



ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น

Minimum Fluidization Velocity for Vibrated Fluidized Bed

วันวิสาข์ กาญจนารณ์

Wanwisa Kanjanaporn

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of

Master of Engineering in Mechanical Engineering

Prince of Songkla University

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์แบบแบน
ผู้เขียน นางสาววันวิสาข์ กาญจนภรณ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ดร. กิตตินันท์ มลิวรรณ)

.....ประธานกรรมการ
(ดร. ฐานันดรศักดิ์ เทพญา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ดร. กิตตินันท์ มลิวรรณ)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ทศกร สมิตไมตรี)

.....กรรมการ
(ดร. นันทพันธ์ นภัทรานันท์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ทศกร สมิตไมตรี)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. นคร ทิพย์วงศ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น
ผู้เขียน	นางสาววันวิสาข์ กาญจนภรณ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบของไหลสองชนิด (Two Fluid Flow Model) รวมทั้งพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการทดลอง สำหรับการทดลองตัวแปรที่ศึกษา คือ ความเข้มของการสั่นสะเทือนและขนาดของอนุภาค โดยกำหนดให้เบดสั่นในแนวขนานกับแรงโน้มถ่วงของโลกที่ความถี่ 35 Hz, 40 Hz และ 45 Hz อนุภาคแก้วที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 และ 3 มม. ความหนาแน่น 2570 kg/m³ และ 2600 kg/m³ ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ความดันลดคร่อมเบด และค่าสัดส่วนช่องว่างจะมีค่าลดลง นอกจากนี้ผลจากการทดลองพบว่าค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนของความเร็วอากาศป้อน และความดันลดคร่อมเบดมีค่าความถี่เดียวกับการสั่นสะเทือน ซึ่งสอดคล้องกับสมมติฐานของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น รวมทั้งความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันที่คำนวณได้จากสมการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันที่สร้างขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังนั้นสรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้วิเคราะห์ผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่มีต่อระบบฟลูอิดไดซ์เบดได้

Thesis Title	Minimum fluidization velocity for vibrated fluidized bed
Author	Miss Wanwisa Kanjanaporn
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2010

ABSTRACT

This research aims to develop the mathematical model for predicting the minimum fluidization velocity for vibrated fluidized bed. The research has employed the Two Fluid Flow Model and used results from experiments to verify this developed mathematical model. The parameters studied in the experiments were vibration intensity and particle diameter. In case of vibration intensity, the bed was being vibrated in the vertical direction parallel with the earth gravity. The vibrating frequencies tested were 35 Hz 40 Hz and 45 Hz. The particles used in the experiments were glass beads 2 mm. diameters of 2570 kg/m^3 density and 3 mm. diameters of 2600 kg/m^3 density, respectively. According to the experiments, it was found that firstly as the vibration intensity increased, minimum fluidization velocity, bed pressure drop and void fraction decreased. Besides, experimental results have shown that the vibrating frequency of superficial gas velocity and the vibrating frequency of bed pressure drop had the same frequency as had been assumed by the hypothesis set up for this research. Finally, the minimum fluidization velocity calculated analytically corresponded with those measured from experiments. Therefore, it can be concluded that the developed mathematical model can be used to analyze the effect of vibrating fluidized bed system.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลสำคัญหลายท่านด้วยกันจึงถือโอกาสขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งต่อ ดร.กิตตินันท์ มลิวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางการแก้ปัญหาอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยอย่างมาก ตลอดจนทุนในการทำวิจัยทั้งหมด

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ทิกร สมิตไมตรี และ ดร. ฐานันต์ศักดิ์ เทพญา ดร. นันทพันธ์ นภทรานันท์ และรองศาสตราจารย์ ดร. นคร ทิพย์วาศ์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ และเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือและสถานที่ และขอขอบคุณ คุรุนิยม พรหมรัตน์ ที่ให้คำปรึกษาช่วยเหลือและสร้างชุดทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้ จึงใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

วันวิสาข กัญจนารักษ์

สารบัญ

สารบัญ	หน้า
รายการรูปภาพ	(8)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(10)
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ	4
2. ทฤษฎีและการทบทวนเอกสาร	
2.1 นิยาม	5
2.2 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์	7
2.3 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart	13
2.4 การทบทวนเอกสารงานวิจัยของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น	15
2.5 สรุป	21
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	
3.1 Averages and Averaging Theorem	23
3.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะท้อน	24
3.3 สรุป	32
4. การดำเนินการวิจัย	
4.1 การทดลองเบื้องต้น	33
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง	34
4.3 วัสดุสำหรับการทดลอง	43
4.4 วิธีการทดลอง	44

สารบัญ (ต่อ)

5. ผลการทดลองและวิจารณ์	
5.1 การทดลองฟลูอิดไดเซชันแบบสั้นสะเทือน	46
5.2 การวิเคราะห์ผลของการสั้นสะเทือนที่มีต่อกระบวนการฟลูอิดไดเซชัน	52
5.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง	57
6. การสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการวิจัย	61
6.2 ข้อเสนอแนะ	62
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	
ก ข้อมูลการทดลอง	68
ข ข้อมูลเซนเซอร์ความดัน MPVX 5004 DP	91
ค ข้อมูลเซนเซอร์ความเร่ง ADXL 210	97
ง แบบของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั้นสะเทือน	101
จ ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์	106
ประวัติผู้เขียน	112

รายการรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	การจับกับเป็นก้อนของอนุภาค	1
1.2	ระบบที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ขนาดเล็กผสมกัน	2
2.1	ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันแบบต่างๆ	7
2.2	ความสัมพันธ์ของความดันลดกับความเร็วในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน	8
2.3	ความเข้มข้นการสันสะเทือนต่อความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาค กลุ่ม A	17
3.1	Representative Elementary Volumes, REV	23
3.2	แกนอ้างอิงสัมพัทธ์ของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสัน	27
3.3	ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะเทือน	27
4.1	อุปกรณ์และชุดทดลองระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะเทือน	34
4.2	เครื่องเป่าอากาศ (Blower)	35
4.3	วาล์วควบคุมการไหลอากาศ (Valve)	35
4.4	ออริฟิซ (Orifice)	36
4.5	เครื่องวัดความเร็วอากาศ (Anemometer)	36
4.6	เซนเซอร์วัดความดัน (Pressure sensor)	37
4.7	สเกลไม้บรรทัด	38
4.8	การติดตั้งกล้องดิจิทัล	38
4.9	ชุดสำหรับสันสะเทือน	39
4.10	Rotating Unbalance	39
4.11	การติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งบริเวณ vibration base	40
4.12	ผลการทดสอบชุดสันสะเทือน	41
4.13	ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์ (Fluidized bed column)	42
4.14	USB DAQ 6008: National Instrument	43

รายการรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.15	โปรแกรม Lab View: Signal Express 3.0	43
4.16	เม็ดอนุภาคแก้ว (Glass beads)	44
5.1	ลักษณะการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะเทือน	48
5.2	ปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะเทือน	49
5.3	ความเร็วอากาศป้อนและความดันลดคร่อมเบด กรณีอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. ที่ความถี่ 35 Hz	50
5.4	ความเร็วก๊าซป้อนกับความดันลดคร่อมเบด กรณีอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.	51
5.5	ผลความเข้มของการสันสะเทือน (Γ) ต่อค่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบด (ε_{mf}) ขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน	53
5.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศและความดันลดคร่อมเบด กรณีการสันสะเทือนของเบดที่ (ก) 35 Hz (ข) 40 Hz (ค) 45Hz สำหรับอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม.	54
5.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศและความดันลดคร่อมเบด กรณีการสันสะเทือนของเบดที่ (ก) 35 Hz (ข) 40 Hz (ค) 45 Hz สำหรับอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.	55
5.8	ผลความเข้มของการสันสะเทือนต่อค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน	56
5.9	การวิเคราะห์ Fast Fourier Transforms ของอนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. ณ ความถี่การสันสะเทือน 35 Hz	58
5.10	เปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันระหว่างการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นของงานวิจัยนี้สำหรับอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม.	59
5.11	เปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันระหว่างการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นของงานวิจัยนี้สำหรับอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.	59

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

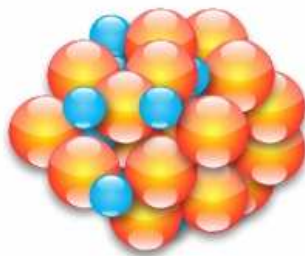
A_b	คือ พื้นที่หน้าตัดของเบดคอลัมน์ (m^2)
b	คือ แอมพลิจูดการสั่นสะเทือน (m)
d_p	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)
f	คือ ความถี่การสั่นสะเทือน (Hz)
g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก (m/s^2)
L	คือ ความสูงของเบด (m)
L_{mf}	คือ ความสูงเบดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน (m)
m_p	คือ มวลของอนุภาคเบดทั้งหมด (kg)
Δp_{mf}	คือ ความดันลดคร่อมเบดต่ำสุดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน (Pa)
Re_p	คือ ค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของอนุภาค
u	คือ ความเร็วของก๊าซป้อน (m/s)
u_f	คือ ความเร็วของก๊าซ (m/s)
u_t	คือ ความเร็วสุดท้าย (m/s)
u_{mf}	คือ ความเร็วอากาศต่ำสุดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน (m/s)
ε	คือ สัดส่วนช่องว่างของเบด
ε_{mf}	คือ สัดส่วนช่องว่างภายในเบดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน
ϕ	คือ สัมประสิทธิ์ความกลมของอนุภาค
Γ	คือ ความเข้มของการสั่นสะเทือน
μ_f	คือ ความหนืดของอากาศ ($N \cdot s/m^2$)
ρ_f	คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
ρ_p	คือ ความหนาแน่นของอนุภาคหรือเม็ดแก้ว (kg/m^3)

บทที่ 1

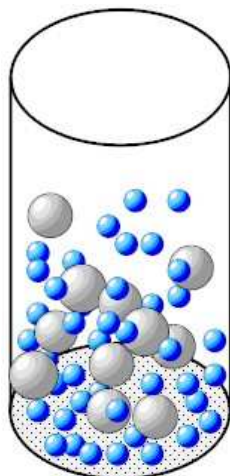
บทนำ

1.1 ที่มาของปัญหา

ฟลูอิดไดเซชันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ใช้ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น อุตสาหกรรมอาหาร การแช่แข็ง ปีโตรเคมี การอบแห้งและการคัดขนาดของอนุภาคที่เป็นผง ฟลูอิดไดเซชันสามารถช่วยให้อนุภาคมีการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ สามารถทำงานได้ต่อเนื่อง และสูญเสียพลังงานน้อย อย่างไรก็ตามการปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดเซชันที่เกิดขึ้นในฟลูอิดไดซ์เบดนั้นเป็นสิ่งที่ซับซ้อน และยากต่อการทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเบดได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะขึ้นกับขนาด ความหนาแน่นของอนุภาค และสภาวะการไหลของก๊าซ ซึ่งพบว่าระบบที่มีอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ไมโครเมตร หรือมีขนาดเล็กมาก ความชื้นสูง เหนียวเกาะเป็นก้อน จะเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ยาก เนื่องจากอนุภาคมีการเกาะกลุ่ม และจับตัวเป็นก้อนใหญ่ ซึ่งทำให้ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคกับของไหลมีประสิทธิภาพลดลง ทำให้ระบบเสียการควบคุม นอกจากนี้ในระบบที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และเล็กผสมกัน จำเป็นต้องใช้ความเร็วก๊าซสูงๆเพื่อทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่เคลื่อนที่ แต่ในขณะที่เดียวกันอนุภาคขนาดเล็กจะลอยหลุดออกจากเบดได้



รูปที่ 1.1 การจับเป็นก้อนของอนุภาค



รูปที่ 1.2 ระบบที่มีอนุภาคขนาดใหญ่และเล็กผสมกัน

ดังนั้นจึงมีการเสนอเทคนิคเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ด้วยการนำวิธีการสั่นสะเทือนเชิงกลมาใช้ร่วมกับระบบฟลูอิดไดซ์เบด หรือเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน (Vibrated Fluidized Bed, VFB) โดยการสั่นจะเป็นการเพิ่มแรงกระทบทำให้อนุภาคที่จับตัวกันเป็นก้อนแยกออกจากกัน และช่วยให้อนุภาคขนาดใหญ่เคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายในฟลูอิดไดซ์เบดจะมีความซับซ้อน และทำได้ยากเนื่องจากมีทั้งการเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลพร้อมกัน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลที่สภาวะต่างๆ โดยสามารถพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคว่ามีพฤติกรรมเหมือนของไหลชนิดหนึ่งซึ่งมีความต่อเนื่อง (Eulerian viewpoint) หรืออาจจะพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นแบบรายเม็ด (Lagrangian viewpoint) ซึ่งแบบแรกจะมีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์ทางทฤษฎีของปรากฏการณ์ต่างๆ ในฟลูอิดไดซ์เบดได้ รวมทั้งสามารถใช้ทำนายค่าความดันลด และค่าความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไดเซชันได้ แต่จะมีข้อจำกัดในกรณีที่อนุภาคขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเบด และต้องทราบคุณสมบัติทางไฮโดรไดนามิกส์ของอนุภาค ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยการจำลองการเคลื่อนที่เป็นแบบรายเม็ดสามารถใช้ศึกษาผลของการกระจายขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคได้โดยตรง แบบที่สองนี้เป็นที่นิยมใช้ในการจำลองแบบเชิงตัวเลข ผลของการสั่นต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นยังมีผู้ศึกษาอยู่น้อย ส่วนสมการทำนายความดันลดคร่อมเบดและค่าความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นนั้นยังการศึกษาและนำเสนอเป็นความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์ยังไม่ชัดเจน

สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลภายในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น และพิสูจน์แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยการเปรียบเทียบค่าความดันลดคร่อมเบด และความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลอง รวมทั้งทดลองศึกษาอิทธิพลของการสั่นเบดที่มีผลต่อพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของอนุภาค

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลการสั่นสะเทือนต่อความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาค สำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นในแนวตั้งขนานกับแกนโลก
2. ออกแบบและสร้างชุดทดลองพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์
3. เปรียบเทียบพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของอนุภาคภายในฟลูอิดไดซ์เบดแบบดั้งเดิมและฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น
4. ศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์การสั่น คือ แอมพลิจูด และความถี่ของการสั่นสะเทือนที่มีต่อสภาวะการทำงานของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. และ 3 มม. และใช้ความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ 35 Hz 40 Hz และ 45 Hz ตามลำดับ

1.4 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถทราบถึงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน
2. ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน
3. สามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาอธิบายปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน และนำเสนอการมาคำนวณขั้นต้นสำหรับการออกแบบเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนเพื่อให้เกิดความเหมาะสมกับงานได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนงานวิจัย

ในบทที่ 2 นี้จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีของกระบวนการฟลูอิดไดเซชัน และปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดในกระบวนการ สมการทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญต่อระบบฟลูอิดไดเซชัน การจัดกลุ่มอนุภาคของฟลูอิดไดซ์เบด และเป็นการทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบฟลูอิดไดเซชันแบบสันสะเทือน เพื่อเป็นประโยชน์และหาแนวทางในการศึกษาและการทำวิจัย

2.1 นิยาม

1. ฟลูอิดไดเซชัน (Fluidization) คือ กระบวนการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วอนุภาคของแข็งมีคุณสมบัติคล้ายของไหล โดยที่ของไหลจะถูกปล่อยให้ผ่านมาทางด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะไหลผ่านออกทางส่วนบนของหอทดลองซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก (Column) เมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นเรื่อยๆจนในที่สุดจะเห็นเม็ดของของแข็งเริ่มเคลื่อนที่ และลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน พฤติกรรมของของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล และเรียกของแข็งในสภาวะนี้ว่า “ฟลูอิดไดเซชัน”

2. ดีฟลูอิดไดเซชัน (Defluidization) คือ กระบวนการที่เกิดฟลูอิดไดเซชันได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเกิดจากการที่อนุภาคของแข็งมีการจับตัว และเกาะกันแน่นขึ้น ทำให้น้ำหนักของอนุภาคที่เกิดจากการเกาะตัวกันมีมากขึ้น ซึ่งทำให้อนุภาคของแข็งที่อยู่ในระบบไม่มีลักษณะคล้ายกับของไหล โดยส่วนใหญ่จะเกิดกับระบบฟลูอิดไดเซชันสามวัฏภาค

2.1.1 ชนิดของฟลูอิดไดเซชัน

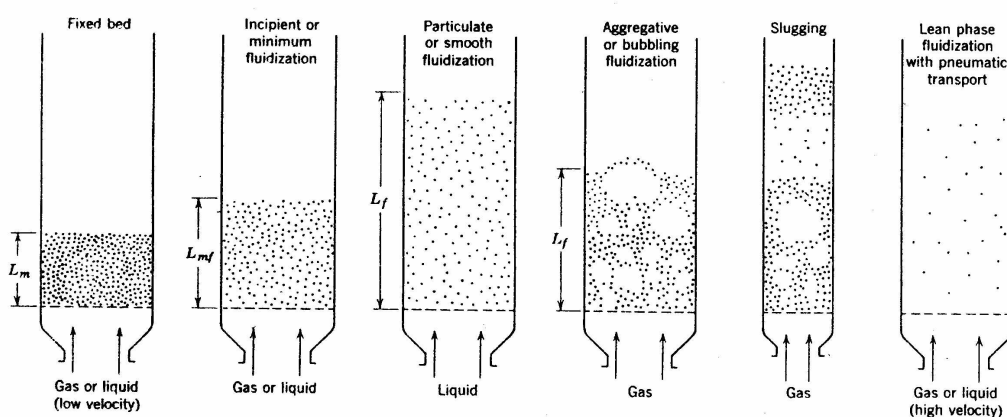
ระบบฟลูอิดไดเซชันสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. ฟลูอิดไดเซชันสองวัฏภาค (Two-phase fluidization) ในหอทดลองจะประกอบด้วย วัฏภาคของของแข็งและของไหล ซึ่งของไหลอาจจะเป็นก๊าซหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

2. ฟลูอิดไดเซชันสามวัฏภาค (Three-phase fluidization) ในหอทดลองประกอบด้วยวัฏภาคของของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งเป็นกระบวนการที่พัฒนามาจากฟลูอิดไดเซชันสองวัฏภาค

2.1.2 ลักษณะฟลูอิดไดเซชัน

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอทดลองที่มีปริมาณอนุภาคของเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าเม็ดของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยของไหลในหอทดลอง ซึ่งมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดคือ ผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอทดลอง เมื่อผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอทดลองเรียบร้อยตามต้องการแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลองอย่างช้าๆ ขณะที่ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่ เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้เรียกว่า เบดนิ่ง (Fixed bed) เมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่ง เม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัวและจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวอย่างอิสระ ลักษณะนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดไดเซชัน หลังจากนั้นไปแล้วความเร็วของของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวตามความเร็วของของไหล ช่วงที่เม็ดของแข็งอยู่ชิดกันมาก เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหนาแน่น (Dense-phase fluidized bed) ถ้าความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีก ของไหลเกือบจะพาเอาเม็ดของแข็งลอยออกจากหอทดลอง เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบเจือจาง (Dilute-phase fluidized bed) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งก็จะหลุดลอยออกจากหอทดลอง ซึ่งในลักษณะนี้ใช้เป็นการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง (Pneumatics transport) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันแบบต่างๆ [1]

2.2 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

พฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดไดเซชันมีปัจจัยหรือตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชัน เช่น ความเร็วของของไหล เม็ดของแข็ง ความหนาแน่นของของไหลและเม็ดของแข็ง ความดัน เป็นต้น ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.1 ช่องว่างภายในเบด (Void fraction)

เม็ดของแข็งที่บรรจุอยู่ในเบดไม่ว่าจะบรรจุอย่างเป็นระเบียบหรือแบบไม่เป็นระเบียบ ย่อมเกิดช่องว่างระหว่างเม็ดของแข็งขึ้นเสมอ จะมีขนาดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะและขนาดของเม็ดของแข็งที่ใช้ การคำนวณหาช่องว่างภายในเบด กรณีที่เม็ดของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลมและขนาดสม่ำเสมอตลอด สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ของปริมาตรช่องว่างภายในเบดต่อปริมาตรทั้งหมดของเบด ดังนั้นสัดส่วนช่องว่างภายในเบดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชันหาได้ดังนี้

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \frac{m_p}{\rho_p A_b L_{mf}} \quad (2.1)$$

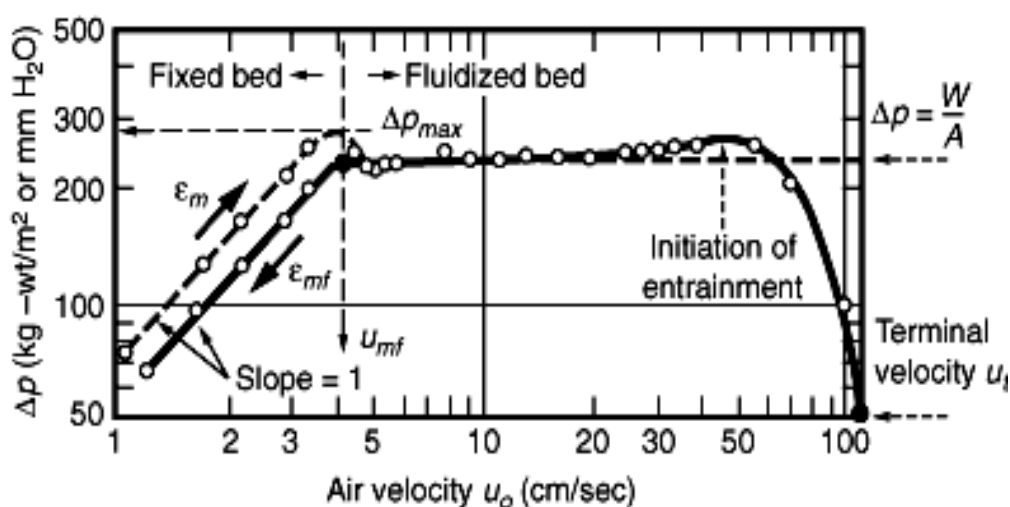
เมื่อ	ε_{mf}	คือสัดส่วนช่องว่างภายในเบดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน
	m_p	คือค่ามวลของอนุภาคเบดทั้งหมด
	A_b	คือพื้นที่หน้าตัดของเบดคอลัมน์
	L_{mf}	คือความสูงของเบดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน

สำหรับวัสดุที่ไม่ใช่เป็นรูปทรงกลม อาจเป็นวัสดุที่มีรูปร่างไม่แน่นอน การหาสัดส่วนช่องว่างที่เกิดขึ้นในเบดก็จะเปลี่ยนไปตามรูปร่างและขนาดของวัสดุที่ใช้บรรจุในหอทดลอง หรือแม้แต่การบรรจุที่เป็นระเบียบกับแบบไม่เป็นระเบียบก็จะมีช่องว่างไม่เท่ากัน

2.2.2 ความเร็วก๊าซป้อน (Superficial velocity) และความเร็วก๊าซระหว่างอนุภาคภายในเบด (Interstitial velocity)

ความเร็วก๊าซป้อน (Superficial velocity, u) คือ ความเร็วก๊าซเฉลี่ยในท่อเปล่ากรณีที่ไม่ม่มีเม็ดอนุภาคของแข็งอยู่ ซึ่งคำนวณได้จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรของก๊าซต่อพื้นที่หน้าตัดของท่อ หรือหาได้จากค่าความเร็วก๊าซระหว่างอนุภาคภายในเบด (Interstitial velocity, u_i) คูณด้วยสัดส่วนช่องว่างภายในเบด (Void fraction, ε)

2.2.3 ความสัมพันธ์ของความดันตกกับความเร็วในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของความดันตกกับความเร็วก๊าซในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน [1]

จากรูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซป้อนกับความดันลดคร่อมเบด ที่ความเร็วก๊าซต่ำเบดจะมีลักษณะนิ่งอยู่กับที่ อนุภาคภายในเบดไม่มีการเคลื่อนที่ เรียกว่าเบดนิ่ง (Fixed bed) ซึ่งช่วงนี้ความดันลดคร่อมเบดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วก๊าซป้อน และเมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซป้อนจนถึงระดับหนึ่งแล้วเบดจะเริ่มเปลี่ยนสภาพจากอนุภาคอยู่นิ่งเป็นอนุภาคที่มีการเคลื่อนที่ ขยับแยกห่างออกจากกัน ณ จุดนี้เบดจะเริ่มขยายตัว และเริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน ความเร็วที่จุดนี้คือความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (Minimum fluidization velocity, u_{mf}) ความดันลดคร่อมเบดคงที่ และเริ่มลดลงหลังจากถึงจุดความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน เมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซให้สูงขึ้นถึงจุดหนึ่งที่ความเร็วก๊าซป้อนมากกว่าความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity, u_t) อนุภาคจะถูกพัดพาติดไปกับก๊าซหรือของไหล จุดนี้จะเป็นจุดที่ความเร็วก๊าซมีค่าเท่ากับความเร็วสุดท้ายของอนุภาค

2.2.4 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (Minimum fluidization velocity)

ณ จุดที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชันนั้นอนุภาคจะลอยตัวเป็นอิสระ อนุภาคของแข็งจะอยู่ในสภาวะสมดุลโดยที่มีแรงสองแรงกระทำกับอนุภาคของแข็ง คือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของอนุภาคกับแรงพยุงจากของไหล (แรงเสียดทานร่วมกับแรงต้านของของไหล) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$\text{แรงพยุง (แรงเสียดทาน+แรงต้านของของไหล)} = \text{น้ำหนักของอนุภาคของแข็ง} \quad (2.2)$$

หรือ

$$\left(\begin{array}{c} \text{ความดันลด} \\ \text{คร่อมเบด} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{พื้นที่ภาคตัดขวางของเบด} \\ \text{ของอนุภาค} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{ปริมาตรของเบด} \\ \text{ของอนุภาค} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{สัดส่วนอนุภาค} \\ \text{ของอนุภาค} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{ความหนาแน่น} \\ \text{ของอนุภาค} \end{array} \right)$$

$$\begin{aligned} (\Delta P)(A_b) &= W \\ &= (A_b L_{mf})(1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g \end{aligned} \quad (2.3)$$

ซึ่งเขียนและจัดรูปใหม่ได้

$$\frac{\Delta P}{L} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_p - \rho_f)g \quad (2.4)$$

จากสมการ (2.4) Ergun ได้สร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ สำหรับการหาความดันลดคร่อมเบดจากความสัมพันธ์ของ Ergun [2] ดังนี้

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu_f u}{\phi^2 d_p^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_f u^2}{\phi d_p} \quad (2.5)$$

- เมื่อ Δp คือ ความดันลดคร่อมเบด
 ε คือ สัดส่วนช่องว่างของเบด
 L คือ ความสูงของเบด
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก
 ρ_p, ρ_f คือ ความหนาแน่นของอนุภาคและก๊าซตามลำดับ
 u คือ ความเร็วก๊าซป้อน
 d_p คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค
 μ_f คือ ค่าความหนืดของของไหล
 ϕ คือ สัมประสิทธิ์ความกลมของอนุภาค

