

การจำลองสามมิติของอุทกพลศาสตร์ในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซิสเบดแบบหมุนเวียน

นายยงยุทธ ประจงการ

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.

THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF HYDRODYNAMICS IN RISER OF  
CIRCULATING FLUIDIZED BED REACTOR

Mr. Yongyoot Prajongkan

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



ยงยุทธ ประจงการ : การจำลองสามมิติของอุทกพลศาสตร์ในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน. (THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF HYDRODYNAMICS IN RISER OF CIRCULATING FLUIDIZED BED REACTOR) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ.ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, 290 หน้า.

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนได้นำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ความซับซ้อนทางด้านอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ถือเป็นปัญหาสำคัญที่ได้รับความสนใจ จึงมีการใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเข้ามาช่วยในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกการจำลองในระบบสามมิติเพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบกับผลการจำลองของเครื่องปฏิกรณ์ในระบบสองมิติกับข้อมูลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมา ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้า ขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค อุณหภูมิแก๊สอนุภาคเข้า ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ความเร็วแก๊สขาเข้า และ ปริมาณฟลักซ์ของแข็ง เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่ออุทกพลศาสตร์ภายในระบบอย่างชัดเจน ส่วน ค่า Specularity coefficient ค่า Restitution coefficient แบบจำลองความหนืด และความหนืดเสียดทาน เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบเพียงเล็กน้อย แต่มีความจำเป็นเพื่อปรับค่าให้ผลการจำลองมีความถูกต้อง ส่วน สัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง อุณหภูมิกระบวนการ และความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ เป็นตัวแปรที่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบเท่าใดนัก โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการจำลองในระบบสามมิติและระบบสองมิติได้ข้อสรุปว่า ถ้าระบบเครื่องปฏิกรณ์มีการป้อนเข้าแบบสมมาตร ผลการจำลองในระบบสองมิติดีเพียงพอต่อการอธิบายอุทกพลศาสตร์ภายในระบบ แต่ถ้าระบบเครื่องปฏิกรณ์มีการป้อนเข้าแบบไม่สมมาตร การจำลองในระบบสามมิติจะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า

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



# # 5372307223 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CIRCULATING FLUIDIZED BED / COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS /  
HYDRODYNAMICS / THREE-DIMENSIONAL SIMULATION

YONGYOOT PRAJONGKAN: THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF  
HYDRODYNAMICS IN RISER OF CIRCULATING FLUIDIZED BED REACTOR.

ADVISOR: BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D., CO-ADVISOR:  
ASSOC.PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., 290 pp.

Gas-solid circulating fluidized bed reactors are applied in many industrial operations due to the advantages over other reactors. However, the complexity of hydrodynamics is the major challenge to improve and understand these systems. Computational fluid dynamics has been conducted to explain the complex hydrodynamics for this system. This research was conducted in three-dimensional domain to investigate the effect of parameters on the hydrodynamics and was compared the results with experimental data and previous two-dimensional domain simulation results. The simulation results showed that the effects of different gas inlet condition, gas outlet configuration, drag model, inlet granular temperature, particle density, gas inlet velocity, and solid mass flux inlet had significantly affected on the hydrodynamics in this system. The effects of specular coefficient, restitution coefficient, frictional viscosity and viscous model had some effect. However, these parameters were necessary for adjusting the correctness of simulation results. The packing limit value, particle diameter process temperature and pressure outlet had seemingly no affected on the hydrodynamics. In addition, when comparing between three-dimensional and two-dimensional domain, it can be concluded that if the reactor has symmetrical inlets, simulations with two-dimensional domain is adequate to explain the hydrodynamics. However, if the reactor has asymmetrical inlets, simulations with three-dimensional domain will be a better solution.

Department : ..... Chemical Technology ..... Student's Signature .....

Field of Study : ..... Fuel Technology ..... Advisor's Signature .....

Academic Year : ..... 2011 ..... Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์การจำลองสามมิติของอุทกพลศาสตร์ในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนฉบับนี้ ได้รับทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชา เคมีเทคนิค ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในงานวิจัยนี้ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เก็จวดี พุกษาทร ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คุชฌารา และ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ อย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาว เคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือที่อบอุ่นด้วยดีเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย .....	3
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.1.1 ฟลูอิดไดเซชัน.....	6
2.1.2 ประเภทของฟลูอิดไดเซชัน.....	7
2.1.3 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดไดเซชัน.....	7
2.1.4 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart.....	12
2.1.5 ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	12
2.1.6 อุทกพลศาสตร์ภายในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน .....	13
2.1.7 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	14
2.1.8 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ .....	15
2.1.9 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม.....	16
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	19

บทที่	หน้า
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.1 การสร้างแบบจำลองและรายละเอียดแบบจำลอง.....	27
3.1.1 การสร้างแบบจำลองการไหลโดยโปรแกรม Gambit.....	27
3.1.2 การจำลองภาวะด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT.....	28
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	29
3.2.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการคำนวณ.....	30
3.2.2 สมการประกอบที่ใช้ในการคำนวณ.....	32
3.2.3 แบบจำลองสัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาค.....	34
3.3 ภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบ.....	37
3.4 ขั้นตอนการทดลอง.....	38
3.4.1 ตัวแปรออกแบบ.....	38
3.4.2 ตัวแปรแบบจำลอง.....	39
3.4.3 ตัวแปรดำเนินการ.....	40
4 ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล.....	48
4.1 ผลของขนาดเซลล์คำนวณ.....	48
4.2 ผลของเวลาคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียร.....	49
4.3 ผลของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้า.....	59
4.4 ผลของขนาดทางออกของท่อไอเซอร์.....	76
4.5 ผลของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาค.....	86
4.6 ผลของ Specularity coefficient.....	102
4.7 ผลของ Restitution coefficient.....	116
4.8 ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้า.....	129
4.9 ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบ.....	143
4.10 ผลของความหนืดเสียดทาน.....	157
4.11 ผลของแบบจำลองความหนืด.....	170
4.12 ผลของความหนาแน่นของอนุภาค.....	182
4.13 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาคของแข็ง.....	196
4.14 ผลของความเร็วแก๊สขาเข้า.....	209

บทที่	หน้า
4.15 ผลของปริมาณฟลักซ์ของแข็ง.....	223
4.17 ผลของอุณหภูมิกระบวนการ .....	236
4.15 ผลของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ .....	250
4.18 เปรียบเทียบการจำลองในระบบสามมิติกับระบบสองมิติ .....	263
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	270
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	270
5.1.1 การศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ.....	270
5.1.2 การศึกษาผลของตัวแปรแบบจำลอง .....	271
5.1.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ.....	273
5.1.4 การเปรียบเทียบการจำลองในระบบสามมิติกับระบบสองมิติ .....	274
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	275
รายการอ้างอิง.....	276
ภาคผนวก .....	284
ภาคผนวก ก การคำนวณช่วงความเร็วที่ใช้ในงานวิจัย .....	285
ภาคผนวก ข แสดงรูปร่างความเร็วที่ต่างกันของรูปแบบที่ 5-7.....	289
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	290

**สารบัญตาราง**

ตารางที่		หน้า
3.1	รายละเอียดของระบบและตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง.....	44
4.1	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x .....	100
4.2	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y.....	101
4.3	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่า Specularity coefficient ค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x.....	114
4.4	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่า Specularity coefficient ค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y.....	115
4.5	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่า Restitution coefficient ค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x.....	127
4.6	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่า Restitution coefficient ค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y.....	128
4.7	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x.....	141
4.8	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y.....	142

ตารางที่	หน้า	
4.9	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของสัดส่วน ปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x.....	155
4.10	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของสัดส่วน ปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y.....	156
4.11	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความหนืด เสียดทานแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ใน ทิศทาง x.....	169
4.12	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความหนืด เสียดทานแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ใน ทิศทาง y.....	169
4.13	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของแบบจำลอง ความหนืดแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ใน ทิศทาง x.....	181
4.14	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของแบบจำลอง ความหนืดแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ใน ทิศทาง y.....	181
4.15	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความ หนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x.....	194
4.16	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความ หนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y.....	195
4.17	แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x.....	207

ตารางที่	หน้า
4.18	208
4.19	221
4.20	222
4.21	234
4.22	235
4.23	248
4.24	249
4.25	261
4.26	262



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดไคส์เบด.....	23
2.2	แสดงช่วงการไหลสำหรับฟลูอิดไคส์เบดแบบต่างๆ.....	23
2.3	ลักษณะการเกิดการผสมของของแข็งในระบบฟลูอิดไคส์เบดแบบฟองแก๊ส.....	24
2.4	การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart.....	24
2.5	ระบบฟลูอิดไคส์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed: CFB).....	25
2.6	ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม.....	25
2.7	แสดงการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง.....	26
2.8	แสดงการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง.....	26
3.1 ก	แผนภาพอุปกรณ์การทดลอง.....	42
3.1 ข	รูปวาดเชิงเรขาคณิตอย่างง่ายในระบบสองมิติ.....	42
3.2 ก	รูปวาดพื้นที่การคำนวณในระบบสามมิติของท่อโรเตอร์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบดแบบหมุนเวียน.....	43
3.2 ข	รูปขยายแสดงรายละเอียดพื้นที่การคำนวณในระบบสามมิติของท่อโรเตอร์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบดแบบหมุนเวียน.....	43
3.3	ผลของข้อมูลปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรสำหรับใช้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง โดยนำมาจากข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009).....	45
3.4	ผลของข้อมูลความหนาแน่นของของแข็งในแนวรัศมีเฉลี่ยที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตร สำหรับใช้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง โดยนำมาจากข้อมูลการทดลอง ของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009).....	46
3.5	ผลของข้อมูลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเตอร์ สำหรับใช้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง โดยนำมาจากข้อมูลการทดลอง ของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009).....	47

ภาพที่	หน้า
4.1 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดเซลล์จำนวนที่มีขนาดต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	51
4.2 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดเซลล์จำนวนที่มีขนาดต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y.....	52
4.3 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดเซลล์จำนวนที่มีขนาดต่างกัน ในทิศทาง x.....	53
4.4 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดเซลล์จำนวนที่มีขนาดต่างกัน ในทิศทาง y.....	54
4.5 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรณคงตัวเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	55
4.6 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรณคงตัวเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y.....	56
4.7 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรณคงตัวในทิศทาง x.....	57
4.8 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรณคงตัวในทิศทาง y.....	58
4.9 แผนผังการจำลองรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่ต่างกันทั้ง 7 รูปแบบ.....	63
4.10 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง x.....	64

ภาพที่	หน้า
4.11 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง $y$ .....	65
4.12 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง $x$ .....	66
4.13 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง $y$ .....	67
4.14 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง $x$ .....	68
4.15 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง $y$ .....	68
4.16 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง $x$ .....	69
4.17 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง $y$ .....	69
4.18 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง $x$ .....	70
4.19 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง $y$ .....	71
4.20 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-6 ในทิศทาง $x$ .....	72
4.21 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-6 ในทิศทาง $y$ .....	73

ภาพที่	หน้า
4.22 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4.....	74
4.23 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-6.....	75
4.24 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง x.....	79
4.25 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง y.....	80
4.26 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง x.....	81
4.27 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง y.....	81
4.28 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง x.....	82
4.29 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง y.....	83
4.30 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกัน.....	84
4.31 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร และ 13.0 เมตร..	85
4.32 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	91

ภาพที่	หน้า	
4.33	ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $y$ .....	92
4.34	ผลการจำลองปริมาณพลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $x$ .....	93
4.35	ผลการจำลองปริมาณพลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $y$ .....	93
4.36	ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ในทิศทาง $x$ .....	94
4.37	ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ในทิศทาง $y$ .....	95
4.38	ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ในทิศทาง $x$ .....	96
4.39	ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ในทิศทาง $y$ .....	97
4.40	รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ.....	98
4.41	รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร....	99

ภาพที่	หน้า
4.42 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	105
4.43 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y.....	106
4.44 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x...	107
4.45 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y...	107
4.46 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง x.....	108
4.47 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง y.....	109
4.48 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า Specularity coefficient ต่างๆ ในทิศทาง x.....	110
4.49 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า Specularity coefficient ต่างๆ ในทิศทาง y.....	111
4.50 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกัน.....	112

ภาพที่	หน้า
4.51 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอรัของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	113
4.52 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอรัของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	118
4.53 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอรัของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y.....	119
4.54 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x...	120
4.55 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y...	120
4.56 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอรัของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง x .....	121
4.57 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอรัของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง y.....	122
4.58 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า Restitution coefficient ต่างๆ ในทิศทาง x .....	123
4.59 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า Restitution coefficient ต่างๆ ในทิศทาง y.....	124

ภาพที่	หน้า
4.60 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกัน.....	125
4.61 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	126
4.62 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของค่าคุณสมบัติแกรนูลาร์ชาเข้าที่ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	132
4.63 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของค่าคุณสมบัติแกรนูลาร์ชาเข้าที่ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y.....	133
4.64 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่าคุณสมบัติแกรนูลาร์ชาเข้าที่ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x...	134
4.65 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่าคุณสมบัติแกรนูลาร์ชาเข้าที่ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y...	134
4.66 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่าคุณสมบัติแกรนูลาร์ชาเข้าที่แตกต่างกันในทิศทาง x .....	135
4.67 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่าคุณสมบัติแกรนูลาร์ชาเข้าที่แตกต่างกันในทิศทาง y.....	136
4.68 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า คุณสมบัติแกรนูลาร์ชาเข้าค่าต่างๆ ในทิศทาง x.....	137



ภาพที่	หน้า
4.69 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า คุณสมบัติแกรนูลาร์ขาเข้าค่าต่างๆ ในทิศทาง $y$ .....	138
4.70 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่าคุณสมบัติแกรนูลาร์ขาเข้าที่แตกต่างกัน.....	139
4.71 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่าคุณสมบัติแกรนูลาร์ขาเข้าที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	140
4.72 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $x$ .....	146
4.73 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $y$ .....	147
4.74 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $x$ .....	148
4.75 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $y$ .....	148
4.76 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	149
4.77 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	150

ภาพที่	หน้า
4.78 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบค่าต่างๆ ในทิศทาง x.....	151
4.79 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบค่าต่างๆ ในทิศทาง y .....	152
4.80 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกัน.....	153
4.81 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	154
4.82 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	160
4.83 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y.....	161
4.84 ผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	162
4.85 ผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y.....	162
4.86 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกันในทิศทาง x.....	163

ภาพที่	หน้า
4.87 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียด ทานที่แตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	164
4.88 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ ต่างกันของความหนืดเสียดทานแบบต่างๆ ในทิศทาง $x$ .....	165
4.89 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ ต่างกันของความหนืดเสียดทานแบบต่างๆ ในทิศทาง $y$ .....	166
4.90 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียด ทานที่แตกต่างกัน.....	167
4.91 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียด ทานที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	168
4.92 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่ แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $x$ .....	172
4.93 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่ แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $y$ .....	173
4.94 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง ของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจาก งานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $x$ .....	174
4.95 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง ของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจาก งานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง $y$ .....	174

ภาพที่	หน้า
4.96 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	175
4.97 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	176
4.98 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของแบบจำลองความหนืดแบบต่างๆ ในทิศทาง $x$ .....	177
4.99 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของแบบจำลองความหนืดแบบต่างๆ ในทิศทาง $y$ .....	178
4.100 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกัน.....	179
4.101 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	180
4.102 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	185
4.103 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	186
4.104 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	187
4.105 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	187
4.106 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	188
4.107 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	189
4.108 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ ....	190

ภาพที่	หน้า
4.109 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ ....	191
4.110 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน.....	192
4.111 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	193
4.112 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	198
4.113 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	199
4.114 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	200
4.115 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	200
4.116 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	201
4.117 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	202
4.118 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	203
4.119 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	204
4.120 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน.....	205

ภาพที่	หน้า
4.121 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	206
4.122 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x.....	212
4.123 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y.....	213
4.124 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x.....	214
4.125 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y.....	214
4.126 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x.....	215
4.127 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y.....	216
4.128 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x.....	217
4.129 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y.....	218
4.130 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกัน.....	219
4.131 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	220
4.132 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x.....	225
4.133 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y.....	226

ภาพที่	หน้า
4.134 ผลการจำลองปริมาณพลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	227
4.135 ผลการจำลองปริมาณพลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	227
4.136 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณ ทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	228
4.137 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณ ทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	229
4.138 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ ต่างกันของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ ..	230
4.139 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ ต่างกันของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ ..	231
4.140 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณ ทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกัน.....	232
4.141 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณ ทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	233
4.142 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของปริมาณพลักซ์ของแข็งที่มีค่า แตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	239
4.143 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของปริมาณพลักซ์ของแข็งที่มีค่า แตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	240
4.144 ผลการจำลองปริมาณพลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของปริมาณพลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	241
4.145 ผลการจำลองปริมาณพลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของปริมาณพลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	241
4.146 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของปริมาณพลักซ์ ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	242

ภาพที่	หน้า
4.147 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	243
4.148 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	244
4.149 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	245
4.150 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน.....	246
4.151 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	247
4.152 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	252
4.153 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	253
4.154 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	254
4.155 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	254
4.156 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	255
4.157 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	256
4.158 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $x$ .....	257
4.159 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง $y$ .....	258



ภาพที่	หน้า
4.160 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิ กระบวนการที่มีค่าแตกต่างกัน.....	259
4.161 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิ กระบวนการที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร.....	260
4.162 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของการจำลองระบบสามมิติ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการ จำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	266
4.163 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของการจำลองระบบสามมิติ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการ จำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y.....	267
4.164 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรของการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	268
4.165 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรของการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y.....	268
4.166 ผลการจำลองความหนาแน่นของของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตรของการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x.....	269
4.167 ผลการจำลองความหนาแน่นของของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตรของการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y.....	269

ภาพที่	หน้า
ก1	แสดงลักษณะรูปร่างความเร็วที่ต่างกันของรูปแบบที่ 5-7..... 289

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบันมีความผูกพันอย่างแน่นแฟ้นกับทรัพยากรพลังงานประเภทที่ไม่สามารถสร้างทดแทนได้ ซึ่งได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติ โดยเฉพาะน้ำมันที่จัดว่าเป็นกลไกสำคัญในการดำเนินกิจกรรมแทบทุกอย่างของมนุษย์ จะเห็นได้ว่า เมื่อมีการขึ้นราคาน้ำมันครั้งใดคนทุกอาชีพจะได้รับผลกระทบกันถ้วนหน้า สิ่งที่น่าวิตกมากที่สุดเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับทรัพยากรพลังงานประเภทนี้คือ ปัญหาการขาดแคลนพลังงานที่ได้เกิดขึ้นแล้วและนับวันจะมีความรุนแรงมากขึ้น ในปัจจุบัน ประเทศต่างๆ ทั่วโลก ได้ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าวนี้จึงพยายามศึกษา แสวงหา และพัฒนาพลังงานจากแหล่งอื่นมาใช้ทดแทน แหล่งของพลังงานทดแทนที่สำคัญที่ได้มีการพัฒนามาใช้ประโยชน์แล้วในหลายๆ ประเทศ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ และพลังงานลม (Sahi, 2004; Falcao, 2010; Mekhilef และคณะ, 2011; Michalak และ Zimny, 2011; Solangi และคณะ, 2011) พลังงานชีวมวลกำลังเริ่มเป็นที่สนใจในการศึกษาและพัฒนา เนื่องจาก นอกจากจะช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานดังกล่าว ยังจะช่วยลดมลภาวะในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญสำหรับการนำพลังงานจากชีวมวลมาใช้ คือ การเลือกเครื่องปฏิกรณ์เพื่อที่จะแปรรูปชีวมวลเหล่านี้ให้มาอยู่ในรูปพลังงานที่ต้องการ

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed) ได้ถูกใช้ในกระบวนการต่างๆ อย่างแพร่หลาย เช่น การเผาไหม้ (Combustion) และการผลิตแก๊ส (Gasification) เป็นต้น เนื่องจากข้อดีเหนือเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น คือ มีการสัมผัสกันระหว่างของแข็ง - ของไหลสูงที่ส่งผลให้มีอัตราการถ่ายโอนมวลและความร้อนสูงขึ้นด้วย มีหลักการทำงาน คือ ของไหลตัวกลาง ซึ่งในที่นี้คือ แก๊สจะไหลผ่านของแข็งภายในท่อโรเตอร์ด้วยความเร็วที่เหมาะสมเพื่อเปลี่ยนให้ของแข็งนั้นมีพฤติกรรมคล้ายกับของไหล พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของแข็งในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหล เกิดช่วงการไหลแบบต่างๆ ตามลำดับ ดังนี้ ฟลูอิดไรซ์เบดแบบปั่นป่วน ฟลูอิดไรซ์เบดแบบความเร็วสูง และฟลูอิดไรซ์เบดแบบเบาบาง (Kunii และ Levenspiel, 1991) โดยภายในท่อโรเตอร์จะเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น จากนั้น ของแข็งที่หลุดออกจากท่อโรเตอร์จะไหลผ่านไซโคลนซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับแยกของไหล และของแข็งออกจากกัน ของแข็งที่ยังมีขนาดใหญ่หรือยังเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์จะถูกป้อนกลับเข้ามาในกระบวนการใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของท่อโรเตอร์ผ่านท่อดาวเนอร์และท่อป้อนกลับ

ดังนั้น ความเข้าใจในอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการคิดค้นและพัฒนารูปแบบเครื่องปฏิกรณ์ให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยความซับซ้อนทางด้านอุทกพลศาสตร์ของระบบถือเป็นปัญหาที่สำคัญที่กำลังพบกันอยู่ อีกทั้งผลการทดลองที่มีอยู่ก็ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ นอกจากนี้ การขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์สำหรับการทำงานในอุตสาหกรรมก็ทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง (Eaton และคณะ, 1999) จึงมีการใช้วิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อแก้ปัญหานี้

วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) เป็นวิธีการที่กำลังได้รับความนิยม เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้งานง่าย สะดวกรวดเร็ว และสามารถลดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองจริง อีกทั้งให้ข้อมูลที่ต้องการได้ละเอียด สามารถแก้ปัญหาและอธิบายปัญหาปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล (Radulovic และคณะ, 1995; Benyahia และคณะ, 2000; Goldschmidt และคณะ, 2002) โดยสมการคำนวณพื้นฐานที่ใช้ในวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล สมการอนุรักษ์โมเมนตัม และสมการอนุรักษ์พลังงาน (Tu และคณะ, 2008) วิธีการคำนวณที่ใช้มีทั้งที่ทำในระบบสองมิติและระบบสามมิติซึ่งโดยทั่วไปในการคำนวณจะนิยมคำนวณในระบบสองมิติเนื่องจากใช้เวลาคำนวณที่น้อยกว่า อีกทั้งการคำนวณในระบบสามมิติยังต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ที่มาก แต่ในปัจจุบัน คอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาให้มีระบบประมวลผลที่เร็วขึ้น การคำนวณในระบบสามมิติจึงเป็นที่สนใจ เพราะสามารถแสดงรายละเอียดของลักษณะการไหลได้ดีกว่าในระบบสองมิติ อีกทั้งการคำนวณในระบบสามมิติยังเป็นการจำลองที่ใกล้เคียงกับระบบในชีวิตจริง โดยมีนักวิจัยบางกลุ่มได้ทำการศึกษาเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์แบบหมุนเวียนแล้วพบว่า การคำนวณในระบบสามมิติให้ผลการทำนายใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าในระบบสองมิติ (Kuipers และ Van Swaaij, 1999; Mathiesen และคณะ, 1999; Ibsen และคณะ, 2001; Zhang และ Heyden, 2001; De Wilde และคณะ, 2003; Hua และคณะ, 2005; Petersen และ Werther, 2005) แต่ก็มีงานวิจัยบางกลุ่มที่แสดงว่าผลการทำนายในระบบสองมิติกับสามมิติให้ผลใกล้เคียงกัน (Xie และคณะ, 2008) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จะทำการหาแบบจำลองภาวะในระบบสามมิติของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์แบบหมุนเวียน แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลจากการทดลองจริงและผลจากแบบจำลองภาวะในระบบสองมิติเพื่อหาข้อสรุปและตอบปัญหาความสับสนของระบบการจำลองดังกล่าว จากนั้นจะทำการศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ (Designing parameter) ตัวแปรแบบจำลอง (Modeling parameter) และตัวแปรดำเนินการ (Operating parameter) ต่างๆ ที่สำคัญต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. จำลองภาวะท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนในระบบสามมิติ ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการทดลองจริง และผลการจำลองภาวะในระบบสองมิติ
2. วิเคราะห์ผลของตัวแปรออกแบบ ตัวแปรแบบจำลอง และตัวแปรดำเนินการต่างๆ ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองในระบบสามมิติของท่อไรเซอร์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยมีภาวะอุณหภูมิคงที่ ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นในกระบวนการ
2. ผลของตัวแปรแบบจำลอง จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงและผลการจำลองภาวะในระบบสองมิติ

## 1.4 คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย

ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน คือ เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหนึ่งซึ่งใช้ในการดำเนินการฟลูอิโดเซชัน โดยมีการหมุนเวียนของเบดอย่างต่อเนื่อง

วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ คือ สาขาหนึ่งในกลศาสตร์ของไหล ที่ใช้กระบวนการเชิงตัวเลขและขั้นวิธีในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับการไหลของของไหล

อุทกพลศาสตร์ คือ การศึกษาการเคลื่อนที่ของของไหล และการเคลื่อนที่ของวัตถุในของไหล

การจำลองในระบบสามมิติ คือ การใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในการจำลองภาวะในระบบสามมิติหรือระบบที่เสมือนจริง

อุณหภูมิแกรนูลาร์ คือ พลังงานจลน์ภายใน หรือความเร็วกวัดแกว่งของอนุภาคของแข็ง

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อไรเซอร์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนในระบบสามมิติที่ทำนายผลทางอุทกพลศาสตร์ภายในได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองจริง
2. ได้แนวทางในการจำลองกระบวนการเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

3. ได้ทราบผลของตัวแปรออกแบบ ตัวแปรแบบจำลอง และตัวแปรดำเนินการ ที่มีต่อ อุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน
4. ได้นักวิชาการ/นักวิจัยรุ่นใหม่ที่มีความสนใจและชำนาญการด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
5. ได้ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารวิชาการหรือเอกสารการประชุมวิชาการ อย่างน้อย จำนวน 1 ฉบับ

### 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน อุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ รวมทั้งโปรแกรม ANSYS® FLUENT®
2. ออกแบบและวางแผนการทดลอง
3. จำลองภาวะท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในระบบสามมิติโดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการสำเร็จรูป ANSYS® FLUENT® เพื่อให้ได้ผลสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองในภาวะการทดลองต่างๆ ของ Knowlton และคณะ (1995) และเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009)
4. พิจารณาผลของตัวแปรออกแบบ (Designing parameters) (ผลของทางเข้า-ทางออก) ตัวแปรแบบจำลอง (Modeling parameters) (ผลของ Specularity coefficient ผลของ Restitution coefficient ผลของสมการแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุ ผลของแบบจำลองความหนืด ผลของความหนืดเสียดทาน ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้า ผลของการจัดเรียงตัวของแข็งจำกัด) และตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) (ผลของความเร็วแก๊สขาเข้า ผลของปริมาณฟลักซ์ของแข็ง ผลของขนาดของของแข็ง ผลของความหนาแน่นของของแข็ง และ ผลของอุณหภูมิกระบวนการ) ที่มีต่อ อุทกพลศาสตร์ภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน เช่น สัดส่วนปริมาตรของแข็ง อุณหภูมิแกรนูลาร์ ความเร็วในทิศทางต่างๆ เป็นต้น
5. ประมวล วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.7 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัยนี้ประกอบด้วยเนื้อหาต่างๆ ดังนี้

- บทที่ 1           ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ข้อจำกัดของการวิจัย คำจำกัดความที่ใช้ในการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย และขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย
- บทที่ 2           พลูอิโดเซชัน พลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics) และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- บทที่ 3           การสร้างแบบจำลองและรายละเอียดแบบจำลองการไหลของวัฏภาคแก๊สและวัฏภาคของแข็ง สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณ
- บทที่ 4           ผลการจำลองตัวแปรออกแบบ ตัวแปรแบบจำลอง และตัวแปรดำเนินการ การเปรียบเทียบการจำลองในระบบสามมิติกับระบบสองมิติ
- บทที่ 5           สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

##### 2.1.1 ฟลูอิดไอเซชัน

ฟลูอิดไอเซชัน ได้มีการเริ่มใช้ในอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรกในกระบวนการแตกตัวน้ำมันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid catalytic cracking) ในปี 1942 (Avidan และ Shinnar, 1990; Avidan, 1997) เป็นปรากฏการณ์ที่ของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายกับของไหลโดยเกิดจากการที่อนุภาคของแข็งสัมผัสกับตัวกลางที่เป็นของไหล ซึ่งอาจเป็นแก๊สหรือของเหลวก็ได้ กล่าวคือ เมื่อของไหลผ่านเข้ามาทางด้านล่างในหอทดลองที่มีของแข็งอยู่ภายใน ของไหลก็จะไหลผ่านชั้นอนุภาคของแข็งแล้วไหลออกส่วนบนของหอทดลอง ที่ความเร็วของไหลต่ำๆ อนุภาคของแข็งยังคงอยู่นิ่งและไม่มีการเคลื่อนไหวใดๆ จนกระทั่งเมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นอนุภาคของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติและพฤติกรรมคล้ายของไหลดังได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.1 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) ความดันที่ความสูงใดๆ จะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของอนุภาคของแข็งต่อพื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่งนั้นๆ

2) อนุภาคของแข็งที่ลอยตัวอยู่ผิวหน้าของเบตจะเรียบสม่ำเสมอตามแนวระนาบเหมือนผิวหน้าของของไหลที่ใสอยู่ในภาชนะ นอกจากนี้ถ้ามีการจัดหอทดลองเอนไปทางซ้ายหรือขวา ผิวหน้าของเบตก็ยังคงเรียบอยู่อย่างเดิม

3) ถ้าเจาะรูด้านข้างของเบต อนุภาคของแข็งจะไหลออกทางรูนั้นได้เหมือนของเหลว

4) ถ้านำวัตถุของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าอนุภาคเบตใส่ลงไปในห้องทดลอง วัตถุของแข็งนั้นจะลอยอยู่บนผิวหน้าของเบต

5) อนุภาคของแข็งผสมกันได้อย่างดีและเมื่อให้ความร้อนกับระบบอนุภาคของแข็งจะสามารถรักษาอุณหภูมิให้เท่ากันได้ทั่วทั้งภาชนะ

พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของของแข็งในระบบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหล เกิดช่วงการไหลแบบต่างๆ ตามลำดับ ดังนี้ ฟลูอิดไอเซชันแบบฟองแก๊ส ฟลูอิดไอเซชันแบบปั่นป่วน ฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง และฟลูอิดไอเซชันแบบเบาบาง (Kunii และ Levenspiel, 1991) รายละเอียดในแต่ละช่วงการไหลจะได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป



## 2.1.2 ประเภทของฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชัน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาคและ ฟลูอิดเซชันแบบสามวัฏภาค

2.1.2.1 ฟลูอิดเซชันแบบสองวัฏภาค (Two-phase fluidization) คือ ฟลูอิดเซชันที่ ปฏิบัติการในหอตลอดหรือในเบดที่ประกอบด้วยสองวัฏภาค คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นฟลูอิดเซชันแบบ 2 วัฏภาคจึงแบ่งย่อยอีกได้เป็น

- ฟลูอิดเซชันของแก๊ส (Gas fluidization)
- ฟลูอิดเซชันของเหลว (Liquid fluidization)

2.1.2.2 ฟลูอิดเซชันแบบสามวัฏภาค (Three-phase fluidization) คือ ฟลูอิดเซชันที่ ปฏิบัติการในหอตลอดหรือในเบดที่ประกอบด้วยของสามวัฏภาค คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยส่วนมากจะนิยมใช้ระบบฟลูอิดเซชันที่เป็นระบบแก๊สหรืออากาศกับของแข็งมากกว่าจะเป็นระบบของเหลวกับของแข็ง

## 2.1.3 ลักษณะช่วงการไหลของฟลูอิดเซชัน (Fluidization flow regimes)

ดังที่ได้กล่าวไปพฤติกรรมเคลื่อนที่ของของแข็งในระบบจะเปลี่ยนไปเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหล ซึ่งสามารถแบ่งช่วงการไหลตามความเร็วของไหลที่เปลี่ยนไปได้ดังแสดงภาพที่ 2.2

### 2.1.3.1 ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidization)

เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น เรียก ความเร็วจุดนี้ว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันหรือความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ (Minimum fluidization velocity:  $u_{mf}$ ) ซึ่งจุดนี้เป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพุดิตัวคล้ายของไหล และจะมีฟองแก๊สเกิดขึ้น อันเป็นลักษณะเด่นของช่วงการไหลนี้ และเรียกช่วงการไหลแบบนี้ว่า ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส โดยสามารถคำนวณความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชันได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

สำหรับ  $Re_{mf} < 20$

$$u_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 \cdot (\rho_s - \rho_g)}{150 \mu_g} g \left( \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) \quad (2.1)$$

สำหรับ  $20 \leq \text{Re}_{mf} \leq 1,000$

$$u_{mf} = \frac{\sqrt{\frac{\phi_s d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \varepsilon_{mf}^3} + \frac{(\phi_s d_p)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\mu_g} g \left( \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right)}{2} \quad (2.2)$$

และสำหรับ  $\text{Re}_{mf} > 1,000$

$$u_{mf} = \sqrt{\frac{\phi_s d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \varepsilon_{mf}^3} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$\varepsilon_{mf}$  คือ สัดส่วนปริมาตรของวัฏภาคแก๊สที่ภาวะต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน (-)

$\rho_s$  คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของวัฏภาคของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

$d_p$  คือ ขนาดอนุภาคของวัฏภาคของแข็ง (เมตร)

$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

$\phi_s$  คือ ค่าความเป็นทรงกลมของอนุภาคของแข็ง (-)

$\mu_g$  คือ ความหนืดรวมของวัฏภาคแก๊ส (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

$u_g$  คือ ความเร็วของวัฏภาคแก๊ส (เมตรต่อวินาที)

ดังที่ได้กล่าวไปช่วงการไหลฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊สมีลักษณะเฉพาะตัว คือ การมีฟองแก๊สเกิดขึ้นซึ่งจะมีอิทธิพลอย่างมากต่อการผสมกันของแก๊ส-ของแข็งและการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมี และสำหรับอนุภาคขนาดที่ต่างกันลักษณะการเกิดช่วงการไหลนี้จะมีความแตกต่างกันไปด้วย กล่าวคือ สำหรับอนุภาค Geldart A เมื่อความเร็วแก๊สถึงค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ ( $u_{mf}$ ) ของแข็งจะไม่เกิดฟองแก๊สขึ้นทันที จะมีเพียงการขยายตัวของเบด (Ye และคณะ, 2005) เนื่องจากแรงระหว่างอนุภาคที่เกิดขึ้นในกระบวนการ โดยจะเริ่มเกิดช่วงการไหลฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊สก็ต่อเมื่อความเร็วแก๊สเข้ามามีค่ามากกว่าค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองแก๊ส (Minimum bubbling velocity:  $u_{mb}$ ) สำหรับอนุภาค Geldart B และ D ช่วงการไหลฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วแก๊สมีค่าเท่ากับความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ของแข็ง

เกิดการเคลื่อนที่ (Johnsson และคณะ, 1991) สำหรับอนุภาค Geldart C ที่ของแข็งมีขนาดละเอียดมากและยากที่จะเกิดพฤติกรรมแบบของไหล ดังนั้น จึงไม่เกิดช่วงการไหลฟลูอิโดเซชันแบบฟองแก๊สขึ้นสำหรับกลุ่มอนุภาคนี้ (Basu, 1978) Abrahamsen และ Geldart (1978) ได้เสนอวิธีประมาณค่า  $u_{mb}$  ไว้ดังนี้

$$u_{mb} = 33d_p \left( \frac{\rho_g}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (2.4)$$

ลักษณะการเคลื่อนที่ของไหลภายในเบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. Bubble phase คือ ส่วนที่เป็นฟองแก๊ส ซึ่งในส่วนนี้อาจมีอนุภาคของแข็งอยู่บ้างแต่น้อยมาก
2. Emulsion phase คือ ส่วนที่ไม่ใช่ฟองแก๊สหรือส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น ขนาดของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นนี้ จะมีความสัมพันธ์อยู่กับขนาดของอนุภาคของแข็ง และความเร็วแก๊สที่ป้อนเข้ากระบวนการ

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกเบดขึ้นไปและมีการรวมตัวกันผ่าน Emulsion phase โดยที่อาจจะมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองแก๊ส และบางส่วนวิ่งตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย จนกระทั่งถึงผิวหน้าเบดด้านบน ฟองแก๊สก็จะเคลื่อนที่หลุดออกไปแล้วแตกกระจายอยู่เหนือผิวหน้าเบด ลักษณะการเกิดการผสมของของแข็งในระบบฟลูอิโดเซชันแบบฟองแก๊สได้แสดงในภาพที่ 2.3

ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบดขึ้นไป ฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองแก๊สจะตกลงมายังเบดอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่า บริเวณอิสระ (Freeboard) อย่างไรก็ดีตาม อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กอาจถูกพัดพาไปกับแก๊สด้วยแต่จะมีปริมาณน้อยมาก

#### 2.1.3.2 ฟลูอิโดเซชันแบบปั่นป่วน (Turbulent fluidization)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่ไหลผ่านช่วงการไหลแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้นมากกว่าค่า  $u_{mb}$  อนุภาคของเบดจะเริ่มเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จนในที่สุดส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการขยายตัวของเบด มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกออกจากกันอย่างรวดเร็ว จนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส ซึ่งหมายความว่าได้มีการเปลี่ยนแปลงไปสู่ช่วงการไหลใหม่ที่เรียกว่า ฟลูอิโดเซชันแบบ

ปั่นป่วน (Turbulent fluidization) (Berruti และคณะ, 1995; Rhodes, 1996; Jiradilok และคณะ, 2007)

ลักษณะการเคลื่อนไหวภายในเบดปั่นป่วนจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. Dense phase คือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น จะอยู่ด้านล่างของหอทดลอง
2. Dilute phase คือ บริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง จะอยู่ด้านบนของหอทดลอง

ความเร็วที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะอยู่ในช่วงระหว่าง  $u_c$  และ  $u_k$  โดยสามารถหาค่าได้ตามสมการด้านล่าง (Tsukada และคณะ, 1993; Bi และ Grace, 1995)

$$u_c = \frac{0.565 \mu_g Ar^{0.461}}{\rho_g d_p} \quad (2.5)$$

$$u_k = \frac{1.310 \mu_g Ar^{0.450}}{\rho_g d_p} \quad (2.6)$$

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

ฟลูอิดเซชันที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด อาจจะเรียกรวมกันว่า Captive Fluidized Bed เพราะว่า อนุภาคของแข็งซึ่งสัมผัสกับแก๊สจะถูกจำกัดบริเวณอยู่ภายในระยะความสูงหนึ่งเท่านั้น หรือมีอนุภาคของแข็งเพียงเล็กน้อยที่ถูกพัดพาออกจากระบบ

ที่ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน Freeboard หรือ Transport Disengaged Height (TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งหลุดออกไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดจะตกกลับลงมายังเบด ของแข็งที่หลุดออกไปกับแก๊สจะหลุดออกไปด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า Elutriation rate

ความเร็วที่ทำให้อนุภาคของแข็งหลุดลอยออกไปเรียกว่า ความเร็วปลาย (Terminal velocity:  $u_t$ ) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการด้านล่าง

$$u_t = \frac{\mu_g \left( \frac{Ar}{7.5} \right)^{0.666}}{\rho_g d_p} \quad (2.7)$$

### 2.1.3.3 ฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization)

ช่วงการไหลฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูงถูกเสนอเป็นครั้งแรกโดย Yerushalmi และคณะ (1976) โดยเป็นลักษณะการไหลที่อยู่ระหว่างช่วงการไหลแบบปั่นป่วนและช่วงการไหลแบบเบาบาง เกิดขึ้นจากเมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สเพิ่มขึ้นไปอีกจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เบดจะมีการขยายตัวจนไม่สามารถระบุงพื้นผิวหน้าด้านบนของเบดได้ อนุภาคของแข็งจะหลุดออกไปทางด้านบนหอตลอด ลักษณะเด่นที่สามารถสังเกตได้จากช่วงการไหลนี้คือ บริเวณตรงกลางของหอตลอดจะมีอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ขึ้นในลักษณะเบาบาง ขณะที่บริเวณผนังกลุ่มอนุภาคของแข็งมีการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (Cluster) และเคลื่อนที่ลง เรียกลักษณะการเกิดแบบนี้ว่า การไหลแบบแกนใน-วงนอก (Core-annulus flow) (Takeuchi และคณะ, 1986; Chen, 1999)

จากที่ได้กล่าวไปในช่วงการไหลแบบฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูงจะมีการหลุดของอนุภาคออกไปทางด้านบนของหอตลอด ถ้ามีการนำอนุภาคที่หลุดออกไปป้อนกลับเข้ามาสู่ระบบอีกครั้งจะเรียกกระบวนการนี้ว่า ฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB) ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (Transport velocity:  $u_{tr}$ ) ถูกเสนอโดย Monazam และคณะ (2005) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$u_{tr} = \frac{2.28 \mu_g Ar^{0.419}}{\rho_g d_p} \quad (2.8)$$

### 2.1.3.4 ฟลูอิดไอเซชันแบบเบาบาง (Pneumatic transport fluidization)

ช่วงการไหลนี้เกิดจากเมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊สขึ้นไปจากช่วงการไหลแบบความเร็วสูง ส่งผลให้ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งภายในหอตลอดจะเบาบางมาก ลักษณะเด่นของช่วงการไหลนี้คือ อนุภาคของแข็งจะถูกพาขึ้นไปด้านบนและกระจายตัวในวัฏภาคแก๊ส ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลนี้ (Minimum pneumatic velocity:  $u_{mp}$ ) ได้ถูกเสนอความโดย Bi และ Fan (1991) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$u_{mp} = 10.1 (g d_p)^{0.347} (G_s / \rho_g)^{0.310} (d_p / D)^{-0.139} Ar^{-0.021} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $G_s$  คือ ปริมาณของแข็งที่ป้อนเข้า (กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที)  
 $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางหลอดลง (เมตร)

#### 2.1.4 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart

การจำแนกกลุ่มของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart (Geldart powder classification) จะอาศัยค่าผลต่างของความหนาแน่นของของแข็งกับแก๊สและขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งลักษณะของอนุภาคในแต่ละกลุ่มสามารถอธิบายได้ดังนี้ (Grace, 1997)

Group C คือ Cohesive หรือ very fine powders เป็นของแข็งที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก ของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิไดซ์ได้ยาก มักจับตัวเป็นก้อนเนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูง

Group A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดอนุภาคเล็กและความหนาแน่นต่ำ สามารถทำให้เกิดฟลูอิไดซ์ได้ง่ายที่ความเร็วต่ำๆ เป็นฟลูอิไดซ์เบดสม่ำเสมอ (Smooth fluidization) และที่ความเร็วสูงๆ ก็สามารถควบคุมการเกิดฟองได้

Group B คือ Sandlike เป็นของแข็งที่มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 40 ถึง 500 ไมโครเมตร และความหนาแน่นในช่วง 1.4 ถึง 4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ของแข็งในกลุ่มนี้ยังสามารถเกิดฟลูอิไดซ์ได้ง่าย แต่มักจะมีกลุ่มของฟองแก๊สเกิดขึ้นด้วย

Group D คือ Spoutable เป็นของแข็งที่มีขนาดอนุภาคใหญ่และ/หรือความหนาแน่นสูง ดังนั้น ของแข็งในกลุ่มนี้จึงเกิดฟลูอิไดซ์ได้ยาก

#### 2.1.5 ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed: CFB)

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหลอดลงที่มีอนุภาคของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวในหลอดลง เบดจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือตัวกระจายแก๊ส (Distributor) ไปจนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของอนุภาคเบด ส่วนฟลูอิไดซ์เบด คือ เครื่องปฏิกรณ์ชนิดหนึ่งซึ่งใช้ในการดำเนินการฟลูอิไดเซชัน เนื่องจากปัญหาการหลุดลอยออกของอนุภาค ส่งผลให้มีการคิดค้นเครื่องปฏิกรณ์แบบใหม่ขึ้นมา คือ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed reactor) โดยจะช่วยลดปัญหาการหลุดลอยออกของอนุภาค และมีการถ่ายโอนมวลที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเดิม

ระบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นระบบที่พัฒนาขึ้นได้เป็นครั้งแรกโดย Winkler (Grace, 1997) และได้ถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรม โดย Warren Lewis และ Edwin Gilliland แห่ง Massachusetts Institute of Technology, MIT ซึ่งพยายามที่จะหารูปแบบที่เหมาะสมที่สุดของการสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับอนุภาคของแข็งในกระบวนการแตกตัวน้ำมันโดย

ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ระบบฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนที่อยู่ในช่วงการไหลแบบฟลูอิดส์เบดความเร็วสูง เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมในการใช้งาน ระบบฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน จะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วน (ดังภาพที่ 2.5) คือ

1. ท่อไรเซอร์ (Riser) ส่วนนี้จะมีการป้อนเข้าของอนุภาคของแข็งและของไหลบริเวณด้านล่างและออกบริเวณด้านบน เป็นส่วนที่ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นในส่วนนี้
2. ไชโคลน (Cyclone) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แยกของแข็งและแก๊สออกจากกัน หลักการทำงานของไชโคลนจะอาศัยแรงเหวี่ยงในแนวรัศมีทำให้อนุภาคของแข็งชนกับผนัง อนุภาคของแข็งที่ยังมีขนาดใหญ่จะตกกลับลงสู่ท่อป้อนกลับ ส่วนอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กอาจจะหลุดออกไปจากระบบ
3. ท่อดาวเนอร์ (Downer) จะเป็นบริเวณพักของแข็งที่มาจากไชโคลน
4. ท่อป้อนกลับ (Return system) ทำหน้าที่ป้อนอนุภาคของแข็งจากท่อดาวเนอร์กลับไปยังด้านล่างของท่อไรเซอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคของแข็ง

### 2.1.6 อุทกพลศาสตร์ภายในระบบฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน

อุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียนเป็นการศึกษาปรากฏการณ์ทางพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นของวัฏภาคแก๊ส-ของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยได้มีผู้ทำการศึกษาดังต่อไปนี้

Benyahia และคณะ (2000) ได้ศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคและแก๊สภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดส์เบดที่มีช่วงการไหลแบบความเร็วสูง พบว่า ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งมีปริมาณมากที่บริเวณผนังและเจ็จางที่บริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์ ส่งผลให้ความเร็วของอนุภาคของแข็งตรงกลางท่อมีค่าสูงและบริเวณผนังมีการเคลื่อนที่ลงของอนุภาคของแข็ง ความดันลดภายในท่อไรเซอร์จะมีค่าสูงที่บริเวณด้านล่างเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีการป้อนเข้าของอนุภาคของแข็งและจะมีค่าลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นเพราะปริมาณของแข็งที่ลดลงนั่นเอง ผลของอุณหภูมิกำหนดว่าบริเวณที่มีของแข็งอยู่หนาแน่นระยะทางระหว่างอนุภาคจะมีค่าน้อยส่งผลให้อุณหภูมิกำหนดมีค่าต่ำ แต่บริเวณที่เจ็จางอุณหภูมิกำหนดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัดส่วนปริมาตรของแข็งยกกำลังเศษสองส่วนสาม นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไรเซอร์ โดยเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ค่าความดันลดสูงขึ้นเนื่องจากมีของแข็งอยู่ในท่อไรเซอร์มากขึ้นนั่นเอง

Zhang และคณะ (2008) ได้ศึกษาลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน พบว่า สัดส่วนปริมาตรของแข็งภายในท่อมีลักษณะเป็น S-shape กล่าวคือของแข็งจะอยู่กันหนาแน่นบริเวณด้านล่างและเจือจางบริเวณด้านบนซึ่งจะสอดคล้องกับผลความดันที่เกิดขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของความเร็วอนุภาคของแข็งที่ความสูงแตกต่างกัน พบว่า ที่ทุกระดับความสูงจะมีรูปแบบความเร็วเป็นแบบแกนใน-วงนอก (core-annular) คือ บริเวณตรงกลางความเร็วของอนุภาคของแข็งมีค่าสูงและบริเวณผนังความเร็วของอนุภาคของแข็งมีค่าน้อย เพราะมีการเคลื่อนที่ลงของอนุภาค นอกจากนี้ยังพบว่าบริเวณตรงกลางจะมีความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของแข็งที่ลดลง และบริเวณผนังความเร็วจะมีค่าสูงที่บริเวณความสูงต่ำๆ เนื่องจากอนุภาคของแข็งมีการตกกลับลงมามากกว่านั่นเอง

Hartge และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาอุทกพลศาสตร์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน พบว่า สัดส่วนปริมาตรของแข็งจะเปลี่ยนเมื่อความเร็วแก๊สเข้าเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือเมื่อความเร็วแก๊สเข้าเพิ่มขึ้น ที่บริเวณด้านล่างสัดส่วนปริมาตรจะมีค่าลดลง เนื่องจากของแข็งถูกพาไปสู่ด้านบนได้มากขึ้น ส่งผลให้ด้านบนจะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วแก๊สเข้าเพิ่มขึ้น

Armstrong และคณะ (2010) ได้ใช้แบบจำลองศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนโดยได้ทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบฟองแก๊สไปสู่ช่วงการไหลฟลูอิด์เบดแบบความเร็วสูง เมื่อเพิ่มความเร็วไม่เกินค่าความเร็วปลาย (Terminal velocity) อนุภาคของแข็งจะยังไม่สามารถหลุดออกได้และจะตกกลับลงมา สิ่งที่เกิดขึ้น คือ เกิดช่วงการไหลแบบฟองแก๊สและแบบปั่นป่วนขึ้น จนกระทั่งเมื่อเพิ่มความเร็วเกินค่าความเร็วปลายจะเกิดช่วงการไหลแบบความเร็วสูง และพบว่าฟองแก๊สที่เกิดในช่วงการไหลแบบฟองแก๊สมีขนาดเล็กและสม่ำเสมอใกล้ๆ บริเวณทางเข้า และจะมีขนาดใหญ่ขึ้น มีรูปร่างที่บิดเบี้ยวไปเมื่อความสูงเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากด้านล่างนั่นเอง

## 2.1.7 ข้อดีและข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

### ข้อดี

- สามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ เนื่องจากคุณสมบัติที่คล้ายกับของไหล โดยปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและเติมเข้ามาในเบดได้
- อนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้เกิดการผสมกันได้อย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ ดังนั้นการสัมผัสกันระหว่างของแข็ง-แก๊สจะดีขึ้น



- อัตราการถ่ายโอนมวลสารและพลังงานสูง เนื่องจากพื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลมีมากขึ้น
- เนื่องจากการผสมกันอย่างรุนแรงของของแข็งภายในชั้นของไหล ทำให้อุณหภูมิภายในเบตมีความสม่ำเสมอว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบตนิ่ง
- มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กและ/หรือความหนาแน่นต่ำจะอยู่ส่วนบน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และ/หรือความหนาแน่นสูงจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกของแข็งได้
- สามารถกำจัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของเครื่อง
- สามารถใช้ในการขนส่งอนุภาคของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

### ข้อเสีย

- ในระบบฟลูอิดเบตแบบหมุนเวียน ที่ดำเนินการโดยใช้ความเร็วของไหลสูงๆ อาจทำให้ระยะเวลาที่อนุภาคของแข็งสัมผัสกับของไหลสั้นเกินไป เบตอาจจะไม่ผสมกันเป็นเนื้อเดียวโดยตลอด ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการใช้เบตหลายชั้น
- เกิดการขัดสีระหว่างของแข็งและผนังทำให้เกิดการสึกกร่อนของทั้งอนุภาคและหอทดลอง
- ขนาดของห้องเผาไหม้จะสูงกว่าระบบทั่วไป ส่งผลให้มีราคาแพงขึ้น
- มีความซับซ้อนในการออกแบบและควบคุมการหมุนเวียนของอนุภาค

### 2.1.8 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) เป็นสาขาหนึ่งในกลศาสตร์ของไหล ที่ใช้กระบวนการเชิงตัวเลขและขั้นตอนวิธีในการแก้ปัญหา (Algorithm) เกี่ยวกับการไหลของของไหล เพื่อการนี้คอมพิวเตอร์จะถูกนำมาใช้เพื่อทำการคำนวณนับล้านๆ ครั้ง ก่อนที่จะสร้างแบบจำลองขึ้นมา วิธีนี้เป็นวิธีการที่กำลังได้รับความนิยม เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้งานง่าย สะดวกรวดเร็ว และสามารถลดค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับทดลองจริง อีกทั้งให้ข้อมูลที่ต้องการได้ละเอียด สามารถแก้ปัญหาและอธิบายปัญหาปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหล (Radulovic และคณะ, 1995; Benyahia และคณะ, 2000; Goldschmidt และคณะ, 2002) การถ่ายโอนมวล การถ่ายโอนความร้อน และปฏิกิริยาเคมีต่างๆ โดยอธิบายด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ (Partial differential equation) แบบไม่เชิงเส้น ที่ไม่สามารถหรือยากต่อการแก้ระบบ

สมการเหล่านี้ด้วยการหาผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) ผ่านวิธีการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ ดังนั้นในการนี้จึงต้องเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในภาพที่สามารถแก้ปัญหาได้ง่ายขึ้น เรียกว่า Discretization

Discretization คือ กระบวนการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิต (Algebraic equation) ที่สามารถแก้ปัญหาออกมาด้วยวิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical solution) โดยปัจจุบันสามารถหาผลเฉลยของระบบสมการนี้ได้ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

วิธีการแก้ปัญหาที่ใช้ทั่วไปมี 3 แบบ คือ

1. Finite difference method คือ การเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์โดยการประมาณด้วยวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series expansion) ที่ตำแหน่งจุดบนกริด
2. Finite element method คือ การเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์โดยจะแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นส่วนเล็กๆ ที่เรียกว่า Element ผลเฉลยโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์จะถูกสร้างขึ้นให้กับ element เหล่านี้ ผลเฉลยทั้งโดเมนจะได้จากการรวมกันของคำตอบในแต่ละ element โดยจะต้องสอดคล้องกับค่าที่ขอบของโดเมน
3. Finite volume method คือ การเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์โดยใช้หลักการทางด้านพลศาสตร์ของไหลเพื่อแบ่งปัญหาที่อยู่ในปริมาตรควบคุม (Control Volume) ของทั้งขอบเขตของปัญหาที่พิจารณา (Domain) ให้กลายเป็นปริมาตรย่อยๆ (Cell) วิธีการนี้ส่วนมากจะใช้กับการแก้ปัญหาที่เป็นของไหล ดังนั้น จะใช้แก้ปัญหาในงานวิจัยนี้

### 2.1.9 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่แบ่งขอบเขตของปัญหาที่สนใจออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ แล้วอินทิเกรตสมการการอนุรักษ์บนปริมาตรควบคุม (Control volume) ดังแสดงภาพที่ 2.6

การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในการแก้ปัญหาคาร์พาและการแพร่ของของไหล จะเริ่มจากสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equations) โดยรูปทั่วไปในภาวะคงตัวของตัวแปร  $\phi$  สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y}}_{\text{Convection Terms}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)}_{\text{Diffusion Terms}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Source Term}} \quad (2.10)$$

สมการ (2.10) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์พื้นฐานที่จะนำมาแก้สมการ โดยสามารถใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขไฟไนต์วอลุ่มมาเปลี่ยนรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการพีชคณิตที่สามารถทำการคำนวณได้ง่ายขึ้นโดยการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุมได้เป็น

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} dV + \int_{CV} \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} dV = \int_{CV} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dV + \int_{CV} \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dV + \int_{CV} S_\phi dV \quad (2.11)$$

โดยสมการนี้ก็คือ สมการพื้นฐานในรูปแบบทั่วไปที่เขียนอยู่ในรูปของอินทิกรัลนั่นเอง สามารถหาค่าของ  $\phi$  บนผิวปริมาตรควบคุม จากการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีทางตัวเลข (Numerical scheme) วิธีต่างๆ เช่น แบบ Central differencing scheme แบบ Upwind scheme หรือแบบ QUICK scheme เป็นต้น โดยในโปรแกรมจำลองกระบวนการสำเร็จรูปทั่วไปจะการใช้การประมาณค่าแบบ Upwind scheme ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1.9.1 ระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง (First order upwind scheme)

จุดประสงค์ในการคิดค้นวิธีนี้ก็เพื่อแก้ไขปัญหาของ Central difference scheme ที่สมมติว่าค่าของการพาที่ Interface  $\phi_e$  เกิดจากค่าเฉลี่ยระหว่าง  $\phi_E$  และ  $\phi_P$  ซึ่งจะส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์  $a_N, a_S, a_E$  หรือ  $a_W$  มีค่าติดลบ จึงส่งผลให้ผลเฉลยของปัญหาไม่ลู่เข้าค่าใดๆ ได้ ดังนั้น วิธีการคิดแบบระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่งจึงแก้ปัญหานี้โดยคิดค่าของ  $\phi$  ที่ Interface ให้มีค่าเท่ากับค่าของ  $\phi$  ที่ Grid point ของผิวปริมาตรควบคุมด้านต้นกระแสการไหล (Upstream) ดังแสดงในภาพที่ 2.7

$$\phi_e = \phi_P \text{ เมื่อ } F_e > 0 \quad (2.12)$$

$$\phi_e = \phi_E \text{ เมื่อ } F_e < 0 \quad (2.13)$$

$$\phi_w = \phi_W \text{ เมื่อ } F_w > 0 \quad (2.14)$$

$$\phi_w = \phi_P \text{ เมื่อ } F_w < 0 \quad (2.15)$$

โดยที่ค่าของ  $\phi_n$  และ  $\phi_s$  ก็หาได้ในลักษณะเดียวกัน และ  $F$  มีค่าเท่ากับ  $\rho u$  นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ จะไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้ ทำให้สามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยที่ผลเฉลยลู่เข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่งและผลเฉลยที่ได้มีค่าเป็นไปตามลักษณะทางกายภาพที่เกิดขึ้นจริง

### 2.1.9.2 ระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่สอง (Second order upwind scheme)

วิธีการคิดแบบนี้จะคล้ายกับการประมาณค่าโดยระเบียบวิธีผลต่างอันดับหนึ่ง เพียงแต่ค่า  $\phi$  จะประมาณค่าที่พื้นผิวของปริมาตรโดยใช้ตำแหน่งข้างเคียงที่อยู่ต้นกระแสการไหล สองตำแหน่งถัดไปดังแสดงในภาพที่ 2.8

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_P - \frac{1}{2}\phi_w \quad \text{เมื่อ} \quad F_e > 0 \quad (2.16)$$

$$\phi_e = \frac{3}{2}\phi_E - \frac{1}{2}\phi_{EE} \quad \text{เมื่อ} \quad F_e < 0 \quad (2.17)$$

$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_w - \frac{1}{2}\phi_{ww} \quad \text{เมื่อ} \quad F_w > 0 \quad (2.18)$$

$$\phi_w = \frac{3}{2}\phi_P - \frac{1}{2}\phi_E \quad \text{เมื่อ} \quad F_w < 0 \quad (2.19)$$

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองระเบียบวิธีพบว่าระเบียบวิธีผลต่างอันดับหนึ่งจะให้การลู่เข้าหาคำตอบดีกว่า และมีความเสถียรมากกว่า ในขณะที่ระเบียบวิธีผลต่างอันดับที่สองจะให้คำตอบที่แม่นยำมากกว่า

### 2.1.10 Under-relaxation factor

เนื่องจากสมการควบคุมที่ถูกแก้ปัญหามีลักษณะเป็นแบบไม่เชิงเส้น ดังนั้น ความผันผวนในการคำนวณจึงเกิดขึ้นอย่างมาก เพื่อลดความผันผวนที่เกิดขึ้นจึงมีการใส่ค่าตัวแปรเพิ่มเข้าไป เรียกตัวแปรนี้ว่า Under-relaxation factor โดยค่านี้มีเพื่อไม่ให้เกิดการลู่เข้าสู่คำตอบเร็วเกินไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เร็วเกินไปจะส่งผลให้คำตอบไม่เกิดการลู่เข้า (Diverge) โดยจะมีค่าตั้งแต่ศูนย์ถึงหนึ่ง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\phi = \phi_{old} + \alpha\Delta\phi \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\phi_{old}$  คือ ตัวแปรจากการคำนวณในครั้งก่อน  
 $\alpha$  คือ Under-relaxation factor มีค่า ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

### 2.1.11 กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE

เพื่อให้ค่าความดันและความเร็วในสมการสอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องดังนั้น กระบวนการหาคำตอบแบบ SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation) จึงถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบค่าความดันและความเร็วให้สอดคล้องกัน มีหลักการ คือ สมมติค่าความดันและความเร็วในขอบเขตของปัญหาที่สนใจ แล้วคำนวณค่าความเร็ว (ในสมการ Momentum conservation) เพื่อที่จะนำค่าความเร็วที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าความดันอีกครั้ง (ในสมการ Mass conservation) โดยใช้ Pressure-correction method ช่วยในการคำนวณค่าความดันที่ถูกต้อง ซึ่งค่า Pressure-correction ที่ได้นี้จะถูกนำกลับมาหาค่าความเร็ว และทำซ้ำขั้นตอนดังกล่าวข้างต้นจนกระทั่งผลเฉลยเข้าสู่ค่าใดค่าหนึ่ง วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ช่วยให้ค่าความเร็วและความดันมีความสัมพันธ์เป็นไปตามการอนุรักษ์มวล และโมเมนตัม (Patankar, 1980)

## 2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Benyahia และคณะ (2000) เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อพฤติกรรมการไหลแก๊ส-ของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนในระบบสองมิติโดยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ ระบบมีความสูงของท่อโรเซออร์ 14.2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2 เมตร ใช้อุณหภูมิที่มีขนาด 76 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1,712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่า แบบจำลองที่ได้สามารถทำนายผลของการกระจายตัวของความหนาแน่นของแข็ง ปริมาณของแข็งในกระบวนการ ความดันลดภายในท่อโรเซออร์ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของการออกแบบทางเข้า-ทางออกของท่อโรเซออร์ โดยการออกแบบนี้ส่งผลสำคัญต่อลักษณะการไหลของแก๊ส-ของแข็งและการเกิดกลุ่มอนุภาคในท่อโรเซออร์ และยังได้ศึกษาผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อโรเซออร์ โดยเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ค่าความดันลดสูงขึ้นเนื่องจากมีของแข็งอยู่ในท่อโรเซออร์มากขึ้นนั่นเอง

Hansen และคณะ (2004) ศึกษาการจำลองในระบบสามมิติของปฏิริยาการสลายตัวของโอโซนในท่อโรเซออร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่มีความสูง 10.85 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.254 เมตร อุณหภูมิของแก๊สที่ใช้มีขนาด 71.2 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1,380 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยผลที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองและข้อมูลการจำลองในระบบสองมิติของผู้วิจัยอื่น พบว่า แบบจำลองสามารถทำนายความดันลดบริเวณด้านบนของท่อโรเซออร์ได้สอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง แต่บริเวณด้านล่างยังไม่ถูกต้องและยังต้องมีการปรับปรุง ในด้านของผลความเข้มข้นของโอโซนในท่อโรเซออร์ พบว่า แบบจำลองสามารถ

ทำนายได้ถูกต้องและสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการจำลองในระบบสองมิติพบว่าแบบจำลองในระบบสามมิติสามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่า

Almuttahir และ Taghipour (2008) เสนอแบบจำลองที่เหมาะสมเพื่ออธิบายอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียนในระบบสองมิติซึ่งมีขนาดความสูงของท่อไรเซอร์ 6.1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.076 เมตร ใช้อนุภาคขนาด 70 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรโดยมีภาวะการดำเนินการที่แตกต่างกัน คือ ฟลูอิดไชน์แบบความเร็วสูงที่มีปริมาณของแข็งสูง (High density fast fluidization) ฟลูอิดไชน์ที่มีปริมาณของแข็งต่ำ (Low density fluidization) และการไหลขึ้นแบบผสมที่มีปริมาณของแข็งสูง (Dense suspension up-flow) ซึ่งเป็นลักษณะการไหลที่ไม่มีกรไหลลงของของแข็งบริเวณผนัง อีกทั้งยังมีการกระจายตัวของของแข็งในแนวแกนที่สม่ำเสมอกว่าฟลูอิดไชน์แบบความเร็วสูง โดยใช้แบบจำลองที่ใช้กันทั่วไป พบว่า ในช่วงการไหลฟลูอิดไชน์แบบความเร็วสูงที่มีปริมาณของแข็งสูง แบบจำลองสามารถทำนายลักษณะการไหลภายในท่อไรเซอร์ได้เป็นที่น่าพอใจ และสอดคล้องกับผลการทดลอง ส่วนในช่วงการไหลขึ้นแบบผสมที่มีปริมาณของแข็งสูง และช่วงการไหลฟลูอิดไชน์ที่มีปริมาณของแข็งต่ำ แบบจำลองยังไม่สามารถทำนายผลได้ถูกต้อง

Wang และคณะ (2009) ศึกษาแบบจำลองในระบบสามมิติเพื่อดูลักษณะการเกิดปฏิกิริยาการผลิตแก๊สของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดที่มีความสูง 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.22 เมตร ถ่านหินที่ใช้มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย 0.62 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 1,250 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าพลังงานความร้อน 29,695 กิโลจูลต่อกิโลกรัม โดยวิฤภาคของแก๊สได้ใช้แบบจำลองความหนืดแบบปั่นป่วน ส่วนวิฤภาคของของแข็งใช้ทฤษฎีจลนการไหลของของแข็งในการจำลอง นอกจากสมการดุลมวลแล้วยังมีการใช้สมการดุลพลังงานเพื่อคำนวณความร้อนในแต่ละวิฤภาคและคำนวณการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างวิฤภาค ผลการจำลองจะพิจารณาลักษณะการไหล ความเร็วของแก๊ส ความเร็วของของแข็ง องค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ การกระจายตัวของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองจริง ดังนั้น แบบจำลองที่ใช้สามารถจำลองพฤติกรรมการไหลและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแก๊สของถ่านหินในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดได้อย่างดี

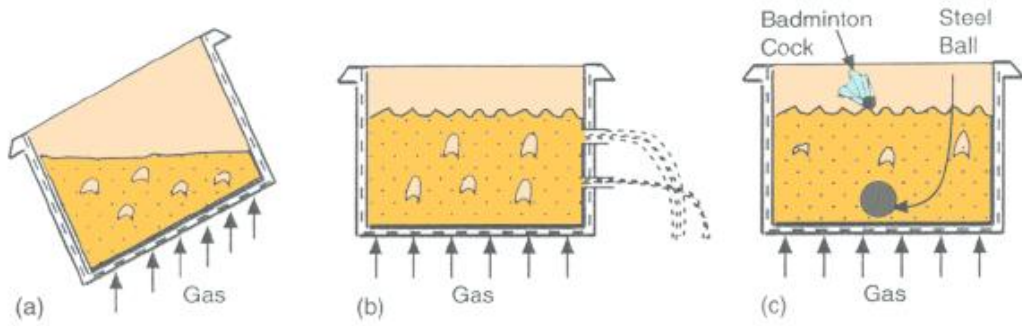
Hartge และคณะ (2009) ศึกษาการจำลองภาวะเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนในระบบสามมิติ ซึ่งท่อโรเซอ์สูง 8.5 เมตร มีขนาดพื้นที่ตัดขวางเท่ากับ 1 เมตร x 0.3 เมตร ใช้ขนาดอนุภาค 190 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 2,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ชั้นแรกได้ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการจำลองซึ่งประกอบด้วย ขนาดของพื้นที่การคำนวณ แบบจำลองความหนืด และแบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยทำการจำลองเปรียบเทียบกับการทดลองจริงซึ่งพบว่า ขนาดของพื้นที่การคำนวณที่เหมาะสมที่จะไม่ส่งผลต่อการจำลองมีค่าเท่ากับ 45,365 เซลล์ ในส่วนของแบบจำลองความหนืดที่ให้ค่าการกระจายตัวของของแข็งบริเวณด้านล่างของท่อโรเซอ์ใกล้เคียงกับการทดลอง คือ แบบจำลองแบบปั่นป่วนของ RNG  $k-\epsilon$  ในส่วนแบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุที่เหมาะสม คือ แบบจำลองของ EMMS เนื่องจากสามารถทำนายผลที่บริเวณส่วนล่างของท่อโรเซอ์ได้ใกล้เคียงกับการทดลองเช่นกัน จากนั้น ได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองภาวะด้วยตัวแปรที่เหมาะสมกับการทดลอง พบว่า แบบจำลองสามารถทำนายการกระจายตัวของของแข็ง สัดส่วนปริมาตรของแข็ง และความเร็วของแข็งได้ถูกต้องตามทฤษฎีและสอดคล้องกับการทดลองจริง

Armstrong และคณะ (2010) ใช้แบบจำลองศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนซึ่งมีความสูงของท่อโรเซอ์ 1 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.032 เมตร ขนาดอนุภาคที่ใช้เท่ากับ 60 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยได้ทำการศึกษาในช่วงการไหลแบบฟองแก๊สไปสู่ช่วงการไหลฟลูอิโดเบดแบบความเร็วสูงทั้งในระบบสองมิติและสามมิติ ในชั้นแรกได้มีการหาค่า Specularity coefficient ที่เหมาะสม พบว่า ค่า Specularity coefficient ที่เหมาะสมกับการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.25 ดังนั้น จึงจะใช้ค่านี้อ้างอิงในส่วนต่อไป จากนั้นได้ศึกษาผลของแบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองของ Gidaspow กับ EMMS ซึ่งพบว่าแบบจำลองของ EMMS สามารถทำนายผลการเกิดกลุ่มก้อนบริเวณผนังของระบบสามมิติได้ดีกว่าของ Gidaspow อย่างไรก็ตาม เมื่อเทียบผลที่ได้ระหว่างระบบสองมิติและสามมิติผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกันและใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองจริง

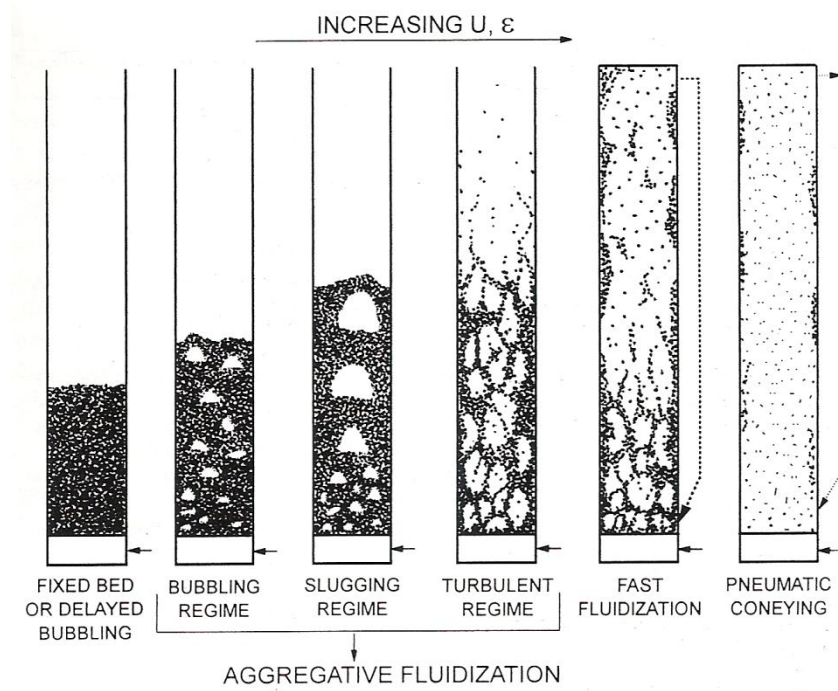
Esmaili และ Mahinpey (2011) จำลองระบบฟลูอิโดเบดแบบฟองแก๊สในระบบสามมิติ ซึ่งท่อโรเซอ์มีความสูง 1.2 เมตร กว้าง 0.280 เมตร ยาว 1.2 เมตร ลึก 0.0254 เมตร อนุภาคที่ใช้มีขนาด 275 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 2,500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยศึกษาผลของ

แบบจำลองแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัตถุที่แตกต่างกัน 12 กรณี (Richardson and Zaki, Wen–Yu, Gibilaro, Gidaspow, Syamlal–O’Brien, Arastoopour, RUC, Di Felice, Hill Koch Ladd, Zhang and Reese, Syamlal ที่ปรับปรุงใหม่ และ Di Felice ที่ปรับปรุงใหม่) ผลจากการจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองซึ่งได้แก่ ความดันลดและอัตราส่วนการขยายตัวของเบด พบว่า ทุกแบบจำลองให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง โดยแบบจำลองของ Di Felice ที่ปรับปรุงใหม่ให้การทำนายที่ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบผลของการจำลองในระบบสามมิติและสองมิติ พบว่า ทั้งสองระบบให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองเพียงแต่การทำนายในระบบสามมิติมีความแม่นยำมากกว่าเนื่องจากผลของสมการควบคุมในระบบสามมิติพิจารณาผลของความลึกด้วย

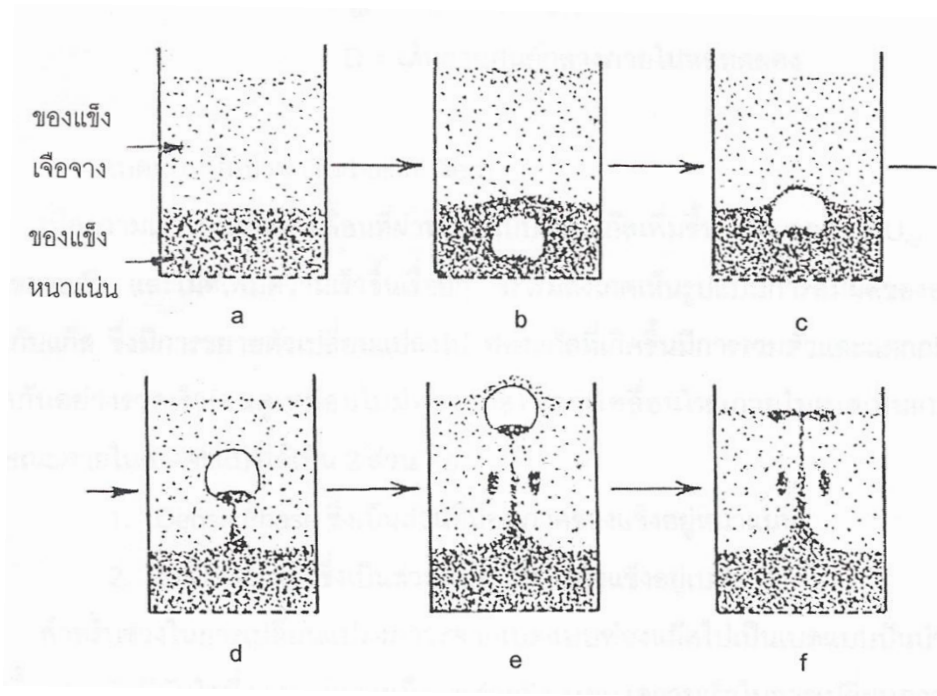




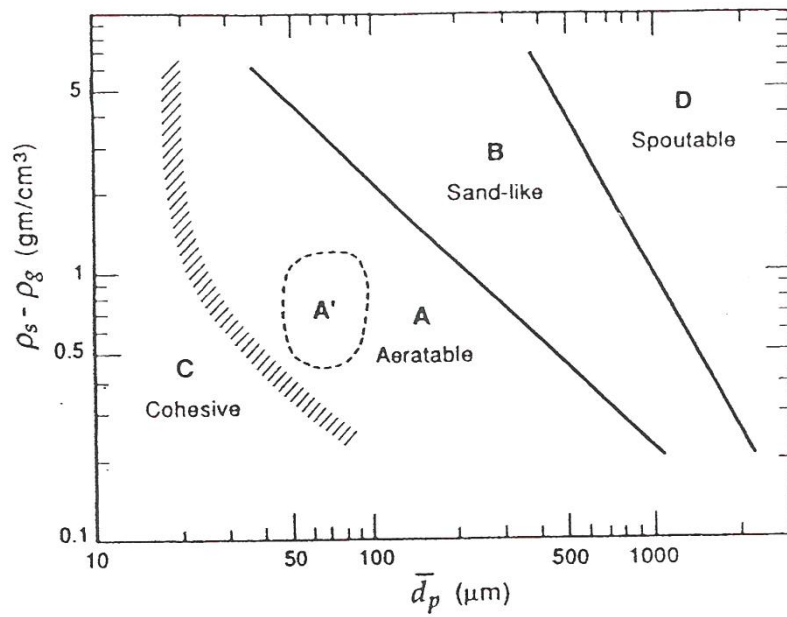
ภาพที่ 2.1 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิไดซ์เบด (Basu, 2006)



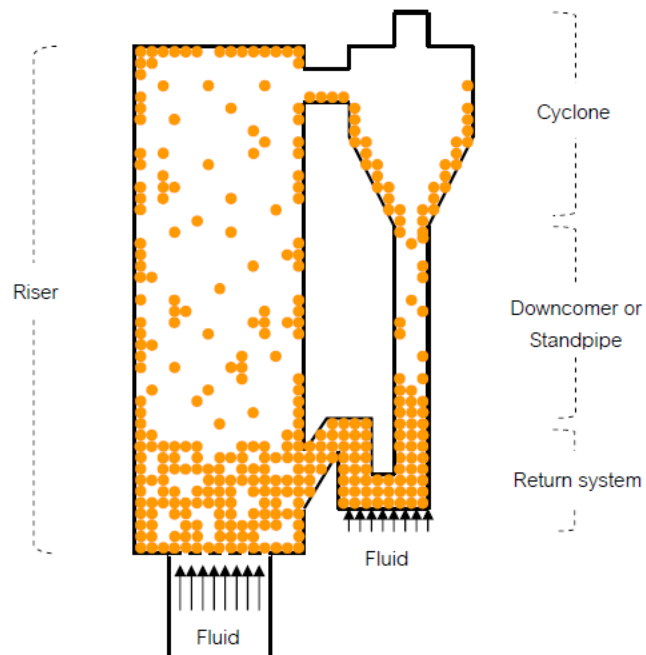
ภาพที่ 2.2 แสดงช่วงการไหลสำหรับฟลูอิไดซ์ชันแบบต่างๆ (Grace, 1997)



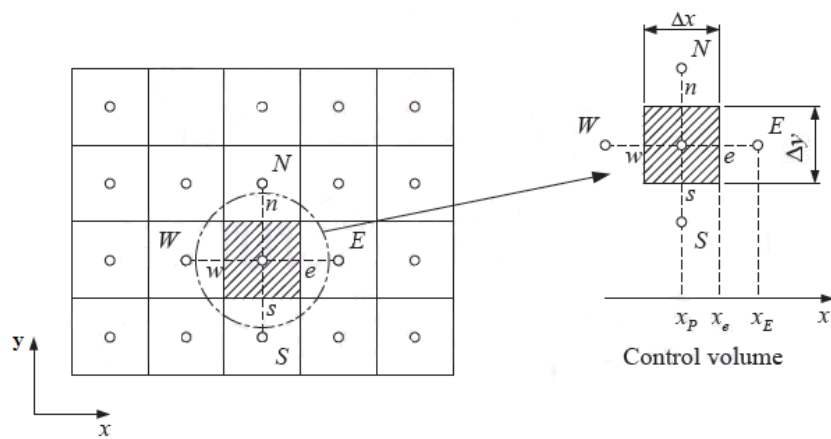
ภาพที่ 2.3 ลักษณะการเกิดการผสมของของแข็งในระบบฟลูอิไดเซชันแบบฟองแก๊ส (Kunii และ Levenspiel, 1991)



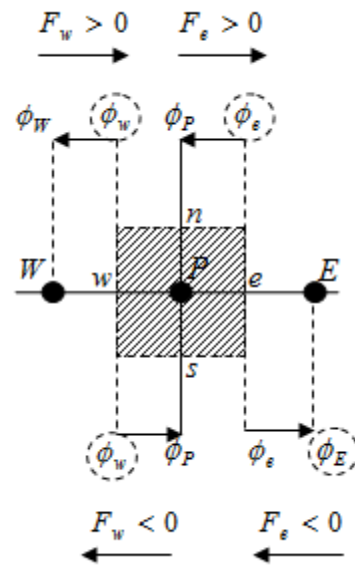
ภาพที่ 2.4 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart (Grace, 1997)



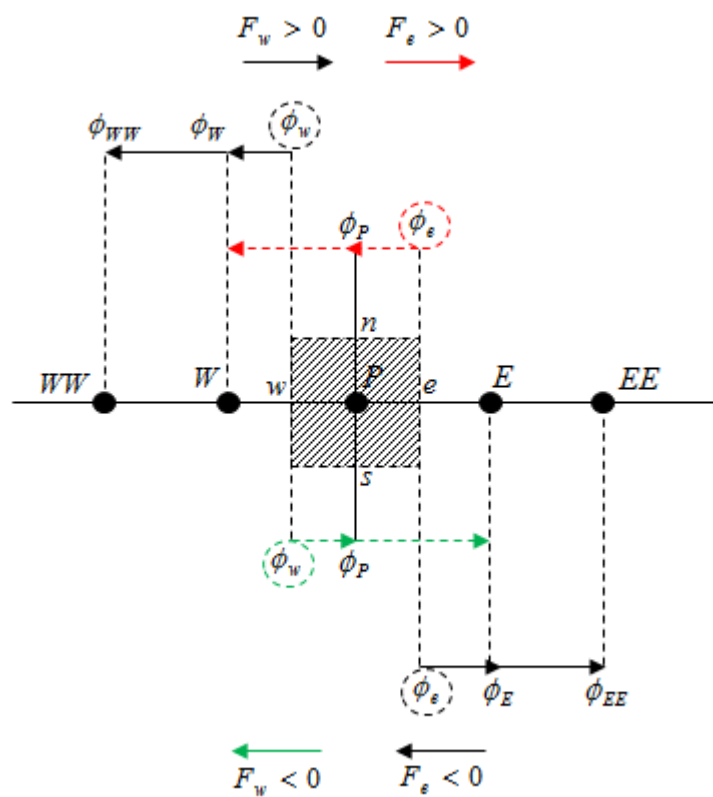
ภาพที่ 2.5 ระบบฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed: CFB)  
(Chalermssinsuwan, 2009).



