	121
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	131
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	131

5.1.1 การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย.....	131
5.1.2 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีผลต่อ อุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซอร์.....	132
5.1.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการ ผสมภายในท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน.....	133
5.1.4 การศึกษาผลของรูปร่างแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ และการผสมภายในท่อไรเซอร์.....	134
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	134
รายการอ้างอิง.....	135
ภาคผนวก.....	139
ภาคผนวก ก.....	140
ภาคผนวก ข.....	142
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	148

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะเด่นของสิ่งกีดขวางภายในแบบต่างๆ.....	13
2.2	การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ⁵	15
3.1	การออกแบบการทดลองแบบ 2 ⁵ ของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบ วงแหวน.....	42
3.2	การออกแบบการทดลองแบบ 2 ⁴ ของตัวแปรดำเนินการ.....	44
4.1	การออกแบบการทดลองแบบ 2 ⁵ ของการศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้ง และค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลอง.....	54
4.2	การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าความแปรปรวน ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี กรณีศึกษาตัวแปรติดตั้ง แผ่นปะทะ.....	56
4.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาตร เฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ กรณีศึกษาตัวแปรติดตั้งแผ่นปะทะ.....	57
4.4	การออกแบบการทดลองแบบ 2 ⁴ ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ และค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลอง.....	79
4.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการโดย ใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนตามกรณีศึกษาที่ 11 และใช้ ค่าตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์.....	81
4.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการโดย ใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนตามกรณีศึกษาที่ 16 และใช้ ค่าตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์.....	81
4.7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการโดย ใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนตามกรณีศึกษาที่ 11 และใช้ ค่าตอบสนองเป็นค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง ในแนวรัศมี.....	84

ตารางที่	หน้า
4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการโดยใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนตามกรณีศึกษาที่ 16 และใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี.....	84
4.9 การแปลงตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย.....	119
4.10 การแปลงตัวแปรดำเนินการให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย.....	120
4.11 การศึกษาผลของรูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวนและค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลองภายใต้ภาวะดำเนินการที่ให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อ โรเซอร์สูงสุดหรือกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 โดยใช้ท่อโรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะที่ 11 ซึ่งให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อโรเซอร์สูงสุด.....	122
4.12 การศึกษาผลของรูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวนและค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลองภายใต้ภาวะดำเนินการที่ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุดหรือกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14 โดยใช้ท่อโรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะที่ 16 ซึ่งให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด.....	126

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน.....	7
2.2	ช่วงการไหลสำหรับฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนในระบบแก๊สและของแข็ง (ก) ฟลูอิด์เบดแบบปั่นป่วน (ข) ฟลูอิด์เบดแบบความเร็วสูง และ (ค) ฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง.....	8
2.3	แผนผังการจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart.....	11
2.4	รูปทรงเรขาคณิตของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนของ Therdthienwong และคณะ.....	21
2.5	ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ ด้วยระเบียบ วิธีไฟไนต์วอลุ่ม.....	22
3.1	แผนภาพเค้าร่างของ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดในการทดลองของ Knowlton และคณะ.....	32
3.2	แผนภาพเค้าร่างของท่อไรเซอร์ที่จะใช้จำลอง (ก) แบบยังไม่ทำการติดตั้ง แผ่นปะทะและ (ข) ท่อไรเซอร์ที่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะ.....	33
3.3	แสดงการแบ่งเซลล์คำนวณ (ก) 2,750 (ข) 5,500 และ (ค) 11,000 เซลล์ คำนวณ.....	41
3.4	รูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวน (ก) สี่เหลี่ยม (ข) สามเหลี่ยม และ (ค) ครึ่งวงกลม.....	45
4.1	การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งเฉลี่ย ณ ช่วงเวลาต่างๆ.....	47
4.2	การกระจายตัวตามแนวแกนของความดันลดต่อความยาวเฉลี่ย ณ ช่วง เวลาต่างๆ.....	48
4.3	การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งที่คำนวณ ได้จากแบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่แบบต่างๆ.....	49
4.4	การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งที่เซลล์การ คำนวณต่างๆ.....	51

ภาพที่	หน้า	
4.5	การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าความดันลดต่อความยาวเฉลี่ยตั้งแต่ วินาทีที่ 20-40 วินาทีที่เซลล์คำนวณต่างๆ.....	52
4.6	ผลของตัวแปรหลักและผลของอันตรกิริยา (ก) ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อ ความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี (ข) ผล ของอันตรกิริยาที่มีต่อความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของ ของแข็งในแนวรัศมี (ค) ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยของสัดส่วน เชิงปริมาตรของของแข็ง และ(ง) ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าเฉลี่ยของ สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง.....	57
4.7	พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิง ปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้พื้นที่เปิดของแผ่นปะทะและระยะห่างระหว่าง แผ่นปะทะต่างๆ กัน.....	60
4.8	พื้นผิวตอบสนองของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายใน ท่อไรเซอร์ โดยรูป (ก) เป็นกรณีที่ใช้แผ่นปะทะจำนวน 14 แผ่น ส่วน รูป (ข) เป็นกรณีที่ใช้แผ่นปะทะ 5 แผ่น.....	61
4.9	การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าความดันลดต่อความยาวเฉลี่ยวินาที ที่ 20-40 ของกรณีศึกษาที่ 11 16 18 และท่อไรเซอร์ที่ไม่มีการติดตั้งแผ่น ปะทะ.....	63
4.10	คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่เวลา 30 วินาที (ก) ท่อไรเซอร์ที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นปะทะ (ข) กรณีที่ 11 (ค) กรณี ที่ 16 และ (ง) กรณีที่ 18.....	64
4.11	การกระจายตัวในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยตั้ง แต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่ความสูง (ก) 3 เมตร (ข) 6 เมตร (ค) 9 เมตร และ (ง) 12 เมตร.....	66
4.12	การกระจายตัวตามแนวแกนของความเร็วในแนวแกนของของแข็งเฉลี่ย ตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาทีที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ.....	68
4.13	การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าความเร็วในแนวแกน ของของแข็งเฉลี่ยตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะ กรณีศึกษาต่างๆ.....	69

ภาพที่	หน้า
4.14	71
4.15	72
4.16	73
4.17	75
4.18	76
4.19	77
4.20	82
4.21	87
4.22	88

ภาพที่	หน้า	
4.23	<p>พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมครอน และใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11.....</p>	89
4.24	<p>พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 และใช้อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมครอน และมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร.....</p>	91
4.25	<p>พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 และใช้อนุภาคของแข็งขนาด 50 ไมครอน และมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร.....</p>	92
4.26	<p>พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 และใช้อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมครอน และมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร.....</p>	93
4.27	<p>พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 และใช้อนุภาคของแข็งขนาด 50 ไมครอน และมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร.....</p>	94
4.28	<p>พื้นผิวตอบสนองของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์เมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11.....</p>	95

ภาพที่	หน้า
4.29	96
4.30	99
4.31	100
4.32	101
4.33	102
4.34	103
4.35	104
4.36	105

ภาพที่	หน้า	
4.37	การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็ง ตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ.....	107
4.38	การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งตั้งแต่วินาที ที่ 20-40 วินาที ตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ ที่การติดตั้งแผ่นปะทะ กรณีศึกษาต่างๆ.....	108
4.39	การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของของแข็ง ตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ.....	110
4.40	การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณี ศึกษาต่างๆ.....	111
4.41	การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของแก๊ส ทุกความสูงตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณี ศึกษาต่างๆ.....	113
4.42	การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของแก๊สตั้งแต่วินาที ที่ 20-40 วินาที ตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ ที่การติดตั้งแผ่นปะทะ กรณีศึกษาต่างๆ.....	114
4.43	การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของ แก๊สตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ.....	115
4.44	การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของแก๊สตั้งแต่วินาที ที่ 20-40 วินาที ตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ที่การติดตั้งแผ่นปะทะ กรณีศึกษาต่างๆ.....	118
4.45	การกระจายตัวของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวความสูง ของท่อไรเซอร์เมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการ ติดตั้งที่ 11 และสภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3.....	123
4.46	คอนทิวรัศมีค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะ ตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 11 และสภาวะดำเนินการตามกรณี ศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 โดยใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรง (ก) สี่เหลี่ยม (ข) สามเหลี่ยม และ (ค) ครึ่งวงกลม.....	124

ภาพที่	หน้า	
4.47	การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 11 และภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3.....	125
4.48	การกระจายตัวของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวความสูงของท่อไรเซอร์เมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 16 และภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14.....	128
4.49	คอนทิวรัศมีค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 16 และภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14 โดยใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรง (ก) สีเหลือง (ข) สามเหลี่ยม และ (ค) ครึ่งวงกลม.....	129
4.50	การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 16 และภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14.....	130
ข1	(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.1.....	142
ข2	(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.2.....	143
ข3	(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.3.....	144
ข4	(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.4.....	145
ข5	(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.5.....	146
ข6	(ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.6.....	147

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนได้ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ รวมไปถึงการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลผ่านกระบวนการแกซีฟิเคชันเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน (Yin และคณะ, 2002; Siedlecki และ De Jong, 2011) เนื่องจากข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ คือ เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีการกระจายความร้อนที่ดี และสามารถใช้ได้กับเชื้อเพลิงหลายชนิด เป็นต้น เครื่องปฏิกรณ์นี้จะเป็นระบบการไหลหลายวัฏภาคซึ่งประกอบขึ้นด้วยส่วนประกอบหลัก ได้แก่ ท่อไรเซอร์ ท่อดาวเนอร์ ท่อป้อนกลับและไซโคลน มีหลักการทำงาน คือ ของไหลตัวกลางที่สนใจในงานวิจัยนี้ ได้แก่ แก๊สจะไหลผ่านของแข็งด้วยความเร็วที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนให้ของแข็งนั้นมีพฤติกรรมคล้ายกับของไหลภายในท่อไรเซอร์ ซึ่งส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเคมีก็จะเกิดขึ้นภายในท่อไรเซอร์นี้ จากนั้น ของแข็งและแก๊สก็จะถูกนำไปแยกออกจากกันด้วยไซโคลน ของแข็งที่มีขนาดอนุภาคเล็กก็จะหลุดออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนแก๊สและของแข็งที่ยังมีขนาดอนุภาคใหญ่ก็จะถูกป้อนกลับเข้ามายังท่อไรเซอร์เพื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีอีกครั้งผ่านทางท่อดาวเนอร์และท่อป้อนกลับ การปรับปรุงท่อไรเซอร์ที่เปรียบเสมือนหัวใจของเครื่องปฏิกรณ์นี้จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ภายในท่อไรเซอร์ยังประสบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการไหลต่างๆ ประสิทธิภาพของกระบวนการที่ได้มีค่าต่ำกว่าเป้าหมายที่คาดหวังไว้ซึ่งเกิดจากการเกิดปรากฏการณ์ของแข็งไหลย้อนกลับ (Back-mixing) และการกระจายตัวของแก๊สและของแข็งที่ไม่สม่ำเสมอทั้งในแนวรัศมีและในแนวแกน (Zhang และคณะ, 2008) จากปัญหาดังกล่าวนี้เองทำให้มีงานวิจัยต่อๆ มาหลายชิ้นที่พยายามศึกษาอุทกพลศาสตร์ ซึ่งก็คือ การศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของของไหลและการผสมภายในท่อไรเซอร์ที่ผ่านการปรับปรุงต่างๆ โดยวิธีการหนึ่งที่มีความน่าสนใจและมีประสิทธิภาพ คือ การติดตั้งสิ่งกีดขวางภายใน (Internal) (Jiang และคณะ, 1991; Therdthianwong และคณะ, 2003; Zhang และคณะ, 2009)

สิ่งกีดขวางภายใน (Internal) ที่ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพจะพบมากอยู่สองประเภท คือ ท่อภายในและแผ่นปะทะ โดยท่อภายในนั้นยังสามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ ตามทิศการติดตั้ง คือ ท่อภายในแนวตั้ง (Vertical banks) ท่อภายในแนวนอน (Horizontal banks) ซึ่ง

ท่อภายในแนวตั้งจะช่วยในเรื่องการแลกเปลี่ยนความร้อนและลดการสึกกร่อนเมื่อเกิดการเสียดสี (Volk, 1962) ส่วนท่อภายในแนวนอนจะช่วยเรื่องการจำกัดขนาดของฟองแก๊สและช่วยให้เกิดการกระจายตัวของแก๊สมากขึ้น (Olsson, 1995) ในส่วนของแผ่นปะทะนั้นจะพบได้หลายชนิดแต่ที่มีการใช้งานมากจะมีอยู่ 4 ชนิด คือ แบบตะแกรง (Wire mesh) ซึ่งจะมีข้อดี คือ สามารถช่วยทำให้ฟองแก๊สแตกตัวและมีการสึกกร่อนน้อย (Dutta และ Suci, 1992) แบบหน้าพรุน (Perforate plate) ที่ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งในแนวรัศมีและช่วยเพิ่มความถี่ของฟองแก๊ส (Hartholt, 1997) แบบบานเกล็ด (Louver plate) ที่ช่วยเพิ่มการผสมระหว่างแก๊สและของแข็งและเพิ่มการกระจายตัวของฟองแก๊สในแนวรัศมี (Jin, 1982) และแบบวงแหวน (Ring) ที่ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของพื้นที่ว่างในแนวรัศมี เพิ่มการผสมของแก๊สและของแข็งในแนวรัศมี เพิ่มประสิทธิภาพในการสัมผัสกันของแก๊สและของแข็ง ช่วยลดการเกิดการผสมแบบย้อนกลับของอนุภาคของแข็ง (Solid back-mixing) รวมทั้งเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยาเคมี (Jiang, Bi และคณะ, 1991)

อย่างไรก็ตาม พบว่า งานวิจัยที่ผ่านมายังมีการศึกษาผลของการติดตั้งแผ่นปะทะเพียงแค่ผิวเผิน เท่านั้น ยังมีปัจจัยอีกมากมายในการติดตั้งแผ่นปะทะที่ส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในกระบวนการ อาทิเช่น ตำแหน่งที่ติดตั้ง จำนวนแผ่นปะทะ พื้นที่การเปิด รวมถึงระยะห่าง ความหนา และรูปร่างของแผ่นปะทะ ซึ่งจำเป็นจะต้องพิจารณาไปด้วยกันอย่างเป็นระบบ ด้วยเหตุดังกล่าวจึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้ที่จะใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) ในการวิจัยเพื่อหาผลของปัจจัยต่างๆ รวมถึงอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยโดยการจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณหรือซีเอฟดี (Computational Fluids Dynamic, CFD) วิธีนี้เป็นวิธีการที่มีความสำคัญต่อการออกแบบกระบวนการ เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้งานง่าย สะดวกรวดเร็ว และสามารถลดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับทดลองจริง โดยโปรแกรมที่ได้เลือกใช้ คือ โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT[®]

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) จำลองภาวะท่อโรเตอร์แบบมีและไม่มีติดตั้งแผ่นปะทะของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์แบบหมุนเวียนเพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์และการผสมที่เกิดขึ้นด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

- 2) เสนอรูปแบบในการใส่แผ่นปะทะเพื่อปรับปรุงอุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) จำลองการไหลภาวะท่อไรเซอร์แบบที่ยังไม่มีการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน เพื่อหาแบบจำลองที่ทำนายผลได้ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด
- 2) นำแบบจำลองการไหลในข้อหนึ่งมาทำการเพิ่มแผ่นปะทะแบบวงแหวนในรูปแบบการติดตั้งต่างๆ กันเพื่อทำนายพฤติกรรมการไหลภายในและเปรียบเทียบเพื่อหารูปแบบการติดตั้งที่ให้ผลการผสมที่ดีที่สุด
- 3) นำรูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่ให้ผลการผสมดีที่สุดมาศึกษาผลของภาวะการดำเนินงาน (Operating condition)

1.4 ข้อจำกัดของการวิจัย

- 1) แบบจำลองการไหลที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นแบบ 2 มิติ
- 2) เป็นการจำลองในภาวะอุณหภูมิคงที่เท่านั้น (Cold model)
- 3) อนุภาคของแข็งในการจำลองมีขนาดและสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกันทั้งหมด

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน เป็นเครื่องปฏิกรณ์เคมีรูปแบบหนึ่งที่ภายในมีอนุภาคของแข็งและของไหลซึ่งมีอันตรกิริยาระหว่างกัน โดยอนุภาคของแข็งจะมีพฤติกรรมเคลื่อนที่คล้ายกับของไหล นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์ยังมีกลไกในการแยกอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่สมบูรณ์และป้อนกลับเข้าสู่กระบวนการอีกครั้ง

อุทกพลศาสตร์ เป็นสาขาวิชาการย่อยของกลศาสตร์ของไหล ที่ศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งหมายรวมถึงของเหลวและแก๊ส

แผ่นปะทะแบบวงแหวน คือ สิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นแผ่นกั้นโดยส่วนที่ยื่นออกมาเป็นวงกลมคล้ายวงแหวน

CFD ย่อมาจาก Computational Fluid Dynamics ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอาศัยความสามารถของคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ช่วยในการคำนวณ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อโรเตอร์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์แบบหมุนเวียนที่ทำนายอุทกพลศาสตร์และการผสมได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง
- 2) ได้แนวทางในการปรับปรุงท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์แบบหมุนเวียนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น
- 3) ได้องค์ความรู้ที่จะเพิ่มขอบเขตการประยุกต์ใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์แบบหมุนเวียน
- 4) ได้นักวิชาการ/นักวิจัยรุ่นใหม่ที่มีความสนใจและชำนาญการด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณซึ่งในปัจจุบันมีจำนวนไม่มาก
- 5) ได้ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการหรือเอกสารการประชุมวิชาการ อย่างน้อยจำนวน 1 ฉบับ

1.7 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ทำการจำลองภาวะท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์แบบหมุนเวียนเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ใช้
- 3) เสนอรูปแบบการใส่แผ่นปะทะภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์แบบหมุนเวียนด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง
- 4) จำลองภาวะท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิซ์แบบหมุนเวียนที่ได้ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะ เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลจากเครื่องปฏิกรณ์ปกติ

- 5) นำรูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะที่ให้การผสมดีที่สุดมาทดสอบผลของภาวะดำเนินการ (operating condition) เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลจากเครื่องปฏิกรณ์ปกติ
- 6) วิเคราะห์ผล สรุปผล เขียนรายงาน และวิทยานิพนธ์

1.8 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

- บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ข้อจำกัดของการวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย
- บทที่ 2 ฟลูอิดไดนามิกส์แบบหมุนเวียน สิ่งกีดขวางภายใน การออกแบบการทดลอง (Design of experiment) พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3 แบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน (Ring baffle configuration) ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซออร์ การศึกษาผลของตัวแปรภาวะดำเนินการ (Operating condition) ผลของรูปร่างแผ่นปะทะแบบวงแหวน
- บทที่ 4 ผลการจำลองภาวะท่อไรเซออร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่ได้ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะ เปรียบเทียบผลที่ได้กับผลจากเครื่องปฏิกรณ์ปกติ และผลการจำลองที่ภาวะดำเนินการต่างๆ
- บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

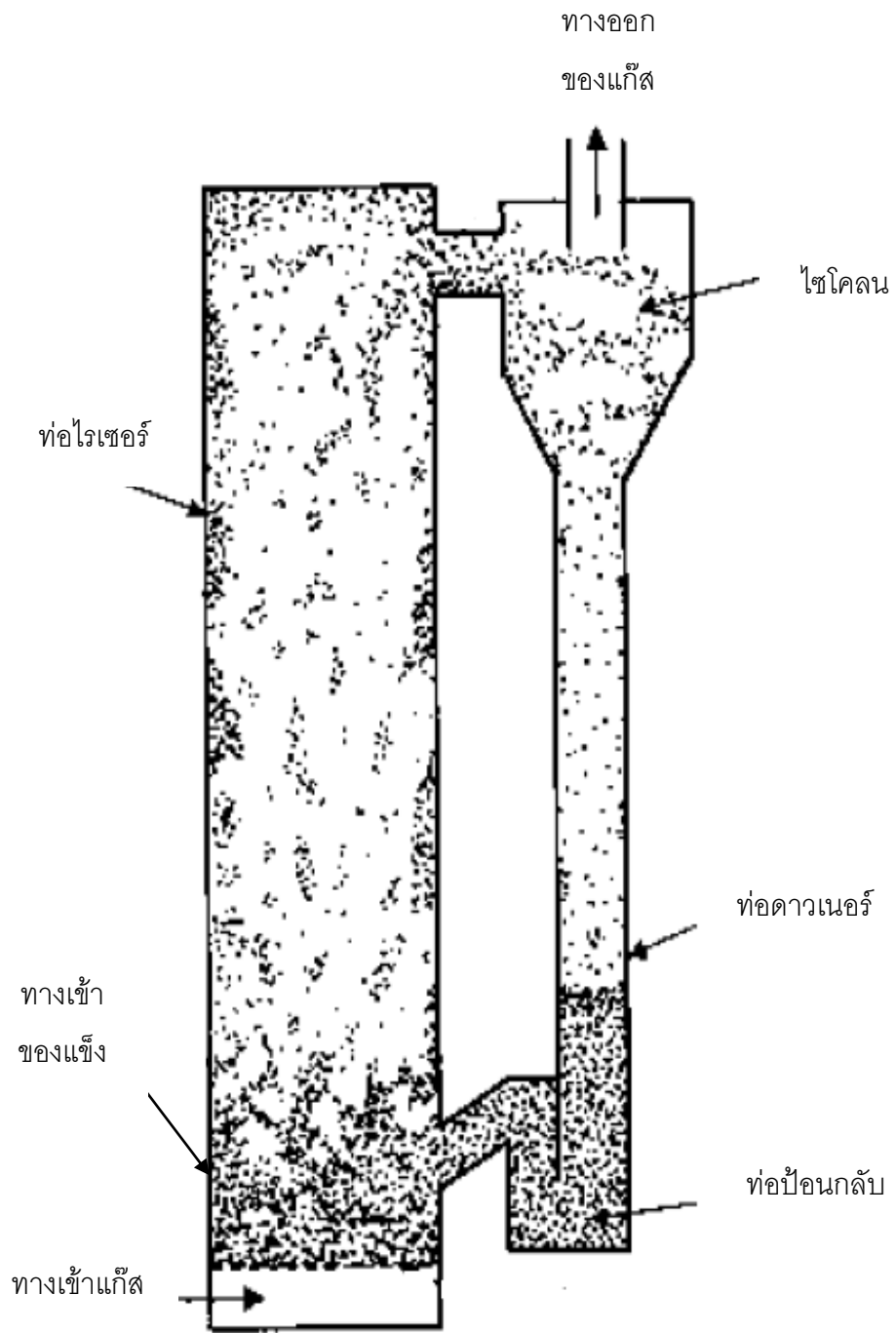
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียน

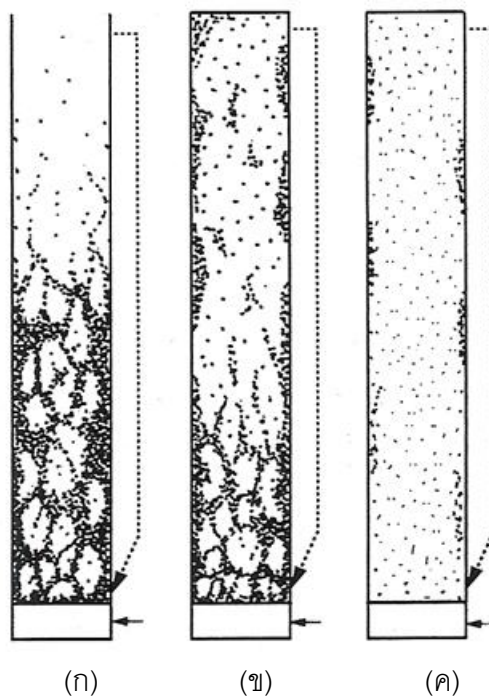
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียนจัดเป็นรูปแบบหนึ่งของระบบเครื่องปฏิกรณ์การไหลหลายวัฏภาคที่ถูกใช้มาตั้งแต่ปี 1940 ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา (Squires, 1994) จากนั้น จะเริ่มพบได้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปตั้งแต่ปี 1970 (Reh, 1986) เป็นต้นมาโดยการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะเป็นลักษณะของกระบวนการแก๊ส-ของแข็ง เช่น การผลิตแก๊สจากเชื้อเพลิงแข็ง (Gasification) การเผาไหม้ (Combustion) หรือแม้กระทั่งการอบแห้ง ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีองค์ประกอบหลัก คือ ท่อไรเซอร์ ท่อดาวเนอร์ ท่อป้อนกลับและไซโคลน ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแต่ละส่วนประกอบจะมีหน้าที่แตกต่างกันออกไป มีหลักการทำงาน คือ ของไหลตัวกลาง ได้แก่ แก๊สหรือของเหลว จะไหลผ่านของแข็งด้วยความเร็วที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนให้ของแข็งนั้นมีพฤติกรรมคล้ายกับของไหลภายในท่อไรเซอร์ ซึ่งส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเคมีก็เกิดขึ้นภายในท่อไรเซอร์นี้ จากนั้น ของแข็งและแก๊สก็จะถูกนำไปแยกออกจากกันด้วยไซโคลน ของแข็งที่มีขนาดอนุภาคเล็กก็จะหลุดออกจากเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนแก๊สและของแข็งที่ยังมีขนาดอนุภาคใหญ่ก็จะถูกป้อนกลับเข้ามายังท่อไรเซอร์เพื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีอีกครั้งผ่านทางท่อดาวเนอร์และท่อป้อนกลับ

2.1.1 ช่วงการไหล (Regime) (Grace และคณะ, 1997)

ช่วงการไหลจะเกิดจากพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วของไหลซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นแก๊ส (อากาศ) ที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ ช่วงการไหลที่จะสามารถพบได้ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียนนี้แสดงในรูปที่ 2.2 ได้แก่



รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบหมุนเวียน



รูปที่ 2.2 ช่วงการไหลสำหรับฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนในระบบแก๊สและของแข็ง (ก) ฟลูอิด์เบดแบบปั่นป่วน (ข) ฟลูอิด์เบดแบบความเร็วสูง และ (ค) ฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง (Grace และคณะ, 1986)

1. ฟลูอิด์เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent) เป็นช่วงการไหลช่วงแรกที่สามารถเกิดขึ้นได้ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน เพราะในช่วงการไหลนี้อนุภาคของแข็งจะเริ่มหลุดออกจากท่อไรเซออร์ โดยลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์ของช่วงการไหลนี้คือ อนุภาคของแข็งจะถูกพบมากที่ด้านล่างของท่อไรเซออร์ ซึ่งสามารถพบเห็นหน้าเบตได้ชัดเจน จะมีอนุภาคของแข็งเพียงส่วนน้อยที่หลุดออกจากท่อไรเซออร์ทางด้านบน ด้วยเหตุนี้อนุภาคของแข็งจะคงอยู่ในระบบนานกว่าช่วงการไหลแบบอื่นที่พบในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน จึงทำให้ช่วงการไหลแบบนี้เหมาะกับกระบวนการที่ปฏิกิริยาเคมีต้องการเวลาเพื่อการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์

2. ฟลูอิด์เบดแบบความเร็วสูง (Fast fluidization) เป็นช่วงการไหลที่พบในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่มีการใช้งานกันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะอนุภาคของแข็งจะมีการกระจายตัวเฉลี่ยตามแนวความสูงของท่อไรเซออร์อย่างสม่ำเสมอ ทำให้ไม่สามารถหาหน้าเบตที่ชัดเจนได้ อีกทั้งปริมาณของแข็งในระบบก็ยังมีมาก ในช่วงการไหลนี้จะมีเอกลักษณ์คือ จะพบอนุภาคของแข็งมากที่บริเวณผนังของท่อไรเซออร์ และพบอนุภาคของแข็งน้อยที่บริเวณ

กึ่งกลางท่อไรเซอร์ ดังนั้น ช่วงการไหลนี้จึงเหมาะกับกระบวนการที่ต้องการพื้นที่หรือปริมาตรในการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการผสมกันที่ดีของอนุภาคของแข็งและของไหล เนื่องจากมีการสัมผัสกันของอนุภาคของแข็งและแก๊สสูงกว่าช่วงการไหลแบบปั่นป่วนและมีปริมาณอนุภาคของแข็งมากกว่าฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง

3. ฟลูอิด์เบดแบบเบาบาง (Dilute-phase transport) เป็นช่วงการไหลที่เกิดจากการใช้ความเร็วป้อนเข้าของไหลสูงที่สุดทำให้อนุภาคของแข็งภายในท่อไรเซอร์ถูกยกตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุนี้ปริมาณอนุภาคของแข็งในระบบจึงมีน้อย และจากการที่อนุภาคของแข็งที่เข้ามาในท่อไรเซอร์จะถูกของไหลพาออกไปอย่างรวดเร็วนี้เองทำให้ช่วงการไหลนี้เหมาะกับการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งหรือเหมาะสำหรับกระบวนการที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีสูง

2.1.2 ข้อดีข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

ข้อดี

1. มีพื้นที่ผิวการสัมผัสกันของอนุภาคของแข็งและของไหลสูง ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสารและความร้อนสูงกว่า
2. มีปริมาณอนุภาคของแข็งสูงตลอดแนวความสูงของเครื่องปฏิกรณ์
3. มีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งดีกว่า และจากการที่อนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ส่งผลให้การกระจายตัวของความร้อนมีความสม่ำเสมอทั้งในแนวรัศมีและแนวระดับ
4. มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานกับของแข็งหลายชนิดหรือของแข็งผสม อีกทั้งยังสามารถเติมของแข็งเข้าหรือปล่อยของแข็งออกจากระบบโดยไม่ต้องหยุดเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้สามารถทำงานได้แบบต่อเนื่อง

ข้อเสีย

1. ในช่วงการไหลฟลูอิด์เบดแบบความเร็วสูง จะพบการตกกลับของอนุภาคของแข็งที่ผนังทำให้เกิดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของแก๊ส-ของแข็งลดลง และทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดได้น้อยลงกว่าที่ควรเป็น อีกทั้งทำให้การกระจายตัวของอนุภาคของแข็งในแนวรัศมีไม่สม่ำเสมอส่งผลให้การถ่ายโอนมวลและความร้อนแย่ง

2. อาจเกิดการสะสมความร้อนบางจุดทำให้เกิดการเสียหายต่ออนุภาคของแข็งหรือเครื่องปฏิกรณ์ได้
3. ในภาวะดำเนินการที่ใช้ความเร็วของไหลสูงจะทำให้อนุภาคของแข็งหลุดออกจากท่อไรเซอร์เร็วเกินไป ทำให้ระยะเวลาที่เกิดการสัมผัสกันของอนุภาคของแข็งและของไหลมีน้อย
4. มีโอกาสที่จะเกิดการสึกกร่อนของอนุภาคของแข็งและผนังของเครื่องปฏิกรณ์สูง เนื่องจากเกิดการเสียดสีกันของอนุภาคของแข็งด้วยกันเอง และอนุภาคของแข็งกับผนัง

2.2 การจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart (Grace และคณะ, 1997)

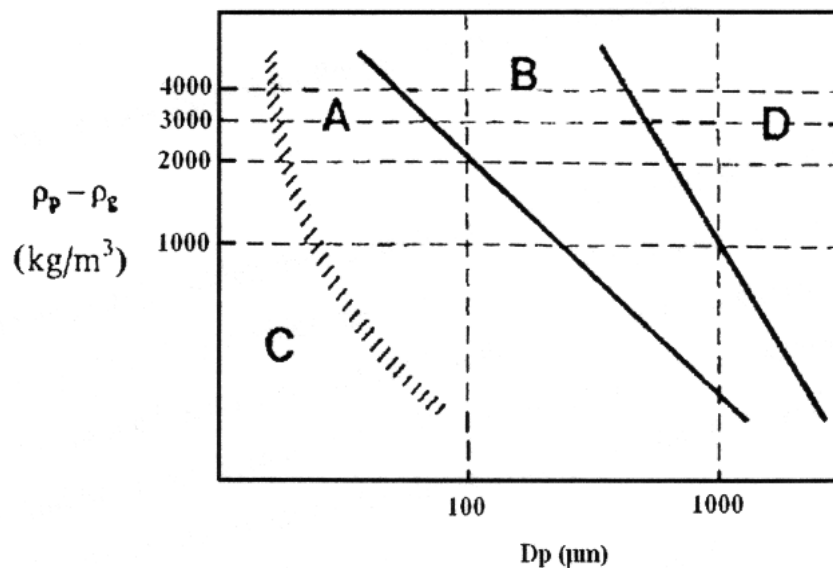
ในการจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart สามารถจัดเรียงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคได้แตกต่างกัน 4 กลุ่ม โดยจัดเรียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค จากต่ำสุดไปยังสูงสุด ดังแสดงตามรูปแผนผังการจัดหมวดหมู่ของ Geldart สำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุเบดที่มีลักษณะคล้ายของไหล ในรูปที่ 2.3

ในกลุ่ม A อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำ (ต่ำกว่า 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ซึ่งเป็นกลุ่มที่อากาศสามารถผ่านอนุภาคได้ (Aeratable) อนุภาคของแข็งนี้สามารถทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ง่ายที่ความเร็วของแก๊สที่ใช้เป็นของไหลมีความเร็วต่ำ อนุภาคของเบดจะมีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนของไหลแบบราบเรียบ (Smooth Fluidization) ที่ความเร็วแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ (Minimum Bubbling) วัสดุเบดจะเปลี่ยนไปเป็นช่วงของการเคลื่อนที่แบบฟองอากาศ

ในกลุ่ม B เป็นกลุ่มที่มีลักษณะคล้ายกับทราย (Sandlike particles) โดยปกติแล้วในกลุ่มนี้จะใช้เป็นวัสดุเบดในเตาเผาฟลูอิดเบดแบบฟองแก๊ส จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 40 – 500 μm และความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งอยู่ระหว่าง 1,400 – 4,000 kg/m^3 อนุภาคในกลุ่มนี้จะเคลื่อนที่ได้ดีในรูปแบบฟองแก๊ส เมื่อความเร็วของแก๊สที่ใช้เป็นของไหลมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน

ในกลุ่ม C เป็นกลุ่มที่อนุภาคมีการยึดเกาะได้ดี (Cohesive) และมีความละเอียดที่สุด โดยปกติอนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้จะเกิดการฟลูอิดเซชันได้ยาก เพราะแรงยึดเกาะของอนุภาคมีค่ามากกว่าแรงดันของของไหล อย่างไรก็ตาม ของไหลก็ยังสามารถหาช่องว่างที่จะผ่านออกไปได้แต่จะมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนในส่วนที่วัสดุเบดมีการยึดเกาะต่ำ

ในกลุ่ม D อนุภาคของแข็งจะมีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นมาก สำหรับกลุ่มนี้ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นได้ช้ากว่ากลุ่มอื่นและเกิดช่องว่างที่สามารถทำให้ของไหลพุ่งผ่านขึ้นมาได้ง่าย (Spoutable) สำหรับวัสดุเบดที่ยึดเกาะกันได้ดีสามารถที่จะเกิดการฟลูอิดเซชันได้ แต่อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่แบบน้ำพุ (Spouting fluidization) จะเกิดขึ้นโดยมีรูปแบบที่ไม่แน่นอนเนื่องมาจากการจ่ายของไหลที่ไม่สม่ำเสมอ



รูปที่ 2.3 แผนผังการจัดหมวดหมู่อนุภาคของ Geldart (Grace และคณะ, 1997)

2.3 สิ่งกีดขวางภายใน (internal)

สิ่งกีดขวางภายใน (Internal) ที่ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ ท่อ และแผ่นปะทะ เป็นต้น ตัวอย่างในการนำไปใช้เช่น ในปฏิกรณ์ที่มีการคายหรือดูดความร้อนสูง ความร้อนในระบบที่จำเป็นต้องกำจัดหรือชดเชยมีมาก การใส่ท่อลงไปสามารถเพิ่มการถ่ายโอนความร้อนของระบบได้ดียิ่งขึ้น หรืออีกตัวอย่างคือ การนำแผ่นปะทะหรือสิ่งกีดขวางรูปทรงอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณภาพของฟลูอิดเซชันหรือเพื่อแบ่งเบดเป็นสัดส่วนเท่าๆกัน ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จะขออธิบายเฉพาะส่วนที่เป็นแผ่นปะทะและท่อภายในเท่านั้น ซึ่งเป็นสิ่งกีดขวางภายในที่มีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสของแก๊สและของแข็งอีกทั้งเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนในระบบที่จะนำไปสู่การเพิ่มศักยภาพของกระบวนการฟลูอิดเซชัน

จากการทบทวนงานวิจัย พบว่า ผลกระทบจากการใส่สิ่งกีดขวางภายในนั้น ส่วนมากจะส่งผลต่อพฤติกรรมของฟองแก๊ส (Bubble behavior) การกระจายตัวของของไหล (Flow distribution) การผสมของแก๊สและของแข็ง และความดันลดซึ่งผลของการใส่สิ่งกีดขวาง

ภายในแบบต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวน เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการติดตั้งแผ่นปะทะชนิดวงแหวนจะเพิ่มการกระจายตัวของของแข็งในแนวรัศมีได้ดีขึ้น อีกทั้งยังช่วยยับยั้งการตกกลับของของแข็งบริเวณผนังซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคของแข็งซึ่งทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและอนุภาคของแข็งลดลง ทำให้การเกิดปฏิกิริยาลดลง ซึ่งตรงกับจุดประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการจะปรับปรุงอุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียนนั่นเอง

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment)

การออกแบบการทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ในกรณีเช่นนี้ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ แต่ประโยชน์ที่สำคัญมากที่สุด คือ เราจะสามารถใช้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่า ในขณะที่ยังสามารถสกัดข้อมูลออกมาได้มากเทียบเท่ากับการทดลองแบบทีละปัจจัย เมื่อเทียบที่ผลการทดลองเท่าๆ กัน

2.4.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งเราต้องการที่จะศึกษาผลของอันตรกิริยาที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ คือ + แทนระดับสูง และ - แทนระดับต่ำของปัจจัยหนึ่งๆ หรือ + แทนการมี หรือ - แทนการไม่มีของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ โดยใน 1 เวกเตอร์ที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

ตารางที่ 2.1 ลักษณะเด่นของสิ่งกีดขวางภายในแบบต่างๆ

ประเภท	ชนิด	จุดเด่น	เอกสารอ้างอิง
แผ่นปะทะ	ตระแกรงลวด (wire mesh)	1. เพิ่มการแตกตัวของฟองแก๊ส 2. ลดการกักคร่อน	Dutta และ Suciu (1992)
	แผ่นโลหะแบบ เจาะรู (Perforated plate)	1. เพิ่มการกระจายตัวของของแข็งในแนวรัศมี 2. เพิ่มความถี่ของฟองแก๊ส	Dutta และ Suciu (1992) Zhao (1992)
	แผ่นบานเกล็ด (Louver plate)	1. เพิ่มการสัมผัสของแก๊สและอนุภาคของแข็ง 2. เพิ่มการกระจายตัวของฟองแก๊สในแนวรัศมี 3. ลดการแยกเฟสของแก๊สและของแข็ง	Jin (1982)
	แผ่นปะทะแบบวง แหวน (Ring baffle)	1. เพิ่มการกระจายตัวของช่องว่างในแนวรัศมี 2. เพิ่มการผสมในแนวรัศมีของแก๊สและของแข็ง 3. เพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสของแก๊สและของแข็ง 4. ยับยั้งการตกกลับของอนุภาคของแข็งในแนวแกน 5. เพิ่มร้อยละการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาเคมี	Zhu และคณะ (1997) Jiang และคณะ (1991)
ท่อ	ท่อแนวนอน (Horizontal banks)	1. เพิ่มการกระจายตัวของฟองแก๊ส 2. เพิ่มความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของแก๊ส	Olsson (1995) Olowson (1994)
	ท่อแนวตั้ง (Vertical banks)	1. มีค่าสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนความร้อนสูง 2. การกักคร่อนต่ำ 3. มีผลกระทบจากการขยายขนาดต่ำ	Volk (1962)

2.4.2 การออกแบบ 2^5

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^5 นี้ คือ การออกแบบการทดลองที่มีปัจจัย 5 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ คือ ระดับสูง ระดับต่ำ รวมทั้งหมด 32 การทดลอง ดัง ตารางที่ 2.2

ในการพิจารณาการประมาณผลหลัก จะสามารถคำนวณได้จากค่า คอนทราสต์ (Contrast) สำหรับการทดลองร่วมปัจจัยนั่นเอง ตารางเครื่องหมายบวก และลบสามารถสร้างได้จากคอนทราสต์ดังแสดงในตารางที่ 2.2 เครื่องหมายของผลหลักหาได้จากค่าบวก และลบที่กำหนดขึ้นเหล่านี้ เมื่อเครื่องหมายของผลหลักถูกกำหนดขึ้นแล้ว เครื่องหมายสำหรับคอลัมน์ที่เหลือจะหาได้จากการนำเอาคอลัมน์ที่เกี่ยวข้องมาคูณกันทีละแถวตัวต่อตัว ตัวอย่างเช่น เครื่องหมายของคอลัมน์ AB คือ ผลคูณของเครื่องหมายของคอลัมน์ A และ B ในแต่ละแถว และคอนทราสต์จะสามารถหาได้โดยง่ายจากตารางที่กล่าวมานี้

ตัวอย่างการพิจารณาการประมาณผลหลัก

$$A = \frac{1}{16n} [a - e + abe - b + ace - c + abc - bce + ade - d + abd - bde + acd - cde + abcde - bcd + ae - 1 + ab - be + ac - ce + abce - bc + ad - de + abde - bd + acde - cd + abcd - bcde] \quad (2.1)$$

ตัวอย่างการพิจารณาการประมาณผลของอันตรกิริยา

$$AB = \frac{1}{16n} [-a + e + abe - b - ace + c + abc - bce - ade + d + abd - bde - acd + cde + abcde - bcd - ae + 1 + ab - be - ac + ce + abce - bc - ad + de + abde - bd - acde + cd + abcd - bcde] \quad (2.2)$$

ซึ่งการประมาณผลต่างๆ จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ คือ

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

ตารางที่ 2.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^5

Run	A	B	C	D	E	Combination
1	+	-	-	-	-	a
2	-	-	-	-	+	e
3	+	+	-	-	+	abe
4	-	+	-	-	-	b
5	+	-	+	-	+	ace
6	-	-	+	-	-	c
7	+	+	+	-	-	abc
8	-	+	+	-	+	bce
9	+	-	-	+	+	ade
10	-	-	-	+	-	d
11	+	+	-	+	-	abd
12	-	+	-	+	+	bde
13	+	-	+	+	-	acd
14	-	-	+	+	+	cde
15	+	+	+	+	+	abcde
16	-	+	+	+	-	bcd
17	+	-	-	-	+	ae
18	-	-	-	-	-	1
19	+	+	-	-	-	ab
20	-	+	-	-	+	be
21	+	-	+	-	-	ac
22	-	-	+	-	+	ce
23	+	+	+	-	+	abce
24	-	+	+	-	-	bc
25	+	-	-	+	-	ad
26	-	-	-	+	+	de
27	+	+	-	+	+	abde
28	-	+	-	+	-	bd
29	+	-	+	+	+	acde
30	-	-	+	+	-	cd
31	+	+	+	+	-	abcd
32	-	+	+	+	+	bcde

จากนั้น จะทำการหาค่าผลรวมของกำลังสองสำหรับผลแต่ละตัว คือ

$$SS_{AB\dots K} = \frac{1}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB\dots K})^2 \quad (2.4)$$

สุดท้ายก็นำค่าที่คำนวณได้ทั้งหมดไปทำการใส่ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) หาค่า F_0 หรือค่า p -Value ทำการวิเคราะห์ผลต่อไปว่าตัวแปรใดมีผลต่อค่าตอบสนองมากที่สุด อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์แบบ 2^k นี้ ก็จะต้องทำการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่ได้ด้วยว่ามีการกระจายตัวเป็นแบบปกติ ไม่มีรูปแบบ และมีความแปรปรวนคงที่หรือไม่ เพื่อแสดงถึงความถูกต้องของการวิเคราะห์ที่ได้ทำไป

2.4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการใช้วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน มาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ จะได้ว่า Total Corrected Sum of Square คือ

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

ซึ่งจะใช้สำหรับวัดความแปรผันทั้งหมดของข้อมูล โดยถ้าเราหาร SS_T ด้วยระดับขั้นความเสรี (Degree of freedom) ที่เหมาะสม คือ $N-1$ เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด เราจะได้ความแปรปรวนของตัวอย่าง y

โดยความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล ซึ่งวัดจาก Total Corrected Sum of Square สามารถแบ่งออกเป็น ส่วนของผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม รวมกับผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายใต้ระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ค่าของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตเฉลี่ยของแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม คือ ตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับ ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับ คือ ความผิดพลาดสุ่ม (Random error) ดังนั้น สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$SS_T = SS_{Treatment} + SS_E \quad (2.6)$$

ซึ่ง $SS_{Treatment}$ เรียกว่า ผลรวมกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับ ซึ่งหาได้จาก

$$SS_{Treatment} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.7)$$

โดยจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ ระดับของค่าเฉลี่ย $a - 1$ และ SS_E เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากความผิดพลาด มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $N - a$ ซึ่งเมื่อทำการนำค่าของผลรวมกำลังสอง (Sum of Square) ของแต่ละตัวหารด้วยระดับขั้นความเสรีของตัวเอง จะได้เป็น Mean Square (MS) ดังสมการ

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

โดยที่ค่า Mean Square error เป็น

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

จากนั้นทำการหาอัตราส่วน F_0 เพื่อทำการทดสอบ F (F test) ซึ่งเป็นการทดสอบสมมุติฐานความเท่ากันของความแปรปรวนของประชากรแบบปกติสองกลุ่ม โดยมีวิธีการคำนวณคือ

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

โดยเราจะทำการปฏิเสธสมมุติฐานหลักหรือ H_0 ก็ต่อเมื่อ $F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$ และสรุปว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งสอง ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่า $F_0 < F_{\alpha, a-1, N-a}$ ผลสรุปที่ได้ก็จะกลับกัน คือ จะได้ว่าข้อมูลไม่มีความแตกต่างกันระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวอย่างทั้งสอง หรือใช้การตรวจสอบจากค่า p -value ซึ่งส่วนมากโดยทั่วไปค่านี้จะถูกกำหนดให้มี

ค่า 0.05 หรือมีค่าความเชื่อมั่นประมาณ 95 % โดยนิยามของค่า p -value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง และสามารถหาได้จากค่า F และระดับชั้นความเสรี ดังนั้น p -value จึงแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระบุนัยสำคัญอื่นๆ ได้ โดยจะทำการปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 เมื่อค่า p -value < 0.05

2.4.4 การสร้างแบบจำลองการถดถอย

แบบจำลองการถดถอยถูกนำมาใช้บ่อยครั้ง ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่ไม่ได้มีการวางแผนล่วงหน้า ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในกรณีของการเก็บข้อมูลจากปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือจากสิ่งที่ยังไม่ทราบในอดีต การวิเคราะห์การถดถอยยังมีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลองที่ได้มีการออกแบบไว้ล่วงหน้าในกรณีที่มีบางอย่างเกิดผิดพลาดไปได้เช่นกัน โดยแบบจำลองการถดถอยจะประกอบไปด้วยตัวแปรฝั่งที่ไม่มีค่าคลาดเคลื่อน เราจะเรียกว่าตัวประมาณการ (Predictor) โดยใช้ สัญลักษณ์แทนคือ X ตัวแปรที่มีความคลาดเคลื่อน เราก็จะเรียกว่า ตัวตอบสนอง (Response) สัญลักษณ์แทนคือ y ซึ่งแบบจำลองการถดถอยสามารถแบ่งได้เป็นสี่รูปแบบ คือ

1. Simple linear regression analysis ที่จะใช้เมื่อเราต้องการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง สองตัวแปร และความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรดังกล่าวจะต้องเป็นในลักษณะเชิงเส้น
2. Multiple linear regression analysis ที่จะใช้เมื่อเราต้องการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ เมื่อมีตัวแปรที่เป็น Predictor มากกว่า 1 ตัวขึ้นไป แต่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองฝั่ง ยังคงเป็นแบบเชิงเส้นตรง
3. Polynomial regression analysis ที่จะใช้เมื่อเราต้องการวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง รวมถึงกรณีมีตัวแปร Predictor มากกว่า 1 ด้วย ยกตัวอย่างเช่น ถ้ากรณีเปิดเครื่องปรับอากาศนั้น นอกจากจำนวนชั่วโมงที่เปิดจะมีผลต่อจำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้แล้ว อุณหภูมิในห้อง ก็ส่งผลด้วยเหมือนกันและไม่เป็นเส้นตรงด้วย การวิเคราะห์ก็จะต้องซับซ้อน และยุ่งยากมากขึ้นไปอีก
4. Logistic regression analysis กรณีที่ y มีค่าเพียงสองสถานะ เช่น No, Yes เป็นต้น แต่ X เป็นค่าแบบต่อเนื่องปกติ

ตัวอย่างแบบจำลองการถดถอย

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

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแบบบางส่วน (Partial Regression Coefficient) β_1 และ β_2 จะมีค่าเป็น 0.5 เท่าของค่าคอนแทรกสต์และค่า β_0 จะเป็นตัวกำหนดจุดตัดของระนาบ และ ε พจน์ของความผิดพลาดในแบบจำลอง

