



ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่นในฟลูอิดไคซ์เบคสามัญภาค  
ของของผสมของอนุภาคสองชนิด

นายไพโรจน์ ชูเกียรติสกุลกาล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันในฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาค  
ของของผสมของอนุภาคสองชนิด

นายไพโรจน์ ชูเกียรติสกุลกาล วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... (รศ.ดร.สุวิทย์ เตีย)	ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
..... (รศ.ดร.สุภาภรณ์ ตักกลาส)	กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
..... (รศ.ดร.สุวิศา พงษ์อำไพ)	กรรมการ
..... (รศ.ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์)	กรรมการ
..... (ผศ.ดร.อุบลรัตน์ สิริภัทรารวม)	กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิด ไคเซชันในฟลูอิด ไคซ์เบคสามวัฏภาค  
ของของผสมของอนุภาคสองชนิด

นายไพโรจน์ ชูเกียรติสกุลกาล วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



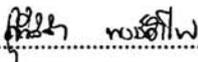
(รศ.ดร.สุวิทย์ เตีย)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์



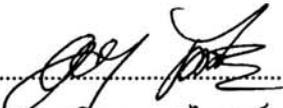
(รศ.ดร.สุภาภรณ์ คักกลาส)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์



(รศ.ดร.สุวิस्ता พงษ์อำไพ)

กรรมการ



(รศ.ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์)

กรรมการ



(ผศ.ดร.อุบลรัตน์ สิริภัทราวรณ)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันในฟลูอิดไคซ์เบด สามวัฏภาคของของผสมของอนุภาคสองชนิด
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายไพโรจน์ ชูเกียรติสกุลกาล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.สุภาภรณ์ ตี๋กกลาง
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันภายในฟลูอิดไคซ์เบดสามวัฏภาคในระบบของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเร็วก๊าซ สัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง และอัตราส่วนขนาดอนุภาค และหาความสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชัน ทำการทดลองโดยใช้เม็ดแก้วซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 750 และ 3,000 ไมโครเมตร และทรายซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1,440 ไมโครเมตร ในสัดส่วนผสมโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็กเท่ากับ 0.125, 0.5 และ 0.875 ความเร็วของก๊าซที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0 ถึง 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที และความเร็วของเหลวอยู่ในช่วง 0 ถึง 4.88 เซนติเมตรต่อวินาที จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันมีค่าลดลงในช่วงที่ความเร็วก๊าซมีค่าต่ำแต่มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงที่ความเร็วก๊าซมีค่าสูง และพบว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่าต่ำ และมีค่าคงที่เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของขนาดอนุภาคมีผลน้อยมากต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่าต่ำ แต่เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กมีค่าสูงพบว่าระบบของผสมที่มีอัตราส่วนของขนาดอนุภาคต่ำมีความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสูงกว่าสมการสหสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf 1}} = \left[ \frac{U_{mf 2}}{U_{mf 1}} \right]^{x_2^{11.87}}$$

คำสำคัญ : ฟลูอิดไคซ์เบดสามวัฏภาค / ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชัน

Thesis Title	Minimum Fluidization Velocity in a Three-Phase Fluidized Bed of a Binary Mixture of Particles
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Piroat Chukiatsakulkarn
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Supaporn Douglas
Program	Master of Engineering
Field of Study	Chemical Engineering
Department	Chemical Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2549

### Abstract

The effect of gas velocity, weight fraction of particles and the diameter ratio of particles on the minimum fluidization velocity was investigated in a three phase fluidized bed containing a binary mixture of particles. Correlations for calculating the minimum fluidization velocity of binary solid mixtures were evaluated and compared. Particles with different diameters but nearly similar density including 750 and 3,000  $\mu\text{m}$  glass beads and 1,440  $\mu\text{m}$  sand were employed in the experiments. For each binary mixture, three different average compositions, corresponding to the averaged weight fraction of small particles of 0.125, 0.5 and 0.875 in the bed were prepared. The measurements were performed with gas velocities in the range of 0 – 7.84 cm/s and liquid velocities in the range of 0 - 4.88 cm/s. From the experiments, it was found that the minimum fluidization velocity decreased rapidly with increasing gas velocity. However, small reductions in the minimum fluidization velocity were observed at higher gas velocities. The minimum fluidization velocity fell rapidly at low weight fraction of small particle but almost constant minimum fluidization velocity was observed at high weight fraction of small particles. The effect of size ratio on minimum fluidization velocity was not observed at low weight fraction of small particles. It was found that a system of particles with a small size ratio had a higher minimum fluidization velocity. The correlation for calculating the minimum fluidization velocity of binary solid mixtures in a three phase fluidized bed was shown as following,

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf 1}} = \left[ \frac{U_{mf 2}}{U_{mf 1}} \right]^{x 2^{11.87}}$$

Keywords : Three Phase Fluidized Bed / Minimum Fluidization Velocity

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้คงไม่สามารถสำเร็จลุล่วงลงได้ถ้าขาดผู้มีพระคุณท่านต่างๆ ผู้วิจัยขอกราบ  
ขอบพระคุณ รศ.ดร.สุภาภรณ์ คี๊กกลาส ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมงานวิจัยที่ให้ความเมตตา ให้  
โอกาส และคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สุวิทย์ เตีย,  
รศ.ดร.สุวิสา พงษ์อำไพ, รศ.ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์ และ ผศ.ดร.อุบลรัตน์ สิริภัทรารวม  
ซึ่งเป็นอาจารย์กรรมการที่ได้ให้ข้อเสนอแนะและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย  
ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ละเอียด เพ็งโสภา และ คุณวิวัช ชิมประดิษฐ์ ที่ได้ให้การ  
สนับสนุนและช่วยเหลือในการทำการทดลอง ขอขอบคุณ พี่ฐนกร บรรจงละเอียด ที่ให้ความ  
ช่วยเหลือติดต่อประสานงานกับคณะพลังงานในการเช็คเครื่อง Recorder ขอขอบคุณ พี่ ภาณุ  
มงคลจรศิลป์ และพี่ ปวีณ ชัยวัฒน์เสฏฐ์ ที่ให้คำแนะนำในการศึกษาการทดลอง สุดท้ายนี้  
ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และพี่สาว ที่เป็นกำลังใจให้สามารถฟันฝ่าอุปสรรคจนงาน  
นี้สำเร็จได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
รายการตาราง	ฅ
รายการรูปประกอบ	ฉุ
รายการสัญลักษณ์	๓
<b>บทที่</b>	
<b>1. บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	7
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	7
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
<b>2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>8</b>
2.1 ฟลูอิดไดเซชัน(Fluidization)	8
2.1.1 ระบบอนุภาคเดี่ยว	8
2.1.2 ระบบอนุภาคผสม	11
2.2 อุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดไดซ์เบด	15
2.2.1 Distributor Region	16
2.2.2 Bulk-fluidized bed region	16
2.2.3 Freeboard region	16
2.3 ลักษณะการไหล	17
2.3.1 Coalesced bubble flow regime	17
2.3.2 Dispersed bubble flow regime	18
2.3.3 Slugging regime	18

2.4	อนุภาคของแข็ง	18
2.4.1	อนุภาคกลุ่ม A	18
2.4.2	อนุภาคกลุ่ม B	19
2.4.3	อนุภาคกลุ่ม C	19
2.4.4	อนุภาคกลุ่ม D	19
<b>3.</b>	<b>วิธีการทดลอง/ระเบียบวิธีวิจัย</b>	<b>21</b>
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์	21
3.2	วัสดุและสารเคมี	21
3.3	หอพลูอิดไดซ์	21
3.4	วิธีการทดลอง	22
3.4.1	ผลของความเร็วก๊าซและสัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง	23
3.4.2	ผลของอัตราส่วนขนาดอนุภาค	23
3.4.3	การศึกษาสหสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันในระบบอนุภาคผสม	23
3.5	การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน	24
<b>4.</b>	<b>ผลการทดลองและวิจารณ์ผล</b>	<b>26</b>
4.1	ผลของความเร็วก๊าซที่มีต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน	26
4.2	ผลของสัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน	27
4.3	ผลของอัตราส่วนขนาดอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน	28
4.4	การทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันของผสมของอนุภาค สองชนิด(Binary mixture)	30
<b>5.</b>	<b>สรุปผลการทดลอง</b>	<b>36</b>
5.1	สรุปผลการทดลอง	36
5.2	ข้อเสนอแนะ	36
	<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>37</b>
	<b>ภาคผนวก</b>	<b>40</b>
ก	ค่าความดันตกคร่อมและค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน	41
ข	กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลว	48

ค	ตัวอย่างการคำนวณความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน	68
ง	การเชื่อมต่อสาย RS-232C ระหว่างเครื่องบันทึกข้อมูลกับเครื่องคอมพิวเตอร์ และผลการสอบเทียบเครื่องวัดความดัน(pressure transducer)	70
	<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	73

รายการตาราง

ตาราง	หน้า	
3.1	แผนดำเนินการทดลอง	24
4.1	สมการสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสมสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไอเซชันเบดสามวัฏภาค ( $U_{mf}$ )	31
4.2	ค่า $U_{mf1}$ และ $U_{mf2}$ จากการทดลองและจากการคำนวณ	33
ก.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่ความเร็วก๊าซค่าต่างๆ สำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:SN1440 ที่สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125	42
ก.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่ความเร็วก๊าซค่าต่างๆ สำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:SN1440 ที่สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.5	43
ก.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่ความเร็วก๊าซค่าต่างๆ สำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:SN1440 ที่สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.875	44
ก.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวสำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:GB750 ที่สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) ค่าต่างๆ ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที	45
ก.5	ความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาค GB3000:SN1440 และ GB3000:GB750 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที	46
ก.6	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันที่ได้จากการทดลองสำหรับอนุภาค GB3000:SN1440 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0, 0.94, 1.93, 3.93, 5.88 และ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที	46
ก.7	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์ที่ใช้ข้อมูลของการทดลองสำหรับอนุภาค GB3000:SN1440 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0, 0.94, 1.93, 3.93, 5.88 และ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที	47
ก.8	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์ที่ใช้ข้อมูลของการคำนวณสำหรับอนุภาค GB3000:SN1440 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0, 0.94, 1.93, 3.93, 5.88 และ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที	47

ง.1 ผลการสอบเทียบเครื่อง Pressure transducer

72

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ของความดันตกและความเร็วของไหล	9
2.2	ผลของสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็งที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของไหล(A) การผสมกันอย่างทั่วถึง, (B) การผสมกันบางส่วน,(C) การแยกชั้น	12
2.3	ลักษณะสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็งที่ขึ้นกับความเร็วของไหลและสัดส่วนผสมของอนุภาค	13
2.4	ฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคแบบการไหลทางเดียว (cocurrent upward)	16
2.5	ลักษณะการไหลในฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาค	17
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความหนาแน่นของของแข็งและก๊าซกับขนาดของอนุภาคของแข็ง	20
3.1	ชุดอุปกรณ์การทดลอง	22
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เซชันกับความเร็วก๊าซสำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:SN1440	26
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เซชันกับสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) สำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:SN1440	27
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เซชันกับสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กสำหรับระบบอนุภาคผสมที่มีอัตราส่วนขนาดอนุภาคต่างกัน	29
4.4	เปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เซชันที่ได้สัมพันธ์ที่ใช้ข้อมูลจากการทดลองและสัมพันธ์ที่ใช้ข้อมูลจากการคำนวณที่ความเร็วก๊าซค่าต่างๆ ก. 0.94 cm/s ข. 1.93 cm/s ค. 3.93 cm/s ง. 5.88 cm/s จ. 7.84 cm/s	34
ข.1	กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วน โดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0 เซนติเมตรต่อวินาที	49
ข.2	กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วน โดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0.94 เซนติเมตรต่อวินาที	49
ข.3	กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วน โดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 1.93 เซนติเมตรต่อวินาที	50
ข.4	กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วน โดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที	50





### รายการสัญลักษณ์

$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ [ตารางเมตร]
$Ar_g$	=	Archimedes Number ในสถานะของแข็ง-ก๊าซ
$Ar_l$	=	Archimedes Number ในสถานะของแข็ง-ของเหลว
$C$	=	ค่าคงที่ในสมการที่ (2.8)
$D_p$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลม [เซนติเมตร]
$D_T$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ [เซนติเมตร]
$d_b$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ [เซนติเมตร]
$d_e$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของอนุภาค [เซนติเมตร]
$d_F$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีความเร็วต่ำสุด ฟลูอิดไดเซชันต่ำกว่า [เซนติเมตร]
$d_i$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค $i$ [เซนติเมตร]
$d_p$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีความเร็วต่ำสุด ฟลูอิดไดเซชันสูงกว่า [เซนติเมตร]
$d_s$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก [เซนติเมตร]
$\bar{d}$	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค [เซนติเมตร]
$g$	=	ค่าความเร่งโน้มถ่วงเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก [นิวตันต่อกิโลกรัม]
$H$	=	ระยะทางหรือความสูงของเบด [เมตร]
$L_{mf}$	=	ความสูงของเบดขณะเริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน [เมตร]
$\Delta p$	=	ความดันตกในพื้นที่ภาคตัดขวางของเบด [ปาสคาล]
$Re$	=	Renolds number [-]
$Re_{lmf}$	=	Renolds number ที่สถานะเริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชันในสถานะของแข็ง-ของเหลว-ก๊าซ [-]
$Re_{mf}$	=	Renolds number ที่สถานะเริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชันในสถานะของแข็ง-ก๊าซ [-]
$Re_{mfo}$	=	Renolds number ที่สถานะเริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชันในสถานะของแข็ง-ของเหลว [-]
$U_g$	=	ความเร็วของก๊าซ [เซนติเมตรต่อวินาที]
$U_{gmf}$	=	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันเบดในสถานะของแข็ง-ก๊าซ [เซนติเมตรต่อวินาที]
$U_l$	=	ความเร็วของของเหลว [เซนติเมตรต่อวินาที]
$U_{lmf}$	=	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันเบดสำหรับอนุภาคเดี่ยว ในสถานะของแข็ง-ของเหลว-ก๊าซ [เซนติเมตรต่อวินาที]
$U_{mf}$	=	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม [เซนติเมตรต่อวินาที]
$U_{mfi}$	=	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาค $i$ [เซนติเมตรต่อวินาที]

$U_{mfo}$	=	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคเซชันในสภาวะของแข็ง-ของเหลว [เซนติเมตรต่อวินาที]
$U_{mf1}$	=	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก [เซนติเมตรต่อวินาที]
$U_{mf2}$	=	ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ [เซนติเมตรต่อวินาที]
$W$	=	น้ำหนักของอนุภาคของแข็ง [กิโลกรัม]
$X_1$	=	สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคขนาดเล็ก [-]
$X_2$	=	สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคขนาดใหญ่ [-]
$x_1$	=	สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก [-]
$x_2$	=	สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่ [-]
$x_i$	=	สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาค $i$ [-]

### ตัวอักษรกรีก

$\alpha_{mf}$	=	สัดส่วนของก๊าซ ต่อ สัดส่วนของของไหล(ของเหลวและของแข็ง) ที่สภาวะเริ่มเกิดฟลูอิดไคเซชัน [-]
$\mathcal{E}$	=	สัดส่วนช่องว่างของเบด [-]
$\mathcal{E}_1$	=	สัดส่วนของของเหลว [-]
$\mathcal{E}_g$	=	สัดส่วนของก๊าซ [-]
$\mathcal{E}_s$	=	สัดส่วนของแข็ง [-]
$\mathcal{E}_{mf}$	=	สัดส่วนช่องว่างของเบดที่สภาวะเริ่มเกิดฟลูอิดไคเซชัน [-]
$\bar{\rho}$	=	ความหนาแน่นเฉลี่ยของอนุภาค [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร]
$\rho_F$	=	ความหนาแน่นของอนุภาคที่มีความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไคเซชันต่ำกว่า [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร]
$\rho_g$	=	ความหนาแน่นของก๊าซ [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร]
$\rho_i$	=	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็งชนิด $i$ [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร]
$\rho_l$	=	ความหนาแน่นของของเหลว [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร]
$\rho_P$	=	ความหนาแน่นของอนุภาคที่มีค่าความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไคเซชันสูงกว่า [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร]
$\rho_s$	=	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร]
$\phi_s$	=	แฟกเตอร์รูปร่าง

$$\mu_g = \text{ความหนืดของก๊าซ [กิโลกรัม/เมตร-ชั่วโมง]}$$

$$\mu_l = \text{ความหนืดของของเหลว [กิโลกรัม/เมตร-ชั่วโมง]}$$

# บทที่ 1 บทนำ

ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาค (three-phase fluidized beds,TPFB) ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และชีวเคมี เป็นต้น ในการดำเนินการโดยใช้ TPFB ในระบบปฏิบัติการแบบต่อเนื่องนั้น มีอัตราการถ่ายเทความร้อน อัตราการถ่ายเทมวล และอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ทั่วไป ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการสัมผัสกันระหว่างวัฏภาคอย่างทั่วถึง [1] และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่า TPFB มีการกระจายตัวของอนุภาคของแข็งและฟองก๊าซอย่างต่อเนื่องในตัวกลางที่เป็นของเหลว ทำให้คุณลักษณะการไหลและพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งและฟองก๊าซใน TPFB มีความซับซ้อนมาก ดังนั้นการทำความเข้าใจในคุณสมบัติทางอุทกพลศาสตร์ของเบด เช่น สภาวะการผสมของอนุภาคของแข็ง (solid mixing states) ลักษณะการไหลภายในเบด (flow regimes) และพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งและฟองก๊าซ จึงมีความสำคัญต่อการกำหนดสภาวะการปฏิบัติการ (operating condition) และการควบคุมการปฏิบัติการ (operating control ) ของ TPFB เนื่องจากทำให้ผู้ควบคุมการปฏิบัติการสามารถทำนายพฤติกรรมต่างๆในเบดภายใต้สภาวะความเร็วของก๊าซและของเหลวค่าต่างๆได้

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การใช้ฟลูอิดไดซ์เบดในทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและชีวเคมี ได้แก่ กระบวนการโคลไฮโดรจิเนชัน (coal-hydrogenation) และกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (bio-process for waste water treatment) นั้น พบว่าอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่ มักมีขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ ของแข็งในกระบวนการดังกล่าวอาจเป็นของผสมของอนุภาคของแข็งชนิดเดียวกันแต่มีขนาดต่างกัน หรือของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด ซึ่งทำให้พฤติกรรมต่างๆภายในเบดแตกต่างกันไปจากระบบที่อนุภาคของแข็งมีขนาดหรือความหนาแน่นเท่ากัน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบดนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ความเร็วก๊าซ ความเร็วของเหลว ชนิดของอนุภาคของแข็ง และสัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นภายในเบด ได้แก่ การเกิดลำ (jetting) ของก๊าซและของเหลวที่พุ่งผ่านตัวกระจายก๊าซ การเกิดฟองก๊าซ (bubbling) ส่งผลให้เกิดสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็ง (solid mixing states) ในรูปแบบต่างๆ เช่น การแยกชั้น (complete segregation) , การผสมกันบางส่วน (partial intermixing) หรือการผสมกันอย่างทั่วถึง (complete intermixing) ทำให้ได้ลักษณะของกราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วยของเหลว ต่างกันซึ่งส่งผลต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เบด [2][3][4][5][6][7]

งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่นั้นทำการศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไคซ์เบดสองวัฏภาคระบบอากาศ-ของแข็ง โดยพบว่า เมื่ออนุภาคในคอลัมน์เป็นระบบของผสมระหว่างอนุภาคขนาดเล็กกับอนุภาคขนาดใหญ่แล้วสามารถลดความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันได้ ทั้งนี้สำหรับการศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันของของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไคซ์เบดสามวัฏภาค นั้นพบว่างานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาโดยใช้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ขนาดอนุภาคที่ศึกษาอยู่ในช่วง 3,000 ถึง 6,000 ไมโครเมตร [7] โดยสำหรับอนุภาคขนาดเล็กในช่วงอนุภาคขนาดต่ำกว่า 3,000 ไมโครเมตรยังไม่ค่อยมีการศึกษากันอย่างจริงจัง ประกอบกับในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟลูอิดไคซ์เบดสามวัฏภาค (three-phase fluidized beds, TPFB) ในการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้สูงขึ้นกับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และชีวเคมีอย่างกว้างขวาง ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันในฟลูอิดไคซ์เบดสามวัฏภาคของของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิดโดยใช้อนุภาคที่มีขนาดเล็กและไม่ทำปฏิกิริยา (inert solids) เพื่อนำผลการศึกษานี้ไปประยุกต์ใช้กับฟลูอิดไคซ์เบดเชิงอุตสาหกรรมในอนาคตต่อไป

## 1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fan และคณะ [7] ศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันของของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไคซ์เบดสามวัฏภาค ทำการทดลองโดยใช้อนุภาคที่มีความแตกต่างทั้งชนิดและขนาด ขนาดอนุภาคที่ศึกษาอยู่ในช่วง 3,000 ถึง 6,000 ไมโครเมตร มีอัตราส่วนระหว่างขนาดอนุภาคใหญ่ต่อเล็ก ( $d_b / d_s$ ) เท่ากับ 1.09 ถึง 2.00 อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคหนักต่อเบา ( $\rho_p / \rho_F$ ) เท่ากับ 1.02 ถึง 1.70 ใช้สัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง 3 ค่า คือ 0.25, 0.5 และ 0.75 ความเร็วก๊าซที่ศึกษาอยู่ในช่วง 0 ถึง 20.3 เซนติเมตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่ากราฟระหว่างความดันตกกับความเร็วยของเหลวที่แต่ละสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็ง (solid mixing states) มีลักษณะแตกต่างกันและถ้าสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็งเป็นแบบแยกชั้น (complete segregation) หรือ ผสมกันบางส่วน (partial intermixing) แล้วพบว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันที่หาได้จากกรณีการเพิ่มความเร็วยของเหลว (ascending liquid velocity) มีค่าแตกต่างจากกรณีการลดความเร็วยของเหลว (decreasing liquid velocity) โดยพบว่าสหสัมพันธ์ดังสมการที่ (1.1) สามารถทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันจากการทดลองได้อย่างแม่นยำ

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf1}} = \left[ \frac{U_{mf2}}{U_{mf1}} \right]^{x_2^{1.69}} \quad (1.1)$$

- เมื่อ  $U_{mf}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม [เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $U_{mf1}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก [เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $U_{mf2}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ [เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $x_2$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่

Cheung และคณะ [8] ศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไอเซชันแบบสองวัฏภาคระบบอากาศ-ของแข็ง ทำการทดลองโดยใช้อนุภาคชนิดเดียวกันแต่ขนาดต่างกัน อนุภาคที่ใช้ ได้แก่ ผงแก้ว (powdered glass), เม็ดทองบรอนซ์ (spherical bronze) และ เม็ดน้ำตาล (sugar balls) ขนาดอนุภาคที่ศึกษาอยู่ในช่วง 96 ถึง 1,305 ไมโครเมตร มีอัตราส่วนระหว่างขนาดอนุภาคใหญ่ต่อเล็ก ( $d_b / d_s$ ) เท่ากับ 1.18 ถึง 6.7 จากการทดลองพบว่า เมื่ออนุภาคในคอลัมน์เป็นระบบของผสมระหว่างอนุภาคขนาดเล็กกับอนุภาคขนาดใหญ่แล้ว ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันมีค่าน้อยกว่าระบบที่มีแต่อนุภาคขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียวโดยพบว่า ถึงแม้ว่าสัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กมีค่าน้อยแต่สามารถลดความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งถ้าอนุภาคทั้งสองมีขนาดต่างกันมากแล้ว จะเกิดการแยกชั้น จากข้อมูลการทดลองพบว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) ขึ้นกับความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ ( $U_{mf2}$ ) และอนุภาคขนาดเล็ก ( $U_{mf1}$ ) กับสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่ ( $x_2$ ) ดังสมการที่ (1.2)

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf1}} = \left[ \frac{U_{mf2}}{U_{mf1}} \right]^{x_2^2} \quad (1.2)$$

โดยสหสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันจากการทดลองได้อย่างแม่นยำโดยมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) เท่ากับ  $\pm 0.07$  ทั้งนี้ สำหรับระบบของผสมที่มีอัตราส่วนระหว่างขนาดอนุภาคใหญ่ต่อเล็ก ( $d_b / d_s$ ) มากกว่า 3.3 นั้นพบว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันที่ทำนายได้มีค่ามากกว่าค่าจากการทดลอง

Noda และคณะ [9] ศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไอเซชันแบบสองวัฏภาคระบบอากาศ-ของแข็ง ทำการทดลองโดยใช้อนุภาคที่มีความแตกต่างทั้งชนิดและขนาด มีอัตราส่วนระหว่างขนาดอนุภาคใหญ่ต่อเล็ก ( $d_b / d_s$ ) เท่ากับ 1.43 ถึง 27.5 อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคหนักต่อเบา ( $\rho_P / \rho_F$ ) เท่ากับ 1 ถึง 5.95 จากการทดลองพบว่า ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันไม่ขึ้นกับความสูงของเบด (H) เมื่อ

ความสูงของเบดมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ ( $D_T$ ) โดยพบว่า สหสัมพันธ์ดังสมการที่ (1.3) สามารถทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันจากการทดลองได้อย่างแม่นยำ

$$Ar = A Re_{mf}^2 + B Re_{mf} \quad (1.3)$$

เมื่อ  $Re_{mf} = \frac{\rho_g U_{mf} D_p}{\mu_g} \quad (1.4)$

$$Ar = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (1.5)$$

และ  $A = 36.2 \left( \frac{d_p \rho_F}{d_F \rho_P} \right)^{-0.196} \quad (1.6)$

$$B = 1397 \left( \frac{d_p \rho_F}{d_F \rho_P} \right)^{0.296} ; \text{การผสมกันอย่างทั่วถึง (complete intermixing)} \quad (1.7)$$

$$B = 6443 \left( \frac{d_p \rho_F}{d_F \rho_P} \right)^{-1.86} ; \text{การผสมกันบางส่วน (partial intermixing)} \quad (1.8)$$

เมื่อ  $U_{mf}$  = ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันของระบบอนุภาคผสม [เซนติเมตรต่อวินาที]

$g$  = ค่าความเร่งโน้มถ่วงเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก [นิวตันต่อกิโลกรัม]

$\mu_g$  = ความหนืดของก๊าซ [กรัม/เซนติเมตร-วินาที]

$D_p$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคทรงกลม [เซนติเมตร]

$\rho_g$  = ความหนาแน่นของก๊าซ [กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร]

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง [กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร]

$d_p$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสูงกว่า [เซนติเมตร]

$d_F$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่มีความเร็วต่ำสุด  
ของฟลูอิดไอเซชันต่ำกว่า [เซนติเมตร]

ทั้งนี้พบว่าในกรณีของการผสมกันบางส่วน มีช่วงการใช้งาน คือ  $\frac{d_P}{d_F} > 3$  และ  $\frac{\rho_P}{\rho_F} \approx 1$

Chyang และคณะ [10] ศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไอเซชันแบบสองวัฏภาคระบบอากาศ-ของแข็ง พร้อมทั้งนำเสนอสมการจากงานวิจัยต่าง ๆ มาทำนายและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่าสมการที่สามารถทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคสองชนิดได้อย่างแม่นยำ คือ Wen-Yu-Cheung กล่าวคือ ควรใช้สมการของ Cheung และคณะ [8] ในการหาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคสองชนิด และใช้สมการของ Wen และ Yu [11] ในการหาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาคเดี่ยว

Formisani [12] ศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไอเซชันแบบสองวัฏภาคระบบอากาศ-ของแข็ง ทำการทดลองโดยใช้เม็ดแก้วที่มีขนาดแตกต่างกัน 5 ขนาด ใช้สัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง 4 ค่า คือ 0.2, 0.4, 0.6, และ 0.8 มีอัตราส่วนระหว่างขนาดอนุภาคใหญ่ต่อเล็ก ( $d_b/d_s$ ) เท่ากับ 1.4 ถึง 2.79 จากการทดลองพบว่าการลดลงอย่างรวดเร็วของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันที่สัดส่วนผสมโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็กมีค่าน้อยนั้นเป็นผลมาจากการลดลงของสัดส่วนช่องว่าง ( $\varepsilon$ ) และจากการเปรียบเทียบผลการทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันระหว่างสมการของ Carman [13] กับ Cheung และคณะ [8] พบว่าสมการทั้งสองสามารถทำนายผลการทดลองได้อย่างแม่นยำ

Delebarre และคณะ [14] ศึกษาการผสมตามแนวแกน (axial mixing) และความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคของแข็งที่มีการกระจาย (dispersed) ทั้งขนาดและความหนาแน่นในฟลูอิดไอเซชันแบบสองวัฏภาคระบบอากาศ-ของแข็ง พบว่า การกระจายของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันตามความสูงของเบด (distribution of the minimum fluidization value along the vertical axis of the bed) สามารถอธิบายลักษณะการผสมตามแนวแกนได้ ทั้งนี้ได้นำสมการของ Goosen และคณะ [15] กับ Thonglimp และคณะ [16] มาทำนายและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า สมการของ Goosen และคณะ สามารถทำนายผลการทดลองได้อย่างแม่นยำ

Asif และคณะ [17] ศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไคซ์เบดสองวัฏภาคระบบน้ำ-ของแข็ง ทำการทดลองโดยใช้อนุภาคที่มีความแตกต่างทั้งชนิดและขนาด ขนาดอนุภาคที่ศึกษาอยู่ในช่วง 257 ถึง 2,880 ไมโครเมตร มีอัตราส่วนระหว่างขนาดอนุภาคใหญ่ต่อเล็ก ( $d_b/d_s$ ) เท่ากับ 4.3 ถึง 10.8 พบว่า เมื่ออนุภาคในคอลัมน์เป็นระบบของผสมระหว่างอนุภาคขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นสูง กับ อนุภาคขนาดใหญ่แล้ว สามารถช่วยลดความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันได้ โดยระบบที่มีอัตราส่วนของขนาดอนุภาค ( $d_b/d_s$ ) ต่ำ คือมีค่า 4.3-6.0 นั้น พบว่าแม้ค่าสัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคขนาดใหญ่ ( $X_2$ ) สูงถึง 0.86 แต่ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันของระบบยังคงมีค่าน้อยกว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ ทั้งนี้ได้นำสหสัมพันธ์ของ Cheung และคณะ [8], Ergen [18] และสหสัมพันธ์ที่หาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคสองชนิดจากการหาค่าเฉลี่ยของความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไคเซชันของอนุภาคเดี่ยว ดังสมการที่ (1.9) มาทำนายและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า สหสัมพันธ์ที่หาโดยวิธีการหาค่าเฉลี่ยโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ ( $p$ ) เท่ากับ  $-0.5$  สามารถทำนายผลการทดลองได้อย่างแม่นยำ

$$U_{mf}^P = X_2 U_{mf2}^P + (1 - X_2) U_{mf1}^P \quad (1.9)$$

เมื่อ  $U_{mf}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม [เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $U_{mf1}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก [เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $U_{mf2}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ [เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $X_2$  คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคขนาดใหญ่

Huilin และคณะ [19] ศึกษาปรากฏการณ์การแยกชั้นและความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไคซ์เบดสองวัฏภาคระบบอากาศ-ของแข็ง ทำการทดลองโดยใช้เม็ดแก้วที่มีขนาดแตกต่างกัน 4 ขนาด คือ 1.59, 2.3, 4.26 และ 5.49 มิลลิเมตร ใช้สัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง 3 ค่า คือ 0.3, 0.5 และ 0.7 พบว่า ปรากฏการณ์การแยกชั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้ค่าการกระจายตัวตามแนวความสูงเบดของค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (mean particle diameter distributions along the bed height) และพบว่าเมื่ออนุภาคในคอลัมน์เป็นระบบของผสมระหว่างอนุภาคขนาดเล็กกับอนุภาคขนาดใหญ่แล้วความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันมีค่าน้อยกว่าระบบที่มีแต่อนุภาคขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ได้นำสหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu [11] มาทำนายและเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่า ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าจากการทดลอง

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคระบบของผสมของอนุภาคของแข็งต่างชนิดกัน

1.3.2 สร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคระบบของผสมของอนุภาคของแข็งต่างชนิดกัน

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคจากการเปลี่ยนแปลงของความดันภายในเบด

1.4.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคของผสมของอนุภาคของแข็งต่างชนิดกัน ได้แก่ เม็ดแก้ว และทราย ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเร็วก๊าซ ขนาด และสัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง

1.4.3 สร้างสหสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาค

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงผลของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคในระบบของผสมของอนุภาคของแข็งต่างชนิด

1.5.2 ทราบสหสัมพันธ์เพื่อใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคในระบบของผสมของอนุภาคของแข็งต่างชนิดกัน

1.5.3 เป็นฐานข้อมูลในการควบคุม ออกแบบ พัฒนาและขยายขนาดเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์ในระบบของผสมของอนุภาคของแข็ง

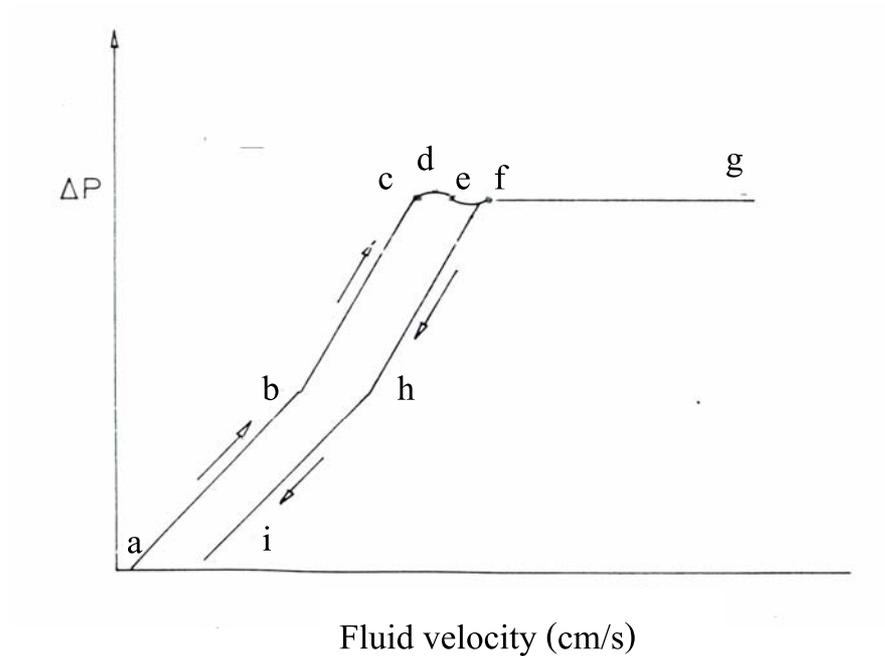
## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ฟลูอิดไลเซชัน (fluidization) เป็นสภาวะที่กลุ่มอนุภาคของแข็งถูกทำให้มีสภาพคล้ายของไหลในกระแสน้ำของของเหลวหรือก๊าซ ขณะที่ของไหลไหลผ่านเบดด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลเซชัน (minimum fluidization velocity,  $U_{mf}$ ) เบดจะอยู่ในสภาวะนิ่ง (fixed bed) แต่เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลจนถึงจุดหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มขยับตัวและบางส่วนจะมีการสั่นและเกิดการเคลื่อนที่ในบริเวณจำกัด สภาวะนี้เรียกว่า เบดขยายตัว (expanded bed) ซึ่งเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลต่อไปจนถึงสภาวะที่น้ำหนักของเบดเท่ากับแรงเสียดทานที่ของไหลกระทำต่ออนุภาคของแข็ง ณ จุดนี้ของแข็งจะเริ่มลอยตัวเป็นอิสระในกระแสน้ำของของเหลวหรือก๊าซ เรียกสภาวะนี้ว่า จุดเริ่มฟลูอิดไลเซชัน (minimum fluidization หรือ incipient fluidization) [26]

### 2.1 ฟลูอิดไลเซชัน (Fluidization)

#### 2.1.1 ระบบอนุภาคเดี่ยว (mono particle system)

เม็ดของแข็งที่บรรจุในเบดนั้นส่วนใหญ่เป็นการบรรจุแบบไม่เป็นระเบียบ (แบบสุ่ม) ซึ่งเมื่อผ่านของไหลที่มีความเร็วต่ำเข้าไปในเบดขณะที่ยังเป็นเบดนิ่ง พบว่าความชันของกราฟความดันตกคร่อมขณะนั้นมีค่าเท่ากับ 1 ดังปรากฏตามเส้น ab (ดังรูปที่ 2.1) และเมื่อเพิ่มความเร็วของไหลให้สูงขึ้น พบว่าความชันของกราฟมีค่าเท่ากับ 2 ซึ่งสอดคล้องกับสมการของ Ergen [18] ดังปรากฏตามเส้น bc ซึ่งที่จุดดังกล่าว ความเร็วของไหลมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไลเซชัน เม็ดของแข็งเริ่มขยับตัวและจัดเรียงตัวให้เป็นระเบียบ ความดันตกคร่อมขณะนั้นมีค่ามากที่สุด คือ จุด cd เมื่อเม็ดของแข็งจัดเรียงตัวเรียบร้อยแล้วความดันตกจะลดลงมาอยู่ที่จุด e ซึ่งต่ำกว่าความดันตกที่จะเกิดฟลูอิดไลเซชัน จากนั้นความดันตกมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยจนถึงจุด f แล้วคงที่ไปจนถึงจุด g เมื่อลดความเร็วของไหลจนถึงจุด f แล้วพบว่าความดันตกยังคงมีค่าคงที่ แต่เมื่อลดความเร็วของไหลให้มึ้นน้อยกว่าที่จุด f แล้ว ความดันตกของเบดมีค่าลดลงปรากฏดังเส้น fh และ hi ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการทดลองใหม่จากเบดเดิมนี้ พบว่ากราฟความดันตกคร่อมปรากฏดังเส้น ih และ hf เหมือนเดิม เนื่องจากเบดที่เปลี่ยนจาก ฟลูอิดไลเซชันเบดเข้าสู่เบดนิ่งนั้นเม็ดของแข็งได้ผ่านการจัดเรียงอนุภาคแล้ว เมื่อทำการทดลองใหม่จึงไม่ต้องเสียพลังงานในการจัดเรียงอนุภาคอีก กราฟความดันตกคร่อมจึงปรากฏดังเส้น ihf ซึ่งที่จุด f นี้เรียกว่า จุดความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไลเซชัน [26]



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของความดันตกและความเร็วของไหล [26]

ในขณะที่เม็ดของแข็งอยู่ในสภาวะจุดเริ่มฟลูอิดไอเซชัน (minimum fluidization หรือ incipient fluidization) พบว่าเม็ดของแข็งอยู่ในสภาวะสมดุลของแรงที่กระทำต่อเม็ดของแข็ง คือแรงที่เกิดจากน้ำหนักของเม็ดของแข็งกับแรงพยุงจากของไหลหรือแรงเสียดทานกับแรงต้านของของไหล

$$\Delta p \cdot A = W = (AL_{mf})(1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g_c}{g} \quad (2.1)$$

เมื่อจัดสมการใหม่ได้

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = (1 - \epsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g) \frac{g_c}{g} \quad (2.2)$$

ทั้งนี้พบว่า สัดส่วนช่องว่างต่ำสุด ( $\epsilon_{mf}$ ) นั้นมีค่ามากกว่าสัดส่วนช่องว่างในสภาวะเบดนิ่งเล็กน้อย เมื่อแทนค่าความดันตกคร่อมขณะเริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชันลงในสมการของ Ergen [18] จะได้

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{\rho_g U_{gmf} D_p}{\mu_g} \right)^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \left( \frac{\rho_g U_{gmf} D_p}{\mu_g} \right) = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\text{Re}_{gmf} = \frac{\rho_g U_{gmf} D_p}{\mu_g}$  (2.4)

และ  $Ar_g = \frac{D_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g^2}$  (2.5)

สมการที่ (2.3) สามารถจัดรูปใหม่เป็น

$$\frac{1.75}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \text{Re}_{gmf}^2 + \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \text{Re}_{gmf} = Ar_g \quad (2.6)$$

สมการที่ (2.6) นั้นใช้กับฟลูอิดไคซ์เบคระบบของแข็ง-ก๊าซ โดยสำหรับการใช้งานในฟลูอิดไคซ์เบคระบบของแข็ง-ของเหลว-ก๊าซ นั้น Zhang และคณะ [28] พบว่ามีรูปแบบดังสมการที่ (2.7)

$$\text{Re}_{lmf} = \left\{ \left[ \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{3.5\phi_s} \right]^2 + \frac{\varepsilon_{mf}^3 (1-\alpha_{mf})^3 Ar_l}{1.75} \right\}^{\frac{1}{2}} - \frac{150(1-\varepsilon_{mf})}{3.5\phi_s} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\alpha_{mf}$  คือ สัดส่วนของก๊าซ ต่อ สัดส่วนของของไหล (ของเหลวและก๊าซ)

$$\alpha_{mf} = \frac{CU_g}{\varepsilon_{mf} (U_g + U_{lmf})} \quad (2.8)$$

โดย  $C = 0.16$  :for non-foaming liquids  
 $C = 0.28$  : for foaming liquids

$$\text{Re}_{lmf} = \frac{D_p U_{lmf} \rho_l}{\mu_l} \quad (2.9)$$

และ  $Ar_l = \frac{D_p^3 \rho_l (\rho_s - \rho_l) g}{\mu_l^2}$  (2.10)

ซึ่งพบว่าในการใช้งานสมการที่ (2.7) นั้นต้องทราบค่าแฟคเตอร์รูปร่าง ( $\phi_s$ ) และค่าสัดส่วนช่องว่างต่ำสุด ( $\varepsilon_{mf}$ ) ทำให้ไม่สะดวกต่อการใช้งาน ทั้งนี้ Wen และ Yu [11] พบว่าผลคูณของค่าสัดส่วนช่องว่างต่ำสุดและแฟคเตอร์รูปร่างมีค่าคงที่ดังสมการ (2.11) และ (2.12)

$$\frac{1}{\phi_s \varepsilon_{mf}^3} \approx 14 \quad (2.11)$$

และ 
$$\frac{1 - \varepsilon_{mf}}{\phi_s^2 \varepsilon_{mf}^3} \approx 11 \quad (2.12)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.7) จัดรูปใหม่เป็น

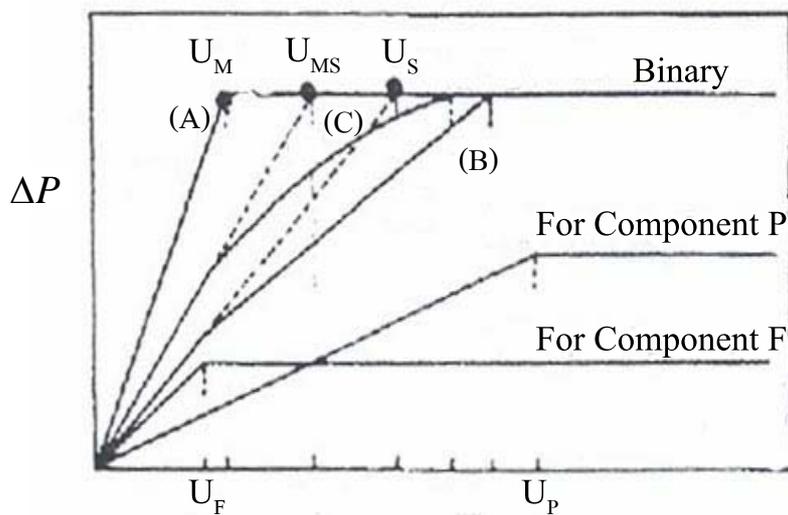
$$\text{Re}_{lmf} = [33.7^2 + 0.0406 Ar_l (1 - \alpha_{mf})^3]^{\frac{1}{2}} - 33.7 \quad (2.13)$$

## 2.1.2 ระบบอนุภาคผสม (mixed particle system)

### 2.1.2.1 สถานะการผสมของอนุภาคของแข็ง (solid mixing state)

ในปัจจุบันการใช้ฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคในทางอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและชีวเคมีนั้น พบว่าอนุภาคของแข็งส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ วัฏภาคของแข็งในกระบวนการดังกล่าวอาจเป็นของผสมของอนุภาคของแข็งชนิดเดียวกันแต่มีขนาดต่างกัน หรือของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด ซึ่งทำให้คุณสมบัติทางอุทกพลศาสตร์ภายในฟลูอิดไดซ์เบดแตกต่างกันไปจากระบบที่อนุภาคของแข็งมีขนาดหรือความหนาแน่นเท่ากัน จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าสถานะการผสมของอนุภาคของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ความเร็วก๊าซ ความเร็วของเหลว ชนิดของอนุภาคของแข็ง และอัตราส่วนในการผสมของอนุภาคของแข็ง เป็นต้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวอาจทำให้เกิด การแยกชั้น (complete segregation) การผสมกันบางส่วน (partial intermixing) หรือ การผสมกันอย่างทั่วถึง (complete intermixing) โดยสำหรับระบบอนุภาคผสมของของแข็งที่มีความแตกต่างกันทั้งขนาด และความหนาแน่น เช่น ระบบอนุภาคผสมของเม็ดอลูมินา (alumina beads) ขนาด 2.2 มิลลิเมตร กับเม็ดแก้ว (glass beads) ขนาด 6 มิลลิเมตร พบว่าอนุภาคของแข็งผสมกันอย่างทั่วถึงเมื่อการไหลเป็นแบบ coalesced bubble และ dispersed bubble และพบเพียงการแยกชั้นของอนุภาคเมื่อการไหลเป็นแบบ slugging [7] ทั้งนี้สำหรับอนุภาคของแข็งชนิดเดียวกันแต่มีขนาดต่างกัน พบว่าเกิดการแยกชั้นอย่างสมบูรณ์ (complete segregation) ที่สถานะ

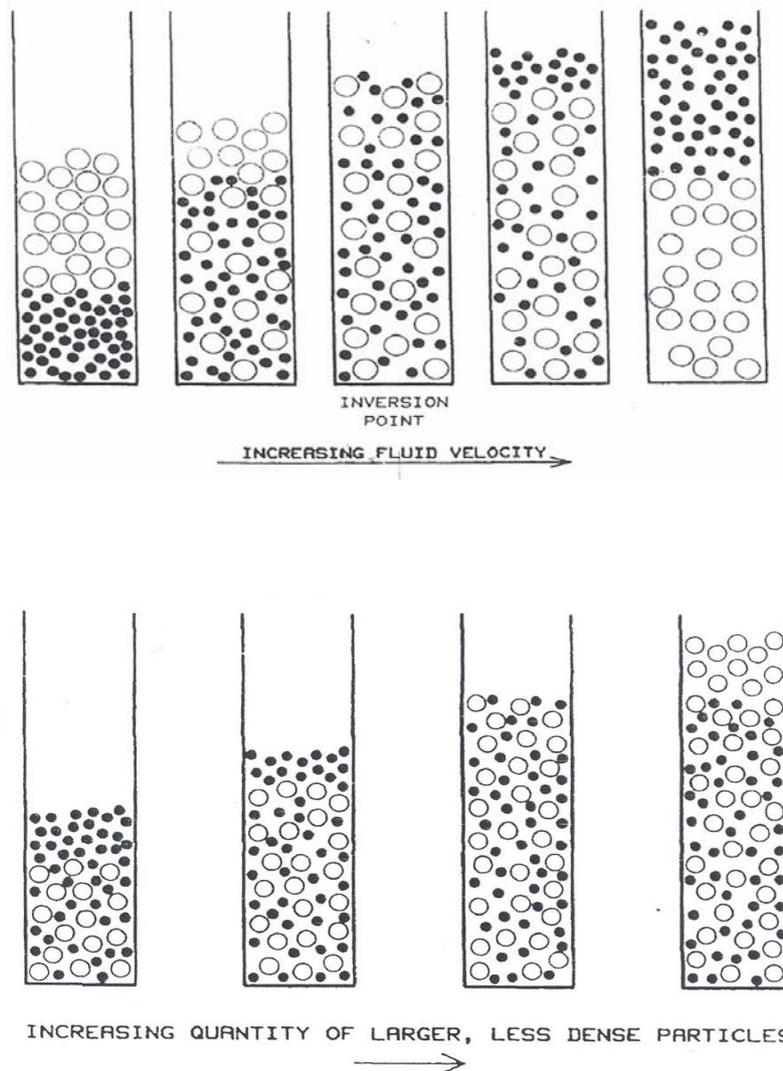
ความเร็วของเหลวสูงแต่ความเร็วของก๊าซต่ำ และเกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง (complete intermixing) ที่สภาวะความเร็วของก๊าซมีค่าสูง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การเพิ่มความเร็วของของเหลวทำให้อนุภาคของของแข็งเกิดการแยกชั้น และการเพิ่มความเร็วของก๊าซทำให้อนุภาคของแข็งเกิดการผสมกัน ทั้งนี้พบว่าอนุภาคของแข็งผสมกันได้น้อยมากเมื่อการไหลเป็นแบบ dispersed bubble และอนุภาคของแข็งจะผสมกันได้เพียงบางส่วนเมื่อการไหลเป็นแบบ dispersed bubble และ transition flow แต่เมื่อการไหลเป็นแบบ coalesced bubble และ slugging พบว่าอนุภาคของแข็งภายในเบดเกิดการผสมกันอย่างทั่วถึง [2] ทั้งนี้ลักษณะกราฟความดันตกกับความเร็วของไหล ที่แต่ละสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็งนั้นจะมีลักษณะแตกต่างกัน โดยค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เซชันสามารถหาได้จากจุดตัดระหว่างเส้นกราฟขณะที่ยังเป็นเบดนิ่ง (packed bed) กับขณะที่เบดเกิดการขยายและแยกตัวเป็นอิสระ (fluidized bed) [9] ดังรูปที่ (2.2)



รูปที่ 2.2 ผลของสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็งที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของไหล (A) การผสมกันอย่างทั่วถึง, (B) การผสมกันบางส่วน, (C) การแยกชั้น [9]

ทั้งนี้สำหรับระบบอนุภาคผสมของของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบดสองวัฏภาค (ของแข็ง-ของเหลว และของแข็ง-ก๊าซ) ที่มีความแตกต่างของขนาดหรือความหนาแน่น นั้น พบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือความหนาแน่นมากจะอยู่บริเวณด้านล่างของคอลัมน์ในบริเวณเหนือตัวกระจายก๊าซ และอนุภาคที่มี