ดังนั้นสมการสำหรับหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันหาได้จากการนำสมการ (2.4) รวมกับสมการ (2.5) จะได้ดังนี้

$$150 \frac{(1-\varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} \right) + \frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_f}{\mu_f} \right) = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu_f^2} \quad (2.6)$$

- เมื่อ u_{mf} คือ ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน
 ε_{mf} คือ สัดส่วนช่องว่างของเบดที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน

และ u_{mf} หาได้ดังนี้

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{150 \mu_f} \frac{\varepsilon_{mf}^3 \phi^2}{1 - \varepsilon_{mf}}, \text{Re}_p < 20 \quad (2.7)$$

$$u_{mf} = \frac{d_p (\rho_p - \rho_f) g}{1.75 \rho_f} \cdot \varepsilon_{mf}^3 \phi, \text{Re}_p > 1000 \quad (2.8)$$

เมื่อ Re_p คือค่าเรโนลด์นัมเบอร์ของอนุภาคซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$Re_p = \frac{|\bar{u}_p - \bar{u}_f| \rho_f \varepsilon d_p}{\mu_f} \quad (2.9)$$

2.2.5 ความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity)

ความเร็วสุดท้าย (Terminal velocity, u_t) คือความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่นิ่งอยู่ ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอคอยลงได้ ความเร็วสุดท้ายนี้คำนวณได้จาก

$$u_t = \left[\frac{4gd_p(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_D} \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

สำหรับระบบของอนุภาคที่มีทรงกลมสามารถหาค่าความเร็วสุดท้ายได้โดยอาศัยการหาสมการสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ดังนี้

$$C_{D,spherical} = \frac{24}{Re_p} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.11)$$

$$C_{D,spherical} = \frac{10}{Re_p} \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.12)$$

$$C_{D,spherical} = 0.43 \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.13)$$

ดังนั้น เมื่อทราบค่า C_D สามารถหาค่า u_t คือ

$$u_{t,spherical} = \frac{g(\rho_p - \rho_f)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.14)$$

$$u_{t,spherical} = \left[\frac{4}{225} \frac{g^2(\rho_p - \rho_f)^2}{\rho_f g} \right]^{1/3} \cdot d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.15)$$

$$u_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_p - \rho_f)d_p}{\rho_f} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.16)$$

2.2.6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลในระบบฟลูอิดไดซ์เบด

การเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลเป็นกลไกสำคัญต่อระบบฟลูอิดไดซ์เบด โดยเฉพาะการถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวล การติดตามพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลภายในฟลูอิดไดซ์เบดนั้นเป็นสิ่งที่กระทำได้ยาก เนื่องจากมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก ดังนั้นจึงมีการศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎี การทดลอง รวมทั้งการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้ติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหล

Anderson และ Jackson [3] Ishii [4] Pritchett และคณะ [5] ได้เสนอและพัฒนาแบบจำลองการไหลแบบของไหลสองชนิด (Two Fluid Flow Model) ซึ่งแบบจำลองนี้ประกอบด้วย วัฏภาคของอนุภาคและของไหล หลักการคือวัฏภาคของอนุภาคในของไหลมีขนาดและเบาจนมีลักษณะคล้ายกับของไหลซึ่งมีความต่อเนื่อง แบบจำลองการไหลของของไหลสองชนิดนี้มีสมการอธิบายการไหลของวัฏภาคของอนุภาคและของไหลดังนี้

สมการอนุรักษ์มวลสำหรับของไหล

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_f) + (\nabla \cdot \varepsilon \rho_f \vec{u}_f) = 0 \quad (2.17)$$

สมการอนุรักษ์มวลสำหรับของแข็ง

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-\varepsilon)\rho_p] + [\nabla \cdot (1-\varepsilon)\rho_p \vec{u}_p] = 0 \quad (2.18)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับของไหล

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho_f \vec{u}_f) + (\nabla \cdot \varepsilon \rho_f \vec{u}_f \vec{u}_f) = -\varepsilon \nabla p - \beta(\vec{u}_f - \vec{u}_p) - (\nabla \cdot \varepsilon \vec{\tau}_f) + \varepsilon \rho_f \vec{g} \quad (2.19)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับของแข็ง

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}[(1-\varepsilon)\rho_p \vec{u}_p] + [\nabla \cdot (1-\varepsilon)\rho_p \vec{u}_p \vec{u}_p] = & -(1-\varepsilon)\nabla p + \beta(\vec{u}_f - \vec{u}_p) \\ & - [\nabla \cdot (1-\varepsilon)\vec{\tau}_p] - \nabla p_p + (1-\varepsilon)\rho_p \vec{g} \end{aligned} \quad (2.20)$$

- เมื่อ u_f คือ ความเร็วของของไหล
 u_p คือ ความเร็วของอนุภาค
 β คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านอนุภาค
 τ_f คือ ค่าความเค้นเฉือนของของไหล
 τ_p คือ ค่าความเค้นเฉือนของอนุภาค
 p คือ ความดันของของไหล
 p_p คือ ความดันของอนุภาค
 g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ค่าสัมประสิทธิ์ β หาได้จาก

$$\beta = \frac{\mu_f(1-\varepsilon)}{d_p^2\varepsilon} [150(1-\varepsilon) + 1.75 \text{Re}_p] \quad \text{เมื่อ } (\varepsilon \leq 0.8) \quad (2.21)$$

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\mu_f(1-\varepsilon)}{d_p^2} \quad \text{เมื่อ } (\varepsilon > 0.8) \quad (2.22)$$

เมื่อ C_D คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ซึ่งหาได้ดังนี้ [6]

$$C_D = 24(1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.687}) / \text{Re}_p \quad \text{เมื่อ } (\text{Re}_p \leq 1000) \quad (2.23)$$

$$C_D = 0.43 \quad \text{เมื่อ } (\text{Re}_p > 1000) \quad (2.24)$$

2.3 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart

Geldart [7] ได้ทำการแบ่งอนุภาคของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบดออกเป็น 4 กลุ่ม คือ A, B, C และ D ตามความแตกต่างของพฤติกรรมที่เกิดฟลูอิดไดเซชันในระบบของแข็ง-ก๊าซ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาค และผลต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคและก๊าซ มีรายละเอียดดังนี้

กลุ่ม A (Aeratable)

เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นต่ำ อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้สามารถเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ง่ายและมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งเบด เบดของอนุภาคของแข็งจะเกิดการขยายตัวเมื่อความเร็วของก๊าซมีค่าต่ำกว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (u_{mf}) และที่ความเร็วก๊าซมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน จะเกิดการรวมตัวเป็นฟองก๊าซภายในเบดของอนุภาคของแข็ง และเกิดการไหลเวียนของอนุภาคของแข็งภายในเบด เมื่อความเร็วก๊าซมีค่าสูงมากๆ จะเกิดฟองก๊าซที่มีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับขนาดของคอลัมน์ซึ่งเรียกว่า Slug เคลื่อนที่ขึ้นไปตามแนวแกนของคอลัมน์

กลุ่ม B (Sand-like)

อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้ส่วนมากจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 40 ถึง 500 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่นประมาณ 1.4 ถึง 4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อนุภาคของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ดี เมื่อความเร็วของก๊าซมีค่าสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันจะเกิดฟองก๊าซซึ่งเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว และเกิดการรวมตัวเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่ตามความสูงของเบด

กลุ่ม C (Cohesive)

อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้เป็นอนุภาคของแข็งที่ละเอียด และมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของแข็งสูง เป็นผลให้อนุภาคของแข็งชนิดนี้เกิดฟลูอิดไดเซชันได้ค่อนข้างยาก ในคอลัมน์ขนาดเล็กอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้มักมีแนวโน้มที่เกิดการอุดตันของอนุภาคของแข็ง แต่ในคอลัมน์ขนาดใหญ่มักจะไม่มีเกิดฟลูอิดไดเซชัน แต่จะเกิดเป็นช่องว่างที่เกิดจากการไหลของก๊าซจากตัวกระจายก๊าซสู่ผิวเบด ตัวอย่างของอนุภาคของแข็งกลุ่มนี้ได้แก่ ผงแป้งมันฝรั่ง

กลุ่ม D (Spoutable)

อนุภาคของแข็งในกลุ่มนี้เป็นอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่ และมีความหนาแน่นสูง ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันได้ยาก เมื่อความเร็วของก๊าซต่ำเคลื่อนที่ผ่านระหว่างช่องว่างของอนุภาคของแข็ง เมื่อความเร็วก๊าซเพิ่มขึ้น จะเกิดการรวมตัวของฟองก๊าซ ทำให้เบดขยายตัว แต่ยังคงมีการไหลเวียนของอนุภาคภายในเบดค่อนข้างน้อย การเพิ่มการไหลเวียนของอนุภาคทำได้โดยการป้อนก๊าซที่กึ่งกลางคอลัมน์ เรียกเบดลักษณะนี้ว่า Spouted beds

2.4 การทบทวนเอกสารงานวิจัยของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น

ปัจจุบันพบว่าได้มีการนำเทคนิคฟลูอิดไดซ์ชันมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแขนงต่างๆ อย่างกว้างขวาง ทั้งนี้เนื่องจากข้อดีต่าง ๆ ของฟลูอิดไดซ์เบด เช่น มีประสิทธิภาพการถ่ายเทมวลและความร้อนที่ดี และเกิดการผสมอย่างทั่วถึง อย่างไรก็ตามเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดยังมีข้อจำกัด คือ ระบบไม่สามารถใช้กับอนุภาคขนาดเล็กที่มีความชื้นสูง หรือเป็นยางได้ เพราะอนุภาคจะเกิดการจับตัวเกาะกันเป็นก้อน และเบดที่มีการกระจายของอนุภาคที่แตกต่างกัน ทำให้ต้องใช้อากาศที่มีความเร็วสูง สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ส่วนอนุภาคขนาดเล็กหลุดออกจากเบดได้ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาได้มีการนำเทคนิคการสั่นเบด หรือฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น (Vibrated Fluidized Bed, VFB) มาใช้ เนื่องจากการสั่นสะเทือนสามารถลดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาค ทำให้การเกิดฟลูอิดไดซ์ชันได้สมบูรณ์ขึ้นและใช้ความเร็วอากาศลดลง

ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นจึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยและมีการศึกษาในด้านต่างๆ เช่น การถ่ายเทความร้อน การถ่ายเทมวล การแยกหรือการผสมกันของอนุภาค เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยเกี่ยวกับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นจึงมีทั้งการทดลองและการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์

เทคนิคการสั่นเบดหรือฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอบแห้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้ง Gupta และ Mujumdar [8] ได้ตรวจสอบเอกสารงานวิจัยเกี่ยวกับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น และสรุปว่าการสั่นสะเทือนทำให้อนุภาคเกิดฟลูอิดไดซ์ชันได้สมบูรณ์ขึ้น ความดันลดคร่อมเบดและความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไดซ์ชันลดลง เมื่อความเร่งในการสั่นสะเทือน (ผลคูณของแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนกับความถี่เชิงมุมการสั่นสะเทือนยกกำลังสอง) มีค่ามากกว่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และการสั่นสะเทือนทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น และในปีเดียวกัน Gupta และคณะ [9] ได้ศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งที่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง โดยทดลองอบแห้งวัสดุพูนและเม็ดซิลิกาเจล พบว่านอกจากการสั่นสะเทือนจะมีผลต่ออัตราการอบแห้งแล้ว การสั่นสะเทือนยังมีผลต่อความสูงของเบด อัตราการไหลของอากาศขนาดของอนุภาค ต่อมา Ringer และ Mujumdar [10] ได้สร้างแผนภูมิสำหรับเลือกตัวแปรการทำงานของระบบอบแห้งโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น จากนั้น Erdész และ Mujumdar [11] เสนอความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไดซ์ชันในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น (y) และสัดส่วนความดันลดคร่อมเบดในฟลูอิดไดซ์เบดแบบตั้งเดิมและแบบสั่น (x) ในรูปของ $y = ax^b$ แต่ค่าคงที่ a และ b ยังคงต้องได้มาจากการทดลอง

ต่อมาได้มีการศึกษาและนำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นมาแก้ปัญหาการเกาะกลุ่มก้อนของอนุภาคนาขนาดเล็ก Kuipers และคณะ [12] ได้ทำการทดลองระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นเพื่อเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของแป้งมันฝรั่งซึ่งเป็นอนุภาคในกลุ่ม C ตามการแบ่งกลุ่มของ Geldart ไปเป็นอนุภาคกลุ่ม A โดยใช้ใบพัดควงที่ก้นเบดและการสั่นเบด พบว่าการควงที่ก้นเบดเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับแป้งมันฝรั่งที่มีความชื้นสูง แต่การสั่นเบดจะช่วยให้อนุภาคของแป้งมันฝรั่งแตกตัว และเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ ต่อมาได้มีการศึกษาผลของการสั่นที่มีต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคกลุ่ม C โดย Noda และคณะ [13] จากการทดลองพบว่าอนุภาคกลุ่ม C ไม่สามารถเกิดฟลูอิดไดเซชันได้หากไม่มีการสั่นของเบด และความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชันจะลดลงเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น (Vibration Intensity) หรืออัตราส่วนระหว่างความเร่งในการสั่นกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ดังแสดงในสมการ

$$\Gamma = \frac{b(2\pi f)^2}{g} \quad (2.25)$$

- เมื่อ Γ = เทอมไร้หน่วยหรือความเข้มของการสั่นสะเทือน
 f = ความถี่การสั่นสะเทือน
 b = แอมพลิจูดการสั่นสะเทือน
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

