

อุทกพลศาสตร์ของช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนสองมิติ

นายสุทธิชัย บุญประสพ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

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.

HYDRODYNAMICS OF FLOW REGIMES IN TWO DIMENSIONAL CIRCULATING FLUIDIZED
BED REACTOR

Mr. SutthichaiBoonprasop

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

สุทธิชัย บุญประสพ : อุทกพลศาสตร์ของช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบแบบหมุนเวียนสองมิติ(HYDRODYNAMICS OF FLOW REGIMES IN TWO DIMENSIONAL CIRCULATING FLUIDIZED BED REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ, 113 หน้า.

ปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีบทบาทสำคัญในวงการอุตสาหกรรมเช่น เตาเผา การผลิตก๊าซจากถ่านหิน และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ขีดจำกัดในการประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนขึ้นอยู่กับภาวะอุทกพลศาสตร์ของแต่ละช่วงการไหลซึ่งมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาช่วงการไหลรูปแบบใหม่จึงเป็นสิ่งสำคัญ ระบบบันทึกภาพนิ่งด้วยกล้อง CCD และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนสองมิติที่มีการป้อนของไหลครั้งเดียว(Single feed)ซึ่งทำจากพลาสติกอะคริลิค ความหนา 1 เซนติเมตร ท่อไรเซอร์มีความกว้าง 5 เซนติเมตรยาว 15 เซนติเมตร และสูง 200 เซนติเมตร จึงได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ของช่วงการไหลต่างๆอากาศที่อุณหภูมิห้องทำหน้าที่เป็นวัฏภาคของไหลในระบบ วัฏภาคของแข็ง คือ อนุภาครายและพีวีซี ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะขจัดและความเร็วในการปิดรูรับแสงของกล้องบันทึกภาพ จากการศึกษาพบว่า การกระจายตัวของความเร็วของอนุภาคในแนวตั้งในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนมีลักษณะเช่นเดียวกับความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบด(Freeboard particle)ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน คือ มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอที่ค่าบวกตลอดแนวหน้าตัดของท่อไรเซอร์ แม้ว่าจะเป็นบริเวณใกล้กับผนังท่อไรเซอร์ก็ตาม นอกจากนี้ยังพบว่าช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนยังสามารถเกิดได้ที่ภาวะที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบสูงและความเร็วของของไหลน้อยกว่าขนส่ง(Transport velocity) งานวิจัยนี้จึงสามารถใช้เป็นความรู้เบื้องต้นในการพัฒนาขีดความสามารถของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนให้มีศักยภาพสูงขึ้น และสามารถใช้ในการสอบเทียบ (Validation) แบบจำลองคณิตศาสตร์ต่อไปในอนาคต

ภาควิชาเคมีเทคนิค.....	ลายมือชื่อนิสิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค.....	ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
ปีการศึกษา2555.....	ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

##5472134023: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CIRCULATING TURBULENT FLUIDIZED BED/ FLOW REGIME DIAGRAM/
CIRCULATING FLUIDIZED BED REACTOR

SUTTHICHAJ BOONPRASOP: HYDRODYNAMICS OF FLOW REGIMES IN
TWO DIMENSIONAL CIRCULATING FLUIDIZED BED REACTOR. ADVISOR:
ASSOC.PROF. PORN POTE PIUMSOMBOON, Ph.D., CO-ADVISOR:
BENJAPON CHALERMSINSUWAN, Ph.D., 113pp

Circulating fluidized bed reactors are widely used in many industries such as combustor, coal gasifier and fluid catalytic cracking reactors. Bubbling and turbulent fluidizations can provide high density bed in a riser, but they cannot be used in continuous processes. The circulating fluidization, which are fast fluidization and pneumatic transport, is in dilute phase leading to low efficiency in operation. Therefore, searching for the new fluidization regime receives attention. The transient flow behavior in two-dimensional plexiglas riser with 2.00 m height, 0.15 m width and 0.05 m depth was investigated using CCD camera system. Air at room temperature was selected as the fluid phase. Silica sand and polyvinyl chloride particles were selected to use as the solid phase. The results expressed both vertical and radial solid particle velocity profiles. It was found that the velocity profile of vertical solid particles in freeboard region of turbulent fluidization regime was uniformly distributed with positive values even at the near riser wall region. This behavior was similar to circulating turbulent fluidization regime with double stage air feeding system. Circulating turbulent fluidization regime can be found in the high solid recirculating rate and low superficial gas velocity comparing to the transport velocity. The results can be used to improve the design of circulating fluidized bed reactor and to validate the mathematical model in the future.

Department: ...Chemical Technology...	Student's Signature.....
Field of Study:Chemical Technology.....	Advisor's Signature.....
Academic Year:2012.....	Co-Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ของอุทกพลศาสตร์ของช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนสองมิติ ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆฝ่าย ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ให้อิสรระในการคิดการดำเนินงานวิจัยอย่างเต็มที่ ตลอดไปถึงสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อให้ผู้จัดทำมีโอกาสในการลองผิดลองถูกเพื่อทดสอบสมมติฐานใหม่ๆ ที่เกิดขึ้นตลอดช่วงระยะเวลา 2 ปีที่ผ่านมา และอาจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยแนะนำแนวทางในการพัฒนาขั้นตอนและกระบวนการในการดำเนินงานวิจัยให้มีความคิดสร้างสรรค์ควบคู่ไปกับเนื้อหาทางวิชาการที่ครบถ้วน นอกจากนี้การที่อาจารย์ทั้ง 2 ท่าน ได้ให้ความกรุณามาฟังความคิดเห็นของวิทยานิพนธ์ทุกสัปดาห์นั้น ได้ช่วยให้ผู้จัดทำได้ลดทอนข้อมูลส่วนเกินที่ไม่มีความจำเป็นต่องานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ออกไปจำนวนมาก จนสามารถทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถตอบคำถามและจุดประเด็นใหม่ๆ เชิงวิชาการได้เป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พุฒษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชดารา และ อาจารย์ ดร. บุญรอด สัจกุลนุกิจ ที่ให้ความกรุณามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ทู่นการศึกษาคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ศูนย์ Center of excellent on petrochemical and materials technology

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกคนในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่คอยให้ปรึกษาและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์เสมอมา

ขอกราบขอบคุณพระคุณมารดา ผู้เป็นแบบอย่างที่ดีเสมอมาในเรื่องของการดำเนินชีวิต และเป็นแรงผลักดันให้ฝ่าฟันอุปสรรคนานัปการ จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายขอขอบคุณพระเจ้าได้ทรงจัดเตรียม สถานศึกษาที่พร้อมไปด้วยอุปกรณ์และทรัพยากรที่ก่อให้เกิดบรรยากาศแห่งการเรียนรู้ ภายใต้การดูแลของคณาจารย์ที่มีความรู้ความสามารถสูงซึ่งเต็มไปด้วยรักกับความเมตตาต่อลูกศิษย์ทุกคน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ข้อยกเว้นของงานวิจัย	4
1.5 คำจำกัดความของงานวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	7

หน้า

2.1.1 ฟลูอิดไฮดรอลิก.....	7
2.1.2 ประเภทของฟลูอิดไฮดรอลิก.....	8
2.1.2.1 ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบสามวัฏภาค	8
2.1.2.2 ฟลูอิดไฮดรอลิกแบบสองวัฏภาค.....	8
2.1.3 ช่วงการไหล.....	8
2.1.3.1 เบดนิ่ง	9
2.1.3.2 ช่วงการไหลแบบฟอง	10
2.1.3.3 ช่วงการไหลแบบสลัก.....	11
2.1.3.4 ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน	12
2.1.3.5 ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน	13
2.1.3.6 ช่วงการไหลแบบความเร็วสูง	14
2.1.4 คุณสมบัติของของแข็ง	15
2.1.5 แผนภาพแสดงช่วงการไหล.....	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.1.1 วัฏภาคของแข็ง	31
3.1.2 วัฏภาคของไหล	31

หน้า

3.2 อุปกรณ์และเครื่องปฏิกรณ์	31
3.2.1 อุปกรณ์	31
3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์	32
3.2.3 ระบบบันทึกภาพนิ่ง	33
3.2.4 ระบบวัดความดัน	34
3.2.5 ระบบป้องกันการดูดตันของท่อวัดความดันด้วยสนามแม่เหล็กจากไฟฟ้า ...	34
3.3 ขั้นตอนการวิจัย	35
3.3.1 การหาความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบดในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน	35
3.3.2 ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อสัดส่วนของแข็งในแต่ละช่วงการไหล	36
3.3.3 สร้างแผนภาพแสดงช่วงการไหล	33
บทที่ 4 วิจารณ์ผลการทดลอง	42
4.1 ความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบดในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน	42
4.2 ผลของตัวแปรดำเนินการ ต่อสัดส่วนของของแข็งและช่วงการไหลในท่อไรเซอร์	43
4.2.1 ทราบาย 260 ไมครอน	44
4.2.2 ทราบาย 126 ไมครอน	46
4.2.3 พีวีซี 161 ไมครอน	48

หน้า

4.2.4 การตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของเบดของแข็ง	50
4.3 การปรับปรุงแผนภาพแสดงช่วงการไหล.....	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	79
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	87
ภาคผนวก ข ข้อมูลขนาดอนุภาคเฉลี่ย.....	90
ภาคผนวก ค ฮิสโตแกรมความเร็ว	94
ภาคผนวก ง ความสูงเบดในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน.....	96
ภาคผนวก จ ความสูงของเบดในงานวิจัยอื่นๆ.....	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	113

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบด.....	27
2.2 ความสัมพันธ์ในการหาค่าความเร็วสุดท้ายที่เบดสามารถคงสภาพอยู่ในช่วงการไหล ฟองแก๊ส(U_c)	28
2.3 ความสัมพันธ์ในการหาค่าความเร็วขนส่ง (U_{tr})	29
3.1 รายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดเซชันแบบ 2 มิติ	41
4.1 รายละเอียดของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่หลุดออกจากเบด	77
4.2 ตัวเลขไร้นิวอาร์คิมิตีส์ของอนุภาคชนิดต่างๆ.....	77
4.3 ค่า V^* ของทรายที่มีขนาดอนุภาค 260 ไมครอน.....	78
4.4 ค่า V^* ของทรายที่มีขนาดอนุภาค 126 ไมครอน.....	78
จ.1 สมบัติของแข็งเม็ดแก้ว	110

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพแรงที่กระทำต่อของแข็ง	19
2.2 พฤติกรรมคล้ายของไหลที่เกิดขึ้นในเบดของแข็ง	19
2.3 ช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคเซด	20
2.4 ความเร็วที่น้อยที่สุดของการเกิดฟลูอิดเซชัน	20
2.5 การแกว่งของแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน	21
2.6 สัดส่วนของแข็งในไรเซอริที่ค่าสูงอย่างสม่ำเสมอในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน	21
2.7 ความเร็วของอนุภาคที่มีค่าเป็นบวกตลอดรัศมีของไรเซอริในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน หมุนเวียน.....	22
2.8 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคเซดที่มีการป้อนของไหลจังหวะที่สองที่ผนังไรเซอริ	22
2.9 กราฟรูปตัว S ของช่วงการไหลแบบความเร็วสูง	23
2.10 การเกิดการจับตัวเป็นก้อนของของแข็งที่เวลาต่างๆ	23
2.11 การจำแนกอนุภาคตามวิธีของเจลดาร์ท	24
2.12 ผลของความเร็วของของไหลต่อช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	24
2.13 แผนภาพของช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	25
2.14 ผลของความเร็วของของไหลต่อช่วงการไหล	25
2.15 แผนภาพของช่วงการไหล.....	26

รูปที่	หน้า
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอเซชันแบบ 2 มิติ	37
3.2 ระบบการบันทึกภาพนิ่ง	38
3.3 ตัวอย่างภาพนิ่งที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วของอนุภาคของแข็ง	38
3.4 ระบบการวัดความดัน	39
3.5 ค่าความดันที่วัดได้จากโปรแกรม Multilab	39
3.6 ตะแกรงกรองอนุภาคที่เกลียวทองเหลือง	40
3.7 ค่าการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ข้อต่อทองเหลือง	40
4.1 การกระจายตัวความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบดในแนวแกนตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ ตามหน้าตัดของท่อไรเซอร์	57
4.2 สัดส่วนของทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตรต่อวินาที	57
4.3 สัดส่วนของทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.8 เมตรต่อวินาที	58
4.4 สัดส่วนของทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.9 เมตรต่อวินาที	58
4.5 สัดส่วนของทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.0 เมตรต่อวินาที	59
4.6 สัดส่วนของทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตรต่อวินาที	59
4.7 สัดส่วนของทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตรต่อวินาที	60
4.8 สัดส่วนของทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.3 เมตรต่อวินาที	60
4.9 สัดส่วนของทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.4 เมตรต่อวินาที	61
4.10 สัดส่วนของทรายขนาด 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.4 เมตรต่อวินาที	61

รูปที่	หน้า
4.29 สัดส่วนของพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตรต่อวินาที	71
4.30 สัดส่วนของพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตรต่อวินาที	71
4.31 μ_r ของพีวีซีขนาด 164 ไมครอน	72
4.32 การขยายตัวเบดทรายขนาด 260 ไมครอน	72
4.33 การขยายตัวเบดทรายขนาด 126 ไมครอน	73
4.34 การขยายตัวเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอน	73
4.35 การขยายตัวเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน	74
4.36 แผนภาพของช่วงการไหลที่มีข้อมูลของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน	74
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขไรน์ฮอยอาร์คิมิดีสต่อความชันของสมการที่ (4.6) – (4.9)	75
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขไรน์ฮอยอาร์คิมิดีสต่อจุดตัดของสมการที่ (4.6) – (4.9)	75
4.39 ผลของตัวแปรดำเนินและตัวแปรของการออกแบบการต่อช่วงการไหล	76
ข.1 ข้อมูลของทรายที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน	90
ข.2 ข้อมูลของทรายที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอน	91
ข.3 ข้อมูลของพีวีซีที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอน	92
ค.1 ฮิสโตแกรมของความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่ง 8 เซนติเมตรจากผนังไรเซออร์	93
ค.2 ฮิสโตแกรมของความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่ง 6 เซนติเมตรจากผนังไรเซออร์	93
ค.3 ฮิสโตแกรมของความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่ง 4 เซนติเมตรจากผนังไรเซออร์	94
ค.4 ฮิสโตแกรมของความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่ง 2 เซนติเมตรจากผนังไรเซออร์	94

รูปที่

หน้า

ค.5	อีลิตโตแกรมของความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่ง 1 เซนติเมตรจากผนังโรเซอ์	95
ง.1	ความสูงของเบดทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตรต่อวินาที	96
ง.2	ความสูงของเบดทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.8 เมตรต่อวินาที	96
ง.3	ความสูงของเบดทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.9 เมตรต่อวินาที	97
ง.4	ความสูงของเบดทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.0 เมตรต่อวินาที	97
ง.5	ความสูงของเบดทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตรต่อวินาที	98
ง.6	ความสูงของเบดทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตรต่อวินาที	98
ง.7	ความสูงของเบดทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.3 เมตรต่อวินาที	99
ง.8	ความสูงของเบดทรายขนาด 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.4 เมตรต่อวินาที	99
ง.9	ความสูงของเบดทรายขนาด 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.4 เมตรต่อวินาที	100
ง.10	ความสูงของเบดทรายขนาด 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาที	100
ง.11	ความสูงของเบดทรายขนาด 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.6 เมตรต่อวินาที	101
ง.12	ความสูงของเบดทรายขนาด 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตรต่อวินาที	101
ง.13	ความสูงของเบดทรายขนาด 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.9 เมตรต่อวินาที	102
ง.14	ความสูงของเบดทรายขนาด 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตรต่อวินาที	102
ง.15	ความสูงของเบดทรายขนาด 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.8 เมตรต่อวินาที	103
ง.16	ความสูงของเบดทรายขนาด 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.0 เมตรต่อวินาที	103
ง.17	ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.2 เมตรต่อวินาที	104

รูปที่

หน้า

ง.18 ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.3 เมตรต่อวินาที.....	104
ง.19 ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.4 เมตรต่อวินาที.....	105
ง.20 ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.5 เมตรต่อวินาที.....	105
ง.21 ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.6 เมตรต่อวินาที.....	106
ง.22 ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตรต่อวินาที.....	106
ง.23 ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.8 เมตรต่อวินาที.....	107
ง.24 ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.9 เมตรต่อวินาที.....	107
ง.25 ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.0 เมตรต่อวินาที.....	108
ง.26 ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตรต่อวินาที.....	108
ง.27 ความสูงของเบดพีวีซีขนาด 164 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตรต่อวินาที.....	109
จ.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยของ Escudero.....	110
จ.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของที่ว่างตลอดแนวความสูงของคอลัมน์	111
จ.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดเม็ดแก้วกับความเร็วของอากาศ	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องปฏิกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นหัวใจสำคัญในอุตสาหกรรมเคมีเพราะนอกจากจะช่วยเพิ่มผลผลิตและผลประกอบการแล้วยังช่วยสิ่งแวดล้อมในการลดปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอดีซ์เบดได้เข้ามามีบทบาทต่อวงการอุตสาหกรรมเคมีอย่างมาก ด้วยลักษณะเด่นของระบบฟลูอิดไอดีซ์เบดที่วิฤภาคของแข็งจะมีการสัมผัสกับวิฤภาคของไหลอย่างทั่วถึง ทำให้พื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามีมาก ส่งผลทำให้ร้อยละของผลได้ของปฏิกิริยามีค่าสูง เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอดีซ์เบดสามารถประยุกต์ใช้ในปฏิกิริยาทุกชนิดที่มีการสัมผัสกันระหว่างวิฤภาคของแข็งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นที่อยู่ในวิฤภาคของไหล ตั้งแต่ปี 1942 เครื่องปฏิกรณ์ Fluid catalytic cracking คือเครื่องปฏิกรณ์ที่รู้จักเป็นอย่างดีในการนำความรู้เรื่องฟลูอิดไอดีซ์เบดมาใช้ในการลดขนาดความยาวของไฮโดรคาร์บอนโซยาวให้เป็นไฮโดรคาร์บอนสายสั้นที่มีมูลค่าสูง[1-5] นอกจากนี้แล้วเครื่องปฏิกริยาฟลูอิดไอดีซ์เบดยังสามารถประยุกต์ใช้ได้เป็นอย่างดีในกระบวนการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวการของภาวะโลกร้อน

ช่วงการไหลแต่ละรูปแบบในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอดีซ์เบดล้วนแล้วแต่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนตัวแปรดำเนินการ ในเบื้องต้นช่วงการไหลสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ช่วงการไหลที่ไม่มีการหมุนเวียนของของแข็งจากท่อไรเซอร์ไปสู่ไซโคลน ได้แก่ ช่วงการไหลแบบฟองแก๊สและช่วงการไหลแบบปั่นป่วน และช่วงการไหลที่มีการหมุนเวียนของแข็งจากยอดของท่อไรเซอร์ไปยังไซโคลน ดาวเนอร์ และกลับเข้าสู่ด้านล่างของท่อไรเซอร์ตามลำดับ ได้แก่ ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน หมุนเวียน ช่วงการไหลแบบความเร็วสูงและช่วงการไหลแบบเบาบาง ความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่ท่อไรเซอร์คือปัจจัยที่สำคัญในการเกิดช่วงการไหลรูปแบบต่างๆ เมื่อป้อนของไหลที่มีความเร็วต่ำๆ เข้าที่ด้านล่างของท่อไรเซอร์ เบดของของแข็งยังไม่มีเคลื่อนที่ ภาวะนี้เรียกว่าระบบเบดนิ่ง ซึ่งยังไม่จัดเป็นช่วงการไหลรูปแบบหนึ่งของฟลูอิดไอดีซ์เบด เพราะว่าของแข็งยังไม่ได้มีการแสดงพฤติกรรมของของไหล เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจะปรากฏฟองแก๊สลอยขึ้นจากด้านล่างถึงด้านบนของเบด รูปแบบการไหลเช่นนี้คือช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส ฟองแก๊สจะขยาย

ขนาดใหญ่ขึ้นตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น และอาจจะเกิดช่วงการไหลแบบสลักได้เมื่อฟองแก๊สมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไรเซอร์ ซึ่งจะพบช่วงการไหลนี้ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดที่ท่อไรเซอร์ขนาดเล็ก เบดของแข็งจะเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนทุกทิศทางเมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น ช่วงการไหลรูปแบบนี้คือช่วงการไหลแบบปั่นป่วน [6] เบดของแข็งจะสูงขึ้นตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น เมื่อเบดของแข็งลอยสูงขึ้นจนกระทั่งของแข็งเริ่มเคลื่อนที่ออกจากยอดของท่อไรเซอร์ไปยังไซโคลอนนี้คือช่วงการไหลรูปแบบใหม่ที่ถูกค้นพบในปี 2009 เรียกว่าช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน [7] เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศสัดส่วนของของแข็งในท่อไรเซอร์จะเริ่มลดลงจนกระทั่งพบว่าช่วงกลางของท่อไรเซอร์มีของแข็งลอยขึ้นแบบเบาบางและของแข็งเคลื่อนที่ลงมาบริเวณผนังของท่อไรเซอร์พฤติกรรมนี้เรียกว่าการไหลแบบแกนใน-วงนอกซึ่งเป็นลักษณะเด่นช่วงการไหลแบบความเร็วสูง[8] เมื่อความเร็วของของไหลมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งสัดส่วนของแข็งมีค่าน้อยมากๆ ช่วงการไหลนี้คือช่วงการไหลแบบเบาบาง ซึ่งมักเอาไว้ใช้ในการลำเลียงของแข็งที่มีขนาดเล็กๆ แต่ไม่นิยมใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีเพราะว่ามีสัดส่วนของของแข็งกับของไหลแตกต่างกันมากเกินไป

ขีดจำกัดในการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดจึงขึ้นอยู่กับอุทกพลศาสตร์ของช่วงการไหลซึ่งแต่ละช่วงการไหลจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ช่วงการไหลที่ได้รับความนิยมเป็นพิเศษคือช่วงการไหลปั่นป่วนเพราะว่ามีสัดส่วนของของแข็งในไรเซอร์สูงอย่างสม่ำเสมอ แต่มีข้อเสียตรงที่ไม่ใช่ระบบต่อเนื่อง ช่วงการไหลที่นิยมใช้กันมากอีกช่วงหนึ่งก็คือช่วงการไหลความเร็วสูงเพราะว่าเป็นช่วงการไหลที่มีการหมุนเวียนของของแข็งอย่างต่อเนื่องจากฝั่งไรเซอร์ไปยังฝั่งดาวเนอร์ตลอดเวลา แต่ยังมีข้อเสียอยู่ที่ความหนาแน่นของของแข็งในไรเซอร์มีค่าน้อยและมีอนุภาคตกลงมาบริเวณผนัง อย่างไรก็ตาม มีผู้พบว่าระหว่างการเปลี่ยนของช่วงการไหลจากช่วงการไหลปั่นป่วนไปเป็นช่วงการไหลความเร็วสูง มีช่วงการไหลรูปแบบใหม่ที่เรียกว่า ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนซึ่งมีสัดส่วนของของแข็งในไรเซอร์สูงเช่นเดียวกับช่วงการไหลปั่นป่วนและมีการหมุนวนของของแข็งจากฝั่งไรเซอร์ไปยังฝั่งดาวเนอร์ตลอดเวลาเช่นเดียวกับช่วงการไหลความเร็วสูง แต่ปัญหาที่สำคัญของงานวิจัยดังกล่าวคือจะต้องมีการป้อนแก๊สครั้งที่ 2 เข้าที่ด้านข้างของท่อไรเซอร์ซึ่งอาจจะทำให้ร้อยละของผลได้มีค่าลดลงเนื่องมาจากมีการรบกวนความเข้มข้นของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์เบดหมุนเวียนสองมิติที่มีการป้อนของไหลตำแหน่งเดียวจึงถูกสร้างขึ้นเพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ของทุกช่วงการไหลรวมไปถึงช่วงการไหลปั่นป่วนหมุนเวียน โดย

ตัวแปรดำเนินการที่จะทำการศึกษาคือความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าท่อโรเตอร์และอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง สัดส่วนของของแข็งในท่อโรเตอร์จะสามารถคำนวณได้จากความดันตามแนวความสูงของท่อโรเตอร์โดยที่ลักษณะที่สำคัญของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนคือมีสัดส่วนของของแข็งสูงอย่างสม่ำเสมอในท่อโรเตอร์

ตลอดครึ่งศตวรรษที่ผ่านมาได้มีการศึกษาช่วงการไหลอย่างละเอียดจนสามารถใช้สมการในการคำนวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของช่วงการไหลแต่ละรูปแบบต่างๆเมื่อตัวแปรดำเนินการเปลี่ยนแปลงได้ และได้มีการพัฒนาสมการดังกล่าวไปสู่แผนภาพของช่วงการไหลทำให้สามารถทำนายช่วงการไหลที่จะเกิดขึ้นในทุกสภาวะของตัวแปรดำเนินการและทุกตัวแปรในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ เช่น ความสูงของโรเตอร์ ขนาดของท่อโรเตอร์ ความหนาแน่นของของแข็ง เป็นต้น แต่แผนภาพที่มีอยู่ยังไม่ได้ครอบคลุมถึงช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนซึ่งเป็นช่วงการไหลรูปแบบใหม่ที่สามารถตอบสนองความต้องการของภาคอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

ความรู้จากการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่ออุทกพลศาสตร์ของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน จึงเป็นความรู้เบื้องต้นที่สำคัญในการเพิ่มศักยภาพของเครื่องปฏิกรณ์ให้สูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้สอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความแม่นยำในการทำนายผลของตัวแปรดำเนินการต่ออุทกพลศาสตร์ ซึ่งจะสามารถลดต้นทุนและเวลาที่ใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนในอนาคตได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาภาวะอุทกพลศาสตร์ของช่วงการไหลต่างๆในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนสองมิติ
- 2) ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อขอบเขตของแต่ละช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนสองมิติ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) สร้างเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนสองมิติเพื่อใช้ในการศึกษาภาวะอุทกพลศาสตร์ของช่วงการไหลรูปแบบต่างๆ
- 2) นำขอบเขตที่ได้ของแต่ละช่วงการไหลมาสร้างแผนภาพแสดงช่วงการไหล

1.4 ข้อจำกัดของงานวิจัย

- 1) เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบสองมิติ
- 2) เครื่องอัดอากาศไม่สามารถป้อนความเร็วของอากาศเกิน 1.5 เมตรต่อวินาที
- 3) อนุภาคของแข็งที่ใช้อยู่ในกลุ่มเจลดาร์ทเอและบี

1.5 คำจำกัดความของงานวิจัย

ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนในระบบสองมิติ ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน
ขอบเขตของช่วงการไหล แผนภาพของช่วงการไหล

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ค้นพบช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนสองมิติที่มีการป้อนของไหลครั้งเดียว
- 2) ทราบขอบเขตที่ชัดเจนของแต่ละช่วงการไหลเมื่อตัวแปรดำเนินการเปลี่ยนแปลง
- 3) ได้แผนภาพชุดใหม่ที่สามารถทำนายช่วงการไหลที่จะเกิดขึ้นเมื่อทราบตัวแปรดำเนินการและตัวแปรการออกแบบ
- 4) ได้ชุดข้อมูลที่สามารถใช้ในการสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อไรเซอร์เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนสองมิติ

- 5) ได้นักวิชาการ/นักวิจัยรุ่นใหม่ที่มีความสนใจและเข้าใจด้านอุทกพลศาสตร์ภายใน
ปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไดซ์เบด
- 6) ได้ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการหรือเอกสารประกอบการประชุมวิชาการอย่าง
น้อย 1 ฉบับ

1.7 วิธีดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไดซ์เบดแบบหมุนเวียน
และขั้นตอนในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไดซ์เบดแบบหมุนเวียน
- 2) ออกแบบและวางแผนการทดลอง
- 3) สร้างเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์ไดซ์เบดแบบหมุนเวียน 2 มิติ ที่มีท่อโรเซอ์สูง 2 เมตร กว้าง
0.15 เมตร ความหนา 5 เซนติเมตร อนุภาคของแข็งที่ใช้ คือ ททราย (Silica sand)
ขนาด 126 และ 260 ไมโครเมตร และพีวีซีที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมโครเมตร
โดยมีอากาศที่อุณหภูมิห้องที่ถูกอัดจนมีความดันเป็น 2 บาร์ทำหน้าที่เป็นของไหลใน
ระบบ
- 4) บันทึกภาพนิ่งของอนุภาคของแข็งที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยกล้อง CCD ที่ค่าความยาว
โฟกัสของเลนส์ 15 เซนติเมตร โดยจัดแสงสว่างให้เหมาะสมกับค่าความเร็วชัดเตอร์
ควบคู่ไปกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนแผ่นใสวงกลมที่มีสีที่แตกต่างกัน 3 สี ได้แก่
น้ำเงิน แดง และเหลืองที่ด้านหน้าแหล่งกำเนิดแสง ลำดับของสีที่ปรากฏบนอนุภาค
ในภาพถ่ายจะใช้ในการจำแนกอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ขึ้นกับอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่
ลงออกจากกัน ความเร็วของอนุภาคคำนวณได้จากการนำระยะทางของอนุภาคใน
ภาพนิ่งที่วัดด้วยโปรแกรม Image-Pro Plus หารด้วยความเร็วของชัดเตอร์
- 5) วัดความดันตลอดแนวความสูงของท่อโรเซอ์ด้วยเครื่องวัดความดันแบบดิจิตอลเพื่อ
ใช้ในการคำนวณหาค่าสัดส่วนของวัฏภาคของแข็งในโรเซอ์
- 6) ประมวลผล วิเคราะห์ สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

ลำดับขั้นตอนในการนำเสนอผลงานวิจัยประกอบไปด้วยเนื้อหาต่างๆดังนี้

- บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ข้อจำกัดของงานวิจัย คำจำกัดความของงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย และขั้นตอนในการเสนอผลงานวิจัย
- บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาภาวะอุทกพลศาสตร์ของช่วงการไหลต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนสองมิติ และศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อขอบเขตของแต่ละช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบ
- บทที่ 3 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รายละเอียดเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนสองมิติ รายละเอียดของระบบบันทึกภาพนิ่ง ระบบการวัดค่าความดัน วิธีการป้องกันการอุดตันของอนุภาคขณะทำการวัดความดัน และขั้นตอนในการทดลอง
- บทที่ 4 ผลการศึกษาความเร็วอนุภาคที่หลุดออกจากเบดในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ผลของตัวแปรดำเนินการต่อสัดส่วนของของแข็งในท่อไรเซอร์ และแผนภาพแสดงช่วงการไหลชุดใหม่
- บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ฟลูอิดไอเซชัน

ฟลูอิดไอเซชัน คือ ปฏิกิริยาการถ่ายเทของแข็งที่มีพฤติกรรมเหมือนของไหลซึ่งเกิดมาจากการสัมผัสกันระหว่างของแข็งและของไหล โดยปกติแล้วน้ำหนักของอนุภาคคือแรงที่กระทำต่ออนุภาคในทิศพุ่งลงตั้งฉากกับผิวโลก แต่เมื่อมีของไหลเคลื่อนที่ผ่านของแข็ง จะทำให้เกิดแรงลอยตัวและแรงต้านการเคลื่อนที่มีทิศทางสวนทางกับน้ำหนักของของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เมื่อผลรวมของแรงในทิศขึ้นมีค่ามากกว่าแรงในทิศลง จะทำให้ของแข็งสามารถเลียนแบบพฤติกรรมของของไหลได้ ดังแสดงในรูป 2.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ความดันที่ค่าความสูงใดๆ จะมีค่าเท่ากับน้ำหนักต่อพื้นที่หน้าตัดที่ตำแหน่งนั้น
- 2) ผิวหน้าของเบดของแข็งจะมีความราบเรียบสม่ำเสมอเช่นเดียวกันกับผิวหน้าของของไหล แม้ว่าเราจะเอียงภาชนะไปด้านใดผิวหน้าของเบดก็ยังคงเรียงตัวในแนวราบขนานกับผิวโลกเช่นเดิม
- 3) หากเจาะรูที่ด้านล่างของภาชนะที่บรรจุเบด ของแข็งสามารถพุ่งออกได้เช่นเดียวกับของไหลที่พุ่งออกจากรูเล็กๆ ได้เมื่อเกิดรูรั่ว โดยที่ความเร็วของของแข็งที่พุ่งออกจากภาชนะจะแปรผันตรงกับควมลึกจากผิวหน้าของเบด
- 4) ของแข็งจะมีการแยกชั้นตามความหนาแน่นจากมากไปน้อยเช่นเดียวกันกับการแยกชั้นระหว่างน้ำมันที่ลอยอยู่เหนือชั้นของน้ำ และถ้านำวัตถุนิดอื่นที่มีความหนาแน่นน้อยกว่ามาใส่ในเบดจะพบว่าวัตถุนั้นจะสามารถอยู่เหนือผิวหน้าของเบด

ประโยชน์ของการเลียนแบบพฤติกรรมของของไหลในเบดของแข็งได้เริ่มเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย เมื่อมีการประยุกต์ใช้เทคนิคฟลูอิดไอเซชันเบดในการแตกตัวน้ำมัน (Fluid catalytic cracking) เพื่อเพิ่มมูลค่าของน้ำมันในปี 1942 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นวัฏภาคของแข็ง

และน้ำมันทำหน้าที่เป็นวัฏภาคของไหลในระบบ ในปี 1970 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เบตได้มีการประยุกต์ใช้หลายรูปแบบในวงการอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

2.1.2 ประเภทของฟลูอิดไธด์เซชัน

ปรากฏการณ์ฟลูอิดไธด์เซชันสามารถจำแนกได้ด้วยจำนวนของวัฏภาคในระบบ ได้แก่

2.1.2.1 ฟลูอิดไธด์เซชันแบบสามวัฏภาค (Three-phase Fluidization) คือ ระบบที่ประกอบด้วย ของแข็ง ของเหลว และแก๊สเช่น กระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยตะกอนชีวภาพซึ่งประกอบไปด้วย ตะกอนชีวภาพทำหน้าที่เป็นวัฏภาคของแข็ง น้ำเสียทำหน้าที่เป็นวัฏภาคของเหลว และฟองอากาศที่ถูกสร้างขึ้นในระบบบำบัดด้วยเครื่องเป่าอากาศทำหน้าที่เป็นวัฏภาคแก๊ส

2.1.2.2 ฟลูอิดไธด์เซชันแบบสองวัฏภาค (Two-phase Fluidization) คือระบบที่ประกอบด้วยวัฏภาคของแข็งกับของเหลว หรือวัฏภาคของแข็งกับแก๊ส

2.1.3 ช่วงการไหล (Regime)

ช่วงการไหล คือ คำที่ใช้นิยามพฤติกรรมที่แตกต่างกันของของแข็งในท่อโรเซออร์ เมื่อความเร็วของของไหลในระบบเปลี่ยนไป

ความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่ท่อโรเซออร์ คือ ปัจจัยที่สำคัญในการเกิดช่วงการไหลรูปแบบต่างๆ ดังแสดงใน รูปที่ 2.3 เบดของแข็งยังไม่มีเคลื่อนที่เมื่อป้อนของไหลที่มีความเร็วค่อยๆ เข้าที่ด้านล่างของท่อโรเซออร์ ภาวะนี้เรียกว่าระบบเบดนิ่ง ซึ่งยังไม่จัดว่าเป็นช่วงการไหลรูปแบบหนึ่งของฟลูอิดไธด์เซชัน เพราะว่าของแข็งยังไม่ได้มีการแสดงพฤติกรรมของของไหล แต่ถือว่าเป็นเครื่องปฏิกรณ์ชนิดหนึ่ง เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจะปรากฏฟองแก๊สลอยจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนของเบด รูปแบบการไหลเช่นนี้ คือ ช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส ฟองแก๊สจะขยายขนาดใหญ่ขึ้นตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น เมื่อฟองแก๊สมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อโรเซออร์อาจทำให้เกิดช่วงการไหลแบบสลักขึ้นได้ ซึ่งมักจะพบช่วงการไหลนี้ได้ ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธด์เซชันที่ท่อโรเซออร์มีขนาดเล็ก เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเบดของแข็งเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนทุกทิศทาง ช่วงการไหลรูปแบบนี้คือช่วงการไหลแบบปั่นป่วน

เบดของของแข็งจะมีความสูงเพิ่มขึ้นตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น เมื่อเบดของแข็งลอยสูงขึ้นจนกระทั่งของแข็งเริ่มเคลื่อนที่ออกจากยอดของท่อโรเซอริไปยังไซโคลนได้ จะเป็นช่วงการไหลรูปแบบใหม่ที่ถูกค้นพบในปี 2009 ที่เรียกว่าช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนสัดส่วนของของแข็งในท่อโรเซอริจะเริ่มลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศต่อไปจนกระทั่งพบว่าช่วงกลางของท่อโรเซอริมีของแข็งลอยขึ้นแบบเบาบางและมีของแข็งเคลื่อนที่ในทิศทางบริเวณผนังของท่อโรเซอริ พฤติกรรมนี้เรียกว่าการไหลแบบแกนใน-วงนอก ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของช่วงการไหลแบบความเร็วสูง เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นจนทำให้สัดส่วนของแข็งมีค่าน้อยมากตลอดแนวความสูงของโรเซอริ ช่วงการไหลนี้คือช่วงการไหลแบบเบาบาง

2.1.3.1 เบดนิ่ง (Fixed Bed)

เบดนิ่ง คือ ลักษณะที่เบดของแข็งอัดแน่นอยู่กับที่ตามแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศพุ่งลงตั้งฉากกับผิวโลกซึ่งมักจะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเมื่อไม่มีของไหลเคลื่อนที่ผ่านเบดหรือมีของไหลเคลื่อนที่ผ่านเบดด้วยความเร็วต่ำมากๆ แต่ทันทีที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งด้วยความเร็วที่สูงขึ้นจะส่งผลให้เกิดความดันลดกับของไหลเนื่องมาจากของไหลจะสูญเสียแรงดันบางส่วนไปเป็นแรงลอยตัวและแรงลาก(Drag force) โดยที่แรงลอยตัวและแรงลากจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับน้ำหนักของของแข็ง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความดันลดที่เกิดขึ้นภายในเบดของแข็งแปรผันตรงกับความเร็วของของไหลที่เคลื่อนที่เข้าสู่เบดของแข็งดังสมการของ Ergun [9]

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1-\psi\varepsilon)^2 \mu u_g}{\varepsilon^3 (\phi d_p)^3} + \frac{175[u_g^2 (1-\psi\varepsilon) \rho_g]}{\phi d_p \varepsilon^3} \quad (2.1)$$

โดยที่

ε = สัดส่วนของแข็ง (-)

ψ = ความเป็นทรงกลมของของอนุภาคของแข็ง (-)

ρ_g = ความหนาแน่นของแก๊ส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

μ = ความหนืด (พาสคาล.วินาที)

U_g = ความเร็วของแก๊สที่ป้อนเข้าสู่เบด (เมตรต่อวินาที)

2.1.3.2 ช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (Bubbling fluidized bed)

ความเร็วค่าสุดท้ายของของไหลที่เบดของแข็งยังคงอยู่นิ่งเรียกว่าความเร็วที่น้อยที่สุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน (Minimum fluidization velocity, U_{mf}) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลจนกระทั่งความดันลดไม่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 2.4 ในภาวะที่ความเร็วของของไหลเท่ากับความเร็วที่น้อยที่สุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน ผลรวมของแรงลอยตัวและแรงลากในทิศขึ้นจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของแข็งที่อยู่ในทิศลงเบดของแข็งจะเริ่มแสดงพฤติกรรมของของไหล ผลของการเพิ่มความเร็วจะส่งผลทำให้เบดของแข็งมีความสูงมากขึ้น และสัดส่วนของของแข็งในเบดมีค่าลดลง

ความเร็วที่น้อยที่สุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชันได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลายจนกระทั่งในปี 1966 ได้มีการนำเสนอสมการที่ให้คำนวณหาความเร็วที่น้อยที่สุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอส์เบด [10]

$$Re_{mf} = \frac{\rho_g d_p U_{mf}}{\mu} = [27.2^2 + 0.0408 Ar]^{0.5} - 27.2 \quad (2.2)$$

โดยที่

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ

U_{mf} = ความเร็วที่น้อยที่สุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน (เมตรต่อวินาที)

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

ถ้าความเร็วของของไหลมีค่ามากกว่าค่าความเร็วน้อยที่สุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชันแล้ว จะเกิดช่วงการไหลแบบฟองแก๊สโดยปรากฏฟองแก๊สลอยขึ้นจากด้านล่างและแตกที่ผิวหน้าของเบด สำหรับของแข็งที่อยู่กลุ่มเจลดาร์ทบีและดี (หัวข้อ 2.1.3) ฟองแก๊สมักจะเกิดขึ้นได้ทันทีเมื่อความเร็วของของไหลมีค่ามากกว่าค่าความเร็วน้อยที่สุดของการเกิดฟลูอิดไอเซชัน แต่สำหรับอนุภาคในกลุ่มเจลดาร์ทเอ ฟองแก๊สจะเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลถึงค่าความเร็วน้อยที่สุดของการเกิดฟองแก๊ส (U_{mb}) ดังแสดงในสมการ [11]

$$U_{mb} = 2.07 \exp(0.716) dp \left[\frac{\rho_g^{0.06}}{\mu^{0.347}} \right] \quad (2.4)$$

2.1.3.3 ช่วงการไหลแบบสลัก (Slug flow)

เมื่อฟองแก๊สขยายตัวจนมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองแก๊สใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อโรเตอร์ จะทำให้เกิดช่วงการไหลแบบสลักขึ้น ที่ภาวะดังกล่าวของแข็งและของไหลจะแยกตัวออกจากกันชัดเจน เป็นกลุ่มก้อนของของแข็งสลับกับช่องว่างที่เต็มไปด้วยของไหลที่เคลื่อนที่ขึ้นตามแนวตั้งของท่อโรเตอร์ อุทกพลศาสตร์ของช่วงการไหลแบบฟองแก๊สและแบบสลักแตกต่างกันอย่างมาก ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบสลัก คือ ท่อโรเตอร์ที่มีความสูงมากแต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญ 3 ประการที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบสลัก คือ [12]