ภาพที่ 2.6 ขอบเขตของปัญหาที่ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์  
วอลุ่ม (Patankar, 1980)



ภาพที่ 2.7 แสดงการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่หนึ่ง



ภาพที่ 2.8 แสดงการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีผลต่างต้นลมอันดับที่สอง

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การสร้างแบบจำลองและรายละเอียดแบบจำลอง

แบบจำลองถูกสร้างมาจากข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) ดังแสดงในภาพที่ 3.1(ก) โดยจะทำการสร้างแบบจำลองกราฟิกเป็นตัวแทนของเครื่องปฏิกรณ์ด้วยโปรแกรม Gambit 2.2.30 เพื่อให้ผู้ใช้สามารถสร้างแบบจำลองกราฟิกของอุปกรณ์ที่ต้องการศึกษาได้ ตัวโปรแกรมจะทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดพื้นที่การเกิดกิจกรรมต่างๆ โดยผู้ใช้จะต้องกำหนดภาวะขอบต่างๆ เพื่อเป็นค่าตั้งต้นสำหรับการแก้ปัญหาเพื่อหาผลเฉลยต่อไป เมื่อสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตเสร็จแล้ว จะทำการแบ่งปริมาตรของอุปกรณ์เหล่านี้ออกเป็นหน่วยปริมาตรเล็กๆ จำนวนมากที่เชื่อมต่อกัน จากนั้นจะนำแบบจำลองที่ได้ไปเข้าสู่การคำนวณจำลองภาวะด้วยโปรแกรม ANSYS® FLUENT® เพื่อทำการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในการจำลองภาวะต่อไป สามารถสรุปขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองคำนวณการไหลได้ดังนี้ คือ

1. การสร้างแบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่กำหนดพื้นที่และขอบเขตการไหลด้วยโปรแกรม Gambit 2.2.30
2. การจำลองภาวะด้วยโปรแกรม ANSYS® FLUENT®

##### 3.1.1 การสร้างแบบจำลองการไหลโดยโปรแกรม Gambit

การทดลองได้ทำในหอฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน ท่อไรเซอร์มีความสูง 14.20 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 0.20 เมตร ทางเข้าของอนุภาคของแข็งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.20 เมตรเหนือด้านล่างขึ้นไป 0.30 เมตร ขณะที่ทางออกของอนุภาคของแข็งมีขนาดเท่ากับ 0.20 เมตร เช่นเดียวกันและอยู่ต่ำกว่าด้านบนของท่อไรเซอร์ 0.30 เมตร ภูมิภาคแก๊สจะถูกป้อนเข้าที่ด้านล่างของท่อไรเซอร์และออกจากเครื่องปฏิกรณ์ที่บริเวณด้านข้างทางส่วนบนของระบบ ขณะที่อนุภาคของแข็งจะถูกป้อนเข้าที่ทางเข้าด้านข้างเหนือด้านล่างของท่อไรเซอร์และออกที่ทางออกด้านบน เช่นเดียวกันกับภูมิภาคแก๊ส ดังแสดงในภาพที่ 3.1(ข) แบบจำลองเชิงเรขาคณิตที่สร้างขึ้นมาใช้ศึกษาประกอบด้วยเซลล์คำนวณเท่ากับ 26,184, 51,789 และ 98,005 เซลล์ โดยใช้ลักษณะเซลล์การคำนวณแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral)

### 3.1.2 การจำลองภาวะด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT

การจำลองภาวะการไหลจะต้องมีข้อมูลของวัสดุที่ใช้และค่าตัวแปรการตั้งค่าต่างๆ ที่จำเป็นเพื่อสามารถคำนวณรูปแบบการไหลได้อย่างถูกต้อง โดยอนุภาคของแข็งที่ถูกจัดให้เป็นอนุภาค Geldart A ซึ่งเป็นตัวเร่งที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์การแตกตัวของไอน้ำมัน ( Fluid catalytic cracking ) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 76 ไมโครเมตร และความหนาแน่นเท่ากับ 1,712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขณะที่แก๊สที่ใช้คืออากาศซึ่งมีความหนาแน่น 1.20 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีความหนืด  $2 \times 10^{-5}$  กิโลกรัมต่อเมตรวินาที

ในการจำลองจะศึกษาระบบแบบ 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคแก๊สกำหนดให้เป็นอากาศ และภูมิภาคของแข็งกำหนดให้เป็นตัวเร่งที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์การแตกตัวของไอน้ำมัน (FCC) การแก้ปัญหาจะเป็นวิธีการคำนวณแบบสามมิติ กระบวนการแก้ปัญหาจะเริ่มที่โปรแกรมทำการรับค่าคุณสมบัติต่างๆ และภาวะขอบ (Boundary condition) ของแต่ละภูมิภาคที่ต้องใช้ในการคำนวณ โดยในการคำนวณครั้งแรกโปรแกรมจะรับค่าภาวะเริ่มต้นที่กำหนดเข้ามา (Initial condition) เพื่อเป็นค่าตั้งต้นของการคำนวณ จากนั้น ในการคำนวณครั้งต่อไปโปรแกรมจะรับค่าจากผลการคำนวณที่ได้จากขั้นการคำนวณก่อนหน้า โดยเมื่อโปรแกรมรับค่าเข้ามาแล้วจะทำการแก้สมการโมเมนต์เพื่อที่จะหาค่าความเร็ว หลังจากนั้นจะนำค่าความเร็วที่ได้ไปทำการตรวจสอบและปรับค่าความดัน (Pressure-correction) ด้วยวิธีการแก้ปัญหาแบบ SIMPLE เมื่อทำการปรับปรุงและแก้ไขเสร็จแล้วจะทำการปรับปรุงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณด้วยค่าที่คำนวณได้ใหม่ และทำการแก้ปัญหา สมการการไหล และสมการเชิงสเกลาร์อื่น (Scalar Equation) ในขั้นตอนสุดท้ายของการคำนวณจะทำการตรวจสอบค่าที่ได้จากการคำนวณว่าลู่เข้าหรือไม่โดยตรวจสอบจากค่าตกค้าง (Residual) ถ้าผลลัพธ์การคำนวณที่ได้ในรอบนั้นยังไม่ลู่เข้าจะทำการนำค่าที่ได้กลับไปเป็นค่าตั้งต้นสำหรับการคำนวณในรอบต่อไป (Iteration) จนกว่าค่าที่ได้จะลู่เข้า หรือเกินจำนวนรอบมากที่สุด (Maximum Iteration) ที่กำหนดไว้ โดยค่าที่ลู่เข้าแล้วก็จะนำไปใช้ในการคำนวณขั้นเวลาต่อไป

ขั้นเวลาของการคำนวณ (Time step) ที่ใช้ที่เหมาะสมจะถูกจำกัดโดยค่า Courant number เพื่อให้มีความถูกต้องในการคำนวณทางตัวเลข การลู่เข้า และความเสถียร โดยขั้นเวลาที่ใช้มีค่าเท่ากับ  $1.00 \times 10^{-3}$  วินาที พร้อมทั้งการทำซ้ำ 100 ครั้งต่อหนึ่งเวลาคำนวณ แบบจำลองจะถูกแก้โดยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วของซีพียูแบบ Intel® Core™ i3 มีสัญญาณนาฬิกาเท่ากับ 3.20 กิกะเฮิร์ต หน่วยความจำแรมเท่ากับ 8 กิกะไบต์ โดยการคำนวณในระบบสามมิติจะใช้เวลา

การคำนวณจริงทั้งหมด 15 วันสำหรับการจำลองกระบวนการทั้งหมด 30 วินาที โดยรายละเอียดของระบบและข้อมูลของตัวแปรที่ใช้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

### 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการจำลองได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT ในการจำลองกระบวนการ โดยจะแก้สมการอนุพันธ์มวล และอนุพันธ์โมเมนตัม ร่วมกับสมการประกอบจากทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็ง (Ding และ Gidaspow, 1990; Khoe และคณะ, 1991; Gidaspow, 1994; Taghipour และคณะ, 2005; Benyahia, 2008; Wang, 2009) โดยในการสร้างแบบจำลองการไหลของสองวัฏภาค แก๊ส-ของแข็ง จะมีแนวคิดที่ใช้ในการคำนวณอยู่ 2 วิธี คือ

#### 1. การคำนวณแบบ ออยเลอร์เรียน-ออยเลอร์เรียน (Eulerian-Eulerian method)

การคำนวณแบบนี้ทั้งสองวัฏภาคจะถูกพิจารณาเป็นของไหลที่ต่อเนื่อง จะนำสมการอนุพันธ์มวลและโมเมนตัม ของทั้งสองวัฏภาคในรูปของสมการ Navier-Stokes มาคำนวณพร้อมกัน โดยจะแก้สมการร่วมระหว่างวัฏภาคผ่านความดันและสัมประสิทธิ์การแลกเปลี่ยนระหว่างวัฏภาค (Interphase exchange coefficient) ซึ่งสมบัติทางกายภาพของวัฏภาคของแข็งที่จะต้องใส่เข้าไป (เช่น ความหนืด และความดัน) จะคำนวณจากสมการอย่างง่าย (Empirical model จากผลการทดลอง) หรือจากทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็ง วิธีการนี้เหมาะกับระบบที่มีอนุภาคเป็นจำนวนมาก เช่น ระบบฟลูอิดไอซ์เบด (Gidaspow, 1994; Enwald และคณะ, 1996; Kuipers และ Van Swaaij, 1997; Wachem และคณะ, 2003)

#### 2. การคำนวณแบบ ลากรานเจียน-ออยเลอร์เรียน (Lagrangian-Eulerian method)

การคำนวณแบบนี้วัฏภาคของแข็งจะถูกกำหนดเป็น Source terms ในสมการวัฏภาคแก๊ส (ทั้งสมการอนุพันธ์มวลและโมเมนตัม) ค่าต่างๆ ของวัฏภาคของแข็งจึงคำนวณจากสมการวัฏภาคแก๊ส โดยจะพิจารณาวัฏภาคแก๊สเป็นของไหลต่อเนื่องโดยการแก้สมการ Navier-Stokes และจะทำการคำนวณเส้นทางและการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละอนุภาค ด้วยสมการการเคลื่อนที่ของ Newton วิธีการนี้จำเป็นต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์จำนวนมากและใช้เวลาในการคำนวณนาน จึงไม่เหมาะสมกับระบบที่มีอนุภาคจำนวนมาก ในปัจจุบันสามารถจำลองระบบที่มีอนุภาคไม่เกิน  $10^{12}$  อนุภาค (Hoomans และคณะ, 1996; Crowe และคณะ, 1998; Kafui และคณะ, 2002; Wachem และคณะ, 2003)

จากที่ได้กล่าวไปในระบบฟลูอิดไอซ์เบดที่มีปริมาณของแข็งปริมาณมากจึงได้ใช้การคำนวณแบบ ออยเลอร์เรียน-ออยเลอร์เรียน ในการคำนวณ ซึ่งในการใช้วิธีการคำนวณแบบนี้

ทฤษฎีจลนการไหลของของแข็ง (Kinetic Theory of Granular Flow: KTGF) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อกำหนดค่าความดันและความหนืดของของแข็ง ทฤษฎีนี้มีพื้นฐานมาจากการขยายขอบเขตของทฤษฎีจลนการไหลของแก๊ส (Kinetic Theory of Gas) ด้วยการเพิ่มผลของพลังงานจลนการกวัดแกว่งของของแข็งและการอธิบายการชนกันของของแข็งแบบไม่ยืดหยุ่น โดยจะตั้งสมมติฐานว่าอนุภาคของแข็งมีพฤติกรรมคล้ายโมเลกุลแก๊สตามทฤษฎีจลนของแก๊ส กล่าวคือ โดยปกติโมเลกุลของแก๊สจะมีการเคลื่อนแบบสุ่ม (Random motion) ด้วยความเร็วไม่เท่ากันและไม่คงที่ โมเลกุลของแก๊สอาจจะกระทบผนังบ้าง ประทะหรือชนกันเองบ้าง ความเร็วของโมเลกุลแก๊สจึงเปลี่ยนแปลงทุกครั้งที่มีการชนกัน การถ่ายโอนโมเมนตัมและเปลี่ยนทิศทางขึ้นกับลักษณะการชนของโมเลกุลในสภาพที่แท้จริงนั้นแก๊สย่อมมีโอกาสชนกันหลายลักษณะไม่เป็นระเบียบ ขึ้นอยู่กับทิศทางและความเร็วของการชน แต่ความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลนของโมเลกุลทั้งหมดในแก๊สนั้นมีค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิคงที่ การชนในลักษณะที่ความเร็วเฉลี่ยและพลังงานจลนเฉลี่ยคงที่ เรียกรวมการชนแบบนี้ว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic collision) สำหรับอนุภาคของแข็ง ในขณะที่อนุภาคชนมีการกั๊กหรืออนุภาคชนกับผนัง นอกจากมีการถ่ายโอนโมเมนตัมให้กันและกันแล้ว ยังมีการสูญเสียทั้งความเร็วและพลังงานจลน โดยพลังงานจลนที่เสียไปจะกลายเป็นความร้อน เรียกรวมการชนแบบนี้ว่า การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic collision) ซึ่งทฤษฎีจลนการไหลของของแข็งจะมีการคำนวณพลังงานที่หายไปเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่นนี้ผ่านทางค่า Restitution coefficient ซึ่งการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน (ความเร็ว) ของของแข็ง (อุณหภูมิแกรนูลลาร์ (Granular temperature),  $\theta$ ) จะคำนวณโดยแก้สมการการถ่ายโอนของอุณหภูมิแกรนูลลาร์เพิ่มในชุดสมการของวิภูภาคของแข็ง จากนั้น จึงนำค่าอุณหภูมิแกรนูลลาร์ที่ได้ไปคำนวณค่าในสมการช่วยอื่นต่อไป สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณได้สรุปไว้ดังข้างล่าง

### 3.2.1 สมการควบคุมที่ใช้ในการคำนวณ (Governing equation)

#### 3.2.1.1 สมการอนุรักษ์มวล (Mass conservation equations)

วิภูภาคแก๊ส

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



วิญญากาศของแข็ง

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

และ

$$\varepsilon_g + \varepsilon_s = 1 \quad (3.3)$$

เมื่อ

- $\varepsilon_s$  คือ สัดส่วนปริมาตรของวิญญากาศของแข็ง (-)
- $\varepsilon_g$  คือ สัดส่วนปริมาตรของวิญญากาศภาคแก๊ส (-)
- $v_s$  คือ ความเร็วของวิญญากาศของแข็ง (เมตรต่อวินาที)
- $v_g$  คือ ความเร็วของวิญญากาศของแก๊ส (เมตรต่อวินาที)
- $t$  คือ เวลา (วินาที)

### 3.2.1.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (Momentum conservation equations)

วิญญากาศแก๊ส

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g v_g) + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g v_g v_g) = -\varepsilon_g \nabla P + \nabla \cdot \tau_g + \varepsilon_g \rho_g g - \beta_{gs}(v_g - v_s) \quad (3.4)$$

วิญญากาศของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_s \rho_s v_s) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s v_s v_s) = -\varepsilon_s \nabla P + \nabla \cdot \tau_s - \nabla P_s + \varepsilon_s \rho_s g + \beta_{gs}(v_g - v_s) \quad (3.5)$$

- เมื่อ  $P$  คือ ความดันกระบวนกรรวม (พาสคาล)
- $P_s$  คือ ความดันของวิญญากาศของแข็ง (พาสคาล)

$\tau_g$	คือ ความเค้นเทนเซอร์ของวัฏภาคแก๊ส (พาสคาล)
$\tau_s$	คือ ความเค้นเทนเซอร์ของวัฏภาคของแข็ง (พาสคาล)
$\beta_{gs}$	คือ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (Interphase exchange coefficient) (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสามวินาที)

### 3.2.1.3 สมการพลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็ง

(Solid fluctuating kinetic energy conservation equation)

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_s \rho_s \theta) + \nabla \cdot (\varepsilon_s \rho_s \theta) v_s \right] = (-\nabla P_s \bar{I} + \tau_s) : \nabla v_s + \nabla \cdot (\kappa_s \nabla \theta) - \gamma_s \quad (3.6)$$

โดยที่ $\theta$	คือ พลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็ง (เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง)
$\kappa_s$	คือ พลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการนำ (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)
$\gamma_s$	พลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (กิโลกรัมต่อเมตรวินาทีกำลังสาม)

## 3.2.2 สมการประกอบที่ใช้ในการคำนวณ (Constitutive equations)

### 3.2.2.1 ความเค้นเทนเซอร์ ( $\tau$ )

วัฏภาคแก๊ส

$$\tau_g = \varepsilon_g \mu_g \left[ \nabla v_g + (\nabla v_g)^T \right] - \frac{2}{3} \varepsilon_g \mu_g (\nabla \cdot v_g) I \quad (3.7)$$

วัฏภาคของแข็ง

$$\tau_s = \varepsilon_s \mu_s \left[ \nabla v_s + (\nabla v_s)^T \right] - \varepsilon_s \left( \xi_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) (\nabla \cdot v_s) I \quad (3.8)$$

เมื่อ	$I$	คือ เทนเซอร์เอกลักษณะ (-)
	$\xi_s$	คือ ความหนืดรวมในวัฏภาคของแข็ง (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)
	$\mu_s$	คือ ความหนืดเนื่องจากความเค้นของวัฏภาคของแข็ง (กิโกรัมต่อเมตรวินาที)

### 3.2.2.2 ความหนืดรวมในวัฏภาคของแข็ง ( $\xi_s$ )

โดยที่ความหนืดรวมในวัฏภาคของแข็งเป็นตัวแปรที่แสดงความต้านทานต่อการอัดและการขยายตัวของอนุภาคซึ่งได้ถูกนิยามไว้ดังนี้

$$\xi_s = \frac{4}{3} \varepsilon_s \rho_s d_p g_0 (1+e) \sqrt{\frac{\theta}{\pi}} \quad (3.9)$$

### 3.2.2.3 ความหนืดเนื่องจากความเค้นของวัฏภาคของแข็ง ( $\mu_s$ )

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

### 3.2.2.4 ความดันของวัฏภาคของแข็ง ( $P_s$ )

ในพจน์ของความดันในวัฏภาคของแข็ง  $P_s$  จะประกอบด้วยพจน์ของพลังงานจลน์ซึ่งมีผลในบริเวณที่เฉื่อยและพจน์ของการชนที่มีผลในบริเวณที่หนาแน่น ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$P_s = \varepsilon_s \rho_s \theta [1 + 2g_0 \varepsilon_s (1+e)] \quad (3.11)$$

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

เมื่อ	$e$	คือ Restitution Coefficient (-)
	$g_0$	คือ ฟังก์ชันการกระจายของอนุภาคของแข็งในแนวรัศมี โดยเป็นตัวบ่งชี้ถึงความน่าจะเป็นของการชนระหว่างอนุภาคของแข็งเมื่ออนุภาคมีความหนาแน่น (-)

$\varepsilon_{s,max}$  คือ สัดส่วนปริมาตรในวัฏภาคของแข็งที่มีการอัดตัวแน่นมากที่สุด (-)

3.2.2.5 พลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการนำ ( $\kappa_s$ )

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

3.2.2.6 พลังงานจลน์การกวัดแกว่งของของแข็งเนื่องจากการชนแบบไม่ยืดหยุ่น ( $\gamma_s$ )

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

3.2.3 แบบจำลองสัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (Interphase exchange coefficient model) ( $\beta_{gs}$ )

3.2.3.1 สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคของ Gidaspow:

สำหรับ  $\varepsilon_g \leq 0.8$ ,

$$\beta_{gs} = 150 \frac{(1-\varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_g) \rho_g |v_g - v_s|}{d_p} \quad (3.15)$$

สำหรับ  $\varepsilon_g > 0.8$ ,

$$\beta_{gs} = \frac{3}{4} \frac{(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{d_p} \rho_g |v_g - v_s| C_{D0} \varepsilon_g^{-2.65} \quad (3.16)$$

โดยที่

$Re < 1000$ ,

$$C_{D0} = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}); \quad Re = \frac{\rho_g \varepsilon_g |v_g - v_s| d_p}{\mu_g} \quad (3.17)$$

$Re \geq 1000$ ,

$$C_{D0} = 0.44 \quad (3.18)$$

### 3.2.3.2 สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคของ

Syamlal:

$$\beta_{gs} = \frac{3}{4} \frac{(1 - \varepsilon_g) \varepsilon_g}{v_{r,s}^2 d_p} \rho_g \frac{Re_s}{v_{r,s}} C_D |v_g - v_s| \quad (3.19)$$

โดยที่  $v_{r,s}$  คือ Terminal velocity correlation สำหรับวัฏภาคของแข็ง (เมตรต่อวินาที)

$$v_{r,s} = 0.5 \left( A - 0.06 Re_s + \sqrt{(0.06 Re_s)^2 + 0.12 Re_s (2B - A) + A^2} \right) \quad (3.20)$$

ซึ่ง

$$C_D = \left( 0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_s / v_{r,s}}} \right)^2; \quad Re_s = \frac{\varepsilon_g |v_g - v_s| d_p}{\mu_g}; \quad A = \varepsilon_g^{4.14} \quad (3.21)$$

และสำหรับ  $\varepsilon_g \leq 0.85$ ,

$$B = 0.8 \varepsilon_g^{1.28} \quad (3.22)$$

สำหรับ  $\varepsilon_g > 0.85$ ,

$$B = \varepsilon_g^{2.65} \quad (3.23)$$

3.2.3.3 สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคของ

Wen&Yu:

$$\beta_{gs} = \frac{3(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{4d_p} \rho_g |v_g - v_s| C_{D0} \varepsilon_g^{-2.65} \quad (3.24)$$

3.2.3.4 สัมประสิทธิ์ของแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคของ EMMS

(Energy Minimization Multi-Scale):

สำหรับ  $\varepsilon_g \leq 0.74$ ,

$$\beta_{gs} = 150 \frac{(1-\varepsilon_g)^2 \mu_g}{\varepsilon_g d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon_g) \rho_g |v_g - v_s|}{d_p} \quad (3.25)$$

สำหรับ  $\varepsilon_g > 0.74$ ,

$$\beta_{gs} = \frac{3(1-\varepsilon_g)\varepsilon_g}{4d_p} \rho_g |v_g - v_s| C_{D0} \omega(\varepsilon_g) \quad (3.26)$$

โดยที่

สำหรับ  $0.74 < \varepsilon_g \leq 0.82$ ,

$$\omega(\varepsilon_g) = -0.5769 + \frac{0.0214}{4(\varepsilon_g - 0.7463)^2 + 0.0044} \quad (3.27)$$

สำหรับ  $0.82 < \varepsilon_g \leq 0.97$ ,

$$\omega(\varepsilon_g) = -0.0101 + \frac{0.0038}{4(\varepsilon_g - 0.7789)^2 + 0.0040} \quad (3.28)$$

และสำหรับ  $\varepsilon_g > 0.97$ ,

$$\omega(\varepsilon_g) = -31.8295 + 32.8295\varepsilon_g \quad (3.29)$$

### 3.3 ภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบ

ในการทำการจำลองภาวะจะต้องทำการกำหนดค่าภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบที่ใช้ในการจำลอง ในตอนเริ่มต้น ความเร็วแก๊สและสัดส่วนปริมาตรของแต่ละวัฏภาคภายในท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนเวียนจะถูกกำหนดค่าไว้ค่าหนึ่งดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ที่บริเวณทางเข้าวัฏภาคแก๊สความเร็วแก๊สขาเข้าถูกกำหนดให้เป็นแบบไม่สม่ำเสมอ (มีลักษณะเป็นพาราโบลา) และแบบความเร็วสม่ำเสมอ (มีลักษณะความเร็วเท่ากันตลอดพื้นที่หน้าตัดทางเข้า) ส่วนที่บริเวณทางเข้าของวัฏภาคของแข็งความเร็วขาเข้าถูกกำหนดให้เป็นแบบสม่ำเสมอ โดยนำค่ามาจากข้อมูลการทดลองจริง ที่บริเวณทางออก ภาวะขอบเขตที่ใช้มีค่าเท่ากับความเร็วบรรยากาศ ที่บริเวณผนังของระบบ จะมีการกำหนดภาวะแบบ No-slip ยกเว้นสำหรับความเร็วแนวสัมผัส (Tangential velocity) ของวัฏภาคของแข็ง และอนุภูมิภาคอนุคลาร์ จะถูกกำหนดภาวะขอบเขตตามแบบของ Sinclair และ Jackson (1989) ตามสมการข้างล่าง

$$v_{t,W} = -\frac{6\mu_s \varepsilon_{s,\max}}{\pi\phi_s \varepsilon_s g_0 \sqrt{3\theta}} \frac{\partial v_{s,W}}{\partial n} \quad (3.30)$$

และ

$$\theta_W = -\frac{\kappa_s \theta}{\gamma_W} \frac{\partial \theta_W}{\partial n} + \frac{\sqrt{3}\pi\phi_s \varepsilon_s v_{s,\text{slip}}^2 g_0 \theta^{\frac{3}{2}}}{6\varepsilon_{s,\max} \gamma_W} \quad (3.31)$$

โดยที่

$$\gamma_w = \frac{\sqrt{3}\pi(1-e_w^2)\epsilon_s\rho_s g_0\theta^{3/2}}{4\epsilon_{s,\max}} \quad (3.32)$$

เมื่อ

- $v_{s,w}$  คือ ความเร็วของวงกลมของแข็งที่บริเวณผนัง (เมตรต่อวินาที)
- $\phi$  คือ ค่า Specularity Coefficient (-)
- $n$  คือ เวกเตอร์เอกลักษณะ (-)
- $v_{s,slip}$  คือ ความเร็วเลื่อนไหลของวงกลมของแข็งที่บริเวณผนัง (เมตรต่อวินาที)
- $e_w$  คือ Restitution Coefficient ระหว่างอนุภาคกับผนัง (-)

### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

ในการจำลองภาวะท่อไรเซอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอดีซ์แบบหมุนเวียนในระบบสามมิติโดยใช้โปรแกรมจำลองกระบวนการสำเร็จรูป ANSYS® FLUENT® จะทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) อันได้แก่ ผลของความดันตกภายในท่อไรเซอร์ ผลของปริมาณฟลักซ์ของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตร และ ผลของความหนาแน่นของของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.3-3.5 โดยตัวแปรที่จะทำการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 ตัวแปรออกแบบ (Designing parameters)

##### 3.4.1.1 ผลของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้า

###### 3.4.1.1.1 ปรับเปลี่ยนการเปิดช่องว่างของทางเข้า

- 1) 25 เปอร์เซ็นต์
- 2) 50 เปอร์เซ็นต์
- 3) 75 เปอร์เซ็นต์
- 4) 100 เปอร์เซ็นต์

###### 3.4.1.1.2 ปรับเปลี่ยนลักษณะรูปร่างความเร็วการป้อนเข้าที่แตกต่างกัน

- 1) รูปร่างความเร็วมีลักษณะป้าน
- 2) รูปร่างความเร็วมีลักษณะโค้ง
- 3) รูปร่างความเร็วมีลักษณะแหลม



#### 3.4.1.2 ผลของขนาดรัศมีทางออกของท่อไรเซอร์

- 1) 0.025 เมตร (25 เปอร์เซ็นต์เทียบกับรัศมีของท่อไรเซอร์)
- 2) 0.050 เมตร (50 เปอร์เซ็นต์เทียบกับรัศมีของท่อไรเซอร์)
- 3) 0.075 เมตร (75 เปอร์เซ็นต์เทียบกับรัศมีของท่อไรเซอร์)
- 4) 0.100 เมตร (100 เปอร์เซ็นต์เทียบกับรัศมีของท่อไรเซอร์)

### 3.4.2 ตัวแปรแบบจำลอง (Modeling parameters)

#### 3.4.2.1 ผลของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค (Drag model)

- 5) Gidaspow drag model
- 6) Syamlal drag model
- 7) Wen&Yu drag model
- 8) EMMS drag model

#### 3.4.2.2 ผลของ Specularity coefficient

- 1) 0.50
- 2) 0.10
- 3) 0.001
- 4) 0.0001

#### 3.4.2.3 ผลของ Restitution coefficient

- 1) 0.95
- 2) 0.90
- 3) 0.80
- 4) 0.50

#### 3.4.2.4 ผลของแบบจำลองความหนืด (Viscous model)

- 1) Laminar
- 2) Turbulent

#### 3.4.2.5 ผลของความหนืดเสียดทาน (Frictional viscosity)

- 1) None
- 2) Schaeffer

#### 3.4.2.6 ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้า (Inlet granular temperature)

- 1) 0.01 เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง

- 2) 0.001 เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง
- 3) 0.0001 เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง
- 4) 0.00001 เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง

#### 3.4.2.7 ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบ (Packing limit)

- 1) 0.56
- 2) 0.60
- 3) 0.64

### 3.4.3 ตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters)

#### 3.4.3.1 ผลของความเร็วแก๊สขาเข้า

- 1) 5.2 เมตรต่อวินาที
- 2) 7.2 เมตรต่อวินาที
- 3) 11.0 เมตรต่อวินาที

#### 3.4.3.2 ผลของปริมาณฟลักซ์ของแข็ง

- 1) 196 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที
- 2) 489 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที
- 3) 721 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

#### 3.4.3.3 ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง

- 1) 46 ไมโครเมตร
- 2) 76 ไมโครเมตร
- 3) 106 ไมโครเมตร

#### 3.4.3.4 ผลของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง

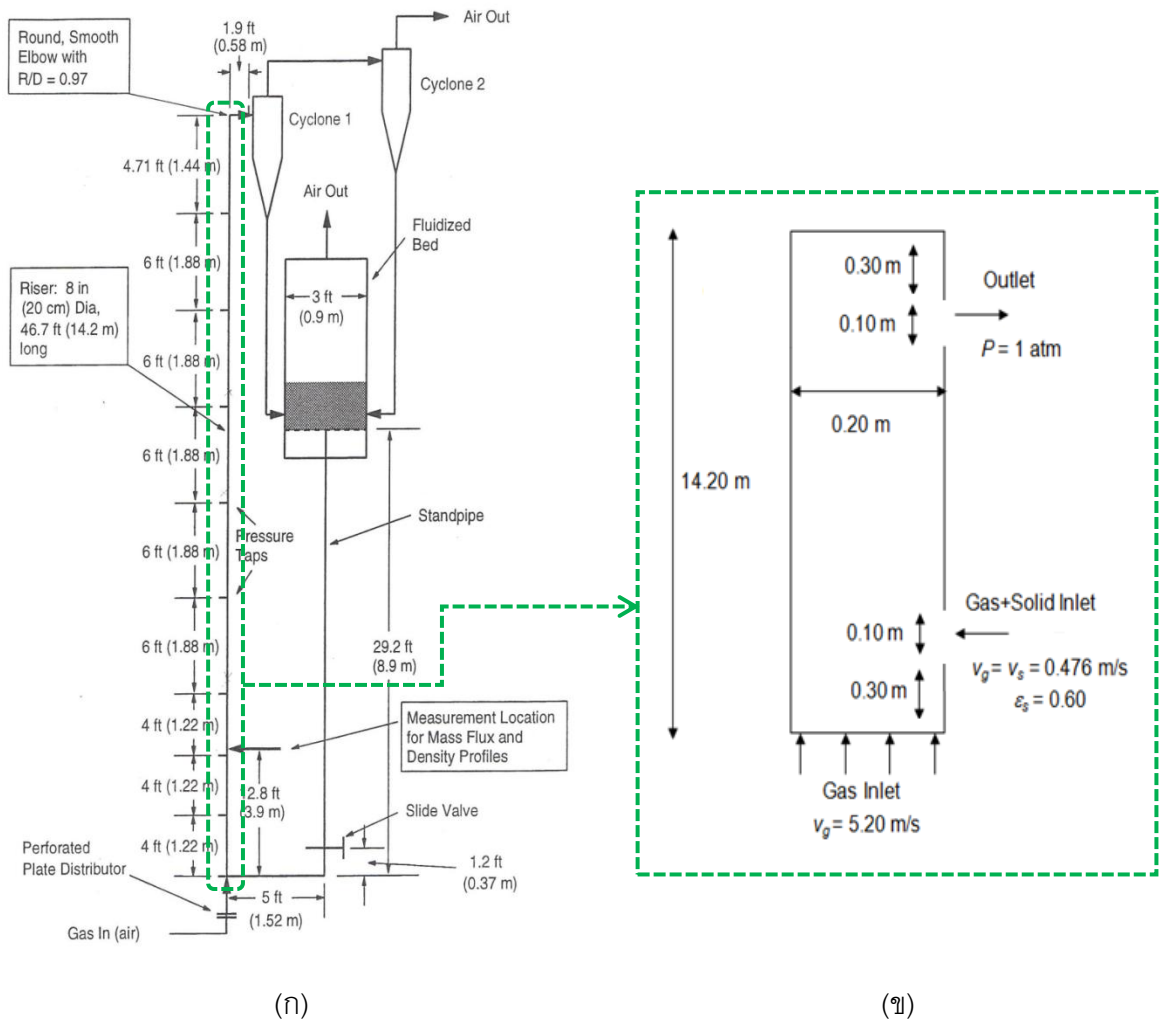
- 1) 1,412 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- 2) 1,712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- 3) 2,012 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

#### 3.4.3.5 ผลของอุณหภูมิกระบวนการ

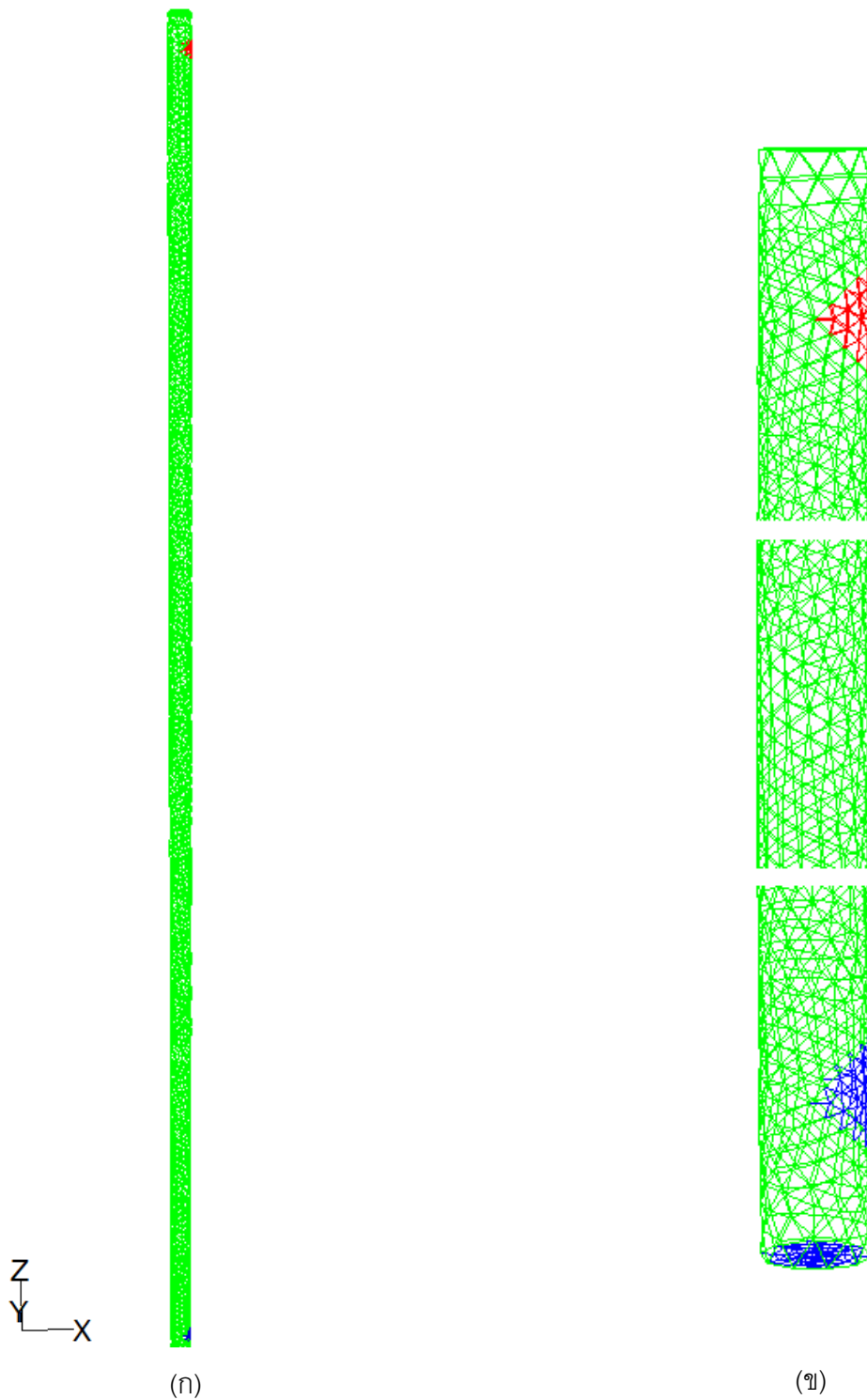
- 1) 773.15 เคลวิน
- 2) 1,073.15 เคลวิน
- 3) 1,273.15 เคลวิน

#### 3.4.3.6 ผลของความดันทางออกกระบวนการ

- 1) 50,662 พาสคาล
- 2) 101,325 พาสคาล
- 3) 202,650 พาสคาล



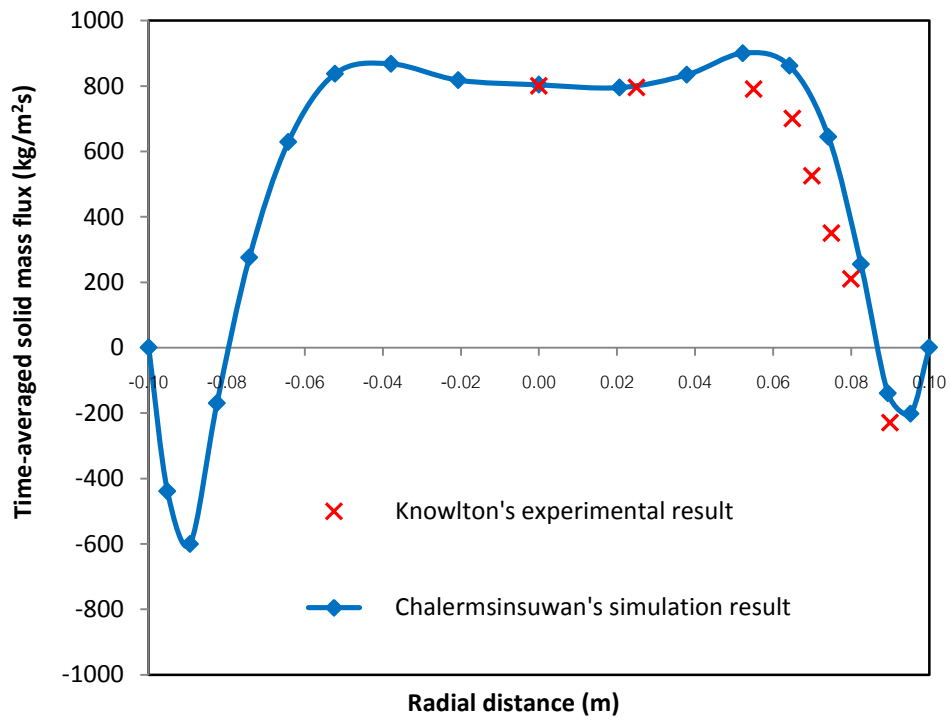
ภาพที่ 3.1 (ก) แผนภาพอุปกรณ์การทดลอง และ (ข) รูปวาดเชิงเรขาคณิตอย่างง่ายในระบบ  
สองมิติ



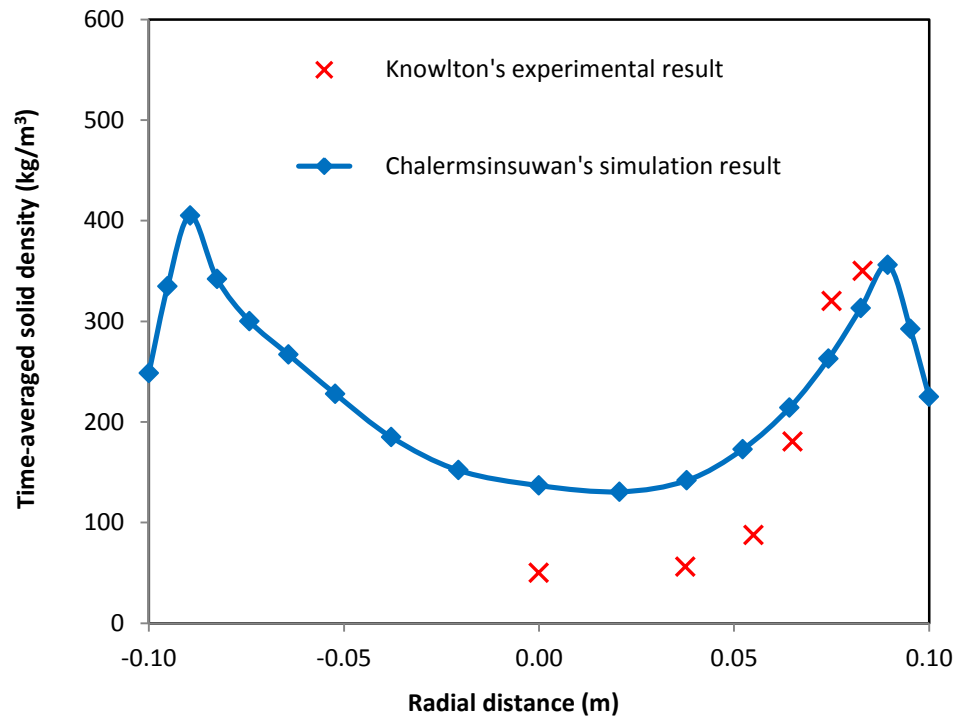
ภาพที่ 3.2 (ก) ภาพวาดพื้นที่การคำนวณในระบบสามมิติของท่อไรเซอร์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์แบบหมุนเวียน และ (ข) ภาพขยายแสดงรายละเอียดพื้นที่การคำนวณในระบบสามมิติของท่อไรเซอร์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดส์แบบหมุนเวียน

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของระบบและตัวแปรที่ใช้ในการจำลอง

No.	Description	Value
1	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไรเซอร์	0.20 เมตร
2	ความสูงของท่อไรเซอร์	14.20 เมตร
3	ความหนาแน่นของแก๊ส	1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
4	ความหนืดของแก๊ส	$2 \times 10^{-5}$ กิโลกรัมต่อเมตรวินาที
5	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง	1,712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
6	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง	76 ไมโครเมตร
7	ความเร็วแก๊สที่ป้อนเข้า	5.20 เมตรต่อวินาที
8	อุณหภูมิแก๊สที่ป้อนเข้า	298.15 เคลวิน
9	ความเร็วอนุภาคของแข็งที่ป้อนเข้า	0.476 เมตรต่อวินาที
10	อุณหภูมิของแข็งที่ป้อนเข้า	298.15 เคลวิน
11	สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่ป้อนเข้า	0.60 (-)
12	ความดันที่ทางออกของวัฏภาคแก๊ส/ของแข็ง	101,325 พาสคาล
13	Restitution coefficient ระหว่างอนุภาคของแข็ง	0.999
14	Restitution coefficient ระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนัง	0.50, 0.80, 0.90 และ 0.95
15	Specularity coefficient	0.0001, 0.001, 0.10 และ 0.50

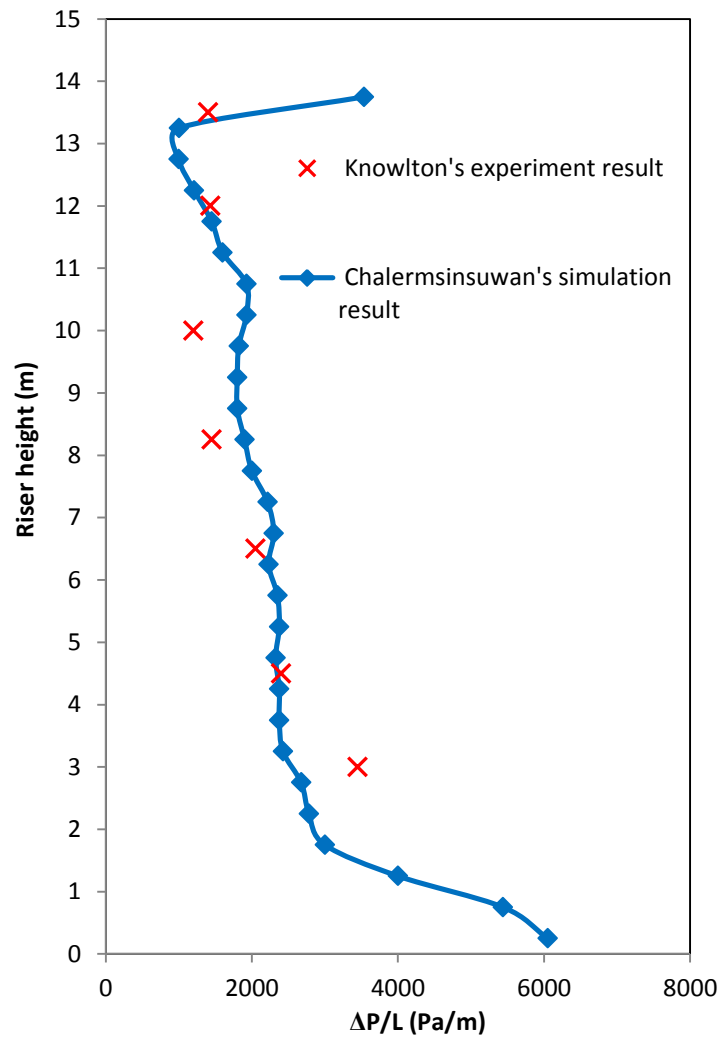


ภาพที่ 3.3 ผลของข้อมูลปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร สำหรับใช้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง โดยนำมาจากข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009)



ภาพที่ 3.4 ผลของข้อมูลความหนาแน่นของของแข็งในแนวรัศมีเฉลี่ยที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตร สำหรับใช้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง โดยนำมาจากข้อมูลการทดลอง ของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009)





ภาพที่ 3.5 ผลของข้อมูลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ สำหรับใช้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง โดยนำมาจากข้อมูลการทดลอง ของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009)

## บทที่ 4

### ผลงานวิจัยและการวิเคราะห์ผล

ในส่วนนี้จะแสดงผลการจำลองของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ภายในระบบ โดยผลการจำลองของตัวแปรแบบจำลองได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองจากข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ส่วนผลการจำลองของตัวแปรออกแบบและตัวแปรดำเนินการจะเป็นเพียงการอธิบายถึงอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นเท่านั้น และสุดท้ายจะเป็นผลการจำลองหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดกับระบบที่ได้ข้อมูลมาจากผลของตัวแปรแบบจำลองที่ได้ศึกษาไป

ในขั้นตอนแรกของการจำลองต้องหาขนาดเซลล์การคำนวณและเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรคงตัว (Quasi-steady state) ที่เหมาะสมเพื่อตัดปัจจัยไม่คงที่ของการจำลองทิ้งไป ผลของขนาดเซลล์คำนวณและเวลาในการจำลองจะได้แสดงในส่วนต่อไป

#### 4.1 ผลของขนาดเซลล์คำนวณ

ผลของขนาดเซลล์คำนวณที่ต่างกันย่อมให้ผลการจำลองที่ต่างกัน สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Hartge และคณะ (2009) และ Atsonios และคณะ (2011) โดยเซลล์คำนวณที่มีความละเอียดย่อมให้ผลการจำลองที่มีความถูกต้องมากกว่า แต่เวลาในการคำนวณก็จะใช้เวลาตามไปด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องหาเซลล์คำนวณที่เหมาะสมทั้งในแง่ความถูกต้องและเวลาที่ใช้ในการจำลอง ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเซลล์คำนวณที่มีขนาดต่างกัน 3 ขนาด คือ 26,184, 51,789 และ 98,005 เซลล์

ภาพที่ 4.1 และ 4.2 แสดงผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดเซลล์คำนวณที่มีขนาดต่างกัน เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อใช้เซลล์คำนวณที่ขนาดเท่ากับ 26,184 เซลล์ ผลการจำลองความดันลดภายในท่อไรเซอร์มีค่าสูงกว่าระบบที่ใช้เซลล์คำนวณเท่ากับ 51,789 และ 98,005 เซลล์ เล็กน้อย ในขณะที่ความแตกต่างระหว่างเซลล์คำนวณเท่ากับ 51,789 และ 98,005 เซลล์ พบว่า ไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ ระบบที่ใช้เซลล์คำนวณเท่ากับ 26,184 เซลล์ ยังมีความละเอียดที่ไม่เพียงพอ ผลการจำลองความดันลดจึงมีค่าสูงกว่าข้อมูลจากการทดลอง ต่อมาเมื่อเปลี่ยนขนาดเซลล์คำนวณ

ให้มีความละเอียดมากขึ้นคือเท่ากับ 51,789 เซลล์ พบว่า ผลการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูล การทดลองมากขึ้น และเมื่อเพิ่มความละเอียดของเซลล์คำนวณเพิ่มขึ้นไปอีกเป็น 98,005 เซลล์ ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงความไม่แตกต่างของความละเอียดเซลล์คำนวณที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น เซลล์คำนวณขนาดเท่ากับ 51,789 เซลล์ ก็เพียงพอต่อการจำลองแล้ว ไม่จำเป็นต้องใช้เซลล์คำนวณที่ละเอียดกว่านี้ เนื่องจากจะใช้เวลาในการคำนวณที่มากขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้ ยังสังเกตว่าเซลล์คำนวณขนาดเท่ากับ 26,184 เซลล์ ผลการจำลองความดันลดบริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์ไม่ถูกต้องตามหลักอุทกพลศาสตร์ กล่าวคือ ไม่สามารถแสดงผลความดันที่สูงบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ซึ่งมีปริมาณของแข็งอยู่สูงได้นั่นเอง อย่างไรก็ตาม เพื่อความถูกต้องจะพิจารณาร่วมกับผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งในส่วนต่อไป

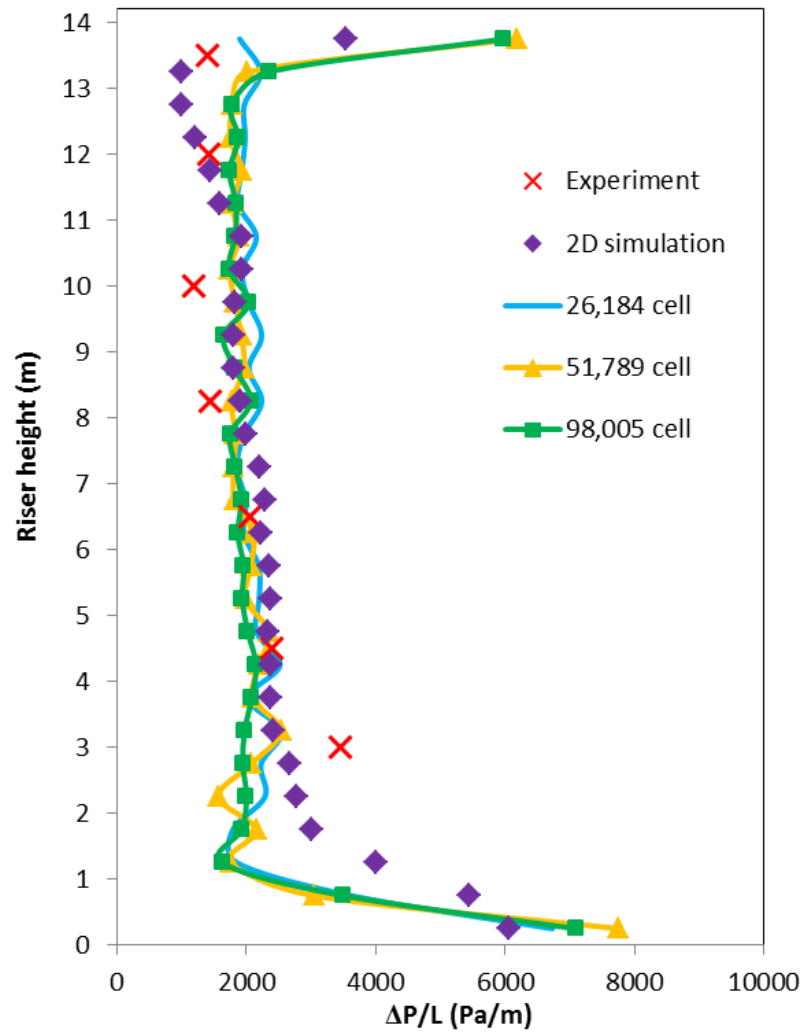
ภาพที่ 4.3 และ 4.4 แสดงผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดเซลล์คำนวณที่มีขนาดต่างกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างความละเอียดของเซลล์คำนวณเท่ากับ 26,184 เซลล์ กับ ความละเอียดเท่ากับ 51,789 และ 98,005 เซลล์ เนื่องจาก เซลล์คำนวณเท่ากับ 26,184 เซลล์ ยังไม่ละเอียดเพียงพอและเมื่อเพิ่มความละเอียดของเซลล์คำนวณเพิ่มขึ้นไป พบว่า ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งมีค่าคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับผลความดันลดในส่วนก่อนหน้านี้ ดังนั้น เซลล์คำนวณขนาด 51,789 เซลล์จึงถูกใช้ในการจำลองส่วนถัดไป

#### 4.2 ผลของเวลาคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรคงตัว (Quasi-steady state)

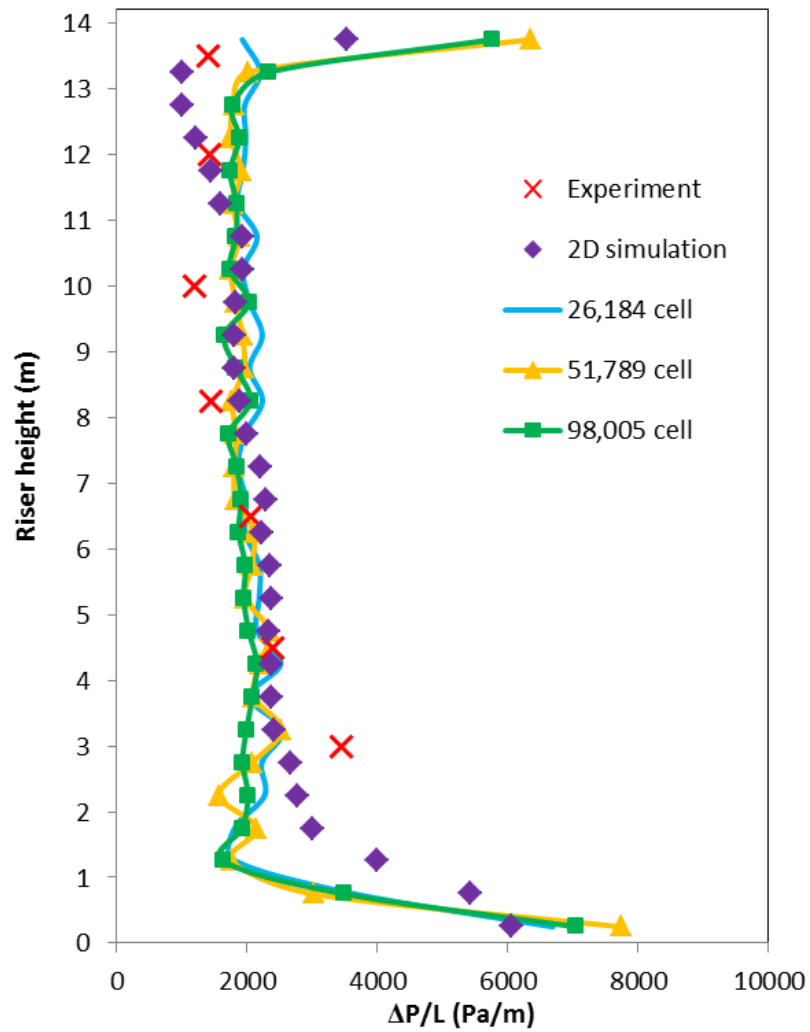
เนื่องจากในระบบฟลูอิดเซชันจะมีความปั่นป่วนจึงเป็นการยากที่จะให้ระบบเข้าสู่ภาวะคงตัว ดังนั้นจึงกำหนดให้เป็นภาวะเสถียรคงตัวแทน คือ มีการเปลี่ยนแปลงทางอุทกพลศาสตร์ในช่วงเวลาหนึ่งๆ ไม่มากนัก ภาพที่ 4.5 และ 4.6 แสดงผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรคงตัวเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากกราฟจะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการจำลองจาก 10 วินาทีไปเป็น 20 วินาที เกิดความแตกต่างของการจำลองขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเวลาขึ้นไปอีกเป็น 30 วินาที ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าไม่มีความแตกต่างของความดันลด ทั้งในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$  แสดงว่าระบบเข้าสู่ภาวะเสถียรคงตัวแล้วตั้งแต่วินาทีที่ 10-20 ส่งผลให้เมื่อเพิ่มเวลาไปอีกจนถึงวินาทีที่ 30 ผลความดันลดจึงมีค่าคงที่ นอกจากนี้ผลการ

จำลองให้ค่าความดันลดที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง แต่เพื่อความถูกต้องจะมีการพิจารณาผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งควบคู่กันไปด้วย

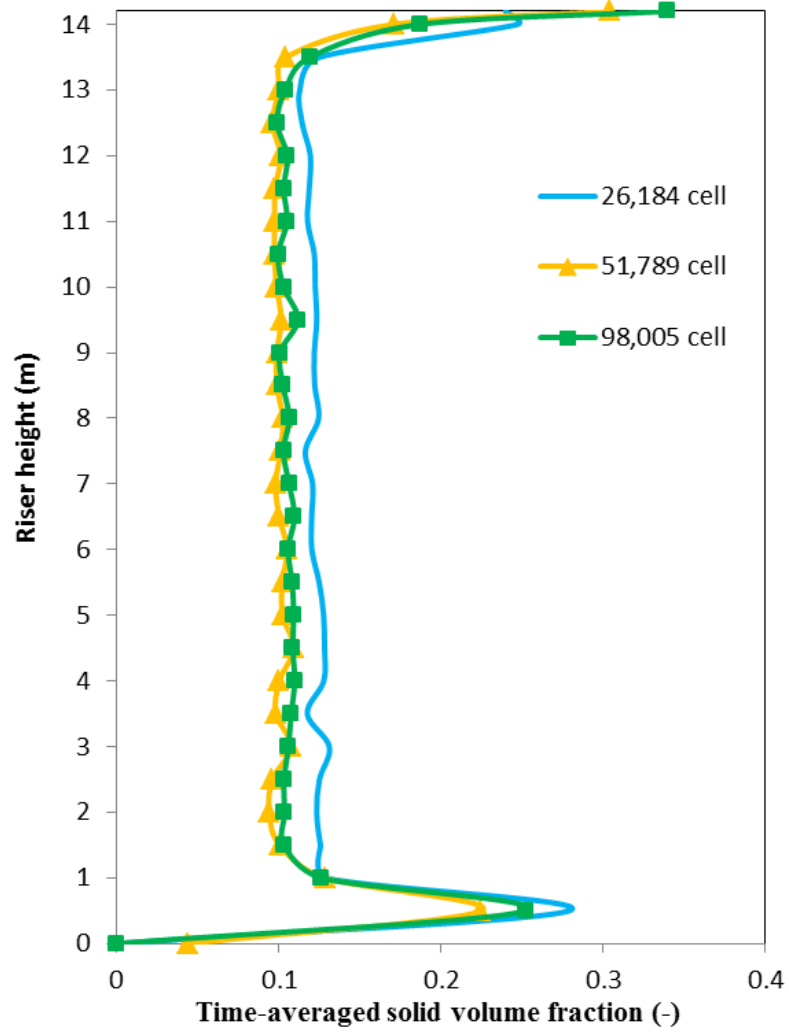
ภาพที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรในตัวทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างระหว่างช่วงเวลาที่ 0-10, 10-20 และ 20-30 ความแตกต่างระหว่างช่วงเวลา 0-10 วินาที กับ 10-20 วินาที พบว่า มีความแตกต่างกันค่อนข้างมากเนื่องจากระบบยังไม่เข้าสู่ภาวะเสถียรในตัวนั่นเอง ส่วนในช่วงเวลา 10-20 วินาทีกับ 20-30 วินาที พบว่ามีความแตกต่างของสัดส่วนปริมาตรของแข็งเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลความดันลดในส่วนก่อนหน้านี้ ดังนั้น ช่วงเวลา 20-30 วินาทีจึงถูกเลือกเพื่อใช้เป็นตัวแทนการจำลองในส่วนถัดไป



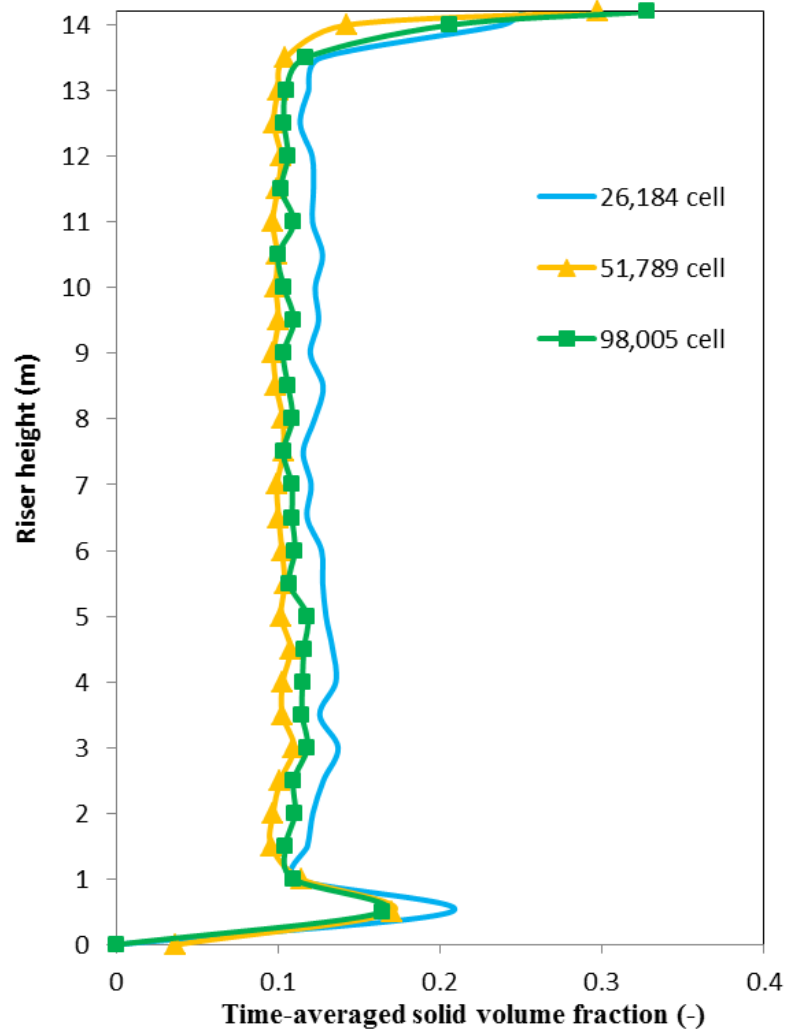
ภาพที่ 4.1 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดเซลล์คำนวณที่มีขนาดต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.2 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดเซลล์คำนวณที่มีขนาดต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y

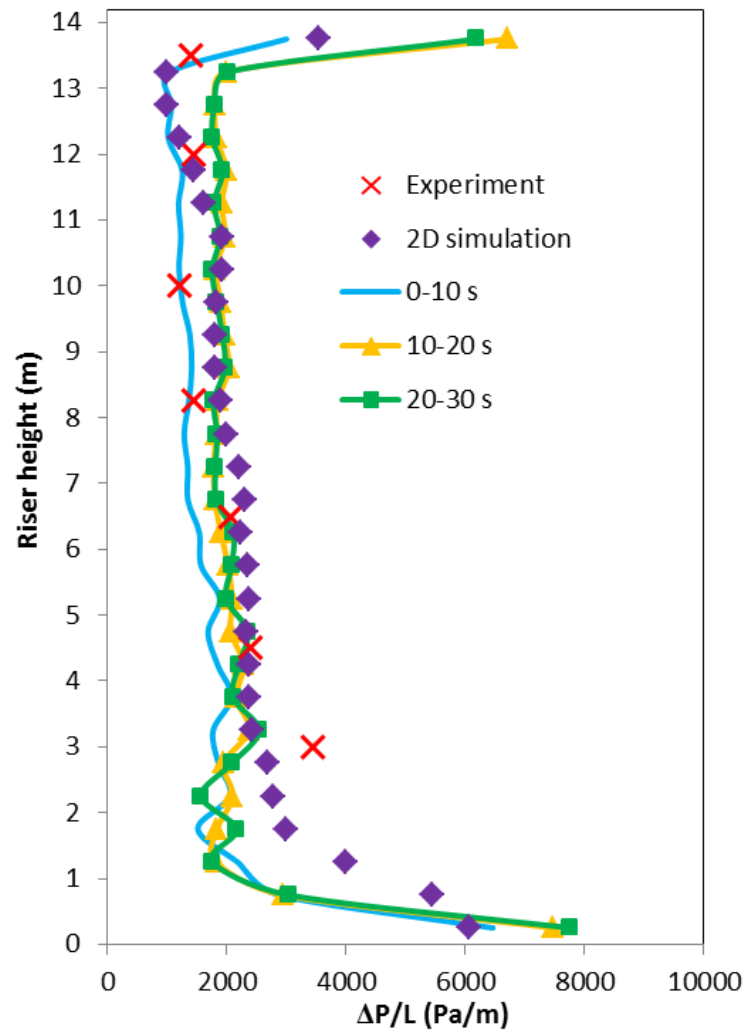


ภาพที่ 4.3 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดเซลล์คำนวณที่มีขนาดต่างกันในทิศทาง x

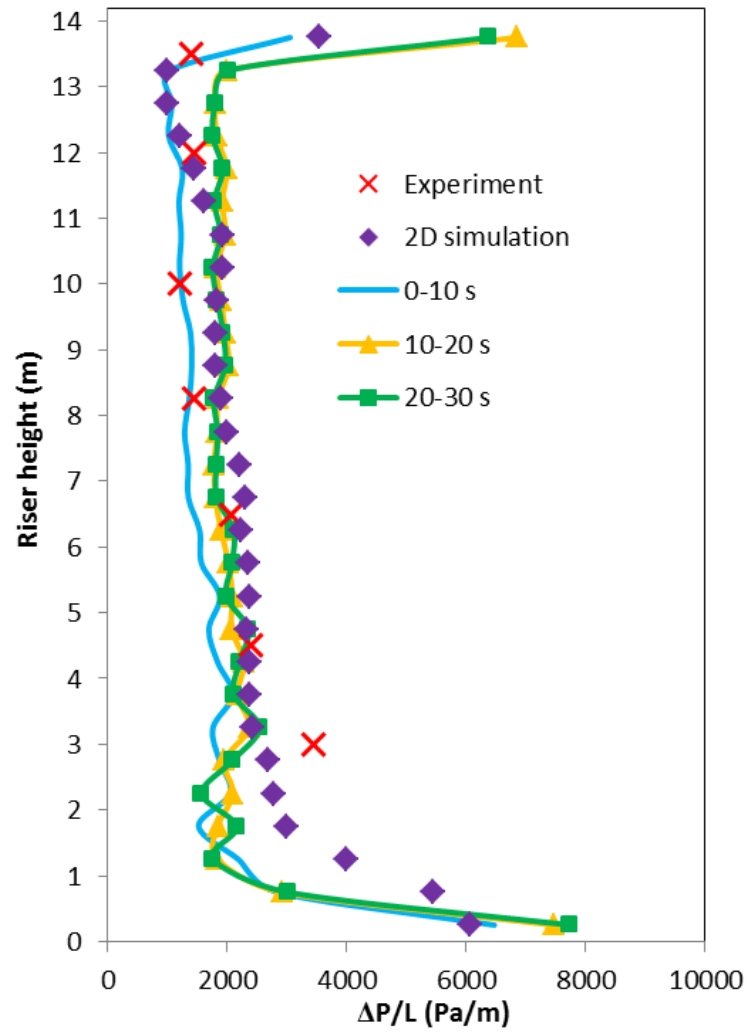


ภาพที่ 4.4 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดเซลล์คำนวณที่มีขนาดต่างกันในทิศทาง y

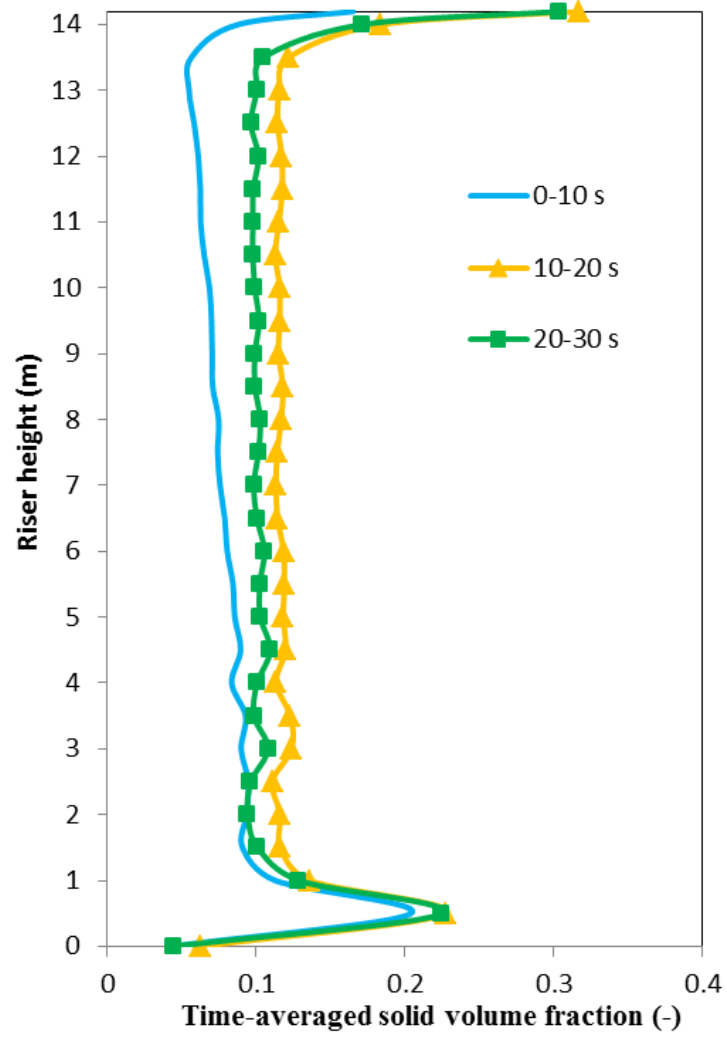




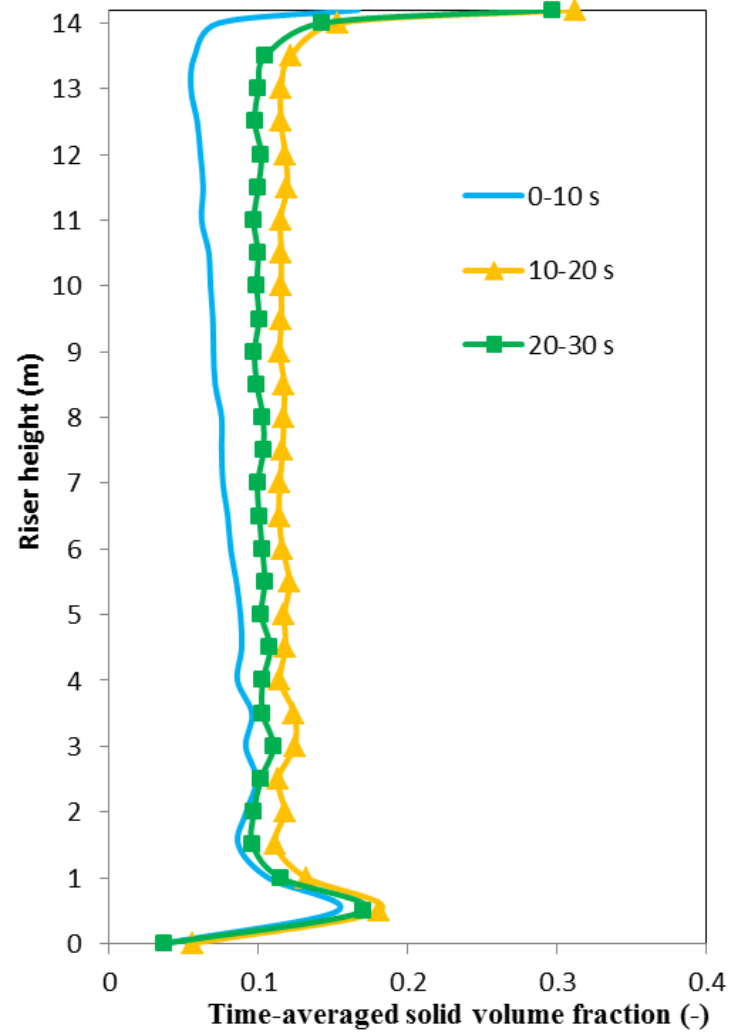
ภาพที่ 4.5 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซอร์ของเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรของตัวเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermisinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.6 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซอร์ของเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรคงตัวเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermsinuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y



ภาพที่ 4.7 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสถียรในทิศทาง x



ภาพที่ 4.8 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของเวลาในการคำนวณที่เข้าสู่ภาวะเสมือนคงตัวในทิศทาง y

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ (Designing parameters) อันประกอบด้วย ผลของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้า และผลขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ว่าจะส่งผลต่อระบบอย่างไร โดยมีรายละเอียดผลการจำลองดังต่อไปนี้

#### 4.3 ผลของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้า

รูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่ต่างกันย่อมส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคเบตแบบหมุนเวียน (Cheng และคณะ, 1998; De Wilde และคณะ, 2005) ในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาผลของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่ต่างกัน 7 รูปแบบ ดังแสดงในภาพที่ 4.9 ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 (รูปแบบที่ 1-4) คือ กลุ่มที่ปรับเปลี่ยนพื้นที่ช่องเปิดของทางเข้า กล่าวคือ ในการป้อนเข้าของแก๊สบริเวณด้านล่าง อาจไม่ได้ป้อนเต็มพื้นที่หน้าตัดที่ทำการป้อน จึงทำการศึกษาโดยปรับเปลี่ยนช่องว่างการป้อนเข้าที่ต่างกัน มีรายละเอียดดังนี้ รูปแบบที่ 1 เปิดช่องว่างของทางเข้า 25 เปอร์เซ็นต์ (บริเวณสีแดงในรูปหมายถึงพื้นที่ช่องช่องว่างที่ป้อนแก๊สเข้า ส่วนพื้นที่สีขาวถูกตั้งค่าให้เป็นผนังด้านล่างของทางเข้า) รูปแบบที่ 2 เปิดช่องว่างของทางเข้า 50 เปอร์เซ็นต์ รูปแบบที่ 3 เปิดช่องว่างของทางเข้า 75 เปอร์เซ็นต์ และรูปแบบที่ 4 เปิดช่องว่างของทางเข้า 100 เปอร์เซ็นต์ (หมายถึงป้อนแก๊สเข้าเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อไรเซอร์นั่นเอง) โดยทำการกำหนดความเร็วในการป้อนเข้าในทุกกรณีให้มีค่าเท่ากับ 5.2 เมตรต่อวินาที กลุ่มที่ 2 (รูปแบบที่ 5-7) คือ กลุ่มที่ปรับเปลี่ยนลักษณะรูปร่างความเร็วการป้อนเข้า กล่าวคือ ในสายป้อนเข้าก่อนที่จะมาถึงบริเวณทางเข้าของท่อไรเซอร์ รูปร่างของความเร็วอาจมีรูปร่างที่แตกต่างกันก่อนที่จะเข้าสู่ท่อไรเซอร์ เป็นไปได้ทั้งรูปแบบการไหลแบบลามินาร์หรือแบบเทอร์บิวเลนต์ ดังนั้นจึงทำการศึกษารูปร่างความเร็วที่ต่างกันว่าจะส่งผลอย่างไร มีรายละเอียดดังนี้ รูปแบบที่ 5 รูปร่างของความเร็วเป็นแบบลามินาร์โดยจะมีลักษณะเรียวยาวแหลม (บริเวณตรงกลางมีความเร็วสูงกว่าบริเวณผนังมาก) รูปแบบที่ 6 รูปร่างของความเร็วเป็นแบบ เทอร์บิวเลนต์ที่มีลักษณะ รูปร่างป้านลงมาเล็กน้อย และรูปแบบสุดท้าย รูปแบบที่ 7 รูปร่างของความเร็วเป็นแบบเทอร์บิวเลนต์ที่มีลักษณะความเร็วตรงกลางน้อยกว่ารูปแบบอื่นๆ โดยสามารถดูภาพประกอบที่ชัดเจนในภาพที่ ข1 ซึ่งอยู่ในภาคผนวก

โดยทั่วไปแล้วสำหรับกลุ่มที่ 1 (กลุ่มที่ปรับเปลี่ยนพื้นที่ช่องเปิดของทางเข้า) สามารถทำการศึกษาได้สองลักษณะ ลักษณะแรกคือ ลักษณะที่ปรับเปลี่ยนความเร็วเมื่อพื้นที่ช่องเปิดของทางเข้าเปลี่ยน เพื่อให้ปริมาณแก๊สที่ป้อนเข้าเท่ากันต่อหน่วยพื้นที่ ซึ่งผลการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Gao และคณะ (2012) พบว่า การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ช่องเปิดของทางเข้าที่ต่างกัน

ส่งผลให้บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์มีลักษณะการไหลที่ต่างกันเท่านั้น ส่วนบริเวณด้านบน ลักษณะการไหลเหมือนกันหรือการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ช่องเปิดไม่ส่งผลนั่นเอง ลักษณะที่สองคือ ลักษณะที่กำหนดความเร็วให้เท่ากันในทุกกรณี ซึ่งเป็นลักษณะที่จำลองในงานวิจัยนี้ เนื่องจากใน ข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) ไม่ได้ให้รายละเอียดลักษณะการป้อนเข้าว่า ป้อนเข้าแบบใด แต่ทำการกำหนดความเร็วในการป้อนเข้าให้มีค่าเท่ากับ 5.2 เมตรต่อวินาที จึงทำการ กำหนดความเร็วให้เท่ากับข้อมูลการทดลองแล้วทำการปรับเปลี่ยนพื้นที่การเปิดให้แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลการจำลองใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองนั่นเอง

ผลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.10 และ 4.11 ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จาก การจำลองจะเห็นได้ว่าผลของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่ต่างกันส่งผลให้ความดันลด ภายในท่อไรเซอร์มีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือ สำหรับรูปแบบที่ 1-4 เมื่อระบบมีเปอร์เซ็นต์การเปิด ช่องว่างของทางเข้าเพิ่มขึ้น ความดันลดภายในท่อไรเซอร์มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเปอร์เซ็นต์การ เปิดช่องว่างทางเข้าเพิ่มขึ้น แก๊สที่ป้อนเข้าก็จะเพิ่มขึ้นต่อพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นสามารถพาดูภาค ของแข็งออกจากระบบได้มากกว่า จึงมีของแข็งในระบบน้อยกว่า ส่งผลให้ความดันลดมีค่าลดลง ตามปริมาณของแข็งที่ลดลงไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบที่ 1 จะเห็นได้ว่ามีเปอร์เซ็นต์การ เปิดช่องว่างเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ แก๊สที่ผ่านเข้ามาจึงพาดูภาคของแข็งออกจากระบบได้น้อย ความดันลดภายในท่อไรเซอร์จึงสูงกว่ารูปแบบอื่นๆ มาก นั่นเอง โดยสามารถเห็นผลที่เกิดขึ้นอย่าง ชัดเจนในส่วนของรูปคอนทัวร์ที่จะได้กล่าวในส่วนต่อไป นอกจากนี้ผลที่ได้ยังสอดคล้องกันทั้ง สองทิศทาง

ภาพที่ 4.12 และ 4.13 แสดงผลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการ ป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการ จำลอง พบว่า การเปลี่ยนลักษณะรูปร่างความเร็วการป้อนเข้าไม่ส่งผลให้ความดันลดภายในท่อ ไรเซอร์แตกต่างกันมากนัก ทั้งสองทิศทาง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพร้อมกับผลของคอนทัวร์ พบว่า รูปร่างความเร็วการป้อนเข้าที่มีลักษณะที่ปานกลาง จะมีปริมาณของแข็งในระบบที่ลดลง เล็กน้อย

ภาพที่ 4.14 และ 4.15 แสดงผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความ สูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ใน ทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า ระบบที่มีเปอร์เซ็นต์การเปิดช่องว่างของทางเข้า 100 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณฟลักซ์ของแข็งต่ำสุด และเมื่อเปอร์เซ็นต์การเปิดช่องว่างของทางเข้า

ลดลง ปริมาณพลักซ์ของแข็งก็เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสำหรับรูปแบบที่ 1-3 ผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$

ภาพที่ 4.16 และ 4.17 แสดงผลการจำลองปริมาณพลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างความเร็วการป้อนเข้าไม่ส่งผลให้ปริมาณพลักซ์ของแข็งแตกต่างกันมากนัก ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีเปอร์เซ็นต์การเปิดช่องว่างของทางเข้าสูง จะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งลดลง เนื่องจากแก๊สสามารถพาอนุภาคของแข็ง ออกจากระบบได้มากกว่า และเมื่อเปอร์เซ็นต์การเปิดช่องว่างของทางเข้าลดลง สัดส่วนปริมาตรของแข็งก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งทิศทาง  $x$  และ  $y$  โดยผลที่ได้สอดคล้องกับผลความดันลด ดังที่ได้กล่าวไป

ภาพที่ 4.20 และ 4.21 แสดงผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างความเร็วการป้อนเข้าไม่ส่งผลให้สัดส่วนปริมาตรของแข็งแตกต่างกันทั้งสองทิศทาง และสอดคล้องกับผลความดันลดที่ได้กล่าวไปข้างต้น

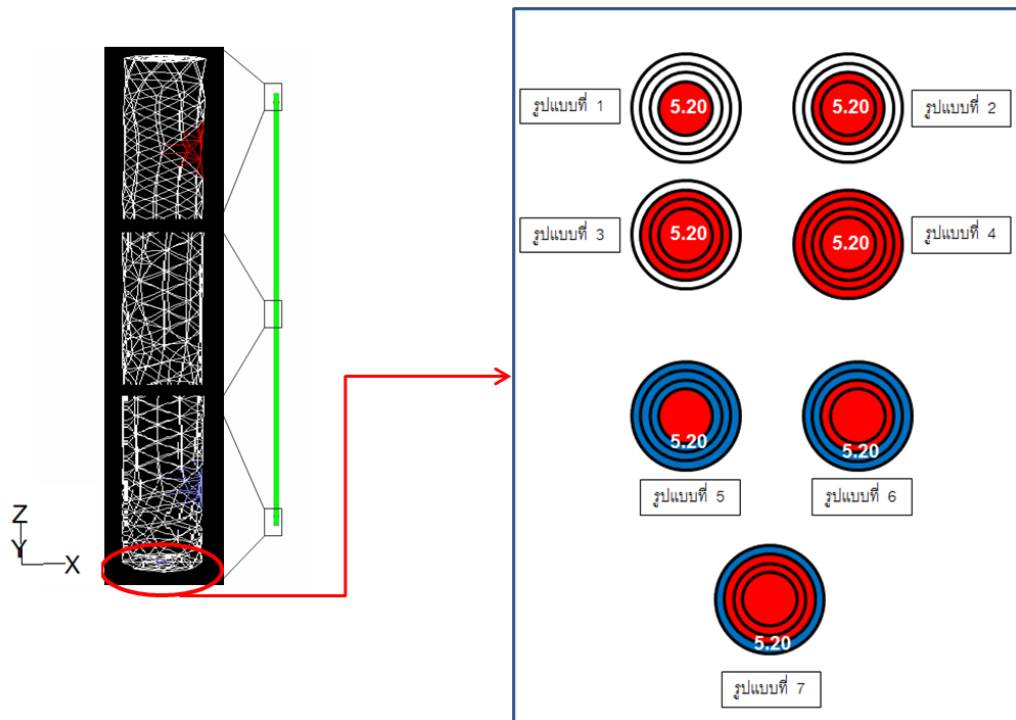
ภาพที่ 4.22 แสดงรูปคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 จากรูปสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนว่า เมื่อเปอร์เซ็นต์การเปิดช่องว่างของทางเข้ามีค่าสูง ระบบจะมีปริมาณของแข็งที่ลดลง และที่เปอร์เซ็นต์การเปิดช่องว่างของทางเข้าเท่ากับ 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าน้อยสุด รูปคอนทัวร์ (ภาพที่ 4.22 (ก)) จะมีสีของคอนทัวร์ที่เข้มกว่ารูปแบบอื่นๆ มาก แสดงถึงปริมาณของแข็งที่มีค่าสูงนั่นเอง สอดคล้องกับผลในส่วนอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวไป

ภาพที่ 4.23 แสดงรูปคอนทัวร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 จากรูปจะเห็นได้ว่าไม่มีความแตกต่างกันสำหรับผลของรูปร่างความเร็วการป้อนเข้าที่ต่างกัน อย่างไรก็ตามสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อระบบมีรูปร่างความเร็วการป้อนเข้าที่ปานกลาง (รูปร่างความเร็วมีลักษณะเป็นแบบเทอร์นิวเลนที่มากขึ้น) จะมีปริมาณของแข็งในระบบลดลง (สีของคอนทัวร์ดูจางกว่าเล็กน้อย) เนื่องจากว่าเมื่อพิจารณาแผนผังในภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่ารูปแบบที่ 5 มีพื้นที่ส่วนสีแดง ซึ่งมีความเร็วสูงกว่าส่วนสีน้ำเงิน

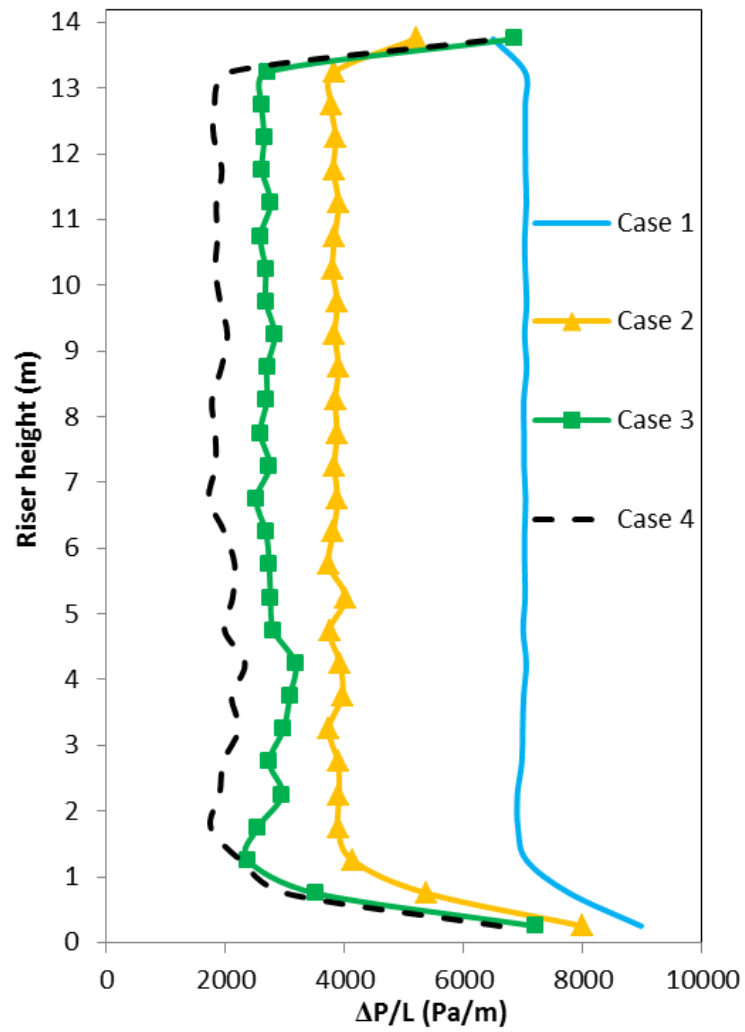
น้อยกว่ารูปแบบที่ 6 และ 7 จึงเป็นไปได้ว่าแก๊สสามารถพาอนุภาคของแข็งออกจากระบบได้ยากกว่ารูปแบบที่ 6 และ 7 ส่งผลให้มีปริมาณของแข็งมากกว่านั่นเอง

จากผลของกลุ่มที่ 1 (กลุ่มที่ปรับเปลี่ยนพื้นที่ช่องเปิดของทางเข้า) สังเกตได้ว่าผลของพื้นที่ช่องเปิดของทางเข้าส่งผลให้อุณหภูมิศาสตร์ต่างกันตลอดทั้งท่อโรเซอ์ เนื่องจาก ดังที่ได้กล่าวไปในข้างต้นว่า ในงานวิจัยนี้ทำการตั้งความเร็วให้มีค่าคงที่ในทุกกรณี ผลของพื้นที่ช่องเปิดของทางเข้าจึงส่งผลต่อรูปแบบการไหลตลอดท่อโรเซอ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Peng และคณะ (2011) ที่ได้ทำการศึกษาลักษณะพื้นที่เปิดของทางเข้าที่ต่างกันโดยตั้งความเร็วให้เท่ากันในทุกกรณี แล้วพบว่าผลของพื้นที่เปิดที่ต่างกันจะส่งผลให้อุณหภูมิศาสตร์ต่างกันตลอดช่วงความสูงของท่อโรเซอ์

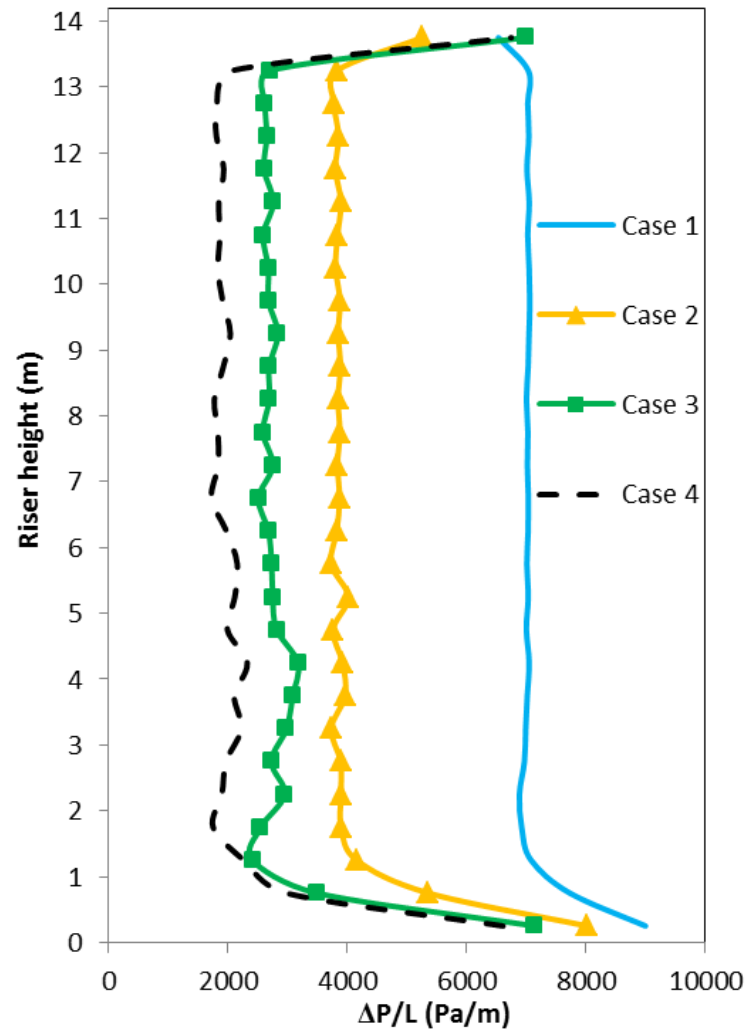




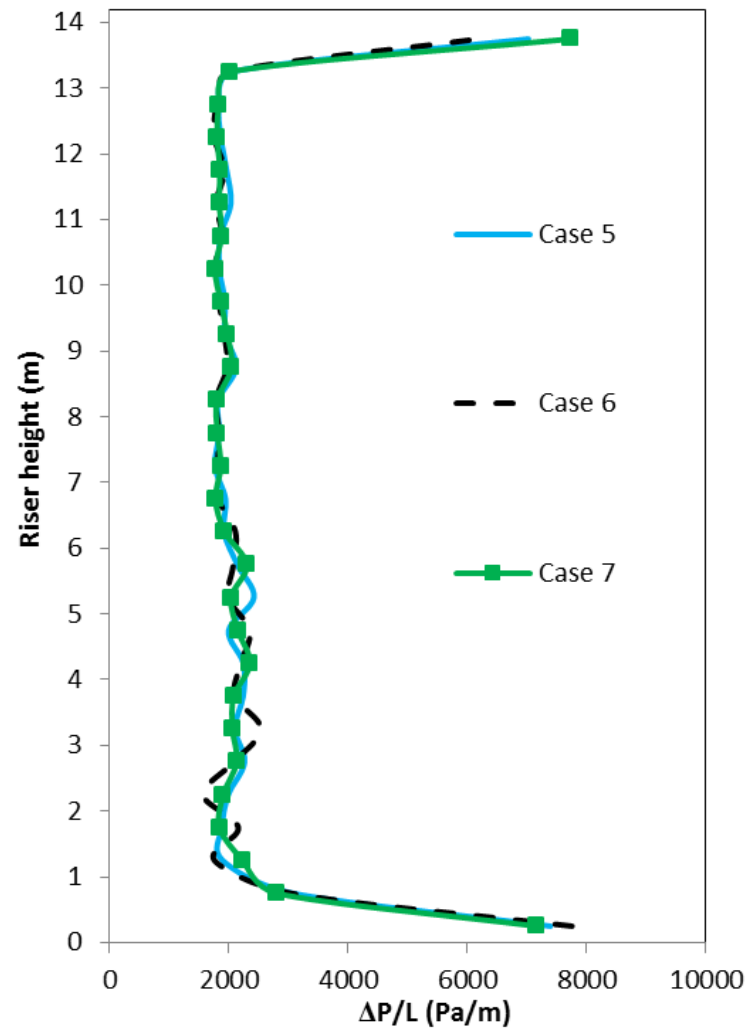
ภาพที่ 4.9 แสดงแผนผังการจำลองรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่ต่างกันทั้ง 7 รูปแบบ



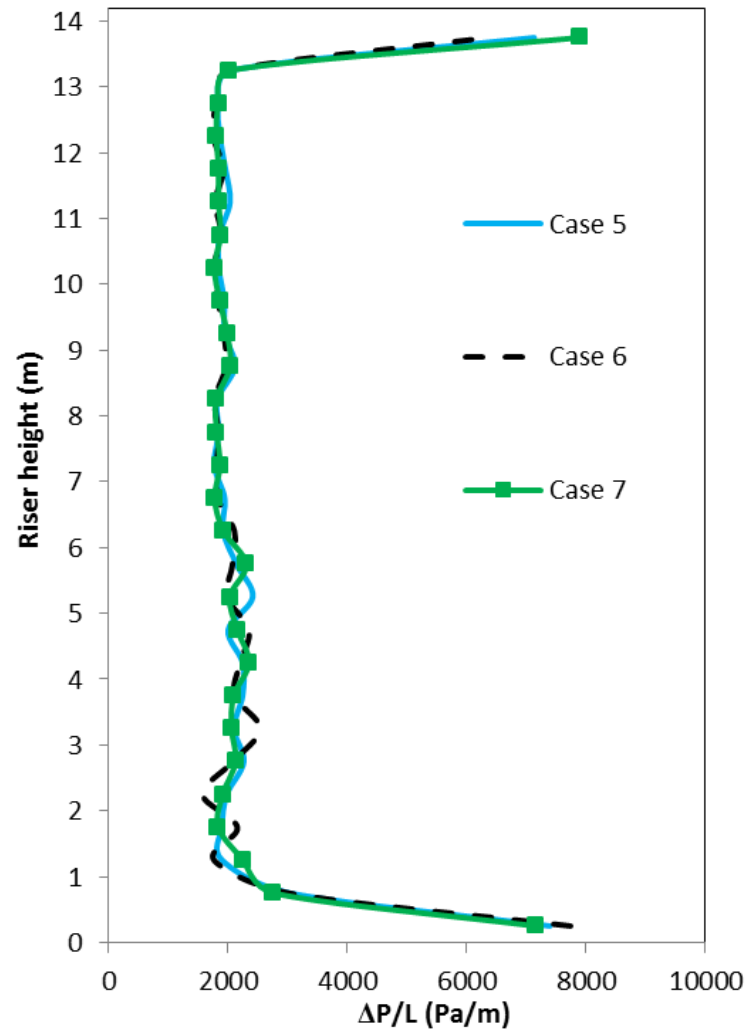
ภาพที่ 4.10 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง x



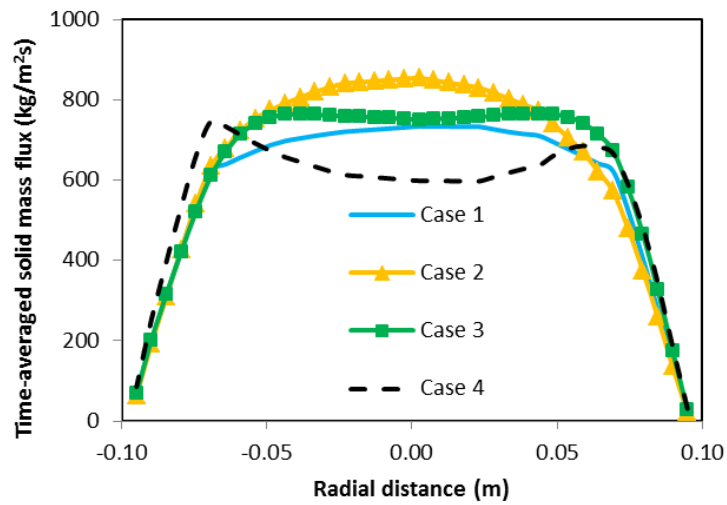
ภาพที่ 4.11 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง y



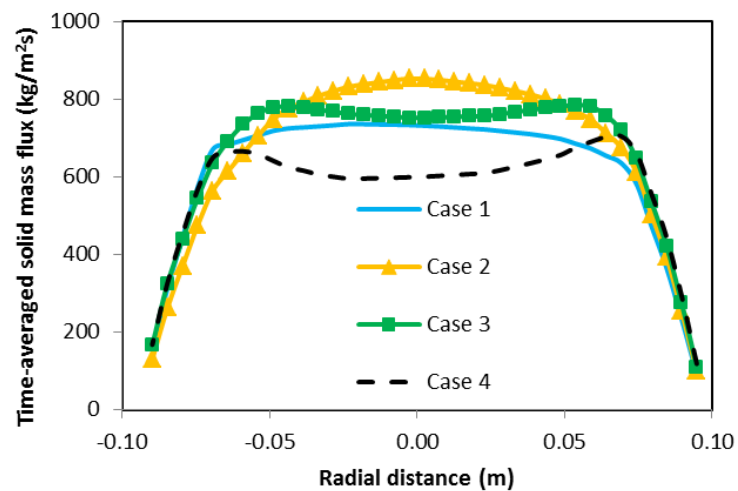
ภาพที่ 4.12 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง x



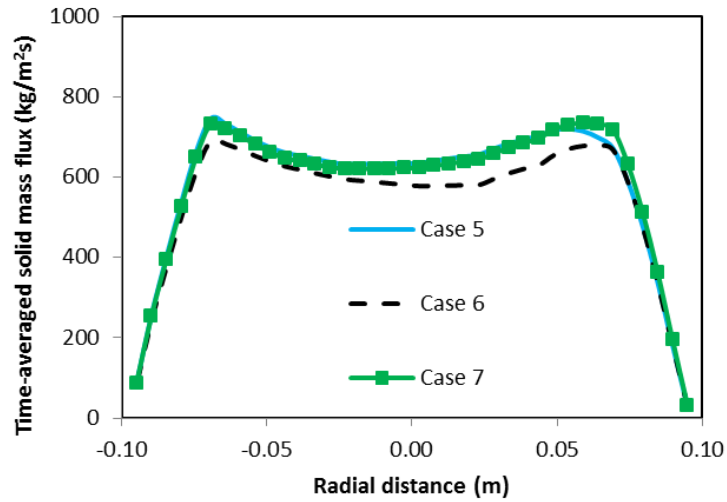
ภาพที่ 4.13 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง y



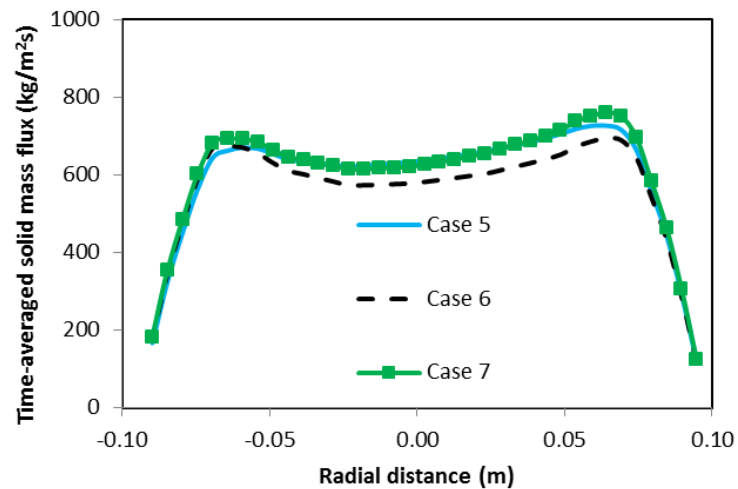
ภาพที่ 4.14 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง x



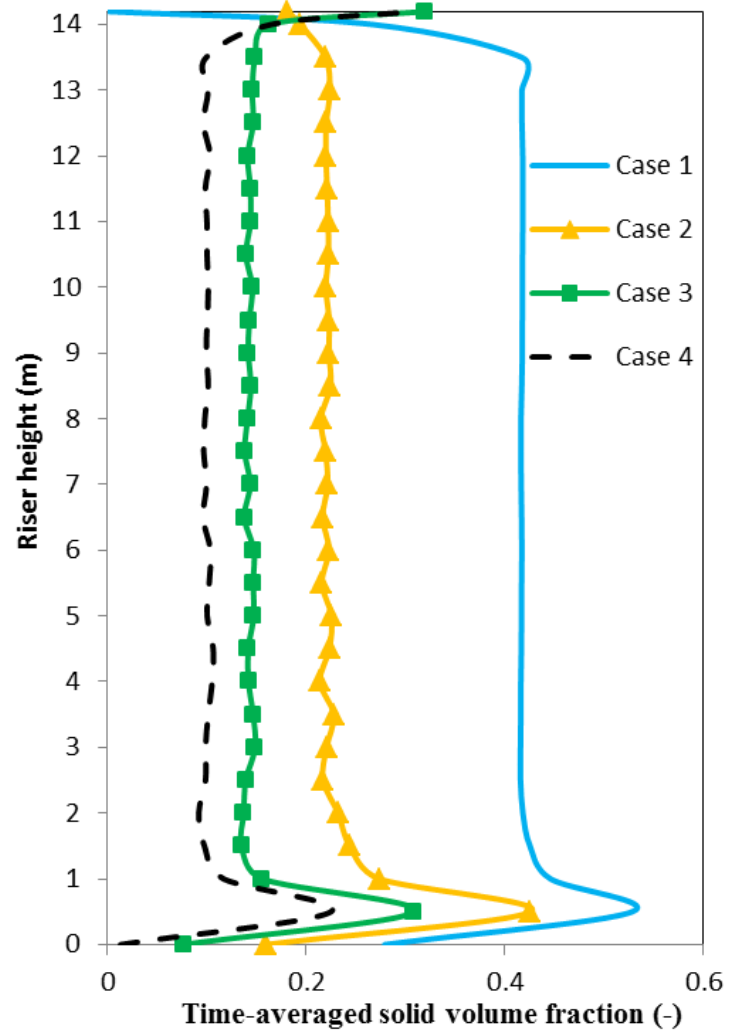
ภาพที่ 4.15 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง y