ขนาดเล็กหรือความหนาแน่นน้อยจะอยู่บริเวณด้านบนของคอลัมน์ แต่สำหรับระบบอนุภาคผสมของของแข็งที่มีความแตกต่างกันทั้งขนาดและความหนาแน่น พบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นน้อยจะอยู่บริเวณด้านบนของคอลัมน์ ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และความหนาแน่นมากจะอยู่บริเวณด้านล่างของคอลัมน์ ทั้งนี้สำหรับระบบอนุภาคผสมของของแข็งระหว่างอนุภาคขนาดเล็กและความหนาแน่นมากกับอนุภาคขนาดใหญ่และความหนาแน่นน้อยนั้นพบว่าสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็งนั้นขึ้นกับความเร็วของไหล และสัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง ดังรูปที่ (2.3) เรียกปรากฏดังกล่าวนี้ว่า solid layer inversion [28]



รูปที่ 2.3 ลักษณะสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็งที่ขึ้นกับความเร็วของไหลและสัดส่วนผสมของอนุภาค[28]

### 2.1.2.2 การทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่น

สำหรับการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่นสำหรับระบบอนุภาคผสมของของแข็งสามารถทำได้โดยวิธีการที่ต่างกันอยู่ 2 วิธี คือ

1. การสร้างสหสัมพันธ์โดยตรงจากข้อมูลของการทดลอง โดยในกรณีนี้ค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่นสำหรับระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) เขียนเป็นสมการสหสัมพันธ์ที่ขึ้นกับแฟคเตอร์ 2 ค่า คือ ค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่นของอนุภาคเดี่ยวแต่ละตัว ( $U_{mfi}$ ) และสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่ ( $x_2$ ) เช่น สหสัมพันธ์สำหรับระบบอนุภาคผสมของของแข็งในฟลูอิดไคเซชันแบบสามวัฏภาคที่เสนอโดย Fan และคณะ[7] ดังสมการที่ (2.14) และสหสัมพันธ์สำหรับระบบอนุภาคผสมของของแข็งในฟลูอิดไคเซชันแบบของแข็ง-ก๊าซที่เสนอโดย Cheung และคณะ[8] ดังสมการที่ (2.15)

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf1}} = \left[ \frac{U_{mf2}}{U_{mf1}} \right]^{x_2^{1.69}} \quad (2.14)$$

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf1}} = \left[ \frac{U_{mf2}}{U_{mf1}} \right]^{x_2^2} \quad (2.15)$$

เมื่อ  $U_{mf}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่นสำหรับระบบอนุภาคผสม [เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $U_{mf1}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่นสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก [เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $U_{mf2}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่นสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ [เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $x_2$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่

ซึ่งข้อดีของสหสัมพันธ์ในกรณีนี้คือ มีลักษณะไม่ซับซ้อน แต่ไม่มีความถูกต้องแม่นยำเมื่อนำไปใช้งานกับระบบอื่น ซึ่งความถูกต้องและแม่นยำในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่นสำหรับระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) โดยใช้วิธีนั้นขึ้นอยู่กับค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่นของอนุภาคเดี่ยวแต่ละตัว ( $U_{mfi}$ ) ที่ต้องหามาจากสหสัมพันธ์อื่น ซึ่งในการคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชั่นเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ต่างๆ ในทางวิศวกรรมเคมี พบว่าควรหาจากแฟคเตอร์ที่เป็นคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆ ของระบบ เช่น อัตราส่วนในการผสมของของแข็งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือ ความหนาแน่นของอนุภาค

2. การสร้างสหสัมพันธ์จากสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันของระบบอนุภาคเดี่ยว (mono particle) โดยการแก้ไขแฟกเตอร์ 2 ค่า ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Diameter) และ ความหนาแน่นของอนุภาค (Density) ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมในการใช้งานกับระบบอนุภาคผสม โดยอยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคผสม ( $\bar{d}$ ) และ ความหนาแน่นของอนุภาคผสม ( $\bar{\rho}$ ) ทั้งนี้สามารถทำการหาค่าเฉลี่ยได้ทั้งแบบค่าเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic Averaging) หรือ ค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิก (Harmonic Averaging) โดยพบว่าผลการหาค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $\bar{d}$ ) และ ความหนาแน่นของอนุภาคผสม ( $\bar{\rho}$ ) ที่นำไปใช้ในการหาค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันระบบอนุภาคผสม แล้วมีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุดนั้นถูกเสนอโดย Goosens และคณะ [15] ดังสมการที่ (2.16) และ (2.17)

$$\bar{\rho} = \left[ \sum \left( \frac{x_i}{\rho_i} \right) \right]^{-1} \quad (2.16)$$

และ

$$\bar{d} = \left[ \bar{\rho} \sum \left( \frac{x_i}{d_i \rho_i} \right) \right]^{-1} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\rho_i$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง  $i$  [กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร]

$d_i$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค  $i$  [เซนติเมตร]

$x_i$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาค  $i$

## 2.2 อุทกพลศาสตร์ของฟลูอิดไคเซชันเบด [23]

การเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไคเซชันในฟลูอิดไคเซชันเบดสามวัฏภาค (three-phase fluidized bed, TPFB) มีความซับซ้อนมาก อนุภาคของแข็งลอยตัวในตัวกลางซึ่งเป็นของเหลวและก๊าซ เมื่อก๊าซผ่านเบดจะเกิดเป็นฟองก๊าซ การเคลื่อนที่ของฟองก๊าซภายในเบดจะเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วน ทำให้ทั้งอนุภาคของแข็ง ของเหลวและก๊าซมีการผสมและมีการสัมผัสกันระหว่างวัฏภาคอย่างทั่วถึง ลักษณะการเกิดฟลูอิดไคเซชันในระบบสามวัฏภาค สามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพได้เป็น 3 ส่วน ดังรูปที่ (2.4) ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันดังนี้

### 2.2.1 Distributor region

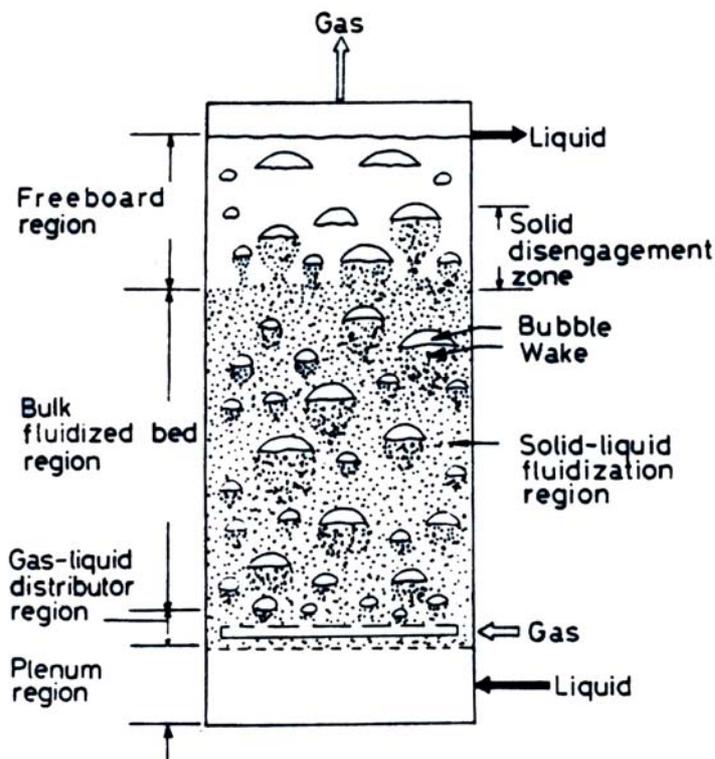
บริเวณที่อยู่เหนือตัวกระจายก๊าซ-ของเหลว เป็นบริเวณที่ก๊าซเข้าสู่เบด เป็นส่วนที่ครอบคลุมตั้งแต่การเริ่มเกิดฟองก๊าซ เนื่องจากแรงเสียดทาน (drag force) ของการสัมผัสกันระหว่างก๊าซและของเหลว จนกระทั่งเกิดเป็นฟองก๊าซอย่างสมบูรณ์ พฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ (hydrodynamic behavior) ในเบดส่วนนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบตัวกระจายก๊าซ-ของเหลว และคุณสมบัติของตัวกลางของเหลว และอนุภาคของแข็ง

### 2.2.2 Bulk-fluidized bed region

เป็นส่วนที่สำคัญของฟลูอิดไดซ์เบด โดยส่วนนี้จะมีการสัมผัสและการผสมกันระหว่างวัฏภาคมากขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางอุทกพลศาสตร์ที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น

### 2.2.3 Freeboard region

อนุภาคของแข็งจะถูกฟองก๊าซและกระแสของของเหลวพัดพาเข้าสู่ส่วนนี้ ทำให้เกิดความแตกต่างของสัดส่วนของอนุภาคของแข็ง ในกรณีที่อนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่และ/หรือหนัก เบดส่วนนี้จะแตกต่างจาก bulk-fluidized bed region อย่างชัดเจน

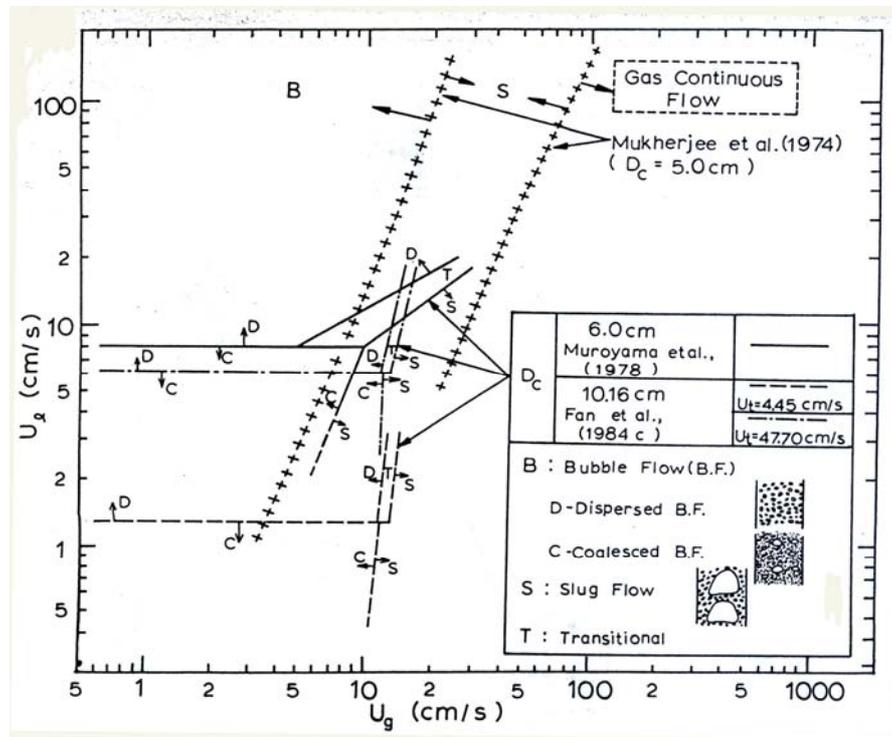


รูปที่ 2.4 ฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคแบบการไหลทางเดียวกัน (cocurrent upward) [23]

โดยทั่วไปพลศาสตร์ของฟลูอิดไดซ์เบดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดและขนาดของอนุภาคของแข็ง ความเร็วของก๊าซและของเหลว ความสูงของเบดและขนาดของคอลัมน์ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับารออกแบบการป้อนของแข็งและตัวกระจายก๊าซและของเหลว

### 2.3 ลักษณะการไหล [23]

ลักษณะการไหลในฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาค แสดงถึงคุณลักษณะทางอุทกพลศาสตร์และการผสมกันของอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นภายในเบด สามารถแบ่งลักษณะการไหลในเบดตามความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเหลวและก๊าซได้เป็น 3 ลักษณะ ดังรูปที่ (2.5)



รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลในฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาค [23]

#### 2.3.1 Coalesced bubble regime

ลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นทรงกลม เป็นช่วงการไหลที่ฟองก๊าซรวมตัวเข้าด้วยกันทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการกระจายของขนาดของฟองก๊าซที่กว้างขึ้นด้วย ฟองก๊าซขนาดใหญ่หรือกลุ่มของฟองก๊าซนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของเบดด้วยความเร็วสูง การรวมตัวของฟองก๊าซนี้ส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณกึ่งกลางของคอลัมน์ซึ่งมีความเร็วของไหลสูงและการไหลมีความปั่นป่วนมาก

### 2.3.2 Dispersed bubble regime

ลักษณะของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กและมีรูปร่างสม่ำเสมอ มักจะเกิดในกรณีที่อัตราไหลของของเหลวสูงแต่อัตราไหลของก๊าซต่ำ

### 2.3.3 Slugging regime

เมื่อเพิ่มความเร็วของก๊าซที่เข้าสู่เบด ฟองก๊าซจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความสูงของเบดจนกระทั่งมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ โดยเฉพาะในกรณีที่คอลัมน์สูงและมีขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 15 เซนติเมตร) เมื่อความเร็วของก๊าซที่เข้าสู่เบดมีค่าสูง ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเกือบเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์ ฟองก๊าซขนาดใหญ่นี้จะพาอนุภาคของแข็งลอยขึ้นไปในลักษณะเป็นชั้น ๆ ตามความสูงของเบด ทำให้เกิดการพัดพาอนุภาคของแข็งหลุดลอยออกไปจากเบด เป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

## 2.4 อนุภาคของแข็ง [24]

Geldart ได้แบ่งอนุภาคของแข็งตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของอนุภาค ดังรูปที่ (2.6) ออกเป็น 4 กลุ่มดังนี้

### 2.4.1 อนุภาคกลุ่ม A

อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30-100 ไมโครเมตร เป็นกลุ่มอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กและมีความหนาแน่นต่ำ (น้อยกว่า 1.4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้สามารถเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ง่ายและมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งเบด เบดของอนุภาคของแข็งจะเกิดการขยายตัว เมื่อความเร็วของก๊าซมีค่าต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ ที่ความเร็วของก๊าซมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์จะเกิดการรวมตัวเป็นฟองก๊าซภายในเบดของอนุภาคของแข็ง และเกิดการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งภายในเบด เมื่อความเร็วของก๊าซมีค่าสูงมากๆ จะเกิดฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับขนาดของคอลัมน์เคลื่อนที่ไปตามแนวแกนของคอลัมน์ ตัวอย่างของอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้คือ คะตะลิสต์ที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรแครกกิง (hydrocracking process)

### 2.4.2 อนุภาคกลุ่ม B

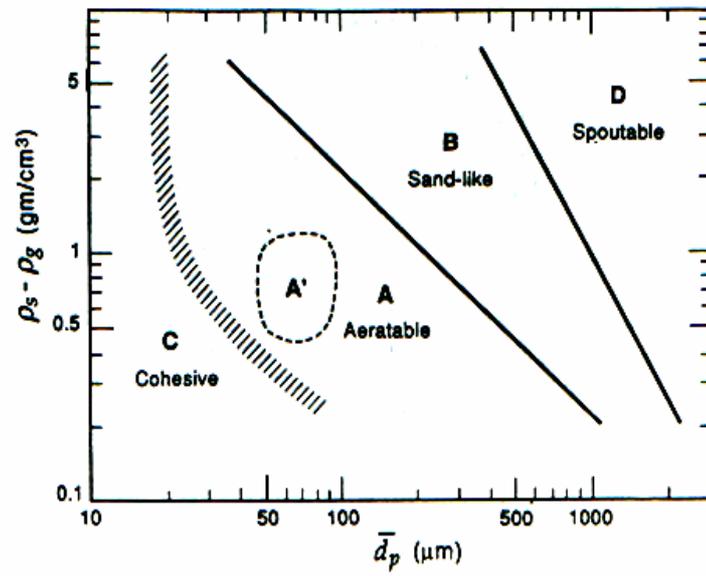
อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 ถึง 800 ไมโครเมตร อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ดี เมื่อความเร็วของก๊าซมีค่าสูงกว่าความเร็วค่าต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ จะเกิดฟองก๊าซซึ่งเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว (fast bubbles) และเกิดการรวมตัวเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ตามความสูงของเบด ตัวอย่างของอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้ ได้แก่ ทราย

### 2.4.3 อนุภาคกลุ่ม C

อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 ไมโครเมตร เป็นอนุภาคของแข็งที่ละเอียดและมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของแข็งสูง เป็นผลให้อนุภาคของแข็งชนิดนี้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ค่อนข้างยาก ในคอลัมน์ขนาดเล็กอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้มักจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันของอนุภาคของแข็ง แต่ในคอลัมน์ขนาดใหญ่อนุภาคกลุ่มนี้มักจะไม่เกิดฟลูอิดไดซ์ แต่จะเกิดเป็นช่องว่างที่เกิดจากกระแสของก๊าซจากตัวกระจายก๊าซสู่ผิวเบด ทำให้ค่าความดันลดที่วัดคร่อมระหว่างเบดมีค่าต่ำกว่าหรือเป็นครึ่งหนึ่งของค่าในทางทฤษฎี (น้ำหนักของแข็งในเบดต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย) ตัวอย่างของอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้ ได้แก่ แป้งที่ได้จากธัญพืช

### 2.4.4 อนุภาคกลุ่ม D

อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้เป็นอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นสูงส่วนใหญ่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1,000 ไมโครเมตร ทำให้อนุภาคกลุ่มนี้เกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ยาก เมื่อความเร็วของก๊าซมีค่าต่ำ ก๊าซจะเคลื่อนที่ผ่านระหว่างช่องว่างของอนุภาคของแข็ง เมื่อความเร็วของก๊าซเพิ่มขึ้น จะเกิดการรวมตัวของฟองก๊าซซึ่งเคลื่อนที่อย่างช้าๆ ไปสู่ผิวหน้าของเบด (slow bubbles) และทำให้เบดขยายตัว แต่ยังคงมีการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งภายในเบดค่อนข้างน้อย การเพิ่มการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งภายในเบดทำได้โดยการป้อนก๊าซที่กึ่งกลางคอลัมน์ ตัวอย่างของอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้ ได้แก่ เมล็ดข้าวสาลี เมล็ดถั่วลิสง



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของความหนาแน่นของของแข็ง และกำลังกับขนาดของอนุภาคของแข็ง [24]

## บทที่ 3 วิธีการทดลอง/ระเบียบวิธีวิจัย

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

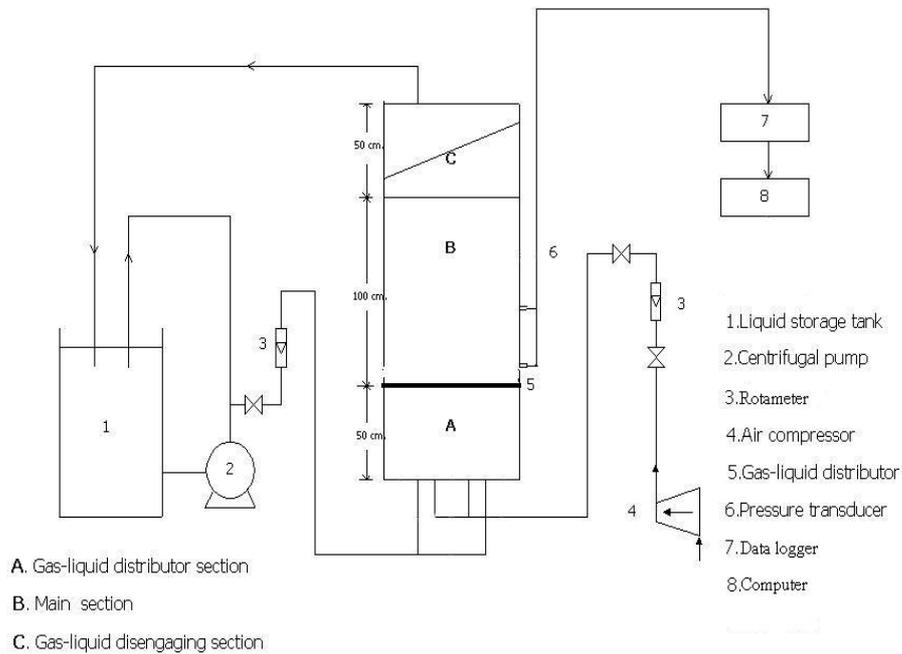
1. หอฟลูอิดไดซ์
2. เครื่องวัดความดัน (pressure transducer) ยี่ห้อ Omega รุ่น PX154-025 DI
3. เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น LR4100
4. คอมพิวเตอร์
5. โรตารีเตอร์
6. ป้อนน้ำ
7. คอมเพรสเซอร์
8. ถังน้ำ 500 ลิตร

### 3.2 วัสดุและสารเคมี

1. ทราย
2. เม็ดแก้ว
3. แผ่นบันทึกข้อมูล

### 3.3 หอฟลูอิดไดซ์

หอฟลูอิดไดซ์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นคอลัมน์อะคริลิกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.13 เมตร และสูงเท่ากับ 2 เมตร (รูปที่ 3.1) ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนตัวกระจายก๊าซ-ของเหลว ( gas-liquid distributor section ) สูง 0.5 เมตร ส่วนหลัก ( main section ) สูง 1 เมตร และส่วนแยกก๊าซ-ของเหลว ( gas-liquid disengaging section ) สูง 0.5 เมตร ตัวกระจายก๊าซ-ของเหลวทำจากแผ่นสแตนเลส เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 2 มิลลิเมตร จำนวน 129 รู จัดเรียงแบบ square pitch มีระยะ pitch เท่ากับ 15 มิลลิเมตร มีอัตราส่วนของจำนวนรูต่อพื้นที่หน้าตัดของคอลัมน์เท่ากับ 0.41



รูปที่ 3.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

### 3.4 วิธีการทดลอง

ทำการทดลองโดยการสูบน้ำจากถังเก็บน้ำ (หมายเลข 1) ด้วยเครื่องปั้มน้ำ (หมายเลข 2) ทำการป้อนของเหลวและอากาศเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 13 เซนติเมตร ผ่าน Raschig ring ที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ส่วนตัวกระจายก๊าซและของเหลว (Gas-liquid distributor section) เพื่อให้อัตราเร็วของของไหลที่เข้าสู่คอลัมน์ (Main section) มีความสม่ำเสมอ วัดอัตราการไหลของอากาศและของเหลวที่เข้าสู่คอลัมน์โดยใช้โรตานิเตอร์ (หมายเลข 3) และปรับอัตราการไหลโดยใช้ gate valve รอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของความดันตกคร่อมระหว่างตำแหน่ง 2.5 และ 20 เซนติเมตรเหนือตัวกระจายก๊าซและของเหลวด้วยเครื่องวัดความดัน (pressure transducer) ยี่ห้อ Omega รุ่น PX 154-025 DI บันทึกสัญญาณที่ได้ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น LR4100 โดยใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 135 ข้อมูลต่อวินาที จำนวนข้อมูลที่ทำกรบันทึกเท่ากับ 32,000 จุด ทำการควบคุมเครื่องบันทึกข้อมูลด้วยโปรแกรม LR Soft version 1.10 ที่ติดตั้งภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ (หมายเลข 8) จากนั้นนำข้อมูลของค่าความดันตกคร่อมที่ความเร็วของเหลวค่าต่างๆมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไลเซชัน

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันในฟลูอิดไดซ์เบดสาม วัฏภาคของของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเร็วก๊าซ อัตราส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง และขนาดอนุภาค และศึกษาสหสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดของ ฟลูอิดไดเซชันในระบบอนุภาคผสม

#### 3.4.1 ผลของความเร็วก๊าซ และ สัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็ง

ทำการทดลองโดยใช้ทรายซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1,440 ไมโครเมตร (SN1440) และเม็ดแก้ว ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3,000 ไมโครเมตร (GB3000) เม็ดแก้วและทรายมีความหนาแน่นของ อนุภาคเท่ากับ 2.504 และ 2.633 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ใช้สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก 3 ค่าคือ 0.125, 0.5 และ 0.875 ทดลองที่ความเร็วก๊าซ 6 ค่าได้แก่ 0 , 0.94, 1.93, 3.92, 5.88 และ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที

#### 3.4.2 ผลของอัตราส่วนขนาดอนุภาค

ทำการทดลองโดยใช้ทรายซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 1,440 ไมโครเมตร และเม็ดแก้วซึ่งมีขนาด อนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 750 และ 3,000 ไมโครเมตร ใช้สัดส่วนผสมโดยน้ำหนัก 3 ค่าคือ 0.125, 0.5 และ 0.875 ทดลองที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.92 เซนติเมตรต่อวินาที

#### 3.4.3 การศึกษาสหสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันในระบบอนุภาคผสม

ทำการหาสหสัมพันธ์ของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันในระบบอนุภาคผสมจากข้อมูลที่ได้จาก การทดลอง ทดสอบความถูกต้องของสหสัมพันธ์และเปรียบเทียบสหสัมพันธ์ที่ได้จากข้อมูลการ ทดลอง กับ สหสัมพันธ์ที่ได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 3.1 แผนดำเนินการทดลอง

ระบบอนุภาค	สัดส่วนผสมโดยมวล ของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ )	อัตราส่วนขนาด อนุภาค (diameter ratio)	ความเร็วก๊าซ (เมตรต่อวินาที)
GB3000:SN1440	0	2.08	0
	0.125		0.94
	0.5		1.93
	0.875		3.93
	1		5.88
			7.84
GB3000: GB750	0	4	0
	0.125		0.94
	0.5		1.93
	0.875		3.93
	1		5.88
			7.84

### 3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน

การหาค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันจากค่าความดันตกคร่อมเบดมีขั้นตอนดังนี้

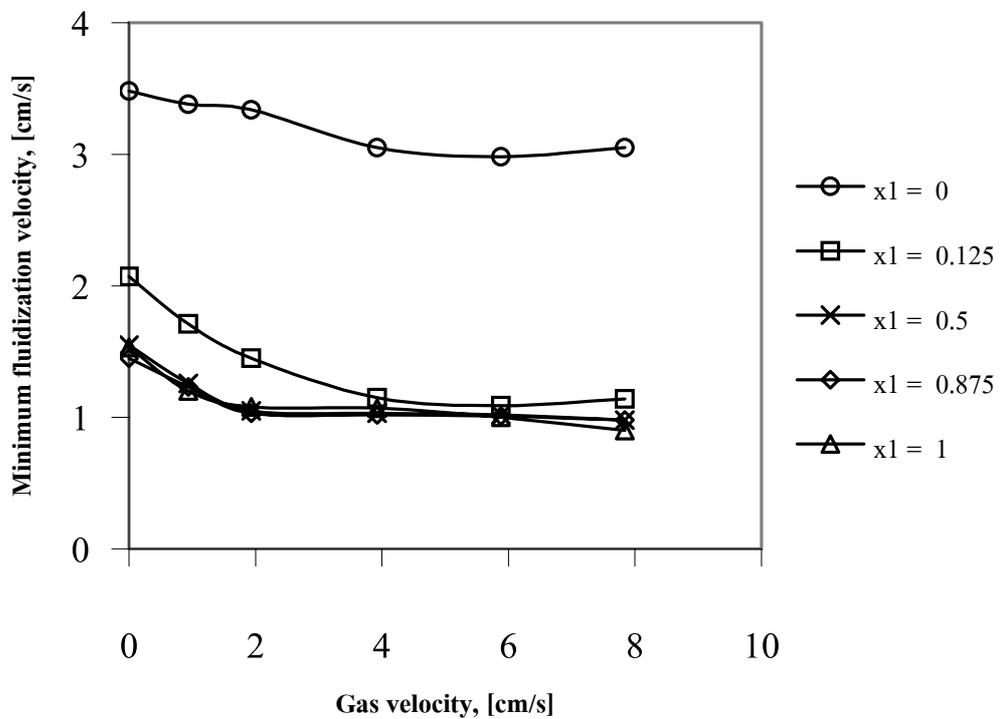
1. ปรับอัตราการไหลของอากาศและน้ำให้ได้ค่าที่ต้องการและรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว
2. วัดความดันตกคร่อมเบด ( $\Delta P$ ) ระหว่างตำแหน่ง 2.5 และ 20 เซนติเมตรเหนือตัวกระจายก๊าซและของเหลวด้วยเครื่องวัดความดัน (pressure transducer) โดยบันทึกสัญญาณที่วัดได้ในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ใช้ความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 135 ข้อมูลต่อวินาที จำนวนข้อมูลที่ทำกรบันทึกเท่ากับ 32000 จุด ซึ่งทำการควบคุมเครื่องบันทึกข้อมูลด้วยโปรแกรม LR Soft version 1.10 ที่ติดตั้งภายในเครื่องคอมพิวเตอร์
3. เปิดไฟล์ข้อมูลของค่าความดัน \*.prm โดยใช้โปรแกรม Excel และพบข้อมูลของค่าความดันเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ที่ระยะเวลาต่างๆ (t) ในการเก็บข้อมูล
4. ทำการแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V) ให้อยู่ในรูปของความดันตกคร่อมเบดโดยใช้ผลการสอบเทียบเครื่องวัดความดัน (ภาคผนวก ง.)