- 1) ขนาดของฟองแก๊สจะต้องมีค่าประมาณ 0.6 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อโรเตอร์
- 2) ความสูงของเบดเมื่อเกิดการขยายตัวแล้วมีความสูงอย่างน้อยเท่ากับความสูงของคอลัมน์
- 3) ความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่เบดจะต้องมีค่ามากกว่าความเร็วที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดสลัก ดังแสดงในสมการ [13]

$$U_{sl} = U_{mf} + 0.07(gD)^{0.5} \quad (2.5)$$

และความเร็วมากที่สุดที่จะให้เกิดการช่วงการไหลแบบสลักแสดงดังสมการ

$$\frac{U_t^2}{gD} \leq 0.123 \quad (2.6)$$

2.1.3.4 ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Fluidized bed)

เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลมากขึ้นจนกระทั่งไม่พบฟองแก๊สลอยขึ้นจากด้านล่างสู่หน้าเบด จะพบว่าอนุภาคที่อยู่ในเบดจะเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วนทุกทิศทางทั้งในแนวตั้งและในแนวระดับของท่อโรเตอร์ การเคลื่อนที่แบบปั่นป่วนทุกทิศทางนี้คือลักษณะเด่นของช่วงการไหลแบบปั่นป่วน [14] เมื่อของแข็งสามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง แสดงว่าวัฏภาคของไหลและของแข็งสามารถผสมผสานกันดีเป็นย่างดี หน้าเบดในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะสูงขึ้นเมื่อความเร็วของของไหลที่เข้าสู่เบดสูงขึ้น แต่สัดส่วนของของแข็งในท่อโรเตอร์จะลดลงเมื่อเบดมีการขยายตัวสูงขึ้น นอกจากนี้แล้วเมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นจะทำให้อนุภาคหลุดออกจากผิวเบด (Freeboard) ปริมาณของอนุภาคที่หลุดออกจากเบดจะแปรผันตรงกับความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่เบด

รูปที่ 2.5 แสดงถึงการแกว่งของความดันภายในเบดในช่วงการไหลแบบฟองแก๊สและช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นในช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส จะพบว่า การแกว่งของความดันจะเพิ่มขึ้น ความเร็วสุดท้ายที่เบดสามารถคงสภาพอยู่ในช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส (U_c) คือ ความเร็วที่ทำให้ค่าการแกว่งของความดันในเบดสูงที่สุดจากนั้นแนวโน้มของการแกว่งของความดันจะลดลงตามความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นความเร็วน้อยที่สุดที่เบดของแข็งสามารถแสดงช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (U_k) ได้ คือความเร็วที่ค่าการแกว่งของความดันภายในเบดเริ่มคงที่

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการวัดความเร็วสุดท้ายที่เบดสามารถคงสภาพอยู่ในช่วงการไหลแบบฟองแก๊สและความเร็วน้อยที่สุดที่เบดของแข็งสามารถแสดงช่วงการไหลแบบปั่นป่วน จะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของโรเตอร์ ความหนาแน่นของแก๊ส ตำแหน่งของเครื่องวัดความดัน อุณหภูมิ และการกระจายตัวของขนาดอนุภาค เป็นต้น สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วสุดท้ายที่เบดสามารถคงสภาพอยู่ในช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส แสดงในตารางที่ 2.2

2.1.3.5 ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน(Circulating turbulent fluidized bed)

ช่วงการไหลแบบความเร็วสูงมักจะเกิดขึ้นหลังจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วน แต่ในปี 2009 ได้มีการค้นพบช่วงการไหลรูปแบบใหม่ที่มีชื่อว่าช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน [15] ที่ของแข็งในท่อโรเตอร์มีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับช่วงการไหลแบบปั่นป่วน คือ มีสัดส่วนของของแข็งสูงอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวความสูงของท่อโรเตอร์และของแข็งมีการหมุนเวียนจากท่อโรเตอร์ไปยังไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 แสดงวิภาคของแข็งและวิภาคของไหลสามารถสัมผัสกันได้ดี

ความเร็วของอนุภาคในแนวรัศมีของท่อโรเตอร์ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนจะมีเพิ่มขึ้นจากผนังเข้าสู่แนวกึ่งกลางของโรเตอร์ที่ในทิศทางที่ลอยขึ้นตลอดแนวรัศมีของท่อโรเตอร์ ดังแสดงในรูป 2.7 ซึ่งแตกต่างจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วนและช่วงการไหลแบบความเร็วสูงที่มักมีปรากฏการณ์การไหลแบบแกนใน-วงนอกที่มีอนุภาคลอยขึ้นในช่วงกลางของท่อโรเตอร์และมีอนุภาคเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้กับผนัง การไหลแบบแกนใน-วงนอกของอนุภาคของแข็งคือสิ่งที่ไม่พึงประสงค์เมื่อมีการนำเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เพราะว่าการไหลแบบแกนใน-วงนอกจะทำให้ของแข็งและของไหลสัมผัสกันได้ไม่ดีเท่าที่ควรและทำให้ของแข็งจับตัวกันเป็นก้อน (Cluster) ที่บริเวณผนัง ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าต่ำ การไม่ปรากฏค่าความเร็วที่เป็นลบแสดงถึงไม่มีอนุภาคเคลื่อนที่ในทิศตกลงตามแรงโน้มถ่วงที่บริเวณผนังท่อโรเตอร์ ทำให้ทราบว่าของแข็งไม่มีการจับตัวเป็นก้อนในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน ส่งผลโดยตรงต่อร้อยละของผลได้ที่มากในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด

ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน คือ สัดส่วนของของแข็ง (Solid fraction) ในท่อโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงการไหลรูปแบบอื่น โดยที่สัดส่วนของของแข็งสามารถคำนวณได้จากค่าความดันลดดังสมการ

$$\varepsilon = \frac{\Delta P}{\rho_s g \Delta h} \quad (2.7)$$

เมื่อ

ε = สัดส่วนของของแข็ง (-)

ΔP = ความดันลด (พาสคาล)

g = สนามแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 เมตรต่อวินาที²)

Δh = ช่วงความสูงที่ทำการวัดความดันลด (เมตร)

ปัญหาที่สำคัญของงานวิจัยดังกล่าว คือ ต้องมีการป้อนของไหลครั้งที่สองเข้าที่ด้านข้างของท่อไรเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งจะรบกวนระบบทำให้ความเข้มข้น อุณหภูมิ พลศาสตร์ และอุทกพลศาสตร์เปลี่ยนไปซึ่งอาจจะส่งผลให้ไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดได้เท่าที่ควร

2.1.3.6 ช่วงการไหลแบบความเร็วสูง (Fast Fluidized bed)

ช่วงการไหลแบบความเร็วสูง เป็นช่วงการไหลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบต่อเนื่อง ที่ของแข็งและของไหลสามารถสัมผัสกันในท่อไรเซอร์ตลอดเวลาซึ่งเป็นบริเวณที่สามารถปรับสภาวะความดันและอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแต่ละกระบวนการ ของไหลจะถ่ายโอนโมเมนตัมให้กับของแข็ง ส่งผลให้ของแข็งสามารถลอยขึ้นสู่ด้านบนของท่อไรเซอร์และข้ามไปยังส่วนไซโคลน ของแข็งจะถูกเหวี่ยงออกจากแนวศูนย์กลางเข้าเสียดสีกับผนังของไซโคลน แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะทำให้พลังงานจลน์ของอนุภาคของแข็งลดจนกระทั่งของแข็งร่วงลงสู่ดาวเนอร์ตามแรงโน้มถ่วง แต่ของไหลจะลอยขึ้นทางด้านบนของไซโคลน ออกสู่บรรยากาศที่มีความดันต่ำกว่าไซโคลน ทำให้เกิดการแยกทางกายภาพระหว่างวัฏภาคของแข็งและของไหล ทำให้สามารถแยกของไหลที่เป็นสารตั้งต้นที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดและผลิตภัณฑ์ออกจากของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งด้วยความดันและอุณหภูมิจะทำได้ที่ดาวเนอร์ ทำให้สามารถป้อนของแข็งจากดาวเนอร์กลับเข้าทำปฏิกิริยาในท่อไรเซอร์ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องหยุดเครื่องปฏิกรณ์

ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา มีการศึกษาช่วงการไหลแบบความเร็วสูงอย่างต่อเนื่อง[16] จนสามารถสรุปลักษณะเด่นของช่วงการไหลแบบความเร็วสูงได้หลายประการ ประการแรก คือ สัดส่วนของแข็งตามความสูงของท่อโรเตอร์จะมีรูปร่างเหมือนตัว “s” กล่าวคือมีสัดส่วนของของแข็งมากทางด้านล่างและด้านบนของโรเตอร์ แต่ช่วงกลางของท่อโรเตอร์จะมีของแข็งเบาบาง ดังแสดงในรูป 2.9 ประการที่สอง คือ ของแข็งจะเกิดการไหลแบบแกนใน-วงนอก ซึ่งจะมีของแข็งลอยขึ้นที่แกนในและตกลงที่วงนอกของท่อโรเตอร์ นอกจากนี้การไหลแบบแกนใน-วงนอกยังส่งผลให้ของแข็งจับตัวกันเป็นก้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สัดส่วนของแข็งที่ไม่สม่ำเสมอในท่อโรเตอร์ประกอบกับการไหลแบบแกนใน-วงนอกนี้เองที่ทำให้ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเซชันแบบต่อเนื่องยังไม่สูงเท่าที่ควร ทำให้ต้องออกแบบท่อโรเตอร์ที่มีความสูงมากซึ่งส่งผลให้สิ้นเปลืองทั้งเงินลงทุนและเกิดความยุ่งยากในการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์

ความเร็วขนส่ง (Transport velocity, U_p) คือความเร็วของไหลที่เปลี่ยนจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วนสู่ช่วงการไหลแบบความเร็วสูง ความเร็วขนส่งได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลายตลอดช่วงเวลากว่า 20 ปี จึงทำให้มีสมการที่สามารถใช้ในการคำนวณความเร็วขนส่งหลายสมการดังแสดงในตารางที่ 2.3

2.1.4 คุณสมบัติของของแข็ง

ในปี 1973 เจลดาร์ทได้ทำการแบ่งอนุภาคของแข็งออกเป็น 4 ประเภท ตามความสามารถในการเลียนแบบพฤติกรรมของของไหลที่ความดันบรรยากาศ [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.11

อนุภาคกลุ่มเอ (Aeratable) คือของแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 30-200 ไมโครเมตร ความหนาแน่นต่ำกว่า 1400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อนุภาคกลุ่มนี้มีน้ำหนักเบาและสามารถเลียนแบบพฤติกรรมของของไหลได้ดี ความเร็วที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบฟองแก๊สจะมีค่ามากกว่าความเร็วที่น้อยที่สุดที่เบดของแข็งเริ่มขยับตัว เบดของแข็งจะมีการขยายตัวก่อนที่จะปรากฏฟองแก๊สลอยขึ้นจากด้านล่างของเบดสุ่มิวเบด ขนาดของฟองแก๊สขึ้นอยู่กับการกระจายของขนาดอนุภาค

อนุภาคกลุ่มบี (Bubbling) คือของแข็งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 200-1,000 ไมโครเมตร ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1,400-4,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ฟองแก๊สของอนุภาคในกลุ่มบี จะเพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นได้เมื่อความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่เบดของแข็งให้มีค่าสูงขึ้น เมื่อขนาดของฟองแก๊สขยายขนาดใหญ่ขึ้นจนมีขนาดเท่ากับท่อโรเตอร์จะทำให้เกิดการไหลในช่วงการไหลแบบสลัก สำหรับอนุภาคในกลุ่มบี ความเร็วที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดฟองแก๊สคือค่าเดียวกับความเร็วที่น้อยที่สุดที่เบดของแข็งเริ่มขยับตัว ขนาดของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นในอนุภาคกลุ่มบี จะแตกต่างกับอนุภาคในกลุ่มเอตรงที่ขนาดของฟองแก๊สไม่ได้ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

อนุภาคกลุ่มซี (Cohesive) คือ อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 30 ไมโครเมตร อนุภาคกลุ่มนี้มีความสามารถในการเลียนแบบพฤติกรรมของไหลต่ำเพราะว่ามีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูงเบดของแข็งของอนุภาคในกลุ่มซีมักเกิดช่องว่างเบดของแข็งน้อยเนื่องมาจากอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

อนุภาคกลุ่มดี (Spoutable) คืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูง ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมักจะรวมกลุ่มอยู่ตำแหน่งเดียวขนาดใหญ่บริเวณจุดกลางของเบดของแข็ง ของไหลจะเคลื่อนที่ในบริเวณที่เกิดฟองแก๊สและของแข็งจะไปจับกลุ่มที่บริเวณใกล้ผนังท่อโรเตอร์

2.1.5 แผนภาพแสดงช่วงการการไหล (Flow regime diagram)

ในช่วงต้นปี 1949 Zenz ได้นำเสนอแผนภาพของช่วงการไหลที่แสดงช่วงการไหลแบบขนส่ง (Pneumatic transport) และช่วงการไหลแบบความเร็วสูง แต่ว่าแผนภาพแสดงช่วงการไหลชุดนั้น ไม่ได้แสดงช่วงการไหลแบบปั่นป่วนและช่วงการไหลแบบสลัก จนกระทั่งในปี 1976 ได้มีการนำเสนอแผนภาพแสดงช่วงการไหลในรูปของความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่เบดกับสัดส่วนของที่ว่างภายในเบดเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิไดเซชัน ทำให้ได้แผนภาพแสดงช่วงการไหลที่มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถทำนายช่วงการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อตัวแปรดำเนินการเปลี่ยนไปได้ดีขึ้น ในปี 1986 Grace ได้เพิ่มรายละเอียดของช่วงการไหลที่มีความเร็วของของไหลต่ำและสูงเข้าไปในแผนภาพแสดงช่วงการไหล แต่ทว่าการนำเสนอแผนภาพด้วยความเร็วของของไหลและ

สัดส่วนของที่ว่างในเขตของแข็งนั้นแสดงบริเวณช่วงการไหลแบบความเร็วต่ำและความเร็วสูงได้ไม่ชัดเจนเท่าที่ควร

ดังนั้นในปี 1980 รูปแบบการนำเสนอแผนภาพแสดงช่วงการไหลรูปแบบใหม่ ซึ่งแสดงผลของความเร็วของของไหลและปริมาณของแข็งที่หมุนเวียนอยู่ภายในระบบในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนตามลำดับ ต่อช่วงการไหลที่เปลี่ยนไปทำให้สามารถแบ่งช่วงการไหลที่มีความเร็วสูงกับความเร็วต่ำได้อย่างชัดเจน แต่กลับแสดงช่วงการเปลี่ยนผ่านของการไหลแบบความเร็วสูงและช่วงการไหลแบบชนส่งได้ไม่ดี

ในปี 1995 Grace และ Bi นำเสนอแผนภาพแสดงช่วงการไหลรูปแบบใหม่ ที่สามารถแสดงช่วงเปลี่ยนผ่านของช่วงการไหลแต่ละช่วงได้อย่างชัดเจน โดยแสดงช่วงการไหลที่เกิดขึ้นผ่านตัวแปร U^* และ V^* ในแนวแกนตั้งและรากที่สามของตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสแผนภาพของ Grace และ Bi แบ่งได้เป็น 2 ประเภทดังนี้

1) แผนภาพแสดงช่วงการไหลแบบกะ

เมื่อความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่เบดเพิ่มขึ้น ช่วงการไหลจะเปลี่ยนจากเบดนิ่งไปเป็นช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส ช่วงการไหลแบบสลัก และช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.12 หลังจากที่ได้รวบรวมข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าจะสามารถแสดงช่วงการไหลดังกล่าวได้ โดยมีแกนตั้งเป็นตัวแปร U^* และแกนนอนเป็นรากที่สามของตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยที่

$$U^* = \frac{Re}{Ar^3} \quad (2.8)$$

เมื่อ

Re = ตัวเลขไร้หน่วยเรโนลด์

Ar = ตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส

2) แผนภาพแสดงช่วงการไหลทั้งหมด

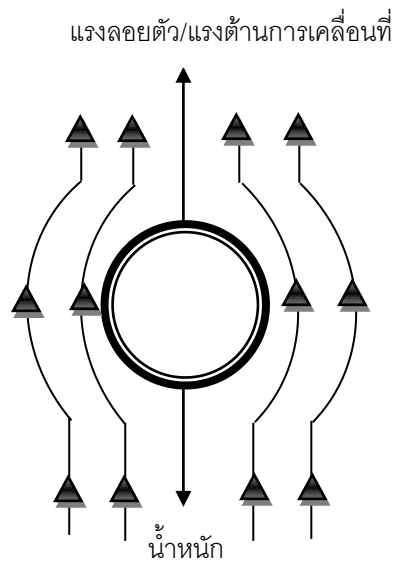
เมื่อผนวกช่วงการไหลเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ อันได้แก่ ช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส ช่วงการไหลแบบสลัก และช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เข้ากับช่วงการไหลที่สามารถเกิดในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง อันได้แก่ ช่วงการไหลแบบความเร็วสูง และช่วงการไหลแบบขนส่งที่ปริมาณของแข็งที่ไหลเวียนอยู่ในระบบคงที่ จะพบว่าเบตหนึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส ช่วงการไหลแบบสลัก ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ช่วงการไหลแบบความเร็วสูงและช่วงการไหลแบบขนส่ง เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.14

ความแตกต่างระหว่างช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะกับการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง คือ ช่วงการไหลในระบบกะจะไม่มีภาระหมุนเวียนของของแข็งในระบบ ($G_s = 0$) แต่ช่วงการไหลในระบบต่อเนื่องจะต้องมีของแข็งหมุนเวียนอยู่ในระบบที่เข้าสู่เบตที่ด้านล่างของโรเตอร์และออกจากเบตที่ยอดของโรเตอร์ ($G_s \neq 0$) ดังนั้นเพื่อที่จะผนวกช่วงการไหลที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะเข้ากับช่วงการไหลที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนิยามตัวแปร V^* ขึ้นมาใหม่ ที่มีผลของความเร็วของของไหลและอัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่หมุนเวียนอยู่ในระบบ ดังแสดงในสมการ

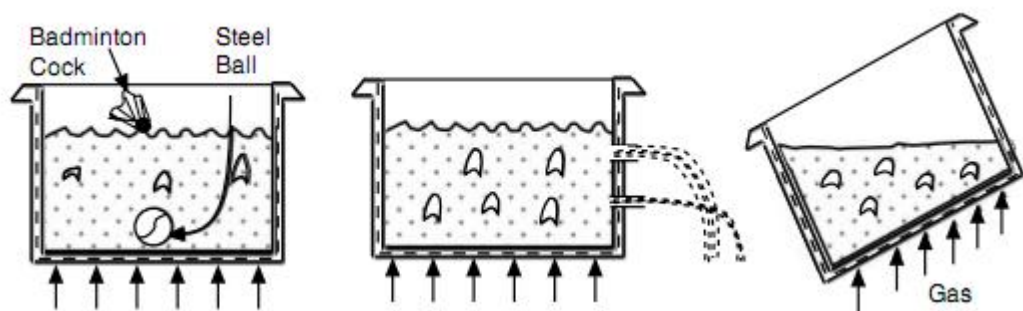
$$V^* = \left[\frac{\rho_g^2}{g\mu_g(\rho_p - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{3}} \left[U_g - \frac{G_s \varepsilon}{\rho_p(1-\varepsilon)} \right] \quad (2.9)$$

แผนภาพแสดงช่วงการไหลที่ผนวกช่วงการไหลในระบบแบบกะและช่วงการไหลในระบบต่อเนื่องซึ่งแสดงในรูปที่ 2.15 ถือว่าเป็นแผนภาพที่แสดงช่วงการไหลได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ แต่ในปี 2009 ได้มีการค้นพบช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนที่มีลักษณะเด่นของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่มีสัดส่วนของแข็งสูงตลอดแนวความสูงของโรเตอร์และช่วงการไหลแบบความเร็วสูงที่มีการหมุนของแข็งในระบบ ลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะที่ดีที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรต์เบตให้สูงขึ้น แผนภาพที่แสดงรายละเอียดของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนมีความจำเป็นอย่างมากในขั้นตอนของการออกแบบ จึงทำให้มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะศึกษาเงื่อนไขของตัวแปรดำเนินการที่สามารถก่อให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนและ

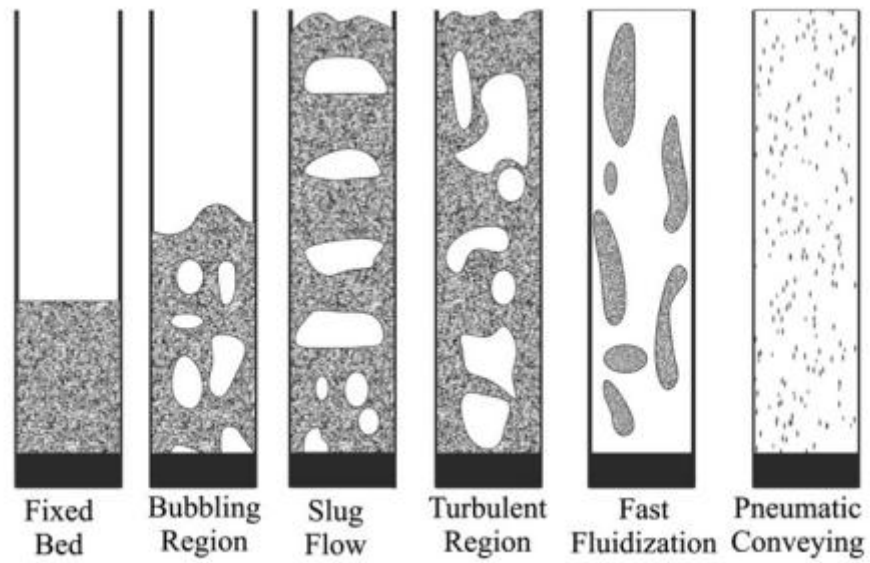
ผนวกเข้าไปกับแผนภาพแสดงช่วงการไหลที่มีอยู่แล้ว อันจะทำให้ได้แผนภาพแสดงช่วงการไหลรูปแบบชิ้นใหม่ที่มีข้อมูลครบถ้วนมากยิ่งขึ้น



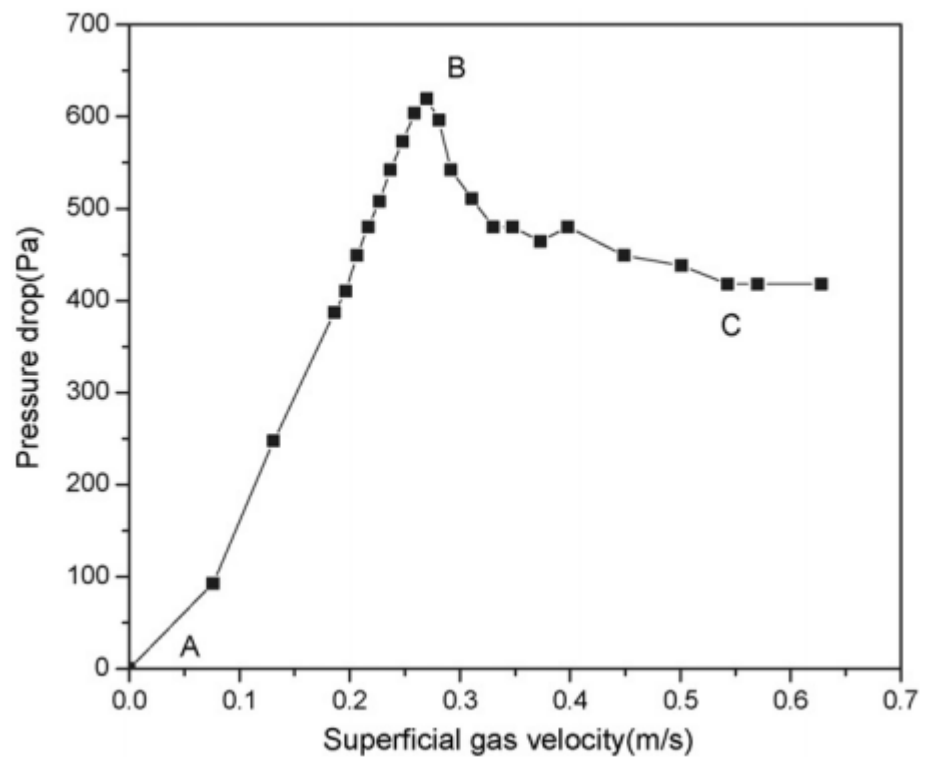
รูปที่ 2.1 แผนภาพแรงที่กระทำต่อของแข็ง



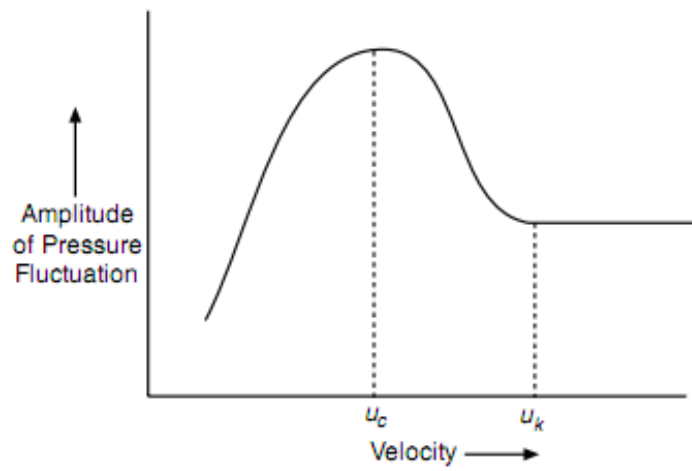
รูปที่ 2.2 พฤติกรรมคล้ายของไหลที่เกิดขึ้นในเบตของแข็ง[7]



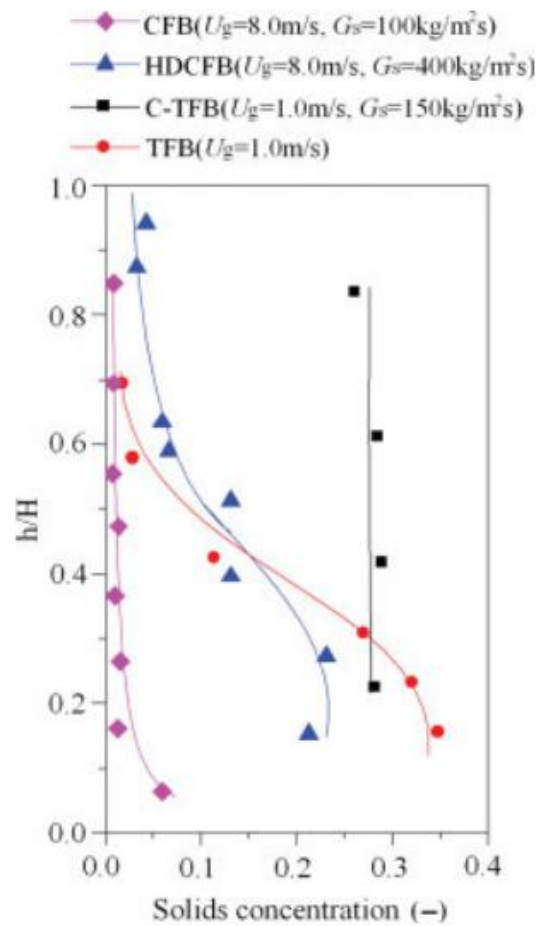
รูปที่ 2.3 ช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธเซด[7]



รูปที่ 2.4 ความเร็วที่น้อยที่สุดของการเกิดฟลูอิดไธเซชัน[14]

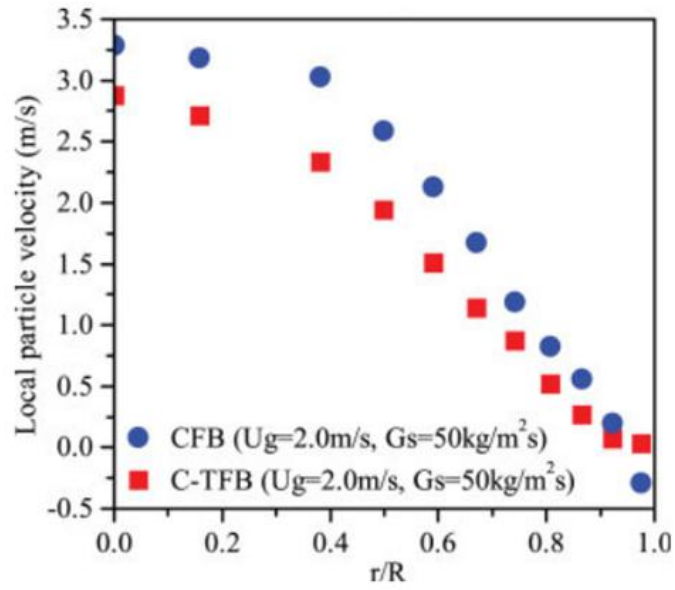


รูปที่ 2.5 การแกว่งของแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าสู่ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน [14]



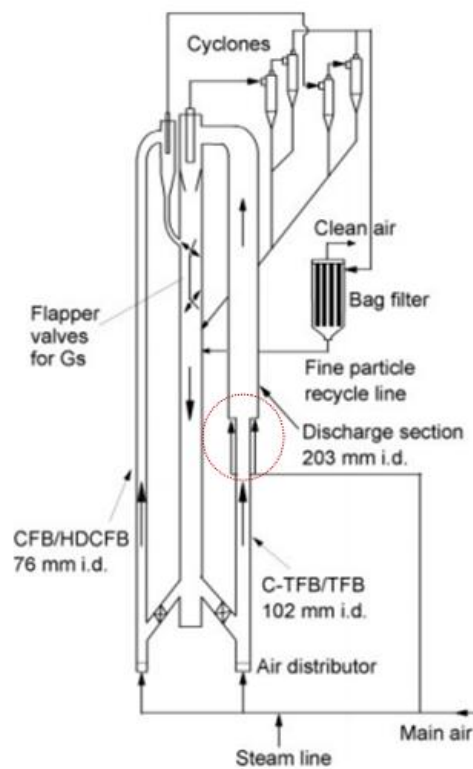
รูปที่ 2.6 สัดส่วนของเชิงไนโรเซอร์ที่ค่าสูงอย่างสม่ำเสมอ

ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน [15]

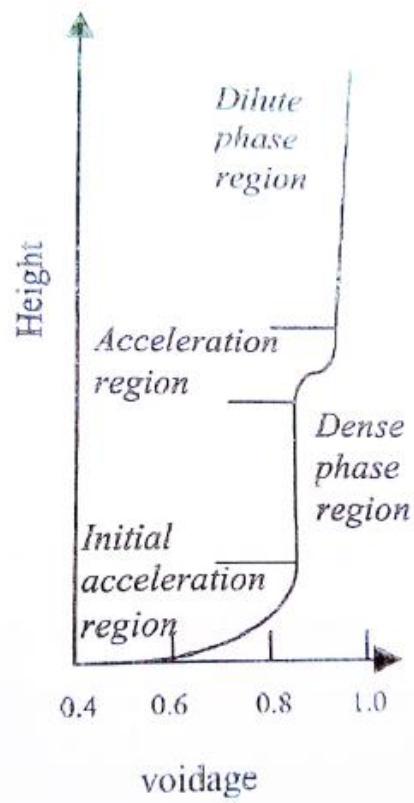


รูปที่ 2.7 ความเร็วของอนุภาคที่มีค่าเป็นบวกตลอดรัศมีของโรเตอร์

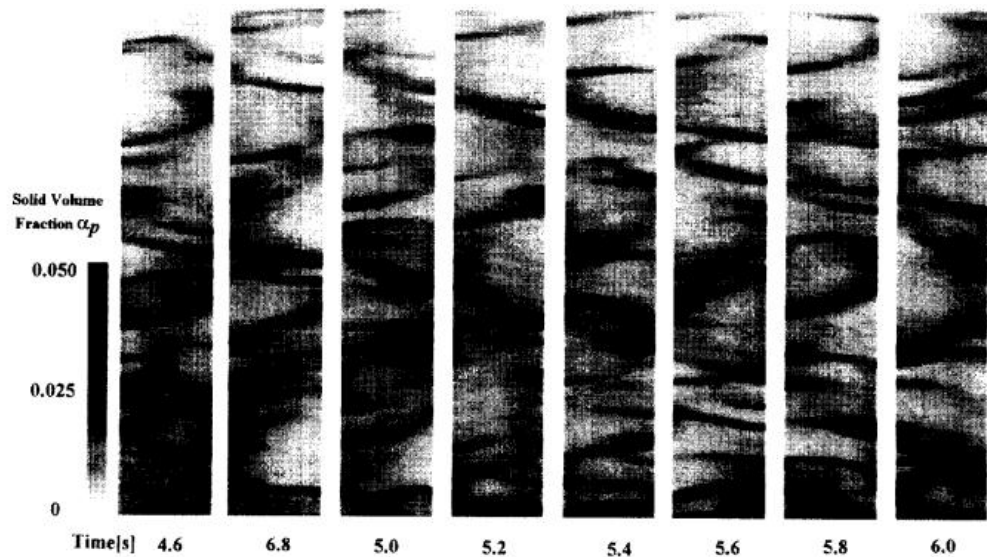
ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน[15]



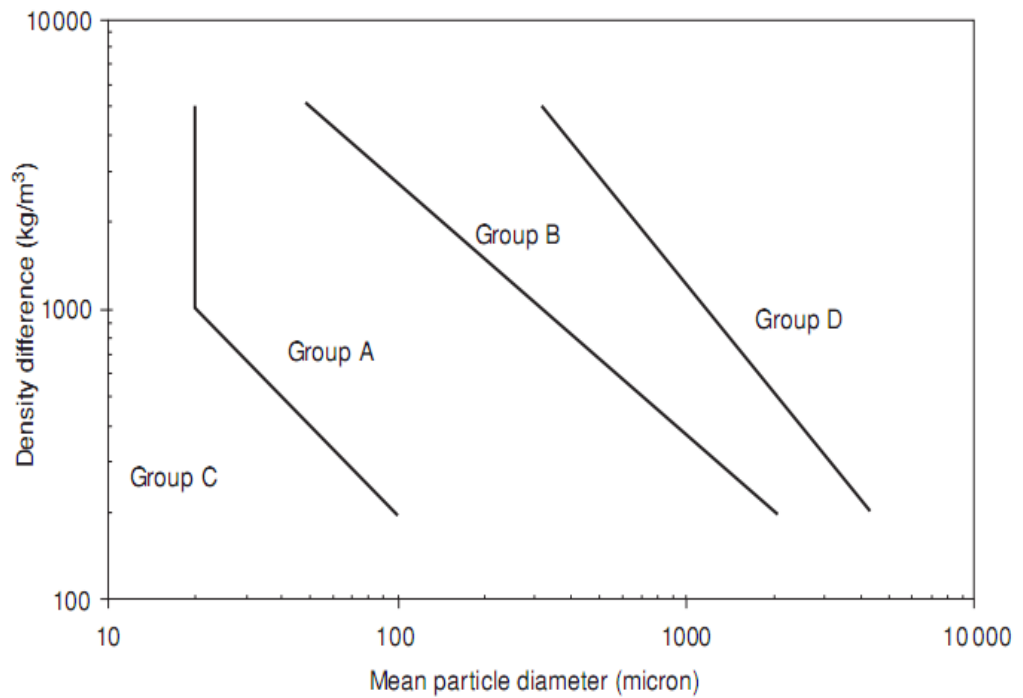
รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่มีการป้อนของไหลจิ่งหะที่สองที่ผนังโรเตอร์ [15]



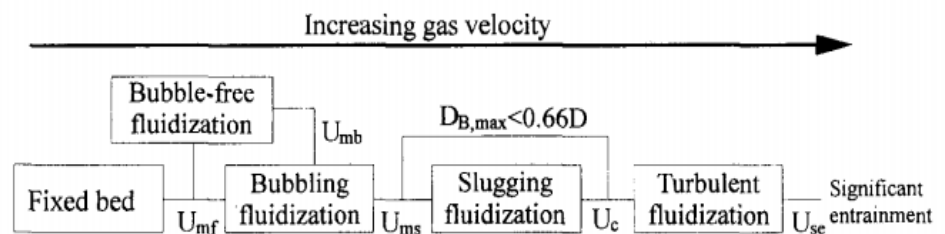
รูปที่ 2.9 กราฟรูปตัว S ของช่วงการไหลแบบความเร็วสูง [20]



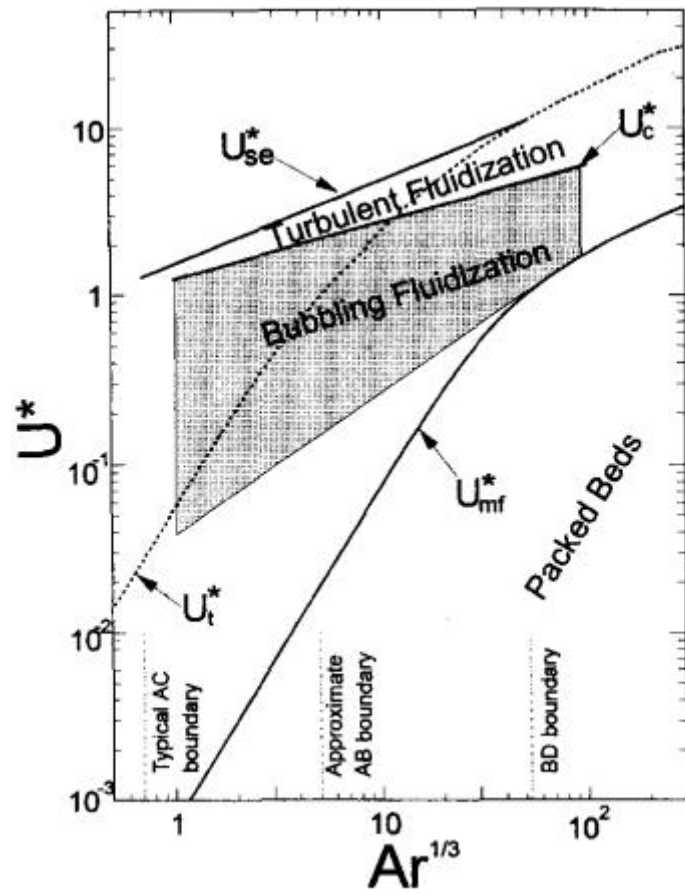
รูปที่ 2.10 การเกิดการจับตัวเป็นก้อนของของแข็งที่เวลาต่างๆ [21]



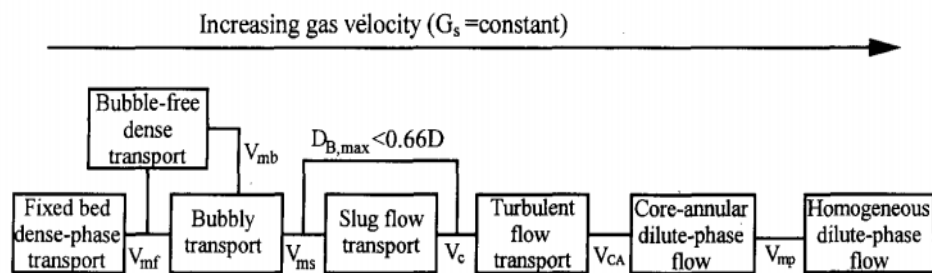
รูปที่ 2.11 การจำแนกอนุภาคตามวิธีของเจลดาร์ท[17]



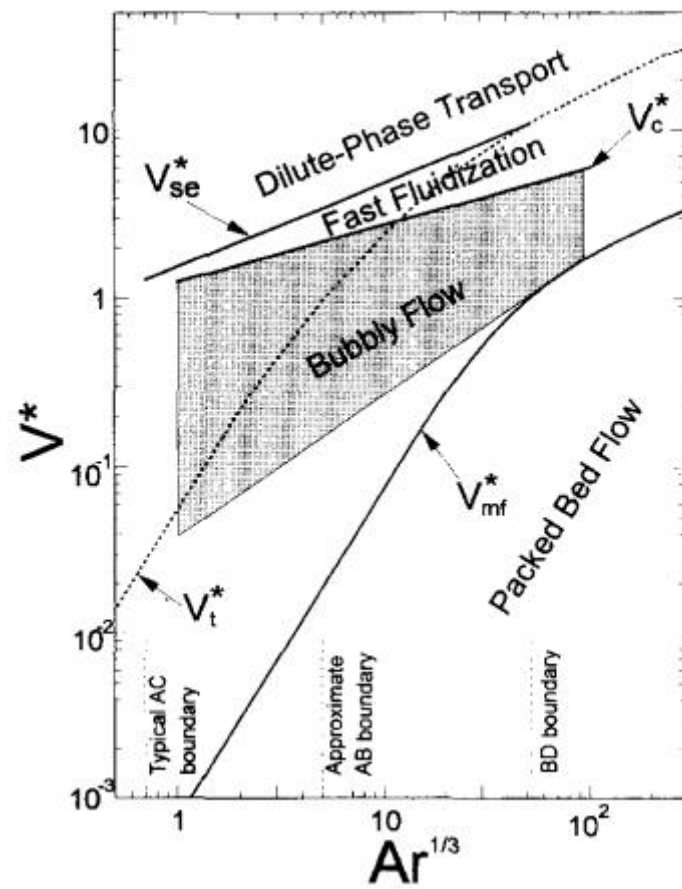
รูปที่ 2.12 ผลของความเร็ของของไหลต่อช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ [8]



รูปที่ 2.13 แผนภาพของช่วงการไหลในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ [8]



รูปที่ 2.14 ผลของความเร็วของของไหลต่อช่วงการไหล [8]



รูปที่ 2.15 แผนภาพของช่วงการไหล [8]

ตาราง 2.1 การประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด [18]

ประเภทของอุตสาหกรรม	การใช้งาน
การสังเคราะห์พอลิเมอร์	การผลิตซิลิคอนสำหรับการทำวัสดุกึ่งตัวนำ การสังเคราะห์โพลีเอทีลีน
ชีวเคมี ยา	การเตรียมอนุภาคที่มีขนาดเล็กในการผลิตอาหารและ
การสังเคราะห์สารเคมี	การผลิต <ul style="list-style-type: none"> - สารประกอบจำพวก แอนไฮไดรต์ - ถ่านกัมมันต์ - อะคริไลไนไตรล์
ปิโตรเคมี	เครื่องปฏิกรณ์ FCC การผลิตเอทีลีนและโพลีลีน
เตาปฏิกรณ์	เครื่องเผาขยะ เตาเผาถ่านหินและเครื่องผลิตไอน้ำ