ในส่วนการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสามารถทำได้หลายวิธีได้แก่ การพลอตส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) ถ้าแบบจำลองที่ได้มีความถูกต้อง และสมมติฐานมีความเหมาะสมแล้ว ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นจะไม่มีรูปแบบ และไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น รวมถึงค่าของผลตอบที่ถูกทำนาย ดังนั้นการพลอตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต กราฟที่ได้ไม่ควรจะมีรูปร่างเฉพาะแต่อย่างใด โดยสิ่งผิดปกติอื่นที่สามารถเห็นได้จากกราฟนี้ คือ การมีความแปรปรวนไม่คงตัว ซึ่งถ้าหากพบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะที่มีความแปรปรวนไม่คงตัว จะแสดงว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้ไม่ถูกต้อง และสามารถตรวจสอบได้อีกวิธี โดยการหาค่า R^2 จากกราฟ Normal Probability Plot ของส่วนตกค้างที่ได้จากแบบจำลองการทำนาย ซึ่ง R^2 เป็นค่าที่บ่งบอกว่าข้อมูลที่ได้จากการทำนายมีความถูกต้องเพียงใดซึ่งจะมีค่าระหว่าง 0 - 1 โดยยิ่งค่าเข้าใกล้ 1 ก็ยิ่งดี

2.5 การจำลองด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics, CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นการใช้คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหลโดยมีพื้นฐานในการพิจารณาของไหลที่มีความต่อเนื่องให้อยู่ในรูปของลักษณะเป็นช่วงโดยอาศัยคอมพิวเตอร์ เช่นโปรแกรม Gambit & Fluent ซึ่งโปรแกรม Gambit & Fluent สามารถทำการวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหลได้ในระยะเวลาอันสั้นเพียงไม่กี่ชั่วโมง ทำให้กระบวนการที่ออกแบบมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแบบเดิมๆ ที่ทำการทดลองจริง ปัจจุบัน CFD เริ่มใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นและเริ่มเข้ามามีบทบาทต่อการวิจัยพื้นฐานและการใช้เชิงพัฒนาต่างๆ ซึ่งพฤติกรรมการไหลของของไหลสามารถอธิบายโดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การจำลองปรากฏการณ์จะคำนวณด้วยชุดของสมการอนุรักษ์ (Conservation equations) ได้แก่ 1. สมการความต่อเนื่องหรือสมการอนุรักษ์มวล (Continuity

equations) 2. สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum equations) และ 3. สมการอนุรักษ์พลังงาน (Energy equations) เนื่องจากงานวิจัยนี้จะจำลองภาวะของระบบเป็นแบบไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี (Cold flow) ดังนั้นจะไม่คำนึงถึงชุดสมการอนุรักษ์พลังงาน

2.5.1 ระเบียบวิธี (Methodology)

ระเบียบวิธีสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีวิธีการพื้นฐานในการคำนวณ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

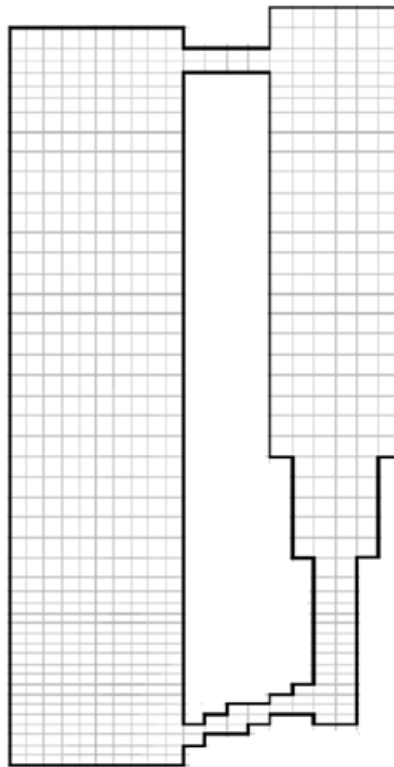
1. กำหนดรูปทรงหรือเรขาคณิต (ขอบเขตทางกายภาพ) ของปัญหาที่ทำการศึกษา
2. แบ่งปริมาตรของของไหลออกเป็นเซลล์แบบโครงตาข่าย (Grid) ยกตัวอย่างเช่น การศึกษาอุทกพลศาสตร์ของแก๊ส-ของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนซึ่งมีปฏิกิริยาการสลายตัวของไอโซนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ Therdthienwong และคณะ (2003) ใช้การจำลองแบบสองมิติซึ่งมีรูปทรงเรขาคณิตดังรูปที่ 2.4
3. กำหนดสมการสำหรับการจำลองแบบทางกายภาพ เช่น สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน เป็นต้น
4. กำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) ซึ่งมักจะเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของของไหลและสมบัติ ณ ขอบเขตนั้นๆ ของปัญหาที่ทำการศึกษา สำหรับปัญหาแบบไม่คงตัว (Transient) จำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) ด้วย ยกตัวอย่างเช่น การกำหนดให้อุณหภูมิผนังคงที่ ฟลักซ์ความร้อนคงที่ หรือความเร็วเริ่มต้นของของไหลบริเวณทางเข้ามีค่าคงที่และสม่ำเสมอ (Uniform)
5. แก้สมการอนุรักษ์หรือสมการควบคุมโดยอาศัยระเบียบวิธีทำซ้ำ (Iteration) เพื่อให้ได้ผลเฉลยของระบบ
6. วิเคราะห์ผลและแสดงภาพสำหรับผลเฉลยที่ได้ เช่น การสร้างกราฟคอนทัวร์ หรือเวกเตอร์ความเร็วของของไหล เป็นต้น

2.5.2 ระเบียบวิธีการแบ่งช่วง (Discretization method)

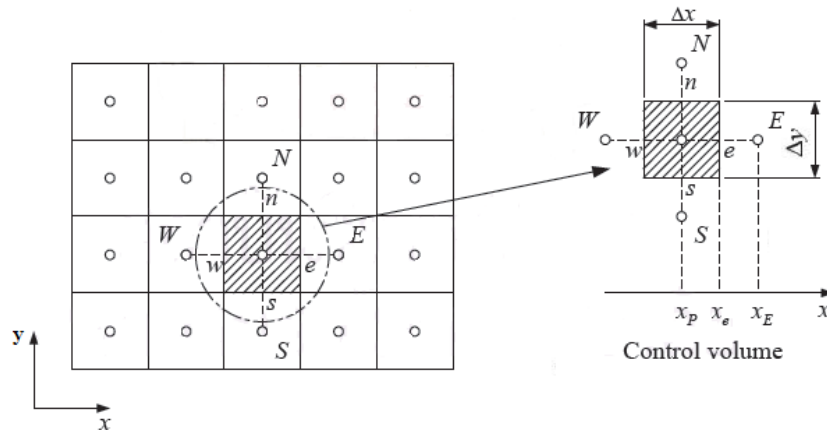
เสถียรภาพของการเลือกใช้ระเบียบวิธีการแบ่งช่วงมักจะเกี่ยวข้องกับการแก้ระบบสมการเชิงเส้นโดยอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) มากกว่าที่จะเกิดขึ้นกับการแก้สมการโดยอาศัยระเบียบวิธีวิเคราะห์ (Analytical methods) ดังนั้น การเลือกใช้ระเบียบ

วิธีในการแบ่งช่วงสำหรับบางระเบียบวิธีจึงจำเป็นต้องระวังเรื่องเสถียรภาพเพื่อให้ได้ผลเฉลย สำหรับระเบียบวิธีที่มักจะใช้ในการแบ่งช่วงปัญหาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้นส่วนใหญ่จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่แบ่งขอบเขตของปัญหาที่สนใจออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ แล้วอินทิเกรตสมการการอนุรักษ์บนปริมาตรควบคุม (Control volume) ดังรูปที่ 2.5 โดยในการแก้ปัญหาคารพา (Convection) และการแพร่ (Diffusion) ของของไหล จะเริ่มจากการแก้ปัญหาคารพา และการแพร่กระจายด้วยระเบียบวิธี Finite volume ที่จะมีจุดเริ่มต้นมาจากสมการพื้นฐานของการไหล ซึ่งสามารถแสดงสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation) ในรูปทั่วไปของตัวแปร ϕ ได้ดังนี้

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



รูปที่ 2.4 รูปทรงเรขาคณิตของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนของ Therdthienwong และคณะ (2003)



รูปที่ 2.5 ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Patankar, 1980)

สมการนี้เป็นสมการอนุพันธ์ย่อยพื้นฐานที่จะนำมาใช้แก้สมการ (หลังจากแทนค่าต่างๆ ที่เหมาะสมจะกลายเป็นสมการ Mass conservation equation X-Momentum conservation equation และ Y-Momentum conservation equation แต่ในที่นี้จะเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไป เพื่อความง่ายในการอธิบาย) โดยเทอมแรก คือ เทอมที่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เทอมที่สอง คือ เทอมจากการพา เทอมที่สาม คือ เทอมจากการแพร่กระจาย และเทอมสุดท้าย คือ เทอมที่เหลืออื่นๆ (Source term) ซึ่งการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม จะเป็นการเปลี่ยนรูปของสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการพีชคณิตที่สามารถทำการคำนวณได้ง่ายขึ้น ทำโดยการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุม (Control Volume, CV) ได้เป็น

$$\int_{CV} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dV + \int_{CV} \text{div}(\rho\phi\mathbf{u}) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.13)$$

ในกรณีของปัญหาในครั้งนี้ การไหลเป็นแบบภาวะไม่คงตัว 2 มิติ สมการจะลดรูปลงเหลือ

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

จากนั้นทำการการแยกพิจารณาการอินทิเกรตที่ละเทอม โดยกำหนดให้ $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$ และ $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$ จะได้เทอมของการพาในสองแนวแกน คือ

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

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

เทอมของการแพร่กระจาย คือ

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

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

และเทอมที่เหลืออื่นๆ (Source term) คือ

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

เมื่อ F และ D คือ สัมประสิทธิ์ของการพา และการแพร่กระจาย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\rho u A$ และ $\Gamma A / \delta$ ตามลำดับ

ค่าของตัวแปร ϕ บนผิวปริมาตรควบคุมในเทอมของการพาที่อยู่ในสมการ จะสามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วย Discretization scheme ต่างๆ เช่น First order upwind differencing scheme Power-law differencing scheme และ Hybrid differencing scheme โดยรายละเอียดของแต่ละวิธี Discretization มีดังต่อไปนี้

1) First order upwind differencing scheme

เป็นวิธีแก้ไขปัญหาที่เกิดจากการสมมติว่าค่าของการพาที่ Interface เกิดจากค่าเฉลี่ยระหว่างค่าที่สองด้านของ Interface (Central differencing scheme) โดยการคิดว่าเทอม

ของการแพร่กระจายไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนในเทอมของการพาจะคำนวณโดยสมมติฐานที่กล่าวว่า ค่าของตัวแปร ϕ ที่ Interface มีค่าเท่ากับค่าที่ Grid point ของผิวปริมาตรควบคุมด้านต้นกระแสน้ำไหล (Upstream) นั่นคือ

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

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

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

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

โดยค่าของ ϕ_n และ ϕ_s ก็จะหาได้ในลักษณะเดียวกัน ดังนั้น สามารถเขียนสมการพีชคณิตของสมการทั่วไปได้เป็น

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + a_s \phi_s + a_n \phi_n + S_\phi V \quad (2.20)$$

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

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

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

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

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

$$a_p = a_n + a_s + a_e + a_w + (F_n - F_s + F_e - F_w) \quad (2.21)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จะไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้ ทำให้ผลเฉลยที่ได้มีค่าเป็นไปตามลักษณะกายภาพที่เกิดขึ้นจริง และทำให้สามารถแก้ปัญหาต่างๆ ได้โดยที่ผลเฉลยเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง

2) Second order upwind scheme

Second order upwind scheme จะทำการประมาณค่าโดยใช้การประมาณแบบเชิงเส้นของค่าที่ต้นกระแสการไหล (Upstream) โดยจะให้ความแม่นยำสูงกว่าแบบ First order upwind scheme และจะให้การลู่เข้าหาผลเฉลยดีกว่า เนื่องจากมีการใช้จุดของค่าที่นำมาคำนวณมากขึ้น

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_P - \frac{1}{2}\phi_w \quad \text{เมื่อ} \quad F_e > 0 \quad (2.22)$$

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_E - \frac{1}{2}\phi_{EE} \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0 \quad (2.23)$$

$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_w - \frac{1}{2}\phi_{ww} \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0 \quad (2.24)$$

$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_P - \frac{1}{2}\phi_E \quad \text{เมื่อ} \quad F_w < 0 \quad (2.25)$$

3) Power-law differencing scheme

วิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ค่าผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับปัญหาหนึ่งมิติมากกว่าวิธีการอื่นๆ (พัฒนามาจากคำตอบเชิงวิเคราะห์ของปัญหาหนึ่งมิติ) โดยเป็นการประมาณแบบโพลีโนเมียล สามารถเขียนสมการพีชคณิตได้เป็น

$$a_P\phi_P = a_W\phi_W + a_E\phi_E + a_S\phi_S + a_N\phi_N + S_\phi V \quad (2.26)$$

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

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

$$\begin{aligned}
a_E &= D_e \max \left[0, (1 - 0.1 |F_e / D_e|)^5 \right] + \max [-F_e, 0] \\
a_W &= D_w \max \left[0, (1 - 0.1 |F_w / D_w|)^5 \right] + \max [F_w, 0] \\
a_P &= a_N + a_S + a_E + a_W + (F_n - F_s + F_e - F_w)
\end{aligned} \tag{2.27}$$

4) Hybrid differencing scheme

วิธีนี้จะรวมข้อดีของวิธี First order upwind differencing scheme และ Central differencing scheme โดยเลือกใช้ค่าจาก Central differencing scheme ซึ่งมีความถูกต้องสูง เนื่องจากเป็น Second order scheme และตรงที่ Central differencing scheme ทำนายค่าได้ไม่ถูกต้อง ($Pe = F/D > 2$ และ $Pe < -2$) เปลี่ยนมาใช้ค่าจาก First order upwind differencing ซึ่งมีความเสถียรสูงเนื่องจากเป็น First order scheme เขียนสมการพีชคณิตเป็น

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S_\phi V \tag{2.28}$$

$$a_N = \max \left[-F_n, D_n - \frac{F_n}{2}, 0 \right]$$

$$a_S = \max \left[F_s, D_s + \frac{F_s}{2}, 0 \right]$$

$$a_E = \max \left[-F_e, D_e - \frac{F_e}{2}, 0 \right]$$

$$a_W = \max \left[F_w, D_w + \frac{F_w}{2}, 0 \right]$$

$$a_P = a_N + a_S + a_E + a_W + (F_n - F_s + F_e - F_w) \tag{2.29}$$

หลังจากการเลือกระเบียบวิธีการแบ่งช่วงแล้ว แทนค่าทั้งหมดลงในสมการก็จะได้ระบบสมการที่พร้อมนำไปคำนวณค่าต่อไป โดยวิธีการแก้สมการอนุกรมโมเมนต์นั้น ผลเฉลยที่

ได้อาจจะไม่สอดคล้องกับสมการอนุรักษ์มวล เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่สอดคล้องกัน ในที่นี้จึงใช้ระเบียบวิธี SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation) ในการแก้ปัญหาการไหล โดยสมมติค่าความดันและความเร็วในขอบเขตของปัญหาที่สนใจ แล้วคำนวณหาค่าความเร็วในสมการอนุรักษ์โมเมนตัม เพื่อที่จะนำค่าความเร็วที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าความดันอีกครั้งในสมการอนุรักษ์มวล โดยใช้ Pressure-correction method ช่วยในการหาค่าความดันที่ถูกต้อง ซึ่งค่า Pressure-correction ที่ได้นี้จะถูกนำกลับมาหาค่าความเร็ว และทำซ้ำขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจนกระทั่งผลเฉลยเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ช่วยให้ค่าความเร็วและความดันมีความสัมพันธ์เป็นไปตามการอนุรักษ์มวล และโมเมนตัม อย่างไรก็ตาม การคำนวณค่าความดัน และค่าความเร็วใหม่ อาจใส่ค่า Relaxation factor ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้เพื่อชะลอหรือเร่งการเปลี่ยนแปลงค่าคำตอบที่ได้จากการคำนวณในแต่ละรอบ เพื่อป้องกันการลู่ออกของคำตอบในระบบที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูงด้วยก็ได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งท่อภายในและแผ่นปะทะภายในท่อโรเตอร์

Jiang และคณะ (1991) ได้นำแผ่นปะทะชนิดวงแหวนจำนวน 4 ชั้นมาติดตั้งเข้ากับท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซิสเบดแบบหมุนเวียนเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับท่อโรเตอร์เปล่า โดยท่อโรเตอร์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.102 เมตร และสูง 6.32 เมตร ขนาดแผ่นปะทะที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 0.0102 เมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.0076 เมตร จากผลการทดลอง พบว่า ท่อโรเตอร์ที่มีแผ่นปะทะชนิดวงแหวนมีประสิทธิภาพสูงกว่าท่อโรเตอร์เปล่า โดยการติดตั้งแผ่นปะทะชนิดวงแหวนจะเพิ่มการกระจายตัวของของแข็งในแนวรัศมีได้ดีขึ้น ต่อมาได้มีการศึกษาผลของแผ่นปะทะชนิดวงแหวนที่มีผลต่อการกระจายตัวของความดันตามแนวแกนโดย Zhu และคณะ (1997) ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาผลของพื้นที่การเปิดช่องว่างโดยทำการปรับค่าพื้นที่การเปิดช่องว่างของแผ่นปะทะชนิดวงแหวนเป็น 70% 80% 90% และ 95% แล้วติดตั้งในท่อโรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.076 เมตร สูง 3 เมตร พบว่าแผ่นปะทะชนิดวงแหวนที่เปิดพื้นที่ไว้ 90% ทำให้เกิดการกระจายตัวของของแข็งสม่ำเสมอมากที่สุดโดยการเปิดช่องทางที่น้อยเกินไปจะเกิดความดันลดสูง แต่ถ้าเปิดมากเกินไปจะเกิดการตกกลับของของแข็งที่ผนัง นอกจากนี้ ยังสรุปว่าการติดแผ่นปะทะทำให้มีลักษณะการไหลแบบสลับ

ไปมา (Zigzag) ที่ต่างจากลักษณะการไหลภายในท่อไรเซอร์แบบปกติซึ่งจะมีลักษณะการไหลแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล หรือรูปทรง S (S-shape)

Therdthianwong และคณะ(2003) ได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของโอโซนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1,420 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบหมุนเวียนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อไรเซอร์ 0.254 เมตร สูง 15.6 เมตร โดยมีการใส่แผ่นปะทะชนิดวงแหวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่แล้วปรับตำแหน่งและจำนวนของแผ่นปะทะ ผลการทดลอง พบว่า ตำแหน่งในการใส่และจำนวนของแผ่นปะทะนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการกระจายตัวของของแข็งและการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยการใส่แผ่นปะทะชนิดดังกล่าว 3 แผ่นที่ด้านล่างซึ่งเป็นบริเวณที่มีของแข็งอยู่หนาแน่นนั้นส่งผลให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพที่ดีที่สุดโดยทำให้เกิดการกระจายตัวที่สม่ำเสมอตลอดความสูงของท่อไรเซอร์และยังเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนของปฏิกิริยามากขึ้นถึง 12%

Chung และคณะ (2003) ได้ทดสอบผลของแผ่นปะทะขนาด 0.15 เมตร x 0.1 เมตร ในแนวตั้ง ที่มีต่อการผสมและการอบแห้งในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบกะที่มีขนาด 0.15 เมตร x 0.61 เมตร ของอนุภาคของแข็งกลุ่ม D ตามวิธีการแบ่งของ Geldart จากงานวิจัยนี้พบว่า การใส่แผ่นปะทะในแนวตั้งจะจำกัดการเติบโตของฟอง โดยการที่ฟองมีขนาดเล็กจะทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับของแข็งและแก๊สที่จะสัมผัสกันมากขึ้นส่งผลให้การถ่ายโอนมวลและการถ่ายโอนความร้อนดีขึ้น นอกจากนี้ขนาดของฟองที่มีขนาดเล็กทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้คล่องตัวภายในเบดก่อนที่ฟองจะแตกที่พื้นผิว ซึ่งทำให้การผสมและการอบแห้งมีประสิทธิภาพมากขึ้น

Cuiping และคณะ (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของการเพิ่มสิ่งกีดขวาง (Internals) ลงไปในระบบการกำจัดกำมะถันซัลเฟอร์ (Desulfurization) ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบหมุนเวียนที่มีขนาด 0.4 เมตร x 0.4 เมตร สูง 3.94 เมตร โดยสิ่งกีดขวางที่ใช้จะมีลักษณะคล้ายลิ้ม (Wedge-shaped) ซึ่งมีความกว้าง 0.10 และ 0.16 เมตร จากการทดลองพบว่า ความสูงที่ต่างๆ กันของตำแหน่งในการใส่สิ่งกีดขวางมีอิทธิพลมากในการเพิ่มความหนาแน่นของแข็งในบริเวณตรงกลาง (Center region) และพบว่าในการใส่สิ่งกีดขวางที่มีการจัดวางสลับซ้ายขวาจะทำให้ประสิทธิภาพในการผสมที่ดีที่สุดโดยหลังจากใส่สิ่งกีดขวางเข้าไปจะทำให้ผลของการกระจายตัวของแก๊สและของแข็งในแนวรัศมีดีขึ้น เพิ่มความหนาแน่นบริเวณกลางท่อ และทำให้เกิดความปั่นป่วนมากขึ้น

Jinsen และคณะ (2008) ได้ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบเบดฟองแก๊สในส่วนของหอแยกตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมันที่มีความสูง 3.5 เมตร ขนาด 0.6 เมตร x 0.5 เมตร ที่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะแบบ V (V-baffles) ซึ่งสามารถกั้นพื้นที่ได้ 50% ของพื้นที่ตัดขวาง และทำมุม 45 องศาจากแนวระดับ เทียบกับแบบที่ไม่ได้ติดตั้ง โดยการจำลองด้วยโปรแกรมจำลองกระบวนการสำเร็จรูป Fluent 6.2.16 พบว่า การใส่แผ่นปะทะลงไปจะเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้อุทกพลศาสตร์เปลี่ยนไป โดยจะเพิ่มการแตกตัวของฟองและช่วยการกระจายตัวของฟอง เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างแก๊สและของแข็งซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลและความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์

Yongmin และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาผลของแผ่นปะทะแบบบานเกล็ด (Louver baffles) ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์และการเกิดแก๊สไหลย้อนกลับ ซึ่งแผ่นปะทะที่ใช้มีความหนา 0.07 เมตร โดยแผ่นบานเกล็ดแต่ละแผ่นจะห่างกัน 0.04 เมตรหรือ 0.06 เมตรและทำมุม 55 องศาจากแนวระดับ ติดตั้งลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาด 0.5 เมตร x 0.03 เมตร สูง 6 เมตร โดยทำการจำลองระบบการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมันแบบสองมิติที่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะดังกล่าวเข้าไปเพื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ไม่ได้ทำการติดตั้ง พบว่า การเพิ่มแผ่นปะทะจะเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างแก๊สและของแข็งมากขึ้นและยังช่วยยับยั้งการเกิดการผสมแบบไหลย้อนกลับของแก๊สและของแข็ง โดยเมื่อลดระยะห่างระหว่างบานเกล็ดจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งการผสมแบบไหลย้อนได้มากขึ้น จากนั้นในปีต่อมา Yongmin และคณะ (2009) ได้ศึกษาต่อถึงผลของแผ่นปะทะชนิดเดิมที่มีต่อความเข้มข้นของอนุภาค ความกวัดแกว่งของความดัน การขยายตัวของเบด และการผสมกันของแก๊สซึ่งทำทั้งในระบบที่มีช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling) และแบบปั่นป่วน (Turbulent) ภายในระบบการจำลองเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ จากผลการทดลอง แผ่นปะทะจะทำให้ฟองอากาศแตกตัวซึ่งทำให้เกิดความกวัดแกว่งของความดัน แต่จะส่งผลเฉพาะเมื่อความเร็วแก๊สเริ่มต้นน้อยกว่า 0.7 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วก่อนที่จะเกิดการไหลแบบปั่นป่วน และพบว่าที่ความเร็วขาเข้าสูง บริเวณด้านบนของแผ่นปะทะจะมีความกวัดแกว่งของความดันและความเข้มข้นของอนุภาคสูงซึ่งไม่เหมาะในการเกิดการผสม

Sripattanapipat และคณะ (2009) ได้ทำการจำลองการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) ภายในท่อที่ได้ทำการติดตั้งแผ่นปะทะที่เป็นรูปทรงเพชร (Diamond shape) สูง 0.5 เท่าของความสูงท่อ เว้นระยะระหว่างแต่ละแผ่นเป็น 0.5 และ 1 เท่าของความสูงท่อ และมีผนังซึ่งมีอุณหภูมิคงที่ แล้วทำการพิจารณาผลที่มีต่อการถ่ายโอนความร้อนและความดันที่สูญเสียจากผลการทดลอง พบว่า การใส่แผ่นปะทะที่มีรูปทรงเพชรที่มีมุมแหลม 5° จากแนวความสูงของแผ่น

กันและเว้นระยะระหว่างกัน 0.5 และ 1 เท่าของความสูงท่อจะทำให้การถ่ายโอนความร้อนดีกว่าการใส่แผ่นกันที่เป็นรูปทรงแบนถึง 6% และให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าท่อแบบไม่มีแผ่นกันถึง 1.5-7 เท่า เนื่องจากเมื่อลดมุมจะทำให้ตัวเลขนัสเซลต์ (Nusselt number) และปัจจัยจากแรงเสียดทาน (Friction factor) เพิ่มขึ้น

Pareek และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของหอแตกตัวของไอน้ำมันที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เครื่องวัดปริมาณความหนาแน่นของอนุภาคด้วยรังสีแกมมา (Gamma-ray Densitometry) หอแตกตัวที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.14 เมตร สูง 0.44 เมตร ท่อโรเซออร์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร ภายในได้ทำการติดตั้งแผ่นปะทะสองชนิด สลับไปมาโดยเริ่มจากแผ่นปะทะแบบโดนัท (Donut) จำนวน 4 ชิ้นไว้ที่ผนังของหอแตกตัวโดยมีลักษณะเป็นแผ่นเอียงทำมุม 45 องศาจากแนวระดับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 0.106 เมตร และติดตั้งแผ่นปะทะแบบจาน (Disk) จำนวน 3 ชิ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใหญ่ 0.108 เมตร ไว้ที่ด้านในท่อโรเซออร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้มีขนาด 80 ไมโครเมตร โดยจะป้อนของแข็งและแก๊สเข้าทางด้านบนและล่าง ตามลำดับ ผลการทดลอง พบว่า รูปร่าง และตำแหน่งในการติดตั้งแผ่นปะทะเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางอุทกพลศาสตร์ ตลอดความสูงของหอแตกตัว โดยในบริเวณระหว่างแผ่นปะทะแบบจานกับท่อโรเซออร์จะมีปริมาณสัดส่วนของแข็งอยู่มากเพราะแผ่นปะทะที่ใช้มีการเอียงมุม 45 องศาทำให้ของแข็งนั้นเคลื่อนที่เข้าไปหาผนังของท่อโรเซออร์ และในส่วนของแก๊สที่เข้าด้านล่างจะถูกขัดขวางด้วยแผ่นปะทะ ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนวนภายใน ด้วยเหตุนี้บริเวณใต้แผ่นปะทะที่ติดกับผนังของหอแตกตัวจะเป็นบริเวณที่มีสัดส่วนปริมาณแก๊สสูง

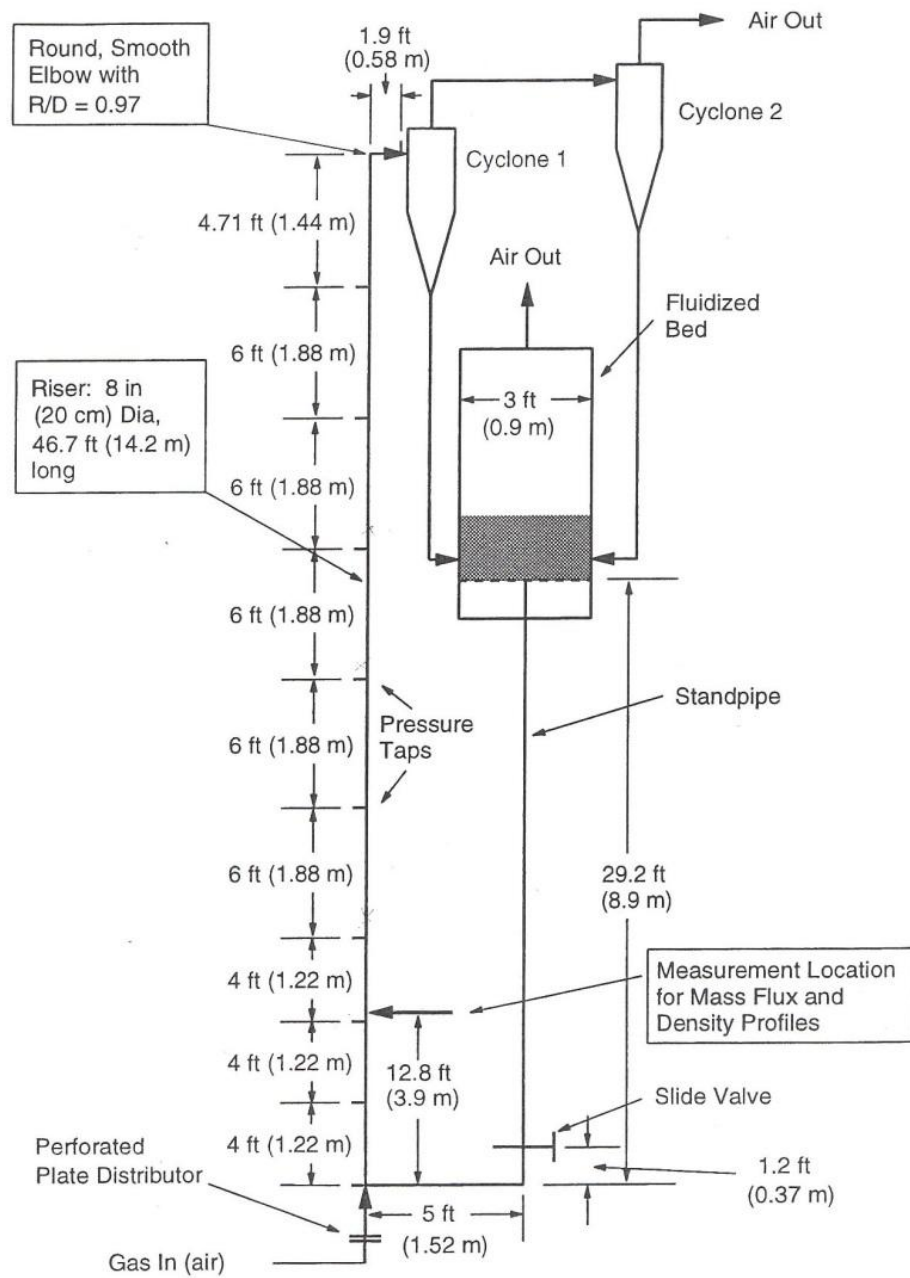
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การจำลองการไหลในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการจำลองการไหลภายในท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนของการทดลอง Knowlton และคณะ (1995) โดยท่อโรเตอร์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตรและสูง 14.2 เมตรดังรูปที่ 3.1 อนุภาคที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 ไมโครเมตร และความหนาแน่น 1,712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม Geldart A ตามวิธีการจำแนกอนุภาคแบบ Geldart ค่าผลการทดลองที่จะนำมาเปรียบเทียบคือ ค่าฟลักซ์การไหลมวลของของแข็ง (Solid mass flux) และค่าความดันลด (Pressure drop)

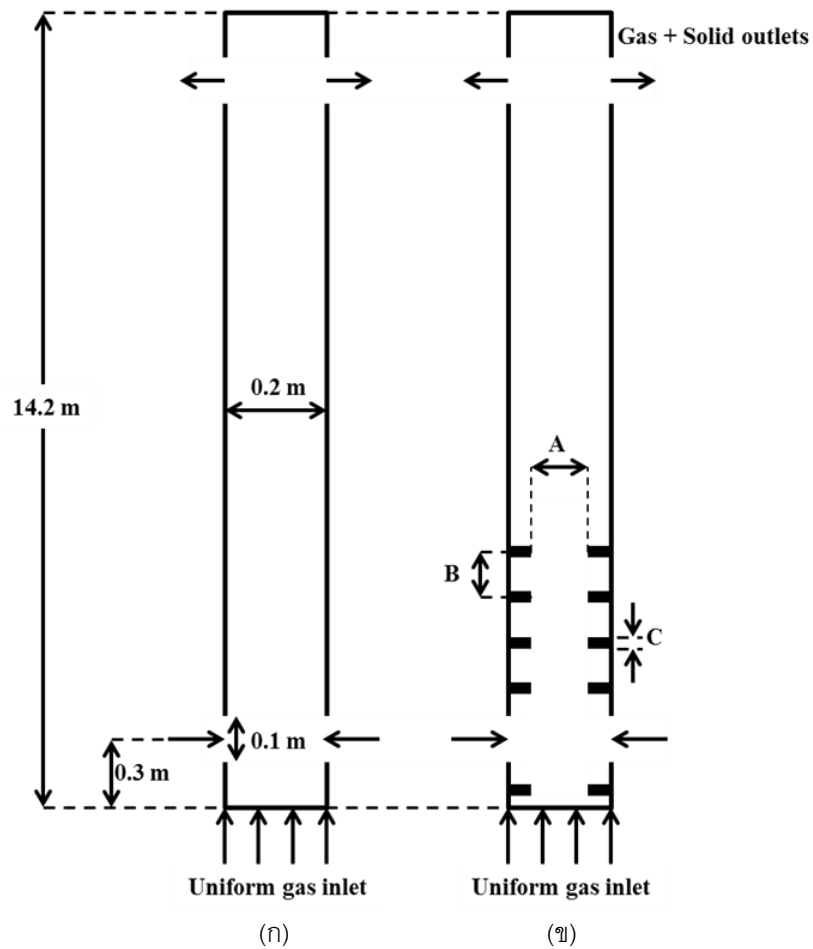
ในการจำลองการไหลจะทำการจำลองการไหลแบบสองวัฏภาค คือ แก๊สและของแข็งภายใต้ภาวะที่ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในระบบ (Cold flow condition) ไม่มีการเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นภายในระบบ จากรูปที่ 3.2 (ก) แผนภาพเค้าร่างของท่อโรเตอร์ที่จะใช้จำลองแบบยังไม่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะและรูปที่ 3.2 (ข) แสดงภาพเค้าร่างของท่อโรเตอร์ที่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน โดยตัวแปร A คือ พื้นที่เปิดของแผ่นปะทะ B คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ C คือ ความหนาของแผ่นปะทะ D คือ จำนวนของแผ่นปะทะ และ E คือ ความสม่ำเสมอของระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ โดยงานวิจัยนี้แก๊สจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างอย่างสม่ำเสมอที่ความเร็ว 5.2 เมตรต่อวินาที ส่วนอนุภาคของแข็งจะมีทางป้อนเข้าสองทางที่ความเร็ว 0.476 เมตรต่อวินาที ทั้งนี้เนื่องมาจากงานวิจัยของ Benyahia และคณะ (2000, 2002) พบว่า การใช้ทางป้อนเข้าสองทางนั้นจะทำให้ค่าการคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งวิธีการดำเนินการวิจัยออกเป็น 4 หัวข้อ คือ 1. การศึกษาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย 2. การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน (Ring baffle configuration) ที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อโรเตอร์ 3. การศึกษาผลของตัวแปรภาวะดำเนินการ (Operating condition) 4. การศึกษาผลของรูปร่างแผ่นปะทะแบบวงแหวน



SCHEMATIC DRAWING OF 20-CM-DIA CFB TEST UNIT

รูปที่ 3.1 แผนภาพเค้าร่างของ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดในการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995)



รูปที่ 3.2 แผนภาพเค้าร่างของท่อไรเซอร์ที่จะใช้จำลอง (ก) แบบยังไม่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะและ (ข) ท่อไรเซอร์ที่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะ

3.1 การศึกษาแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัย

ในส่วนการหาแบบจำลองการไหลภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์แบบหมุนเวียนที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ จะแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ 1.การหาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ และ 2. การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test)

3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

แบบจำลองที่ใช้ในครั้งนี้จะใช้แนวคิดออยเลอร์แบบหลายวัฏภาคในโปรแกรมทางการคำนวณ ANSYS FLUENT ซึ่งวัฏภาคของแก๊สและของแข็งจะถูกพิจารณาเป็นของไหลอย่าง

ต่อเนื่อง ทั้งสองวัฏภาคจะถูกอธิบายในรูปของชุดสมการอนุรักษ์ต่างๆ ซึ่งจะประยุกต์ใช้โดยการพัฒนาสมการบนพื้นฐานของทฤษฎีจลน์การไหลของแข็ง (Kinetic Theory of Granular Flow: KTGF) (Gidaspow, 1994) โดยกำหนดภาวะขอบ (Boundary conditions) กำหนดภาวะเริ่มต้น (Initial conditions) กำหนดค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที กำลังสอง ในทิศทางติดลบของแกน Y และกำหนดค่าความดันแวดล้อมเท่ากับ 101,325 ปาสคาล

3.1.1.1 สมการอนุรักษ์ (Conservation equations) (FLUENT 6.2 User's Guide)

สมการอนุรักษ์ที่ใช้ในแบบจำลองของวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่งของของแข็ง

3.1.1.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equations)

วัฏภาคแก๊ส , g

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

วัฏภาคของแข็ง , s

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

ซึ่งผลรวมของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเท่ากับหนึ่งหน่วย $\varepsilon_g + \varepsilon_s = 1$

ε_s คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาคของแข็ง (-)

ε_g คือ สัดส่วนเชิงปริมาตรของวัฏภาคแก๊ส (-)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ρ_g คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

v_s คือ ความเร็วของวัฏภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที)

v_g คือ ความเร็วของวัฏภาคแก๊ส (เมตรต่อวินาที)

t คือ เวลา (วินาที)

3.1.1.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equations)

วัฏภาคแก๊ส , g

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

วัฏภาคของแข็ง , s

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

τ_g คือ ความเค้นเทนเซอร์ของแก๊ส (ปาสคาล)

τ_s คือ ความเค้นเทนเซอร์ของของแข็ง (ปาสคาล)

P_g คือ ความดันของวัฏภาคแก๊ส (ปาสคาล)

P_s คือ ความดันของวัฏภาคของแข็ง (ปาสคาล)

β คือ แบบจำลองการต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสามวินาที)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

3.1.1.1.3 สมการอนุรักษ์พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัดแกว่ง (Fluctuating kinetic energy conservation equation) ของวัฏภาคของแข็ง

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

I คือ เทนเซอร์เอกลักษณ์ (-)

θ_s คือ อุณหภูมิของอนุภาค (เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง)

κ_s คือ พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

γ_s คือ พลังงานกวัตต์แกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)

พลังงานจลน์เนื่องจากการกวัตต์แกว่งของอนุภาคหรืออุณหภูมิของอนุภาค (Granular temperature) จะถูกใช้เป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการคำนวณด้วยทฤษฎีจลน์การไหลของอนุภาค เช่น ความดันของอนุภาค และความหนืดของอนุภาค เป็นต้น

3.1.1.2 สมการเสริม (Constitutive equations)

พฤติกรรมของวัสดุของแข็งจะถูกอธิบายผ่านพลังงานของอนุภาคซึ่งสัมพันธ์กับการชนและการเคลื่อนไหวเนื่องจากการกวัตต์แกว่งของอนุภาค

ความเค้นเทนเซอร์ (Stress tensor)

วัสดุภาคแก๊ส, g

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

วัสดุภาคของแข็ง, s

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

ξ_s คือ ความหนืดรวม (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

μ_s คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

ความดันของอนุภาคจะประกอบด้วยสองพจน์ พจน์ที่หนึ่งจะเกี่ยวข้องกับจลนศาสตร์ซึ่งจะมีผลมากในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคน้อยและพจน์ที่สองจะเกี่ยวเนื่องกับการชนกันของอนุภาคซึ่งจะมีผลมากในบริเวณที่มีความหนาแน่นของอนุภาคมาก

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

g_o คือ ฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคในแนวรัศมีซึ่งจะมีค่ามาก เมื่อสัดส่วนปริมาตรของแข็งมีค่าเข้าใกล้สัดส่วนปริมาตรของแข็งขณะที่อัดตัวแน่น ($\varepsilon_{s,\max} = 0.60$)

ความหนืดเนื่องจากความเค้นจะประกอบด้วยพจน์ของจลนศาสตร์ การชน และแรงเสียดทานซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมของอนุภาคของแข็ง

$$\mu_s = \frac{4}{5} \varepsilon_s \rho_s d_p g_o (1+e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} + \frac{10\rho_s d_p \sqrt{\pi\theta}}{96(1+e) g_o \varepsilon_s} \left[1 + \frac{4}{5} \varepsilon_s g_o (1+e) \right]^2 \quad (3.9)$$

เมื่อ e คือ Restitution Coefficient
 $e = 1$ คือ การชนแบบยืดหยุ่นซึ่งจะไม่มี การสูญเสียพลังงาน
 $e = 0$ คือ การชนซึ่งจะสูญเสียพลังงานทั้งหมดระหว่างการชน
 $0 < e < 1$ คือ การชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งจะสูญเสียพลังงานระหว่างการชน
 d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)

ความหนืดรวมของอนุภาคเป็นตัววัดความต้านทานของอนุภาคสำหรับการบีบอัดและการขยายตัว

$$\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_p g_o (1+e) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

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

$$g_o = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{s,\max}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (3.11)$$

พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (γ_s)

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

พลังงานกวัดแกว่งเนื่องจากการนำ (κ_s)

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

สำหรับแบบจำลองการด้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่ Energy Minimization Multi-Scale (EMMS) ซึ่งพัฒนาโดย Yang และคณะ (2004) โดยจากงานวิจัยของ Chalermsoinsuwan และคณะ (2009a; 2010b) พบว่า แบบจำลองการด้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบ EMMS นั้นเหมาะกับการจำลองการไหลภายใต้ช่วงการไหลฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization) เนื่องจากแบบจำลองด้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคนี้จะคำนึงถึงผลของการเกิดกลุ่มก้อนของอนุภาคขึ้นภายในกระบวนการด้วย

$$\text{สำหรับ } \varepsilon_g > 0.74, \beta_{gs} = 150 \frac{(1-\varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_g) \rho_g |v_g - v_s|}{d_p} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_g > 0.74, \beta_{gs} = \frac{3(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{4} \frac{\rho_g |v_g - v_s| C_{D0}}{d_p} \omega(\varepsilon_g) \quad (3.15)$$

$$0.74 \leq \varepsilon_g < 0.82, \omega(\varepsilon_g) = -0.5760 + \frac{0.0214}{4(\varepsilon_g - 0.7463)^2 + 0.0044} \quad (3.16)$$

$$0.82 \leq \varepsilon_g < 0.97, \omega(\varepsilon_g) = -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0040} \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_g > 0.97, \omega(\varepsilon_g) = -31.8295 + 32.8295\varepsilon_g \quad (3.18)$$

$$\text{และที่ } \text{Re} < 1000, C_{D0} = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}); \text{Re} = \frac{d_p \rho_g \varepsilon_g |v_g - v_s|}{\mu_g} \quad (3.19)$$

$$\text{Re} \geq 1000, C_{D0} = 0.44$$

โดยที่ C_{D0} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การต้านทานการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (-)

3.1.2 การหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test)

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ เซลล์การคำนวณ แบบมีระยะห่างของแต่ละเซลล์การคำนวณ ไม่เท่ากัน (Non-uniform grid) จำนวน 3 ค่า โดยรูปที่ 3.3 แสดง เซลล์การคำนวณ แต่ละขนาด ได้แก่ 2,750 5,500 และ 11,000 เซลล์การคำนวณ

ในการหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมจะทำการเพิ่มปริมาณของเซลล์การคำนวณ ให้มีปริมาณมากขึ้น การคำนวณจะเข้าสู่ค่าตอบค่าๆ หนึ่งมากขึ้น เนื่องจากยังมีปริมาณ เซลล์การคำนวณมาก การคำนวณค่าในปริมาตรควบคุมเล็กๆ จะมีความละเอียดขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ก็จะใช้เวลาในการคำนวณที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน

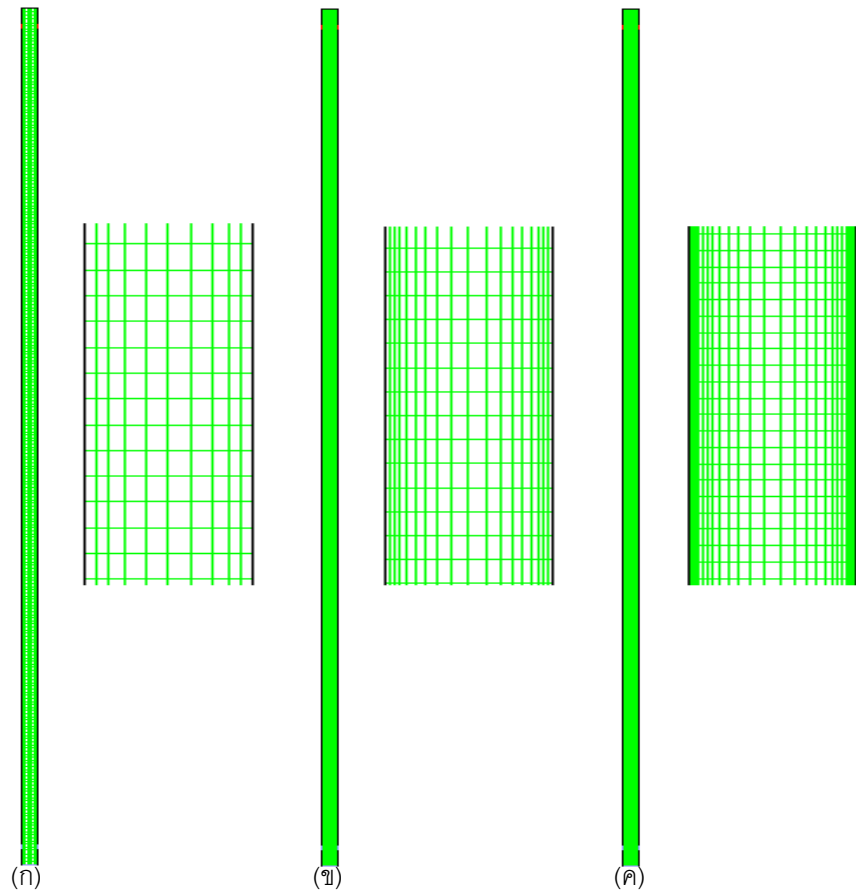
3.2 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน (Ring baffle configuration)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการศึกษาผลของเสนอรูปแบบการใส่แผ่นปะทะภายในท่อ ไโรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนด้วยวิธีการจำลอง โดยตัวแปรที่ศึกษามีด้วยกัน 5 ตัวแปร คือ

1. พื้นที่การเปิดช่องว่างของแผ่นปะทะ (A) ซึ่งจะกำหนดโดยการเพิ่มหรือลด ความกว้างวงแหวนในแผ่นปะทะแบบวงแหวน ในงานวิจัยนี้จะศึกษาโดยใช้ พื้นที่การเปิดช่องว่างของแผ่นปะทะที่ 50% และ 75% โดยกำหนดความ กว้างของวงแหวนในแผ่นปะทะแบบวงแหวน
2. ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะแต่ละแผ่น (B) แผ่นปะทะแบบวงแหวนสองแผ่น แรกจะวัดระยะห่างจากกึ่งกลางของทางเข้าออกไปทางด้านบนและด้านล่าง ในระยะห่างที่เท่ากัน ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 0.08 เมตร และ 0.20 เมตร

3. ความหนาของแผ่นปะทะ (C) ที่ใช้มีสองความหนา คือ 0.01 เมตร และ 0.04 เมตร
4. จำนวนของแผ่นปะทะที่ใช้ (D) มีจำนวนต่ำสุดที่ใช้คือ 5 แผ่นและจำนวนสูงสุดที่ใช้คือ 14 แผ่น
5. ความสม่ำเสมอของระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ (E) ในการจำลองนี้ใช้ค่า 1 และ 1.25 ค่า 1 หมายถึง แผ่นปะทะที่ติดตั้งทั้งหมดมีระยะห่างสม่ำเสมอตลอดความสูงของท่อโรเซออร์ ค่า 1.25 หมายถึง ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะจะมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 ต่อครั้งจากระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะก่อนหน้า

โดยจะทำการทดลองตามวิธีออกแบบการทดลองแบบ 2^k factorial design of experiment สรุปได้เป็น $2^5 = 32$ กรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งค่าสูงสุดต่ำสุดที่ใช้จะพิจารณาให้มีช่วงครอบคลุมค่าที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Jin และคณะ, 2003) ซึ่งแต่ละตัวแปรจะเป็นอิสระต่อกัน ในการเปรียบเทียบผลการจำลองภาวะท่อโรเซออร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ได้ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะเปรียบเทียบกับผลจากเครื่องปฏิกรณ์ปกติ ตัวแปรที่นำมาพิจารณาเพื่อเป็นตัวชี้วัดการผสมที่เกิดขึ้นภายในท่อโรเซออร์ ได้แก่ ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตร (Volume fraction) ในแนวแกนและแนวรัศมี เนื่องจากค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งจะบอกถึงการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งซึ่งสามารถนำมาใช้ในการอธิบายการผสมที่เกิดขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมจำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณของแข็งที่อยู่ในระบบด้วย ในส่วนการพิจารณาอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในท่อโรเซออร์นั้นจะพิจารณาจากความเร็วในแนวแกนและแนวระดับทั้งของวัฏภาคของแข็งและแก๊ส รวมทั้งพิจารณาผลของค่าความดันลดตลอดความสูงของท่อโรเซออร์ควบคู่กันไปด้วย