ภาพที่ 4.16 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง x

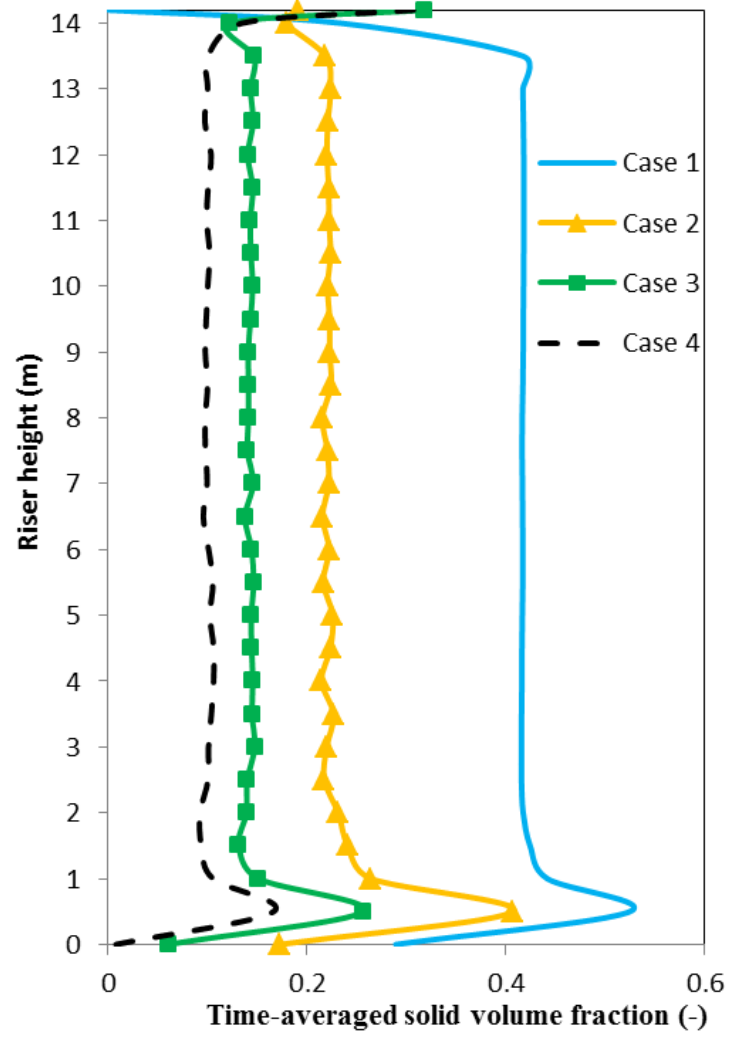


ภาพที่ 4.17 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง y

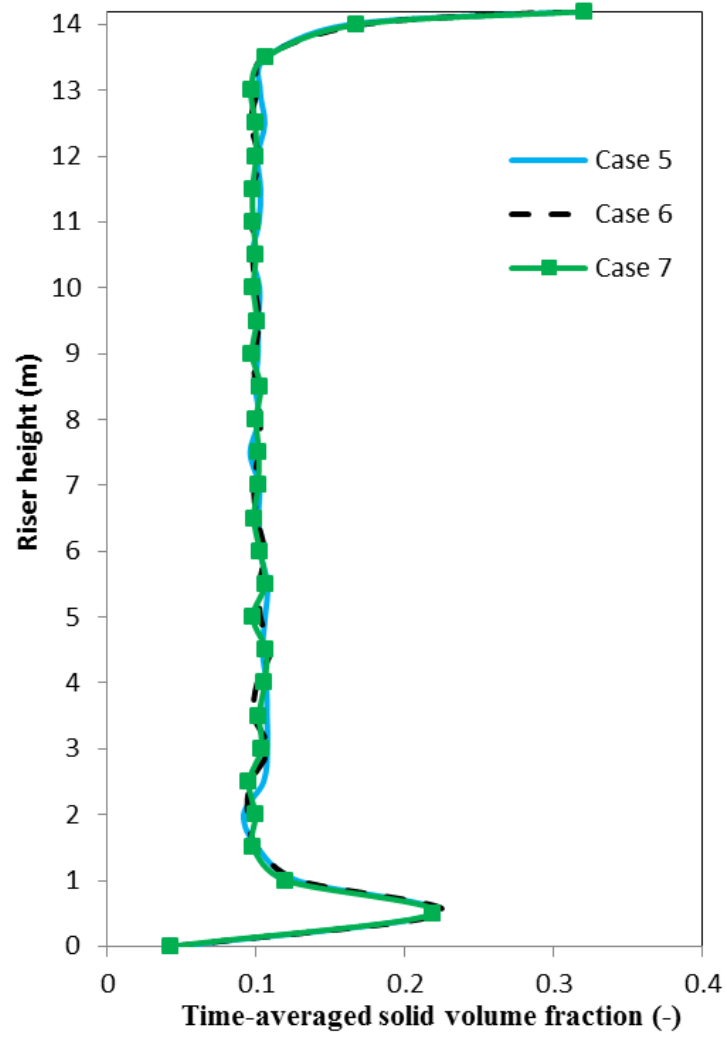


ภาพที่ 4.18 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง x

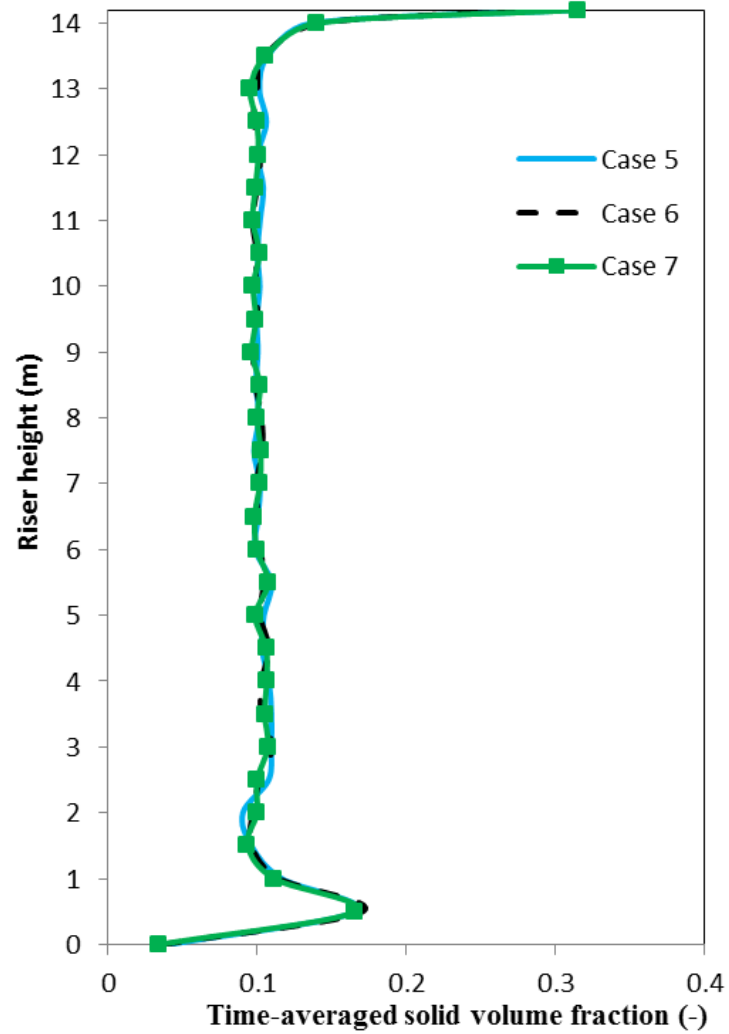




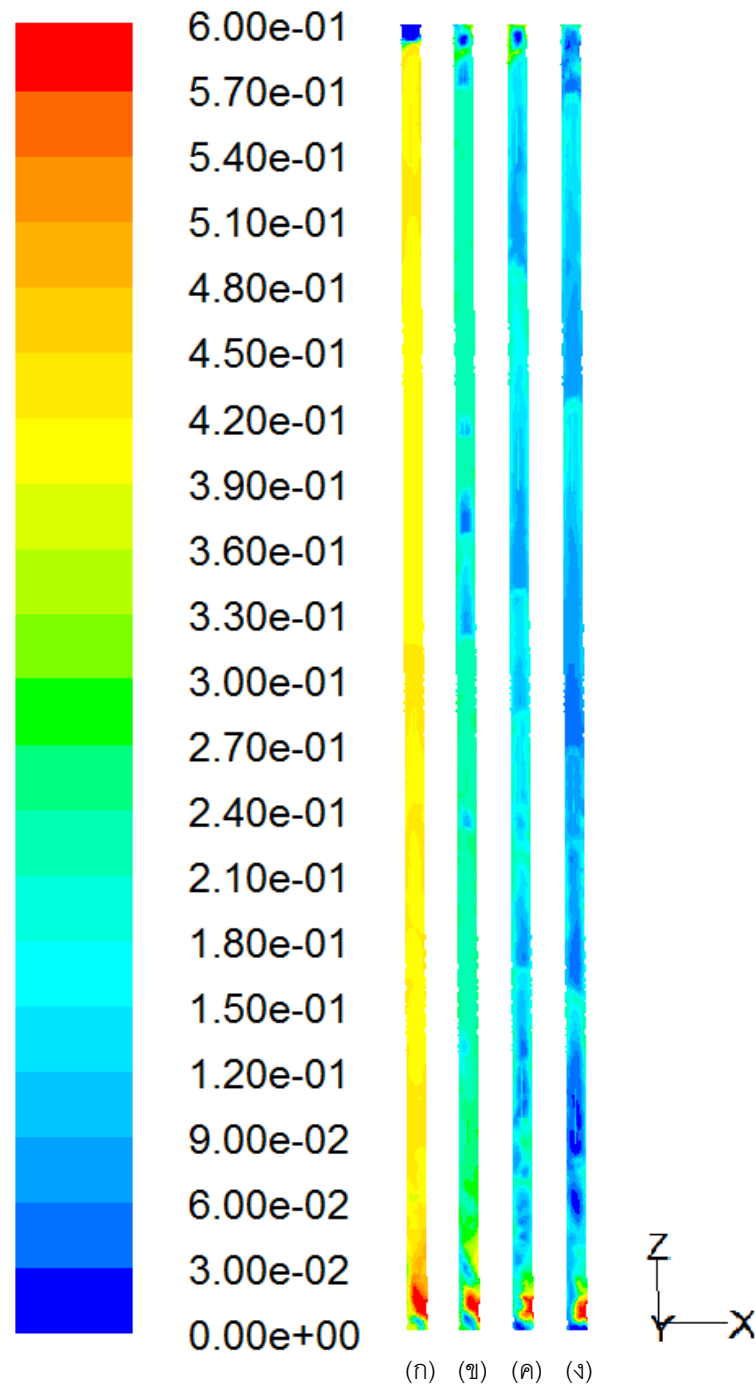
ภาพที่ 4.19 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 ในทิศทาง y



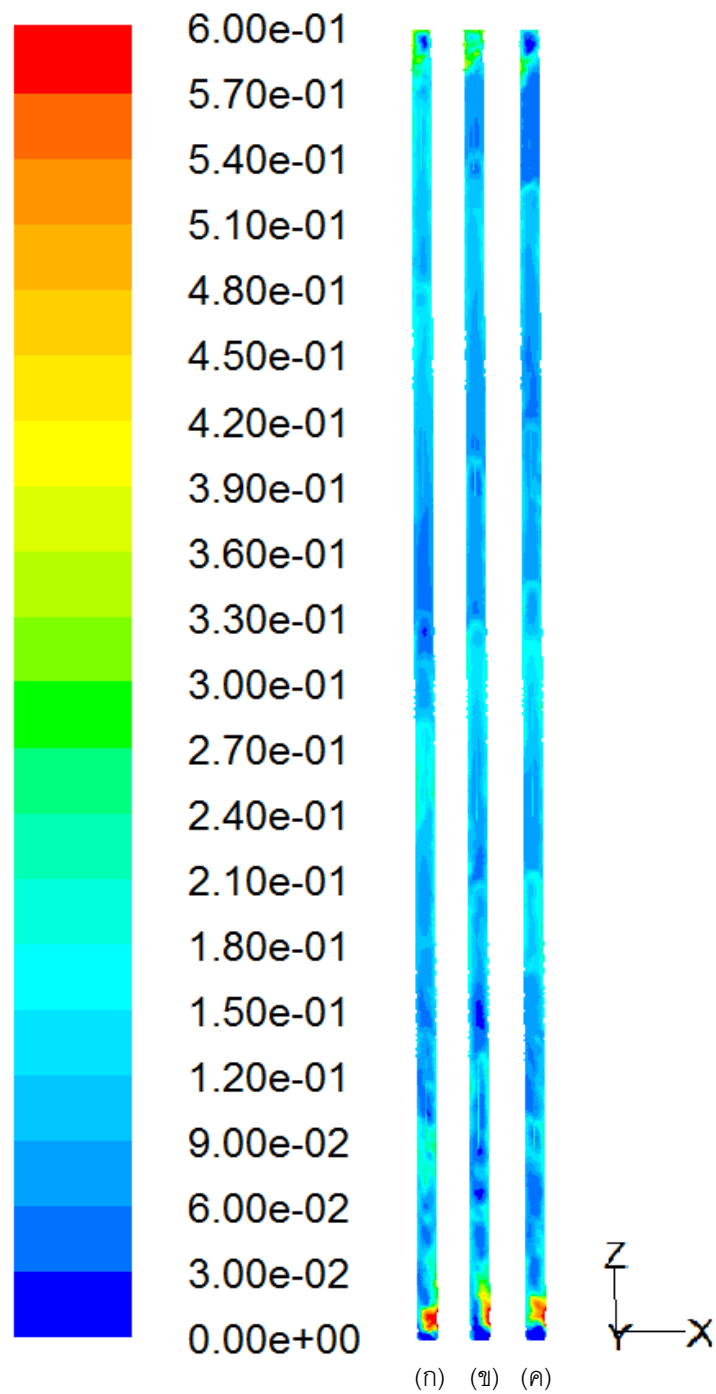
ภาพที่ 4.20 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.21 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 ในทิศทาง y



ภาพที่ 4.22 รูปคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาณของแข็งในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 1-4 โดยที่ (ก) รูปแบบที่ 1 (ข) รูปแบบที่ 2 (ค) รูปแบบที่ 3 และ (ง) รูปแบบที่ 4



ภาพที่ 4.23 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาณของแข็งในท่อไรเซอร์ของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่แตกต่างกัน สำหรับรูปแบบที่ 5-7 โดยที่ (ก) รูปแบบที่ 5 (ข) รูปแบบที่ 6 และ (ค) รูปแบบที่ 7

#### 4.4 ผลของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์

ขนาดทางออกของท่อไรเซอร์มีความสำคัญต่ออุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในระบบ ขนาดทางออกที่แตกต่างกันส่งผลถึงปรากฏการณ์ภายในท่อไรเซอร์ที่แตกต่าง (Cheng และคณะ, 1998; De Wilde และคณะ, 2003) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานาฬิกาทางออกของท่อไรเซอร์ที่ต่างกัน 4 ค่า อันได้แก่ รัศมีทางออกของท่อไรเซอร์เท่ากับ 0.100 เมตร (100 เปอร์เซ็นต์เทียบกับรัศมีของท่อไรเซอร์), 0.075 เมตร (75 เปอร์เซ็นต์เทียบกับรัศมีของท่อไรเซอร์), 0.050 เมตร (50 เปอร์เซ็นต์เทียบกับรัศมีของท่อไรเซอร์) และ 0.025 เมตร (25 เปอร์เซ็นต์เทียบกับรัศมีของท่อไรเซอร์)

ผลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีขนาดแตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.24 และ 4.25 ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากการจำลองจะเห็นได้ว่าผลของขนาดทางออกที่ต่างกันไม่ส่งผลให้ความดันลดบริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์แตกต่างกันมากนัก แต่บริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์ซึ่งเป็นบริเวณใกล้ทางออกจะสังเกตเห็นว่ามีความแตกต่างกันเกิดขึ้น กล่าวคือ เมื่อรัศมีของทางออกท่อไรเซอร์มีค่าสูง ความดันลดบริเวณทางออกก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย เนื่องจากปริมาณของแก๊สที่สามารถออกจากระบบไปได้มากกว่า (พื้นที่ทางออกมีมาก ทำให้ของแก๊สออกได้มาก) และเมื่อลดขนาดของรัศมีทางออกของท่อไรเซอร์ลงมา ความดันลดบริเวณทางออกก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าเมื่อใช้รัศมีทางออกที่มีขนาดเล็ก จะมีความดันลดภายในสูงกว่าเล็กน้อย ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนจากผลของสัดส่วนปริมาตรของแก๊สเฉลี่ย และรูปคอนทัวร์ ที่จะได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป ในด้านผลของการจำลองในทิศทาง  $y$  พบว่ามีความสอดคล้องกัน

ภาพที่ 4.26 และ 4.27 แสดงผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแก๊สเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีขนาดแตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า ที่ขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าต่ำ จะมีปริมาณพลั๊กซ์ของแก๊สบริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์สูงกว่าเมื่อเทียบกับขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าสูง โดยเมื่อขนาดทางออกของท่อไรเซอร์เพิ่มขึ้น ปริมาณพลั๊กซ์ของแก๊สบริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์ก็จะมีค่าลดลง ทั้งในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$  เนื่องจากว่าขนาดทางออกที่มีขนาดเล็กนั้นจะทำให้ของแก๊สออกจากระบบได้ยาก จึงทำให้มีปริมาณของแก๊สตกกลับลงหรือคงเหลือในระบบมากกว่านั่นเอง ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากภาพคอนทัวร์ที่ได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป อย่างไรก็ตาม ที่บริเวณผนัง ปริมาณพลั๊กซ์ของแก๊สของระบบที่มีขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ขนาดใหญ่จะมีค่าสูงกว่า และเมื่อลดขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ลง ปริมาณพลั๊กซ์ของแก๊สที่บริเวณผนังก็มีค่าลดลงด้วย

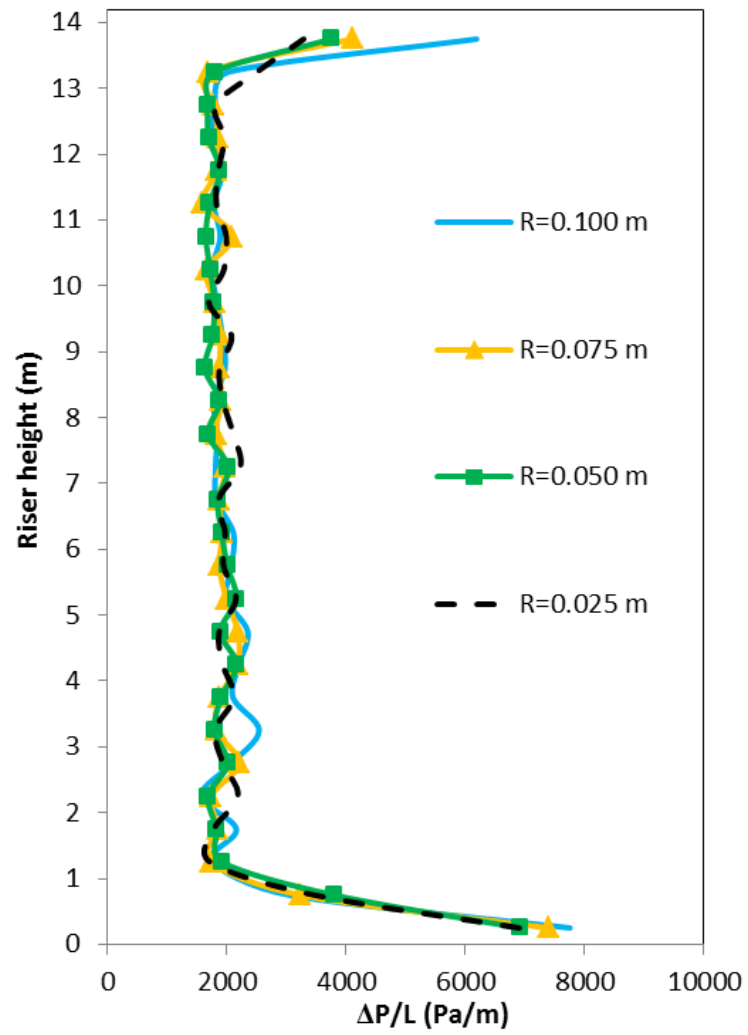
เนื่องจากว่า ปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งคิดมาจาก ความเร็วในแนวแกนคูณกับ สัดส่วนปริมาตรของแข็งคูณกับ ความหนาแน่นของของแข็ง ถึงแม้ว่าที่ขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ขนาดเล็กจะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งอยู่มากก็ตาม แต่ผลของความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่มีค่าน้อย (เพราะมีปริมาณของแข็งมาก) จึงทำให้ปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งบริเวณผนังน้อยกว่า อีกนัยหนึ่งคือ ผลของความเร็วของแข็งตามแนวแกนบริเวณผนังส่งผลมากกว่าปริมาณของแข็งนั่นเอง นอกจากนี้ยังสังเกตว่าผลในทิศทาง  $x$  ที่ขนาดทางออกของท่อไรเซอร์เท่ากับ 0.025 เมตร ซึ่งเป็นขนาดเล็กที่สุดในงานวิจัยนี้ มีความไม่สมมาตรของภาพเกิดขึ้น สาเหตุของความไม่สมมาตรในทิศทาง  $x$  เกิดมาจากเมื่อขนาดทางออกของท่อไรเซอร์มีขนาดเล็กส่งผลให้ของแข็งจะออกจากระบบได้ยากจึงตกกลับลงมาด้านล่างบริเวณฝั่งเดียวกับทางออกหรือในที่นี้ก็คือในทิศทาง  $x$  นั่นเอง จึงเกิดความไม่สมมาตรขึ้น และเมื่อของแข็งตกลงมาส่งผลให้ของแข็งสะสมตัวอยู่บริเวณด้านขวาของท่อไรเซอร์ (ในทิศทาง  $x$ ) มากกว่าด้านซ้ายจึงทำให้ความเร็วของแข็งตามแนวแกนในทิศทาง  $x$  บริเวณด้านขวาของท่อไรเซอร์มีค่าน้อยกว่าด้านซ้าย ทำให้ปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งไม่สมมาตรนั่นเอง

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีขนาดเล็กจะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงกว่าขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากทางออกขนาดเล็กส่งผลให้ของแข็งออกสู่ระบบได้ยาก ดังนั้นของแข็งจึงตกกลับลงมาด้านล่าง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ De Wilde และคณะ (2003) ผลที่ได้สอดคล้องกับความดันลุดที่เกิดขึ้น และในส่วนผลในทิศทาง  $y$  นั้นพบว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

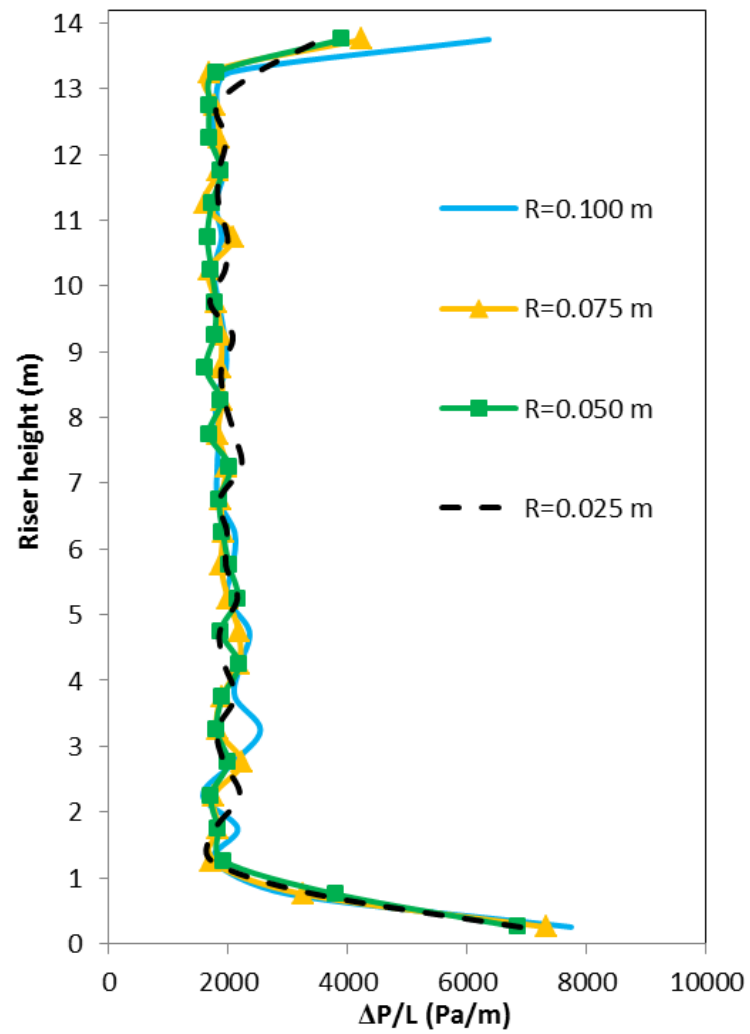
ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.30 เมื่อพิจารณาภาพคอนทัวร์จะเห็นได้ว่าขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีขนาดเล็กจะมีปริมาณของแข็งในระบบสูงกว่าขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีขนาดใหญ่เล็กน้อย นอกจากนี้ที่ขนาดของทางออกของท่อไรเซอร์เท่ากับ 0.025 เมตร จะเห็นถึงการตกกลับของของแข็งบริเวณด้านข้างฝั่งเดียวกันกับที่ตั้งของทางออก โดยสามารถสังเกตได้จากในภาพที่ 4.31 (ง) ที่ระดับความสูงเท่ากับ 13 เมตร โดยสิ่งที่เกิดขึ้นแตกต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ De Wilde และคณะ (2003) ที่ได้ศึกษาผลของขนาดทางออกในระบบสามมิติแล้วพบว่า ทางออกที่มีขนาดเล็กจะมีโอกาสที่ของแข็งจะออกจากระบบได้ยากและตกกลับลงมาด้านตรงข้ามของทางออก สาเหตุที่ต่างกันอาจเนื่องมาจากในงานวิจัยนี้มีขนาดเครื่องปฏิกรณ์ที่เล็กกว่า และขนาดทางออกที่เล็กมาก ส่งผลให้อุณหภูมิของแข็งออกจากระบบได้ยากกว่า อุณหภูมิ

ของแข็งไปชนกับผนังทางออก จึงมีโอกาสตกกลับมาฝั่งเดียวกับทางออกมากกว่าฝั่งตรงข้ามเล็กน้อย

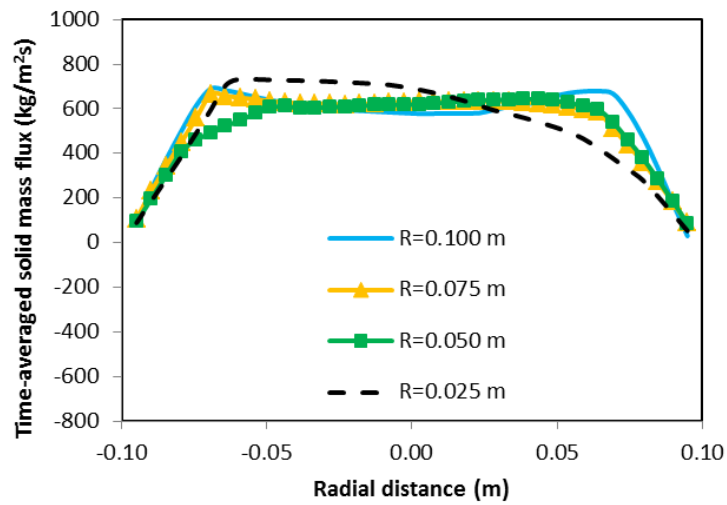




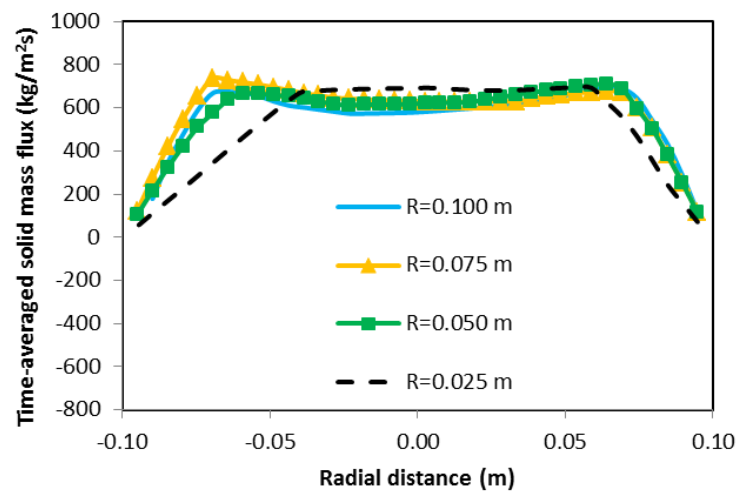
ภาพที่ 4.24 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง x



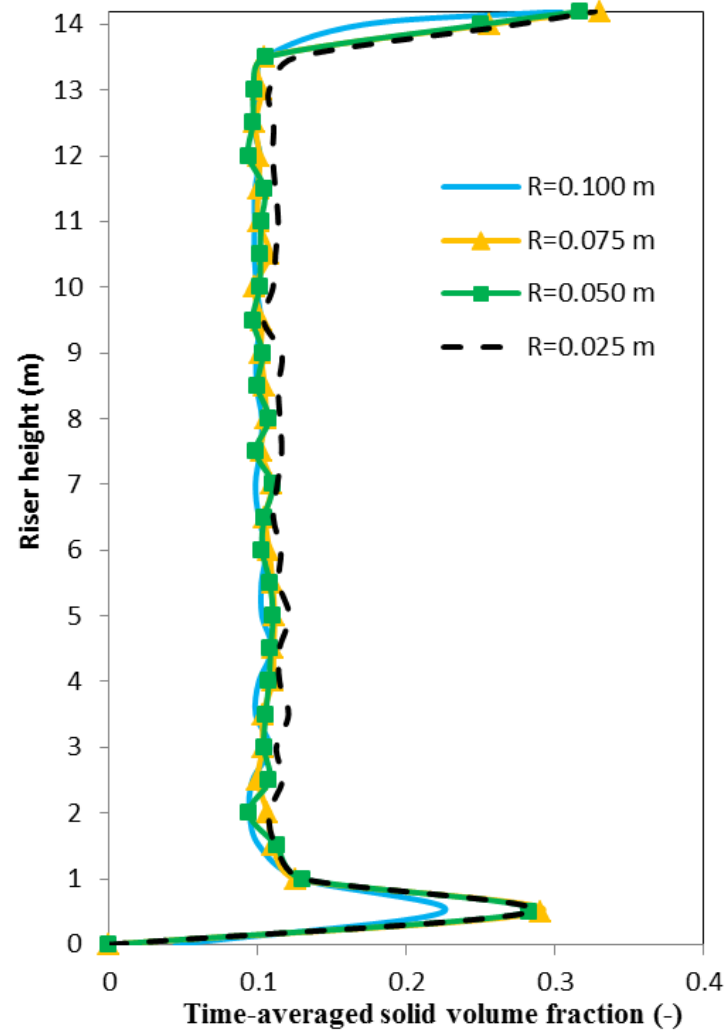
ภาพที่ 4.25 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อโรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง y



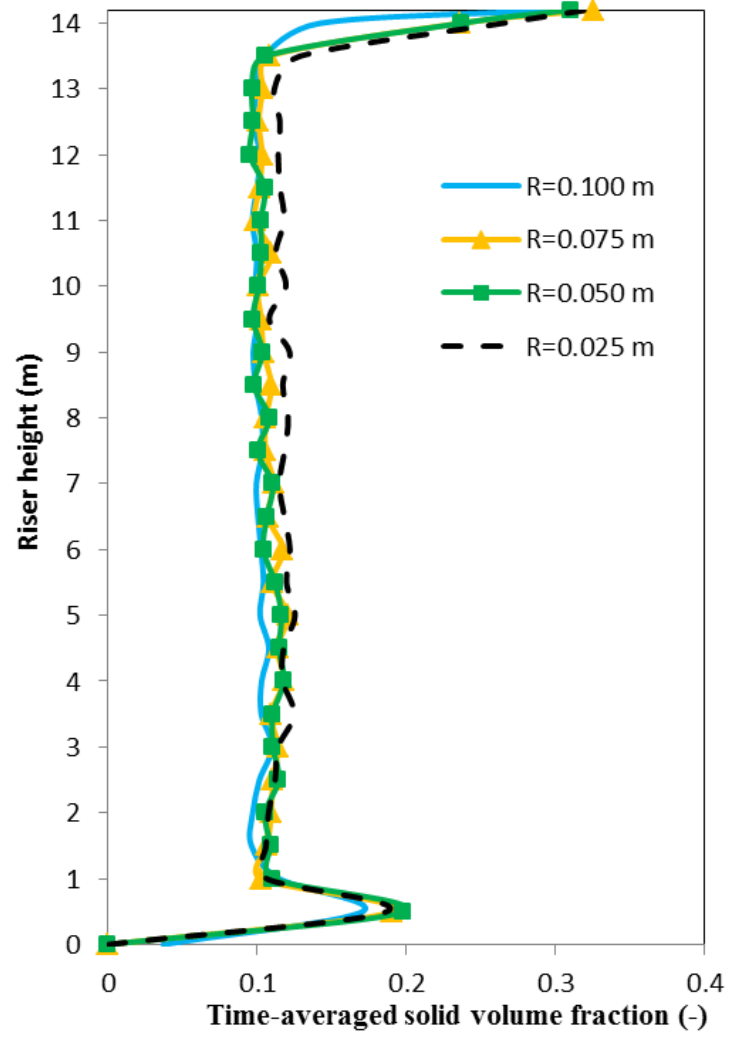
ภาพที่ 4.26 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของขนาดทางออกของท่อโรเซอรัที่แตกต่างกันในทิศทาง x



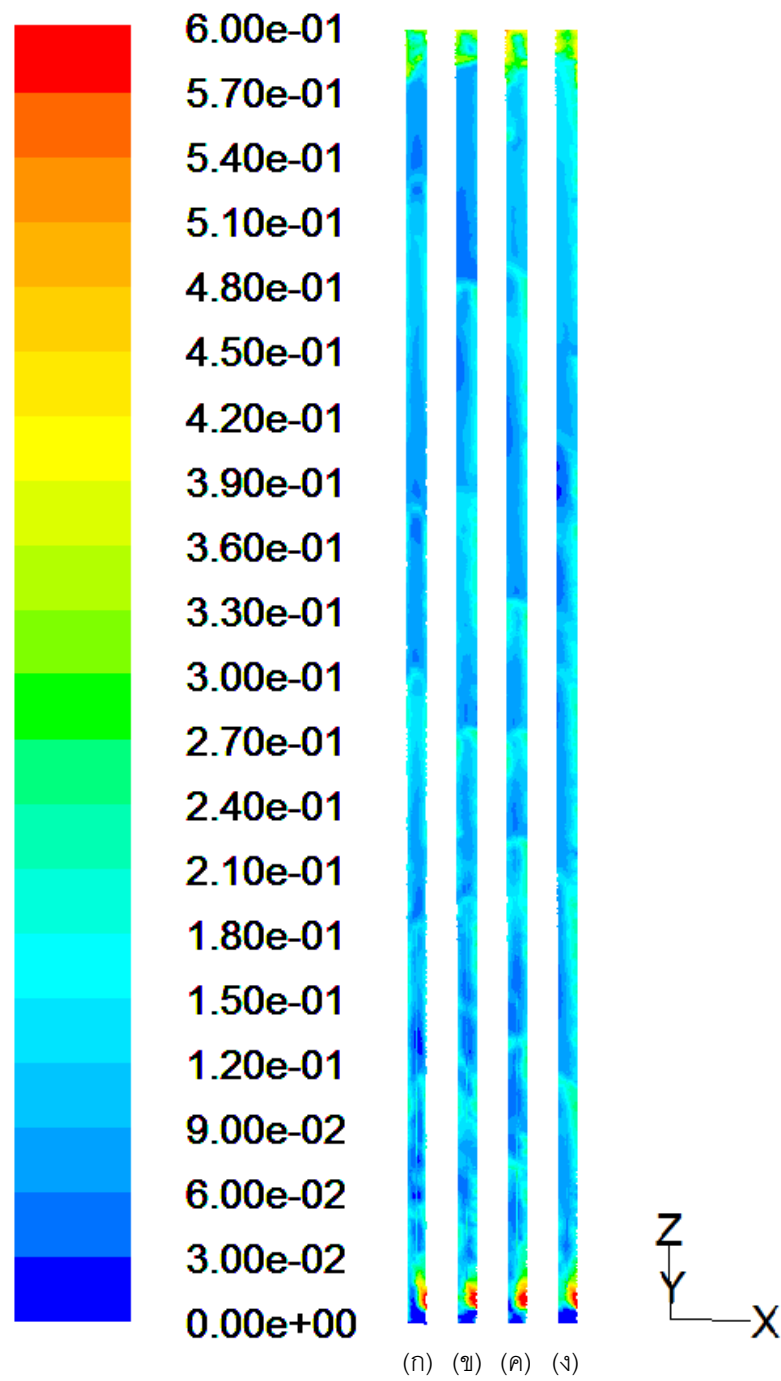
ภาพที่ 4.27 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของขนาดทางออกของท่อโรเซอรัที่แตกต่างกันในทิศทาง y



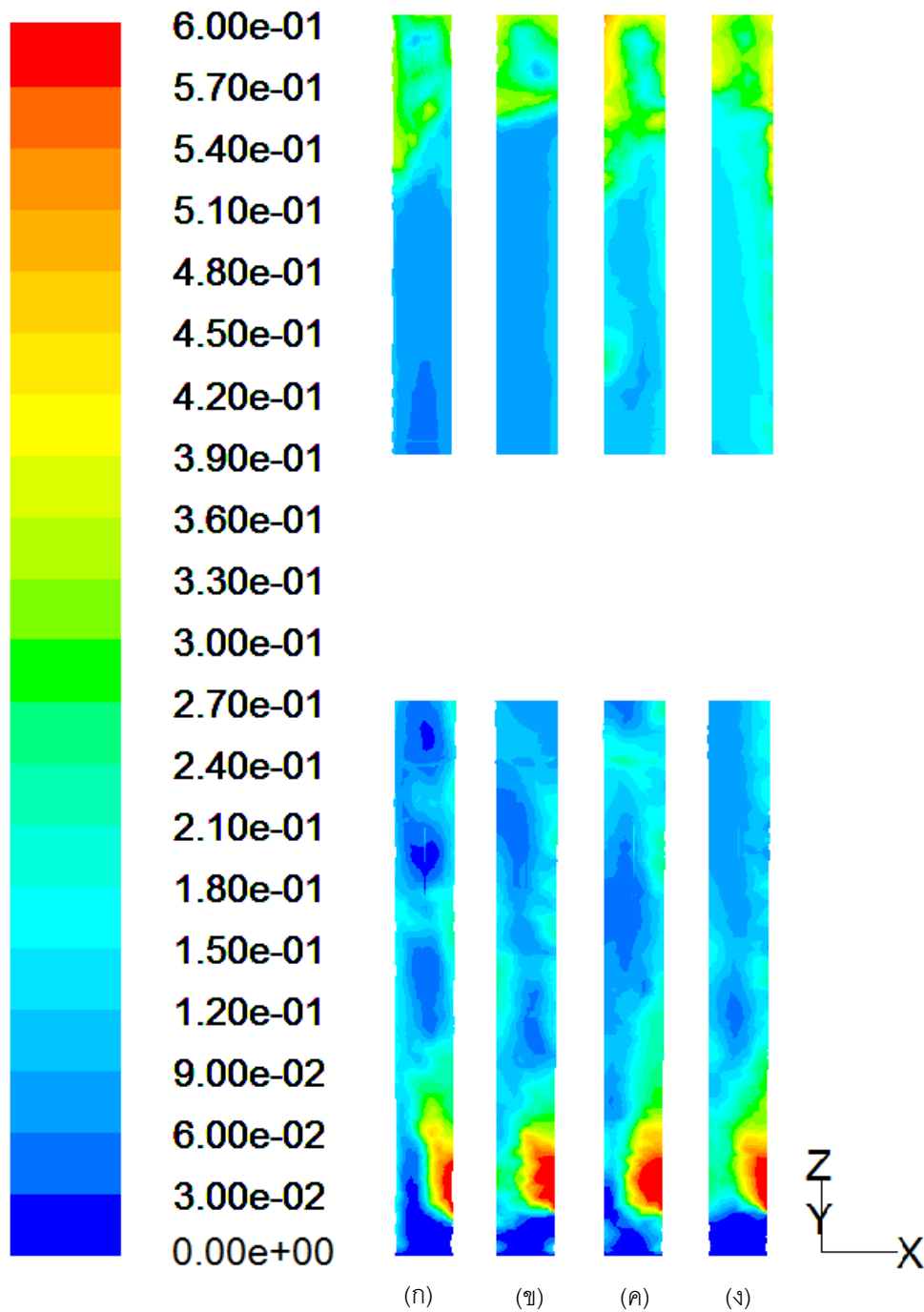
ภาพที่ 4.28 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง x



ภาพที่ 4.29 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง y



ภาพที่ 4.30 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาณของแรงในท่อไรเซอร์ของขนาดทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกัน โดยที่ (ก) รัศมี = 0.100 เมตร (ข) รัศมี = 0.075 เมตร (ค) รัศมี = 0.050 เมตร และ (ง) รัศมี = 0.025 เมตร



ภาพที่ 4.31 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแรงในท่อไรเซอรัของขนาดทางออกของท่อไรเซอรัที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร และ 13.0 เมตร โดยที่ (ก) รัศมี = 0.100 เมตร (ข) รัศมี = 0.075 เมตร (ค) รัศมี = 0.050 เมตร และ (ง) รัศมี = 0.025 เมตร

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของตัวแปรแบบจำลอง (Modeling parameters) อันประกอบด้วย ผลของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาค ผลของ Specularity coefficient ผลของ Restitution coefficient ผลของแบบจำลองความหนืด ผลของความหนืดเสียดทาน ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้า และ ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบ ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ภายในระบบและนำค่าที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) เพื่อไปหาแบบจำลองที่ดีที่สุดในส่วนท้ายของการจำลอง

#### 4.5 ผลของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาค

แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาค คือ ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งถูกนิยามให้เป็นตัวแทนแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุตั้งที่ได้แสดงสมการในบทที่ 2 โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคที่มีค่าสูงแสดงถึงแรงต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มาก ในงานวิจัยที่ผ่านมาของ Jie และ Jam (2005) ได้บ่งชี้ว่าแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคส่งผลอย่างมากต่อการจำลองในระบบของฟลูอิดส์เบดในภูมิภาคแก๊ส-ของแข็ง นอกจากนี้ Esmaili และ Mahinpey (2011) ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคที่แตกต่างกันย่อมให้ผลที่แตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรสัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคที่แตกต่างกัน 4 แบบ คือ แบบจำลองของ EMMS (Yang และคณะ, 2003) Gidaspow (Gidaspow และคณะ, 1992) Syamlal (Syamlal และคณะ, 1993) และ Wen&Yu (Wen และ Yu, 1966) ผลการจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermisinsuwan และคณะ (2009) อันได้แก่ ผลของความดันลดภายในท่อไรเซอร์ และผลของปริมาณฟลักซ์ของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตรเท่านั้น ส่วนผลของความหนาแน่นของของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตร จะได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ดีที่สุดซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายของงานวิจัย

ผลของความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ในทิศทาง x และทิศทาง y ได้ถูกนำเสนอไว้ในภาพที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแบบจำลองของ Gidaspow, Syamlal และ Wen&Yu ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมของความดันได้ถูกต้องมากนัก กล่าวคือ ทั้งสามแบบจำลองทำนายผลของความดันลดบริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง และลักษณะของความดันลดที่เกิดขึ้นมีลักษณะคงที่ตลอดความสูงของท่อไรเซอร์ แต่ในความเป็นจริงความดันลดที่เกิดขึ้นควรมีลักษณะสูงบริเวณด้านล่าง จากนั้นค่อยๆ ลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น



และความดันจะสูงอีกครั้งบริเวณทางออกของท่อ มีลักษณะเฉพาะตัวที่เรียกว่า S-shape นั้นเอง มีเพียงแบบจำลองของ EMMS เท่านั้นที่สามารถทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าแบบจำลองของ EMMS จะพัฒนามาจากแนวคิดการเกิดกลุ่มก้อนอนุภาค (Cluster) ที่เกิดขึ้นในระบบ (Yang และคณะ, 2003; Shah และคณะ, 2011) ส่งผลให้สามารถทำนายใน ส่วนบริเวณด้านล่างของท่อโรเซออร์ซึ่งเป็นบริเวณที่มีปริมาณของแข็งอยู่สูงนั่นเอง เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นที่ไม่มีการคิดผลของการเกิดกลุ่มก้อนอนุภาคและเป็นแบบจำลองที่คิดมาจากระบบที่เฉื่อย อย่างไรก็ตามที่บริเวณด้านล่างผลการจำลองจากแบบจำลองของ EMMS ที่ได้มีค่าต่ำกว่าข้อมูลการทดลองเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองในระบบสองมิติและสามมิติพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน ค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ส่วนผลของความดันลดในทิศทาง  $y$  พบว่าผลการจำลองสอดคล้องกันกับในทิศทาง  $x$

ภาพที่ 4.34 และ 4.35 แสดงผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากผลการจำลองพบว่าแบบจำลองของ EMMS ให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ เล็กน้อยเช่นเดียวกับผลของความดันลด อย่างไรก็ตามสิ่งที่แตกต่างอย่างเห็นได้ชัดคือในทิศทางของแกน  $x$  (ภาพที่ 4.36) ผลปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยของแบบจำลองของ Gidaspow, Syamlal และ Wen&Yu จะไม่มีความสมมาตรเนื่องจากรูปแบบของการป้อนเข้าในทิศทางเดียว ส่งผลให้ของแข็งไปรวมกันด้านซ้ายของท่อโรเซออร์ แต่แบบจำลองของ EMMS มีความสมมาตร เนื่องจากมีการคิดผลของการเกิดกลุ่มอนุภาคขึ้น จึงสามารถทำนายการตกกลับลงมาของกลุ่มอนุภาคได้นั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองในระบบสองมิติและสามมิติ พบว่า ผลการจำลองในระบบสามมิติมีค่าน้อยกว่าการจำลองในระบบสองมิติ โดยเฉพาะบริเวณตรงกลางของท่อโรเซออร์ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดมาจากในระบบสามมิติจะพิจารณามิติความลึกซึ่งเป็นส่วนด้านหน้าและด้านหลังของท่อโรเซออร์ ดังนั้น ของแข็งจึงมีโอกาสเคลื่อนที่ไปตกบริเวณด้านหน้ากับด้านหลังของท่อโรเซออร์นอกจากบริเวณด้านข้างด้วย ส่งผลให้ปริมาณของแข็งบริเวณตรงกลางของท่อโรเซออร์จึงลดลงนั่นเอง ผลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Briongos และ Guardiola (2005) และ Chalermisinsuwan และคณะ (2011)

ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อโรเซออร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ ผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลของความดันลดภายในท่อโรเซออร์กล่าวคือ แบบจำลองของ EMMS สามารถทำนายสัดส่วนปริมาตรของแข็งได้มากกว่าแบบจำลองอื่นๆ ทั้งในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$

ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไปข้างต้น ผลที่ได้สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนเมื่อพิจารณาผลของคอนทัวร์ในภาพที่ 4.40 และ 4.41 ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

ผลความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคแบบต่างๆ สำหรับทิศทาง  $x$  และ  $y$  แสดงไว้ในภาพที่ 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ทุกระดับความสูง (ยกเว้นที่ความสูงเท่ากับ 14 เมตรซึ่งเป็นบริเวณทางออก) ความเร็วของแข็งตามแนวแกนของแบบจำลองของ EMMS มีค่าน้อยกว่าแบบจำลองต้านการเคลื่อนที่แบบอื่นๆ เนื่องจากลักษณะเด่นของแบบจำลองที่สามารถทำนายการเกิดกลุ่มก้อนของแข็งหรือทำนายบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่อย่างหนาแน่นได้ดี ส่งผลให้สามารถทำนายอนุภาคของแข็งที่เคลื่อนจากด้านล่างสู่ด้านบนได้มากกว่าแบบจำลองอื่นๆ ดังนั้นความเร็วของแข็งตามแนวแกนจึงมีค่าต่ำกว่าเพราะสามารถทำนายปริมาณของแข็งได้มากกว่านั่นเอง อย่างไรก็ตาม สามารถสังเกตได้ว่าที่ความสูงต่างๆ ประมาณ 0.5-3.9 เมตร ผลความเร็วของแข็งตามแนวแกนในทิศทาง  $x$  และ  $y$  แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการป้อนเข้าของของแข็งเข้าในทิศทาง  $x$  นั่นเองจึงทำให้ของแข็งไปกองบริเวณด้านซ้ายของท่อไรเซอร์ นอกจากนี้บริเวณทางออกที่ความสูงเท่ากับ 14 เมตรก็จะพบความไม่สมมาตรระหว่างสองทิศทางของความเร็วของแข็งตามแนวแกนเช่นเดียวกัน

จากที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งว่าผลของความแตกต่างระหว่างแบบจำลองสามารถพบได้ชัดเจนจากภาพคอนทัวร์ โดยในภาพที่ 4.40 แสดงภาพคอนทัวร์ผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคแบบต่างๆ สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนว่าแบบจำลองของ EMMS ที่แสดงในภาพ 4.40 (ง) มีการเคลื่อนตัวของอนุภาคของแข็งจากด้านล่างไปสู่ด้านบนของท่อไรเซอร์ และสามารถพบถึงความหนาแน่นของปริมาณของแข็งที่เกิดขึ้นได้ (สีที่เข้มหมายถึงสัดส่วนปริมาตรของแข็งที่มากกว่า) ในขณะที่แบบจำลองอื่นๆ ไม่พบการเกิดขึ้นในลักษณะนี้ ปรากฏเพียงลักษณะที่เจือจางตลอดความสูงของท่อไรเซอร์เท่านั้นเอง และเมื่อพิจารณาที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ในภาพที่ 4.41 จะเห็นได้อย่างชัดเจนถึงปริมาณของแข็งที่มากกว่าในแบบจำลองของ EMMS ในภาพ 4.41 (ง) เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ

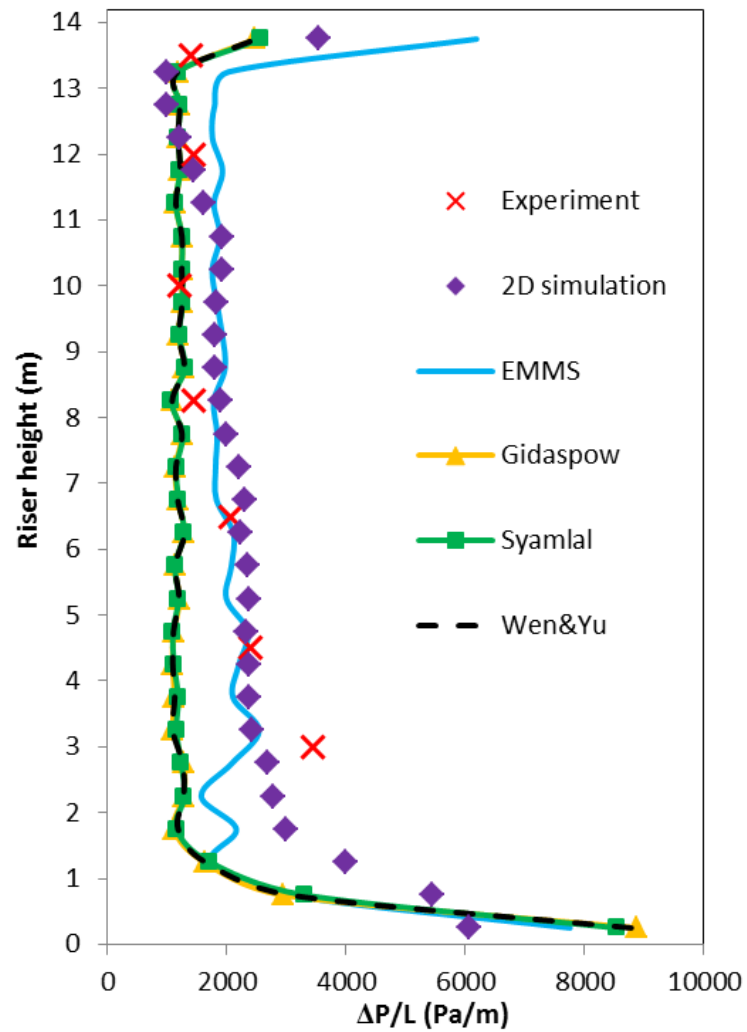
อุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular temperature) เป็นหนึ่งในตัวแปรที่สามารถใช้อธิบายถึงปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของแก๊ส-ของแข็งภายในเครื่องปฏิกรณ์ มีนิยามคือ พลังงานจลน์ภายในหรือความเร็วกวัดแกว่งของอนุภาคของแข็ง Tartan และ Gidaspow (2004) ได้ทำการหาอุณหภูมิแกรนูลาร์ของอนุภาคโดยใช้ทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็ง และพบว่า มี 2 แบบคือ อุณหภูมิ

แกรนูลาร์แบบลามินาร์ (Laminar granular temperature) ซึ่งหาค่ามาจากพลังงานการกวัดแกว่งของอนุภาคเดียว กับอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนซ์ (Turbulent granular temperature) ที่หาค่ามาจากค่าเฉลี่ยของ Normal Reynolds stress ที่แสดงพลังงานการกวัดแกว่งของกลุ่มอนุภาค ในการคำนวณค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์จะได้ค่ามาจากตัวโปรแกรมจำลองกระบวนการ ในขณะที่อุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนซ์ ( $\theta_t$ ) สามารถคำนวณได้จากค่าเฉลี่ยของความเร็วการกวัดแกว่งกำลังสองในสามทิศทาง ดังสมการด้านล่าง

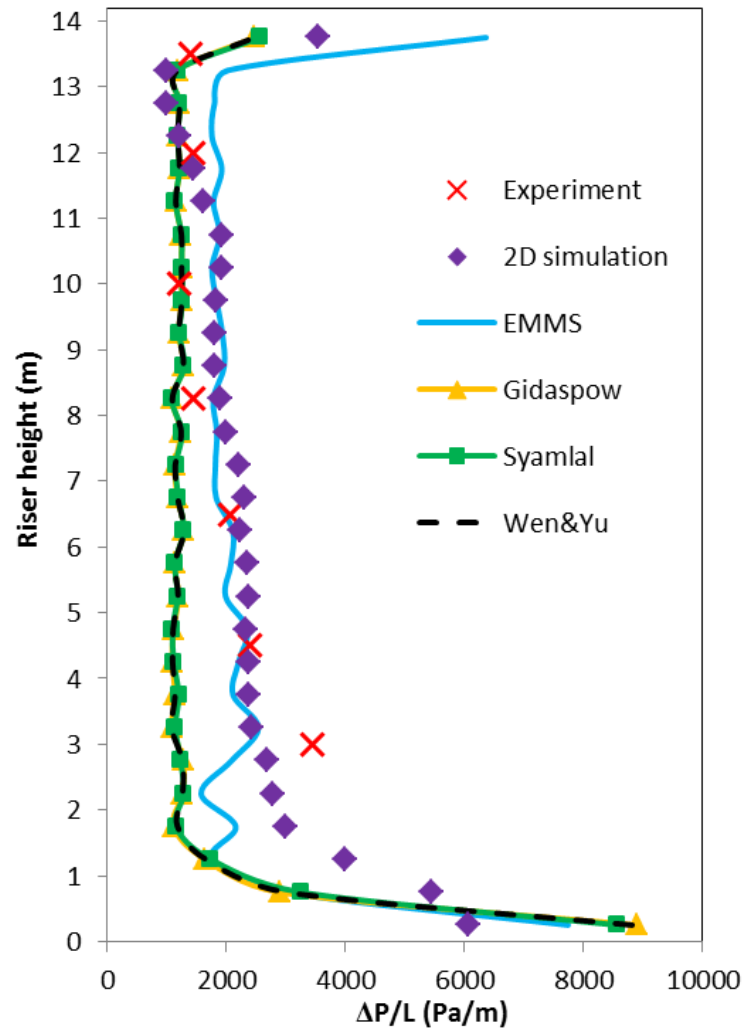
$$\theta_t(t) \cong \frac{1}{3} \overline{v_x'v_x'} + \frac{1}{3} \overline{v_y'v_y'} + \frac{1}{3} \overline{v_z'v_z'} \quad (4.1)$$

ผลรวมระหว่างอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์กับอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนซ์ จะเรียกว่า อุณหภูมิแกรนูลาร์รวม (Total granular temperature) ตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ จากตาราง พบว่า แบบจำลองของ EMMS มีค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์กับอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนซ์สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ ในขณะที่แบบจำลองอื่นจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากว่าแบบจำลองของ EMMS สามารถทำนายการเกิดกลุ่มก้อนอนุภาคในระบบได้ ส่งผลให้สามารถทำนายการสิ้นหรือการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เกิดขึ้นในระบบได้ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ และยังทำให้อุณหภูมิแกรนูลาร์รวมมีค่าสูงตามไปด้วย เมื่อพิจารณาในทุกแบบจำลองจะพบว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนซ์มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์ สาเหตุเกิดจากระบบที่ทำการศึกษาเป็นระบบที่มีอนุภาคของแข็งขนาดเล็กอยู่มาก ดังนั้น ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนซ์ที่แสดงถึงพลังงานจากกลุ่มก้อนอนุภาคจึงมีผลเหนือกว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์ที่แสดงถึงพลังงานจากอนุภาคเดียว (มีการสั่นของกลุ่มอนุภาคมากกว่าอนุภาคเดียวนั่นเอง) จึงใช้ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนซ์เป็นตัวแทนของระบบ นอกจากนี้ จะเห็นว่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์กับอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนซ์ในแบบจำลองของ EMMS ไม่แตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นที่ค่าทั้งสองแตกต่างกันมาก เมื่อพิจารณาผลของความสูงพบว่าแบบจำลองของ Gidaspow, Syamlal และ Wen&Yu แสดงให้เห็นว่าเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นอุณหภูมิแกรนูลาร์รวมมีค่าลดลง ที่เป็นเช่นนี้เกิดจากทั้งสามแบบจำลองไม่สามารถทำนายการเคลื่อนตัวของอนุภาคของแข็งจากด้านล่างขึ้นไปด้านบนได้ ทำนายเป็นเพียงลักษณะที่เฉื่อย

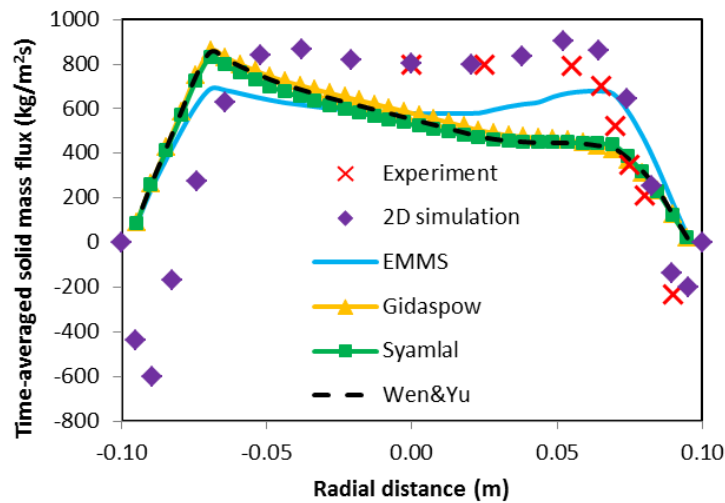
ดังนั้น เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นจึงมีส่วนปริมาตรของแข็งลดลง ทำให้การสั่นของอนุภาคลดลงตาม ปริมาณของแข็งนั้น คุณสมบัติแก๊วแลวาร์รวมจึงลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นนั่นเอง แต่ในกรณีของ แบบจำลองของ EMMS ซึ่งสามารถทำนายการเคลื่อนตัวของอนุภาคของแข็งขึ้นสู่ด้านบนได้ พบว่า คุณสมบัติแก๊วแลวาร์รวมมีค่าลดลงบริเวณตรงกลางท่อโรเตอร์เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีปริมาณ ของแข็งอยู่น้อย และจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งบริเวณด้านบนของท่อโรเตอร์ซึ่งที่บริเวณใกล้กับทางออก จะมีปริมาณของแข็งอยู่มาก การสั่นของอนุภาคจึงมีค่ามากตามไปด้วย ในส่วนผลของทิศทาง  $y$  ที่ ได้แสดงในตารางที่ 4.2 พบว่ามีความสอดคล้องกันกับผลในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกัน



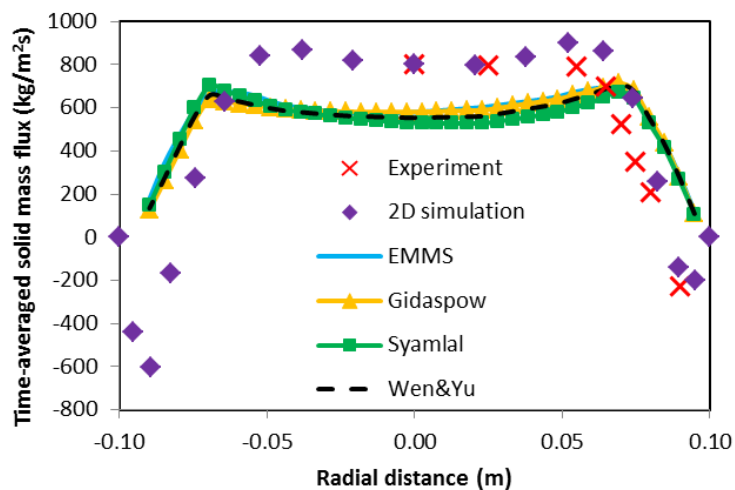
ภาพที่ 4.32 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm sinuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



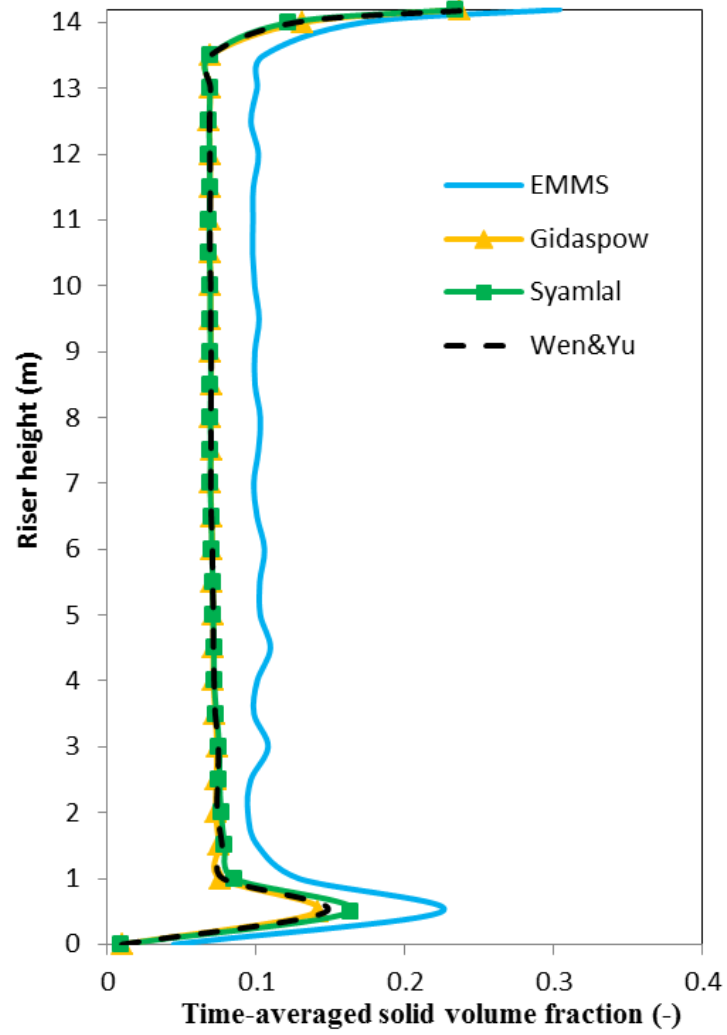
ภาพที่ 4.33 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y



ภาพที่ 4.34 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x

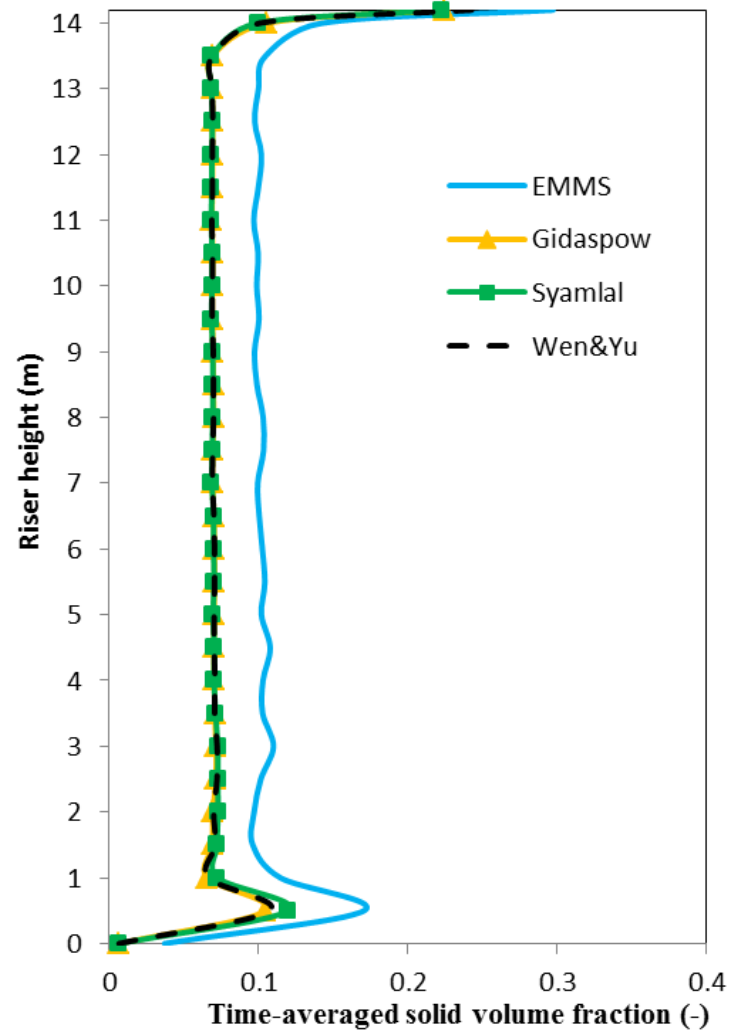


ภาพที่ 4.35 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y

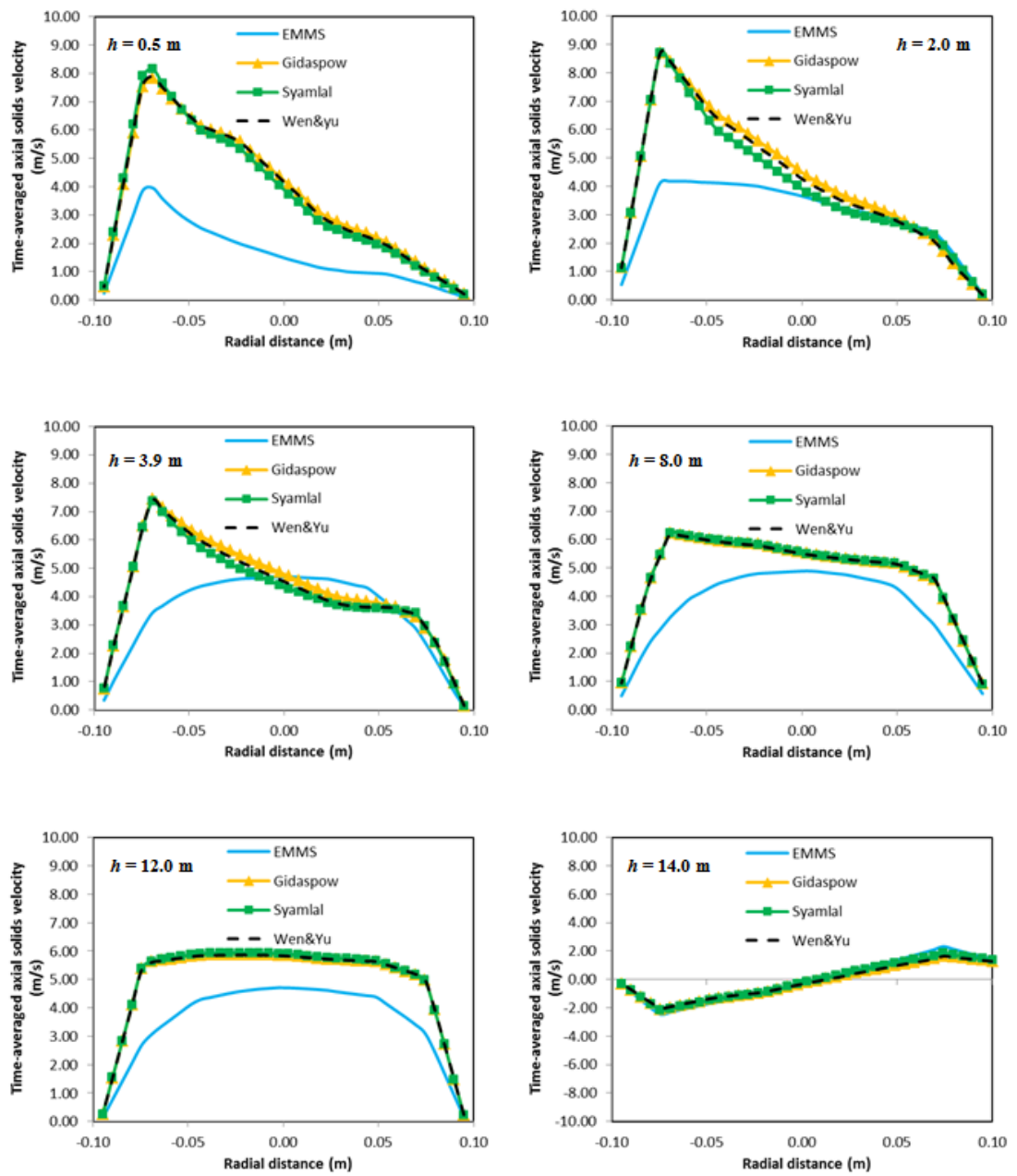


ภาพที่ 4.36 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคแบบต่างๆ ในทิศทาง x

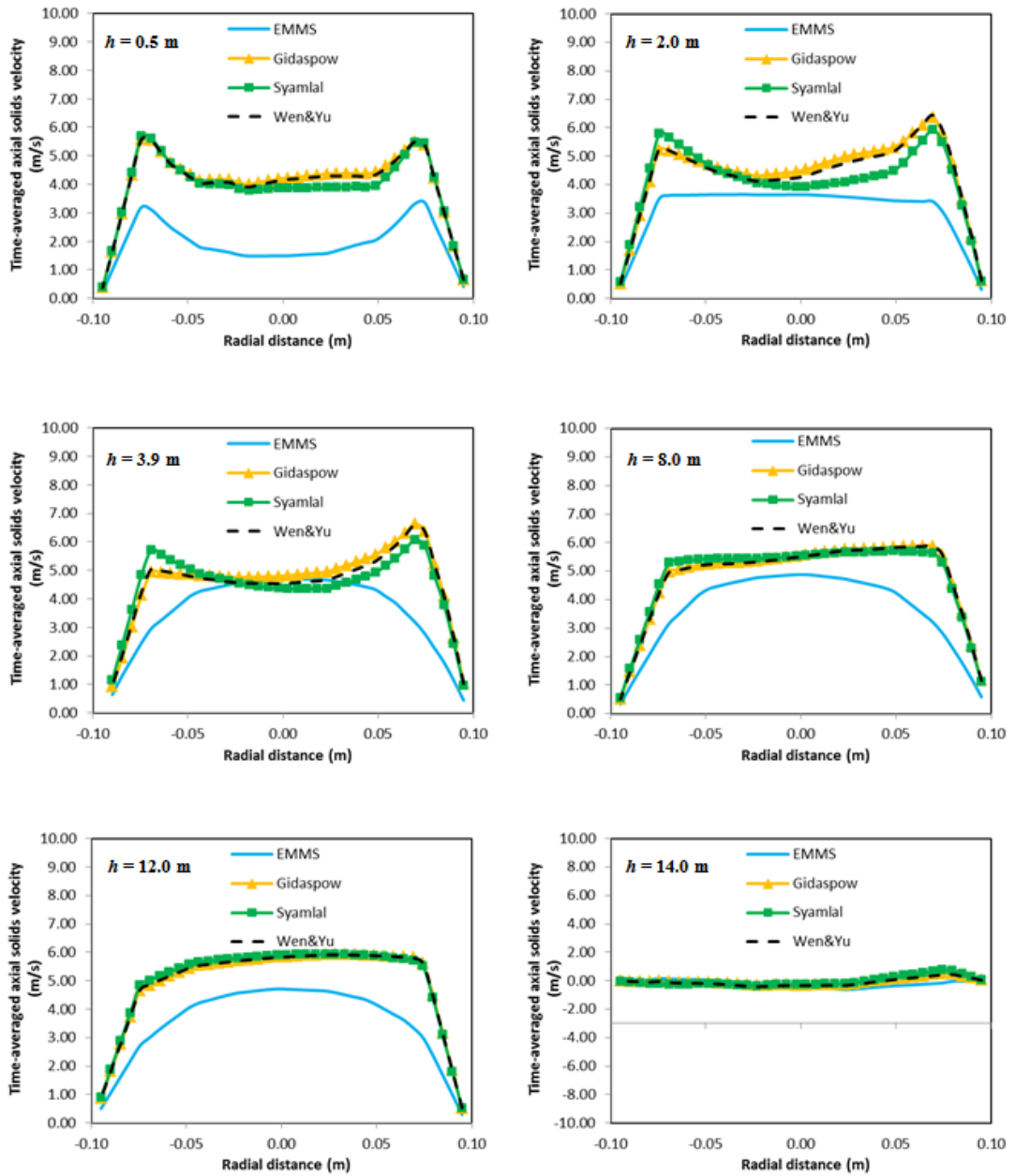




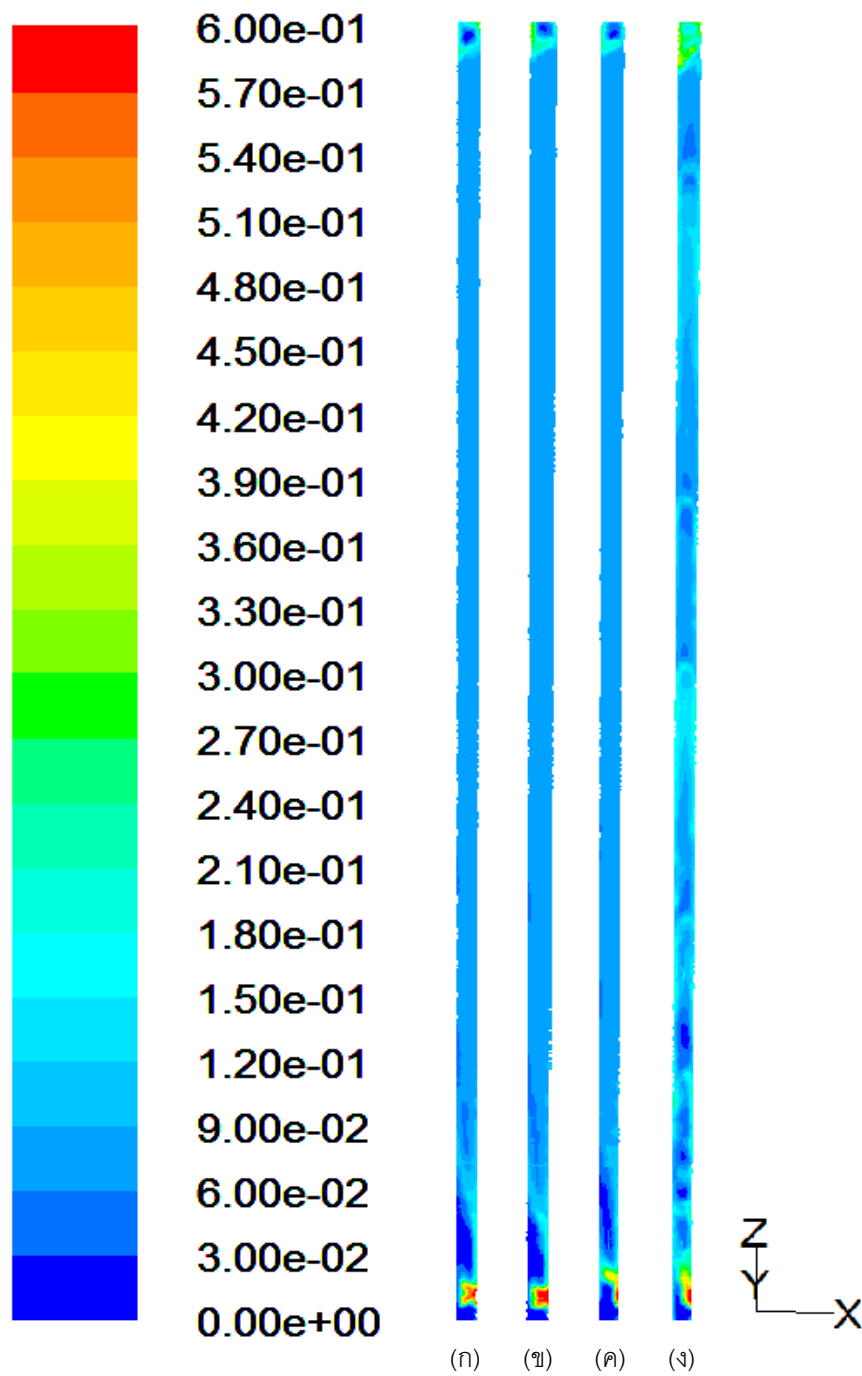
ภาพที่ 4.37 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคแบบต่างๆ ในทิศทาง y



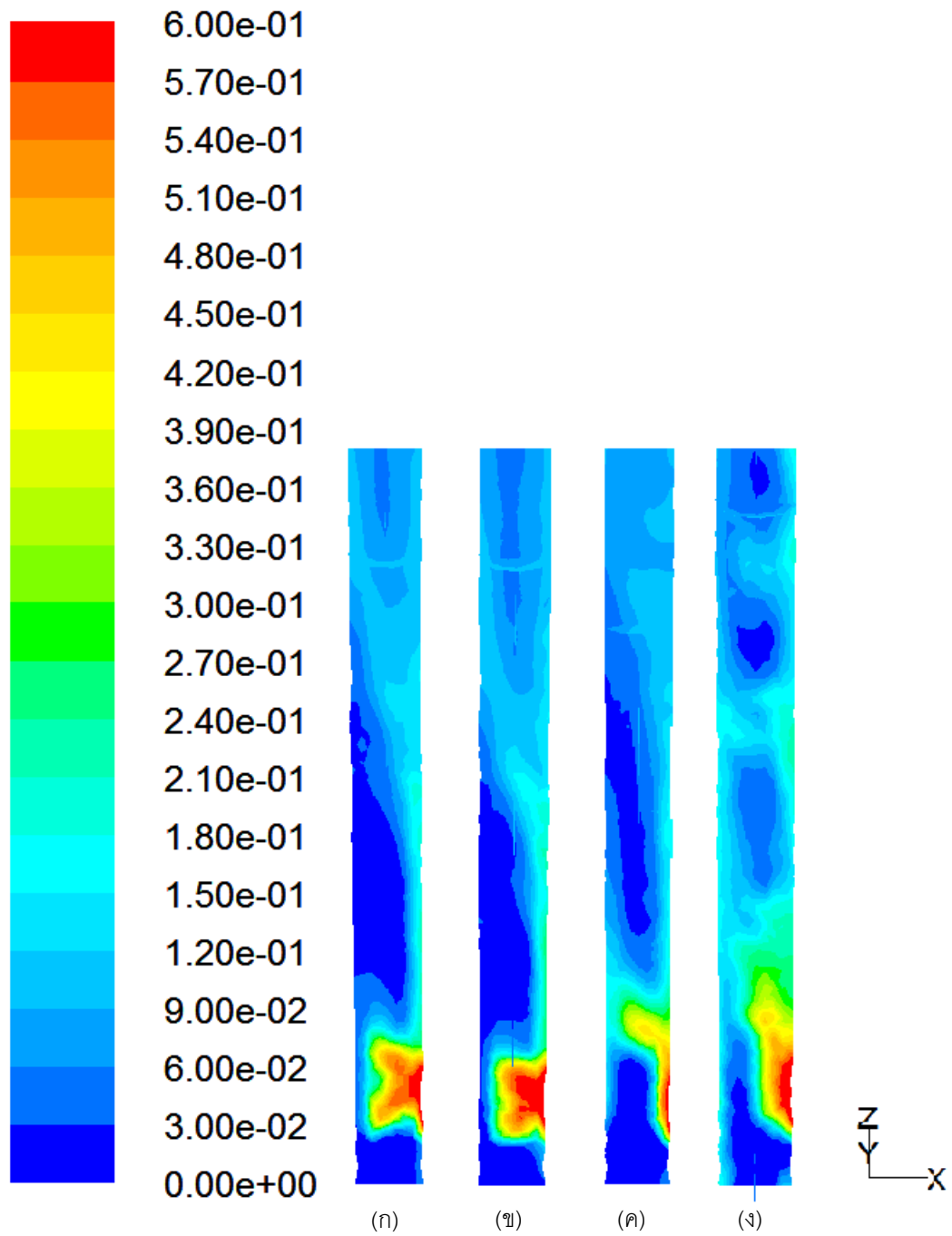
ภาพที่ 4.38 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.39 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ในทิศทาง  $y$



ภาพที่ 4.40 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อโรเตอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคแบบต่างๆ โดยที่ (ก) Gidaspow (ข) Wen&Yu (ค) Syamlal และ (ง) EMMS



ภาพที่ 4.41 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อโรเตอร์ของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างภูมิภาคแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยที่ (ก) Gidaspow (ข) Wen&Yu (ค) Syamlal และ (ง) EMMS

ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Drag model	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	EMMS	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
2	Gidaspow	3.5	8.7418E-07	2.1772E-02	2.1773E-02
		7.0	4.1879E-07	1.4411E-03	1.4415E-03
		10.5	2.5531E-08	2.0451E-04	2.0454E-04
		Averaged	6.3921E-06	9.8533E-02	7.8062E-03
3	Syamlal	3.5	6.8565E-07	8.8453E-02	8.8453E-02
		7.0	2.2301E-07	1.0998E-02	1.0999E-02
		10.5	2.0090E-08	1.4940E-03	1.4940E-03
		Averaged	8.0693E-06	1.1265E-01	3.3649E-02
4	Wen&Yu	3.5	9.2896E-07	2.4781E-02	2.4782E-02
		7.0	4.1262E-07	2.9974E-03	2.9979E-03
		10.5	2.3822E-08	2.7133E-04	2.7136E-04
		Averaged	5.8018E-06	9.6846E-02	9.3503E-03

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของแบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Drag model	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	EMMS	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
2	Gidaspow	3.5	1.6804E-06	2.9373E-02	2.9375E-02
		7.0	3.4197E-07	2.8801E-03	2.8805E-03
		10.5	3.0114E-08	1.5719E-04	1.5722E-04
		Averaged	2.1704E-05	9.3363E-02	1.0804E-02
3	Syamlal	3.5	1.2312E-06	1.3335E-01	1.3335E-01
		7.0	1.7246E-07	2.2607E-02	2.2607E-02
		10.5	2.2723E-08	3.2574E-03	3.2575E-03
		Averaged	3.4063E-06	1.2336E-01	5.3071E-02
4	Wen&Yu	3.5	1.9184E-06	3.9222E-02	3.9224E-02
		7.0	3.3792E-07	5.1470E-03	5.1474E-03
		10.5	2.8833E-08	3.5912E-04	3.5915E-04
		Averaged	1.9725E-05	9.1745E-02	1.4910E-02

#### 4.6 Specularity coefficient

ค่า Specularity coefficient เป็นหนึ่งในตัวแปรปรับค่าที่ผนังคู่กับค่า Restitution coefficient ซึ่งจะได้กล่าวในส่วนต่อไป ตัวแปรนี้แสดงถึง สัดส่วนของการชนที่ถ่ายเทโมเมนตัมไปสู่ผนังของระบบ หรืออีกนัยหนึ่งสามารถอธิบายได้ว่าผนังมีแรงเฉือนหรือความขรุขระมากน้อยเพียงใด ค่า Specularity coefficient ที่มีค่าเท่ากับศูนย์ หมายถึง จะมีปริมาณโมเมนตัมที่ถ่ายเทไปสู่ผนังของระบบน้อยหรือผนังไม่มีความขรุขระ ขณะที่ค่าเท่ากับหนึ่งหมายถึงปริมาณโมเมนตัมที่ถ่ายเทไปสู่ผนังของระบบมากหรือผนังมีความขรุขระนั่นเอง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันทั้งสิ้นจำนวน 4 ค่า ดังนี้ 0.5, 0.10, 0.001 และ 0.0001

ผลของความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันทั้งในทิศทาง x และ y ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.42 และ 4.43 ตามลำดับ ผลการจำลอง พบว่า ความดันลดมีค่าเป็นไปตามอุทกพลศาสตร์ คือ มีลักษณะสูงบริเวณด้านล่าง จากนั้น ค่อยๆ ลดลงมาเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น และความดันลดจะสูงอีกครั้งบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าผลของค่า Specularity coefficient ที่ต่างกันไม่ส่งผลให้ความดันลดภายในท่อไรเซอร์แตกต่างกันทั้งในทิศทาง x และทิศทาง y ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ McKeen และ Pugsley (2003) และ Almuttahir และ Taghipour (2008) ที่แสดงให้เห็นว่าค่า Specularity coefficient ส่งผลเล็กน้อยต่ออุทกพลศาสตร์ในระบบ เป็นเพียงตัวแปรที่ปรับค่าให้สอดคล้องกับการทดลองเท่านั้น โดยผลการจำลองที่ได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองและการจำลองในระบบสองมิติ

ภาพที่ 4.44 และ 4.45 แสดงผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง x และ y ตามลำดับ จากผลการจำลอง พบว่า ค่า Specularity coefficient เท่ากับ 0.5 ให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากกว่าค่าอื่นๆ และเมื่อลดค่า Specularity coefficient ลง ส่งผลให้ปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งบริเวณตรงกลางท่อไรเซอร์มีค่าลดลงทั้งในทิศทาง x และทิศทาง y เนื่องจากว่า ค่า Specularity coefficient ที่น้อยแสดงถึงปริมาณของโมเมนตัมที่ถ่ายเทไปสู่ผนังของระบบน้อยหรือผนังไม่มีความขรุขระ จึงทำให้อนุภาคของแข็งตกลงบริเวณผนังมาก อีกนัยหนึ่งคือ บริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์ก็จะมีปริมาณของแข็งน้อยลงนั่นเอง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าค่า Specularity coefficient ที่น้อยสุดในการจำลองนี้คือ 0.0001 มีปริมาณของแข็งบริเวณตรงกลางท่อไรเซอร์น้อยกว่าค่าอื่นๆ ผลการจำลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Benyahia และคณะ (2005)



และ Almuttahir และ Taghipour (2008) ที่ได้เสนอว่าค่า Specularity coefficient ที่น้อยจะส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่บริเวณผนังของระบบนั้นสูงขึ้น

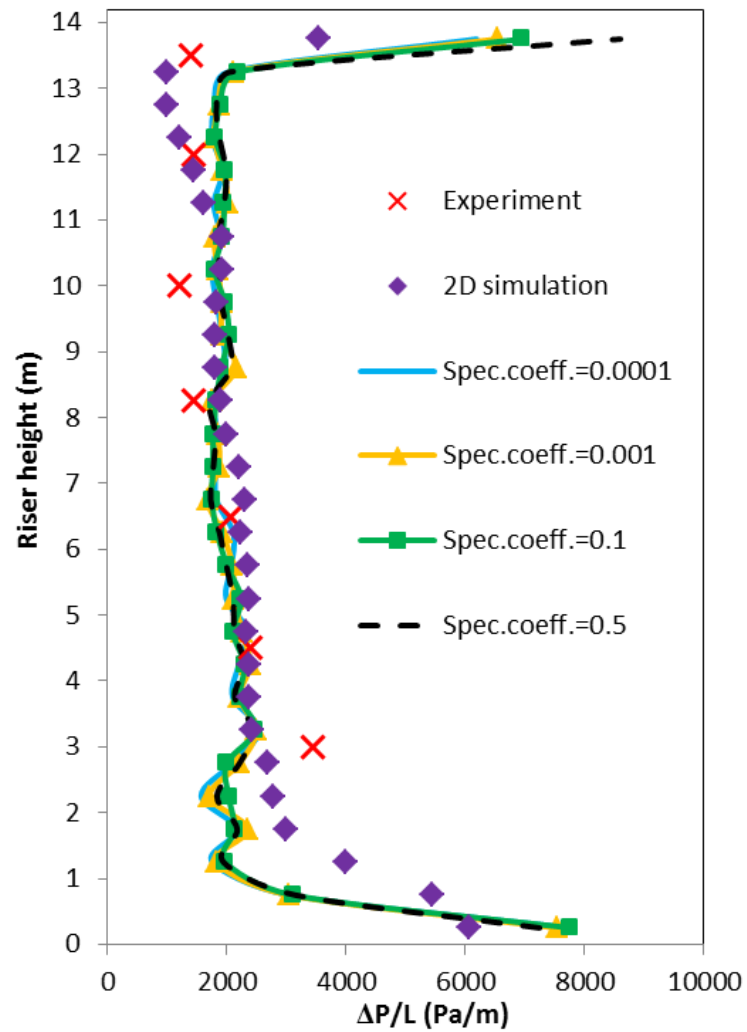
ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันทั้งสองทิศทางได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.46 และ 4.47 ผลที่ได้พบว่า สัดส่วนปริมาตรของแข็งจะมีค่าสูงบริเวณด้านล่างและด้านบนของท่อไรเซอร์ และพบว่าค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้สัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลของความดันลดดังที่ได้กล่าวไป เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างสองทิศทางพบว่า มีความเหมือนกันทั้งสองทิศทาง

ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันทั้งสองทิศทาง x และ y ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.48 และ 4.49 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้ความเร็วแตกต่างกันดังที่ได้กล่าวไปว่าตัวแปรนี้ไม่ส่งผลต่อระบบเท่าใดนัก เมื่อพิจารณาในแต่ละความสูงจะพบว่า ที่ความสูงต่ำๆ ความเร็วของแข็งตามแนวแกนจะมีค่าน้อยกว่าที่ความสูงมากขึ้น เนื่องจากที่บริเวณด้านล่างเป็นบริเวณที่มีอนุภาคของแข็งอยู่ปริมาณมากจึงส่งผลให้ความเร็วของแข็งตามแนวแกนมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีปริมาณของแข็งอยู่น้อยนั่นเอง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Zhang และคณะ (2008) และ Hartge และคณะ (2009) ที่ค้นพบว่า เมื่อความสูงเพิ่มขึ้นความเร็วของแข็งตามแนวแกนมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณของแข็งที่ลดลงนั่นเอง ในด้านผลระหว่างสองทิศทาง พบว่า ไม่มีความแตกต่างกัน เพียงแต่บริเวณความสูงต่ำๆ ผลความเร็วในแนวแกนในทิศทาง x และ y มีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากผลของการป้อนเข้าในทิศทาง x นั้นเอง และบริเวณทางออกที่ความสูงเท่ากับ 14 เมตรก็พบความไม่สมมาตรระหว่างสองทิศทางของความเร็วของแข็งตามแนวแกนเช่นเดียวกัน