โดยรูปแบบการเกิดฟลูอิดไดเซชันแบบสั่น สามารถแบ่งตามขนาดความเข้มของการสั่นสะเทือนในแนวดิ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

1. Vibrated state เกิดขึ้นเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือน $\Gamma < 1$ เบดจะมีลักษณะเหมือนฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่มีการสั่นสะเทือน และการสั่นสะเทือนจะช่วยให้เกิดฟลูอิดไดเซชันสมบูรณ์และมีเสถียรภาพมากขึ้นเท่านั้น

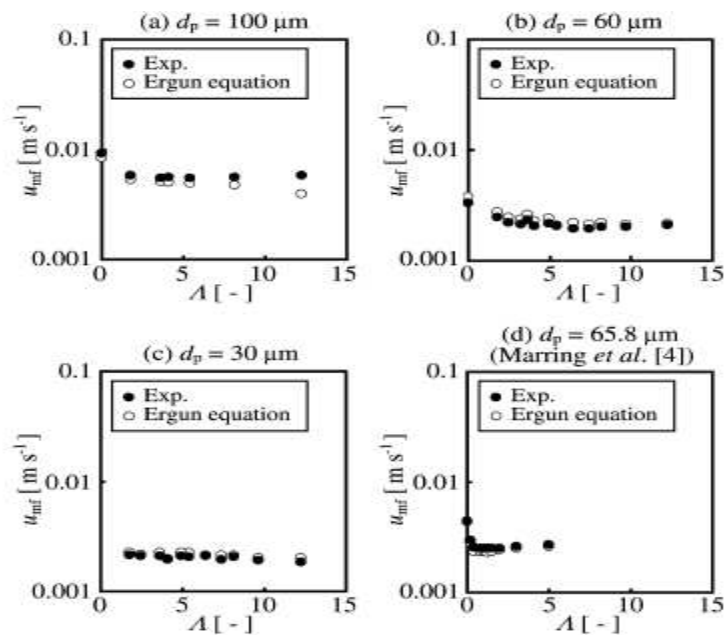
2. Vibrofluidized layer เกิดขึ้นเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือน $\Gamma \approx 1$ โดยที่ความเร็วอากาศและการสั่นสะเทือนมีอิทธิพลต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันเท่าๆกัน

3. Vibrated fluidized layer เกิดขึ้นเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือน $\Gamma > 1$ เบดจะได้รับอิทธิพลจากการสั่นสะเทือนเท่านั้น โดยที่อากาศจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนและมวลเท่านั้น

เมื่อเบดมีความสูงเพิ่มขึ้นผลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันจะลดลง โดยทั่วไปความสูงเบดจะมีค่าไม่เกิน 0.5 เมตร

Mawatari และคณะ [14] ได้นำฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นมาปรับปรุงการไหลของอนุภาคละเอียด โดยทดลองและเปรียบเทียบรูปแบบของการสั่นสะเทือนสามแบบ คือ การสั่นสะเทือนในแนวตั้ง การสั่นสะเทือนในแนวนอน และการสั่นสะเทือนแบบการบิดเป็นเกลียว (Twist) พบว่ารูปแบบการสั่นสะเทือนมีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน สัดส่วนช่องว่างภายในเบด และผลการทดลองพบว่า อนุภาคขนาดใหญ่ (60 และ 100 μm) จะเกิดฟองก๊าซ (Bubble) เมื่อความเร็วมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ต่อมา Zhou และคณะ [15] ได้ศึกษาพฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคแก้วภายใต้การสั่นสะเทือนในแนวตั้งและแนวนอน พบว่ารูปแบบการไหลของอนุภาคแก้วขึ้นอยู่กับทิศทางของการสั่นสะเทือน และที่ความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนมีค่าสูง พบว่าค่าความดันลดคร่อมเบด และความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการสั่นสะเทือน จากนั้น Tatemoto และคณะ [16] ทำการศึกษาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคกลุ่ม A และ C ในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น โดยใช้สมการ Ergun [2] ในการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการฟลูอิดไดเซชันในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น เปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลอง พบว่าสมการ Ergun สามารถใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ดีสำหรับอนุภาคกลุ่ม A แต่ค่าสัดส่วนช่องว่างของของไหลขณะเกิดฟลูอิดไดเซชันยังคงได้มาจากการทดลอง และผลของการสั่นสะเทือนทำให้สัดส่วนช่องว่างและค่าความเร็วต่ำสุดลดลงเมื่อค่าความถี่การสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่

2.3



รูปที่ 2.3 ความถี่การสั่นสะเทือนต่อความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคกลุ่ม A [16]

นอกจากนี้การศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการเกาะกลุ่มของอนุภาคและทำการทดลอง สำหรับการเกิดฟลูอิดไดเซชันในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น ถูกเสนอโดย Xu และ Zhu [17] จากการทดลองพบว่าขนาดของการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคลดลงเมื่อความเข้มของการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ต่อมา Xu และ Zhu [18] ยังได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคขนาดเล็กภายใต้การสั่นสะเทือนเชิงกล พบว่าผลของการสั่นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอนุภาค (กลุ่มอนุภาค การกระจายของขนาดและรูปร่าง) และทิศทางของการสั่น คือการสั่นในแนวขนานกับแรงโน้มถ่วงของโลกจะมีผลดีต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันมากที่สุด และจะน้อยที่สุดเมื่อทิศทางของการสั่นตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงของโลก และ Mawatari และคณะ [19] ได้ศึกษาคุณสมบัติการจับตัวเป็นก้อนของอนุภาค โดยการสังเกตการกระจายตัวของการจับกลุ่มก้อนของอนุภาคภายใต้เงื่อนไขของการสั่นสะเทือนจากการทดลอง พบว่า การสั่นสะเทือนมีผลให้ขนาดของการจับกลุ่มก้อนของอนุภาคลดลงและเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันมีค่าลดลง

Jin และคณะ [20] ได้ศึกษาผลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อคุณสมบัติการขยายตัวของฟลูอิดไดซ์เบดของอนุภาคขนาดใหญ่ โดยการทดลองและใช้ PC-4 Optical fiber probe ในการสังเกตการณ์การเกิดช่องว่างภายในเบด พบว่าการสั่นสะเทือนในแนวตั้งสามารถช่วยให้อนุภาคเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ดี และลักษณะการกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างในแนวแกนและแนวรัศมีมีลักษณะเหมือนกัน และการกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างภายในเบดดีกว่าฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่มีการสั่นสะเทือน นอกจากนี้ Barletta และคณะ [21] ได้ศึกษาและทดลองผลของตัวแปรการสั่นสะเทือนเชิงกล คือผลของความถี่ของการสั่นสะเทือนและค่าความเร่งของการสั่นสะเทือนที่มีต่อก๊าซฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคกลุ่ม A รวมทั้งศึกษาชนิดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันภายใต้การสั่นสะเทือนเชิงกล พบว่าอิทธิพลของก๊าซฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือนมีผลต่อค่าความดันลดคร่อมเบดที่ความแตกต่างของความสูงภายในเบด

สำหรับการศึกษาฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนนั้น ยังมีการศึกษากับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ Valverde และคณะ [22] ศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนและสนามไฟฟ้าสถิตของนาโนฟลูอิดไดเซชัน (Nanofluidization) และเสนอผลการทดลองของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นของอนุภาคซิลิกาขนาดนาโน และ Zhou และคณะ [23] ได้ศึกษาพฤติกรรมการเกาะกลุ่มของอนุภาคนาโน (Nano-particles) โดยทำการทดลองศึกษาผลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อการเกาะกลุ่มของอนุภาค พบว่าการสั่นสะเทือนสามารถปรับปรุงคุณลักษณะการเกิดฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคนาโนได้ดีขึ้น ความเร็วของการเกิดฟลูอิดไดเซชันมีค่าลดลง ซึ่งปัจจุบันพบว่างานวิจัยที่เกี่ยวกับฟลูอิดไดซ์

เบดแบบสันสะเทือน ได้พัฒนาและมีการวิจัยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และยังเป็นการศึกษาและนำมาใช้ในระบบ กระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมมากขึ้น

สำหรับระบบฟลูอิดไดซ์เบดนั้นยังมีปัจจัยที่สำคัญในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน คือการเคลื่อนที่ของอนุภาค จึงมีผลงานการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในฟลูอิดไดซ์เบด [24] และมีนักวิจัยได้เสนอผลงานการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค แต่ทำได้ยากเนื่องจากในการทำวิจัยต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีราคาสูง ดังนั้นจึงมีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาใช้ติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดย Anderson และ Jackson [3] ได้เสนอแบบจำลองการไหลแบบของไหลสองชนิด (Two-Fluid Flow Model) มีหลักการคือวิฤภาคของอนุภาคในของไหลมีขนาดเล็ก และมีความเบาบางมากจนคล้ายของไหลชนิดหนึ่งซึ่งมีความต่อเนื่อง แต่สามารถใช้ได้เฉพาะกรณีที่อนุภาคและช่องว่างมีขนาดเล็กพอเมื่อเทียบกับขนาดของเบด และเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว Cundall และ Strack [25] ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบรายเม็ด (Distinct Element Method, DEM) สำหรับคำนวณการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมในแต่ละเม็ด แรงที่กระทำกับอนุภาคจะเป็นแรงเนื่องมาจากการกระทบกันของอนุภาค แรงเนื่องจากการกระทบกับผนัง และแรงกระทำเนื่องจากของไหล (Drag Force) สำหรับแรงเนื่องจากการกระทบกันของอนุภาคจะจำลองอยู่ในรูปอย่างง่ายของสปริง ตัวหน่วง และแรงเสียดทาน

งานวิจัยเกี่ยวกับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสัน นิยมใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบรายเม็ดในการติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค Tatemoto และคณะ [26] ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคกลุ่ม B ในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันทั้งในแนวตั้งและแนวนานกับแรงโน้มถ่วงของโลก โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบรายเม็ด (DEM) พบว่าการสั่นในแนวตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงของโลกจะทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันได้ยากเมื่อมีค่าความเข้มข้นสูง ความถี่ต่ำ และที่ความเข้มข้นคงที่ผลของการสั่นสะเทือนลดลงเมื่อความถี่มีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากนั้น Tatemoto และคณะ [27] ยังได้ศึกษาผลกระทบของการสั่นที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคขนาดเล็ก และมีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคมากโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบรายเม็ด (DEM) พบว่าการสั่นสามารถทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ และมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างอนุภาคเนื่องจากการกระทบกันจากด้านล่างไปยังด้านบนของเบด Limtrakul และคณะ [28] ได้ศึกษาผลของการสั่นที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนภายในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสัน โดยการสร้างแบบและจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบรายเม็ด (DEM) จากการจำลองพบว่า การสั่นสามารถช่วยให้อนุภาคเกิดการแตกตัวได้ดี และพฤติกรรมที่เกิดฟลูอิดไดเซชันได้ดีรวมทั้งการผสมกันดีขึ้น เมื่อระบบมีความถี่และแอมพลิจูดสูงขึ้น Huilin และคณะ [29] ได้สร้างแบบจำลองแบบรายเม็ด (DEM) เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่

ของอนุภาคในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน พบว่าการสั่นสะเทือนในแนวตั้งช่วยให้เกิดฟองก๊าซ (Bubble) ขนาดใหญ่ขึ้นและการสั่นสะเทือนทำให้ความดันก๊าซมีค่าลดลง

สำหรับในประเทศไทยงานวิจัยเกี่ยวกับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นส่วนมากจะมีการทำวิจัยโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมและสภาวะการทำงานภายในฟลูอิดไดซ์เบด สุวัฒน์ ตรุทัศน์วินท์ [30] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยใช้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือก ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้มีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งโดยใช้ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น ควรมีการคำนึงถึงผลลัพธ์ของการสั่นสะเทือนที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดขึ้น และสามารถทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศอบแห้งและวัสดุที่ต้องการอบแห้งดีขึ้นด้วย