รูปที่ 3.3 แสดงการแบ่งเซลล์จำนวน (ก) 2,750 (ข) 5,500 และ (ค) 11,000 เซลล์จำนวน

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองแบบ 2^5 ของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน

กรณี	พื้นที่เปิดของแผ่น ปะทะ (%) (A)	ระยะห่างของแผ่น ปะทะ (m) (B)	ความหนา (m) (C)	จำนวนแผ่น ปะทะ (-) (D)	ความสม่ำเสมอของ ระยะห่าง (-) (E)
Baffle free	-	-	-	-	-
riser	-	-	-	-	-
1	75%	0.08	0.01	5	1.25
2	50%	0.08	0.01	5	1.00
3	75%	0.20	0.01	5	1.00
4	50%	0.20	0.01	5	1.25
5	75%	0.08	0.04	5	1.00
6	50%	0.08	0.04	5	1.25
7	75%	0.20	0.04	5	1.25
8	50%	0.20	0.04	5	1.00
9	75%	0.08	0.01	14	1.00
10	50%	0.08	0.01	14	1.25
11	75%	0.20	0.01	14	1.25
12	50%	0.20	0.01	14	1.00
13	75%	0.08	0.04	14	1.25
14	50%	0.08	0.04	14	1.00
15	75%	0.20	0.04	14	1.00
16	50%	0.20	0.04	14	1.25
17	75%	0.08	0.01	5	1.00
18	50%	0.08	0.01	5	1.25
19	75%	0.20	0.01	5	1.25
20	50%	0.20	0.01	5	1.00
21	75%	0.08	0.04	5	1.25
22	50%	0.08	0.04	5	1.00
23	75%	0.20	0.04	5	1.00
24	50%	0.20	0.04	5	1.25
25	75%	0.08	0.01	14	1.25
26	50%	0.08	0.01	14	1.00
27	75%	0.20	0.01	14	1.00
28	50%	0.20	0.01	14	1.25
29	75%	0.08	0.04	14	1.00
30	50%	0.08	0.04	14	1.25
31	75%	0.20	0.04	14	1.25
32	50%	0.20	0.04	14	1.00

3.3 การศึกษาผลของตัวแปรการดำเนินการ (Operating condition)

วิธีการดำเนินงานวิจัยในส่วนนี้จะนำท่อโรเซอริที่ผ่านการปรับปรุงด้วยการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนในกรณีที่ทำให้การผสมของของแข็ง-แก๊สดีที่สุดและการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่ให้ปริมาณของแข็งภายในระบบสูงที่สุด มาทำการศึกษาผลของตัวแปรการดำเนินการ เพื่อหาภาวะการดำเนินการที่ทำให้ท่อโรเซอริที่ผ่านการปรับปรุงมีการผสมและปริมาณของแข็งภายในที่ดียิ่งขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้ ตัวแปรที่เกี่ยวกับการดำเนินการที่ศึกษาได้แก่

1. ความเร็วแก๊สขาเข้า (Inlet gas velocity) (F) ที่นำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะมีค่าความเร็วต่ำสุด-สูงสุดอยู่ในช่วงค่าความเร็วที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบฟลูอิดไอเซชันความเร็วสูง โดยมีค่าความเร็วต่ำสุดที่ 2.2 เมตรต่อวินาทีและค่าความเร็วสูงสุดที่ 8.2 เมตรต่อวินาที
2. อัตราการป้อนกลับของอนุภาคของแข็ง (Solid circulation rate) (G) โดยค่าต่ำสุด-สูงสุด อยู่ในช่วงที่ยังทำให้ปริมาณของแข็งภายในระบบยังคงมีค่ามากอยู่ ซึ่งในการปรับค่าอัตราการป้อนกลับของงานวิจัยนี้จะทำโดยการปรับความเร็วของแก๊สที่ทางเข้าโดยเมื่อใช้ความหนาแน่นของของแข็งเท่ากับ 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งเท่ากับ 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที จะใช้ความเร็วขาเข้าของแก๊สที่ 0.468 เมตรต่อวินาที และที่ค่าอัตราการป้อนกลับของอนุภาคของแข็ง 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตร วินาที จะใช้ความเร็วขาเข้าของแก๊สที่ 0.676 เมตรต่อวินาที เมื่อเปลี่ยนความหนาแน่นของของแข็งเป็น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งเท่ากับ 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที จะใช้ความเร็วขาเข้าของแก๊สที่ 0.333 เมตรต่อวินาที และที่ค่าอัตราการป้อนกลับของอนุภาคของแข็ง 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตร วินาที จะใช้ความเร็วขาเข้าของแก๊สที่ 0.482 เมตรต่อวินาที
3. ขนาดของอนุภาคของแข็ง (H) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีค่าอยู่ในกลุ่มอนุภาค Geldart A โดยค่าต่ำสุดที่ใช้คือ 50 ไมโครเมตร และค่าสูงสุดที่ใช้คือ 90 ไมโครเมตร

4. ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (I) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีค่าอยู่ในกลุ่มอนุภาค Geldart A โดยค่าต่ำสุดที่ใช้คือ 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และค่าสูงสุดที่ใช้คือ 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

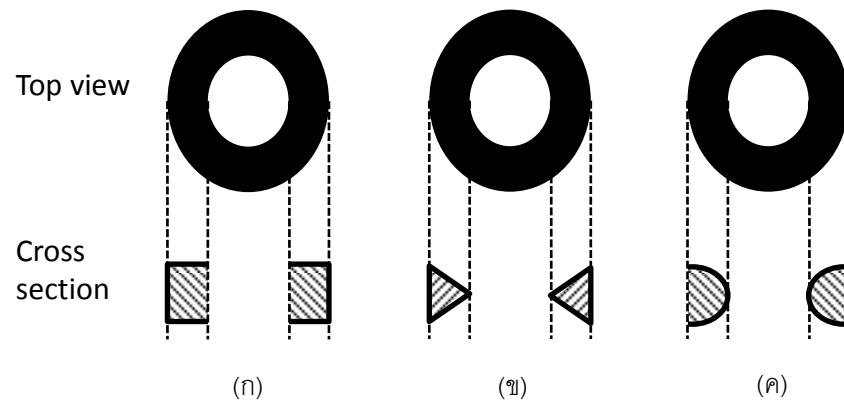
ในการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการดังที่กล่าวมานั้นจะทำการแบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 16 กรณีตามวิธีออกแบบการทดลอง ดังสรุปได้เป็นตารางที่ 3.2 ซึ่งทั้ง 16 กรณีนี้จะใช้การติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนสองแบบ คือ แบบที่ให้การผสมดีที่สุด และแบบที่ให้ปริมาณของแข็งเฉลี่ยทั้งระบบมากที่สุด จากนั้น เปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้เพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อไรเซอร์ที่ทำการปรับปรุงด้วยแผ่นปะทะแบบวงแหวนทั้งสองแบบ และกรณีที่เหมาะสมในการดำเนินการ

ตารางที่ 3.2 การออกแบบการทดลองแบบ 2^4 ของตัวแปรดำเนินการ

กรณี	ความเร็ว แก๊สเข้า (m/s) (F)	ฟลักซ์โดยมวลของ ของแข็ง (kg/m ² s) (G)	เส้นผ่านศูนย์กลางของ อนุภาคของแข็ง (m) (H)	ความหนาแน่นของ อนุภาคของแข็ง (kg/m ³) (I)
1	2.2	400	50×10^{-6}	1,424
2	8.2	400	50×10^{-6}	1,424
3	2.2	578	50×10^{-6}	1,424
4	8.2	578	50×10^{-6}	1,424
5	2.2	400	90×10^{-6}	1,424
6	8.2	400	90×10^{-6}	1,424
7	2.2	578	90×10^{-6}	1,424
8	8.2	578	90×10^{-6}	1,424
9	2.2	400	50×10^{-6}	2,000
10	8.2	400	50×10^{-6}	2,000
11	2.2	578	50×10^{-6}	2,000
12	8.2	578	50×10^{-6}	2,000
13	2.2	400	90×10^{-6}	2,000
14	8.2	400	90×10^{-6}	2,000
15	2.2	578	90×10^{-6}	2,000
16	8.2	578	90×10^{-6}	2,000

3.4 การศึกษาผลของรูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวน

รูปร่างของแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้มี 3 รูปทรงได้แก่ 1. รูปทรงทั่วไป (สี่เหลี่ยม) 2. รูปทรงสามเหลี่ยม 3. รูปทรงครึ่งวงกลม ดังแสดงในรูปที่ 3.4 การศึกษาผลของรูปร่างของแผ่นปะทะแบบวงแหวนนั้นจะแบ่งเป็น 2 กรณี โดย 1. ใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนและภาวะดำเนินการที่ให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์สูงที่สุดและ 2. ใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนและภาวะดำเนินการที่ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด



รูปที่ 3.4 รูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวน (ก) สี่เหลี่ยม (ข) สามเหลี่ยม และ (ค) ครึ่งวงกลม

บทที่ 4

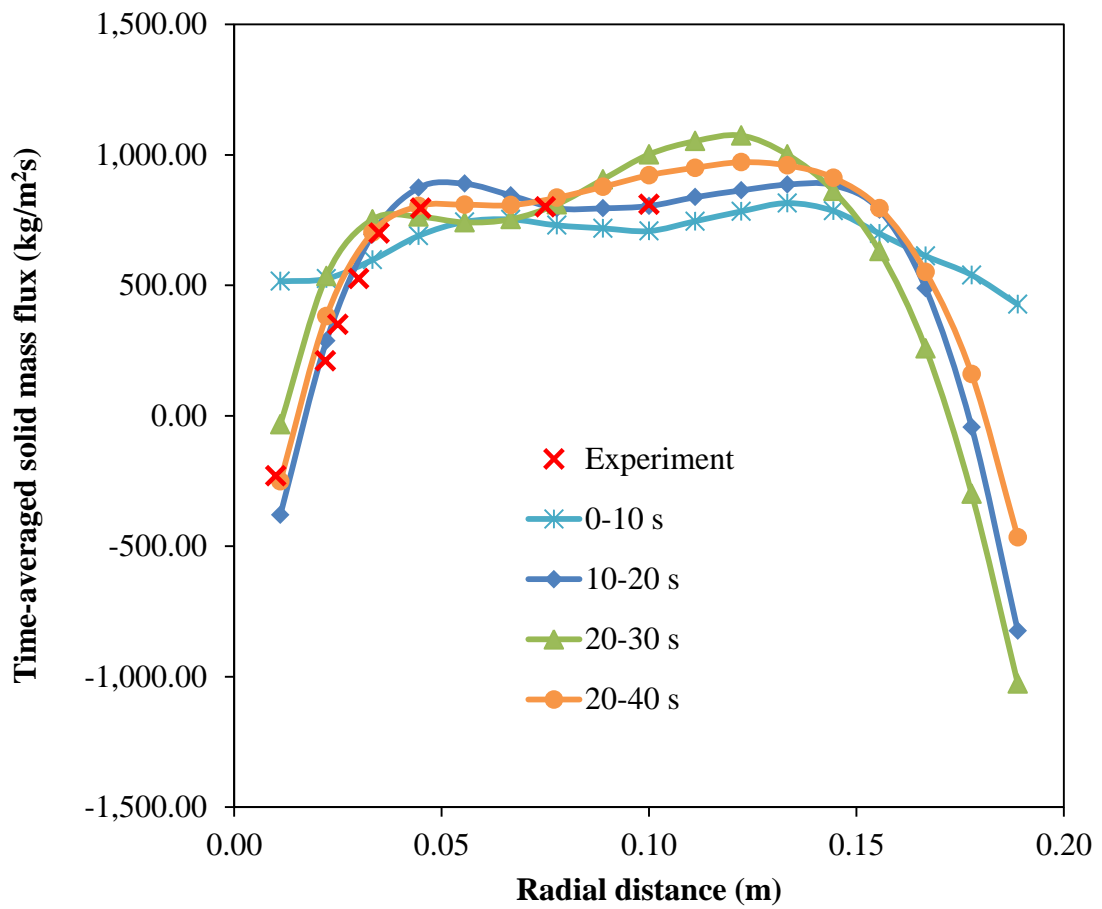
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย

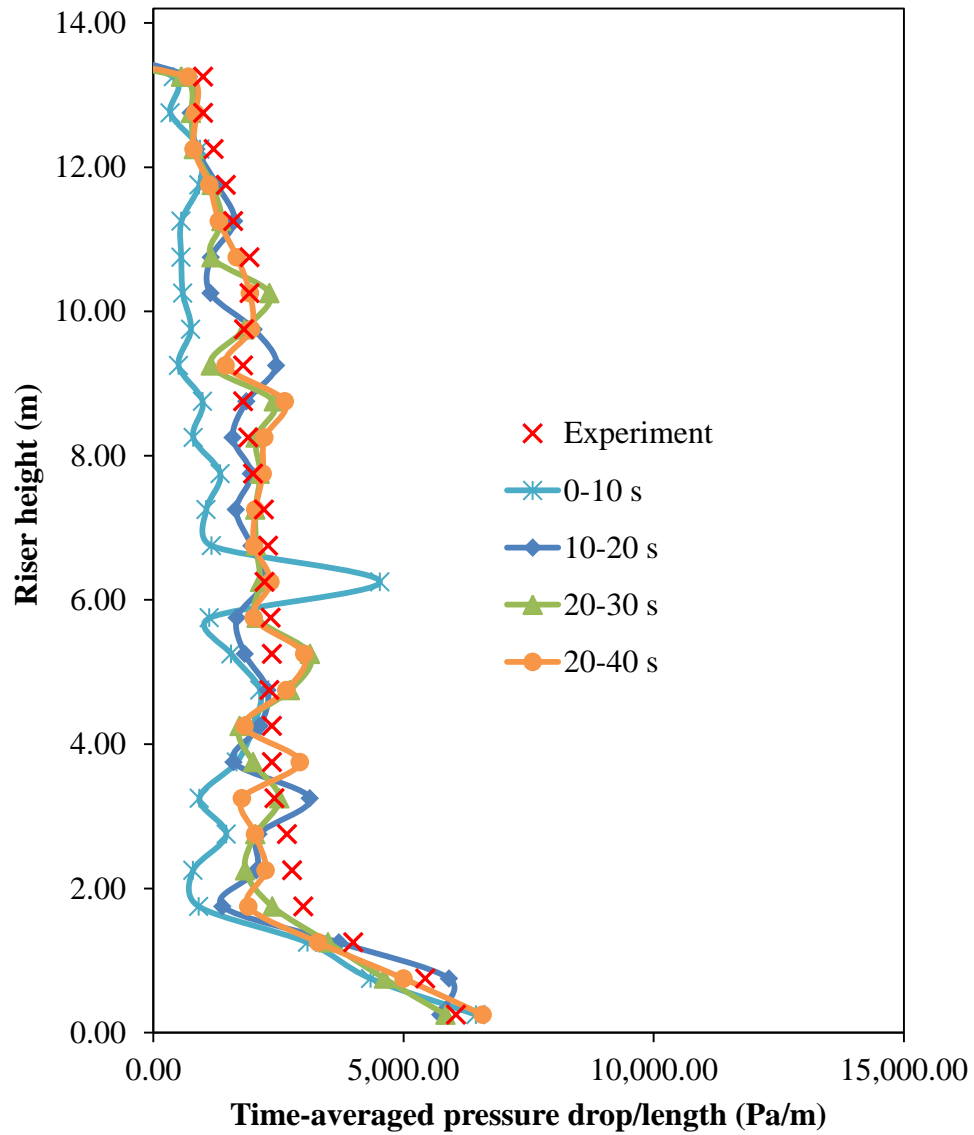
จากการดำเนินการวิจัยในตอนต้นที่ 1 การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัยจะแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ การหาแบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Drag model) เนื่องจากแบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุได้ถูกค้นพบมากขึ้นในปัจจุบัน ทำให้มีแบบจำลองมากมายที่อาจให้ผลลัพธ์จากการจำลองมีความถูกต้องมากขึ้น และการหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test) ที่สามารถทำนายค่าได้ถูกต้องและใช้เวลาในการคำนวณต่ำ

ในการเปรียบเทียบผลของข้อมูลการจำลองการไหลในที่นี้จะใช้ค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 20-40 วินาทีซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว (Steady state) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ที่เป็นการพลอตค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งในแนวรัศมีซึ่งเฉลี่ยในช่วงเวลาต่างๆ กัน แล้วเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) พบว่า ที่ช่วงเวลา 0-10 วินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็งในแนวรัศมี ยังให้ค่าไม่ถูกต้อง เมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลา 10-20 20-30 และ 20-40 พบว่าทั้งสามช่วงเวลามีแนวโน้มของค่ามวลฟลักซ์ในแนวรัศมีใกล้เคียงกันแสดงว่าระบบเริ่มเข้าสู่ภาวะคงตัวแล้วซึ่งสามารถยืนยันได้จากรูปที่ 4.2 ที่เป็นการแสดงค่าเฉลี่ยของความดันลดต่อความยาวที่เกิดขึ้นในท่อไรเซอร์ที่ช่วงเวลาต่างๆ กัน ตลอดความสูงโดยพบว่าช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวนั้นเป็นช่วงเวลาเดียวกัน ในกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความดันลดต่อความยาวที่เฉลี่ยในช่วงเวลา 0-10 วินาที ยังคงมีค่าน้อยกว่าค่าความดันลดต่อความยาวที่ได้จากการทดลอง และค่าความดันลดเฉลี่ยในอีกสามช่วงเวลาให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าเช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.1 ดังนั้น ในการเปรียบเทียบผลของข้อมูลการจำลองการไหลในงานวิจัยนี้จะทำที่ค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 20-40 วินาที เพื่อความแม่นยำในผลการคำนวณที่ได้

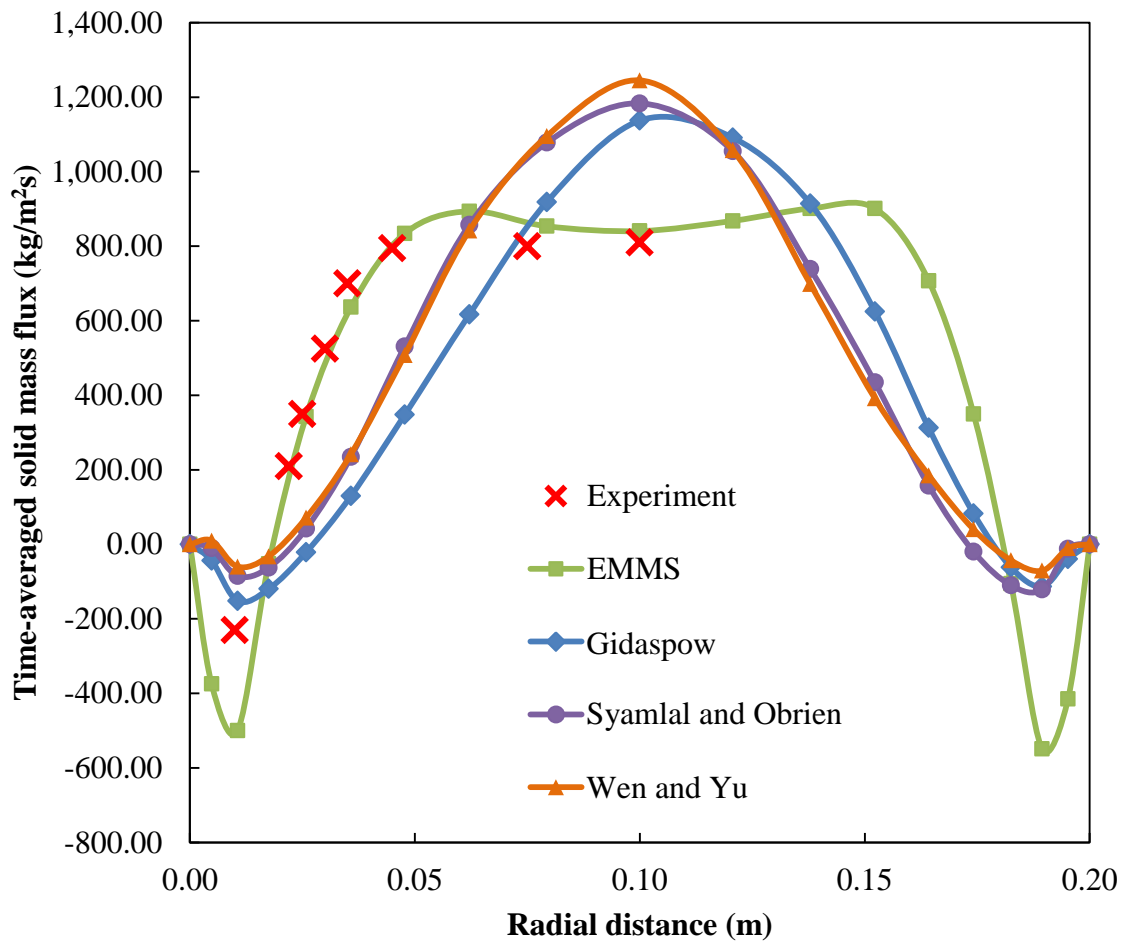
จากผลการทดลองในส่วนของการหาแบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุ พบว่า การใช้แบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบ Energy Minimization Multi-Scale (EMMS) ซึ่งพัฒนาโดย Yang และคณะ (2004) นั้นสามารถให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) มากที่สุด ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.3 ซึ่ง



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งเฉลี่ย ณ ช่วงเวลาต่างๆ



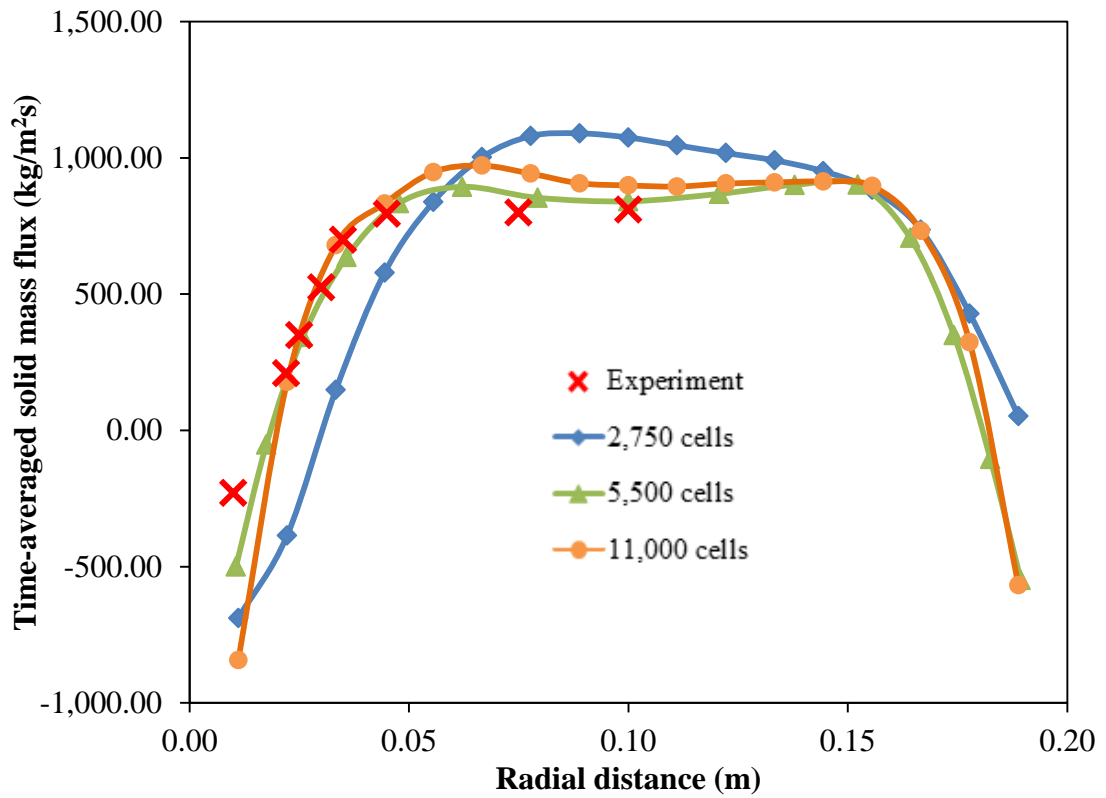
รูปที่ 4.2 การกระจายตัวตามแนวแกนของความดันลดต่อความยาวเฉลี่ย ณ ช่วงเวลาต่างๆ



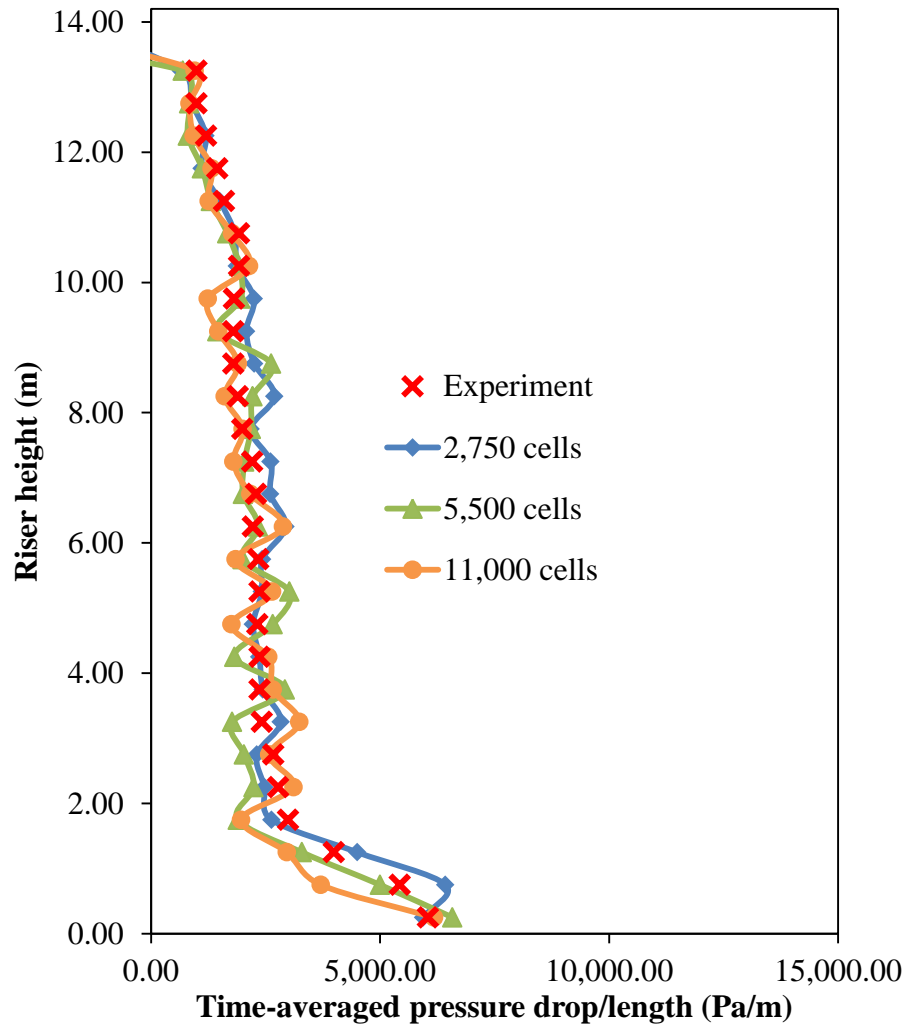
รูปที่ 4.3 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งที่คำนวณได้จากแบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่แบบต่างๆ

เป็นการแสดงค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งในแนวรัศมี จากกราฟ พบว่า เฉพาะแบบจำลองการ
 ด้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบ EMMS เท่านั้นที่สามารถทำนายค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง
 ที่บริเวณใกล้ผนังได้แม่นยำ โดยจะพบว่าค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งที่บริเวณใกล้ผนังมีค่าสูง
 เมื่อเทียบกับการใช้แบบจำลองการด้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบอื่นซึ่งจะทำนายค่าฟลักซ์
 โดยมวลของของแข็งสูงเฉพาะบริเวณกึ่งกลางของท่อโรเซอรัฟเท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะ แบบจำลอง
 การด้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบ EMMS นั้นจะคิดผลกระทบจากการจับกลุ่มกันของอนุภาค
 เกิดเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) ดังนั้น การนำแบบจำลองการด้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบ
 EMMS มาใช้จำลองที่ช่วงการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization) ซึ่งบริเวณผนัง
 มีของแข็งอยู่หนาแน่นมากกว่าตรงกลางท่อโรเซอรัฟจึงมีความเหมาะสมที่สุด

การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องหาจำนวนเซลล์การ
 คำนวณที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณ เพื่อให้การคำนวณมีความถูกต้องและใช้เวลาต่ำ
 โดยจำนวนเซลล์การคำนวณที่นำมาศึกษามีขนาด 2,750 5,500 และ 11,000 เซลล์ ซึ่งจะมีการ
 กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform) โดยจะมีจำนวนเซลล์การคำนวณหนาแน่นบริเวณผนัง
 เพื่อการทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นให้แม่นยำ เนื่องจากในช่วงการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบ
 ความเร็วสูงจะมีของแข็งปริมาณมากที่บริเวณผนัง ค่าที่นำมาใช้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการ
 ทดลอง คือ ค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งและค่าความดันลดต่อความยาว ซึ่งในรูปที่ 4.4 เป็น
 กราฟแสดงฟลักซ์โดยมวลของของแข็งในแนวรัศมีที่ได้จากการใช้เซลล์การคำนวณต่างๆ กัน จะ
 เห็นได้ว่าการใช้จำนวนเซลล์การคำนวณ 2,750 เซลล์ ค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งนั้นมีความ
 คลาดเคลื่อนจากค่าผลการทดลองสูงเนื่องจากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในระบบมีความซับซ้อน
 การใช้จำนวนเซลล์การคำนวณน้อยเกินไปจึงไม่สามารถทำนายได้อย่างแม่นยำนัก เมื่อเพิ่มจำนวน
 เซลล์การคำนวณมากขึ้นไป เป็น 5,500 และ 11,000 เซลล์ พบว่าค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งที่
 ได้จากการทำนายมีความใกล้เคียงค่าจากการทดลองมากขึ้น อีกทั้งพบว่าค่าที่ได้จากการใช้เซลล์
 การคำนวณ 5,500 เซลล์นั้นไม่ต่างจากการใช้เซลล์การคำนวณจำนวน 11,000 เซลล์ ด้วยเหตุ
 ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มจำนวนเซลล์มากไปกว่า 5,500 ไม่ส่งผลต่อความถูกต้องของค่าที่
 ได้จากการทำนายแล้ว เช่นเดียวกันกับผลที่ได้จากการพิจารณาค่าความดันลดต่อความยาวตลอด
 แนวความสูงของท่อโรเซอรัฟที่เซลล์การคำนวณต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ดังนั้นแบบจำลองการ
 ไหลในงานวิจัยนี้จะใช้เซลล์การคำนวณจำนวน 5,500 เซลล์



รูปที่ 4.4 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งที่เซลล์การคำนวณต่างๆ



รูปที่ 4.5 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าความดันลดต่อความยาวเฉลี่ยตั้งแต่วินาทีที่ 20-40
วินาทีที่เซลล์จำนวนต่างๆ

4.2 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซอร์

การอภิปรายผลการศึกษาค้นคว้าผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซอร์ในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของผลที่ได้จากเทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of experiment) และในส่วนของอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) เป็นส่วนที่สอง

4.2.1 การออกแบบการทดลอง

การศึกษาค้นคว้าผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง ซึ่งข้อดีของเทคนิคการออกแบบการทดลอง คือให้ผลของความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลสูง สามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ โดยทั่วไปแล้วจะทำการเลือกตัวแปรตอบสนองให้ตรงกับปัญหาที่ต้องการจะศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ค่าความแปรปรวนของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีเฉลี่ยในช่วงเวลาที่ระบบอยู่ในภาวะคงตัว เพื่อบอกการกระจายตัวและความสามารถในการผสมของของแข็งและแก๊สภายในระบบ แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในระบบก็มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีด้วย ดังนั้น การศึกษาค้นคว้าผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนในงานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มตัวแปรตอบสนองอีกหนึ่งตัวเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยรวมทั้งท่อไรเซอร์

จากการจำลองระบบตามตารางที่ 3.1 ที่ได้แสดงไว้ในส่วนของกรณศึกษาวิจัย สามารถนำค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรในแนวรัศมีของของแข็งและค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์สรุปผลออกมาได้ดังตารางที่ 4.1 โดยจากตารางดังกล่าว พบว่า กรณีศึกษาที่ 16 ซึ่งใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีพื้นที่เปิดร้อยละ 50 และมีความหนา 0.04 เมตร ติดตั้งลงในท่อไรเซอร์โดยเว้นระยะห่างเริ่มต้น 0.20 เมตรและค่อยๆเพิ่มระยะห่างมากขึ้นครั้งละร้อยละ 25 ที่ติดตั้งรวมทั้งหมด 14 แผ่น สามารถทำให้ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรในแนวรัศมีของของแข็งมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งการที่มีค่าดังกล่าวนี้หมายความว่าปริมาณของแข็งในแนวรัศมีสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวและการผสมของของแข็งดีขึ้นนั่นเอง ในส่วนของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์นั้นมีค่ามากที่สุดในการณศึกษาที่ 11 ซึ่งใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีพื้นที่เปิดร้อยละ 75 มีความหนา 0.01 เมตร ติดตั้งลงในท่อไรเซอร์โดยเว้นระยะห่างเริ่มต้น 0.20 เมตรและค่อยๆเพิ่มระยะห่างมาก

ตารางที่ 4.1 การออกแบบการทดลองแบบ 2^5 ของการศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งและค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลอง

Case	Baffle opening area (%) (A)	Space (m) (B)	Depth (m) (C)	Number (-)(D)	Uniformity (-) (E)	SD of radial solid volume fraction (-)	Average of solid volume fraction (-)
Baffle free riser	-	-	-	-	-	0.0409	0.1254
1	75%	0.08	0.01	5	1.25	0.0370	0.1273
2	50%	0.08	0.01	5	1.00	0.0402	0.1364
3	75%	0.20	0.01	5	1.00	0.0417	0.1275
4	50%	0.20	0.01	5	1.25	0.0371	0.1277
5	75%	0.08	0.04	5	1.00	0.0416	0.1317
6	50%	0.08	0.04	5	1.25	0.0417	0.1390
7	75%	0.20	0.04	5	1.25	0.0424	0.1280
8	50%	0.20	0.04	5	1.00	0.0397	0.1371
9	75%	0.08	0.01	14	1.00	0.0333	0.1227
10	50%	0.08	0.01	14	1.25	0.0339	0.1326
11	75%	0.20	0.01	14	1.25	0.0391	0.1419
12	50%	0.20	0.01	14	1.00	0.0419	0.1285
13	75%	0.08	0.04	14	1.25	0.0421	0.1372
14	50%	0.08	0.04	14	1.00	0.0403	0.1384
15	75%	0.20	0.04	14	1.00	0.0404	0.1407
16	50%	0.20	0.04	14	1.25	0.0202	0.1162
17	75%	0.08	0.01	5	1.00	0.0360	0.1298
18	50%	0.08	0.01	5	1.25	0.0464	0.1356
19	75%	0.20	0.01	5	1.25	0.0423	0.1264
20	50%	0.20	0.01	5	1.00	0.0358	0.1255
21	75%	0.08	0.04	5	1.25	0.0369	0.1251
22	50%	0.08	0.04	5	1.00	0.0376	0.1398
23	75%	0.20	0.04	5	1.00	0.0405	0.1248
24	50%	0.20	0.04	5	1.25	0.0343	0.1278
25	75%	0.08	0.01	14	1.25	0.0398	0.1366
26	50%	0.08	0.01	14	1.00	0.0396	0.1328
27	75%	0.20	0.01	14	1.00	0.0451	0.1326
28	50%	0.20	0.01	14	1.25	0.0311	0.1240
29	75%	0.08	0.04	14	1.00	0.0424	0.1317
30	50%	0.08	0.04	14	1.25	0.0375	0.1365
31	75%	0.20	0.04	14	1.25	0.0382	0.1346
32	50%	0.20	0.04	14	1.00	0.0315	0.1276

ขึ้นร้อยละ 25 ต่อครั้ง ติดตั้งรวมทั้งหมด 14 แผ่น จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) โดยใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นค่าความแปรปรวนของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีเฉลี่ยในช่วงเวลาที่ระบบอยู่ในภาวะคงตัว พบว่า ค่าพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะและอันตรกิริยาระหว่างพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะกับระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ นั้นเป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากตารางที่ 4.2 ตัวแปร A หรือค่าพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะ และตัวแปร AB หรืออันตรกิริยาระหว่างพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะกับระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ มีค่า p -value ต่ำกว่า 0.05 ซึ่งการที่ค่า p -value ต่ำกว่า 0.05 ทางทฤษฎีของการออกแบบการทดลอง ถ้าทำการตั้งช่วงความเชื่อมั่นไว้ที่ร้อยละ 95 สามารถบอกได้ว่าตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อค่าตอบสนองซึ่งในกรณีนี้คือ ค่าความแปรปรวนของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี อย่างไรก็ตามการที่ ตัวแปร AB เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองนั้น จำเป็นจะต้องนำตัวแปร B หรือระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ มาร่วมพิจารณาด้วย จากนั้น เมื่อทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยรวมทั้งท่อไรเซอร์ ได้ผลดังตารางที่ 4.3 พบว่าระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ (B) อันตรกิริยาระหว่างพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะกับระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ (AB) และ อันตรกิริยาระหว่างพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะกับจำนวนของแผ่นปะทะ (AD) เป็นตัวแปรที่มีค่า p -value ต่ำกว่า 0.05 แสดงว่าตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อค่าตอบสนองซึ่งในกรณีนี้คือค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยรวมทั้งท่อไรเซอร์ ด้วยเหตุที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นการที่ตัวแปร AB และ AD มีผลจึงจำเป็นต้องนำตัวแปร A และ D มาร่วมพิจารณาร่วมด้วย

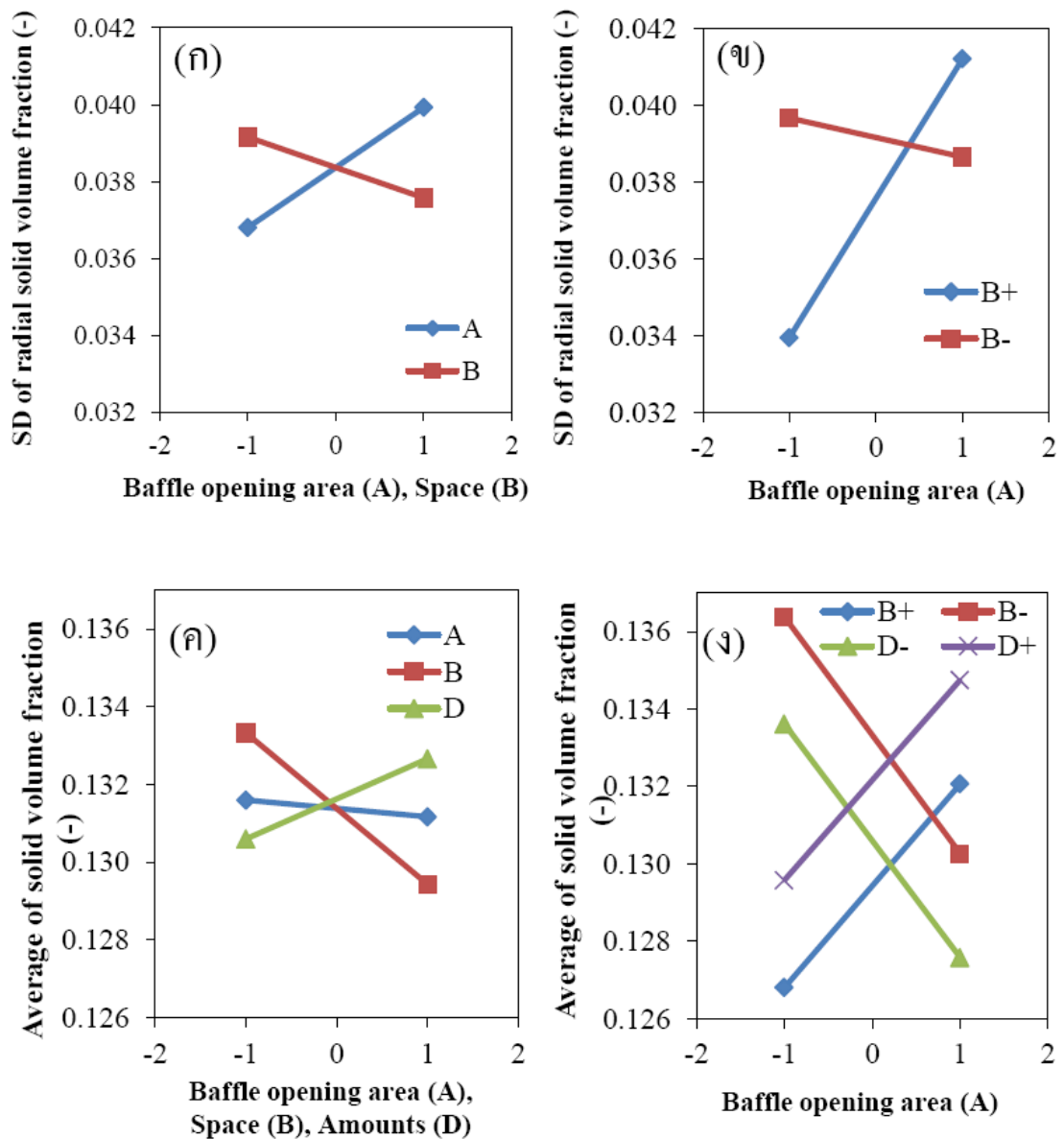
รูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงผลของตัวแปรหลักและผลของอันตรกิริยา พิจารณาที่รูป (ก) เป็นผลของตัวแปรหลักที่มีต่อความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี โดยพบว่า ตัวแปร A แสดงผลเชิงบวก คือ เมื่อเพิ่มพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะ ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีจะเพิ่มขึ้น และตัวแปร B แสดงผลเชิงลบ คือ เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะจะทำให้ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีจะลดลง ซึ่งตามที่ได้อธิบายในตอนต้น การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าความแปรปรวนดังกล่าวจะเป็นตัวบอกถึงประสิทธิภาพในการผสมและกระจายตัวของของแข็งในระบบนั่นเอง เมื่อพิจารณาที่รูป (ข) เป็นผลของอันตรกิริยาที่มีต่อความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี จากกราฟ พบว่า เมื่อค่า B เป็นค่าสูง (+) เส้นกราฟจะมีความชันสูง และการเพิ่มของตัวแปร A มีผลเชิงบวก แสดงว่า เมื่อใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะมาก การเพิ่มขึ้นของพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะจะทำให้ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนว

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี กรณีศึกษาตัวแปรติดตั้งแผ่นปะทะ

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F₀</i>	<i>p-value</i>
A	7.81E-05	1	7.81E-05	4.26	0.048
B	2.00E-05	1	2.00E-05	1.09	0.306
AB	1.37E-04	1	1.37E-04	7.47	0.011
Error	5.14E-04	28	1.83E-05		
Total	7.49E-04	31			

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรเฉลี่ยทั้งหมดไรเซอร์ กรณีศึกษาตัวแปรติดตั้งแผ่นปะทะ

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F₀</i>	<i>p-value</i>
A	1.49E-06	1	1.49E-06	0.08	0.7831
B	1.21E-04	1	1.21E-04	6.31	0.0186
D	1.97E-05	1	1.97E-05	1.02	0.3210
AB	2.59E-04	1	2.59E-04	13.49	0.0011
AD	2.51E-04	1	2.51E-04	13.07	0.0013
Error	5.14E-04	26	1.92E-05		
Total	1.15E-03	31			



รูปที่ 4.6 ผลของตัวแปรหลักและผลของอันตรกิริยา (ก) ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี (ข) ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี (ค) ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง และ(ง) ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

รัศมีมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมในทางกลับกันเมื่อค่า B มีค่าต่ำ (-) เส้นกราฟจะมีความชันน้อย และการเพิ่มของตัวแปร A แสดงผลเชิงลบ หมายความว่า เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะมีค่าน้อยการเพิ่มขึ้นของพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะจะทำให้ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีมีค่าลดลง รูป (ค) เป็นกราฟแสดงผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งทั้งหมดไรเซอร์ ซึ่งพบว่า ตัวแปร A และ B มีผลเชิงลบ ส่วนตัวแปร D มีผลเชิงบวก หมายความว่า การเพิ่มขึ้นของพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะและระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะจะทำให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งทั้งหมดไรเซอร์มีค่าลดลง แต่การเพิ่มขึ้นของจำนวนแผ่นปะทะที่ใช้จะทำให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งทั้งหมดไรเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนของผลของอันตรกิริยานั้นแสดงในรูป (ง) พบว่าเมื่อตัวแปร B และ D มีค่าน้อย (-) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร A ส่งผลเชิงลบ หมายความว่า เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะมีค่าน้อยและใช้จำนวนแผ่นปะทะน้อย การเพิ่มขึ้นของพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะจะทำให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งหมดไรเซอร์มีค่าน้อยลง ตรงกันข้ามกับเมื่อตัวแปร B และ D มีค่ามาก (+) การเพิ่มขึ้นของตัวแปร A ส่งผลเชิงบวก หมายความว่า เมื่อระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะมีค่ามากและใช้จำนวนแผ่นปะทะมาก การเพิ่มขึ้นของพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะจะทำให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งหมดไรเซอร์มีค่ามากขึ้น

หลังจากนั้นเราได้ทำการหาแบบจำลองการถดถอย (Regression model) เพื่อความสะดวกในการนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้ออกแบบการติดตั้งแผ่นปะทะในอนาคต จากการทำงานวิจัยนี้มีค่าตอบสนองสองค่า คือ ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีและค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งหมดไรเซอร์ ดังนั้น แบบจำลองการถดถอยจึงมีสองแบบจำลองโดยสมการที่ (4.1) เป็นแบบจำลองการถดถอยโดยมีค่าตอบสนองคือค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี และสมการที่ (4.2) คือแบบจำลองการถดถอยโดยมีค่าตอบสนองคือค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งหมดไรเซอร์

$$Y_1 = 0.0380 + 0.0016X_A - 0.0008X_B + 0.0021X_A X_B \quad (4.1)$$

$$Y_2 = 0.1314 - 0.0002X_A - 0.0019X_B + 0.000784X_D + 0.0028X_A X_B + 0.0028X_A X_D \quad (4.2)$$

โดยที่ตัวแปร Y_1 คือ ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี

Y_2 คือ ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรเฉลี่ยทั้งหมดไรเซอร์

X_A X_B X_D คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร A B และ D ตามลำดับ

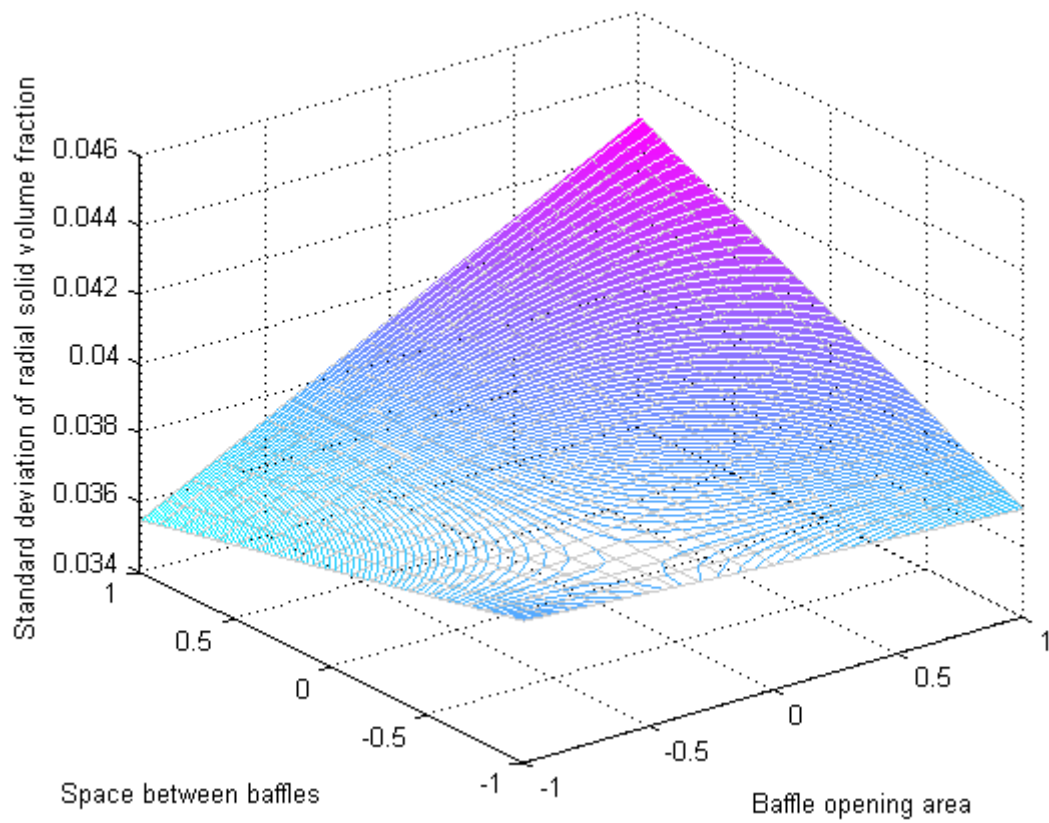
เมื่อพิจารณาการทดสอบความถูกต้องของส่วนตกค้างซึ่งแสดงในภาคผนวก จะเห็นว่าส่วนตกค้างที่ได้มีการกระจายตัวเป็นปกติ ไม่มีรูปแบบ และความแปรปรวนที่ได้คงที่ แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้นั้นมีความถูกต้อง หลังจากนั้นเราสามารถนำแบบจำลองการถดถอยที่ได้มาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) โดย รูปที่ 4.7 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีเมื่อใช้พื้นที่เปิดของแผ่นปะทะและระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะต่างๆ กัน ซึ่ง จะพบว่าการใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ 0.20 เมตร และใช้พื้นที่เปิดของแผ่นปะทะร้อยละ 50 จะให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด และรูปที่ 4.8 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ โดยรูป (ก) เป็นกรณีที่ใช้แผ่นปะทะจำนวน 14 แผ่น ส่วนรูป (ข) เป็นกรณีที่ติดตั้งแผ่นปะทะเพียง 5 แผ่น พบว่า การใช้แผ่นปะทะที่มีพื้นที่เปิดร้อยละ 50 จำนวน 5 แผ่นและระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ 0.08 เมตร จะให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์มีค่าสูงที่สุด