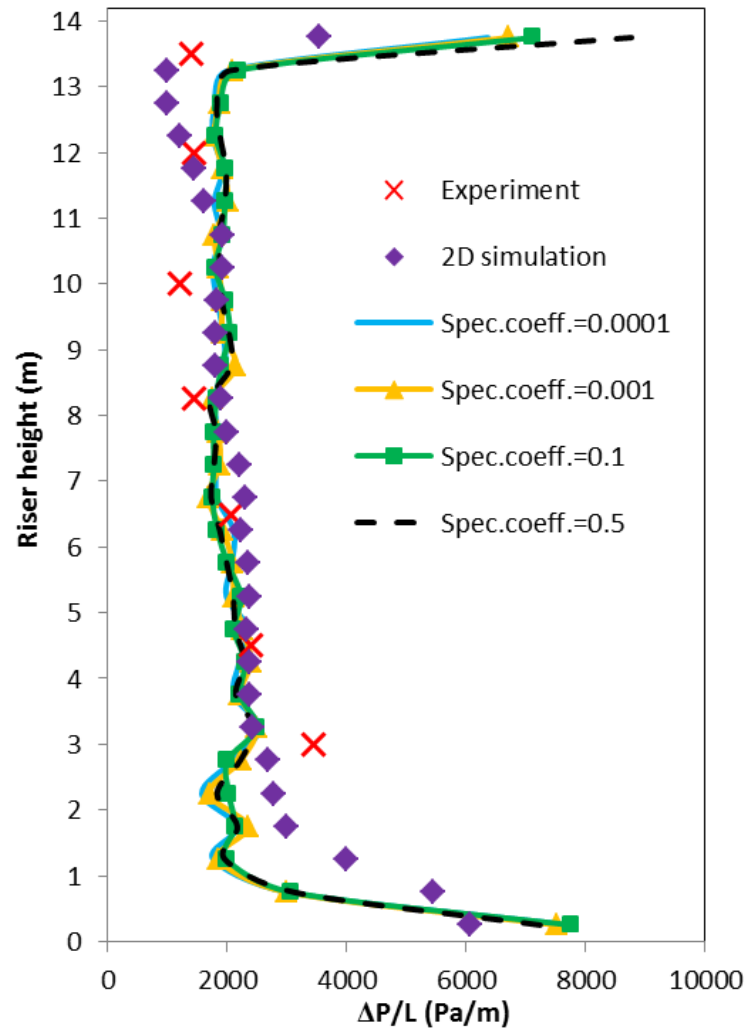
ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกัน ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.50 สังเกตเห็นได้ว่าทุกค่า Specularity coefficient จะมีการเคลื่อนตัวของอนุภาคของแข็งจากด้านล่างไปสู่ด้านบนของท่อไรเซอร์ และค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อระบบมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้กล่าวไปข้างต้น และเมื่อพิจารณาที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ในภาพที่ 4.51 จะเห็นได้อย่างชัดเจนถึงความไม่แตกต่างกันของผลที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลของอนุกรมมิแกรนูลาร์ที่ต่างกันของค่า Specularity coefficient ค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ จากตาราง พบว่า ทุกค่าของ Specularity coefficient ผลของอนุกรมมิ

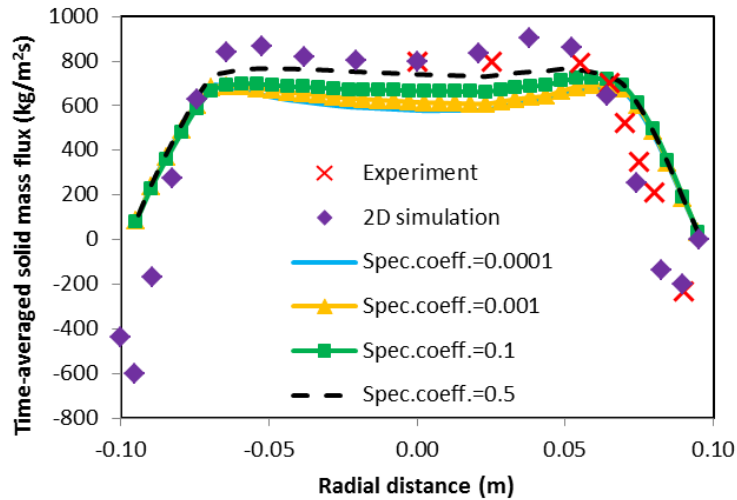
แกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนที่มีค่าสูงกว่าอนุภูมิภาคแกรนูลาร์แบบลามินาร์ เนื่องจากอนุภูมิภาคแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนที่คิดมาจากกลุ่มอนุภาคมีผลเหนือกว่าอนุภูมิภาคแกรนูลาร์แบบลามินาร์ที่คิดมาจากอนุภาคเดี่ยว ดังที่ได้กล่าวไป ผลของค่า Specularity coefficient ที่ต่างกัน ส่งผลให้ค่าอนุภูมิภาคแกรนูลาร์แตกต่างกันไปด้วย จะสังเกตได้ว่าค่า Specularity coefficient ที่น้อยจะมีอนุภูมิภาคแกรนูลาร์รวมเฉลี่ยสูงกว่า แต่ที่ค่า Specularity coefficient เท่ากับ 0.1 และ 0.5 พบว่าอนุภูมิภาคแกรนูลาร์ไม่แตกต่างกันมากนักซึ่งอาจเนื่องมาจากมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาผลของความสูง พบว่า อนุภูมิภาคแกรนูลาร์รวมมีค่าลดลงบริเวณตรงกลางท่อไรเซอร์และจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งบริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์ ในทุกค่าของ Specularity coefficient เนื่องจากปริมาณของแข็งที่ลดลงและเพิ่มขึ้นบริเวณตรงกลางและใกล้ทางออกตามลำดับนั่นเอง ในส่วนผลของทิศทาง  $y$  ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่ามีความสอดคล้องในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกัน



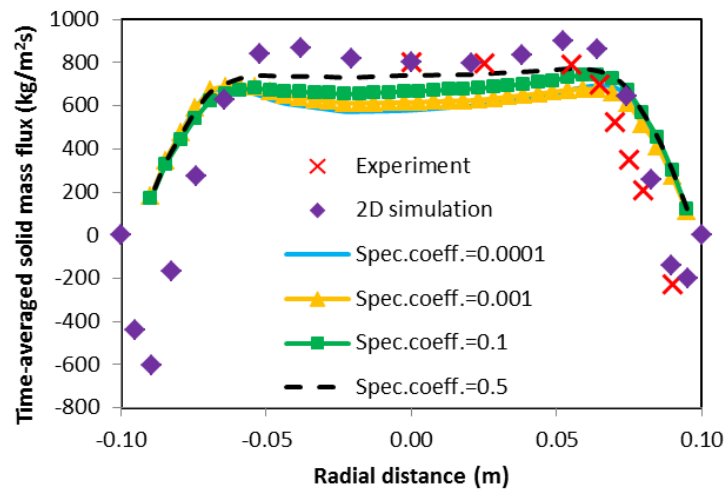
ภาพที่ 4.42 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



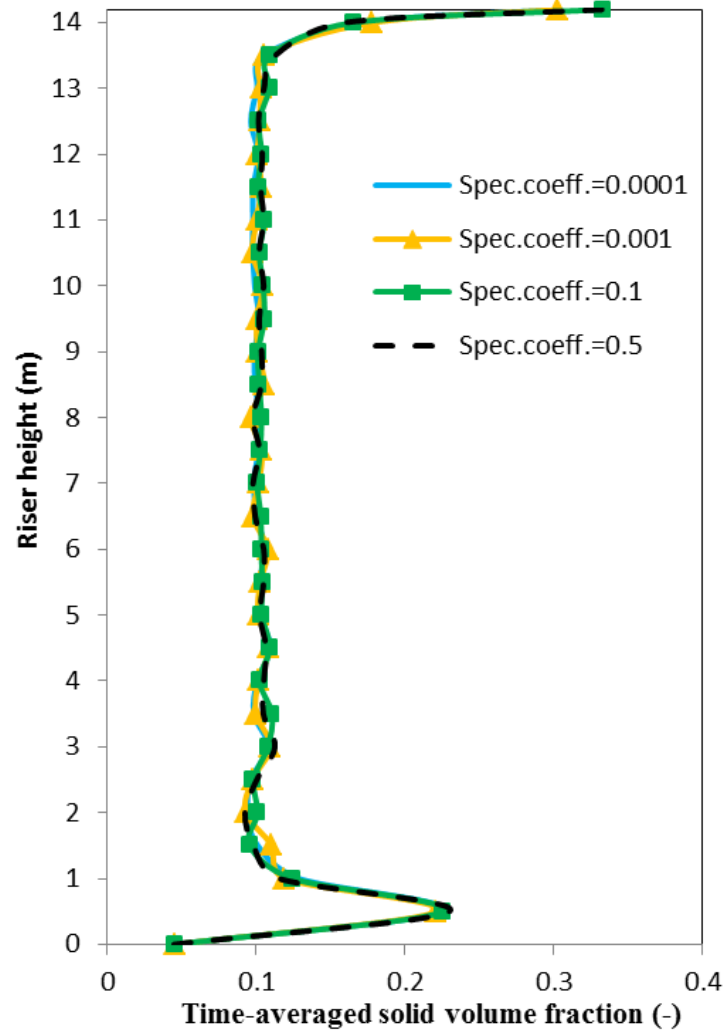
ภาพที่ 4.43 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermsinuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y



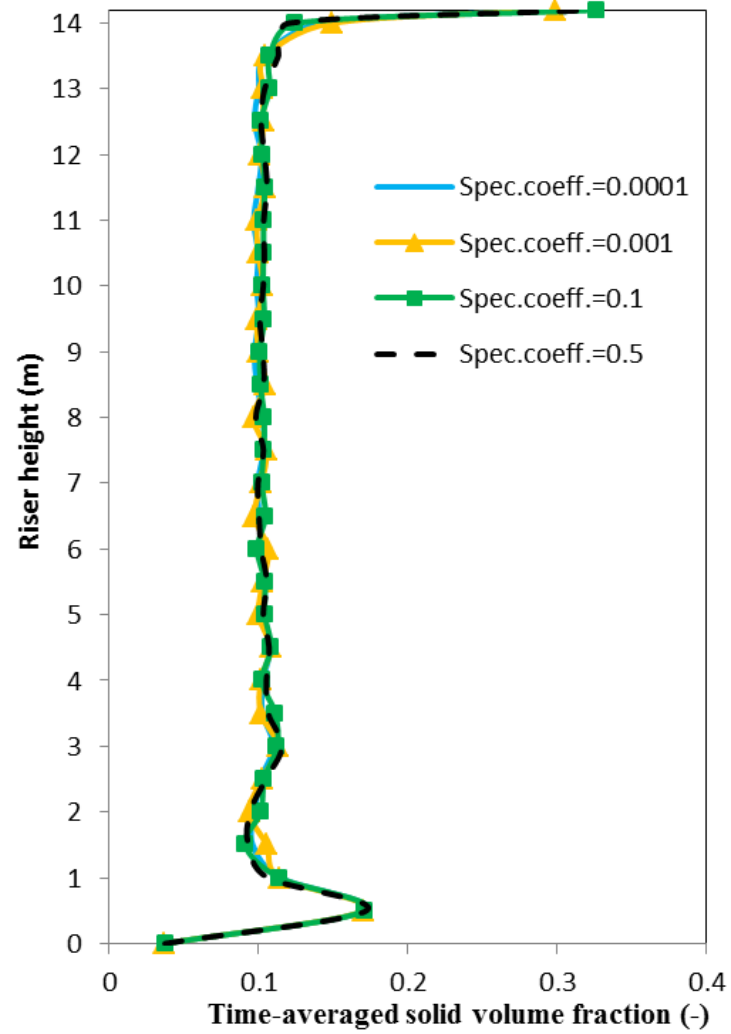
ภาพที่ 4.44 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



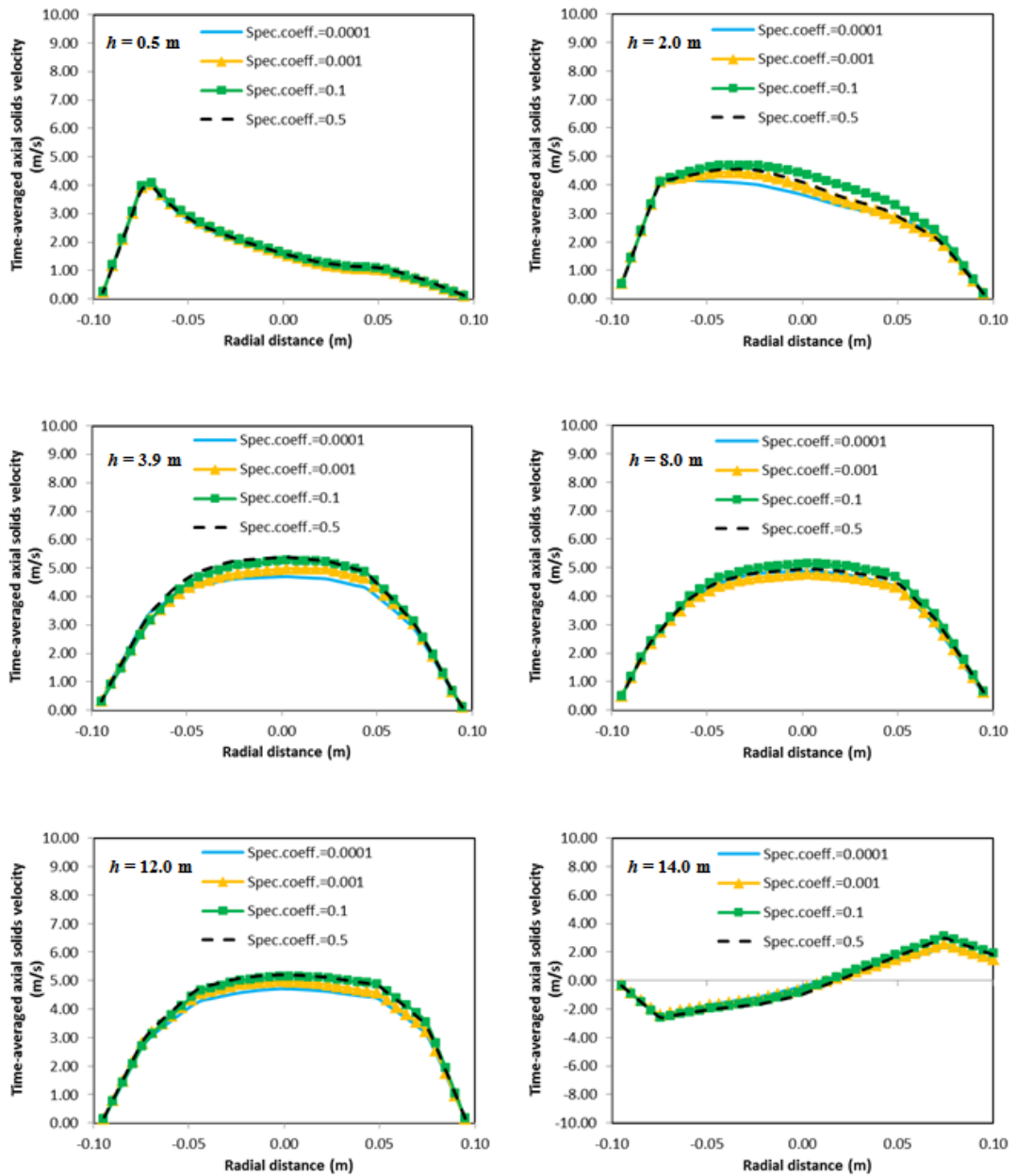
ภาพที่ 4.45 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y



ภาพที่ 4.46 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง x

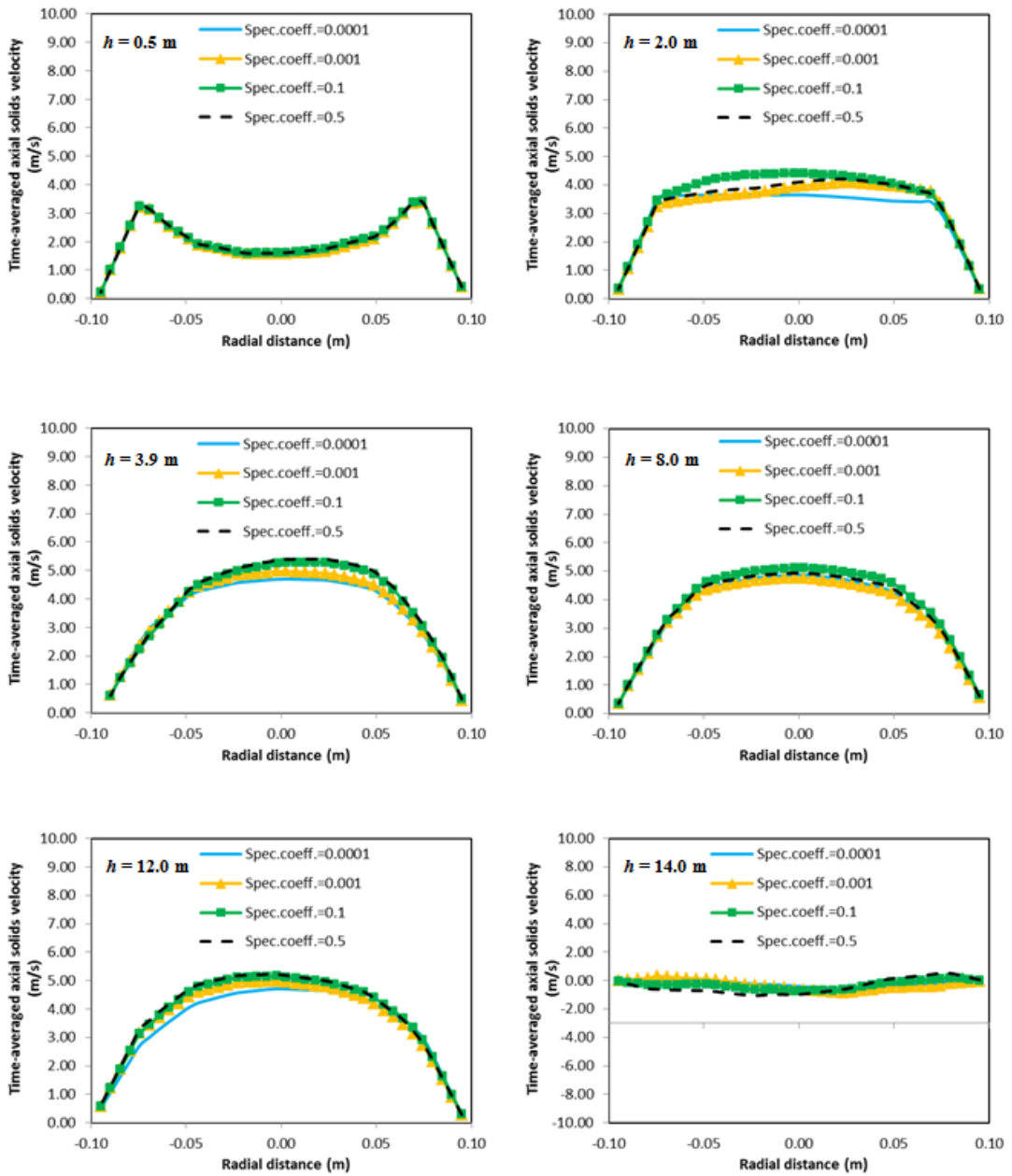


ภาพที่ 4.47 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง y

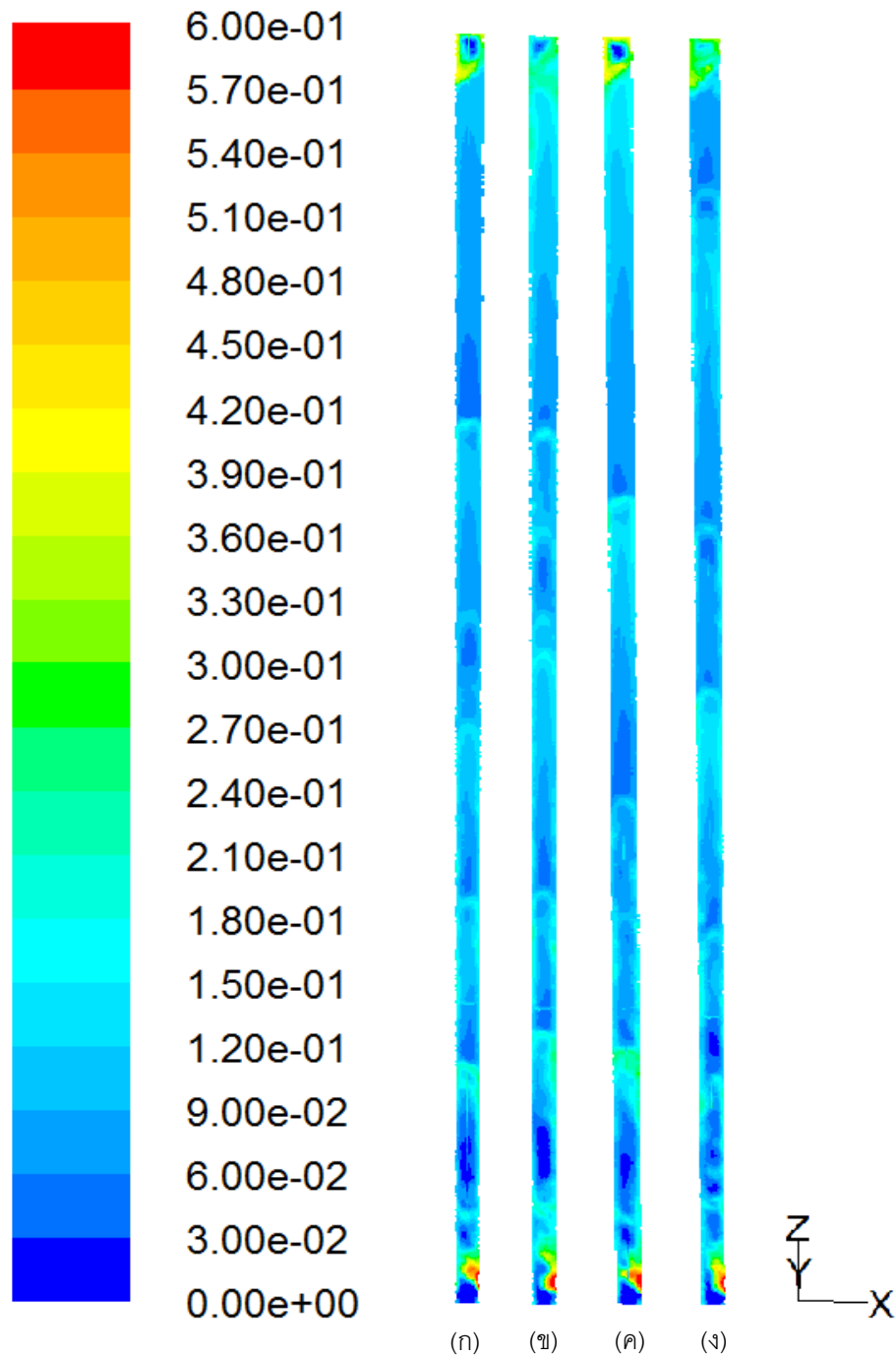


ภาพที่ 4.48 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า Specularity coefficient ต่างๆ ในทิศทาง x

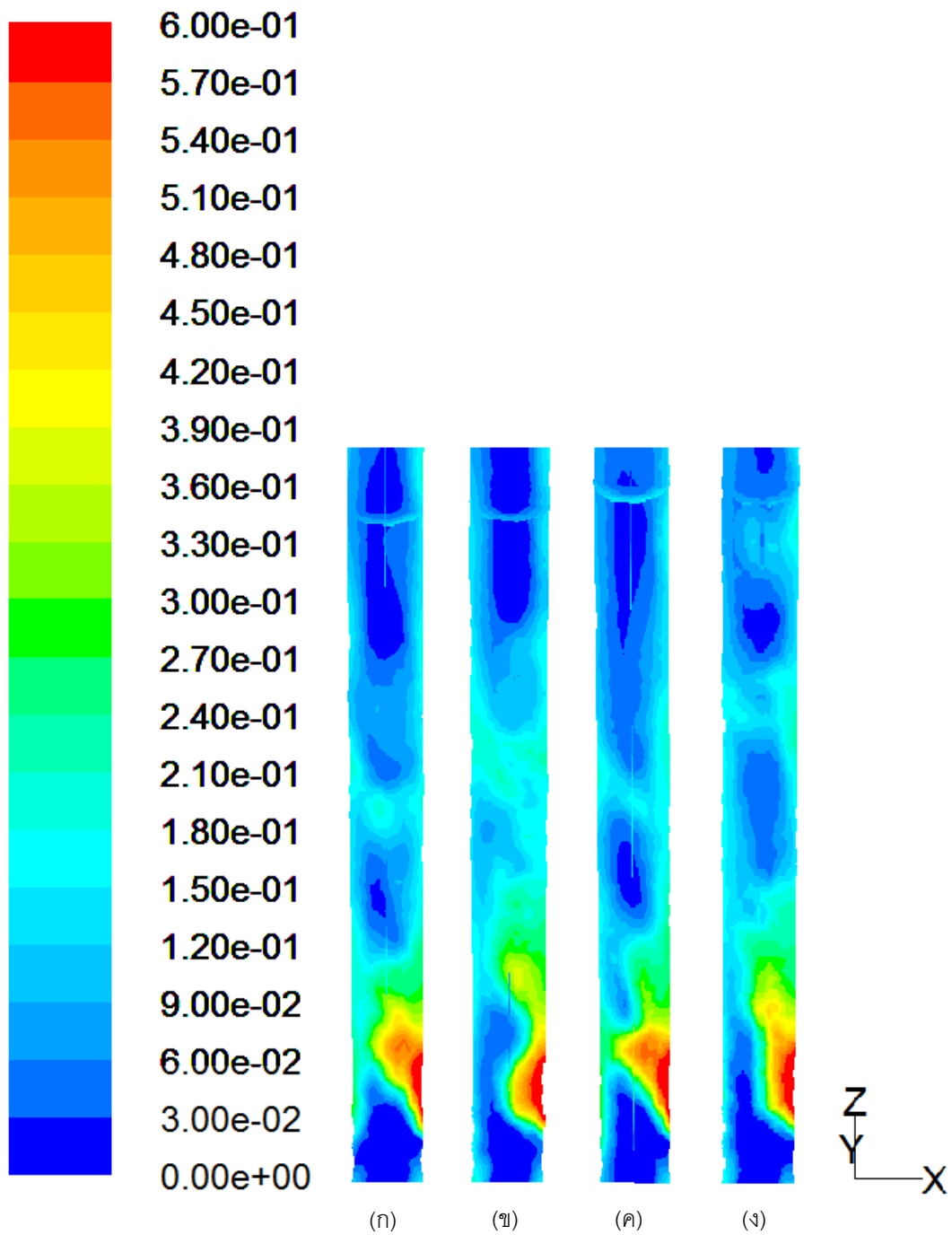




ภาพที่ 4.49 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า Specularity coefficient ต่างๆ ในทิศทาง y



ภาพที่ 4.50 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอรัลของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 0.5 (ข) 0.1 (ค) 0.001 และ (ง) 0.0001



ภาพที่ 4.51 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไอเซอร์ของค่า Specularity coefficient ที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 0.5 (ข) 0.1 (ค) 0.001 และ (ง) 0.0001

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่า Specularity coefficient ค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Specularity coefficient	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	0.0001	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
2	0.001	3.5	1.0324E-05	1.9155E-01	1.9156E-01
		7.0	9.7653E-06	2.6131E-01	2.6132E-01
		10.5	6.5372E-06	3.7291E-01	3.7292E-01
		Averaged	4.5593E-05	2.9372E-01	2.9377E-01
3	0.1	3.5	2.4722E-05	3.1273E-01	3.1276E-01
		7.0	2.0538E-05	1.1219E-01	1.1221E-01
		10.5	1.6983E-05	2.0044E-01	2.0046E-01
		Averaged	6.5751E-05	2.0004E-01	2.0010E-01
4	0.5	3.5	2.5074E-05	2.4762E-01	2.4764E-01
		7.0	2.1177E-05	1.6786E-01	1.6788E-01
		10.5	1.7405E-05	2.5226E-01	2.5228E-01
		Averaged	6.2329E-05	2.1768E-01	2.1775E-01

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่า Specularity coefficient ค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Specularity coefficient	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	0.0001	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
2	0.001	3.5	1.0584E-05	1.9801E-01	1.9802E-01
		7.0	8.2819E-06	2.3660E-01	2.3661E-01
		10.5	6.4934E-06	3.5595E-01	3.5595E-01
		Averaged	7.4447E-05	3.0030E-01	3.0037E-01
3	0.1	3.5	2.2171E-05	3.0696E-01	3.0698E-01
		7.0	1.9604E-05	1.1172E-01	1.1174E-01
		10.5	2.1116E-05	1.9082E-01	1.9084E-01
		Averaged	8.6791E-05	2.1528E-01	2.1536E-01
4	0.5	3.5	2.2209E-05	2.5093E-01	2.5095E-01
		7.0	2.0114E-05	1.6457E-01	1.6459E-01
		10.5	2.1463E-05	2.4366E-01	2.4368E-01
		Averaged	7.9313E-05	2.2966E-01	2.2974E-01

#### 4.7 Restitution coefficient

ค่า Restitution coefficient ระหว่างอนุภาคและผนัง เป็นหนึ่งในตัวแปรปรับค่าที่ผนังตั้งที่ได้อีกกล่าวไว้ นิยามของตัวแปรนี้จะบ่งบอกถึงปริมาณของพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากการชนกันของอนุภาคและผนัง การมีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึงพลังงานสูญเสียที่สูง การมีค่าเท่ากับหนึ่งแสดงถึงพลังงานสูญเสียที่ต่ำ ในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาผลของ ค่า Restitution coefficient จำนวน 4 ค่า ประกอบด้วยค่าเท่ากับ 0.50, 0.80, 0.90 และ 0.95

ภาพที่ 4.52 และ 4.53 แสดงผลของความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซอรัของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ผลที่ได้ พบว่า ความดันลดมีค่าสูงบริเวณด้านล่าง จากนั้นค่อยๆ ลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น และความดันจะสูงอีกครั้งบริเวณทางออกของท่อโรเซอรั ในด้านความแตกต่างของค่า Restitution coefficient ที่ต่างกัน พบว่า ไม่ส่งผลให้ความดันลดภายในท่อโรเซอรัแตกต่างกันทั้งในทิศทาง x และทิศทาง y เช่นเดียวกันกับค่า Specularity coefficient และผลการจำลองที่ได้มีแนวโน้มที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองและการจำลองในระบบสองมิติ

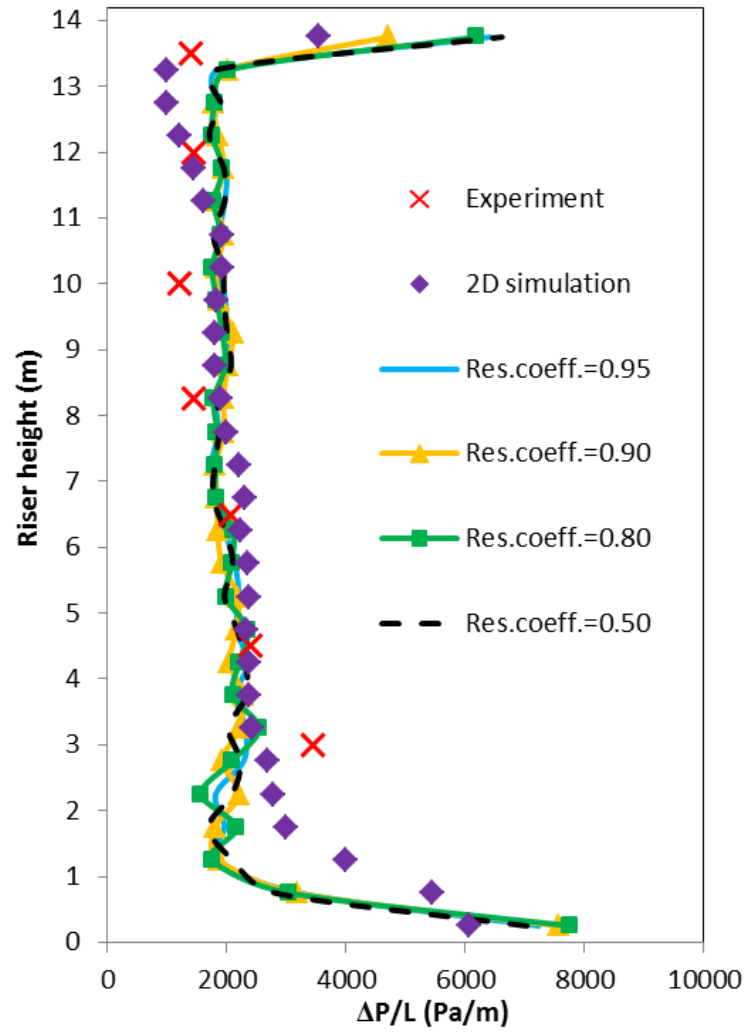
ภาพที่ 4.54 และ 4.55 แสดงผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ดังที่ได้กล่าวไว้ว่าตัวแปรปรับค่าที่บริเวณผนังส่งผลน้อยต่ออุทกพลศาสตร์ภายในระบบ เป็นเพียงตัวแปรที่ปรับค่าให้สอดคล้องกับการทดลองเท่านั้น เมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นได้ว่าผลการจำลองที่ได้ไม่แตกต่างกัน เมื่อค่า Restitution coefficient แตกต่างกัน ทั้งในทิศทาง x และทิศทาง y ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ McKeen และ Pugsley (2003) และ Almuttahir และ Taghipour (2008) ที่สังเกตว่าการเปลี่ยนค่า Restitution coefficient จากช่วง 0.5-0.99 ไม่ส่งผลต่อการทำนายแบบจำลองเท่าใดนัก แต่ในทางทฤษฎีค่า Restitution coefficient ที่น้อย (ค่าเข้าใกล้ศูนย์) หมายถึงของแข็งมีการชนกับผนังแบบไม่ยืดหยุ่น มีการสูญเสียพลังงานสูง ดังนั้นของแข็งจึงจะตกบริเวณผนังมาก ยิ่งเพิ่มค่า Restitution coefficient ขึ้นไปบริเวณผนังจะมีปริมาณของแข็งลดลง ในขณะที่บริเวณตรงกลางของท่อโรเซอรัจะมีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น แต่ที่ไม่เป็นเช่นนี้เป็นไปได้ว่าในระบบนี้ ตัวแปรตัวนี้ไม่ส่งผลหรือส่งผลน้อยมากเมื่อพิจารณาจากผลที่ได้จะเห็นว่าค่าใกล้เคียงกันจนถือว่าไม่มีนัยสำคัญ และบริเวณด้านล่างเป็นบริเวณที่มีความปั่นป่วนมากผลการจำลองที่ได้จึงไม่เป็นไปตามทฤษฎี โดยค่า Restitution coefficient ที่ให้ผลการจำลองใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองคือ ค่าเท่ากับ 0.95

ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซออร์ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง x และ y ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.56 และ 4.57 ตามลำดับ ผลที่ได้ พบว่า สัดส่วนปริมาตรของแข็งสอดคล้องกับความดันลุดที่เกิดขึ้นในระบบ คือจะมีค่าสูงบริเวณด้านล่าง และด้านบนของท่อไรเซออร์ และผลของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้ สัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยแตกต่างกันทั้งในทิศทาง x และทิศทาง y

ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกัน ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันทั้งทิศทาง x และ y ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.58 และ 4.59 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลของค่า Restitution coefficient ที่ต่างกันไม่ส่งผลให้ความเร็วแตกต่างกันดังที่ได้กล่าวไป และที่บริเวณด้านล่าง ความเร็วของแข็งตามแนวแกนจะมีค่าน้อยกว่าที่บริเวณ ด้านบน เนื่องจากปริมาณของแข็งด้านล่างที่มากกว่าบริเวณด้านบนนั่นเอง เมื่อพิจารณาความแตกต่างในสองทิศทาง พบว่า มีเพียงบริเวณด้านล่างและด้านบน ที่มีความแตกต่างของความเร็ว เนื่องจากผลของการป้อนเข้าและผลของทางออกดังที่ได้เคยกล่าวไป

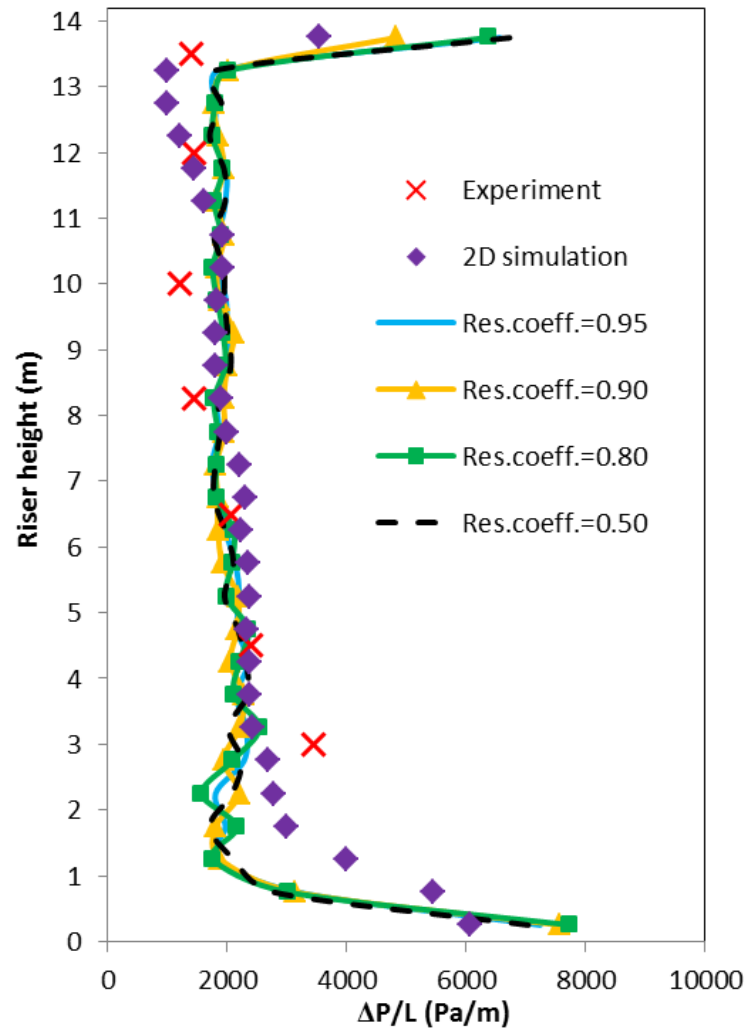
ภาพที่ 4.60 แสดงคอนทัวร์ของผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซออร์ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกัน จากภาพสามารถสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็ง จากด้านล่างไปสู่ด้านบนของท่อไรเซออร์ได้ในทุกๆ ค่าของ Restitution coefficient และดังที่ได้กล่าวไปว่าผลของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อระบบ โดยจะเห็นได้ชัดเจน เมื่อพิจารณาร่วมกับภาพคอนทัวร์ที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรดังที่แสดงในภาพที่ 4.61

ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่ต่างกันของค่า Restitution coefficient ค่าต่างๆ ที่ระดับ ความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และ 4.6 ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ จากตาราง พบว่า ผลของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิ แกรนูลาร์แบบลามินาร์ ในทุกค่าของ Restitution coefficient เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของ ค่า Restitution coefficient ที่มีต่ออุณหภูมิแกรนูลาร์ พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันมาก หรือต่าง เพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองในส่วนที่ได้กล่าวไป ในแง่ผลของความสูงที่มีต่อ อุณหภูมิแกรนูลาร์นั้น พบว่า อุณหภูมิแกรนูลาร์รวมมีค่าลดลงบริเวณตรงกลางท่อไรเซออร์และจะมี ค่าสูงขึ้นอีกครั้งบริเวณด้านบนของท่อไรเซออร์ เนื่องจากปริมาณของแข็งที่ลดลงและเพิ่มขึ้นบริเวณ ตรงกลางและใกล้ทางออกตามลำดับนั่นเอง ในส่วนผลของทิศทาง y ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า มีความสอดคล้องในทิศทาง x เช่นเดียวกัน

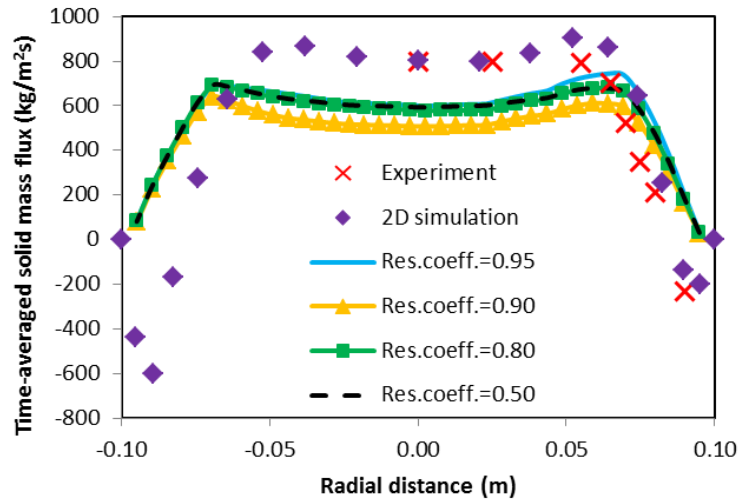


ภาพที่ 4.52 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x

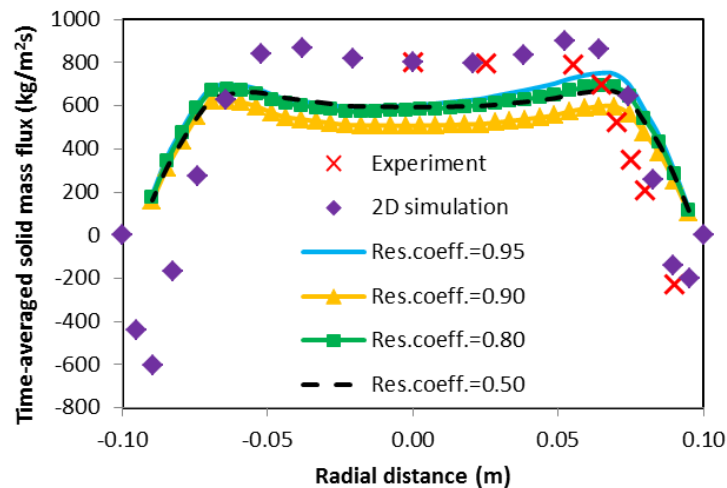




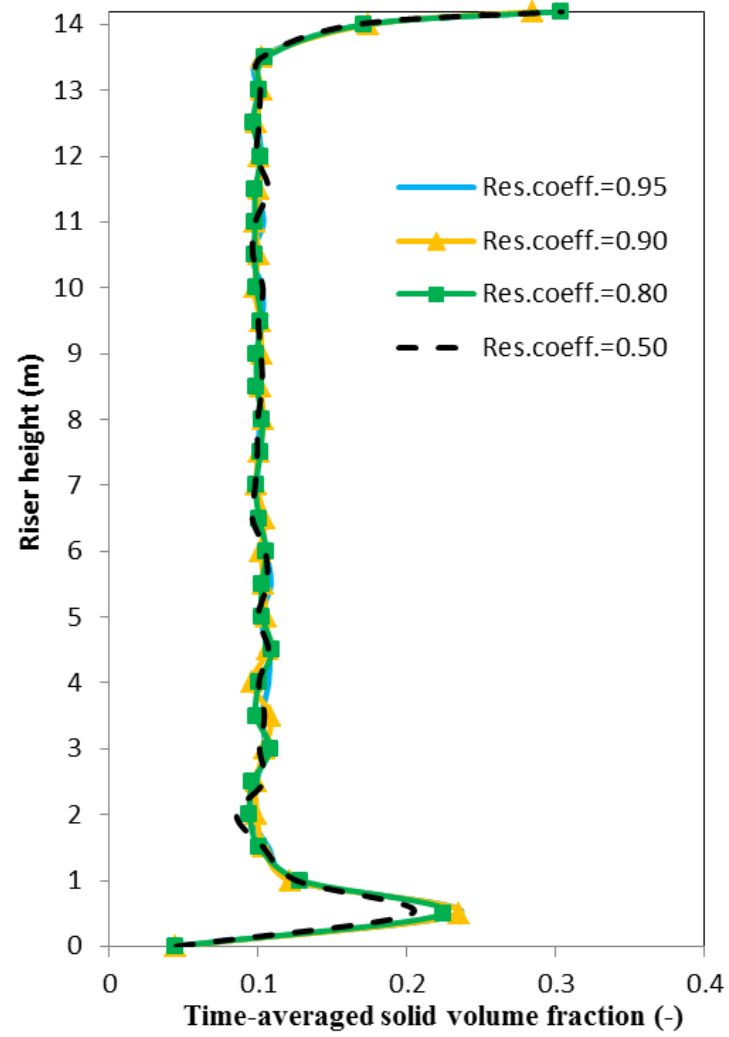
ภาพที่ 4.53 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซอรัของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y



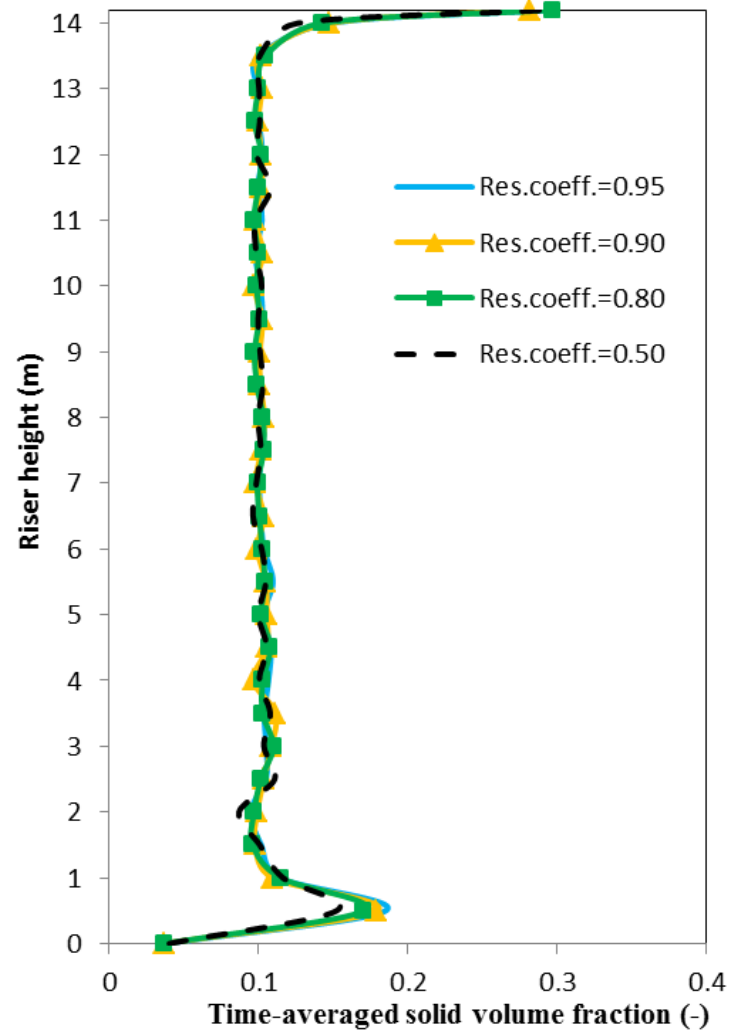
ภาพที่ 4.54 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



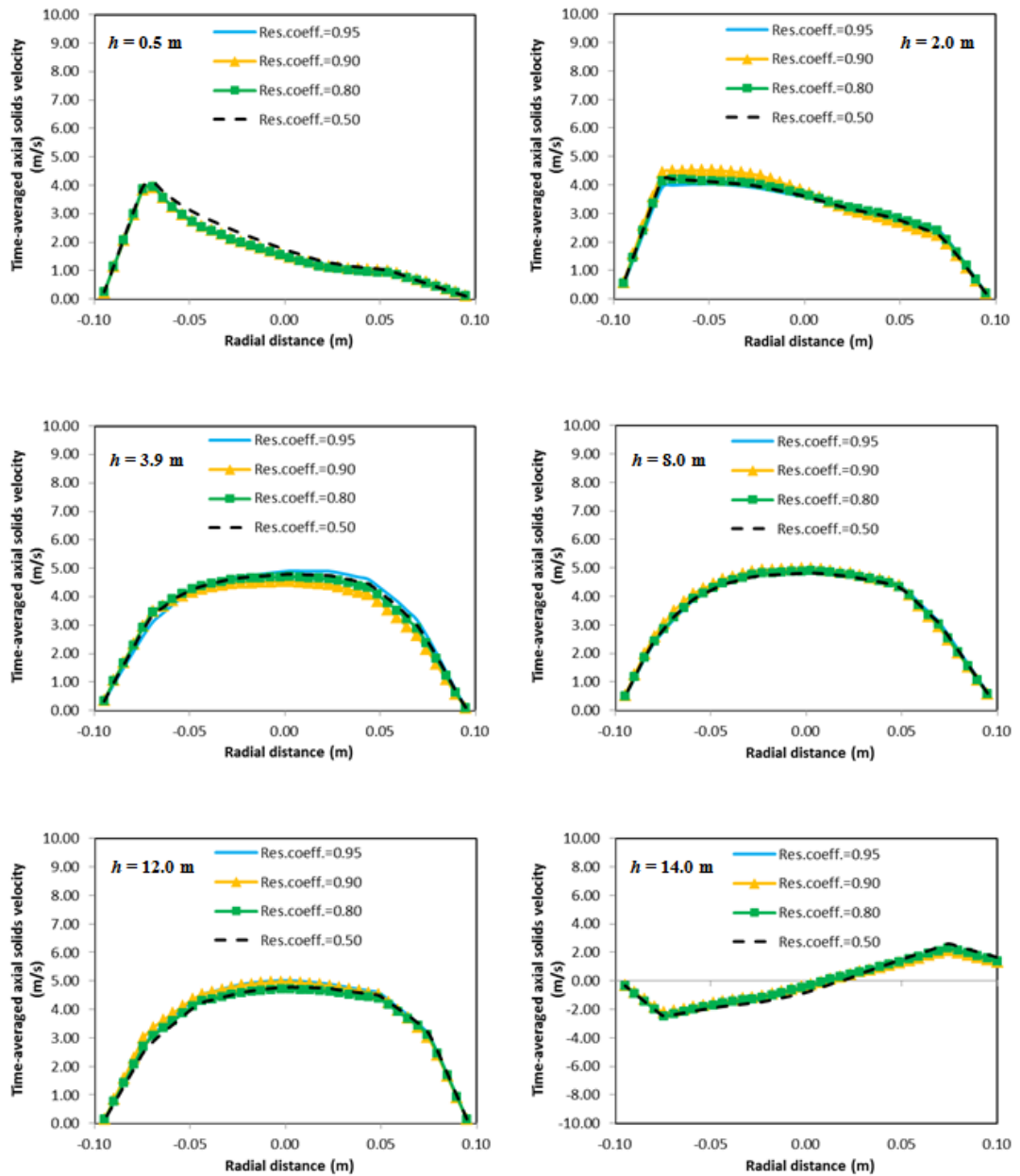
ภาพที่ 4.55 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y



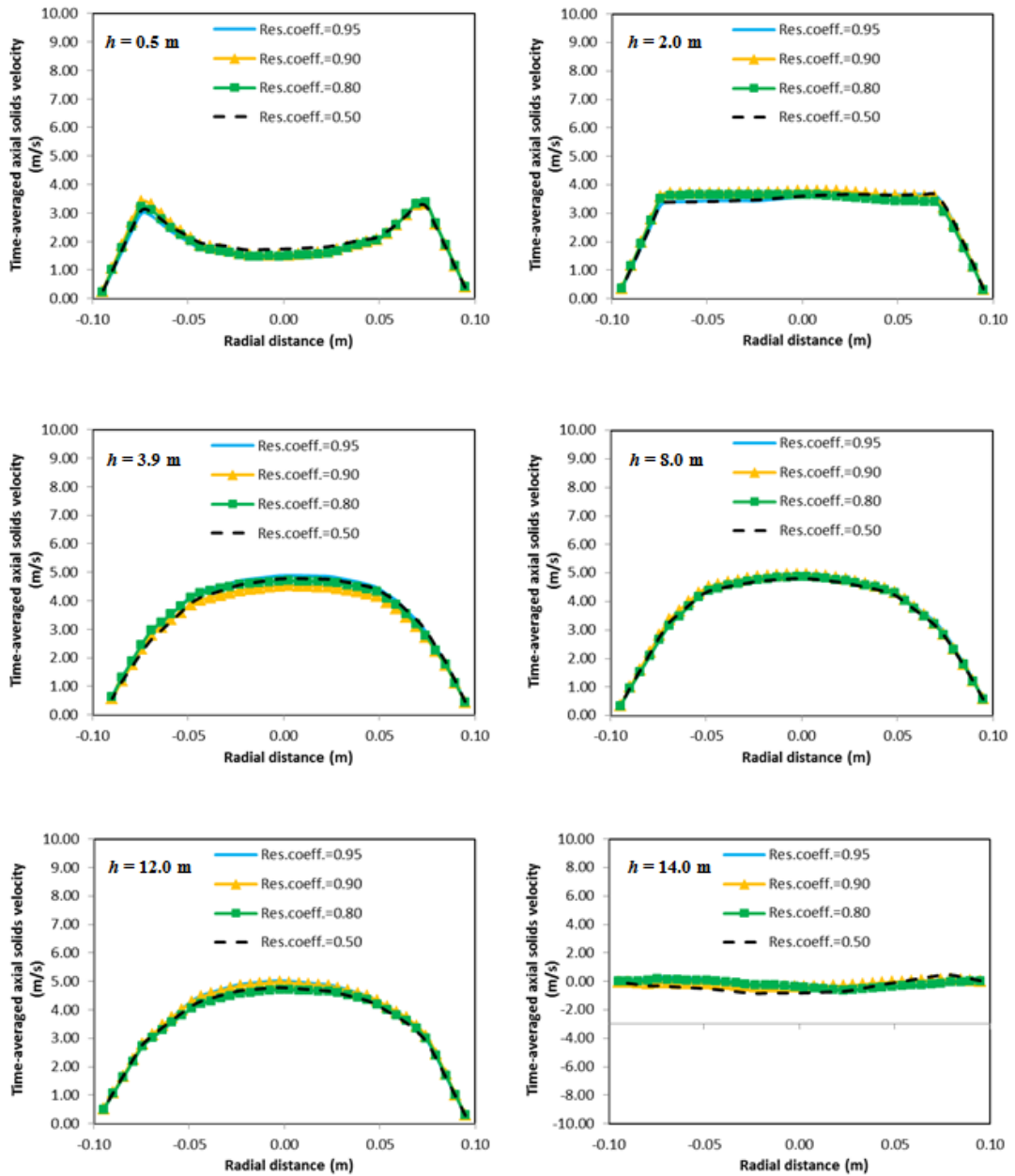
ภาพที่ 4.56 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อโรเซอรัของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง x



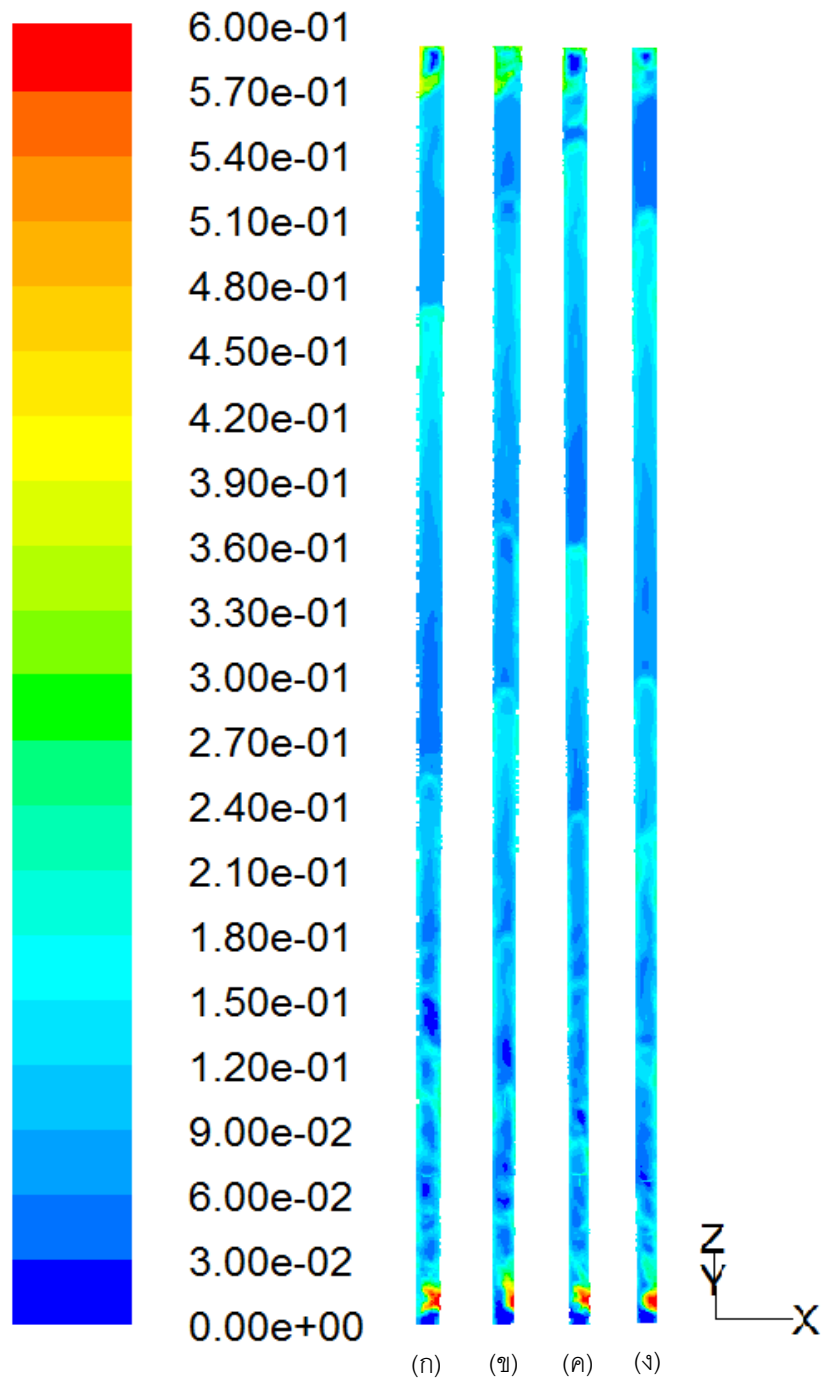
ภาพที่ 4.57 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อโรเซอรัของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกันในทิศทาง y



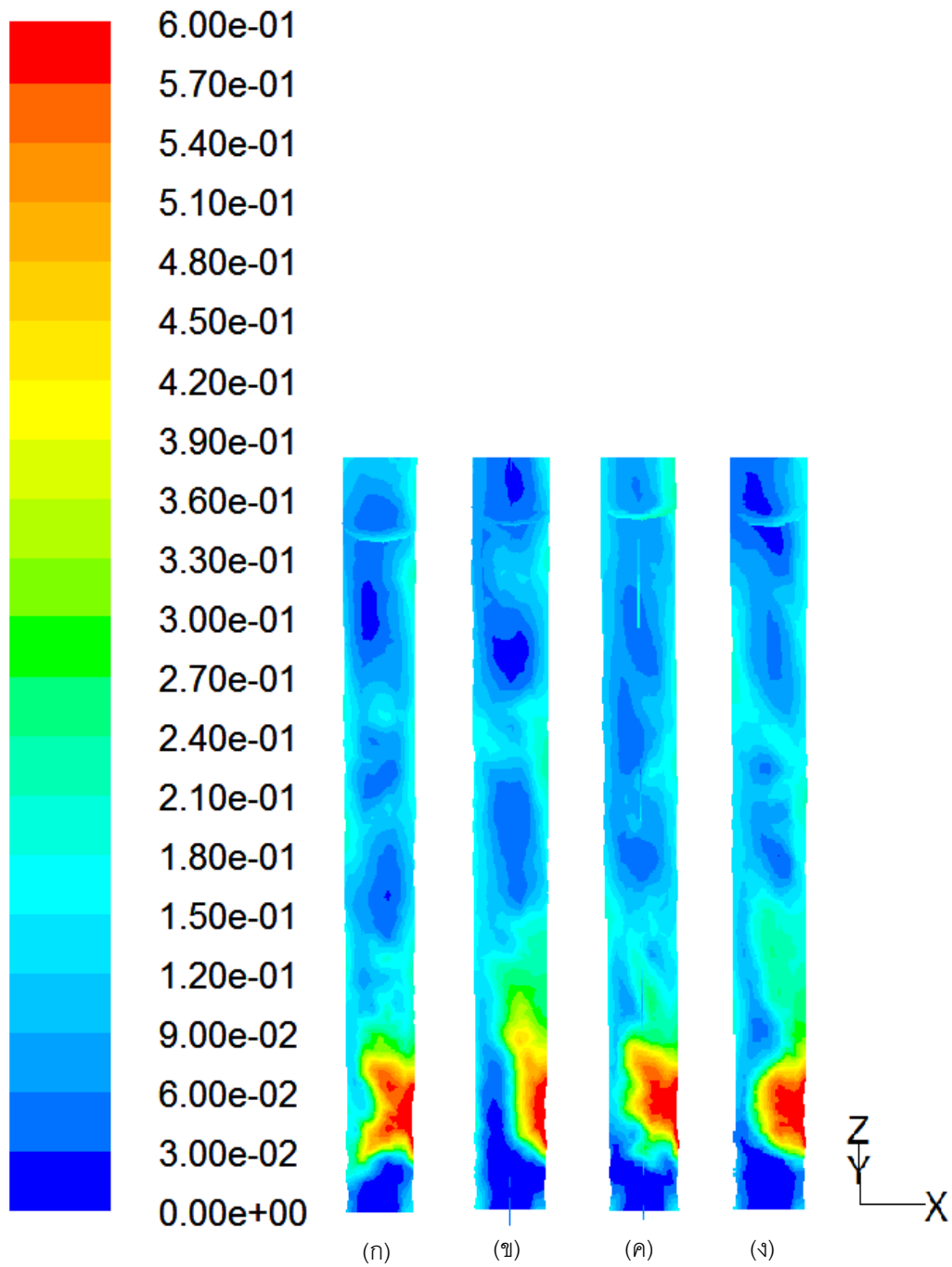
ภาพที่ 4.58 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า Restitution coefficient ต่างๆ ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.59 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า Restitution coefficient ต่างๆ ในทิศทาง y



ภาพที่ 4.60 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาณของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 0.50 (ข) 0.80 (ค) 0.90 และ (ง) 0.95



ภาพที่ 4.61 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่า Restitution coefficient ที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 0.50 (ข) 0.80 (ค) 0.90 และ (ง) 0.95



ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่า Restitution coefficient ค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Restitution coefficient	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	0.95	3.5	5.1688E-05	3.1770E-01	3.1776E-01
		7.0	3.8683E-05	2.3437E-01	2.3441E-01
		10.5	1.9766E-05	3.5608E-01	3.5610E-01
		Averaged	1.2749E-04	2.8640E-01	2.8653E-01
2	0.90	3.5	2.1626E-05	3.7134E-01	3.7136E-01
		7.0	1.7474E-05	2.5971E-01	2.5972E-01
		10.5	1.0936E-05	4.3789E-01	4.3790E-01
		Averaged	7.7123E-05	3.2707E-01	3.2715E-01
3	0.80	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
4	0.50	3.5	3.1756E-06	2.7441E-01	2.7441E-01
		7.0	2.9253E-06	2.8398E-01	2.8398E-01
		10.5	2.3242E-06	3.6832E-01	3.6832E-01
		Averaged	1.1645E-05	3.0966E-01	3.0967E-01

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่า Restitution coefficient ค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Restitution coefficient	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	0.95	3.5	5.8816E-05	3.2647E-01	3.2653E-01
		7.0	3.1585E-05	2.3243E-01	2.3246E-01
		10.5	1.7299E-05	3.3304E-01	3.3306E-01
		Averaged	1.6823E-04	3.0354E-01	3.0371E-01
2	0.90	3.5	2.2080E-05	3.7124E-01	3.7126E-01
		7.0	1.4339E-05	2.4907E-01	2.4909E-01
		10.5	1.0646E-05	4.2246E-01	4.2247E-01
		Averaged	9.8152E-05	3.3738E-01	3.3748E-01
3	0.80	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
4	0.50	3.5	3.5231E-06	2.8502E-01	2.8502E-01
		7.0	2.4636E-06	2.7673E-01	2.7674E-01
		10.5	2.1123E-06	3.4677E-01	3.4677E-01
		Averaged	1.5459E-05	3.1988E-01	3.1989E-01

#### 4.8 อุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้า

อุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular temperature) คือ พลังงานจลน์ภายใน หรือความเร็วกวัดแกว่งของอนุภาคของแข็งดังที่ได้กล่าวไป ค่ายิ่งมากแสดงถึงพลังงานภายในที่สูง อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่หรือการสั่นที่มากนั่นเอง ในส่วนนี้จะทำการศึกษาผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ของอนุภาคของแข็งที่ป้อนเข้าสู่ระบบในภาวะตอนเริ่มต้นของกระบวนการว่าส่งผลอย่างไรต่ออุทกพลศาสตร์ภายในระบบ โดยจะทำการตั้งค่าให้แตกต่างกันทั้งสิ้น 4 ค่าอันประกอบไปด้วยค่า ดังนี้ 0.01, 0.001, 0.0001 และ 0.00001 เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง

ผลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าที่แตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.62 และ 4.63 ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ สิ่งที่สังเกตเห็นได้จากกราฟ คือ ความแตกต่างบริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ซึ่งเป็นบริเวณที่ป้อนของแข็งเข้ามาเมื่อค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ อุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าที่มีค่าสูง หมายถึง อนุภาคของแข็งมีพลังงานภายในสูง จึงเคลื่อนที่ไปด้านบนของท่อไรเซอร์ได้เร็วกว่า ดังนั้น ปริมาณของแข็งบริเวณด้านล่างจึงมีค่าน้อย ส่งผลให้ความดันลดมีค่าน้อยนั่นเอง และเมื่อลดค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าลง ความดันลดบริเวณด้านล่างจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจนจากผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ย และภาพคอนทราสต์ ที่ได้กล่าวถึงในส่วนต่อไป เมื่อพิจารณาผลระหว่างสองทิศทางพบว่าเป็นไปในลักษณะเดียวกัน

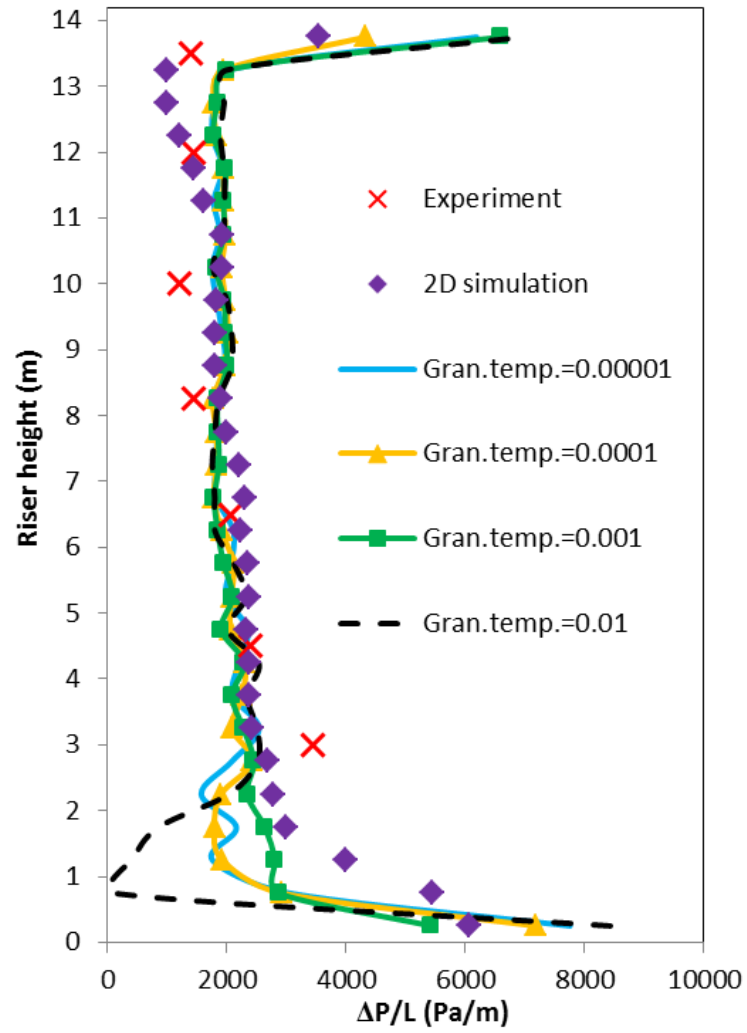
ภาพที่ 4.64 และ 4.65 แสดงผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลอง พบว่า ที่ค่าของอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าที่มีค่าต่ำ จะมีปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าที่มีค่าสูง และเมื่อเพิ่มค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้า ส่งผลให้ปริมาณพลั๊กซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$  เนื่องจากว่าปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งคิดมาจาก ความเร็วในแนวแกนคูณกับ สัดส่วนปริมาตรของแข็งคูณกับความหนาแน่นของของแข็ง ถึงแม้ว่าที่อุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าค่าต่ำจะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งอยู่มากก็ตาม แต่ผลของความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่มีค่าน้อย (เพราะมีปริมาณของแข็งมาก) จึงทำให้ปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งน้อยกว่า อีกนัยหนึ่งคือ ผลของความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าลดลงส่งผลมากกว่านั่นเอง สิ่งนี้จะได้รับการยืนยันในส่วนของผลความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่จะกล่าวในส่วนถัดไป และยังพบว่าค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าเท่ากับ 0.001 ให้ค่าสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากที่สุด

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าที่แตกต่างกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.66 และ 4.67 ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าค่าต่ำๆ จะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งบริเวณด้านล่างมากกว่าค่าที่อุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าสูง เนื่องจากว่าที่อุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าต่ำ อนุภาคของแข็งมีพลังงานน้อยส่งผลให้เคลื่อนที่ไปด้านบนของท่อไรเซอร์ช้ากว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคที่มีพลังงานสูง ดังนั้น ของแข็งจึงอยู่บริเวณด้านล่างมากกว่านั่นเอง ผลที่ได้สอดคล้องกับความดันลดที่เกิดขึ้น คือ ยิ่งลดค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้า ปริมาณของแข็งบริเวณด้านล่างก็จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ผลที่ได้สอดคล้องทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$

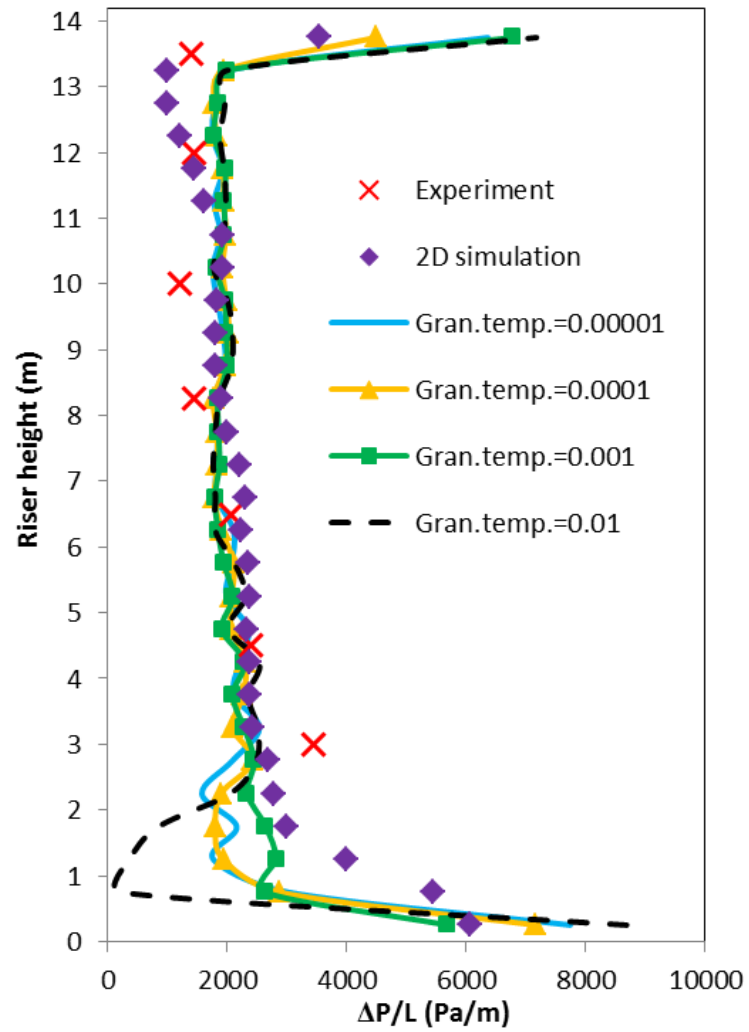
ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าที่แตกต่างในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.68 และ 4.69 ตามลำดับ จากกราฟ พบว่า ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าส่งผลที่ระดับความสูงต่ำๆ เท่านั้น กล่าวคือ ที่อุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าค่าต่ำๆ จะมีความเร็วของแข็งตามแนวแกนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าที่มีค่าสูงเนื่องจาก ปริมาณของแข็งที่มากกว่าที่ระดับความสูงเดียวกัน (ปริมาณของแข็งที่มากกว่า ส่งผลให้ความเร็วของแข็งตามแนวแกนมีค่าน้อย เป็นลักษณะทั่วไปทางอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในท่อไรเซอร์ (Benyahia และคณะ, 2000; Almuttahir และ Taghipour, 2008) และค่าความเร็วของแข็งตามแนวแกนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าสูงขึ้น แต่ที่ระดับความสูงเท่ากับ 0.5 เมตรซึ่งเป็นบริเวณทางเข้าแนวโน้มที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผนังของท่อไรเซอร์เพราะบริเวณส่วนนี้เป็นบริเวณที่มีความปั่นป่วนและอนุภาคของแข็งที่ป้อนเข้ามาเมื่อได้รับพลังงานที่สูงจึงเคลื่อนตัวไปด้านบนอย่างรวดเร็วกว่าบริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์ ในส่วนของผลในทิศทาง  $y$  นั้น พบว่า มีความสอดคล้องกับทิศทาง  $x$  และพบความแตกต่างเนื่องจากความไม่สมมาตรจากการป้อนเข้าในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกับผลของตัวแปรดังที่ได้ศึกษาไปเบื้องต้น

ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าที่แตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.70 เมื่อพิจารณาภาพคอนทัวร์จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าค่าน้อยเช่น ภาพ 4.70 (ง) จะมีปริมาณของแข็งบริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ที่สูงสังเกตได้จากสีของคอนทัวร์ที่มีสีแดงซึ่งแสดงถึงปริมาณของแข็งที่สูงนั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าที่สูง ดังภาพ 4.70 (ก) สังเกตได้ถึงปริมาณของแข็งที่น้อยกว่า และเมื่อพิจารณาความสูงที่ 3.9 เมตร ในภาพที่ 4.71 จะเห็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนถึงการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้า

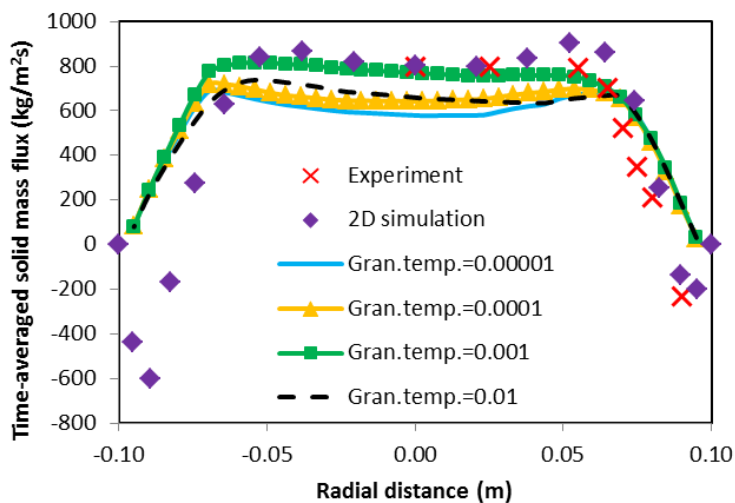
ตารางที่ 4.7 และ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแก๊รูลาร์ที่แตกต่างกันของค่าอุณหภูมิแก๊รูลาร์ขาเข้าค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากตาราง พบว่า ค่าอุณหภูมิแก๊รูลาร์แบบเทอร์บิวเลนที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแก๊รูลาร์แบบลามินาร์ ดังนั้น ผลของอุณหภูมิแก๊รูลาร์แบบเทอร์บิวเลนที่จึงเป็นตัวแทนของระบบ เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิแก๊รูลาร์ขาเข้าที่แตกต่างกัน พบว่า ค่าของอุณหภูมิแก๊รูลาร์ขาเข้าที่มีค่าน้อยจะมีอุณหภูมิแก๊รูลาร์มากกว่าผลของอุณหภูมิแก๊รูลาร์ขาเข้าที่มีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบที่ความสูงเดียวกัน เนื่องจากค่าอุณหภูมิแก๊รูลาร์ขาเข้าที่ต่ำ ปริมาณของแข็งจึงมีมากกว่า ดังนั้น การสันของกลุ่มอนุภาคจึงมีมากกว่านั่นเอง ส่งผลให้มีค่าอุณหภูมิแก๊รูลาร์ที่สูงกว่าตามไปด้วย จากนั้น พิจารณาผลของความสูงพบว่าอุณหภูมิแก๊รูลาร์รวมมีค่าลดลงบริเวณตรงกลางท่อไรเซอร์และจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งบริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์ เนื่องจากปริมาณของแข็งที่ลดลงและเพิ่มขึ้นบริเวณตรงกลางและใกล้ทางออกตามลำดับนั่นเอง ในส่วนผลในทิศทาง  $y$  ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า มีความสอดคล้องในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกัน



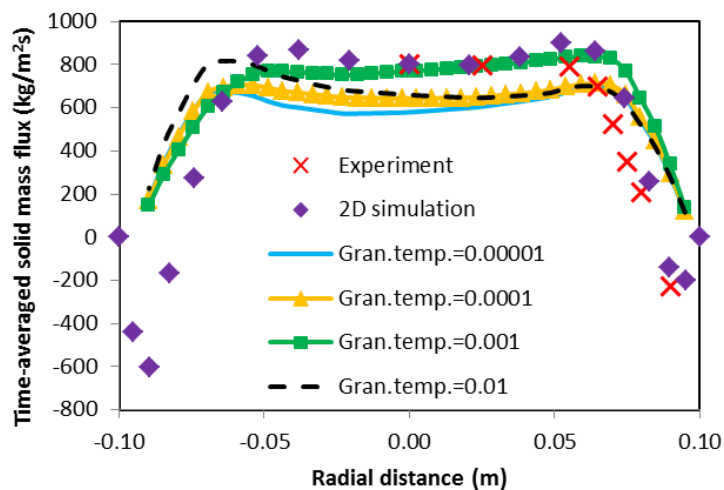
ภาพที่ 4.62 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.63 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซอร์ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y

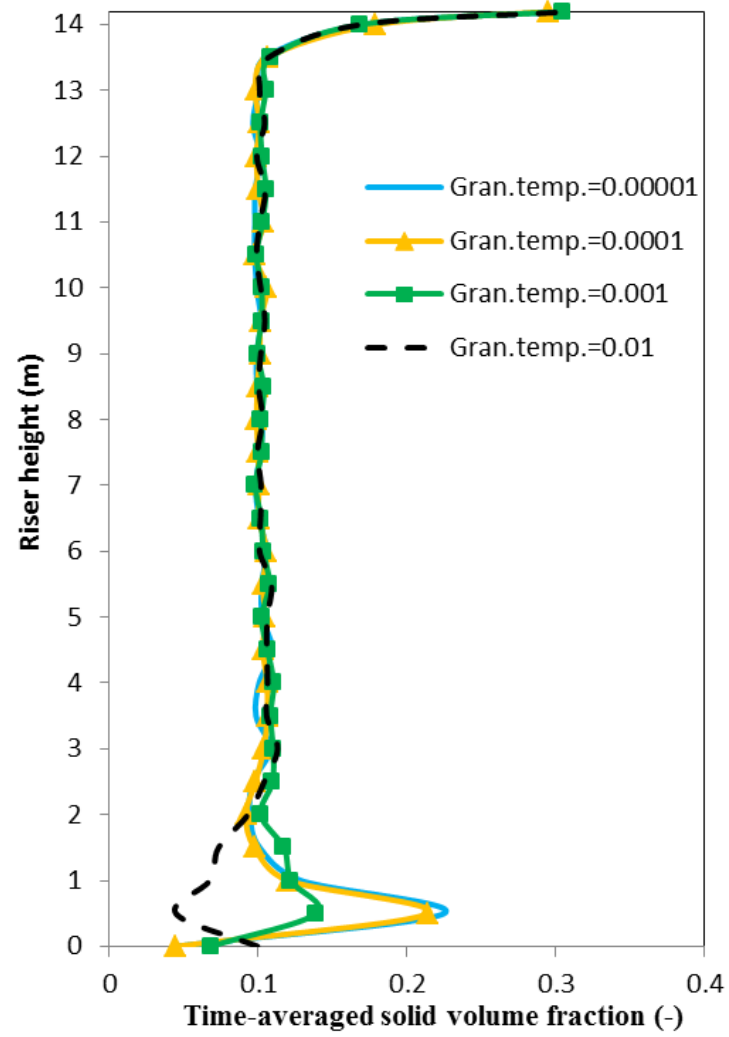


ภาพที่ 4.64 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x

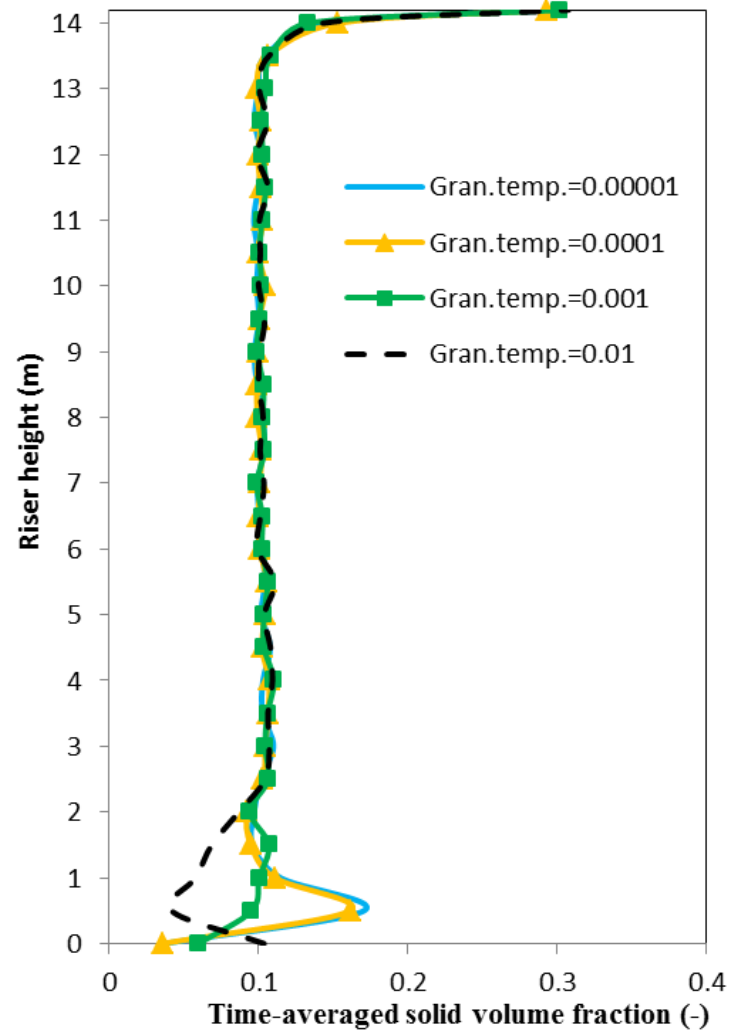


ภาพที่ 4.65 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y

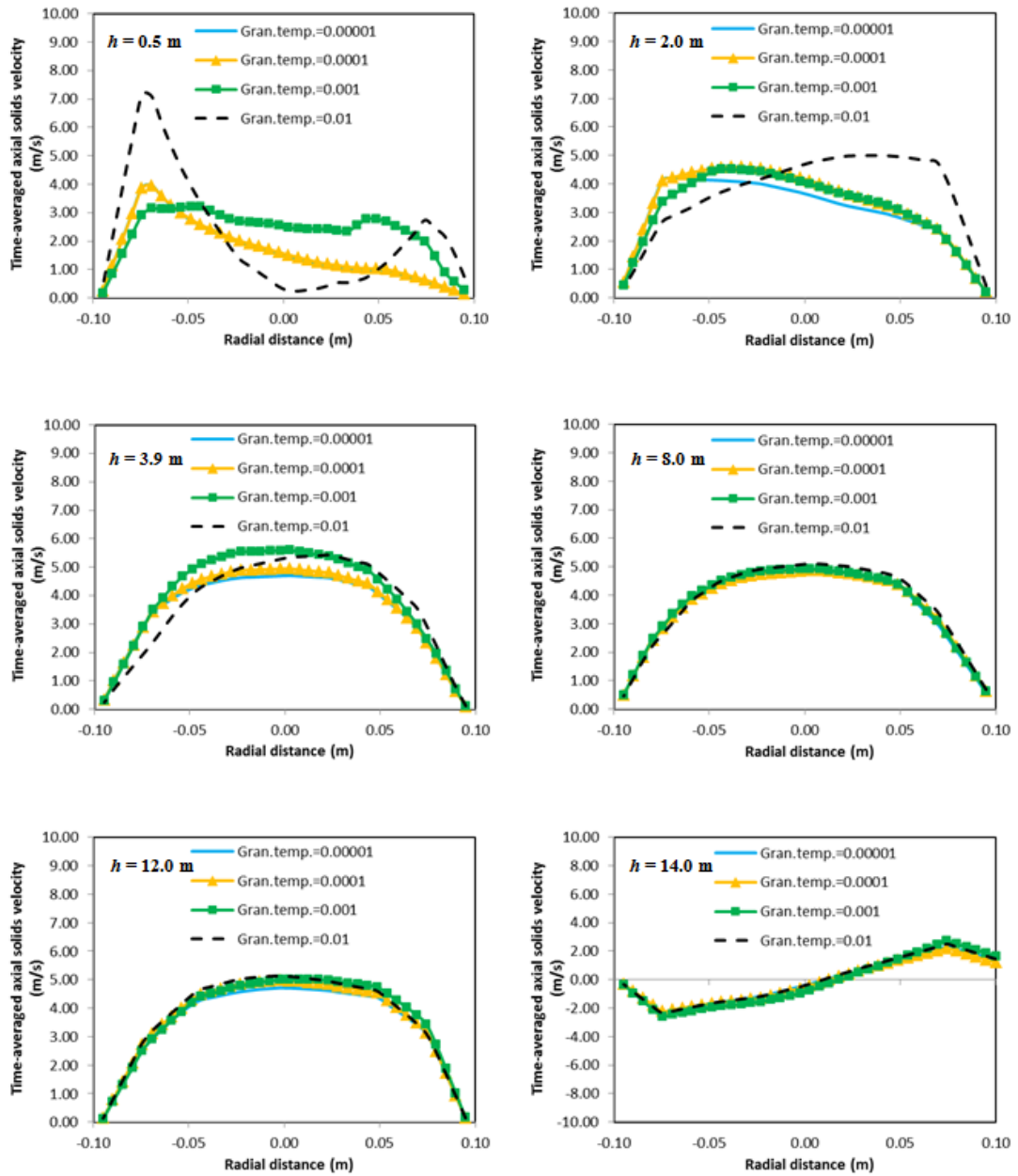




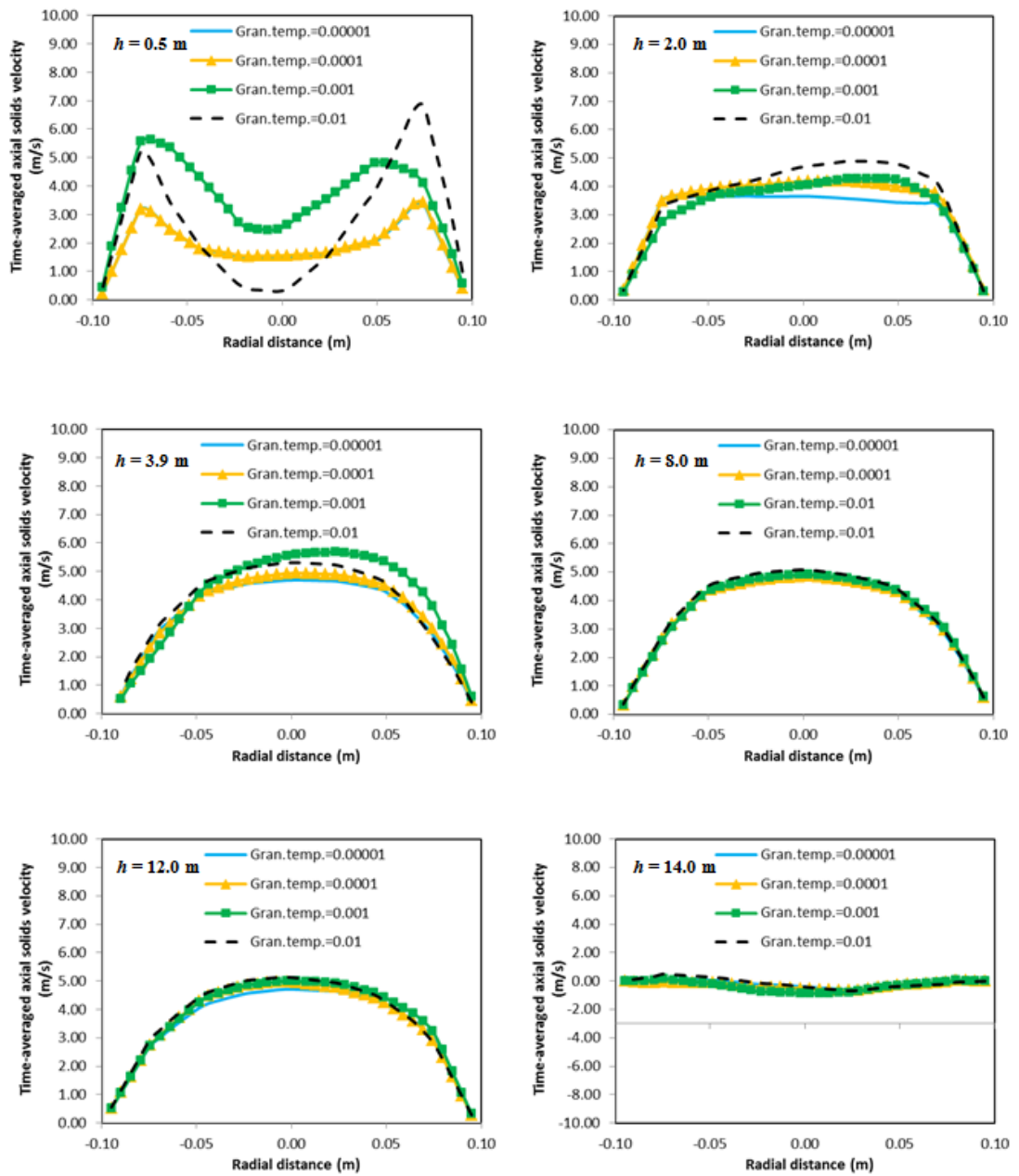
ภาพที่ 4.66 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์  
 ขาเข้าที่แตกต่างกันในทิศทาง x



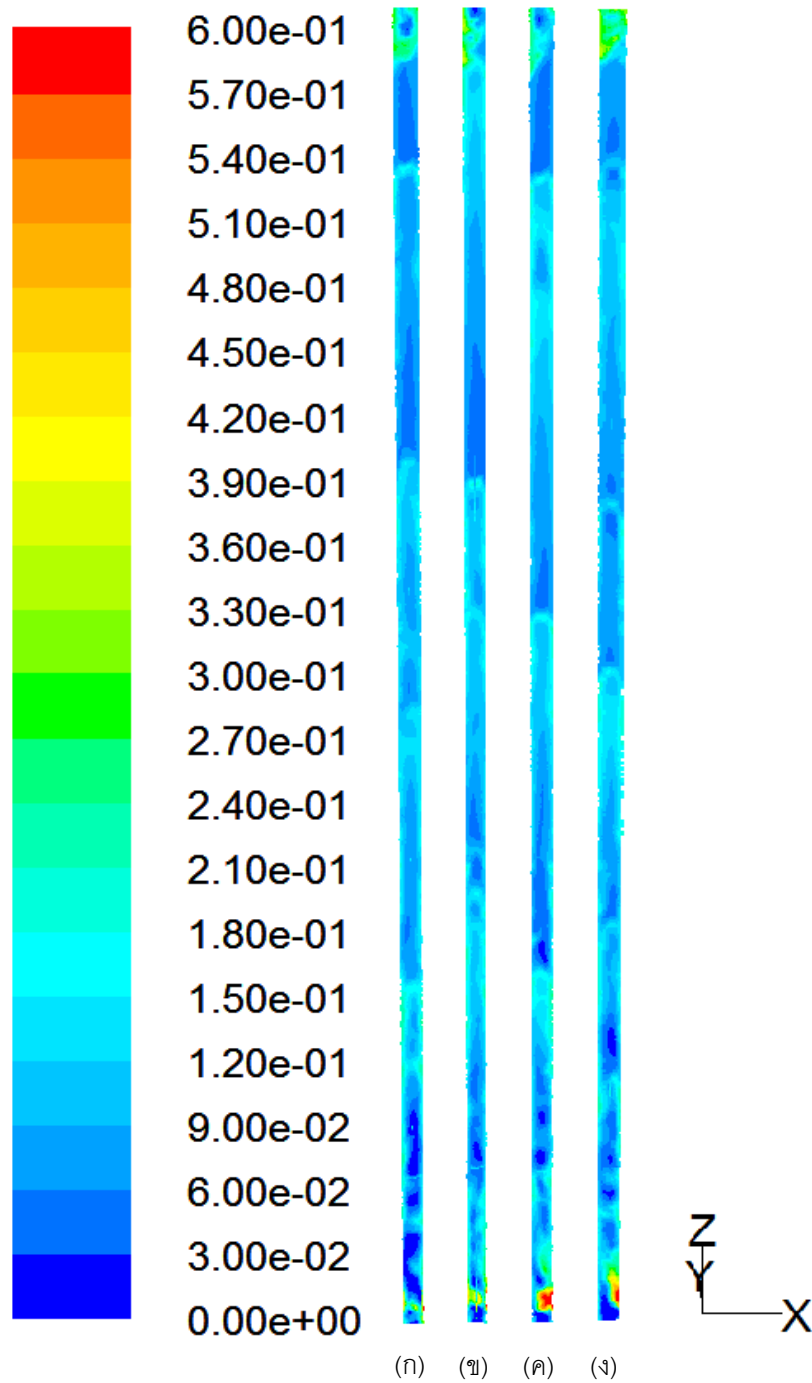
ภาพที่ 4.67 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์  
 ขาเข้าที่แตกต่างกันในทิศทาง y