ชัยชาญ แสงจันทร์ [31] ได้จำลองแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นในสามมิติ โดยวิธีการวิเคราะห์อนุภาคแบบรายเม็ด (DEM) ร่วมกับ CFD เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคซึ่งหาได้จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน พบว่าที่ความเร็วอากาศต่ำกว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดจะไม่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาค ส่วนในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนพบว่าเมื่อความเร็วลมมีค่าเท่ากับค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดจะเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดีที่สุด และในปีเดียวกัน วรรณวรงค์ โรจนวิจิตร [32] ได้ทำการสร้างแบบและจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น เพื่อศึกษาอิทธิพลต่างๆที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อเกิดการสั่นของเบดในแนวขนานกับแรงโน้มถ่วงของโลก จากการศึกษาพบว่าการสั่นสะเทือนสามารถทำให้ระบบเกิดฟลูอิดไดซ์เบดได้ดีมากขึ้น และการสั่นสามารถลดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคเคลื่อนที่และกระจายตัวดีขึ้น สุวิณี สุนทรสมัย [33] ได้จำลองการถ่ายเทโมเมนตัมและความร้อนในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น เพื่อศึกษาผลกระทบของการสั่นที่มีต่อสภาวะการทำงานของอนุภาค ประกอบด้วยความเร็วก๊าซป้อนและความเข้มของการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อการถ่ายเทโมเมนตัมและการถ่ายเทความร้อน ซึ่งพบว่าการเพิ่มความเร็วของก๊าซป้อนสามารถเพิ่มอุณหภูมิของอนุภาคได้ และการสั่นสะเทือนของเบดจะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาค ความดันลดคร่อมเบดและการถ่ายเทความร้อนภายในฟลูอิดไดซ์เบด ในปีต่อมา ศุภฤกษ์ วงศ์ศิริวรรณ [34] ได้จำลองแบบการอบแห้งในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นในสามมิติโดยวิธีการวิเคราะห์อนุภาคแบบรายเม็ด (DEM) เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรวมทั้งอัตราการอบแห้งของอนุภาคภายในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น จากการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มการสั่นสะเทือนจะมีผลทำให้อนุภาคเกิดฟลูอิดไดซ์เบดขึ้นได้มากขึ้น อนุภาคมีการผสมกันมากขึ้นและความร้อนกระจายทั่วทั้งเบด มีผลทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาและสำรวจผลงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นทั้งในและต่างประเทศ พบว่าผลจากการทดลองและการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์แสดงให้เห็นว่าการสั่นสะเทือนเชิงกลของเบดในแนวนานกับแรงโน้มถ่วงของโลกมีผลทำให้ระบบเกิดฟลูอิดไดซ์ชันได้ดีขึ้น และค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชันลดลงก็ตาม แต่ยังมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้เนื่องจากระบบฟลูอิดไดซ์ชันมีพฤติกรรมที่ซับซ้อนภายในเบด ซึ่งอาจเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น การเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็ง รูปแบบการไหลภายในฟลูอิดไดซ์เบด การเปลี่ยนแปลงของความดันลดคร่อมเบด รวมทั้งการกระจายตัวของช่องว่างภายในเบด ประกอบกับเทคนิคทางด้าน การทดลองมีข้อจำกัดหลายอย่างทำให้ต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีราคาสูง และมีความยากในการวิเคราะห์และการตีความหมายของข้อมูล เนื่องจากยังขาดความเข้าใจทางด้านไฮโดรไดนามิกส์การเคลื่อนที่ของอนุภาค [35] และงานวิจัยเหล่านั้นไม่ได้มีการเสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์สำหรับผลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อตัวแปรที่เป็นปัจจัยของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชันในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น เช่น ความดันลดคร่อมเบด และค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชัน แม้จะมีการแสดงให้เห็นว่าสมการของ Anderson และ Jackson หรือ สมการของ Ergun ยังสามารถใช้ทำนายความดันลดคร่อมเบดของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น แต่สามารถใช้ได้ในบางกรณีเท่านั้น และสมการดังกล่าวนี้ไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ผลของการสั่นที่มีต่อความดันลดคร่อมเบดได้อย่างชัดเจน เนื่องจากสมการยังขาดตัวแปรของการสั่นสะเทือน

2.5 สรุป

จากการศึกษาทฤษฎีและการทบทวนเอกสารเกี่ยวกับงานวิจัยที่ผ่านมา สามารถสรุปได้ว่างานวิจัยเกี่ยวกับระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนนั้น โดยส่วนมากจะเน้นการศึกษาและทำการวิจัยในด้านการประยุกต์ใช้ในระบบต่างๆ เพื่อเป็นการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบฟลูอิดไดซ์ชัน ซึ่งเป็นการทดลองและทำการเปรียบเทียบปรากฏการณ์ของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชันด้วยสมการ Ergun เพียงอย่างเดียว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน และพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชัน รวมทั้งศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนที่มีระบบฟลูอิดไดซ์ชัน

บทที่ 3

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การเคลื่อนที่ของอนุภาคและของไหลเป็นกลไกที่สำคัญสำหรับการถ่ายเทความร้อนและมวลในระบบฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งการติดตามการเคลื่อนที่ของเม็ดอนุภาคของแข็งและของไหลเป็นสิ่งที่ซับซ้อนและมีความยุ่งยากมาก เนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดและความแม่นยำสูง ดังนั้นจึงมีการศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลองเพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งและของไหล เช่น Anderson and Jackson [3] ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองการไหลแบบของไหลสองชนิด (Two Fluid Flow Model) โดยการใช้วิธี Volume average ซึ่งแบบจำลองนี้ประกอบด้วยเฟสของไหลและเฟสของอนุภาคของแข็ง และพิจารณาให้อนุภาคของแข็งในของไหลมีขนาดเล็ก และเบาบางมากจนมีลักษณะคล้ายของไหลชนิดหนึ่งซึ่งมีความต่อเนื่อง สำหรับวิธีการของ Volume average นั้นได้มีนักวิจัยต่างๆ นำมาใช้ในการพัฒนารูปแบบทางด้านคณิตศาสตร์สำหรับการไหลที่มีหลายๆ ภูมิภาคในระบบ ซึ่งรูปแบบหรือแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์นี้สามารถช่วยอธิบายพฤติกรรมและปรากฏการณ์ต่างๆ ของของไหลและอนุภาคของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบดได้ [36][37]

ดังนั้นในบทที่ 3 นี้จึงเป็นการกล่าวถึงกระบวนการของการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น ด้วยวิธีการของ Volume averaging theorems ร่วมกับสมการควบคุมพื้นฐาน (Governing equation) สำหรับอนุภาคของแข็งและของไหล และเพื่อนำสมการที่ได้จากการพัฒนานี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเครื่องมือต่างๆ เพื่อให้สามารถใช้งานได้จริง

3.1 Averages and Averaging Theorem

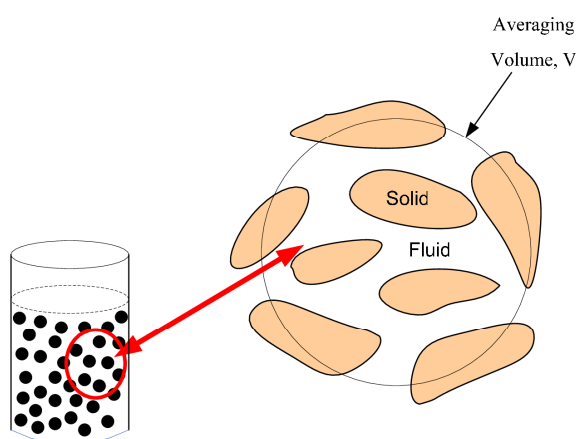
3.1.1 Local Volume Average

สมการกำกับในระดับมหภาค (Macroscopic governing equations) สำหรับการไหลผ่านตัวกลางรูพรุนหาได้จากการเฉลี่ยเชิงปริมาตร (Volume averaging) สมการกำกับในระดับจุลภาค (Microscopic equation) ในปริมาตรควบคุมขนาดเล็กหรือเรียกว่าปริมาตรมูลฐานตัวแทน (Representative Elementary Volume, REV) [38] ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดย Phase average และ Intrinsic Average สามารถหาได้โดยใช้สมการ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ

$$\langle \varphi_k \rangle^o = \frac{1}{V} \int_{V_k} \varphi_k dV \quad (3.1)$$

$$\langle \varphi_k \rangle = \frac{1}{V_k} \int_{V_k} \varphi_k dV \quad (3.2)$$

- เมื่อ φ_k คือ ปริมาณของวัฏภาค k
 V_k คือ ปริมาตรที่เกิดขึ้นโดยวัฏภาค k ภายในปริมาตรควบคุม
 V คือ ปริมาตรควบคุม



รูปที่ 3.1 Representative Elementary Volumes, REV

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง Phase average และ Intrinsic Average มีดังนี้

$$\langle \varphi_k \rangle = \frac{V_k}{V} \langle \varphi_k \rangle = \varepsilon_k \langle \varphi_k \rangle \quad (3.3)$$

3.1.2 Volume Averaging Theorems

คุณสมบัติของทฤษฎีการเฉลี่ยเชิงปริมาตร (Characteristic of the volume average theorems) มีดังนี้ [36] [39]

$$\langle \nabla \varphi_k \rangle = \nabla \langle \varphi_k \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_k} \varphi_k \vec{n}_k dA \quad (3.4)$$

$$\langle \nabla \cdot \vec{\varphi}_k \rangle = \nabla \cdot \langle \vec{\varphi}_k \rangle + \frac{1}{V} \int_{A_k} \vec{\varphi}_k \cdot \vec{n}_k dA \quad (3.5)$$

$$\left\langle \frac{\partial}{\partial t} \varphi_k \right\rangle = \frac{\partial}{\partial t} \langle \varphi_k \rangle - \frac{1}{V} \int_{A_k} \varphi_k \vec{U}_s \cdot \vec{n}_k dA \quad (3.6)$$

เมื่อ \vec{n}_k คือ Normal vector

A_k คือ พื้นผิวอินเตอร์เฟซของภูมิภาค k

\vec{U}_s คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่ของอินเตอร์เฟซ

3.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นเป็นแบบจำลองการไหลแบบของไหลสองชนิด (Two-Fluid Flow Model) ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคของแข็งและก๊าซ การสั่นสะเทือนที่กระทำต่อเบดเป็นการสั่นเชิงกลแบบฮาร์โมนิก (Harmonic) ในแนวขนานกับแรงโน้มถ่วงของโลก โดยแกนอ้างอิงสัมพัทธ์จะถูกติดตั้งที่เบด ทำให้แรงเนื่องจากการสั่นสะเทือนกลายเป็นแรงภายนอกที่กระทำกับระบบ และเป็นการคำนวณการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของอนุภาคและของไหลแทน

3.2.1 สมการควบคุม (Governing Equations)

สมการควบคุมประกอบไปด้วยสมการความต่อเนื่องและสมการ โมเมนตัมแสดง
ได้ดังนี้

- สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.7)$$

- สมการ โมเมนตัม (Momentum Equation)

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{u} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \nabla \cdot \overline{\overline{E}} + \rho \vec{g} \quad (3.8)$$

เมื่อ ρ คือ ค่าความหนาแน่นของของไหล
 \vec{u} คือ ค่าความเร็วของของไหลและอนุภาคของแข็งเทียบกับแกนอ้างอิงเฉื่อย
 $\overline{\overline{E}}$ คือ Stress tensor

โดยที่

$$\overline{\overline{E}} = -pI + \vec{\tau} \quad (3.9)$$

เมื่อ p คือ ความดันสถิต (Static pressure)
 I คือ Unit tensor
 $\vec{\tau}$ คือ ค่าความเค้นเฉือน

ซึ่งเทอมของ $\vec{\tau}$ สามารถอธิบายได้ด้วยแรงเนื่องจากความหนืด (Viscous force) ดังสมการด้านล่าง

$$\vec{\tau} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \vec{e}_i \vec{e}_j + \left(\mu' - \frac{2\mu}{3} \right) (\nabla \cdot \vec{u}) \delta_{ij} \vec{e}_i \vec{e}_j \quad (3.10)$$

- เมื่อ μ คือ ค่า Effective bulk viscosity ของไหลหรืออนุภาคของแข็ง
 μ' คือ ค่า Effective shear viscosity ของไหลและอนุภาคของแข็ง
 δ_{ij} คือ Kronecker delta

3.2.2 สมการการเฉลี่ยเชิงปริมาตร (Volume-Average balance equations)

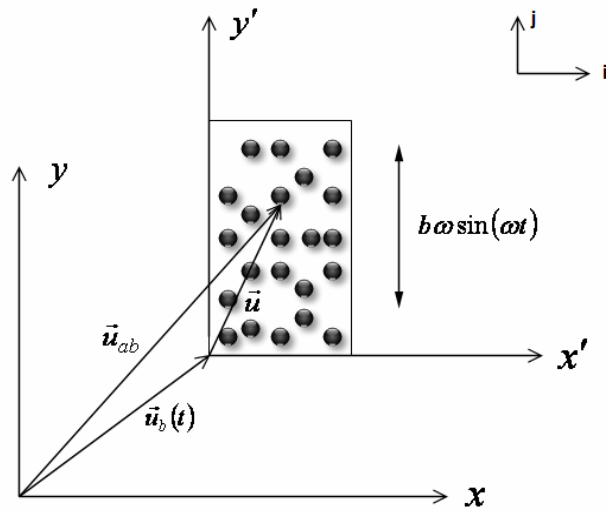
วิธีการของ Volume Averaging Theorems [36] ถูกใช้กับสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับฟลูอิดโคชเบคแบบสั่นสะเทือน โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. พิจารณาระบบเป็นของไหลสองชนิด คือ ก๊าซและอนุภาคของแข็ง
2. พิจารณาการสั่นสะเทือนของเบคเป็นการสั่นสะเทือนเชิงกลแบบฮาร์โมนิก ในแนวขนานกับแรงโน้มถ่วงโลก
3. แกนอ้างอิงสัมพัทธ์ถูกพิจารณาที่ตำแหน่งเบค
4. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซและของแข็ง
5. แรงดึงดูดและการกระทบกันระหว่างอนุภาคของแข็งมีค่าน้อยมาก
6. ผลของแรงเสียดทานและการเกิดไฟฟ้าสถิตระหว่างอนุภาคมีค่าน้อยมาก