4.2.2 อุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics)

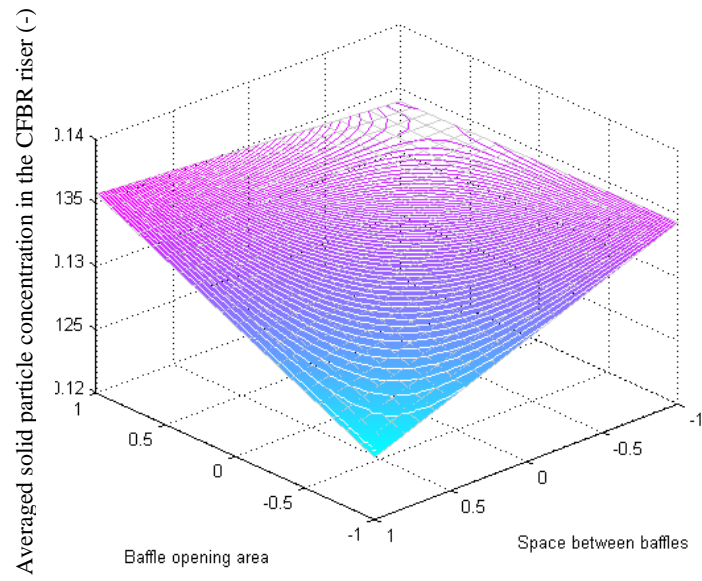
4.2.2.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนในตัวแปรความดันลดต่อความยาว

เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะทำการใส่สิ่งกีดขวางเข้าไปในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนซึ่งในที่นี้คือ แผ่นปะทะแบบวงแหวน ซึ่งจะเข้าไปขัดขวางการไหลของของไหลในท่อไรเซอร์ ด้วยเหตุนี้เอง อาจทำให้เกิดความดันลดต่อความยาวมีมากขึ้น ดังนั้นในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน จึงทำการศึกษารูปแบบความดันลดต่อความยาวที่เกิดขึ้นในระบบเป็นอันดับแรก

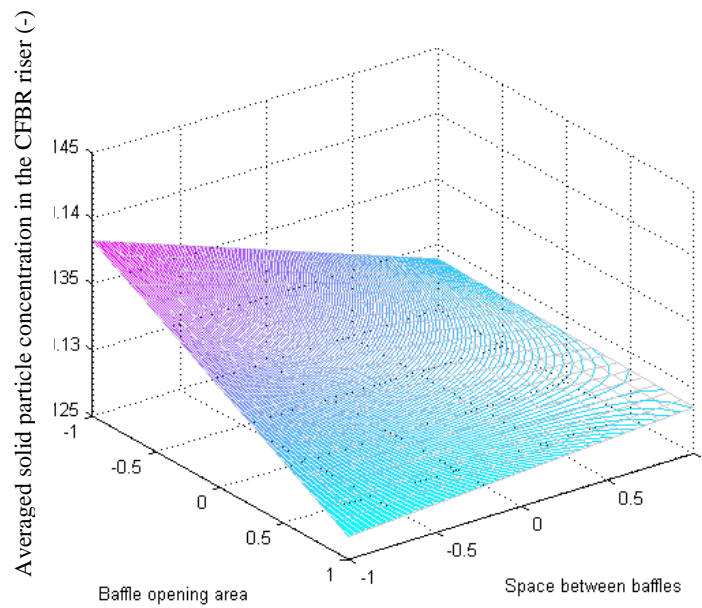
จากการจำลองตามกรณีศึกษาทั้ง 32 รูปแบบการใส่แผ่นปะทะ พบว่า กรณีที่ 16 เป็นรูปแบบการใส่แผ่นปะทะที่ทำให้ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีน้อยที่สุดอีกทั้งยังให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์น้อยที่สุดด้วย กรณีที่ 11 เป็นรูปแบบการใส่แผ่นปะทะที่ทำให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์มีค่ามากที่สุด และกรณีที่ 18 เป็นกรณีที่ให้ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีมากที่สุด เนื่องด้วยกรณีศึกษาที่มีมาก การนำผลการจำลองทั้งหมดมาสร้างกราฟจะ



รูปที่ 4.7 พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง
เมื่อใช้พื้นที่เปิดของแผ่นปะทะและระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะต่างๆ กัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 พื้นผิวตอบสนองของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ โดยรูป

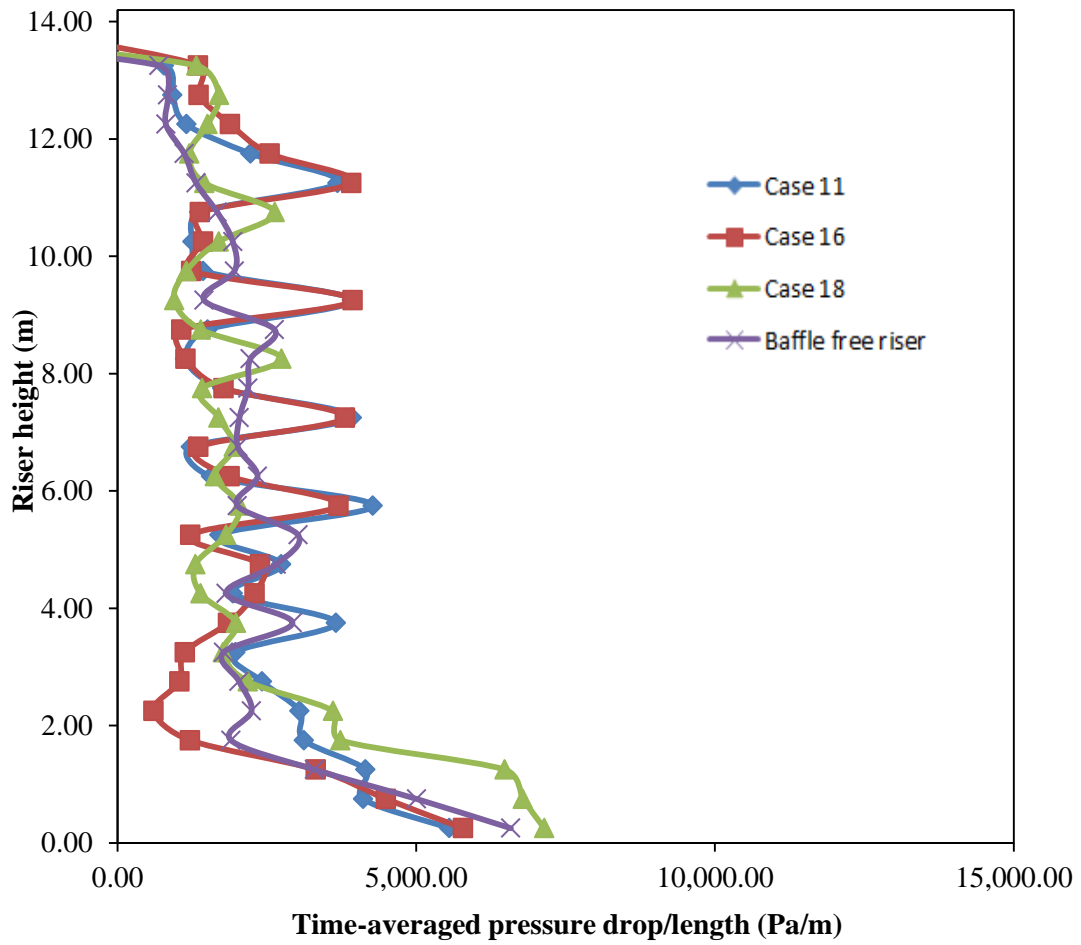
(ก) เป็นกรณีที่ใช้แผ่นปะทะจำนวน 14 แผ่น ส่วนรูป (ข) เป็นกรณีที่ใช้แผ่นปะทะ 5 แผ่น

ทำให้วิเคราะห์ข้อมูลได้ยาก ดังนั้นในการพิจารณาผลการจำลองจะขอแนะนำเฉพาะกรณีศึกษาทั้ง 3 และค่าที่ได้จากการจำลองท่อไรเซอร์ที่ยังไม่ได้ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะดังกล่าวมาเปรียบเทียบ

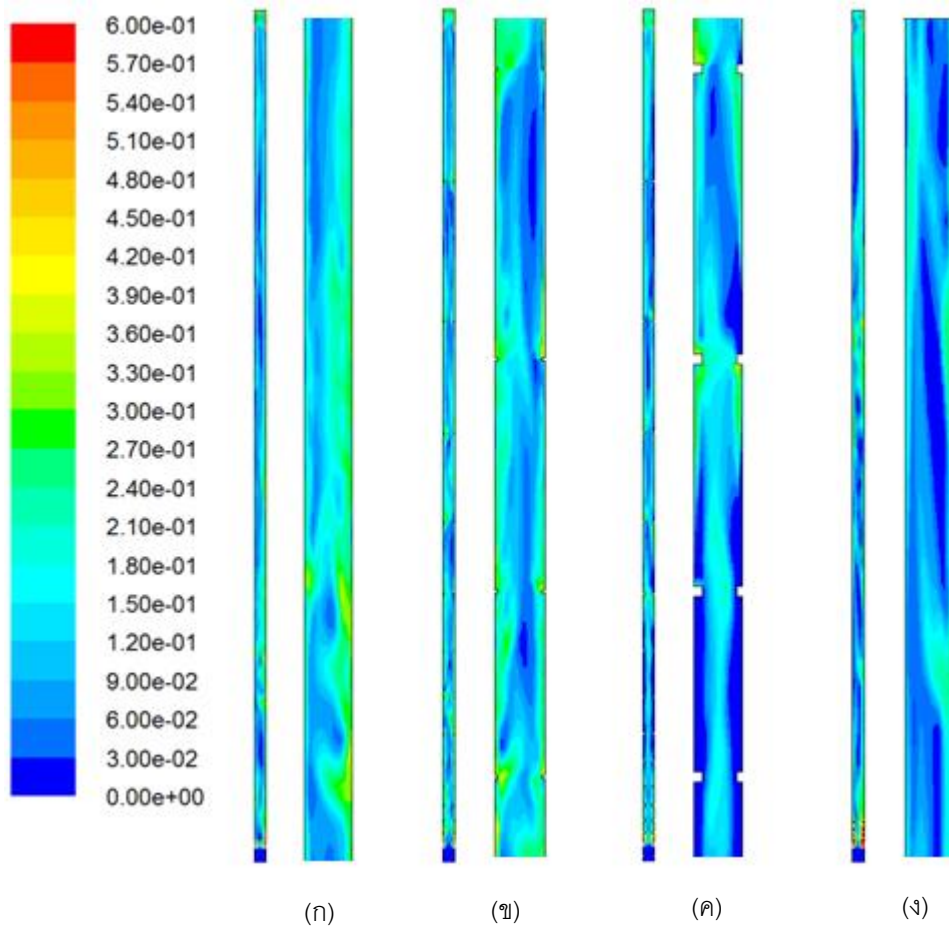
รูปที่ 4.9 เป็นการพลอตค่าความดันลดต่อความยาวเฉลี่ยวินาทีที่ 20-40 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวแล้วของกรณีศึกษาที่ 11 16 18 และท่อไรเซอร์ที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นปะทะ จากกราฟ พบว่า ตำแหน่งของท่อไรเซอร์ที่มีการใส่แผ่นปะทะจะเกิดความดันลดต่อความยาวสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ตำแหน่งความสูงอื่นๆ และเมื่อเปรียบเทียบแต่ละกรณีศึกษาพบว่ากรณีศึกษาที่ 11 และ 16 มีรูปแบบของความดันลดต่อความยาวที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกันทั้งนี้เนื่องมาจากกรณีศึกษาที่ 11 และ 16 ใส่แผ่นปะทะที่ตำแหน่งความสูงเดียวกันนั่นเอง และเมื่อเปรียบเทียบค่าความดันลดต่อความยาวเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ของทั้ง 3 กรณีศึกษาพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และแตกต่างจากความดันลดต่อความยาวเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์แบบไม่ติดตั้งแผ่นปะทะเล็กน้อย แสดงว่า การใส่แผ่นปะทะแบบวงแหวนลงไปไม่ส่งมากนักต่อค่าความดันลดต่อความยาวเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ ซึ่งเป็นผลมาจากการใส่แผ่นปะทะแบบวงแหวนลงไปจะไปยับยั้งการเกิดความดันลดต่อความยาวจากการตกกลับของของแข็งที่ผนังซึ่งเป็นเหตุผลหลักในการเกิดความดันลดต่อความยาวภายในท่อไรเซอร์ ดังนั้นความดันลดต่อความยาวที่เกิดจากการใส่แผ่นปะทะชนิดนี้ลงไปจะไปหักล้างกับการที่แผ่นปะทะยับยั้งความดันลดต่อความยาวที่เกิดจากการตกกลับของของแข็งนั่นเอง

4.2.2.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนในตัวแปรสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

จากจุดประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการพัฒนาการผสมภายในระบบทำให้ตัวแปรที่นำมาพิจารณาเป็นอันดับต่อมา คือ ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งซึ่งทำให้เราทราบว่า มีของแข็งกระจายตัวอยู่ในกระบวนการตรงส่วนใดบ้าง มีลักษณะเป็นอย่างไร รูปที่ 4.10 เป็นการพลอตคอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่เวลา 30 วินาที จะเห็นว่าการใส่แผ่นปะทะลงไปทำให้ของแข็งที่บริเวณผนังลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับรูป (ก) ซึ่งเป็นท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะ โดยกรณีศึกษาที่ 16 หรือรูป (ข) จะมีการลดลงของของแข็งที่ผนังมากที่สุด แสดงให้เห็นว่าเกิดการตกกลับของของแข็งที่ผนังน้อย ลดการรวมตัวกันของอนุภาคของแข็งเกิดเป็นกลุ่มก้อนอนุภาค (Cluster) ทำให้มีค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีน้อยที่สุด และด้วยการมีของแข็งที่ผนังตกกลับลงมาน้อย จะทำให้ของแข็งนั้นหลุดออกจากท่อไรเซอร์เร็วขึ้น ส่งผลให้ค่าสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์มีน้อยที่สุด ในส่วนกรณีศึกษาที่



รูปที่ 4.9 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าความดันลดต่อความยาวเฉลี่ยวินาทีที่ 20-40 ของกรณีศึกษาที่ 11 16 18 และท่อไรเซอร์ที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นปะทะ



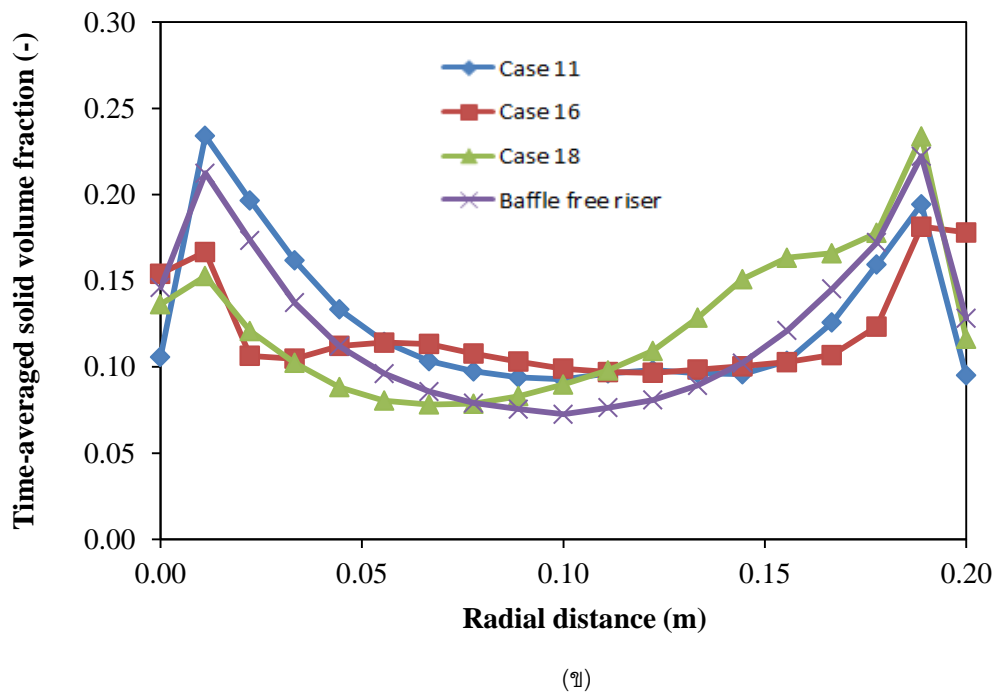
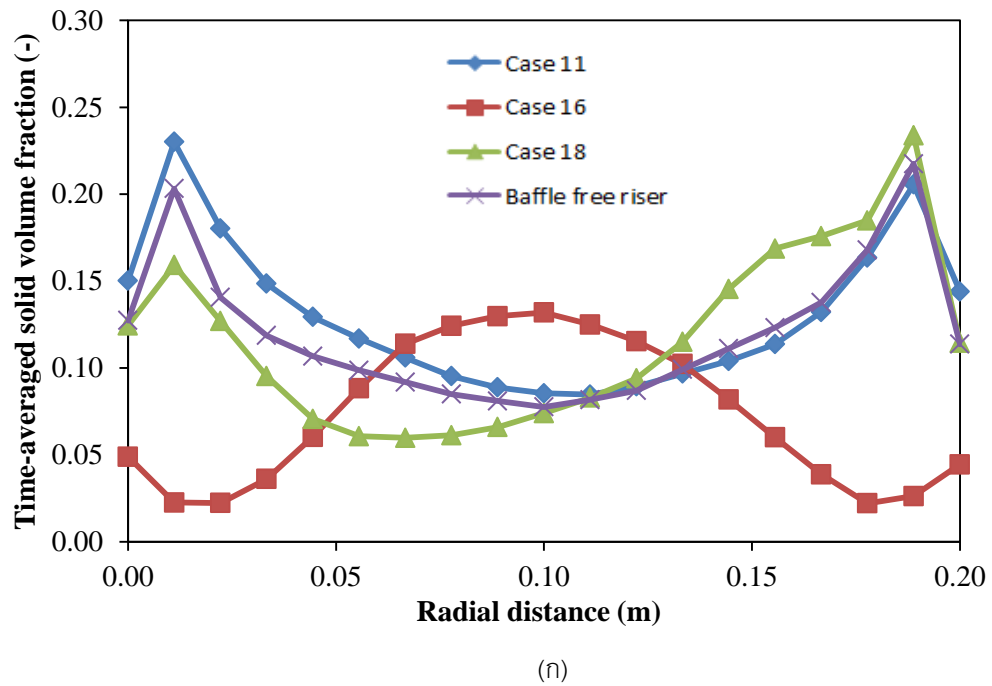
รูปที่ 4.10 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่เวลา 30 วินาที (ก) ท่อไรเซอร์ที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นปะทะ (ข) กรณีที่ 11 (ค) กรณีที่ 16 และ (ง) กรณีที่ 18

11 ซึ่งเป็นกรณีที่มีค่าสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์มากที่สุด จะเห็นว่าการใส่แผ่นปะทะในรูปแบบของกรณีศึกษาที่ 11 หรือรูป (ค) จะเป็นการเพิ่มการหมุนวนภายในของของแข็งอันเห็นได้จากการมีของแข็งจำนวนมากโดยเฉพาะบริเวณรอบๆ แผ่นปะทะ เนื่องมาจากการที่ของแข็งเกิดการตกกลับที่ผนังแล้วถูกผลึกเข้าสู่ส่วนกลางท่อไรเซอร์โดยรูปแบบการใส่แผ่นปะทะดังกล่าวทำให้เกิดการหมุนวนภายในระหว่างแผ่นปะทะซึ่งในกรณีศึกษาที่ 11 มีมากกว่ากรณีท่อไรเซอร์ที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นปะทะเพราะการหมุนวนภายในของท่อไรเซอร์แบบที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นปะทะเป็นการหมุนวนซึ่งเกิดจากการตกกลับของของแข็งเท่านั้น ส่วนในกรณีศึกษาที่ 18 เป็นรูปแบบการใส่แผ่นปะทะที่ทำให้ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีมีค่าสูงสุดซึ่งสอดคล้องกับคอนทัวร์รูป (ง) ที่พบว่ามีการกระจายตัวของของแข็งที่บริเวณผนังอยู่มากกว่าบริเวณกึ่งกลางท่อไรเซอร์

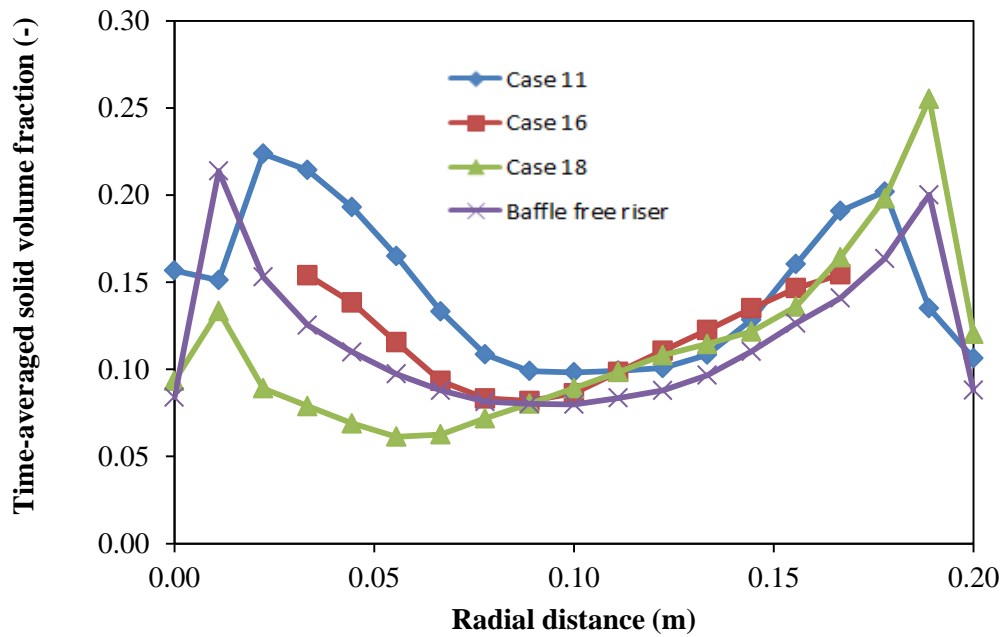
รูปที่ 4.11 เป็นกราฟที่พลอตการกระจายตัวในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่ความสูงต่างๆ รูป (ก) ที่ความสูง 3 เมตรจากด้านล่าง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณของแข็งอยู่หนาแน่นพบว่า กรณีศึกษาที่ 16 จะให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีแตกต่างจากกรณีศึกษาแบบอื่นๆ โดยมีการลดลงของปริมาณของแข็งที่ผนัง และบริเวณกึ่งกลางท่อที่มีปริมาณของแข็งมากกว่ากรณีศึกษาอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากการใส่แผ่นปะทะที่มีพื้นที่เปิดน้อย จะผลึกให้ของแข็งเข้าไปอยู่บริเวณกึ่งกลางท่อมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความสูง 6 เมตร รูป (ข) พบว่ารูปแบบของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งนั้นคล้ายคลึงกัน แต่กรณีนี้ที่ 16 ยังคงมีรูปแบบที่สม่อกันมากกว่ารูปแบบอื่น แสดงว่าของแข็งนั้นกระจายตัวได้อย่างสม่อกัน และยังคงเป็นเช่นนี้ในความสูง 9 และ 12 เมตรหรือ รูป (ค) และ (ง) โดยเมื่อพิจารณาที่สัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งของกรณีศึกษาที่ 11 พบว่าที่ทุกความสูงจะมีสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมากกว่ากรณีอื่นๆ สม่อที่เป็นเช่นนี้มาจากเหตุผลดังที่กล่าวไว้ในรูปที่ 4.10

4.2.2.3 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนในตัวแปรความเร็วในแนวแกนและแนวรัศมีของของแข็ง

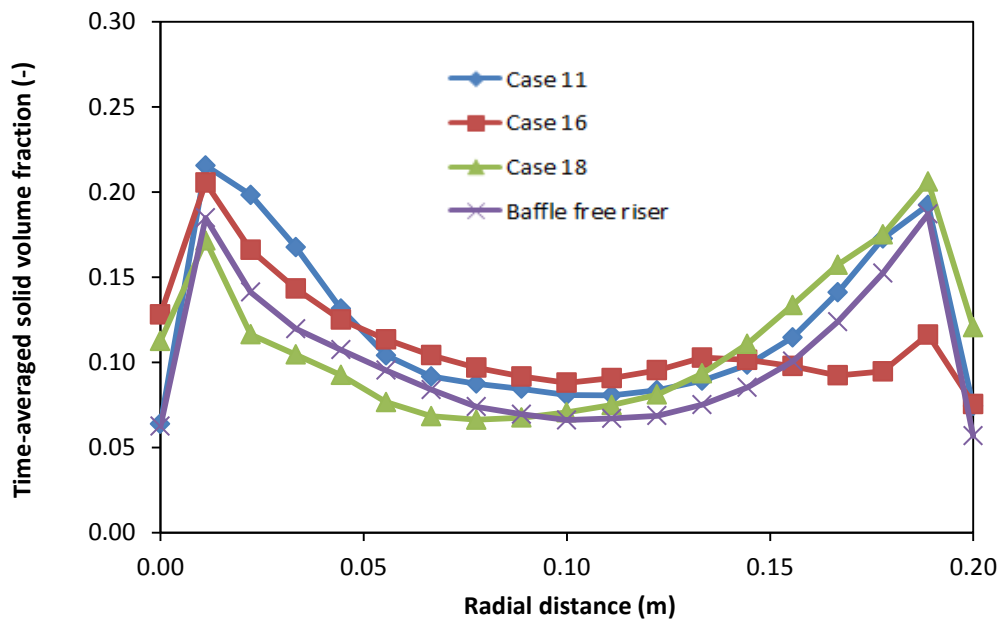
ผลการจำลองความเร็วในแนวแกนของของแข็งแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า การติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนลงไปจะทำให้ความเร็วในแนวแกนของของแข็งมีความกว้างมากขึ้นเมื่อเทียบกับท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะ การกวัดแกว่งที่เกิดขึ้นนี้แสดงให้เห็นว่าการผสมในแนวแกนมากขึ้นนั่นเอง และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวในแนวรัศมีของค่าความเร็วในแนวแกนของของแข็งดังแสดงใน รูปที่ 4.13 พบว่า เฉพาะกรณีศึกษาที่ 16 เท่านั้นที่ความเร็วในแนวแกนบริเวณผนังของท่อไรเซอร์มีค่าเป็นบวก ซึ่งเครื่องหมายของค่าความเร็วใน



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่ความสูง (ก) 3 เมตร (ข) 6 เมตร (ค) 9 เมตร และ (ง) 12 เมตร

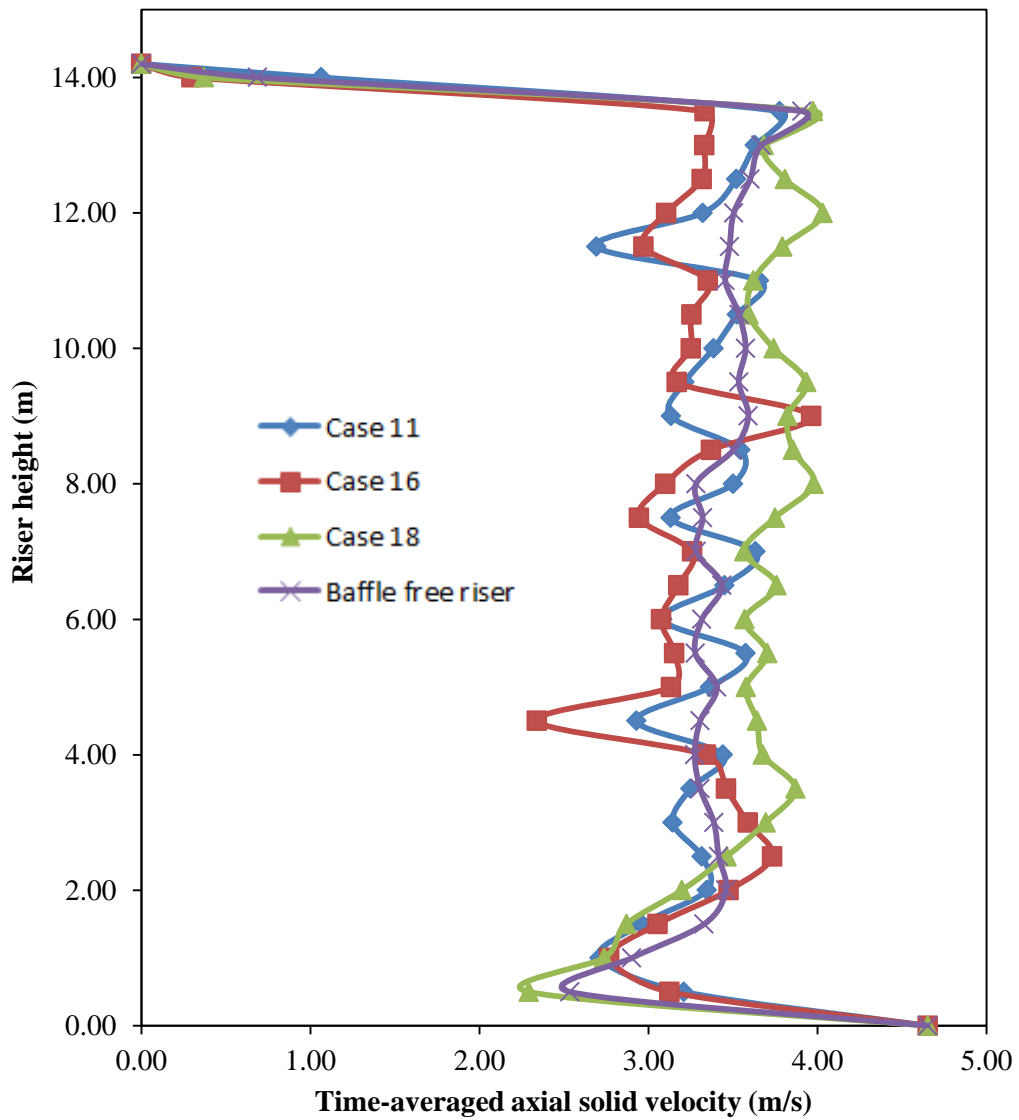


(ค)

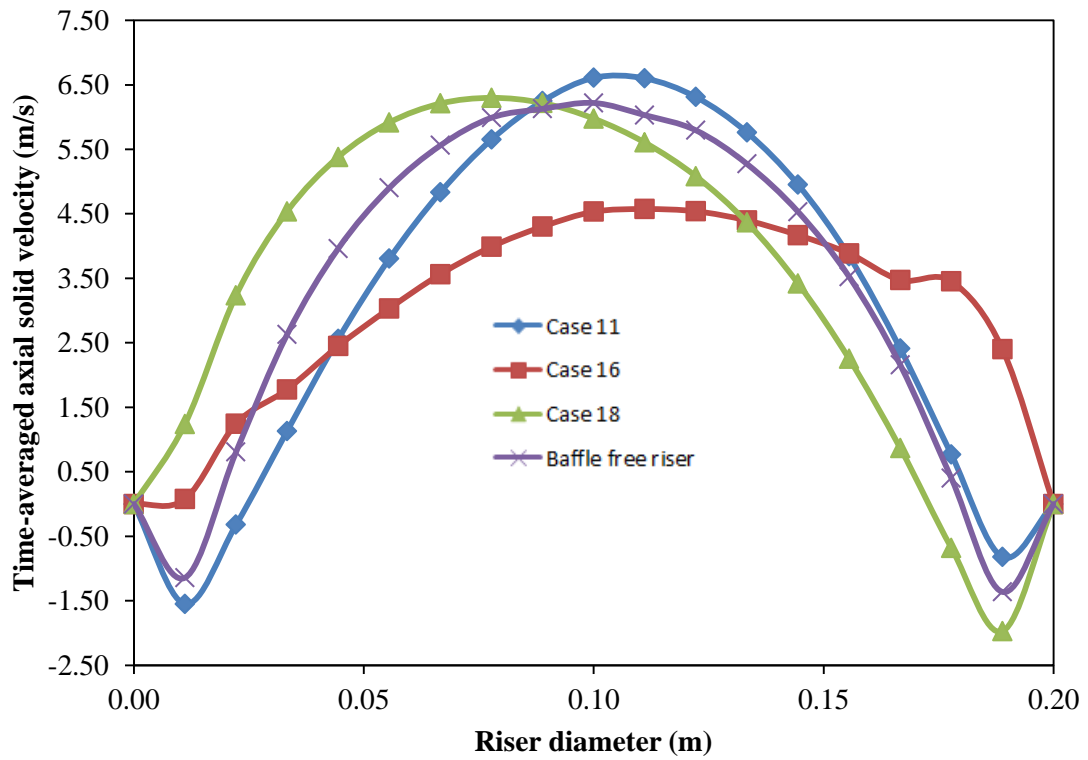


(ง)

รูปที่ 4.11 (ต่อ) การกระจายตัวในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่ความสูง (ก) 3 เมตร (ข) 6 เมตร (ค) 9 เมตร และ (ง) 12 เมตร



รูปที่ 4.12 การกระจายตัวตามแนวแกนของความเร็วในแนวแกนของของแข็งเฉลี่ยตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาทีที่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

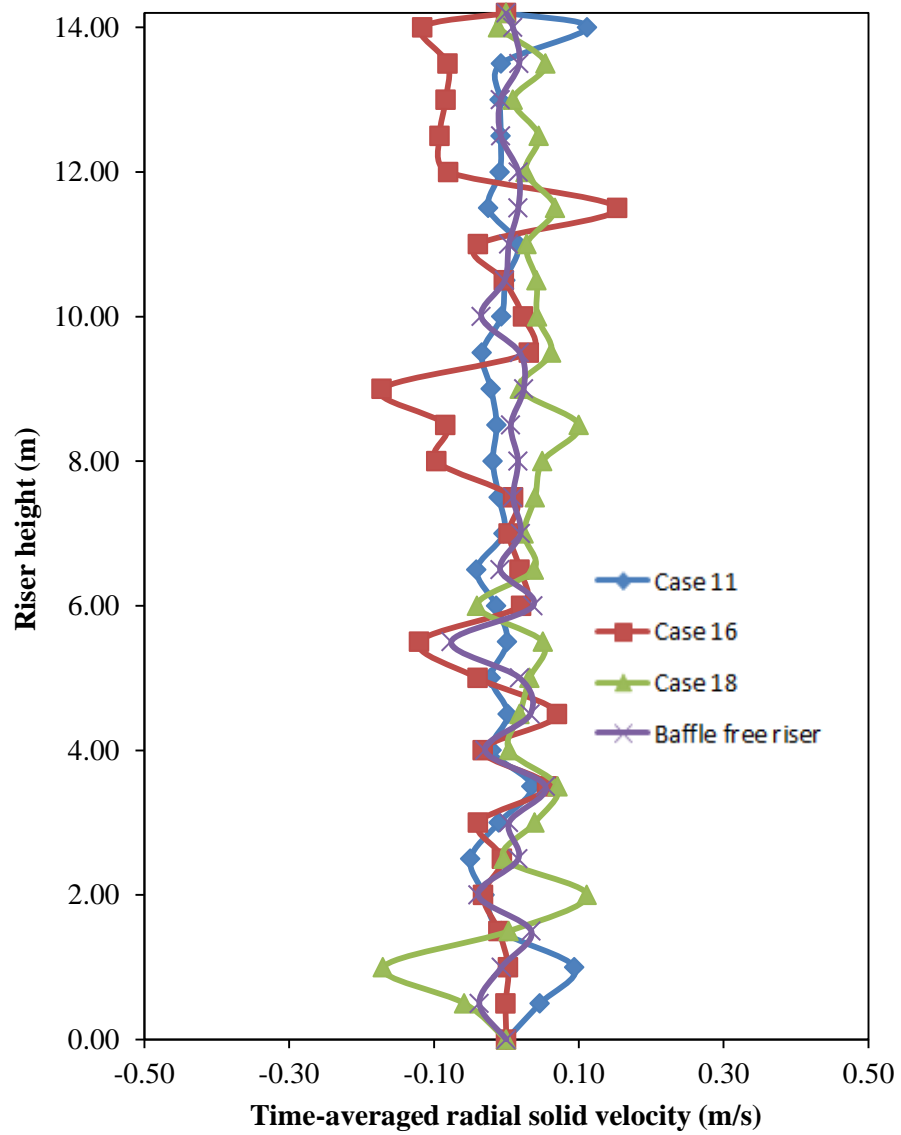


รูปที่ 4.13 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าความเร็วในแนวแกนของของแข็งเฉลี่ยตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

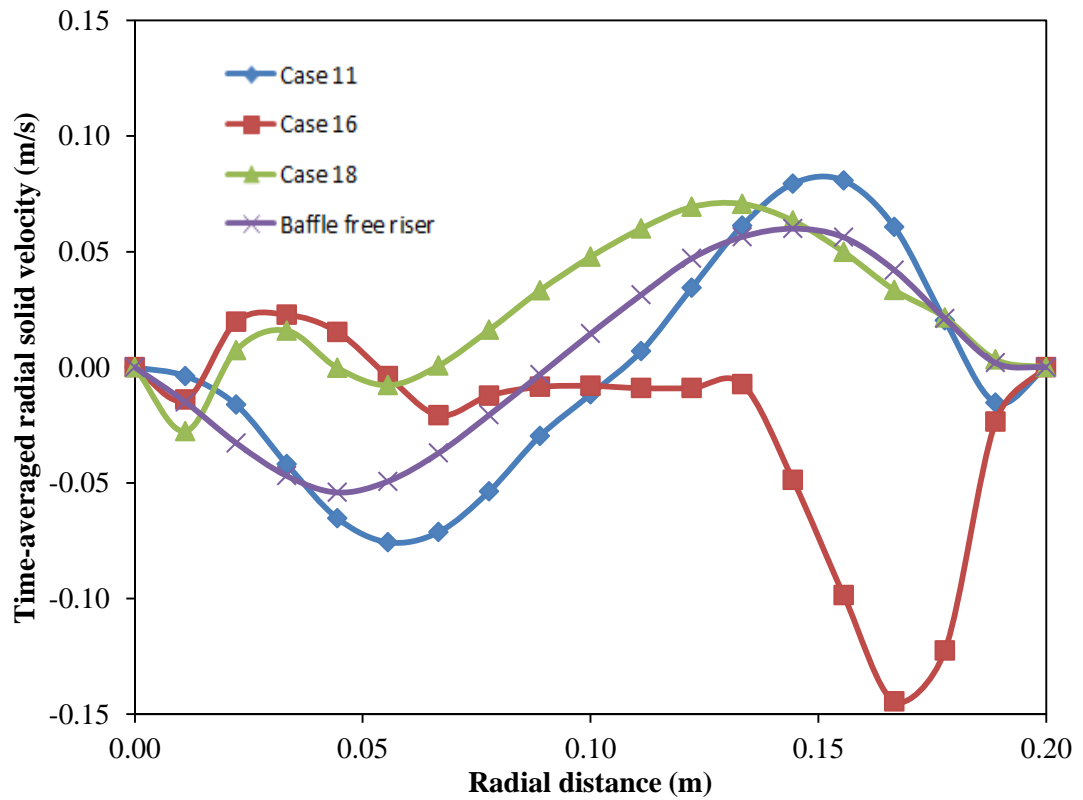
แนวแกนนี้เป็นตัวบอกทิศทางในการเคลื่อนที่ ซึ่งการที่ความเร็วในแนวแกนบริเวณผนังของท่อไรเซอรัมีค่าเป็นบวกแสดงว่า ทิศทางที่ของแข็งเคลื่อนที่นั้นเป็นทิศขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการติดตั้งแผ่นปะทะในรูปแบบกรณีที่ 16 จะไปยับยั้งการตกกลับของของแข็งที่ผนังนั่นเอง และนอกจากนั้น ค่าความเร็วในแนวแกนของของแข็งบริเวณกึ่งกลางท่อมีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเทียบกับแบบอื่นที่จะมีค่าความเร็วในแนวแกนสูงเฉพาะบริเวณกึ่งกลางแต่มีค่าต่ำที่บริเวณผนัง

รูปที่ 4.14 เป็นกราฟแสดงการกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมี จะเห็นได้ว่าความเร็วในแนวรัศมีมีความปั่นป่วนมากขึ้นเมื่อติดตั้งแผ่นปะทะลงไปใ้ท่อไรเซอรั ซึ่งการที่ความเร็วในแนวรัศมีมีความกวัดแกว่งนี้เป็นผลดีต่อระบบ โดยความกวัดแกว่งนี้แสดงว่าของแข็งนั้นวิ่งเข้าหากัน ซึ่งทำให้การผสมกันเกิดมากขึ้นนั่นเอง จากกราฟจะเห็นว่ากรณีศึกษาที่ 16 นั้นมีความกวัดแกว่งมากที่สุด จากนั้นเมื่อนำค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งมาสร้างกราฟกับระยะทางในแนวรัศมีดังรูปที่ 4.15 พบว่า กรณีที่ 18 ซึ่งมีการกระจายตัวของของแข็งต่ำที่สุดนั้นให้ผลสอดคล้องกับค่าความเร็วในแนวรัศมีที่แสดงในกราฟ โดยจะพบเฉพาะค่าความเร็วที่เป็นบวก ซึ่งเครื่องหมายบวกและลบนั้นเป็นตัวแสดงทิศทางเคลื่อนที่ของของแข็ง โดยค่าบวกแสดงถึงการเคลื่อนที่ของของแข็งไปทางซ้าย และค่าลบแสดงถึงการเคลื่อนที่ของของแข็งไปทางขวา การที่กรณี 18 มีเฉพาะค่าความเร็วที่เป็นบวกแสดงว่าของแข็งนั้นวิ่งไปทางเดียวกันเอง ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ดังกล่าวไม่ทำให้เกิดการผสมในแนวรัศมี อีกทั้งอาจเกิดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอนุภาค และเมื่อพิจารณาที่กรณีศึกษาอื่นๆ พบว่า ของแข็งนั้นจะเคลื่อนที่เข้าหาผนัง โดยพบค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งที่เป็นลบที่บริเวณผนังด้านซ้ายและพบค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งที่เป็นบวกบริเวณด้านขวา แต่ในกรณีศึกษาที่ 16 จะพบค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งที่เป็นบวกที่บริเวณผนังด้านซ้ายและพบค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งที่เป็นลบบริเวณด้านขวา แสดงว่าของแข็งนั้นวิ่งเข้าหากันที่กึ่งกลางท่อ ซึ่งการวิ่งเข้าหากันนั้นจะทำให้เกิดการผสมกันในแนวรัศมีมากขึ้น และลดการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอนุภาคบริเวณผนังอีกด้วย

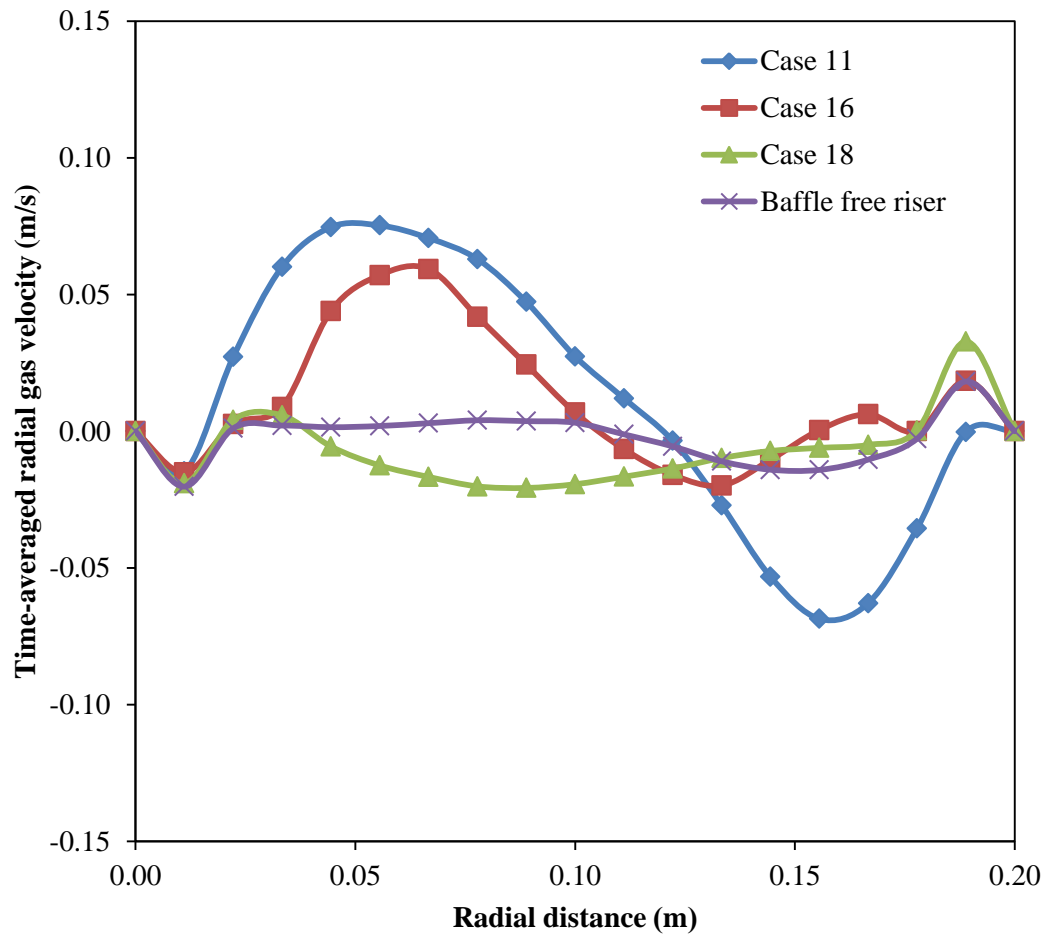
4.2.2.4 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอรัของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียนในตัวแปรความเร็วในแนวแกนและแนวรัศมีของแก๊ส
ความเร็วในแนวรัศมีของแก๊สเฉลี่ยตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 ของกรณีศึกษาที่ 11 16 18 และท่อไรเซอรัที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะถูกนำมาเปรียบเทียบในรูปที่ 4.16 โดยเส้นสีม่วงแทนท่อไรเซอรัที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะ พบว่า ความเร็วแก๊สในแนวรัศมีจะมีความคงที่และมี



รูปที่ 4.14 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วของของแข็งในแนวรัศมีตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ



รูป 4.15 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

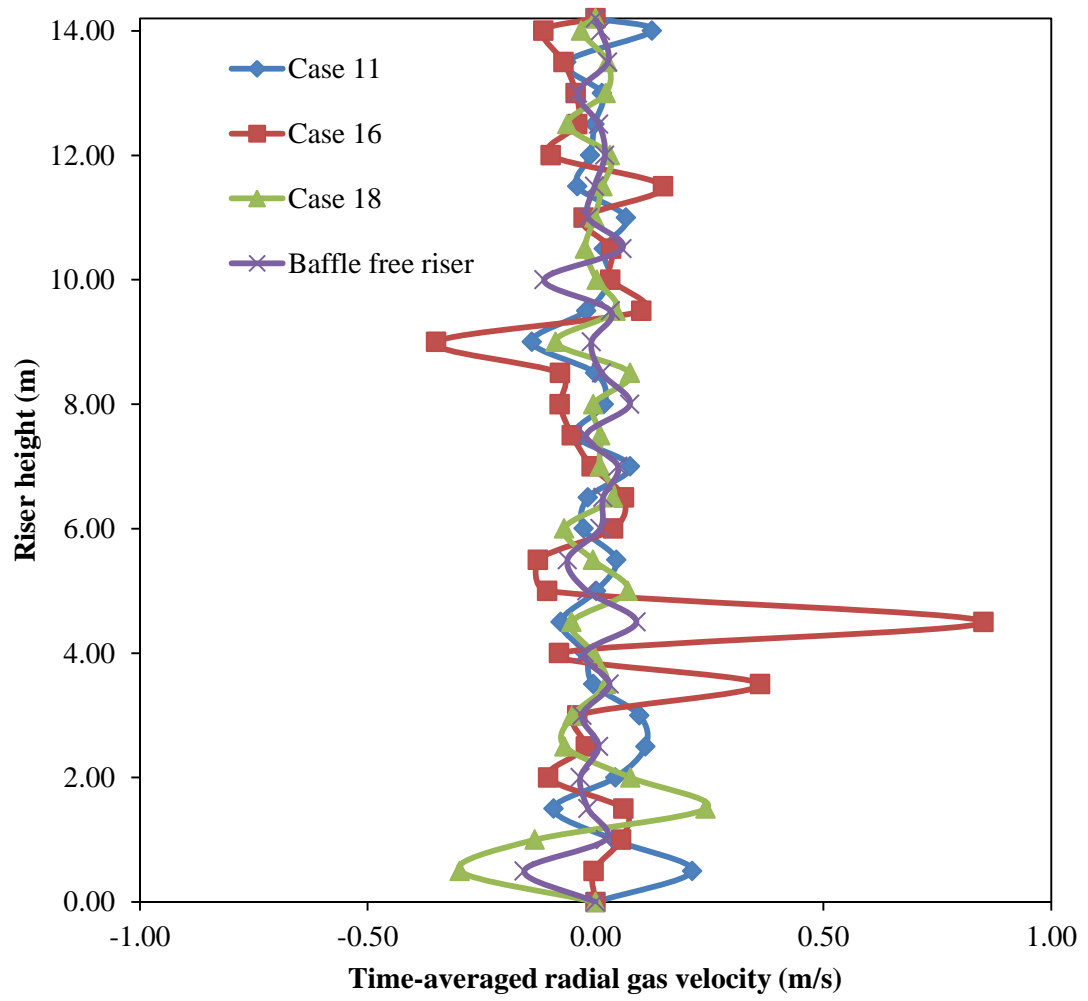


รูป 4.16 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของแก๊สตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