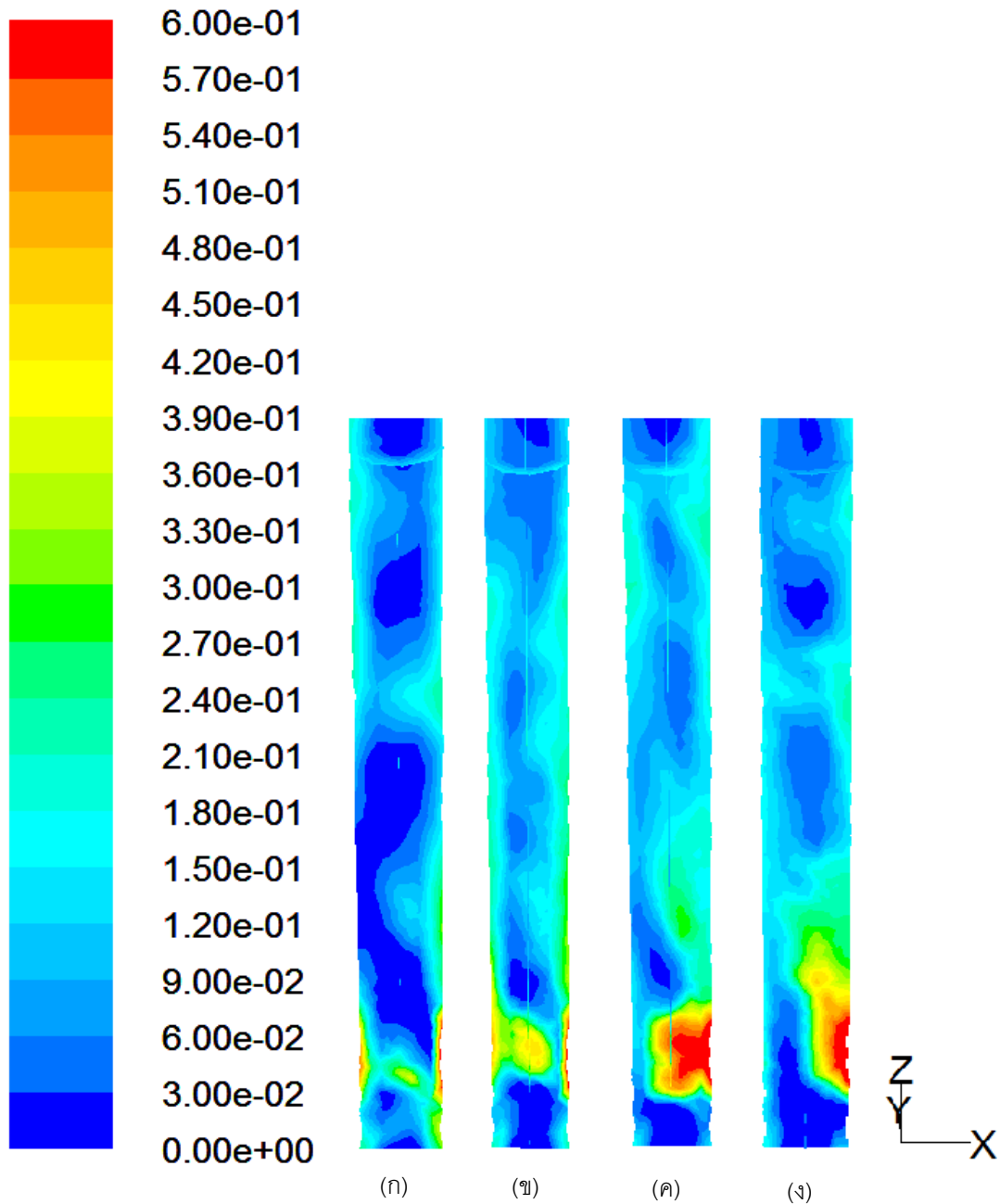
ภาพที่ 4.68 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า อุณหภูมิแกรนูลาร์ฯเข้าค่าต่างๆ ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.69 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่า อุณหภูมิแกรนูลาร์ฯเข้าค่าต่างๆ ในทิศทาง y



ภาพที่ 4.70 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่าอุณหภูมิแก๊รูลาร์  
 ษาเข้าที่แตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 0.01 (ข) 0.001 (ค) 0.0001 และ (ง) 0.00001 เมตรกำลัง  
 สองต่อวินาทีกำลังสอง



ภาพที่ 4.71 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแรงในท่อไรเซอร์ของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์  
 ขาเข้าที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 0.01 (ข) 0.001 (ค)  
 0.0001 และ (ง) 0.00001 เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง

ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Inlet granular temperature ( $m^2/s^2$ )	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	0.00001	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
2	0.0001	3.5	8.7871E-06	2.8768E-01	2.8769E-01
		7.0	8.4275E-06	2.1607E-01	2.1608E-01
		10.5	5.9535E-06	3.5295E-01	3.5296E-01
		Averaged	4.0549E-05	2.7856E-01	2.7860E-01
3	0.001	3.5	2.4979E-04	2.1272E-01	2.1297E-01
		7.0	1.5068E-04	1.7792E-01	1.7807E-01
		10.5	8.2087E-05	2.6434E-01	2.6442E-01
		Averaged	6.4875E-04	2.1277E-01	2.1342E-01
4	0.01	3.5	1.3263E-05	1.8461E-01	1.8462E-01
		7.0	9.4136E-06	1.3579E-01	1.3580E-01
		10.5	6.7664E-06	2.3541E-01	2.3542E-01
		Averaged	2.3556E-04	2.8117E-01	1.8528E-01

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ขาเข้าค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Inlet granular temperature ( $m^2/s^2$ )	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	0.00001	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
2	0.0001	3.5	9.1553E-06	2.9327E-01	2.9328E-01
		7.0	7.0998E-06	2.1556E-01	2.1556E-01
		10.5	5.2126E-06	3.4208E-01	3.4208E-01
		Averaged	6.0270E-05	2.8775E-01	2.8781E-01
3	0.001	3.5	1.9145E-04	2.0760E-01	2.0780E-01
		7.0	1.0927E-04	1.7159E-01	1.7169E-01
		10.5	6.2714E-05	2.5258E-01	2.5264E-01
		Averaged	7.8413E-04	2.2299E-01	2.2378E-01
4	0.01	3.5	1.2803E-05	2.1944E-01	2.1945E-01
		7.0	7.7647E-06	1.3471E-01	1.3472E-01
		10.5	5.8652E-06	2.2972E-01	2.2973E-01
		Averaged	1.8771E-04	2.9661E-01	1.9464E-01



#### 4.9 ผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบ

ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบ (Packing limit) คือ สัดส่วนปริมาตรของแข็งที่มีอยู่ได้สูงสุดภายในระบบ โดยในตัวโปรแกรมจะสามารถทำการตั้งค่าที่แตกต่างกันได้ว่าจะใช้ค่าเท่าไร ในส่วนนี้จะทำการศึกษาผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันจำนวน 3 ค่า คือ ค่าเท่ากับ 0.56, 0.60 และ 0.64

ภาพที่ 4.72 และ 4.73 แสดงผลของความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลให้ความดันลดในท่อไรเซอร์แตกต่างกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ถึงแม้ว่าในการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) จะใช้สัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่เท่ากับ 0.60 ก็ตาม แต่ผลการจำลองที่ได้กลับให้ค่าใกล้เคียงทั้งข้อมูลการทดลองจริงและผลการจำลองในระบบสองมิติ อย่างไรก็ตามดูเหมือนว่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่มีค่าน้อยสุดจะมีความดันลดน้อยกว่าค่าอื่นๆ เล็กน้อย เนื่องจากว่าปริมาณของแข็งที่มีได้สูงสุดในระบบมีค่าน้อยกว่านั่นเอง ส่วนลักษณะความดันลดที่ทำนายได้พบว่าเป็นไปตามอุทกพลศาสตร์ซึ่งพียงเกิดขึ้นในระบบ

ภาพที่ 4.74 และ 4.75 แสดงผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากกราฟ พบว่า ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่ต่างกันจะไม่ส่งผลให้ปริมาณฟลักซ์ของแข็งเปลี่ยนแปลง ผลการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองและผลการจำลองในระบบสองมิติ ยกเว้นบริเวณกลางของท่อไรเซอร์ที่เกิดจากผลของความลึกทำให้ปริมาณของแข็งน้อยกว่าดังที่ได้เคยกล่าวไปนั่นเอง โดยผลในทิศทาง  $y$  พบว่ามีความสอดคล้องกับทิศทาง  $x$

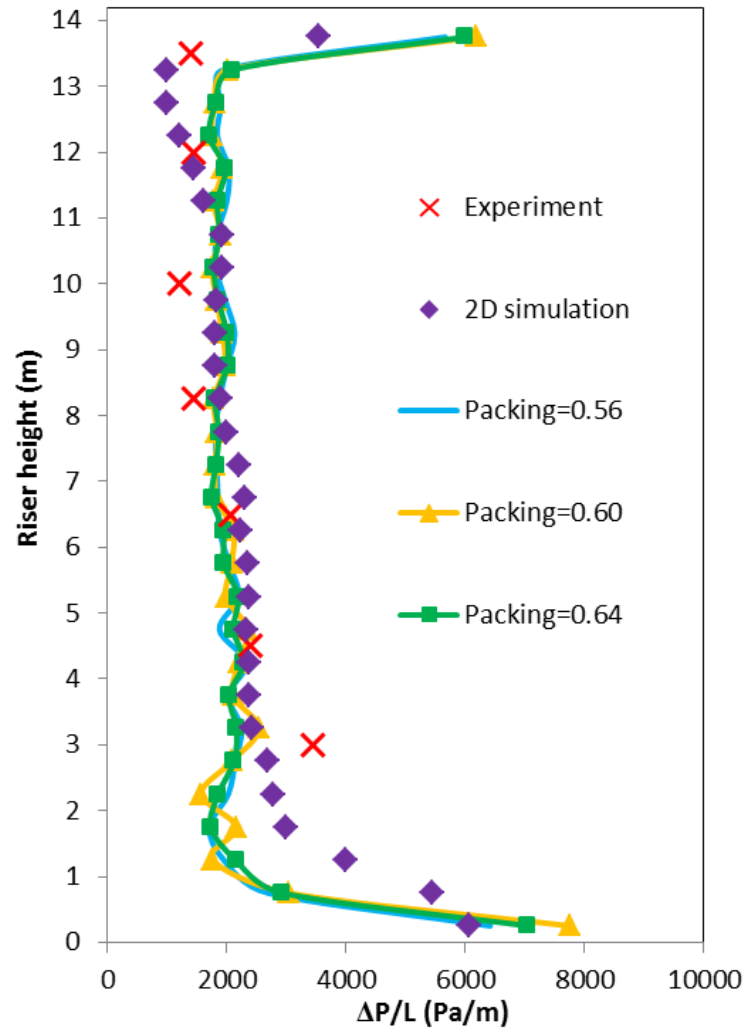
ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.76 และ 4.77 ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสอดคล้องกับความดันลดที่เกิดขึ้นในระบบ คือจะมีค่าสูงบริเวณด้านล่างและด้านบนของท่อไรเซอร์ และผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่ต่างกันไม่ส่งผลให้สัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยแตกต่างกันเช่นเดียวกันทั้งในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$  แต่จะสังเกตเห็นว่าที่บริเวณด้านล่างค่าของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่มีค่าน้อยสุดจะมีค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งน้อยสุดเนื่องจากปริมาณของแข็งที่มีได้น้อยกว่านั่นเอง ซึ่งจะสอดคล้องกับผลความดันลด ดังที่ได้กล่าวไป

ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างทั้งทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.78 และ 4.79 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าผลของค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้ความเร็วแตกต่างกัน แต่จะสังเกตได้ว่าค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่มีค่าน้อยจะมีความเร็วของแข็งตามแนวแกนสูงกว่า เนื่องจากปริมาณของแข็งที่น้อยกว่าเมื่อพิจารณาความแตกต่างในสองทิศทาง พบว่า มีเพียงบริเวณด้านล่างและด้านบน ที่มีความแตกต่างของความเร็วเนื่องจากผลของการป้อนเข้าและผลของทางออกดังที่ได้เคยกล่าวไป

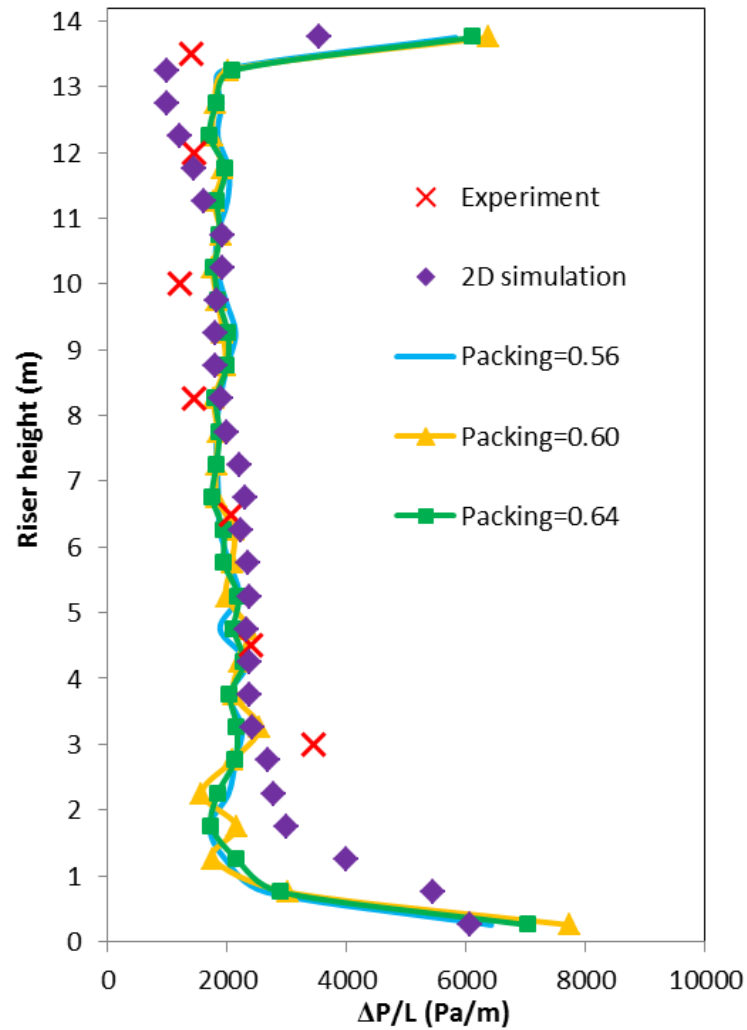
ภาพที่ 4.80 แสดงคอนทัวร์ของผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกัน จากภาพสามารถสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งจากด้านล่างไปสู่ด้านบนของท่อไรเซอร์ได้ในทุกๆ ค่าของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบ และจะเห็นได้ว่าภาพคอนทัวร์มีลักษณะคล้ายกัน แสดงถึงความไม่แตกต่างกันของค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่ต่างกัน ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะการไหลในช่วงการไหลฟลูอิดไฮดรอลิกแบบความเร็วสูง ดังเช่นในการจำลองนี้มีปริมาณสัดส่วนปริมาตรของแข็งไม่ถึงค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบนั่นเอง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรที่แสดงในภาพที่ 4.81 จะสังเกตเห็นว่าค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่มีค่าสูงสุดในที่นี้เท่ากับ 0.64 จะมีปริมาณของแข็งมากกว่าเล็กน้อย (สีของคอนทัวร์บริเวณทางเข้ามีสีเข้มกว่า)

ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และ 4.10 ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากตาราง พบว่า ผลของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์ในทุกค่าของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบ และเมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่มีต่ออุณหภูมิแกรนูลาร์ พบว่า ไม่มีความแตกต่างกันมาก หรือต่างเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองในส่วนที่ได้กล่าวไป แต่จะเห็นได้ว่าที่ค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบจะมีค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์รวมสูงกว่าระบบที่มีสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบค่าต่ำๆ เล็กน้อย ซึ่งเป็นตัวยืนยันถึงปริมาณของแข็งที่แตกต่างกันได้ ในแง่ผลของความสูงที่มีต่ออุณหภูมิแกรนูลาร์นั้น พบว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์รวมมีค่าลดลงบริเวณตรงกลางท่อไรเซอร์และจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งบริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์ เนื่องจากปริมาณของแข็งที่ลดลงและเพิ่มขึ้นบริเวณตรงกลางและใกล้

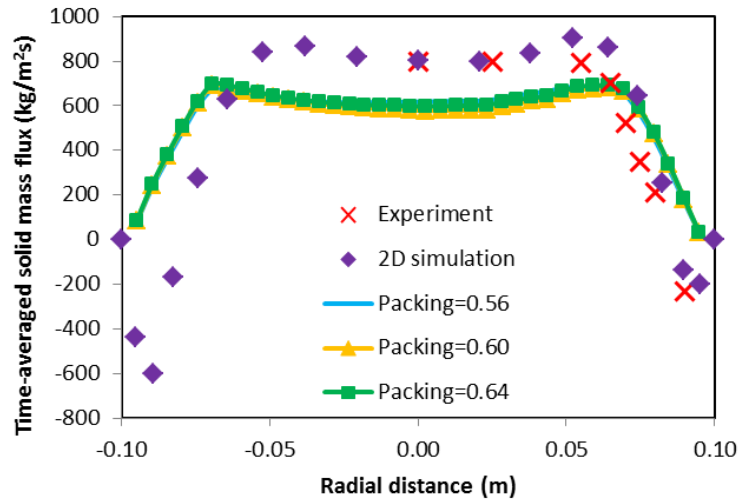
ทางออกตามลำดับนั้นเอง ในส่วนผลของทิศทาง  $y$  ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.10 พบว่ามีความสอดคล้องกับในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกัน



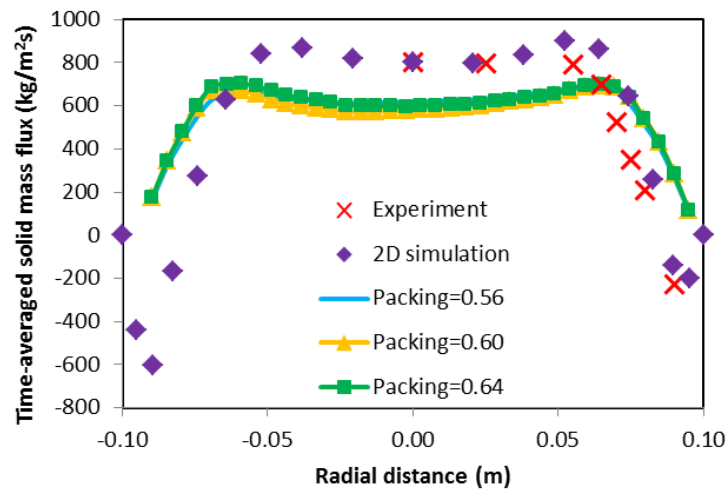
ภาพที่ 4.72 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



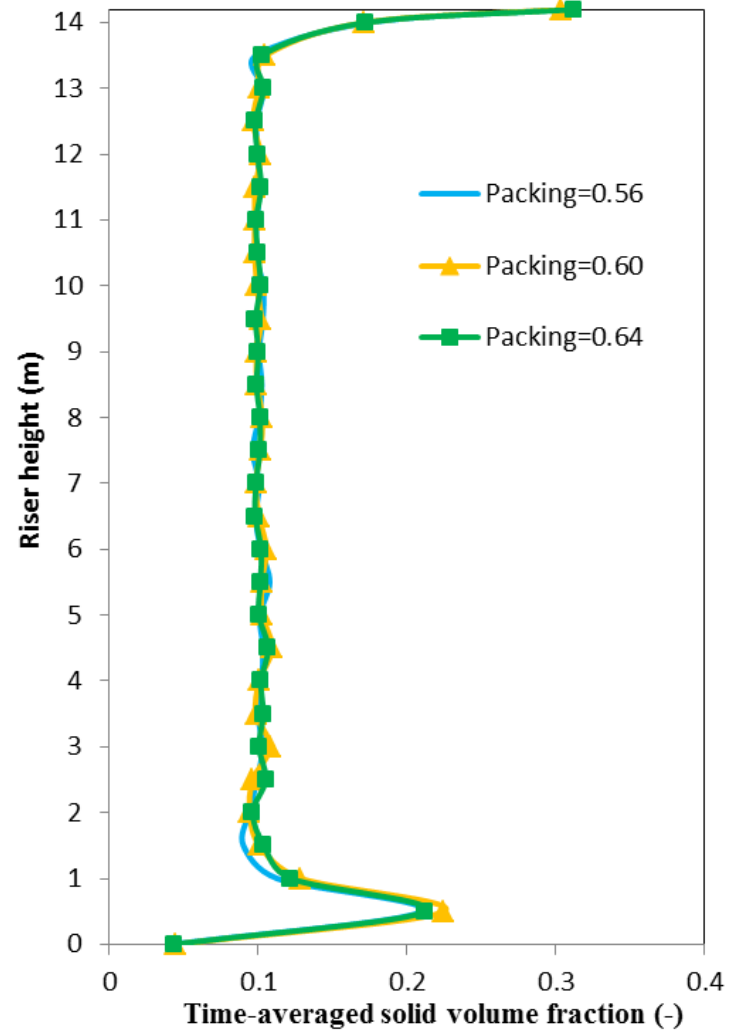
ภาพที่ 4.73 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y



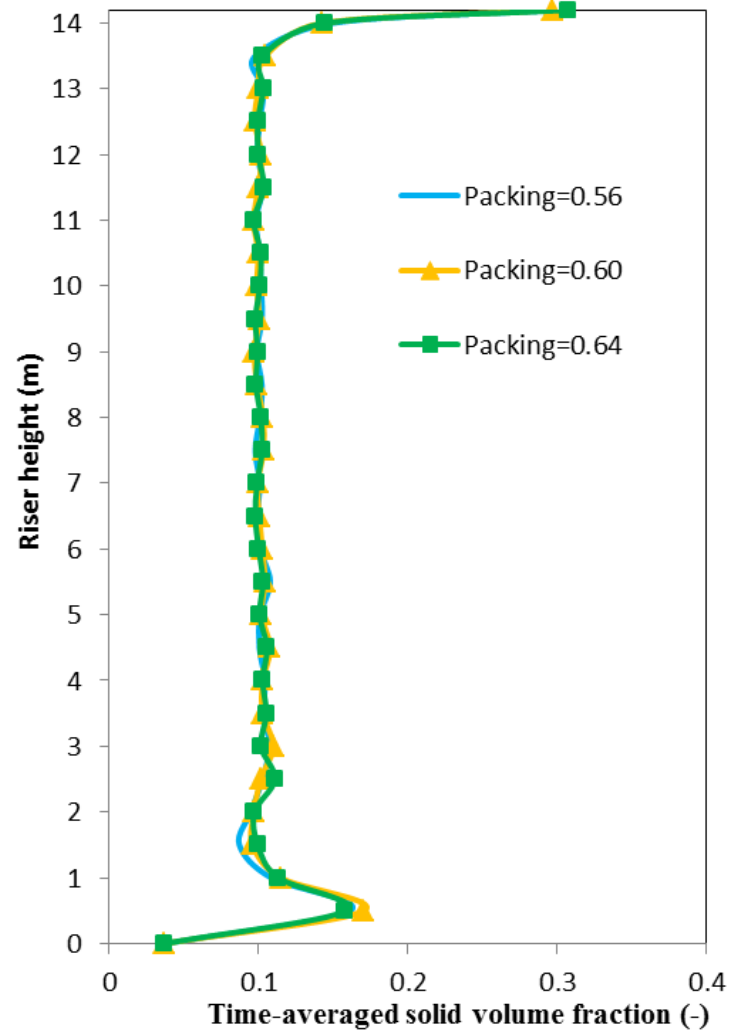
ภาพที่ 4.74 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.75 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y

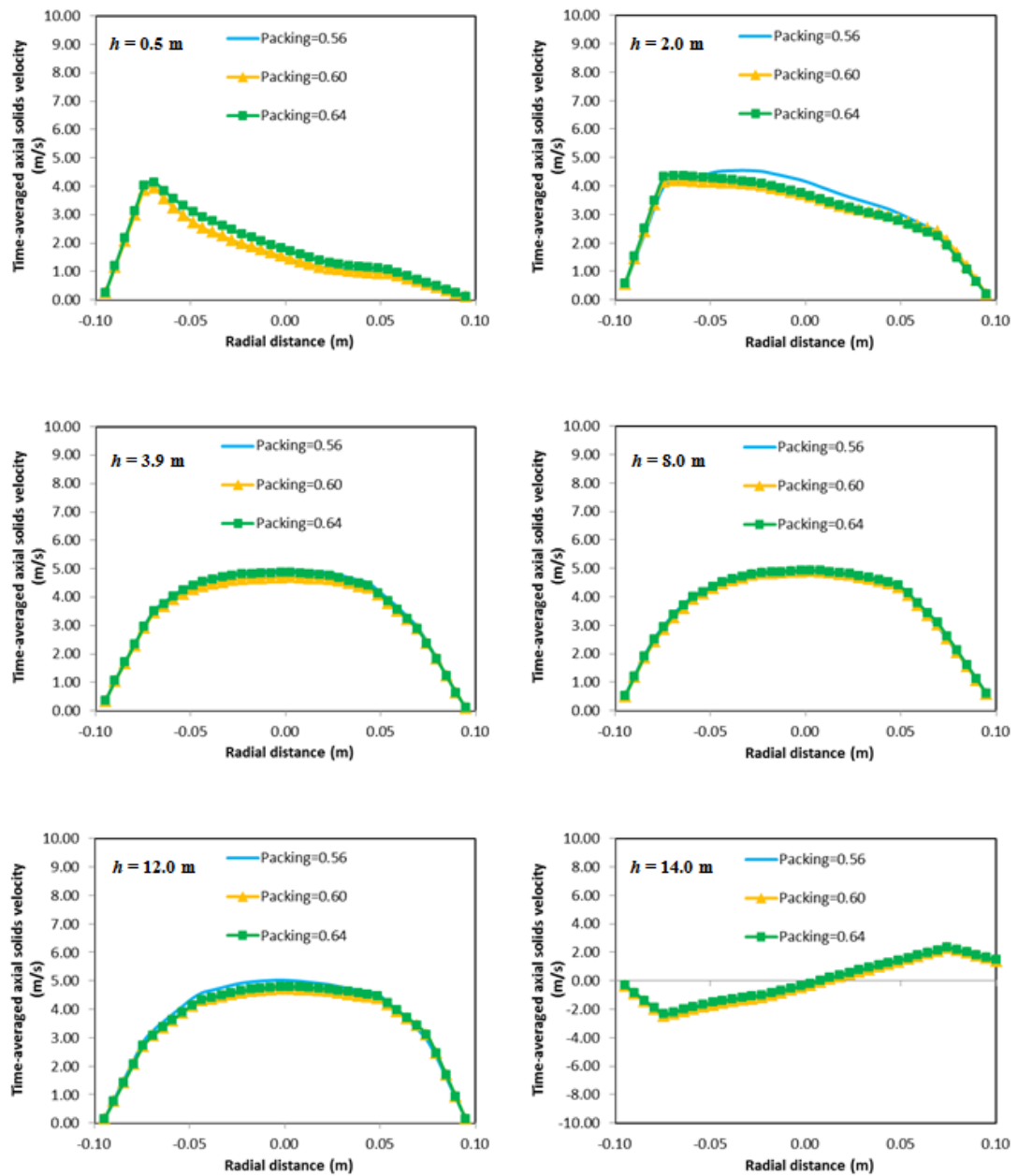


ภาพที่ 4.76 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันในทิศทาง x

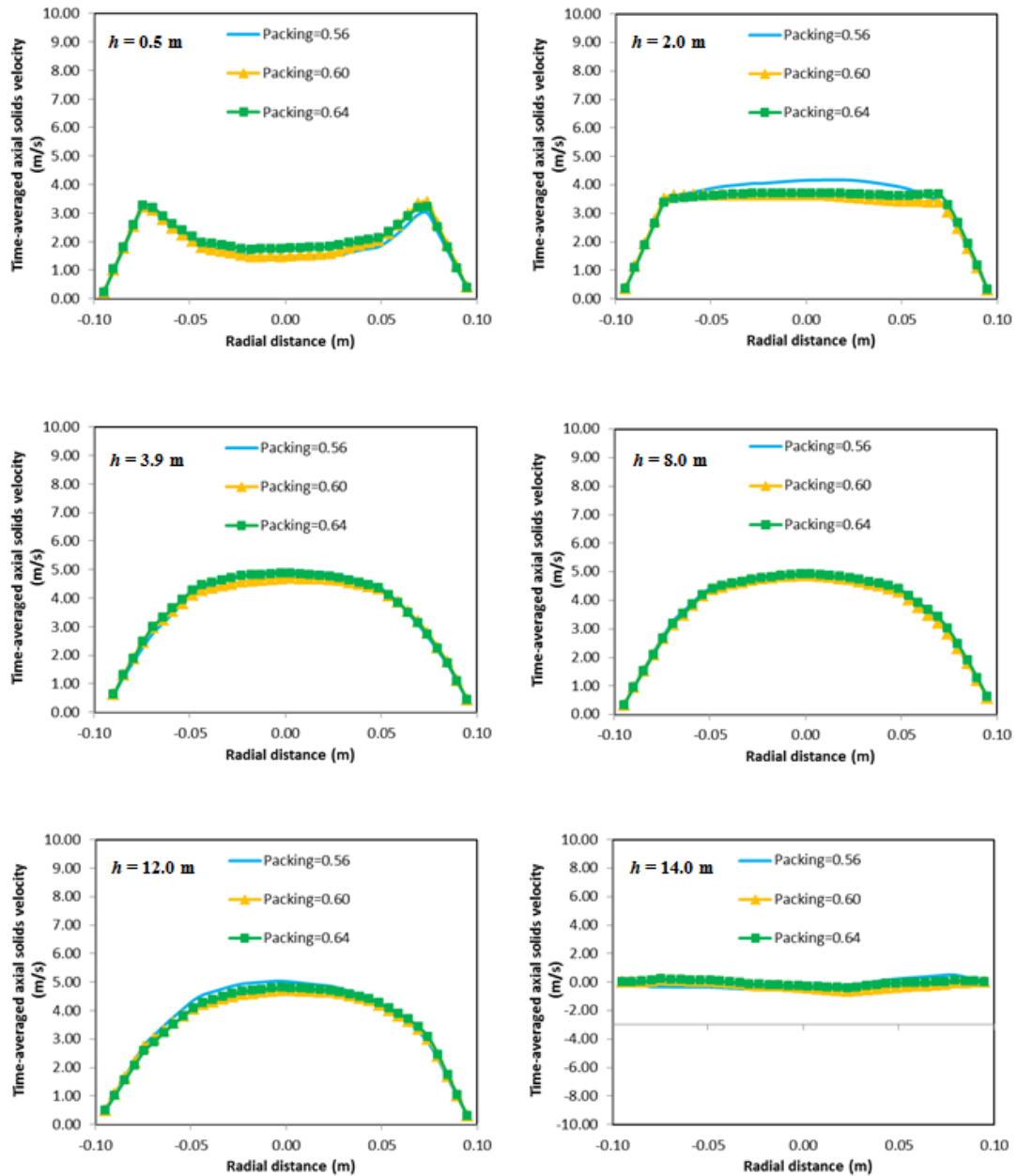


ภาพที่ 4.77 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกันในทิศทาง y

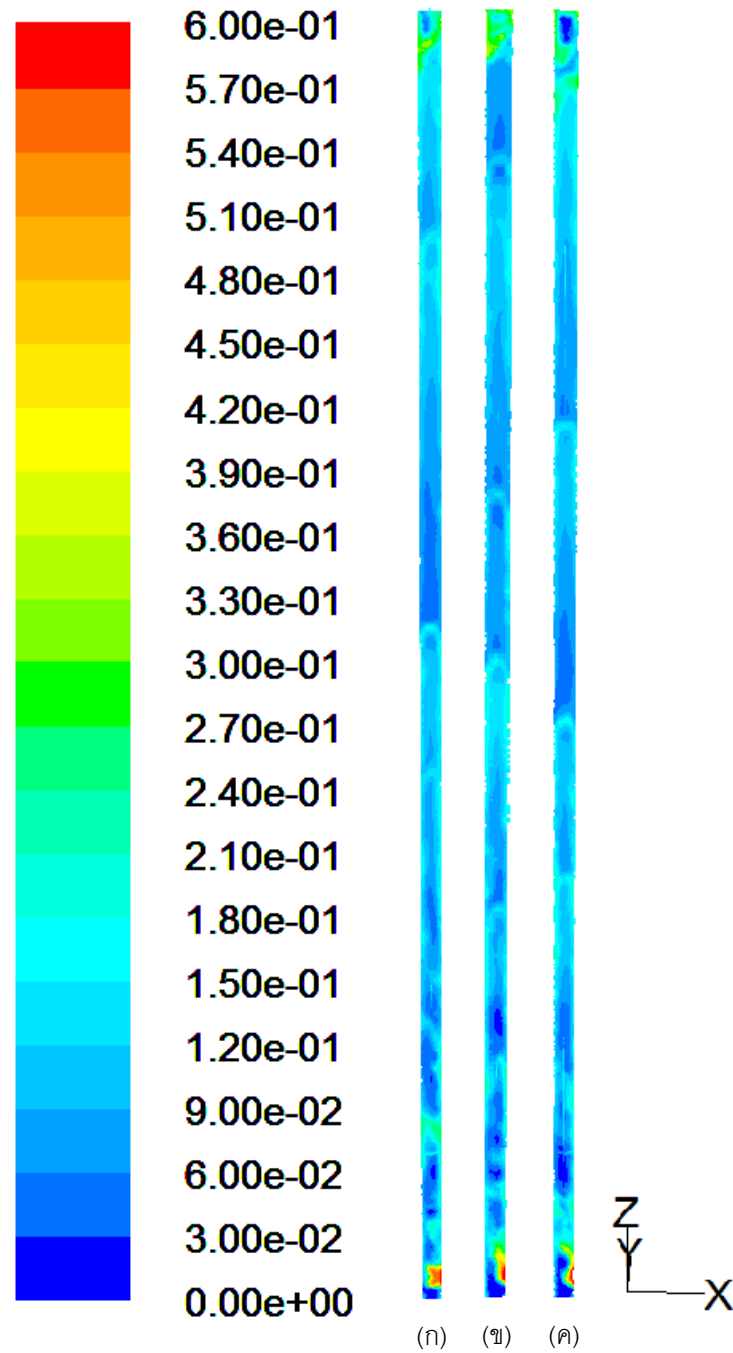




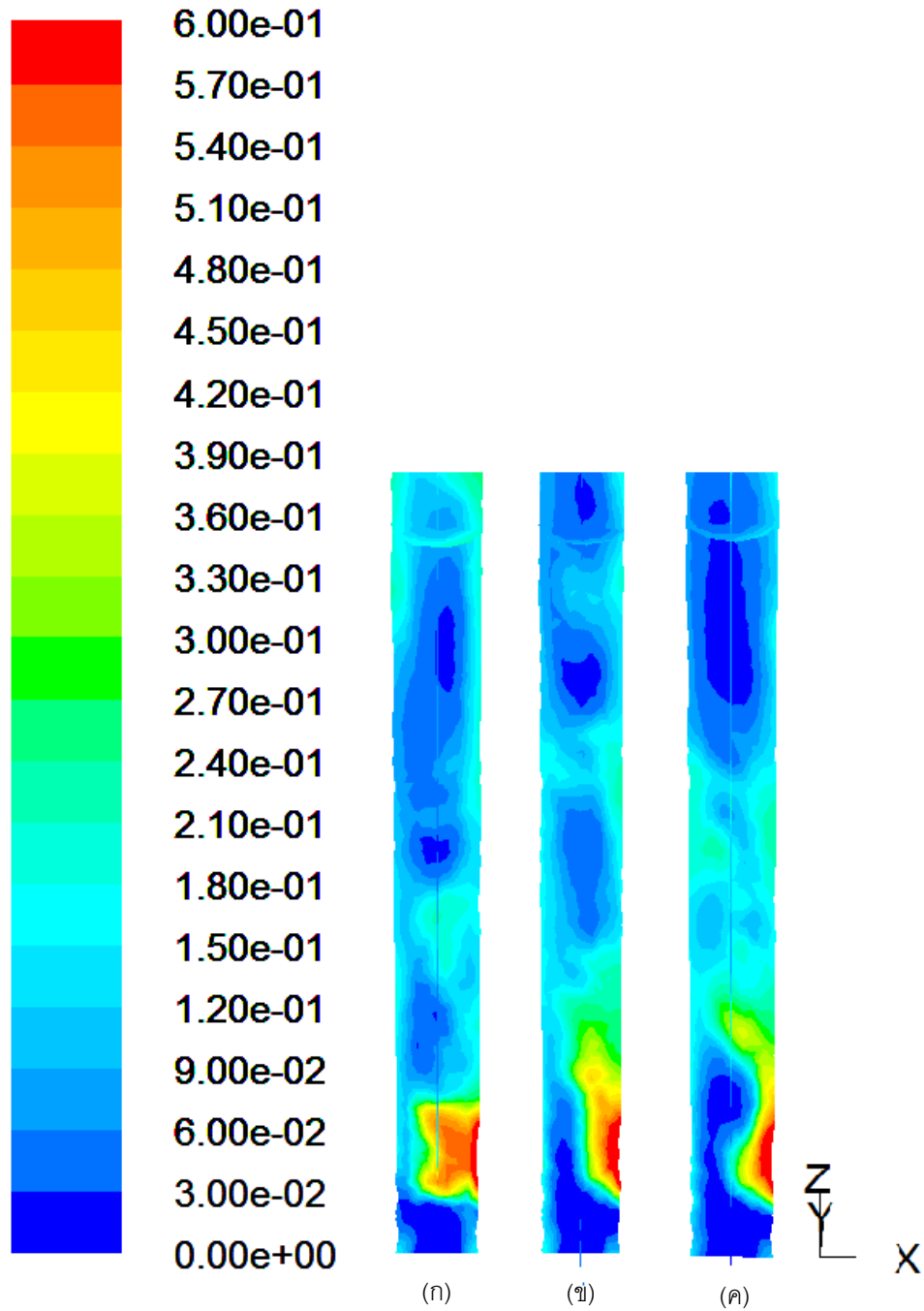
ภาพที่ 4.78 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบค่าต่างๆ ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.79 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบค่าต่างๆ ในทิศทาง y



ภาพที่ 4.80 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อโรเตอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 0.56 (ข) 0.60 และ (ค) 0.64



ภาพที่ 4.81 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อโรเตอร์ของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 0.56 (ข) 0.60 และ (ค) 0.64

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Packing limit value	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	0.56	3.5	1.1007E-05	2.7465E-01	2.7466E-01
		7.0	8.9586E-06	2.4829E-01	2.4830E-01
		10.5	5.7382E-06	3.5640E-01	3.5641E-01
		Averaged	3.6840E-05	2.9794E-01	2.9798E-01
2	0.6	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
3	0.64	3.5	8.8835E-06	3.5803E-01	3.5804E-01
		7.0	8.0710E-06	3.2026E-01	3.2027E-01
		10.5	6.1707E-06	4.6784E-01	4.6785E-01
		Averaged	3.5120E-05	3.5781E-01	3.5784E-01

ตารางที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Packing limit value	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	0.56	3.5	1.1643E-05	2.7549E-01	2.7550E-01
		7.0	7.6495E-06	2.2241E-01	2.2242E-01
		10.5	5.4585E-06	3.4640E-01	3.4640E-01
		Averaged	5.7932E-05	3.0639E-01	3.0645E-01
2	0.6	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
3	0.64	3.5	1.0141E-05	3.5074E-01	3.5075E-01
		7.0	6.9479E-06	3.2088E-01	3.2088E-01
		10.5	5.7134E-06	4.4416E-01	4.4416E-01
		Averaged	6.1760E-05	3.7324E-01	3.7331E-01

#### 4.10 ผลของความหนืดเสียดทาน

ความหนืดเสียดทาน (Frictional viscosity) คือ แรงที่ต้านการเคลื่อนที่ของของไหล เปรียบดังแรงเสียดทานที่มีในของแข็ง โดยในตัวโปรแกรม ตัวแปรนี้จะสามารถตั้งค่าได้ โดยทั่วไปจะมีให้เลือกใช้อยู่สองแบบ คือ แบบ None ซึ่งก็คือ ไม่คิดผลของแรงเสียดทาน (No frictional viscosity) และแบบ Schaeffer (Schaeffer, 1987) การตั้งค่าแบบ None จะนิยมใช้กับระบบฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน หรือแบบความเร็วสูง ที่มีปริมาณของแข็งในระบบไม่สูงนัก ส่วนการตั้งค่าแบบ Schaeffer ใช้กับระบบที่มีปริมาณของแข็งอยู่สูง นิยมใช้กับฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊สดังนั้น ในส่วนนี้จึงทำการศึกษาผลของความหนืดเสียดทานทั้ง 2 แบบ คือ แบบ None ที่ไม่คิดผลของแรงเสียดทาน และแบบ Schaeffer ว่าจะส่งผลกระทบต่ออุทกพลศาสตร์ภายในระบบอย่างไร

ผลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.82 และ 4.83 ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ จากกราฟ พบว่า ผลของความดันลดภายในท่อไรเซอร์ไม่มีความแตกต่างกันเท่าใดนักเมื่อเปลี่ยนค่าความหนืดเสียดทาน แต่ดูเหมือนว่าการตั้งค่าความหนืดเสียดทานแบบ Schaeffer จะมีความดันลดที่สูงกว่าเล็กน้อย ผลที่เกิดขึ้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งในทิศทาง x และทิศทาง y นอกจากนี้ ผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกับผลข้อมูลการทดลองและการจำลองในระบบสองมิติ และสามารถทำนายอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นได้ตรงกับความเป็นจริง

ภาพที่ 4.84 และ 4.85 แสดงผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกันในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า การตั้งค่าความหนืดเสียดทานแบบ None ให้ค่าการจำลองที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากกว่าความหนืดเสียดทานแบบ Schaeffer ทั้งในทิศทาง x และ y เนื่องจากระบบที่ใช้ในการจำลองเป็นระบบฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง ส่งผลให้การตั้งค่าความหนืดเสียดทานแบบ None ที่เหมาะสมกับระบบมากกว่าให้ผลการทำนายที่แม่นยำกว่านั่นเอง ซึ่งสามารถยืนยันได้จากงานวิจัยของ Shah และคณะ (2011) ที่ได้ใช้การตั้งค่าความหนืดเสียดทานแบบ Schaeffer ในการจำลองระบบเดียวกันกับที่ทำการวิจัย ส่งผลให้ค่าที่ได้ไม่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง ส่วนความแตกต่างที่เกิดขึ้นบริเวณตรงกลางท่อไรเซอร์เมื่อเปรียบเทียบกับผลข้อมูลการทดลองและการจำลองในระบบสองมิตินั้น อาจเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความลึกที่เข้ามาเกี่ยวข้องในการจำลองระบบสามมิติ ดังที่ได้เคยกล่าวไว้ในตอนต้น

ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่าความหนืดเสียดทานในทิศทาง x และ y ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.86 และ 4.87 ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า

สัดส่วนปริมาตรของแข็งของการตั้งค่าความหนืดเสียตทานแบบ None มีค่าน้อยกว่าแบบ Schaeffer ซึ่งสอดคล้องกับผลความดันลดภายในท่อไรเซอร์ เนื่องจากการตั้งค่าความหนืดเสียตทานแบบ Schaeffer ใช้กับระบบที่มีปริมาณของแข็งสูง เช่น ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบฟองแก๊ส ดังนั้น จึงทำนายปริมาณของแข็งที่มีในระบบสูงกว่าความเป็นจริง อย่างไรก็ตามผลของความหนืดเสียตทานทั้งสองก็ไม่ได้แตกต่างกันมากนัก และให้การทำนายสัดส่วนปริมาตรของแข็งที่เป็นไปตามอุทกพลศาสตร์ที่ควรเกิดขึ้นจริง ผลการจำลองที่ได้เป็นไปในแนวโน้มเดียวกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$

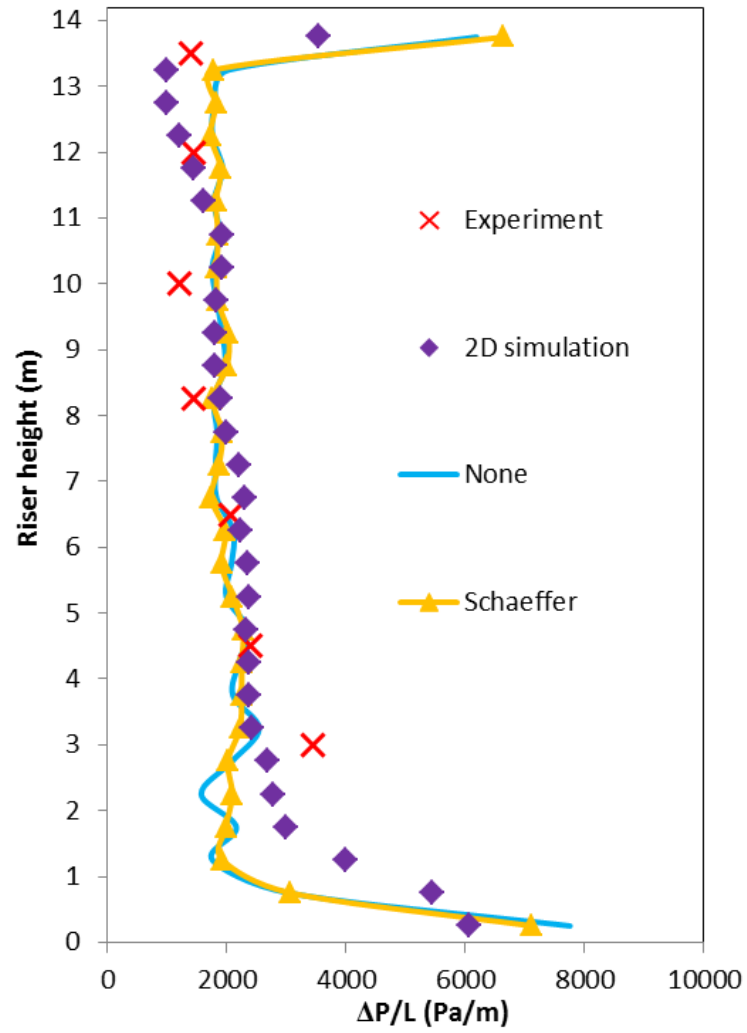
ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่าความหนืดเสียตทานแบบต่างๆ ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.88 และ 4.89 ตามลำดับ จากกราฟ พบว่า ผลของความหนืดเสียตทานไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะเห็นแนวโน้มที่เกิดขึ้น กล่าวคือ การตั้งค่าความหนืดเสียตทานแบบ None มีความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่สูงกว่าความหนืดแบบ Schaeffer เนื่องจากการตั้งค่าความหนืดแบบ Schaeffer ทำนายปริมาณของแข็งได้สูงกว่าจึงทำให้มีความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่น้อยกว่า ที่ระดับความสูงเดียวกัน นอกจากนี้ ยังพบผลของการบ่อน้ำและทางออกที่มีในทิศทาง  $x$  จึงเห็นความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่ระดับความสูงต่างๆ และที่บริเวณความสูงเท่ากับ 14 เมตร มีความไม่สมมาตรเกิดขึ้น ซึ่งแตกต่างกันกับในทิศทาง  $y$

ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียตทานที่แตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.90 เมื่อพิจารณาภาพคอนทัวร์จะเห็นได้ว่าการตั้งค่าความหนืดเสียตทานแบบ Schaeffer ภาพที่ 4.90 (ก) ทำนายปริมาณของแข็งได้สูงกว่าดังที่ได้กล่าวไปจริง และเมื่อพิจารณาที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรที่แสดงในภาพ 4.91 จะเห็นความแตกต่างของปริมาณของแข็งที่เกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัดว่าความหนืดแบบ Schaeffer ให้การทำนายปริมาณของแข็งสูงกว่าการตั้งค่าความหนืดแบบ None

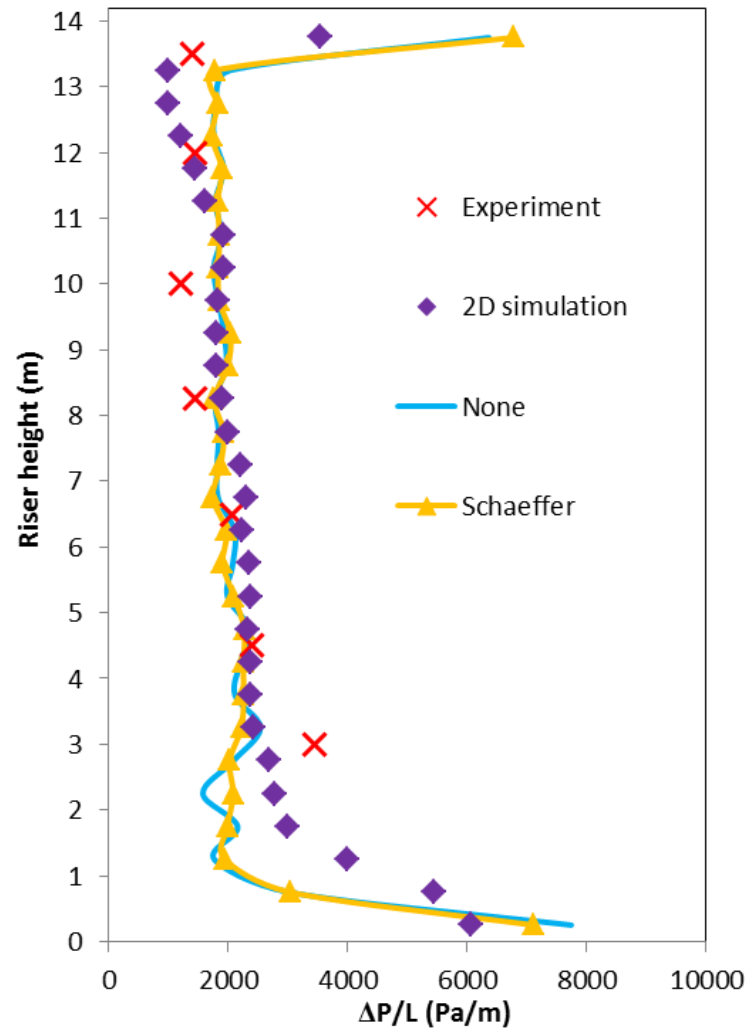
ตารางที่ 4.11 และ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลของอนุกรมการไหลที่แตกต่างกันของความหนืดเสียตทานแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลของอนุกรมการไหลเป็นอีกตัวที่แสดงให้เห็นว่าการตั้งค่าความหนืดเสียตทานแบบ Schaeffer ทำนายปริมาณของแข็งสูงกว่าการตั้งค่าความหนืดเสียตทานแบบ None จากตาราง พบว่า ที่ระดับความสูงต่างๆ ค่าอนุกรมการไหลรวมของความหนืดเสียตทานแบบ None มีค่าน้อยกว่าความหนืดเสียตทานแบบ Schaeffer เนื่องจากความหนืดเสียตทานแบบ None มีปริมาณของแข็งที่น้อยกว่า ส่งผลให้การสิ้นของอนุภาคหรือพลังงานภายในน้อยกว่า



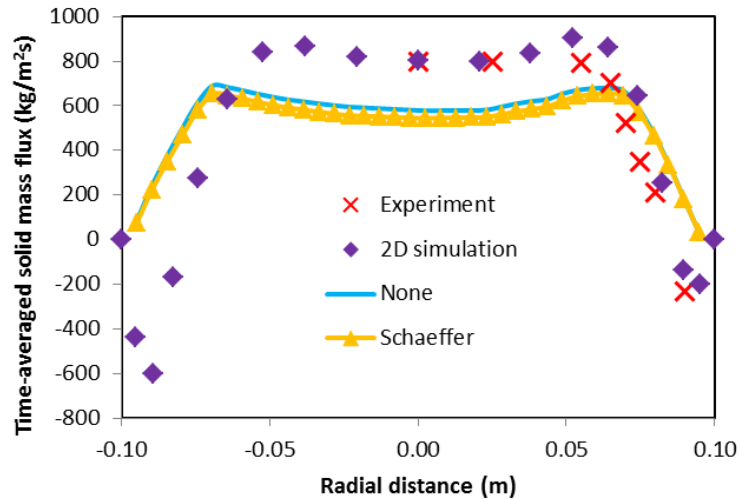
นั่นเอง อย่างไรก็ตาม ในระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นผลของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้คุณสมบัติการไหลต่างกัน และยังพบว่า คุณสมบัติการไหลแบบเทอร์บิวเลนที่มีค่าสูงกว่าคุณสมบัติการไหลแบบลามินาร์ ส่วนผลของอุณหภูมิการไหลในทิศทาง  $y$  ที่แสดงในตารางที่ 4.12 พบว่ามีความสอดคล้องกับในทิศทาง  $x$



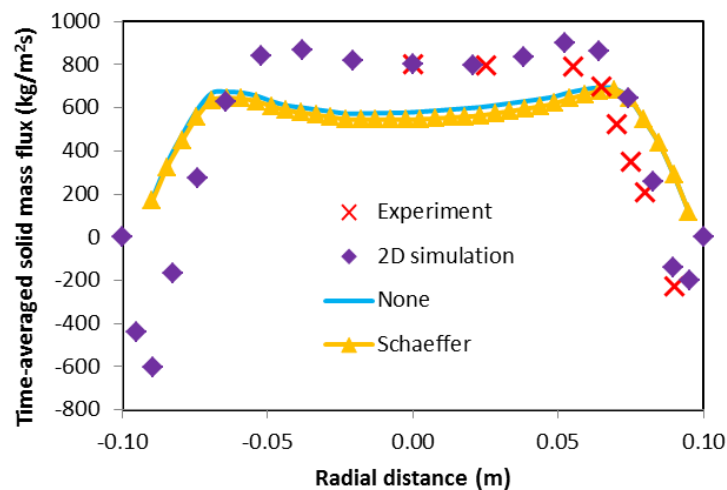
ภาพที่ 4.82 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความหนืดเดียวกันที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



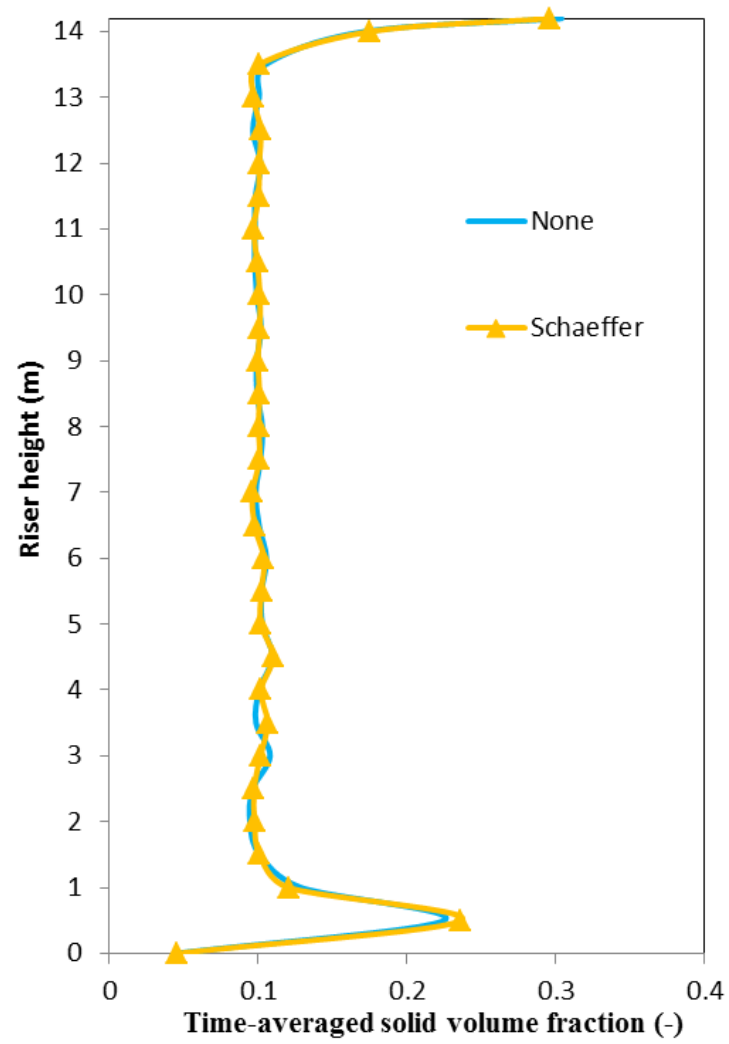
ภาพที่ 4.83 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียตทานที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y



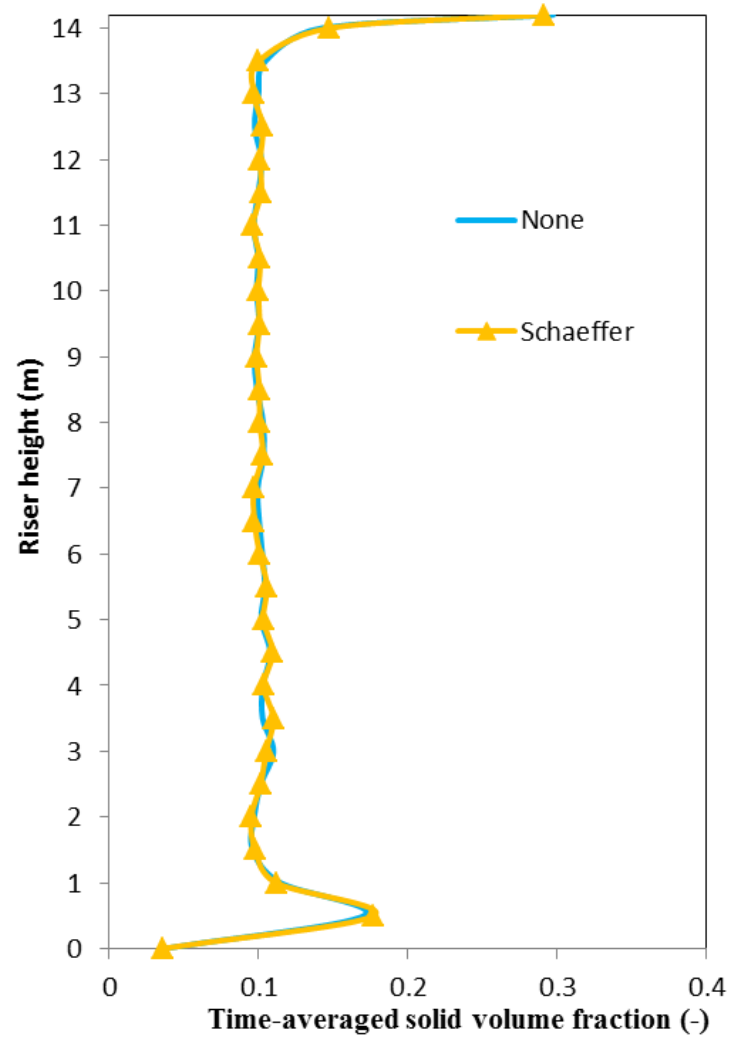
ภาพที่ 4.84 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



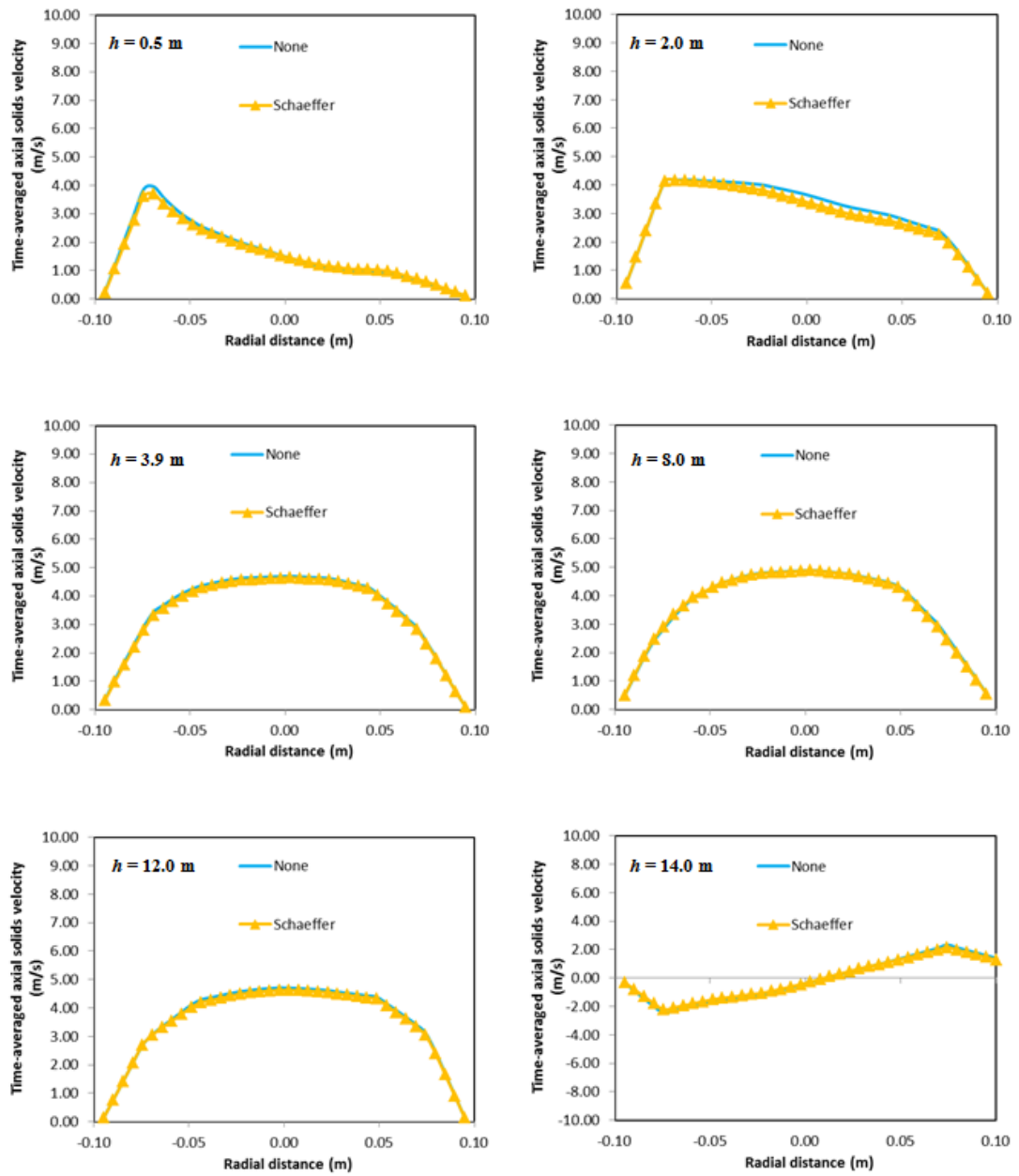
ภาพที่ 4.85 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y



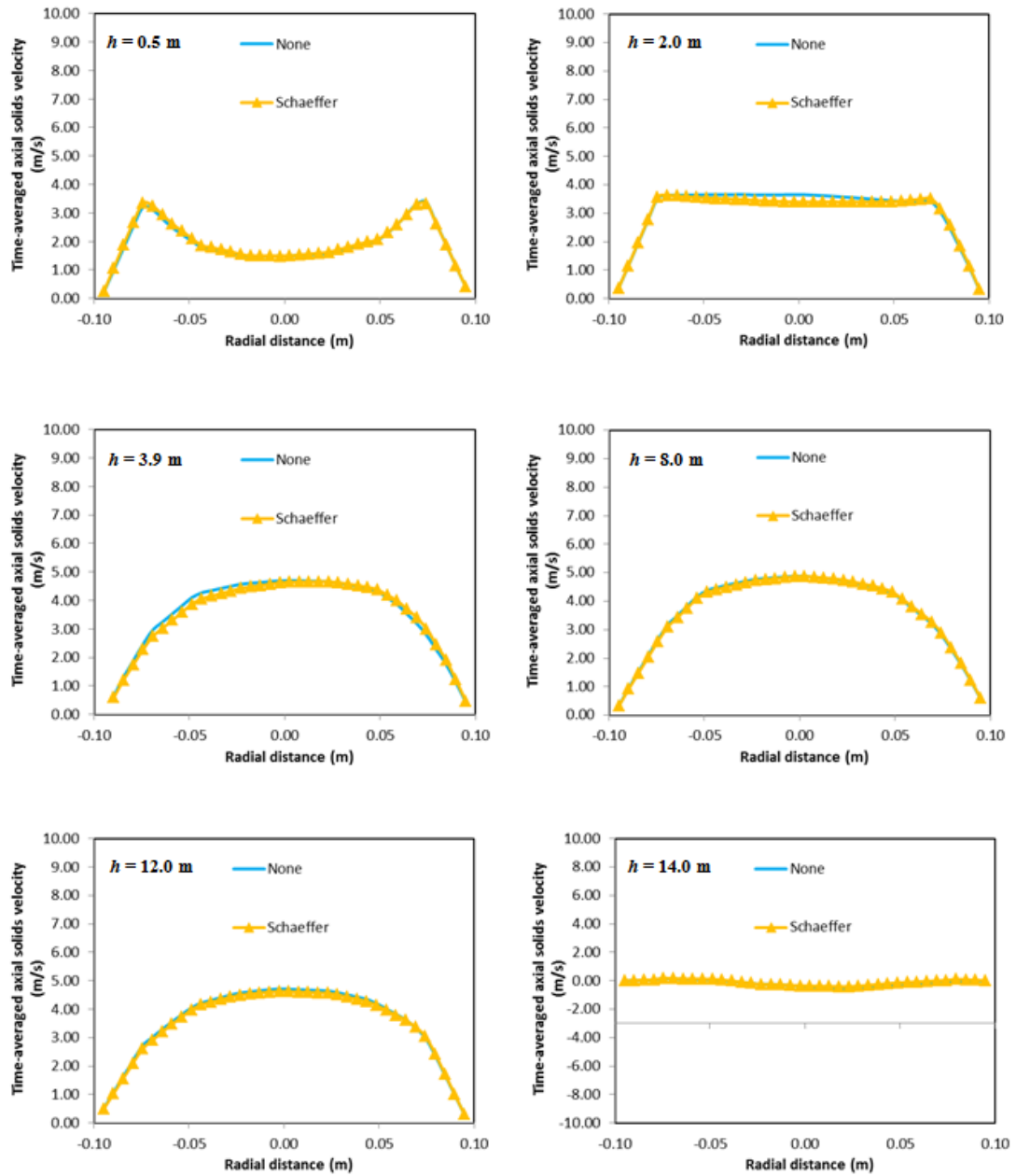
ภาพที่ 4.86 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียตทานที่แตกต่างกันในทิศทาง x



ภาพที่ 4.87 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความหนืดเสียตทานที่แตกต่างกันในทิศทาง y

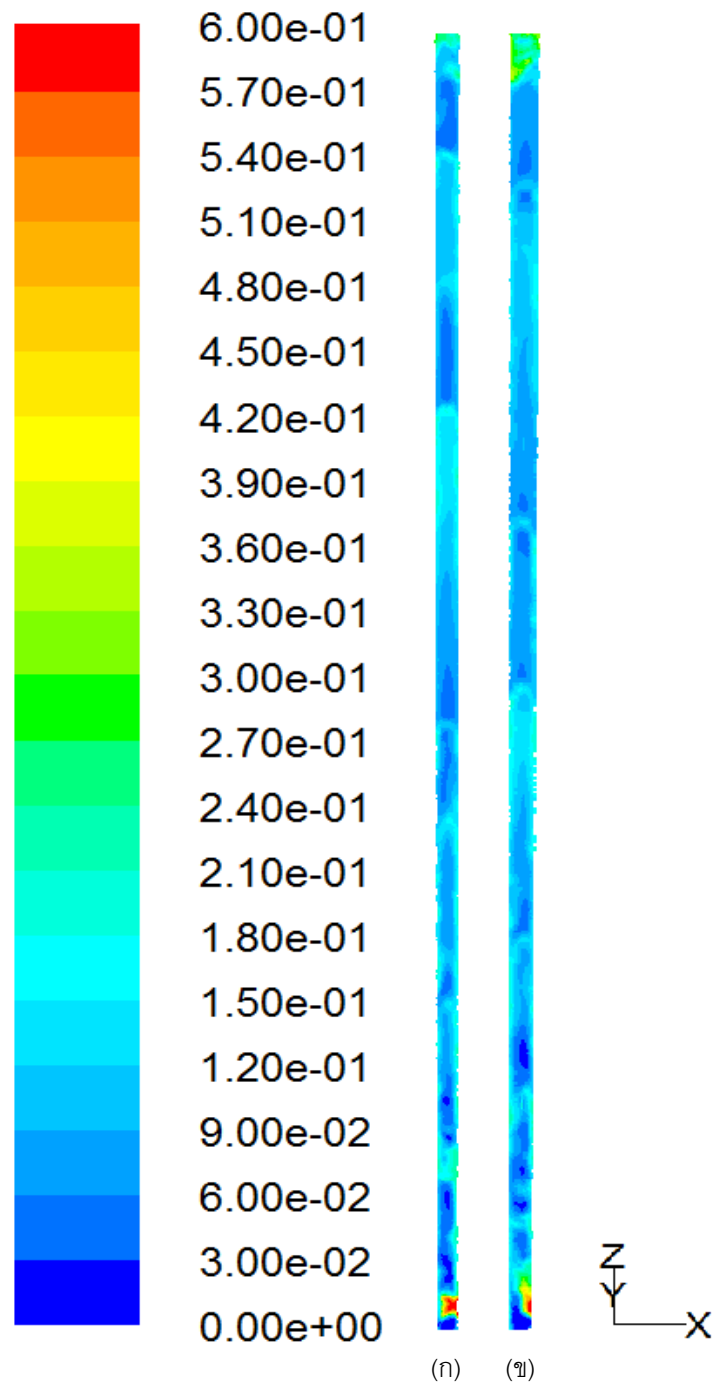


ภาพที่ 4.88 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความหนืดเสียดทานแบบต่างๆ ในทิศทาง x

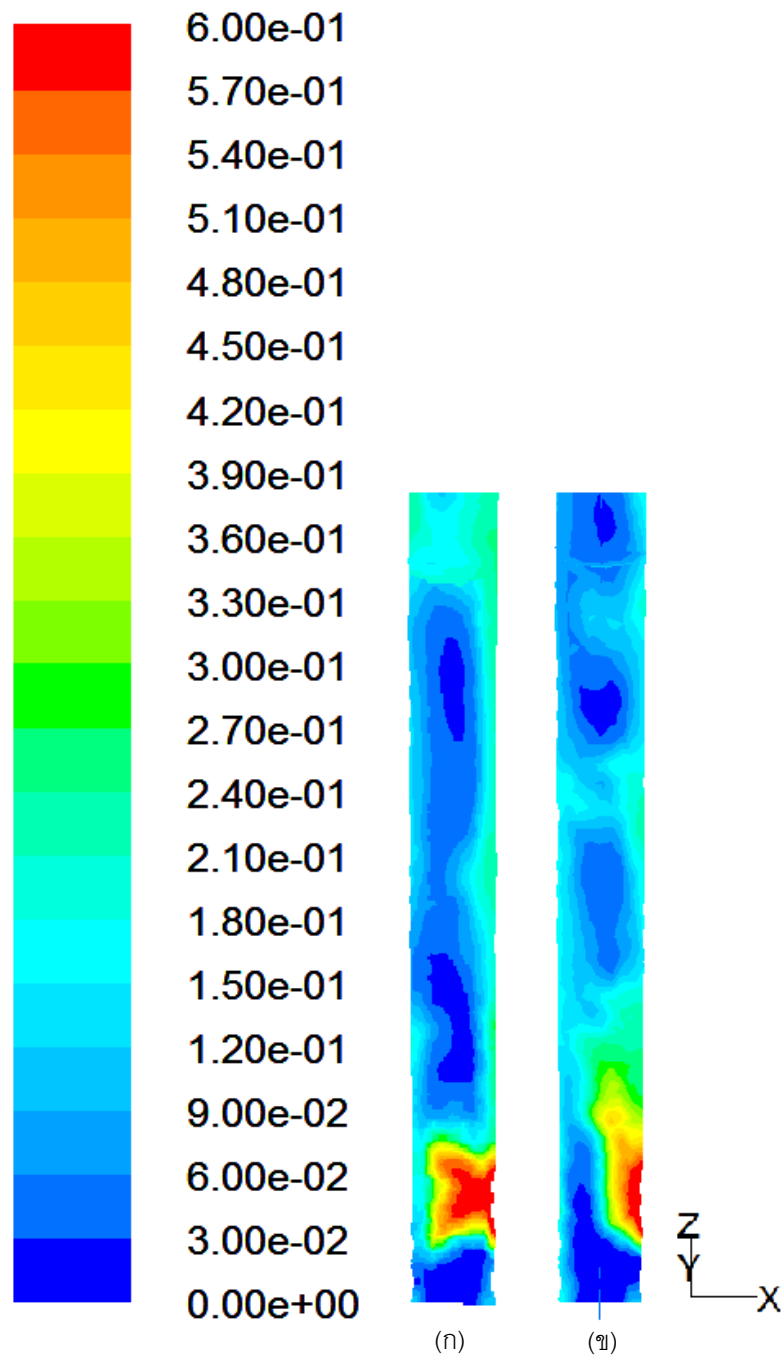


ภาพที่ 4.89 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความหนืดเสียดทานแบบต่างๆ ในทิศทาง  $y$





ภาพที่ 4.90 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไอเซอร์ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกัน โดยที่ (ก) Schaeffer และ (ข) None



ภาพที่ 4.91 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไอเซอร์ของความหนืดเสียดทานที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยที่ (ก) Schaeffer และ (ข) None

ตารางที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความหนืดเสียดทานแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Frictional viscosity	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	None	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
2	Schaeffer	3.5	3.3755E-04	3.3912E-01	3.3946E-01
		7.0	2.4971E-05	3.0557E-01	3.0560E-01
		10.5	1.4838E-04	4.9055E-01	4.9069E-01
		Averaged	4.0251E-04	3.5043E-01	3.5083E-01

ตารางที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความหนืดเสียดทานแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Frictional viscosity	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	None	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
2	Schaeffer	3.5	3.9144E-04	3.4017E-01	3.4056E-01
		7.0	2.0476E-05	3.0014E-01	3.0016E-01
		10.5	1.1391E-04	4.5771E-01	4.5783E-01
		Averaged	4.1362E-04	3.6770E-01	3.6811E-01

#### 4.11 ผลของแบบจำลองความหนืด

แบบจำลองความหนืด (Viscous model) เป็นแบบจำลองเพื่อใช้คำนวณพฤติกรรมของ ภูมิภาคแก๊ส-ของแข็งภายในระบบ ประกอบด้วย 2 แบบจำลองที่สำคัญคือ แบบจำลองความหนืดแบบลามินาร์ (Laminar model) ที่คำนวณพฤติกรรมของภูมิภาคแก๊สแบบลามินาร์ กับแบบจำลองความหนืดแบบเทอร์บิวเลนต์ (Turbulent model) ที่คำนวณพฤติกรรมของภูมิภาคแก๊สแบบเทอร์บิวเลนต์ อย่างไรก็ตามในแบบจำลองความหนืดแบบเทอร์บิวเลนต์นั้นจะมีหลายสมการให้เลือกใช้ ในที่นี้จะเลือกแบบจำลองความหนืดเทอร์บิวเลนต์แบบ  $k - \epsilon$  ที่มีความซับซ้อนน้อย ดังนั้นในส่วนนี้จะทำการศึกษาผลของแบบจำลองความหนืดที่ต่างกัน 2 แบบคือ แบบจำลองความหนืดลามินาร์ และแบบจำลองความหนืดเทอร์บิวเลนต์แบบ  $k - \epsilon$

ผลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.92 และ 4.93 ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความหนืดที่ต่างกันไม่ส่งผลให้ค่าความดันลดมีค่าต่างกันทั้งในทิศทาง x และทิศทาง y เป็นไปตามงานวิจัยที่ผ่านมาของ Cloete และคณะ (2011) ที่แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันไม่ส่งผลให้อุณหภูมิศาสตร์เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้แบบจำลองความหนืดทั้งสองยังสามารถทำนายพฤติกรรมความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อไรเซอร์ได้ถูกต้องตามหลักอุทกพลศาสตร์ และผลการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองและผลการจำลองในระบบสองมิติอีกด้วย

ภาพที่ 4.94 และ 4.95 แสดงผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันในทิศทาง x และ y ตามลำดับ จากผลการจำลองจะเห็นว่าผลของแบบจำลองความหนืดที่ต่างกันไม่ส่งผลให้ปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเปลี่ยนแปลงเท่าใดนัก ถึงแม้จะดูเหมือนว่าแบบจำลองความหนืดเทอร์บิวเลนต์แบบ  $k - \epsilon$  จะให้ผลใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองมากกว่าก็ตาม โดยในความเป็นจริงแบบจำลองความหนืดลามินาร์เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมกว่าเนื่องจากในทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็งจะมีการคิดผลของส่วนเทอร์บิวเลนต์เข้ามาด้วยแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องมีการคิดภูมิภาคแก๊สแบบเทอร์บิวเลนต์อีก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ที่ทำการจำลองโดยใช้แบบจำลองความหนืดลามินาร์และผลที่ได้มีความถูกต้อง นอกจากนี้ Almuttahir และ Taghipour (2008) ยังแสดงการเปรียบเทียบให้เห็นว่าแบบจำลองความหนืดลามินาร์ให้การทำนายที่ถูกต้องมากกว่าแบบจำลองความหนืดเทอร์บิวเลนต์แบบ  $k - \epsilon$

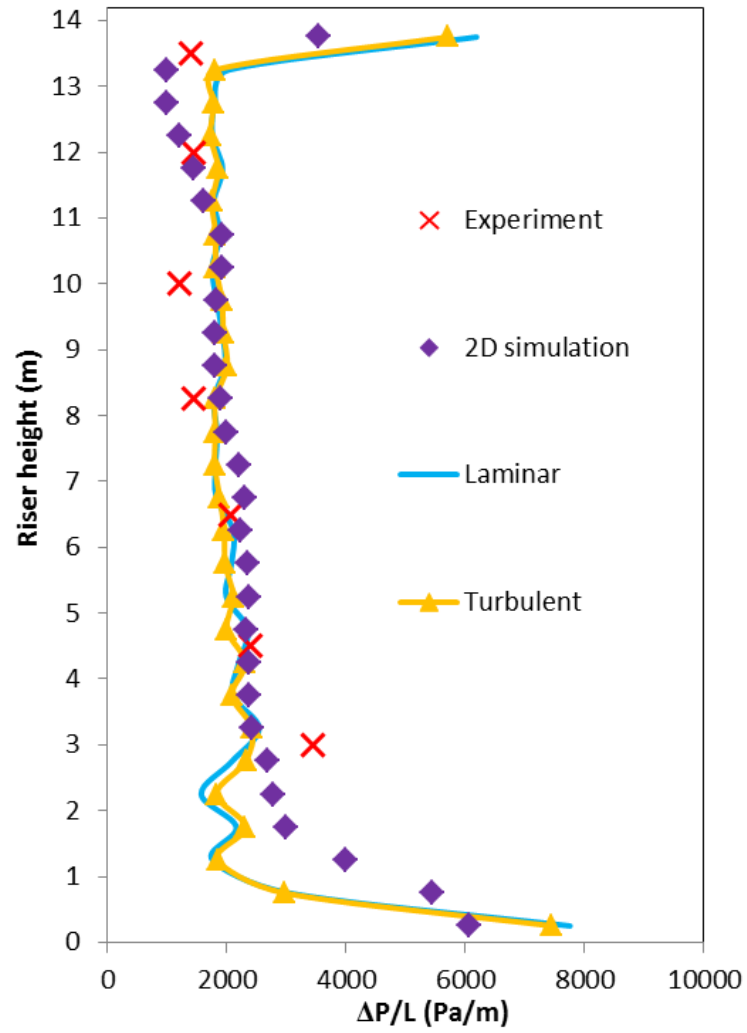
ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดในทิศทาง x และ y ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.96 และ 4.97 ตามลำดับ จากกราฟ พบว่า แบบจำลอง

ความหนืดทั้งสองแบบให้ผลการทำนายสัดส่วนปริมาตรของแข็งได้ถูกต้อง และสอดคล้องกับความดันลดยภายในท่อไรเซอร์ที่เกิดขึ้น ดังที่ได้กล่าวไป แบบจำลองความหนืดทั้งสองให้ค่าการจำลองไม่แตกต่างกัน ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$

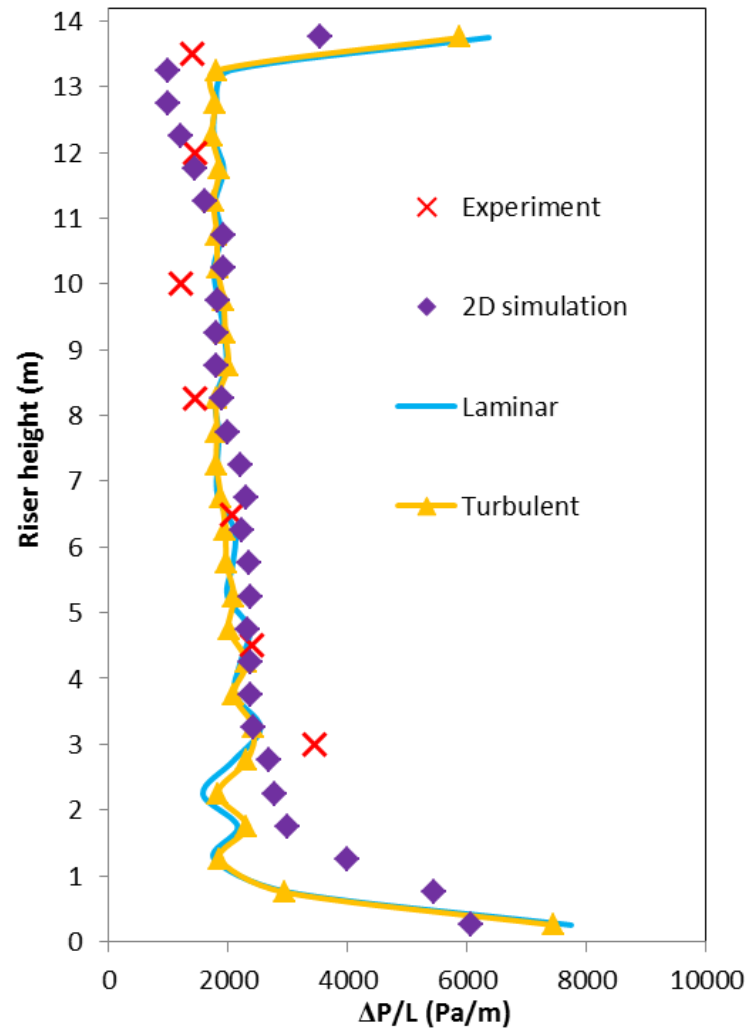
ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของค่าแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.98 และ 4.99 ตามลำดับ จากกราฟ พบว่า ผลของความเร็วของแข็งตามแนวแกนไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเสียดทาน เช่นเดียวกัน ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  นอกจากนี้ ยังพบความไม่สมมาตรเนื่องจากการป้อนเข้าและทางออกในทิศทาง  $x$  ส่งผลให้กราฟบริเวณด้านล่างแตกต่างกันกับในทิศทาง  $y$  และบริเวณที่ความสูงเท่ากับ 14 เมตร นั่นเอง

ภาพที่ 4.100 แสดงคอนทัวร์ของผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกัน จากภาพสามารถสังเกตการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งจากด้านล่างไปสู่ด้านบนของท่อไรเซอร์ได้ในทุกแบบจำลอง และดังที่ได้กล่าวไปว่าผลของแบบจำลองความหนืดส่งผลต่อระบบเพียงเล็กน้อย จึงไม่เห็นความแตกต่างที่เกิดขึ้นรวมทั้งที่ความสูง 3.9 เมตร (ภาพที่ 4.101) ด้วย

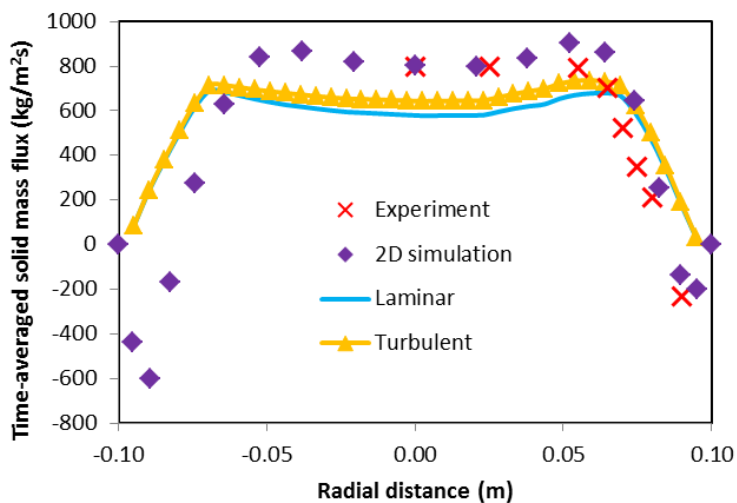
ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์แสดงให้เห็นชัดเจนว่าแบบจำลองความหนืดทั้งสองไม่แตกต่างกัน เนื่องจากค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์รวมมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงเดียวกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และ 4.14 ซึ่งเป็นผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่าแบบจำลองความหนืดแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ และยังพบว่าผลของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนซ์มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์ ดังที่ได้เคยกล่าวไป ในส่วนผลของทิศทาง  $y$  ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.14 พบว่า มีความสอดคล้องในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกัน



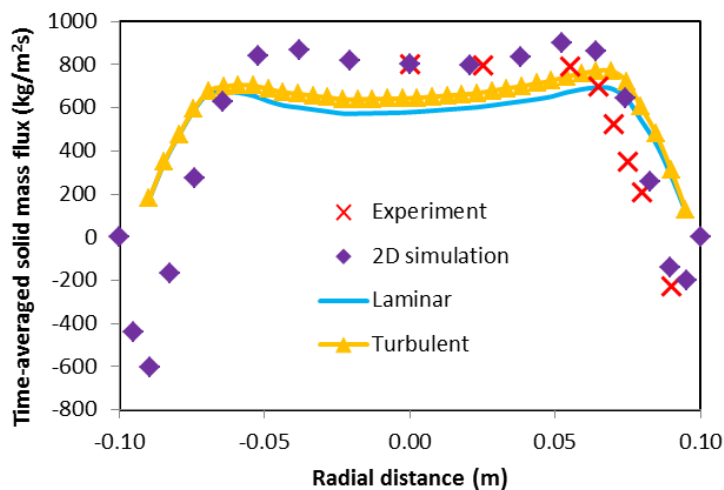
ภาพที่ 4.92 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.93 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y