ตารางที่ 2.2 ความสัมพันธ์ในการหาค่าความเร็วสุดท้ายที่เบตสามารถคงสภาพอยู่ในช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส(U_c) [21]

ผู้ทำการวิจัย	สมการ	สมการที่
Yershalmi (1984)	$U_c = 0.3(\rho_p d_p)^{0.5} - 0.77$	(2.10)
	$U_c = U_t \epsilon_e^m$	(2.11)
Lee and kim(1988)	$Re_c = 0.7Ar^{0.485}$	(2.12)
Leu, Huang and Gua(1990)	$Re_c = 0.568Ar^{0.578}$	(2.13)
Horio(1991)	$Re_c = 0.936Ar^{0.472}$	(2.14)
Nakajima et al. (1991)	$Re_c = 0.663Ar^{0.467}$	(2.15)
Dunham et al. (1993)	$Re_c = 1.201Ar^{0.386} (H/D)^{0.128 \ln(d_p \rho_p) + 0.264}$	(2.16)
Bi and Grace (1995)	$Re_c = 1.243Ar^{0.467}$	(2.17)
Bi and grace (1995)	$Re_c = 0.565Ar^{0.46}$	(2.18)

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ในการหาค่าความเร็วขนส่ง(U_{tr}) [22]

ผู้ทำการวิจัย	สมการ	สมการที่
Lee and kim(1990)	$Re_{tr} = 2.916Ar^{0.354}$	(2.19)
Perales et al.(1991)	$Re_{tr} = 1.415Ar^{0.483}$	(2.20)
Bi and Fan (1992)	$Re_{tr} = 2.28Ar^{0.419}$	(2.21)
Adenez et al.(1993)	$Re_{tr} = 2.078Ar^{0.458}$	(2.20)
Tsukada et al.(1994)	$Re_{tr} = 1.806Ar^{0.458}$	(2.21)
Chehbouni et al. (1995)	$Re_{tr} = 0.169Ar^{0.545} (D_t/d_p)^{0.3}$	(2.22)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาความเร็วของของแข็งที่หลุดออกจากเบตในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อใช้ในการประเมินแนวโน้มการเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการป้อนอากาศเพียงครั้งเดียว คือประเด็นที่สำคัญประการแรกของการศึกษานี้ เมื่อทราบถึงแนวโน้มในการเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำมาสู่ประเด็นที่สำคัญประการที่ 2 ของงานวิจัย คือการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการได้แก่ ความเร็วของของไหลที่ป้อนเข้าสู่ไรเซอร์และปริมาณของแข็งที่หมุนเวียนอยู่ในระบบที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนและนำเสนอเงื่อนไขที่ทำให้เกิดช่วงการไหลปั่นป่วนหมุนเวียนด้วยสมการควบคู่กับแผนภาพแสดงช่วงการไหล

เพื่อที่จะศึกษาแง่มุมต่างๆของทั้ง 2 ประเด็นอย่างครบถ้วน ในบทนี้จึงได้กล่าวถึงสารที่ใช้ในงานวิจัยและการทำงานของเครื่องมือรวมไปถึงระบบต่างๆในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับขั้นตอนของงานวิจัยจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งในหัวข้อนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ การหาความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบต (Freeboard) ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อสัดส่วนของแข็งในแต่ละช่วงการไหลและการสร้างแผนภาพแสดงช่วงการไหลขึ้นใหม่ที่มีข้อมูลครบถ้วนสมบูรณ์

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุของแข็ง

- ททราย (Silica Sand) จากแหล่งธรรมชาติ อำเภอโพธาราม จังหวัดราชบุรี ความหนาแน่นด้วยวิธีปริมาตรแทนที่น้ำ 2,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงที่มีจำนวนช่องว่างต่อความยาว 1 นิ้วเท่ากับ 16 30 50 และ 100 ช่องตามลำดับ จากนั้นนำทรายแต่ละช่วงที่ร่อนผ่านตะแกรงไปวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยด้วยเครื่อง Particle size analyzer แล้วเลือกอนุภาคทรายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 126 และ 260 ไมโครเมตรไปใช้ในงานวิจัย

- ผงพลาสติกพีวีซี (Polyvinyl chloride) ที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปจากบริษัทไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด (มหาชน) ความหนาแน่น 1,400 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยซึ่งวัดจากเครื่อง Particle size analyzer เท่ากับ 161 ไมโครเมตร

3.1.2 วัสดุภาคของไหล

- อากาศที่อุณหภูมิห้องที่ผ่านเครื่องอัดจนมีความดัน 2 บาร์

3.2 อุปกรณ์และเครื่องปฏิกรณ์

3.2.1 อุปกรณ์

1) เครื่องปรับแรงดัน (Regulator) จำนวน 2 ชิ้น สำหรับควบคุมแรงดันของอากาศที่ 2 ตำแหน่ง ได้แก่

- ท่อลมเสริมที่ป้อนเข้าดาวเนอร์

เครื่องปรับแรงดันยี่ห้อ CHSFC Pneumatic รุ่น AW4000 ที่มีช่วงควบคุมความดันอยู่ระหว่าง 0 – 4 บาร์

- ท่อลมหลักที่ป้อนเข้าโรเซออร์

เครื่องปรับแรงดันยี่ห้อ CHSFC Pneumatic รุ่น AW5000 ที่มีช่วงควบคุมความดันอยู่ระหว่าง 0 – 10 บาร์

2) เครื่องวัดปริมาตรการไหลของอากาศ (Rotameter) จำนวน 2 ชิ้น สำหรับวัดปริมาตรอากาศที่ 2 ตำแหน่ง ได้แก่

- ท่อลมเสริมที่ป้อนเข้าดาวเนอร์

เครื่องวัดปริมาตรของอากาศยี่ห้อ Dwyer ที่มีช่วงการวัดปริมาตรอยู่ระหว่าง 0 -100 ลิตรต่อนาที

- ท่อลมหลักที่ป้อนเข้าโรเตอร์

เครื่องวัดปริมาตรของอากาศยี่ห้อ Dwyer ที่มีช่วงการวัดปริมาตรอยู่ระหว่าง 0 -1,400 ลิตรต่อนาที

3) เครื่องวัดความดัน (Pressure transducer) ยี่ห้อ Fourier รุ่น DT015 ที่มีช่วงการวัดความดันอยู่ระหว่าง 150-1,150 มิลลิบาร์ เก็บค่าข้อมูลของแรงดัน 500 ครั้งต่อวินาที จำนวน 8 ชั้น สำหรับวัดค่าความดันตลอดแนวความสูงของโรเตอร์

4) เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์

5) กล้อง CCD ยี่ห้อ Sony รุ่น SNC-CS10 เลนส์รับภาพขนาด 3 – 8 มิลลิเมตร

6) แหล่งกำเนิดแสง ยี่ห้อ Stocker Yale รุ่น 21AC 230 VAC, Hz 50, 2A

7) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 โวลต์

8) แผ่นสีโปร่งแสงวงกลมที่ประกอบไปด้วย สีแดง สีน้ำเงิน สีเขียว เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร

3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์

ในรูปที่ 3.1 แสดงเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดเซชันสองมิติที่ทำมาจากพลาสติกอะคริลิกที่มีความหนา 1 เซนติเมตร โดยที่อนุภาคของแข็งจะบรรจุอยู่ในดาวเนอร์สามารถเคลื่อนที่ผ่านวาล์วเข้าสู่ทางเข้าด้านล่างของท่อโรเตอร์เข้าสัมผัสกับอากาศที่ผ่านการปรับความดันและวัดปริมาตรด้วยเครื่องปรับความดันและเครื่องวัดปริมาตรอากาศตามลำดับ เมื่ออากาศสัมผัสกับอนุภาคของแข็งจนกระทั่งผลรวมของแรงลอยตัวและแรงลากในทิศขึ้นมีค่ามากกว่าน้ำหนักของอนุภาคของแข็งในทิศลงจะทำให้อนุภาคของแข็งสามารถลอยจากด้านล่างของท่อโรเตอร์ขึ้นสู่ยอดของท่อ

โรเซออร์ซึ่งต่อกับไซโคลน การเสียดสีและกับชนกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนังไซโคลนจะทำให้พลังงานจลน์ของอนุภาคของแข็งลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งร่วงลงสู่ดาวเนอริอ์อีกครั้งดังนั้นที่ไซโคลนจึงเป็นตำแหน่งที่เกิดการแยกของอนุภาคแข็งออกจากอากาศซึ่งของแข็งจะร่วงลงสู่ด้านล่างของดาวเนอริอ์แต่อากาศจะถูกระบายออกที่ด้านบนของไซโคลน ขนาดของเครื่องปฏิกรณ์แสดงในตารางที่ 3.1

ในงานวิจัยจะศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการทั้ง 2 ตัวที่จะส่งผลต่อช่วงการไหลต่อช่วงการไหลได้แก่ ความเร็วของอากาศที่ป้อนสู่ท่อโรเซออร์และปริมาณของของแข็งที่หมุนเวียนอยู่ในระบบ โดยที่ความเร็วของอากาศที่ป้อนสู่ท่อโรเซออร์และปริมาณของของแข็งที่หมุนเวียนอยู่ในระบบสามารถควบคุมได้ด้วยวาล์วที่ควบคุมการไหลของอากาศเข้าสู่โรเซออร์และดาวเนอริอ์ตามลำดับ

3.2.3 ระบบบันทึกภาพนิ่ง

โดยทั่วไปแล้วความเร็วของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากการหารระยะขจัดด้วยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ระยะขจัดและมุมในการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถวัดได้จากภาพนิ่งของอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม Image-Pro Plus ระยะเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่ที่สามารถแทนได้ด้วยระยะเวลาที่กล้องใช้ในการเปิดปิดช่องรับแสงในการบันทึกภาพ (Shutter speed) แต่การจะระบุทิศทางเคลื่อนที่ในทิศขึ้นหรือลงในแนวความสูงของโรเซออร์ จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเพิ่มระบบแสงที่ให้แสงสว่าง 3 สีสลับกันได้แก่ น้ำเงิน เหลือง เขียวอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงที่บันทึกภาพ โดยการให้แสงสว่างสลับสีอย่างต่อเนื่องนี้ จะติดแผ่นสีโปร่งแสงรูปวงกลมเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้วหมุนผ่านแหล่งกำเนิดแสงที่ส่องเข้าสู่บริเวณที่ทำการบันทึกภาพ

ระบบถ่ายภาพนิ่งแสดงในรูป 3.2 โดยเริ่มต้นจากใช้กล้อง CCD ถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคความเร็วชัดเตอร์ 1/250 วินาที ภายใต้แสงสว่างสลับสี ในอัตรา 100 ภาพต่อวินาที ภาพนิ่งทั้งหมดที่ถ่ายได้จะถูกบันทึกลงในคอมพิวเตอร์และทำการวัดระยะขจัดและระบุทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยโปรแกรม Image-Pro Plus รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างภาพนิ่งที่สามารถระบุ

ทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวไรเซอร์ได้จากลำดับที่แตกต่างกันของสี่ที่ปรากฏในแต่ละแนวการเคลื่อนของอนุภาค

3.2.4 ระบบวัดความดัน

การวัดความดันที่แม่นยำจะส่งผลอย่างมากต่อการคำนวณสัดส่วนของของแข็งขณะเกิดช่วงการไหลรูปแบบต่างๆในไรเซอร์ แต่ในระบบที่มีอนุภาคของแข็งและอากาศผสมกันอยู่ย่อมเกิดการแกว่งของความดัน (Pressure fluctuation) ทำให้การวัดความดันแต่ละครั้งมีค่าไม่แน่นอน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องวัดความดันตำแหน่งทุกตำแหน่งที่ต้องการทราบค่าสัดส่วนของของแข็งพร้อมกันในช่วงเวลาเดียวกัน จึงติดตั้งเครื่องวัดความดันทั้ง 8 เครื่องตลอดแนวความสูงของท่อไรเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เครื่องวัดความดันแต่ละตัวจะแปลงค่าความดันที่วัดได้เป็นสัญญาณดิจิทัลส่งเข้าเครื่องเก็บข้อมูล (Data logger) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์โปรแกรม Multilap ที่จะแปลงสัญญาณดิจิทัลจากเครื่องเก็บข้อมูลเป็นค่าความดันที่วัดได้จากท่อไรเซอร์และแสดงกราฟที่แกนตั้งแสดงค่าความดันในหน่วยบาร์หรือพาสคาลและแกนนอนคือเวลาที่ทำการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.5

3.2.5 ระบบป้องกันการอุดตันของท่อวัดความดันด้วยสนามแม่เหล็กจากไฟฟ้า

ในการป้องกันความเสียหายของเครื่องวัดความดันจากอนุภาคที่เคลื่อนที่อยู่ในอากาศสามารถทำได้ด้วยการติดตะแกรงที่มีจำนวนช่องว่าง 400 ช่อง ความยาว 1 นิ้วที่เกลียวทองเหลืองขนาด 1/8 นิ้วซึ่งเป็นทางออกของอากาศเข้าสู่เครื่องวัดความดันดังแสดงในรูปที่ 3.6 แต่การติดตะแกรงเพื่อป้องกันความเสียหายของเครื่องวัดความดันกลับสร้างปัญหาอย่างมากต่อการวัดความดัน เพราะว่าอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในอากาศจะเสียดสีกันจนเกิดประจุบวกขึ้นเมื่ออนุภาคนั้นเสียดสีกันและเกิดประจุลบขึ้นเมื่ออนุภาคนั้นรับอิเล็กตรอน อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า

ต่างกันค่อยๆจับตัวกันเป็นกลุ่มขนาดใหญ่จุดตันที่ตะแกรงทำให้อากาศไม่สามารถเข้าสู่เครื่องวัดความดันได้

การปล่อยไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่เกลียวทองเหลืองดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณทางเข้าออกของอากาศ เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กดังกล่าวจะทำให้เกิดแรงผลักร้อนๆในแนวที่ตั้งฉากการเคลื่อนที่ตามกฎมือขวา จึงทำให้สามารถเบี่ยงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าออกจากตะแกรงที่ส่งผลต่ออัตราการสะสมของอนุภาคหน้าตะแกรงลดลง ทำให้สามารถวัดความดันของอากาศที่มีของแข็งแขวนลอยอยู่ในช่วงการไหลต่างๆได้ในช่วงเวลาที่นานขึ้นและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 การหาความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบตในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน

- 1) ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อไรเซอรั โดยป้อนอากาศเข้าที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที และ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เข้าที่ไรเซอรัและดาวเนอร์ตามลำดับ
- 2) บันทึกภาพนิ่งของอนุภาคที่หลุดออกจากเบตด้วยกล้อง CCD โดยใช้ความเร็วของชัตเตอร์และความสว่างของแหล่งกำเนิดแสงที่เหมาะสมทั้งหมด 5 ตำแหน่งที่ระยะห่างจากผนังของท่อไรเซอรั 1 2 4 6 และ 8 เซนติเมตรตำแหน่งละ 800 รูปโดยที่บริเวณที่มีอนุภาคที่อนุภาคหลุดจากเบตสังเกตได้จากตำแหน่งที่มีสัดส่วนของแข็งเบาบางเหนือหน้าเบตของแข็ง ซึ่งในการทดลองนี้คือที่ตำแหน่งความสูง 140 เซนติเมตรจากทางเข้าของท่อไรเซอรั
- 3) ใช้โปรแกรม Image-Pro Plus ในการวัดระยะชัดและมุมในการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ได้จากรูปถ่ายแต่ละรูป

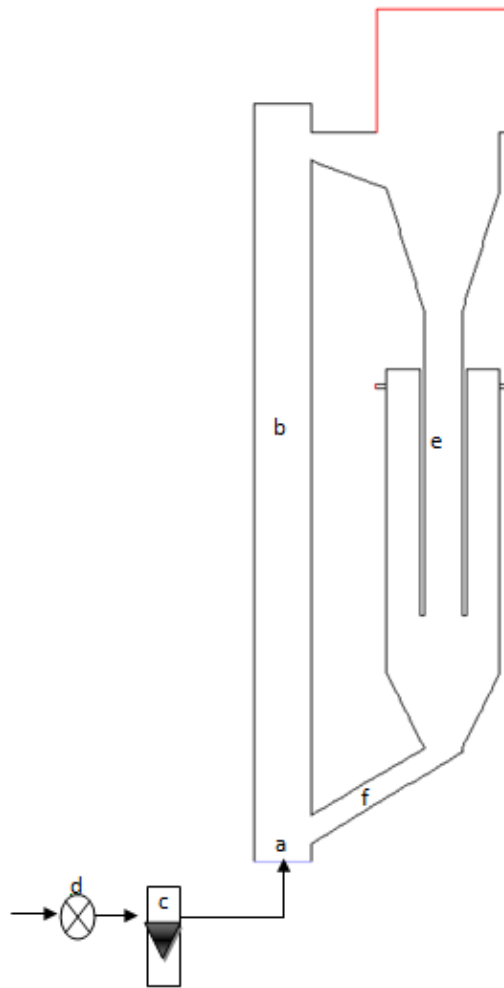
- 4) ใช้โปรแกรมแยกองค์ประกอบของการขาดออกเป็นการขาดแนวระดับและแนวตั้ง คำนวณความเร็วของอนุภาคในแนวแกนต่างๆ และตรวจสอบความแม่นยำของข้อมูลด้วย ฮิสโตแกรมที่แสดงค่าความถี่ของความเร็วค่าต่างๆ ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel
- 5) เปรียบการกระจายตัวของความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบตในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนกับการกระจายตัวของความเร็วของอนุภาคในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน

3.3.2 ศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อสัดส่วนของแข็งในแต่ละช่วงการไหล

- 1) บรรจุอนุภาคของแข็งจนมีความสูงร้อยละ 80 ของความสูงดาวเนอร์
- 2) ควบคุมความเร็วของอากาศที่และปริมาณเข้าสู่ท่อไรเซอร์และดาวเนอร์ให้มีค่าคงที่ จนกระทั่งเบตของแข็งอยู่ในสภาวะคงตัว
- 3) วัดความดันที่ความสูงต่างๆ ของท่อไรเซอร์เพื่อใช้คำนวณสัดส่วนของแข็งภายในท่อไรเซอร์
- 4) นำค่าสัดส่วนของของแข็งมาสร้างกราฟการกระจายตัวของสัดส่วนของแข็งตลอดแนวความสูงของไรเซอร์
- 5) จำแนกช่วงการไหลแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นในแต่ละคู่ตัวแปรดำเนินการโดยใช้กราฟการกระจายตัวของสัดส่วนของแข็งตลอดแนวความสูงของไรเซอร์

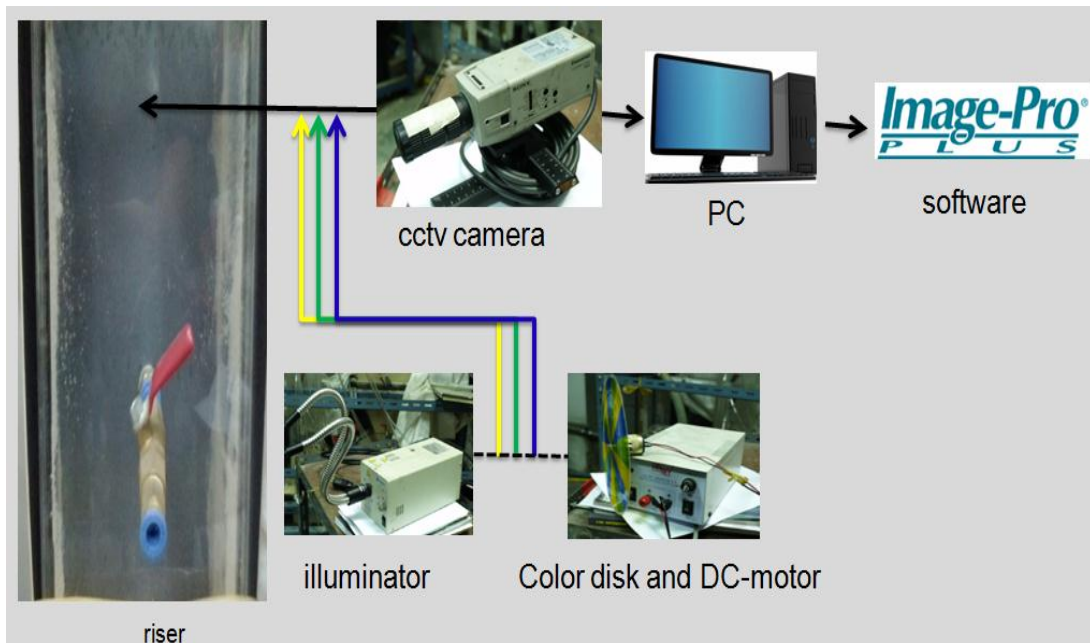
3.3.3 สร้างแผนภาพแสดงช่วงการไหล

- 1) นำค่าของตัวแปรดำเนินการมาคำนวณเป็นตัวแปร V^* และตัวเลขไร้หน่วยของอาร์คิมิดีสซึ่งสามารถแสดงช่วงการไหลต่างๆ ในแผนภาพแสดงช่วงการไหล
- 2) หาขอบเขตและเงื่อนไขที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน

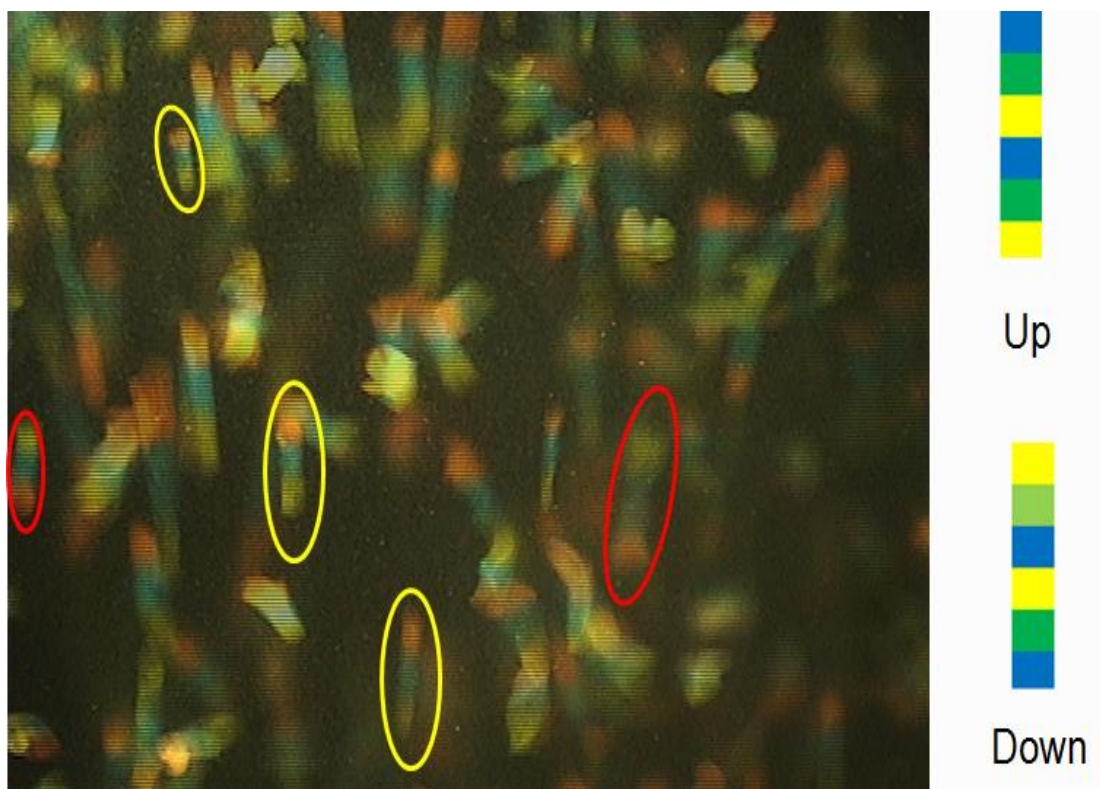


รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดเซชันแบบสองมิติ

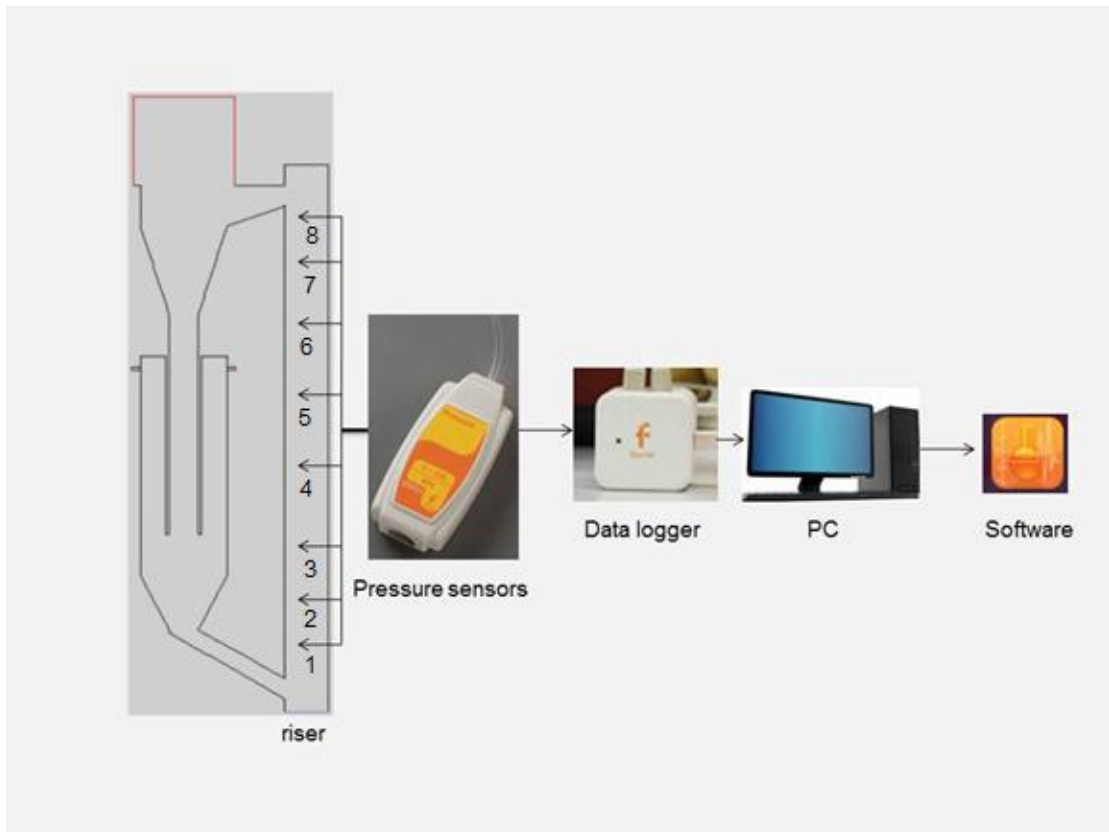
- a) ทางเข้าท่อไรเซอรั
- b) ไรเซอรั
- c) เครื่องวัดปริมาตรอากาศ
- d) เครื่องปรับแรงดัน
- e) ดาวเนอร์
- f) บอลวาล์ว



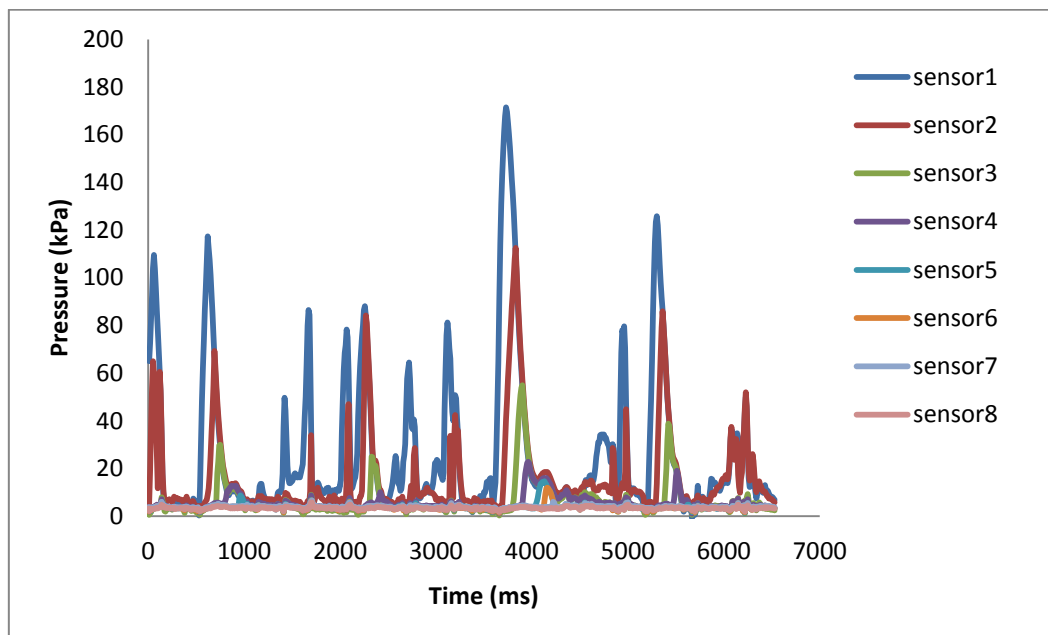
รูปที่ 3.2 ระบบการบันทึกภาพนิ่ง



รูปที่ 3.3 ภาพนิ่งที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วของอนุภาคของแข็ง



รูปที่ 3.4 ระบบการวัดความดัน



รูปที่ 3.5 ค่าความดันที่วัดได้จากโปรแกรม Multilab



รูปที่ 3.6 ตะแกรงกรองอนุภาคที่เกิดลิวทงเหลือง



รูปที่ 3.7 การป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ข้อต่อของเหลือง

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอเซชันแบบ 2 มิติ

ชิ้นส่วน	ขนาด(เซนติเมตร)
ความกว้างของท่อไรเซอร์	15
ความหนาของท่อไรเซอร์	5
ความสูงของท่อไรเซอร์	200
ความกว้างของไซโคลน	30
ความสูงของไซโคลน	30
ความหนาของไซโคลน	5
ความกว้างของทางออกด้านล่างไซโคลน	10
ความสูงช่วงเอียงของไซโคลน	30
ความสูงของดาวเนอร์	120
ความกว้างของดาวเนอร์	30
ความหนาของดาวเนอร์	5
ความสูงของท่อที่ทางเข้าด้านล่างและทางออกด้านบนของท่อไรเซอร์	10
ความหนาของท่อที่ทางเข้าด้านล่างและทางออกด้านบนของท่อไรเซอร์	5

บทที่ 4

วิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบตในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน

ความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบตในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนสามารถคำนวณได้จากการหารระยะขจัดด้วยเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่ โดยการขจัดสามารถวัดได้จากภาพนิ่งของอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่และเวลาของการเคลื่อนที่จะมีค่าเท่ากับความเร็วในการเปิดและปิดช่องรับแสงของกล้องที่ใช้บันทึกภาพ เมื่อแยกองค์ประกอบของการขจัดด้วยมุมที่ทำกับแนวอนทางด้านบวกจะทำให้สามารถแยกองค์ประกอบของระยะขจัดออกเป็น 2 แนวแกนได้แก่ ระยะขจัดในแนวระดับและระยะขจัดในแนวตั้งซึ่งแสดงถึงระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ในแนวระดับของท่อไรเซอร์และในแนวความสูงของท่อไรเซอร์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดของความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบต ค่าบวกในแนวแกนตั้งและในแนวระดับหมายถึงความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ไปทางด้านขวาของท่อไรเซอร์ตามลำดับ ค่าลบในแนวแกนตั้งและในแนวระดับหมายถึงความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ลงและเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายของท่อไรเซอร์ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่หลุดออกจากเบตในแนวแกนตั้งจะพบว่าความเร็วที่อนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแนวความสูงของท่อไรเซอร์จะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งจุดกึ่งกลางของท่อไรเซอร์ (ตำแหน่ง 8 เซนติเมตรจากผนังท่อไรเซอร์)ความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นของอนุภาคจะค่อยๆ ลดลงเมื่อตำแหน่งที่วัดความเร็วของเข้าใกล้ผนังของท่อไรเซอร์มากขึ้น สาเหตุที่ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ขึ้นค่อยๆ ลดลงเพราะว่าที่บริเวณผนังจะมีแรงเสียดทานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศเข้าเสียดสีกับผนังท่อไรเซอร์ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่บริเวณผนังจะส่งผลทำให้ผลรวมของแรงในทิศขึ้นมีค่าน้อยลงจึงทำให้ความเร็วของอนุภาคในทิศขึ้นมีค่าน้อยลง[23] นอกจากนี้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบริเวณผนังท่อไรเซอร์ยังส่งผลต่อสัดส่วนของจำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ขึ้นและอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ลง โดยที่สัดส่วนของอนุภาคของที่ลอยขึ้นต่ออนุภาคที่ร่วงลงมามีค่าลดลง

เมื่อเข้าใกล้ผนังไรเซอร์มาก แต่ทว่าความเร็วเฉลี่ยที่มีค่าเป็นบวกนั้นแสดงให้เห็นอนุภาคที่หลุดออกจากเบตานั้นมีแนวโน้มในการเคลื่อนที่ในทิศขึ้นตลอดแนวหน้าตัดของท่อไรเซอร์

ความเร็วในแนวระดับของอนุภาคที่หลุดออกจากเบตามีข้อแตกต่างจากความเร็วในแนวตั้ง คือความเร็วในการเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายหรือด้านขวาของท่อไรเซอร์จะเป็นอิสระต่อตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วและความเร็วอนุภาคเคลื่อนที่ไปทางซ้ายจะมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปทางขวา จึงทำให้ความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ในแนวระดับมีค่าเท่ากับศูนย์ นั้นแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ในแนวระดับของอนุภาคนั้นเป็นการเคลื่อนที่แบบสุ่ม ที่เป็นเช่นนี้ก็ เพราะว่าความเร็วในแนวระดับของอนุภาคเกิดมาจากการชนกันของอนุภาคด้วยกันเองจึงทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายและทางด้านขวาของท่อไรเซอร์มีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละจุด ซึ่งแตกต่างจากความเร็วเฉลี่ยตามแนวความสูงของไรเซอร์ที่เกิดจากผลรวมของแรงในแนวตั้ง ได้แก่ แรงลอยตัวและแรงลากในทิศขึ้นมีค่ามากกว่าน้ำหนักของอนุภาคซึ่งเป็นแรงในทิศลง จึงส่งผลทำให้ความเร็วในแนวความสูงของไรเซอร์ไม่เป็นอิสระต่อตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วและมีแนวโน้มในการเคลื่อนที่ในทิศขึ้นตลอดแนวหน้าตัดด้วยความเร็วที่ลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนังไรเซอร์มากขึ้น

การวัดค่าความเร็วด้วยการถ่ายภาพนิ่งของอนุภาคที่กำลังเคลื่อนอยู่นั้นจะต้องใช้ความชำนาญของผู้ทำการวิจัยซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่อาจจะเกิดความคลาดเคลื่อน จึงทำให้ต้องใช้รูปถ่ายของอนุภาคจำนวน 800 ภาพในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดค่าความเร็ว ความน่าเชื่อถือของความเร็วเฉลี่ยที่คำนวณได้จะสามารถตรวจสอบได้จากการกระจายแบบปกติของฮิสโตแกรมความเร็วของเร็ว ดังแสดงในภาคผนวก โดยที่รูปที่ ข1 ถึง รูปที่ ข5 แสดงฮิสโตแกรมของความเร็ว ในรูป (a) และ (b) ของแต่ละรูปแสดงฮิสโตแกรมของความเร็วในแนวระดับและแนวตั้งตามลำดับ โดยที่ฮิสโตแกรมของความเร็วในแนวระดับจะแสดงแนวโน้มของความเร็วที่ตำแหน่งรอบๆความเร็ว 0 เมตรต่อวินาที เพียงกลุ่มเดียวซึ่งแตกต่างจากฮิสโตแกรมของความเร็วในแนวตั้งที่จะมีการกระจายตัวของความเร็วเกิดขึ้น 2 กลุ่มซึ่งอยู่ในช่วงความเร็วค่าบวกและค่าลบอย่างละกลุ่มรอบๆค่าเฉลี่ยของความเร็วในทิศขึ้นและทิศลงของแต่ละจุด

รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบตในแนวแกนตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวหน้าตัดของท่อไรเซอร์ซึ่งมีค่าเป็นบวกตลอดแนวหน้าตัดการกระจายของความเร็วในลักษณะนี้มีความคล้ายคลึงกันกับการกระจายตัวของความเร็วของอนุภาคที่อยู่ในช่วงการไหลปั่นป่วนแบบหมุนเวียนดังที่เคยได้แสดงไว้ในรูป 2.6 การกระจายตัวของความเร็วในแนวแกนตั้งที่มีค่าเป็นบวกนี้เองเป็นลักษณะเด่นที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการแยกช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนออกช่วงการไหลรูปแบบอื่น ดังนั้นช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนก็น่าจะมีโอกาสเกิดในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตที่มีการป้อนอากาศเพียงครั้งเดียวเช่นเดียวกับในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตที่มีการป้อนอากาศครั้งที่สองเข้าที่ผนังท่อไรเซอร์ โดยที่อาจจะมีรายละเอียดบางประการของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตที่มีการป้อนอากาศเพียงจังหวะเดียวแตกต่างออกไปจากที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบตที่มีการป้อนอากาศสองครั้ง [24]

4.2 ผลของตัวแปรดำเนินการต่อสัดส่วนของของแข็งและช่วงการไหลในท่อไรเซอร์

4.2.1 ทราบขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน

รูปที่ 4.2 แสดงสัดส่วนของทราบขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน ตลอดแนวความสูงของท่อไรเซอร์ ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตรต่อวินาที พบว่าสัดส่วนของของแข็งจะมีค่าสูงที่สุดที่ตำแหน่งที่ต่ำที่สุด ($h/H = 0.2$) เนื่องมาจากการสะสมของของแข็งที่บริเวณทางเข้า (Entrance effect) และจะค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ตำแหน่งความสูงที่สัดส่วนของของแข็งมีค่าน้อยที่สุดคือตำแหน่งของหน้าเบต ความสูงของเบตทราบในท่อไรเซอร์ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนที่ความเร็วดังกล่าวคือระยะทางจากทางเข้าของอากาศถึงหน้าเบต ปริมาณของทราบที่หลุดออกจากเบตแปรผันตรงกับสัดส่วนของของแข็งที่ตำแหน่งเหนือหน้าเบต สัดส่วนของของแข็งที่หลุดออกจากเบตจะเพิ่มมากขึ้นอีกครั้งที่บริเวณทางออก ($h/H = 0.9$) เนื่องมาจากผลของทางออกที่ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาค (Exit effect) [25]

ปริมาณของแข็งที่หมุนเวียนอยู่ในระบบ (Gs) เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้สัดส่วนของแข็งในเบตมีค่าสูงขึ้น เพราะการเพิ่มปริมาณของแข็งที่ไหลเวียนอยู่ในระบบที่ความเร็วของอากาศมีค่าคงที่จะ

ทำให้แรงลอยตัวที่เกิดจากการไหลของอากาศผ่านอนุภาคทรายแต่ละอนุภาคมีค่าลดลง เมื่อแรงลอยตัวเป็นแรงที่อยู่ในทิศขึ้นมีค่าลดลงทำให้อนุภาคมีพลังงานจลน์สูงจนสามารถหลุดออกจากเบตได้มีจำนวนลดลง จึงทำให้อนุภาคเกิดการสะสมอยู่ในเบตเมื่อปริมาณของแข็งที่ไหลเวียนอยู่ในระบบมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณารูปที่ 4.3 - 4.9 คือ กราฟแสดงสัดส่วนของทรายที่ความเร็วอากาศอยู่ในช่วง 0.9 - 1.4 เมตร/วินาที ตามลำดับก็จะพบแนวโน้มเช่นเดียวกัน แสดงว่าสัดส่วนของทรายในเบตขึ้นอยู่กับปริมาณของของแข็งที่หมุนเวียนอยู่ในระบบ จุดสี่ดำที่ปรากฏอยู่ในแต่ละกราฟ คือ แนวโน้มที่ทำให้ทราบความสูงของเบตในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่หน้าเบตจะอยู่ตรงตำแหน่งความสูงที่ทำให้สัดส่วนของของแข็งมีค่าเท่ากับศูนย์

ผลของทางออกจะไม่ปรากฏในรูปที่ 4.4 - 4.9 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงสัดส่วนของทรายที่ความเร็วอากาศที่อยู่ในช่วง 0.9 - 1.4 เมตรต่อวินาที ตามลำดับเพราะว่าอากาศจะใช้เวลาอยู่ในเบตของแข็ง (Residence time) น้อยที่ความเร็วของอากาศสูงขึ้น ส่งผลให้พลังงานจลน์ของอากาศที่เหลือจากการถ่ายโอนให้แก่อนุภาคทรายในเบตมีค่ามาก จึงทำให้อากาศสามารถให้พลังงานจลน์แก่อนุภาคของทรายที่หลุดออกจากเบตได้มากขึ้น ความเร็วที่เพิ่มขึ้นของทรายที่หลุดออกจากเบตนี้เองทำให้อนุภาคของทรายมีความสามารถในการเคลื่อนที่จากไรเซอร์ข้ามไปยังฝั่งไซโคลนได้ดีขึ้น จึงไม่ปรากฏผลของทางออกที่ความเร็ว 0.9 - 1.4 เมตรต่อวินาที