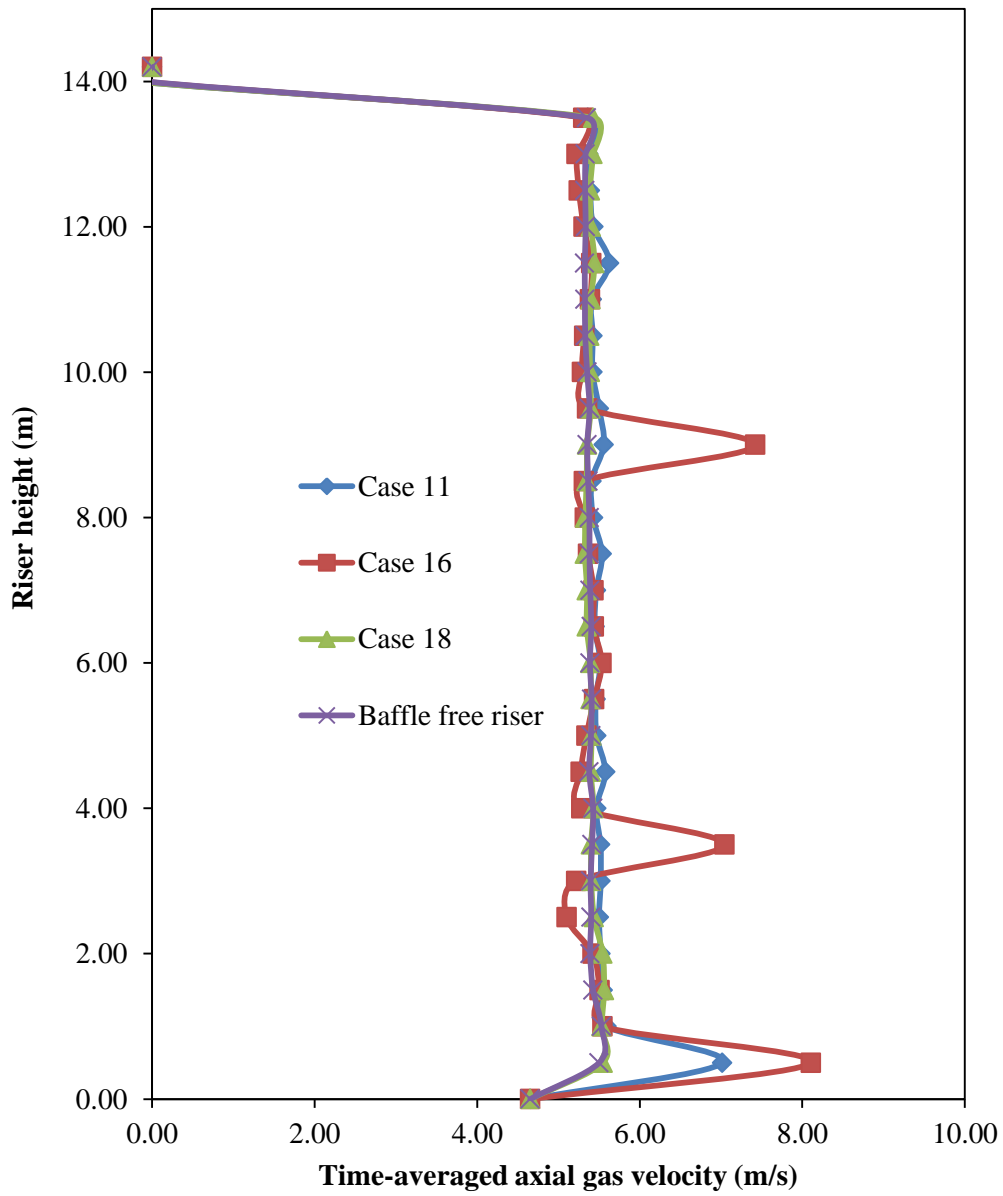
ค่าใกล้เคียง 0 เมตรต่อวินาทีดังจะเห็นว่าเส้นกราฟมีความราบเรียบตลอดแนวรัศมี ซึ่งแสดงว่าแก๊สนั้นไม่เกิดการเคลื่อนที่ไปทางซ้ายหรือขวา รูปแบบความเร็วแก๊สลักษณะนี้จะทำให้การผสมระหว่างแก๊สและของแข็งนั้นต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีศึกษาที่ 18 ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งสูงที่สุดหรือมีการกระจายตัวของของแข็งไม่สม่ำเสมอมากที่สุด พบรูปแบบความเร็วแก๊สที่คล้ายกัน นี่เป็นเหตุผลที่ว่าทำไมของแข็งกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในกรณีศึกษาที่ 18 หลังจากนั้นเมื่อพิจารณากรณีศึกษาที่ 11 และ 16 ซึ่งมีค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำ พบว่า มีการกวัดแกว่งของค่าความเร็วแก๊สในแนวรัศมี โดยพบทั้งความเร็วที่มีค่าเป็นบวกและลบ แสดงว่าแก๊สนั้นเกิดการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีในทิศทางต่างกัน ซึ่งรูปแบบความเร็วลักษณะนี้จะส่งผลให้เกิดการผสมระหว่างของแข็งและแก๊ส ก่อให้เกิดการกระจายตัวของของแข็งสม่ำเสมอ และการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอนี้จะเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแก๊สและของแข็งมากขึ้น

รูปที่ 4.17 แสดงรูปแบบการกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของแก๊สตั้งแต่วินาทีที่ 20- 40 ตามระดับความสูง ในการพิจารณาการผสมที่เกิดขึ้นภายในกรณีศึกษาต่างๆ จะพิจารณาความกวัดแกว่งของเส้นกราฟ จากรูปจะพบว่าท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะจะมีเส้นกราฟเกือบจะคงที่ที่ค่าความเร็วในแนวรัศมีของแก๊สเท่ากับศูนย์แสดงว่าการผสมของแก๊สกับของแข็งนั้นเกิดขึ้นน้อยมาก ส่วนกรณีศึกษาที่ 16 ซึ่งเกิดการผสมของแก๊สและของแข็งมากที่สุด จะมีเส้นกราฟที่กวัดแกว่งมากที่สุด

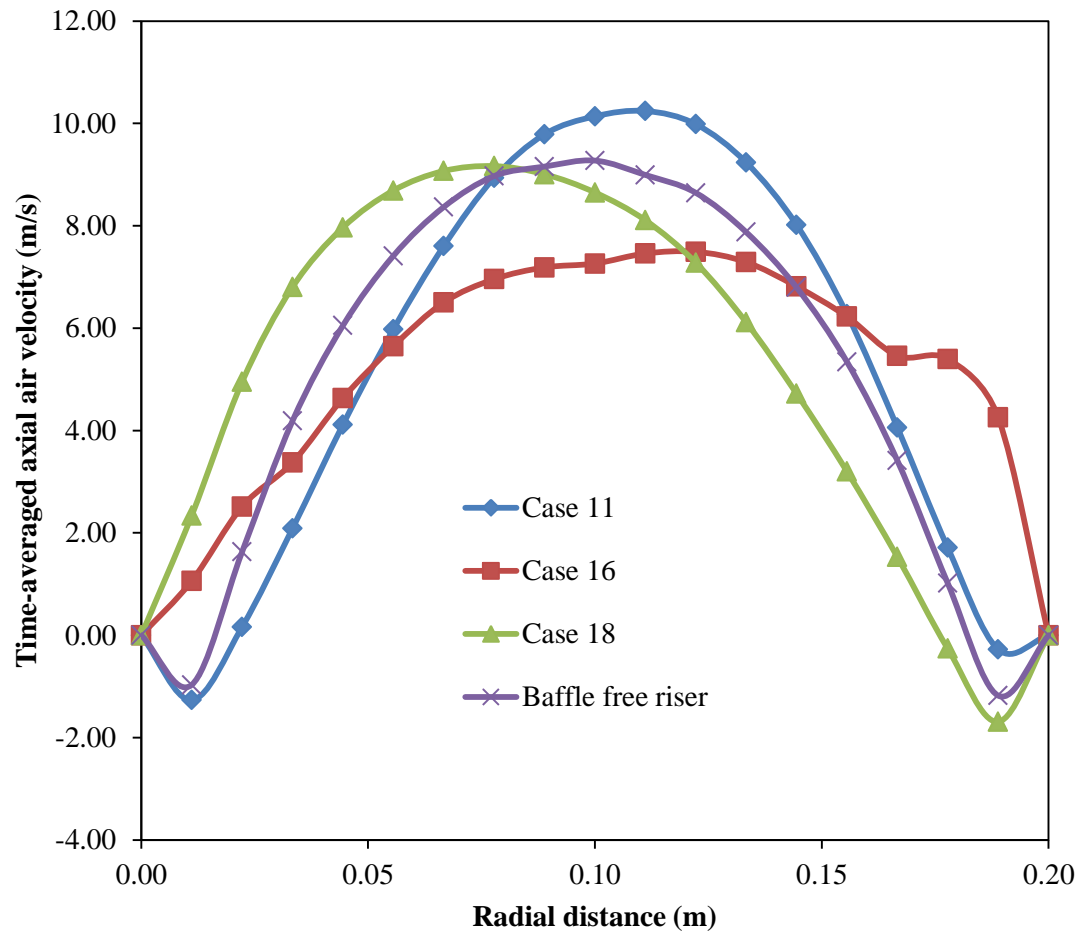
ค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของแก๊สตามระดับความสูงต่างๆ ของท่อไรเซอร์ของกรณีศึกษา 11 16 18 และท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะพลอตได้ดังกราฟรูปที่ 4.18 พบว่า มีการเพิ่มขึ้นของความเร็วในแนวแกนของแก๊สอย่างรวดเร็วที่ความสูง 0.5 3.5 และ 9 เมตร เนื่องมาจากการใส่แผ่นปะทะทำให้ช่องทางที่แก๊สสามารถวิ่งผ่านได้ลดลง ด้วยเหตุนี้ของแข็งจะผลัดกันเข้าสู่ช่องทางที่เหลืออยู่ทำให้แก๊สมีความเร็วในแนวแกนเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วในตำแหน่งที่มีการใส่แผ่นปะทะ อย่างไรก็ตามในกรณีศึกษาที่ 11 และ 16 มีการติดตั้งแผ่นปะทะที่ความสูงอื่นด้วยแต่ที่ไม่พบการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของความเร็วในแนวแกนของแก๊สเนื่องจากความสูงที่ทำการติดตั้งค่าต่างไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะ เมื่อนำค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของแก๊สในช่วงวินาทีที่ 20-40 มาสร้างกราฟกับระยะทางในแนวรัศมีดังรูปที่ 4.19 พบว่า เฉพาะกรณีศึกษาที่ 16 เท่านั้นที่ไม่พบค่าความเร็วในแนวแกนของแก๊สเป็นค่าลบ แสดงว่าของแข็งซึ่งโดยปกติแล้วจะเกิดการตกกลับที่ผนังซึ่งอาจเห็นยวนำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนอนุภาคที่จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็งลดลงได้ถูกยับยั้งด้วยแผ่นปะทะ



รูป 4.17 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของแก๊สตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ



รูป 4.18 การกระจายตัวตามแนวแกนของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของแก๊สตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ



รูป 4.19 การกระจายตัวในแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของแก๊สตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

นอกจากนั้นยังทำให้ค่าความเร็วในแนวแกนของแก๊สมีความสม่ำเสมอมากขึ้นทำให้ของแข็งอยู่ในระบบด้วยเวลาที่ใกล้เคียงกันมากขึ้นอีกด้วย

4.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน

จากการศึกษาตอนที่ 2 ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนในกรณีศึกษาที่ 11 และกรณีศึกษาที่ 16 เป็นรูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะที่ส่งผลให้ของแข็งเกิดการผสมกันได้ดีที่สุดและมีปริมาณของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์มากที่สุดตามลำดับ ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะทั้งสองกรณีจะถูกนำมาใช้สำหรับการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการในขั้นตอนนี้ โดยตัวแปรดำเนินการที่ใช้ในการทดสอบมีทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า (Superficial gas velocity, F) ค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง (Solid mass flux, G) ขนาดของอนุภาคของแข็ง (Diameter, H) และความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (Density, I) โดยการอภิปรายผลการทดลองของการศึกษาตัวแปรดำเนินการ จะแบ่งผลการทดลองเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรก คือ ผลที่ได้จากเทคนิคการออกแบบการทดลอง และส่วนที่สอง คือ ส่วนของอุทกพลศาสตร์

4.3.1 การออกแบบการทดลอง

จากการศึกษาตัวแปรดำเนินการตามกรณีศึกษาดังตารางที่ 4.4 เมื่อตัวแปรตอบสนองมีสองตัวแปร คือ ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งและค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์ ซึ่งค่าทั้งสองจะแบ่งพิจารณาเป็นสองกรณีคือ กรณีที่ใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาที่ 16 และ 11 ของการศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะในตอนี่ 2

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.4 จะสังเกตว่าที่การติดตั้งแผ่นปะทะในรูปแบบของกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 และ 16 ที่ตัวแปรตอบสนองเป็นค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์มีค่ามากที่สุดที่กรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 ซึ่งใช้ค่าความเร็วแก๊สทางเข้า 2.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 76 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและมีค่าน้อยที่สุดในกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 ซึ่งใช้ค่าความเร็วแก๊สทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 50 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.4 การออกแบบการทดลองแบบ 2⁴ ของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการและค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลอง

Run	Inlet gas velocity (m/s) (F)	Solid mass flux (kg/m ² .s) (G)	Particle diameter (microns) (H)	Particle density (kg/m ³) (I)	Case 16		Case 11	
					SD of radial solid volume fraction (-)	Average of solid volume fraction (-)	SD of radial solid volume fraction (-)	Average of solid volume fraction (-)
					BF	5.2	489	76
1	2.2	400	50	1424	0.0298	0.1837	0.0316	0.1957
2	8.2	400	50	1424	0.0083	0.0800	0.0202	0.0839
3	2.2	578	50	1424	0.0243	0.2035	0.0298	0.2078
4	8.2	578	50	1424	0.0112	0.0988	0.0204	0.1104
5	2.2	400	90	1424	0.0250	0.1767	0.0270	0.1772
6	8.2	400	90	1424	0.0121	0.0762	0.0236	0.0879
7	2.2	578	90	1424	0.0248	0.2018	0.0293	0.2065
8	8.2	578	90	1424	0.0182	0.0943	0.0376	0.1180
9	2.2	400	50	2000	0.0173	0.1359	0.0349	0.1756
10	8.2	400	50	2000	0.0127	0.0651	0.0213	0.0734
11	2.2	578	50	2000	0.0299	0.2028	0.0306	0.1915
12	8.2	578	50	2000	0.0170	0.0937	0.0378	0.1055
13	2.2	400	90	2000	0.0234	0.1492	0.0408	0.1870
14	8.2	400	90	2000	0.0083	0.0679	0.0194	0.0768
15	2.2	578	90	2000	0.0335	0.1975	0.0409	0.2067
16	8.2	578	90	2000	0.0115	0.0888	0.0142	0.0813

ในทั้งสองกรณีของรูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะ แต่เมื่อพิจารณาที่ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง พบว่า กรณีศึกษาที่ 15 มีค่ามากที่สุด ซึ่งใช้ค่าความเร็วแก๊สทางเข้า 2.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเหมือนกันในทั้งสองกรณีของรูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะ แต่กรณีศึกษาที่ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งน้อยสุดนั้นแตกต่างกัน โดยการติดตั้งแผ่นปะทะในรูปแบบของกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะที่ 11 จะพบค่าความแปรปรวนน้อยที่สุดในกรณีศึกษาที่ 16 ซึ่งใช้ค่าความเร็วแก๊สทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่การติดตั้งแผ่นปะทะในรูปแบบของกรณีศึกษาตัวแปรติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 จะพบค่าความแปรปรวนน้อยสุดในกรณีศึกษาที่ 14 ซึ่งใช้ค่าความเร็วแก๊สทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

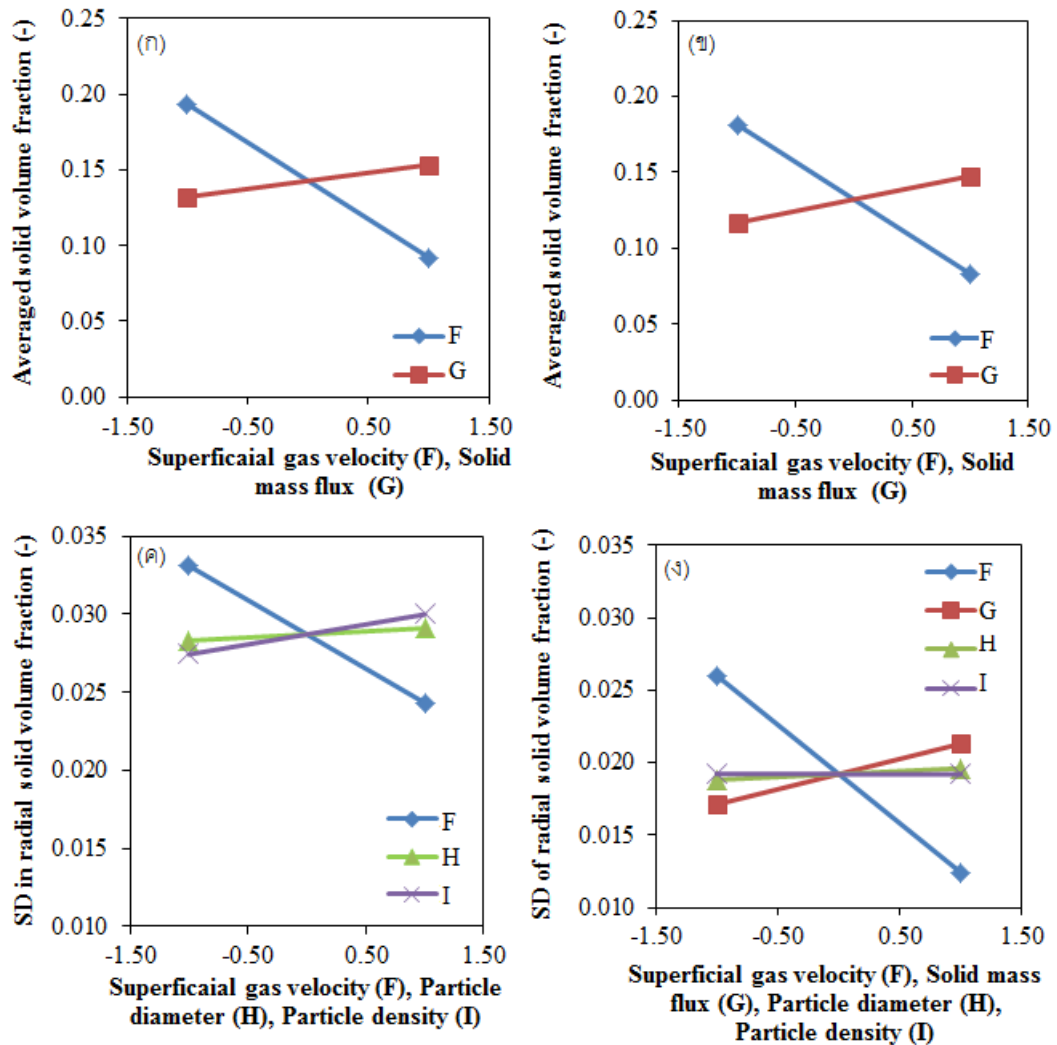
เมื่อพิจารณาการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 แล้วใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ มาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.5 จะพบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ คือ ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า (F) และค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง (G) โดยพบว่ามีความ p -value ต่ำกว่า 0.05 ซึ่งอาจเนื่องจากค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้านั้นจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาที่ของแข็งอยู่ในระบบและค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็งนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความเร็วของของแข็งซึ่งมีผลต่อระยะเวลาที่ของแข็งอยู่ในท่อไรเซอร์เช่นกัน แต่ขนาดของอนุภาคของแข็งและความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งนั้นไม่มีผลต่อค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ เนื่องจากค่าของตัวแปรทั้งสองนั้นยังคงอยู่ในช่วงของกลุ่มอนุภาค Geldart เดียวกัน เมื่อพิจารณาการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาที่ 16 โดยใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์จากตารางที่ 4.6 พบว่า ค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้า และฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง ยังคงเป็นตัวแปรที่ส่งผลมากที่สุดเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในข้างต้น ที่กรณีศึกษาของตัวแปรดำเนินการที่ให้ค่าตัวแปรตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งจะพบค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดที่กรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 และ 10 ตามลำดับ เหมือนกันทั้งสองรูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะดังกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแบบที่ 11 และ 16 ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 4.20 (ก) ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลของตัว

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการโดยใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนตามกรณีศึกษาที่ 11 และใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาณของแข็งเฉลี่ยทั้งหมดไรเซอร์

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F_o</i>	<i>p-value</i>
F	4.11E-02	1	4.11E-02	3.98E+02	< 0.0001
G	1.81E-03	1	1.81E-03	1.75E+01	0.0011
Error	1.34E-03	13	1.03E-04		
Total	4.42E-02	15			

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการโดยใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนตามกรณีศึกษาที่ 16 และใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าสัดส่วนเชิงปริมาณของแข็งเฉลี่ยทั้งหมดไรเซอร์

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F_o</i>	<i>p-value</i>
F	3.90E-02	1	3.90E-02	2.40E+02	< 0.0001
G	3.80E-03	1	3.80E-03	2.36E+01	0.0003
Error	2.09E-03	13	1.61E-04		
Total	4.50E-02	15			



รูปที่ 4.20 ผลของตัวแปรหลักของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (ก) ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งโดยใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาที่ 11 (ข) ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งโดยใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาที่ 16 (ค) ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีโดยใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาที่ 11 และ (ง) ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีโดยใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาที่ 16

แปรหลักที่มีต่อค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์โดยใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 และ 16 จะพบว่าเส้นกราฟในรูป (ก) และ(ข) นั้นมีแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก

ในส่วนการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรดำเนินการโดยใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 โดยใช้ตัวแปรตอบสนองเป็นค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีสรุปผลที่ได้ดังตารางที่ 4.7 พบว่า ตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าตอบสนองนั้น คือ ค่าความเร็วของแก๊สที่ทางเข้า (F) และอันตรกิริยาของความเร็วของแก๊สที่ทางเข้า-ขนาดของอนุภาคของแข็ง-ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (FHI) โดยพบว่ามีค่า p -value น้อยกว่า 0.05 ทำให้ในทางทฤษฎีจำเป็นต้องนำตัวแปรอันดับหนึ่งมาพิจารณาควบคู่ไปด้วย คือ ขนาดของอนุภาคของแข็ง (H) และความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (I)

ตารางที่ 4.8 เป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการโดยใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 และใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี พบว่าตัวแปรที่ส่งผลได้แก่ ความเร็วของแก๊สที่ทางเข้า (F) พลั๊กซ์โดยมวลของของแข็ง (G) อันตรกิริยาระหว่าง พลั๊กซ์โดยมวลของของแข็ง-ความหนาแน่น (GI) อันตรกิริยาระหว่างค่าความเร็วของแก๊สที่ทางเข้า-พลั๊กซ์โดยมวลของของแข็ง -ความหนาแน่น (FGI) อันตรกิริยาระหว่างค่าความเร็วของแก๊สที่ทางเข้า-ขนาดของอนุภาค-ความหนาแน่นของอนุภาค (FHI) ทำให้ต้องนำตัวแปรอันดับหนึ่งของอันตรกิริยามาพิจารณาควบคู่ไปด้วยซึ่งก็คือค่าขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (G และ I)

เมื่อทำการเปรียบเทียบตารางที่ 4.7 กับตารางที่ 4.8 แล้วจะเห็นได้ชัดว่าตัวแปรที่ส่งผลมากที่สุดสองลำดับแรกนั้นเป็นตัวแปรเดียวกันคือ ค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้า (F) และอันตรกิริยาระหว่างค่าความเร็วของแก๊สที่ทางเข้า-ขนาดของอนุภาค-ความหนาแน่นของอนุภาค (FHI) แต่ในกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 จะมีตัวแปรที่ส่งผลเพิ่มมาอีกคือ พลั๊กซ์โดยมวลของของแข็ง (G) อันตรกิริยาระหว่างพลั๊กซ์โดยมวลของของแข็ง-ความหนาแน่น (GI) อันตรกิริยาระหว่างค่าความเร็วของแก๊สที่ทางเข้า-พลั๊กซ์โดยมวลของของแข็ง-ความหนาแน่น (FGI) ซึ่งสาเหตุอาจเป็นเพราะว่าในการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 จะให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์ต่ำ และมีค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีต่ำมากเมื่อเทียบกับกรณีศึกษาการติดตั้งแผ่นปะทะ

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการโดยใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนตามกรณีศึกษาที่ 11 และใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F₀</i>	<i>p-value</i>
F	3.08E-04	1	3.08E-04	8.28E+00	0.0150
H	2.49E-06	1	2.49E-06	6.71E-02	0.8004
I	2.62E-05	1	2.62E-05	7.03E-01	0.4195
FHI	2.85E-04	1	2.85E-04	7.66E+00	0.0183
Error	4.09E-04	11	3.72E-05		
Total	1.03E-03	15			

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการโดยใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนตามกรณีศึกษาที่ 16 และใช้ค่าตอบสนองเป็นค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F₀</i>	<i>p-value</i>
F	7.39E-04	1	7.39E-04	3.76E+02	0.00000
G	7.02E-05	1	7.02E-05	3.58E+01	0.00033
H	2.55E-06	1	2.55E-06	1.30E+00	0.28720
I	7.40E-10	1	7.40E-10	3.77E-04	0.98498
GI	4.48E-05	1	4.48E-05	2.28E+01	0.00139
FGI	5.60E-05	1	5.60E-05	2.85E+01	0.00069
FHI	7.48E-05	1	7.48E-05	3.81E+01	0.00027
Error	1.57E-05	8	1.96E-06		
Total	1.00E-03	15			

แบบที่ 11 โดยเมื่อในระบบมีของแข็งอยู่น้อยการปรับค่าตัวแปรดำเนินการต่างๆจึงสามารถพบเห็นการเปลี่ยนแปลงของการกระจายตัวและเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีได้ชัดเจนมากกว่า เพื่อสนับสนุนเหตุผลข้างต้นให้พิจารณารูปที่ 4.18 จะพบว่าที่กราฟ (ค) ผลของตัวแปรหลักที่มีต่อความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีโดยใช้ท่อไรเซออร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งน้อยกว่ารูป (ง) ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลของตัวแปรหลักที่มีต่อความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีโดยใช้ท่อไรเซออร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16

ในส่วนการศึกษาผลของอันตรกิริยาในงานวิจัยนี้ จะทำการศึกษาเฉพาะอันตรกิริยาระดับสองเท่านั้นดังนั้นในรูปที่ 4.21 เป็นการพลอตผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง พบว่า ที่ฟลักซ์โดยมวลของของแข็งต่ำ (-) การเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งจะเกิดผลเชิงลบต่อค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง และที่ฟลักซ์โดยมวลของของแข็งสูง (+) จะแสดงผลเชิงบวกต่อค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างตัวแปรอันดับหนึ่ง อันดับสอง และอันดับสาม พบว่า ตัวแปรอันดับสามจะมีผลกระทบมากกว่าแสดงว่าทุกตัวแปรจะส่งผลต่อค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง แต่ไม่มีผลต่อค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรเฉลี่ยทั้งท่อไรเซออร์ หลังจากนั้น เราได้ทำการหาแบบจำลองการถดถอย (Regression model) เพื่อความสะดวกในการใช้หาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมสำหรับท่อไรเซออร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแบบที่ 11 และ 16 ในอนาคต รวมทั้งเป็นแนวทางเบื้องต้นของรูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะแบบอื่นๆ จากการทำงานวิจัยนี้มีตัวแปรตอบสนองสองตัวแปร คือ ความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรในแนวรัศมีของของแข็งและค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซออร์ จึงได้แบบจำลองการถดถอยทั้งหมดสี่แบบจำลองโดยสมการที่ (4.3) และ (4.4) เป็นแบบจำลองการถดถอยโดยมีค่าตอบสนอง คือ ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรในแนวรัศมีของของแข็งของท่อไรเซออร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 และ 16 ตามลำดับ ส่วนสมการที่ (4.5) และ (4.6) เป็นแบบจำลองการถดถอยโดยมีค่าตอบสนอง คือ ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของ

ของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ของท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 และ 16 ตามลำดับ

$$Y_3 = 0.029 - 0.0044X_F + 0.00039X_H + 0.00128X_I - 0.00421 X_F X_H X_I \quad (4.3)$$

$$Y_4 = 0.019 - 0.00680X_F + 0.00210X_G + 0.0004X_H - 0.0000068X_I + 0.00167 X_G X_I - 0.00187X_F X_G X_I - 0.002163X_F X_H X_I \quad (4.4)$$

$$Y_5 = 0.14 - 0.051X_F + 0.011X_G \quad (4.5)$$

$$Y_6 = 0.13 - 0.049X_F + 0.015X_G \quad (4.6)$$

Y_3 คือ ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรในแนวรัศมีของของแข็งของกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแบบที่ 11

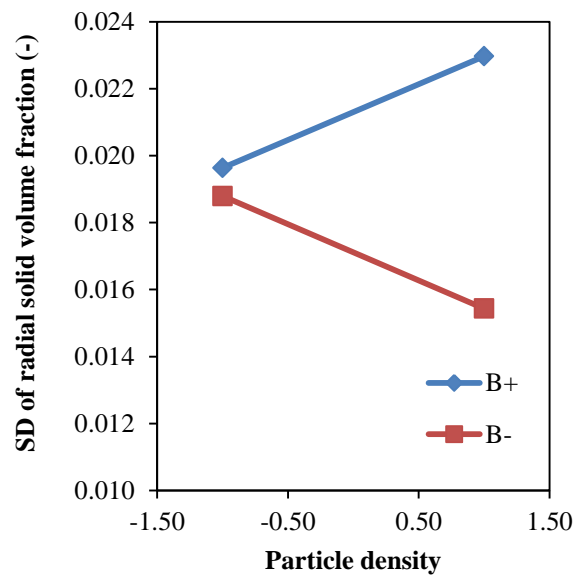
Y_4 คือ ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรในแนวรัศมีของของแข็งของกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแบบที่ 16

Y_5 คือ ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ของกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแบบที่ 11

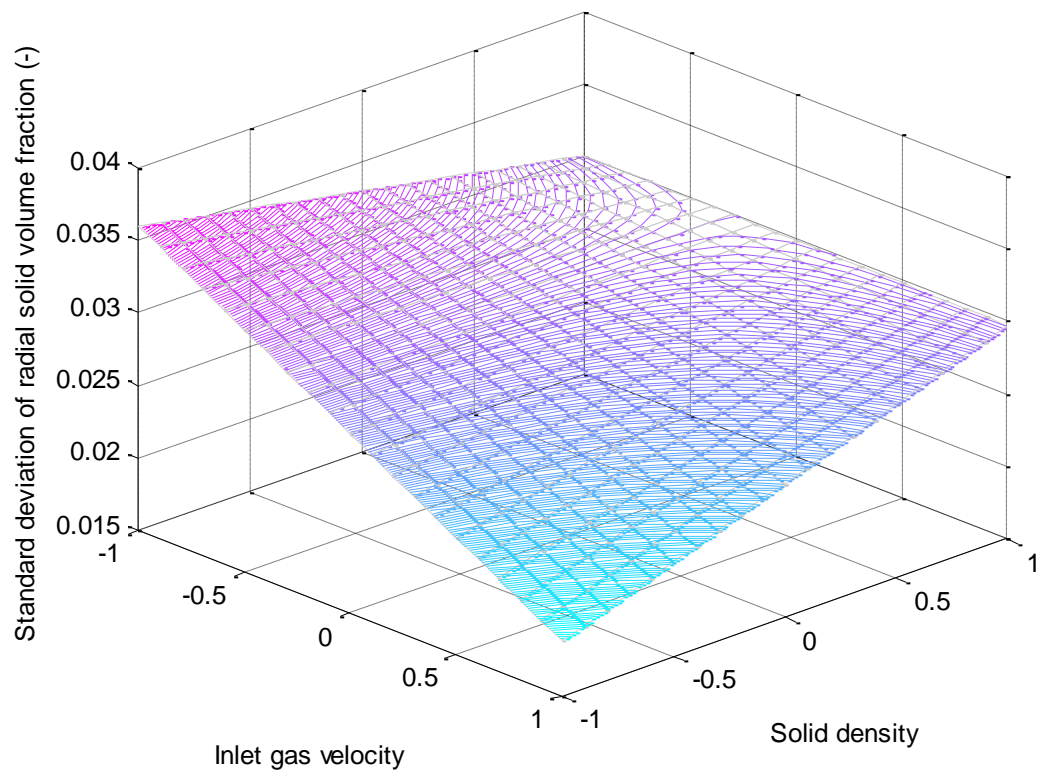
Y_6 คือ ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ของกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแบบที่ 16

$X_F X_G X_H X_I$ คือ ค่าเข้ารหัสของตัวแปร F G H และ I ตามลำดับ

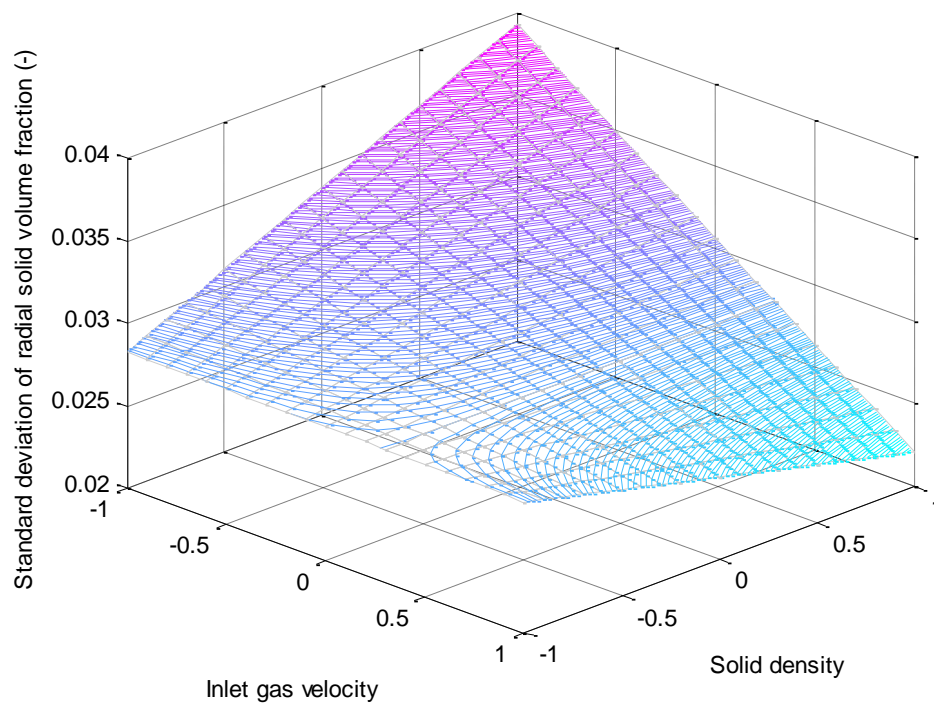
จากนั้นนำแบบจำลองการถดถอยที่ได้มาทดสอบความถูกต้องของส่วนตกค้างซึ่งแสดงในภาคผนวก จะเห็นว่าส่วนตกค้างที่ได้มีการกระจายตัวเป็นปกติ ไม่มีรูปแบบ และความแปรปรวนที่ได้คงที่ แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้นั้นมีความถูกต้อง หลังจากนั้นเราสามารถนำแบบจำลองการถดถอยที่ได้มาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response surface) โดย รูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงกราฟพื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งโดยใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 และใช้อุณหภูมิของแข็งขนาด 50 ไมโครเมตร และ 90 ไมโครเมตร ตามลำดับ จากทั้งสองรูป พบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตร ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งเป็น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที จะทำให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีค่าต่ำที่สุด



รูปที่ 4.21 ผลของอันตรกิริยาที่มีต่อค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง



รูปที่ 4.22 พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง
เมื่อใช้อนุภาคของแข็งขนาด 50 ไมโครเมตร และใช้ท่อโรเตอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตาม
กรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11



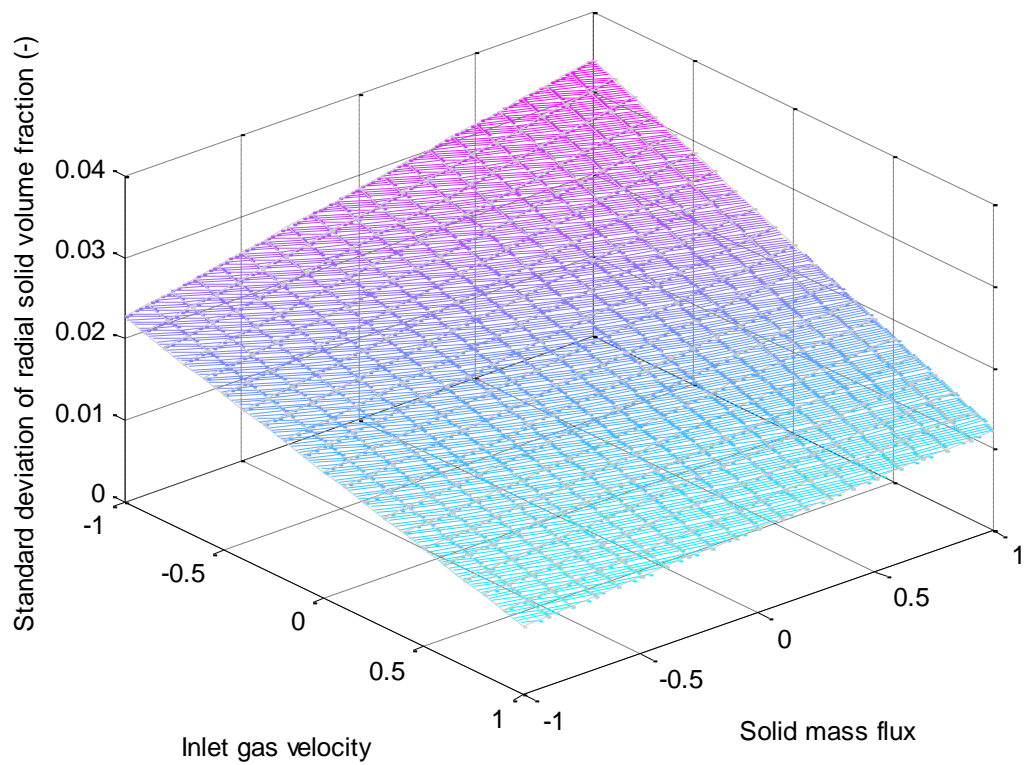
รูปที่ 4.23 พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เมื่อใช้อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตร และใช้ท่อโรเตอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตาม กรณีสึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11

รูปที่ 4.24 4.25 4.26 และ 4.27 ซึ่งเป็นกราฟพื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ที่ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งต่างกัน โดยในรูป 4.24 จะใช้อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนในรูปที่ 4.25 ใช้อนุภาคของแข็งขนาด 50 ไมโครเมตร ที่มีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งเป็น 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รูปที่ 4.26 ใช้อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตร ที่มีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งเป็น 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และรูปที่ 4.27 ใช้อนุภาคของแข็งขนาด 50 ไมโครเมตร ที่มีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งเป็น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากทั้งสี่รูปจะพบว่าการใช้ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที และฟลักซ์โดยมวลของของแข็งเป็น 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที จะให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด ในทุกกรณี

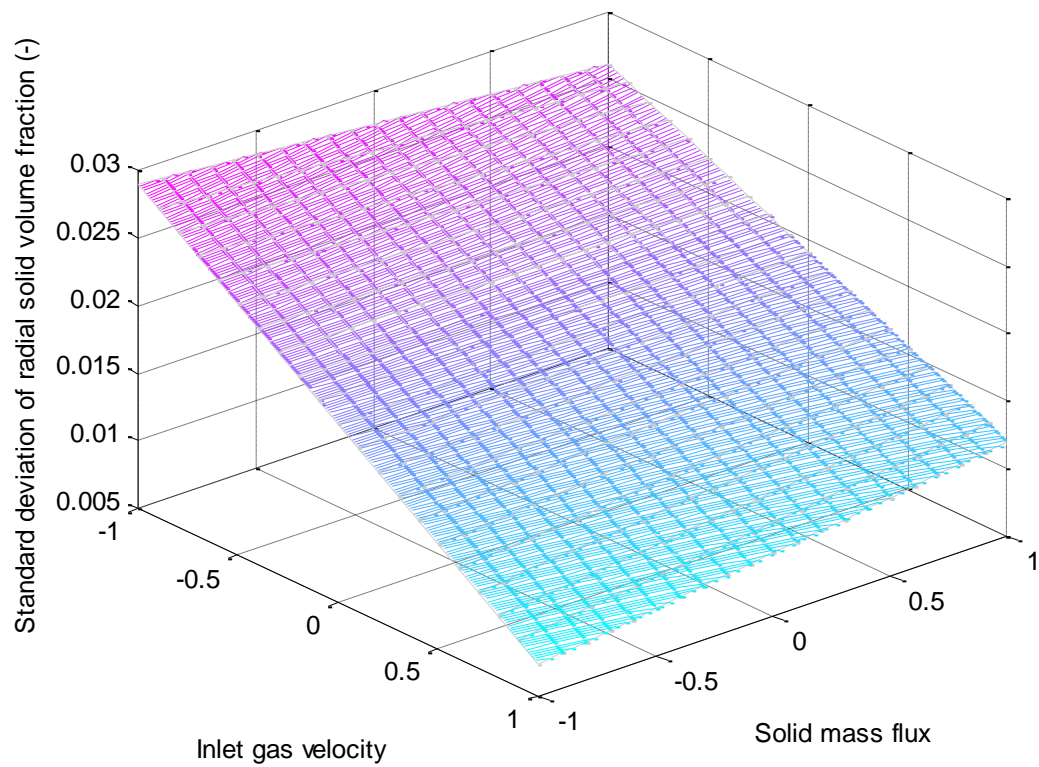
จากนั้นพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนองของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ โดยรูปที่ 4.28 จะพบว่า เมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 ต้องใช้ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 2.2 เมตรต่อวินาที และฟลักซ์โดยมวลของของแข็งเป็น 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที จึงจะให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อสูงที่สุด เช่นเดียวกันกับเมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 อันจะแสดงในรูปที่ 4.29

4.3.2 อุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics)

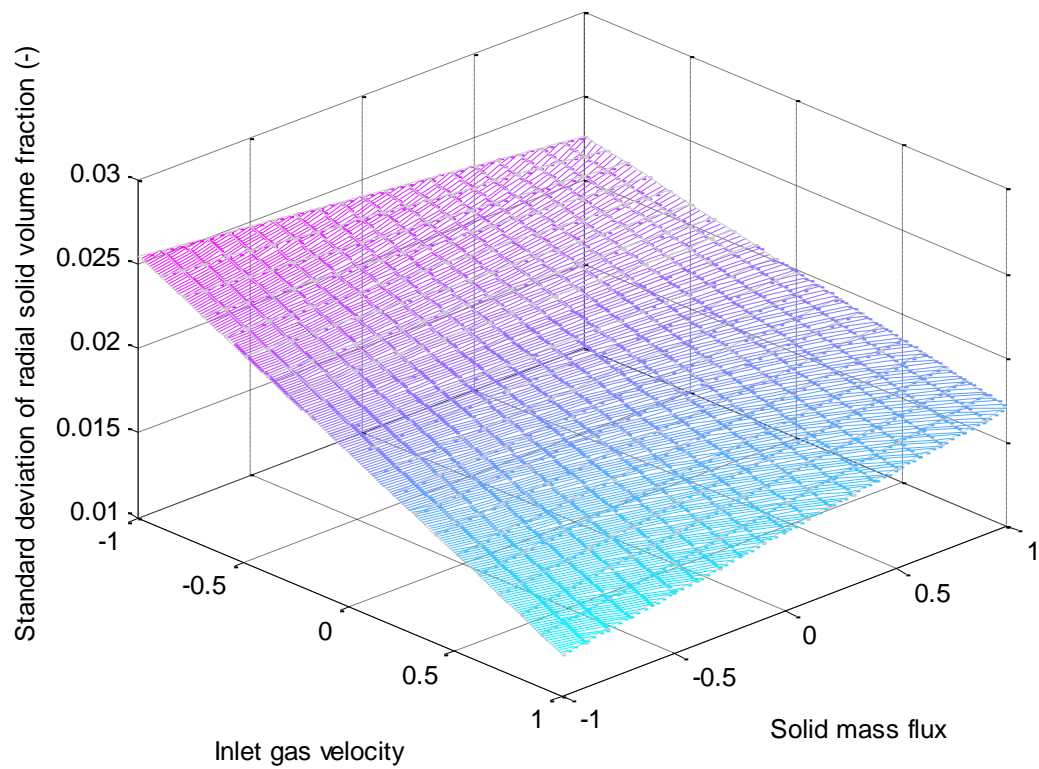
ในการอภิปรายผลส่วนของอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในท่อไรเซอร์ของกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการจะเลือกพิจารณาเฉพาะกรณีศึกษาที่ 3 10 14 และ 15 จากทั้งหมด 16 กรณีโดยใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 เนื่องจากในส่วนของการศึกษาโดยการออกแบบการทดลองพบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ในท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแบบที่ 11 และ 16 นั้นเป็นตัวแปรเดียวกัน อีกทั้งพบว่ากรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์สูงสุดและต่ำสุดรวมถึงค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งสูงเป็นกรณีศึกษาเดียวกันในท่อไรเซอร์ทั้งสองโดยกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 ซึ่งใช้ค่าความเร็วแก๊สทางเข้า 2.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 400



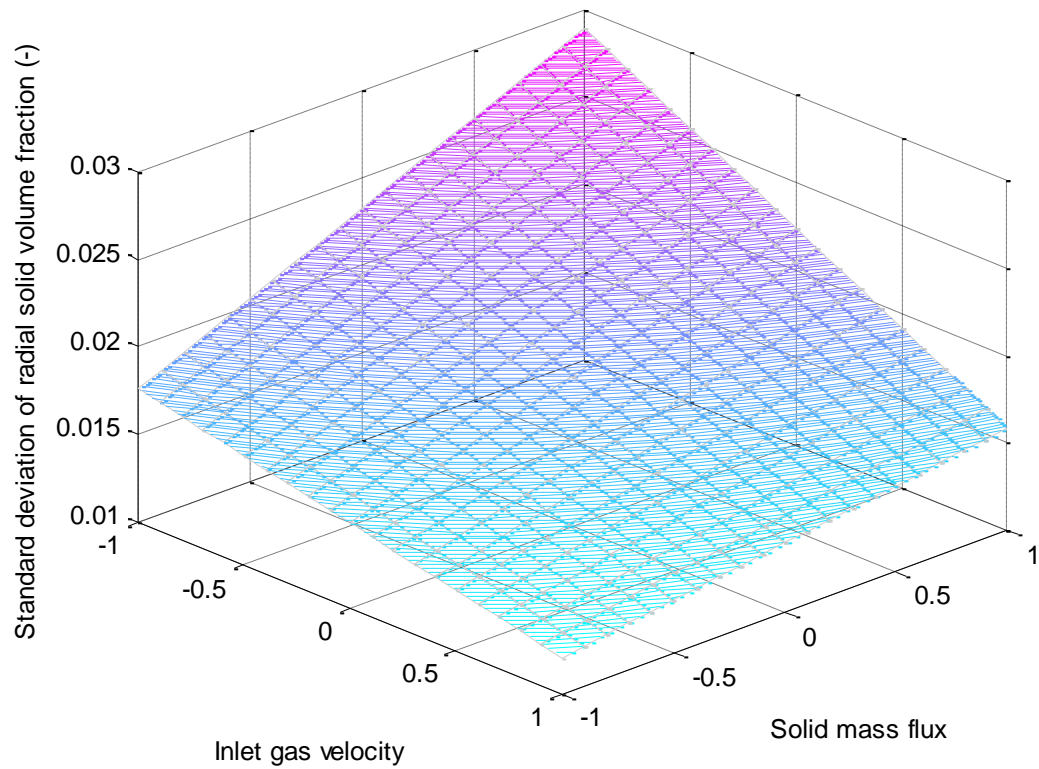
รูปที่ 4.24 พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เมื่อใช้ท่อโรเตอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 และใช้อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