5. นำค่าความดันตกคร่อมเบด ( $\Delta P$ ) ที่เก็บได้ทั้งหมด 32,000 ข้อมูล มาหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetic mean) โดยใช้โปรแกรม Excel
6. เพิ่มอัตราการไหลของน้ำซึ่งครอบคลุมตั้งแต่สถานะที่เป็นเบดนิ่ง (fixed bed) จนกระทั่งเบดขยายตัวและเกิดฟลูอิดไดซ์อย่างสมบูรณ์ (fully fluidization) และโดยมีขั้นตอนการปฏิบัติเหมือนดังข้อ 1.-5.
7. ทำการวัดความดันขณะที่ปลายทั้งสองข้างของเครื่องวัดความดัน (pressure transducer) เปิดสู่บรรยากาศโดยมีขั้นตอนการปฏิบัติเหมือนกับกรณีวัดความดันตกคร่อมเบดดังข้อ 1.-5.
8. นำค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความดันตกคร่อมเบด ( $\Delta P$ ) ที่อัตราการไหลของน้ำค่าต่างๆ ลบด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตของความดันขณะที่ปลายทั้งสองข้างเปิดสู่บรรยากาศ ซึ่งค่าที่ได้คือ ค่าความดันตกคร่อมเบด ( $\Delta P$ ) ที่ช่วงความเร็วของเหลวค่าต่างๆ
9. นำค่าความดันตกคร่อมเบด ( $\Delta P$ ) ที่ช่วงความเร็วของเหลวค่าต่างๆจากข้อ 8. มาทำการพล็อตกราฟระหว่างความดันตกคร่อมเบด ( $\Delta P$ ) กับ ความเร็วของเหลว ( $U_f$ )
10. หาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์ชันจากจุดตัดกราฟระหว่างส่วนที่กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง (initial slope) ในสถานะเบดนิ่ง กับ ส่วนที่ความดันตกมีค่าคงที่ (constant pressure drop line) ในสถานะเกิดฟลูอิดไดซ์อย่างสมบูรณ์ [9] โดยเลือกช่วงของจุดที่เป็นเส้นตรงและมีค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย ( $R^2$ ) ใกล้เคียง 1

## บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

### 4.1 ผลของความเร็วก๊าซที่มีต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน

ทำการทดลองในระบบอากาศ-น้ำ-อนุภาคผสมระหว่างทรายขนาด 1,440 ไมโครเมตรและเม็ดแก้วขนาด 3,000 ไมโครเมตร ใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125, 0.5 และ 0.875 ใช้ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0, 0.94, 1.93, 3.92, 5.88 และ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันที่ได้แสดงในรูปที่ (4.1)



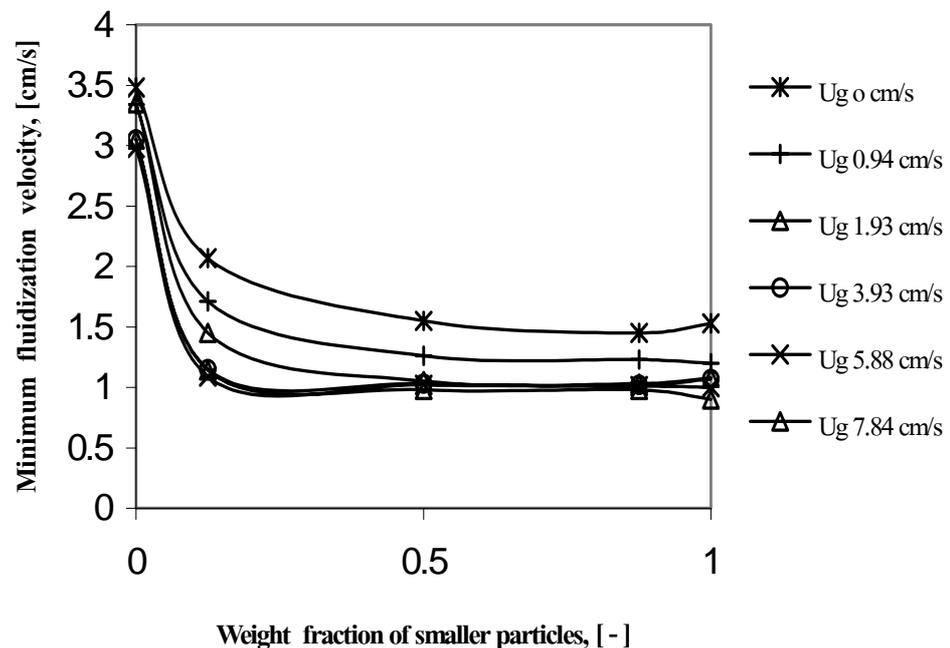
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันกับความเร็วก๊าซ สำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:SN1440

จากรูปที่ (4.1) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันกับความเร็วก๊าซ ที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) ค่าต่างๆ พบว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันมีค่าลดลงในช่วงที่ความเร็วก๊าซมีค่าต่ำกว่า 1.93 เซนติเมตรต่อวินาที และมีค่าค่อนข้างคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในช่วงที่ความเร็วก๊าซมีค่าสูงกว่า 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที สามารถ

อธิบายได้ว่า เมื่อความเร็วก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น ก๊าซแทนที่ของเหลวบางส่วนทำให้สัดส่วนของเหลวมีค่าลดลง และทำให้ความเร็วของเหลวที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาค (interstitial liquid velocity) มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความเร็วที่เกิดขึ้นระหว่างของเหลวและอนุภาค (slip velocity) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรง (drag force) ที่ทำต่ออนุภาคมีค่ามากขึ้นตาม และทำให้ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันมีค่าลดลง [29]

## 4.2 ผลของสัดส่วนผสมของอนุภาคของแข็งที่มีต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน

ทำการทดลองในระบบอากาศ-น้ำ-อนุภาคผสมระหว่างทรายขนาด 1,440 ไมโครเมตรและเม็ดแก้วขนาด 3,000 ไมโครเมตร ใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125, 0.5 และ 0.875 และใช้ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0, 0.94, 1.93, 3.93, 5.88 และ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันที่ได้แสดงในรูปที่ (4.2)

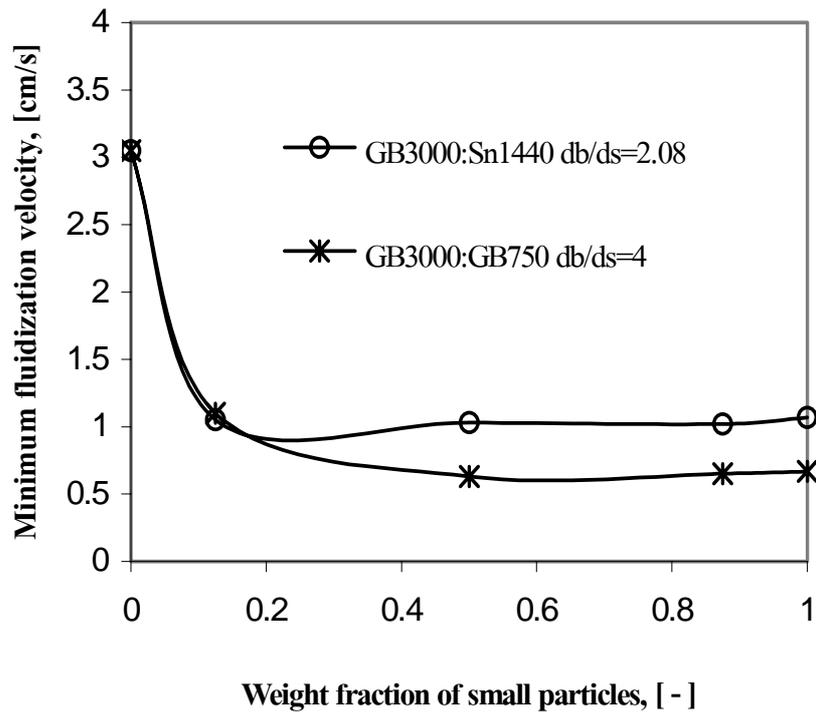


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันกับสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) สำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:SN1440

จากรูปที่ (4.2) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันกับสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) ที่ความเร็วต่างๆ พบว่าในช่วงที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กมีค่าต่ำกว่า 0.125 ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว และมีค่าคงที่เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กมีค่าเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อเริ่มใส่อนุภาคขนาดเล็ก(ทราย) ลงในระบบอนุภาคผสม ทำให้สัดส่วนช่องว่าง ( $\varepsilon$ , voidage) ของอนุภาคผสมลดลง ทำให้ความเร็วของเหลวที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาค (interstitial liquid velocity) มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรง (drag force) ที่ทำต่ออนุภาคมีค่ามากขึ้นตาม และทำให้ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันมีค่าลดลง [12] และเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กมีค่าตั้งแต่ 0.125 ขึ้นไปค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันมีค่าคงที่และเข้าใกล้ค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคขนาดเล็กอธิบายตาม [17] ได้ว่าเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กคือ ทรายเมื่อถูกผสมมากขึ้น อนุภาคขนาดเล็กจะแทรกอยู่ในช่องแคบเล็กๆระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ (interstices) มากขึ้นและด้วยปริมาณของอนุภาคขนาดเล็กที่มากเพียงพอทำให้พฤติกรรมการเกิดฟลูอิดไดเซชันต่ำสุด (behavior at the minimum fluidization) ถูกควบคุมโดยอนุภาคขนาดเล็กส่งผลให้ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคผสมมีค่าเท่ากับความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคขนาดเล็กเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กมีค่ามากกว่า 0.125

#### 4.3 ผลของอัตราส่วนขนาดอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน

การศึกษาผลของอัตราส่วนขนาดอนุภาคที่มีต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน ทำการทดลองโดยใช้อนุภาคผสม 2 ชุด อนุภาคผสมชุดแรกใช้เม็ดแก้วขนาด 3,000 ไมโครเมตรและทรายขนาด 1,440 ไมโครเมตรซึ่งมีอัตราส่วนขนาดอนุภาค ( $d_b/d_s$ ) เท่ากับ 2.08 กับอนุภาคผสมชุดที่สองคือเม็ดแก้วขนาด 3,000 ไมโครเมตรและเม็ดแก้วขนาด 750 ไมโครเมตรซึ่งมีอัตราส่วนขนาดอนุภาค ( $d_b/d_s$ ) เท่ากับ 4 ในการทดลองใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125, 0.5 และ 0.875 ที่ความเร็วต่างๆที่เท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที ผลของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคผสม 2 ชุดแสดงในรูปที่ (4.3)



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันกับสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กสำหรับระบบอนุภาคผสมที่มีอัตราส่วนขนาดอนุภาคต่างกัน

เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนขนาดอนุภาคจากรูปที่ (4.3) พบว่าเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กมีค่าน้อยในช่วง 0 ถึง 0.125 อัตราส่วนขนาดอนุภาคมีผลน้อยมากหรือแทบไม่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน แต่เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.125 ถึง 1 พบว่าอัตราส่วนขนาดอนุภาคมีผลต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน โดยระบบของผสมที่มีอัตราส่วนขนาดอนุภาคสูงมีค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันต่ำกว่าระบบที่มีอัตราส่วนขนาดอนุภาคต่ำ คือที่อัตราส่วนของขนาดอนุภาค  $(d_b/d_s)$  เท่ากับ 4 ได้ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน 0.65 เซนติเมตรต่อวินาที ขณะที่อัตราส่วนของขนาดอนุภาค  $(d_b/d_s)$  เท่ากับ 2.08 ได้ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน 1.02 เซนติเมตรต่อวินาที เหตุผลนี้เนื่องจากเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กมากกว่า 0.125 ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันของระบบอนุภาคผสมเริ่มมีค่าคงที่และเข้าหาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคขนาดเล็กด้วยเหตุผลเดียวกับหัวข้อ 4.2 ดังนั้นความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันของระบบอนุภาคผสมระหว่างเม็ดแก้วขนาด 3,000 ไมโครเมตร และทรายขนาด 1,440 ไมโครเมตรจึงมีค่าสูงกว่าระบบอนุภาคผสมระหว่างเม็ดแก้วขนาด

3,000 ไมโครเมตรและเม็ดแก้วขนาด 750 ไมโครเมตร เพราะความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของทรายขนาด 1,440 ไมโครเมตรมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของเม็ดแก้วขนาด 750 ไมโครเมตร และจากงานวิจัยของ Asif และคณะ[17] พบว่าเมื่ออัตราส่วนของขนาดอนุภาคมีค่าลดลง โอกาสเกิดการแยกชั้นของอนุภาคสองชนิดมีมากขึ้นทำให้การผสมกันของอนุภาคทั้งสองชนิดไม่ดี และส่งผลให้ค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของระบบอนุภาคผสมมีค่าสูงขึ้น

#### 4.4 การทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของผสมของอนุภาค

##### สองชนิด (Binary mixture)

ในงานวิจัยนี้ทำการหาความสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของผสมของอนุภาคสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไอซ์เบดสามวัฏภาค ( $U_{mf}$ ) จากข้อมูลของการทดลอง โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไอเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) ขึ้นกับความเร็วนต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของอนุภาคเดี่ยวแต่ละตัว ( $U_{mfi}$ ) และสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่ ( $x_2$ ) เช่น สมสัมพันธ์สำหรับอนุภาคผสมของของแข็งในฟลูอิดไอซ์เบดสามวัฏภาคที่เสนอโดย Fan และคณะ[7] ดังสมการที่ (4.1) และสมสัมพันธ์สำหรับอนุภาคผสมของของแข็งในฟลูอิดไอซ์เบดระบบของแข็ง-ก๊าซที่เสนอโดย Cheung และคณะ[8] ดังสมการที่ (4.2)

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf1}} = \left[ \frac{U_{mf2}}{U_{mf1}} \right]^{x_2^{1.69}} \quad (4.1)$$

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf1}} = \left[ \frac{U_{mf2}}{U_{mf1}} \right]^{x_2^2} \quad (4.2)$$

โดย  $U_{mf}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม[เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $U_{mf1}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก[เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $U_{mf2}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ [เซนติเมตรต่อวินาที]  
 $x_2$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอสหสัมพันธ์ 3 รูปแบบดังในตารางที่ 4.1 โดยรูปแบบที่ 1 ใช้แนวคิดเกี่ยวกับงานวิจัยของ Fan และคณะ [7] และ Cheung และคณะ [8] ส่วนรูปแบบที่ 2 และ 3 ใช้แนวคิดที่ว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสมได้จากผลรวมของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของอนุภาคแต่ละชนิด ( $U_{mf1}, U_{mf2}$ ) ในระบบอนุภาคผสมตามสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคแต่ละชนิดที่อยู่ในระบบอนุภาคผสม ( $x_1, x_2$ )

ตารางที่ 4.1 สหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสมสองชนิด (binary mixture) ในฟลูอิดไอเซชันแบบสามวัฏภาค ( $U_{mf}$ )

Eq.	Correlation equations	R <sup>2</sup>
1.	$\frac{U_{mf}}{U_{mf1}} = \left[ \frac{U_{mf2}}{U_{mf1}} \right]^{x_2^{11.87}}$	0.97
2.	$U_{mf} = \left[ (x_2 U_{mf2})^{10.588} + (x_1 U_{mf1})^{7.711} \right]^{0.072}$	0.56
3.	$U_{mf} = x_2 U_{mf2} + x_1 U_{mf1} - 5.347 x_1 x_2$	0.64

จากผลของการหาสหสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.1 พบว่า สหสัมพันธ์แบบที่ 1 ให้ค่าความถูกต้อง (R<sup>2</sup>) มากที่สุด เท่ากับ 0.97 คือ สหสัมพันธ์แสดงในสมการที่ (4.3)

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf1}} = \left[ \frac{U_{mf2}}{U_{mf1}} \right]^{x_2^{11.87}} \quad (4.3)$$

จากสหสัมพันธ์ที่ได้แสดงว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของระบบผสมขึ้นอยู่กับความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของอนุภาคแต่ละชนิดและสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคแต่ละชนิดที่อยู่ในระบบอนุภาคผสมแต่ไม่ใช่ผลรวมของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันของอนุภาคแต่ละชนิดกับสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคแต่ละชนิดที่อยู่ในระบบของผสมนั้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบสหสัมพันธ์ที่ได้จากข้อมูลการทดลองกับการใช้ข้อมูลจากการคำนวณ โดยคำนวณความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชันสำหรับอนุภาคนขนาดเล็ก ( $U_{mf1}$ ) และอนุภาคนขนาดใหญ่ ( $U_{mf2}$ ) จากสหสัมพันธ์ของ Song และคณะ [22] และสหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu [11] ดังแสดงใน

สมการที่ (4.4) ถึง (4.7) ตามลำดับ โดยสหสัมพันธ์ของ Song และคณะ[22] ใช้กับระบบอนุภาคเดี่ยวในฟลูอิดไอซ์เบดสามวัฏภาค ส่วนสหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu [11] ใช้กับระบบอนุภาคเดี่ยวในฟลูอิดไอซ์เบดสภาวะของแข็ง-ของเหลว

สหสัมพันธ์ของ Song และคณะ[22]

$$\frac{U_{mfi}}{U_{mf0}} = 1 - 376 U_g^{0.327} \mu_l^{0.227} d_e^{0.213} (\rho_s - \rho_l)^{-0.423} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $1.8 \leq \rho_s \leq 2.5 \text{ g/cm}^3$  ,  $0 \leq U_g \leq 17 \text{ cm/s}$  ,  $460 \leq d_e \leq 6300 \mu\text{m}$

โดย  $U_{mfo}$  หาได้จากสหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu [11]

$$\text{Re}_{mfo} = \frac{\rho_l U_{mfo} d_e}{\mu_l} \quad (4.5)$$

โดยที่  $\text{Re}_{mfo} = [33.7^2 + 0.0408 Ar]^{\frac{1}{2}} - 33.7$  (4.6)

และ  $Ar = \frac{d_e^3 \rho_l (\rho_s - \rho_l) g}{\mu_l^2}$  (4.7)

โดย  $U_{mfo}$  = ความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไอซ์เบดชั้นเบดในระบบของแข็ง-ของเหลว [เซนติเมตรต่อวินาที]

$U_{mfi}$  = ความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไอซ์เบดชั้นของอนุภาค i [เซนติเมตรต่อวินาที]

$U_g$  = ความเร็วก๊าซ [เซนติเมตรต่อวินาที]

$\mu_l$  = ความหนืดของของเหลว [กรัม/เซนติเมตร-วินาที]

$d_e$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของอนุภาค [เซนติเมตร]

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง [กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร]

$\rho_l$  = ความหนาแน่นของของเหลว [กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร]

ผลของการคำนวณความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก ( $U_{mf1}$ ) และอนุภาคขนาดใหญ่ ( $U_{mf2}$ ) แสดงดังในตารางที่ 4.2

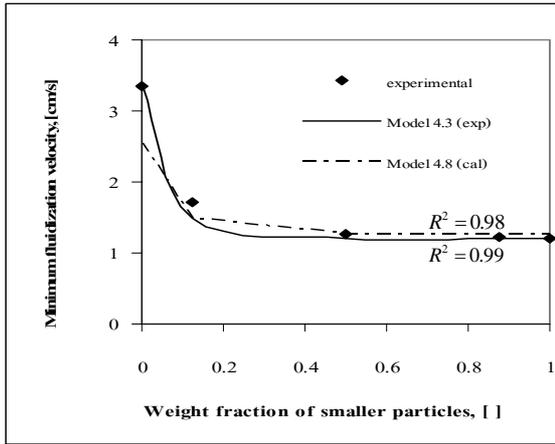
ตารางที่ 4.2 ค่า  $U_{mf1}$  และ  $U_{mf2}$  จากการทดลองและจากการคำนวณ

ความเร็วก๊าซ (cm/s)	$U_{mf1}$		$U_{mf2}$	
	การทดลอง	การคำนวณ	การทดลอง	การคำนวณ
0.94	1.2	1.26	3.38	2.56
1.93	1.08	1.19	3.34	2.36
3.93	1.07	1.09	3.05	2.12
5.88	1	1.03	2.98	1.95
7.84	0.9	0.98	3.05	1.82

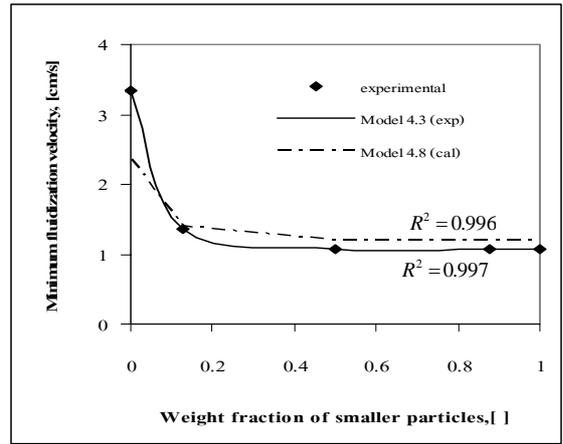
เมื่อทำการเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก ( $U_{mf1}$ ) และอนุภาคขนาดใหญ่ ( $U_{mf2}$ ) ที่ได้จากการคำนวณกับการทดลอง พบว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก ( $U_{mf1}$ ) ที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ ( $U_{mf2}$ ) เหตุผลอาจเนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีคุณสมบัติเป็นไปตามสมมุติฐานของการใช้สหสัมพันธ์ของ Song และคณะ[22] และ Wen และ Yu [11] มากกว่า เมื่อนำความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก ( $U_{mf1}$ ) และอนุภาคขนาดใหญ่ ( $U_{mf2}$ ) ที่ได้จากการคำนวณมาหาสหสัมพันธ์เพื่อทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) ได้สหสัมพันธ์ดังในสมการ(4.8)

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf1}} = \left[ \frac{U_{mf2}}{U_{mf1}} \right]^{12.09} \quad (4.8)$$

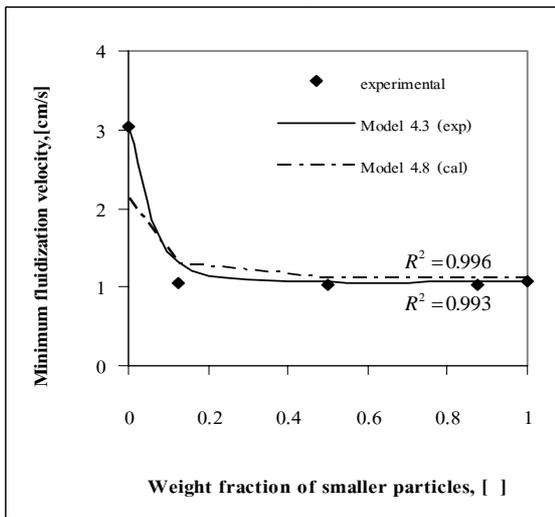
เมื่อทำการเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) ที่ได้จากสหสัมพันธ์ที่ใช้ข้อมูลจากการทดลองสมการ (4.3) กับสหสัมพันธ์ที่ใช้ข้อมูลจากการคำนวณสมการ (4.8) ได้ผลดังรูปที่ (4.4)



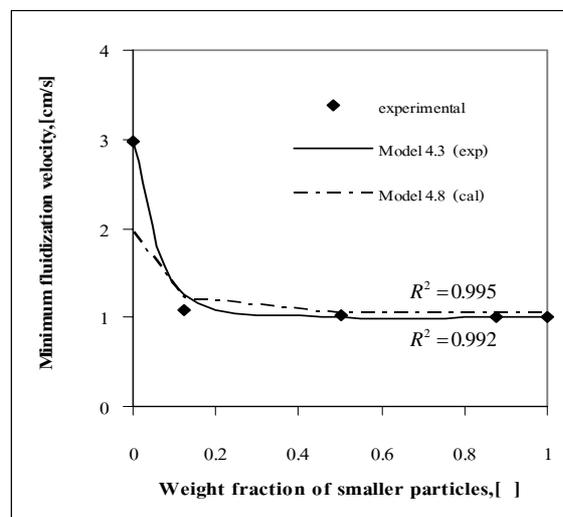
ก.