ในทางกลับกันอากาศจะใช้เวลาอยู่ในเบตนานเมื่อความเร็วของอากาศน้อยลง ทำให้อากาศต้องสูญเสียพลังงานจลน์ไปในเบตของแข็งมากขึ้น พลังงานจลน์ของอากาศที่ลดลงย่อมส่งผลในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพต่ออนุภาคที่หลุดออกจากเบต จึงทำให้สัดส่วนของอนุภาคทรายที่หลุดออกจากเบตเมื่อมีผลของทางออกปรากฏอยู่นั้นมีสัดส่วนของของแข็งน้อยกว่ากรณีที่ไม่ผลของทางออกปรากฏอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ผลเชิงคุณภาพคือการที่อนุภาคที่หลุดออกจากเบตมีความเร็วลดลง กลไกการเกิดผลของทางออกสามารถอธิบายได้จากความเร็วที่ลดลงของอนุภาคที่หลุดออกจากเบต การเคลื่อนที่ออกจากท่อไรเซอร์ไปยังไซโคลนนั่นอนุภาคของแข็งจะต้องเกิดการชนกับผนังบริเวณทางออกและในทุกครั้งที่เกิดการชนนั้นอนุภาคจะมีการสูญเสียพลังงานเนื่องมาจากการชน เมื่ออนุภาคที่มีความเร็วน้อยอยู่แล้วต้องสูญเสียพลังงานจลน์

ไปกับการชนอีก จึงทำให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่ข้ามจากทางออกของท่อไรเซอร์ไปยังไซโคลนลดลง ส่งผลทำให้เกิดผลของทางออกดังแสดงในรูป 4.3 และ 4.4

ในรูปที่ 4.8 แสดงสัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน ตลอดแนวความสูงของท่อไรเซอร์ที่ความเร็วของอากาศ 1.3 เมตรต่อวินาที ความพิเศษของกราฟรูปนี้อยู่ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบเท่ากับ 386 และ 391 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งได้แสดงลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากกราฟที่ผ่านมาคือไม่ปรากฏหน้าเบตตลอดแนวความสูงของท่อไรเซอร์แสดงว่าเบตของแข็งมีการขยายตัวจนเต็มความสูงของท่อไรเซอร์และสัดส่วนของของแข็งมีค่าสูงกว่าสัดส่วนของของแข็งที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่น้อย 386 และ 391 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที อยู่ถึง 4 เท่าที่ช่วงความสูง ระหว่าง h/H เท่ากับ 0.2 ถึง 0.8 เพราะฉะนั้นสัดส่วนของของแข็งที่มีค่าสูงอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวความสูงนี้เองคือข้อแตกต่างที่สามารถใช้ในการแยกช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนที่ความเร็วอากาศ 1.3 เมตรต่อวินาที ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็ง 386 และ 391 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ออกจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่ปรากฏอนุภาคที่หลุดออกจากเบต ซึ่งลักษณะการไหลที่คู่ตัวแปรดำเนินการดังกล่าวมีลักษณะสอดคล้องกับช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนดังที่ Jesse Zhu ได้กล่าวไว้ในปี 2009 นอกจากนี้ในรูปที่ 4.9 ที่แสดงสัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน ตลอดแนวความสูงของท่อไรเซอร์ที่ความเร็วอากาศ 1.4 เมตรต่อวินาที ยังได้แสดงให้เห็นถึงช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนในช่วงอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบเท่ากับ 290 405 413 และ 586 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ดังนั้น ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนที่แสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ทำให้ทราบว่าไม่มีความจำเป็นที่จะต้องป้อนอากาศครั้งที่ 2 เข้าผนังของท่อไรเซอร์เพื่อที่จะทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนดังเช่นในการวิจัยในปี 2009

4.2.2 ทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอน

ในการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อทรายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 126 ไมครอนไม่สามารถเปลี่ยนค่าอัตราการหมุนเวียนของของแข็งได้หลายค่าเช่นเดียวกับการศึกษาผลของตัวแปรดำเนินการต่อทรายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260

ไมครอน เพราะว่าทุกครั้งที่เกิดฟลูอิดไฮดรอลิกขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์จะมีอนุภาคจำนวนมากหลุดออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์จึงทำให้ไม่สามารถเดินเครื่องปฏิกรณ์เป็นระยะเวลาที่นานได้เท่ากับการใช้ทรายที่อนุภาคขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน ประกอบกับอนุภาคทรายที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนมีอยู่ในปริมาณที่จำกัดจึงทำให้ต้องเลือกศึกษาเฉพาะค่าอัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่มากที่สุดประมาณ 2 - 3 ค่าต่อหนึ่งค่าความเร็วอากาศ

ความเร็วน้อยสุดที่ทำให้อนุภาคหลุดออกจากเขตของทรายที่มีขนาดอนุภาคขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอน คือ 0.4 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าน้อยกว่าในเขตทรายที่มีขนาดอนุภาคขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน เพราะว่าอนุภาคที่มีความหนาแน่นเท่ากันแต่มีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าจะมีมวลต่ออนุภาคน้อยกว่า จึงทำให้สามารถตอบสนองต่อผลรวมของแรงลัพธ์ในแนวความสูงของโรเตอร์ด้วยการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ หน้าเบดจะมีการขยายตัวเมื่อความเร็วของอากาศสูงขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศเปลี่ยนไปดังแสดงในรูป 4.10 - 4.13 ผลของทางออกจะปรากฏอยู่บ้างแต่ไม่ได้ทำให้สัดส่วนของของแข็งที่บริเวณทางออกของท่อโรเตอร์มีค่าสูงดังเช่นทรายขนาดใหญ่ เพราะมวลต่ออนุภาคที่มีค่าน้อยของทรายขนาดเล็กทำให้ความสามารถในการเปลี่ยนขนาดและทิศทางของความเร็วของอนุภาคสูงขึ้นจึงมีโอกาสในการเข้าชนกับผนังทางออกของโรเตอร์มีน้อยลง ส่งผลให้ของแข็งสะสมที่ทางออกของท่อโรเตอร์ได้น้อย

ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอน ปรากฏครั้งแรกที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ 0.8 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นได้จากสัดส่วนของของแข็งมีค่าสูงอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวความสูงท่อโรเตอร์โดยที่ไม่มีหน้าเบดปรากฏอยู่ ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนยังสามารถเกิดขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจาก 0.8 เมตรต่อวินาที ไปเป็น 0.9 และ 1.0 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูป 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ

ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนในรูปที่ 4.17 ที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตรต่อวินาที จะค่อนข้างแตกต่างจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนในช่วงความเร็วที่ผ่านมา เพราะว่าที่ความเร็วนี้กราฟสัดส่วนของของแข็งตลอดแนวความสูงจะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ 1.1 เมตรต่อวินาที อาจจะเป็นความเร็วสุดท้ายที่จะสามารถเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วน

รูปที่ 4.18 แสดงสัดส่วนของทรายขนาดเฉลี่ย 126 ไมครอนตลอดแนวความสูงของท่อไรเซอร์ ที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตรต่อวินาที พบว่าไม่พบช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน ดังเช่นที่ผ่านมา สัดส่วนของทรายตลอดแนวความสูงของท่อไรเซอร์ในรูป 4.18 แสดงลักษณะเด่นของช่วงการไหลแบบความเร็วสูงที่กราฟสัดส่วนของของแข็งตลอดแนวความสูงจะเป็นรูปตัว “เอส” (S-shape) อันเนื่องมาจากผลของทางเข้าและทางออก

ความเร็วสุดท้ายที่สามารถทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Transport velocity, U_T) แสดงได้จากจุดตัดของกราฟในรูปที่ 4.19 แกนตั้งแสดงเวลาที่ใช้ในการย้ายของแข็งที่มีในท่อไรเซอร์ไปยังดาวเนอร์และแกนนอนคือความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่ท่อไรเซอร์ เมื่อนำข้อมูลในการเคลื่อนที่ของแข็งจากไรเซอร์ไปยังดาวเนอร์ด้วยการป้อนอากาศมาเขียนลงบนกราฟจะทำให้ได้กราฟเส้นตรง 2 เส้นที่ความชันไม่เท่ากันและจุดตัดของกราฟทั้งสองเส้นคือความเร็วสุดท้ายของการเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งมีค่าประมาณ 1.18 เมตรวินาที ค่าความเร็วดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในรูป 4.17 และ 4.18 ที่แสดงให้เห็นว่าความเร็วสุดท้ายของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนคือ 1.1 เมตรต่อวินาทีและความเร็วแรกของช่วงการไหลแบบความเร็วสูงคือ 1.2 เมตรต่อวินาที แสดงว่าช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนคือช่วงการไหลที่อยู่ระหว่างช่วงการไหลแบบปั่นป่วน และช่วงการไหลแบบความเร็วสูง

4.2.3 พีวีซีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอน

อนุภาคพีวีซีที่มีความหนาแน่น 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 161 ไมครอนจัดอยู่กลุ่มเอตามวิธีการของเจลดาร์ท (Geldart group A) ซึ่งแตกต่างจากทรายทั้ง 2 ขนาดซึ่งอยู่ในกลุ่มบี (Geldart group B)

ด้วยน้ำหนักที่เบาและขนาดที่เล็กของพีวีซีทำให้อนุภาคพีวีซีหลุดออกจากเบดในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่ความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที แต่หน้าเบดขยายตัวตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับทรายทั้งสองชนิดดังแสดงในรูปที่ 4.20 - 4.24 ตามลำดับ เพราะอนุภาคพีวีซีสามารถกระตุ้นให้เกิดประจุไฟฟ้าได้ง่ายจากการเสียดสีกันในเบดแต่ทว่ากลับมี

ความสามารถในการถ่ายโอนอิเล็กทรอนิกส์เพื่อคืนสภาพให้เป็นกลางทางไฟฟ้าได้น้อยมากจึงทำให้อุณหภูมิที่มีประจุตรงกันข้ามจับตัวกันเป็นก้อนส่งผลทำให้ความสามารถในการขยายตัวของเบดเมื่อความเร็วเปลี่ยนไปน้อยมากเมื่อเทียบกับทราย เมื่อความเร็วมากกว่า 0.6 เมตรต่อวินาที พบว่าความสูงของเบดไม่ได้มีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นอย่างเช่นในช่วงแรกดังแสดงในรูป 4.25 - 4.30

จากการปรากฏผลของทางออกอยู่ตลอดช่วงความเร็ว 0.2 – 1.2 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.25 - 4.35 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ความสูง $h/H = 0.9$ ในช่วงความเร็ว 0.2 – 0.6 เมตรต่อวินาที จะพบว่าผลของทางออกแปรผันตรงกับความเร็วของอากาศ สังเกตได้จากสัดส่วนของพีวีซีที่ความสูง h/H เท่ากับ 0.9 มีค่าสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.20 – 4.24 แต่ผลของทางออกจะไม่ขึ้นอยู่กับการไหลของอากาศเมื่อความเร็วมีค่าตั้งแต่ 0.7 เป็นต้นไปเพราะสัดส่วนของของแข็งที่ความสูง $h/H = 0.9$ ไม่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงมากนักดังแสดงในรูปที่ 4.25 - 4.30

การปรากฏหน้าเบดที่ทุกความเร็วของอากาศคือข้อแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนอีกประการหนึ่งของอนุภาคพีวีซี รูปที่ 4.31 แสดงค่าความเร็วที่มากที่สุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนคือ 0.66 เมตรต่อวินาที แต่ที่ความเร็วที่น้อยกว่า 0.66 กลับมิได้แสดงช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนแต่อย่างใด แสดงว่าที่ความเร็วมากกว่า 0.6 เมตรต่อวินาที เป็นต้นไปอนุภาคจะมีการเคลื่อนที่ที่อยู่ในช่วงการไหลแบบความเร็วสูงซึ่งสอดคล้องกับผลของทางออกที่ไม่ได้ส่งผลต่อสัดส่วนของของแข็งมากนักเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นดังเช่นในช่วงความเร็ว 0.2 - 0.6 เมตรต่อวินาที

การเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดที่มีการป้อนอากาศครั้งเดียวขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเวียนของของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ โดยที่ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนจะเกิดขึ้นในระบบที่มีความเร็วของของไหลน้อยกว่าความเร็วสุดท้ายของช่วงการไหลแบบปั่นป่วน และที่อัตราการไหลเวียนของของแข็งสูงในการทดลองอัตราการไหลเวียนของของแข็งที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนคือ 290 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยที่อัตราการไหลเวียนของของแข็งซึ่งทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนมีความสัมพันธ์กับแปร V^* ซึ่งจะแสดงในหัวข้อ 4.2.4

ความสูงของโรเตอร์ที่เหมาะสมอาจเป็นเหตุผลประการหนึ่งที่ทำให้อัตราการหมุนเวียนของของแข็งมีค่าสูงจนทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนได้ความสูงที่เหมาะสมในที่นี้หมายถึงโรเตอร์ที่ความสูงน้อยกว่าความสูงที่มากที่สุดที่เบดของแข็งจะสามารถขยายตัวได้และความสูงที่มากที่สุดที่เบดจะสามารถขยายตัวไปได้ คือความสูงของเบดที่ขยายตัวด้วยความเร็วที่มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วสุดท้ายของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนมากที่สุด นั่นคือสาเหตุที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนในระบบของทรายทั้ง 2 ขนาดแต่กลับไม่เกิดในระบบของพีวีซีซึ่งเบดของของแข็งขยายตัวไปได้เพียงแค่อ้อยละ 80 ของความสูงของท่อโรเตอร์

ความเร็วของอากาศจะต้องมีค่าน้อยกว่าความเร็วที่มากที่สุดที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (U_p) คือเหตุผลประการที่ 2 เพราะว่าเมื่อความเร็วมากขึ้นความแตกต่างของความเร็วระหว่างภูมิภาคของไหลกับของแข็ง (Slip velocity) จะมีค่ามากทำให้อากาศที่ไหลเข้าเบดมีความเร็วสูงมากและใช้เวลาในการไหลผ่านเบดน้อยลง พลังงานจลน์ของอากาศถ่ายโอนเข้าสู่เบดของแข็งได้น้อยลง ส่งผลให้ความเร็วของของแข็งและความสูงของเบดมีค่าลดลง [26] แสดงให้เห็นว่าอนุภาคแต่ละชนิดจึงมีขีดจำกัดในการขยายตัวเนื่องมาจากความเร็วของอากาศ [27]

4.2.4 การตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของเบดของแข็ง

หลังจากนำกราฟแสดงสัดส่วนของอนุภาคของแข็งตลอดแนวความสูงของท่อโรเตอร์ของอนุภาคชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 - 4.30 มาพิจารณาพบว่ากราฟทุกรูปจะมีจุดร่วมที่เหมือนกันก็คือ ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่มากที่สุดของแต่ละช่วงความเร็ว สัดส่วนของอนุภาคของแข็งตลอดแนวความสูงของท่อโรเตอร์มีแนวโน้มเป็นกราฟเชิงเส้นที่มีค่าความชันเป็นลบ แนวโน้มของกราฟเชิงเส้นที่มีค่าความชันเป็นลบนั้นแสดงด้วยจุดสีดำของแต่ละกราฟ

เมื่อนำเอาข้อมูลที่มีแนวโน้มเป็นกราฟเชิงเส้นที่แสดงได้ด้วยจุดสีดำในรูปที่ 4.2 - 4.30 มาสร้างเป็นกราฟที่แกนนอนและแกนตั้งแสดงค่าสัดส่วนของของแข็งและความสูงของท่อโรเตอร์ตามลำดับ โดยที่กราฟเชิงเส้นที่ได้จะสามารถแสดงความสูงของเบดของอนุภาคแต่ละชนิดที่ความเร็วต่างๆ แสดงในรูปที่ ค1 - ค27ของภาคผนวก โดยที่ความสูงของเบดสามารถแสดงได้ด้วย

จุดตัดบนแนวแกนตั้งซึ่งเป็นจุดที่สัดส่วนของของแข็งมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากนี้สมการเชิงเส้นของกราฟแต่ละรูปในภาคผนวกได้มีการตรวจสอบค่า R^2 พบว่า ทุกรูปมีค่ามากกว่า 0.85

เพื่อที่จะสามารถทำความเข้าใจการตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของเบตของแข็ง จึงต้องวิเคราะห์ข้อมูลความสูงของเบตที่ควบคู่ไปกับความเร็วของอากาศที่เพิ่ม

สำหรับการขยายตัวของเบตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนสามารถนำข้อมูลความสูงของเบตจากรูป ค1 – ค8 มาเป็นข้อมูลในแนวแกนตั้งควบคู่ไปกับค่าความเร็วของอากาศที่ทำให้เกิดหน้าเบตที่ความสูงต่างๆในแนวแกนนอน ทำให้ได้กราฟที่แสดงการตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของเบตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.32 จะพบว่า ที่ความเร็วอากาศในช่วง 0.7 - 0.9 เมตรต่อวินาที เบตทรายมีความชันน้อยกว่าช่วงความเร็ว 0.9 - 1.4 เมตรต่อวินาที แสดงว่าเบต ของทรายสามารถขยายตัวได้น้อยในช่วงแรก ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าในช่วง 0.7 - 0.9 เมตรต่อวินาที มีผลของทางออกปรากฏอยู่ ทำให้มีอนุภาคที่สะสมอยู่บริเวณทางออกเกิดการชนกันและมีบางส่วนตกกลับลงมาปะทะอนุภาคของของแข็งที่อยู่บนหน้าเบต จึงส่งผลทำให้เบตขยายตัวได้น้อยในช่วงความเร็วต่ำซึ่งมีผลของทางออกปรากฏอยู่ในช่วงการความเร็ว 0.9 - 1.4 เมตรต่อวินาที ไม่มีผลทางออกปรากฏอยู่จึงส่งผลทำให้เบตของแข็งสามารถขยายตัวได้ดี เนื่องจากไม่มีอนุภาคตกกลับลงมาปะทะที่หน้าเบต ดังนั้นสมการการขยายตัวของเบตในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน จึงแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่

$$\text{ช่วงความเร็ว } 0.7 - 0.9 \text{ เมตรต่อวินาที : } h/H = 0.083(U_g) + 0.5287 \quad (4.1)$$

$$\text{ช่วงความเร็ว } 0.9 - 1.4 \text{ เมตรต่อวินาที : } h/H = 2.1228(U_g) - 1.5174 \quad (4.2)$$

โดยที่

h = ความสูงของเบตของแข็ง (เมตร)

H = ความสูงของท่อไรเซออร์ = 2 เมตร

U_g = ความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าไรเซอร์ (เมตรต่อวินาที)

ความชันของสมการที่ 4.1 และ 4.2 สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์ของ U_g ค่าความชันของกราฟทำให้ทราบถึงความสามารถในการตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของเบตของแข็งได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบความชันของทั้ง 2 ช่วงจะพบว่าความชันในช่วงที่มีความเร็วสูงมีค่ามากกว่าความชันในช่วงความเร็วต่ำซึ่งหมายถึงเบตของทรายมีความสามารถขยายตัวได้ดีในช่วงความเร็วสูง

ในรูปที่ 4.33 คือ กราฟแสดงการตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของเบตทรายขนาดที่มีขนาดอนุภาค 126 ไมครอน โดยข้อมูลที่ปรากฏในกราฟได้มาจากความสูงของเบตที่ความเร็วค่าต่างๆ ในรูป ค9 - ค16 ซึ่งปรากฏอัตราการขยายตัวของเบต 2 ช่วง เช่นเดียวกับทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน โดยที่ความเร็วของอากาศที่อยู่ในช่วง 0.3 – 0.5 เมตรต่อวินาที คือช่วงความเร็วต่ำและที่ความเร็วของอากาศที่อยู่ในช่วง 0.5 – 0.7 เมตรต่อวินาที คือช่วงความเร็วสูง การขยายตัวที่แตกต่างต่างกันของความเร็วทั้งสองช่วงเกิดมาจากการปรากฏผลของทางออกในช่วงความเร็วต่ำทำให้เบตขยายตัวได้ไม่ดี การตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของเบตของแข็งในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนแสดงได้ดังสมการ 4.3 และ 4.4

$$\text{ช่วงความเร็ว } 0.3 - 0.5 \text{ เมตรต่อวินาที: } h/H = 0.738(U_g) + 0.0419 \quad (4.3)$$

$$\text{ช่วงความเร็ว } 0.5 - 0.7 \text{ เมตรต่อวินาที: } h/H = 2.997(U_g) - 1.1407 \quad (4.4)$$

เมื่อเปรียบเทียบความชันของทรายทั้ง 2 ขนาดจะพบว่าทรายที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราการขยายตัวของเบตได้ดีกว่าทรายที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมวลต่ออนุภาคที่น้อยกว่าจึงสามารถทำให้อนุภาคทรายสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วสูง ส่งผลทำให้เบตของทรายที่อนุภาคขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอน มีความสามารถในการขยายตัวได้ดีกว่าเบตของทราย 260 ไมครอน

เมื่อนำข้อมูลของพีวีซีในรูปที่ ค17 – ค27 มาสร้างกราฟแสดงการตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของเบตของแข็งดังแสดงในรูป 4.34 จะพบว่าในช่วงความเร็ว 0.2 - 0.6 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงการไหลแบบปั่นป่วนกราฟจะมีความชันเพียงค่าเดียว

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสูงของเบตที่ความเร็วมากกว่า 0.6 เมตรต่อวินาที ซึ่งอยู่ในช่วงการไหลแบบความเร็วสูงจะพบว่าความสูงของเบตของพีวีซีไม่ได้แปรผันตรงกับความเร็วของอากาศซึ่งแตกต่างจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วนและช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน ในรูป 4.35 แสดงการตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของเบตพีวีซีซึ่งแตกต่างจากทรายทั้ง 2 ขนาดที่จะปรากฏความชัน 2 ค่า ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่เบตพีวีซีมีค่าน้อยมากจึงส่งผลให้อัตราการขยายตัวของเบตมีเพียงแค่ว่าเดียว สมการที่แสดงอัตราการขยายตัวของเบตพีวีซีแสดงด้วยสมการ 4.5

$$h/H = 0.3213(U_0) - 0.647 \quad (4.5)$$

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์ของการขยายตัวของเบตพีวีซีจะพบว่ามีความชันน้อยกว่าทรายที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 126 และ 260 ไมครอน เนื่องจาก พีวีซีเป็นอนุภาคที่ถูกกระตุ้นให้เกิดประจุไฟฟ้าได้ง่ายจากการเสียดสีแต่กลับมีความสามารถถ่ายโอนประจุไฟฟ้าได้น้อยมากเพราะพีวีซีเป็นฉนวนไฟฟ้า แรงยึดเหนี่ยวของไฟฟ้านี้เองที่ทำให้เบตของพีวีซีมีความสามารถในการขยายตัวได้ต่ำมากแม้ว่ามวลต่ออนุภาคจะมีค่าน้อยกว่าทรายทั้ง 2 ขนาดอยู่มากก็ตาม [28]

4.3 การปรับปรุงแผนภาพแสดงช่วงการไหล

เมื่อพิจารณาผลการทดลองและสมการการตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของเบตของในหัวข้อที่ 4.2 พบว่าผลการทดลองที่ได้มีความจำเพาะเจาะจงสูงมาก ไม่สามารถประยุกต์ใช้ในขั้นตอนของการออกแบบได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องดัดแปลงตัวแปรดำเนินการ(Operating parameters) ได้แก่ ความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าสู่โรเตอร์และอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบเป็นต้น ตัวแปรในขั้นตอนการออกแบบ (Design parameters) ได้แก่ ความหนาแน่นของอนุภาคและขนาดอนุภาคเฉลี่ยให้อยู่ในรูปของตัวแปรรูปแบบอื่นหรือตัวเลขไร้หน่วย เพื่อใช้รวบรวมข้อมูลในการศึกษาช่วงการไหลรูปแบบต่างๆในเครื่องปฏิบัติการ ฟลูอิดเบตที่สภาวะต่างๆในรูปของตัวเลขไร้หน่วยหรือตัวแปรชนิดใหม่ที่ง่ายต่อการออกแบบและสามารถทำนายช่วงการไหลที่เกิดขึ้นที่สภาวะต่างๆได้

ตัวแปรดำเนินการและตัวแปรของการออกแบบที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสโดยใช้สมการ (2.3) และ ตัวแปร V^* ดังแสดงในสมการ (2.8) ตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสและค่า V^* แสดงในตาราง 4.2 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

เมื่อนำข้อมูลของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนมาแสดงในแผนภาพของ Grace [4] จะได้แผนภาพแสดงช่วงการไหลใหม่ที่มีข้อมูลของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนเพิ่มเข้าไปดังแสดงในรูปที่ 4.36

เพื่อให้ทำนายการเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนได้แม่นยำยิ่งขึ้นจึงจะต้องมีการเพิ่มสมการที่แสดงความสามารถในการขยายตัวของอนุภาคแต่ละชนิดควบคู่ไปกับการใช้แผนภาพแสดงช่วงการไหลดังแสดงในรูปที่ 4.36 โดยรวบรวมข้อมูลความสูงของเบดของแข็งที่อยู่ในกลุ่มปีตามวิธีการของเจลดาร์ท โดยที่งานวิจัยที่นำมาใช้อ้างอิง คือ งานวิจัยของ Escudero[29] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่แสดงผลการตอบสนองต่อความเร็วของของไหลด้วยการขยายตัวของเบดของแข็งอนุภาคที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าว คือ เม็ดแก้วที่มีค่าตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสเท่ากับ 12,560 ทำให้ได้สมการแสดงอัตราการขยายตัวของเบดเม็ดแก้วและอนุภาคเอพซีซีในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนดังแสดงในสมการ (4.6)

$$h = 0.12555U_g + 0.08517 \quad (4.6)$$

โดยที่ข้อมูลและวิธีการสกัดข้อมูลจากผลการทดลองเพื่อให้ได้สมการที่ (4.6) แสดงอยู่ในภาคผนวก

เมื่อแทนค่า $H = 2$ สมการที่ (4.2) และ (4.4) จะได้สมการแสดงอัตราการขยายตัวของเบดทรายที่มีขนาดผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 126 และ 260 ไมครอน ดังแสดงในสมการ (4.8) และ (4.9) ตามลำดับ

$$h = 5.994U_g - 2.2814 \quad (4.7)$$

$$h = 4.2456U_g - 3.0348 \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.6) – (4.8) จะเห็นได้ว่าความสูงของเบตของแข็งที่มีค่าตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสแตกต่างกัน ล้วนแล้วแต่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับอัตราเร็วของของไหล จึงทำให้สามารถทำนายความสูงของเบตเมื่อเกิดการขยายตัวด้วยสมการทั่วไปดังแสดงในสมการที่ (4.9)

$$h(U_g) = m(U_g) + c \quad (4.9)$$

โดยที่ค่าความชัน (m) และจุดตัดแกน (c) ของสมการที่ (4.9) สามารถหาได้จากการหาสมการโดยประมาณ (Empirical equation) ของความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสต่อความชันและจุดตัดแกนของแต่ละสมการที่ (4.6)-(4.8)

รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสต่อความชันของสมการที่ (4.6) – (4.8) พบว่าความชันมีค่าลดลงแบบเอกโพเนนเชียล(Exponential decay) เมื่อค่าของตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสเพิ่มขึ้นดังแสดงในสมการ (4.10)

$$m(Ar) = 6.3698e^{-3E-4 (Ar)} \quad (4.10)$$

รูปที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสต่อจุดตัดแกนของสมการที่ (4.6) – (4.9) พบว่าความค่าของจุดตัดแกนมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในสมการ

$$c(Ar) = 0.0002Ar - 2.8461 \quad (4.11)$$

เมื่อแทนในค่าสมการ (4.10) และ (4.11) ในสมการที่ (4.9) ทำให้อัตราการขยายตัวของเบตของแข็งที่อยู่กลุ่มเจลดาร์บี้แสดงได้ดังสมการ(4.12)

$$h(U_g, Ar) = [6.3698e^{-3E-4 (Ar)}]U_g + [0.0002Ar - 2.8461]$$

$$h(U_g, Ar) = [6.3698e^{-3E-4 (Ar)}]U_g + 0.0002Ar - 2.8461 \quad (4.12)$$

จากการทดลองพบว่าความเร็วมากที่สุดที่สามารถเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน จะต้องมีย่านน้อยกว่าความเร็วสุดท้ายที่จะสามารถเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (U_{tr}) จากตารางที่ 2.3 สามารถประมาณค่าความเร็วสุดท้ายที่จะสามารถเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนได้ โดยเลือกใช้สมการที่ (2.20) มาคำนวณหา U_{tr} จะได้ว่า

$$Re_{tr} = \frac{\rho_g d_p U_{tr}}{\mu} = 1.415 Ar^{0.483}$$

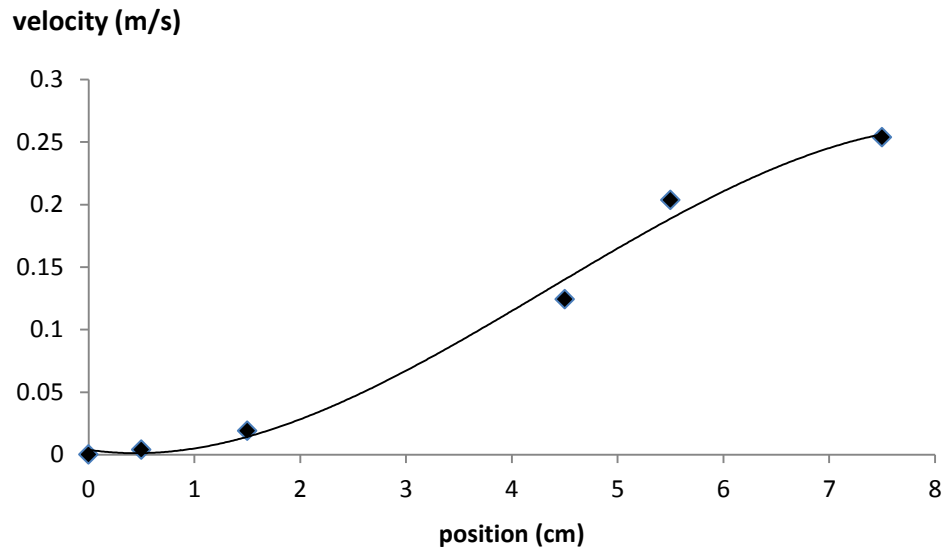
$$U_{tr} = 1.415 Ar^{0.483} \left(\frac{\mu}{\rho_g d_p} \right) \quad (4.13)$$

ดังนั้นเมื่อความเร็วของของไหลมีค่าเท่ากับความเร็วสุดท้ายของช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ($U_g = U_{tr}$) จะทำให้สามารถประมาณค่าความสูงที่มากที่สุดที่เบดของแข็งจะสามารถขยายตัว (Maximum bed expansion, h_{mbe}) ด้วยการแทนสมการ (4.13) ใน (4.12) ได้ดังแสดงในสมการ (4.15)

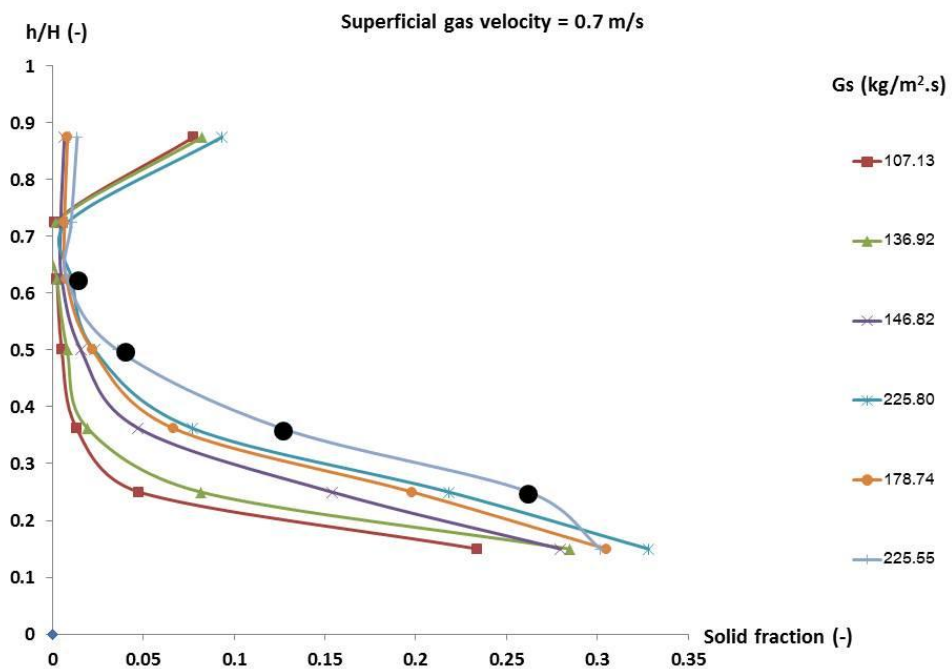
$$h_{mbe}(Ar) = [6.3698e^{-3E-4(Ar)}] \left[1.415 Ar^{0.483} \left(\frac{\mu}{\rho_g d_p} \right) \right] + 0.0002Ar - 2.8461$$

$$h_{mbe}(Ar) = 1.415 [6.3698e^{-3E-4(Ar)}] \left(\frac{\mu}{\rho_g d_p} \right) Ar^{0.483} + 0.0002Ar - 2.8461 \quad (4.14)$$

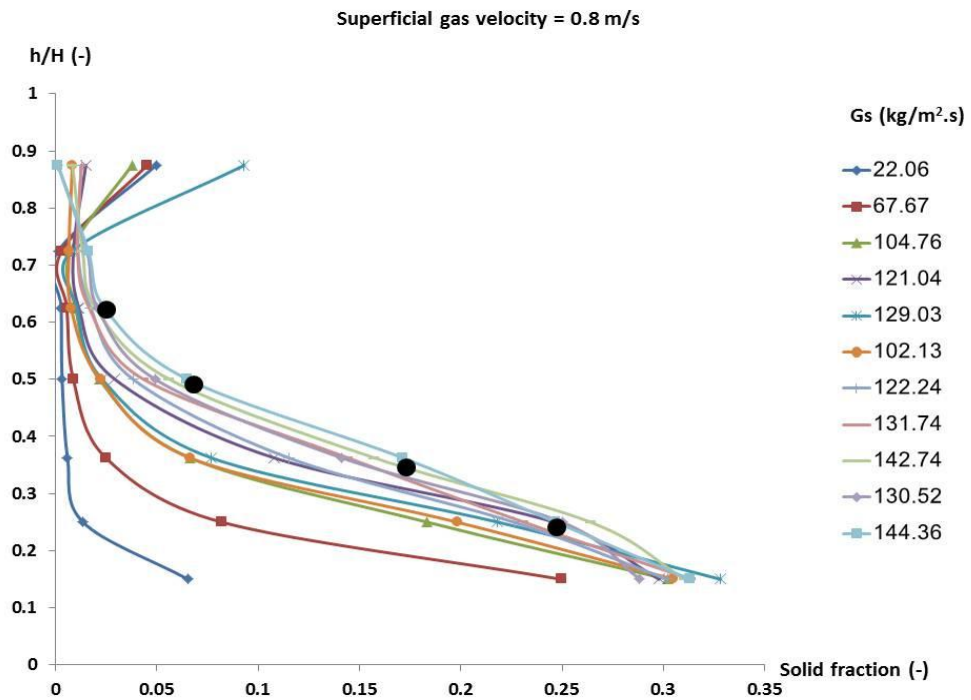
เพราะฉะนั้นเงื่อนไขที่จะใช้ควบคู่กับแผนภาพเพื่อแสดงช่วงการไหลใหม่คือความเร็วของอากาศจะต้องมีย่านน้อยกว่าความเร็วสุดท้ายของแข็งจะสามารถเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนและความสูงของท่อไรเซอร์จะต้องมีความความสูงน้อยกว่าความสูงมากที่สุดที่เบดของแข็งจะสามารถขยายตัวได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.39



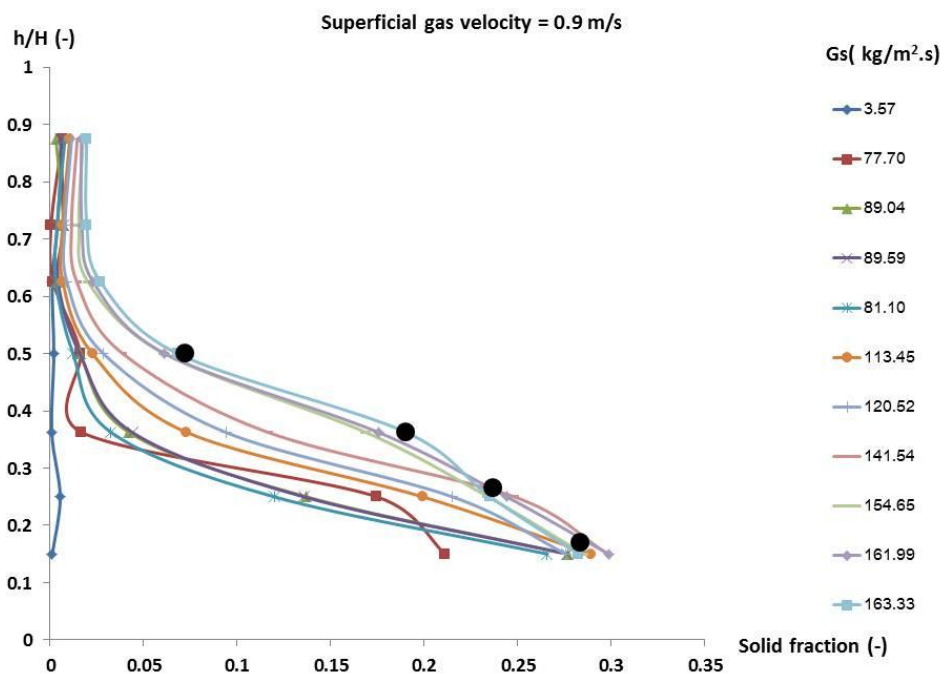
รูปที่ 4.1 การกระจายตัวความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบดในแนวแกนตั้ง
ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามหน้าตัดของท่อไรเซออร์



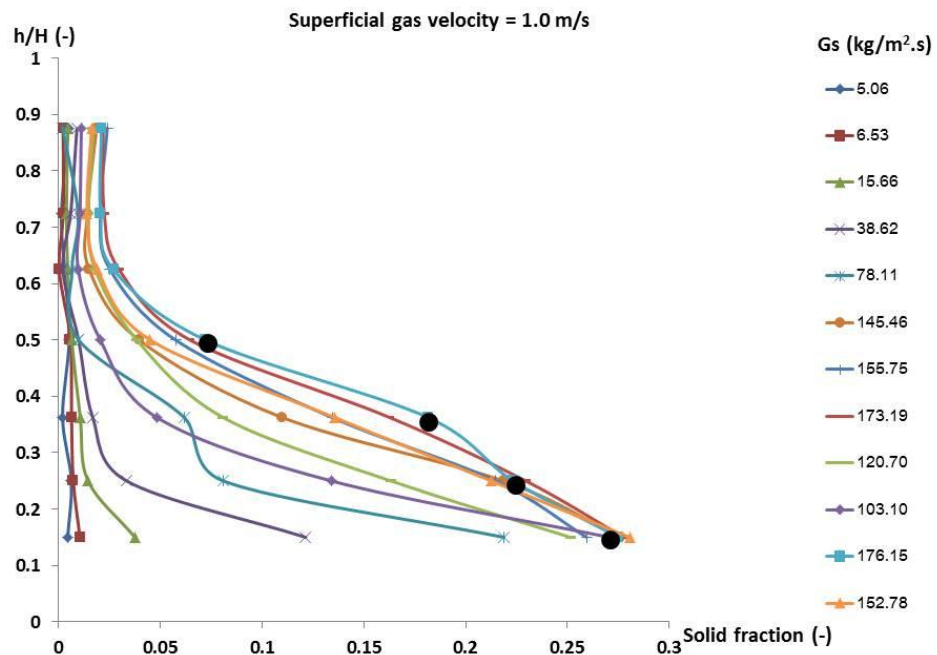
รูปที่ 4.2 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตร/วินาที



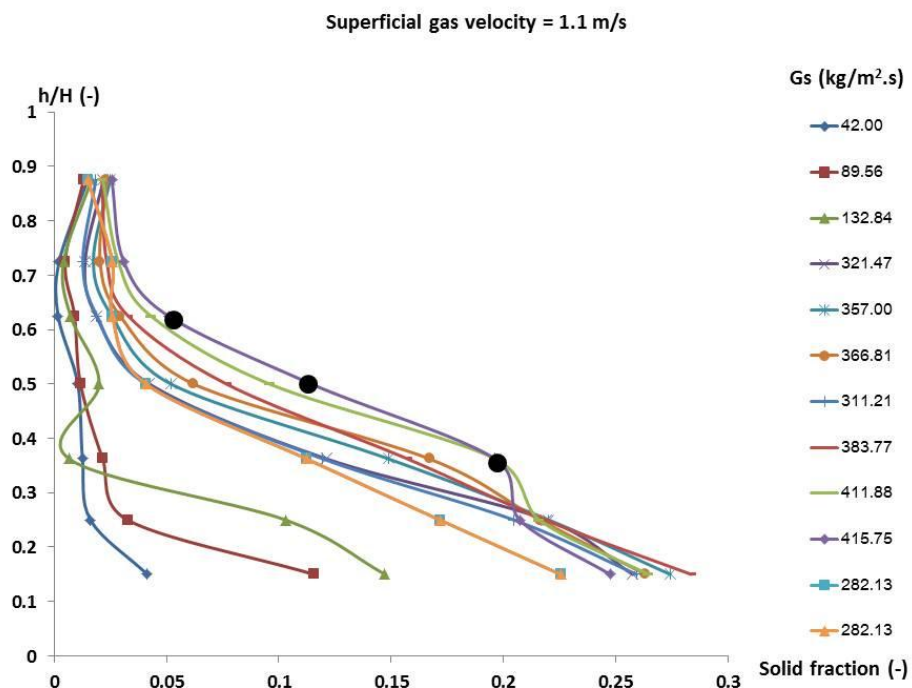
รูปที่ 4.3 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.8 เมตร/วินาที