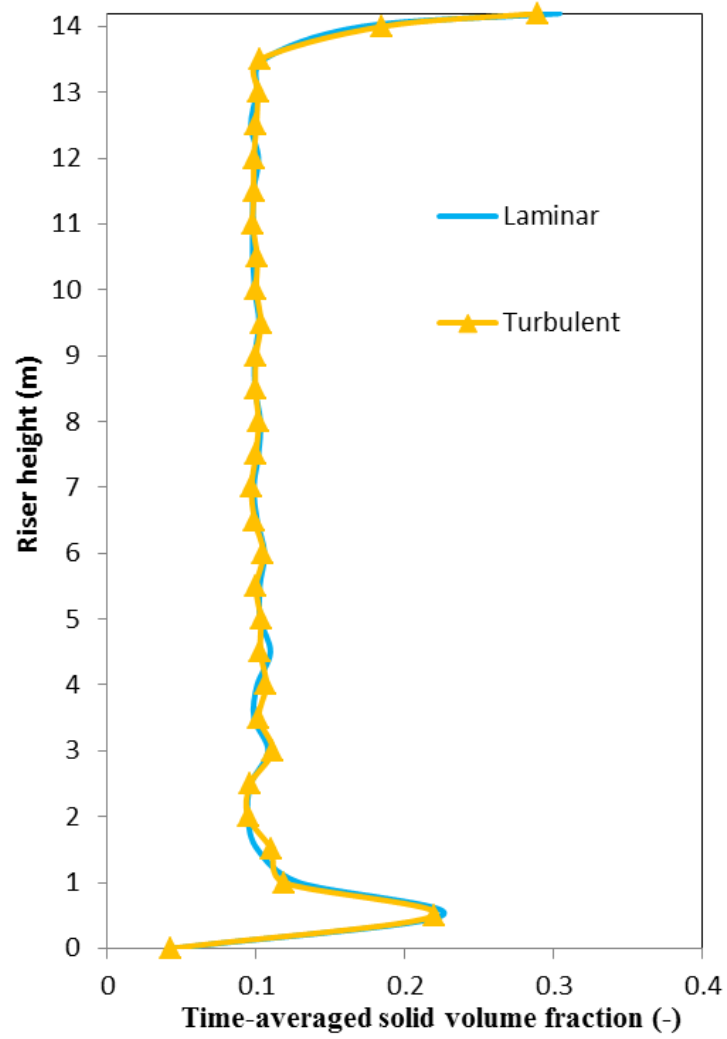


ภาพที่ 4.94 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x

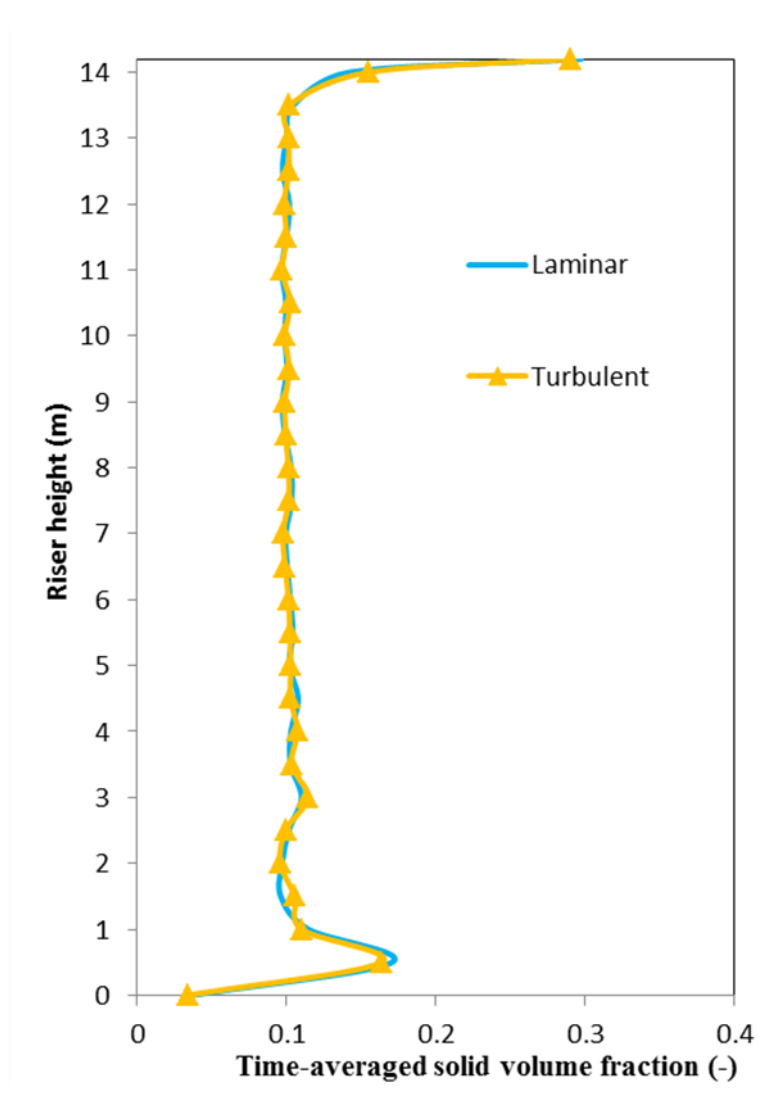


ภาพที่ 4.95 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y

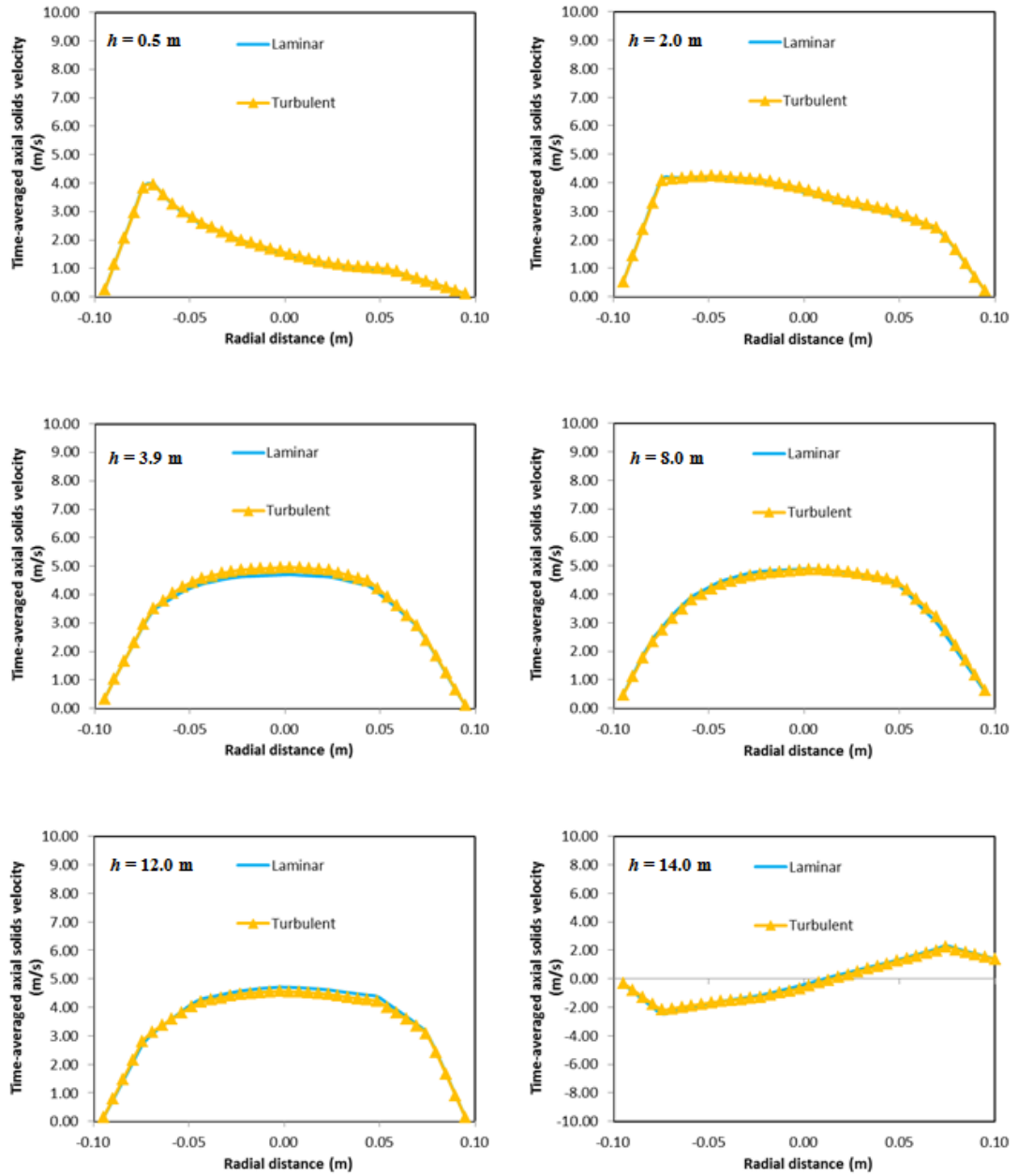




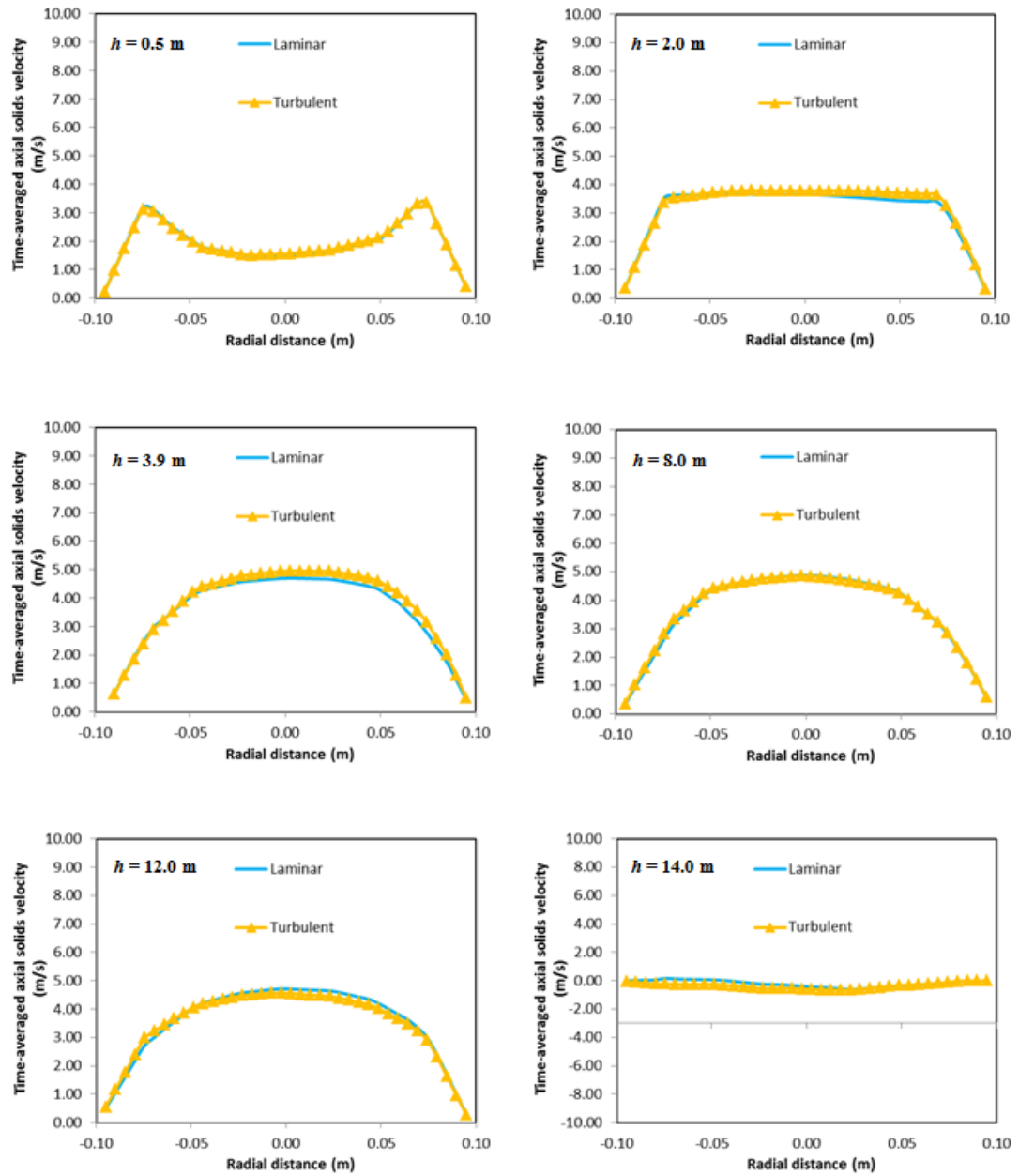
ภาพที่ 4.96 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันในทิศทาง x



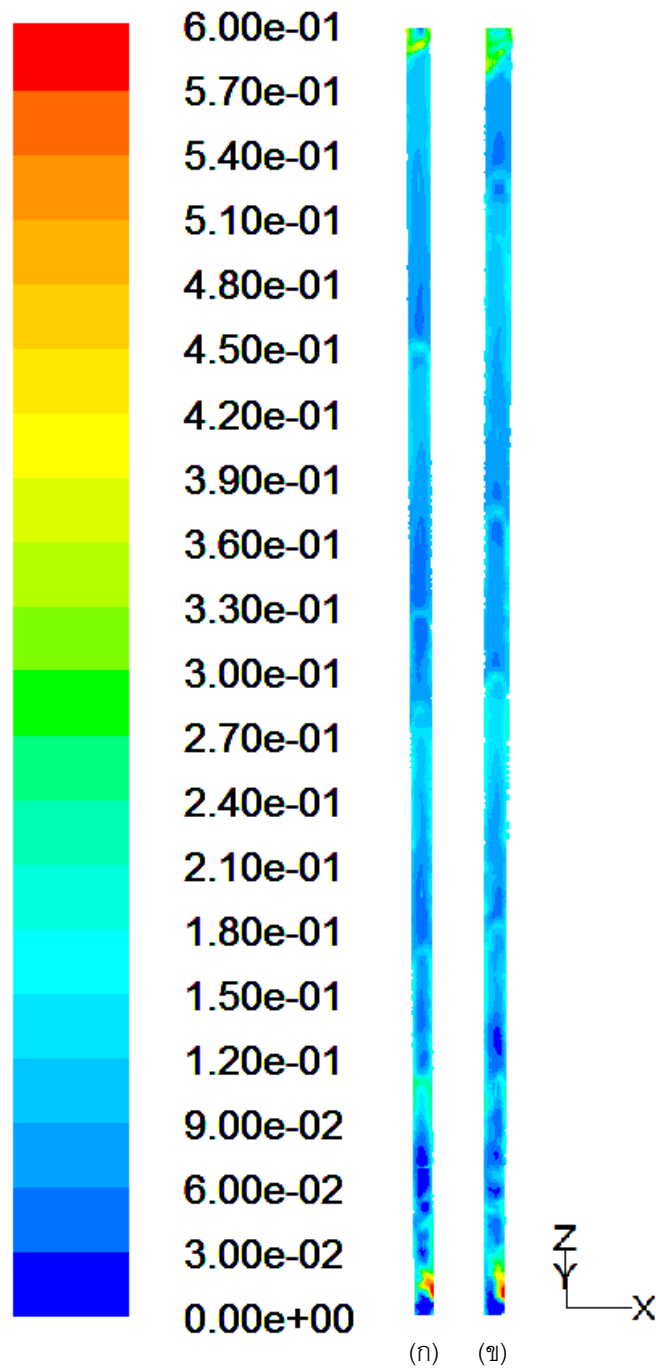
ภาพที่ 4.97 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกันในทิศทาง y



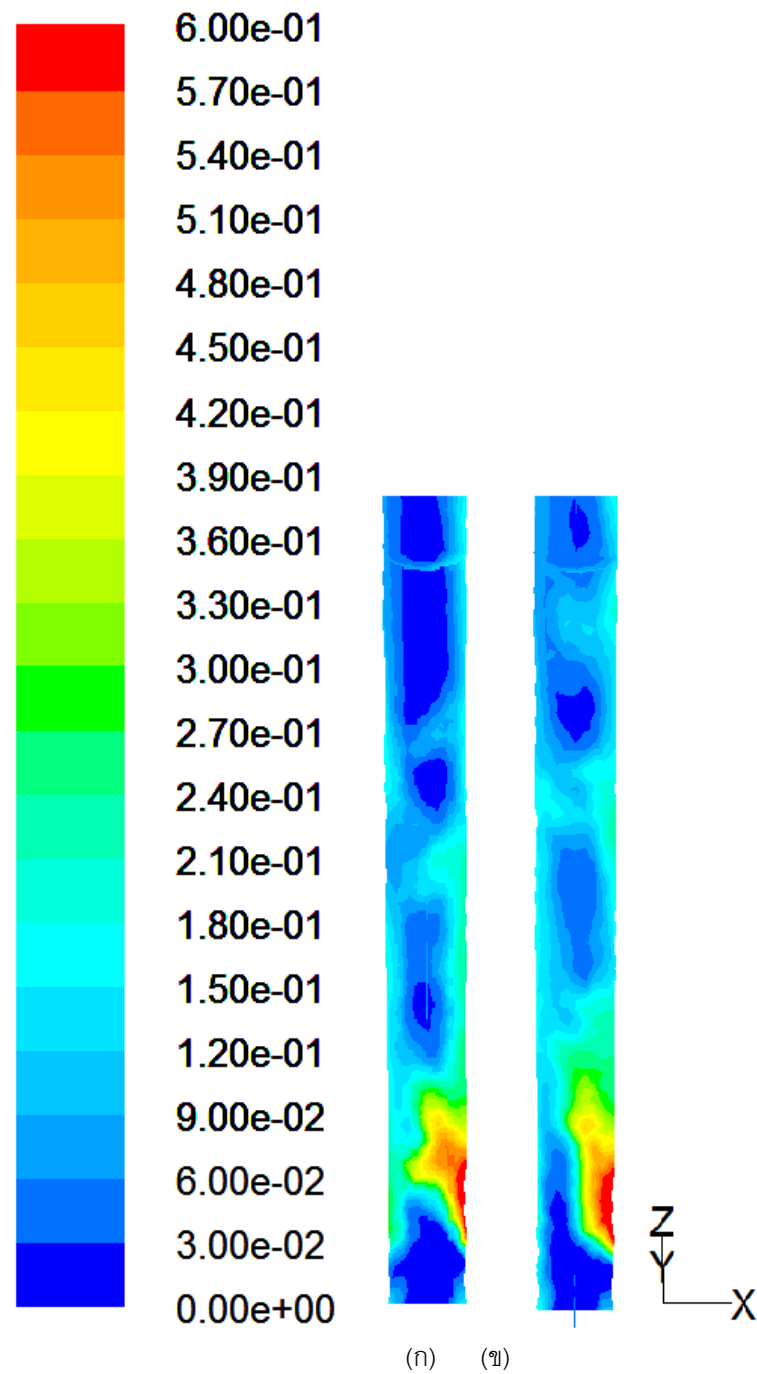
ภาพที่ 4.98 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของแบบจำลองความหนืดแบบต่างๆ ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.99 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของแบบจำลองความหนืดแบบต่างๆ ในทิศทาง  $y$



ภาพที่ 4.100 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาณของแข็งในท่อไรเซอร์ของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกัน โดยที่ (ก) เทอร์บิวเลนซ์ และ (ข) ลามินาร์



ภาพที่ 4.101 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของเชิงในท่อไรเซอรัของแบบจำลองความหนืดที่แตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยที่ (ก) เทอร์บิวเลนซ์ และ (ข) ลามินาร์

ตารางที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของแบบจำลองความหนืดแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Viscous model	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	Laminar	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
2	Turbulent	3.5	1.1639E-05	3.2643E-01	3.2644E-01
		7.0	7.3471E-06	2.4118E-01	2.4118E-01
		10.5	5.2651E-06	4.5789E-01	4.5789E-01
		Averaged	4.4769E-05	3.2131E-01	3.2135E-01

ตารางที่ 4.14 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของแบบจำลองความหนืดแบบต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Viscous model	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	Laminar	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
2	Turbulent	3.5	1.2376E-05	3.0209E-01	3.0210E-01
		7.0	6.2600E-06	2.3772E-01	2.3773E-01
		10.5	4.8794E-06	4.4038E-01	4.4038E-01
		Averaged	5.0129E-05	3.3052E-01	3.3057E-01

ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) อันประกอบด้วย ผลของความเร็วแก๊สขาเข้า ผลของปริมาณฟลักซ์ของแข็ง ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง ผลของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ผลของอุณหภูมิกระบวนการ และผลของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ ว่าส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ในระบบอย่างไร มีรายละเอียดการจำลองดังต่อไปนี้

#### 4.12 ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง

ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของของแข็ง ในการจำลองส่วนนี้ ได้ทำการกำหนดขนาดของอนุภาคของแข็งไว้เท่ากับ 76 ไมโครเมตร เพื่อกำหนดให้อยู่ใน Geldart A ทั้งหมด แล้วทำการปรับค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งให้มีค่าต่างกัน ค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่ได้ทำการจำลอง ประกอบไปด้วย 1,412, 1,712 และ 2,012 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ผลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.102 และ 4.103 ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งมีค่าสูง ส่งผลให้ความดันลดมีค่าสูงตามไปด้วย และเมื่อค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งมีค่าลดลง ความดันลดก็จะมีค่าลดลง เนื่องจากค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่สูงส่งผลให้อนุภาคของแข็งมีมวลมาก อนุภาคของแข็งจึงตกกลับลงมาได้มาก จึงอยู่ในระบบได้มากนั่นเอง ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Mastellone และ Arena (1999) ที่ได้ศึกษาผลของค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่ต่างกัน แล้วพบว่า ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าสูงจะส่งผลให้มีของแข็งในระบบสูงกว่าค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าต่ำ อย่างไรก็ตาม ค่าความหนาแน่นที่ต่างกันจะมีลักษณะทางอุทกพลศาสตร์ที่เหมือนกัน คือ ความดันลดมีค่าสูงบริเวณด้านล่าง ลดลงบริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์ และมีค่าสูงอีกครั้งบริเวณทางออก ผลการจำลองมีความสอดคล้องกันทั้งในทิศทาง x และ y

ภาพที่ 4.104 และ 4.105 แสดงผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x และ y ตามลำดับ จากกราฟสังเกตได้ว่า เมื่อระบบใช้อนุภาคที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูงจะมีปริมาณฟลักซ์ของแข็งสูงกว่าระบบที่ใช้ความหนาแน่นของอนุภาคค่าต่ำ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้สามารถอธิบายได้จากสองเหตุผล เหตุผลแรก ดังที่ได้กล่าวไปคือ เมื่อค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งมีค่าสูง อนุภาคของแข็งมีมวลมาก อนุภาคของแข็งจึงตกกลับลงมาได้มาก ส่งผล



ให้มีปริมาณของแข็งในระบบสูงกว่าค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าต่ำ ดังนั้น ปริมาณฟลักซ์ของแข็งจึงมีค่าสูงตามไปด้วย สาเหตุที่สองเกิดจาก ปริมาณฟลักซ์ของแข็งคิดมาจาก ความเร็วในแนวแกนคูณกับ สัดส่วนปริมาตรของแข็งคูณกับ ความหนาแน่นของของแข็ง ดังนั้น เมื่อความหนาแน่นของของแข็งเพิ่มขึ้น ปริมาณฟลักซ์ของแข็งจึงเพิ่มขึ้น เช่นกัน ทั้งนี้ ผลการจำลองสอดคล้องกันในทั้งทิศทาง  $x$  และ  $y$

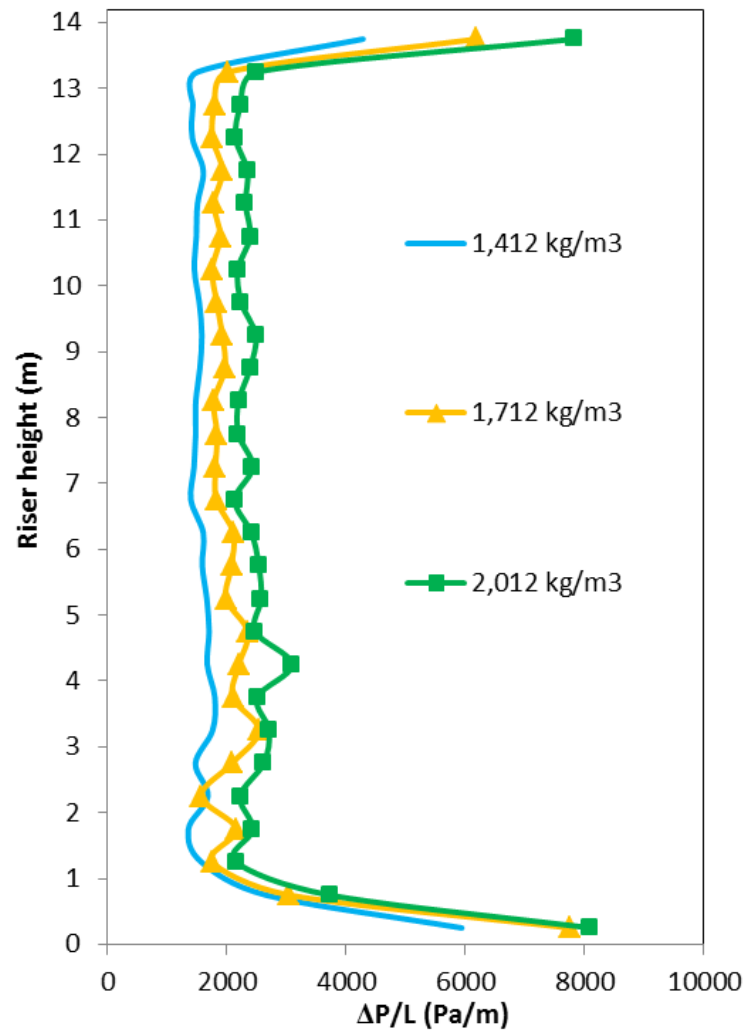
ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.106 และ 4.107 ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่ต่างกันส่งผลให้สัดส่วนปริมาตรของแข็งมีค่าต่างกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ผลที่ได้สอดคล้องกับความดันลุดที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามสังเกตได้ว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย แต่ก็แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มว่า ค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่สูง จะส่งผลให้สัดส่วนของแข็งในระบบมีค่าสูงตามไปด้วย และเมื่อลดค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งลง สัดส่วนปริมาตรก็จะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.108 และ 4.109 ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า เมื่อค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งมีค่าสูงจะมีความเร็วของแข็งตามแนวแกนน้อยกว่าระบบที่มีค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งต่ำที่ระดับความสูงเดียวกัน เนื่องจาก ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าสูงจะมีปริมาณของแข็งในระบบสูงเช่นเดียวกัน ดังนั้นความเร็วของแข็งตามแนวแกนจึงมีค่าน้อยกว่า (เนื่องจากปริมาณของแข็งที่มากกว่านั่นเอง) โดยผลที่เกิดขึ้นถึงแม้จะไม่เห็นได้อย่างชัดเจน แต่สามารถอธิบายถึงแนวโน้มได้ นอกจากนี้ยังพบความไม่สมมาตรของความเร็วของแข็งตามแนวแกนในทิศทาง  $x$  ซึ่งแตกต่างจากในทิศทาง  $y$  เนื่องจากผลของการป้อนเข้าและทางออกอีกด้วย

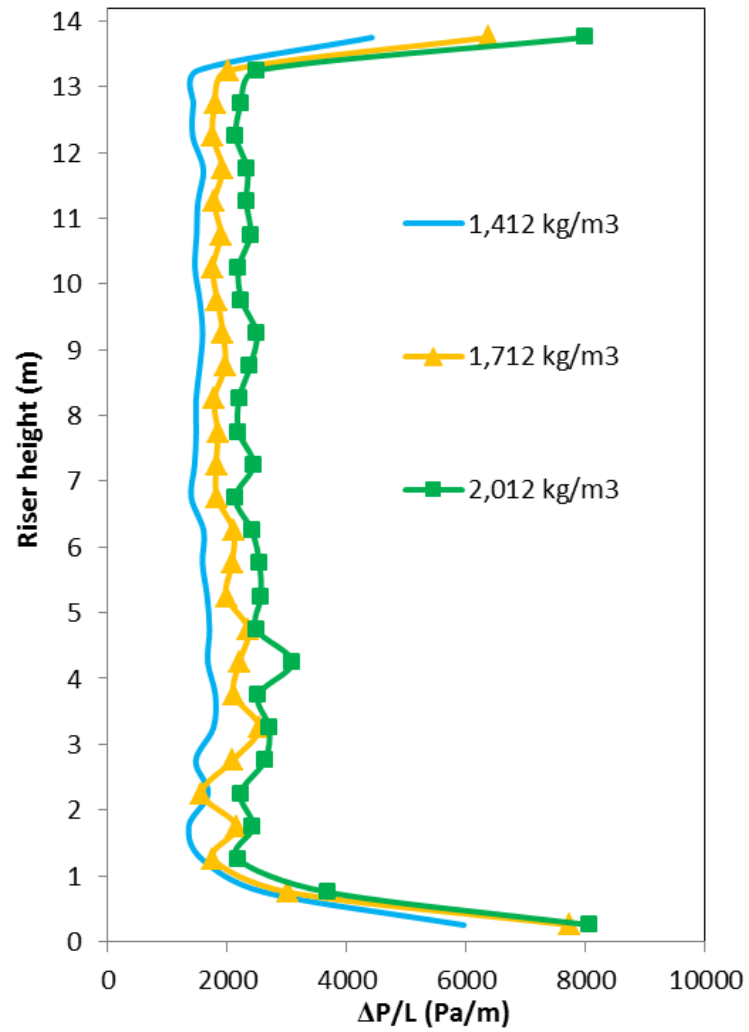
ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.110 เมื่อพิจารณาภาพคอนทัวร์จะเห็นว่า ที่ค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งมีค่าสูง จะสังเกตเห็นสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงกว่าที่ค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งมีค่าต่ำเล็กน้อย (สีของคอนทัวร์ดูเข้มกว่า) สอดคล้องกับผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งภายในท่อไรเซอร์ดังที่ได้กล่าวไป และเมื่อพิจารณาที่ความสูงระดับ 3.9 เมตร ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.111 พบว่า เป็นไปในทิศทางเดียวกัน แต่จะสังเกตเห็นว่าค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าต่ำ (ภาพ 4.111 (ก)) จะมีปริมาณของแข็งบริเวณด้านล่างสูง

กว่าค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าสูง (สีคอนทัวร์ที่เข้มกว่า) โดยสิ่งนี้จะได้รับการยืนยันอีกครั้งจากผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์

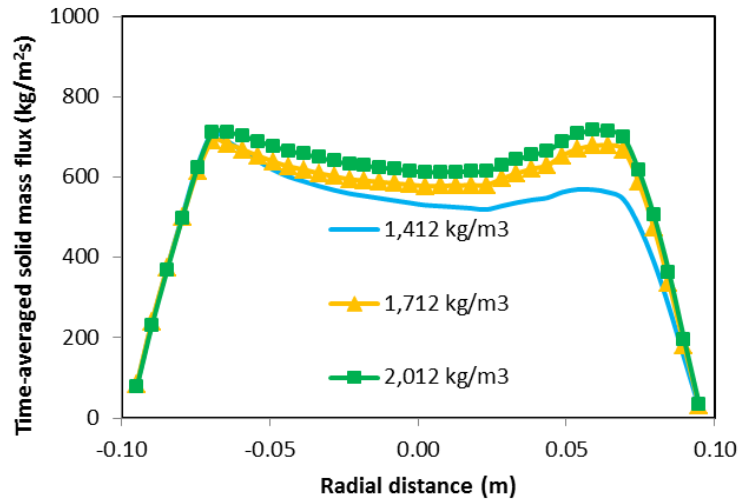
ตารางที่ 4.15 และ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากตาราง พบว่า ค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์ ดังนั้น ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนที่จึงใช้เป็นตัวแทนของระบบ เมื่อพิจารณาผลของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่แตกต่างกัน พบว่าค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่สูงจะมีอุณหภูมิแกรนูลาร์มากกว่าผลของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าต่ำ เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงเดียวกัน เนื่องจากค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่สูง จะมีปริมาณของแข็งที่มากกว่า ดังนั้น การสั่นของกลุ่มอนุภาคจึงมีมากกว่านั่นเอง ส่งผลให้มีค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่สูงกว่าตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม ดูเหมือนว่าที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5 เมตร ค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่ต่ำจะมีอุณหภูมิแกรนูลาร์สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลของคอนทัวร์ และในส่วนของผลในทิศทาง  $y$  ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.16 พบว่า มีความสอดคล้องในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกัน



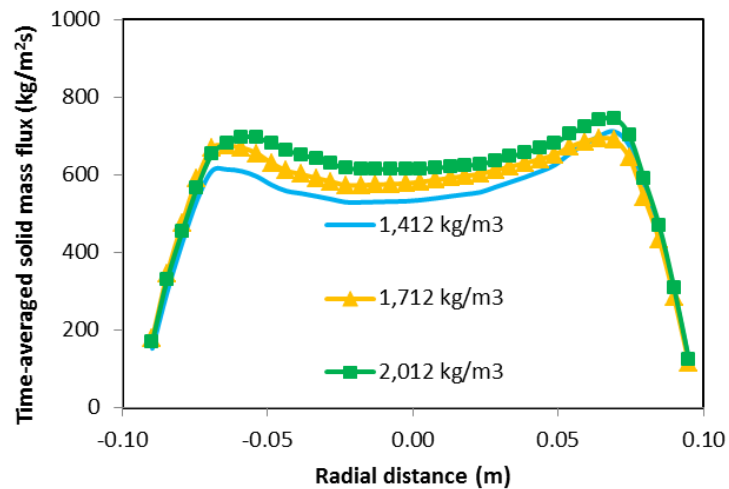
ภาพที่ 4.102 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



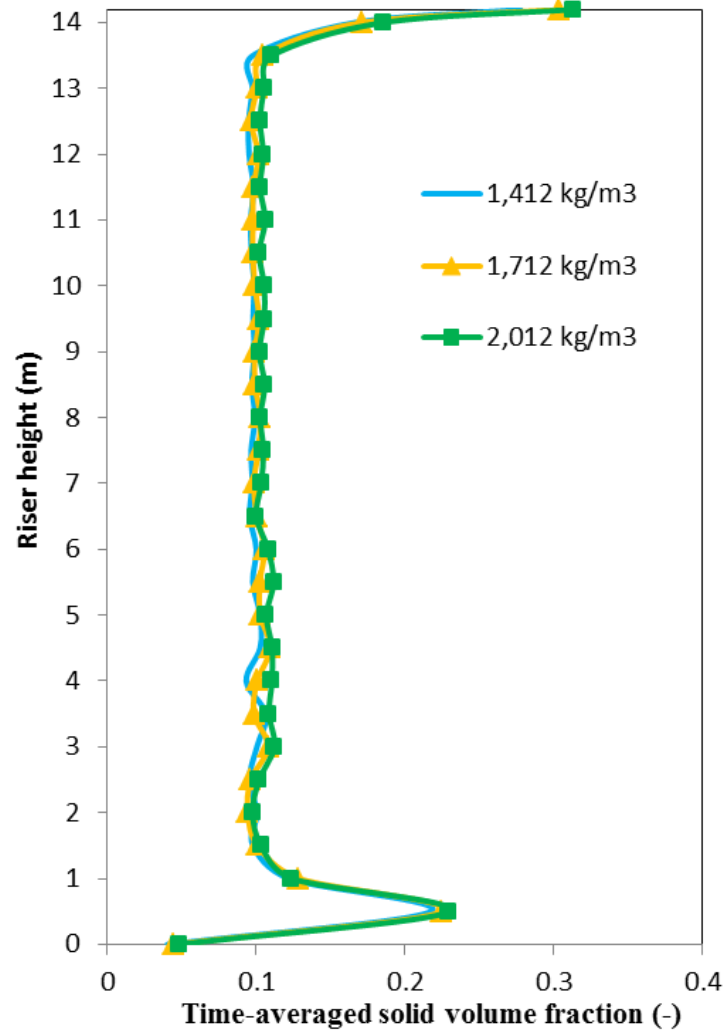
ภาพที่ 4.103 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



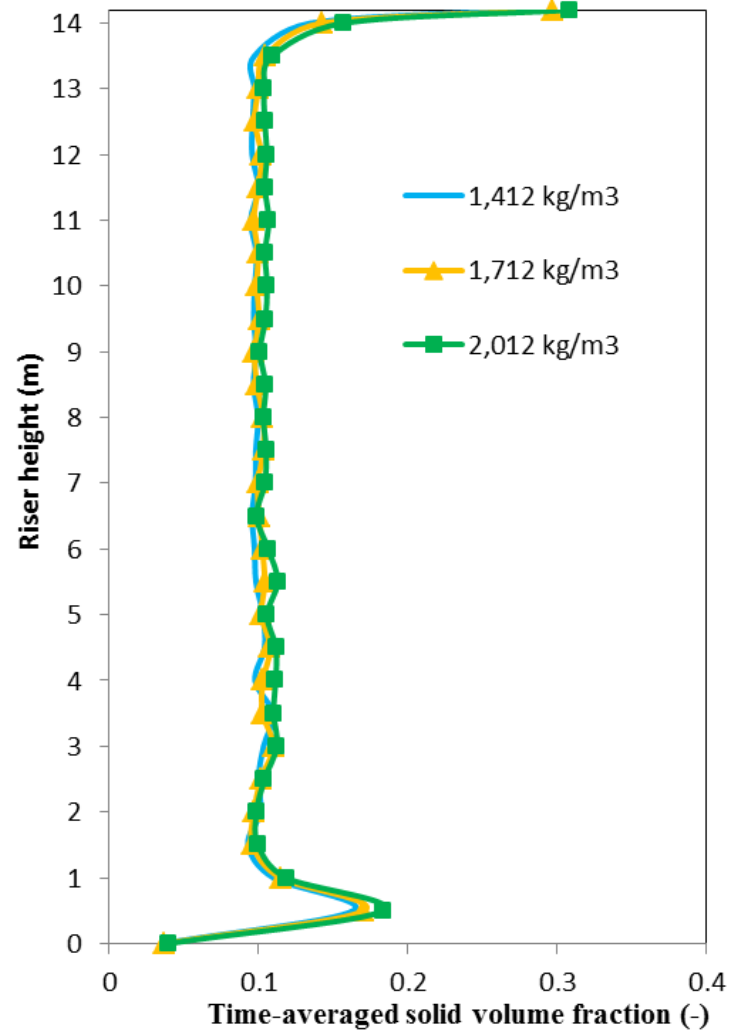
ภาพที่ 4.104 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



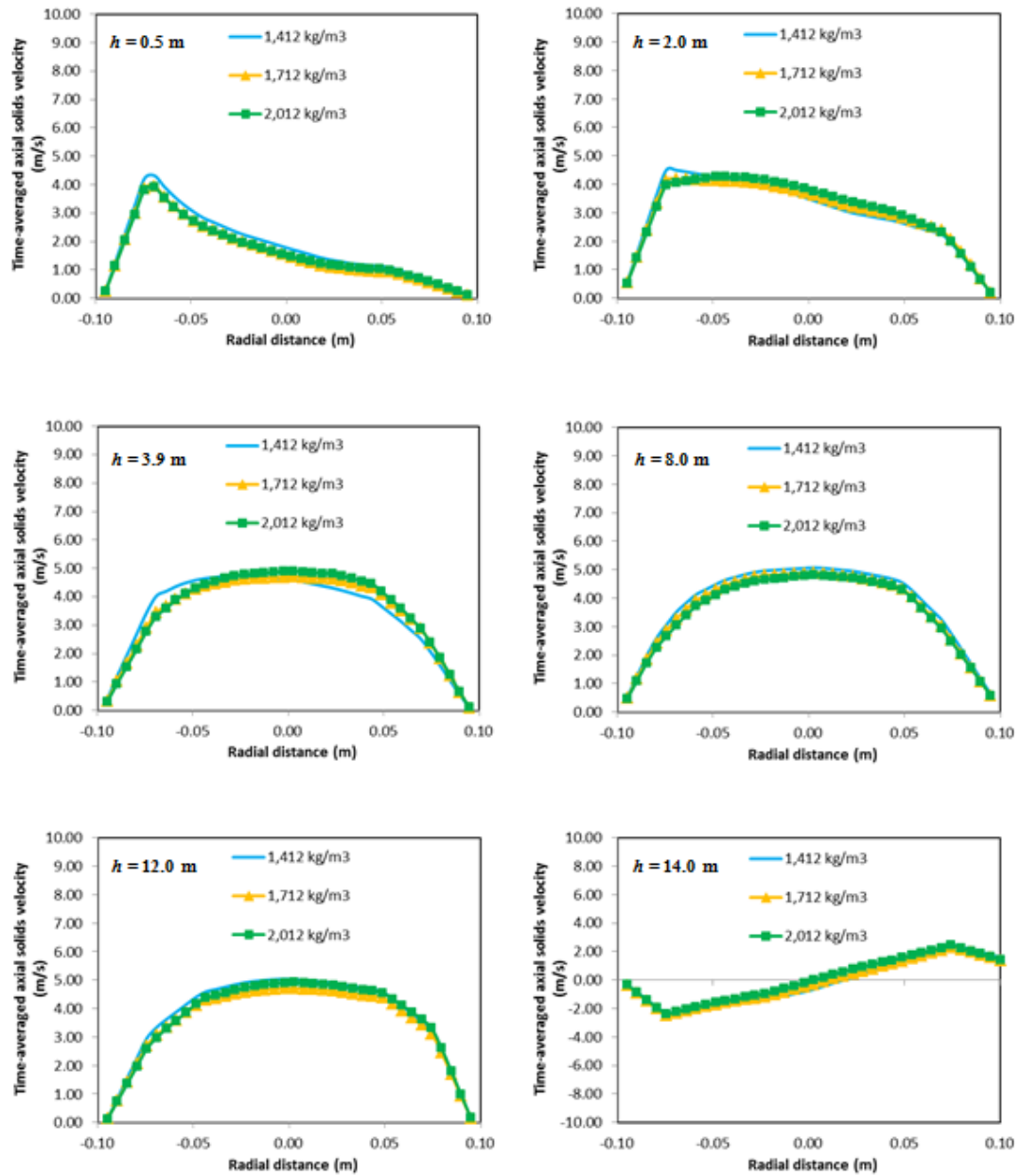
ภาพที่ 4.105 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



ภาพที่ 4.106 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x

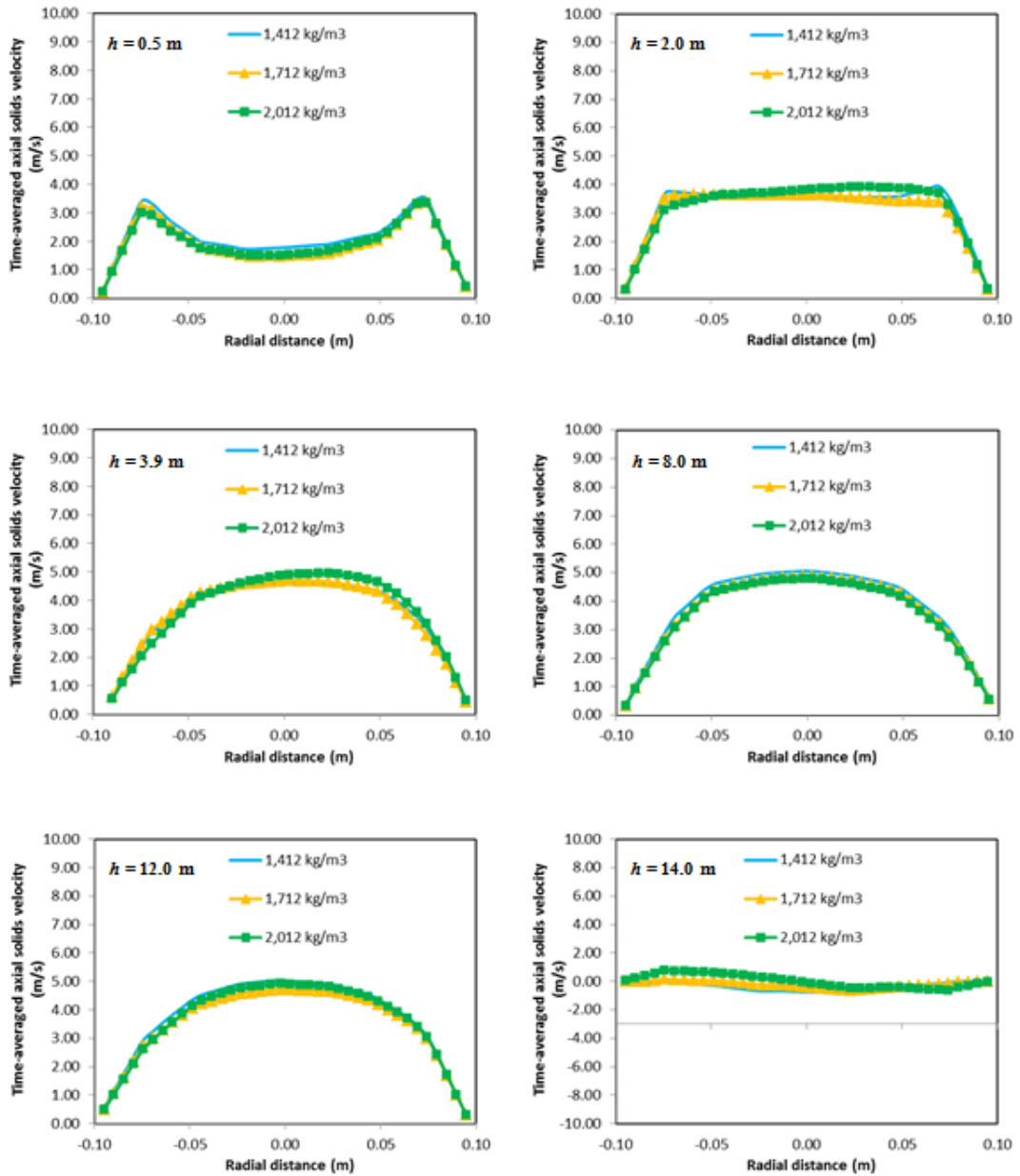


ภาพที่ 4.107 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y

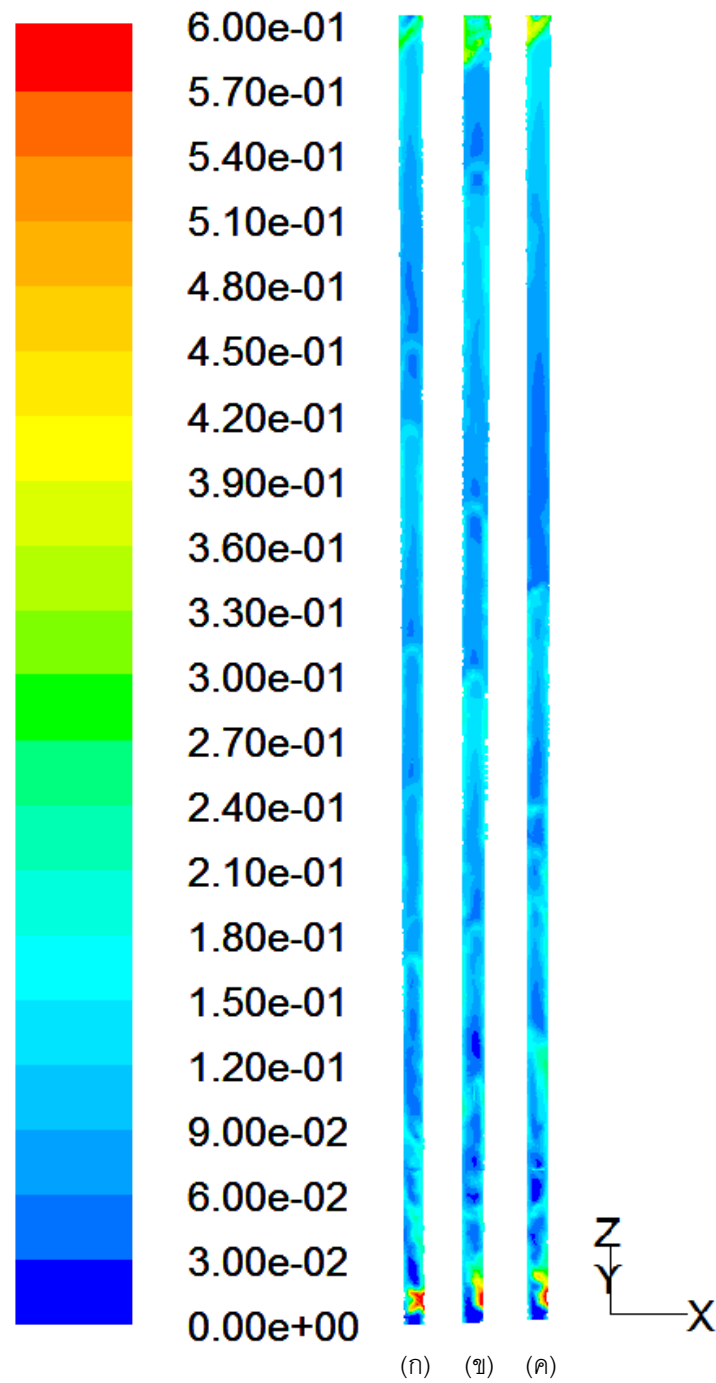


ภาพที่ 4.108 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $x$

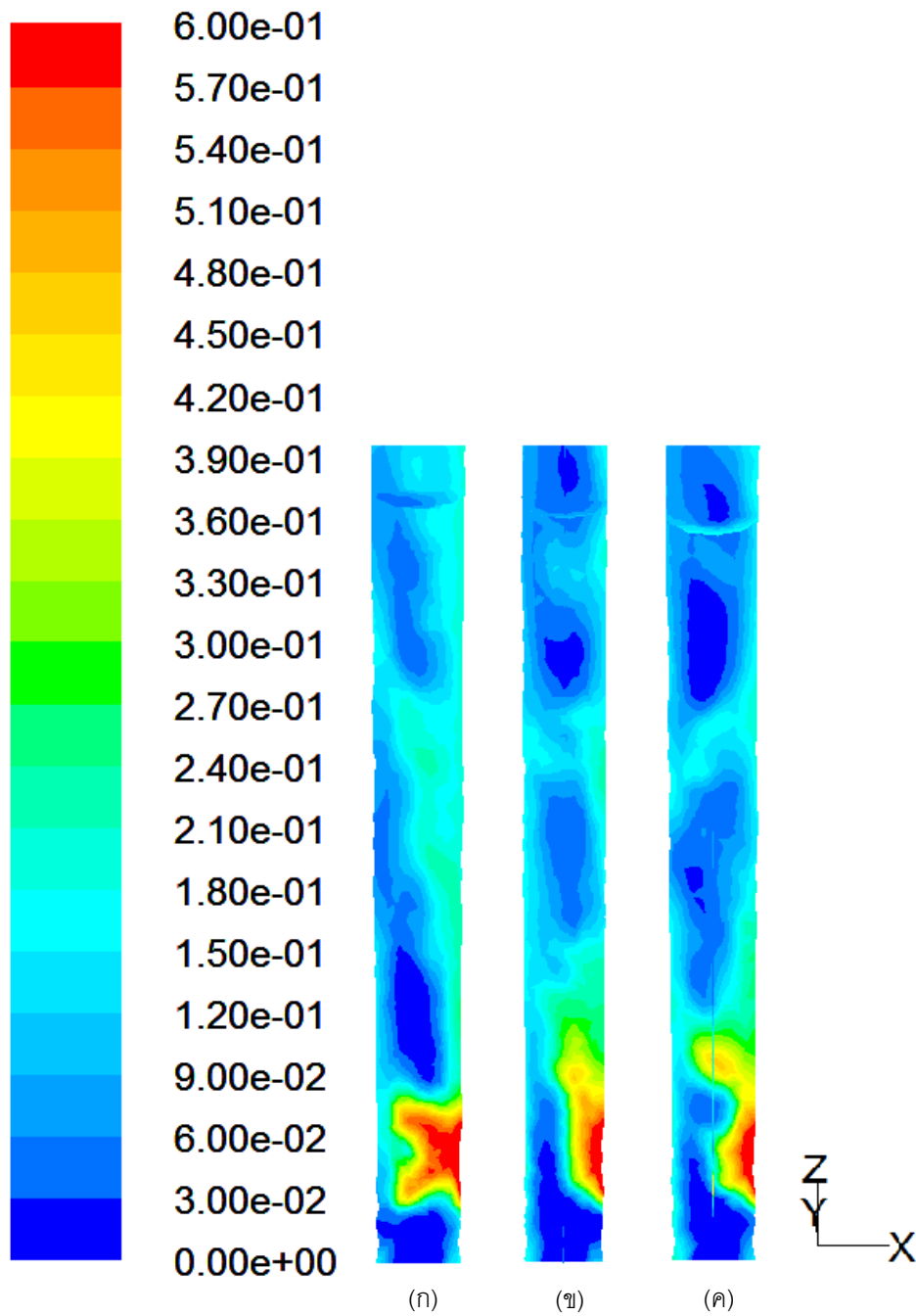




ภาพที่ 4.109 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $y$



ภาพที่ 4.110 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 1,412 (ข) 1,712 และ (ค) 2,012 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



ภาพที่ 4.111 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของเชิงในท่อไรเซอร์ของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 1,412 (ข) 1,712 และ (ค) 2,012 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Diameter density (kg/m <sup>3</sup> )	Height (m)	Granular temperature (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	1,412	3.5	9.5142E-06	3.1210E-01	3.1211E-01
		7.0	8.0636E-06	1.4534E-01	1.4535E-01
		10.5	4.9913E-06	2.6616E-01	2.6617E-01
		Averaged	3.4895E-05	2.2444E-01	2.2447E-01
2	1,712	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
3	2,012	3.5	1.0026E-05	2.9057E-01	2.9058E-01
		7.0	8.1306E-06	3.5598E-01	3.5598E-01
		10.5	6.7893E-06	5.2249E-01	5.2250E-01
		Averaged	5.5900E-05	3.7749E-01	3.7754E-01

ตารางที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Diameter density (kg/m <sup>3</sup> )	Height (m)	Granular temperature (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	1,412	3.5	9.5859E-06	3.1641E-01	3.1641E-01
		7.0	6.6574E-06	1.3577E-01	1.3578E-01
		10.5	4.4252E-06	2.4878E-01	2.4879E-01
		Averaged	5.9251E-05	2.3485E-01	2.3490E-01
2	1,712	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
3	2,012	3.5	1.0197E-05	3.0095E-01	3.0096E-01
		7.0	6.8132E-06	3.5350E-01	3.5351E-01
		10.5	6.6832E-06	4.9438E-01	4.9439E-01
		Averaged	5.8283E-05	3.9139E-01	3.9145E-01

#### 4.13 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง

ในส่วนนี้ได้ทำการศึกษขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง โดยกำหนดขนาดความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งไว้เท่ากับ 1,712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อกำหนดให้อยู่ใน Geldart A ทั้งหมด แล้วทำการปรับค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งให้มีค่าต่างกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่ได้ทำการจำลอง ประกอบไปด้วยค่าดังนี้ 46, 76 และ 106 ไมโครเมตร

ผลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเตอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.112 และ 4.113 ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าต่างกันไม่ส่งผลให้ความดันลดภายในท่อโรเตอร์มีค่าแตกต่างกัน ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  เนื่องจาก อาจเป็นเพราะอนุภาคยังอยู่ในกลุ่ม Geldart เดียวกันและค่าที่ใช้ศึกษามีความไม่แตกต่างกันมากนัก จึงไม่ส่งผลเท่าใดนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mastellone และ Arena (1999) อย่างไรก็ตาม Xu และ Zhu (2011) ค้นพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกันส่งผลให้อุณหภูมิผลศาสตร์ต่างกัน ถ้าช่วงที่เลือกศึกษาอยู่ใน Geldart ต่างกันหรือเลือกช่วงการศึกษาที่กว้างมากขึ้น

ภาพที่ 4.114 และ 4.115 แสดงผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากกราฟ พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่ต่างกันไม่ส่งผลให้ปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งมีค่าต่างกัน อย่างไรก็ตามดูเหมือนว่าที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าน้อยสุด (46 ไมโครเมตร) จะให้ผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งน้อยสุด ผลการจำลองที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งในสองทิศทาง

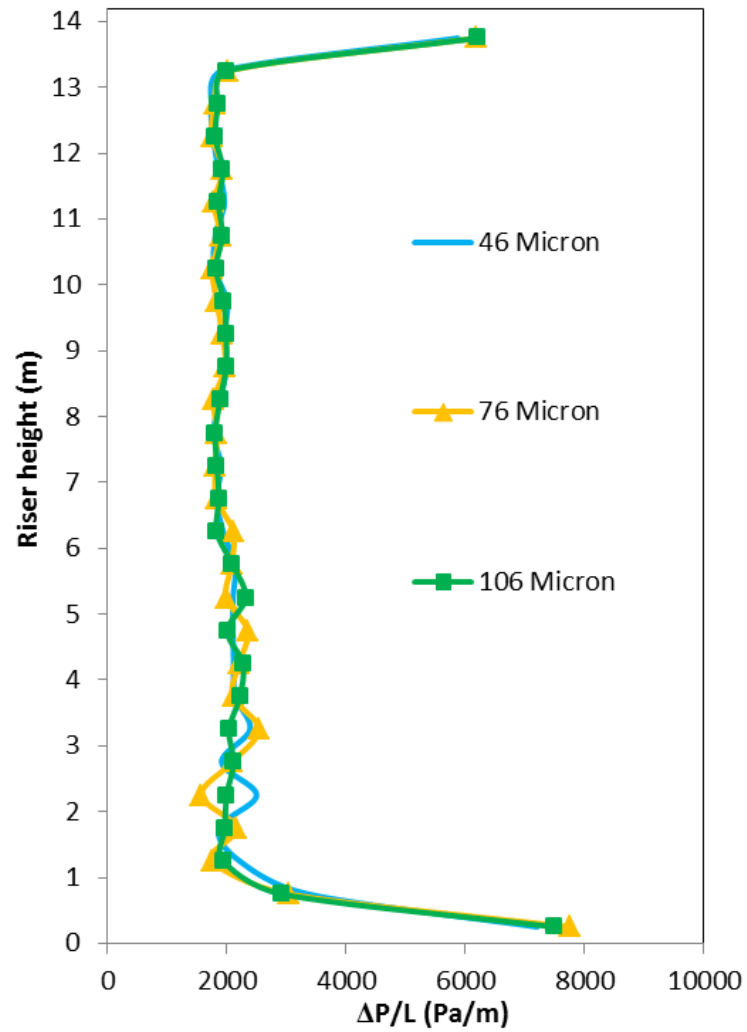
ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อโรเตอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.116 และ 4.117 ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่ต่างกันไม่ส่งผลให้สัดส่วนปริมาตรของแข็งมีค่าแตกต่างกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ซึ่งสอดคล้องกับผลความดันลดที่เกิดขึ้น

ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.118 และ 4.119 ตามลำดับ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ไม่มีความแตกต่างของความเร็วของแข็งตามแนวแกนเมื่อเปลี่ยนค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง ในทุก

ระดับความสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้กล่าวไป และยังพบความไม่สมมาตรของความเร็วของแข็งตามแนวแกนในทิศทาง  $x$  ซึ่งแตกต่างจากในทิศทาง  $y$  เนื่องจากผลของการป้อนเข้าและทางออกเช่นเดียวกัน

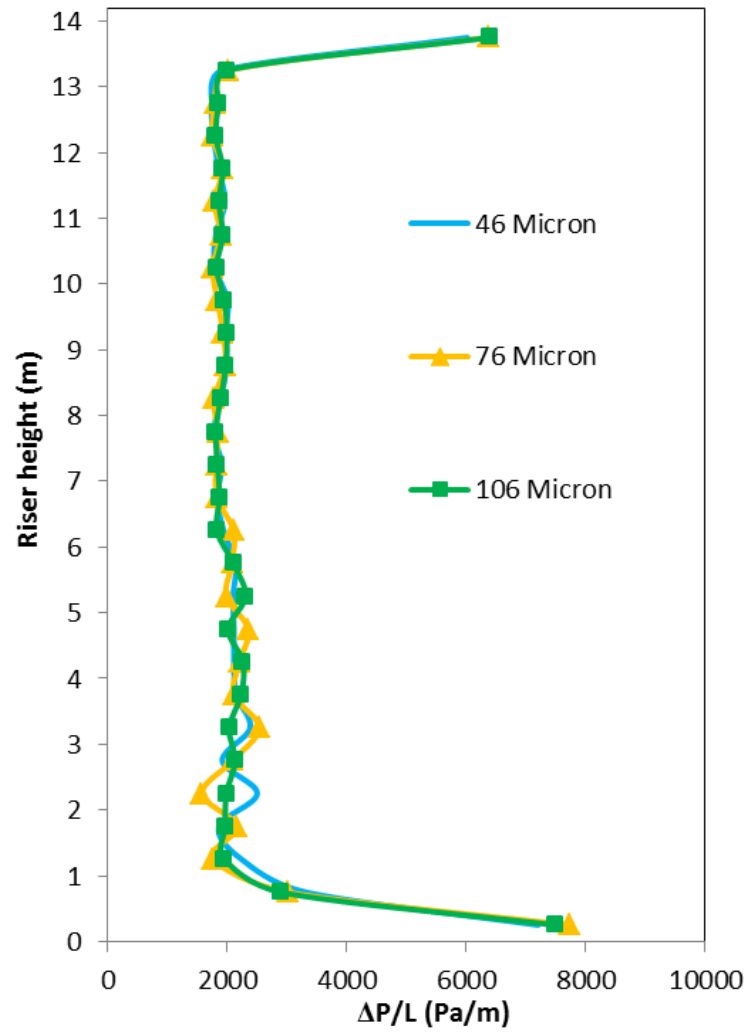
ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.120 ภาพคอนทัวร์แสดงให้เห็นชัดเจนว่าเมื่อเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง ไม่ทำให้ผลการจำลองแตกต่างกัน และเมื่อพิจารณาที่ความสูงระดับ 3.9 เมตร ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.121 พบว่า ไม่มีความแตกต่างของผลการจำลองที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 4.17 และ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากตาราง พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่ต่างกัน ไม่ส่งผลให้อุณหภูมิแกรนูลาร์ต่างกัน หรือต่างกันเล็กน้อย ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  เช่นเดียวกับผลด้านต้น ในแง่ผลของความสูงที่มีต่ออุณหภูมิแกรนูลาร์นั้นพบว่า อุณหภูมิแกรนูลาร์รวมมีค่าลดลงบริเวณตรงกลางท่อไรเซอร์และจะมีค่าสูงขึ้นอีกครั้งบริเวณด้านบนบนของท่อไรเซอร์เนื่องจากปริมาณของแข็งที่ลดลงและเพิ่มขึ้นบริเวณตรงกลางและใกล้ทางออกตามลำดับนั่นเอง

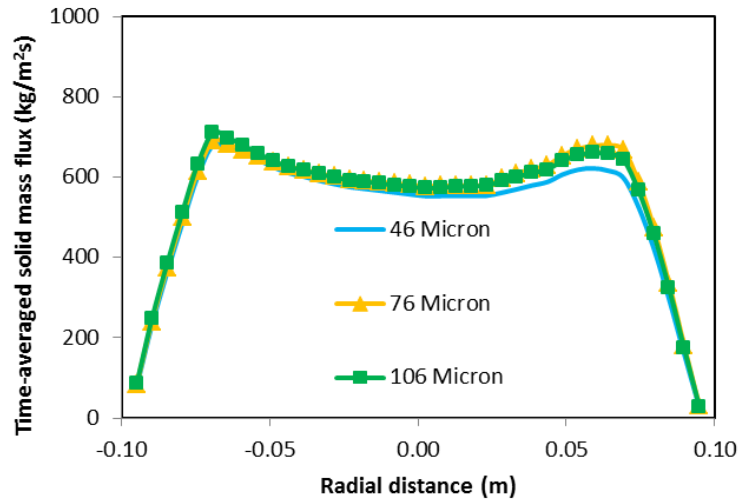


ภาพที่ 4.112 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซอรัของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x

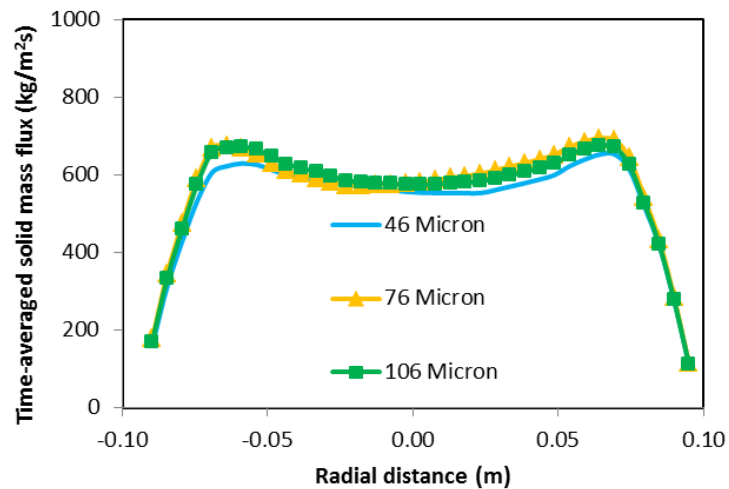




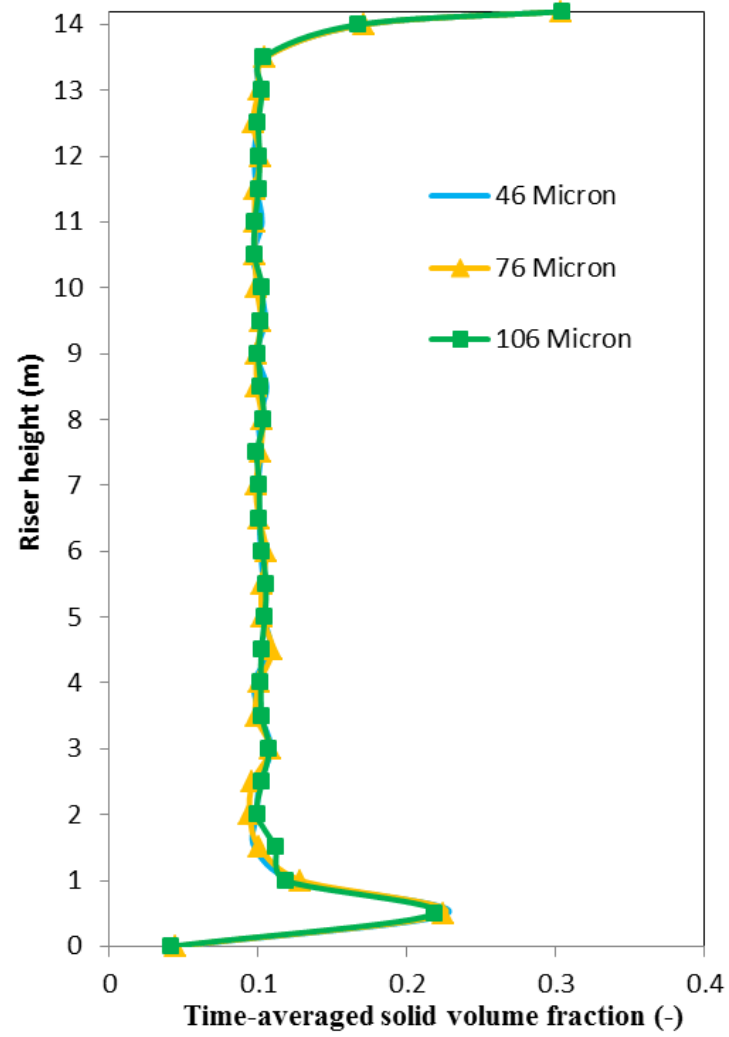
ภาพที่ 4.113 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซอริชของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



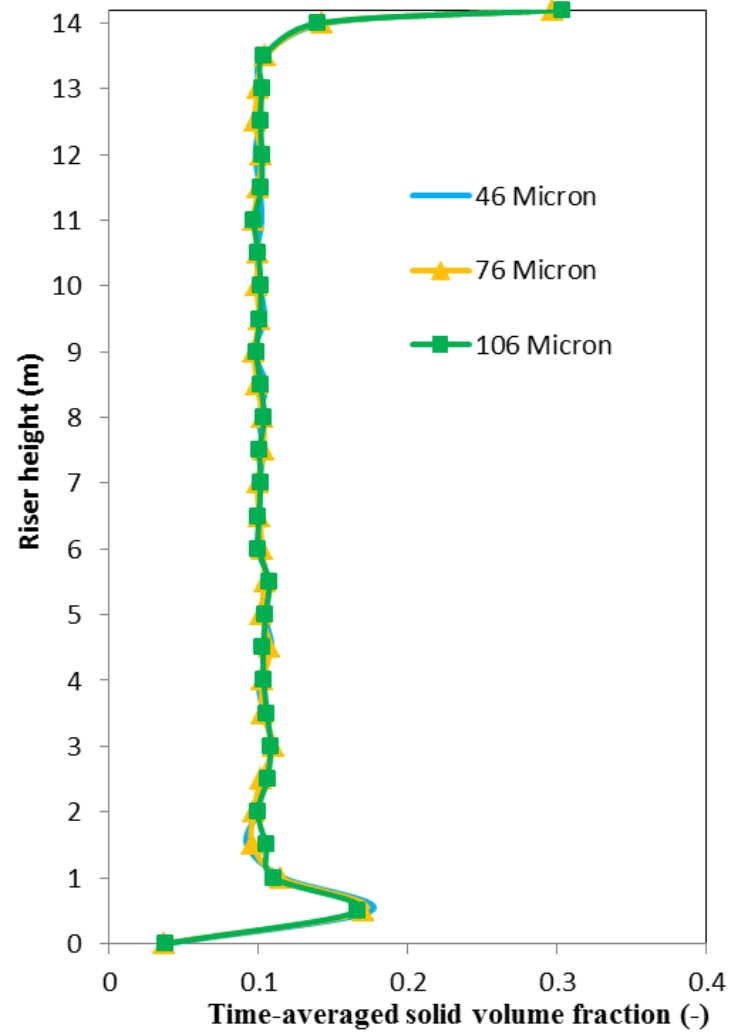
ภาพที่ 4.114 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



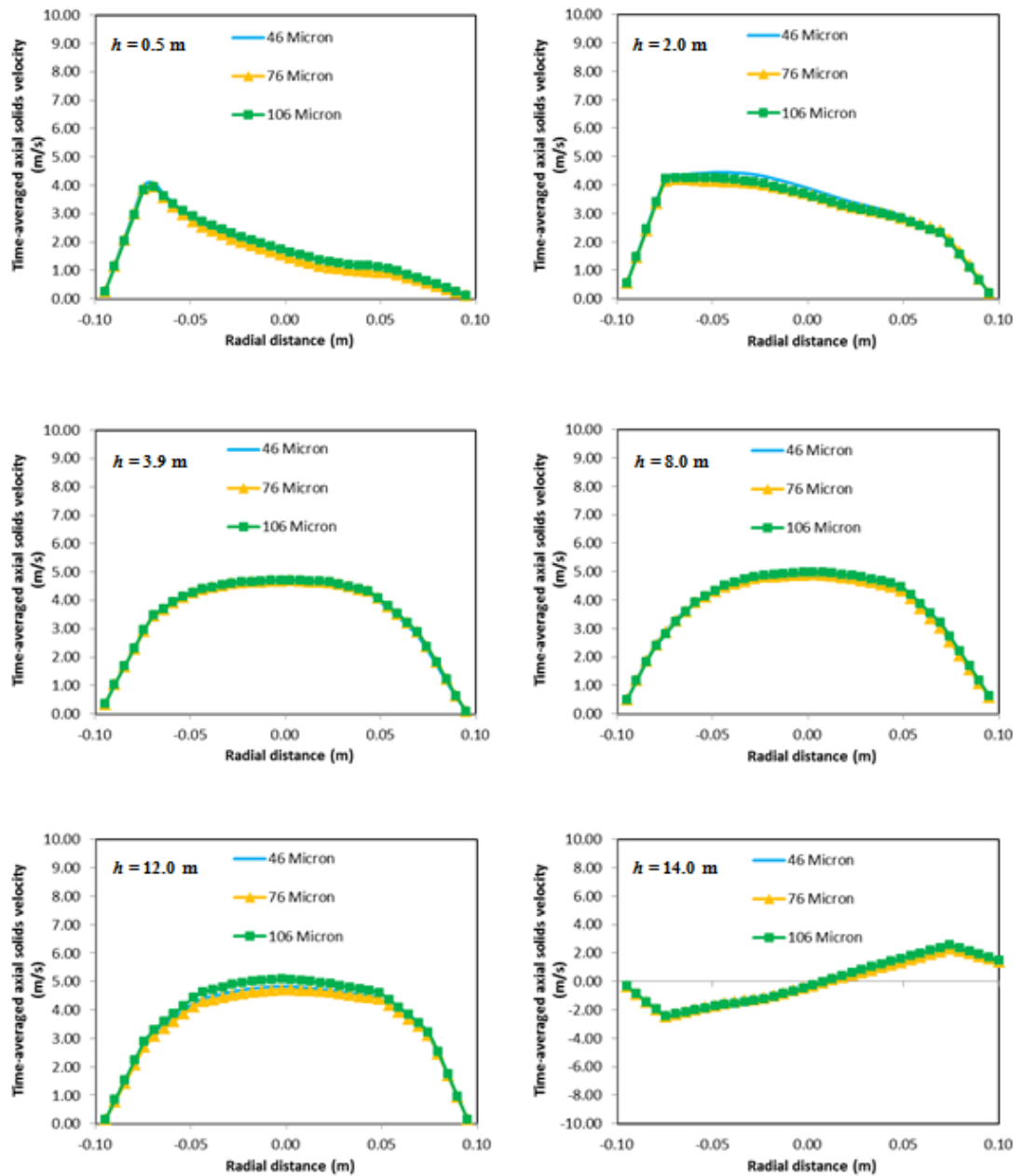
ภาพที่ 4.115 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



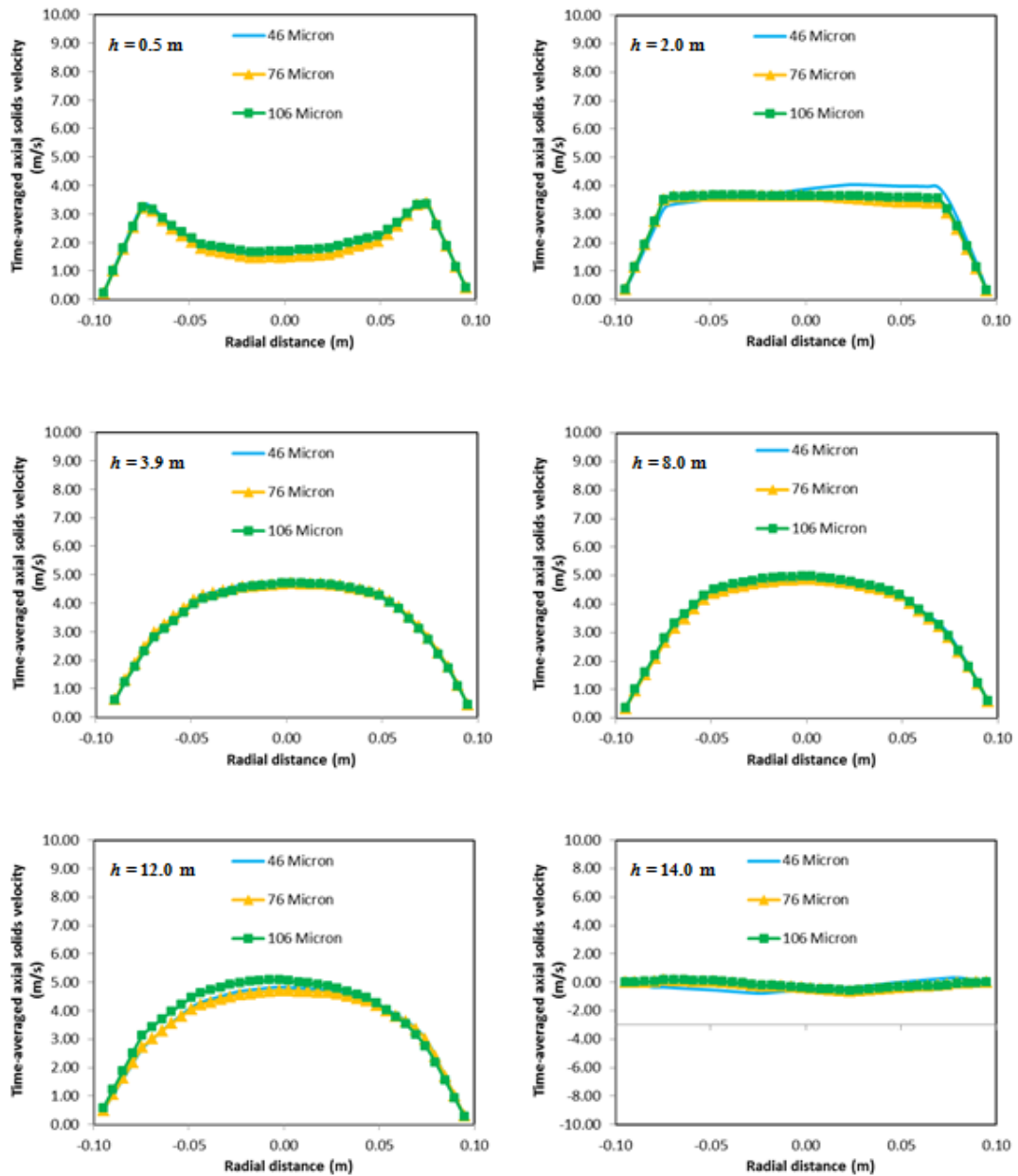
ภาพที่ 4.116 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อโรเซอรัของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



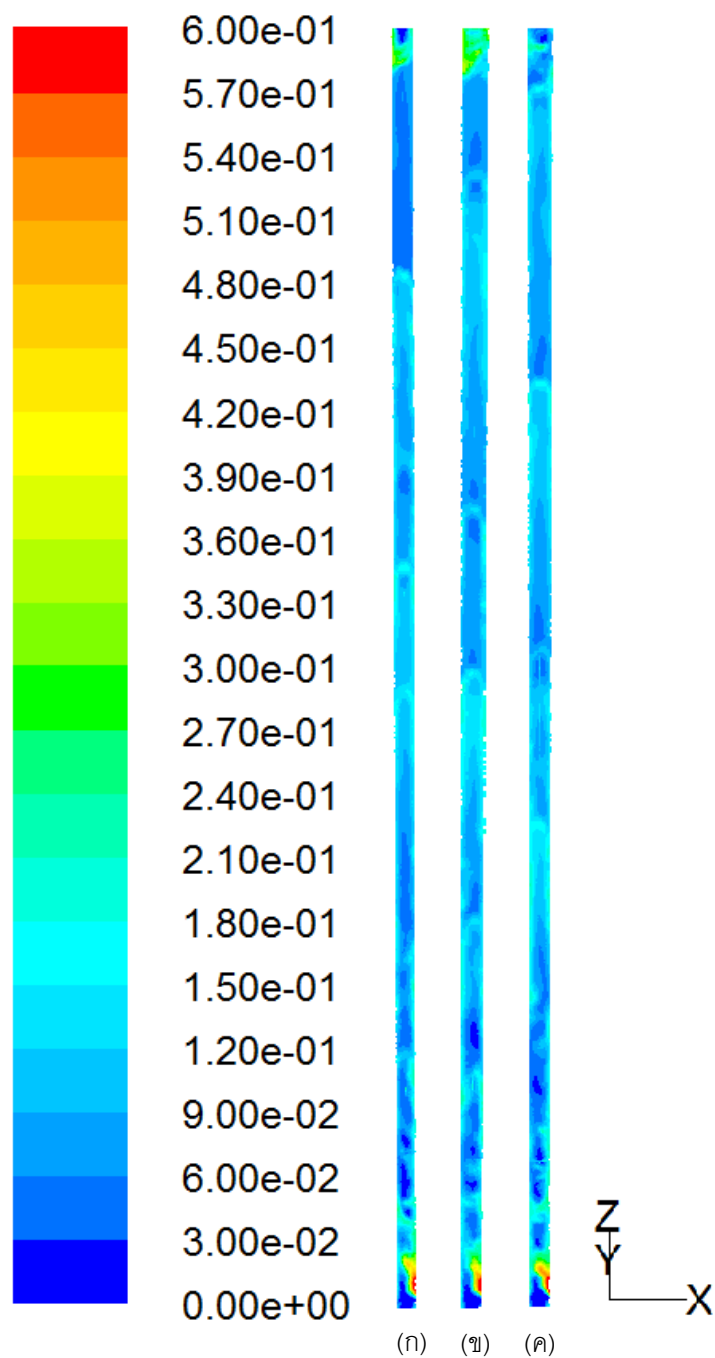
ภาพที่ 4.117 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



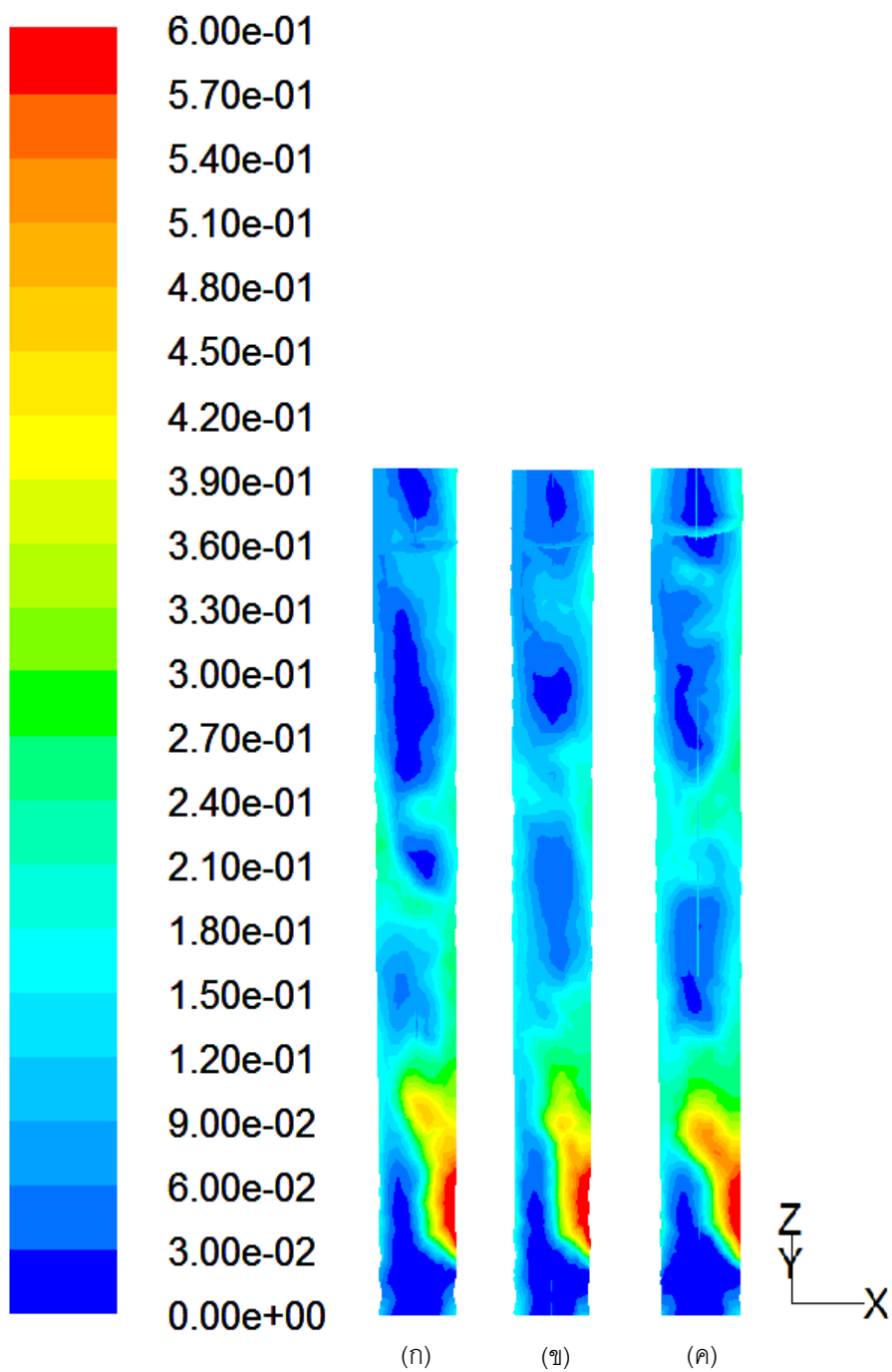
ภาพที่ 4.118 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $x$



ภาพที่ 4.119 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $y$



ภาพที่ 4.120 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อโรเซอรัของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 46 (ข) 76 และ (ค) 106 ไมโครเมตร



ภาพที่ 4.121 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 46 (ข) 76 และ (ค) 106 ไมโครเมตร



ตารางที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	Height (m)	Granular temperature ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	46	3.5	3.5911E-06	3.2663E-01	3.2663E-01
		7.0	2.8262E-06	2.5860E-01	2.5860E-01
		10.5	2.0308E-06	3.8559E-01	3.8560E-01
		Averaged	1.5759E-05	3.0758E-01	3.0759E-01
2	76	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
3	106	3.5	1.5696E-05	3.7158E-01	3.7159E-01
		7.0	1.7356E-05	2.5271E-01	2.5273E-01
		10.5	1.0829E-05	3.3339E-01	3.3340E-01
		Averaged	5.5020E-05	2.9260E-01	2.9266E-01

ตารางที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	Height (m)	Granular temperature ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	46	3.5	3.9639E-06	3.5836E-01	3.5837E-01
		7.0	2.4452E-06	2.4908E-01	2.4909E-01
		10.5	1.9815E-06	3.6652E-01	3.6652E-01
		Averaged	2.3070E-05	3.2349E-01	3.2351E-01
2	76	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
3	106	3.5	1.7246E-05	3.6429E-01	3.6430E-01
		7.0	1.3945E-05	2.5164E-01	2.5165E-01
		10.5	9.8055E-06	3.1783E-01	3.1784E-01
		Averaged	8.2350E-05	3.0737E-01	3.0745E-01

#### 4.14 ความเร็วแก๊สขาเข้า

ความเร็วแก๊สขาเข้า คือ ความเร็วของวัฏภาคแก๊สที่ป้อนเข้าด้านล่างของท่อโรเซออร์ ส่งผลให้อนุภาคของแข็งสามารถเคลื่อนตัวสู่ด้านบนได้ ในงานวิจัยส่วนนี้ได้ทำการจำลองผลของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกัน 3 แบบว่าจะส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในระบบอย่างไร โดยความเร็วที่ทำการจำลองมีดังนี้ 5.2, 7.2 และ 11.0 เมตรต่อวินาที โดยความเร็วที่เลือกมายังคงอยู่ในช่วงการไหลแบบความเร็วสูง ซึ่งเป็นช่วงการไหลที่เลือกมาศึกษาในงานวิจัยนี้ (รายละเอียดการคำนวณความเร็วในการคำนวณช่วงการไหลสามารถดูได้ในภาคผนวก ก)

ผลความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซออร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่แตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.122 และ 4.123 ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความเร็วแก๊สขาเข้าที่ต่างกัน ย่อมส่งผลให้อุทกพลศาสตร์ภายในต่างกัน กล่าวคือ เมื่อใช้ความเร็วแก๊สขาเข้ามีค่าสูง ส่งผลให้ระบบมีแนวโน้มที่จะประพฤติตัวเป็นระบบที่เฉื่อยมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของแข็งถูกพาออกไปจากระบบได้เร็วขึ้นเอง จึงทำให้ความดันลดภายในท่อโรเซออร์ของระบบที่ความเร็วแก๊สขาเข้าสูงมีความดันลดน้อยกว่า (เนื่องจากปริมาณของแข็งมีน้อยกว่า) และเมื่อลดความเร็วแก๊สขาเข้าลง ความดันลดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ผลการจำลองที่ได้มีความสอดคล้องกันทั้งในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$

ภาพที่ 4.124 และ 4.125 แสดงผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลอง พบว่า ที่ค่าของความเร็วแก๊สขาเข้ามีค่าต่ำ จะมีปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งมากกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าสูง และเมื่อเพิ่มความเร็วแก๊สขาเข้า ส่งผลให้ปริมาณพลั๊กซ์มีค่าลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม สังเกตได้ว่าผลในทิศทาง  $x$  มีความไม่สมมาตรของกราฟเกิดขึ้น และปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งบริเวณผนังจะมีค่าสูง เมื่อปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งมีค่าสูง เนื่องจากว่าทิศทาง  $x$  เป็นทิศทางที่ป้อนเข้าจึงมีความไม่สมมาตรเกิดขึ้น และปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งคิดมาจาก ความเร็วในแนวแกนคูณกับ สัดส่วนปริมาตรของแข็งคูณกับ ความหนาแน่นของของแข็ง ถึงแม้ว่าที่ความเร็วแก๊สขาเข้าค่าต่ำจะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งอยู่มากก็ตาม แต่ผลของความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่มีค่าน้อย (เพราะมีปริมาณของแข็งมาก) จึงทำให้ปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งน้อยกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่า ความเร็วแก๊สขาเข้าส่งผลให้ความเร็วของแข็งตามแนวแกนมีผลมากกว่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งในทิศทาง  $x$  บริเวณผนังนั่นเอง สิ่งนี้ได้รับการยืนยันในส่วนของผลความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่จะกล่าวในส่วนถัดไป

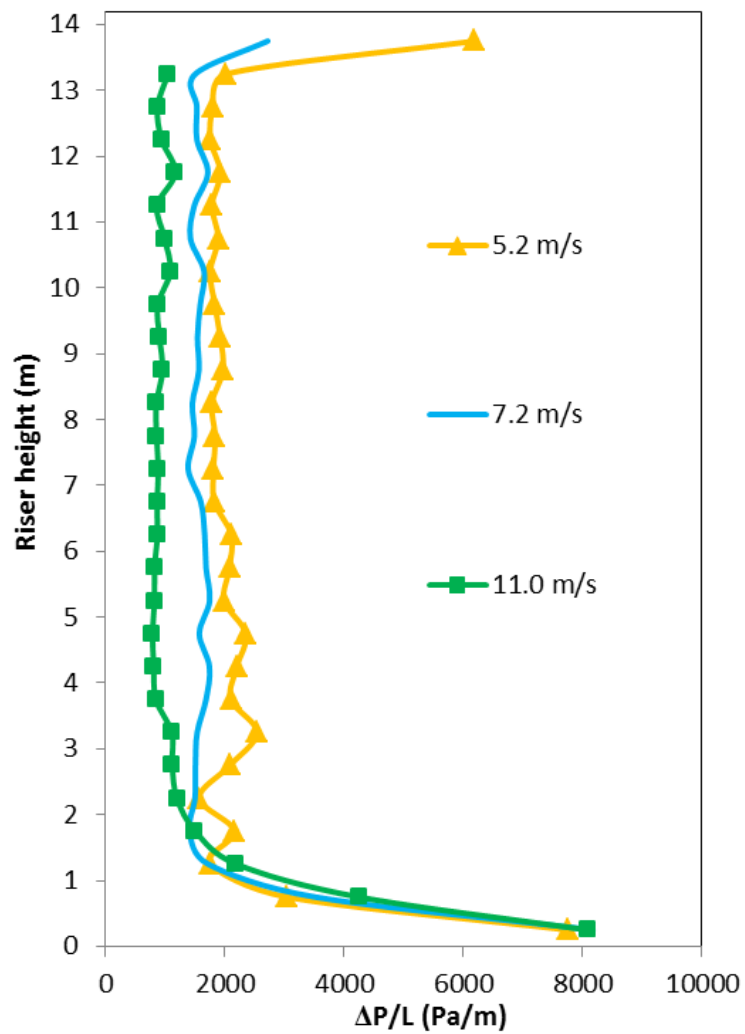
ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของค่าความเร็วแก๊สขาเข้าที่แตกต่างกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงในภาพที่ 4.126 และ 4.127 ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วแก๊สขาเข้าต่ำๆ จะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งในระบบมากกว่าที่ความเร็วแก๊สขาเข้าสูง เนื่องจากว่าที่ความเร็วแก๊สขาเข้าต่ำ อนุภาคของแข็งออกจากระบบได้ช้ากว่า จึงมีปริมาณของแข็งในระบบมากกว่า ดังนั้น สัดส่วนปริมาตรของแข็งจึงมากกว่านั่นเอง และเมื่อเพิ่มความเร็วแก๊สขาเข้า สัดส่วนปริมาตรของแข็งก็จะมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลความดันลดที่ได้กล่าวไป นอกจากนี้ผลการจำลองยังเป็นไปในทางเดียวกันทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$

ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความเร็วแก๊สขาเข้าที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.128 และ 4.129 ตามลำดับ จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อระบบมีความเร็วแก๊สขาเข้าที่สูง ส่งผลให้มีความเร็วของแข็งตามแนวแกนสูงกว่าความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าต่ำที่ระดับความสูงเดียวกัน เนื่องจากความเร็วแก๊สขาเข้าที่สูงส่งผลให้พาอนุภาคของแข็งออกจากระบบได้เร็ว จึงมีปริมาณของแข็งในระบบน้อยกว่า ดังนั้นความเร็วของแข็งตามแนวแกนจึงมีค่าสูงกว่านั่นเอง และเมื่อลดความเร็วแก๊สขาเข้าลง ความเร็วของแข็งตามแนวแกนก็จะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Zhang และคณะ (2008) และ Hartge และคณะ (2009) ในส่วนของผลในทิศทาง  $y$  นั้น พบว่า มีความสอดคล้องกับทิศทาง  $x$  แต่จะพบความแตกต่างเนื่องจากความไม่สมมาตรจากการป้อนเข้าและทางผลของทางออกในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกับผลของตัวแปรดังที่ได้ศึกษาไปเบื้องต้น

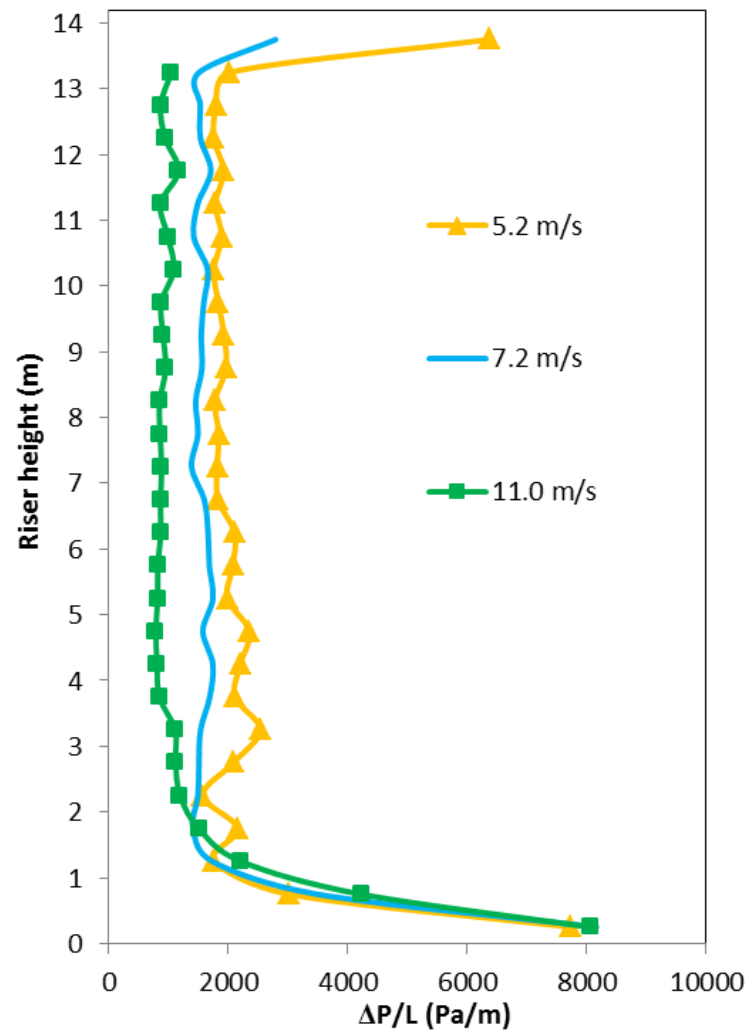
ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่แตกต่างกันได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.130 เมื่อพิจารณาภาพคอนทัวร์จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อใช้ความเร็วแก๊สขาเข้าที่สูง (ภาพที่ 4.130 (ค)) ระบบจะมีแนวโน้มเป็นระบบที่เจือจาง และมีปริมาณของแข็งในระบบที่น้อยกว่าค่าความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าต่ำ สังเกตได้จากภาพคอนทัวร์ที่มีสีค่อนข้างจะเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนปริมาตรของแข็งที่น้อย หรือ เกือบจะไม่มีภายในระบบ และเมื่อพิจารณาความสูงที่ 3.9 เมตร ในภาพที่ 4.131 จะเห็นว่ามีผลการจำลองไปในลักษณะเดียวกัน

ตารางที่ 4.19 และ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแก๊สที่ต่างกันของความเร็วแก๊สขาเข้าค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากตาราง พบว่า ความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าสูง จะมีอุณหภูมิแก๊สที่สูงกว่าระบบที่มีความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าต่ำ เนื่องจากอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า จึงทำให้มี

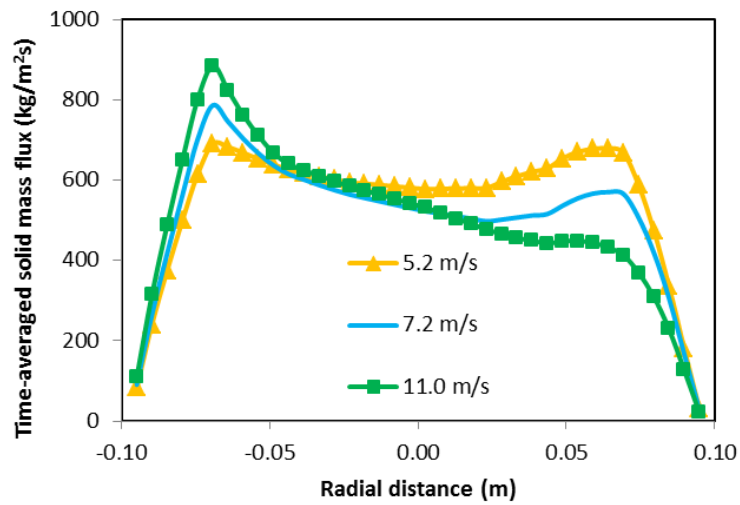
พลังงานการกวัดแกว่งมากกว่า หรือพลังงานในการเคลื่อนที่มากกว่า ในส่วนผลในทิศทาง  $y$  ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.20 พบว่า มีความสอดคล้องในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกัน