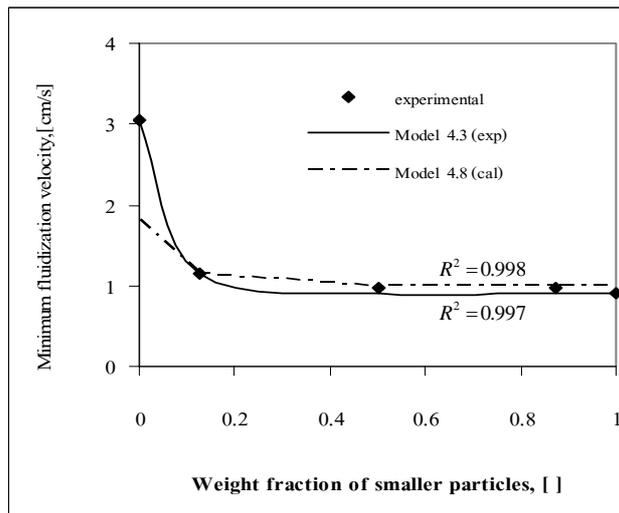
ข.



ค.



ง.



จ.

รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไลเซชันที่ได้จากสหสัมพันธ์ที่ใช้ข้อมูลจากการทดลองและสหสัมพันธ์ที่ใช้ข้อมูลจากการคำนวณที่ค่าความเร็วที่ต่างกัน ก. 0.94 cm/s ข. 1.93 cm/s ค. 3.93 cm/s ง. 5.88 cm/s จ. 7.84 cm/s

จากรูปที่ 4.4 พบว่า สหสัมพันธ์ (4.3) ที่ใช้ข้อมูลจากการทดลองสามารถทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) ได้ใกล้เคียงความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) จากการทดลองทุกสภาวะ เนื่องจากสหสัมพันธ์ได้มาจากข้อมูลการทดลองโดยตรง สำหรับสหสัมพันธ์ (4.8) ที่ใช้ข้อมูลจากการคำนวณความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับอนุภาคนขนาดเล็ก ( $U_{mf1}$ ) และอนุภาคนขนาดใหญ่ ( $U_{mf2}$ ) สามารถทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) ได้ใกล้เคียงกับความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) จากการทดลองที่เกือบทุกสภาวะ ยกเว้นที่สภาวะอนุภาคผสมมีเฉพาะอนุภาคนขนาดใหญ่ ( $x_1 = 0$ ) ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันสำหรับอนุภาคนขนาดใหญ่ ( $U_{mf2}$ ) ที่คำนวณได้มีความแตกต่างจากการทดลองดังที่ได้กล่าวแล้ว

จากการพิจารณา สหสัมพันธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้ (สมการที่ 4.3 และ 4.8) พบว่า การทำนายความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันของระบบอนุภาคผสม ( $U_{mf}$ ) ที่ขึ้นกับสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลอง คือในช่วงสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคนขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่าน้อย (ตั้งแต่ 0 ถึง 0.125) ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันของระบบมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและค่อยๆคงที่เข้าสู่ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันของอนุภาคนขนาดเล็กเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคนขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่ามากกว่า 0.125 ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันของระบบอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วงสั้นที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคนขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่าต่ำ ดังนั้น ถ้าสามารถหาสหสัมพันธ์ที่แยกทำนายในช่วงการเปลี่ยนแปลงอย่างมากของความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันของระบบ (dynamic) และช่วงการเปลี่ยนแปลงน้อย (static) อาจทำให้ผลการทำนายถูกต้องมากขึ้นในงานวิจัยนี้ไม่สามารถหาสหสัมพันธ์ที่ใช้ทำนายแต่ละช่วงได้เนื่องจากข้อมูลการทดลองไม่เพียงพอ

## บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงทางอุทกพลศาสตร์ในฟลูอิดไอซ์เบดสามวัฏภาคในระบบของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอซ์ชั้นในระบบของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิด สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เมื่อความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้นแล้ว ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอซ์ชั้นมีค่าลดลงในช่วงที่ความเร็วก๊าซมีค่าต่ำแต่มีค่าค่อนข้างคงที่ในช่วงที่ความเร็วก๊าซมีค่าสูง
2. ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอซ์ชั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่าต่ำ และมีค่าคงที่เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น
3. อัตราส่วนของขนาดอนุภาคมีผลน้อยมากต่อความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอซ์ชั้นเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่าต่ำ แต่เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็กมีค่าสูงพบว่าระบบของผสมที่มีอัตราส่วนของขนาดอนุภาคต่ำมีความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอซ์ชั้นสูงกว่า
4. สหสัมพันธ์ของค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอซ์ชั้นในระบบของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิดมีค่าความถูกต้อง ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.97

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf 1}} = \left[ \frac{U_{mf 2}}{U_{mf 1}} \right]^{x_2^{11.87}}$$

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอซ์ชั้นในระบบของผสมของอนุภาคของแข็งสองชนิดนั้น ควรออกแบบการทดลองให้มีการทดลองเพิ่มขึ้นในช่วงที่อนุภาคผสมมีสัดส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) ต่ำ เพื่อศึกษาและอธิบายการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอซ์ชั้นในระบบอนุภาคผสมได้ดีขึ้น เนื่องจากความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอซ์ชั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่าต่ำ แต่มีค่าคงที่และใกล้เคียงกับความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไอซ์ชั้นของอนุภาคขนาดเล็กเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

1. Yutani, N., Fan, L.T. and Too, J.R., 1983, "Behavior of Particles in A Liquid-Solids Fluidized Bed", **The American Institute of Chemical Engineers Journal**, Vol. 29, No.1, pp. 101-106.
2. Fan, L.S., Chern, S.H. and Muroyama, K., 1984, "Solids Mixing in A Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed Containing A Binary Mixture of Particles", **The American Institute of Chemical Engineers Journal**, Vol. 30, No.5, pp. 858-860.
3. Fan, L.S., Yamashita, T., and Jean, R.H., 1987, "Solids Mixing and Segregation in A Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed", **Chemical Engineering Science**, Vol. 42, No. 1, pp. 17-25.
4. Kang, Y., Woo, K.J., Ko, H.M. and Kim, S.D., 1997, "Particle Dispersion and Pressure Fluctuations in Three-Phase Fluidized Beds" ,**Chemical Engineering Science**, Vol.52, No. 21/22, pp. 3723-3732.
5. Cassanello, M., Larachi, F., Guy, C. and Chaouki, J., 1996,"Solids Mixing in A Gas-Liquid-Solid Fluidized Beds Experiments and Modelling", **Chemical Engineering Science**, Vol.51, No. 10, pp. 2011-2020.
6. Matsumoto, T., Hidaka, N., Takebayasi, Y. and Morooka, S., 1997, "Axial Mixing and Segregation in A Gas-Liquid-Solid Three-Phase Fluidized Bed of Solid Particles of Different Sizes and Densities", **Chemical Engineering Science**, Vol. 52, No. 21/22, pp. 3961-3970.
7. Fan, L.S., Matsuura, A. and Chern, S.H., 1985, "Hydrodynamic Characteristics of A Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed Containing A Binary Mixture of Particles", **The American Institute of Chemical Engineers Journal**, Vol. 31, No. 11, pp. 1801-1810.
8. Cheung, L., A. W. Nienow and P. N. Rowe, 1974, "Minimum Fluidization Velocity of a Binary Mixture of Different Sized Particles", **Chem. Eng. Sci.**, Vol. 29, pp. 1301-1303.

9. Noda, K., Uchida, S., Makino, T., and Kamo, H., 1986, "Minimum Fluidization Velocity of Binary Mixture of Particles with Large Size Ratio", **Powder Technology**, Vol. 46, pp. 149-154.
10. Chien-Song Chyang, Chen-Chung Kuo and May-Yann Chen, 1989, "Minimum Fluidization Velocity of Binary Mixtures", **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Vol. 67, pp. 344-347.
11. Wen, C.Y., and Yu, Y.H., 1966, "Mechanics of Fluidization", **Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.**, Vol. 62, pp. 100-111.
12. B. Formisani, 1991, "Packing and fluidization properties of binary mixtures of spherical particles", **Powder Technology**, Vol. 66, pp. 259-264.
13. Carman, P.C., 1973, **Trans. Inst. Chem. Engrs.**, Vol. 15, pp. 150.
14. Delebarre, A. B., Pavinato, A., Leroy, J.C., 1994, "Fluidization and mixing of solids distributed in size and density", **Powder Technology**, Vol. 80, pp. 227-233.
15. Goosens, W. R. A., Dumont, G. L. and Spaepen, G. L., 1971, **Chem, Eng. Progr. Symp. Ser.**, Vol 67, No. 116, pp. 38.
16. Thonglimp, V., Hiquily, N. and Laguerie, C., 1984, **Powder Technology**, Vol. 39, pp. 223.
17. Asif, M., Ibrahim, A. A., 2002, "Minimum fluidization velocity and defluidization behavior of binary-solid liquid-fluidized beds", **Powder Technology**, Vol. 126, pp. 241-254.
18. Ergen, S., 1952, **Chem. Eng. Prog.**, Vol. 48, pp. 88-94.
19. Huilin. Kue., Chen-Chung Kuo and May-Yann Chen, 2000, **Powder Technology**, Vol. 48, pp. 227.

20. Jean, R.H. and Fan, L.S., 1986, "A Simple Correlation for Solids Holdup in A Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed", **Chemical Engineering Science**, Vol.41, No.11, pp. 2823-2828.
21. Fan, L.T., Ho, T.C., Hiraoka, S. and Walawender, W.P., 1981, "Pressure Fluctuations in A Fluidized Bed", **The American Institute of Chemical Engineers Journal**, Vol. 27, No. 3, pp. 388-396.
22. Song, G.H., F. Bavarian, L.-S. Fan, R.D. Buttke, and L.B. Peck, 1987, paper presented at **AICHE Annual Meeting**, New York, Nov. pp. 15-20
23. Fan, L.S., 1989, Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering, Stoneham, **Butterworths**, pp. 3-161.
24. Kunii, D. and Levenspil, O., 1991, Fluidization Engineering, **Butterworths-Heinemann**, pp. 77- 79.
25. Wu, S.Y. and Baeyens, J., 1998, "Segregation by Size Difference in Gas Fluidized Beds", **Powder Technology**, Vol. 98, pp. 139-150.
26. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 2528, "ฟลูอิดไดเซชัน", สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 3- 4
27. Yang, W.C., 1995, "Handbook of Fluidization and Fluid-particle systems", **Butterworths**, pp. 21-22.
28. Epstein, N., "Handbook of Fluid-particle systems", **Butterworths**, pp. 729
29. Miura, H. and Kawase, Y., 1998, "Minimum liquid fluidization velocity in two- and three-phase fluidized beds with non-Newtonian fluids", **Powder Technology**, Vol. 97, pp. 124-128.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก.

ค่าความดันตกคร่อม และ  
ค่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน

ตารางที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่ความเร็วก๊าซค่าต่างๆ  
สำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:SN1440 ที่วัดด้วยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก  
( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125

Liquid velocity [cm/s]	Pressure drop [kPa]					
	0 cm/s	0.94 cm/s	1.93 cm/s	3.93 cm/s	5.88 cm/s	7.84 cm/s
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.09	0.03	0.03	0.04	0.07	0.10	0.06
0.23	0.08	0.08	0.10	0.12	0.17	0.12
0.29	0.10	0.10	0.12	0.17	0.20	0.16
0.36	0.12	0.12	0.15	0.21	0.22	0.19
0.42	0.14	0.16	0.16	0.23	0.25	0.22
0.48	0.16	0.17	0.19	0.24	0.26	0.23
0.54	0.18	0.19	0.22	0.26	0.26	0.24
0.61	0.19	0.22	0.24	0.28	0.27	0.28
0.86	0.30	0.31	0.36	0.30	0.34	0.33
1.11	0.40	0.37	0.41	0.35	0.42	0.40
1.48	0.54	0.51	0.46	0.48	0.51	0.49
1.98	0.65	0.56	0.57	0.56	0.59	0.56
2.48	0.67	0.61	0.61	0.59	0.62	0.60
3.14	0.70	0.60	0.61	0.59	0.63	0.59
3.49	0.70	0.60	0.62	0.58	0.62	0.58
3.84	0.70	0.60	0.63	0.59	0.60	0.54

ตารางที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่ความเร็วก๊าซค่าต่างๆ สำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:SN1440 ที่สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.5

Liquid velocity [cm/s]	Pressure drop [kPa]					
	0 cm/s	0.94 cm/s	1.93 cm/s	3.93 cm/s	5.88 cm/s	7.84 cm/s
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.09	-	0.06	0.08	0.07	0.07	0.08
0.23	0.11	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14
0.29	-	-	-	-	-	0.18
0.36	-	0.19	0.21	0.22	0.20	0.20
0.42	-	-	-	-	0.22	0.22
0.48	0.19	0.28	0.29	0.27	0.24	0.24
0.54	-	-	-	-	0.26	0.27
0.61	-	0.36	0.29	0.31	0.28	0.28
0.67	-	-	-	-	0.32	0.29
0.73	0.29	0.36	0.34	0.34	0.34	0.31
0.79	-	-	-	-	-	0.33
0.86	-	-	0.36	0.37	0.38	0.33
0.98	0.40	0.40	0.39	0.41	-	-
1.11	-	-	0.42	0.44	0.46	0.41
1.23	0.52	0.50	-	-	-	-
1.48	0.63	0.56	0.52	0.54	0.54	0.50
1.73	0.63	0.60	-	-	-	-
1.98	0.65	0.63	0.58	0.58	0.56	0.56
2.23	0.68	0.65	-	-	-	-
2.48	0.66	0.69	0.61	0.60	0.61	0.57
3.14	0.65	0.69	0.60	0.60	0.59	0.57
3.49	0.65	0.69	0.61	0.60	0.59	0.53
3.84	0.65	0.70	0.61	0.56	0.56	0.50

ตารางที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่ความเร็วก๊าซค่าต่างๆ  
สำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:SN1440 ที่สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก  
( $x_1$ ) เท่ากับ 0.875

Liquid velocity [cm/s]	Pressure drop [kPa]					
	0 cm/s	0.94 cm/s	1.93 cm/s	3.93 cm/s	5.88 cm/s	7.84 cm/s
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.09	0.04	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07
0.23	0.10	0.14	0.14	0.14	0.15	0.14
0.29	0.13	0.18	-	-	-	0.18
0.36	0.18	0.20	0.21	0.22	0.21	0.20
0.42	0.22	0.23	-	-	0.22	0.22
0.48	0.23	0.26	0.29	0.28	0.24	0.24
0.54	0.26	0.28	-	-	0.26	0.26
0.61	0.29	0.29	0.29	0.31	0.28	0.28
0.67	-	-	-	-	-	0.29
0.73	-	-	0.33	0.34	0.31	0.30
0.79	-	-	-	-	-	0.33
0.86	0.46	0.39	0.35	0.37	0.33	0.33
1.11	0.64	0.48	0.39	0.41	0.37	0.41
1.48	0.65	0.61	0.41	0.44	0.46	0.50
1.98	0.66	0.68	0.52	0.54	0.54	0.56
2.48	0.65	0.70	0.58	0.58	0.56	0.57
3.14	0.65	0.71	0.61	0.60	0.61	0.57
3.49	0.65	0.72	0.60	0.60	0.58	0.53
3.84	0.65	0.72	0.61	0.59	0.58	0.49
4.19	-	-	0.61	0.59	0.56	-
4.88	-	-	0.61	0.59	-	-

ตารางที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวสำหรับระบบอนุภาคผสม GB3000:GB750 ที่สัดส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) ค่าต่างๆ ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที

Liquid velocity [cm/s]	Pressure drop [kPa]			
	$x_1 = 0.125$	$x_1 = 0.5$	$x_1 = 0.875$	$x_1 = 1$
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.09	-	0.10	0.12	0.16
0.23	0.14	0.21	0.26	0.22
0.29	-	0.43	0.27	0.24
0.36	-	-	-	0.28
0.42	-	-	0.28	0.28
0.48	0.26	0.46	-	0.36
0.73	0.36	0.46	-	0.41
0.98	-	0.53	0.39	0.48
1.11	0.44	-	-	-
1.23	-	0.57	-	0.49
1.48	-	0.57	0.44	0.48
1.73	0.52	0.58	0.43	0.48
1.98	-	0.58	0.43	-
2.23	0.57	0.58	-	-
3.49	0.59	-	-	-
4.19	0.57	-	-	-

ตารางที่ ก.5 ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาค GB3000:SN1440 และ GB3000:GB750 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที

$x_1$	Minimum fluidization velocity [cm/s]	
	GB3000:SN1440	GB3000:GB750
1	1.07	0.67
0.875	1.02	0.65
0.5	1.03	0.63
0.125	1.05	1.1
0	3.05	3.05

ตารางที่ ก.6 ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันที่ได้จากการทดลองสำหรับอนุภาค GB3000:SN1440 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0, 0.94, 1.93, 3.93, 5.88 และ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที

$x_1$	Minimum fluidization velocity [cm/s]					
	0 cm/s	0.94 cm/s	1.93 cm/s	3.92 cm/s	5.88 cm/s	7.84 cm/s
1	1.53	1.2	1.08	1.07	1	0.9
0.875	1.45	1.23	1.03	1.02	1.01	0.98
0.5	1.55	1.26	1.05	1.03	1.02	0.98
0.125	2.07	1.71	1.45	1.05	1.09	1.14
0	3.48	3.34	3.35	3.05	2.98	3.05

ตารางที่ ก.7 ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์ที่ใช้ข้อมูลของการทดลอง สำหรับอนุภาค GB3000:SN1440 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0.94, 1.93, 3.93, 5.88 และ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที

$x_1$	Minimum fluidization velocity [cm/s]				
	0.94 cm/s	1.93 cm/s	3.92 cm/s	5.88 cm/s	7.84 cm/s
1	1.2	1.08	1.07	1	0.9
0.875	1.2	1.08	1.07	1	0.9
0.5	1.2	1.08	1.07	1	0.9
0.125	1.48	1.36	1.33	1.25	1.16
0	3.38	3.34	3.05	2.98	3.05

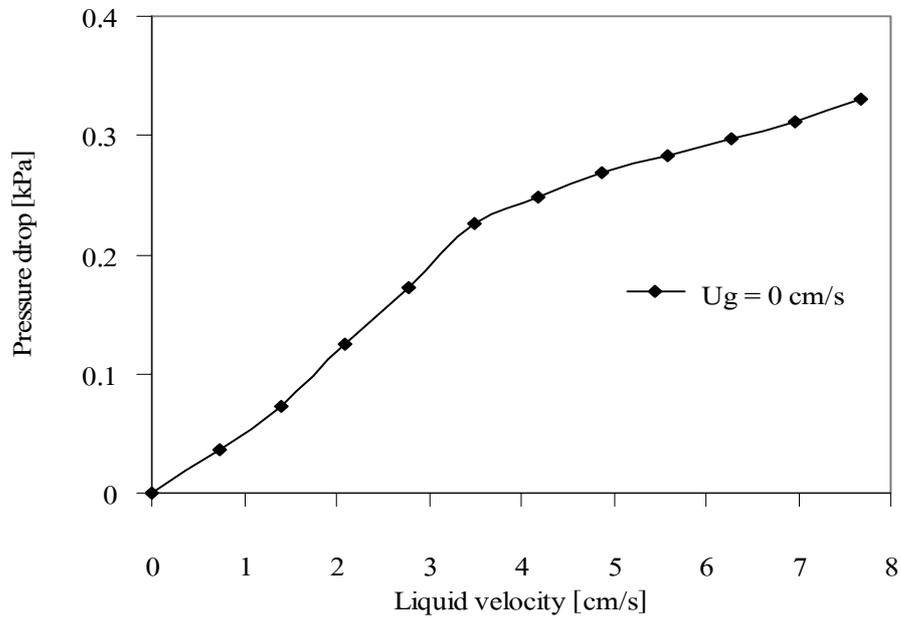
ตารางที่ ก.8 ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันที่คำนวณได้จากสหสัมพันธ์ที่ใช้ข้อมูลของการคำนวณ สำหรับอนุภาค GB3000:SN1440 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0.94, 1.93, 3.93, 5.88 และ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที

$x_1$	Minimum fluidization velocity [cm/s]				
	0.94 cm/s	1.93 cm/s	3.92 cm/s	5.88 cm/s	7.84 cm/s
1	1.26	1.19	1.09	1.03	0.98
0.875	1.26	1.19	1.11	1.05	0.99
0.5	1.26	1.19	1.11	1.05	0.99
0.125	1.46	1.37	1.25	1.17	1.11
0	2.56	2.36	2.12	1.95	1.82

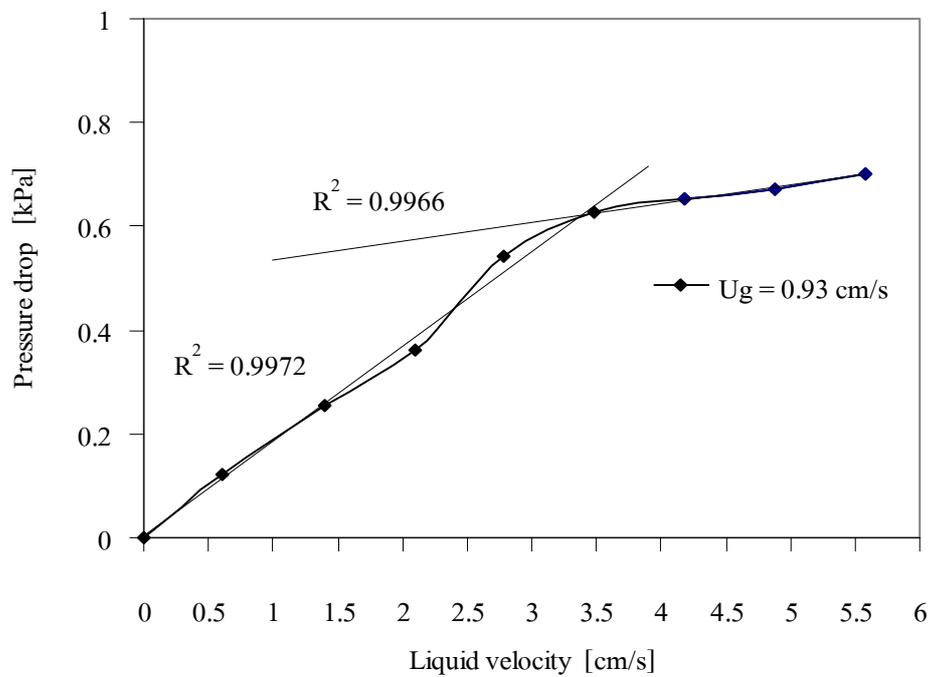
## ภาคผนวก ข

กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลว

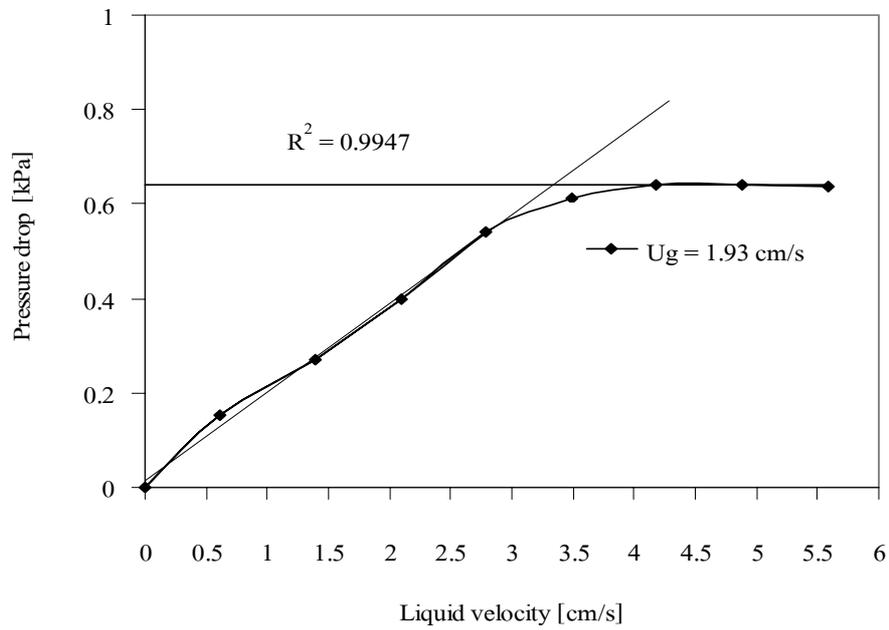
ข.1 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวสำหรับระบบอนุภาค GB3000:SN1440