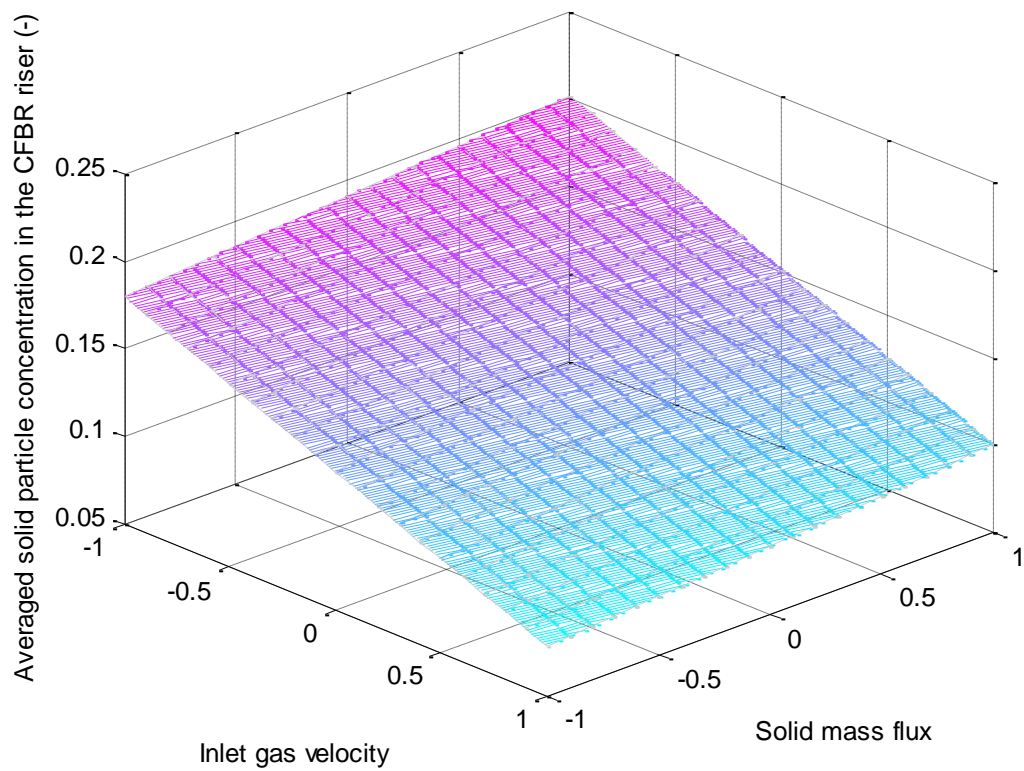
รูปที่ 4.25 พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เมื่อใช้ท่อโรเตอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 และใช้อนุภาคของแข็งขนาด 50 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



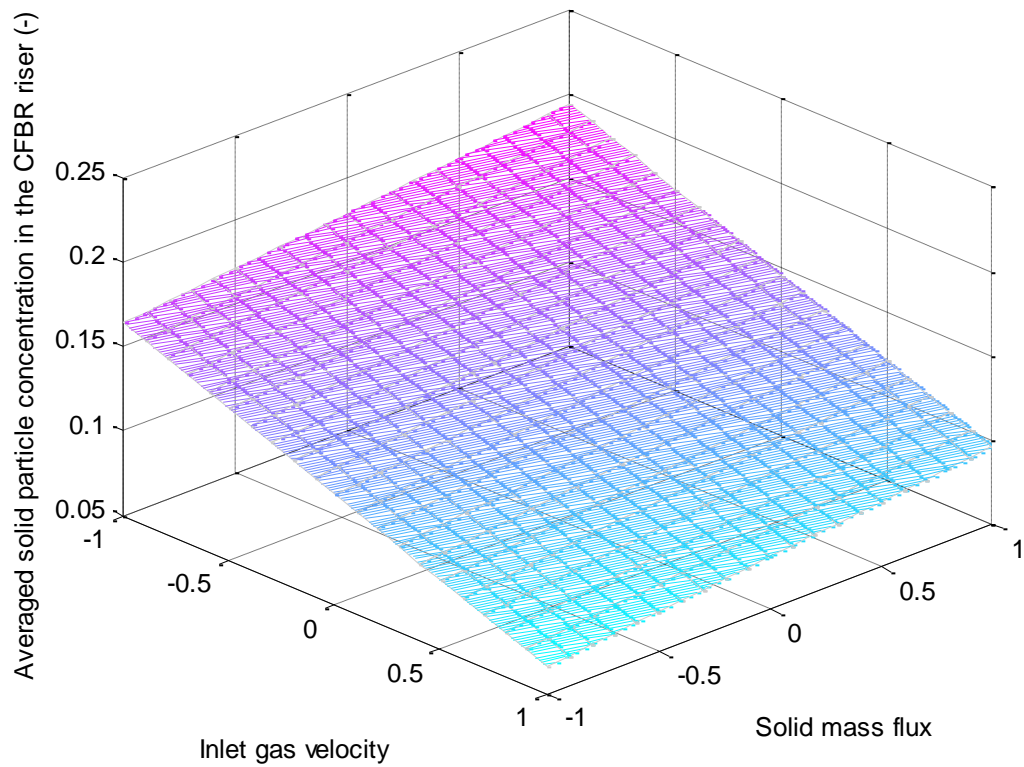
รูปที่ 4.26 พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เมื่อใช้ท่อโรเตอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 และใช้อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.27 พื้นผิวตอบสนองของค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง เมื่อใช้ท่อโรเตอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 และใช้อนุภาคของแข็งขนาด 50 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4.28 พื้นผิวตอบสนองของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์เมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11



รูปที่ 4.29 พื้นผิวตอบสนองของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อโรเซอริเมื่อใช้ท่อโรเซอริที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16

กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 76 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์มากที่สุด และมีค่าน้อยที่สุดในกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 ซึ่งใช้ค่าความเร็วแก๊สทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 50 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุดในทั้งสองท่อไรเซอร์นั้นเป็นกรณีศึกษาที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตาม ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งของทั้งสองท่อไรเซอร์ก็ยังคงใกล้เคียงกันอย่างเห็นได้ชัด โดยในการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 ภาวะดำเนินการที่ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเป็น 0.0142 พบในกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 16 ซึ่งใช้ค่าความเร็วแก๊สทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่ถ้าติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 พบว่าภาวะดำเนินการที่ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุดซึ่งมีค่าเป็น 0.083 พบในกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14 ซึ่งใช้ค่าความเร็วแก๊สทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่พบว่าภาวะดำเนินการนี้ยังทำให้ท่อไรเซอร์ที่ติดตั้งแผ่นปะทะตามตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งนั้นมีค่าเป็น 0.0192 ซึ่งมีค่าต่ำสุดเป็นลำดับที่สองด้วย และพบว่ามีค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมากที่สุดภายใต้ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 15 ในทั้งสองท่อไรเซอร์ โดยมีความเร็วแก๊สที่ทางเข้าเป็น 2.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

4.3.2.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนในตัวแปรความดันลดต่อความยาว

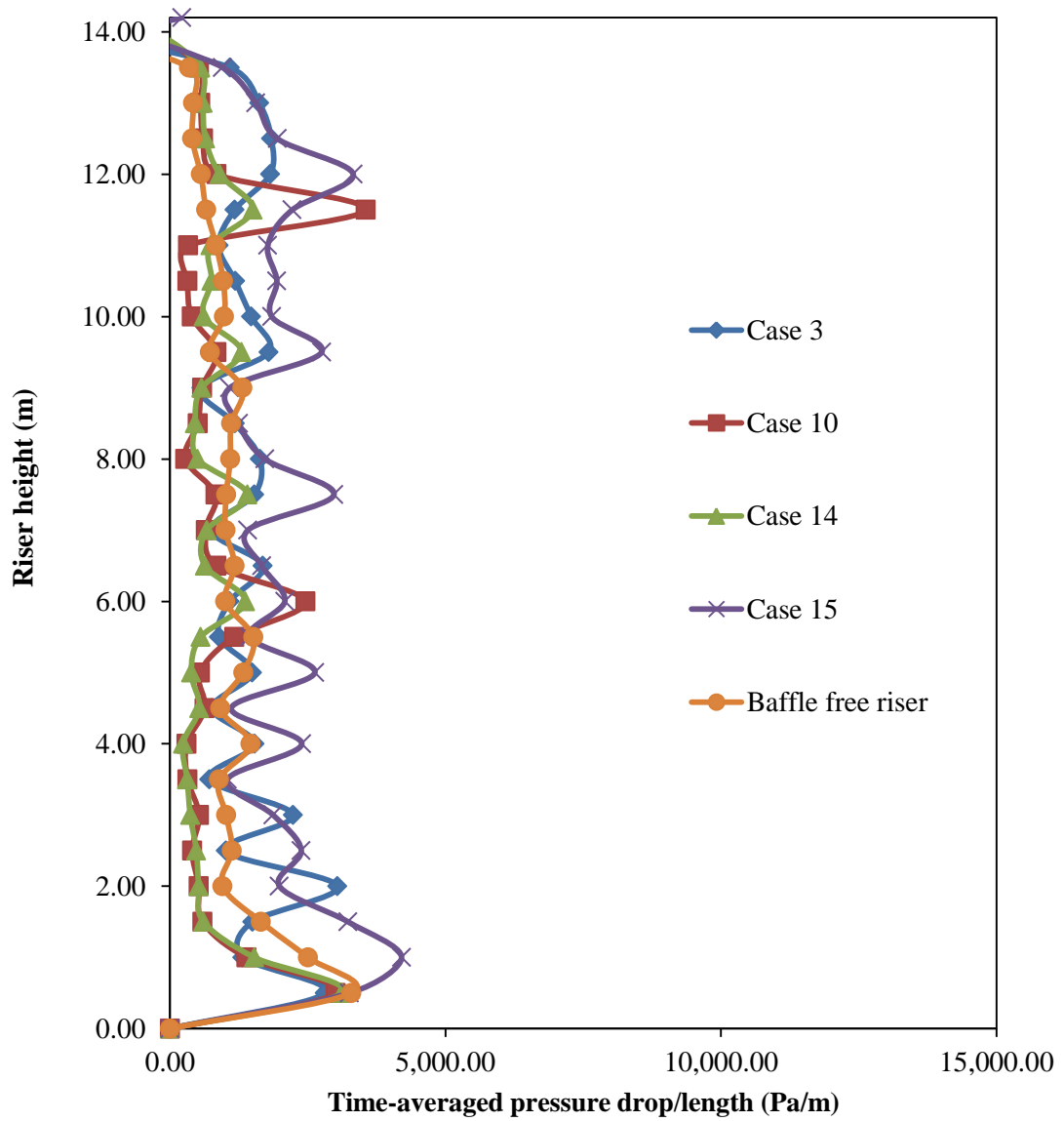
รูปที่ 4.30 เป็นการพลอตค่าความดันลดต่อความยาวเฉลี่ยวินาทีที่ 20-40 จากกราฟจะพบว่าค่าความดันลดต่อความยาวที่เกิดขึ้นนั้นใกล้เคียงกันโดยกรณีศึกษาตัวแปร

ดำเนินการที่ 10 และ 14 จะให้ค่าความดันลดต่อความยาวน้อยกว่าท่อไรเซอร์ปกติอยู่เล็กน้อย ส่วนกรณีศึกษาที่ 3 และ 15 จะให้ค่าความดันลดต่อความยาวมากกว่าท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะอยู่เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 และ 14 ใช้ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาทีซึ่งสูงกว่ากรณีศึกษาที่เหลือ ส่วนกรณีศึกษาที่ 3 และ 15 ใช้ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 2.2 เมตรต่อวินาทีซึ่งต่ำกว่ากรณีศึกษาที่เหลือนั่นเอง โดยถ้าความเร็วแก๊สที่ทางเข้าต่ำจะส่งผลให้ของแข็งอยู่ในระบบมากขึ้น ทำให้เกิดความดันลดต่อความยาวมากขึ้นตามมา

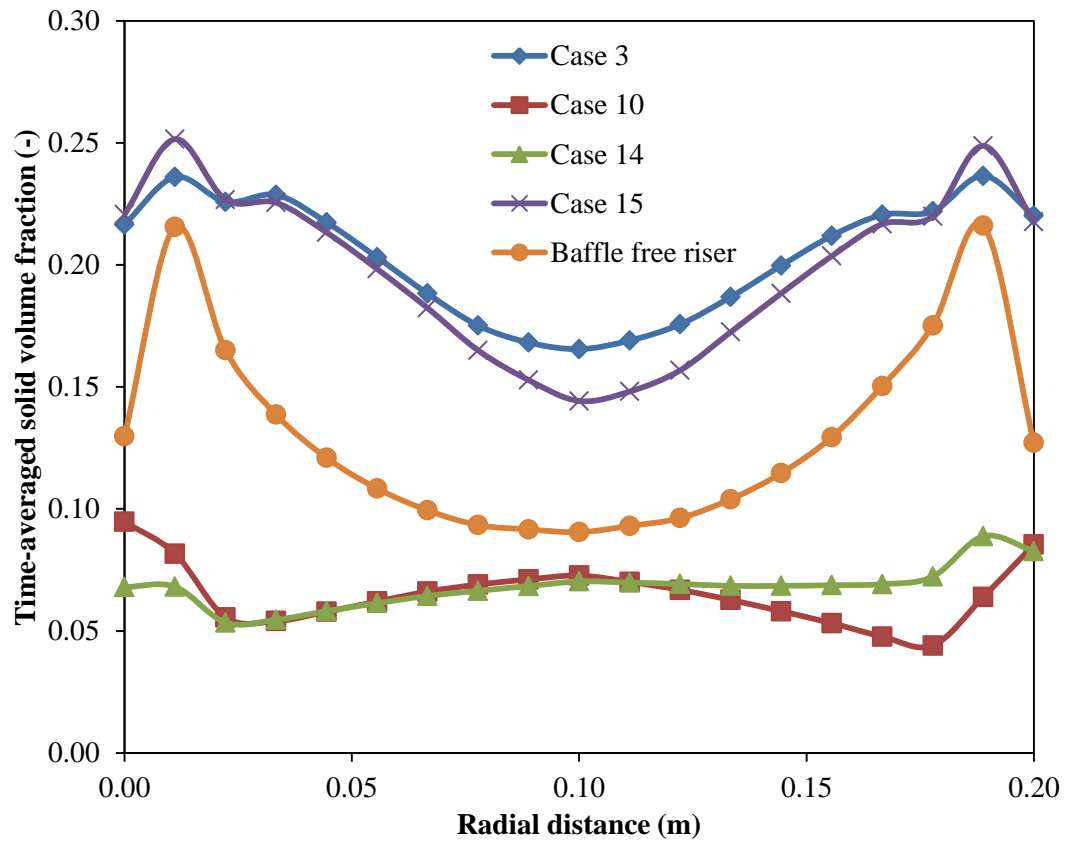
4.3.2.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนตัวแปรของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง

จากการศึกษาความดันลดต่อความยาวที่เกิดขึ้น พบว่า สอดคล้องกับรูปที่ 4.31 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการกระจายตัวของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งตามแนวรัศมี จะเห็นได้ว่ากรณีศึกษาที่ 3 และ 10 จะมีค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งสูงกว่ากรณีศึกษาอื่นๆ จากรูปยังสามารถบอกได้ว่าการปรับปรุงท่อไรเซอร์โดยใช้รูปแบบการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ทำให้รูปแบบการกระจายตัวของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมีความสม่ำเสมอมากขึ้นกว่าท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะในทุกภาวะดำเนินการที่ต่างกัน และเส้นกราฟของกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 และ 14 ก็แสดงให้เห็นว่ามีสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งอยู่น้อยกว่ากรณีศึกษาอื่นๆ แต่มีความสม่ำเสมอของสัดส่วนของของแข็งเชิงปริมาตรในแนวรัศมีมากกว่ากรณีอื่นๆ เช่นกัน

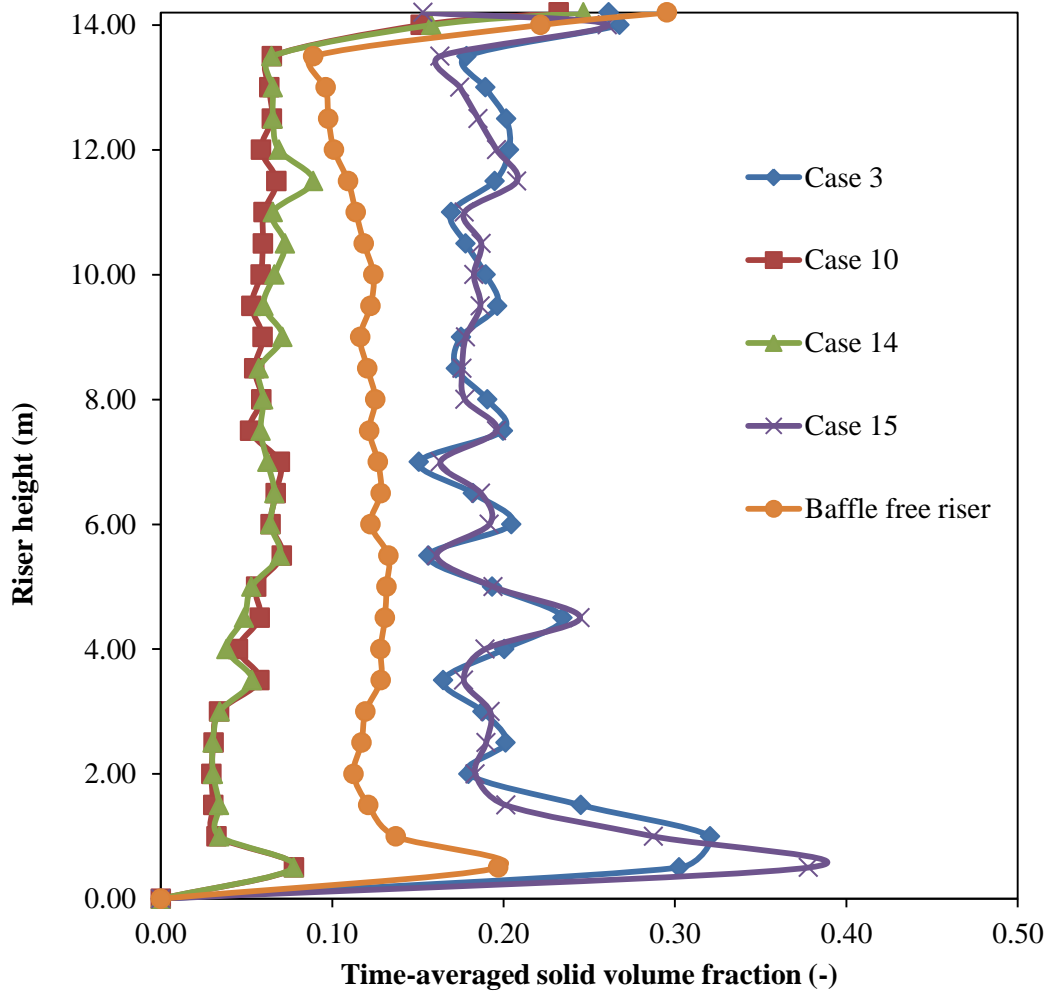
เมื่อพิจารณาสัดส่วนเชิงปริมาตรเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงต่างๆ ในรูปที่ 4.32 นอกจากจะพบว่ากรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการแบบที่ 3 และ 15 จะมีสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีสูงกว่ากรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการแบบอื่นๆ แล้ว ยังพบว่ามีการกวัดแกว่งของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมากกว่ากรณีอื่นด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากการมีปริมาณของแข็งในระบบสูง อาจเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของแข็งที่บางจุดซึ่งเห็นได้ชัดเจนเมื่อดูจากรูปที่ 4.33 และ 4.34 ซึ่งแสดงภาพคอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งที่วินาที 20 25 30 35 และ 40 จะพบว่ากรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 และ 15 จะมีสี่เหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมพบอยู่บริเวณด้านบนบนของแผ่นปะทะ ซึ่งแสดงถึงการมีปริมาณสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งสูงที่บริเวณดังกล่าว แต่จะพบเห็นอยู่น้อยดังแสดงในรูปคอนทัวร์ที่ 4.35 และ 4.36 ใน



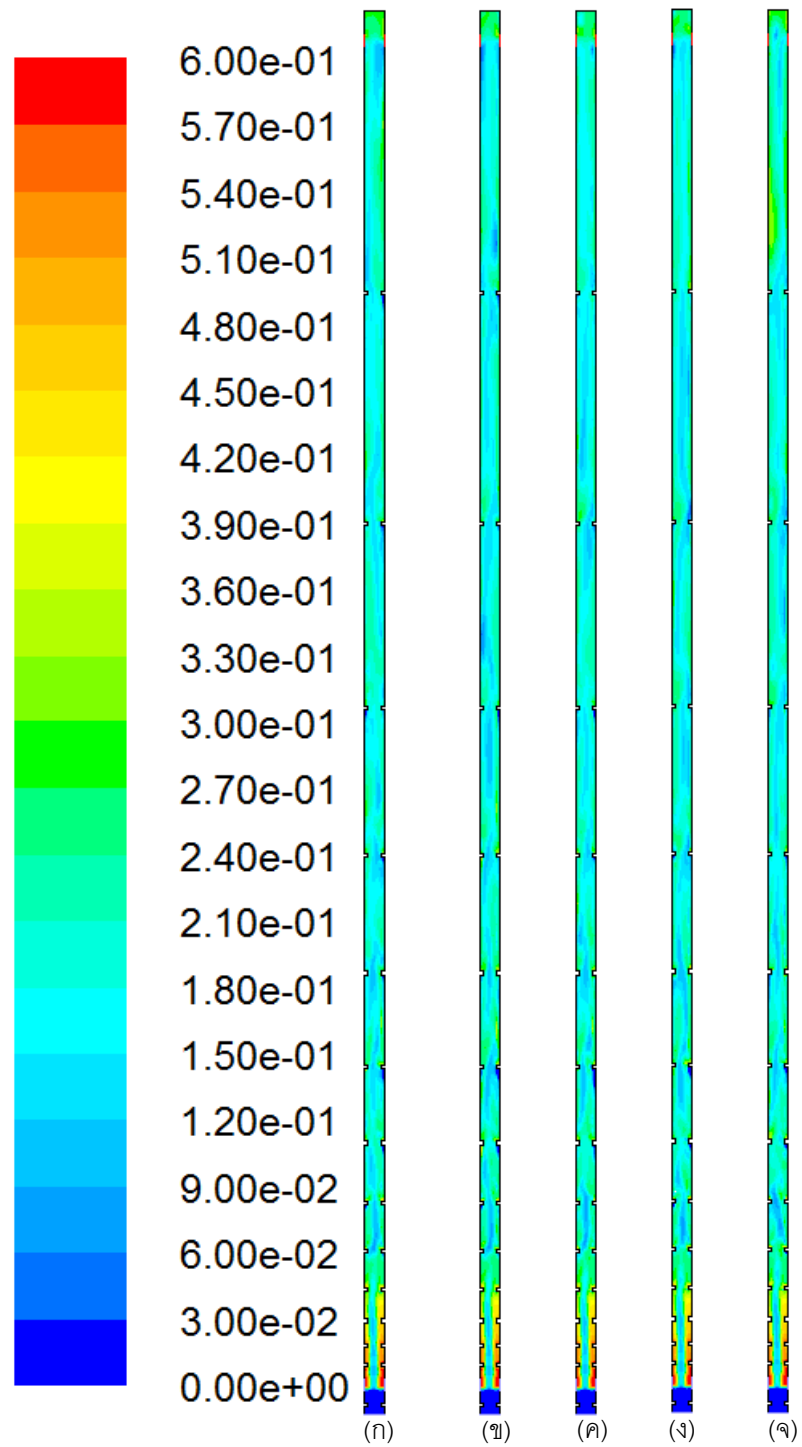
รูป 4.30 ค่าความดันลดต่อความยาวเฉลี่ยวินาทีที่ 20-40 ของกรณีศึกษาที่ 3 10 14 15 และท่อไรเซอร์ที่ไม่มีการติดตั้งแผ่นปะทะ



รูป 4.31 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

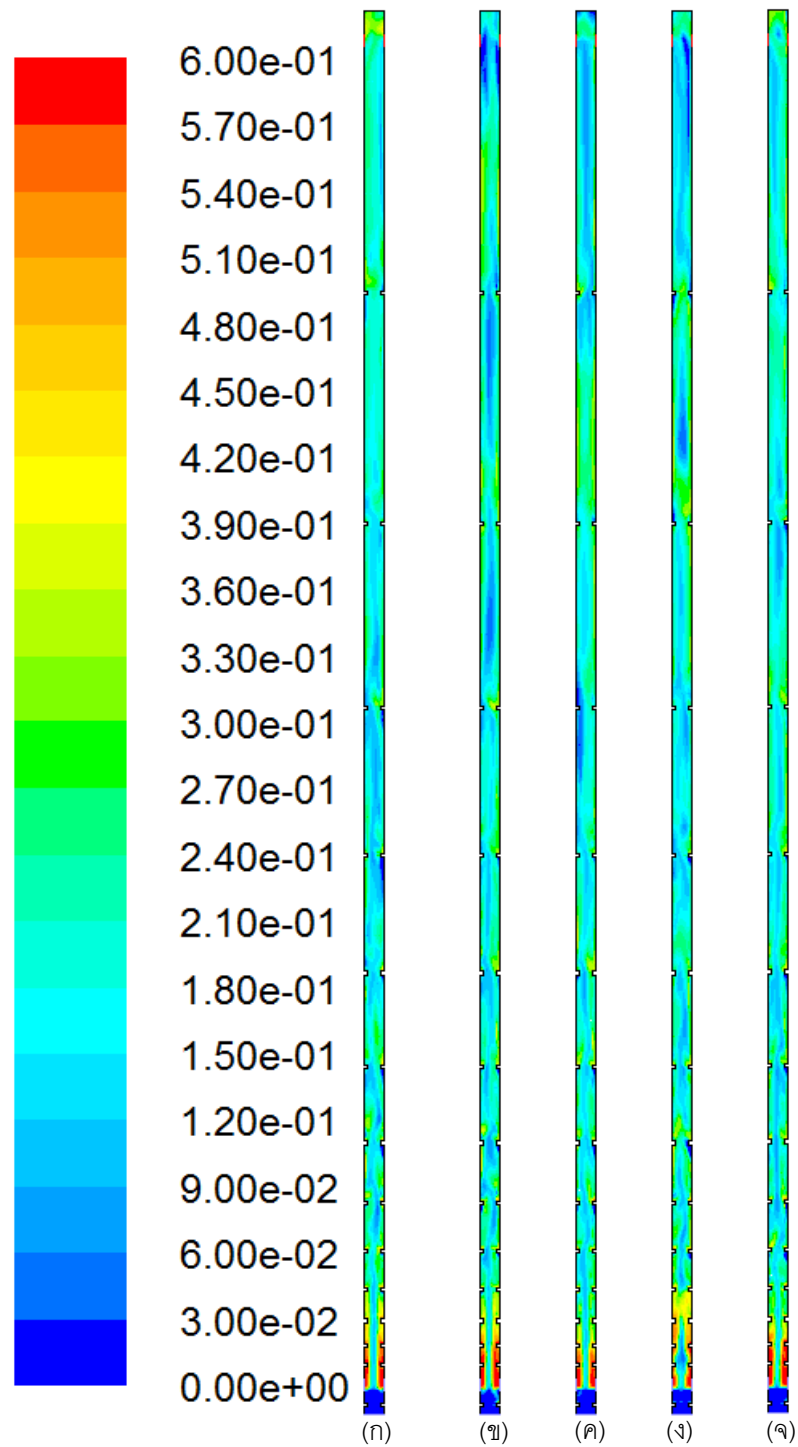


รูป 4.32 ค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ตลอดแนวความสูงของท่อไรเซอร์ ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ



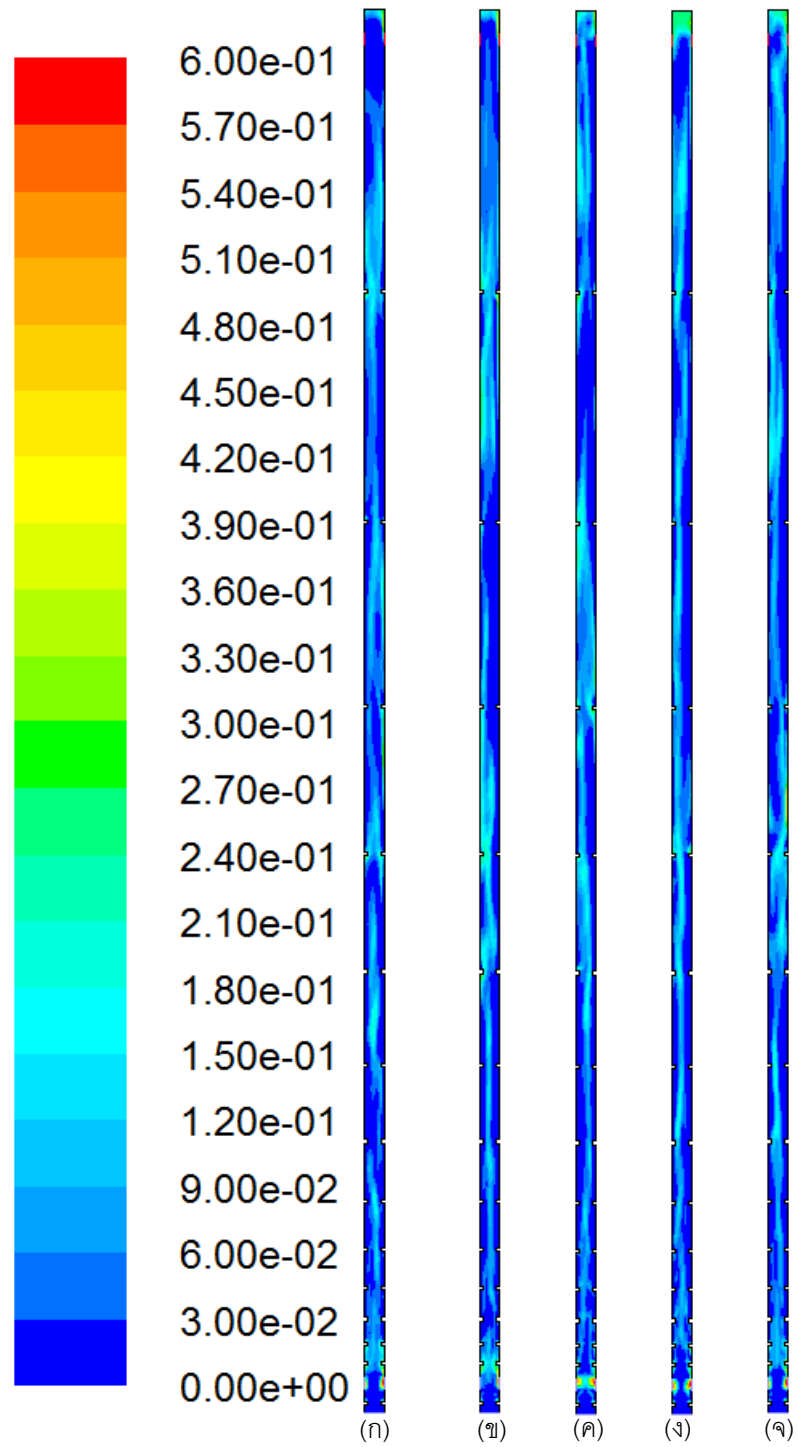
รูปที่ 4.33 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในท่อโรเซอริที่ติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ภายใต้ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 ที่วินาทีที่ (ก) 20

(ข)25 (ค)30 (ง)35 และ (จ)40

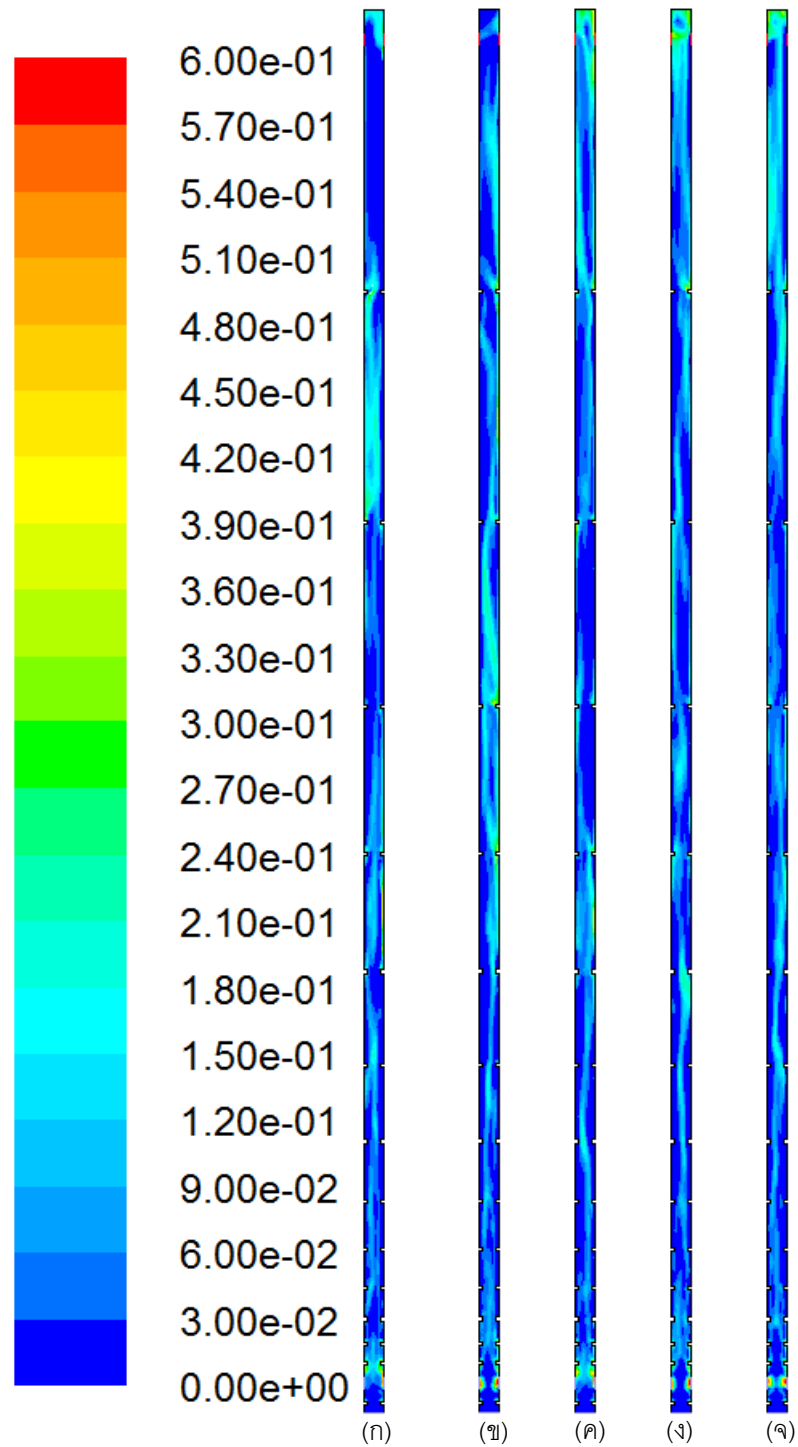


รูปที่ 4.34 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในท่อโรเซอริที่ติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปร การติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ภายใต้ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 15 ที่วินาทีที่ (ก) 20

(ข)25 (ค)30 (ง)35 และ (จ)40



รูปที่ 4.35 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในท่อโรเซอริที่ติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปร การติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ภายใต้ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 ที่วินาทีที่ (ก) 20 (ข)25 (ค)30 (ง)35 และ (จ)40



รูปที่ 4.36 คอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในท่อโรเตอร์ที่ติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปร การติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ภายใต้ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14 ที่วินาทีที่ (ก) 20 (ข)25 (ค)30 (ง)35 และ (จ)40

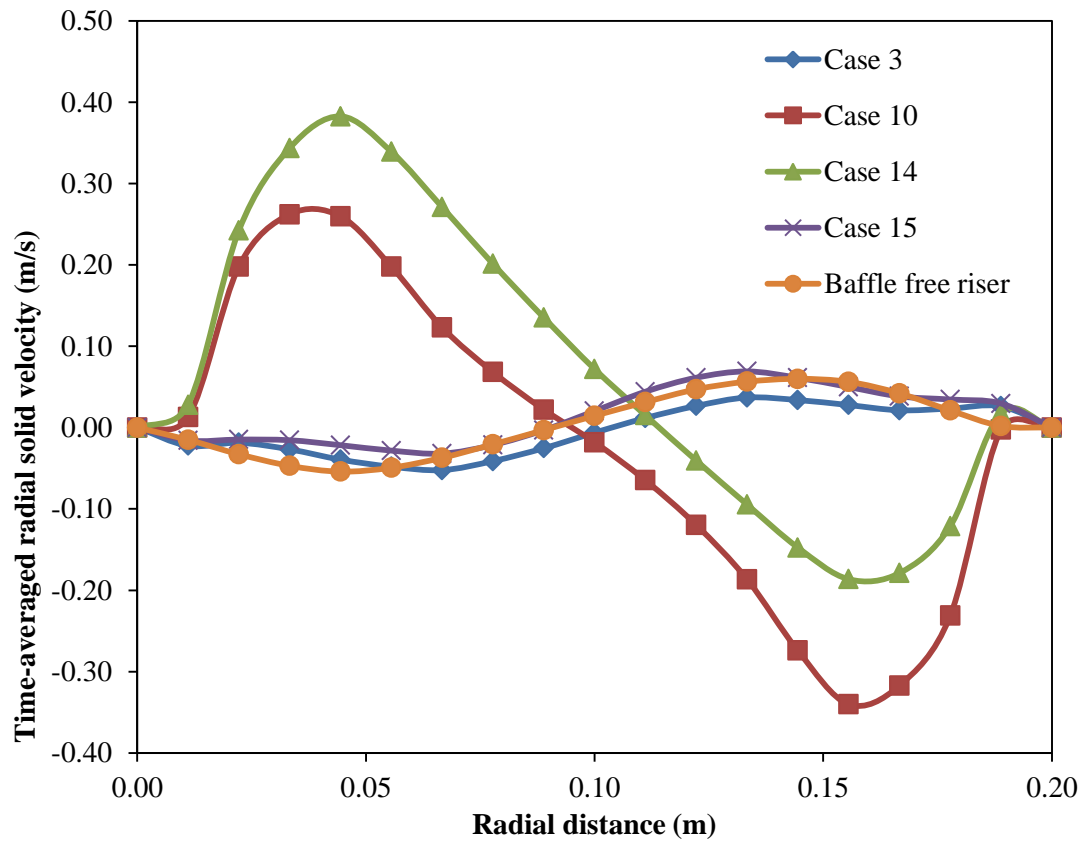
กรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 และ 14 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าแทบไม่มีการรวมตัวกันของของแข็งที่บริเวณด้านบนของแผ่นปะทะ

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้น เมื่อพิจารณาประกอบกับผลที่ได้จากเทคนิคการออกแบบการทดลองก็พบว่าข้อมูลมีความสอดคล้องกันโดยตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งภายในท่อไรเซอร์นั้น คือ ค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้าและค่าฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง ซึ่งในกรณีศึกษาที่ 3 และ 15 มีค่าพารามิเตอร์ทั้งสองเท่ากันโดยมีความเร็วแก๊สที่ทางเข้าต่ำ คือ 2.2 เมตรต่อวินาทีและฟลักซ์โดยมวลของของแข็งสูง คือ 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ซึ่งจากค่าดังกล่าวจะทำให้มีของแข็งอยู่ในท่อไรเซอร์ในปริมาณมาก อันจะเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมกลุ่มเป็นก้อนอนุภาคนั้นเอง ส่วนกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 และ 14 นั้นก็เป็นเช่นเดียวกันโดยมีค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้าสูงเท่ากับ 8.2 เมตรต่อวินาทีและมีฟลักซ์โดยมวลของของแข็งต่ำ คือ 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ซึ่งทำให้มีปริมาณของแข็งในระบบน้อย ทำให้ไม่มีการรวมกลุ่มเป็นก้อนอนุภาคที่บริเวณผนังหรือด้านบนของแผ่นปะทะ

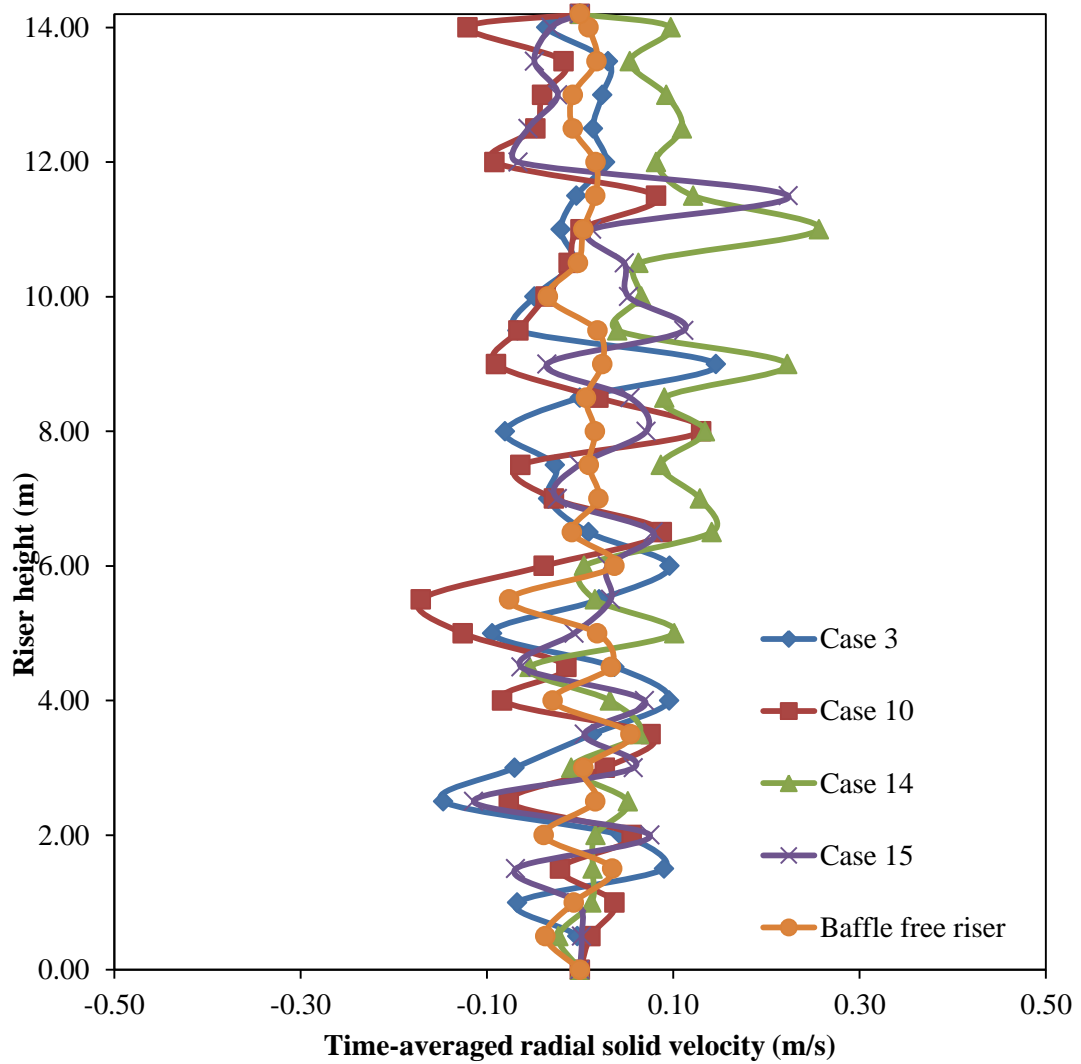
4.3.2.3 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์แบบหมุนเวียนในตัวแปรความเร็วในแนวแกนและแนวรัศมีของของแข็ง

ตามที่ได้กล่าวไปในตอนที่ 2 ความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บอกถึงทิศทางในการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีของของแข็งซึ่งเป็นตัวบอกการเกิดการผสมของแก๊สและของแข็ง รูปที่ 4.37 เป็นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็ง จากรูป จะพบว่ากรณีศึกษาที่ 10 และ 14 จะมีค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งเป็นค่าบวก และค่าลบสูง ซึ่งหมายความว่าของแข็งเคลื่อนที่จากผนังเข้าหากัน รูปแบบการเคลื่อนที่นี้แสดงว่าของแข็งนั้นเกิดการผสมกันมากขึ้นเมื่อเปลี่ยนเทียบกับกรณีศึกษาที่ 3 15 และท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะซึ่งจะมีค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งใกล้เคียงศูนย์หมายความว่าของแข็งเกิดการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีต่ำมากและเกิดการผสมกันน้อยมาก

รูปที่ 4.38 เป็นการนำค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งที่ 20- 40 วินาที มาสร้างกราฟกับแนวความสูงของท่อไรเซอร์ เมื่อเปรียบท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะกับกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 10 14 และ 15 ซึ่งใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะที่ 16 แล้วจะพบว่ารูปแบบของเส้นกราฟของท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะจะมีความกวัดแกว่งน้อยกว่าซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใส่แผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 นั้นสามารถเพิ่มการผสมได้ดีกว่า และเมื่อทำการ



รูป 4.37 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

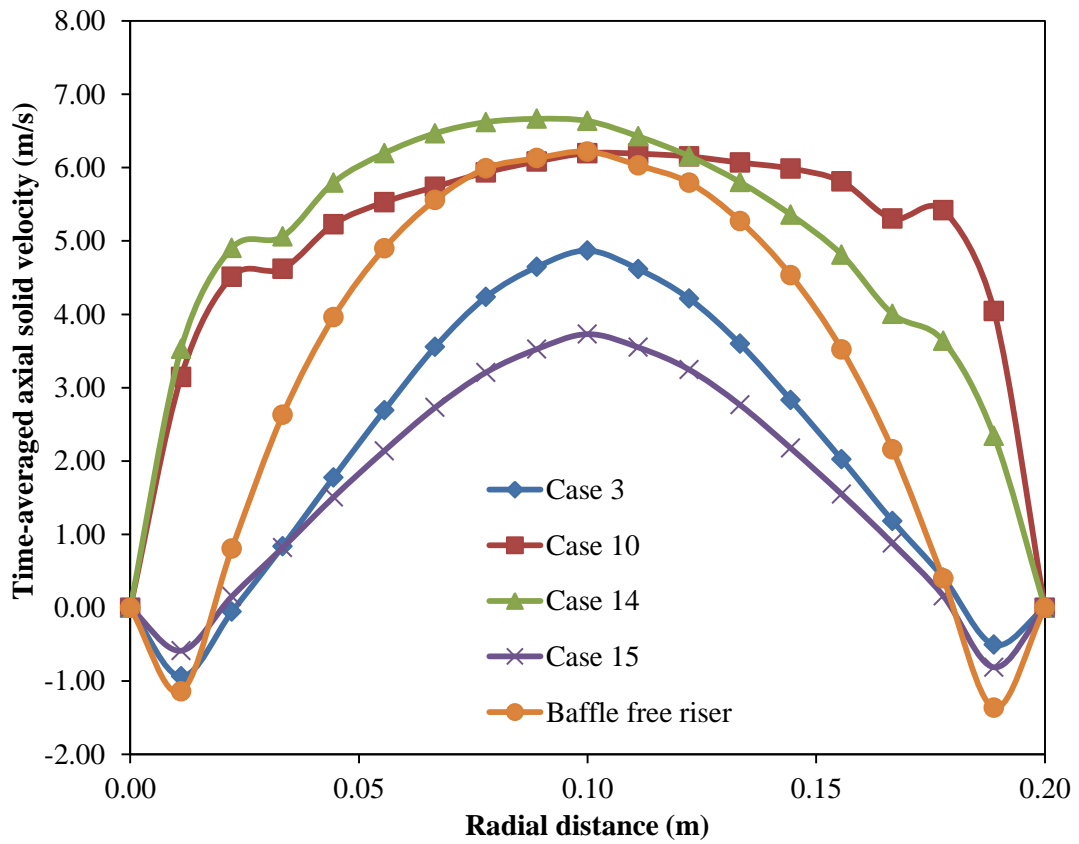


รูป 4.38 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

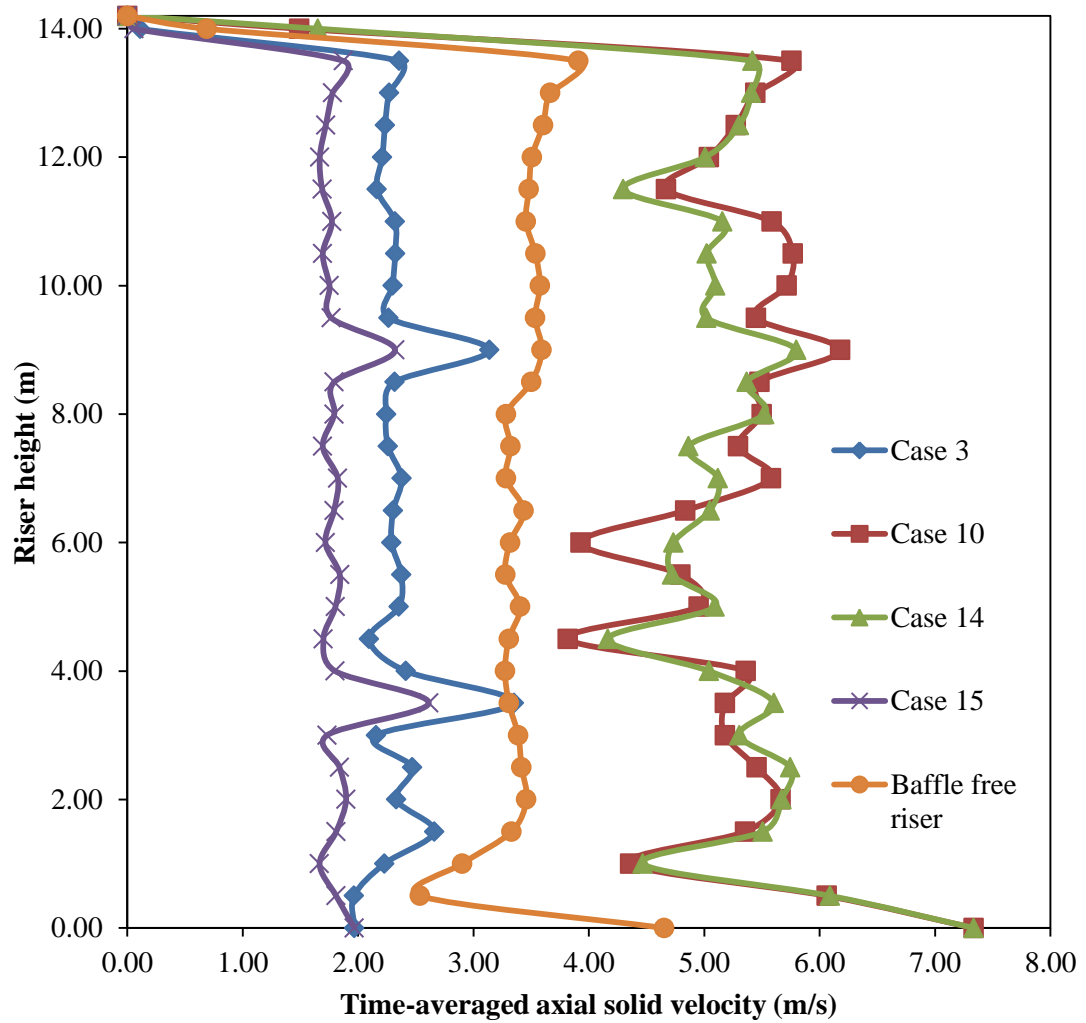
จำลองที่ภาวะดำเนินการต่างๆ กัน คือ กรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 10 14 และ 15 พบว่า ความกว้างแตกต่างกันออกไปแสดงว่าเกิดการผสมที่แตกต่างกันในกระบวนการ