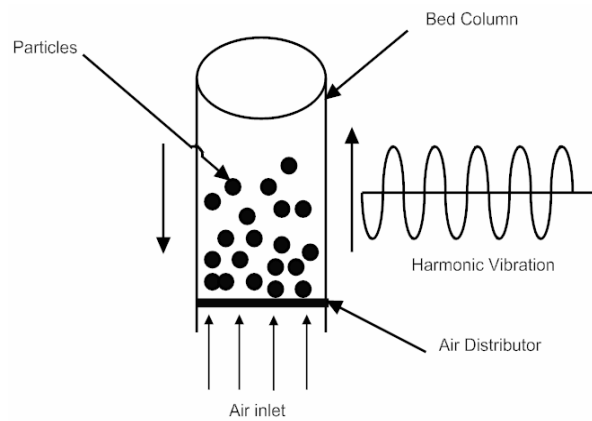
เมื่อแกนอ้างอิงสัมพัทธ์อยู่บนเบคดังรูปที่ 3.2 และระบบฟลูอิดโคชเบคแบบสั่นแสดงในรูปที่ 3.3 ความเร็วสมบูรณ์ของของไหลและอนุภาคของแข็งหาได้จาก

$$\vec{u}_{ab} = \vec{u} + \vec{u}_b(t) \quad (3.11)$$

- เมื่อ \vec{u}_{ab} คือ ค่าความเร็วสัมบูรณ์
 \vec{u} คือ ค่าความเร็วสัมพัทธ์
 $\vec{u}_b(t)$ คือ ค่าความเร็วของฟลูอิดโคชเบคคอลลัมน์อันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนซึ่งขึ้นกับเวลา (t) และเป็น การสั่นสะเทือนเชิงกลแบบฮาร์โมนิกส์



รูปที่ 3.2 แกนอ้างอิงสัมพัทธ์ของฟลูอิด ไคซ์เบดแบบสั่น



รูปที่ 3.3 ระบบฟลูอิด ไคซ์เบดแบบสั่นสะท้อน

แทนค่าสมการ (3.11) ลงในสมการ (3.7) และ สมการ (3.8) แล้วใช้ทฤษฎี volume averaging จะได้สมการ (3.12) (3.13) (3.14) และ (3.15) ตามลำดับ คือ

- สมการความต่อเนื่องสำหรับวิฤภาคของไหลสำหรับฟลูอิด ไคซ์เบดแบบสั่น

$$\underbrace{\varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \langle \rho_f \rangle}_1 + \nabla \cdot \varepsilon \langle \rho_f \rangle \langle \vec{u}_f(t) \rangle = 0 \tag{3.12}$$

สั้น

- สมการ โมเมนตัมสำหรับวิภาคของอนุภาคของแข็งสำหรับฟลูอิดไคซ์เบคแบบ

$$\underbrace{(1-\varepsilon)\frac{\partial}{\partial t}\langle\rho_p\rangle}_{1} + \nabla \cdot (1-\varepsilon)\langle\rho_p\rangle\langle\bar{u}_p(t)\rangle = 0 \quad (3.13)$$

เทอมแรกทางด้านซ้ายมือของสมการ (3.12) และสมการ (3.13) คือความสัมพันธ์ของอัตรามวลสะสมต่อหนึ่งหน่วย และไม่ปรากฏเทอมของการสั้นสะเทือน (\bar{u}_b)

- สมการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับวิภาคของไหลสำหรับฟลูอิดไคซ์เบคแบบสั้น

$$\varepsilon\langle\rho_f\rangle\left[\frac{\partial}{\partial t}\langle\bar{u}_f\rangle + \langle\bar{u}_f\rangle \cdot \nabla\langle\bar{u}_f\rangle\right] = \varepsilon\nabla \cdot \langle\bar{E}\rangle + \varepsilon\langle\rho_f\rangle\bar{g} - \bar{F}_p - \varepsilon\langle\rho_f\rangle\frac{d\bar{u}_b}{dt} \quad (3.14)$$

- สมการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับวิภาคของอนุภาคของแข็งสำหรับฟลูอิดไคซ์เบคแบบสั้น

$$(1-\varepsilon)\langle\rho_p\rangle\left[\frac{\partial}{\partial t}\langle\bar{u}_p\rangle + \langle\bar{u}_p\rangle \cdot \nabla\langle\bar{u}_p\rangle\right] = (1-\varepsilon)\nabla \cdot \langle\bar{E}\rangle + (1-\varepsilon)\langle\rho_p\rangle\bar{g} + \nabla \cdot \langle\bar{E}_p\rangle - (1-\varepsilon)\langle\rho_p\rangle\frac{d\bar{u}_b}{dt} + \bar{F}_p \quad (3.15)$$

เมื่อ

ε	คือ สัดส่วนช่องว่าง
$\langle\rho_f\rangle, \langle\rho_p\rangle$	คือ ความหนาแน่นของของไหลและความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง
$\langle\bar{u}_f\rangle, \langle\bar{u}_p\rangle$	คือ เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ย (Volume averaged velocity vector) ของของไหลและอนุภาคของแข็งเทียบกับแกนอ้างอิงสัมพัทธ์ตามลำดับ
$\langle\bar{E}\rangle, \langle\bar{E}_p\rangle$	คือ Stress tensor ของของไหลและอนุภาคของแข็งตามลำดับ
\bar{F}_p	คือ แรงปฏิกริยาระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็ง (Fluid-particle interaction force)
\bar{u}_b	คือ ความเร็วของการสั้นสะเทือนของเบค หรือความเร็วการสั้นสะเทือนแบบฮาร์โมนิกส์

เมื่อแรงปฏิกริยาระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็ง (\vec{F}_p) หาได้จาก

$$\vec{F}_p = \underbrace{n\alpha_\varepsilon(\vec{u}_f - \vec{u}_p)}_1 + \underbrace{(1-\varepsilon)C_\varepsilon\rho_f \frac{d}{dt}(\vec{u}_f - \vec{u}_p)}_2 \quad (3.16)$$

เทอมแรกของทางด้านขวามือสมการ (3.16) เป็นแรงเนื่องจากแรงต้านที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ยเฉพาะของวัฏภาค ค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของแรงต้านเฉพาะที่ (Local mean drag coefficient) ต่ออนุภาคของแข็งซึ่งขึ้นกับค่าสัดส่วนช่องว่างหรือความพรุนของระบบ (α_ε) และค่าเฉลี่ยของจำนวนอนุภาคต่อปริมาตร (n) ส่วนเทอมที่สองของสมการ (3.16) คือ Virtual mass ซึ่งสัมพันธ์กับความเร่งเฉลี่ยเฉพาะที่ (Local mean acceleration) ของของไหลและอนุภาคของแข็ง และค่า Virtual mass coefficient (C_ε) ซึ่งขึ้นกับค่าสัดส่วนช่องว่างหรือความพรุน (ε) ภายในฟลูอิด ไคซ์เบคมีค่าเท่ากับ 0.5 [40]

เมื่อนำสมการ โมเมนตัมสำหรับของไหลและอนุภาคของแข็งจากสมการ (3.15) และ (3.16) มารวมเข้าด้วยกันจะได้สมการที่ 3.17 คือ

$$(1-\varepsilon)\langle\rho_p\rangle\left[\frac{\partial}{\partial t}\langle\vec{u}_p\rangle+\langle\vec{u}_p\rangle\cdot\nabla\langle\vec{u}_p\rangle\right]=(1-\varepsilon)(\langle\rho_p\rangle-\langle\rho_f\rangle)\vec{g}+\frac{\vec{F}_p}{\varepsilon}+\nabla\cdot\overline{\vec{E}_p}-(1-\varepsilon)(\langle\rho_p\rangle-\langle\rho_f\rangle)\frac{d\vec{u}_b}{dt} \\ + (1-\varepsilon)\langle\rho_f\rangle\left[\frac{\partial}{\partial t}\langle\vec{u}_f\rangle+\langle\vec{u}_f\rangle\cdot\nabla\langle\vec{u}_f\rangle\right] \quad (3.17)$$

3.2.3 การหาผลเฉลยของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับฟลูอิดไคซ์เบคแบบสั่นสะเทือน (Solutions of the equations of motion for vibrated fluidized bed)

การแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคซ์เบคกรณีที่มีการสั่นสะเทือนของเบค โดยใช้สมการความต่อเนื่องและสมการ โมเมนตัมสำหรับของไหลและอนุภาคของแข็งที่ได้พัฒนาขึ้น ต้องใช้เงื่อนไขของการเกิดฟลูอิดไคซ์เบคคือ อนุภาคของแข็งภายในเบคไม่มีการเคลื่อนที่หรือความเร็วของของแข็งเท่ากับศูนย์ ความเร็วของของไหลและความเร็วของการสั่นสะเทือนของเบคมีความถี่เท่ากันและขึ้นกับเวลาเท่านั้น ดังแสดงคือ

$$\vec{u}_f = u_f(t)\vec{j}; \quad \vec{u}_p = 0; \quad \vec{u}_b = u_b(t)\vec{j}; \quad \vec{g} = -g\vec{j};$$

แทนค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในสมการที่ (3.14) จะได้

$$\varepsilon \langle \rho_f \rangle \left[\frac{\partial}{\partial t} \langle u_f(t) \vec{j} \rangle \right] = \varepsilon \nabla \cdot \langle \vec{E} \rangle - \varepsilon \langle \rho_f \rangle g \vec{j} - \vec{F}_p - \varepsilon \langle \rho_f \rangle \left[\frac{\partial}{\partial t} \langle u_b(t) \vec{j} \rangle \right] \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.18) สังเกตว่าค่าความเร็วการเคลื่อนที่ของของไหลจะขึ้นกับเวลาเพียงอย่างเดียว และเมื่อแทนค่าตัวแปรของเทอม \vec{E} ของของไหลจากสมการ (3.9) และค่าของแรงปฏิกริยาระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็ง (Fluid-particles interaction force, \vec{F}_p) จากสมการ (3.16) และจัดเทอมของ $\frac{1}{\varepsilon} \left[n \alpha_\varepsilon (u_f(t)) + (1-\varepsilon) C_\varepsilon \langle \rho_f \rangle \frac{d}{dt} (u_f(t)) \right]$ จัดรูปสมการใหม่จะได้สมการสำหรับหาค่าความดันลดคร่อมเบดสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะท้อน ดังแสดงในสมการ (3.19)

$$\therefore \nabla \langle p \rangle = -(1-\varepsilon) \langle \rho_p \rangle \left(g + \frac{d}{dt} u_b(t) \right) \vec{j} - \varepsilon \langle \rho_f \rangle \left(g + \frac{d}{dt} u_b(t) + \frac{d}{dt} u_f(t) \right) \vec{j} \quad (3.19)$$

สมการ (3.19) เป็นสมการความดันลดคร่อมเบดของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะท้อน เมื่อเปรียบเทียบกับสมการความดันลดคร่อมเบดสำหรับกรณีที่ไม่มีการสันสะท้อน พบว่ามีความแตกต่างคือ จะปรากฏเทอมอันเนื่องมาจากการสันสะท้อนของเบด ($u_b(t)$) ในสมการ ซึ่งเป็นผลให้ค่าความดันลดคร่อมเบดมีค่าน้อยกว่ากรณีของฟลูอิดไดซ์เบดที่ไม่มีการสันสะท้อน จากนั้นนำสมการ (3.18) ซึ่งแทนค่าของตัวแปรที่กำหนดแล้วมาลบด้วยสมการ (3.19) เพื่อจัดเทอมของความดัน และทำการจัดรูปและเขียนสมการใหม่จะได้สมการสำหรับนำไปหาผลเฉลยของความเร็วดำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชัน ดังแสดงในสมการที่ (3.20)

$$\left(\frac{C_\varepsilon}{\varepsilon} + 1 \right) \left((1-\varepsilon) \langle \rho_f \rangle \frac{d}{dt} u_f(t) \right) + \beta u_f(t) + (1-\varepsilon) \left[\langle \rho_f \rangle - \langle \rho_p \rangle \right] \left(g + \frac{d}{dt} u_b(t) \right) = 0 \quad (3.20)$$

เมื่อ β คือสัมประสิทธิ์ของแรงปฏิกริยาระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็ง (Fluid-particles interaction coefficient) มีค่าเท่ากับ $\frac{n \alpha_\varepsilon}{\varepsilon}$ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2.21) และสมการ (2.22) [2]

จากสมการ (3.20) จัดรูปสมการอนุพันธ์ ใหม่ได้ดังนี้

$$A \frac{d}{dt}(u_f(t)) + B(u_f(t)) + M + K(t) = 0 \quad (3.21)$$

เมื่อ

$$A = \left(\frac{C_\varepsilon}{\varepsilon} + 1 \right) (1 - \varepsilon) \langle \rho_f \rangle$$

$$B = \beta = \frac{n\alpha_\varepsilon}{\varepsilon}$$

$$M = (1 - \varepsilon) (\langle \rho_f \rangle - \langle \rho_p \rangle) g$$

$$u_b(t) = b\omega \sin(\omega t)$$

$$K(t) = (1 - \varepsilon) (\langle \rho_f \rangle - \langle \rho_p \rangle) \frac{d}{dt}(u_b(t))$$

ดังนั้นค่าความเร็วของการเกิดฟลูอิดไคเซชันสำหรับฟลูอิดไคซ์เบดแบบ สั่นสะเทือน หาได้จากการแก้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (Ordinary differential equation) แบบ Non-homogeneous ด้วยวิธี Undertermined coefficient [41] จะได้ผลเฉลยของสมการหรือค่า ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไคเซชันแบบสั่นสะเทือน ดังแสดงในสมการ (3.22)

$$\therefore u_f(t) = C e^{-\frac{B}{A}t} + \left(\frac{K_a}{B^2 + A^2\omega^2} \right) (B \cos(\omega t) + A\omega \sin(\omega t)) - \frac{M}{B} \quad (3.22)$$