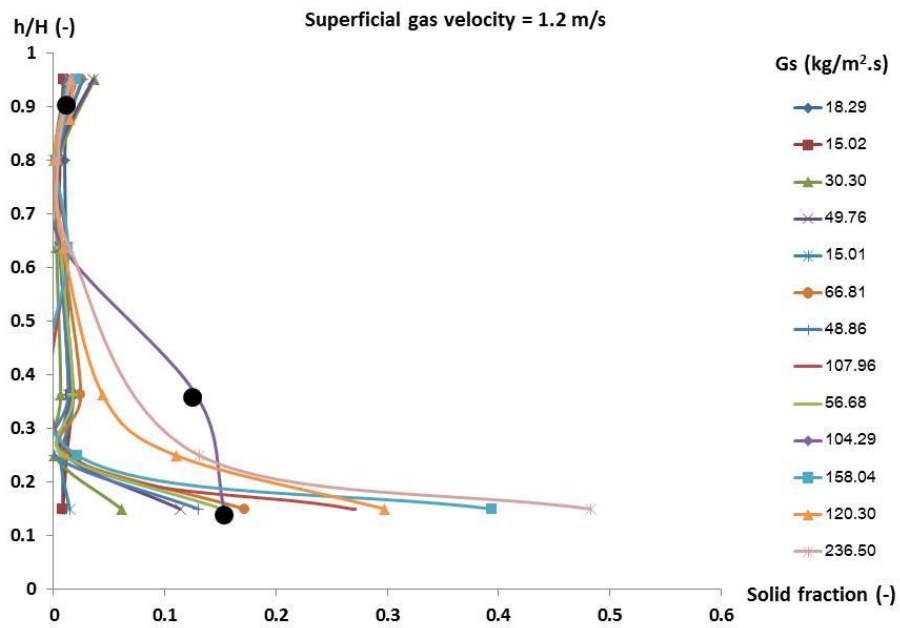
รูปที่ 4.4 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.9 เมตร/วินาที



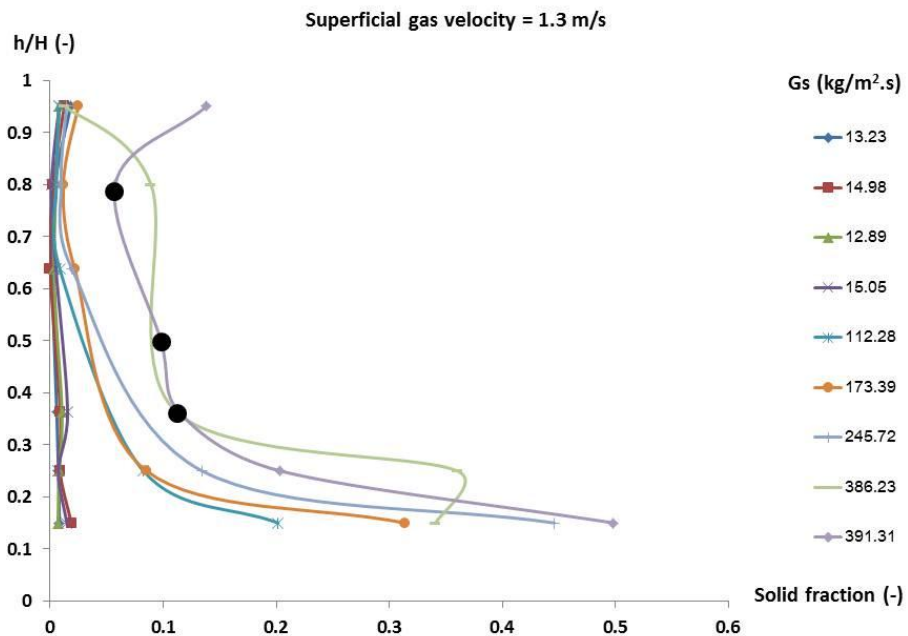
รูปที่ 4.5 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.0 เมตร/วินาที



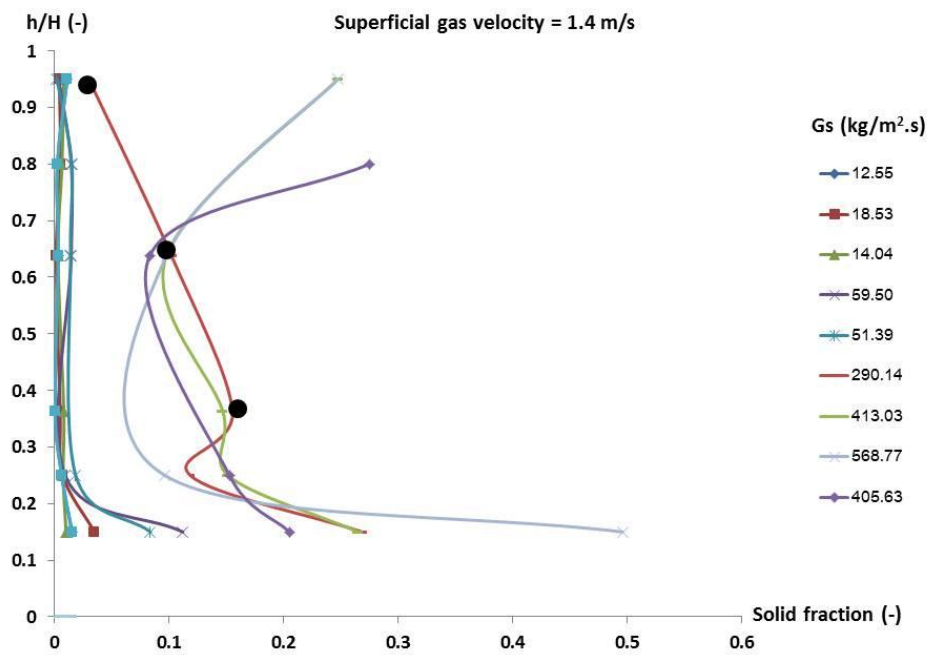
รูปที่ 4.6 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตร/วินาที



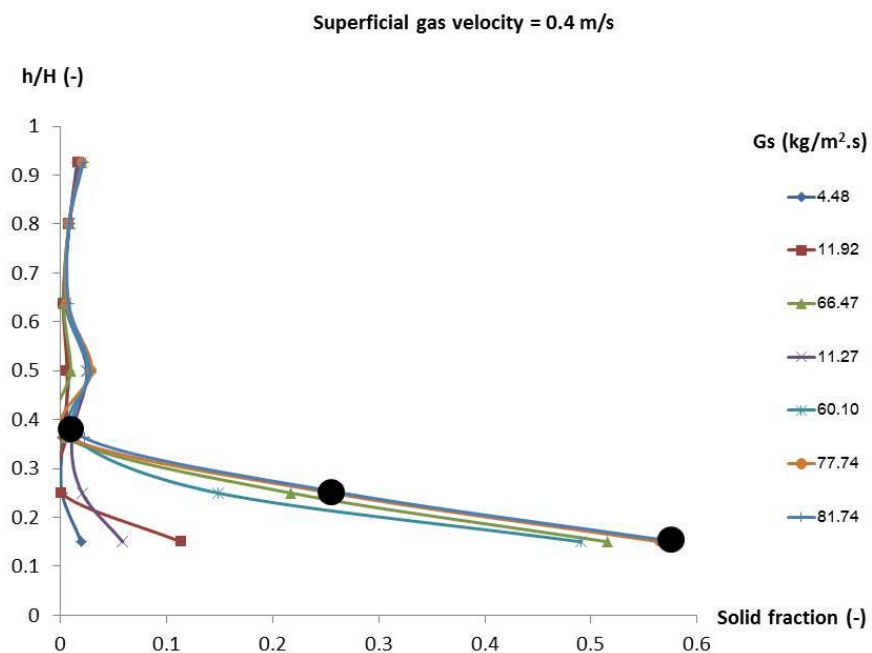
รูปที่ 4.7 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตร/วินาที



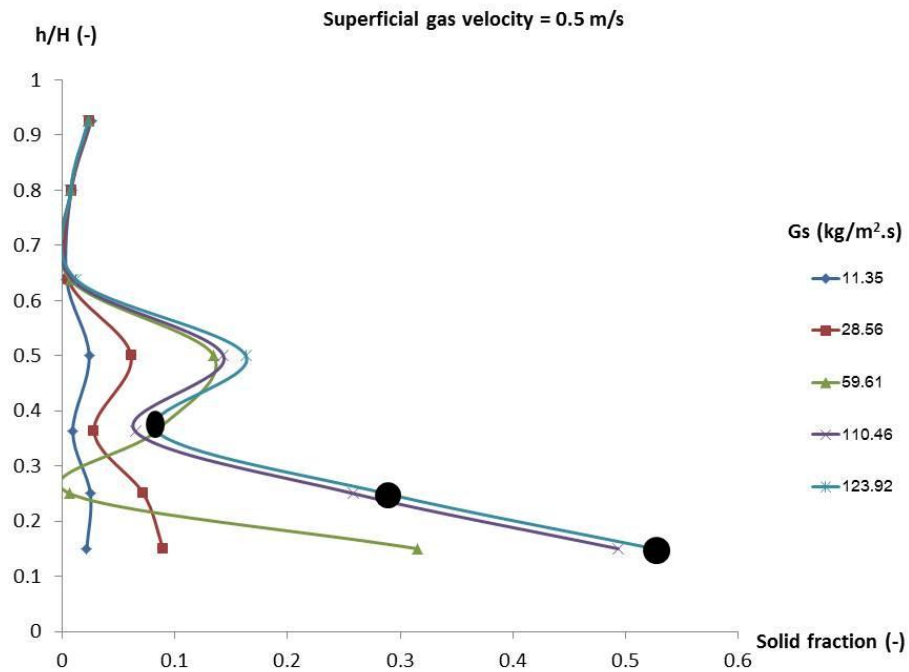
รูปที่ 4.8 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.3 เมตร/วินาที



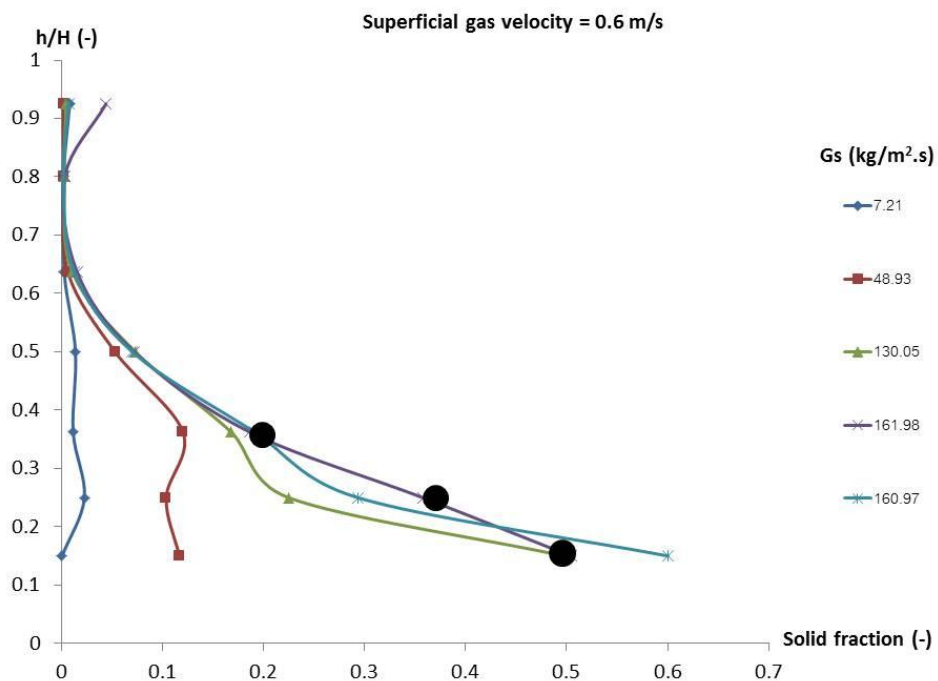
รูปที่ 4.9 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.4 เมตร/วินาที



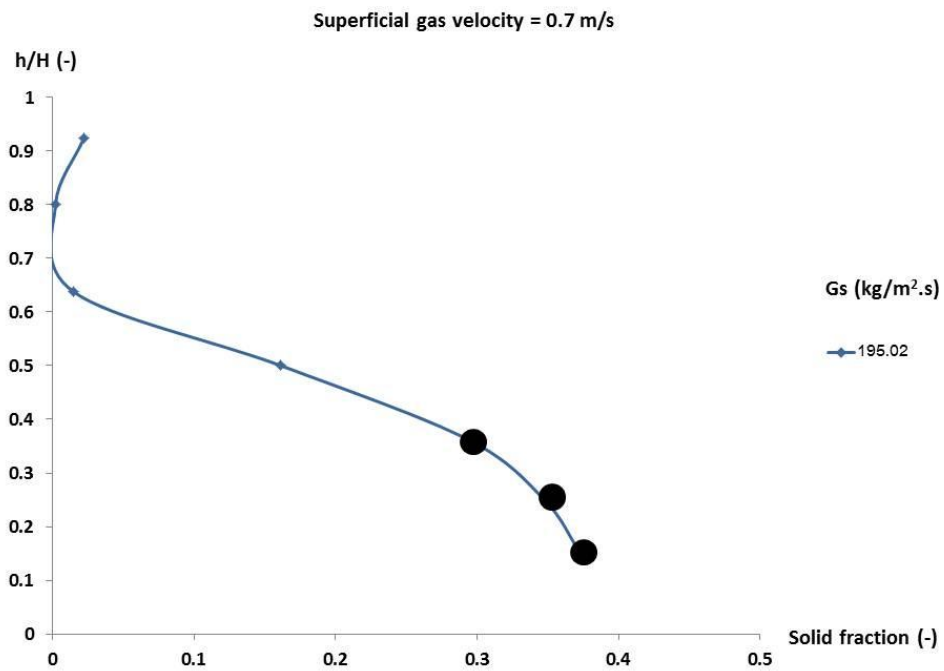
รูปที่ 4.10 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.4 เมตร/วินาที



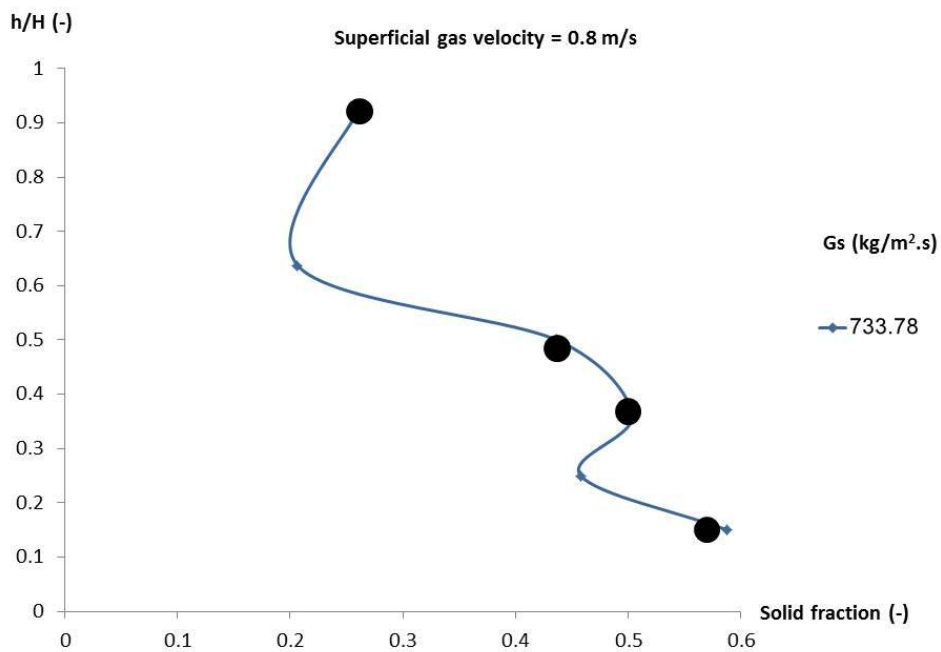
รูปที่ 4.11 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.5 เมตร/วินาที



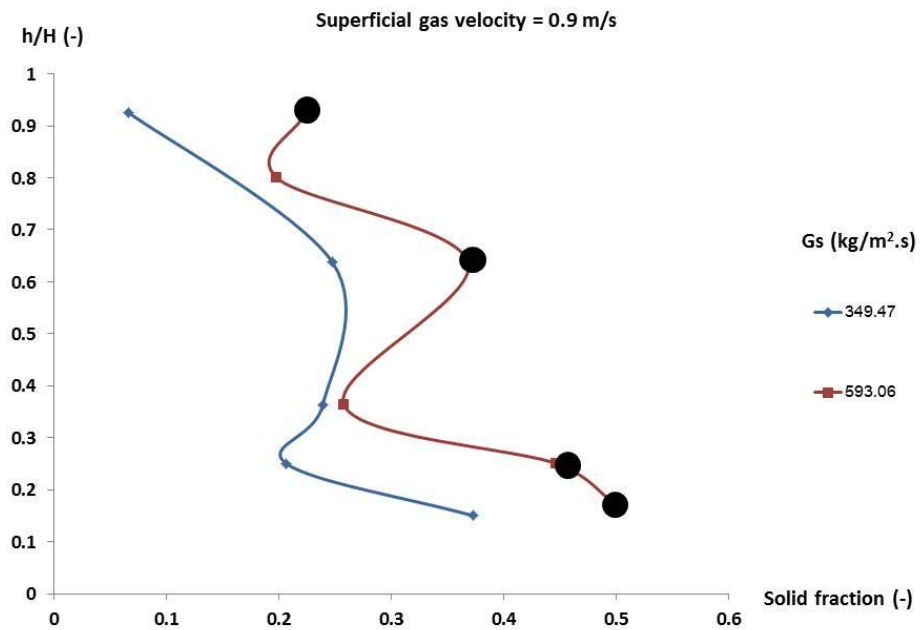
รูปที่ 4.12 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.6 เมตร/วินาที



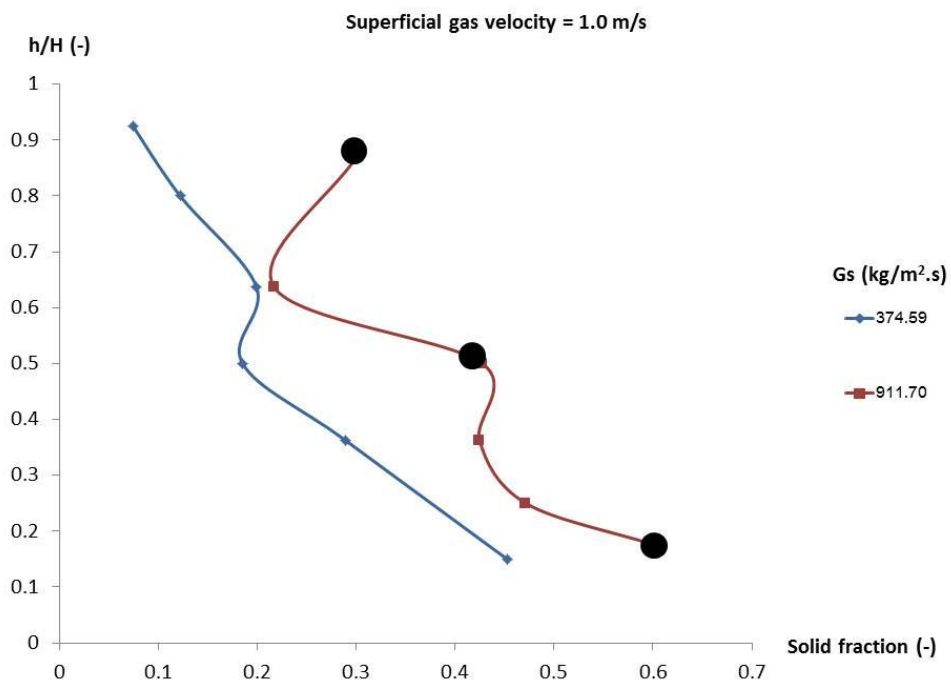
รูปที่ 4.13 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตร/วินาที



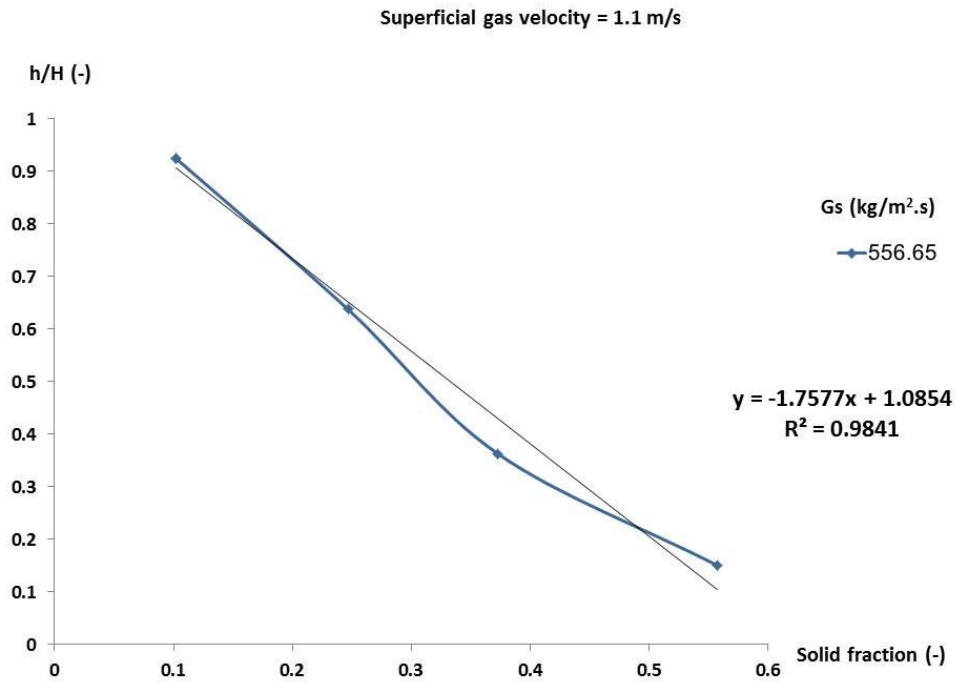
รูปที่ 4.14 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.8 เมตร/วินาที



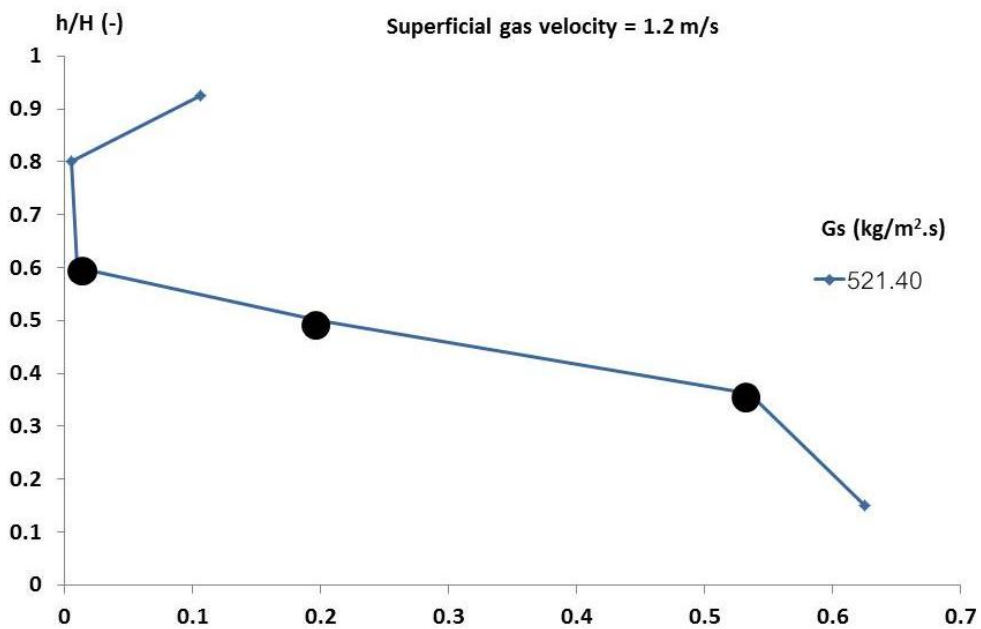
รูปที่ 4.15 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.9 เมตร/วินาที



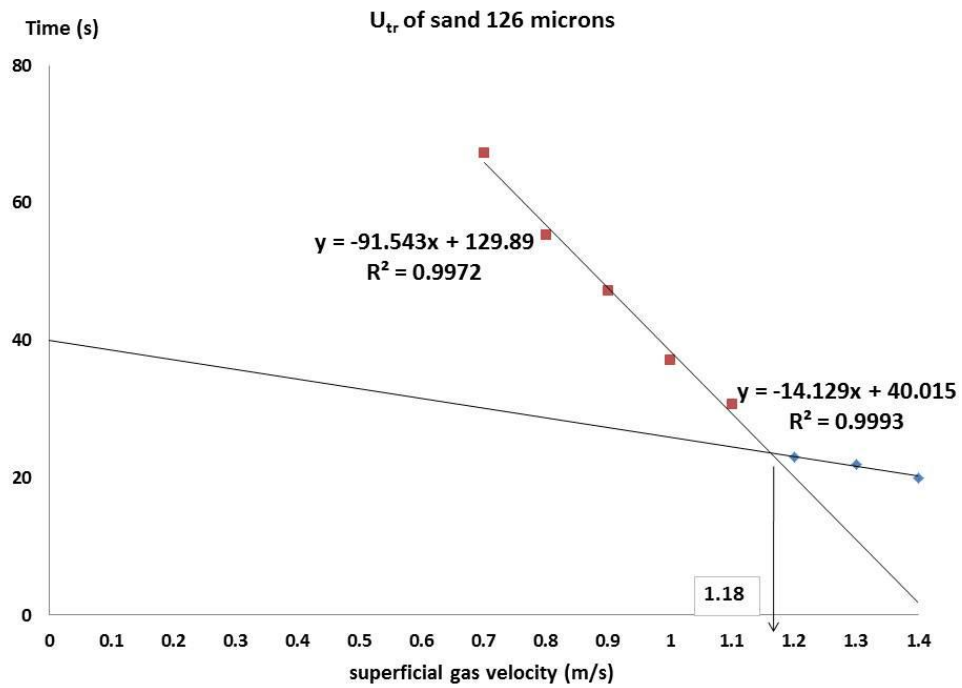
รูปที่ 4.16 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.0 เมตร/วินาที



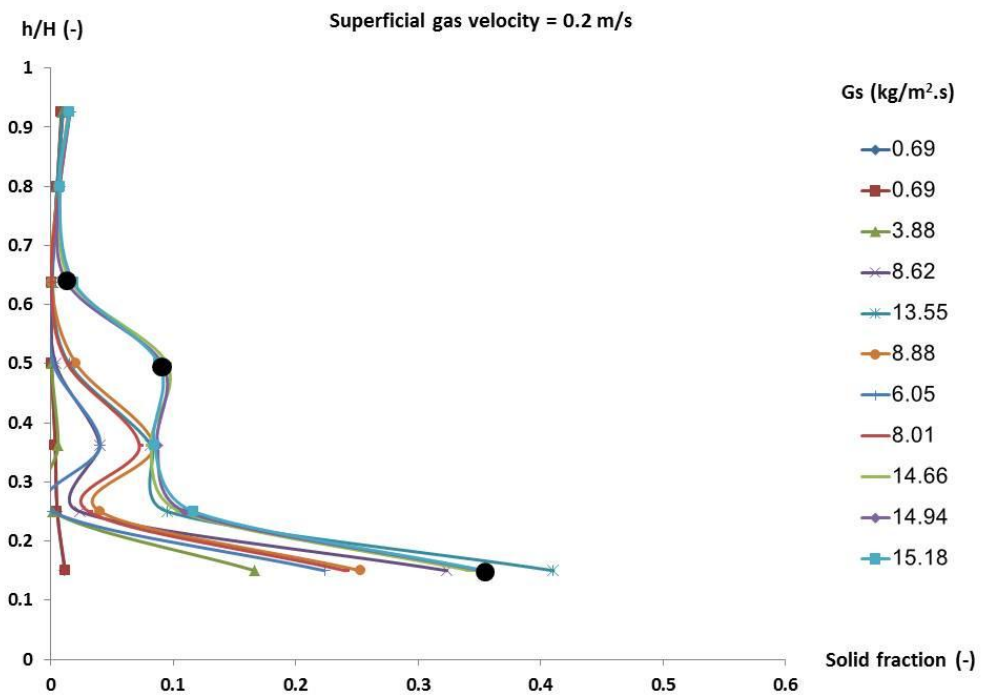
รูปที่ 4.17 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตร/วินาที



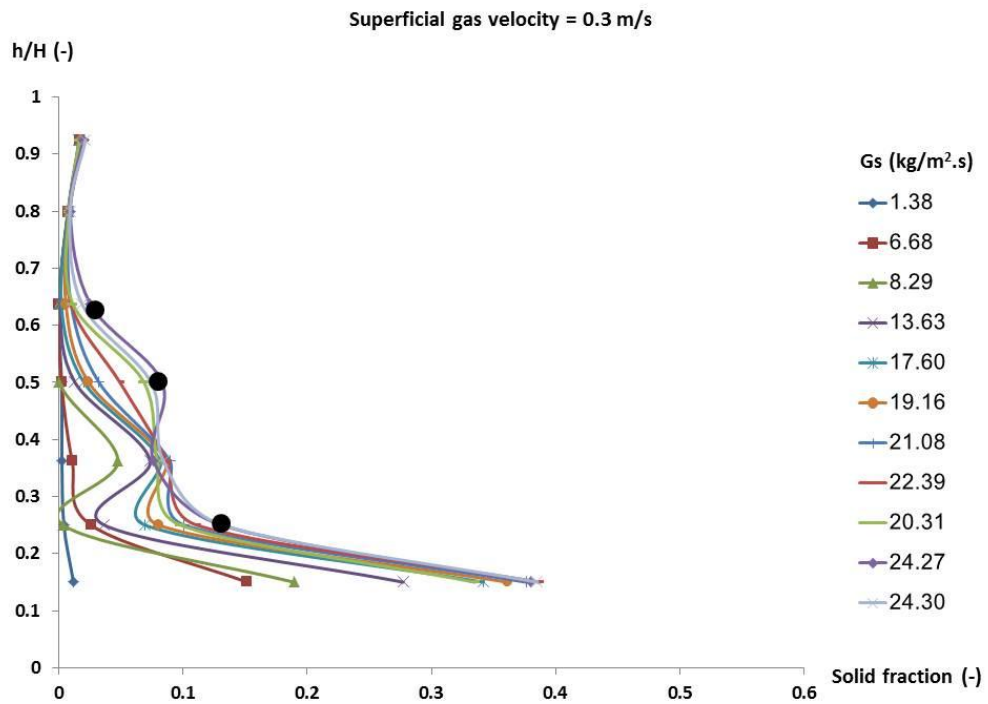
รูปที่ 4.18 สัดส่วนของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตร/วินาที



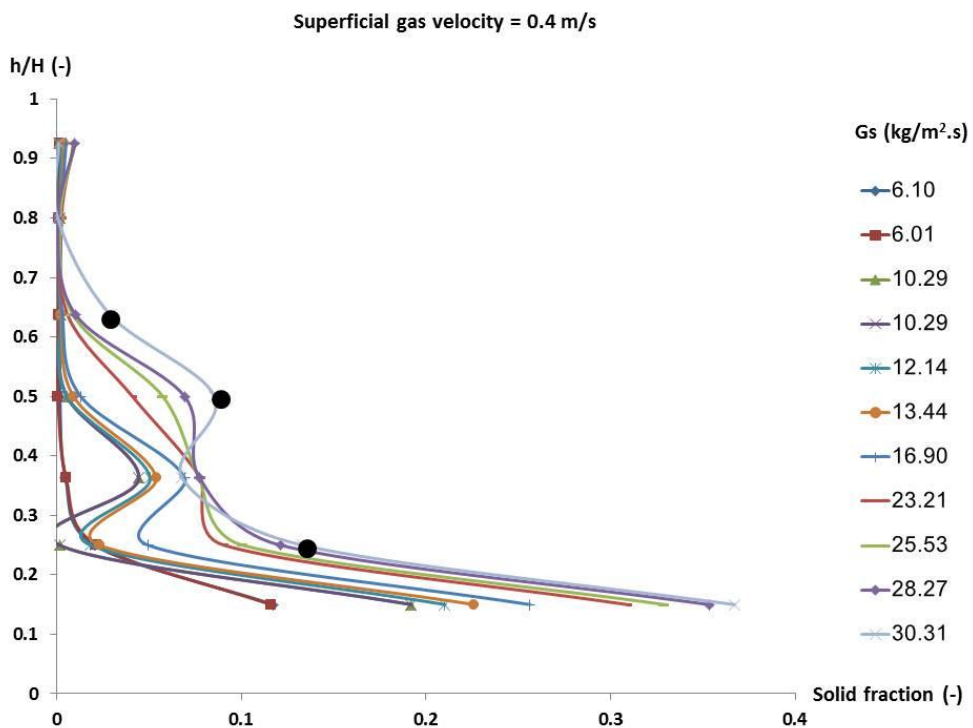
รูปที่ 4.19 U_{tr} ของทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอน



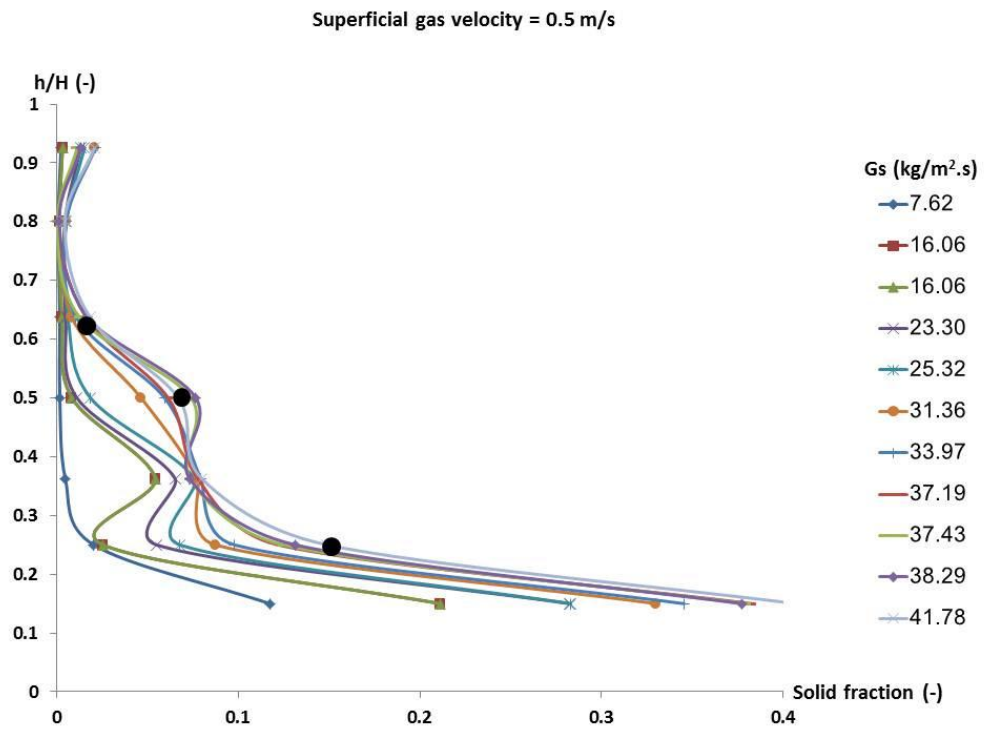
รูปที่ 4.20 สัดส่วนของฟลูวี่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.2 เมตร/วินาที



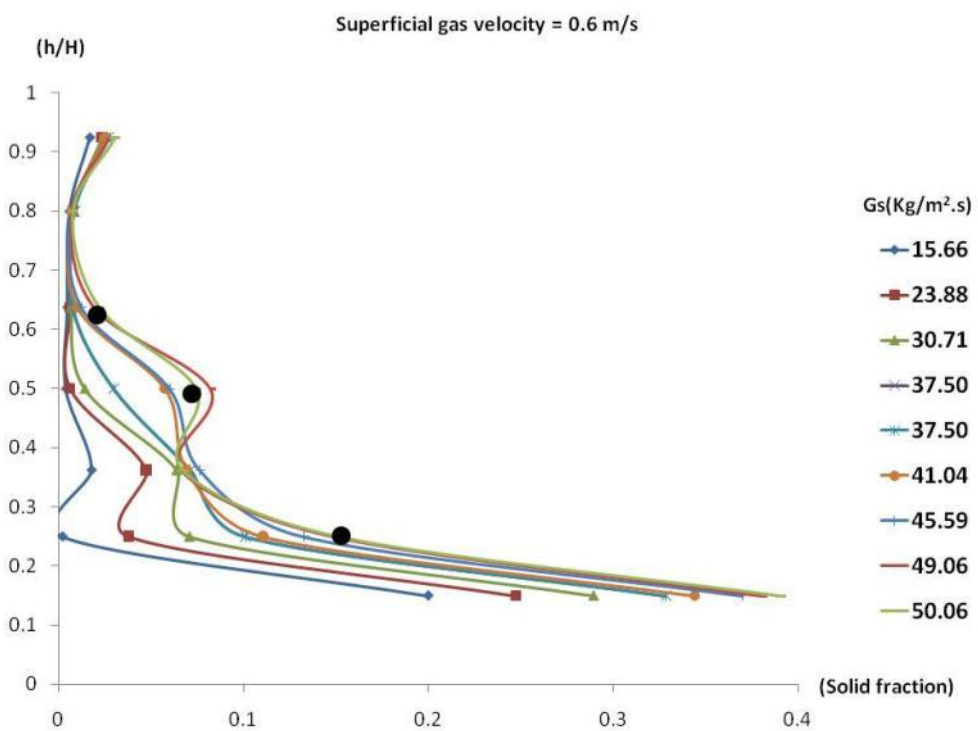
รูปที่ 4.21 สัดส่วนของฟลูอิดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.3 เมตร/วินาที



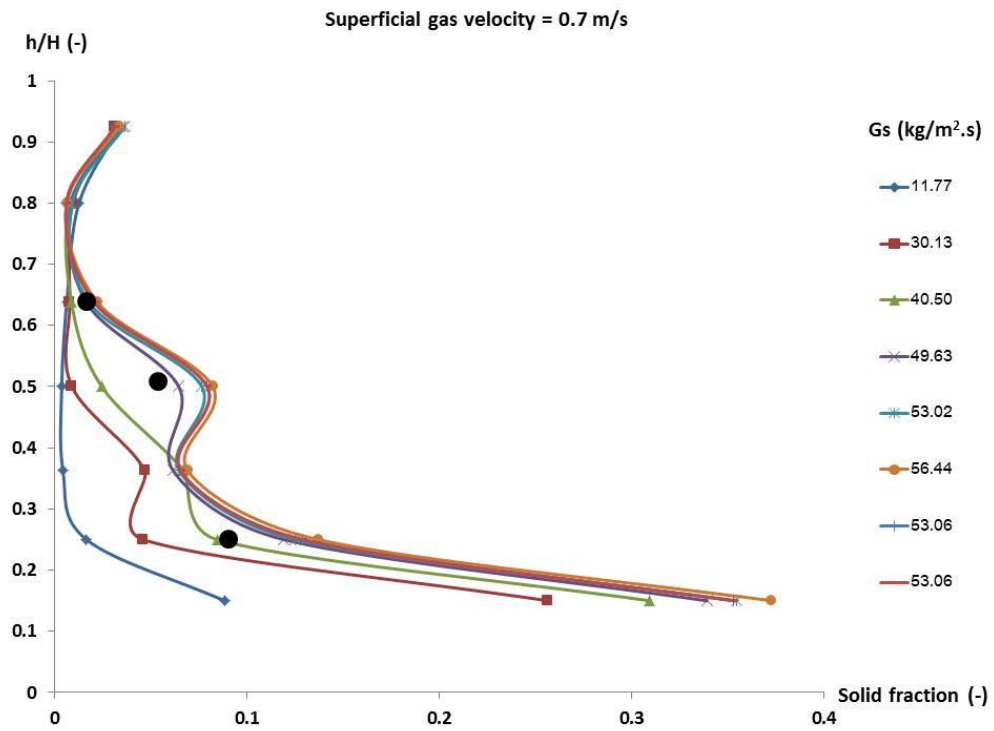
รูปที่ 4.22 สัดส่วนของฟลูอิดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.4 เมตร/วินาที



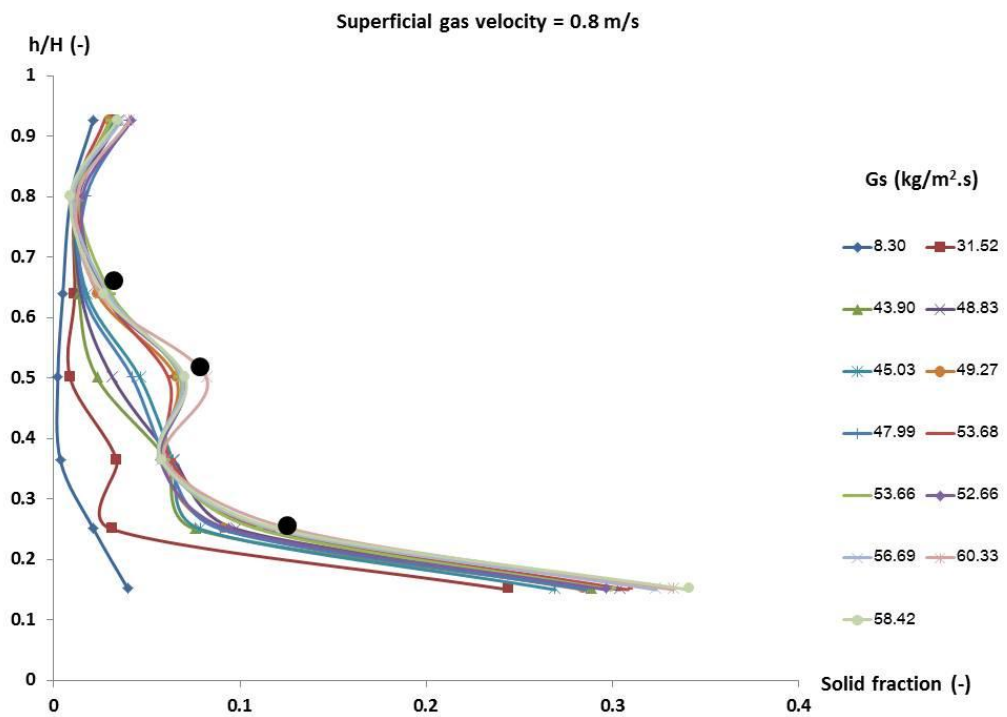
รูปที่ 4.23 สัดส่วนของฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.5 เมตร/วินาที