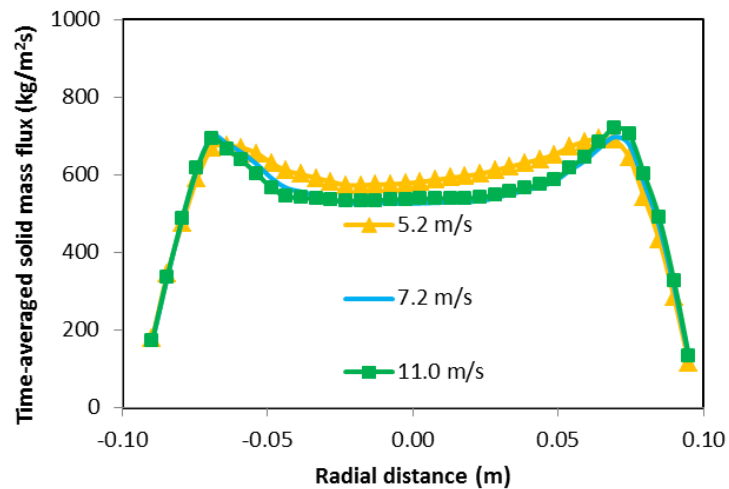
ภาพที่ 4.122 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



ภาพที่ 4.123 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y

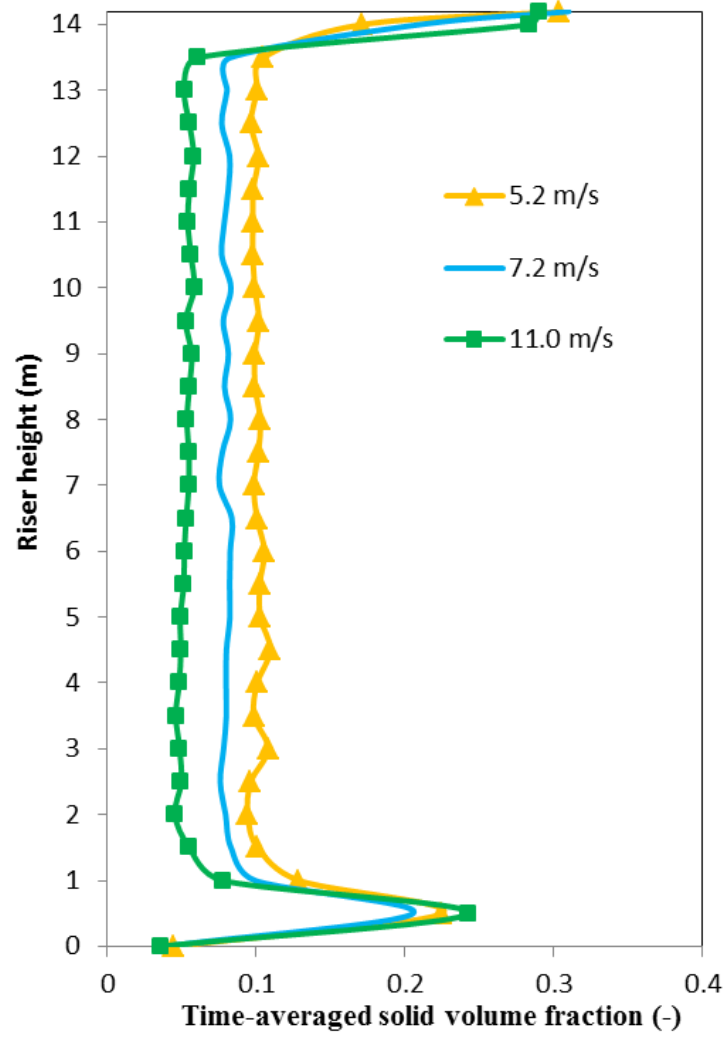


ภาพที่ 4.124 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x

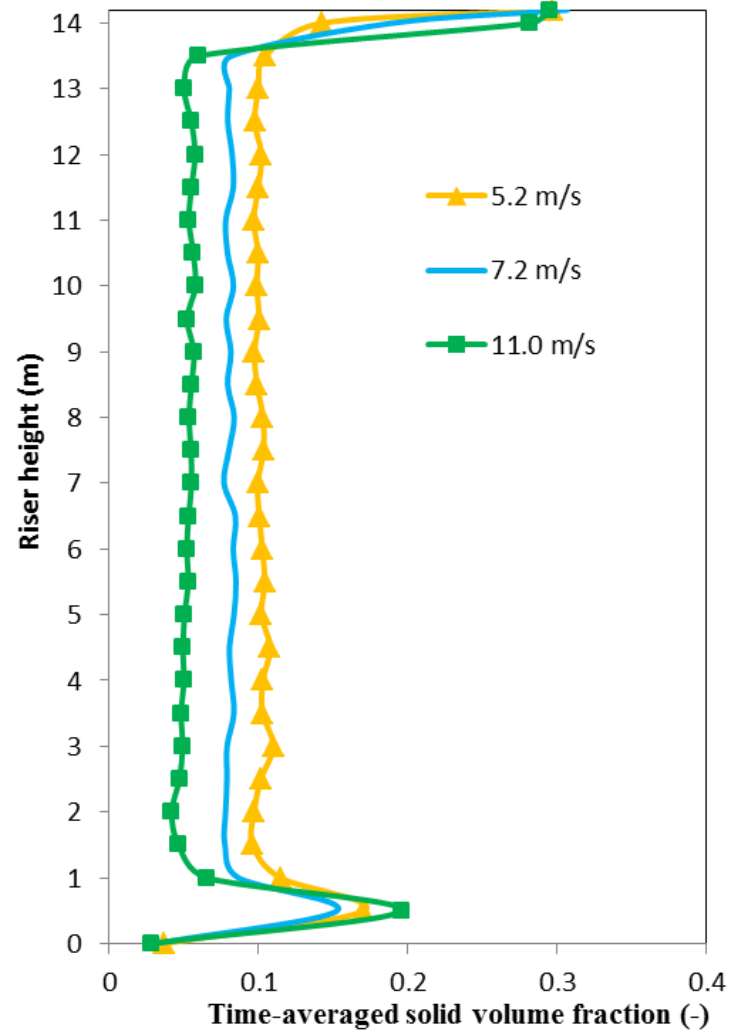


ภาพที่ 4.125 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y

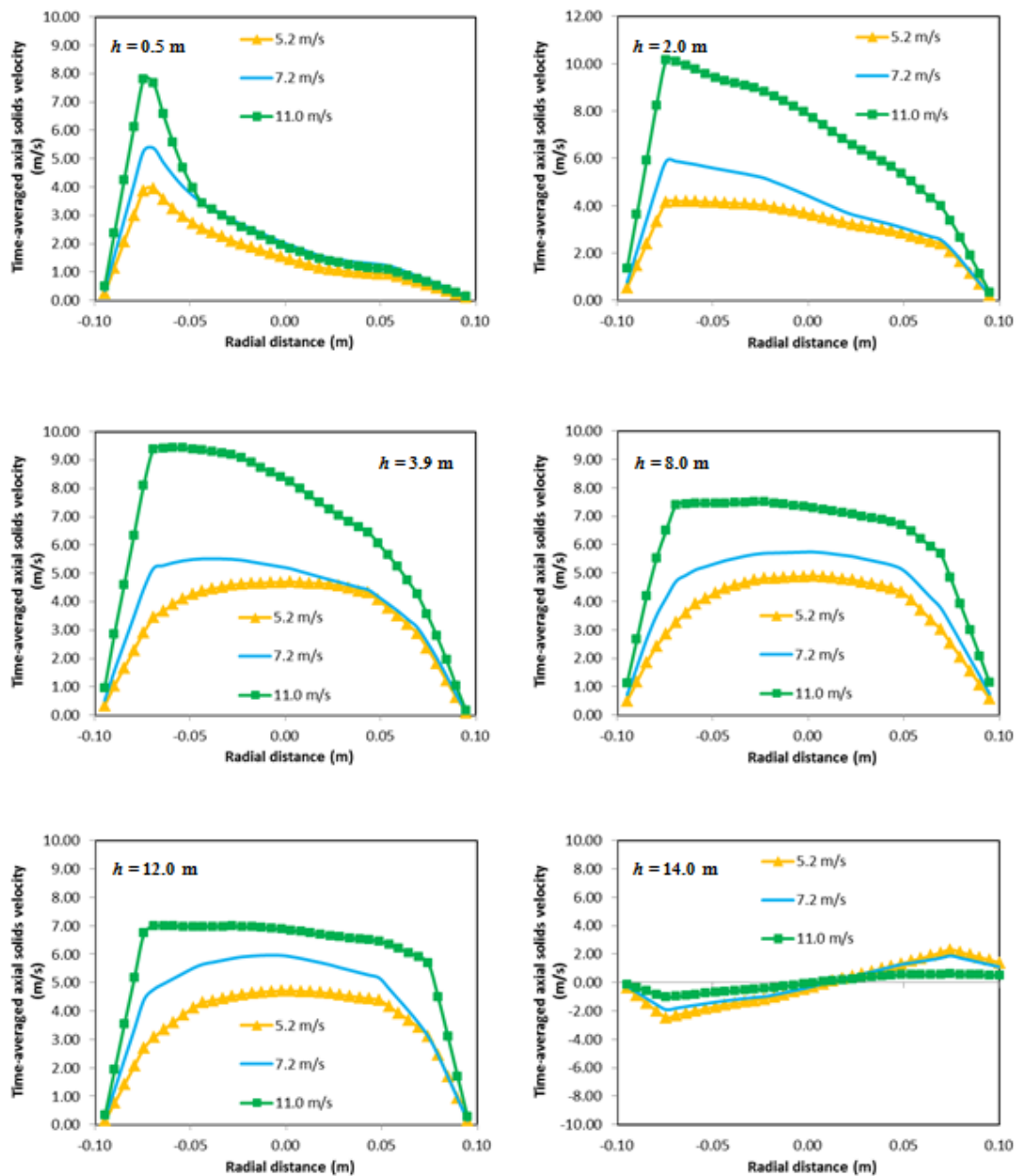




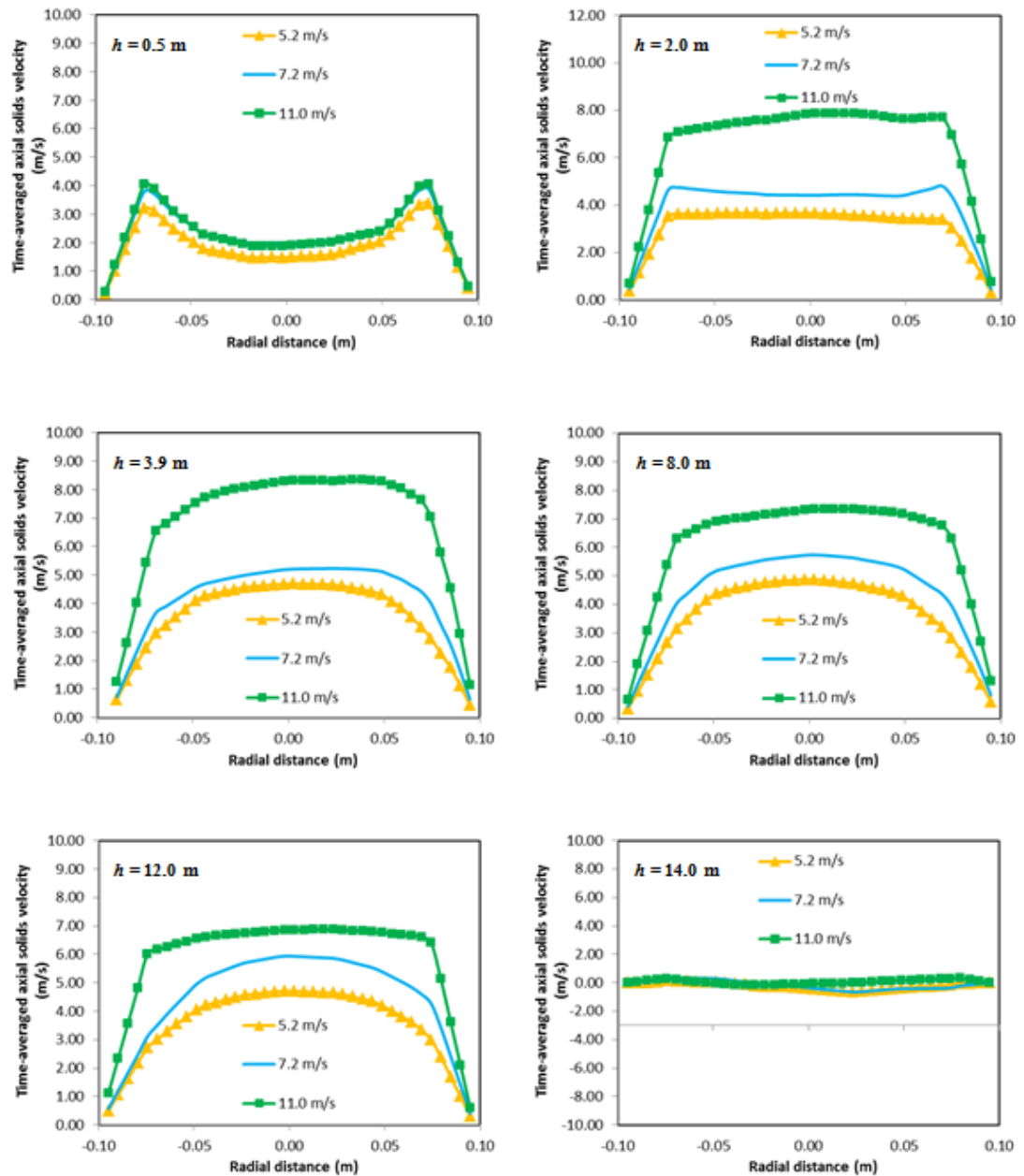
ภาพที่ 4.126 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อโรเซอริของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



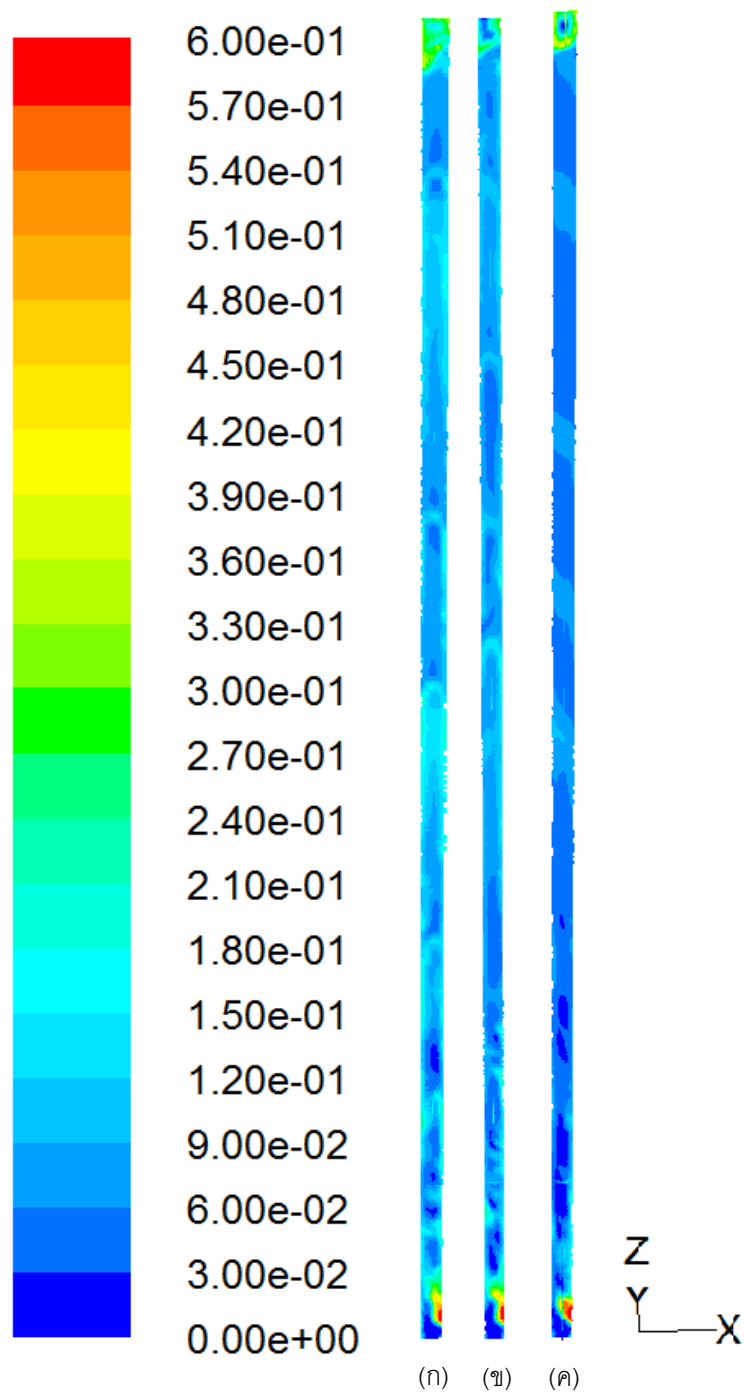
ภาพที่ 4.127 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



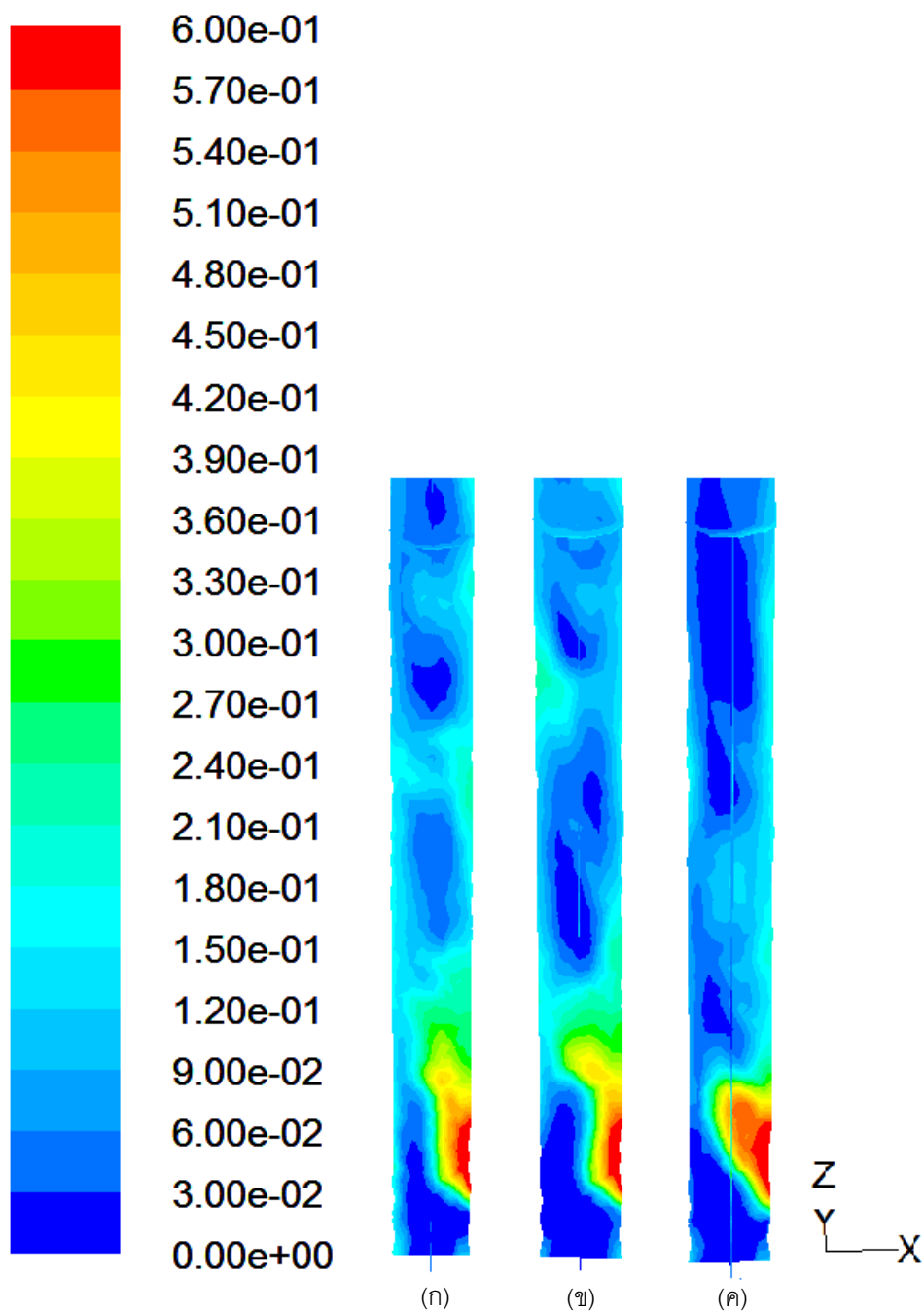
ภาพที่ 4.128 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



ภาพที่ 4.129 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $y$



ภาพที่ 4.130 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อโรเตอร์ของความเร็วก๊าซขาเข้า  
ที่มีค่าแตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 5.2 (ข) 7.2 และ (ค) 11.0 เมตรต่อวินาที



ภาพที่ 4.131 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อโรเตอร์ของความเร็วแก๊สขาเข้า ที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 5.2 (ข) 7.2 และ (ค) 11.0 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Gas inlet velocity (m/s)	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	5.2	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
2	7.2	3.5	1.6970E-05	1.6885E-01	1.6886E-01
		7.0	9.3225E-06	1.1758E-01	1.1759E-01
		10.5	6.7325E-06	1.6173E-01	1.6174E-01
		Averaged	4.0489E-05	2.1265E-01	1.4940E-01
3	11.0	3.5	6.7998E-05	2.9222E-01	2.9229E-01
		7.0	2.8549E-05	3.7792E-02	3.7820E-02
		10.5	7.7091E-06	7.8344E-02	7.8352E-02
		Averaged	5.2988E-05	1.7084E-01	1.7090E-01

ตารางที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความเร็วแก๊สขาเข้าที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Gas inlet velocity (m/s)	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	5.2	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
2	7.2	3.5	1.7447E-05	3.0047E-01	3.0049E-01
		7.0	8.3691E-06	1.3408E-01	1.3408E-01
		10.5	6.3710E-06	1.6299E-01	1.6300E-01
		Averaged	5.5991E-05	2.3554E-01	2.3560E-01
3	11.0	3.5	6.9678E-05	4.5002E-01	4.5008E-01
		7.0	2.3818E-05	4.8296E-02	4.8320E-02
		10.5	7.4251E-06	7.2781E-02	7.2788E-02
		Averaged	5.5544E-05	2.0054E-01	2.0059E-01



#### 4.15 ปริมาณพลังค์ของแข็ง

ปริมาณพลังค์ของแข็งคือปริมาณของแข็งที่ป้อนเข้าบริเวณด้านข้างของท่อโรเตอร์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่หนึ่งหน่วยเวลา ในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาผลของปริมาณพลังค์ของแข็งที่ต่างกันที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ภายในระบบ โดยเมื่อปริมาณพลังค์ของแข็งเปลี่ยนจะส่งผลให้ความเร็วที่ป้อนเข้าของอนุภาคของแข็งเปลี่ยนเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการปรับค่าจึงทำการคำนวณความเร็วที่ป้อนเข้าของอนุภาคของแข็งเพื่อให้ได้ค่าพลังค์ที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาปริมาณพลังค์ของแข็งที่ต่างกัน 3 ค่า คือ 196, 489 และ 721 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

ภาพที่ 4.132 และ 4.133 แสดงผลของความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเตอร์ของปริมาณพลังค์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลอง พบว่า ระบบที่มีปริมาณพลังค์ของแข็งสูงจะมีความดันลดภายในท่อโรเตอร์สูงไปด้วย และเมื่อลดปริมาณพลังค์ของแข็งลง ความดันลดในท่อโรเตอร์มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  เนื่องจากปริมาณพลังค์ของแข็งเพิ่ม ส่งผลให้ปริมาณของแข็งในระบบเพิ่ม ดังนั้นความดันลดจึงมีค่าเพิ่มตามปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ผลการจำลองปริมาณพลังค์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของปริมาณพลังค์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.134 และ 4.135 ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่ใช้ปริมาณพลังค์ของแข็งสูงก็จะมีปริมาณพลังค์ของแข็งสูงตามไปด้วย และเมื่อลดปริมาณพลังค์ของแข็งลงค่าก็จะลดลง ผลการจำลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$

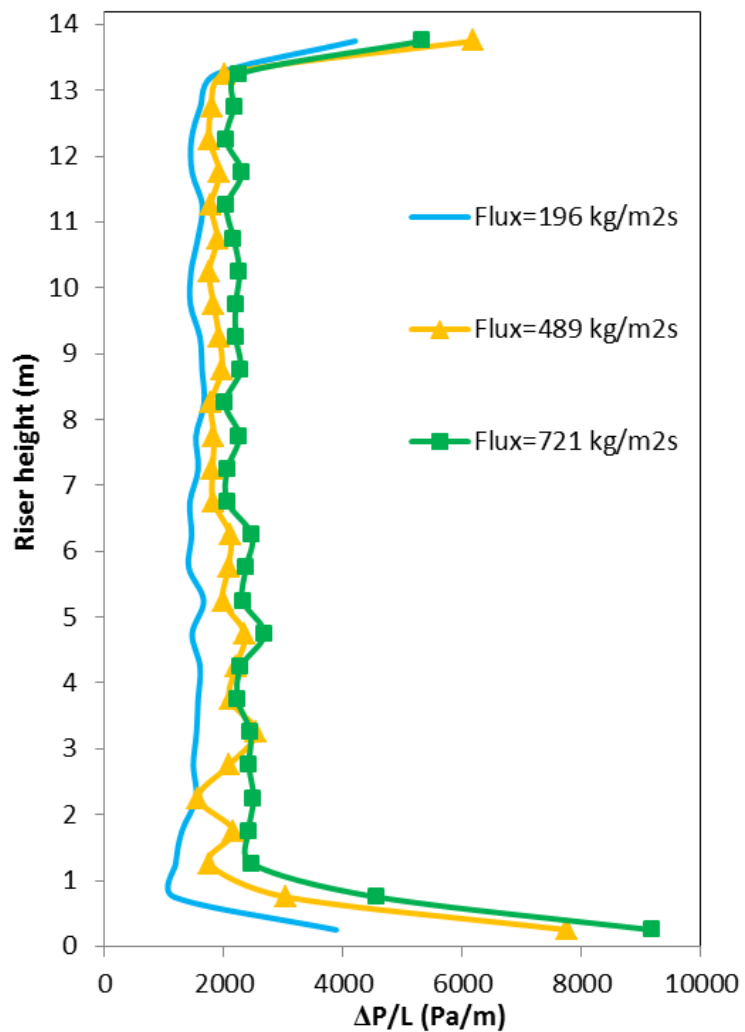
ภาพที่ 4.136 และ 4.137 แสดงผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อโรเตอร์ของปริมาณพลังค์ของแข็งที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณพลังค์ของแข็งเปลี่ยน กล่าวคือ ระบบที่มีปริมาณพลังค์ของแข็งสูงจะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูง และเมื่อลดปริมาณพลังค์ของแข็งลง สัดส่วนปริมาตรของแข็งก็จะมีค่าลดลง ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ผลที่ได้สอดคล้องกับผลความดันลดที่กล่าวถึงในส่วนก่อนหน้า

ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของปริมาณพลังค์ของแข็งที่แตกต่างทั้งทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.138 และ 4.139 ตามลำดับ เมื่อดูในภาพรวมจะเห็นว่าเมื่อปริมาณพลังค์ของแข็งเพิ่มขึ้น ความเร็วของแข็งตามแนวแกนก็จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากปริมาณพลังค์ของแข็งที่เพิ่มแสดงว่า ความเร็วในอนุภาคของแข็งก็จะเพิ่มขึ้นด้วย จึงเป็นไปได้ว่าความเร็วที่เพิ่มเข้ามาไปช่วยทำให้ความเร็วของแข็งตามแนวแกนสูงขึ้น ถึงแม้จะมีปริมาณของแข็งมากขึ้นด้วยก็ตาม (ผลของความเร็วป้อนเข้าของ

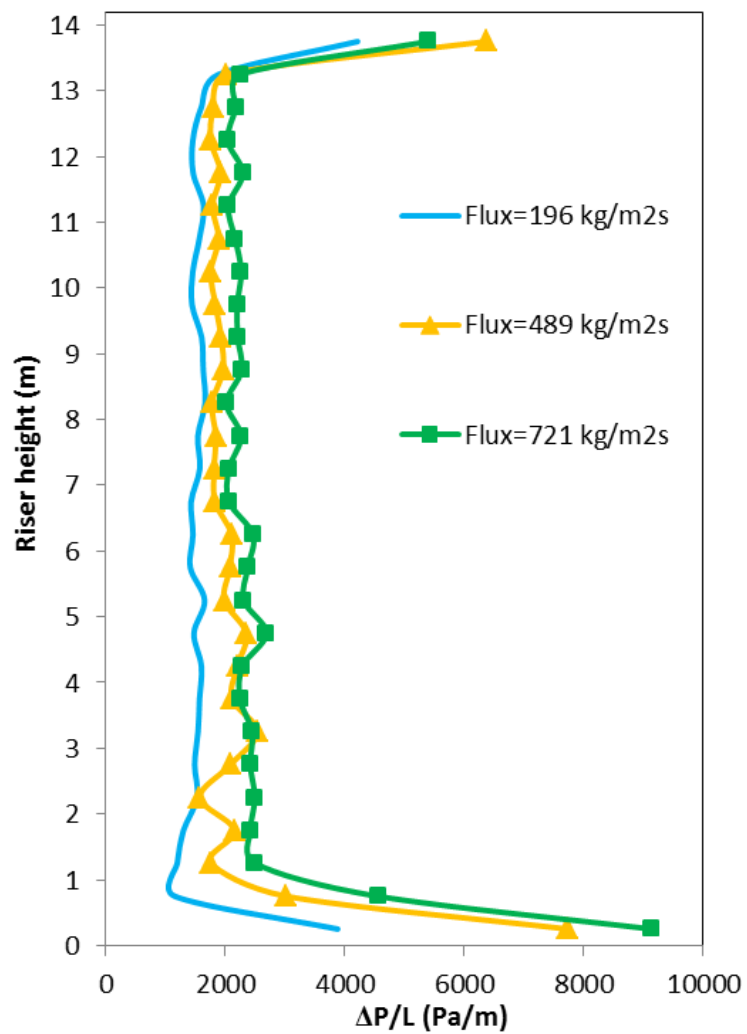
วิฤภาคของแข็งมีผลเหนือกว่าปริมาณของแข็งที่สูงขึ้น) ยกเว้นที่ระดับความสูงเท่ากับ 0.5 และ 2.0 เมตร ที่ผลที่ได้แตกต่างออกไป เนื่องจากที่ความสูงเท่ากับ 0.5 เมตร เป็นบริเวณที่ใกล้กับทางเข้า ดังนั้นผลของปริมาณของแข็งจึงน่าจะมีผลเหนือกว่าผลของความเร็วป้อนเข้าของวิฤภาคของแข็ง กล่าวคือ ปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่น้อย จะมีปริมาณของแข็งที่น้อย ดังนั้นความเร็วของแข็งตามแนวแกนจึงสูงกว่านั่นเอง ส่วนผลที่ความสูงเท่ากับ 2.0 เมตรนั้น ความเร็วมีลักษณะใกล้เคียงกัน อาจเป็นบริเวณที่เริ่มเปลี่ยนผลของความเร็วของแข็งตามแนวแกน ส่วนความแตกต่างในสองทิศทาง พบว่า มีเพียงบริเวณด้านล่างและด้านบน ที่มีความแตกต่างของความเร็วเนื่องจากผลของการป้อนเข้าและผลของทางออกดังที่ได้เคยกล่าวไป

ภาพที่ 4.140 แสดงคอนทัวร์ของผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่แตกต่างกัน จากภาพแสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบมีปริมาณฟลักซ์ของแข็งสูงขึ้น ระบบจะมีปริมาณของแข็งสูงขึ้น สังเกตได้จากสีของคอนทัวร์ที่เข้มขึ้น และเมื่อลดปริมาณฟลักซ์ของแข็งลง ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงไปสู่ระบบที่เจือจาง ภาพที่ 4.141 แสดงผลการจำลองในระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร สังเกตได้ว่าบริเวณด้านล่างของระบบที่มีปริมาณฟลักซ์ของแข็งสูง (ภาพที่ 4.141 (ค)) จะเห็นปริมาณของแข็งที่สูงกว่าชัดเจน

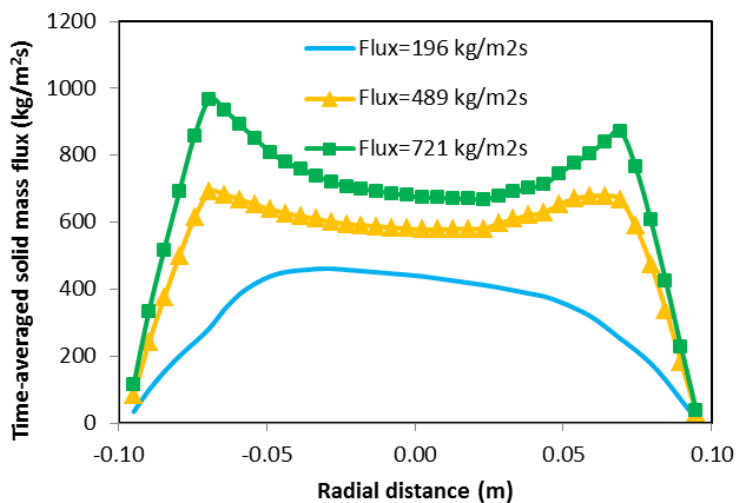
ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่ต่างกันของปริมาณฟลักซ์ของแข็งค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.21 และ 4.22 ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากตาราง พบว่า ผลของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์ ในทุกค่าของปริมาณฟลักซ์ของแข็งเช่นเดียวกับผลของตัวแปรอื่นๆ เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีต่ออุณหภูมิแกรนูลาร์ พบว่า ระบบที่มีปริมาณฟลักซ์ของแข็งสูงจะมีอุณหภูมิแกรนูลาร์สูงกว่าระบบที่มีปริมาณฟลักซ์ของแข็งต่ำ เนื่องจากปริมาณของแข็งที่มากกว่า ส่งผลให้มีการสั่นของกลุ่มอนุภาคมากกว่า อย่างไรก็ตามที่ปริมาณฟลักซ์ของแข็งเท่ากับ 489 และ 721 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ที่ความสูงเท่ากับ 7.0 และ 10.5 พบว่า ผลที่ได้ไม่เป็นเช่นนั้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจาก ที่ปริมาณฟลักซ์ของแข็งเท่ากับ 721 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาทีที่มีปริมาณของแข็งด้านบนน้อยกว่า (อนุภาคของแข็งอยู่ด้านล่างจำนวนมากส่งผลให้ของแข็งด้านบนและตรงกลางมีน้อยกว่า) หรืออาจเกิดจากความไม่แน่นอนของระบบฟลูอิดไดเซชันเอง ทำให้เมื่อวิเคราะห์ผลออกมา ความแปรปรวนจึงส่งผลออกมาด้วย ก็เป็นไปได้ ผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลในทิศทาง  $y$  ที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.22



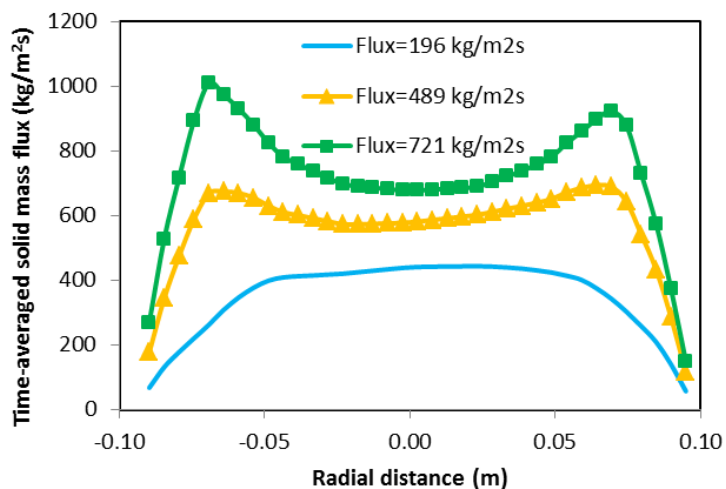
ภาพที่ 4.132 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



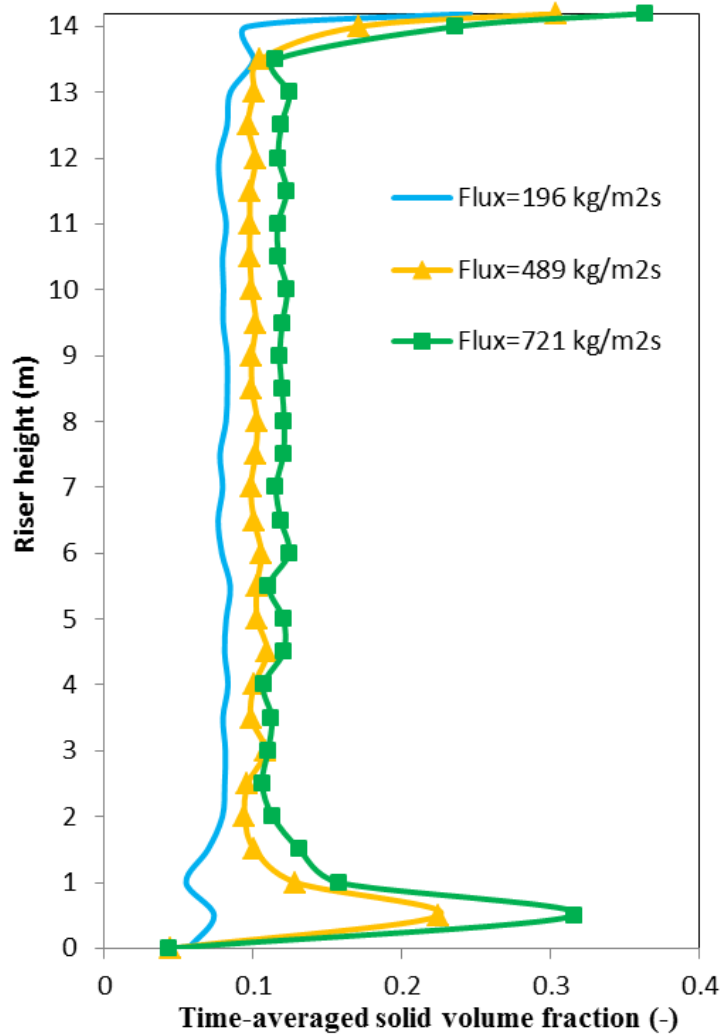
ภาพที่ 4.133 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซอริของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



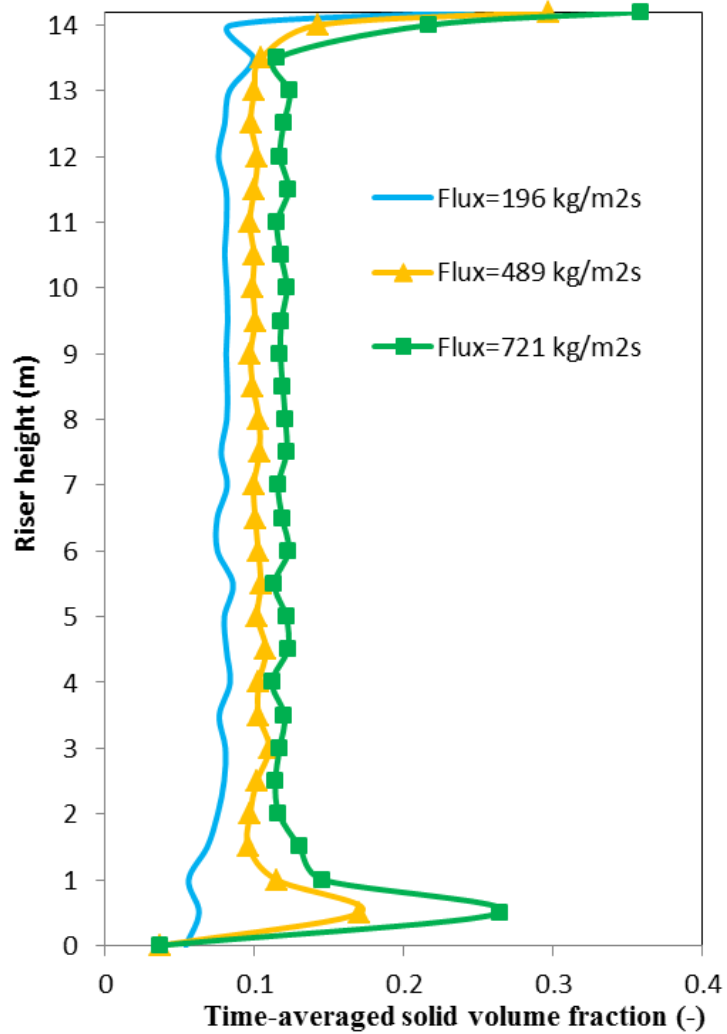
ภาพที่ 4.134 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



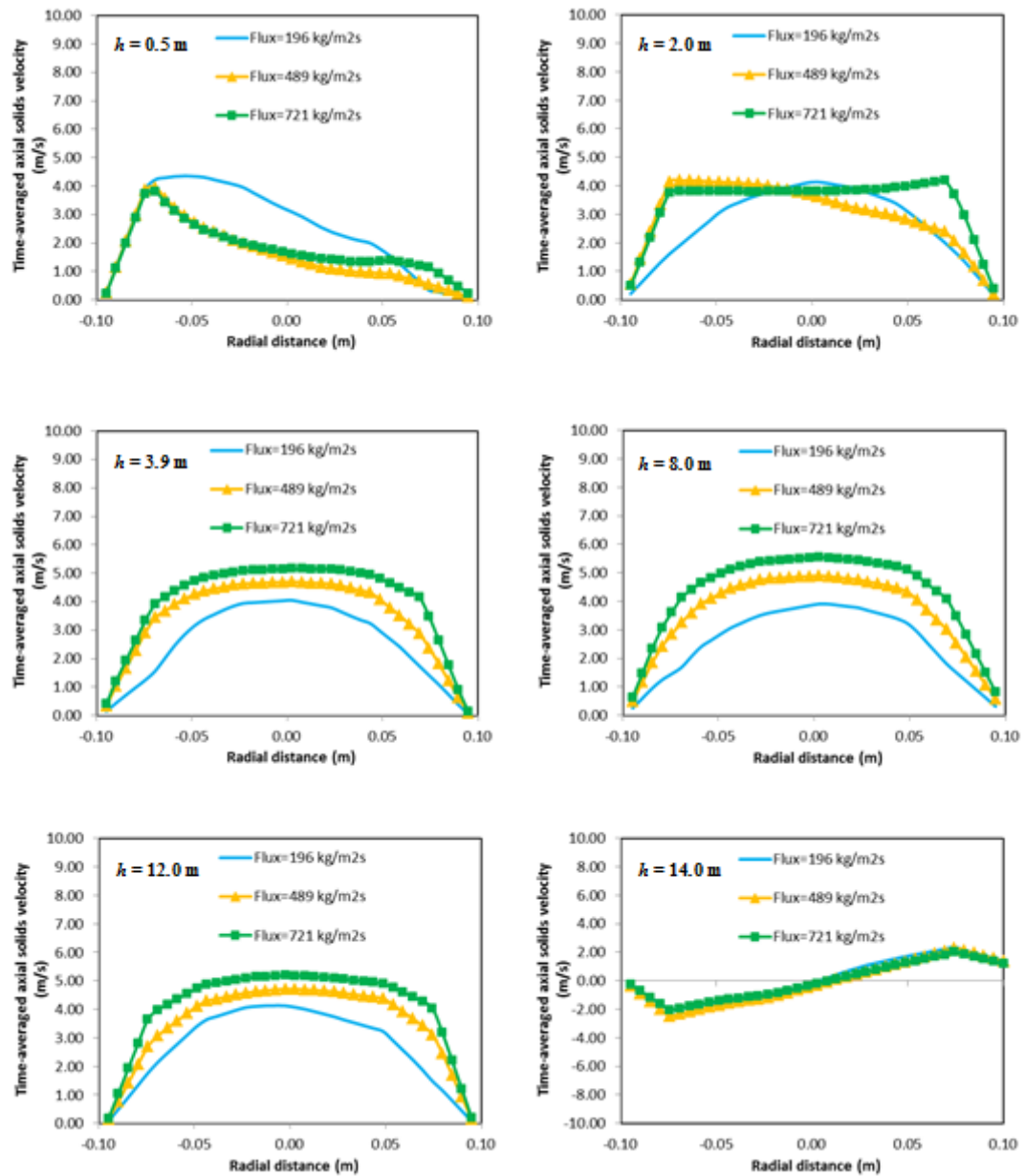
ภาพที่ 4.135 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



ภาพที่ 4.136 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x

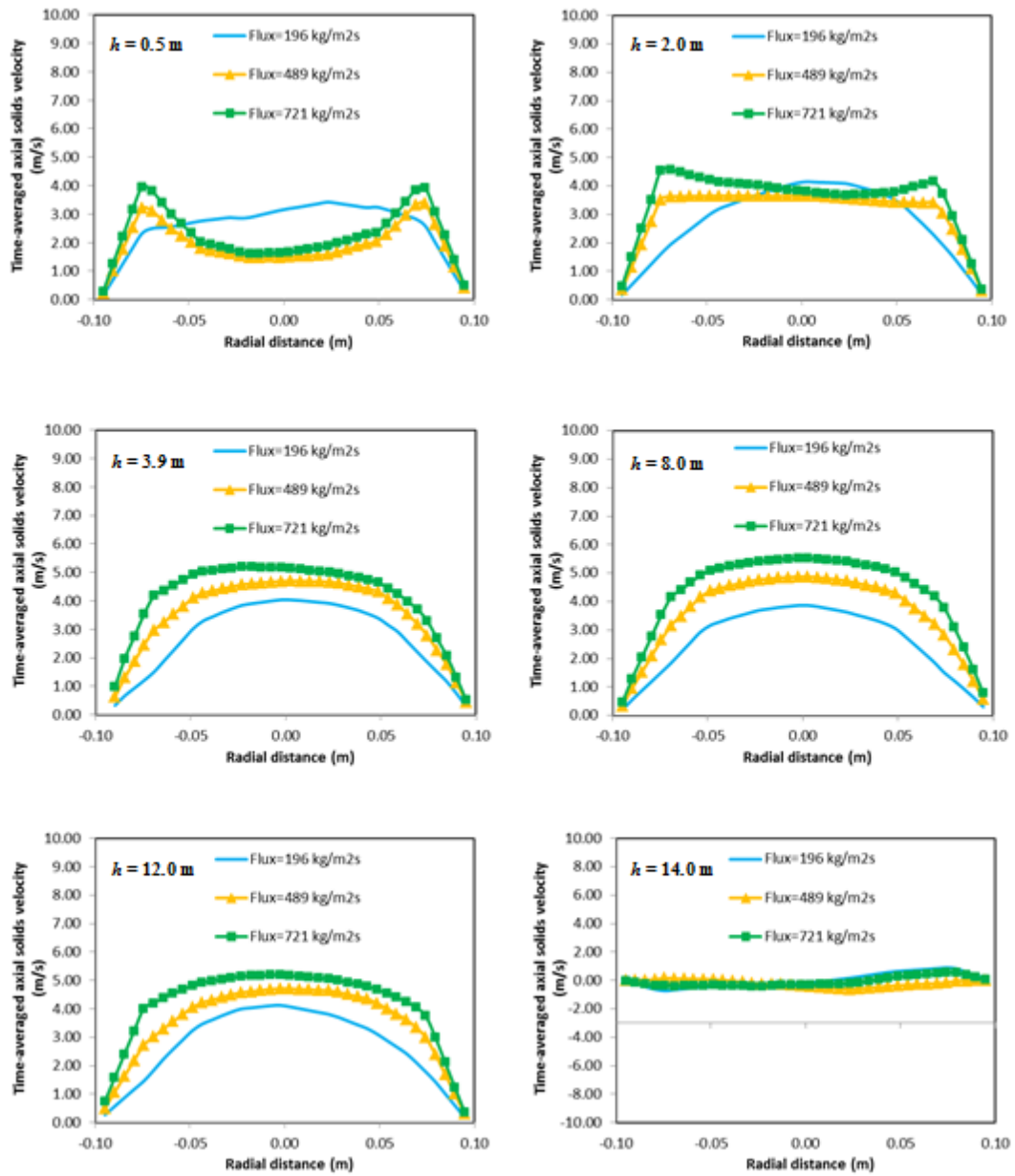


ภาพที่ 4.137 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y

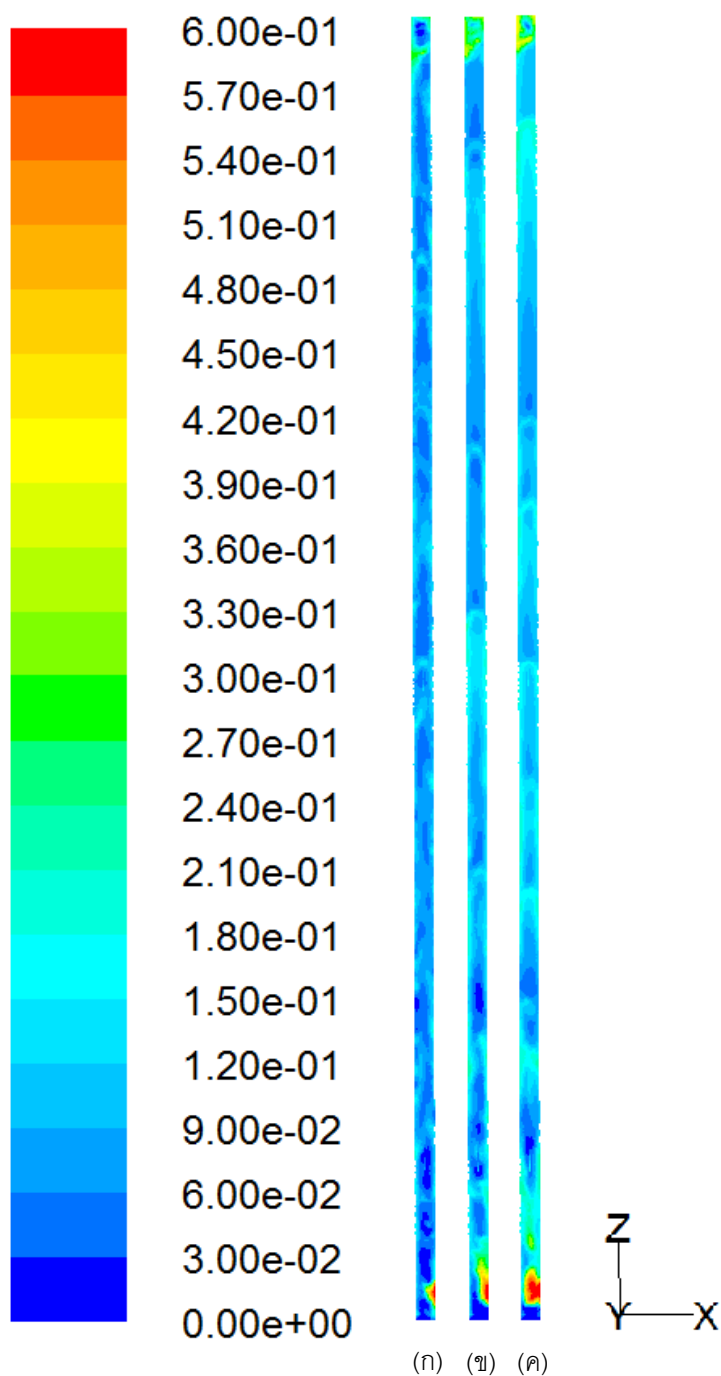


ภาพที่ 4.138 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x

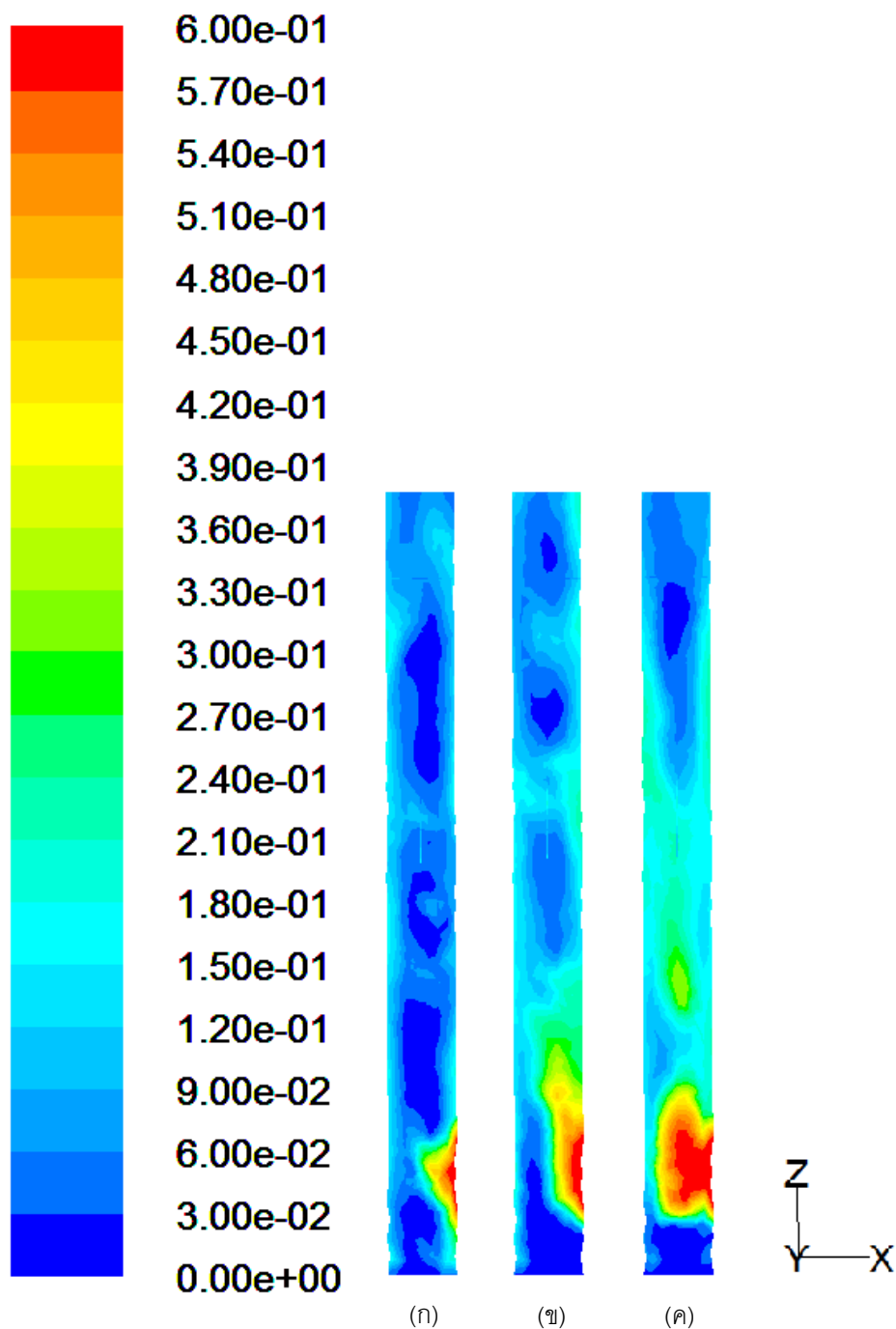




ภาพที่ 4.139 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $y$



ภาพที่ 4.140 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 196 (ข) 489 และ (ค) 721 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที



ภาพที่ 4.141 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแรงเฉือนในท่อไรเซอร์ของปริมาณฟลักซ์ของแรงที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 196 (ข) 489 และ (ค) 721 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

ตารางที่ 4.21 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Flux (kg/m <sup>2</sup> s)	Height (m)	Granular temperature (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	196	3.5	1.5675E-05	7.4431E-02	7.4447E-02
		7.0	1.2754E-05	6.3193E-02	6.3206E-02
		10.5	1.5164E-05	9.7368E-02	9.7383E-02
		Averaged	5.7147E-05	1.2910E-01	7.8345E-02
2	489	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
3	721	3.5	5.5883E-06	2.9183E-01	2.9183E-01
		7.0	6.1349E-06	1.7120E-01	1.7121E-01
		10.5	2.6948E-06	2.6120E-01	2.6120E-01
		Averaged	2.8040E-05	2.3555E-01	2.3558E-01

ตารางที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของปริมาณฟลักซ์ของแข็งที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Flux (kg/m <sup>2</sup> s)	Height (m)	Granular temperature (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	196	3.5	1.4410E-05	8.1023E-02	8.1038E-02
		7.0	1.1375E-05	6.6674E-02	6.6685E-02
		10.5	1.5008E-05	7.5997E-02	7.6012E-02
		Averaged	6.9867E-05	1.3574E-01	7.4578E-02
2	489	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
3	721	3.5	5.6342E-06	3.4857E-01	3.4858E-01
		7.0	4.9903E-06	1.7029E-01	1.7030E-01
		10.5	2.4431E-06	2.4637E-01	2.4638E-01
		Averaged	5.2224E-05	2.5975E-01	2.5980E-01

#### 4.16 อุณหภูมิกระบวนการ

ในส่วนนี้เป็นตัวแปรสุดท้ายที่ทำการศึกษา คือผลของอุณหภูมิกระบวนการ โดยเมื่ออุณหภูมิกระบวนการเปลี่ยน ความหนาแน่น และความหนืด ของวัฏภาคแก๊สก็จะเปลี่ยนไปด้วย ผลของอุณหภูมิกระบวนการที่ได้ทำการศึกษาประกอบไปด้วย 4 ค่า คือ อุณหภูมิเท่ากับ 298.15, 773.15, 1073.15 และ 1273.15 เคลวิน

ภาพที่ 4.142 และ 4.143 แสดงผลของความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลที่ได้ พบว่า ความดันลดมีค่าสูงบริเวณด้านล่าง จากนั้นค่อยๆ ลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น และความดันจะสูงอีกครั้งบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ ในด้านความแตกต่างของอุณหภูมิกระบวนการที่ต่างกันดูเหมือนว่า ไม่ส่งผลให้ความดันลดภายในท่อไรเซอร์แตกต่างกันมากนักทั้งในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$  อย่างไรก็ตาม มีแนวโน้มที่เกิดขึ้นคือ อุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าต่ำจะมีความดันลดภายในท่อไรเซอร์สูงกว่าอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าสูง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการขึ้น ความดันลดภายในท่อไรเซอร์มีค่าลดลง เนื่องจากว่า อุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าสูงทำให้ความหนืดของวัฏภาคแก๊สสูงขึ้น ดังนั้นวัฏภาคแก๊สจึงพาอนุภาคของแข็งจึงเคลื่อนที่ออกจากระบบได้มากขึ้นนั่นเอง ปริมาณของแข็งในระบบจึงมีน้อยกว่า ส่งผลให้ความดันลดมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิกระบวนการมีค่าสูงขึ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Wang และคณะ (1995) ที่ศึกษาผลของอุณหภูมิกระบวนการแล้วพบว่า ปริมาณของแข็งในระบบจะลดลง เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการเพิ่มขึ้น

การจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของอุณหภูมิกระบวนการที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้แสดงในภาพที่ 4.144 และ 4.145 ตามลำดับ ผลการจำลอง พบว่า อุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าต่ำสุด (298.15 เคลวิน) จะมีปริมาณฟลักซ์ของแข็งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าสูง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการ ส่งผลให้ปริมาณฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$  เนื่องจากว่าปริมาณฟลักซ์ของแข็งคิดมาจาก ความเร็วในแนวแกนคูณกับ สัดส่วนปริมาตรของแข็งคูณกับ ความหนาแน่นของของแข็ง ถึงแม้ว่าที่อุณหภูมิกระบวนการค่าต่ำจะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งอยู่มากกว่าก็ตาม แต่ผลของความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่มีค่าน้อย (เพราะมีปริมาณของแข็งที่มากกว่า) จึงทำให้ปริมาณฟลักซ์ของแข็งน้อยกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่า ความเร็วของแข็งตามแนวแกนมีผลมากกว่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งนั่นเอง โดยจะได้รับการยืนยันในส่วนของผลความเร็วของแข็งตามแนวแกนที่จะกล่าวในส่วนถัดไป

ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่แตกต่างกัน ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.146 และ 4.147 ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่า อุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าต่ำจะมีสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงกว่าอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าสูง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการขึ้น สัดส่วนปริมาตรของแข็งมีค่าลดลง ดังเหตุผลที่ได้กล่าวไป ผลที่ได้สอดคล้องกับผลความดันลดที่เกิดขึ้น ส่วนผลการจำลองในทิศทาง  $y$  มีความสอดคล้องกันดีกับผลในทิศทาง  $x$

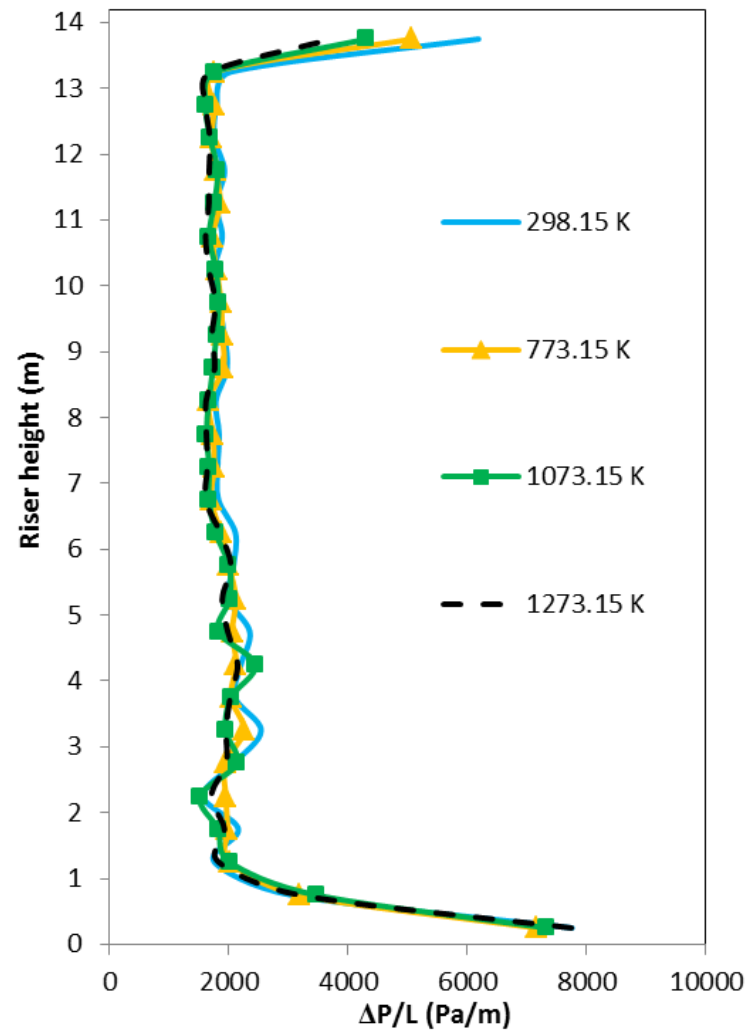
ภาพที่ 4.148 และ 4.149 แสดงผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของอุณหภูมิกระบวนการที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากกราฟจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนว่า เมื่อระบบมีอุณหภูมิกระบวนการที่สูงส่งผลให้มีความเร็วของแข็งตามแนวแกนสูงกว่าระบบที่มีอุณหภูมิกระบวนการค่าต่ำที่ระดับความสูงเดียวกัน เนื่องจากอุณหภูมิกระบวนการที่สูง สะท้อนถึงความหนืดของวัสดุภาคแก๊สที่สูงขึ้น ดังนั้นวัสดุภาคแก๊สจึงพาอนุภาคของแข็งออกจากระบบได้มากกว่า ปริมาณของแข็งในระบบจึงมีน้อยกว่าระบบที่อุณหภูมิกระบวนการมีค่าต่ำ ส่งผลให้ความเร็วของแข็งตามแนวแกนมีค่าสูงกว่านั่นเอง และเมื่อลดอุณหภูมิกระบวนการลง ความเร็วของแข็งตามแนวแกนก็จะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ในส่วนของผลในทิศทาง  $y$  นั้น พบว่า มีความสอดคล้องกับทิศทาง  $x$  แต่จะพบความแตกต่างเนื่องจากความไม่สมมาตรจากการป้อนเข้าและทางผลของทางออกในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกับผลของตัวแปรดังที่ได้ศึกษาไปเบื้องต้น

ภาพที่ 4.150 แสดงคอนทัวร์ของผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่แตกต่างกัน จากภาพคอนทัวร์ แสดงให้เห็นว่าระบบที่อุณหภูมิกระบวนการมีค่าต่ำจะมีปริมาณของแข็งสูงกว่าระบบที่อุณหภูมิกระบวนการมีค่าสูง (สีของคอนทัวร์เข้มกว่านั่นเอง) และเมื่อเพิ่มค่าอุณหภูมิกระบวนการขึ้นไป ปริมาณของแข็งในระบบก็จะลดลง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรในภาพที่ 4.151 จะสังเกตเห็นว่าระบบที่อุณหภูมิกระบวนการมีค่าสูงจะมีปริมาณของแข็งบริเวณทางเข้าสูงกว่าระบบที่อุณหภูมิกระบวนการมีค่าต่ำ เนื่องจากพลังงานภายในที่สูงกว่านั่นเอง

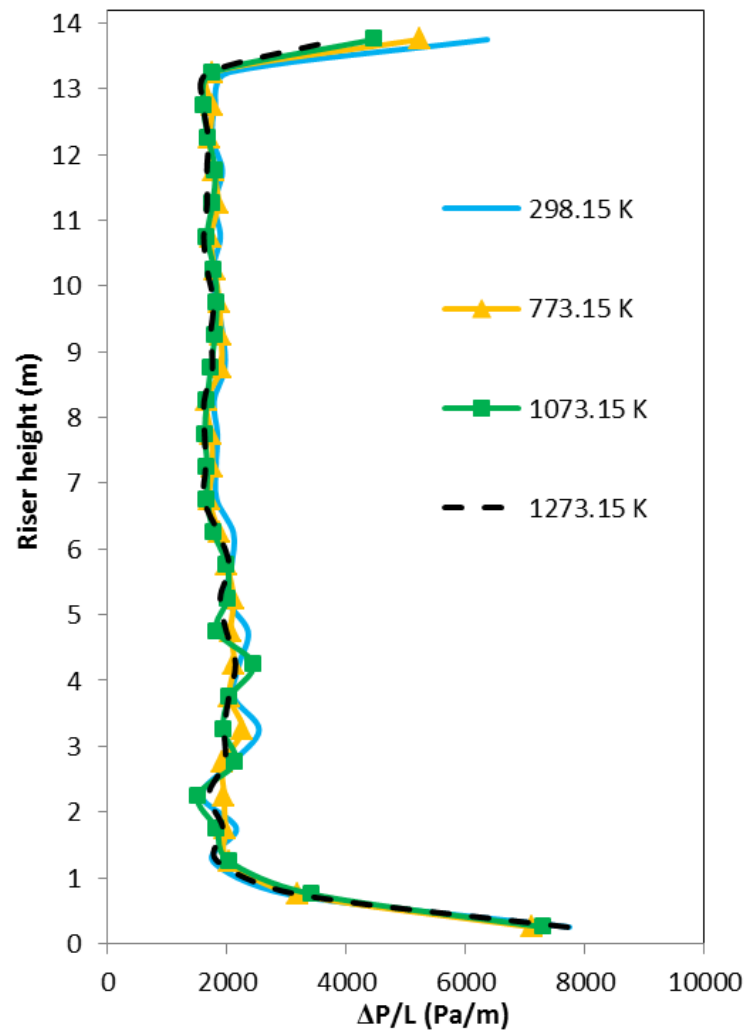
ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของอุณหภูมิกระบวนการค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.23 และ 4.24 ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากตาราง พบว่า ผลของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์ เช่นเดียวกับผลของตัวแปรอื่น เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของอุณหภูมิกระบวนการที่มีต่ออุณหภูมิแกรนูลาร์ พบว่า ระบบที่มีอุณหภูมิกระบวนการค่าต่ำมีอุณหภูมิ

แกรนูลาร์สูงกว่าระบบที่มีอุณหภูมิกระบวนการค่าสูง เนื่องจากปริมาณของแข็งที่มากกว่า จึงทำให้มีการสิ้นของกลุ่มอนุภาคที่มากกว่า ดังนั้นผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์บิวเลนซ์ที่เกิดจากการสิ้นของกลุ่มอนุภาคและเป็นตัวแทนของระบบ จึงมีค่าสูงตามไปด้วย ในส่วนผลของทิศทาง  $y$  ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.24 พบว่า มีความสอดคล้องในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกัน

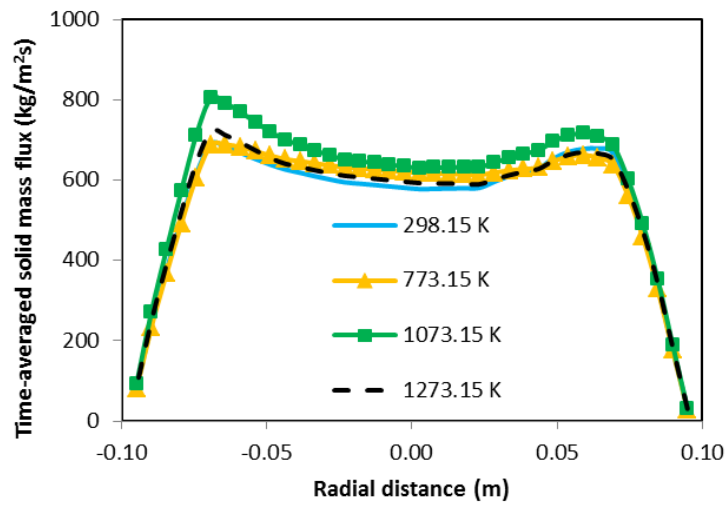




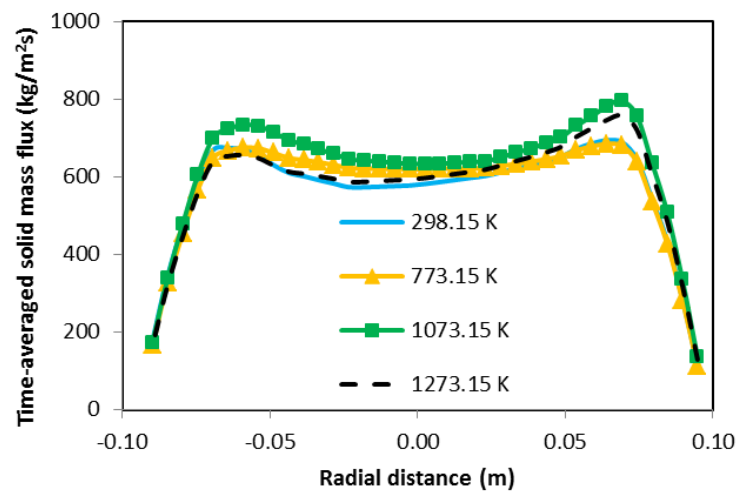
ภาพที่ 4.142 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



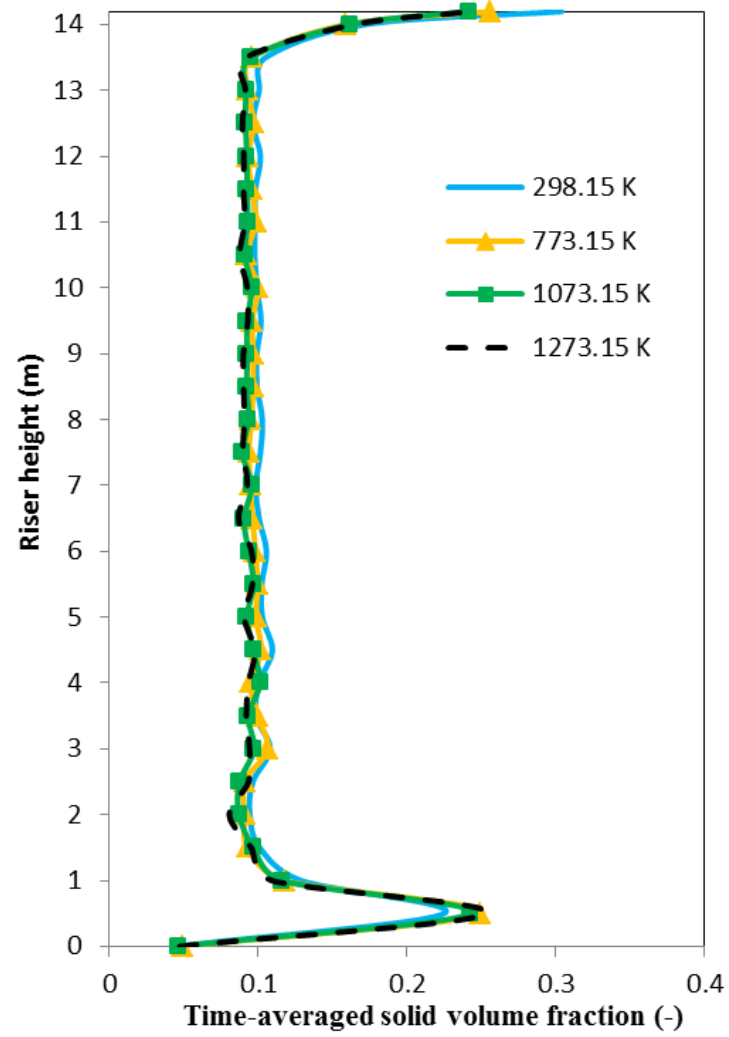
ภาพที่ 4.143 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



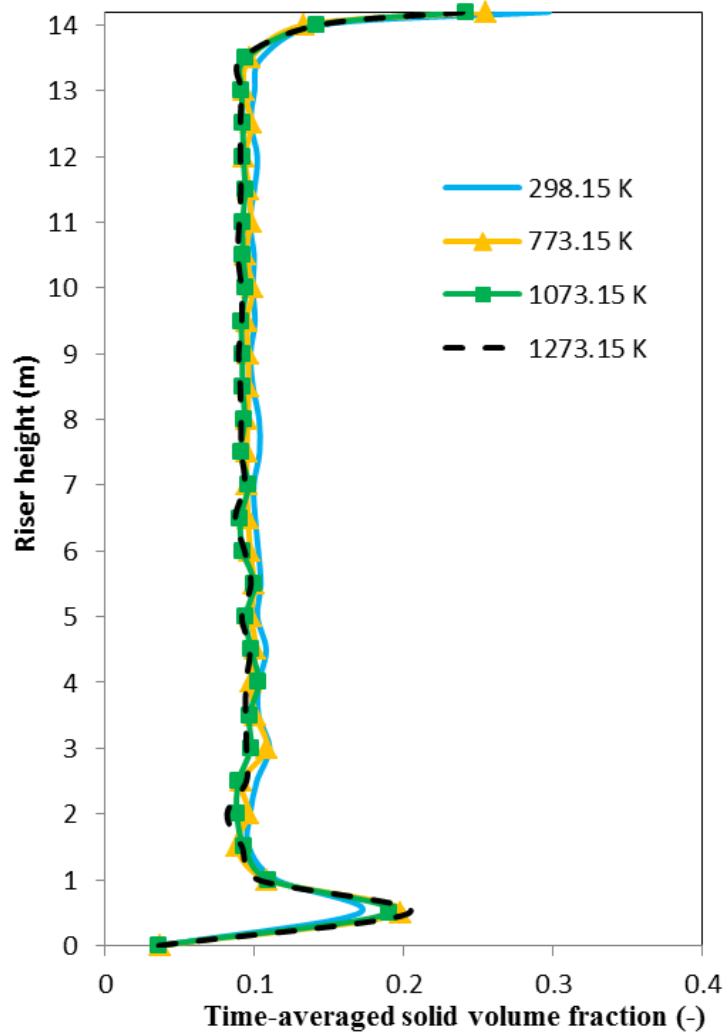
ภาพที่ 4.144 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของอนุกรมการคำนวณการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



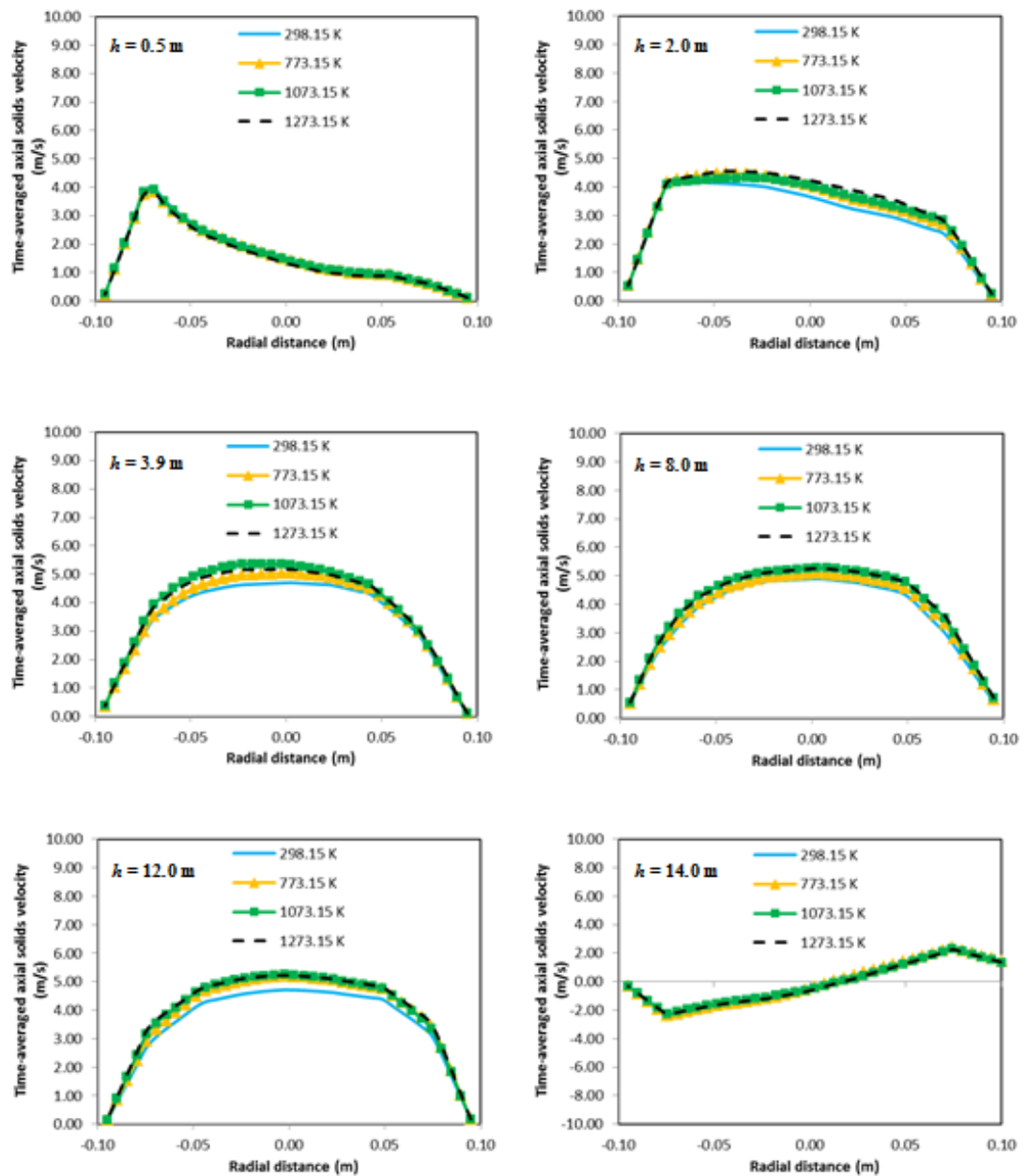
ภาพที่ 4.145 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของอนุกรมการคำนวณการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



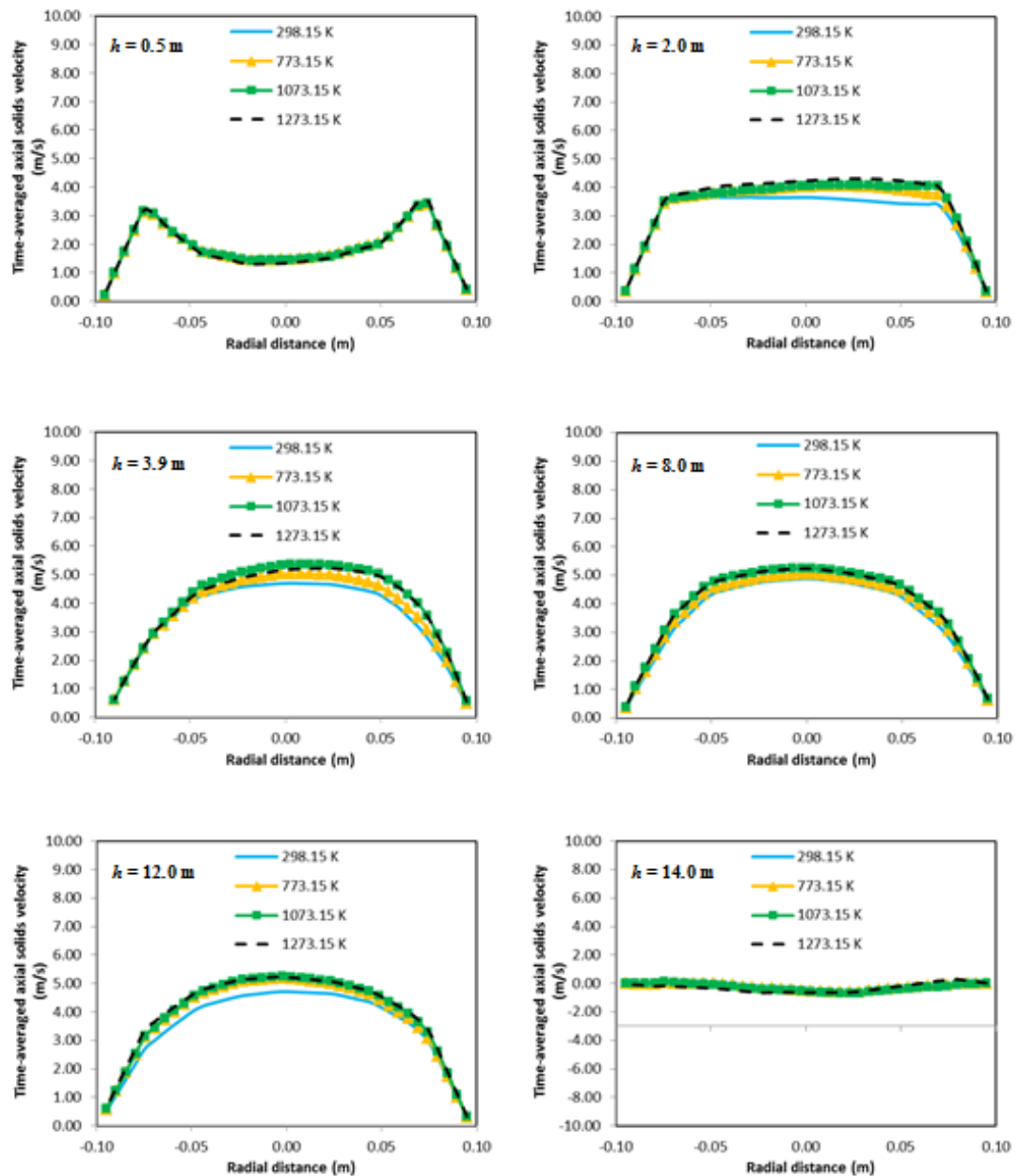
ภาพที่ 4.146 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



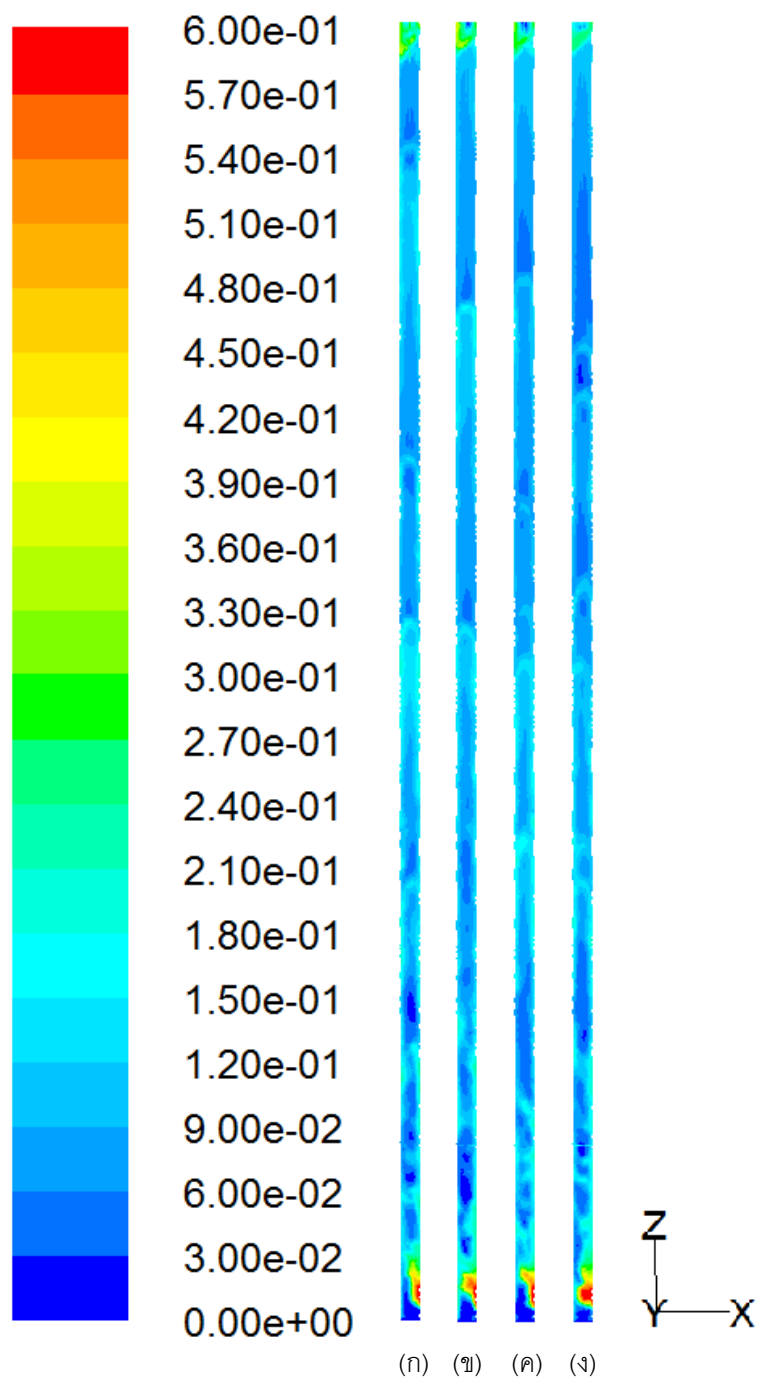
ภาพที่ 4.147 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



ภาพที่ 4.148 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของอนุภาคนิวเคลียสที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x

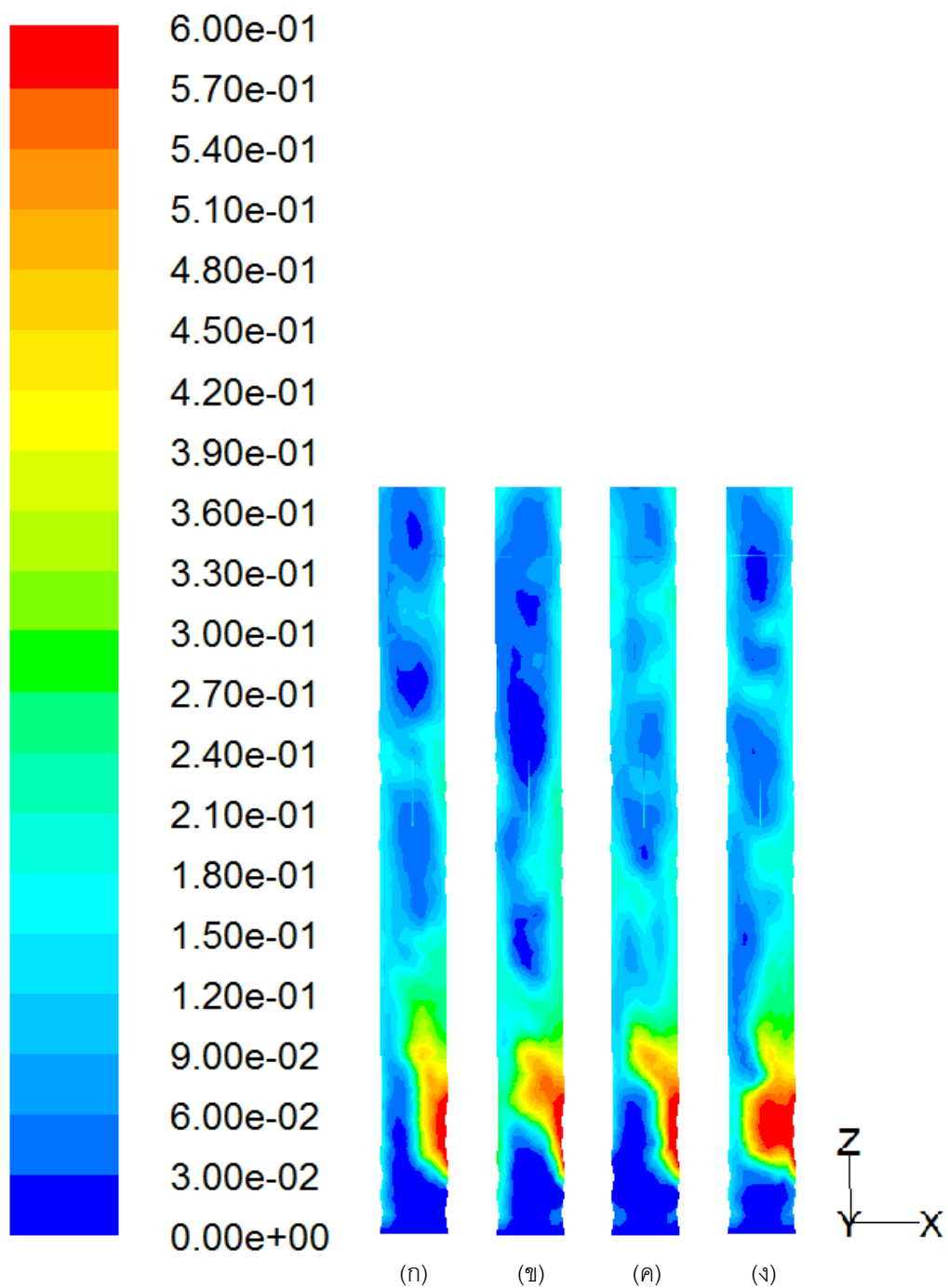


ภาพที่ 4.149 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของอนุภาคนิวเคลียสที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $y$



ภาพที่ 4.150 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาณของแรงแม่เหล็กในท่อไรเซอร์ของอุณหภูมิ กระบวนการที่มีค่าแตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 298.15 (ข) 773.15 (ค) 1073.15 และ (ง) 1273.15 เคลวิน





ภาพที่ 4.151 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อโรเซอรัของอุณหภูมิ กระบวนการที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 298.15 (ข) 773.15 (ค) 1073.15 และ (ง) 1273.15 เคลวิน

ตารางที่ 4.23 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของอุณหภูมิ  
กระบวนการที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Temperature (K)	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	298.15	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
2	773.15	3.5	3.4762E-04	2.9894E-01	2.9929E-01
		7.0	2.5554E-04	2.4556E-01	2.4582E-01
		10.5	9.9761E-05	2.7656E-01	2.7666E-01
		Averaged	7.9866E-04	2.5527E-01	2.5607E-01
3	1073.15	3.5	1.0260E-05	1.9674E-01	1.9675E-01
		7.0	8.1205E-06	1.2462E-01	1.2463E-01
		10.5	5.0214E-06	2.0493E-01	2.0493E-01
		Averaged	4.7095E-05	1.9394E-01	1.9399E-01
4	1273.15	3.5	8.6278E-06	1.8406E-01	1.8407E-01
		7.0	8.2199E-06	1.5683E-01	1.5684E-01
		10.5	5.1896E-06	2.3984E-01	2.3984E-01
		Averaged	4.9525E-05	2.0646E-01	2.0651E-01

ตารางที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของอุณหภูมิ  
กระบวนการที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Temperature (K)	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	298.15	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
2	773.15	3.5	3.0731E-04	2.9241E-01	2.9272E-01
		7.0	2.0373E-04	2.3756E-01	2.3776E-01
		10.5	1.0053E-04	2.6477E-01	2.6487E-01
		Averaged	7.8924E-04	2.7345E-01	2.7424E-01
3	1073.15	3.5	1.0797E-05	2.2908E-01	2.2909E-01
		7.0	6.8251E-06	1.2124E-01	1.2125E-01
		10.5	4.4628E-06	2.0001E-01	2.0001E-01
		Averaged	4.3913E-05	2.1379E-01	2.1384E-01
4	1273.15	3.5	8.8787E-06	2.1502E-01	2.1503E-01
		7.0	6.9093E-06	1.5978E-01	1.5979E-01
		10.5	4.7946E-06	2.2148E-01	2.2149E-01
		Averaged	3.9187E-05	2.1980E-01	2.1984E-01