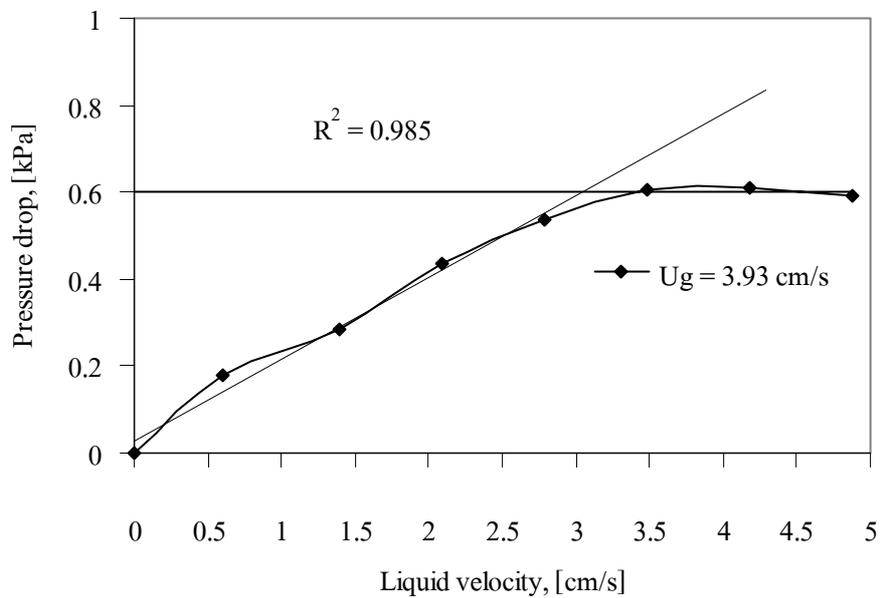
รูปที่ ข.1 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0 เซนติเมตรต่อวินาที



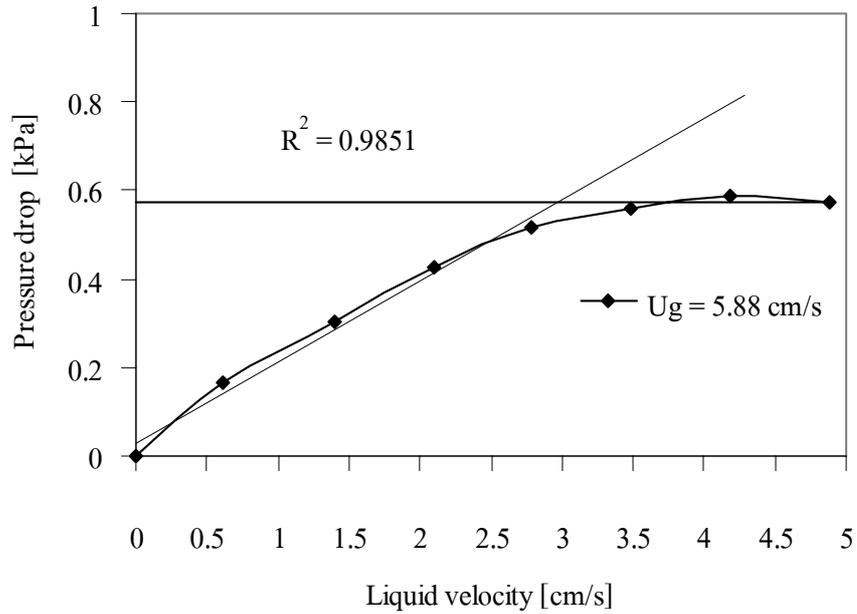
รูปที่ ข.2 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0.94 เซนติเมตรต่อวินาที



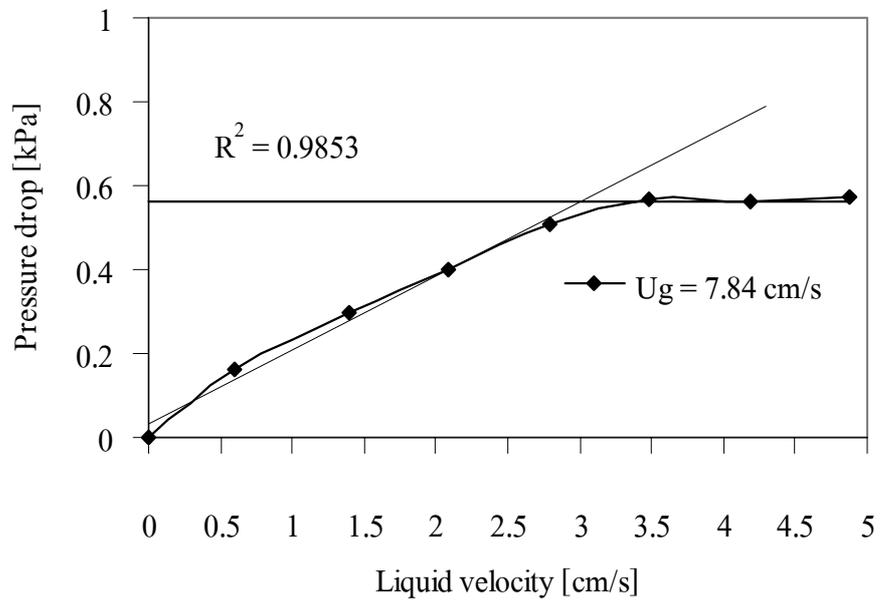
รูปที่ ข.3 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วยของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 1.93 เซนติเมตรต่อวินาที



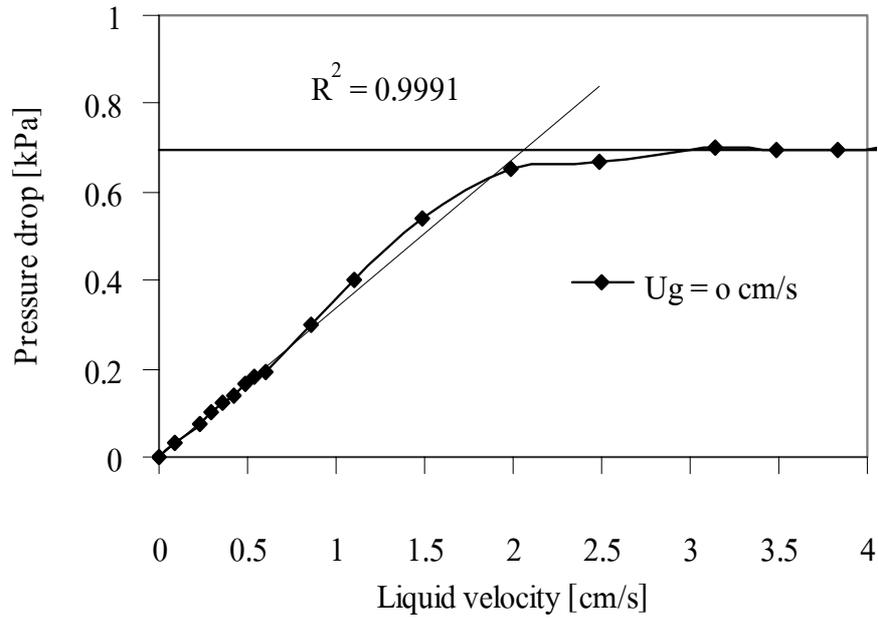
รูปที่ ข.4 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วยของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที



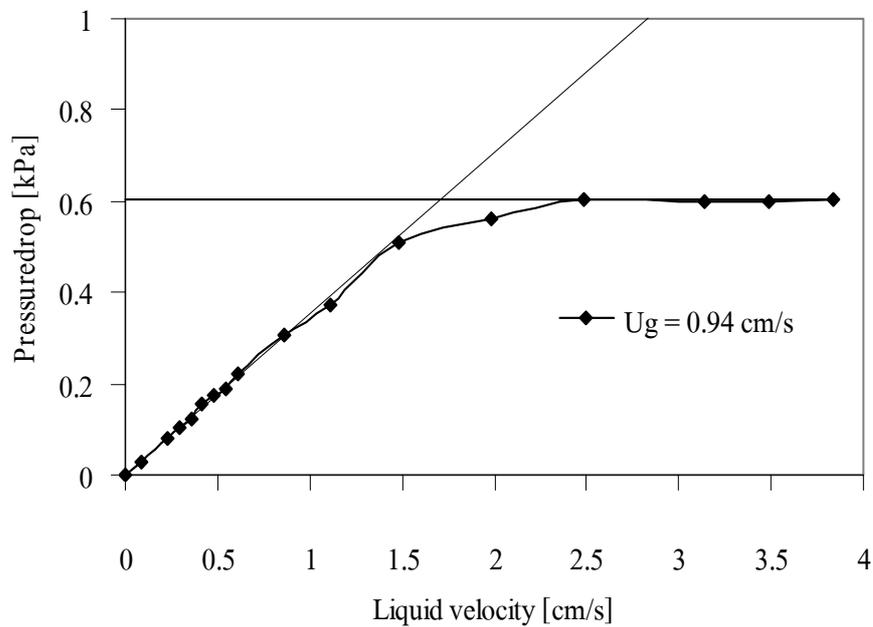
รูปที่ ข.5 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วน โดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 5.88 เซนติเมตรต่อวินาที



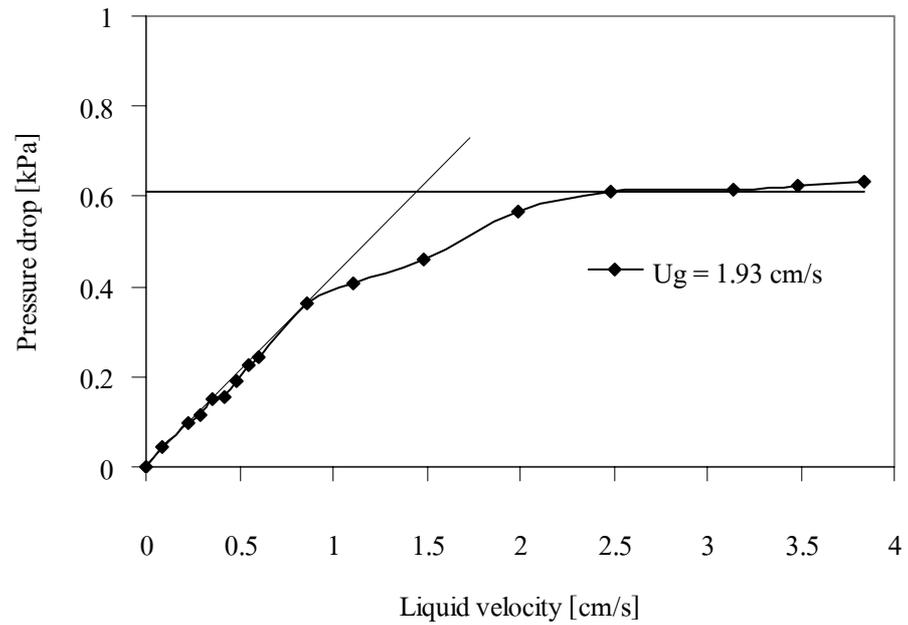
รูปที่ ข.6 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วน โดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที



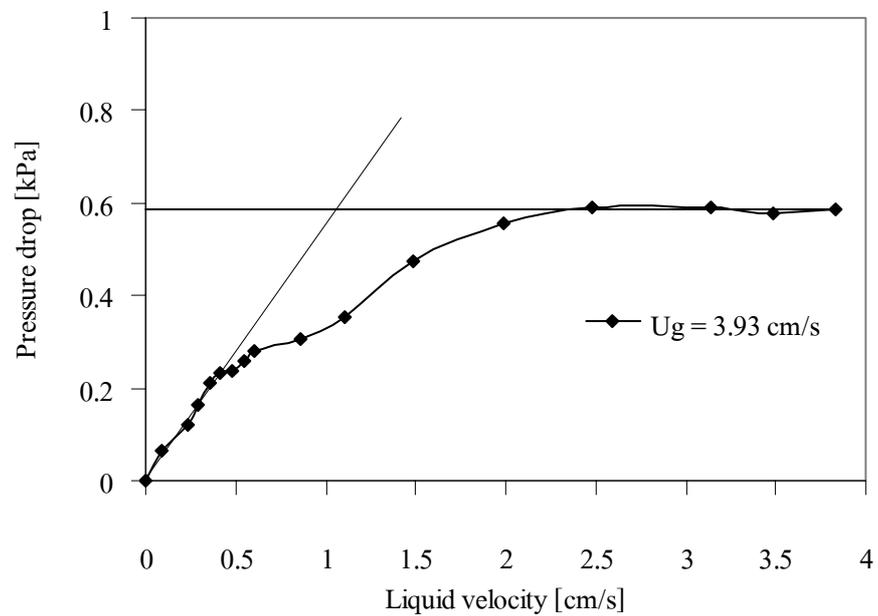
รูปที่ ข.7 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0 เซนติเมตรต่อวินาที



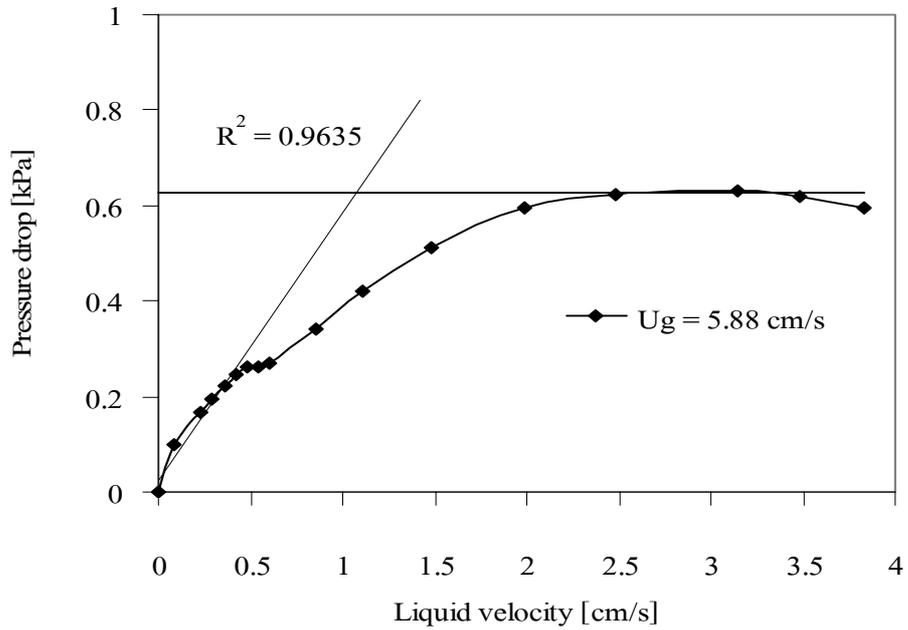
รูปที่ ข.8 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0.94 เซนติเมตรต่อวินาที



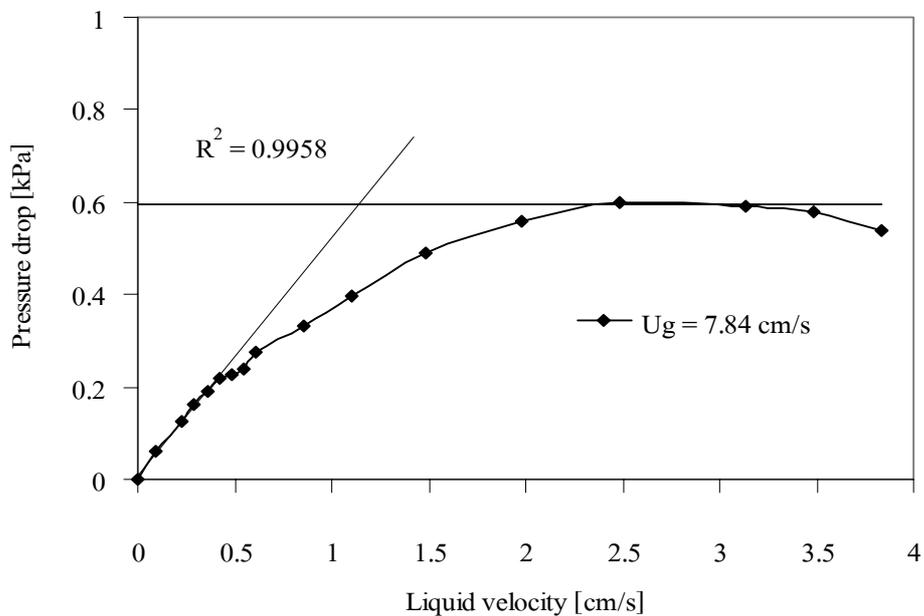
รูปที่ ข.9 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วน โดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 1.93 เซนติเมตรต่อวินาที



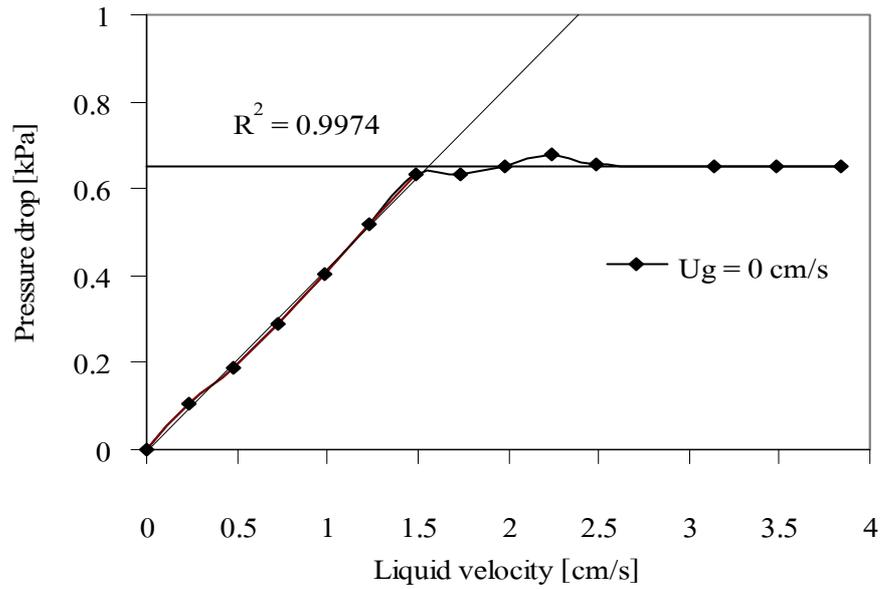
รูปที่ ข.10 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วน โดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที



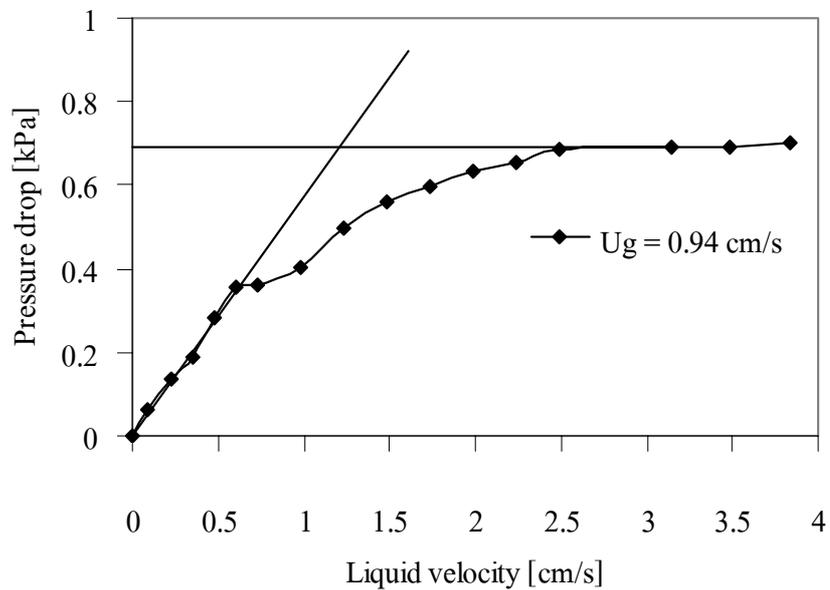
รูปที่ ข.11 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 5.88 เซนติเมตรต่อวินาที



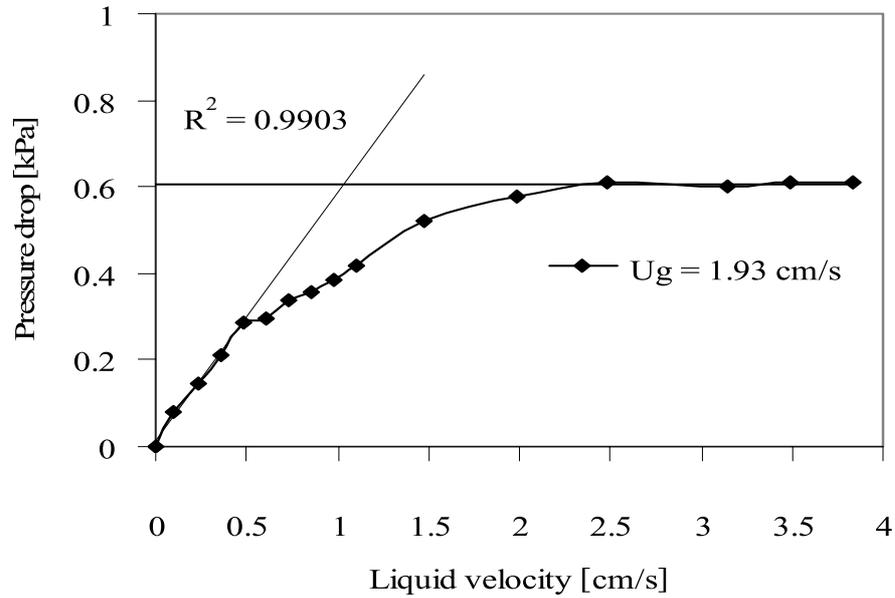
รูปที่ ข.12 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที



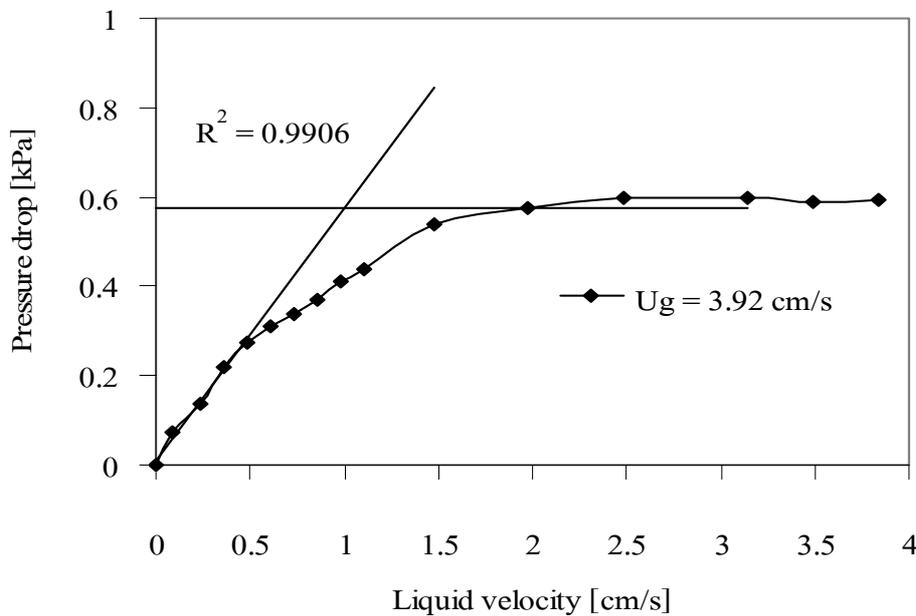
รูปที่ ข.13 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.5 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0 เซนติเมตรต่อวินาที



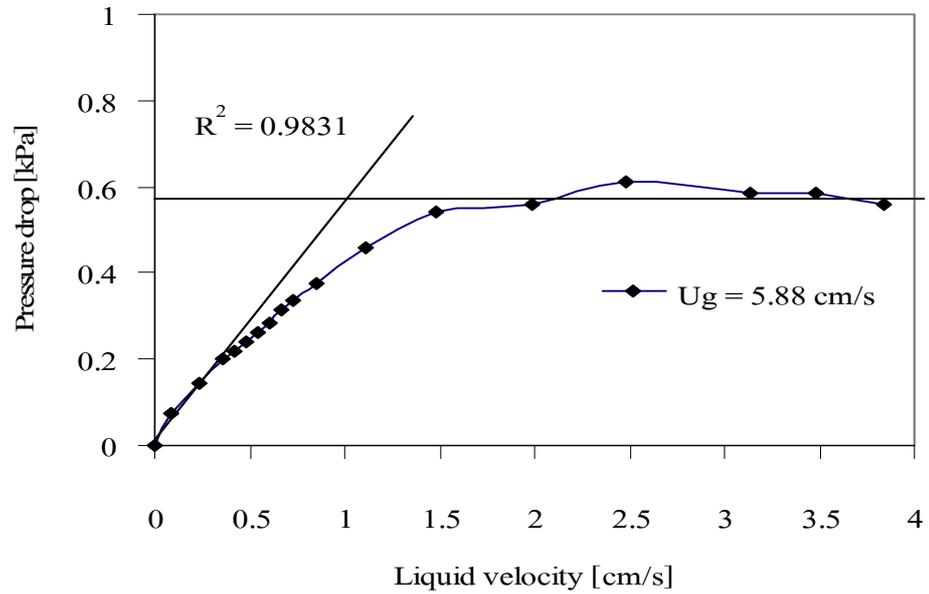
รูปที่ ข.14 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.5 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0.94 เซนติเมตรต่อวินาที