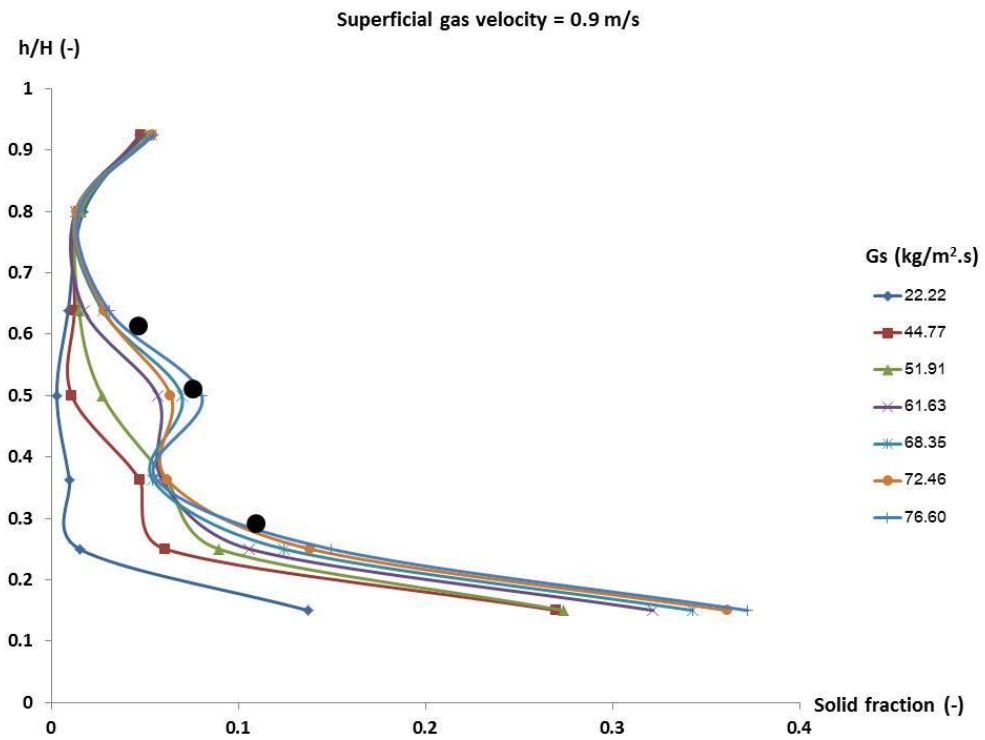
รูปที่ 4.24 สัดส่วนของฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.6 เมตร/วินาที



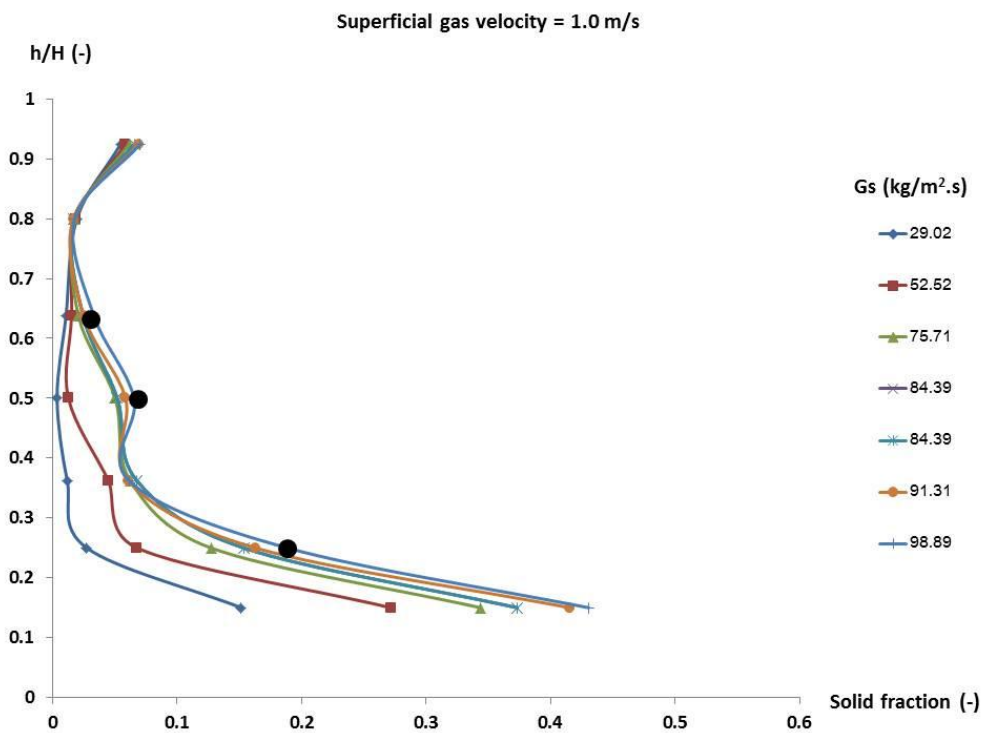
รูปที่ 4.25 สัดส่วนของฟิวส์ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตรวินาที



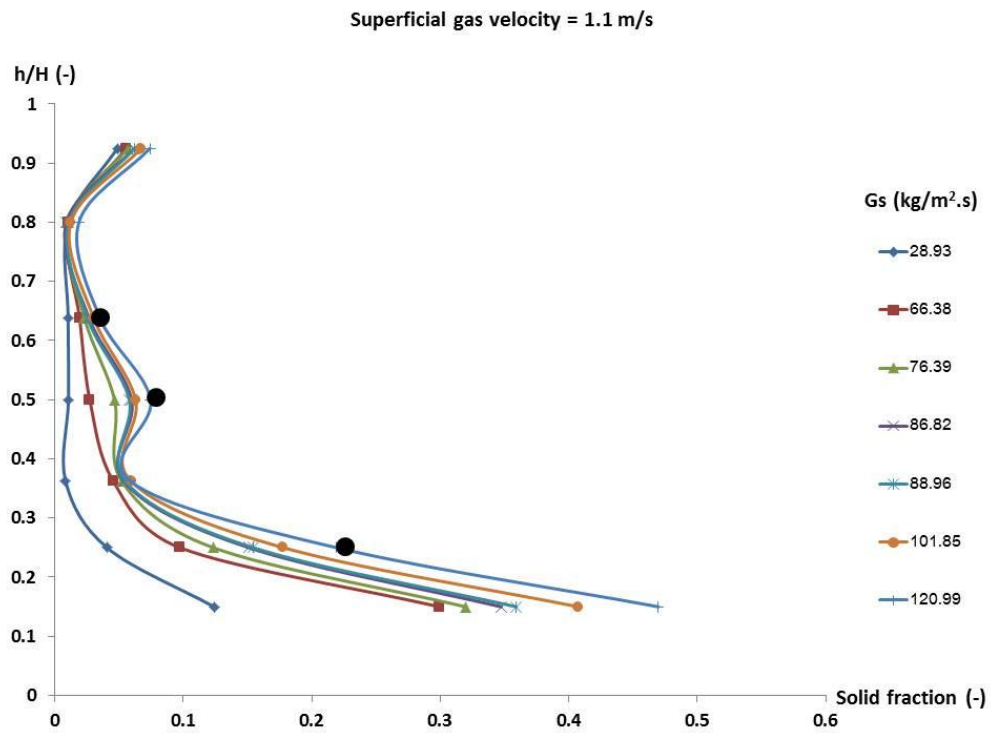
รูปที่ 4.26 สัดส่วนของฟิวส์ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.8 เมตรวินาที



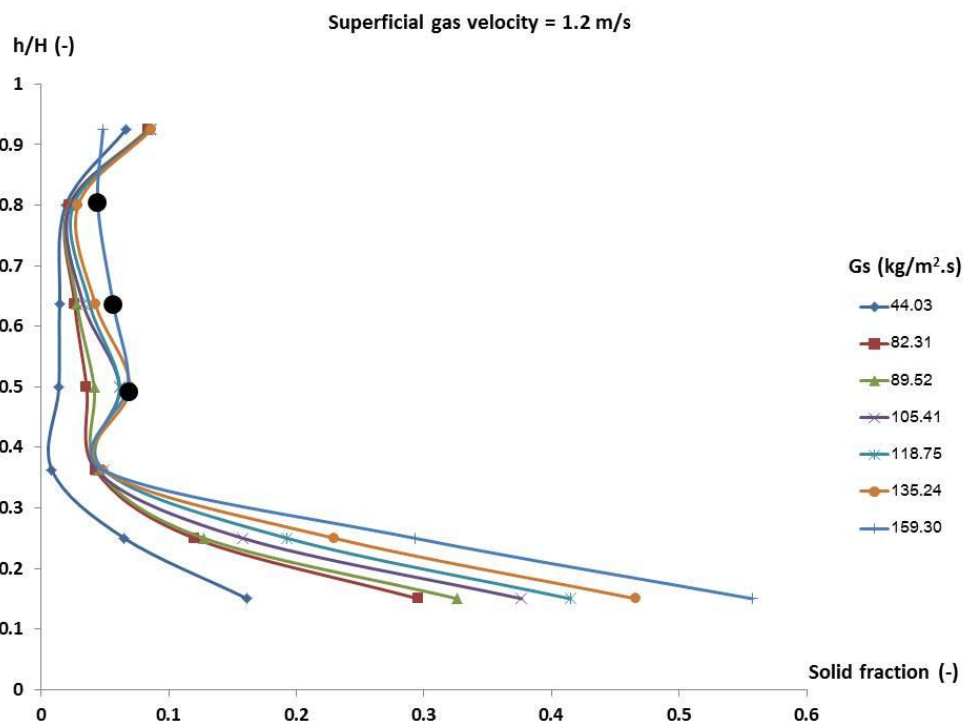
รูปที่ 4.27 สัดส่วนของฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.9 เมตร/วินาที



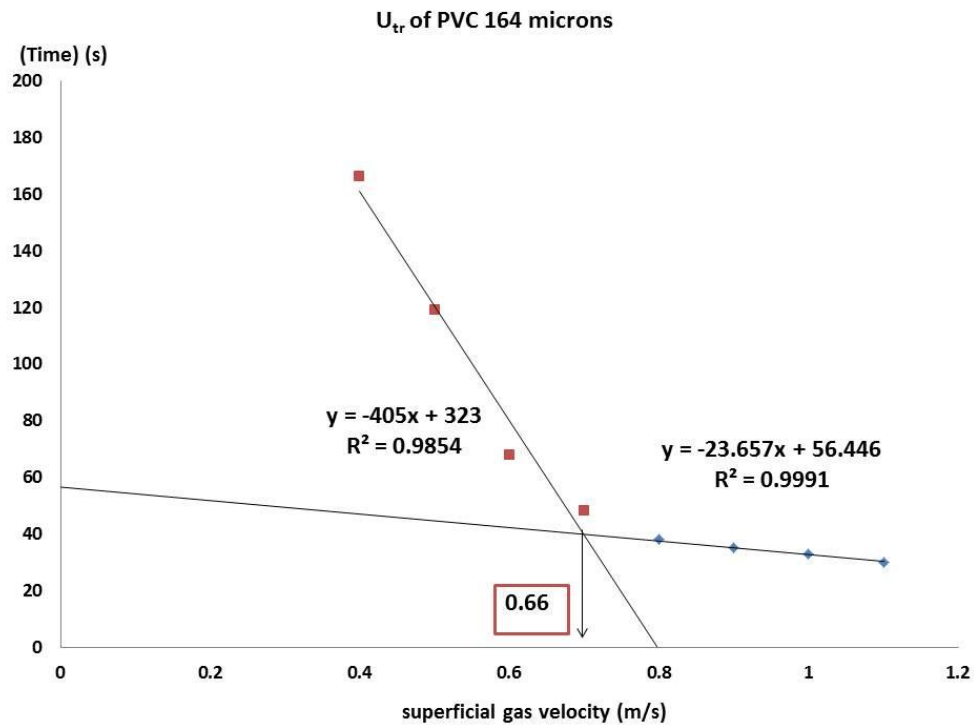
รูปที่ 4.28 สัดส่วนของฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.0 เมตร/วินาที



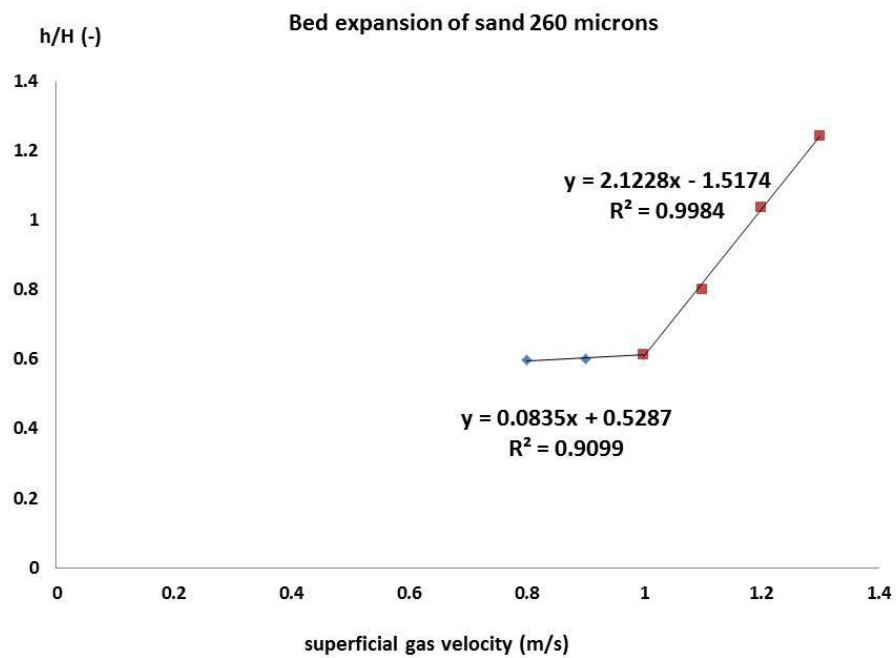
รูปที่ 4.29 สัดส่วนของฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตร/วินาที



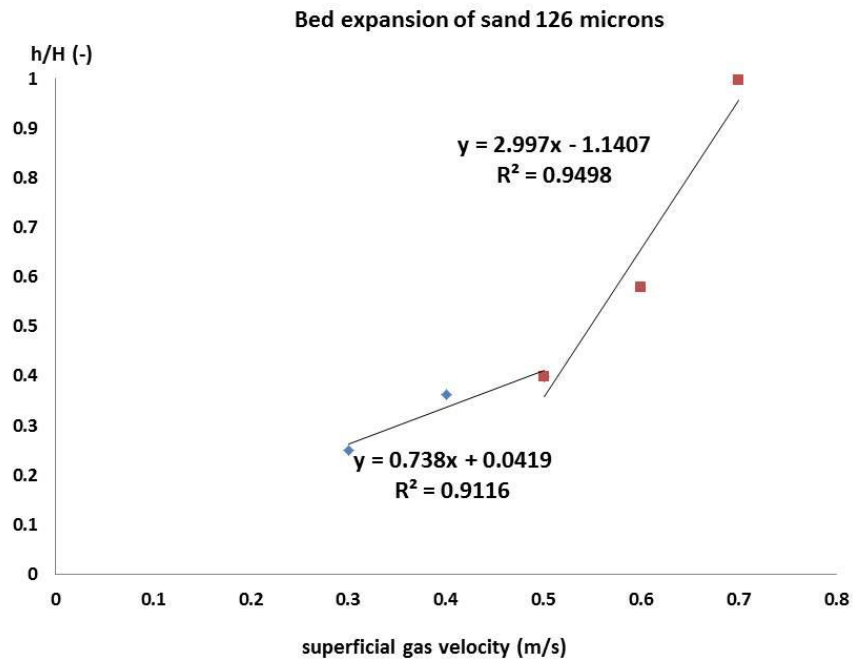
รูปที่ 4.30 สัดส่วนของฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตร/วินาที



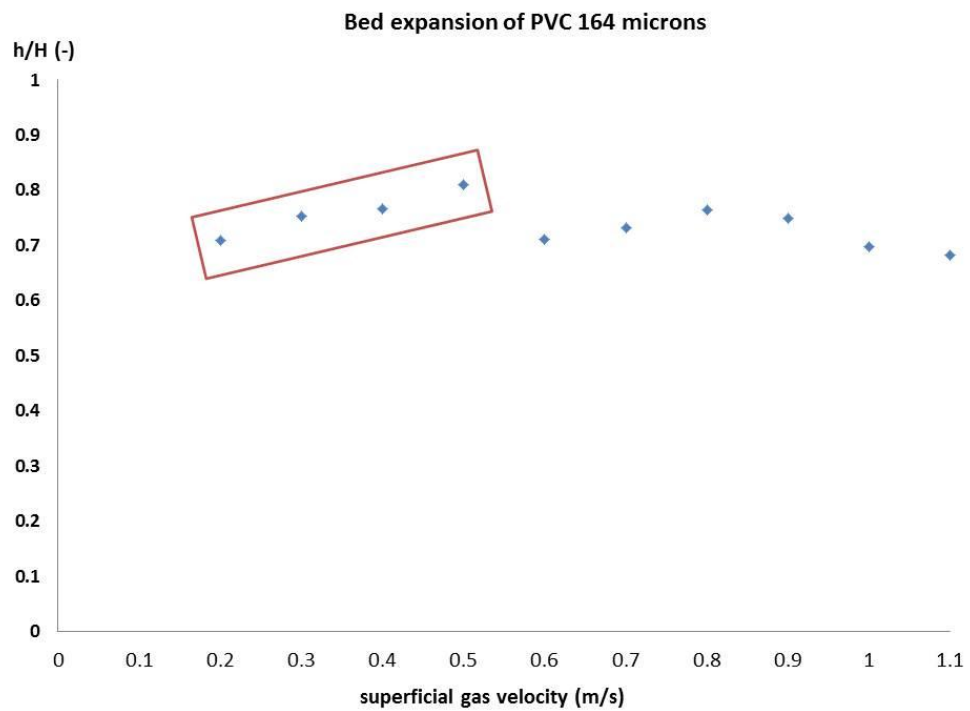
รูปที่ 4.31 U_{tr} ของพีวีซีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอน



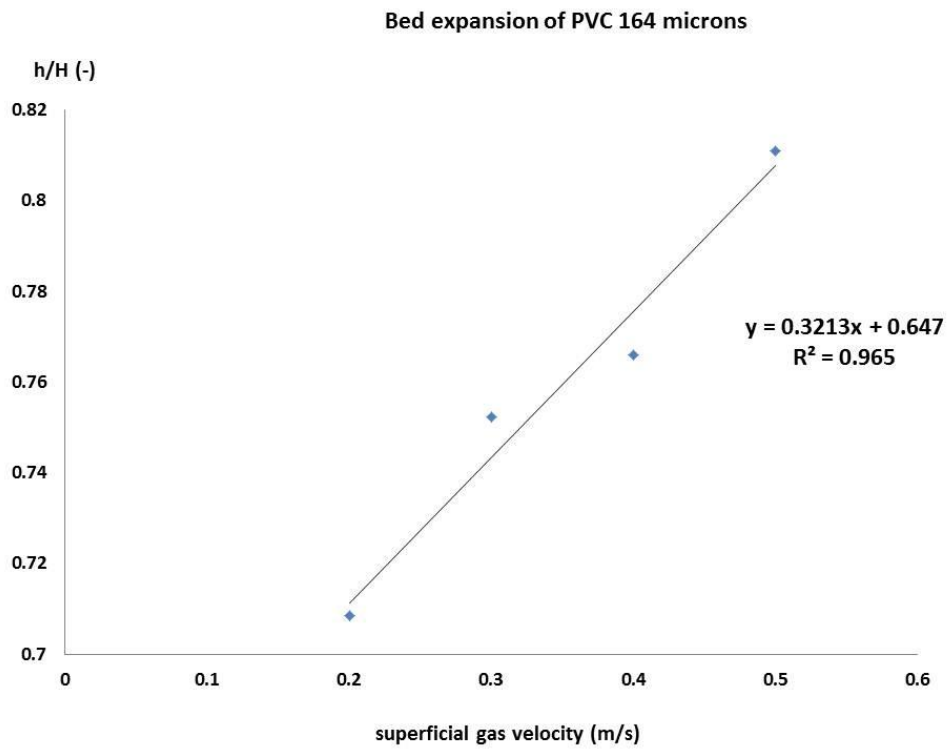
รูปที่ 4.32 การขยายตัวเบตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน



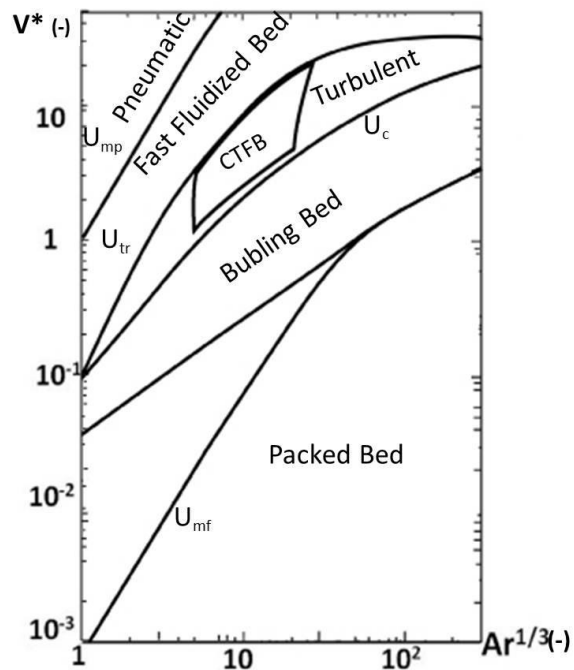
รูปที่ 4.33 การขยายตัวเบตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอน



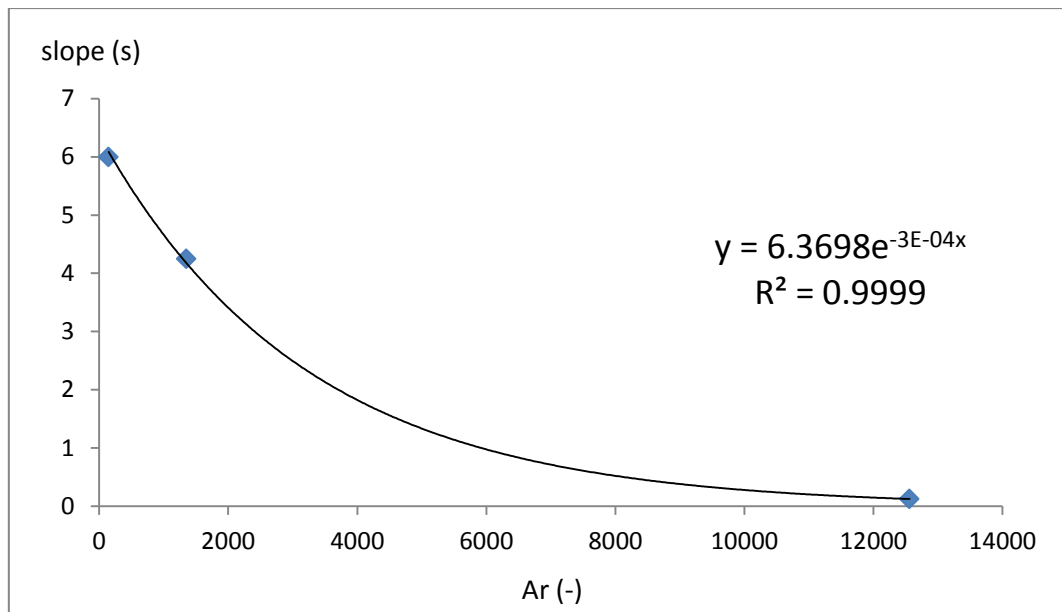
รูปที่ 4.34 การขยายตัวเบตพีวีซีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอน



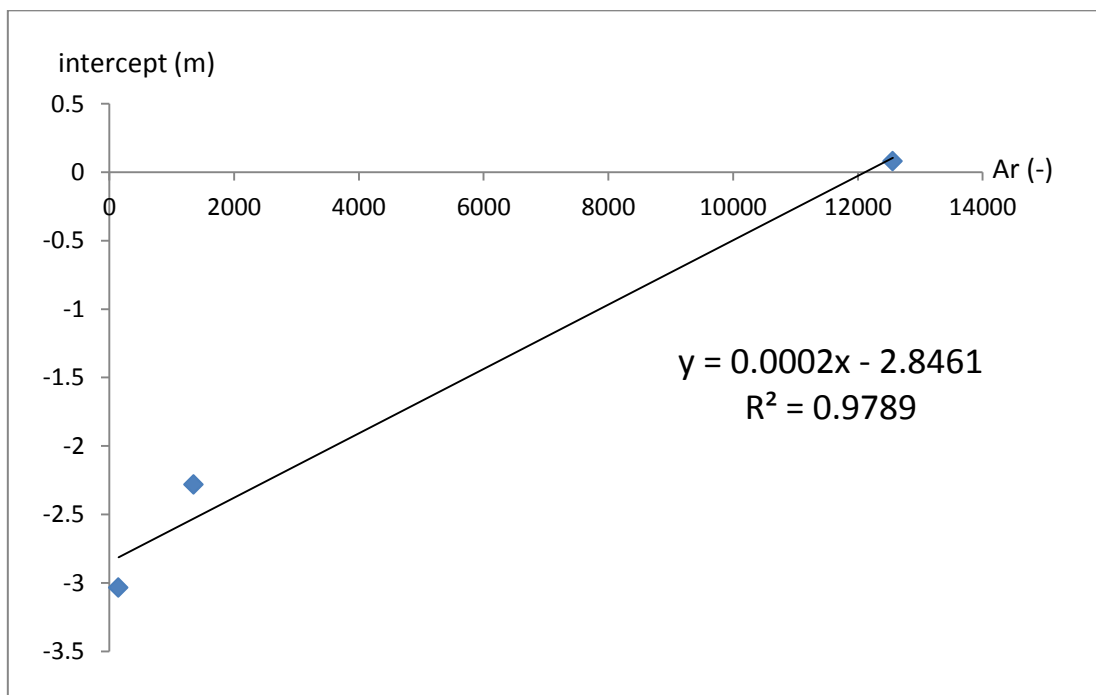
รูปที่ 4.35 การขยายตัวของเม็ดพีวีซีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน



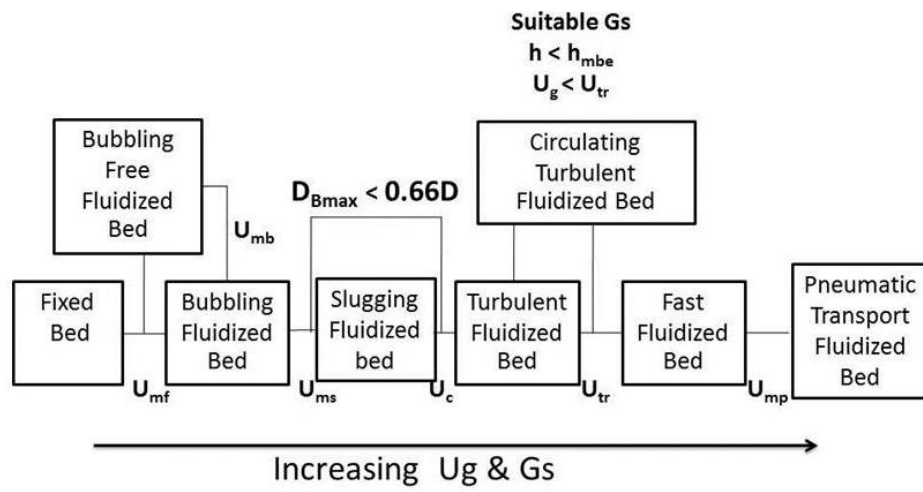
รูปที่ 4.36 แผนภาพของช่วงการไหลที่มีข้อมูลของช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน (CTFB)



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสต่อความชันของสมการที่ (4.6) – (4.8)



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสต่อจุดตัดของสมการที่ (4.6) – (4.8)



รูปที่ 4.39 ผลของตัวแปรดำเนินและตัวแปรของการออกแบบการต่อช่วงการไหล

ตาราง 4.1 รายละเอียดของการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่หลุดออกจากเบด

ตำแหน่ง (cm)	การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง(y)				การเคลื่อนที่ในแนวระดับ(x)			
	+y (m/s)	-y (m/s)	Ave. (m/s)	Number (+y/-y)	+x (m/s)	-x (m/s)	Ave. (m/s)	Number (+x/-x)
8	0.390	-0.298	0.254	2581/703	0.155	-0.163	-0.007	1536/1748
6	0.378	-0.324	0.203	2810/875	0.165	-0.157	0.016	1997/1058
4	0.337	-0.293	0.124	2104/1057	0.143	-0.147	0.008	1490/1671
2	0.306	-0.324	0.019	709/573	0.113	-0.162	-0.07	697/834
1	0.212	-0.225	0.014	506/416	0.227	-0.214	0.005	556/468

ตาราง 4.2 ตัวเลขไร่หน่วยอาร์คิมิดีสของอนุภาคชนิดต่างๆ

ชนิดของของแข็ง	ตัวเลขไร่หน่วยอาร์คิมิดีส
ทรายขนาดอนุภาคขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน	1352
ทรายขนาดอนุภาคขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอน	146
พีวีซีขนาดอนุภาคขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอน	179

ตารางที่ 4.3 ค่า V^* ของทรายที่มีขนาดอนุภาค 260 ไมครอน

Operating parameters		V^* (-)
U_g (m/s)	G_s (kg/(m ² .s))	
1.3	386.23	1.705
1.3	391.31	1.745
1.4	290.14	1.909
1.4	405.63	1.887
1.4	413.03	1.886
1.4	586.77	1.839

ตารางที่ 4.4 ค่า V^* ของทรายที่มีขนาดอนุภาค 126 ไมครอน

Operating parameters		V^* (-)
U_g (m/s)	G_s (kg/(m ² .s))	
0.8	733.78	0.839
0.9	349.47	1.189
0.9	593.06	1.089
1.0	374.59	1.326
1.0	911.70	1.055
1.1	556.65	1.408

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบตในเครื่องปฏิกรณ์ฟิวชันไอซ์เบตแบบหมุนเวียนสองมิติ ด้วยการถ่ายภาพนิ่งของอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยกล้อง CCD ในระบบที่มีภูมิภาคของไหลเป็นอากาศที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งผ่านการปรับและควบคุมให้ความดันคงที่ 2 บาร์ และใช้ทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่มีความหนาแน่น 2650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเป็นภูมิภาคของแข็งพบว่าความเร็วในแนวระดับของอนุภาคทรายที่หลุดออกจากเบตของแข็งในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน เป็นอิสระต่อตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็ว ซึ่งแสดงได้ด้วยความเร็วเฉลี่ยในแนวระดับของอนุภาคมีความเร็วใกล้เคียง 0 เมตรต่อวินาที ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวระดับเกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาค โดยที่ไม่มีแรงภายนอกเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงทำให้จำนวนของอนุภาคที่เคลื่อนไปทางซ้ายและทางขวาของท่อไรเซออร์มีปริมาณใกล้เคียงกันด้วยความเร็วที่เท่ากันแต่ที่ความเร็วในแนวแกนตั้งขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็ว อนุภาคทรายที่หลุดออกจากเบตทรายในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน จะมีความเร็วเฉลี่ยในแนวแกนตั้งสูงที่สุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อไรเซออร์ และจะค่อยๆลดลงเมื่อตำแหน่งที่ทำการวัดความเร็วอยู่ใกล้ผนังของท่อไรเซออร์ ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแนวแกนตั้งนั้นเกิดจากผลรวมของแรงลอยตัวและแรงต้านการเคลื่อนที่ที่มากกว่าน้ำหนักของอนุภาคซึ่งเป็นแรงในทิศลง แต่ที่บริเวณผนังของท่อไรเซออร์ อากาศจะเข้าเสียดสีกับผนังท่อกลายเป็นแรงเสียดทานซึ่งเป็นแรงในทิศลง ส่งผลให้ความเร็วและจำนวนของอนุภาคในทิศขึ้นมีค่าน้อยลงจนกระทั่งมีค่าความเร็วเฉลี่ยเป็น 0 เมตรต่อวินาที ที่ตำแหน่งผนังไรเซออร์ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าความเร็วของอนุภาคในทิศขึ้นจะลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนังไรเซออร์มากขึ้น แต่ก็ยังไม่ปรากฏค่าความเร็วในทิศขึ้นที่มีค่าเป็นลบ แสดงว่าอนุภาคมีแนวโน้มในการเคลื่อนที่ขึ้นตลอดแนวหน้าตัด ไม่มีรูปแบบการเคลื่อนที่แบบแกว่งใน-วงนอก ที่จะทำให้เกิดค่าความเร็วที่ติดลบบริเวณใกล้ๆ ผนังไรเซออร์ สรุปได้ว่าอนุภาคที่หลุดออกจากเบตในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนนั้นไม่มีการจับตัวเป็นก้อนเช่นเดียวกันกับช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน

เมื่อช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเกิดขึ้นภายในท่อไรเซออร์ จะเกิดบริเวณที่สัดส่วนของของแข็งมีค่าสูง เรียกว่าเบต และบริเวณที่มีของแข็งอยู่เบาบางเรียกว่าช่วงที่อนุภาคของแข็งหลุดออกจากเบต ในเบตของแข็ง สัดส่วนของของแข็งจะมีค่าสูงที่สุดที่ทางเข้าไรเซออร์ เนื่องจากผลของทางเข้า และจะค่อยๆลดลงตามความสูงของไรเซออร์ ในช่วงที่อนุภาคหลุดออกจากเบตนั้น จะมีค่าสัดส่วน

ของของแข็งเบาบางมากๆ แต่สัดส่วนของของแข็งจะเพิ่มขึ้นที่ทางออกของท่อไรเซอร์ เนื่องมาจากปรากฏการณ์ทางออก ผลของทางเข้าจะปรากฏอยู่ในทุกช่วงการไหล แต่ผลทางออกจะปรากฏที่ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่มีความเร็วของอากาศน้อยและช่วงการไหลแบบความเร็วสูง เนื่องมาจากว่าอนุภาคของแข็งมีความเร็วช้าจึงทำให้อนุภาคของแข็งมีความสามารถในการเคลื่อนที่จากไรเซอร์ไปยังไซโคลนน้อยตามไปด้วย ก่อให้เกิดการสะสมของอนุภาคที่บริเวณทางออกของไรเซอร์ แต่ผลของทางออกจะไม่ปรากฏในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนหรือช่วงการไหลแบบปั่นป่วนที่อนุภาคของแข็งหลุดออกจากเบตเป็นจำนวนมาก เพราะอนุภาคมีโอกาสชนกันได้มากขึ้น จึงส่งผลทำให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่ในแนวระดับมากได้ดียิ่งขึ้น อนุภาคของแข็งจึงสามารถเคลื่อนที่ออกจากท่อไรเซอร์ไปยังไซโคลนได้ดี และไม่ปรากฏผลของทางออกเมื่ออัตราการหมุนเวียนของแข็งมีค่าสูง

การเพิ่มอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบจะทำให้สัดส่วนของของแข็งในเบตมีค่าสูงขึ้นและความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่วัยเซอร์ทำให้เบตเกิดการขยายตัว การตอบสนองต่อการไหลของอากาศด้วยการขยายตัวของของแข็งจะขึ้นอยู่กับชนิดของของแข็งตามวิธีของเจลดาร์ทและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค

อนุภาคที่อยู่ในกลุ่มเอตามวิธีของเจลดาร์ทนั้นจะมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา แต่กลับมีความสามารถในการขยายตัวของเบตได้น้อยมาก เนื่องมาจากแรงทางไฟฟ้าที่เป็นแรงยึดเหนี่ยวของอนุภาคมีค่าสูง แรงทางไฟฟ้างดงกล่าวเกิดมาจากการเสียดสีกันระหว่างอนุภาคในทุกๆครั้งที่เกิดการชนกัน อนุภาคในกลุ่มเอซึ่งในงานวิจัยนี้คืออนุภาคพีวีซีนั้นว่องไวมากต่อการเกิดประจุไฟฟ้า แต่มีความสามารถในการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าต่ำ จึงทำให้เบตขยายตัวได้น้อยมากเมื่อเทียบกับอนุภาคในกลุ่มบี ซึ่งในงานวิจัยนี้คืออนุภาคของทราย แม้ว่าทรายจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าและมีน้ำหนักมากกว่าแต่กลับมีความสามารถในการขยายตัวได้ดีกว่าพีวีซี เนื่องมาจากมีแรงทางไฟฟ้าที่ยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อย จึงทำให้สามารถตอบสนองการไหลของอากาศผ่านเบตของแข็งด้วยการขยายตัวของเบตได้สูง

ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนสามารถเกิดขึ้นได้ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบตสองมิติที่มีการป้อนอากาศตำแหน่งเดียว โดยจะเกิดขึ้นที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งสูง ในงานวิจัยนี้พบว่า อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่ต่ำที่สุดที่จะเกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน คือ 290 กิโลกรัมต่อวินาทีต่อตารางเมตร การที่จะทำให้เกิดอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบสูงถึงขั้นนั้นได้ เบตของแข็งจะต้องสามารถขยายตัวจนมีความสูงเท่ากับความสูงของท่อไรเซอร์ หากท่อไรเซอร์มีความสูงมากกว่าความสูงมากที่สุดที่เบตของแข็งจะสามารถขยายตัวได้ ช่วงการ

ไหลจะเปลี่ยนจากช่วงการไหลแบบปั่นป่วนไปเป็นช่วงการไหลแบบความเร็วสูง เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้น จนกระทั่งความเร็วของของไหลมีค่ามากกว่าความเร็วสุดท้ายของช่วงการไหลแบบปั่นป่วน โดยที่ไม่ปรากฏช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน

เมื่อเปลี่ยนค่าของตัวแปรการออกแบบให้อยู่ในรูปของรากที่สามของตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีส และ V^* จะทำให้สามารถนำผลของตัวแปรดำเนินการที่ทำให้เกิดช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนผนวกเข้ากับข้อมูลของช่วงการไหลต่างๆที่เคยได้มีการศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ จึงทำให้ได้แผนภาพที่แสดงช่วงการไหลชุดใหม่ที่แสดงขอบเขตของเบตตั้น ช่วงการไหลแบบฟองแก๊ส ช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียน ช่วงการไหลแบบความเร็วสูง และช่วงการไหลแบบเบาบางได้อย่างชัดเจน โดยที่ช่วงการไหลแบบปั่นป่วนจะสามารถเปลี่ยนไปเป็นช่วงการไหลแบบปั่นป่วนหมุนเวียนได้หากมีอัตราการหมุนเวียนที่มีค่าสูงมากพอ โดยการที่จะทำให้เกิดอัตราการหมุนเวียนที่มีค่าสูงดังกล่าวได้นั้นความสูงของคอลัมน์จะต้องมีความสูงน้อยกว่าความสูงมากที่สุดที่เบตของแข็งจะสามารถขยายตัวได้

ข้อเสนอแนะ

1. อนุภาคที่สามารถเกิดประจุไฟฟ้าได้ดี แต่สามารถถ่ายโอนประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้น้อย เช่น พอลิเมอร์ชนิดต่างๆ จะมีการขยายตัวของเบตน้อยมาก จึงควรทำการศึกษาลักษณะที่จำเพาะของเบตพอลิเมอร์หลายๆ ชนิด เพื่อให้ทราบอัตราการขยายตัวของเบตในอนุภาคกลุ่มนี้
2. การวัดความดันจะต้องใช้ข้อมูลจำนวนอย่างน้อย 10,000 ค่า เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยที่เป็นตัวแทนของข้อมูลที่น่าเชื่อถือ
3. การผ่านไฟฟ้ากระแสตรงเข้าที่ข้อต่อของเครื่องที่เชื่อมระหว่างตำแหน่งที่ต้องการวัดความดันในท่อไรเซอรักับเครื่องวัดความดัน จะสามารถช่วยลดการอุดตันของท่อวัดความดันได้เป็นอย่างดี
4. ควรศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อไรเซอรัต่อการขยายตัวของเบตในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน
5. อนุภาคที่จะสามารถทำให้แผนภาพแสดงช่วงการไหลและสมการการขยายตัวของเบตมีความสมบูรณ์ขึ้น คืออนุภาคที่อยู่ในกลุ่มเจลดาร์ทบี ที่มีเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสระหว่าง 4,000 – 6,000 ยกตัวอย่างเช่น เม็ดแก้ว อะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นต้น

- ดาวเนอรฺ์ที่จะสามารถทำให้อัตราการผลิตของของแข็งที่สูง คือ ดาวเนอรฺ์ที่การป้อนลมเข้าที่รอบๆ ตำแหน่งต่างๆ ของท่อโรเซอรฺ์

รายการอ้างอิง

- [1] Srivastava, A., Arrawal K., Sundraresan, Reddy S., Knowlton, T.M., Dynamic of gas-particle flow circulating fluidized beds. Powder Technology 100(1998): 173-182.
- [2] Ellis, N., Bi, H.T., Lim, C.J., Grace, J.R., Hydrodynamics of Turbulent fluidized beds of different diameters. Powder Technology, 141(2004): 124-136.
- [3] Brereton, C.M.H., Grace, J.R., The transition to turbulent fluidization. ChemE 70(1992): 246-251.
- [4] Bi, H.T., Grace, J.R., Zhu, J., Propagation of pressure wave and force oscillation in gas-solid fluidized beds and their influence on diagnostics of local hydrodybamics. Power Technology, 82(1995): 239-235.
- [5] Cai, P., The transition of flow regime in dense phase gas-solid fluidized bed. PhD Dissertation, Ohio State University, 1989.
- [6] Bing, D., Liang-Shih, F. W., Fei, W., Gas and solids mixing in a turbulent fluidized bed. Particle Technology and Fluidization 48(2002): 1896-1990.
- [7] Issangya, A.S., Bai, D., Grace, J.R., Zhu, J., Solid flux profile in a high density circulating fluidized bed riser. Chemical Engineering Science 54(1999): 5451-5460.
- [8] Bi, H.T., Flow regime diagrams for gas-solid fluidization and up transport. Multiphase Flow 21(1995): 1229-1235.
- [9] Grace, J.R., Bi, H., Circulating Fluidized Beds. New York : Blackie of Academic and professional, 1997.
- [10] Patnailk, K.S.K., Fluidization Principles for Three-Phase Fluidized Bed Bio Reactor. Chemical Engineering and Applications 1(2010): 251-255.