เมื่อ C คือค่าคงที่ และ $K_a = (1 - \varepsilon) (\langle \rho_f \rangle - \langle \rho_p \rangle) (b\omega)$ จากสมการ (3.22) สามารถ เขียนสมการให้อยู่ในรูปการเปลี่ยนแปลงเฟสของการสั่นสะเทือน โดยใช้คุณสมบัติทางด้านตรีโกณมิติ และจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\therefore u_f(t) = C e^{-\frac{B}{A}t} + \frac{K_a}{\sqrt{B^2 + A^2\omega^2}} \left[\cos\left(\omega t + \tan^{-1}\left(-\frac{A\omega}{B}\right)\right) \right] - \frac{M}{B} \quad (3.23)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ได้พัฒนาขึ้นของงานวิจัยนี้กับสมการของ Ergun ของ ระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบไม่มีการสั่นสะเทือน พบว่าสมการทางคณิตศาสตร์ของงานวิจัยนี้จะ ปรากฏเทอมของแรงกระทำซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของฟลูอิดไคซ์เบดเพิ่มเข้ามาในสมการ ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไคเซชัน

3.3 สรุป

สมการสำหรับการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันดังสมการ (3.23) ได้ถูกพัฒนาโดยใช้ Volume Averaging Theorems (VAT) ร่วมกับสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับของไหลและอนุภาคของแข็ง สำหรับการพิสูจน์ความถูกต้องของสมการดังกล่าวเพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้จริงจะใช้วิธีการทดลอง ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการทดลองและเงื่อนไขต่างๆสำหรับการทดลองระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะท้อนในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

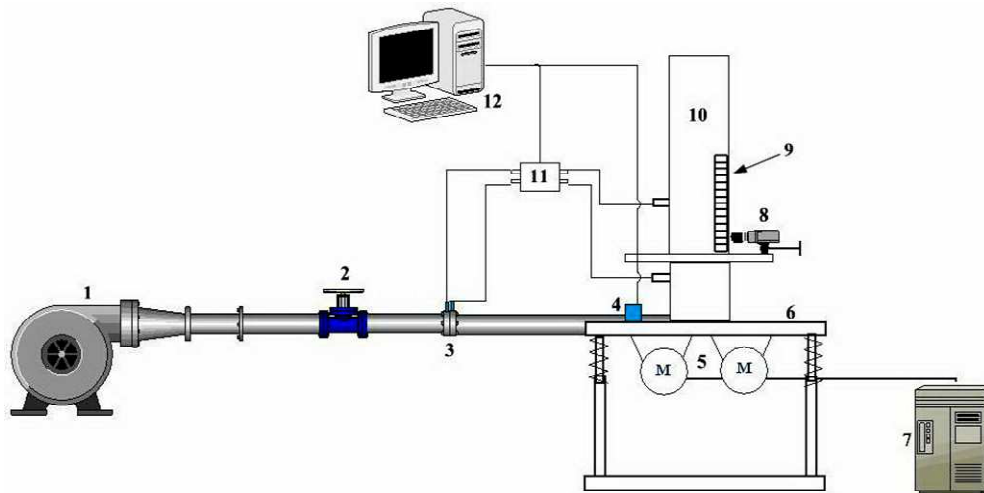
วิธีการทดลอง

ในบทนี้เป็นส่วนของวิธีการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของการเกิดฟลูอิดไลเซชันของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน โดยศึกษาผลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อค่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบด ความดันลดคร่อมเบด และความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลเซชัน นอกจากนี้จะนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นในบทที่ 3

4.1 การทดลองเบื้องต้น

วัตถุประสงค์ของการทดลองเบื้องต้นคือเพื่อหาเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ทดลองที่เหมาะสม เริ่มจากการทดลองเป่าเม็ดคอนูภาคแก้วเพื่อหาขนาดของ Blower และหาช่วงความดันลดคร่อมออริฟิซและความดันลดคร่อมเบดโดยใช้ U-Tube เพื่อนำมาเลือกเซนเซอร์สำหรับใช้วัดความดัน ซึ่งจากการทดลองขั้นต้นนี้ ความเร็วก๊าซที่ใช้ในการเป่าเม็ดคอนูภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. ความหนาแน่น 2600 kg/m^3 จำนวน 1 kg. จนกระทั่งเม็ดคอนูภาคแก้วลอยตัวขึ้นอยู่ในช่วง 0-3 m/s และความดันลดคร่อมเบดอยู่ในช่วง 0- 20 kPa จากการทดลองสามารถเลือกเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองได้ดังแสดงในหัวข้อ 4.2

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง



- | | | |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 1. Blower | 5. Vibro-motor | 9. Scale |
| 2. Valve | 6. Vibration base | 10. Bed Column |
| 3. Orifice plate | 7. Inverter | 11. Pressure sensor |
| 4. Accelerometer sensor | 8. Web camera | 12. Data Acquisition System |

รูปที่ 4.1 อุปกรณ์และชุดทดลองระบบฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือน

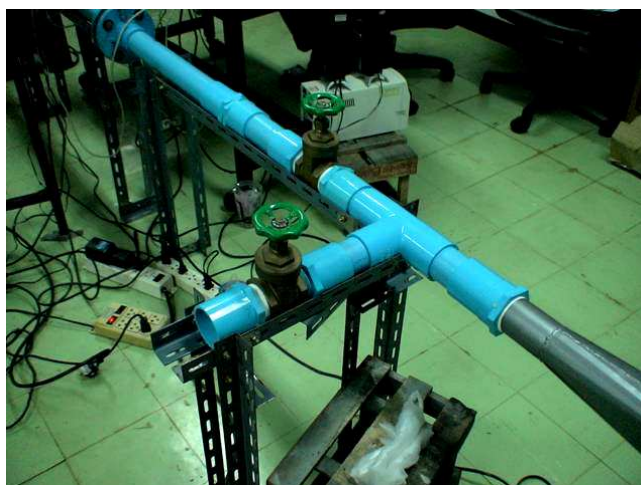
ชุดทดลองฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือนประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบไปด้วย

4.2.1 อุปกรณ์เป่าอากาศ (Air Blower)

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเป่าอากาศให้กับการทดลองนี้คือ เครื่องเป่าอากาศขนาดกำลัง 3 แรงม้า ชนิด Centrifugal fan (Type AV-D1216) เนื่องจาก Blower ชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในระบบแรงดันสูงและส่งวัสดุคิขนาดเล็ก น้ำหนักเบาในระบบผลิต ดังรูปที่ 4.2 และก๊าซจาก Blower ถูกส่งผ่านตามท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว และควบคุมการไหลของอากาศโดยใช้โกลบวาล์ว (Globe valve) ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 เครื่องเป่าอากาศ (Blower)



รูปที่ 4.3 วาล์วควบคุมการไหลอากาศ (Valve)

4.2.2 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลอากาศ

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลอากาศภายในท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้วคือออร์พีช โดยใช้เซนเซอร์วัดความดันวัดความดันลด และนำค่าความดันลดที่ได้มาคำนวณหาอัตราการ

ไหลของอากาศด้วยสมการ ซึ่งได้จากการปรับเทียบค่าความดันลดกับความเร็วมวลที่วัดโดยใช้ อุปกรณ์วัดความเร็วอากาศ (Anemometer) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ รูปที่ 4.5



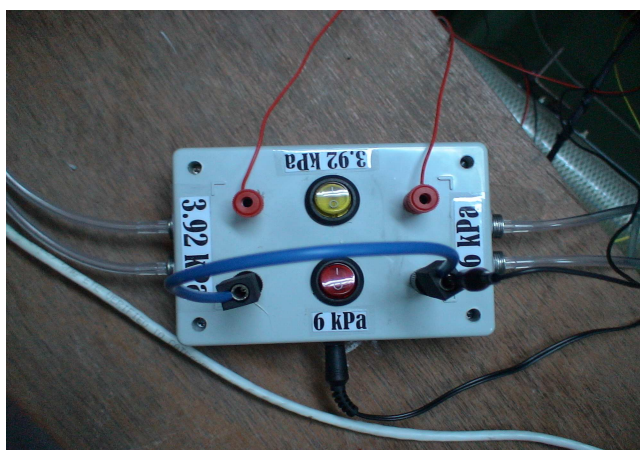
รูปที่ 4.4 ออริฟิซ (Orifice)



รูปที่ 4.5 เครื่องวัดความเร็วอากาศ (Anemometer)

4.2.3 อุปกรณ์วัดความดัน

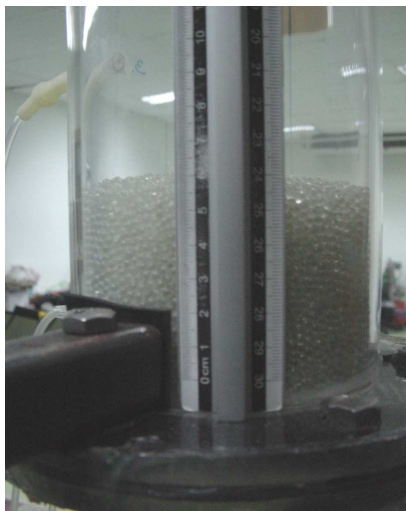
อุปกรณ์สำหรับวัดค่าความดันภายในฟลูอิดไดซ์เบดของงานวิจัยนี้ คือเซนเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor) โมเดล MPXV5004DP 3.92 kPa (0-400 mm H₂O) 1-4.9 volt output: Free Scale ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งรายละเอียดของเซนเซอร์กล่าวไว้ในภาคผนวก ข



รูปที่ 4.6 เซนเซอร์ความดัน (Pressure sensor)

4.2.4 อุปกรณ์วัดความสูงของฟลูอิดไดซ์เบด (Bed Expansion)

อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความสูงของฟลูอิดไดซ์เบด หรือการขยายตัวของเบดขณะทำการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน ประกอบด้วย สเกลไม้บรรทัดติดซึ่งติดตั้งกับฟลูอิดไดซ์เบดดังรูปที่ 4.7 และกล้องดิจิทัล (Web camera:OKER, Resolution:2.0 M pixles up to 8.0M pixles by software; 60 fps;Info noise rate 48 dB.) ที่ติดตั้งกับฟลูอิดไดซ์เบด ดังแสดงในรูปที่ 4.8



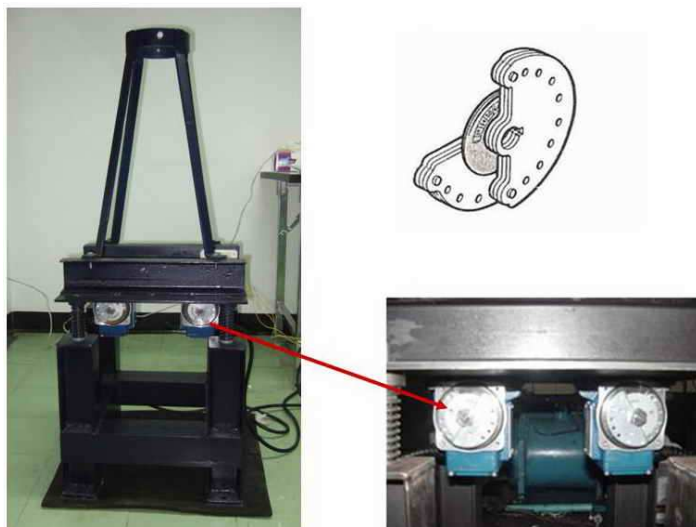
รูปที่ 4.7 สเกลไม้บรรทัด



รูปที่ 4.8 การติดตั้งกล้องดิจิทัล

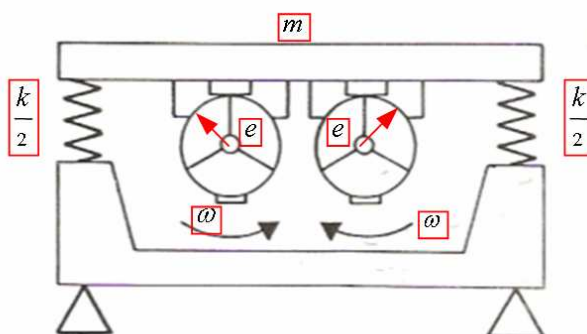
4.2.5 ชุดอุปกรณ์สั่นสะเทือน (Vibration Base)

ชุดสั่นสะเทือนที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมีส่วนประกอบหลักคือมอเตอร์เข่ายี่ห้อ OMB (Vibro-motor: TYPE BM 50/3, 2 pole: 3000 rpm, 50Hz) ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ชุดสำหรับสั่นสะเทือน

การทำงานของชุดสั่นสะเทือนสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.1 การสั่นสะเทือนนั้นเกิดจากความไม่สมดุลของการหมุนมอเตอร์ (Rotating unbalance) แสดงในรูปที่ 4.10 เมื่อมอเตอร์เขย่าหมุนในทิศทางตรงกันข้ามที่ความถี่ของการสั่นสะเทือนเดียวกัน แรงเนื่องจากการสั่นสะเทือนของมอเตอร์เขย่าจะหักล้างกันในแนวนอน และจะเสริมกันในทิศทางขนานกับแรงโน้มถ่วงของโลก หรือแนวตั้ง จึงทำให้ชุดสั่นสะเทือนสั่นเฉพาะในแนวนอนกับแรงโน้มถ่วงโลกเพียงทิศทางเดียว และใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมความถี่ของมอเตอร์ สามารถปรับระยะเชิงศูนย์กลางของมอเตอร์ซึ่งอยู่ในช่วง 30%-90%