#### 4.17 ความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์

ในส่วนนี้ได้ทำการศึกษาผลของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ ซึ่งเป็นความดันภายนอกในระบบบริเวณทางออกว่าจะส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในระบบหรือไม่ จึงได้ทำการเลือกค่าความดันบริเวณทางออกมาทั้งสิ้น 3 ค่า มีค่าเท่ากับ 0.5, 1.0 และ 2.0 บรรยากาศ

ผลของความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้ถูกแสดงไว้ในภาพที่ 4.152 และ 4.153 ตามลำดับ ผลการจำลองดูเหมือนว่า ความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันไม่ส่งผลให้ความดันลดภายในท่อไรเซอร์แตกต่างกัน ทั้งในทิศทาง  $x$  และ  $y$  โดยกราฟมีลักษณะซ้อนทับกันนั่นเอง

ภาพที่ 4.154 และ 4.155 แสดงผลการจำลองปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ผลในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ไม่ส่งผลต่อระบบเช่นเดียวกัน ทั้งในทิศทาง  $x$  และทิศทาง  $y$

ผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.156 และ 4.157 ตามลำดับ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่ต่างกันไม่ส่งผลให้สัดส่วนปริมาตรของแข็งมีค่าต่างกัน สอดคล้องกับความดันลดที่เกิดขึ้น

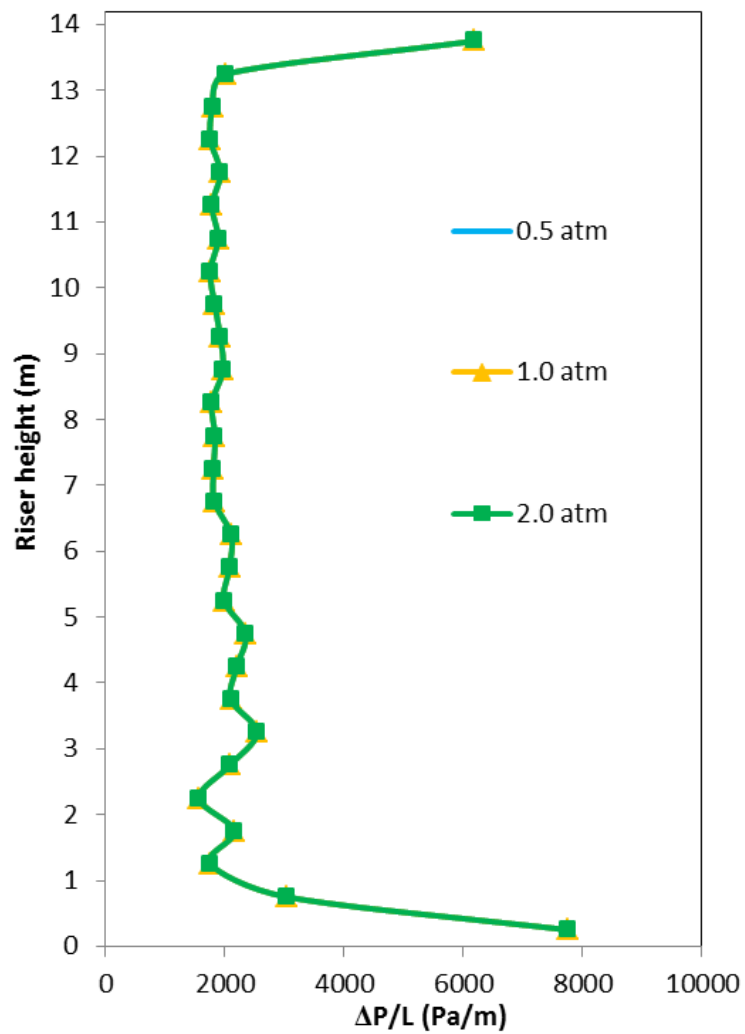
ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกันทั้งทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.158 และ 4.159 ตามลำดับ ผลการจำลองส่วนนี้ดูพบว่าความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่ต่างกันไม่ทำให้ความเร็วของแข็งตามแนวแกนแตกต่างกัน (กราฟเป็นเส้นเดียวกัน)

ภาพที่ 4.160 แสดงคอนทัวร์ของผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่แตกต่างกัน จากภาพคอนทัวร์ทั้งสามพบว่า ผลของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์จะไม่แตกต่างกันเลย และเมื่อพิจารณาร่วมกับภาพที่ 4.143 ที่แสดงในระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร พบว่า เป็นเช่นเดียวกัน

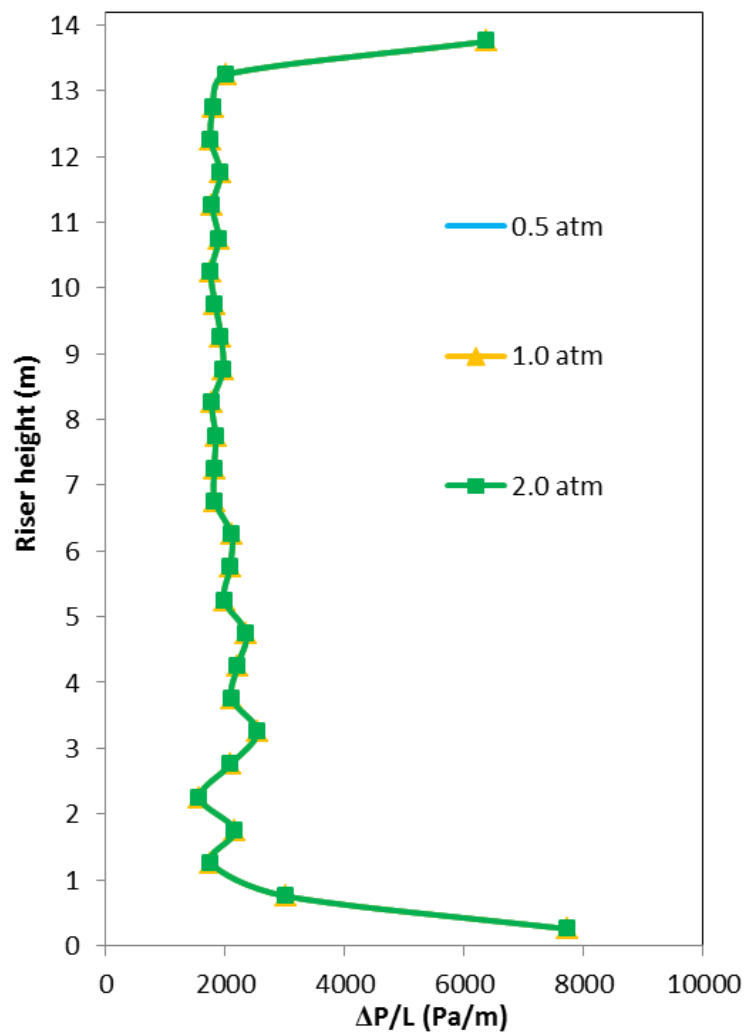
ผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ค่าต่างๆ ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ได้แสดงไว้ในตารางที่ 25 และ 26 ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ จากตาราง พบว่า ผลของค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบเทอร์วิบลอนที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์แบบลามินาร์ ในทุกค่าของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์สาเหตุที่นั่นดังที่ได้เคยกล่าวไว้ในตัวผลของตัวแปรที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของ

ความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีต่ออุณหภูมิแกรนูลาร์ พบว่า ที่ค่าของอุณหภูมิแกรนูลาร์มีค่าใกล้เคียงกัน หรือต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น แสดงถึงความไม่แตกต่างกันของผลความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ ในส่วนผลของทิศทาง  $y$  ที่ได้แสดงในตารางที่ 26 พบว่า มีความสอดคล้องในทิศทาง  $x$  เช่นเดียวกัน

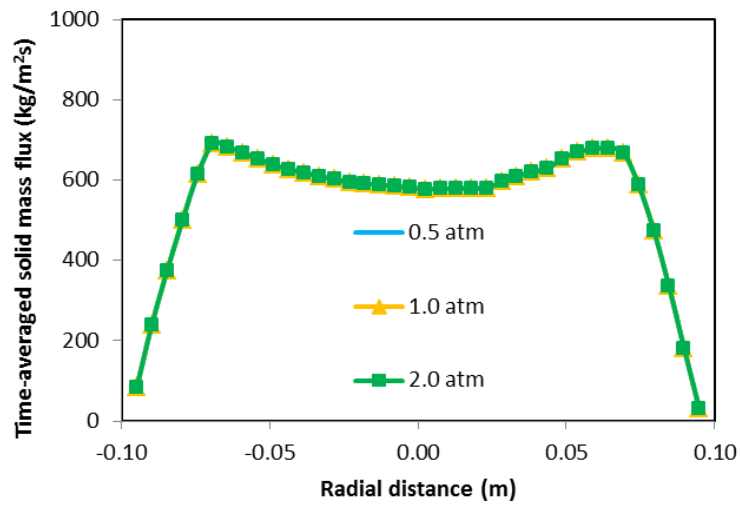
ในส่วนของผลความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ พบว่า ไม่มีความแตกต่างของผลการจำลอง ไม่ว่าจะใช้ความดันเท่าไร เนื่องจาก ระบบที่ทำการวิจัยเป็นระบบที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีศึกษาเพียงอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น ผลของความดันจึงไม่ส่งผล แต่ถ้าเป็นระบบที่ใส่ปฏิกิริยาเคมี ผลของความดันจะส่งผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในระบบ



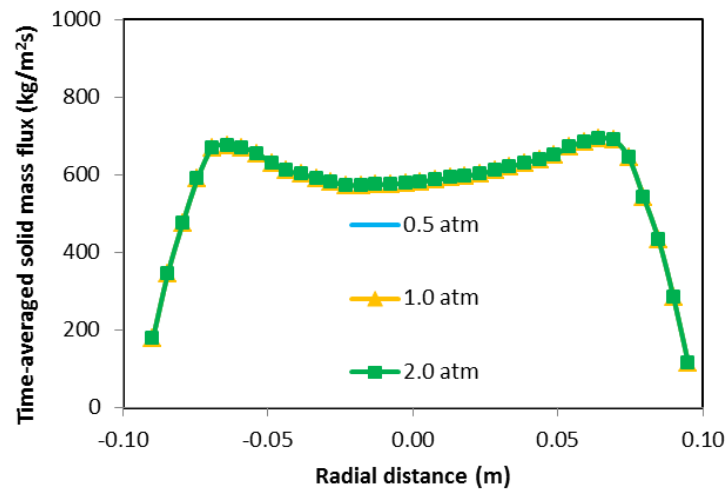
ภาพที่ 4.152 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



ภาพที่ 4.153 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y

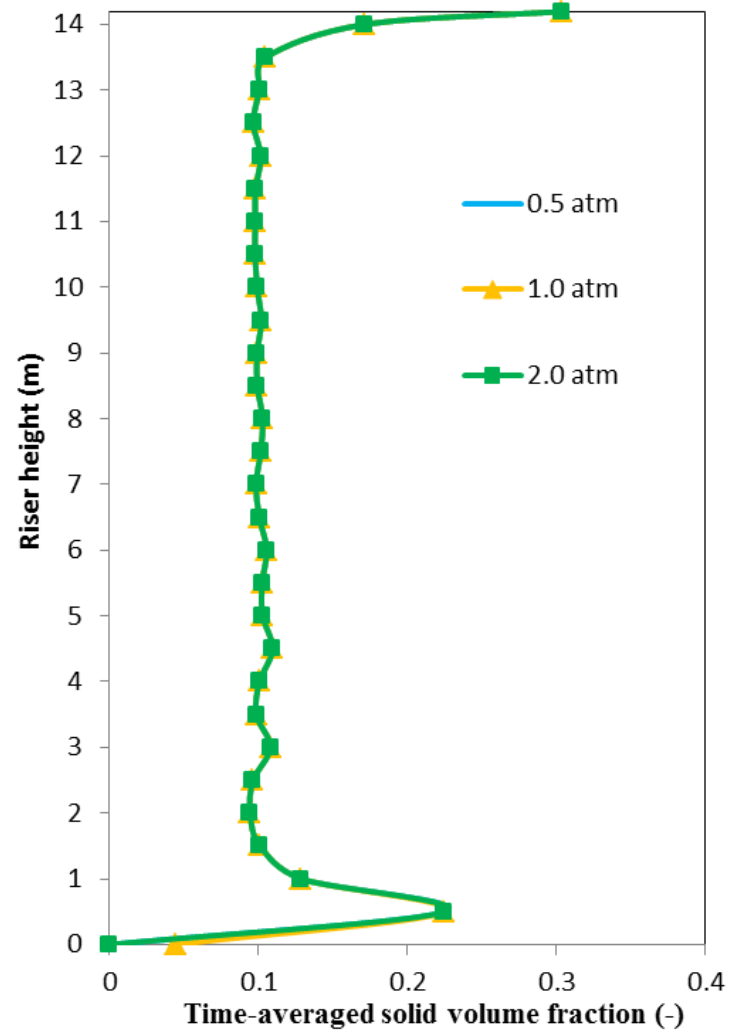


ภาพที่ 4.154 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความดันบริเวณทางออกของท่อโรเซอรัที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x

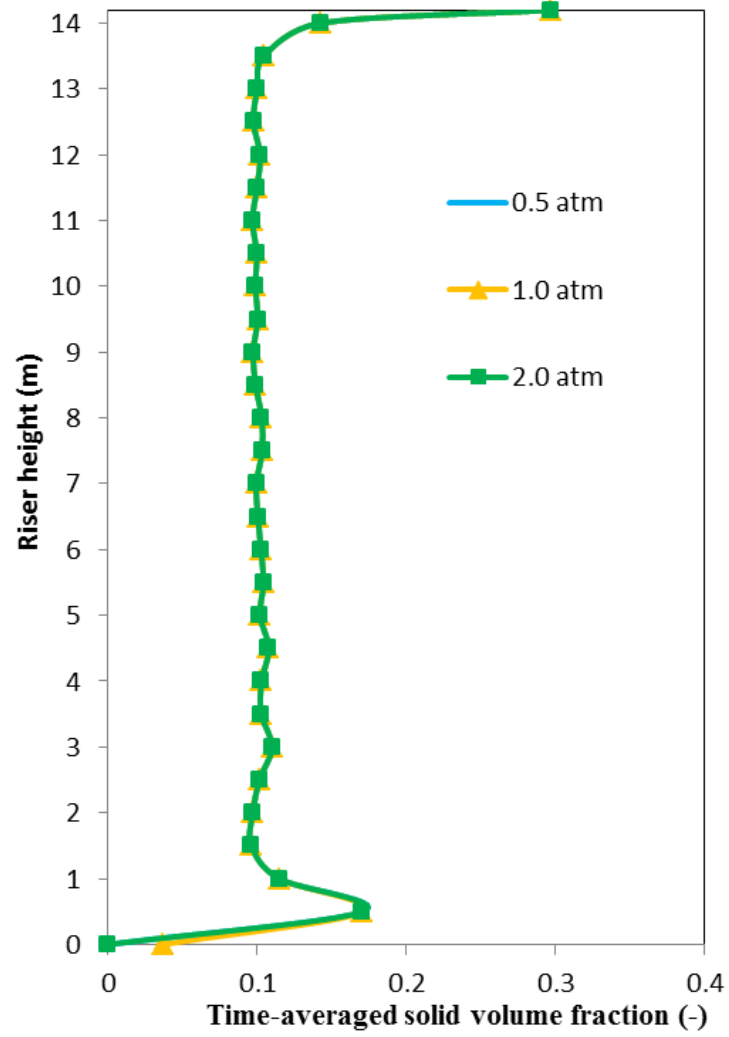


ภาพที่ 4.155 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร ของความดันบริเวณทางออกของท่อโรเซอรัที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y

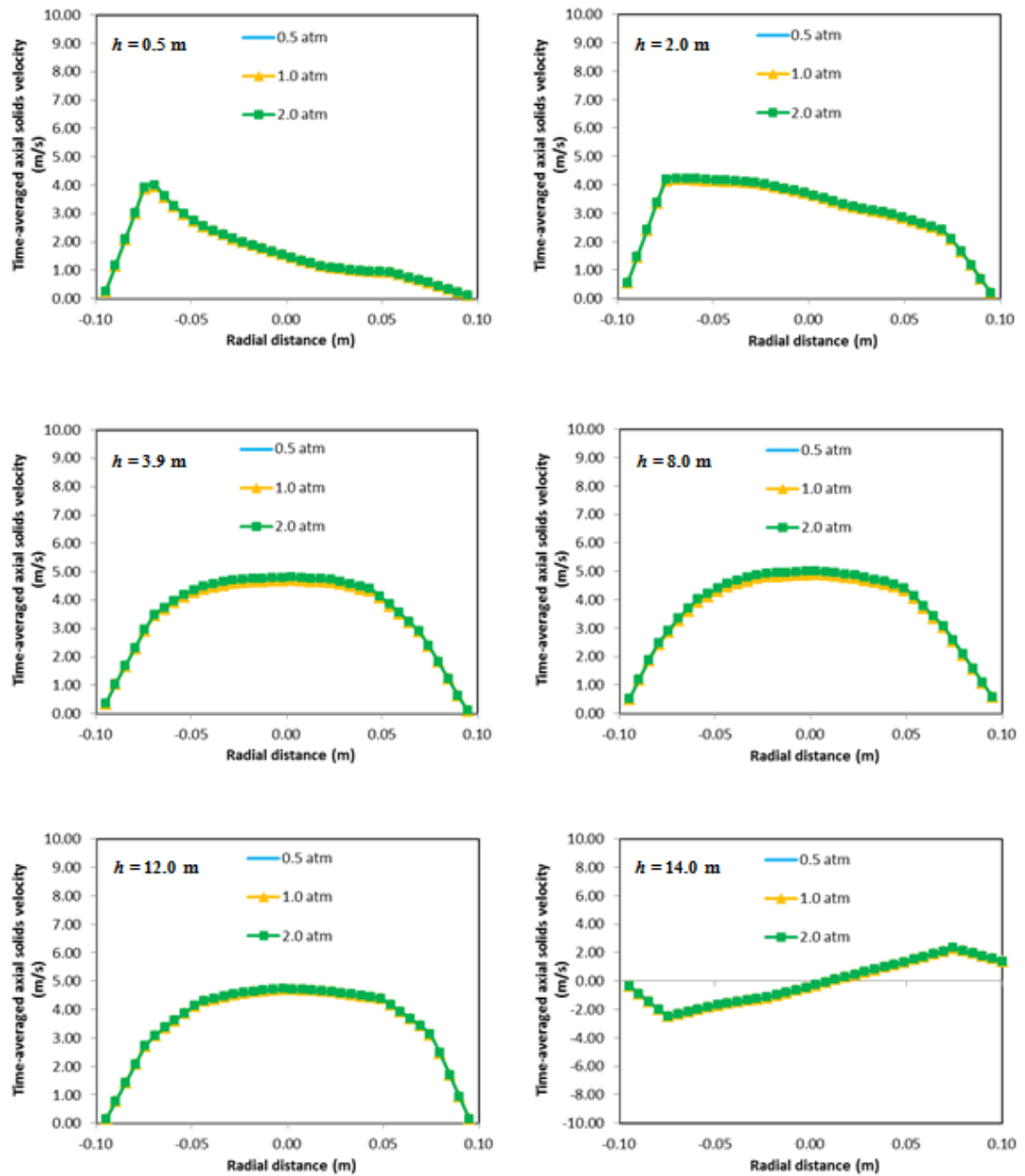




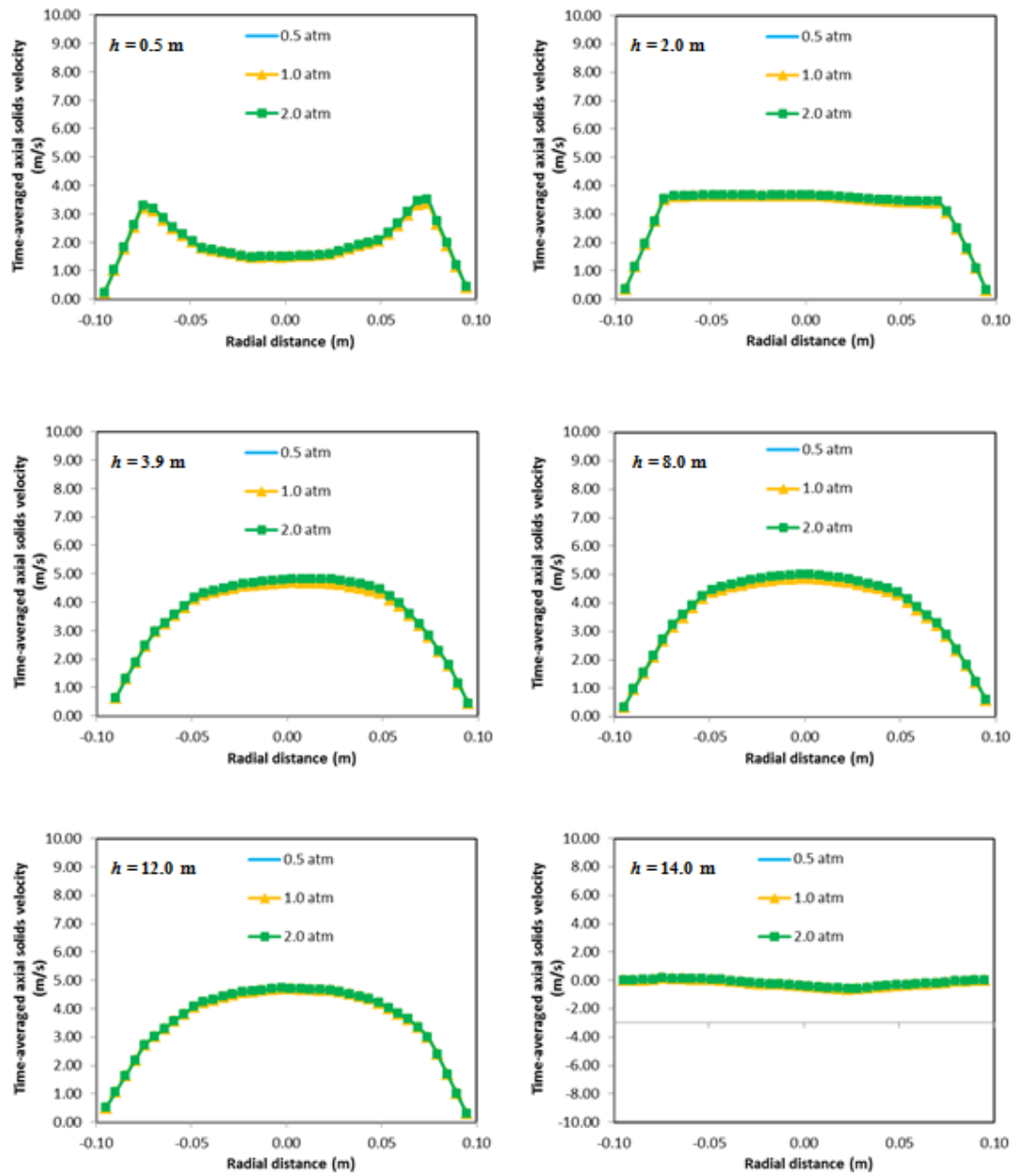
ภาพที่ 4.156 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง x



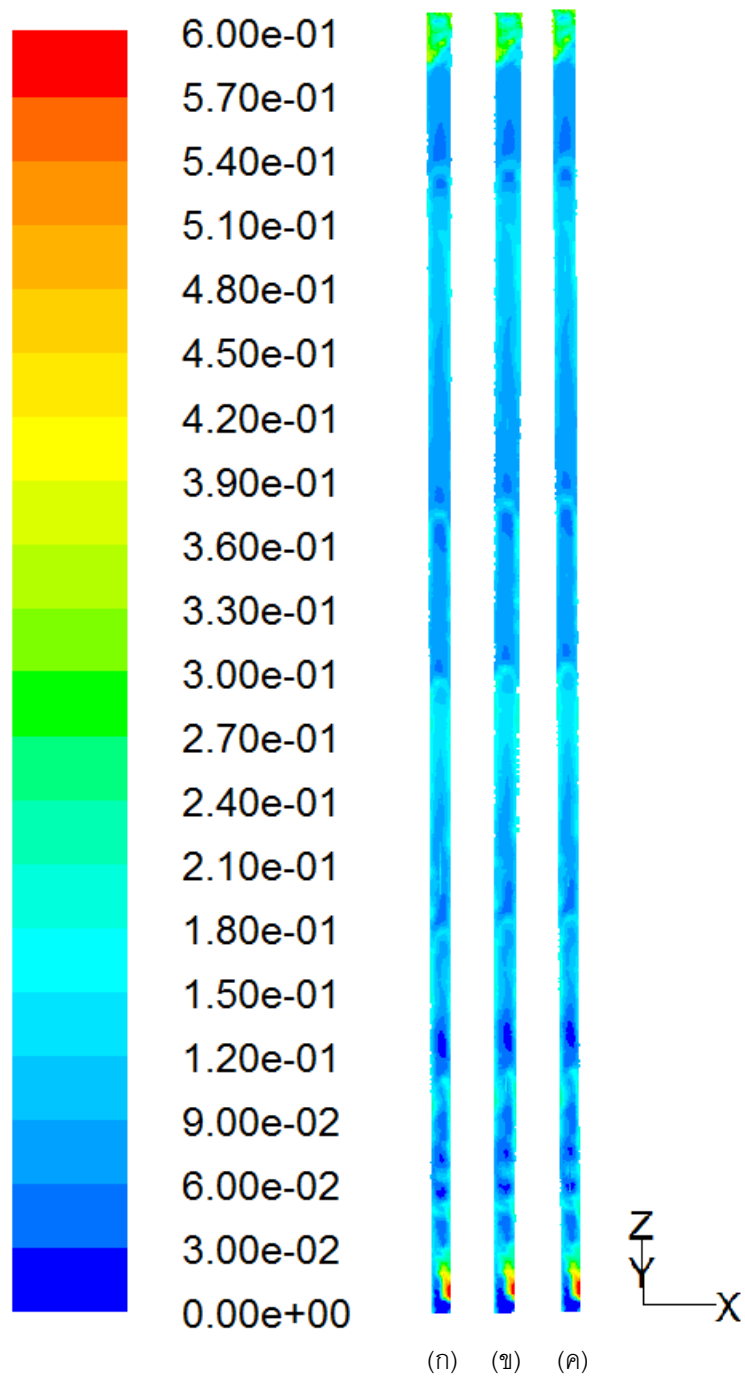
ภาพที่ 4.157 ผลการจำลองสัดส่วนปริมาตรของแข็งเฉลี่ยในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง y



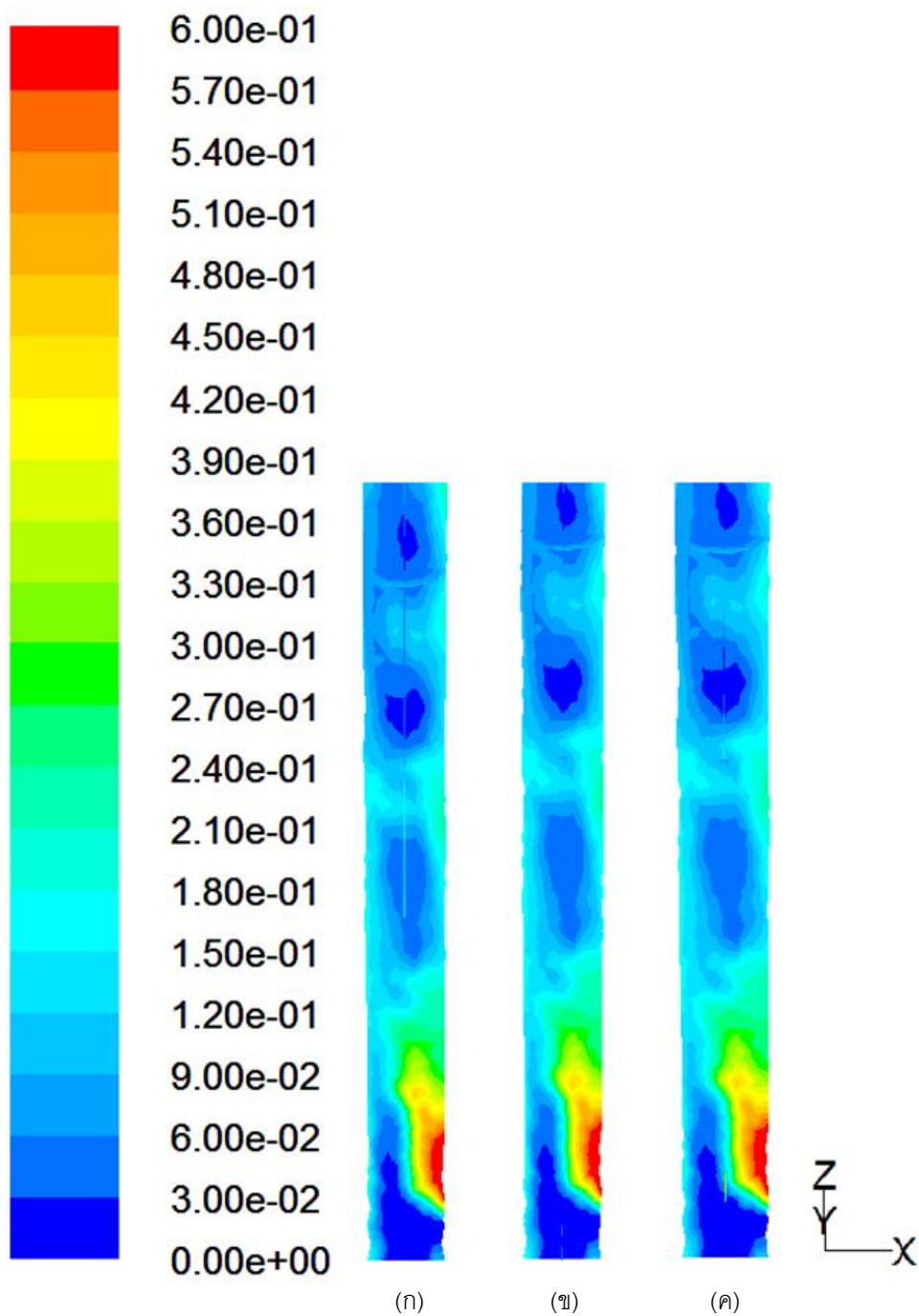
ภาพที่ 4.158 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความดันบริเวณทางออกของท่อโรเตอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $x$



ภาพที่ 4.159 ผลการจำลองความเร็วของแข็งตามแนวแกนเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ระดับความสูงที่ต่างกันของความดันบริเวณทางออกของท่อโรเตอร์ที่มีค่าแตกต่างกันในทิศทาง  $y$



ภาพที่ 4.160 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของแข็งในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกัน โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 0.5 (ข) 1.0 และ (ค) 2.0 บรรยากาศ



ภาพที่ 4.161 ภาพคอนทัวร์แสดงผลสัดส่วนปริมาตรของเชิงในท่อไรเซอร์ของความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.9 เมตร โดยมีค่าเท่ากับ (ก) 0.5 (ข) 1.0 และ (ค) 2.0 บรรยากาศ

ตารางที่ 4.25 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความดันบริเวณทางออกของท่อโรเตอร์ที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง x

No.	Pressure outlet (atm)	Height (m)	Granular temperature ( $m^2/s^2$ )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	0.5	3.5	1.1007E-05	2.7183E-01	2.7184E-01
		7.0	8.9586E-06	2.5123E-01	2.5124E-01
		10.5	5.7382E-06	5.0493E-01	5.0494E-01
		Averaged	3.6840E-05	3.4666E-01	3.4670E-01
2	1.0	3.5	1.0413E-03	2.7193E-01	2.7298E-01
		7.0	9.1834E-04	2.5124E-01	2.5216E-01
		10.5	1.2111E-03	5.0493E-01	5.0614E-01
		Averaged	4.3934E-03	3.4653E-01	3.5092E-01
3	2.0	3.5	1.2162E-05	3.8690E-01	3.8692E-01
		7.0	8.8331E-06	2.7872E-01	2.7873E-01
		10.5	5.5474E-06	5.4837E-01	5.4838E-01
		Averaged	4.6178E-05	4.0155E-01	4.0160E-01

ตารางที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิแกรนูลาร์ที่แตกต่างกันของความดันบริเวณทางออกของท่อโรเตอร์ที่มีค่าแตกต่างกัน ที่ระดับความสูงเท่ากับ 3.5, 7.0 และ 10.5 เมตร ในทิศทาง y

No.	Pressure outlet (atm)	Height (m)	Granular temperature (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )		
			Laminar	Turbulent	Total
1	0.5	3.5	1.1643E-05	2.5077E-01	2.5078E-01
		7.0	7.6495E-06	2.3830E-01	2.3831E-01
		10.5	5.4585E-06	4.8125E-01	4.8126E-01
		Averaged	5.7932E-05	3.5969E-01	3.5975E-01
2	1.0	3.5	1.4014E-03	2.5073E-01	2.5213E-01
		7.0	7.7762E-04	2.3831E-01	2.3909E-01
		10.5	1.0475E-03	4.8126E-01	4.8230E-01
		Averaged	4.7041E-03	3.5987E-01	3.6457E-01
3	2.0	3.5	1.3501E-05	3.7167E-01	3.7168E-01
		7.0	7.4406E-06	2.6421E-01	2.6421E-01
		10.5	4.8970E-06	5.2217E-01	5.2217E-01
		Averaged	5.5922E-05	4.1929E-01	4.1934E-01



#### 4.18 เปรียบเทียบการจำลองในระบบสามมิติกับระบบสองมิติ

ในส่วนนี้ได้นำข้อมูลผลของตัวแปรแบบจำลอง (Modeling parameters) ที่ได้ศึกษาในก่อนหน้านี้นำมาใช้ในการจำลองในระบบสามมิติ โดยผลของตัวแปรที่ใช้ประกอบด้วย แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคของ EMMS ค่า Specularity coefficient เท่ากับ 0.5 ค่า Restitution coefficient เท่ากับ 0.95 ค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าเท่ากับ 0.001 ความหนืดเสียดทานใช้แบบ No frictional viscosity และแบบจำลองความหนืดแบบลามินาร์ นอกจากนี้ยังใช้ผลรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้ารูปแบบที่ 6 (รูปร่างความเร็วของการป้อนแก๊สมีลักษณะเป็นแบบเทอร์บิวเลนต์) มีความเร็วแก๊สเข้าเท่ากับ 5.20 เมตรต่อวินาที ปริมาณฟลักซ์ของแข็งเท่ากับ 489 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที ใช้ขนาดทางออกของท่อโรเซออร์เท่ากับ 0.10 เมตร โดยมีความดันบริเวณทางออกเท่ากับ 1.0 บรรยากาศ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่ใช้มีขนาด 76 ไมโครเมตร ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง 1,712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอุณหภูมิในกระบวนการที่ใช้ในการจำลองเท่ากับ 298.15 เคลวิน ผลการจำลองที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) อันได้แก่ ผลของความดันลดภายในท่อโรเซออร์ ผลของปริมาณฟลักซ์ของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตร และผลของความหนาแน่นของของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตร

ภาพที่ 4.162 และ 4.163 แสดงผลของความดันลดเฉลี่ยภายในท่อโรเซออร์ในการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ผลที่ได้ พบว่า แบบจำลองในระบบสามมิติสามารถทำนายความดันลดได้ถูกต้องตามหลักอุทกพลศาสตร์ คือ ความดันลดมีค่าสูงบริเวณด้านล่าง จากนั้นค่อยๆ ลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น และความดันจะสูงอีกครั้งบริเวณทางออกของท่อโรเซออร์ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองและผลการจำลองในระบบสองมิติ อย่างไรก็ตามบริเวณด้านล่างของท่อโรเซออร์ทั้งระบบสองมิติและสามมิติยังทำนายผลความดันลดน้อยกว่าข้อมูลการทดลองเล็กน้อย ในด้านความแตกต่างของระบบสองมิติและสามมิตินั้นพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ยกเว้นที่บริเวณด้านบนของท่อโรเซออร์ที่การจำลองในระบบสองมิติทำนายผลความดันลดได้มากกว่า ผลที่ได้สอดคล้องกันในทั้งทิศทาง x และทิศทาง y

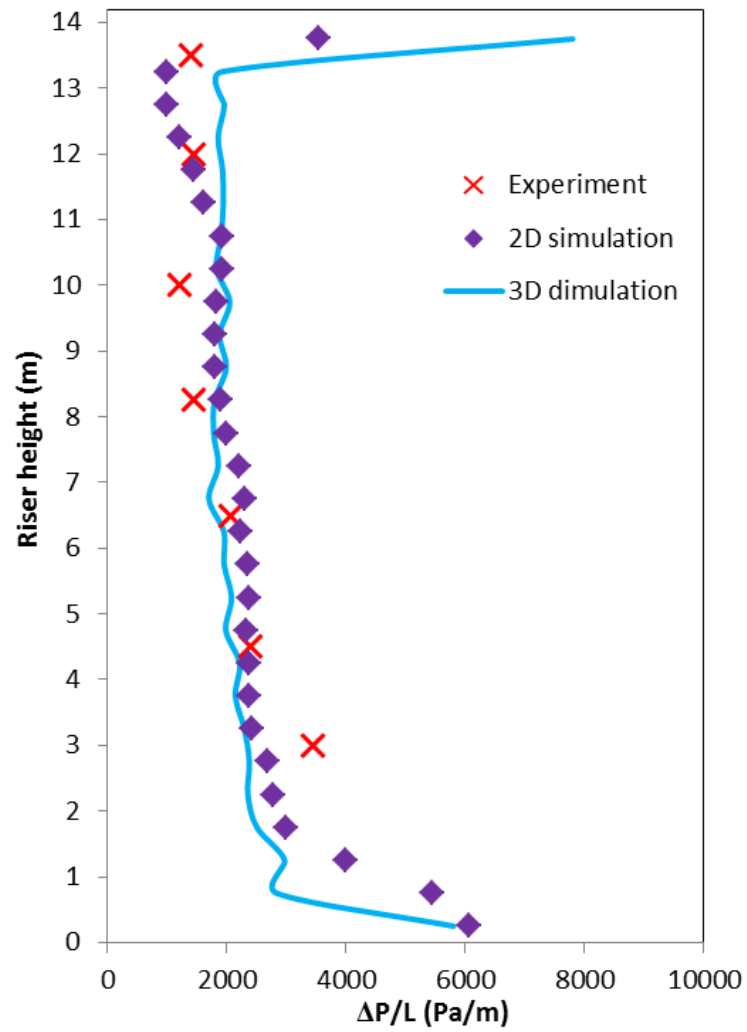
การจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรของการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการ

จำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้แสดงในภาพที่ 4.164 และ 4.165 ตามลำดับ ผลการจำลอง พบว่า การจำลองในระบบสามมิติทำนายปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งบริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง และผลการจำลองในระบบสองมิติ แต่ยังมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อยเนื่องจาก ในระบบสามมิติจะพิจารณามิติความลึกซึ่งเป็นส่วนด้านหน้าและด้านหลังของท่อไรเซอร์ ดังนั้น ของแข็งจึงมีโอกาสเคลื่อนที่ไปตกบริเวณด้านหน้ากับด้านหลังของท่อไรเซอร์นอกจากบริเวณด้านข้างด้วย ส่งผลให้ปริมาณของแข็งบริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์จึงลดลงนั่นเอง ผลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Briongos และ Guardiola (2005) และ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2011) ดังที่ได้เคยกล่าวไป นอกจากนี้ยังพบว่า บริเวณผนังยังไม่สามารถทำนายการตกกลับของอนุภาคของแข็งได้ดีเท่าที่ควร สาเหตุอาจเกิดจาก ในระบบฟลูอิดเซชันมีความปั่นป่วนของระบบอยู่ ดังนั้นผลการจำลองจึงแสดงทั้งการตกกลับของอนุภาคของแข็ง และผลการจำลองที่ไม่แสดงการตกกลับของอนุภาคของแข็ง แต่เมื่อนำผลมาวิเคราะห์จำเป็นต้องทำการหาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งๆ ที่อยู่ในภาวะเสมือนคงตัว ทำให้ผลการจำลองแสดงผลของส่วนที่ไม่แสดงการตกกลับของอนุภาคของแข็งซึ่งเมื่อเฉลี่ยแล้วมีมากกว่าผลของส่วนที่แสดงการตกกลับของอนุภาคของแข็ง ดังนั้นจึงไม่สามารถเห็นการตกกลับของอนุภาคของแข็งบริเวณผนังได้นั่นเอง

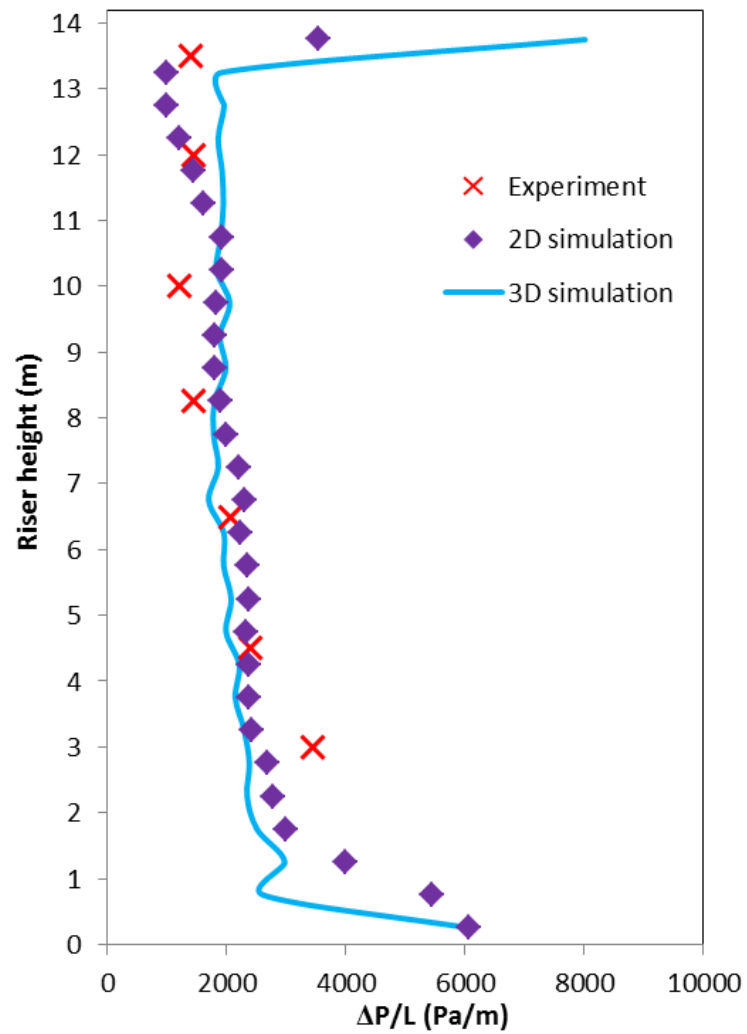
ผลของความหนาแน่นของของแข็งในแนวรัศมีที่ความสูงเท่ากับ 3.90 เมตรของการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.166 และ 4.167 ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่า การจำลองในระบบสามมิติสามารถทำนายความหนาแน่นของของแข็งภายในระบบได้ อย่างไรก็ตาม ทั้งผลการจำลองในระบบสองมิติและสามมิติ ผลที่ได้มีความแตกต่างจากข้อมูลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) โดยเฉพาะบริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์ค่อนข้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับผลปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งเฉลี่ยข้างต้น ถึงแม้เลือกจากที่ความสูงเดียวกัน สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เกิดจากผลของปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งคำนวณมาโดย ความเร็วของแข็งตามแนวแกน สัดส่วนปริมาตรของแข็ง และความหนาแน่นของของแข็ง ซึ่งผลของความเร็วจริงของแข็งตามแนวแกนส่งผลให้ค่าปริมาณพลั๊กซ์ของแข็งทั้งในระบบสองมิติและสามมิติมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง ส่วนผลความหนาแน่นของของแข็งคำนวณมาโดย สัดส่วนปริมาตรของแข็ง และความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งเพียงอย่างเดียว ซึ่งในข้อมูลการทดลองจริงของ Knowlton และคณะ (1995) ไม่ได้แสดงรายละเอียดว่ามีค่าเท่าไร บันทึกด้วยมุม

เท่าไร อีกทั้งในการทดลองจริงการบันทึกค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งและความเร็วของของแข็งจะไม่สามารถกระทำพร้อมกันได้ ค่าที่ได้จึงเป็นคนละช่วงเวลา แต่ในการจำลองค่าเหล่านี้มาจากช่วงเวลาเดียวกัน ส่งผลให้ในการจำลองค่าที่ได้จึงไม่ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลองนั่นเอง นอกจากนี้ยังพบความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยบริเวณผนังที่ไม่แสดงการตกกลับของอนุภาคของแข็ง ซึ่งเกิดจากผลจากการหาค่าเฉลี่ยดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น

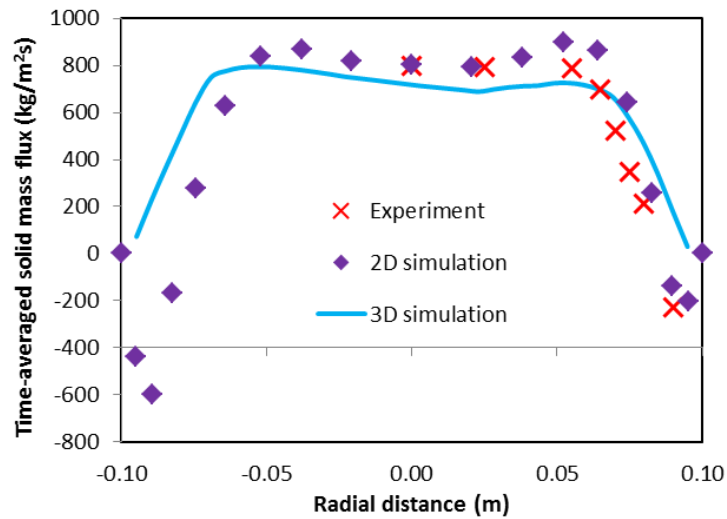
โดยสรุปแล้วการจำลองในระบบสามมิติให้ผลการจำลองใกล้เคียงกันกับในระบบสองมิติ ดังนั้นในทางปฏิบัติการจำลองในระบบสองมิติอาจเพียงพอที่จะอธิบายอุทกพลศาสตร์ภายในระบบที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ระบบที่ทำการศึกษากลับมาเป็นระบบท่อไรเซอร์ที่มีการป้อนเข้าแบบไม่สมมาตร สังเกตว่าผลการจำลองในระบบสามมิติมีความแตกต่างกันในทิศทาง  $x$  และ  $y$  เนื่องจากผลการป้อนเข้าที่ไม่สมมาตร ซึ่งจะไม่สามารถสังเกตเห็นในการจำลองในระบบสองมิติได้ นอกจากนี้ ถ้าจะทำการจำลองในระบบสองมิติจำเป็นต้องทำให้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในรูปร่างที่แตกต่างจากเครื่องปฏิกรณ์จริง หรือรูปร่างที่ง่ายในการจำลอง เพื่อให้สามารถจำลองได้ จึงอาจส่งผลต่อการอธิบายอุทกพลศาสตร์ภายในระบบได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ถ้าระบบเครื่องปฏิกรณ์มีการป้อนเข้าแบบสมมาตร การจำลองในระบบสองมิติก็น่าจะเพียงพอ ต่อการอธิบายอุทกพลศาสตร์ภายในระบบ แต่ถ้าระบบเครื่องปฏิกรณ์มีการป้อนเข้าแบบไม่สมมาตร การจำลองในระบบสามมิติจะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า เนื่องจากให้ข้อมูลที่ถูกต้องของผลความไม่สมมาตร และเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะที่เหมือนเครื่องปฏิกรณ์จริงมากกว่า



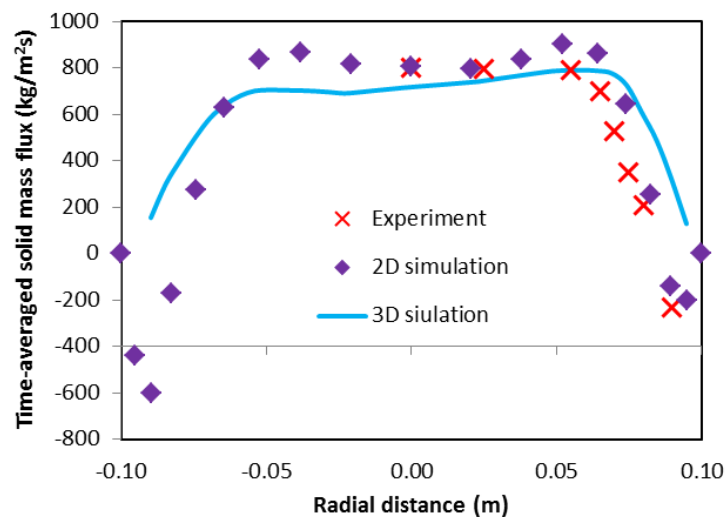
ภาพที่ 4.162 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของการจำลองระบบสามมิติ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติ จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



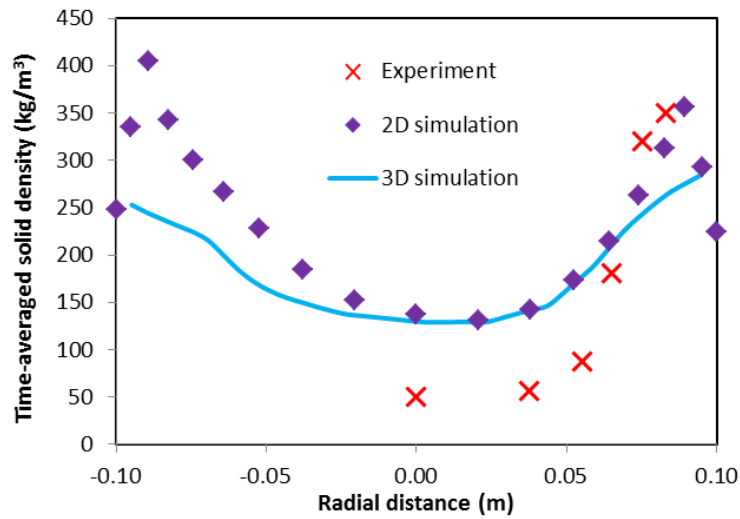
ภาพที่ 4.163 ผลการจำลองความดันลดเฉลี่ยภายในท่อไรเซอร์ของการจำลองระบบสามมิติ เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติ จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalermssinuwาน และคณะ (2009) ในทิศทาง y



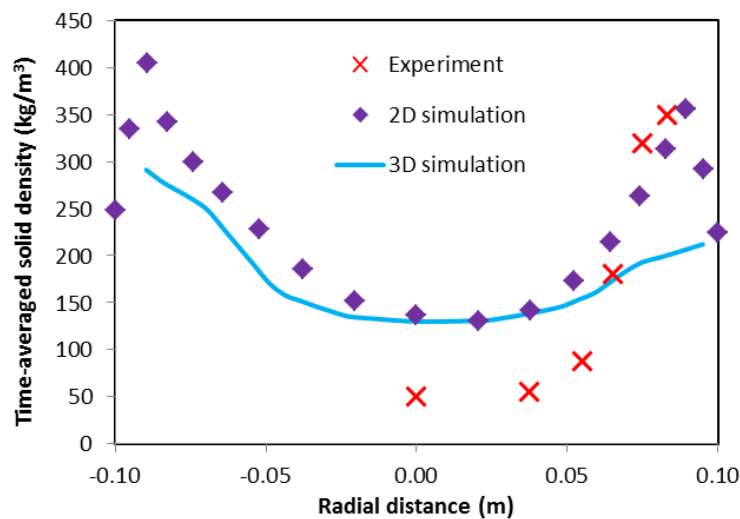
ภาพที่ 4.164 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรของการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.165 ผลการจำลองปริมาณฟลักซ์ของแข็งเฉลี่ยในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.9 เมตรของการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y



ภาพที่ 4.166 ผลการจำลองความหนาแน่นของของแข็งในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.90 เมตรของการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง x



ภาพที่ 4.167 ผลการจำลองความหนาแน่นของของแข็งในแนวรัศมีที่มีความสูงเท่ากับ 3.90 เมตรของการจำลองระบบสามมิติเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ในทิศทาง y

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ร่วมกับแนวคิดแบบออยเลอร์-ออยเลอร์ (Eulerian-Eulerian method) และทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็ง (KTGF) จำลองภาวะท่อโรเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนในระบบสามมิติ แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลจากการทดลองจริงและผลจากแบบจำลองภาวะในระบบสองมิติ จากนั้นทำการศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ (Designing parameters) ตัวแปรแบบจำลอง (Modeling parameters) และตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters) ต่างๆ ที่สำคัญต่อ อุทกพลศาสตร์ภายในเครื่องปฏิกรณ์

##### 5.1.1 การศึกษาผลของตัวแปรออกแบบ (Designing parameters)

ตัวแปรออกแบบที่ได้ทำการศึกษาในที่นี้คือ รูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้า และขนาดทางออกของท่อโรเตอร์ โดยรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าสามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้ 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 (รูปแบบที่ 1-4) คือ กลุ่มที่ปรับเปลี่ยนพื้นที่ช่องเปิดของทางเข้า และกลุ่มที่ 2 คือ กลุ่มที่ปรับเปลี่ยนลักษณะรูปร่างความเร็วการป้อนเข้า ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าสำหรับกลุ่มที่ 1 เมื่อระบบมีเปอร์เซ็นต์การเปิดช่องว่างของทางเข้าเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งภายในระบบมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเปอร์เซ็นต์การเปิดช่องว่างทางเข้าเพิ่มขึ้น แก๊สที่ป้อนเข้าก็จะเพิ่มขึ้นต่อพื้นที่หน้าตัด ดังนั้นสามารถพาดูภาคของแข็งออกจากระบบได้มากกว่า จึงมีของแข็งในระบบน้อยกว่านั่นเอง ส่วนสำหรับกลุ่มที่ 2 พบว่า รูปร่างความเร็วการป้อนเข้าที่ต่างกันไม่ส่งผลให้อุทกพลศาสตร์ภายในระบบต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อระบบมีรูปร่างความเร็วการป้อนเข้าที่ปานกลาง หรือ รูปร่างความเร็วมีลักษณะเป็นแบบปั่นป่วน จะมีปริมาณของแข็งในระบบลดลง เนื่องจาก เป็นไปได้ว่าแก๊สสามารถพาดูภาคของแข็งออกจากระบบได้สะดวกกว่าระบบที่รูปแบบความเร็วมีลักษณะเป็นแบบลามินาร์

ในด้านขนาดทางออกของท่อโรเตอร์ที่ต่างกันนั้นพบว่า ระบบที่ใช้ขนาดทางออกของท่อโรเตอร์ที่มีขนาดเล็ก จะมีปริมาณของแข็งในระบบสูงกว่าระบบที่ขนาดทางออกของท่อโรเตอร์มีขนาดใหญ่ เนื่องจากขนาดทางออกที่เล็กส่งผลให้ของแข็งออกสู่ระบบได้ยาก ดังนั้นของแข็งจึงตกกลับลงมาอยู่ภายในระบบมากกว่านั่นเอง นอกจากนี้ที่ขนาดของทางออกของท่อโรเตอร์เท่ากับ



0.025 เมตร จะเห็นถึงการตกกลับของของแข็งบริเวณด้านข้างฝั่งเดียวกันกับที่ตั้งของทางออกได้ชัดเจน ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ De Wilde และคณะ (2003) ที่ได้ศึกษาผลของขนาดทางออกในระบบสามมิติแล้วพบว่า ทางออกที่มีขนาดเล็กจะมีโอกาสที่ของแข็งจะออกจากระบบได้ยากและตกกลับลงมาด้านตรงข้ามของทางออก สาเหตุที่ต่างกันอาจเนื่องมาจากในงานวิจัยนี้มีขนาดเครื่องปฏิกรณ์ที่เล็กกว่า และขนาดทางออกที่เล็กมาก ส่งผลให้อนุภาคของแข็งออกจากระบบได้ยากกว่าจึงมีโอกาสตกกลับมาฝั่งเดียวกับทางออกมากกว่าฝั่งตรงข้ามเล็กน้อย

### 5.1.2 การศึกษาผลของตัวแปรแบบจำลอง (Modeling parameters)

ตัวแปรแบบจำลองที่ได้ทำการศึกษาในส่วนนี้ประกอบด้วย แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค ค่า Specularity coefficient ค่า Restitution coefficient แบบจำลองความหนืด ความหนืดเสียดทาน อุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้า และ สัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบ โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบอย่างชัดเจนได้แก่ แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค และอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้า ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบเล็กน้อยได้แก่ ค่า Specularity coefficient ค่า Restitution coefficient แบบจำลองความหนืด และความหนืดเสียดทาน ส่วนผลของสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบไม่ส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ภายในระบบแต่อย่างใด

ในส่วนแรกจะกล่าวถึงตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบอย่างชัดเจนก่อน คือ แบบจำลองแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาค และอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้า แบบจำลองต้านการเคลื่อนที่ระหว่างวัฏภาคที่ต่างกันส่งผลให้อุทกพลศาสตร์ต่างกันด้วย ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ EMMS ที่พัฒนามาจากแนวคิดการเกิดกลุ่มก้อนอนุภาค (Cluster) ที่เกิดขึ้นในระบบ สามารถทำนายปริมาณของแข็งที่มีอยู่ในระบบได้มากกว่าเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นที่ไม่มีการคิดผลของการเกิดกลุ่มก้อนอนุภาคและเป็นแบบจำลองที่คิดมาจากระบบที่เจือจาง ส่งผลให้ทำนายความดันลดภายในท่อไรเซอร์ได้สูงกว่า นอกจากนี้แบบจำลองของ EMMS ยังให้ผลการจำลองสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากกว่าแบบจำลองอื่นอีกด้วย

อุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าของอนุภาคของแข็งคือ พลังงานจลน์ภายใน หรือความเร็วกวัดแกว่งของอนุภาคของแข็งที่ป้อนเข้าสู่ระบบในภาวะเริ่มต้นของกระบวนการ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ระบบที่มีอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าค่าต่ำๆ จะมีปริมาณของแข็งบริเวณด้านล่างมากกว่าระบบที่มีอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าค่าสูง เนื่องจากว่าระบบที่มีอุณหภูมิแกรนูลาร์ชาเข้าค่าต่ำอนุภาคของแข็งมีพลังงานน้อยส่งผลให้เคลื่อนที่ไปด้านบนของท่อไรเซอร์ช้ากว่าเมื่อเทียบกับอนุภาคที่มีพลังงานสูง ดังนั้น ของแข็งจึงกองอยู่บริเวณด้านล่างมากกว่านั่นเอง และเมื่อค่า

อุณหภูมิแกรนูลาร์ซาเข้าเพิ่มขึ้นปริมาณของแข็งบริเวณด้านล่างก็จะลดลง โดยผลที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดเฉพาะบริเวณความสูงต่ำๆ เท่านั้น เนื่องจาก เป็นบริเวณที่บ่อนอนุภาคของแข็งเข้ามา และค่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ซาเข้าที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.001 เมตรกำลังสองต่อวินาทีกำลังสอง

ส่วนนี้จะกล่าวถึงตัวแปรที่ส่งผลต่อระบบบ้างเล็กน้อย อันประกอบด้วย ค่า Specularity coefficient ค่า Restitution coefficient แบบจำลองความหนืด และความหนืดเสียดทาน โดยผลการจำลองพบว่า ค่า Specularity coefficient ที่น้อยทำให้อนุภาคของแข็งตกลงบริเวณผนังมาก อีกนัยหนึ่งคือ บริเวณตรงกลางของท่อไรเซอร์ก็จะมีปริมาณของแข็งน้อยลงนั่นเอง และยังเพิ่มค่า Specularity coefficient ให้สูงขึ้นอนุภาคของแข็งก็จะตกบริเวณผนังลดลง และค่า Specularity coefficient เท่ากับ 0.5 ให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากที่สุด ในส่วนของค่า Restitution coefficient พบว่า ไม่ส่งผลต่อระบบแต่อย่างใด และค่าเท่ากับ 0.95 ให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลอง

ตัวแปรความหนืดเสียดทานที่ให้ผลสอดคล้องกับข้อมูลการทดลองมากที่สุดคือแบบ None หรือ ไม่คิดผลของแรงเสียดทานนั่นเอง เนื่องจาก การตั้งค่าแบบนี้นิยมใช้กับระบบฟลูอิดเซชันแบบปั่นป่วน หรือแบบความเร็วสูง ที่มีปริมาณของแข็งในระบบไม่สูงนัก ซึ่งเหมาะสมกับระบบที่ทำการศึกษา ในแง่อุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นนั้นพบว่า การตั้งค่าความหนืดเสียดทานแบบ Schaeffer ส่งผลให้มีปริมาณของแข็งในระบบที่สูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจาก การตั้งค่าความหนืดเสียดทานแบบ Schaeffer ใช้กับระบบที่มีปริมาณของแข็งสูง เช่น ฟลูอิดเซชันแบบฟองแก๊ส ดังนั้น จึงทำนายปริมาณของแข็งที่มีในระบบสูงกว่าความเป็นจริง อย่างไรก็ตามผลของความหนืดเสียดทานทั้งสองก็ไม่ได้ทำให้อุทกพลศาสตร์ภายในระบบแตกต่างกันมากนัก

ในงานวิจัยนี้พบว่าแบบจำลองความหนืดที่ต่างกันไม่ส่งผลให้ผลการจำลองต่างกัน ถึงแม้ในความเป็นจริงแบบจำลองความหนืดแบบลามินาร์จะเหมาะสมกว่า เนื่องจากในทฤษฎีจลน์การไหลของของแข็งจะมีการคิดผลของส่วนเทอร์บิวเลนซ์เข้ามาด้วยแล้ว จึงไม่จำเป็นต้องมีการคิดวิฏภาคแก๊สแบบเทอร์บิวเลนซ์อีก อย่างไรก็ตามการศึกษาในส่วนนี้ช่วยทำให้ได้รู้ว่าผลของแบบจำลองความหนืดไม่ส่งผลต่อระบบมากนัก สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Cloete และคณะ (2011)

อย่างที่ได้อธิบายไปตอนต้นแล้วว่า ตัวแปรสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของการจำลองขึ้น สาเหตุอาจเป็นไปได้ว่า ลักษณะการไหลในช่วงการไหล

ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง ดังเช่นในการจำลองนี้มีปริมาณสัดส่วนปริมาตรของแข็งไม่ถึงค่าสัดส่วนปริมาตรของแข็งสูงสุดในระบบนั่นเอง จึงทำให้ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงของตัวแปร

### 5.1.3 การศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการ (Operating parameters)

ตัวแปรดำเนินการที่ได้ทำการศึกษาประกอบด้วย ความเร็วแก๊สขาเข้า ปริมาณพลังค์ของแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง อุณหภูมิกระบวนการ และความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ โดยตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบอย่างชัดเจนประกอบไปด้วย ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ความเร็วแก๊สขาเข้า และปริมาณพลังค์ของแข็ง ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบเล็กน้อยได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง และ อุณหภูมิกระบวนการ ส่วนความดันบริเวณทางออกไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ

ผลของตัวแปรความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งได้ถูกศึกษา โดยทำการกำหนดขนาดของอนุภาคของแข็งไว้เท่ากับ 76 ไมโครเมตร เพื่อกำหนดให้อยู่ใน Geldart A ทั้งหมดแล้วทำการปรับค่าความหนาแน่นให้แตกต่างกัน ผลการจำลองพบว่า ระบบที่มีค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งสูง จะมีปริมาณของแข็งในระบบสูงกว่าระบบที่มีค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่มีค่าต่ำ เนื่องจาก ค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งที่สูงส่งผลให้อนุภาคของแข็งมีมวลมาก อนุภาคของแข็งจึงตกกลับลงมาได้มาก จึงอยู่ในระบบได้มากนั่นเอง และเมื่อลดความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งลง ปริมาณของแข็งก็จะลดลงตามไปด้วย

ผลของความเร็วแก๊สขาเข้าที่ต่างกันได้ถูกศึกษา โดยความเร็วที่เลือกมายังคงอยู่ในช่วงการไหลแบบความเร็วสูง ผลการจำลอง แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ความเร็วแก๊สขาเข้ามีค่าสูง ส่งผลให้ระบบมีแนวโน้มที่จะประทุติดัวเป็นระบบที่เจือจางมากขึ้น มีปริมาณของแข็งลดลง เนื่องจากอนุภาคของแข็งถูกพาออกไปจากระบบได้เร็วนั่นเอง

ปริมาณพลังค์ของแข็งที่ต่างกันส่งผลให้ระบบมีความแตกต่างกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่มีปริมาณพลังค์ของแข็งสูงจะมีปริมาณของแข็งในระบบที่สูงกว่าระบบที่มีปริมาณพลังค์ของแข็งต่ำ

ส่วนต่อไปจะได้กล่าวถึงตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อระบบเพียงเล็กน้อยอันได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง และ อุณหภูมิกระบวนการ ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็งที่ต่างกันไม่ส่งผลให้ระบบมีความแตกต่างกัน เนื่องจาก อาจเป็นเพราะอนุภาคยังอยู่ในกลุ่ม Geldart เดียวกันและความแตกต่างของช่วงที่เลือกมาอยู่ในช่วงที่แคบจึงไม่ส่งผลเท่าใดนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mastellone และ Arena (1999) อย่างไร

ก็ตาม Xu และ Zhu (2011) ค้นพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ต่างกันส่งผลให้อุณหภูมิศาสตร์ต่างกัน ถ้าช่วงที่เลือกศึกษาอยู่ใน Geldart ต่างกันหรือเลือกช่วงการศึกษาที่กว้างมากขึ้น

ส่วนผลของอุณหภูมิกระบวนการที่มีต่ออุณหพลศาสตร์ภายในระบบนั้นพบว่า ไม่ส่งผลให้ระบบแตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองแสดงให้เห็นแนวโน้มที่เกิดขึ้นว่า ระบบที่ใช้อุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าต่ำจะมีปริมาณของแข็งในระบบสูงกว่าระบบที่ใช้อุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าสูง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระบวนการขึ้น ปริมาณของแข็งในระบบก็จะมีค่าลดลง เนื่องจากว่า อุณหภูมิกระบวนการที่มีค่าสูงทำให้ความหนืดของวัฏภาคแก๊สสูงขึ้นด้วย ดังนั้น วัฏภาคแก๊สจึงพาอนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ออกจากระบบได้มากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณของแข็งในระบบมีน้อยกว่า ในส่วนของผลความดันบริเวณทางออกของท่อไรเซอร์ พบว่า ไม่มีความแตกต่างของผลการจำลอง ไม่ว่าจะใช้ความดันเท่าไร เนื่องจาก ระบบที่ทำการวิจัยเป็นระบบที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ศึกษาเพียงอุณหพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น ผลของความดันจึงไม่ส่งผล แต่ถ้าระบบมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น ผลของความดันจะส่งผลต่อปฏิกิริยาเคมีภายในระบบ

### 5.1.3 การเปรียบเทียบการจำลองในระบบสามมิติกับระบบสองมิติ

ในการจำลองภาวะของระบบ วิธีการคำนวณที่ใช้มีทั้งที่ทำในระบบสองมิติและระบบสามมิติ โดยข้อดีของการจำลองในระบบสองมิติคือ ใช้เวลาคำนวณที่น้อยกว่า แต่มีข้อเสียคือแบบจำลองที่ใช้ต้องทำให้อยู่ในรูปร่างง่าย ซึ่งไม่เหมือนกับเครื่องปฏิกรณ์จริง และอาจแสดงรายละเอียดการจำลองไม่เหมือนระบบจริงเท่าใดนัก ส่วนการจำลองในระบบสามมิติมีข้อดีคือสามารถแสดงรายละเอียดของลักษณะการไหลได้ดีกว่าในระบบสองมิติ อีกทั้งการคำนวณในระบบสามมิติยังเป็นการจำลองที่ใกล้เคียงกับระบบในชีวิตจริงแต่ข้อเสียคือ ใช้เวลาในการคำนวณที่มากกว่า แต่ในปัจจุบัน คอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาให้มีระบบประมวลผลที่เร็วขึ้น การคำนวณในระบบสามมิติจึงเป็นที่สนใจ จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ เมื่อนำผลจากการจำลองของตัวแปรแบบจำลองที่เหมาะสมมาทำการจำลองเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดลองของ Knowlton และคณะ (1995) และผลการจำลองในระบบสองมิติจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chalerm-sinsuwan และคณะ (2009) ผลการจำลองพบว่า การจำลองในระบบสามมิติสามารถทำนายผลได้ใกล้เคียงกับข้อมูลการทดลอง และผลการจำลองในระบบสองมิติ โดยอาจมีความแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงว่าการจำลองในระบบสามมิติสามารถทำนายอุณหพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นภายในระบบได้อย่างถูกต้อง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองในระบบสองมิติแล้วพบว่า มีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นในทางปฏิบัติการจำลองในระบบสองมิติอาจเพียงพอที่จะอธิบาย

อุทกพลศาสตร์ภายในระบบที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ระบบที่ทำการศึกษาคือระบบท่อไรเซอร์ที่มีการป้อนเข้าแบบไม่สมมาตร การจำลองในระบบสองมิติไม่สามารถแสดงผลเนื่องจากความไม่สมมาตรนี้ได้ นอกจากนี้ ถ้าจะทำการจำลองในระบบสองมิติจำเป็นต้องทำให้แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในรูปร่างที่ง่ายในการจำลอง เพื่อให้สามารถจำลองได้ จึงอาจส่งผลต่อการอธิบายอุทกพลศาสตร์ภายในระบบได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ถ้าระบบเครื่องปฏิกรณ์มีการป้อนเข้าแบบสมมาตร การจำลองในระบบสองมิติก็น่าจะเพียงพอ ต่อการอธิบายอุทกพลศาสตร์ภายในระบบ แต่ถ้าระบบเครื่องปฏิกรณ์มีการป้อนเข้าแบบไม่สมมาตร การจำลองในระบบสามมิติจะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า เนื่องจากให้ข้อมูลที่ถูกต้องของผลความไม่สมมาตร และเครื่องปฏิกรณ์มีลักษณะที่เหมือนเครื่องปฏิกรณ์จริงมากกว่า

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการเปรียบเทียบจากระบบสามมิติพบว่า สิ่งหนึ่งที่ทำให้เกิดความแตกต่างของผลการจำลองขึ้น คือ บริเวณผนังของท่อไรเซอร์ ซึ่งเป็นผลจากการเฉลี่ยในช่วงเวลาหนึ่งๆ ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว อาจลองศึกษาผลของขนาดเซลล์คำนวณบริเวณผนังให้มีความละเอียดมากขึ้น เพื่อดูว่าส่งผลหรือไม่ก็เป็นได้ แต่ก็ต้องยอมรับว่า เมื่อใช้เซลล์คำนวณที่มีความละเอียดมากขึ้น เวลาในการคำนวณก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ ในงานวิจัยศึกษาผลของตัวแปรเพียงช่วงการไหลเดียวคือ ช่วงการไหลแบบความเร็วสูง ดังนั้น อาจเลือกช่วงการไหลอื่นมาทำการศึกษาเพื่อศึกษาถึงอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น ว่าแตกต่างจากระบบนี้มากน้อยเพียงใด และสุดท้ายอาจลองทำการจำลองระบบสามมิติแบบสมมาตรว่ามีความแตกต่างจากระบบสองมิติมากน้อยเพียงใด เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

## รายการอ้างอิง

- Almutterah, A., and Taghipour, F. Computational fluid dynamics of a circulating fluidized bed under various fluidization conditions. Chemical Engineering Science 63 (2008): 1696-1709.
- Almutterah, A., and Taghipour, F. Computational fluid dynamics of high density circulating fluidized bed riser: Study of modeling parameters. Powder Technology 185 (2008): 11-23.
- Armstrong, L. M., Luo, K. H., and Gu, S. Two-dimensional and three-dimensional computational studies of hydrodynamics in the transition from bubbling to circulating fluidised bed. Chemical Engineering Journal 160 (2010): 239-248.
- Atsonios, K., Nikolopoulos, A., Karellas, S. Nikolopoulos, N., Grammelis, P., and Kakaras, E., Numerical investigation of the grid spatial resolution and the anisotropic character of emms in cfb multiphase flow. Chemical Engineering Science 66 (2011): 3979-3990.
- Avidan, A. A., and Shinnar, R. Development of catalytic cracking technology. A lesson in chemical reactor design. Industrial and Engineering Chemistry Research 29 (1990): 931-942.
- Basu, P. Combustion and gasification in fluidized beds. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- 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.
- Benyahia, S., Syamlal, M., and O'Brien, T. J. Evaluation of boundary conditions used to model dilute, turbulent gas/solids flows in a pipe. Powder Technology 156 (2005): 62-72.
- Benyahia, S. Validation study of two continuum granular frictional flow theories. Industrial and Engineering Chemistry Research 47 (2008): 8926-8932.

- Berruti, F., Chaouki, J., Godfroy, L., Pugsley, T. S., and Patience, G. S. Hydrodynamics of circulating fluidized bed risers: A review. Canadian Journal of Chemical Engineering 73 (1995): 579-602.
- Bi, H. T., and Fan, L. S. Regime transitions in gas-solid circulating fluidized beds. AIChE Annual Meeting, Los Angeles, 1991.
- Bi, H. T., and Grace, J. R. Effect of measurement method on the velocities used to demarcate the onset of turbulent fluidization. The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal 57 (1995): 261-271.
- Briongos, J. V., and Guardiola, J. New methodology for scaling hydrodynamic data from a 2d-fluidized bed. Chemical Engineering Science 60 (2005): 5151-5163.
- Chalermisinsuwan, B. Kinetic theory based computation of hydrodynamics and mass transfer in fluidized bed, Doctoral dissertation, Department of chemical technology, Faculty of science, Chulalongkorn University, 2009.
- 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.
- Chalermisinsuwan, B., and Piumsomboon, P. Computation of the mass transfer coefficient of fcc particles in a thin bubbling fluidized bed using two- and three-dimensional cfd simulations. Chemical Engineering Science 66 (2011): 5602-5613.
- Chen, J. C. Experiments that address phenomenological issues of fast fluidization. Chemical Engineering Science 54 (1999): 5529-5539.
- Cheng, Y., Wei, F., Yang, G. Q., and Jin, Y. Inlet and outlet effects on flow patterns in gas-solid risers, Powder Technology, 98 (1998): 151-156.
- Cloete, S., Amini, A., and Johansen, S. T. A fine resolution parametric study on the numerical simulation of gas-solid flows in a periodic riser section. Powder Technology 205 (2011): 103-111.
- Crowe, C., Sommerfeld, M., and Tsuji, Y. Multiphase flows with droplets and particles. CRC Press, 1998.

- De Wilde, J., Marin, G. B., and Heynderickx, G. J. The effects of abrupt t-outlets in a riser: 3d simulation using the kinetic theory of granular flow. Chemical Engineering Science 58 (2003): 877-885.
- De Wilde, J., Engelandt, G. V., Heynderickx, G. J., and Marin, G. B. Gas–solids mixing in the inlet zone of a dilute circulating fluidized bed. Powder Technology 151 (2005): 96-116.
- Ding, J., and Gidaspow, D. A bubbling model using kinetic theory of granular flow. AIChE Journal 36 (1990): 523-538.
- Eaton, A. M., Smoot, L. D., Hill, S. C., and Eatough, C. N. Components, formulations, solutions, evaluation, and application of comprehensive combustion models. Progress in Energy and Combustion Science 25 (1999): 387-436.
- Enwald, H., Peirano, E., and Almstedt, A. E. Eulerian two-phase flow theory applied to fluidization. International Journal of Multiphase Flow 22 (1996): 21-66.
- Esmaili, E., and Mahinpey, N. Adjustment of drag coefficient correlations in three dimensional cfd simulation of gas–solid bubbling fluidized bed. Advances in Engineering Software 42 (2011): 375-386.
- Falcao, A. F. O. Wave energy utilization: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010): 899-918.
- Gao, X., Wang, L. J., Wu, C., Cheng, Y. W., and Li, X. Steady-state simulation of core-annulus flow in a circulating fluidized bed (CFB) riser. Chemical Engineering Science 78 (2012): 98-110.
- Gidaspow, D., Bezburuah, R., and Ding, J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach. 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, 1992.
- Gidaspow, D. Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory description. Boston: Academic Press, 1994.
- Geldart, D., and Abrahamsen, A. R. Homogeneous fluidization of fine powders using various gases and pressures. Powder Technology 19 (1978): 133-136.



- Goldschmidt, M. J. V., Beetstra, R., and Kuipers, J. A. M. Hydrodynamic modelling of dense gas-fluidised beds: Comparison of the kinetic theory of granular flow with 3d hard-sphere discrete particle simulations. Chemical Engineering Science 57 (2002): 2059-2075.
- Grace, J. R., Avidan, A. A., and Knowlton, T. M. Circulating fluidized beds. London; New York: Blackie Academic & Professional, 1997.
- Hansen, K. G., Solberg, T., and Hjertager, B. H. A Three-dimensional simulation of gas/particle flow and ozone decomposition in the riser of a circulating fluidized bed. Chemical Engineering Science 59 (2004): 5217-5224.
- Hartge, E. U., Ratschow, L., Wischnewski, R., and Werther, J. Cfd-simulation of a circulating fluidized bed riser. Particuology 7 (2009): 283-296.
- Hoomans, B. P. B., Kuipers, J. A. M., Briels, W. J., and van Swaij, W. P. M. Discrete particle simulation of bubble and slug formation in a two-dimensional gas-fluidised bed: A hard-sphere approach. Chemical Engineering Science 51 (1996): 99-118.
- Hua, Y., Flamant, G., Lu, J., and Gauthier, D. 3d modelling of radiative heat transfer in circulating fluidized bed combustors: Influence of the particulate composition. International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005): 1145-1154.
- Ibsen, C. H., Solberg, T., and Hjertager, B. H. Evaluation of a three-dimensional numerical model of a scaled circulating fluidized bed. Industrial and Engineering Chemical Research 40 (2001): 5081-5086.
- Jiradilok, V., Gidaspow, D., and Breault, R. W. Computation of gas and solid dispersion coefficients in turbulent risers and bubbling beds. Chemical Engineering Science 62 (2007): 3397-3409.
- Johnsson, F., Andersson, S., and Leckner, B. Expansion of a freely bubbling fluidized bed. Powder Technology 68 (1991): 117-123.
- Kafui, K. D., Thornton, C., and Adams, M. J. Discrete particle-continuum fluid modelling of gas-solid fluidised beds. Chemical Engineering Science 57 (2002): 2395-2410.

- Khoe, G. K., Ip, T. L., and Grace, J. R. Rheological and fluidization behaviour of powders of different particle size distribution. Powder Technology 66 (1991): 127-141.
- Knowlton, T. M., Geldart, D., Masten, J., and King, D. Comparison of cfb hydrodynamic models: Psri challenge problem. Presented at the Eighth International Fluidization Conference, Tour, France, 1995.
- Kuipers J. A. M., and van Swaaij, W. P. M. Application of computational fluid dynamics to chemical reaction engineering. Reviews Chemical Engineering 13 (1997): 1.
- Kuipers J. A. M., and van Swaaij, W. P. M. Simulation of three-dimensional (3d) riser flow using kinetic theory of granular flow. In Werther, J. (Ed.), 6th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Wurzburg, Germany, 1999.
- Kunii, D., and Levenspiel, O. Fluidization Engineering. Butterworth- Heinemann, 1991.
- Li, J., and Kuipers, J. A. M. On the origin of heterogeneous structure in dense gas–solid flows. Chemical Engineering Science 60 (2005): 1251-1265.
- Mastellone, M. L., and Arena, U. The effect of particle size and density on solids distribution along the riser of a circulating fluidized bed. Chemical Engineering Science 54 (1999): 5383-5391.
- Mathiesen, V., Solberg T., and Hjertager, B. H. A numerical study of three-dimensional multiphase flow pattern in a riser. In Werther, J. (Ed.), 6th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Wurzburg, Germany, 1999.
- McKeen, T., and Pugsley, T. Simulation and experimental validation of a freely bubbling bed of fcc catalyst. Powder Technology 129 (2003): 139-152.
- Mekhilef, S., Saidur, R., and Safari, A. A review on solar energy use in industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011): 1777-1790.
- Michalak, P., and Zimny, J. Wind energy development in the world, Europe and Poland from 1995 to 2009; Current status and future perspectives. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011): 2330-2341.

- Monazam, E. R., Shadle, L. J., Mei, J. S., and Spenik, J. Identification and characteristics of different flow regimes in a circulating fluidized bed. Powder Technology 155 (2005): 17-25.
- Patankar, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Hemisphere, 1980.
- Peng, B., Xu, J., Zhu, J., and Zhang, C. Numerical and experimental studies on the flow multiplicity phenomenon for gas–solids two-phase flows in CFB risers. Powder Technology 214 (2011): 177-187.
- Petersen, I., and Werther, J. Three-dimensional modeling of a circulating fluidized bed gasifier for sewage sludge. Chemical Engineering Science 60 (2005): 4469-4484.
- Radulovic, P. T., Ghani, M. U., and Smoot, L. D. An improved model for fixed bed coal combustion and gasification. Fuel 74 (1995): 582-594.
- Rhodes, M. What is turbulent fluidization. Powder Technology 88 (1996): 3-14.
- Sahi, A. D. Progress and recent trends in wind energy. Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004): 501-543.
- Schaeffer, D. G. Instability in the evolution equations describing incompressible granular flow. Journal of Differential Equations 66 (1987): 19–50.
- 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.
- Sinclair, J. L., and Jackson, R. Gas-particle flow in a vertical pipe with particle–particle interactions. AIChE Journal 35 (1989): 1473–1486.
- Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A., and Fayaz, H. A review on global solar energy policy. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011): 2149-2163.
- Syamlal, M., Rogers, W., and O'Brien, T. J. MFIX Documentation: Theory Guide, technical. 1993.

- Taghipour, F., Ellis, N., and Wong, C. Experimental and computational study of gas–solid fluidized bed hydrodynamics. Chemical Engineering Science 60 (2005): 6857-6867.
- Takeuchi, H., Hirama, T., Chiba, T., Biswas, J., and Leung, L. S. A quantitative definition and flow regime diagram for fast fluidization. Powder Technology 47 (1986): 195-199.
- Tartan, M., and Gidaspow, D. Measurement of granular temperature and stresses in risers. AIChE Journal 50 (2004): 1760–1775.
- Tsukada, M., Nakanishi, D., and Horio, M. The effect of pressure on the phase transition from bubbling to turbulent fluidization. International Journal of Multiphase Flow 19 (1993): 27-34.
- Tu, J., Yeoh, G. H., and Liu, C. Computational fluid dynamics: A practical approach. Butterworth-Heinemann, 2008.
- Van Wachem, B. G. M., and Almstedt, A. E. Methods for multiphase computational fluid dynamics. Chemical Engineering Journal 96 (2003): 81-98.
- Wang, J. A review of eulerian simulation of geldart a particles in gas-fluidized beds. Industrial and Engineering Chemistry Research 48 (2009): 5567-5577.
- Wang, X. S., Rhodes, M. J., and Gibbs, B. M. Influence of temperature on solids flux distribution in a cfb riser. Chemical Engineering Science 50 (1995): 2441-2447.
- Wang, X., Baosheng J., and Zhong, W. Three-dimensional simulation of fluidized bed coal gasification. Chemical Engineering and Processing 48 (2009): 695-705.
- Wen, C. Y., and Yu, Y. H. Mechanics of fluidization. Chemical Engineering Progress Symposium Series 62 (1966): 100–111.
- Xie, N., Battaglia, F., and Pannala, S. Effects of using two- versus three-dimensional computational modeling of fluidized beds: Part I, hydrodynamics. Powder Technology 182 (2008): 1-13.
- Xu, J., and Zhu, J. Effects of particle properties on flow structure in a 2-d circulating fluidized bed: Solids concentration distribution and flow development. Chemical Engineering Science 66 (2011): 5064-5076.

- Yang, N., Wang, W., Ge, W., and Li, J. Cfd simulation of concurrent-up gas–solid flow in circulating fluidized beds with structure-dependent drag coefficient. Chemical Engineering Journal 96 (2003): 71-80.
- Ye, M., van der Hoef, M. A., and Kuipers, J. A. M. The effects of particle and gas properties on the fluidization of geldart a particles. Chemical Engineering Science 60 (2005): 4567-4580.
- Yerushalmi, J., Turner, D. H., and Squires, A. M. The fast fluidized bed. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development 15 (1976): 47-51.
- Zhang, D. Z., and Heyden, W. B. V. High-resolution three-dimensional numerical simulation of a circulating fluidized bed. Powder Technology 116 (2001): 133-141.
- Zhang, N., Lu, B., Wang, W., and Li, J. Virtual experimentation through 3d full-loop simulation of a circulating fluidized bed. Particuology 6 (2008): 529-539.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## การคำนวณช่วงความเร็วที่ใช้ในงานวิจัย

1. ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum fluidization velocity:  $u_{mf}$ )

โดยในการคำนวณ Minimum fluidization velocity สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

สำหรับ  $Re_{mf} < 20$

$$u_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 \cdot (\rho_s - \rho_g)}{150 \cdot \mu_g} g \left( \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right) \quad (ก1)$$

สำหรับ  $20 \leq Re_{mf} \leq 1,000$

$$u_{mf} = \frac{\sqrt{1.75 \cdot \frac{\phi_s d_p \cdot (\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \epsilon_{mf}^3} + \frac{(\phi_s d_p)^2 \cdot (\rho_s - \rho_g)}{150 \cdot \mu_g} g \left( \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right)}{2} \quad (ก2)$$

และสำหรับ  $Re_{mf} > 1,000$

$$u_{mf} = \sqrt{1.75 \cdot \frac{\phi_s d_p \cdot (\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \epsilon_{mf}^3} \quad (ก3)$$

เมื่อ

$\epsilon_{mf}$  เท่ากับ 0.4

$\rho_s$  เท่ากับ 1,712 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$\rho_g$  เท่ากับ 1.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$d_p$  เท่ากับ 76 ไมโครเมตร

$g$  เท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

$\phi_s$  เท่ากับ 1

$\mu_g$  เท่ากับ 0.00002 กิโลกรัมต่อเมตรวินาที

ในการคำนวณจะเลือกใช้สมการที่ (ก1) มาคำนวณก่อนจากนั้นนำไปตรวจสอบความถูกต้องจากตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ถ้าค่าที่คำนวณไม่อยู่ในช่วงที่ถูกต้องก็จะเปลี่ยนไปใช้สมการอื่นแทน

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad u_{mf} &= \frac{(1.2 \times 76 \times 10^{-6})^2}{150} \cdot \frac{(1,712 - 1.2)}{0.00002} \cdot 9.81 \left( \frac{0.4^3}{1 - 0.4} \right) \\ &= 0.0035 \text{ เมตรต่อวินาที} \end{aligned}$$

ตรวจสอบค่า Reynolds number (Re)

จากสมการ

$$\text{Re} = \frac{\rho_g d_p u_{mf}}{\mu} \quad (\text{ก4})$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{1.2 \times 76 \times 10^{-6} \times 0.0035}{0.00002} \\ &= 0.016 \text{ (Re} < 20) \end{aligned}$$

ดังนั้น Minimum fluidization velocity ( $u_{mf}$ ) = 0.004 เมตรต่อวินาที

## 2. ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast fluidization)

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (Transport velocity:  $u_{tr}$ ) ถูกเสนอโดย Monazam และคณะ (2005) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$u_{tr} = \frac{2.28 \mu_g Ar^{0.419}}{\rho_g d_p} \quad (\text{ก5})$$



โดยที่

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g d_p^3}{\mu_g^2} \quad (ก6)$$

คำนวณหาค่า Archimedes numer ( $Ar$ )

แทนค่า

$$Ar = \frac{(1.2 \times 9.81)(1,712 - 1.2)(76 \times 10^{-6})^3}{0.00002^2}$$

$$= 22.079$$

คำนวณค่า Transport velocity ( $u_{tr}$ )

$$u_{tr} = \frac{2.28 \times 0.00002 \times (22.079)^{0.419}}{1.2 \times 76 \times 10^{-6}}$$

$$= 1.828 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้น Transport velocity ( $u_{tr}$ ) = 1.83 เมตรต่อวินาที

### 3. ความเร็วปลาย (Terminal velocity: $u_t$ )

สำหรับค่า Terminal velocity สามารถคำนวณได้จากสมการด้านล่าง

$$u_t = \frac{\mu_g \left( \frac{Ar}{7.5} \right)^{0.666}}{\rho_g d_p} \quad (ก7)$$

แทนค่า Terminal velocity ( $u_t$ )

$$u_t = \frac{0.00002 \left( \frac{22.079}{7.5} \right)^{0.666}}{1.2 \times 76 \times 10^{-6}}$$

$$= 0.45 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้น Terminal velocity ( $u_t$ ) = 0.45 เมตรต่อวินาที

4. ความเร็วต่ำสุดในช่วงการไหลแบบเบาบาง (Minimum pneumatic velocity:  $u_{mp}$ )

สำหรับค่า Minimum pneumatic velocity ได้ถูกเสนอความโดย Bi และ Fan (1991) มีความสัมพันธ์ ดังนี้

$$u_{mp} = 10.1(gd_p)^{0.347} (G_s / \rho_g)^{0.310} (d_p / D)^{-0.139} Ar^{-0.021} \quad (ก8)$$

แทนค่า Minimum pneumatic velocity ( $u_{mp}$ )

$$u_{mp} = 10.1(9.81 \times 76 \times 10^{-6})^{0.347} (489/1.2)^{0.310} (76 \times 10^{-6} / 0.2)^{-0.139} (22.079)^{-0.021}$$

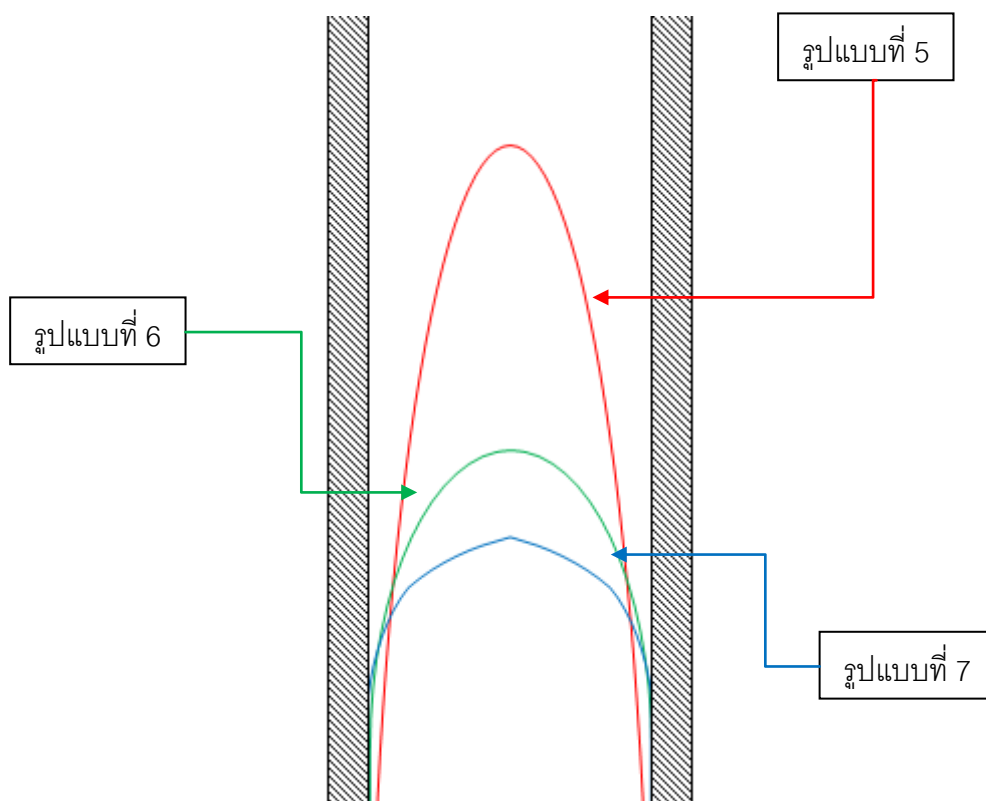
$$= 14.976 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้น Minimum pneumatic velocity ( $u_{mp}$ ) = 14.98 เมตรต่อวินาที

## ภาคผนวก ข

## แสดงรูปร่างความเร็วที่ต่างกันของรูปแบบที่ 5-7

ในส่วนผลของรูปแบบการป้อนเข้าของทางเข้าที่ต่างกัน ได้กล่าวถึงรูปร่างความเร็วที่ต่างกัน (รูปแบบที่ 5-7) โดยมีรายละเอียดดังนี้ รูปแบบที่ 5 รูปร่างของความเร็วเป็นแบบลามินาร์ โดยจะมีลักษณะเรียวยาวแหลม (บริเวณตรงกลางมีความเร็วสูงกว่าบริเวณผนังมาก) รูปแบบที่ 6 รูปร่างของความเร็วเป็นแบบ เทอร์บิวเลนต์ที่มีลักษณะ รูปร่างปานลงมาเล็กน้อย และรูปแบบสุดท้าย รูปแบบที่ 7 รูปร่างของความเร็วเป็นแบบเทอร์บิวเลนต์ที่มีลักษณะความเร็วตรงกลางน้อยกว่ารูปแบบอื่นๆ ซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน ดังภาพที่แสดงด้านล่าง



ภาพที่ ข1 แสดงลักษณะรูปร่างความเร็วที่ต่างกันของรูปแบบที่ 5-7

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายยงยุทธ ประจงการ เกิดเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2553