- [11] Haeri, S., Shrimpton, J.S., A mesoscopic description of polydispersed particle laden turbulent flows. Progress in Energy and Combustion Science, 37(2011): 716-740.
- [12] Radic, D., Jovovic, A., The Influence of Variable Operation Condition on The design and Exploitation of fly ash Pneumatic Transport System in the Thermal Power Plants. Brazilian Journal of Chemical Engineering 25(2008): 123-135.
- [13] Sau, D.C., Mohanty, S., Biswal, K.C., Minimum fluidization velocities and maximum bed pressure drops for gas–solid tapered fluidized beds. Chemical Engineering Journal 132(2007)151-157.
- [14] Constantieau, G., Grace, J.P., Richards, G.G., Generalized Bubbling-Slugging Fluidized Bed Reactor Model. Chemical Engineering Science 63(2007): 70-81.
- [15] Qi, X., Zhu, H., Zhu, J., Demarcation of a new circulating turbulent fluidization regime. AIChE Journal 55(2009): 594-611.
- [16] Chakravarti, S., Gupta, A., Amitabh, B., Advanced Technology for the Capture of Carbon Dioxide from Flue Gases. Proceeding of the First National Conference on Carbon Sequestration, Washington, (2001).
- [17] Geldart, D., Types of Gas Fluidization. Powder Technology 7(1973)285-292.
- [18] Stewart, P. S., Davidson, J. F., Slug flow in Fluidized Beds, Powder Technology 1(1978): 915-918.
- [19] Smolders, K., Baeyens, J., Fluidized Bed Operating at High Velocities: a Critical Review of Occurring Regimes. Powder Technology 119(2001): 269-291.
- [20] Schnitzlein, M., Weinstein, G.H., Flow Characterization in High Velocity Fluidized Beds Using Pressure Fluctuations. Chemical Engineering Science 43(1988): 2605-2614.
- [21] Basu, P., Bubbling to Turbulent Transition, Combustion and Gasification in Fluidized beds. United State : Taylor Francis Group, 4(2006): 142-152.

- [22] Pandit, K.J., Wang, X.S., Rhodes, M.J., Study of Geldart's Group A Behavior Using the Discrete Element Method Simulation. Powder Technology 160(2005): 7-14.
- [23] Qi, M., Zhu, J., Barghi, S., Particle velocity and flux distribution in high solid concentration circulating turbulent fluidized bed. Chemical Engineering Science 48(2012): 437-448.
- [24] Qi, M., Barghi, S., Zhu, J., Detailed hydrodynamics of high flux gas-solid in a circulating turbulent fluidized bed. Chemical Engineering Science 209(2012): 633-644.
- [25] Wang, J., Tan, L., Hoef, M.A., Annaland, M., Kuipers, I.A.M., From bubbling to turbulent fluidization: Advanced onset of regime transition in micro-fluidized beds. Chemical Engineering Science 66(2011): 633-644.
- [26] Smolders, K., Beayens, J., Gas fluidized beds operating at high velocities: a critical review of occurring regimes. Powder Technology 119(2001): 269-291.
- [27] Xu, G., Hartge, X., Werther, J., Gao, S., Saturation carrying capacity at high Archimedes number of vertical concurrent gas-particle flow. Chemical Engineering Science 61(2006): 7115-7124.
- [28] Monazam, E.R., Shadle, L.S., Lawson, L.O., A transient method for determination of saturation carrying capacity. Powder Technology 121(2001) 205-212.
- [29] Escudero, D.R., Bed height and material density effects on fluidized bed hydrodynamics. Graduate thesis and dissertations, Iowa University, 2010.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

1. ความเร็วของอนุภาคที่หลุดออกจากเบตของแข็ง

$$V = \frac{S}{t}$$

เมื่อ

$$S = \text{ระยะขจัด} = 0.001092 \text{ เมตร}$$

$$t = \text{ความเร็วตัดเตอร์} = 1/125 \text{ วินาที}$$

ดังนั้น

$$V = \frac{0.001092}{\frac{1}{125}}$$

$$V = 0.136 \text{ เมตร/วินาที}$$

2. สัดส่วนของของแข็ง (Solid fraction)

$$\varepsilon = \frac{\Delta P}{\rho_s g \Delta h} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$$\varepsilon = \text{สัดส่วนของของแข็ง}$$

$$\Delta P = \text{ความดันลด} = 2642.803 \text{ พาสคาล}$$

$$g = \text{สนามแรงโน้มถ่วงของโลก} = 9.81 \text{ เมตร/วินาที}^2$$

$$\Delta h = \text{ช่วงความสูงที่ทำการวัดความดันลด} = 0.15 \text{ เมตร}$$

$$\rho_s = \text{ความหนาแน่นของของแข็ง} = 2650 \text{ กิโลกรัม/เมตร}^3$$

$$\varepsilon = \frac{2642.803}{(2650)(9.81)(0.2)}$$

$$\varepsilon = 0.498$$

3. ตัวเลขไร์หน่วยอาร์คิมิดีส (Archimedes number)

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_s - \rho_g) g d_p^3}{\mu^2} \quad 2.3$$

$$d_p = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค} = 0.00026 \text{ เมตร}$$

$$\rho_s = \text{ความหนาแน่นของอนุภาค} = 2650 \text{ กิโลกรัม/เมตร}^3$$

$$\rho_g = \text{ความหนาแน่นของอากาศ} = 1.164 \text{ กิโลกรัม/เมตร}^3$$

$$g = \text{สนามแรงโน้มถ่วงของโลก} = 9.81 \text{ เมตร/วินาที}$$

$$\mu = \text{ความหนืด} = 0.00001983 \text{ เมตร}^2/\text{วินาที}$$

4. ตัวแปร V^*

$$V^* = \left[\frac{\rho_g^2}{g \mu_g (\rho_p - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{3}} \left[U_g - \frac{G_s \varepsilon}{\rho_p (1 - \varepsilon)} \right]$$

$$d_p = \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค} = 0.00026 \text{ เมตร}$$

$$\rho_p = \text{ความหนาแน่นของอนุภาค} = 2650 \text{ กิโลกรัม/เมตร}^3$$

$$\rho_g = \text{ความหนาแน่นของอากาศ} = 1.164 \text{ กิโลกรัม/เมตร}^3$$

$$g = \text{สนามแรงโน้มถ่วงของโลก} = 9.81 \text{ เมตร/วินาที}$$

$$\mu_g = \text{ความหนืดของอากาศ} = 0.00001983 \text{ เมตร}^2/\text{วินาที}$$

$$Gs = \text{อัตราการผลิตของของแข็ง} = 290 \text{ กิโลกรัม}/(\text{เมตร}^2 \cdot \text{วินาที})$$

$$Ug = \text{ความเร็วของของไหล} = 1.3 \text{ เมตร/วินาที}$$

$$\epsilon = \text{สัดส่วนของของแข็ง} = 0.276$$

$$V^* = \left[\frac{1.164^2}{(9.81)(0.00001983)(2650-1.164)} \right]^{\frac{1}{3}} \left[1.3 - \frac{(290)(0.276)}{2650(1-0.276)} \right]$$

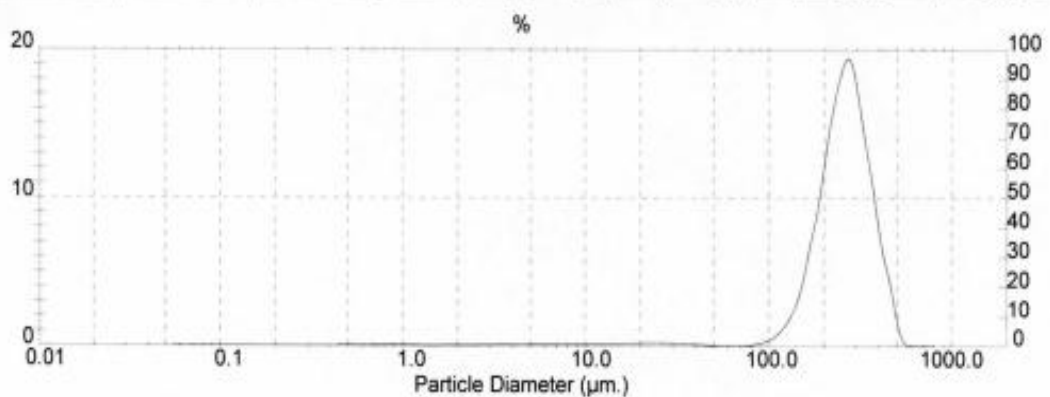
$$V^* = 1.74 \text{ เมตร/วินาที}$$

ภาคผนวก ข

ข้อมูลของขนาดอนุภาคเฉลี่ย

1. ทราบขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน

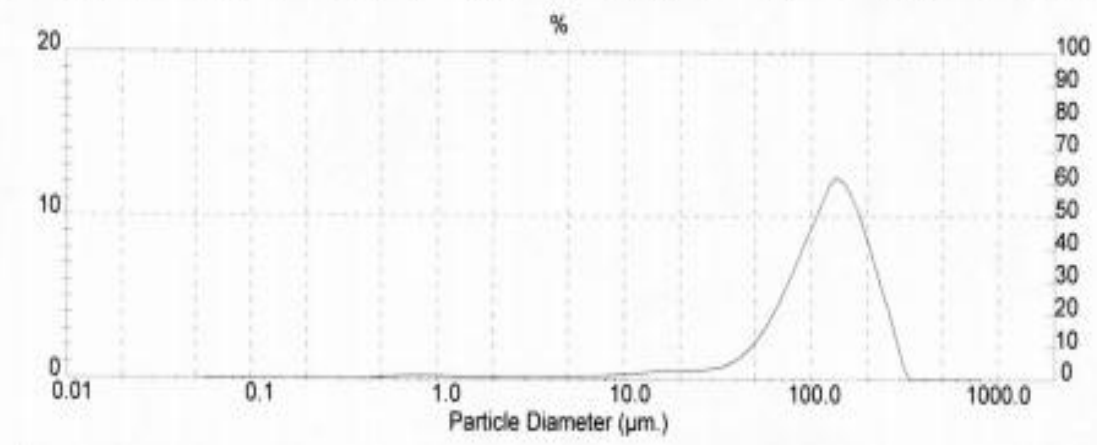
Result Statistics							
Distribution Type: Volume		Concentration = 0.1518 %Vol		Density = 1.000 g / cub. cm		Specific S.A. = 0.1111 sq. m / g	
Mean Diameters:		D (v, 0.1) = 156.86 um		D (v, 0.5) = 258.63 um		D (v, 0.9) = 380.89 um	
D [4, 3] = 260.37 um		D [3, 2] = 54.02 um		Span = 8.662E-01		Uniformity = 2.848E-01	
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.17	7.72	2.02
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.17	9.00	2.19
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.16	10.48	2.35
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.16	12.21	2.51
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.16	14.22	2.68
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.18	16.57	2.86
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.21	19.31	3.06
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.23	22.49	3.29
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.24	26.20	3.54
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.23	30.53	3.77
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.20	35.56	3.97
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	0.15	41.43	4.12
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	0.10	48.27	4.22
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	0.05	56.23	4.27
0.42	0.08	0.49	0.08	56.23	0.01	65.51	4.29
0.49	0.08	0.58	0.15	65.51	0.03	76.32	4.32
0.58	0.07	0.67	0.23	76.32	0.11	88.91	4.43
0.67	0.09	0.78	0.32	88.91	0.32	103.58	4.75
0.78	0.11	0.91	0.43	103.58	0.80	120.67	5.55
0.91	0.12	1.06	0.55	120.67	1.88	140.58	7.42
1.06	0.10	1.24	0.65	140.58	4.09	163.77	11.51
1.24	0.07	1.44	0.72	163.77	7.96	190.80	19.47
1.44	0.07	1.68	0.79	190.80	13.11	222.28	32.58
1.68	0.09	1.95	0.88	222.28	17.57	258.95	50.16
1.95	0.08	2.28	0.95	258.95	19.23	301.68	69.38
2.28	0.09	2.65	1.04	301.68	14.76	351.46	84.14
2.65	0.10	3.09	1.14	351.46	9.70	409.45	93.84
3.09	0.12	3.60	1.26	409.45	5.06	477.01	98.90
3.60	0.13	4.19	1.39	477.01	1.10	555.71	100.00
4.19	0.14	4.88	1.53	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.15	5.69	1.68	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.17	6.63	1.85	754.23	0.00	878.67	100.00



รูป ข.1 ข้อมูลของทรายที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอน

2. ทฤษฎีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอน

System Details							
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1		Obscuration: 21.3 %			
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]		Residual: 0.842 %			
Analysis Model: Polydisperse							
Modifications: None							
Result Statistics							
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1058 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.2100 sq. m / g				
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 43.65 um	D (v, 0.5) = 122.07 um	D (v, 0.9) = 215.39 um				
D [4, 3] = 126.09 um	D [3, 2] = 28.57 um	Span = 1.407E+00	Uniformity = 4.308E-01				
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.83	0.22	7.72	3.29
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.26	9.00	3.55
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.32	10.48	3.87
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.39	12.21	4.26
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.45	14.22	4.71
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.51	16.57	5.23
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.55	19.31	5.78
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.58	22.49	6.36
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.59	26.20	6.95
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.65	30.53	7.60
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.79	35.56	8.39
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	1.11	41.43	9.50
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	1.68	48.27	11.18
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	2.55	56.23	13.73
0.42	0.07	0.49	0.07	56.23	3.75	65.51	17.48
0.49	0.14	0.58	0.22	65.51	5.25	76.32	22.73
0.58	0.18	0.67	0.40	76.32	6.99	88.91	29.71
0.67	0.22	0.78	0.62	88.91	8.82	103.58	38.53
0.78	0.22	0.91	0.84	103.58	10.58	120.67	49.11
0.91	0.21	1.06	1.05	120.67	12.20	140.58	61.31
1.06	0.18	1.24	1.22	140.58	11.86	163.77	73.17
1.24	0.15	1.44	1.37	163.77	10.30	190.80	83.47
1.44	0.14	1.68	1.52	190.80	7.96	222.28	91.44
1.68	0.15	1.95	1.67	222.28	5.41	258.95	96.85
1.95	0.15	2.28	1.82	258.95	2.85	301.68	99.70
2.28	0.16	2.65	1.98	301.68	0.30	351.48	100.00
2.65	0.17	3.09	2.15	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.18	3.60	2.33	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.18	4.19	2.51	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.18	4.88	2.69	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.18	5.69	2.88	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.20	6.63	3.07	754.23	0.00	878.67	100.00



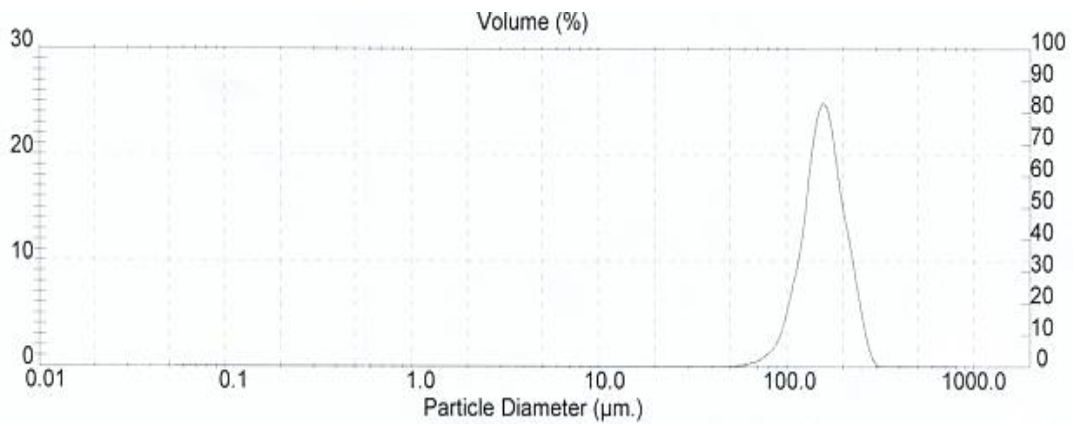
รูป ข.2 ข้อมูลของทรายที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอน

3. พีวีซีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอน

System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 16.6 %
Presentation: 3OHD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	
Analysis Model: Polydisperse			Residual: 0.736 %
Modifications: Active --	Killed Result Channels: < 0.58 um; > 878.67 um.		

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1654 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0399 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 111.80 um	D (v, 0.5) = 157.68 um	D (v, 0.9) = 217.67 um
D [4, 3] = 161.54 um	D [3, 2] = 150.34 um	Span = 6.714E-01	Uniformity = 2.069E-01

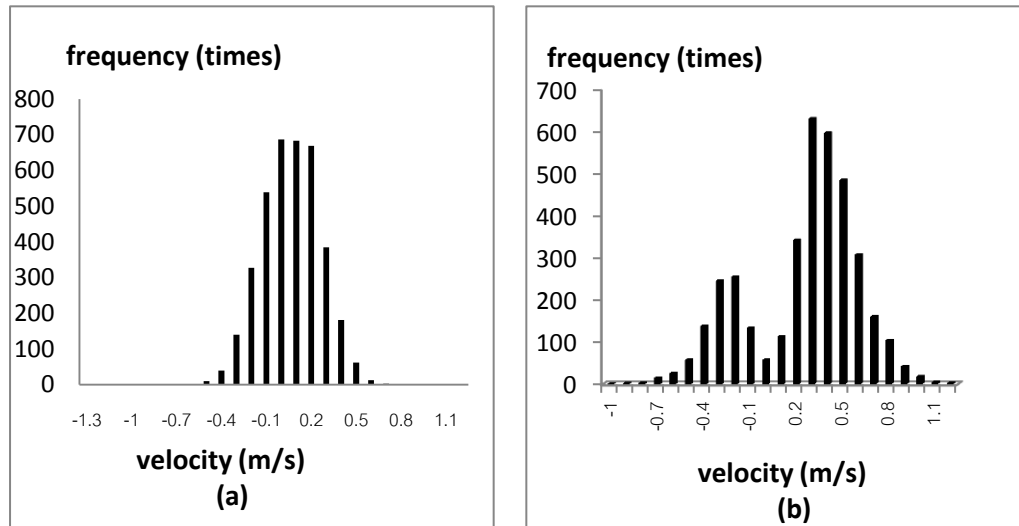
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	0.00	0.06	0.00	6.63	0.00	7.72	0.00
0.06	0.00	0.07	0.00	7.72	0.00	9.00	0.00
0.07	0.00	0.08	0.00	9.00	0.00	10.48	0.00
0.08	0.00	0.09	0.00	10.48	0.00	12.21	0.00
0.09	0.00	0.11	0.00	12.21	0.00	14.22	0.00
0.11	0.00	0.13	0.00	14.22	0.00	16.57	0.00
0.13	0.00	0.15	0.00	16.57	0.00	19.31	0.00
0.15	0.00	0.17	0.00	19.31	0.00	22.49	0.00
0.17	0.00	0.20	0.00	22.49	0.00	26.20	0.00
0.20	0.00	0.23	0.00	26.20	0.00	30.53	0.00
0.23	0.00	0.27	0.00	30.53	0.00	35.56	0.00
0.27	0.00	0.31	0.00	35.56	0.00	41.43	0.00
0.31	0.00	0.36	0.00	41.43	0.03	48.27	0.03
0.36	0.00	0.42	0.00	48.27	0.09	56.23	0.11
0.42	0.00	0.49	0.00	56.23	0.24	65.51	0.35
0.49	0.00	0.58	0.00	65.51	0.60	76.32	0.95
0.58	0.00	0.67	0.00	76.32	1.50	88.91	2.45
0.67	0.00	0.78	0.00	88.91	3.72	103.58	6.17
0.78	0.00	0.91	0.00	103.58	8.68	120.67	14.85
0.91	0.00	1.06	0.00	120.67	16.92	140.58	31.77
1.06	0.00	1.24	0.00	140.58	24.47	163.77	56.24
1.24	0.00	1.44	0.00	163.77	21.56	190.80	77.80
1.44	0.00	1.68	0.00	190.80	13.75	222.28	91.56
1.68	0.00	1.95	0.00	222.28	7.06	258.95	98.62
1.95	0.00	2.28	0.00	258.95	1.38	301.68	100.00
2.28	0.00	2.65	0.00	301.68	0.00	351.46	100.00
2.65	0.00	3.09	0.00	351.46	0.00	409.45	100.00
3.09	0.00	3.60	0.00	409.45	0.00	477.01	100.00
3.60	0.00	4.19	0.00	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.00	4.88	0.00	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.00	5.69	0.00	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.00	6.63	0.00	754.23	0.00	878.67	100.00



รูป ข.3 ข้อมูลของพีวีซีที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอน

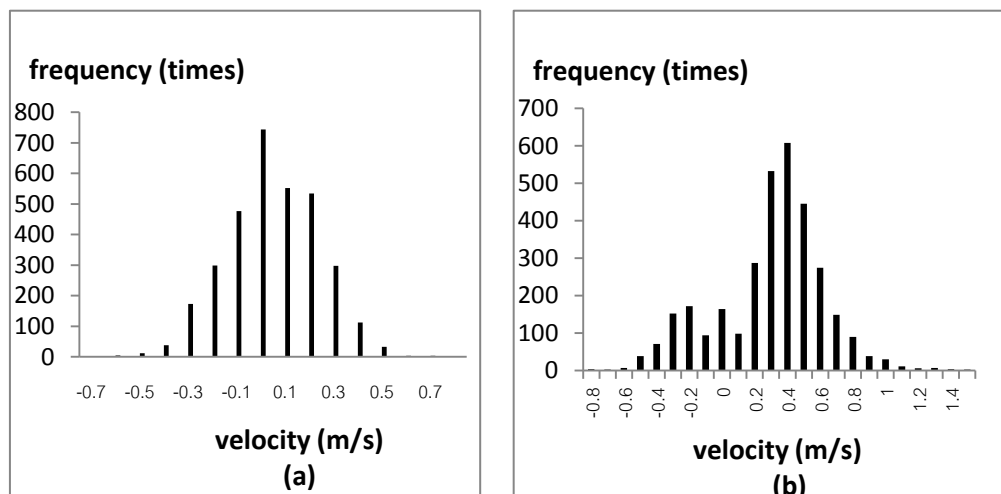
ภาคผนวก ค

ฮิสโตแกรมความเร็ว



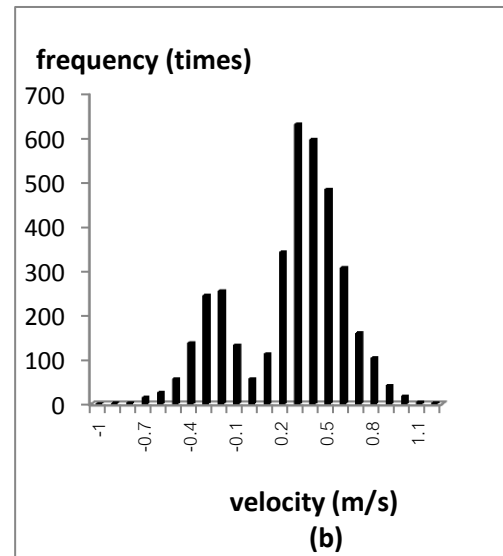
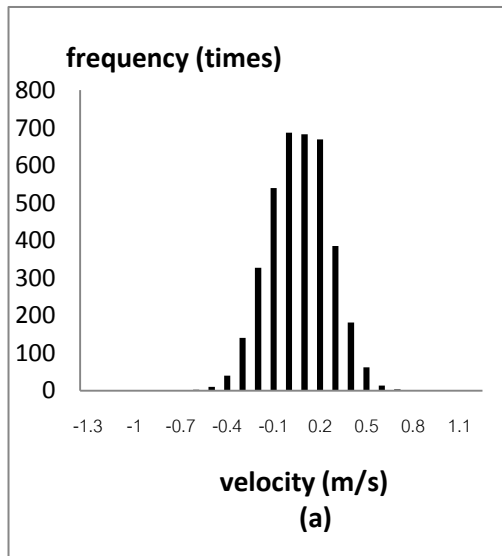
รูปที่ ค.1 ฮิสโตแกรมของความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่ง 8 เซนติเมตรจากผนังไรเซออร์

(a) ความเร็วในแนวระดับและ (b)ความเร็วในแนวตั้ง



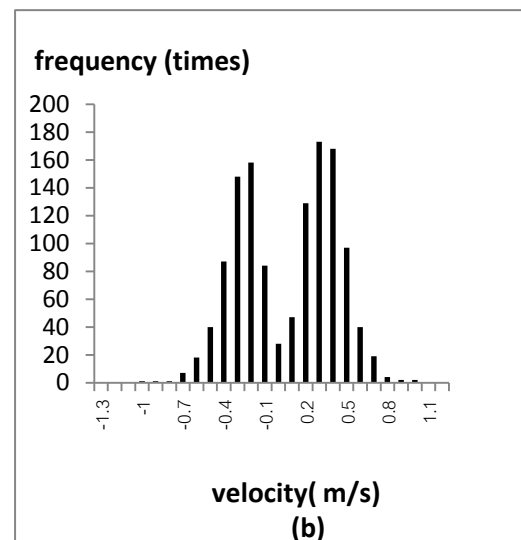
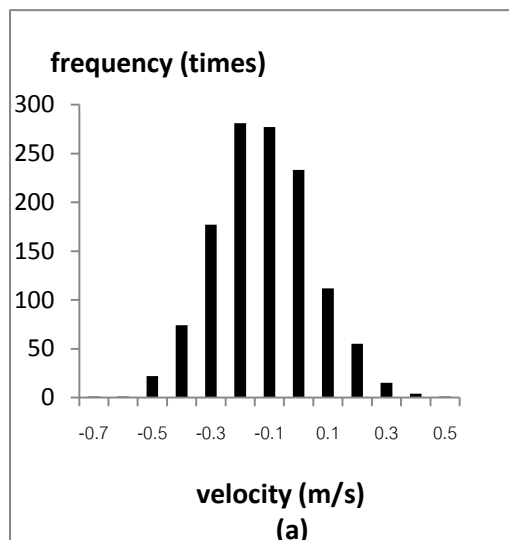
รูปที่ ค.2 ฮิสโตแกรมของความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่ง 6 เซนติเมตรจากผนังไรเซออร์

(a) ความเร็วในแนวระดับและ (b)ความเร็วในแนวตั้ง



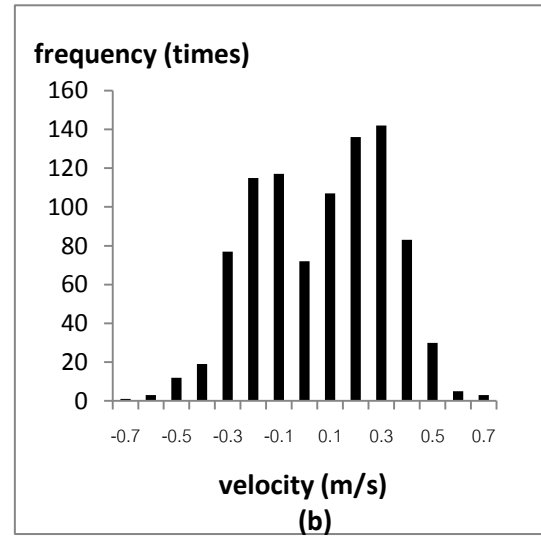
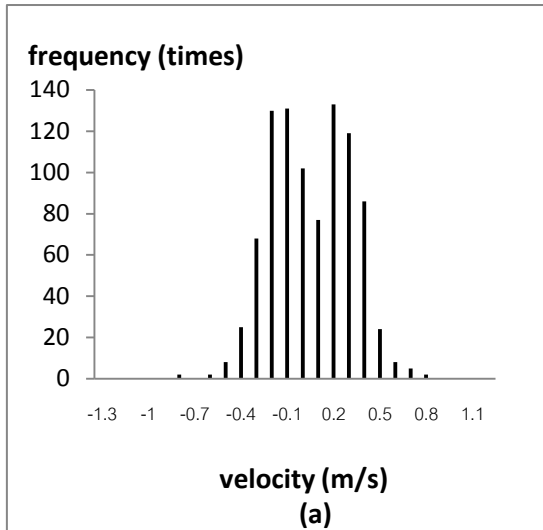
รูปที่ ค.3 ฮิสโตแกรมของความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่ง 4 เซนติเมตรจากผนังไรเซอร์

(a) ความเร็วในแนวระดับและ (b)ความเร็วในแนวตั้ง



รูปที่ ค.4 ฮิสโตแกรมของความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่ง 2 เซนติเมตรจากผนังไรเซอร์

(a) ความเร็วในแนวระดับและ (b)ความเร็วในแนวตั้ง

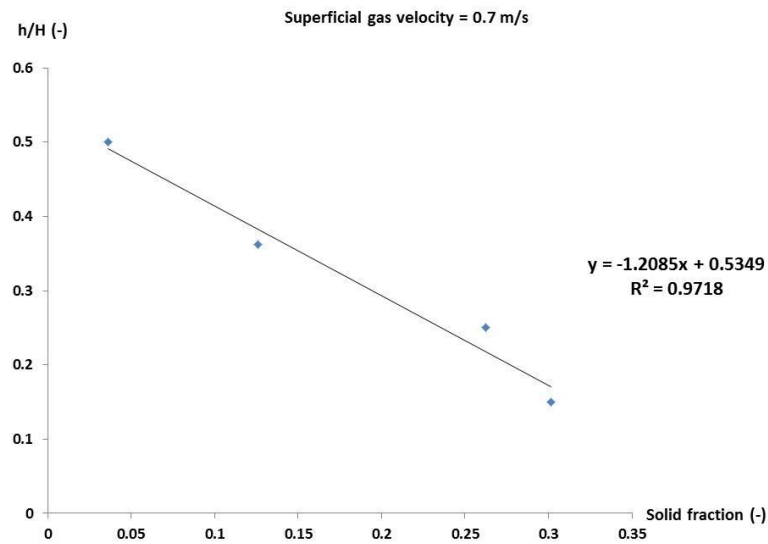


รูปที่ ค.5 ฮิสโตแกรมของความเร็วอนุภาคที่ตำแหน่ง 1 เซนติเมตรจากผนังไรเซอร์

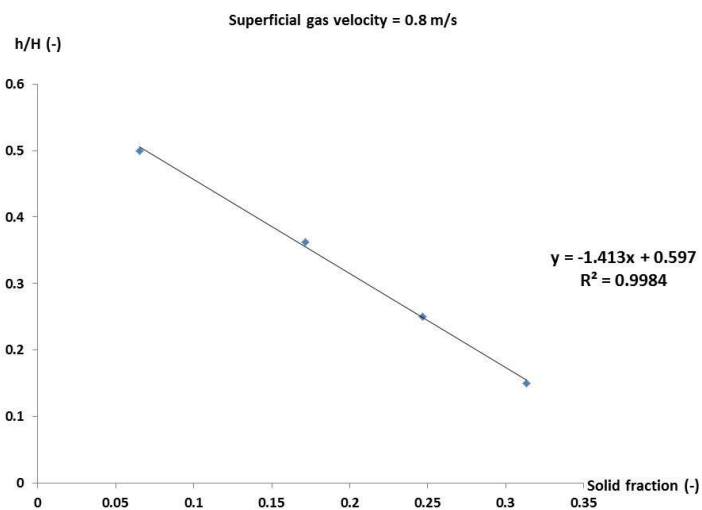
(a) ความเร็วในแนวระดับและ (b)ความเร็วในแนวตั้ง

ภาคผนวก ง

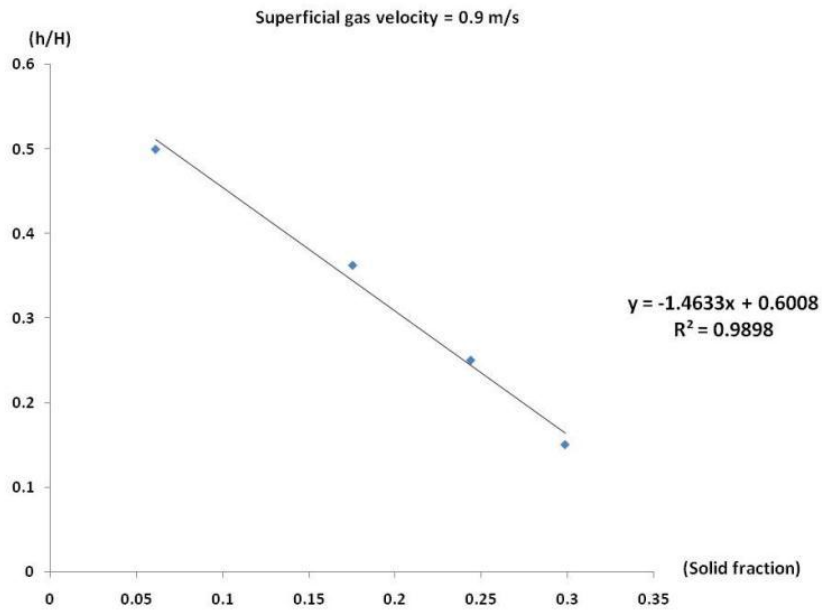
ความสูงของเบตในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน



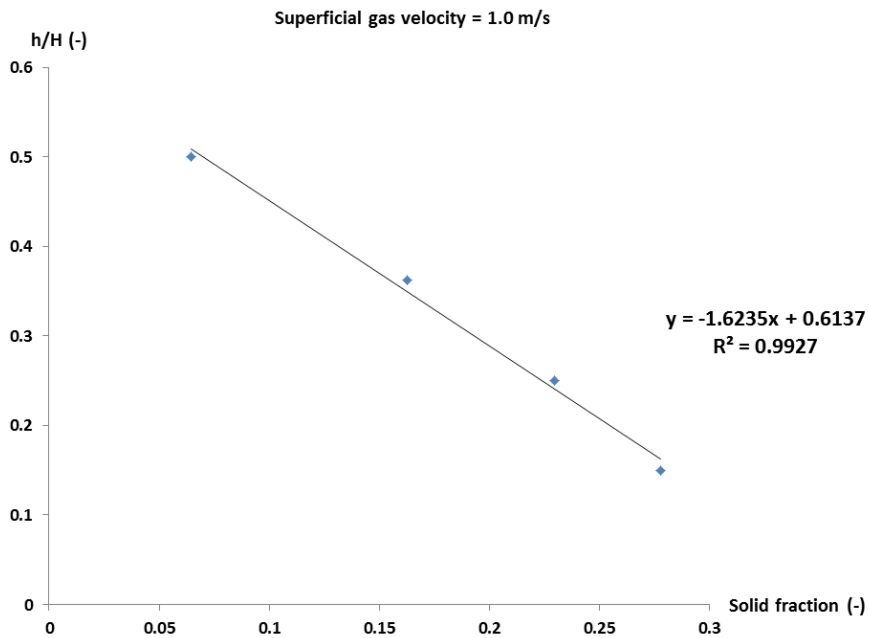
รูปที่ ง.1 ความสูงของเบตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตรต่อวินาที



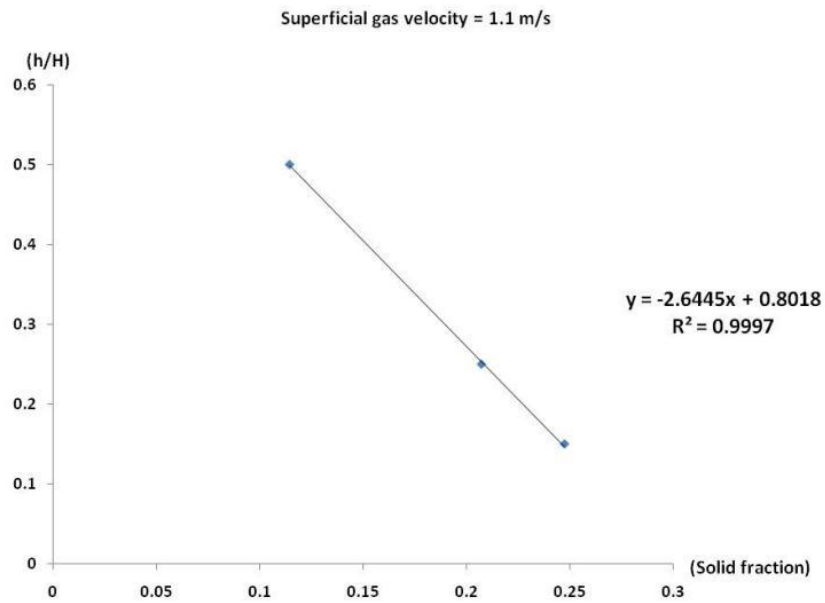
รูปที่ ง.2 ความสูงของเบตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.8 เมตรต่อวินาที



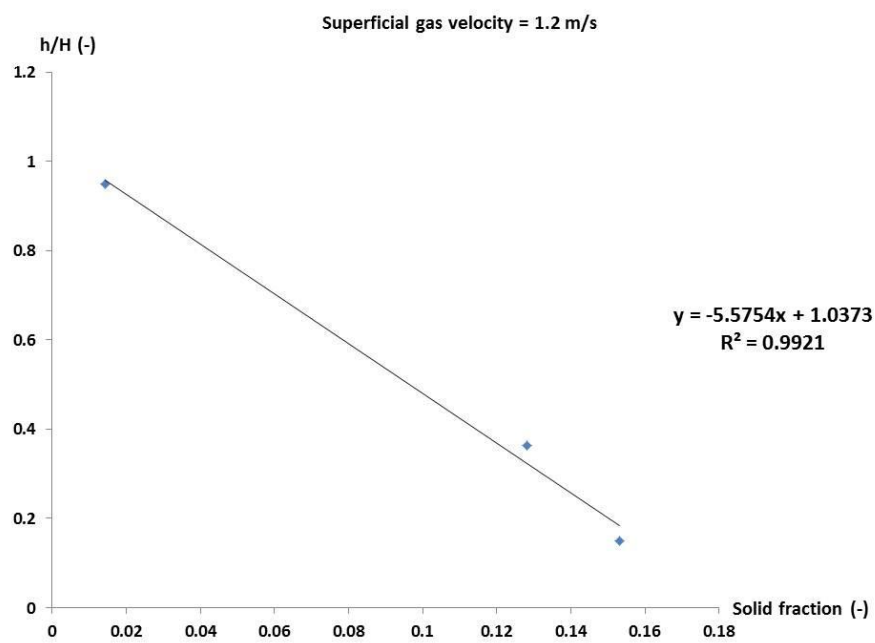
รูปที่ ง.3 ความสูงของเบตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.9 เมตร ต่อวินาที



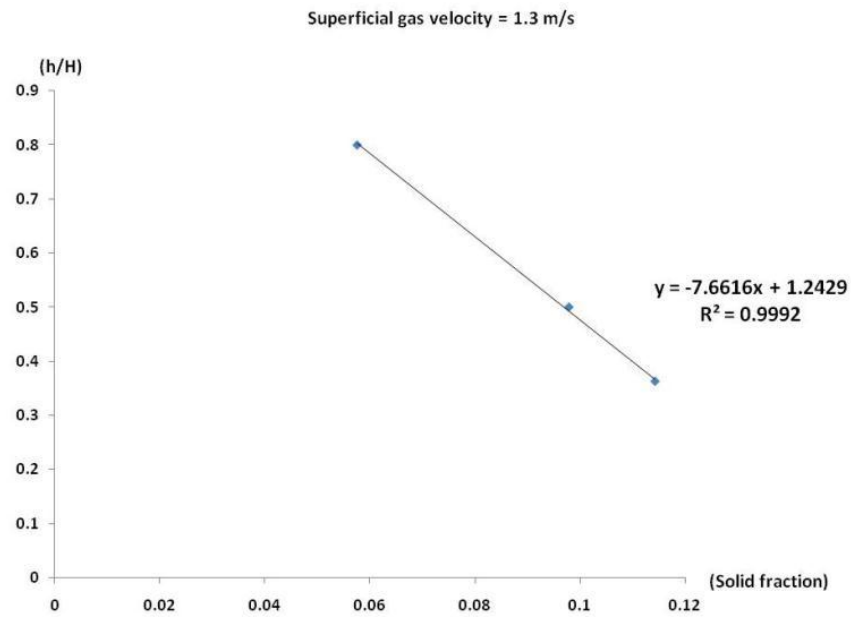
รูปที่ ง.4 ความสูงของเบตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.0 เมตร ต่อวินาที



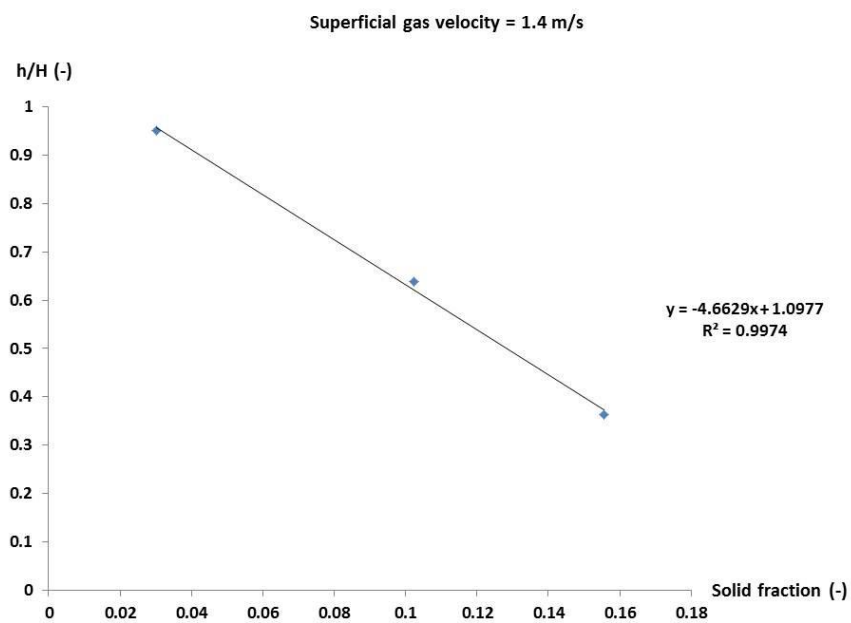
รูปที่ ง.5 ความสูงของเบดทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตร ต่อวินาที



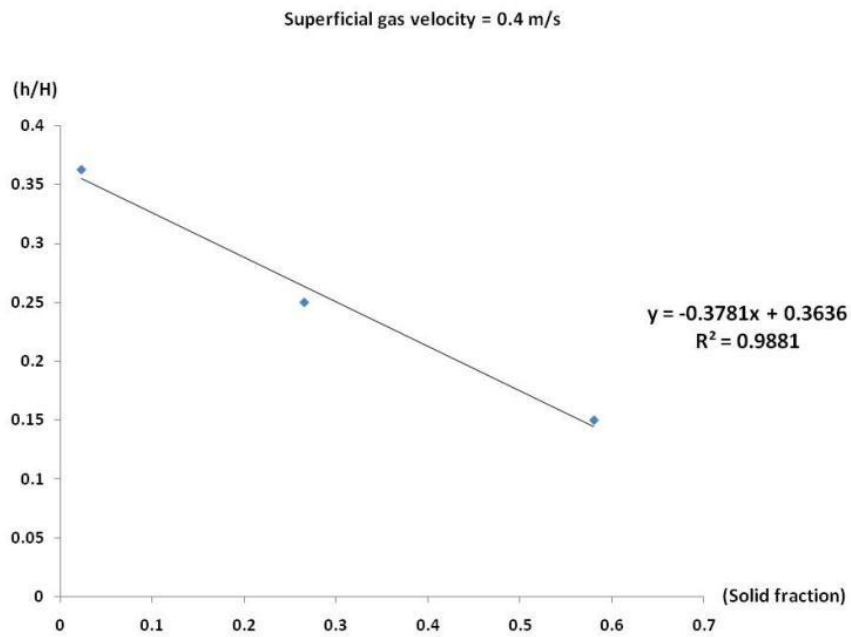
รูปที่ ง.6 ความสูงของเบดทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตร ต่อวินาที