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวตามแนวรัศมีของความเร็วในแนวแกนของของแข็ง ในรูปที่ 4.39 จะ พบว่าเฉพาะกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 และ 14 เท่านั้นที่ไม่มีค่าความเร็ว ในแนวแกนของของแข็งเป็นค่าลบ ซึ่งหมายความว่าไม่มีการตกกลับของของแข็ง อีกทั้งพบว่ามี ความสม่ำเสมอของความเร็วอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดการผสมที่มีมากดังที่เคยกล่าวในรูป ที่ 4.37 และ 4.38 ส่วนกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 และ 10 นั้นมีรูปแบบใกล้เคียงกับกรณี ที่ใช้ท่อไรเซอร์แบบไม่ใส่แผ่นปะทะโดยจะพบของแข็งที่อยู่บริเวณกลางท่อจะมีความเร็วในแนวแกน สูงมากเมื่อเทียบกับที่บริเวณผนังซึ่งมีความเร็วในแนวแกนเป็นค่าลบ ทั้งนี้เป็นเพราะจากรูปที่ 4.37 และ 4.38 กรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 10 และท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะนั้น แทบไม่เกิดการผสมในแนวรัศมี ดังนั้น บริเวณผนังที่เกิดการเสียดสีของของแข็งกับผนังทำให้ สูญเสียความเร็วและตกกลับลงมาจึงมีความเร็วที่ต่ำ และบริเวณกึ่งกลางของท่อไรเซอร์ซึ่งไม่ถูก เสียดสีหรือไม่มีอิทธิพลของผนังเครื่องปฏิกรณ์จึงมีความเร็วที่สูงกว่า และเมื่อนำความเร็วใน แนวแกนของของแข็งมาสร้างกราฟกับความสูงของท่อไรเซอร์ดังรูปที่ 4.40 จะพบว่ากรณีศึกษาตัว แปรดำเนินการที่ 10 และ 14 จะเกิดการกวัดแกว่งของค่าความเร็วในแนวแกนมากกว่ากรณีศึกษา ที่ 3 15 และกรณีที่ไม่ใส่แผ่นปะทะ ซึ่งความกวัดแกว่งในแนวแกนนี้เกิดจากการผสมกันในแนวรัศมี ส่วนกรณีศึกษาที่ 3 และ 15 จะมีความกวัดแกว่งน้อยกว่าแต่มีจุดที่ความเร็วในแนวแกนของ ของแข็งเพิ่มมากขึ้นอย่างฉับพลันเนื่องมาจากเป็นตำแหน่งที่มีการใส่แผ่นปะทะ อย่างไรก็ตามใน กรณีศึกษาดังกล่าวไม่ได้ใส่แผ่นปะทะเพียงสองแผ่นยังมีการติดตั้งแผ่นปะทะที่ความสูงอื่นด้วยแต่ ที่ไม่พบการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของความเร็วในแนวแกนของแก๊สเนื่องจากความสูงที่ทำการแสดง ค่าไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะ

เมื่อนำค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งมาพิจารณาควกับค่าสัดส่วนเชิง ปริมาตรของแข็งที่ได้อภิปรายในหัวข้อก่อนหน้านี้ จะพบว่าอนุภาคของแข็งจะเกิดการเคลื่อนที่จาก ผนังเข้ามาผสมกันมากขึ้นเมื่อมีปริมาณของแข็งในระบบน้อย ซึ่งเกิดจากการใช้ภาวะดำเนินการที่ มีความเร็วของแก๊สที่ทางเข้าสูงและฟลักซ์โดยมวลของของแข็งต่ำ ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้ความเร็ว ของแก๊สที่ทางเข้าสูงจะยับยั้งการตกกลับของอนุภาคของแข็งที่ผนังดังที่ได้กล่าวไปในรูปที่ 4.39 ซึ่ง กรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 และ 14 ไม่พบความเร็วของของแข็งที่เป็นลบหรือเคลื่อนที่ใน ทิศทางลง และการลดฟลักซ์โดยมวลของของแข็งจะทำให้ของแข็งในระบบน้อย ซึ่งเมื่อของแข็งมี ปริมาณน้อยจะเกิดการผสมในแนวรัศมีได้ง่ายทำให้การกระจายตัวของของแข็งสม่ำเสมอมากขึ้น



รูป 4.39 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของของแข็งตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

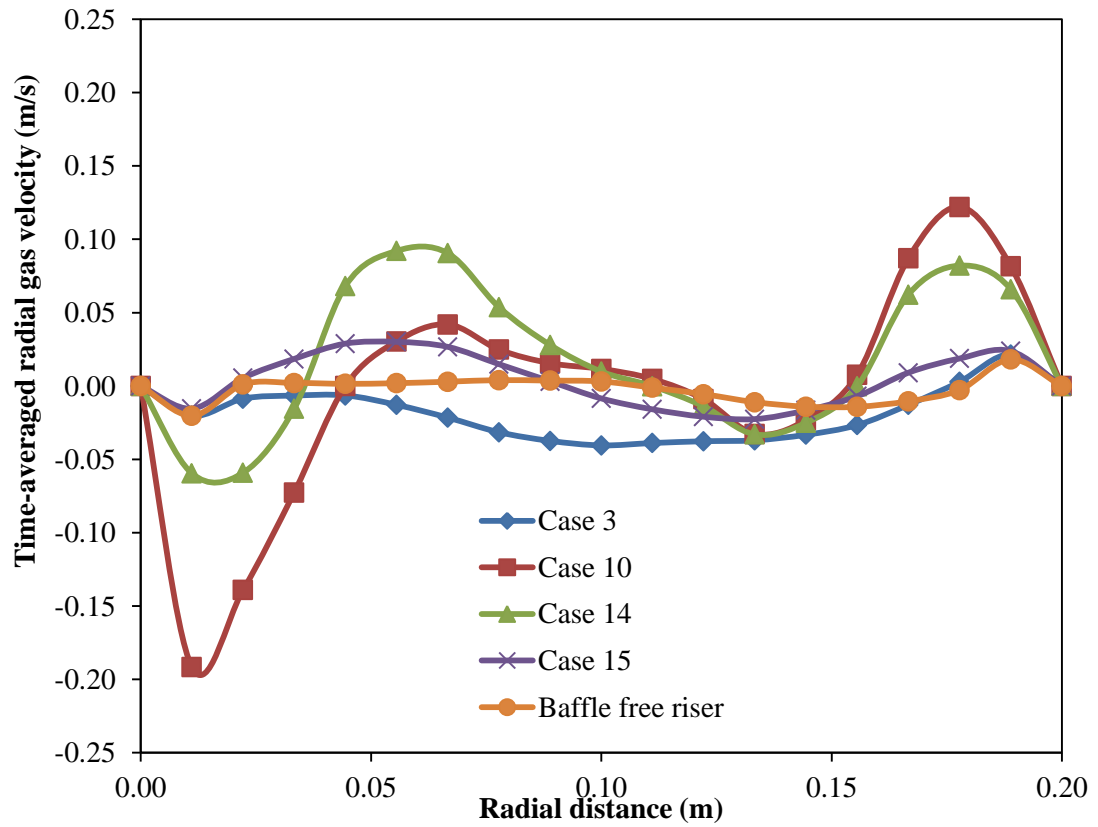


รูป 4.40 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

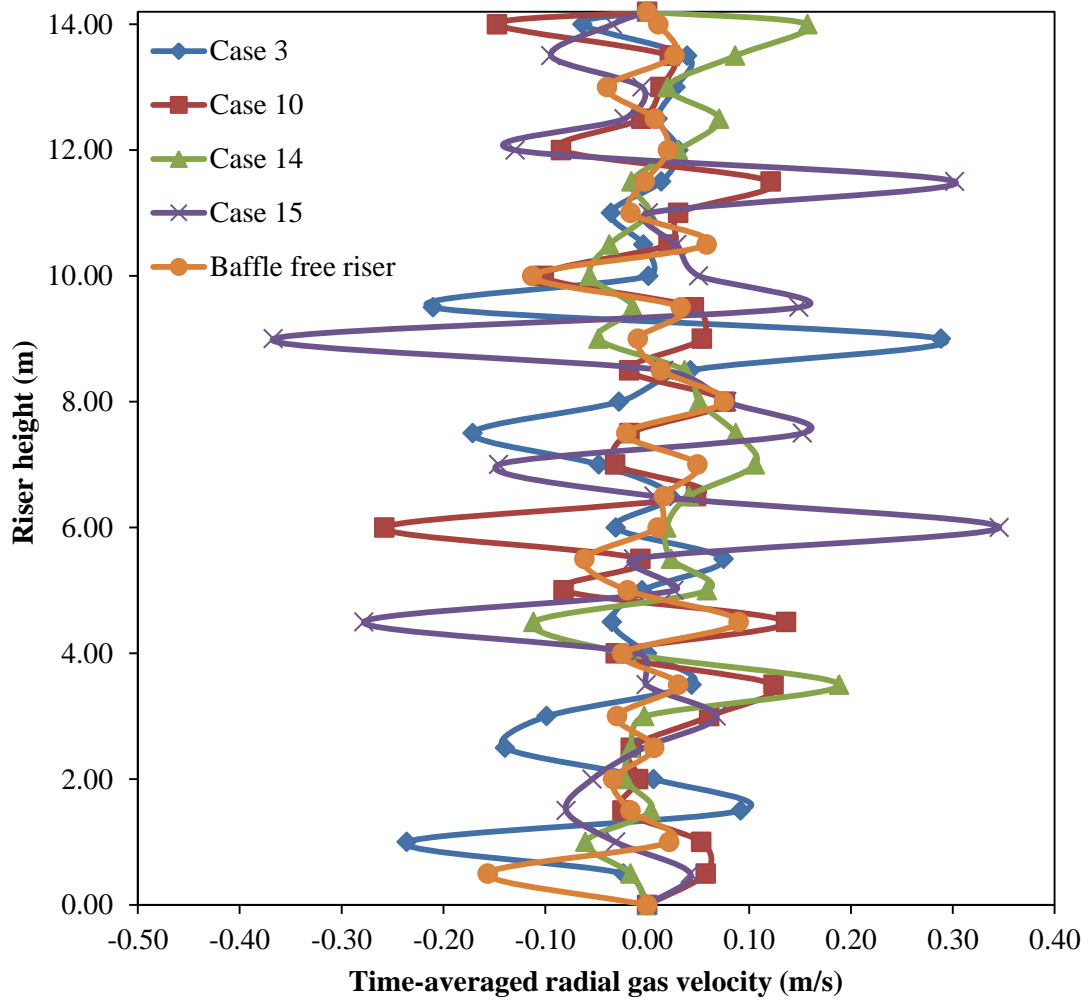
อันจะเห็นได้ชัดในรูปที่ 4.33 ซึ่งมีความสม่ำเสมอของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมี และรูปที่ 4.37 แสดงการวิ่งเข้าหากันของของแข็งในแนวรัศมี นอกจากนี้ ผลที่ได้ยังสอดคล้องกับผลที่ได้จากเทคนิคการออกแบบการทดลองดังรูปที่ 4.30 ซึ่งเป็นผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีที่บอกถึงการกระจายตัวของของแข็งและการผสมที่พบว่า ค่าความเร็วของแก๊สที่ทางเข้ามีผลเชิงลบ หมายถึง การเพิ่มค่าความเร็วของแก๊สที่ทางเข้าจะทำให้ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีน้อยลง และพลั๊กซีโดยมวลของของแข็งมีผลเชิงบวก หมายถึง การเพิ่มพลั๊กซีโดยมวลของของแข็ง จะทำให้ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีมีค่าสูงขึ้น

4.3.2.4 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนในตัวแปรความเร็วในแนวแกนและแนวรัศมีของแก๊ส

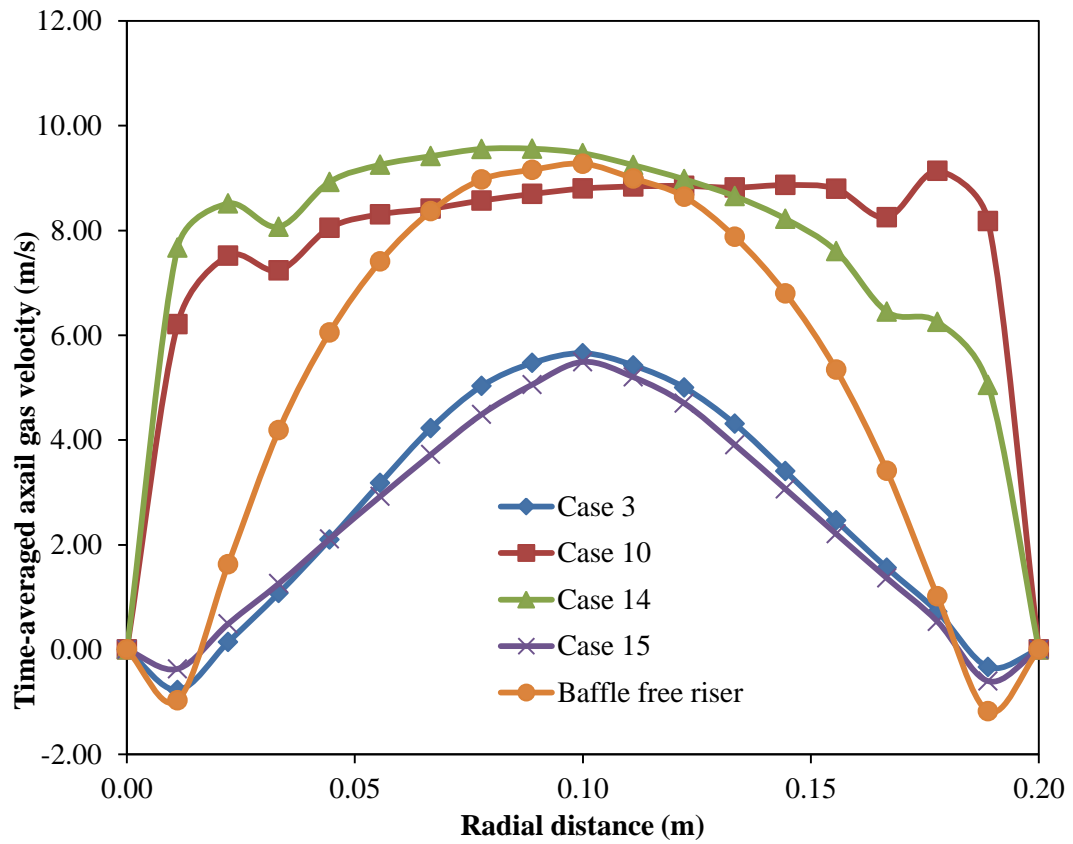
ในส่วนของความเร็วในแนวแกนและแนวรัศมีของแก๊สนั้นผลที่ได้จากการจำลองพบว่าใกล้เคียงกับผลของความเร็วในแนวแกนและแนวรัศมีของของแข็ง รูปที่ 4.41 เป็นกราฟแสดงการกระจายตัวในแนวรัศมีของค่าความเฉลี่ยความเร็วของแก๊สในแนวรัศมี จากรูปจะพบว่ากรณีศึกษาที่ 10 และ 14 จะมีค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งมีความกว้างมากกว่ากรณีศึกษาอื่นๆ โดยมีทั้งค่าลบและค่าบวกซึ่งบอกทิศทางเคลื่อนที่ของแก๊สแสดงว่าแก๊สนั้นเคลื่อนที่จากผนังเข้าหากัน รูปแบบการเคลื่อนที่นี้คล้ายกับการเคลื่อนที่ของของแข็งในรูปที่ 4.37 เป็นการสนับสนุนคำอธิบายว่ามีการผสมกันระหว่างแก๊สและของแข็งจริง จากนั้น เมื่อเปลี่ยนเทียบกับกรณีศึกษาที่ 3 15 และท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะซึ่งจะมีค่าความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งใกล้เคียงศูนย์หมายความว่า เกิดการเคลื่อนที่ของแก๊สในแนวรัศมีต่ำมากหรือเกิดการผสมกันน้อยมากนั่นเอง จากนั้น นำค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งที่ 20- 40 วินาที มาสร้างกราฟตามความสูงของท่อไรเซอร์ดังรูป 4.42 เมื่อเปรียบท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะกับกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 10 14 และ 15 ซึ่งเป็นท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะที่ 16 แล้วจะพบว่ารูปแบบของเส้นกราฟของท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะจะมีความกว้างน้อยกว่าซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใส่แผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 นั้นสามารถเพิ่มการผสมได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาที่ภาวะดำเนินการต่างๆ กัน คือ กรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 10 14 และ 15 พบว่าความกว้างมีความแตกต่างกันออกไปแสดงว่าเกิดการผสมขึ้นจริงด้วยปริมาณที่แตกต่างกันโดยผลที่ได้สอดคล้องกับความเร็วในแนวรัศมีของของแข็งเช่นกัน



รูป 4.41 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของแก๊สทุกความสูงตั้งแต่
วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ



รูป 4.42 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวรัศมีของแก๊สตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ



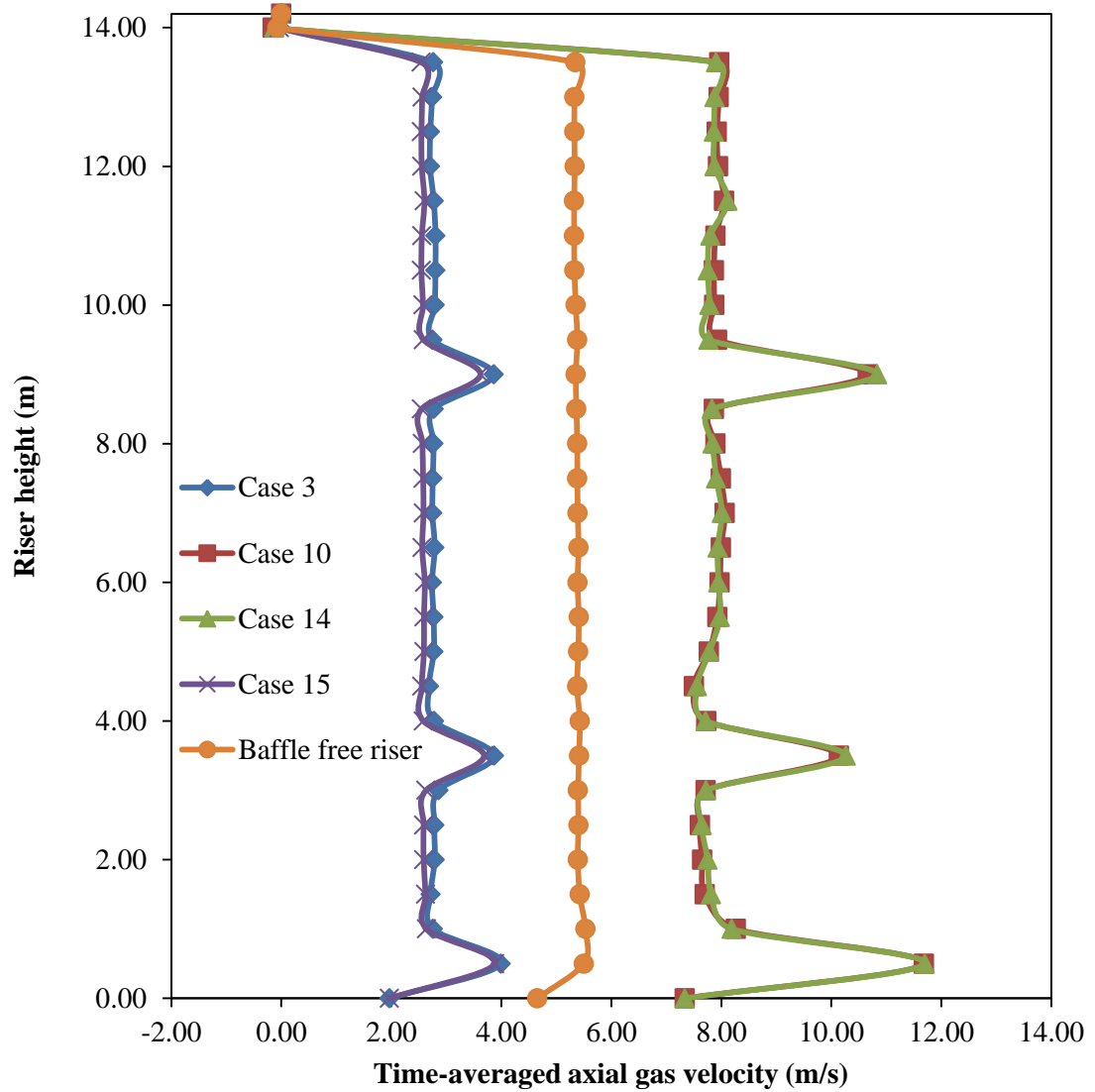
รูป 4.43 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของแก๊สตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวตามแนวรัศมีของความเร็วในแนวแกนของแก๊สในรูปที่ 4.43 จะเห็นว่า มีรูปแบบของเส้นกราฟใกล้เคียงกับความเร็วในแนวแกนของของแข็ง การอธิบายการผสมในส่วนนี้จึงใกล้เคียงกันโดยจากกราฟจะพบว่าเฉพาะกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 และ 14 เท่านั้นที่ไม่มีค่าความเร็วในแนวแกนของของแข็งเป็นค่าลบ ซึ่งหมายความว่าไม่มีการไหลย้อนกลับของแก๊ส อีกทั้งพบว่ามีค่าความสม่ำเสมอของความเร็วแก๊สอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดการผสมที่มีมากขึ้น ส่วนกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 และ 10 นั้นมีรูปแบบใกล้เคียงกับกรณีที่ใช้ท่อไรเซอร์แบบไม่ใส่แผ่นปะทะโดยจะพบว่าแก๊สที่อยู่บริเวณกลางท่อจะมีความเร็วในแนวแกนสูงมากเมื่อเทียบกับความเร็วที่บริเวณผนังซึ่งพบว่ามีค่าความเร็วในแนวแกนเป็นค่าลบ ทั้งนี้เป็นเพราะจากรูปที่ 4.41 และ 4.43 กรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 10 และท่อไรเซอร์ที่ไม่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะนั้นแทบไม่เกิดการผสมในแนวรัศมีและมีลักษณะการไหลเป็นโครงสร้างแบบแกนและวงแหวน (Core-Annulus) โดยความเร็วของแก๊สและของแข็งจะมีค่ามากที่บริเวณกลางท่อ (Core) ซึ่งมีปริมาณของแข็งน้อย ในขณะที่ความเร็วของแก๊สและของแข็งจะมีค่าน้อยที่บริเวณผนัง (Annulus) ซึ่งมีปริมาณของแข็งอยู่มาก เนื่องจากการเสียดสีของของแข็งกับผนังท่อทำให้ความเร็วของของแข็งต่ำลงซึ่งทำให้เกิดการตกลงของของแข็ง และเกิดการผสมย้อนกลับทำให้การไหลของแก๊สและของแข็งมีความไม่สม่ำเสมอ และเกิดการเกาะกลุ่มกันของของแข็งที่บริเวณผนังซึ่งจะทำให้การสัมผัสกันของแก๊สและของแข็งต่ำลง ทำให้ประสิทธิภาพที่ได้น้อยลง เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในแนวแกนของแก๊สกับความสูงต่างๆของท่อไรเซอร์ดังรูปที่ 4.44 จะพบว่า กรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 10 และ 14 นั้นมีความเร็วในแนวแกนของแก๊สที่ความสูงต่างๆของท่อไรเซอร์จะมีความแตกต่างจากความเร็วในแนวแกนของของแข็งที่จะไม่เกิดการกวัดแกว่งเพราะเมื่อของแข็งเกิดการชนกับแผ่นปะทะจะทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางของการเคลื่อนที่และความเร็วนั่นเอง จากนั้นเมื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วในแนวแกนของกรณีศึกษาทั้งห้าแบบพบว่า มีแนวโน้มเหมือนกันแต่เนื่องจากใช้ความเร็วแก๊สที่ทางเข้าที่ความเร็วต่างกัน ค่าจึงแบ่งเป็นสามช่วงคือ กรณีศึกษาที่ 10 และ 14 จะมีค่าความเร็วในแนวแกนสูงสุดคือ 8.2 เมตรต่อวินาที ท่อไรเซอร์ที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นปะทะจะใช้ความเร็ว 5.2 เมตรต่อวินาที และกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 และ 10 ใช้ความเร็วแก๊สที่ทางเข้าเป็น 2.2 เมตรต่อวินาที ในส่วนการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของความเร็วในแนวแกนนั้นเนื่องมาจากเป็นตำแหน่งที่มีการใส่แผ่นปะทะ แต่อย่างไรก็ตามในกรณีศึกษาดังกล่าวไม่ได้ใส่แผ่นปะทะเพียงสองแผ่นยังมีการติดตั้งแผ่นปะทะที่ความสูงอื่นด้วยแต่ที่ไม่พบการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของความเร็วในแนวแกน

ของแก๊สเนื่องจากความสูงที่ทำการแสดงค่าไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ทำการติดตั้งแผ่นปะทะ

จากผลการทดลองพบว่าการใช้ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที และใช้ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที จะทำให้เกิดช่วงการไหลฟลูอิดไดเซชันแบบความเร็วสูงที่มีความคล้ายคลึงกับช่วงการไหลฟลูอิดไดเซชันแบบเบาบาง (Pneumatic transport) โดยจะมีอนุภาคของแข็งในปริมาณต่ำตลอดแนวความสูงของท่อโรเซอรัออนุภาคของแข็งภายในท่อโรเซอรัจะถูกพุงและยกตัวขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องมาจากแรงกระทำจากแก๊ส ทำให้ไม่พบการไหลย้อนกลับของของแข็งและการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอนุภาค อีกทั้งการผสมและการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งในแนวรัศมีมากขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ว่างให้อนุภาคของแข็งสามารถกระจายตัวและเคลื่อนที่ในแนวรัศมีได้ ดังนั้นค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งจึงมีค่าต่ำ แตกต่างจากการใช้ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 2.2 เมตรต่อวินาทีและใช้ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที จะทำให้เกิดช่วงการไหลฟลูอิดไดเซชันแบบความเร็วสูงที่มีความคล้ายคลึงกับช่วงการไหลฟลูอิดไดเซชันแบบปั่นป่วน ที่มีปริมาณอนุภาคของแข็งบริเวณด้านล่างของท่อโรเซอรัสูงกว่าบริเวณด้านบนและพบการไหลย้อนกลับของของแข็งที่บริเวณผนัง ซึ่งทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันของอนุภาคเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งกลุ่มก้อนอนุภาคบริเวณผนังนี้จะทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งในแนวรัศมีทำไม่ได้ยากเป็นสาเหตุให้การผสมและการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งในแนวรัศมีมีน้อยมาก ด้วยสาเหตุดังกล่าวทำให้ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในท่อโรเซอรัมีค่าสูง

สำหรับการนำแบบจำลองการถดถอยที่ได้จากการศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อโรเซอรัและตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อโรเซอรัที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน สามารถแปลงตัวแปรที่ศึกษาทั้งหมดให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย (Dimensionless) เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนอื่น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของท่อโรเซอรัต่างออกไป ดังแสดงในตารางที่ 4.9 สำหรับตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะ และตารางที่ 4.10 สำหรับตัวแปรดำเนินการ หลังจากนั้นเปลี่ยนตัวแปรไร้หน่วยให้อยู่ในรูปของตัวแปรเข้ารหัส แล้วแทนค่าตัวแปรเข้ารหัสที่ได้ลงในแบบจำลองการถดถอย ทั้งนี้ค่าของตัวแปรไร้หน่วยจะต้องมีค่าอยู่ระหว่างค่าสูง-ต่ำของงานวิจัยนี้ด้วย



รูป 4.44 การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยความเร็วในแนวแกนของแก๊สตั้งแต่วินาทีที่ 20-40 วินาที ตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ที่การติดตั้งแผ่นปะทะกรณีศึกษาต่างๆ

ตารางที่ 4.9 การแปลงตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย

ตัวแปร	วิธีคำนวณ	ค่าสูงสุด (Max)	ค่าต่ำสุด (Min)
ตัวแปรเข้ารหัส ($X_{A,B,C,D,E}$)	$\frac{\text{ค่าที่ต้องการเข้ารหัส} - \frac{(\text{ค่าสูงสุด} + \text{ค่าต่ำสุด})}{2}}{\frac{(\text{ค่าสูงสุด} - \text{ค่าต่ำสุด})}{2}}$	1	-1
พื้นที่เปิดของแผ่น ปะทะแบบวง แหวน	$\frac{\text{พื้นที่เปิดของแผ่นปะทะ (ตารางเมตร)}}{\text{พื้นที่ตัดขวางของท่อไรเซอร์ (ตารางเมตร)}} \times 100$	75%	50%
ระยะห่างระหว่าง แผ่นปะทะ	$\frac{\text{ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ (เมตร)}}{\text{ความสูงของท่อไรเซอร์ (เมตร)}}$	0.01408	0.00563
ความหนาของ แผ่นปะทะ	$\frac{\text{ความหนาของแผ่นปะทะ (เมตร)}}{\text{ความสูงของท่อไรเซอร์ (เมตร)}}$	0.00282	0.00070
จำนวนแผ่นปะทะ	$\frac{\text{จำนวนแผ่นปะทะ (ชิ้น)}}{1 \text{ (ชิ้น)}}$	14	5
ความสม่ำเสมอ ของระยะห่าง ระหว่างแผ่นปะทะ	$\frac{\text{ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะคู่ที่ } n \text{ (เมตร)}}{\text{ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะคู่ที่ } n - 1 \text{ (เมตร)}}$ <small>*n มีค่าตั้งแต่ 3 ถึง 13 เนื่องจากแผ่นปะทะ มีสูงสุด 14 แผ่นและระยะห่างระหว่าง แผ่นปะทะคู่ที่หนึ่งและสองมีขนาดเท่ากัน</small>	1.25	1

ตารางที่ 4.10 การแปลงตัวแปรดำเนินการให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้หน่วย

ตัวแปร	วิธีคำนวณ	ค่าสูงสุด (Max)	ค่าต่ำสุด (Min)
ตัวแปร เข้ารหัส ($X_{F,G,H,I}$)	$\frac{\text{ค่าที่ต้องการเข้ารหัส} - \frac{(\text{ค่าสูงสุด} + \text{ค่าต่ำสุด})}{2}}{\frac{(\text{ค่าสูงสุด} - \text{ค่าต่ำสุด})}{2}}$	1	-1
ความเร็ว แก๊สที่ ทางเข้า	$\frac{\text{ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า (เมตรต่อวินาที)}}{\text{ความเร็วแก๊สน้อยสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง (เมตรต่อวินาที)}}$	4.4858	1.2035
ฟลักซ์โดย มวลของ ของแข็ง	$\frac{\text{ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)}}{489 \text{ (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)}}$ <small>*489 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที เป็นค่าจากการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995)</small>	1.1820	0.8180
ขนาด อนุภาค ของแข็ง	$\frac{\text{เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (ไมโครเมตร)}}{76 \text{ (ไมโครเมตร)}}$ <small>*76 ไมโครเมตร เป็นค่าจากการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995)</small>	1.1842	0.6579
ความ หนาแน่น ของอนุภาค ของแข็ง	$\frac{\text{ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)}}{1,712 \text{ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)}}$ <small>*1,712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นค่าจากการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995)</small>	1.1682	0.8318

4.4 การศึกษาผลของรูปร่างแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซอร์

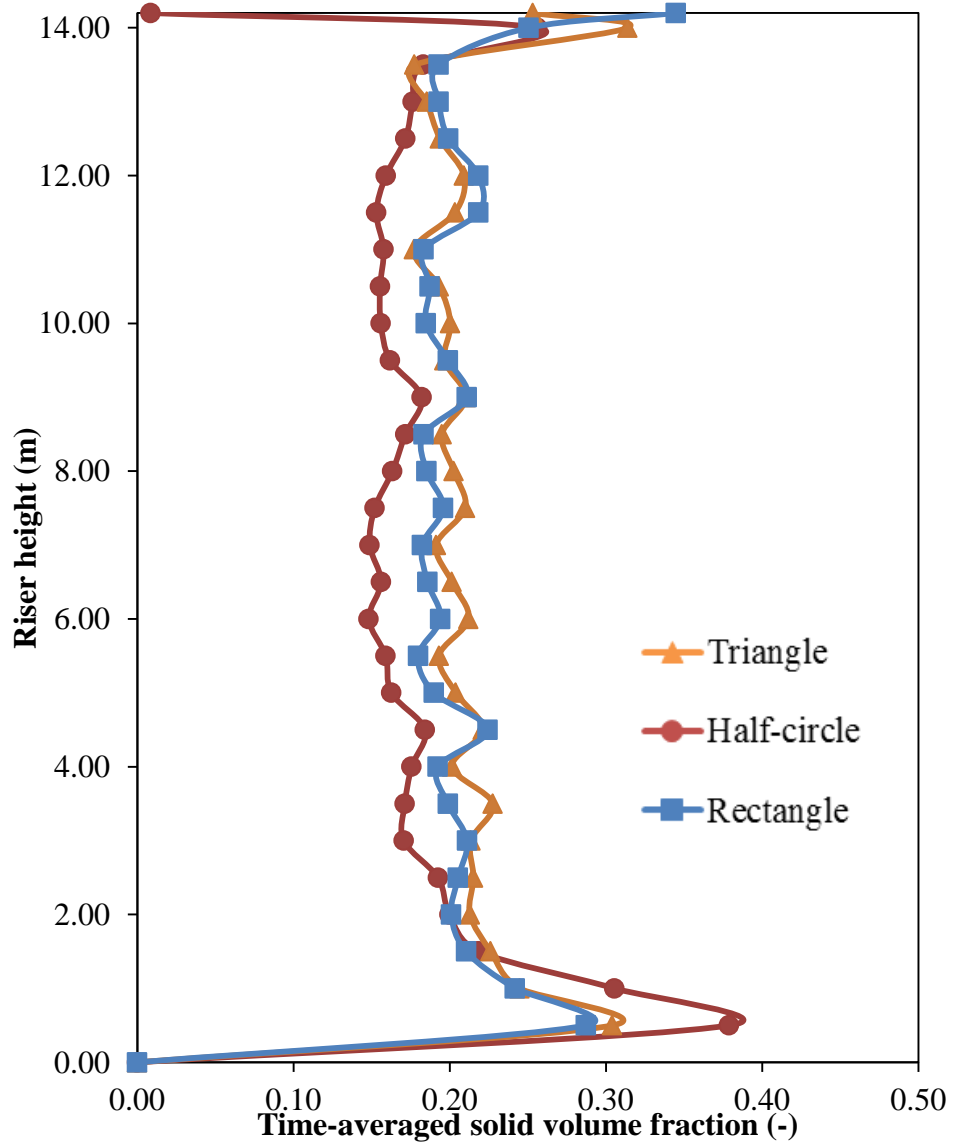
รูปร่างแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย รูปทรงสามเหลี่ยม รูปทรงครึ่งวงกลม และรูปทรงสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นแบบที่ทำการจำลองมาตั้งแต่ตอนต้น โดยจะแบ่งการจำลองออกเป็นสองส่วน ส่วนที่หนึ่งจะทำการจำลองโดยใช้ท่อไรเซอร์ที่ติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 โดยมีพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะร้อยละ 75 ของพื้นที่ตัดขวางของท่อไรเซอร์ ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ 0.2 เมตร ความสม่ำเสมอของระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ 1.25 ความหนาของแผ่นปะทะ 0.01 เมตร และจำนวนแผ่นปะทะ 14 แผ่นซึ่งการติดตั้งตามกรณีดังกล่าวเป็นการติดตั้งแผ่นปะทะที่ให้ปริมาณของแข็งในระบบมากที่สุด และใช้ภาวะดำเนินการในกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 ซึ่งเป็นภาวะดำเนินการที่ให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์สูงสุดหรือ โดยมีค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 2.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 76 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และส่วนที่สองเป็นการจำลองโดยใช้ท่อไรเซอร์ที่ติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ซึ่งใช้แผ่นปะทะที่มีพื้นที่เปิดคือ ร้อยละ 50 ของพื้นที่ตัดขวางของท่อไรเซอร์ ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ 0.2 เมตร ความสม่ำเสมอของระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ 1.25 ความหนาของแผ่นปะทะเป็น 0.04 เมตร และจำนวนแผ่นปะทะ 14 แผ่น การติดตั้งแผ่นปะทะแบบนี้เป็นการติดตั้งแผ่นปะทะที่ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุดและใช้ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14 ที่เป็นภาวะดำเนินการที่ทำให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุดโดยมีค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที อนุภาคของแข็งขนาด 90 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่น 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากตารางที่ 4.11 ซึ่งเป็นตารางสรุปผลที่ได้จากการจำลองรูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวนทั้งสามรูปทรงที่ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 และใช้ท่อไรเซอร์ที่ติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 จะได้ว่าแผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงสามเหลี่ยมจะให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ค่าสูงที่สุด ส่วนแผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงครึ่งวงกลมจะให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ต่ำที่สุด จากนั้นพิจารณารูปที่ 4.45 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการกระจายตัวของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ที่ใส่แผ่นปะทะ

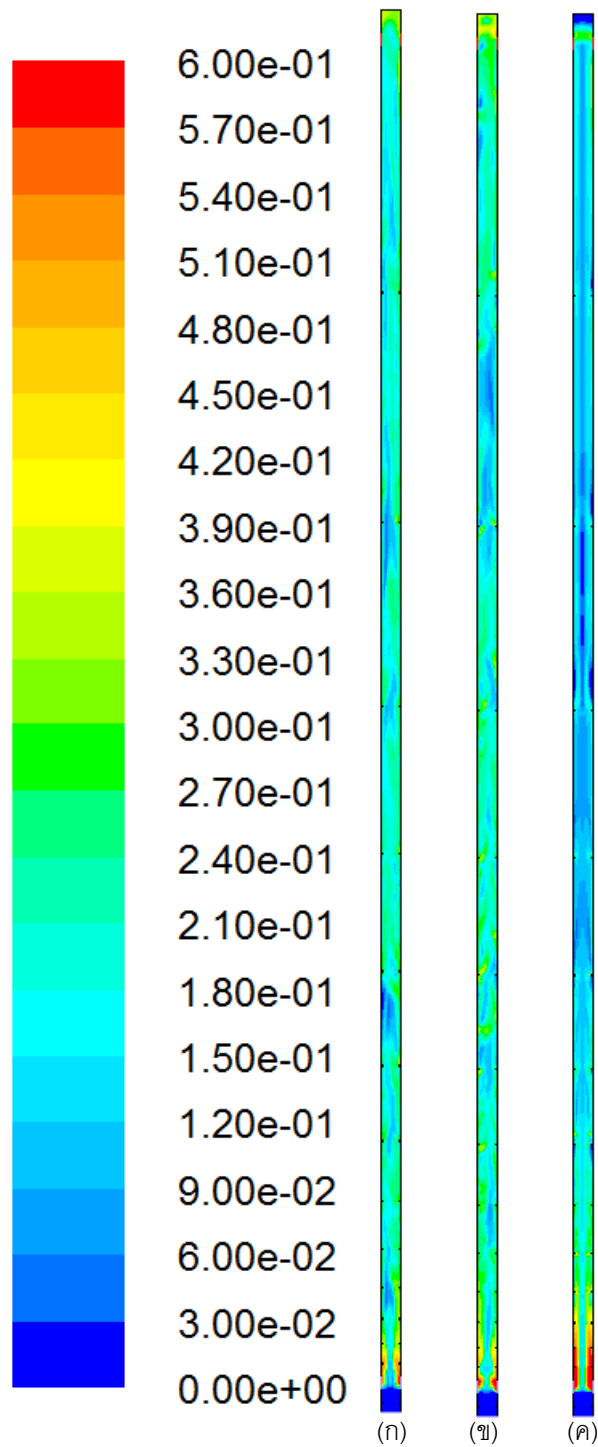
แบบวงแหวนทั้งสามรูปทรงตามการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 และใช้ภาวะดำเนินการที่ทำให้มีสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์มีค่าสูงที่สุดหรือภาวะของกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการแบบที่ 3 ผลที่ได้ค่อนข้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากการแผ่นปะทะในกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแบบที่ 11 นั้นมีขนาดเล็กคือ หนา 0.01 เมตรและมีพื้นที่เปิดร้อยละ 75 แต่อย่างไรก็ตามยังสามารถเห็นแนวโน้มโดยจะพบว่าการใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงครึ่งวงกลมจะมีปริมาณของแข็งที่ความสูงต่ำกว่าสองเมตรของท่อไรเซอร์มากกว่ารูปทรงอื่นๆ และลดลงที่ความสูงมากขึ้น แต่พบว่าการใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงสามเหลี่ยมทำให้มีปริมาณของแข็งสูงตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงสามเหลี่ยมจะพบการจับกลุ่มกันของของแข็งที่บริเวณเหนือแผ่นปะทะมากกว่ารูปทรงอื่นๆ โดยจะสามารถยืนยันสิ่งที่เกิดขึ้นได้จากรูปที่ 4.46 ซึ่งเป็นคอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็งที่เปรียบเทียบกันระหว่างสามรูปทรง และรูปที่ 4.47 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของแข็งเฉลี่ย โดยจะพบว่าการใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงสามเหลี่ยมจะมีปริมาณของแข็งที่บริเวณผนังและบริเวณกึ่งกลางท่อสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงอื่นๆ

ตารางที่ 4.11 การศึกษาผลของรูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวนและค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลองภายใต้ภาวะดำเนินการที่ให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์สูงที่สุดหรือกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 โดยใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะที่ 11 ซึ่งให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์สูงที่สุด

รูปทรง	Average of solid volume fraction (-)
สามเหลี่ยม	0.21325
ครึ่งวงกลม	0.18075
สี่เหลี่ยม	0.20778

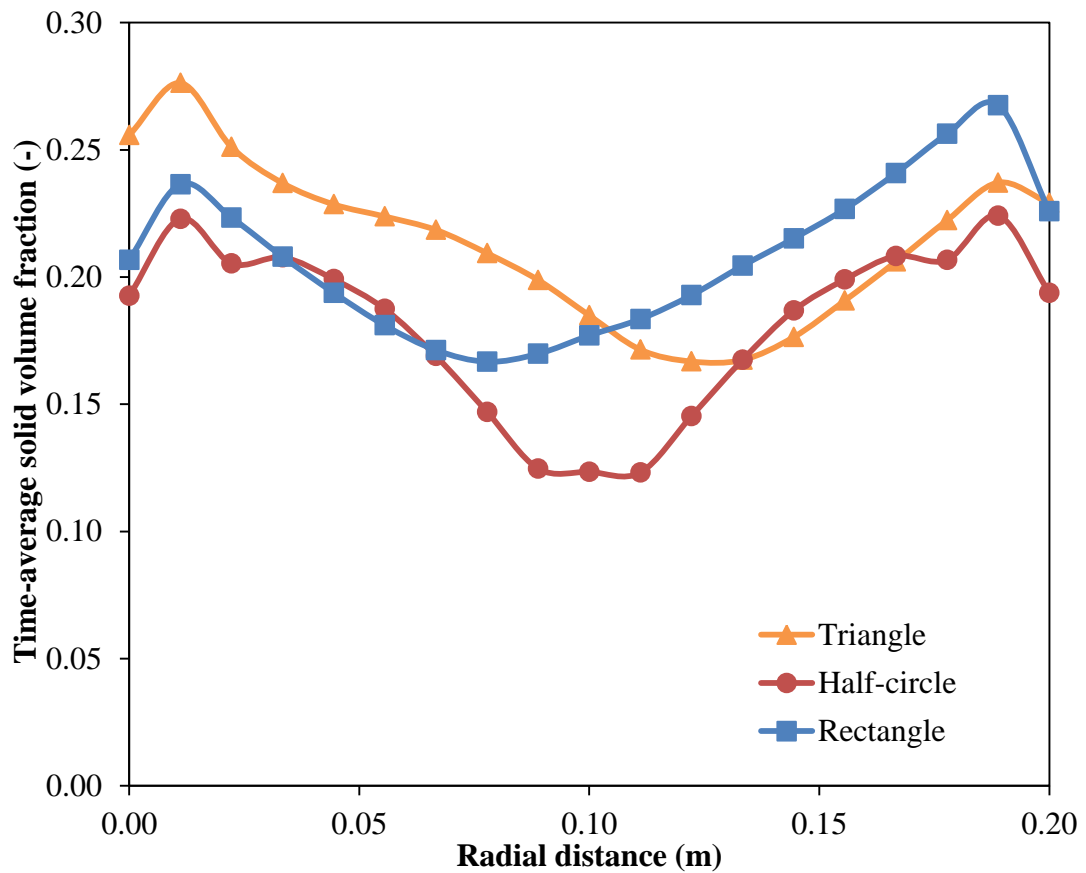


รูปที่ 4.45 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวความสูงของท่อไรเซอร์เมื่อ
 ใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 11 และภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษา
 ตัวแปรดำเนินการที่ 3



รูปที่ 4.46 คอนทัวร์ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 11 และภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 โดยใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรง

(ก) สี่เหลี่ยม (ข) สามเหลี่ยม และ (ค) ครึ่งวงกลม



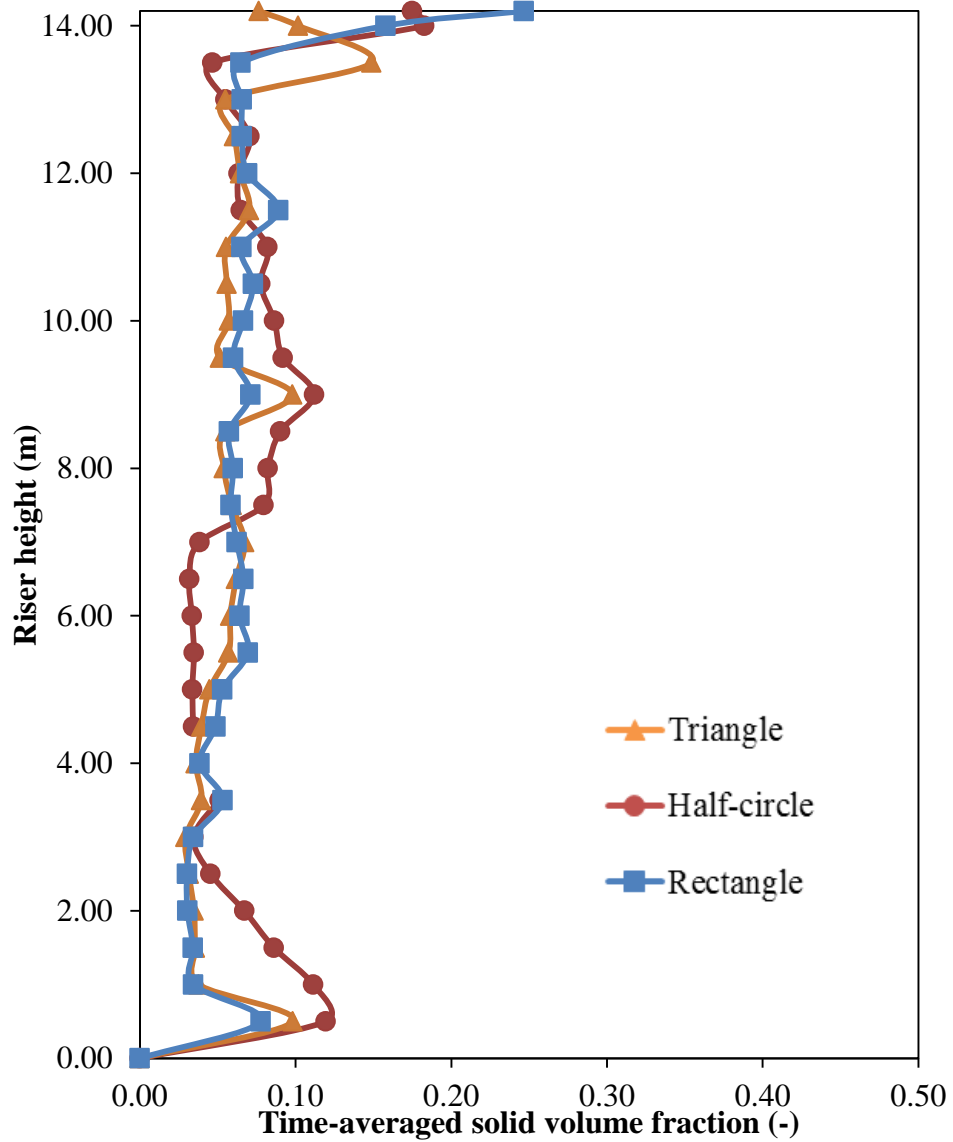
รูปที่ 4.47 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 11 และภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3