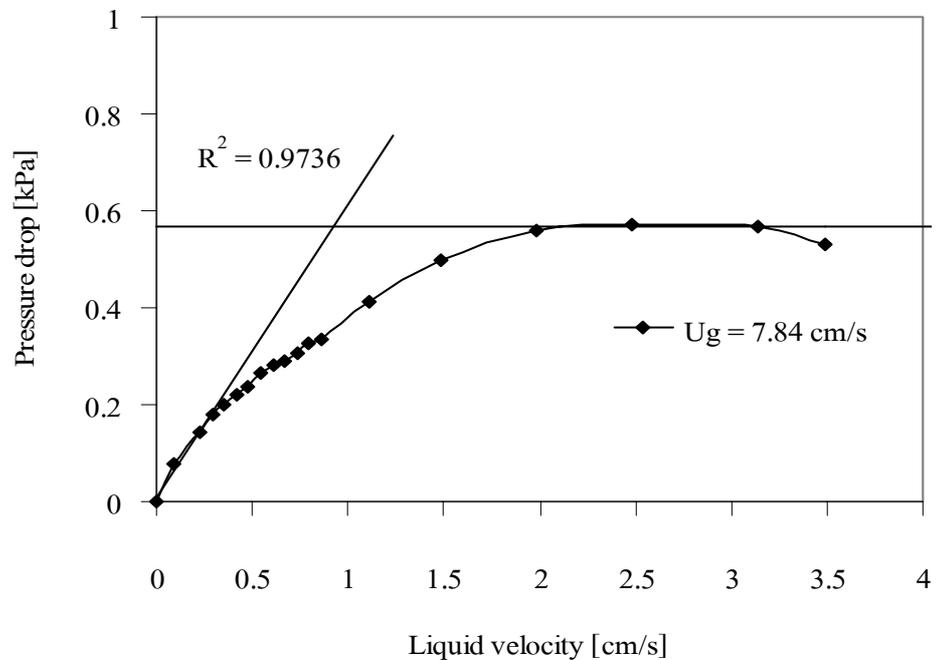
รูปที่ ข.15 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.5 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 1.93 เซนติเมตรต่อวินาที



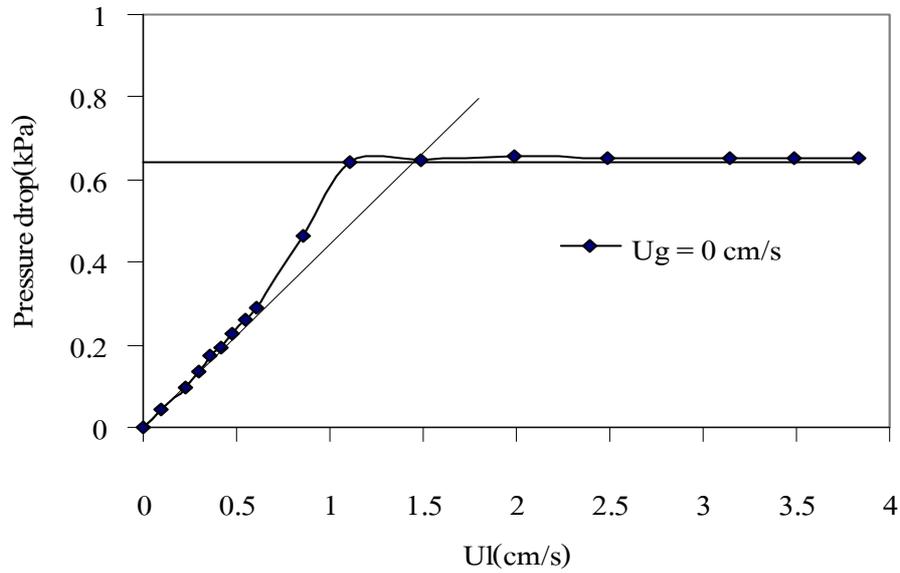
รูปที่ ข.16 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.5 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที



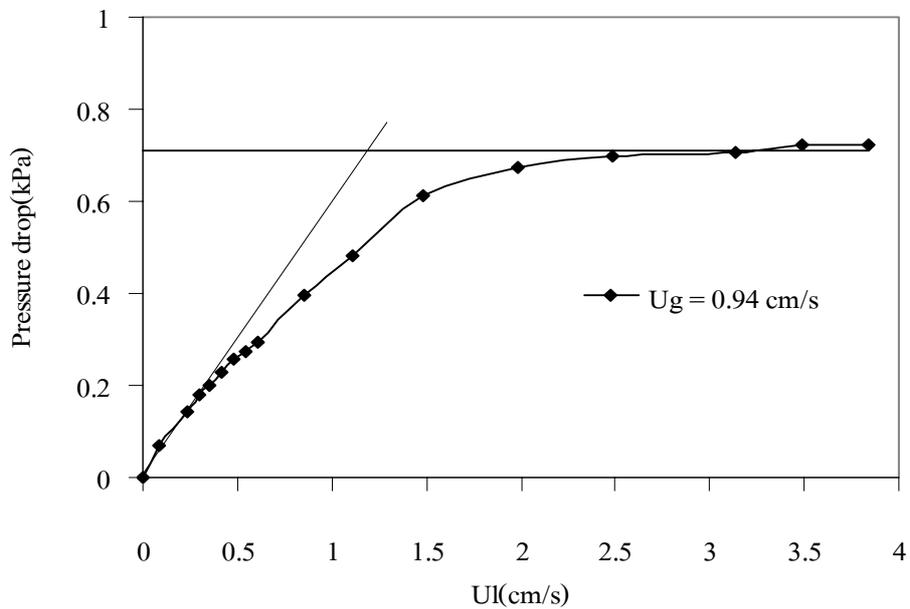
รูปที่ ข.17 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.5 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 5.88 เซนติเมตรต่อวินาที



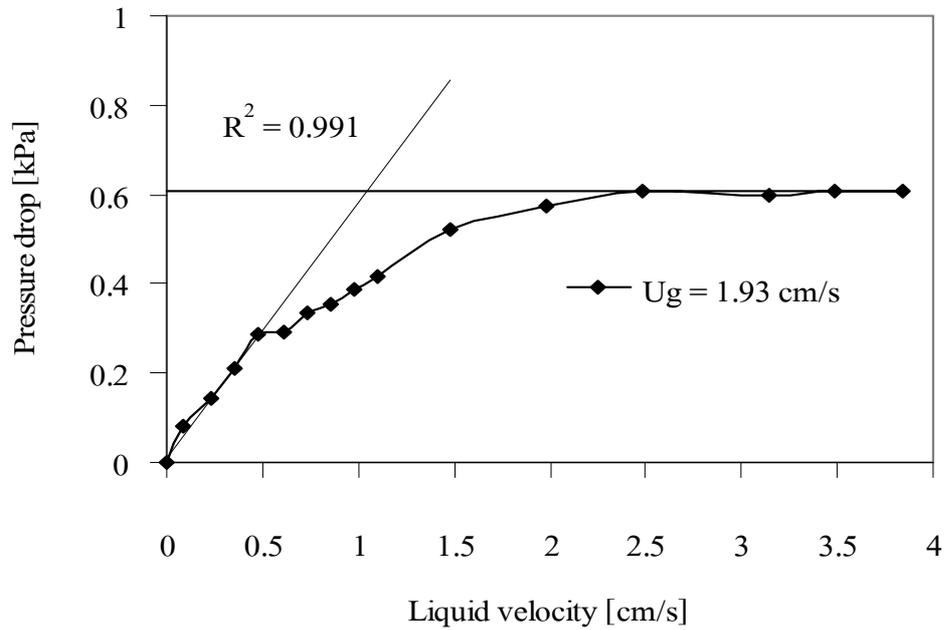
รูปที่ ข.18 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.5 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที



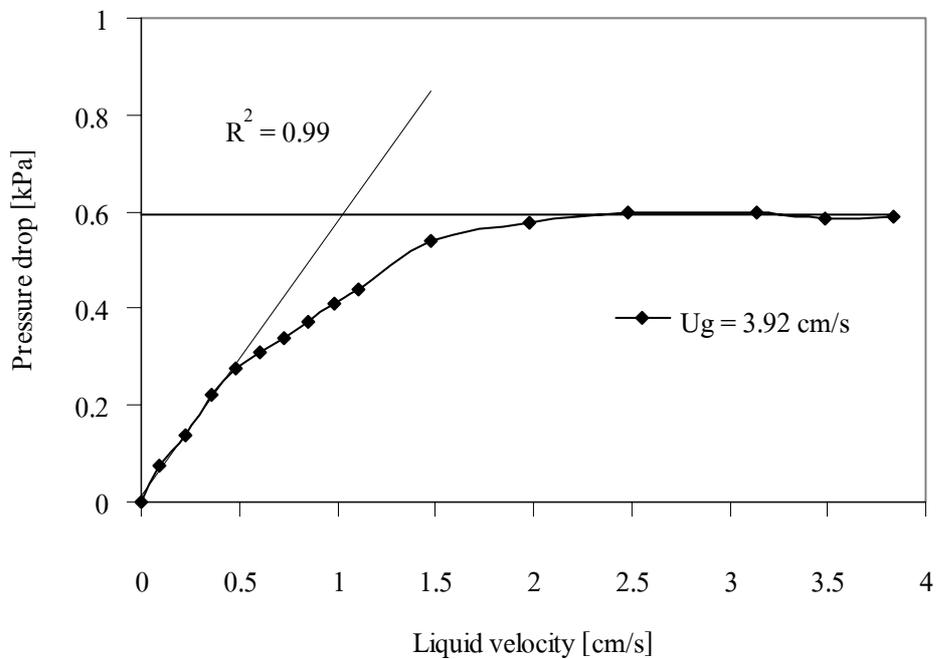
รูปที่ ข.19 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.875 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0 เซนติเมตรต่อวินาที



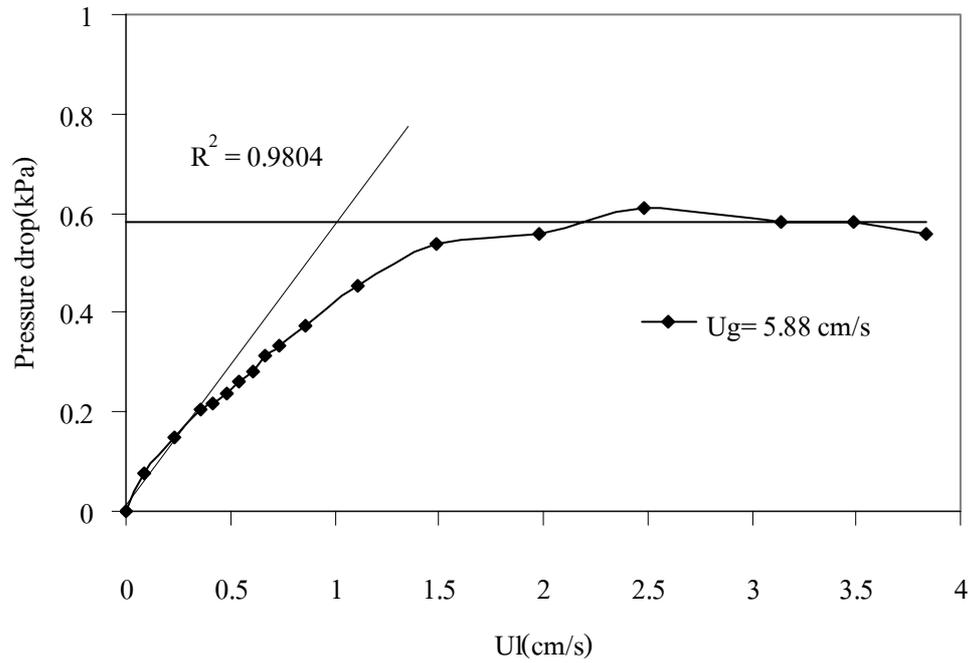
รูปที่ ข.20 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.875 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0.94 เซนติเมตรต่อวินาที



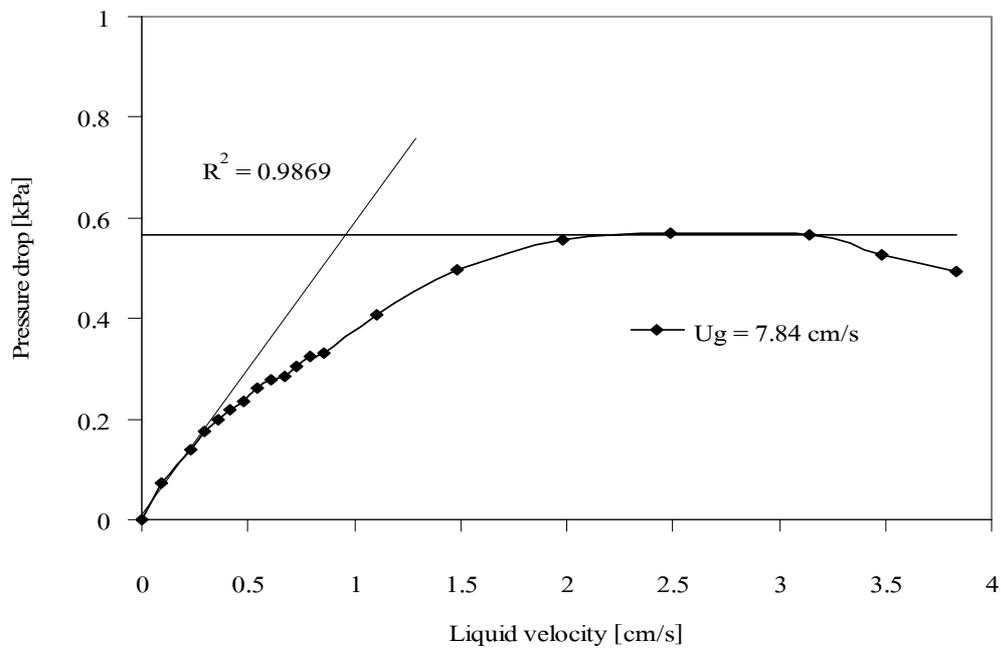
รูปที่ ข.21 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็ของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.875 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 1.93 เซนติเมตรต่อวินาที



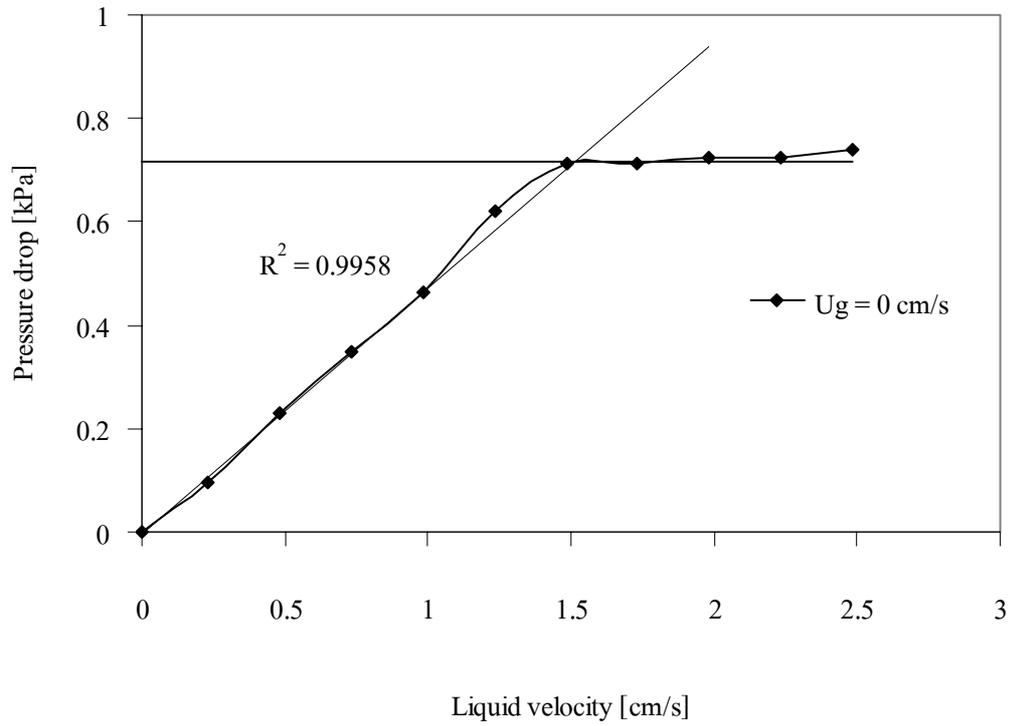
รูปที่ ข.22 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็ของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.875 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที



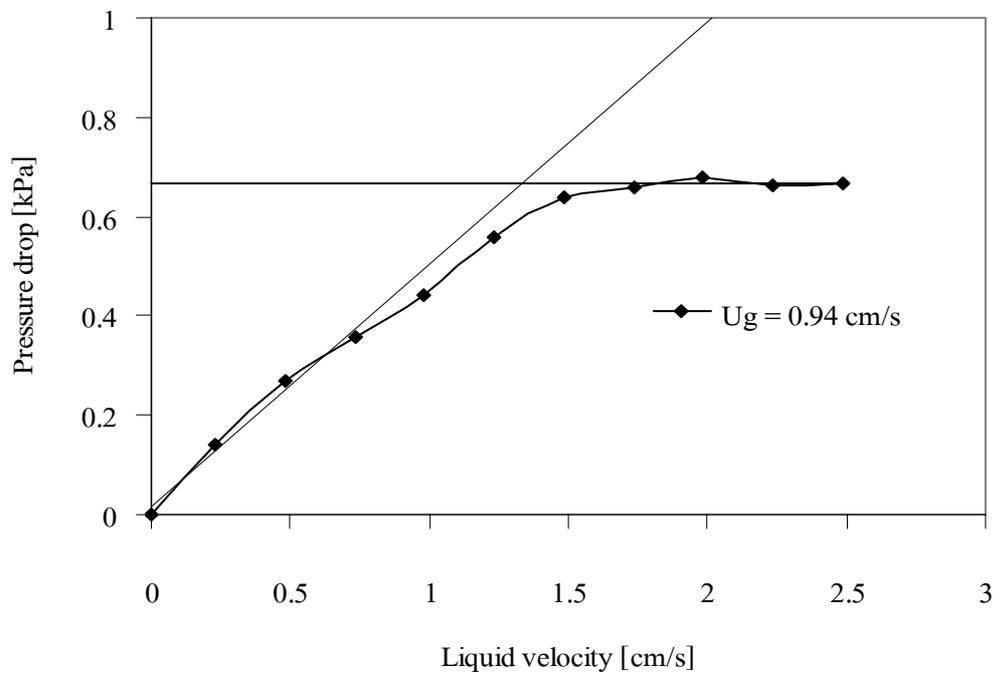
รูปที่ ข.23 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.875 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 5.88 เซนติเมตรต่อวินาที



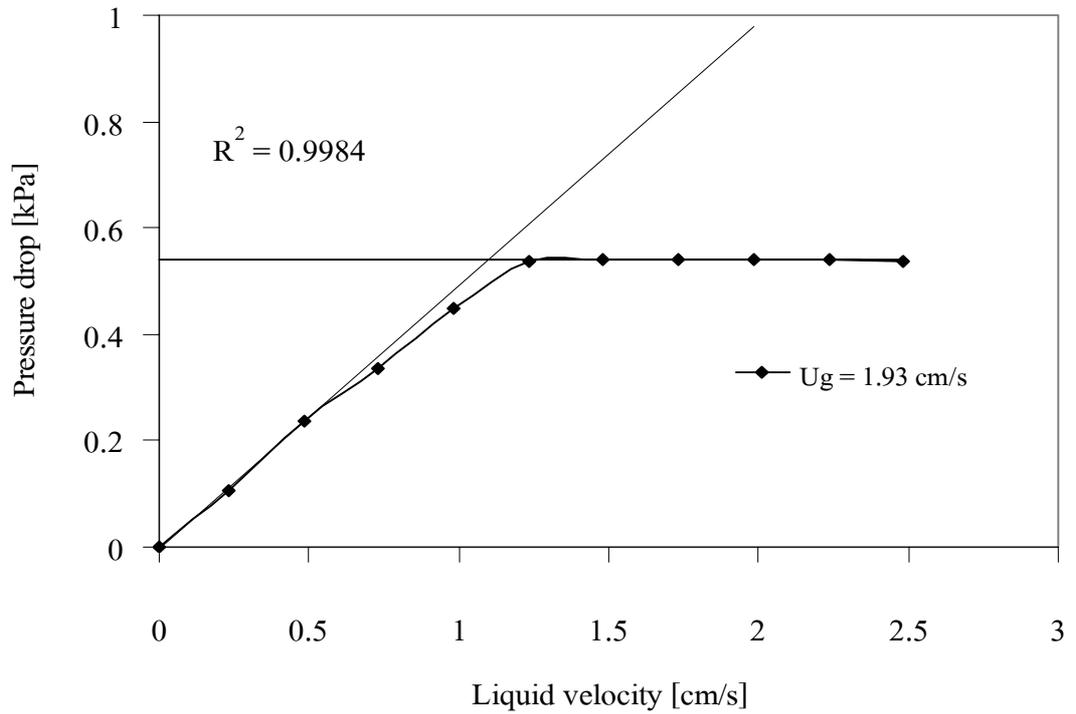
รูปที่ ข.24 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.875 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที



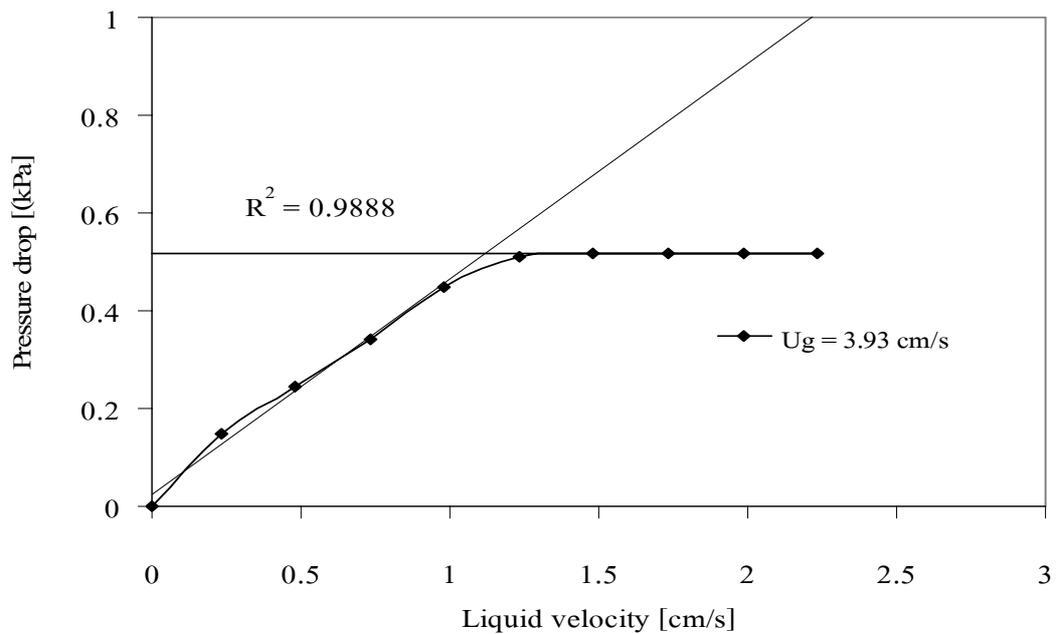
รูปที่ ข.25 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 1 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0 เซนติเมตรต่อวินาที



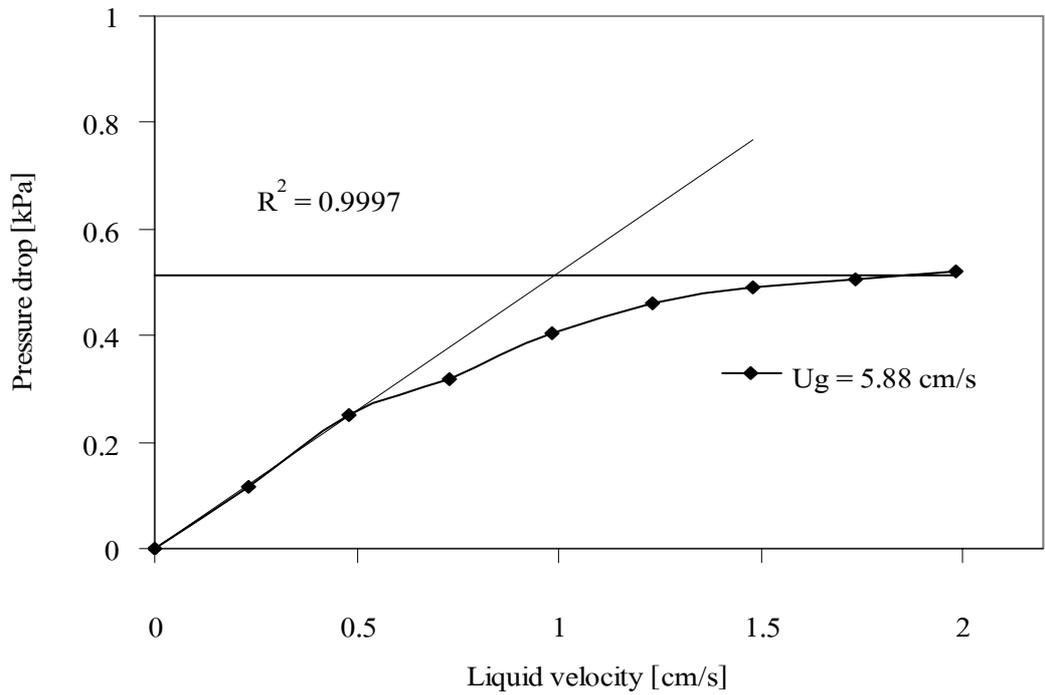
รูปที่ ข.26 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 1 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0.94 เซนติเมตรต่อวินาที