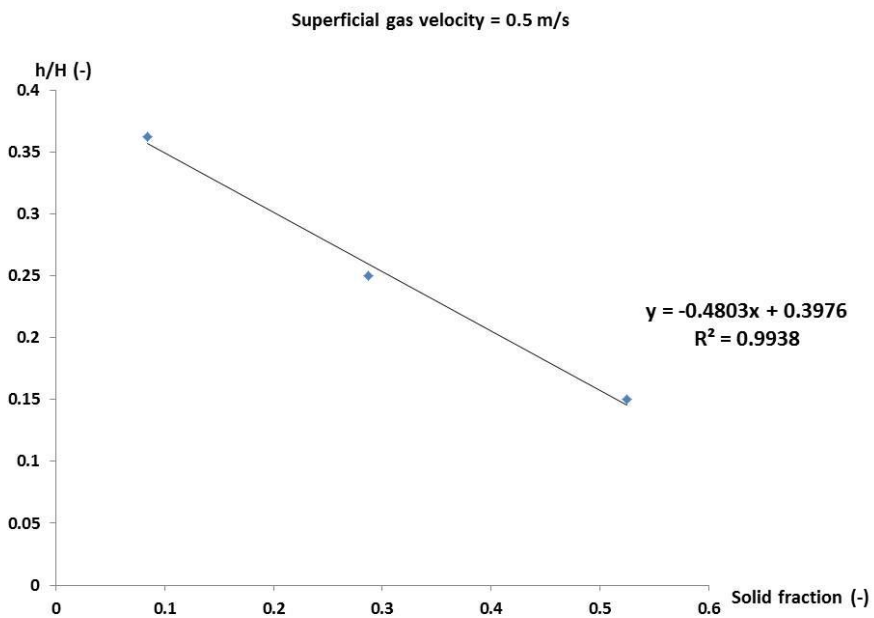
รูปที่ ง.7 ความสูงของเบดทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.3 เมตร ต่อวินาที



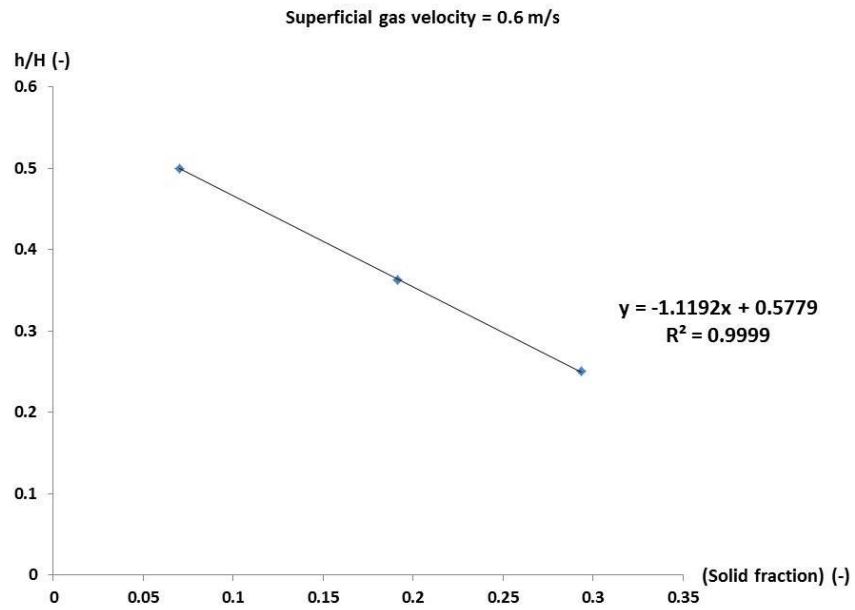
รูปที่ ง.8 ความสูงของเบดทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 260 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.4 เมตร ต่อวินาที



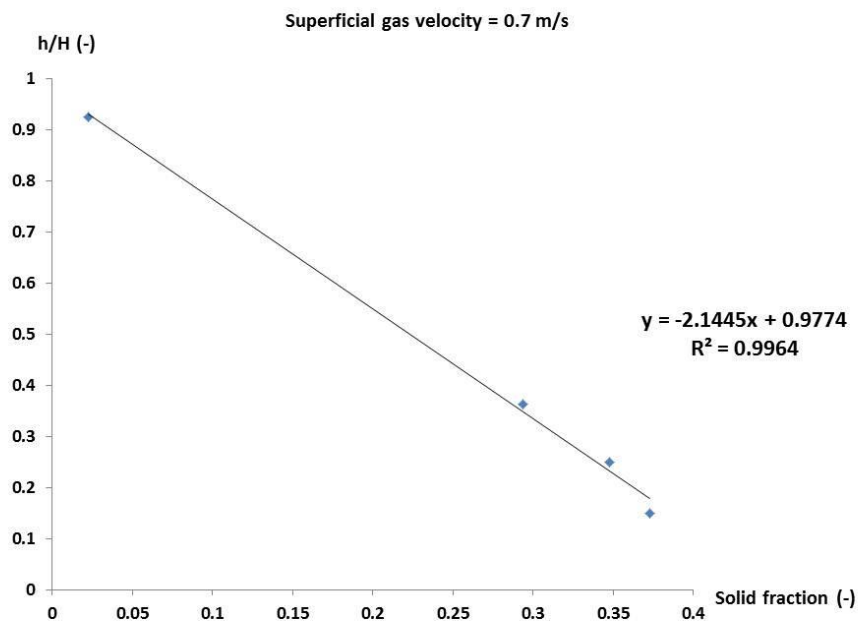
รูปที่ ง.9 ความสูงของเบดทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.4 เมตร ต่อวินาที



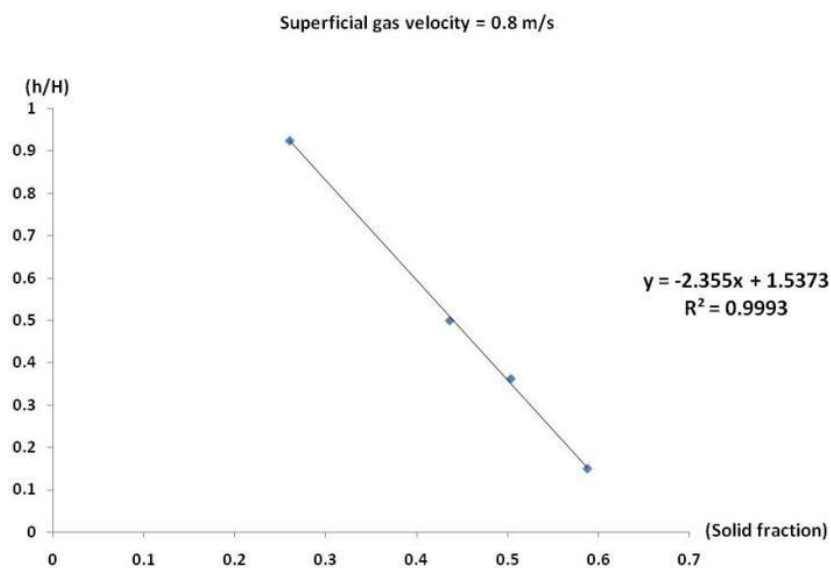
รูปที่ ง.10 ความสูงของเบดทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.5 เมตร ต่อวินาที



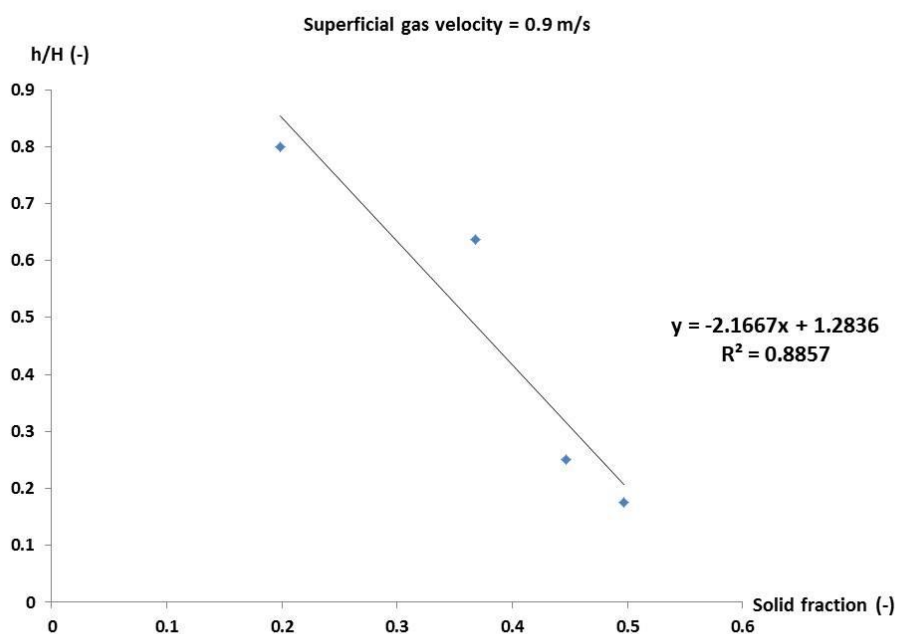
รูปที่ ง.11 ความสูงของเขตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.6 เมตร ต่อวินาที



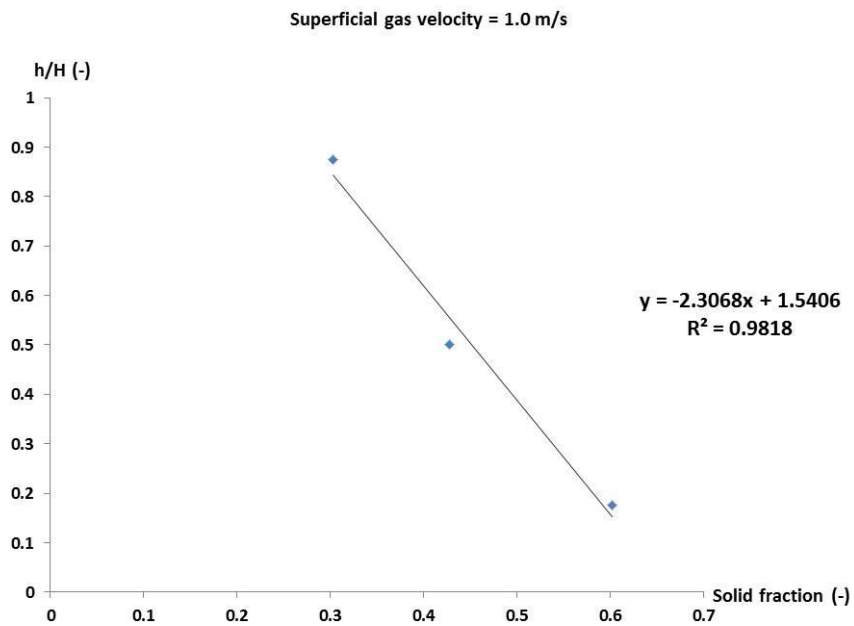
รูปที่ ง.12 ความสูงของเขตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตร ต่อวินาที



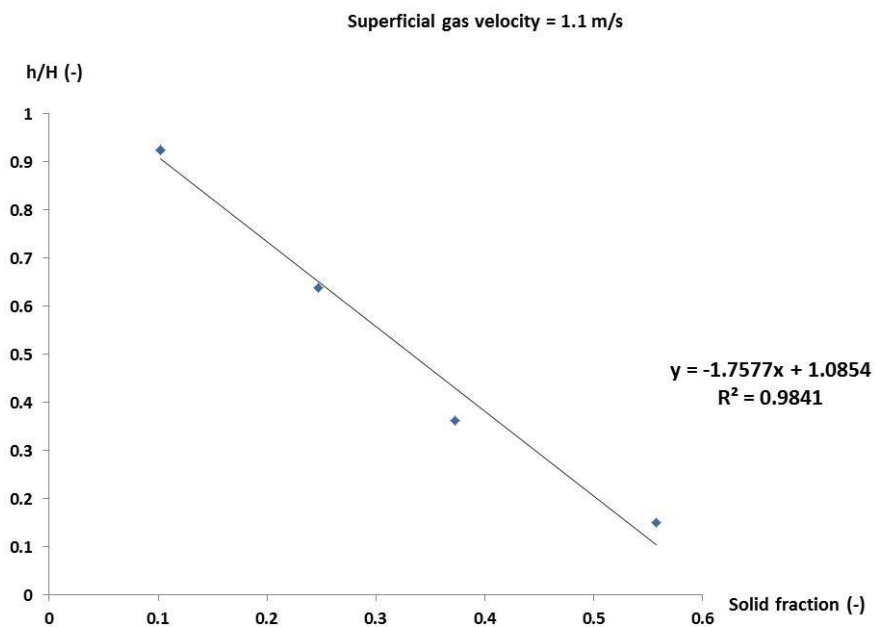
รูปที่ 13 ความสูงของเขตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.8 เมตร ต่อวินาที



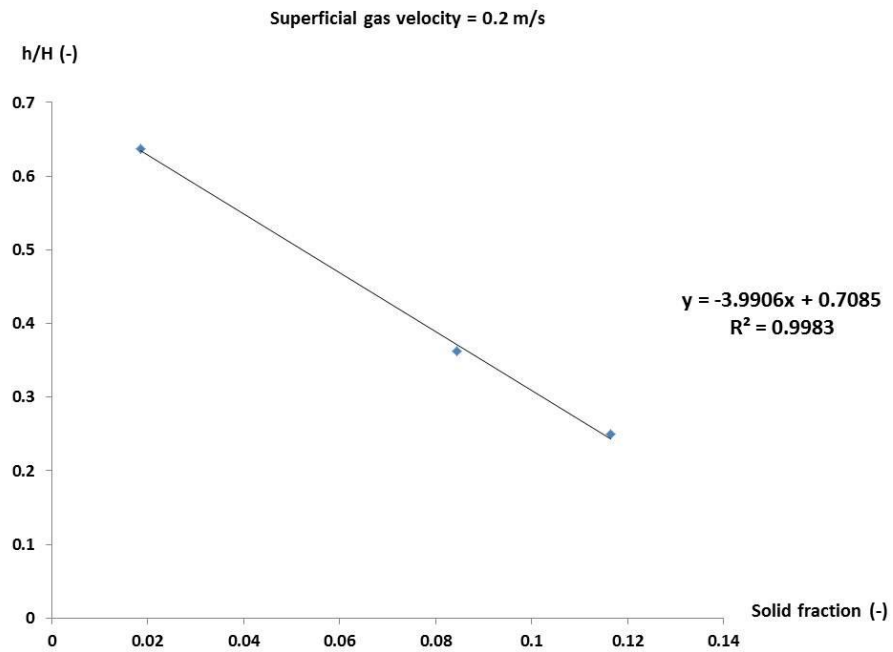
รูปที่ 14 ความสูงของเขตทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.9 เมตร ต่อวินาที



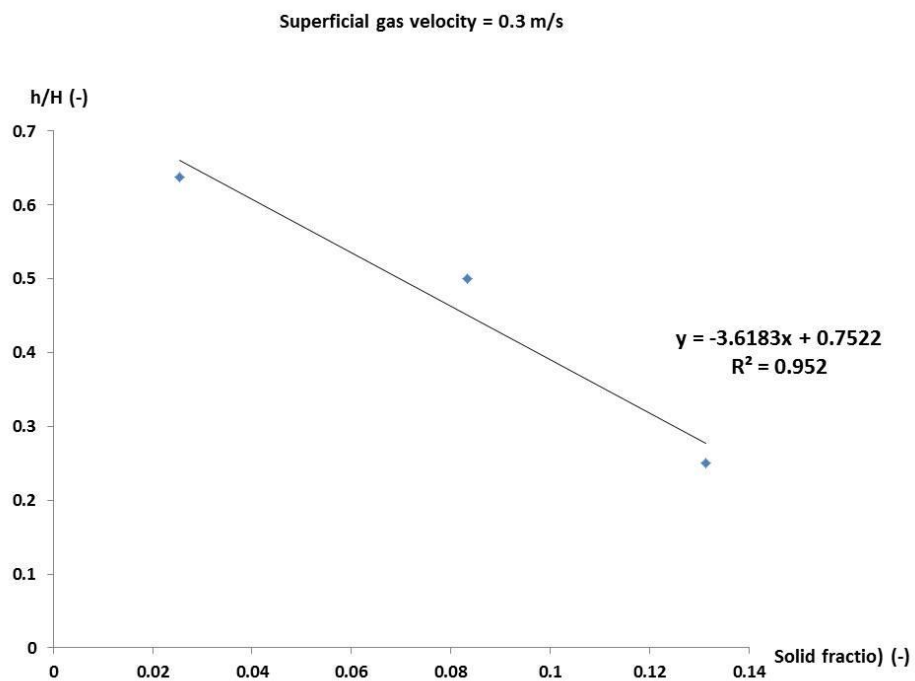
รูปที่ ง.15 ความสูงของเบดทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.0 เมตร ต่อวินาที



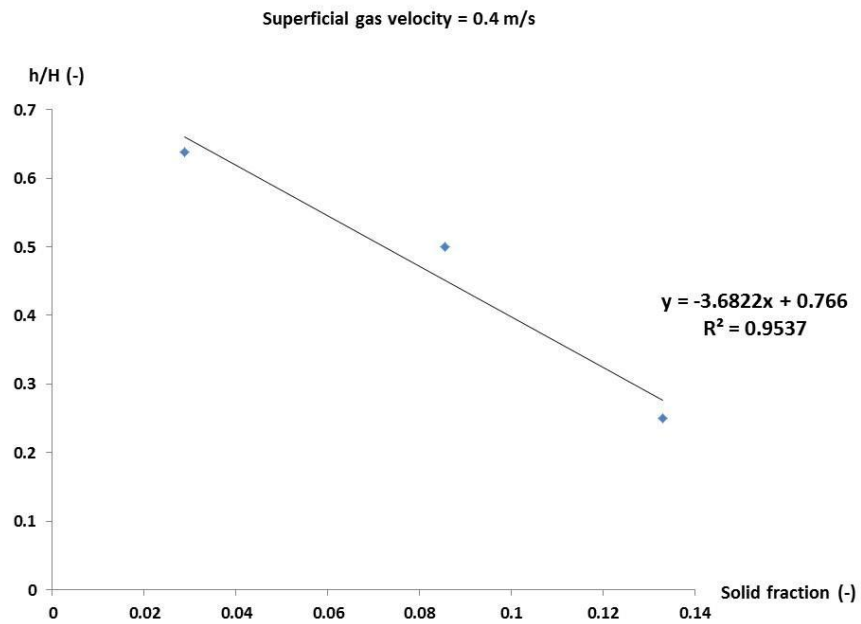
รูปที่ ง.16 ความสูงของเบดทรายขนาดอนุภาคเฉลี่ย 126 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตร ต่อวินาที



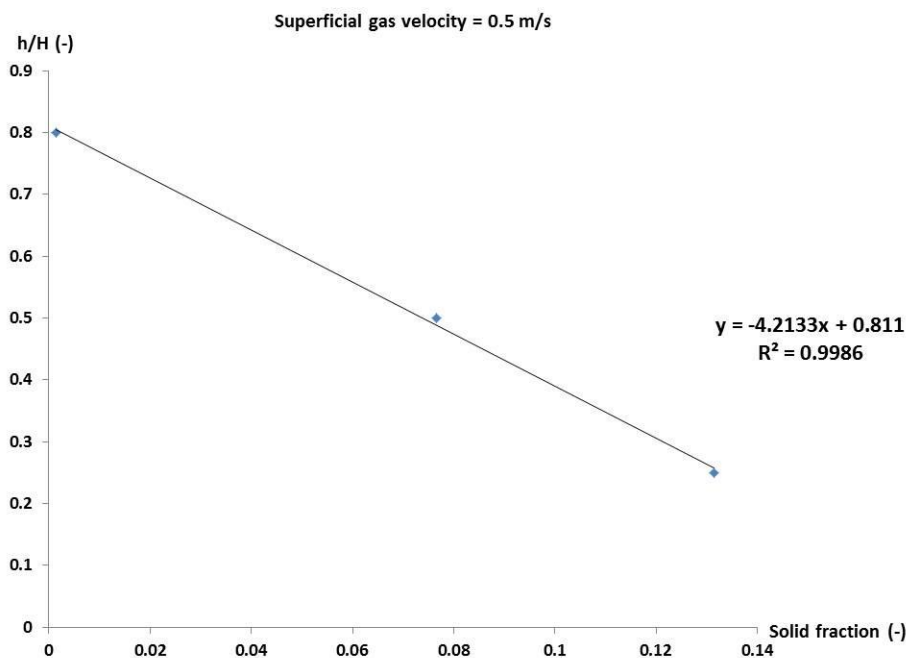
รูปที่ ง.17 ความสูงของเบดฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.2 เมตร ต่อวินาที



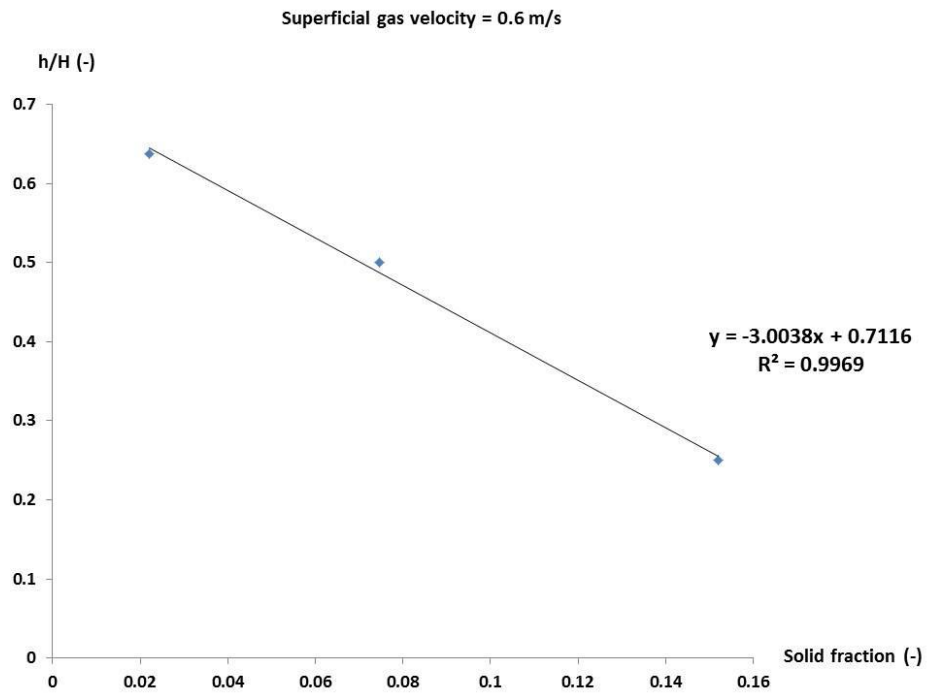
รูปที่ ง.18 ความสูงของเบดฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.3 เมตร ต่อวินาที



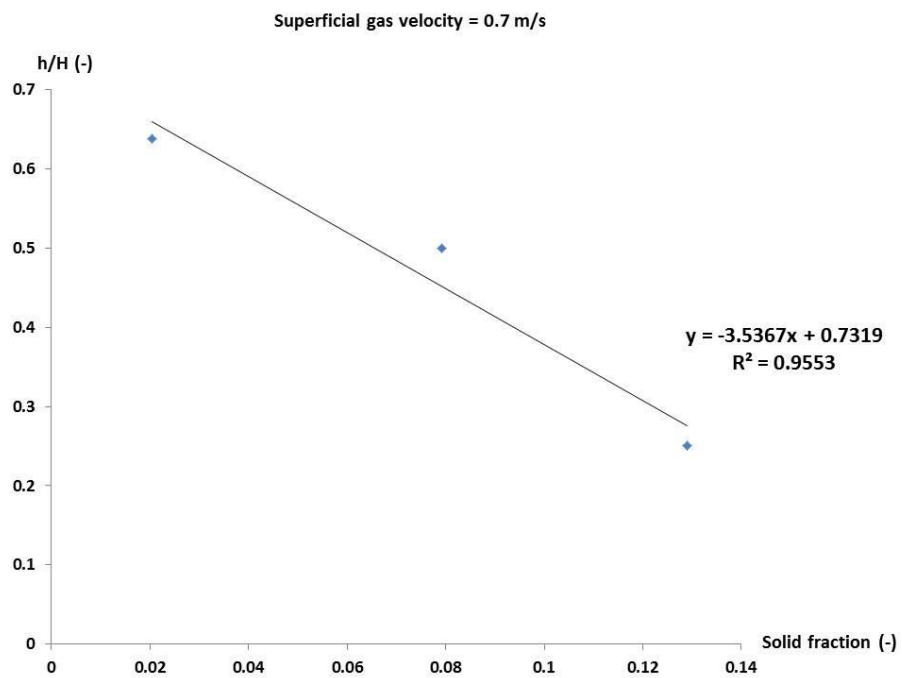
รูปที่ ง.19 ความสูงของเบตพิวซีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.4 เมตร ต่อวินาที



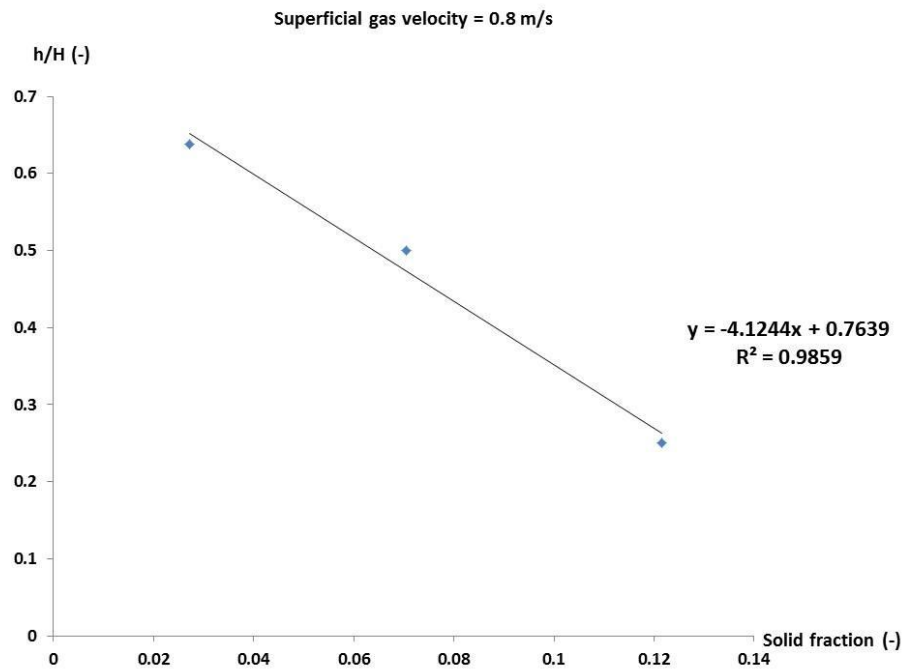
รูปที่ ง.20 ความสูงของเบตพิวซีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.5 เมตร ต่อวินาที



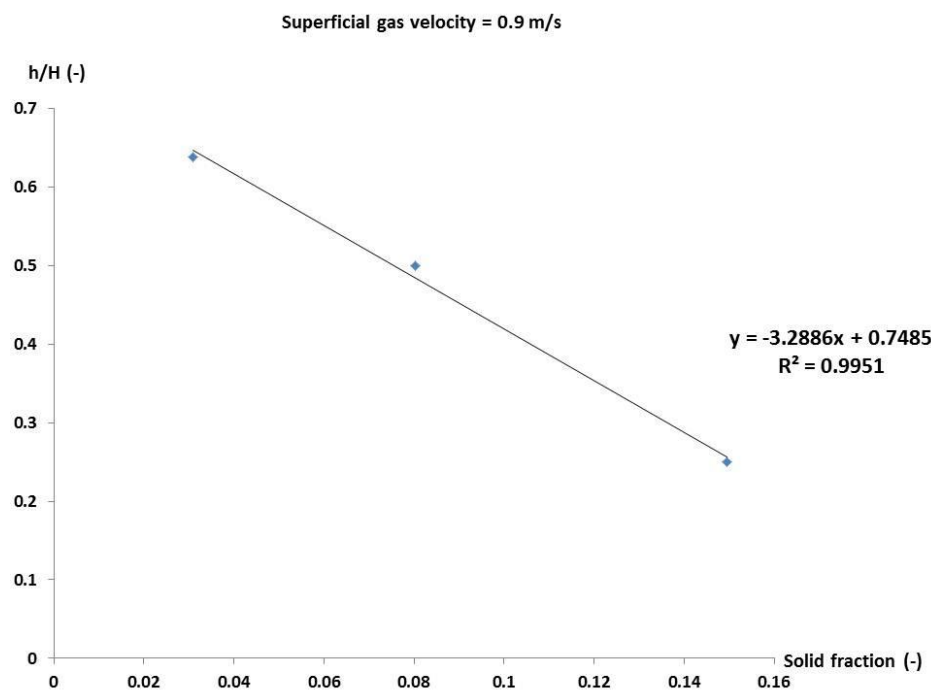
รูปที่ ง.21 ความสูงของเบดฟลูอิซที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.6 เมตร ต่อวินาที



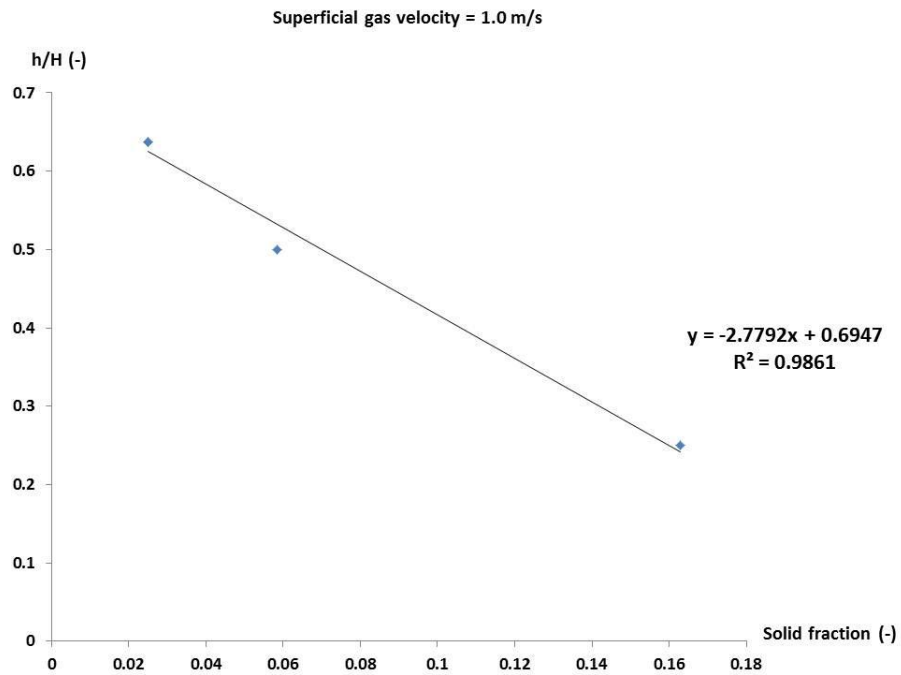
รูปที่ ง.22 ความสูงของเบดฟลูอิซที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.7 เมตร ต่อวินาที



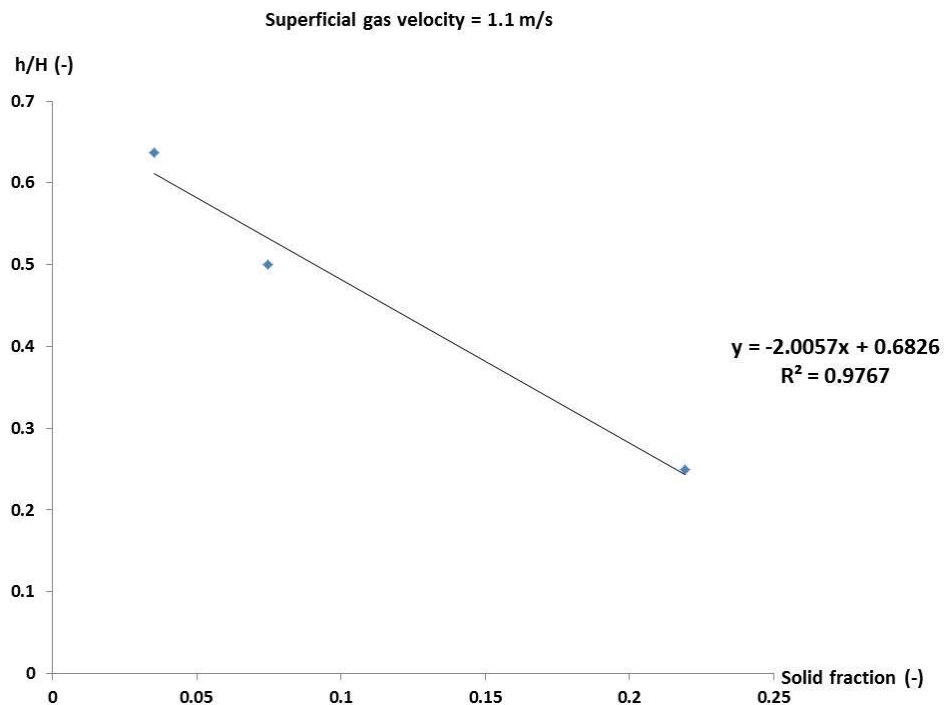
รูปที่ ง.23 ความสูงของเบดฟลูอิ์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.8 เมตรต่อวินาที



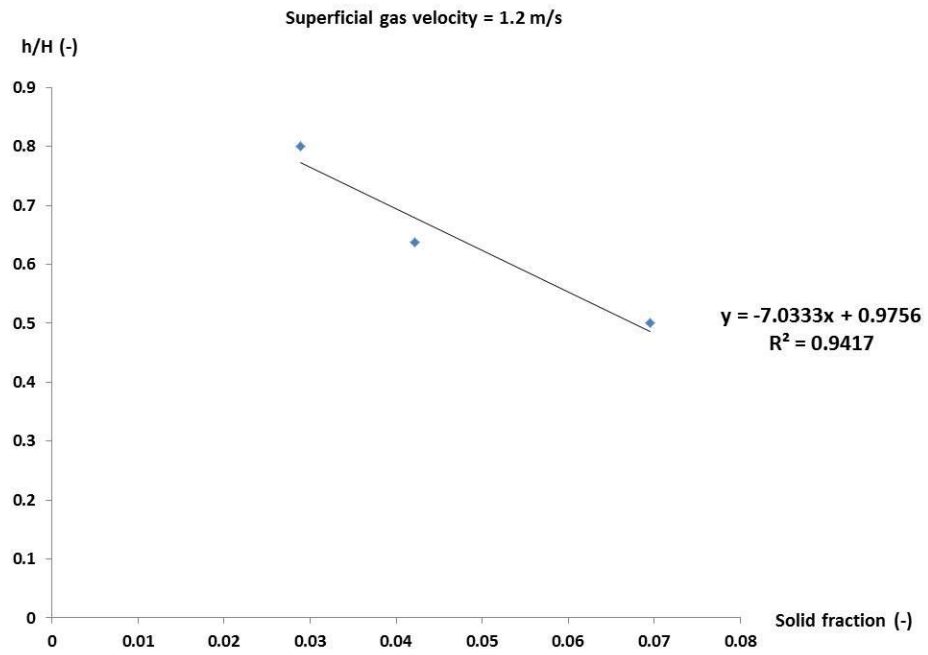
รูปที่ ง.24 ความสูงของเบดฟลูอิ์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 0.9 เมตรต่อวินาที



รูปที่ ง.25 ความสูงของเบดฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.0 เมตร ต่อวินาที



รูปที่ ง.26 ความสูงของเบดฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.1 เมตร ต่อวินาที



รูปที่ 27 ความสูงของเบดฟิวส์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 161 ไมครอนที่ความเร็วของอากาศ 1.2 เมตร ต่อวินาที

ภาคผนวก จ

ข้อมูลความสูงของเบดในงานวิจัยอื่น

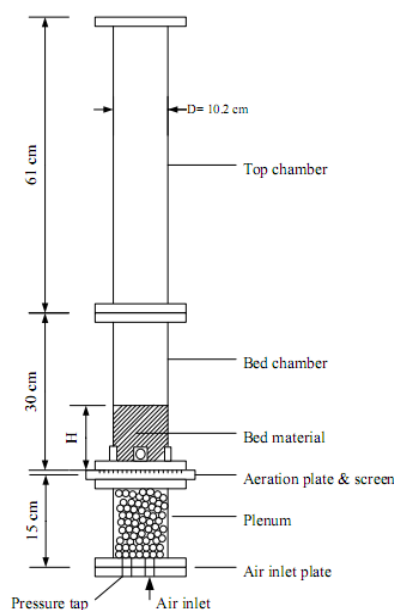
1. Escudero [29]

อนุภาคแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เม็ดแก้วที่มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1 ข เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแก้วที่ใช้ คือ 550 ไมครอน ซึ่งมีตัวเลขไร้หน่วยอาร์คิมิดีสเท่ากับ 12560

ตารางที่ จ.1 สมบัติของแข็งเม็ดแก้ว

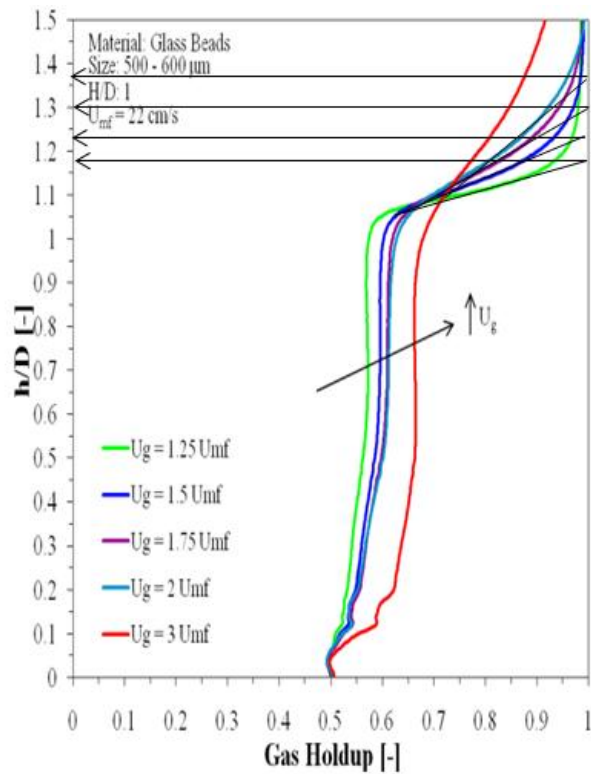
	Glass Beads				
Bed Height (cm)	5.1	10.2	15.3	20.4	30.6
H/D	0.5	1	1.5	2	3
Diameter (μm)	500-600	500-600	500-600	500-600	500-600
Bed Weight (g)	590	1180	1775	2440	3640
Bulk Density (kg/m^3)	1410 ± 30	1410 ± 30	1420 ± 30	1465 ± 30	1455 ± 30
Particle Density (kg/m^3)	2600	2600	2600	2600	2600

โดยที่อากาศที่อุณหภูมิห้องถูกป้อนเข้าสู่สัมผัสกับของแข็งที่ถูกรวบรวมในคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่รูปที่ จ.1



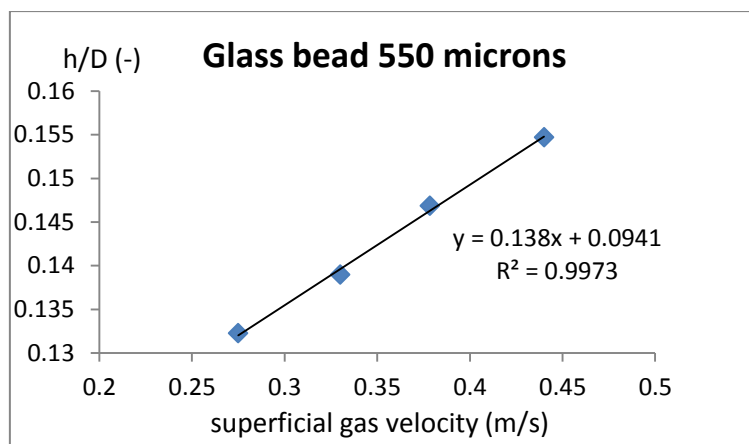
รูปที่ จ.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยของ Escudero

รูปที่ ๑.2 แสดงกราฟระหว่างสัดส่วนของที่ว่างตลอดแนวความสูงของคอลัมน์ โดยที่ความสูงเบด คือ ตำแหน่งที่เส้นแนวโน้มของสัดส่วนที่ว่างมีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ ๑.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของที่ว่างตลอดแนวความสูงของคอลัมน์

เมื่อนำสูงของเบดที่ความเร็วของอากาศค่าต่างๆ มาสร้างเป็นกราฟ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเบดมีความสัมพันธ์เชิงเส้นเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ ๑.3



รูปที่ ๑.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบดเม็ดแก้วกับความเร็ของอากาศ

จากรูปที่ ๑.3 จะทำให้ได้สมการแสดงอัตราการขยายตัวของเบดดังแสดงในสมการ (1๑) และเมื่อแทนค่า $D = 0.91$ เซนติเมตรในสมการ (1๑) จะได้สมการ (4.6) ที่นำไปใช้หาสมการทั่วไปที่แสดงความสามารถในการขยายตัวของอนุภาคแต่ละชนิด

$$\frac{h}{D} = 0.155U_g + 0.1057 \quad (1๑)$$

$$h = 0.12555U_g + 0.08517 \quad (4.6)$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย สุทธิชัย บุญประสพ เกิดเมื่อวันอาทิตย์ที่ 22 มกราคม 2532 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม สายวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2555