ตารางที่ 4.12 การศึกษาผลของรูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวนและค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากการทำการจำลองภายใต้ภาวะดำเนินการที่ให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุดหรือกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14 โดยใช้ท่อไรเซออร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะที่ 16 ซึ่งให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด

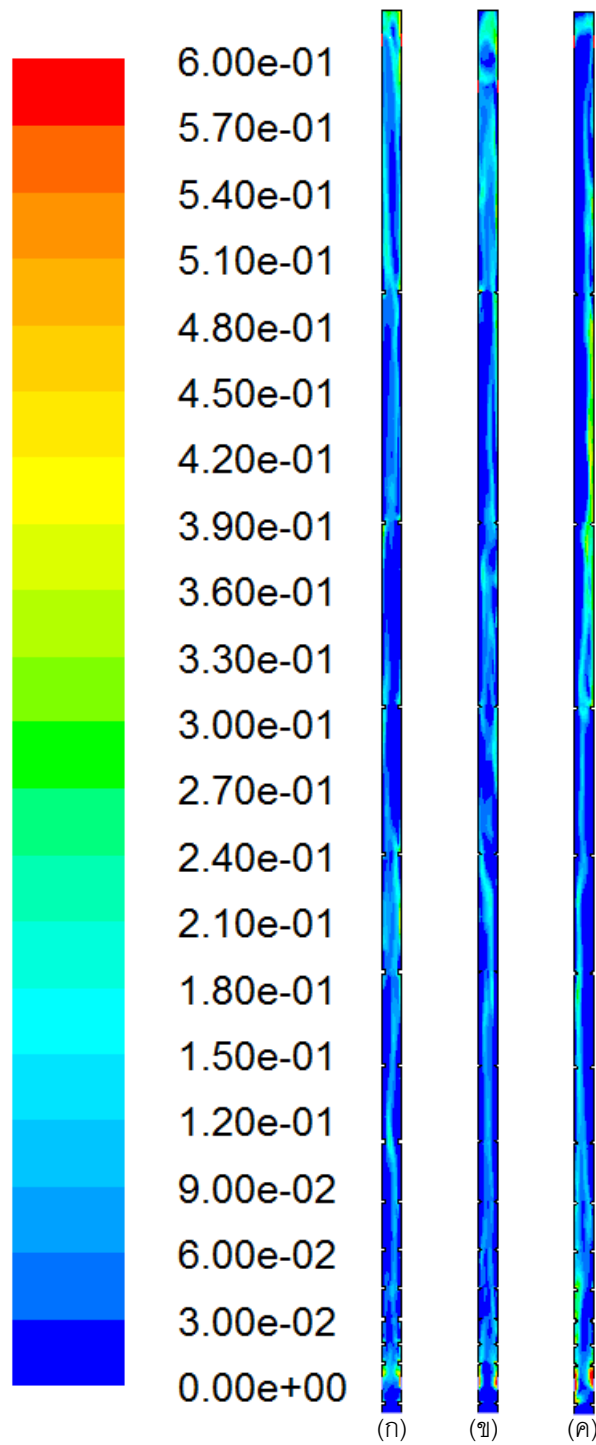
รูปทรง	SD of radial solid volume fraction (-)
สามเหลี่ยม	0.00946
ครึ่งวงกลม	0.02206
สี่เหลี่ยม	0.00826

ผลการจำลองในส่วนที่สองนั้นถูกสรุปลงในตารางที่ 4.12 ซึ่งเป็นตารางสรุปผลที่ได้จากการจำลองรูปทรงของแผ่นปะทะแบบวงแหวนทั้งสามรูปทรงที่ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14 และใช้ท่อไรเซออร์ที่ติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 จะได้ว่าการใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงสี่เหลี่ยมนั้นจะให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด ส่วนการใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงครึ่งวงกลมจะให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งสูงที่สุด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.48 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการกระจายตัวตามแนวความสูงของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งจะพบว่า การกวัดแกว่งของเส้นกราฟของแผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงสี่เหลี่ยมจะมีน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้แผ่นปะทะแบบสี่เหลี่ยมสามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวของของแข็งในแนวรัศมี ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 4.49 ซึ่งเป็นรูปคอนทัวร์ของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งโดยจะเห็นได้ว่าแผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงสี่เหลี่ยมจะมีการกระจายตัวของของแข็งสม่ำเสมอว่ารูปทรงอื่นๆ และแผ่นปะทะรูปทรงครึ่งวงกลมนั้นจะมีการกวัดแกว่งของสัดส่วนเชิงปริมาตรทั้งตามแนวแกนและแนวรัศมีสูงที่บริเวณด้านบนของท่อไรเซออร์ จึงเป็นสาเหตุให้มีค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งมากกว่า หรือมีความกวัดแกว่งของกราฟมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.50 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็ง จะพบว่า เส้นกราฟของกรณีที่ใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงครึ่งวงกลมจะมีความกวัดแกว่งมากที่สุด และพบปริมาณ

ของแข็งที่ผนังมากที่สุด ต่างจากการใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงสี่เหลี่ยมที่เส้นกราฟค่อนข้างเรียบสม่ำเสมอ ซึ่งสาเหตุน่าจะมาจากการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ใช้แผ่นปะทะที่มีขนาดใหญ่คือ หนา 0.04 เมตรและมีพื้นที่เปิดร้อยละ 50 ซึ่งการใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมจะช่วยยับยั้งการตกกลับของของแข็งที่บริเวณผนังได้ดีที่สุด อีกทั้งทำให้เกิดความปั่นป่วนในระบบมากขึ้น ซึ่งทำให้ของแข็งนั้นเกิดการผสมและการกระจายตัวในแนวนอนมีมากขึ้นทำให้มีค่าความแปรปรวนในแนวนอนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด

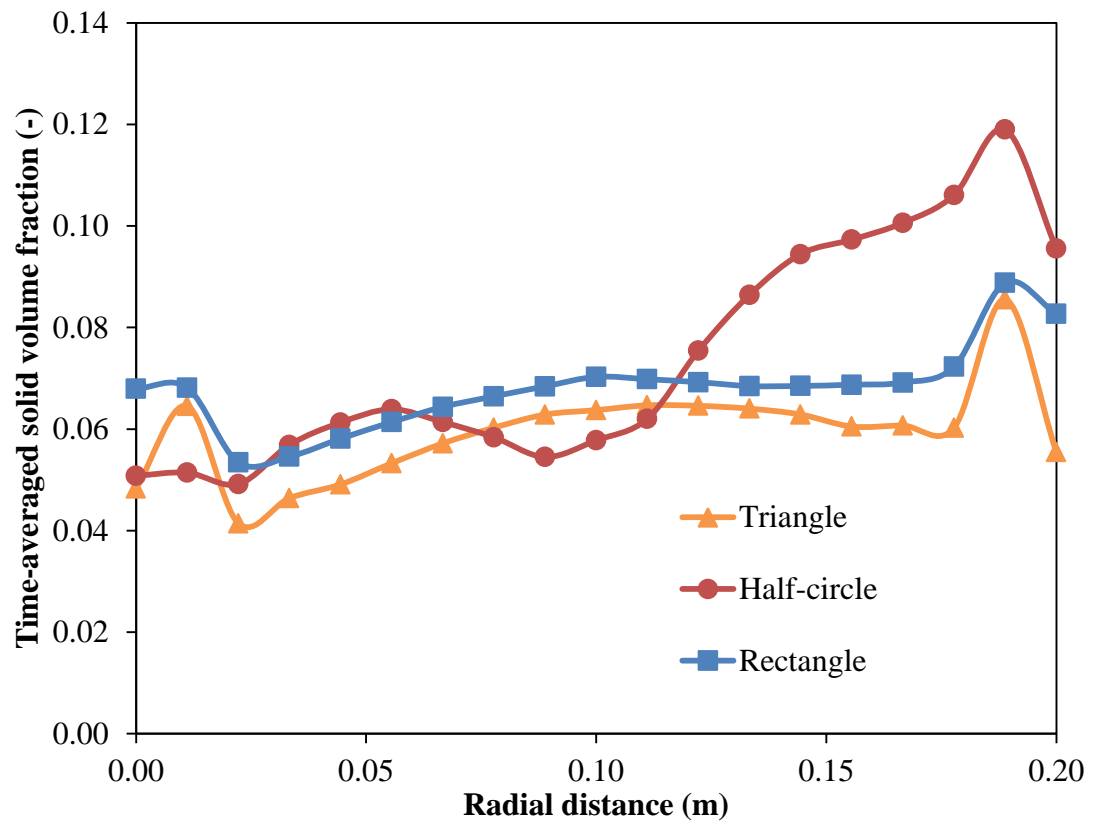


รูปที่ 4.48 การกระจายตัวของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวความสูงของท่อไรเซอร์เมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 16 และภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14



รูปที่ 4.49 คอนทิวรัลค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 16 และภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14 โดยใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรง

(ก) สี่เหลี่ยม (ข) สามเหลี่ยม และ (ค) ครึ่งวงกลม



รูปที่ 4.50 การกระจายตัวตามแนวรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเมื่อใช้การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งที่ 16 และภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การสรุปผลการวิจัยจะแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อ คือ 1. การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย 2. การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซอร์ 3. การศึกษาผลของตัวแปรภาวะดำเนินการ และ 4. การศึกษาผลของรูปร่างแผ่นปะทะแบบวงแหวน

5.1.1 การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัย

การหาแบบจำลองการไหลที่ใช้ในงานวิจัยจะแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ การหาแบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุ (Drag model) เนื่องจากแบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุได้ถูกค้นพบมากขึ้นในปัจจุบัน ทำให้มีแบบจำลองมากมายที่อาจให้ผลลัพธ์จากการจำลองมีความถูกต้องมากขึ้น และการหาพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสม (Grid independency test) ที่สามารถทำนายค่าได้ถูกต้องและใช้เวลาในการคำนวณต่ำ โดยจะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) ในการเปรียบเทียบผลของข้อมูลการจำลองการไหลในนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยในช่วงเวลา 20-40 วินาทีซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว (Steady state)

จากผลการจำลองพบว่าการใช้แบบจำลองการต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบ EMMS นั้นสามารถให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) มากที่สุด และพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมที่สามารถทำนายค่าได้ถูกต้องอีกทั้งยังใช้เวลาในการคำนวณต่ำคือ พื้นที่การคำนวณที่มีเซลล์การคำนวณ 5,500 เซลล์

5.1.2 การศึกษาผลของตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซอร์

จากผลการจำลองท่อไรเซอร์ทั้งแบบมีและไม่มี การติดตั้งแผ่นปะทะของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนตาม พบว่าจากกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะทั้งหมด 32 กรณี กรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ซึ่งใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนซึ่งมีพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะร้อยละ 50 หน้า 0.04 เมตร จำนวน 14 แผ่น โดยเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะเริ่มต้นที่ 0.2 เมตรและเว้นระยะห่างเพิ่มขึ้นครึ่งละร้อยละ 25 นั้นจะให้ค่าความแปรปรวนของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด และกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 ซึ่งใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนซึ่งมีพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะร้อยละ 75 หน้า 0.01 เมตร จำนวน 14 แผ่น โดยเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะเริ่มต้นที่ 0.2 เมตรและเว้นระยะห่างเพิ่มขึ้นครึ่งละร้อยละ 25 จะให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์สูงที่สุด และค่าพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะค่าพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะ และอันตรกิริยาระหว่างพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะกับระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะมีผลต่อค่าความแปรปรวนของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในแนวรัศมีในส่วนค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยรวมทั้งท่อไรเซอร์ พบว่าระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ อันตรกิริยาระหว่างพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะกับระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ และ อันตรกิริยาระหว่างพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะกับจำนวนของแผ่นปะทะเป็นตัวแปรที่มีผลต่อค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยรวมทั้งท่อไรเซอร์ อีกทั้งได้แบบจำลองการถดถอยเพื่อความสะดวกในการนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้ออกแบบการติดตั้งแผ่นปะทะในอนาคต และจากกราฟพื้นผิวดูตอบสนอง พบว่าถ้าใช้พื้นที่เปิดของแผ่นปะทะร้อยละ 50 ของพื้นที่ตัดขวางท่อไรเซอร์ และใช้ระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะเป็น 0.20 เมตร จะให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด แต่ถ้าต้องการสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์สูงที่สุดจะต้องใช้แผ่นปะทะที่มีพื้นที่เปิดร้อยละ 50 จำนวน 5 แผ่นและระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะ 0.08 เมตร

5.1.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์และการผสมภายในท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวน

ผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์ที่ติดตั้งแผ่นปะทะแบบวงแหวนในกรณีศึกษาที่ 11 ซึ่งให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งสูงสุด และกรณีศึกษาที่ 16 ซึ่งให้ค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำสุดนั้นเป็นตัวแปรเดียวกันคือค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้า และฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง ส่วนผลของตัวแปรดำเนินการที่มีต่อค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งในการติดตั้งแผ่นปะทะทั้งสองกรณีพบว่า ตัวแปรที่ส่งผลสองลำดับแรกเป็นตัวแปรเดียวกันคือ ค่าความเร็วแก๊สที่ทางเข้า และอัตราการไหลของความเร็วของแก๊สที่ทางเข้า-ขนาดของอนุภาคของแข็ง-ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง พร้อมทั้งได้แบบจำลองการถดถอยเพื่อความสะดวกในการนำผลการวิจัยที่ได้ไปใช้ออกแบบภาวะดำเนินการในอนาคตและจากกราฟพื้นผิวตอบสนอง พบว่าค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์สูงที่สุด เมื่อใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 โดยใช้ภาวะดำเนินการที่ความเร็วแก๊สขาเข้าเป็น 2.2 เมตรต่อวินาที และฟลักซ์โดยมวลของของแข็งเท่ากับ 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ส่วนค่าความแปรปรวนในแนวรัศมีของสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด จะต้องใช้ท่อไรเซอร์ที่ผ่านการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ที่ภาวะดำเนินการซึ่งมีความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็งเป็น 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ขนาดของอนุภาคของแข็ง 50 ไมโครเมตรและมีความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งเป็น 1,424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 ซึ่งใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนซึ่งมีพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะร้อยละ 75 หนา 0.01 เมตร จำนวน 14 แผ่น โดยเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะเริ่มต้นที่ 0.2 เมตรและเว้นระยะห่างเพิ่มขึ้นครั้งละร้อยละ 25 และใช้ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 ซึ่งใช้ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 2.2 เมตรต่อวินาที ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง 578 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ขนาดของอนุภาค 50 ไมโครเมตรและความหนาแน่นของอนุภาค 1424 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์สูงที่สุด ส่วนการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 ซึ่งใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนซึ่งมีพื้นที่เปิดของแผ่นปะทะร้อยละ 50 หนา 0.04 เมตร จำนวน 14 แผ่น โดยเว้นระยะห่างระหว่างแผ่นปะทะเริ่มต้นที่ 0.2 เมตรและเว้นระยะห่างเพิ่มขึ้นครั้งละร้อยละ 25 ส่วนการใช้ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14 ซึ่งใช้

ความเร็วแก๊สที่ทางเข้า 8.2 เมตรต่อวินาที พัดซีโดยมวลของของแข็ง 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตร วินาที ขนาดของอนุภาค 90 ไมโครเมตรและความหนาแน่นของอนุภาค 2,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้ค่าความแปรปรวนในแวนรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด

5.1.4 การศึกษาผลของรูปร่างแผ่นปะทะแบบวงแหวนที่มีผลต่ออุทกพลศาสตร์ และการผสมภายในท่อไรเซอร์

จากผลการจำลองพบว่า การติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 11 และใช้ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 3 การใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงสามเหลี่ยมจะให้ค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรเฉลี่ยทั้งท่อไรเซอร์สูงที่สุด ส่วนการติดตั้งแผ่นปะทะตามกรณีศึกษาตัวแปรการติดตั้งแผ่นปะทะแบบที่ 16 และใช้ภาวะดำเนินการตามกรณีศึกษาตัวแปรดำเนินการที่ 14 การใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนรูปทรงสี่เหลี่ยมจะให้ค่าความแปรปรวนในแวนรัศมีของค่าสัดส่วนเชิงปริมาตรของของแข็งต่ำที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

การจำลองในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองแบบสองมิติซึ่งสามารถจำลองท่อไรเซอร์แบบมีและไม่มีติดตั้งแผ่นปะทะได้ในภาวะที่ไม่มีปฏิกิริยาเคมีและการถ่ายโอนความร้อน จึงทำให้แบบจำลองที่ได้ไม่สามารถอธิบายผลของการติดตั้งแผ่นปะทะที่มีต่อปฏิกิริยาเคมีและการถ่ายโอนความร้อนได้ อีกทั้งจากงานวิจัยชิ้นนี้พบว่าการใช้แผ่นปะทะแบบวงแหวนเป็นวิธีการที่สามารถนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพของท่อไรเซอร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนได้ แต่อย่างไรก็ตามสิ่งกีดขวางภายในนอกจากแผ่นปะทะแบบวงแหวนนั้นมีอยู่หลายชนิด ดังนั้นแนวทางการพัฒนาและปรับปรุงแบบจำลองนี้คือ การเพิ่มการคำนวณในส่วนของปฏิกิริยาเคมีและถ่ายโอนความร้อนลงในแบบจำลอง และการใช้สิ่งกีดขวางภายในแบบอื่นๆ รวมทั้งการใช้อนุภาคที่จัดอยู่ในกลุ่ม Geldart อื่นด้วยเนื่องจากในงานวิจัยชิ้นนี้ทำการศึกษาโดยใช้กลุ่มอนุภาค Geldart A เท่านั้น และอาจทำการจำลองในแบบสามมิติเพื่อการจำลองที่ใกล้เคียงความจริงมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- Benyahia, S., Arastoopour, H. and Knowlton, T. M. Two-dimensional transient numerical simulation of solids and gas flow in the riser section of a circulating fluidized bed. Chemical Engineering Communications 189 (2002): 510-527.
- Benyahia, S., Arastoopour, H., Knowlton, T. M. and Massah, H. Simulation of particles and gas flow behavior in the riser section of a circulating fluidized bed using the kinetic theory approach for the particulate phase. Powder Technology 112 (2000): 24-33.
- Chalermisinsuwan, B., Kuchonthara, P. and Piumsomboon, P. CFD modeling of tapered circulating fluidized bed reactor risers: Hydrodynamic descriptions and chemical reaction responses. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 49 (2010): 1144-1160.
- Chalermisinsuwan, B., Piumsomboon, P. and Gidaspow, D. Kinetic theory based computation of PSRI riser: Part I—Estimate of mass transfer coefficient. Chemical Engineering Science 64 (2009): 1195-1211.
- Faaij, A., van Ree, R., Waldheim, L., Olsson, E., Oudhuis, A., van Wijk, A., Daey-Ouwens, C. and Turkenburg, W. Gasification of biomass wastes and residues for electricity production. Biomass and Bioenergy 12 (1997): 387-407.
- Fluent Inc. Fluent 6.2 User's Guide. Lebanon: Fluent Inc., 2005a.
- Gao, J., Chang, J., Xu, C., Lan, X. and Yang, Y. CFD simulation of gas solid flow in FCC strippers. Chemical Engineering Science 63 (2008): 1827-1841.
- Gidaspow, D. Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Description. Boston: Academic Press, 1994.
- Grace, J. R. Contacting modes and behaviour classification of gas-solid and other two-phase suspensions. The Canadian Journal of Chemical Engineering 64 (1986): 353-363.
- Grace, J. R. Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions. The Canadian Journal of Chemical Engineering 73 (1995): 784-784.

- Jiang, P., Bi, H., Jean, R.-H. and Fan, L.-S. Baffle effects on performance of catalytic circulating fluidized bed reactor. AIChE Journal 37 (1991): 1392-1400.
- Knowlton, T., Geldart, D., Masten, J., and King, D. Comparison of CFB hydrodynamic models, PSRI Challenge Problem. The Eighth International Fluidization Conference, France, May 14-19, 1995.
- Law, C. L., Tasirin, S. M., Daud, W. R. W. and Geldart, D. Effect of vertical baffles on particle mixing and drying in fluidized beds of group D particles. China Particuology 1 (2003): 115-118.
- McIlveen-Wright, D. R., Pinto, F., Armesto, L., Caballero, M. A., Aznar, M. P., Cabanillas, A., Huang, Y., Franco, C., Gulyurtlu, I. and McMullan, J. T. A comparison of circulating fluidised bed combustion and gasification power plant technologies for processing mixtures of coal, biomass and plastic waste. Fuel Processing Technology 87 (2006): 793-801.
- Olowson, P. A. Influence of pressure and fluidization velocity on the hydrodynamics of a fluidized bed containing horizontal tubes. Chemical Engineering Science 49 (1994): 2437-2446.
- Olsson, S. E., Wiman, J. and Almstedt, A. E. Hydrodynamics of a pressurized fluidized bed with horizontal tubes: influence of pressure, fluidization velocity and tube-bank geometry. Chemical Engineering Science 50 (1995): 581-592.
- Shah, M. T., Utikar, R. P., Tade, M. O. and Pareek, V. K. Hydrodynamics of an FCC riser using energy minimization multiscale drag model. Chemical Engineering Journal 168 (2011): 812-821.
- Siedlecki, M. and De Jong, W. Biomass gasification as the first hot step in clean syngas production process – gas quality optimization and primary tar reduction measures in a 100 kW thermal input steam–oxygen blown CFB gasifier. Biomass and Bioenergy 35 (2011): 40-62.
- Squires, A. M. Origins of the Fast Fluid Bed. Advances in Chemical Engineering 20 (1994): 1-37.

- Sripattanapipat, S. and Promvonge, P. Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles. International Communications in Heat and Mass Transfer 36 (2009): 32-38.
- Therdthianwong, A., Pantaraks, P. and Therdthianwong, S. Modeling and simulation of circulating fluidized bed reactor with catalytic ozone decomposition reaction. Powder Technology 133 (2003): 1-14.
- Volk W, Johnson CA, Stotler HH. Effect of reactor internals on quality of fluidization. Chemical Engineering Progress 58 (1962):44-47.
- Wang, C., Lu, Z. a. and Li, D. Experimental study of the effect of internals on optimizing gas–solid flow in a circulating fluidized bed. Powder Technology 184 (2008): 267-274.
- Yang, N., Wang, W., Ge, W., Wang, L. and Li, J. Simulation of Heterogeneous Structure in a Circulating Fluidized-Bed Riser by Combining the Two-Fluid Model with the EMMS Approach. Industrial & Engineering Chemistry Research 43 (2004): 5548-5561.
- Yin, X. L., Wu, C. Z., Zheng, P. S. and Chen, Y. Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk. Biomass and Bioenergy 23 (2002): 181-187.
- Yong, J., Fei, W., and Yao, W. Effect of Internal Tubes and Baffles. Handbook of fluidization and fluid-particle systems (2003): 189-217.
- Zhang, Y., Grace, J. R., Bi, X., Lu, C. and Shi, M. Effect of louver baffles on hydrodynamics and gas mixing in a fluidized bed of FCC particles. Chemical Engineering Science 64 (2009): 3270-3281.
- Zhang, Y., Lu, C., Grace, J. R., Bi, X. and Shi, M. Gas Back-Mixing in a Two-Dimensional Baffled Turbulent Fluidized Bed. Industrial & Engineering Chemistry Research 47 (2008): 8484-8491.
- Zheng, C., Tung, Y., Zhang, W. and Zhang, J. Impact of internals on radial distribution of solids in a circulating fluidized bed (in Chinese). Chemical Metallurgical Engineering 11 (1990): 296-302.

Zhao, J., Zhong, X., Xu, H. A model of solid backmixing between stages in a gas-fluidized bed with perforated baffles. Powder Technology 73 (1992):37-41.

Zhu, J.-X., Salah, M. and Zhou, Y. Radial and Axial Voidage Distributions in Circulating Fluidized Bed with Ring-Type Internals. Journal of Chemical Engineering of Japan 30 (1997): 928-937.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณความเร็วน้อยสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (Transport velocity: u_{tr})

$$u_{tr} = \frac{2.28\mu_g Ar^{0.419}}{\rho_g d_p} \quad (ก1)$$

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g d_p^3}{\mu_g^2} \quad (ก2)$$

- Ar คือ เลขอาร์คิมิดีส (-)
 ρ_s คือ ความหนาแน่นของของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 ρ_g คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (เมตร)
 g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)
 μ_g คือ ค่าความหนืดของแก๊ส (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

ตัวอย่างการคำนวณหาค่า u_{tr}

$$Ar = \frac{(1.2)(1,712 - 1.2)(9.81)(76 \times 10^{-6})^3}{(2 \times 10^{-5})^2} = 22.079 \quad (ก3)$$

$$u_{tr} = \frac{2.28(2 \times 10^{-5})(22.079)^{0.419}}{1.2(76 \times 10^{-6})} = 1.828 \text{ m/s} \quad (ก4)$$

การคำนวณความเร็วน้อยสุดในช่วงการไหลแบบเบาบาง (Minimum pneumatic velocity: u_{mp})

$$u_{mp} = 10.1(gd_p)^{0.347}(G_s / \rho_g)^{0.310}(d_p / D)^{-0.139} Ar^{-0.021} \quad (ก5)$$

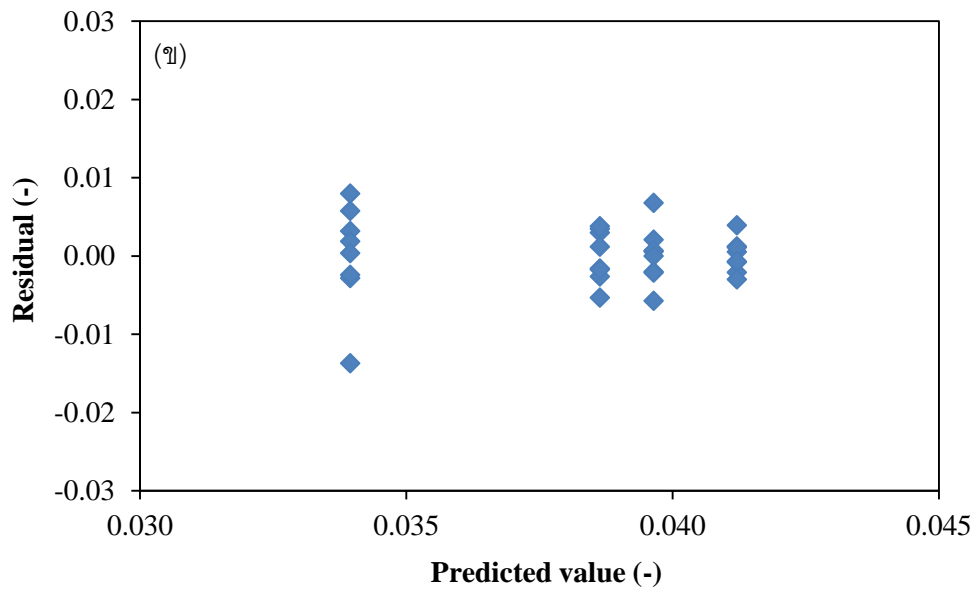
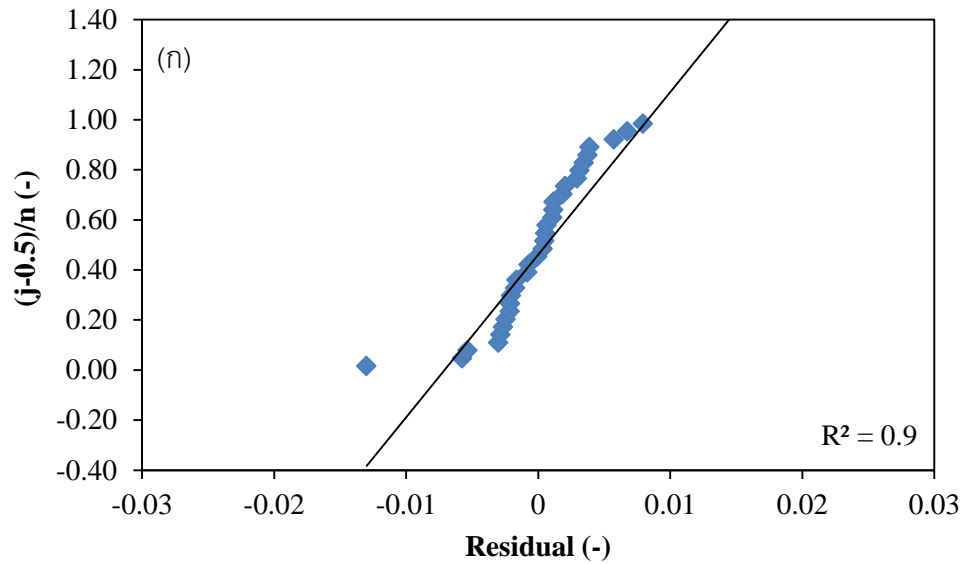
G_s คือ ฟลักซ์โดยมวลของของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อโรเซออร์ (เมตร)

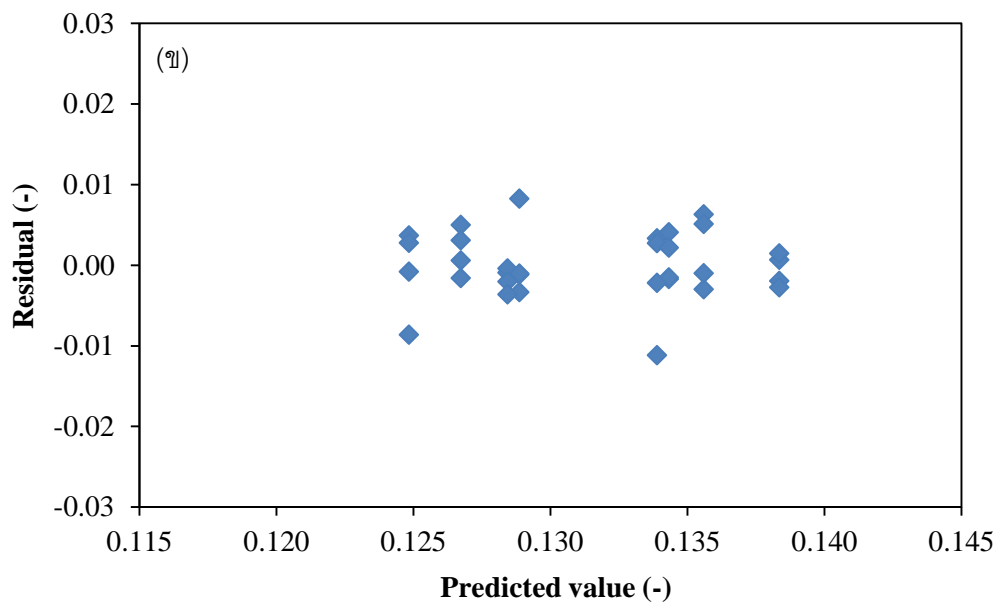
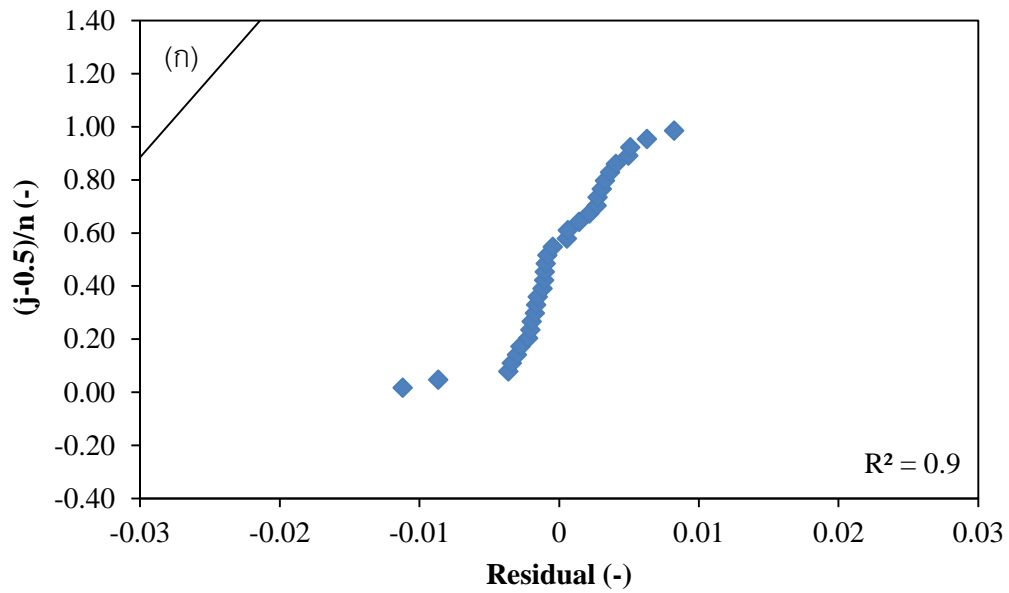
ตัวอย่างการคำนวณหาค่า u_{mp}

$$\begin{aligned} u_{mp} &= 10.1(9.81 \times 76 \times 10^{-6})^{0.347}(489/1.2)^{0.310}(76 \times 10^{-6} / 0.2)^{-0.139}(22.079)^{-0.021} \\ &= 14.976 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (ก6)$$

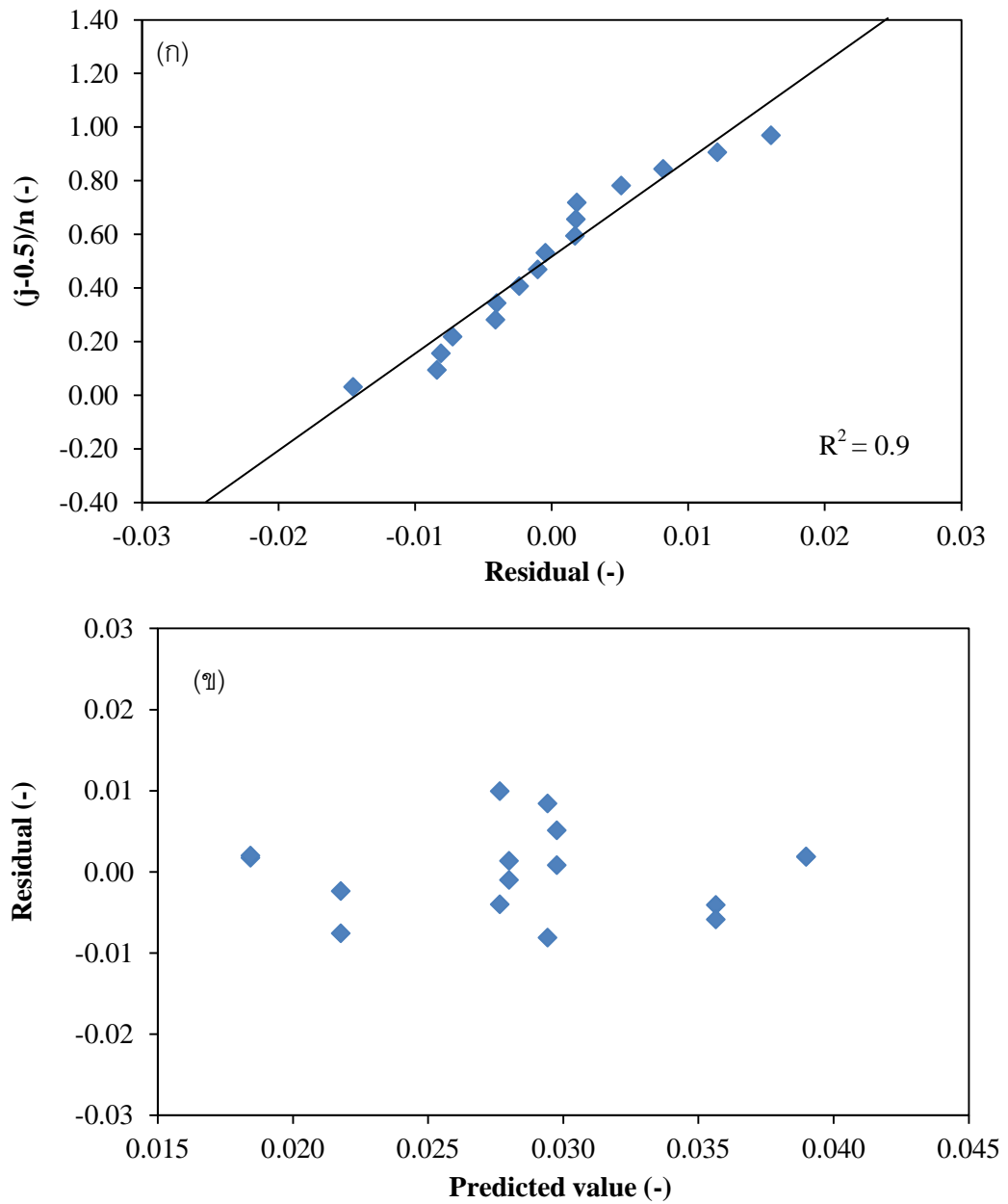
ภาคผนวก ข



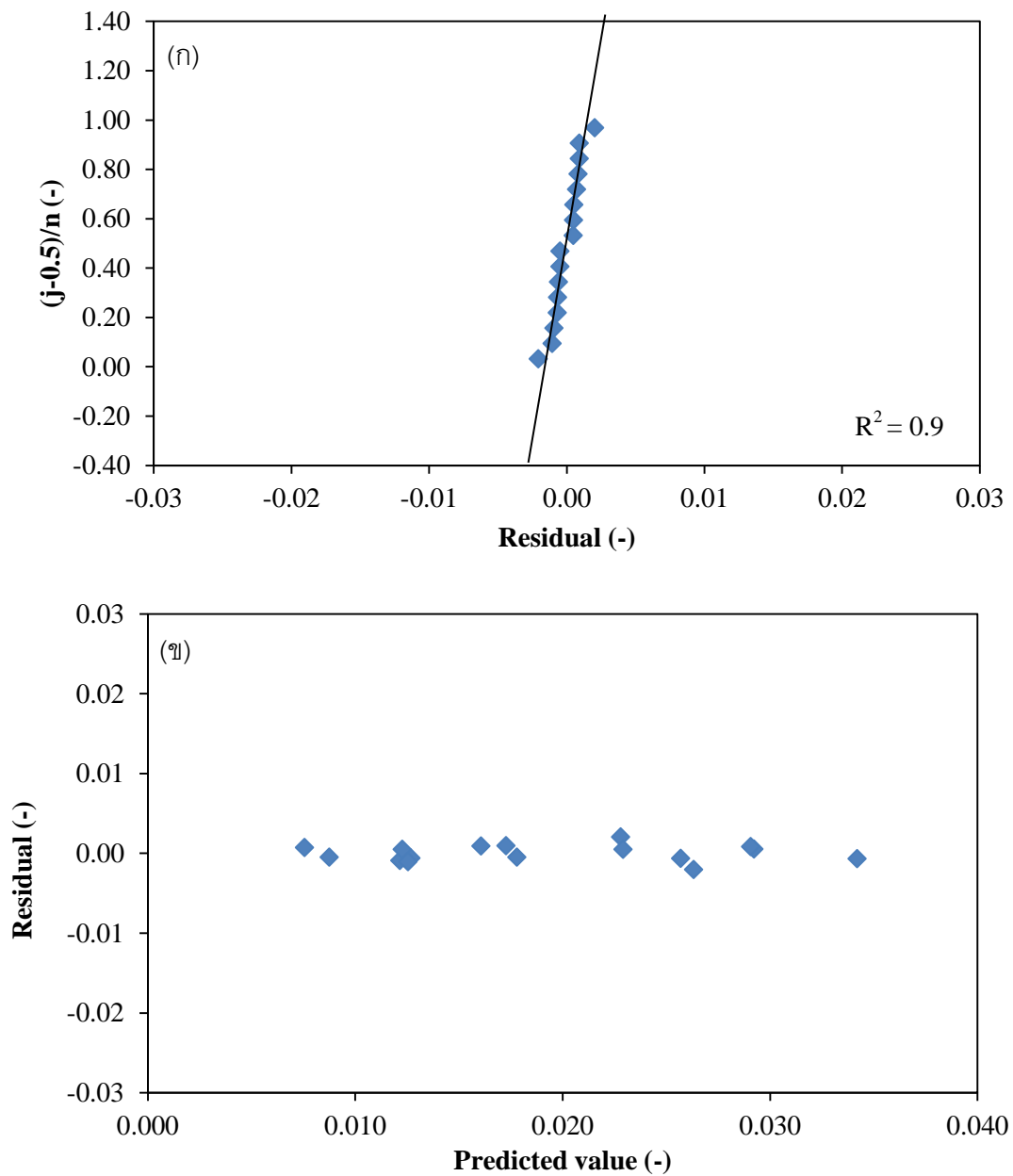
รูปที่ ข1 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง
ส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.1



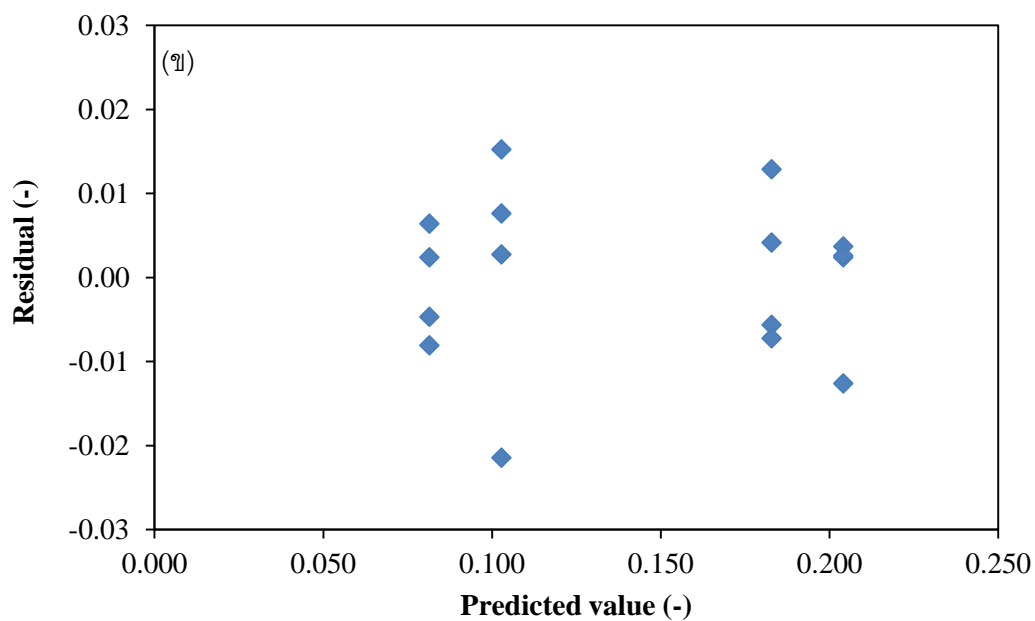
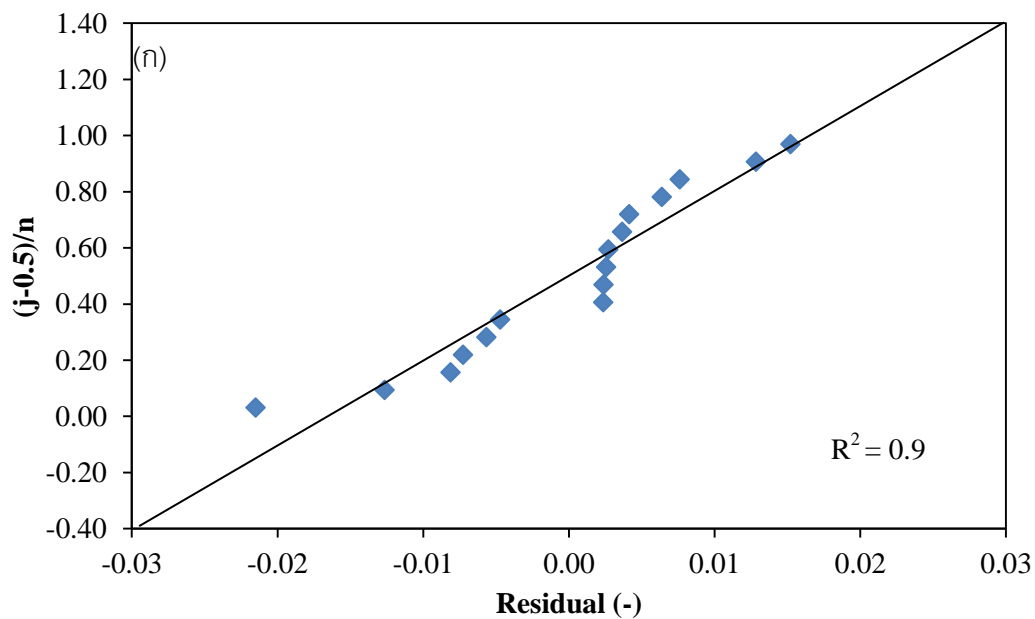
รูปที่ ข2 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.2



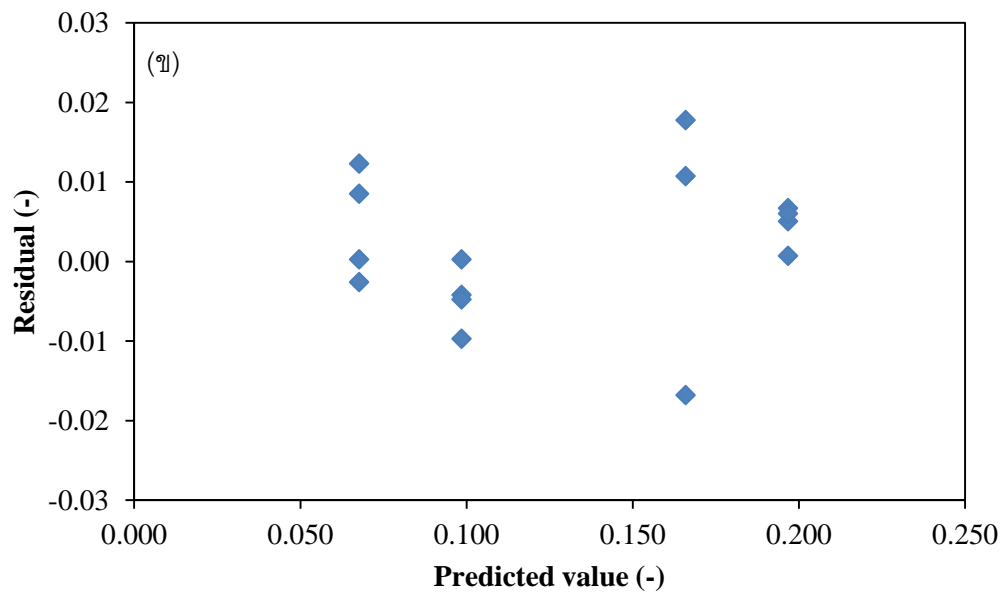
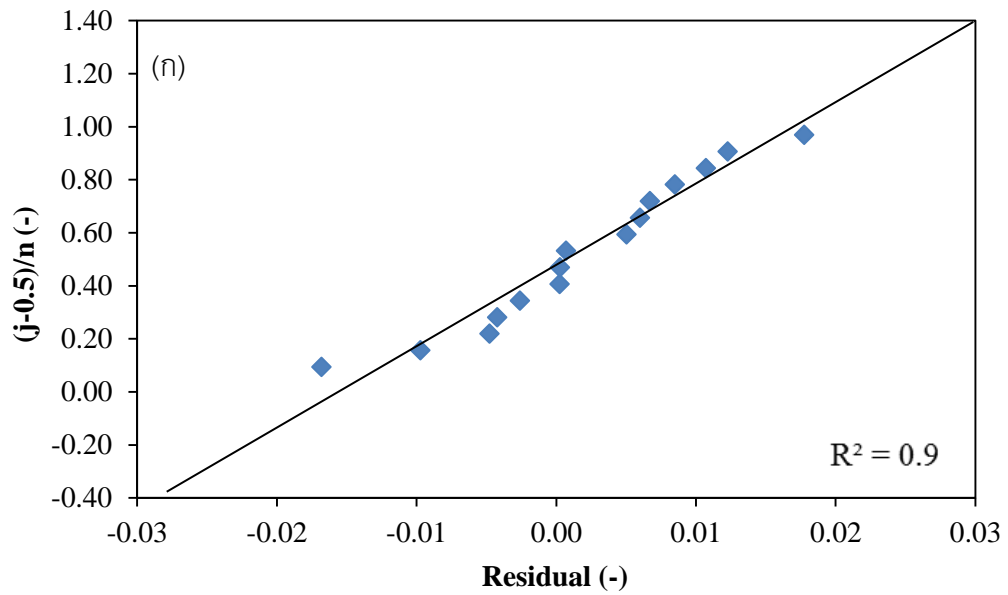
รูปที่ ๓3 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.3



รูปที่ ๓4 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.4



รูปที่ ข5 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง
ส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.5



รูปที่ ข6 (ก) กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้าง และ (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ทำนายได้ของสมการที่ 4.6

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัชชัย สำรวมเพียรสกุล เกิดเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2553