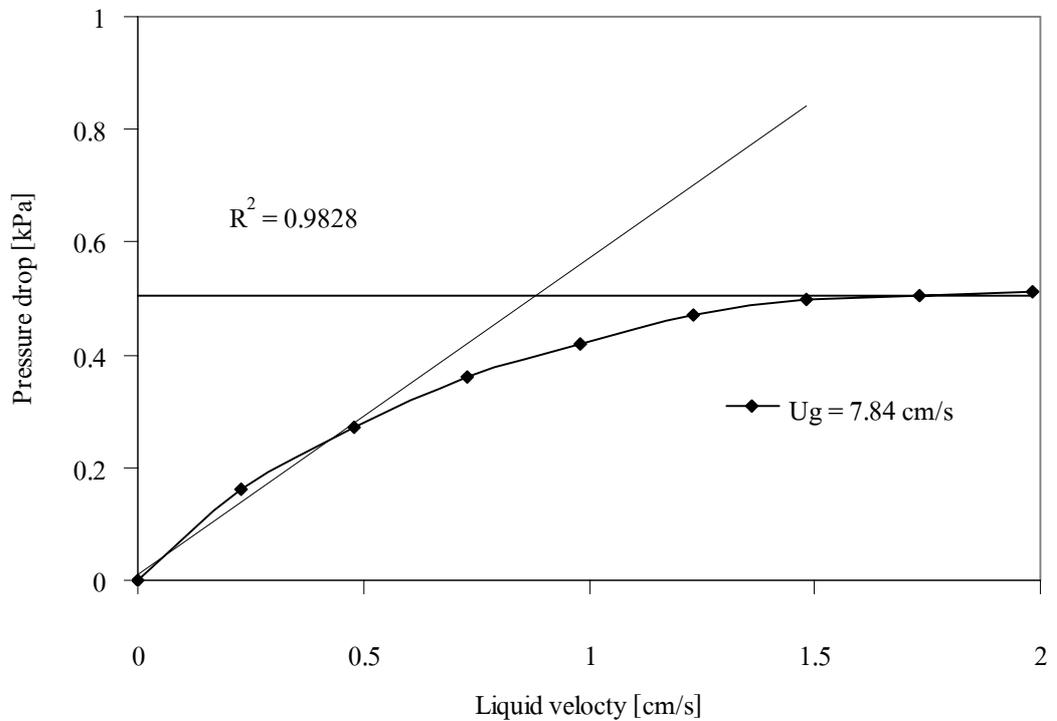
รูปที่ ข.27 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 1 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 1.93 เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ ข.28 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 1 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที

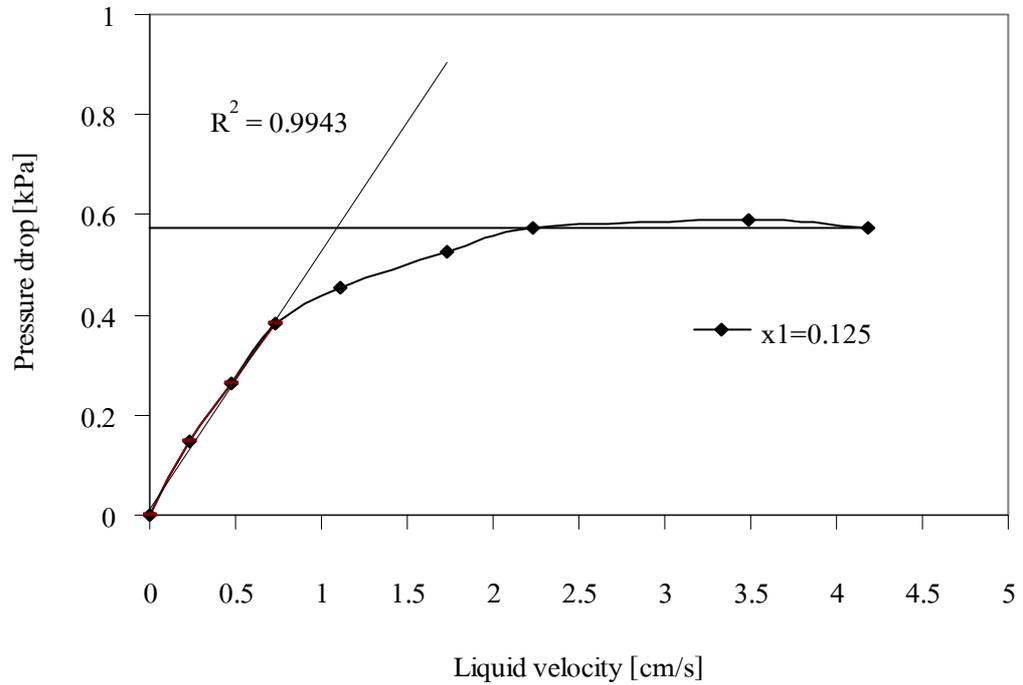


รูปที่ ข.29 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 1 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 5.88 เซนติเมตรต่อวินาที

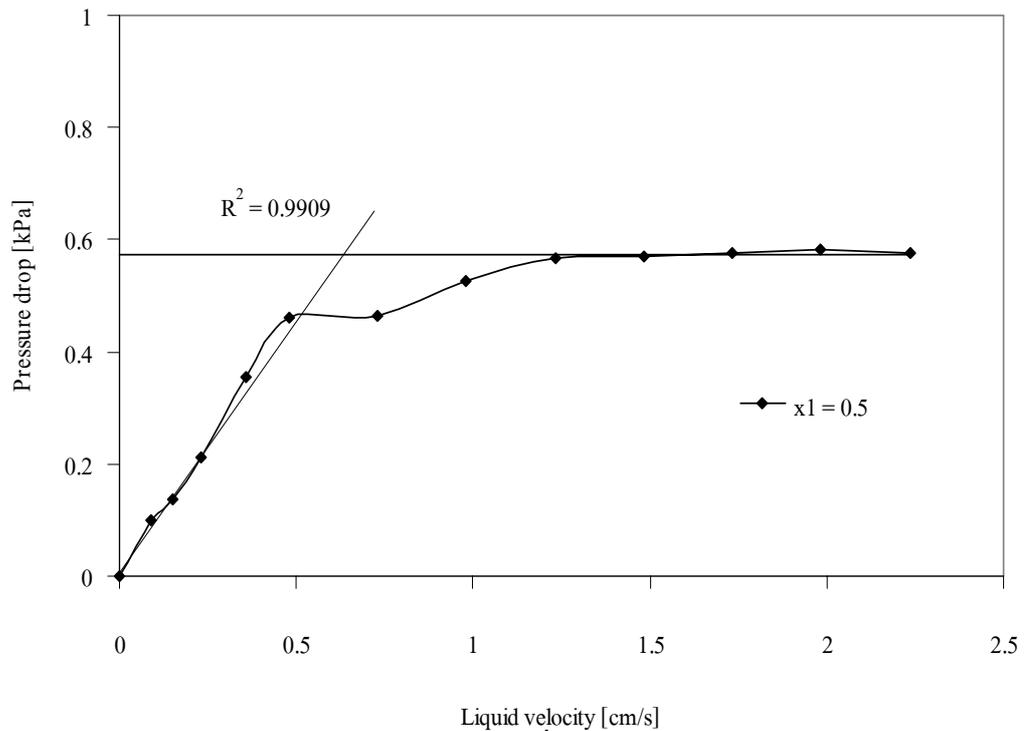


รูปที่ ข.30 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 1 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 7.84 เซนติเมตรต่อวินาที

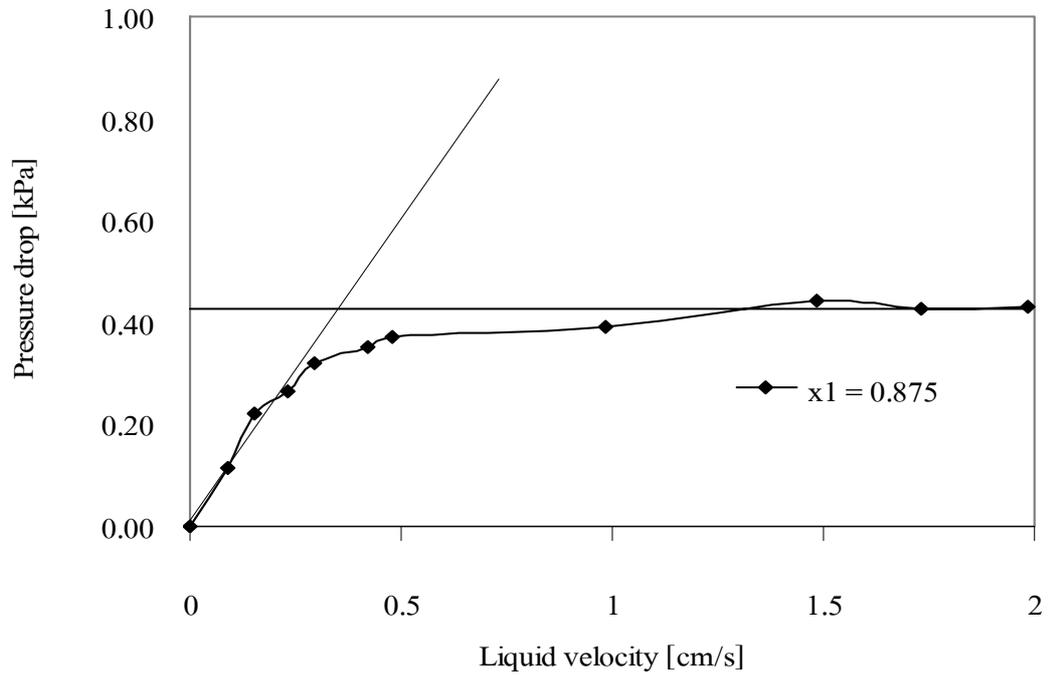
## ข.2 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวสำหรับระบบอนุภาค GB3000:GB750



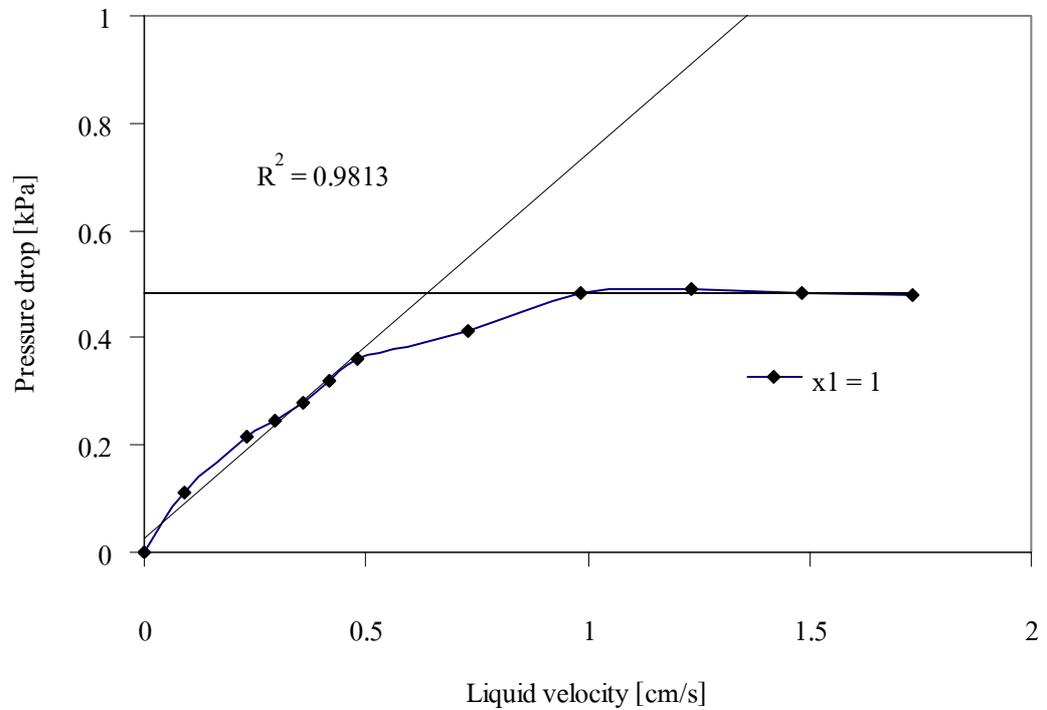
รูปที่ ข.31 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ ข.32 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็วของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.5 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ ข.33 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็ของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.875 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ ข.34 กราฟความดันตกคร่อมกับความเร็ของเหลวที่อัตราส่วนโดยมวลของอนุภาคนาขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 1 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 3.93 เซนติเมตรต่อวินาที

## ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน

**ตัวอย่างการคำนวณความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันในฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาค  
ของของผสมของอนุภาคสองชนิด**

การหาความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไดเซชันสำหรับระบบของผสมระหว่าง เม็ดแก้วขนาด 3,000 ไมโครเมตร และทรายขนาด 1,440 ไมโครเมตร ใช้สัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดเล็ก ( $x_1$ ) เท่ากับ 0.125 ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0.94 เซนติเมตรต่อวินาที

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

1.  $\rho_1 = 1,000 \text{ kg/m}^3$
2.  $\mu_1 = 0.00098 \text{ kg/m.s}$
3.  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

1. หาความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไดเซชันในสถานะของแข็ง-ของเหลว

ในกรณี อนุภาคของแข็ง คือ ทรายขนาด 1,440 ไมโครเมตร ความหนาแน่นเท่ากับ 2,633 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากสหสัมพันธ์ของ Wen และ Yu [11]

$$Re_{mfo} = [33.7^2 + 0.0408 Ar_l]^{\frac{1}{2}} - 33.7$$

$U_{mfo}$  = ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดในสถานะของแข็ง-ของเหลว [cm/s]

$U_l$  = ความเร็วของเหลว [เซนติเมตรต่อวินาที]

$\mu_1$  = ความหนืดของของเหลว [กิโลกรัม/เมตร-ชั่วโมง]

$d_e$  = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของอนุภาค [เซนติเมตร]

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร]

$\rho_1$  = ความหนาแน่นของของเหลว [กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร]

เมื่อ

$$Ar_l = \frac{D_p^3 \rho_l (\rho_s - \rho_l) g}{\mu_l^2}$$

$$Ar_l = \frac{(1,440 * 10^{-6})^3 (1,000)(2,633 - 1,000)(9.8)}{(9.8 * 10^{-4})^2}$$

$$Ar_l = 49,756.244$$

แต่  $Re_{mfo} = [33.7^2 + 0.0408Ar]^{1/2} - 33.7$

จะได้  $Re_{mfo} = [33.7^2 + (0.0408 * 49,756.244)]^{1/2} - 33.7$

ดังนั้น  $Re_{mfo} = 22.75$

แต่  $Re_{mfo} = \frac{\rho_l U_{mfo} D_p}{\mu_l}$

ดังนั้น  $U_{mfo} = \frac{Re_{mfo} \cdot \mu}{\rho_l \cdot D_p} = \frac{(22.75)(9.8 * 10^{-4})}{1,000 * (1,440 * 10^{-6})}$

$$= 0.01548 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$= 1.548 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

2. หาความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไดเซชันในสภาวะของแข็ง-ของเหลว-ก๊าซ

ในกรณีอนุภาคของแข็ง คือ ทรายขนาด 1,440 ไมโครเมตร

ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับ 0.94 เซนติเมตรต่อวินาที

จากสหสัมพันธ์ของ Song และคณะ[22]

$$\frac{U_{mfi}}{U_{mf0}} = 1 - 376 U_g^{0.327} \mu_l^{0.227} d_e^{0.213} (\rho_s - \rho_l)^{-0.423}$$

$$\frac{U_{mfi}}{0.01548} = 1 - 376(0.0094^{0.327})(0.0098^{0.227})(0.00144^{0.213})(2,633 - 1,000)^{-0.423}$$

$$U_{mfi} = 0.0126 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$U_{mfi} = 1.26 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

ในกรณีการหาความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไดเซชันในสภาวะของแข็ง-ของเหลว และ ในสภาวะของแข็ง-ของเหลว-ก๊าซ สำหรับเม็ดแก้วขนาด 3,000 ไมโครเมตร ความหนาแน่นเท่ากับ 2,504 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีขั้นตอนการคำนวณเหมือนดังข้อ 1. และ 2. ได้ค่า  $U_{mf0} = 3.29$  เซนติเมตรต่อวินาที และ ค่า  $U_{mfi} = 2.56$  เซนติเมตรต่อวินาที

3. หาความเร็วต่ำสุดฟลูอิดไดเซชันในสภาวะของแข็ง-ของเหลว-ก๊าซ (ระบบของผสมของอนุภาค)

จากสหสัมพันธ์ที่ได้จากงานวิจัยนี้

$$\frac{U_{mf}}{U_{mf1}} = \left[ \frac{U_{mf2}}{U_{mf1}} \right]^{x_2^{11.87}}$$

โดย  $U_{mf}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับระบบอนุภาคผสม [เซนติเมตรต่อวินาที]

$U_{mf1}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก [เซนติเมตรต่อวินาที]

$U_{mf2}$  คือ ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่ [เซนติเมตรต่อวินาที]

$x_2$  คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของอนุภาคขนาดใหญ่

ดังนั้น  $U_{mf1} = 1.26$  เซนติเมตรต่อวินาที

$U_{mf2} = 2.56$  เซนติเมตรต่อวินาที

$$\begin{aligned} x_2 &= 1 - x_1 \\ &= 1 - 0.125 \\ &= 0.875 \end{aligned}$$

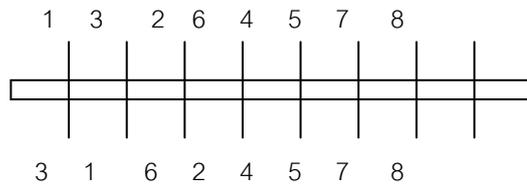
ดังนั้น  $\frac{U_{mf}}{1.26} = \left[ \frac{2.56}{1.26} \right]^{0.875^{11.87}}$

$U_{mf} = 1.46$  เซนติเมตรต่อวินาที

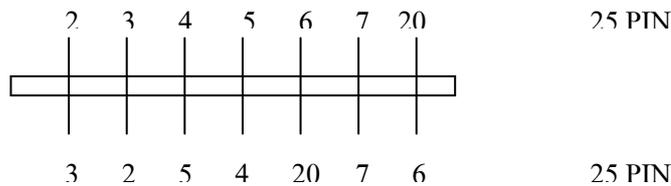
## ภาคผนวก ง

การเชื่อมต่อสาย RS-232C ระหว่างเครื่องบันทึกข้อมูลกับเครื่องคอมพิวเตอร์  
และผลการสอบเทียบเครื่อง Pressure transducer

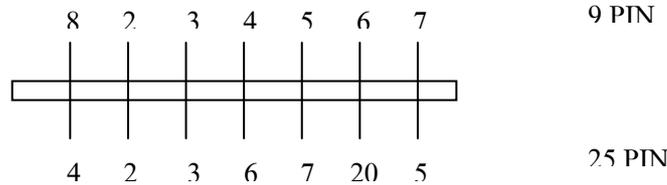
ในการควบคุมเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ยี่ห้อ Yokokawa รุ่น LR4100 ด้วยโปรแกรม LR Soft version 1.10 ที่ติดตั้งภายในเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของความดันตกคร่อมเบด โดยการต่อสาย RS-232C เชื่อมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ มีลักษณะการเชื่อมต่อของสายแต่ละหมุดเข็ม (pin) ดังนี้



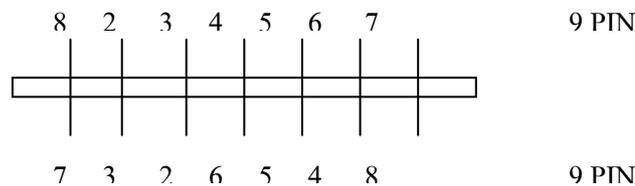
1. 25 PIN กับ 25 PIN



2. 9 PIN กับ 25 PIN



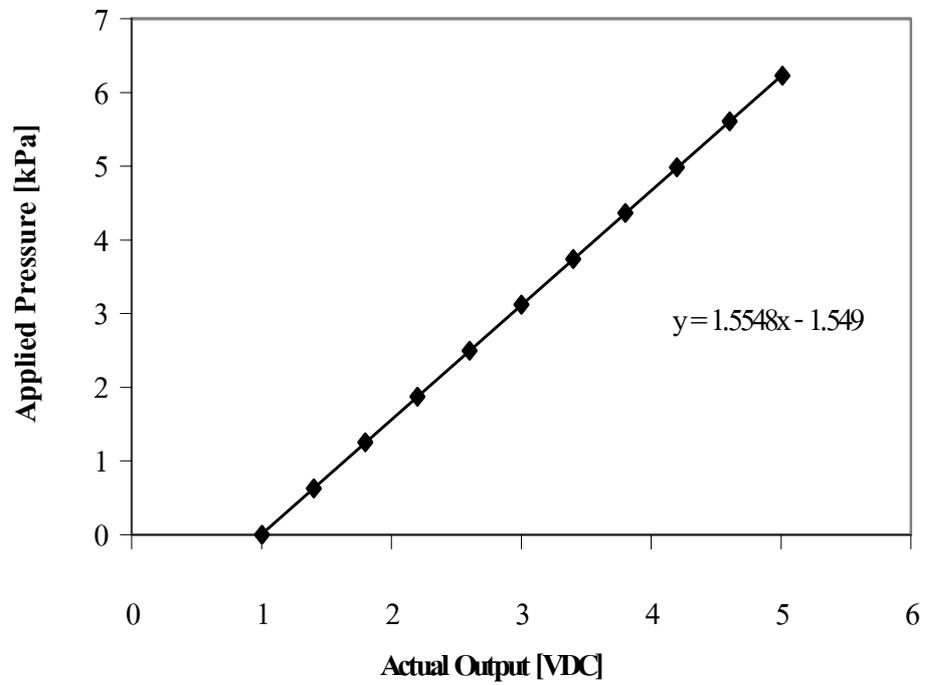
3. 9 PIN กับ 9 PIN



บริษัท Yokogawa(Thailand)  
 เบอร์โทร 02-3810071 ต่อ 460  
034-471917-8

ตารางที่ ง.1 ผลการสอบเทียบเครื่อง Pressure transducer

Applied Pressure	Actual output
kPa	VDC
0.0000	1.004
0.6318	1.402
1.2538	1.8
1.8757	2.201
2.4977	2.601
3.1196	3.001
3.7416	3.401
4.3636	3.801
4.9856	4.199
5.6076	4.604
6.2296	5.01



รูปที่ ง.1 ผลการสอบเทียบเครื่อง Pressure transducer

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายไพโรจน์ ชูเกียรติสกุลกาล
วัน เดือน ปีเกิด	18 มิถุนายน 2523
ประวัติการศึกษา	
ระดับมัธยมศึกษา	ระยองมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนทิวธาภิเษก พ.ศ. 2540
ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2544
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2549

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์

12 ธ.ค. 2550

วันที่ 11 มิถุนายน 2550

ข้าพเจ้า นายไพโรจน์ ชูเกียรติสกุลกาล รหัสประจำตัว 45400024 เป็นนักศึกษาของ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา  โท  เอก  
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
อยู่บ้านเลขที่ 2/21 ถนนสุขาภิบาล 1 ซอยบุญมี ตำบลบางแค อำเภอบางแค จังหวัดกรุงเทพฯ  
10160 ขอโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี  
รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์ ตำแหน่ง คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลง  
ดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดโคเซชันในฟลูอิดโคซ์เบด  
สามภูมิภาคของของผสมของอนุภาคสองชนิด โดยซึ่งอยู่ในความควบคุมของ รศ.ดร.สุภาภรณ์  
ด็กกลาส ตามมาตรา 14 แห่งพ.ร.บ. ลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าใน  
วิทยานิพนธ์ให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งความคุ้มครอง  
ลิขสิทธิ์ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับการอนุมัติโครงร่าง  
วิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

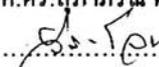
3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆก็ตาม  
ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุก  
ครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่หรืออนุญาตให้ผู้อื่น  
ทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28, มาตรา  
29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะ  
กระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า  
ธนบุรี

ลงชื่อ นายไพโรจน์ ชูเกียรติสกุลกาล..... ผู้โอนลิขสิทธิ์  
(นายไพโรจน์ ชูเกียรติสกุลกาล)

ลงชื่อ  ผู้รับโอนลิขสิทธิ์  
(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ  พยาน  
(รศ.ดร.สุภาภรณ์ ด็กกลาส)

ลงชื่อ  พยาน  
(ผศ.ดร.วีระ โลหะ)