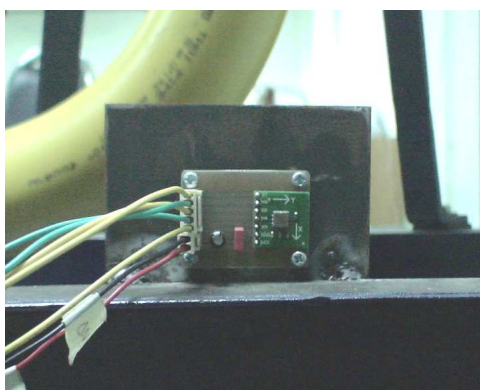
รูปที่ 4.10 Rotating Unbalance

$$m\ddot{x} + kx = (me\omega^2)\sin \omega t \quad (4.1)$$

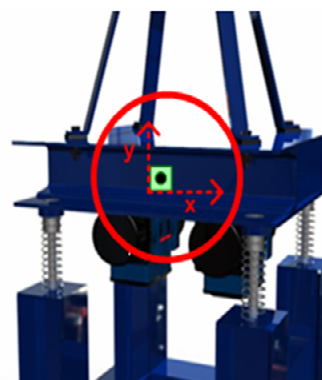
เมื่อ

- m คือ มวลทั้งหมด
 e คือ Eccentric ของมอเตอร์เขย่า
 ω คือ ความเร็วรอบของการหมุนมอเตอร์
 k คือ ค่า Stiffness ของสปริง

การสั่นสะเทือนของระบบถูกวัดด้วยเซนเซอร์วัดความเร่ง Analog Devices: ADXL210 $\pm 10g$ ซึ่งติดตั้งบริเวณฐานของชุดสั่นสะเทือน ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และเซนเซอร์วัดความเร่งมีคุณสมบัติการวัดค่าความเร่งการสั่นสะเทือนแบบ 2 แกน คือ แกน X และแกน Y และมีค่า Sensitivity X_{FILT} , Y_{FILT} ที่แรงดัน 5 Volt เท่ากับ 100 mV/g



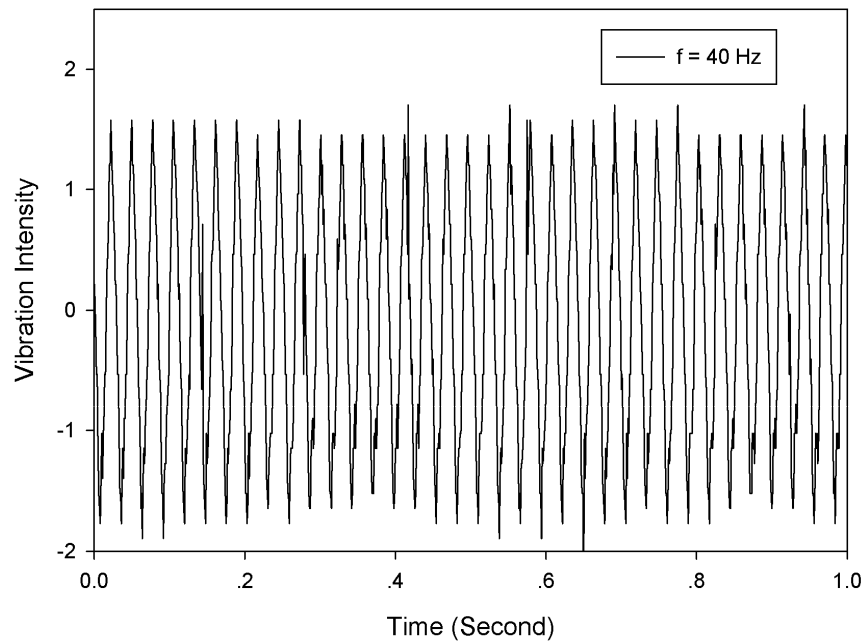
(ก) เซนเซอร์วัดความเร่ง



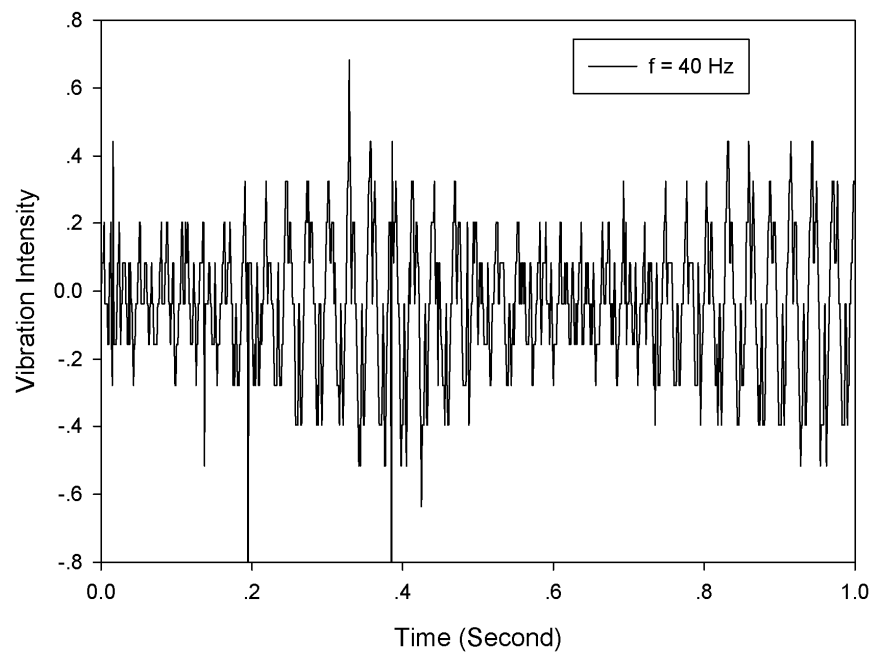
(ข) ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่ง

รูปที่ 4.11 การติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่งบริเวณ vibration base

รูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) แสดงค่าความเข้มของการสั่นสะเทือนในแนวนอนและตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงโลกในกรณีความถี่เท่ากับ 40 Hz จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีค่าความเข้มของการสั่นสะเทือนในแนวตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงโลกน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแนวนอนกับแรงโน้มถ่วงโลก ดังนั้นจึงสามารถตัดผลของการสั่นในแนวตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงโลกหรือมีการสั่นในแนวนอนกับแรงโน้มถ่วงโลกเท่านั้น



(ก) การสั่นสะเทือนในแนวตั้งขนานกับแรงโน้มถ่วงโลก



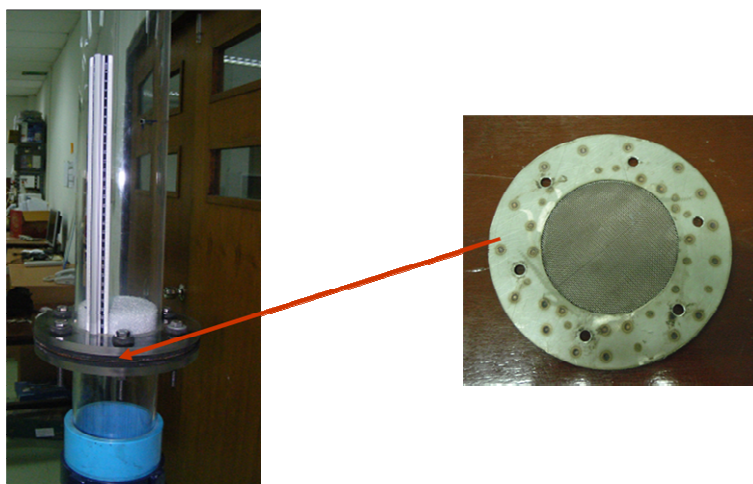
(ข) การสั่นสะเทือนในแนวตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงโลก

รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบชุดสั่นสะเทือน

4.2.6 ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์ (Fluidized Bed Column)

ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์แสดงในรูป 4.13 เป็นท่ออะคริลิก (Acrylic) ไสทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 0.10 เมตร สูง 1 เมตร โดยมีแผ่นกระจายอากาศบริเวณด้านล่างของท่อ และสเกลไม้บรรทัดติดบริเวณด้านข้างของท่ออะคริลิก

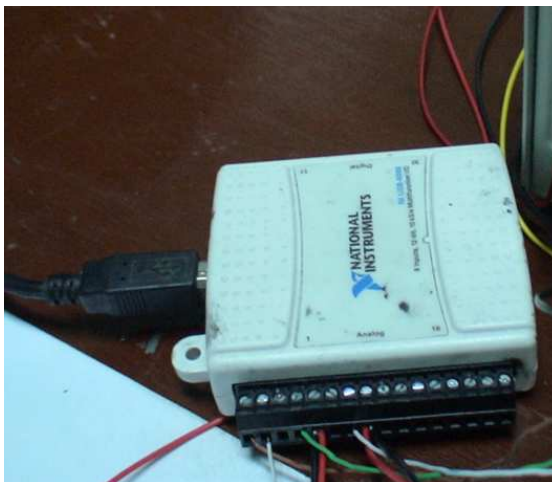
แผ่นกระจายที่ใช้สำหรับรองรับเม็ดอนุภาคแก้วภายในเบดคอลัมน์เป็นแผ่นตะแกรงสแตนเลสสำเร็จรูปที่มีลักษณะเป็นรูปกลม ขนาดของรูบนแผ่นกระจายมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 มม.



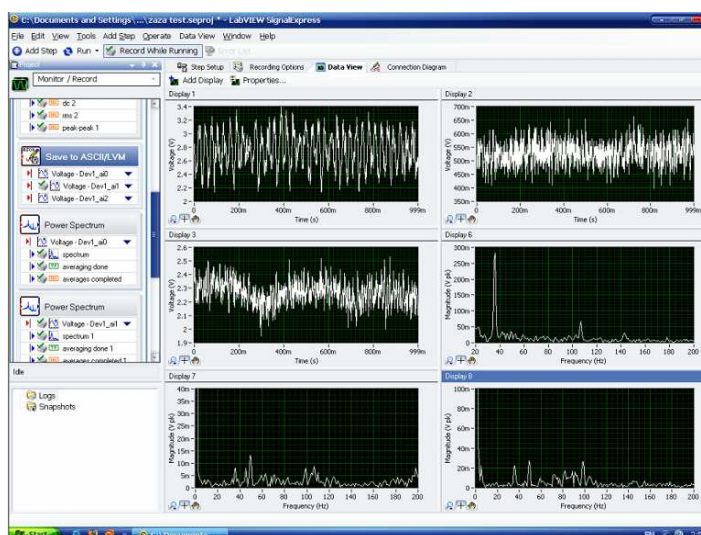
รูปที่ 4.13 ฟลูอิดไดซ์เบดคอลัมน์ (Fluidized Bed Column)

4.2.7 การบันทึกผลการทดลอง (Data Acquisitions System)

ผลการทดลองซึ่งประกอบด้วย ค่าความดันภายในเบด ค่าการสันสะท้อนของฟลูอิดไดซ์เบด ถูกบันทึกผ่านคอมพิวเตอร์โดยใช้ USB DAQ 6008 National Instrument (8 analog inputs (12-bit, 10 kS/s); 2 analog outputs (12-bit, 150 S/s); 12 digital I/O; 32-bit counter) ดังรูปที่ 4.14 ร่วมกับโปรแกรม LabView: Signal Express 3.0 (รูปที่ 4.15)



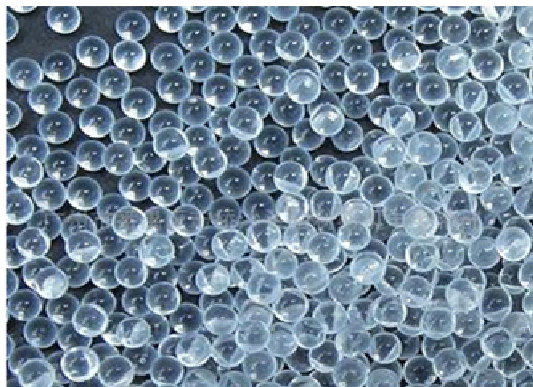
รูปที่ 4.14 USB DAQ 6008: National Instrument



รูปที่ 4.15 โปรแกรม Lab View: Signal Express 3.0

4.3 วัสดุสำหรับการทดลอง

วัสดุที่ใช้ทดลองคือ อนุภาคแก้ว (Glass Beads) ทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มม. ความหนาแน่น 2570 kg/m^3 จำนวน 1 kg. และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มม. ความหนาแน่น 2600 kg/m^3 จำนวน 1 kg. ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 เม็ดอนุภาคแก้ว (Glass beads)

4.4 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนประกอบไปด้วย

1. บรรจุเม็ดอนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มม. ความหนาแน่น 2570 kg/m³ มวล 1 kg. ลงในหอทดลอง
2. เปิดสวิทช์ให้ Blower ทำงาน ปรับอัตราการไหลของก๊าซด้วยวาล์ว บันทึกค่าความดันลดคร่อมออริฟิซและความสูงของเบด
3. เปิดสวิทช์ให้มอเตอร์เขย่า (vibro-motor) ทำงาน ปรับความถี่ของการสั่นสะเทือนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ 35 Hz บันทึกค่าความเร่งของการสั่นสะเทือนและความดันลดคร่อมเบด
4. ปรับเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซจนกระทั่งเกิดฟลูอิดไดเซชัน แล้วให้เพิ่มความเร็วก๊าซอีกประมาณ 5 ค่า โดยบันทึกค่าความดันลดคร่อมออริฟิซและความสูงของเบดทุกครั้ง ที่ปรับเพิ่มอัตราการไหล
5. ทำซ้ำการทดลองข้อ 3 และ 4 โดยปรับเพิ่มความถี่เป็น 40 Hz และ 45 Hz
6. ทำซ้ำการทดลองทั้งหมดโดยปรับเพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางของมอเตอร์เขย่า
7. ทำซ้ำการทดลองอีกครั้งโดยเปลี่ยนเม็ดอนุภาคเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มม. ความหนาแน่น 2600 kg/m³

ตัวแปรที่สำคัญจากการทดลองของงานวิจัยนี้ คือ ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ความดันลดคร่อมเบด และค่าสัดส่วนช่องว่างขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยนำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลของการสันสะท้อนที่มีต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชัน และนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบผลจากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (สมการที่ 3.23 ในบทที่ 3) สำหรับหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน

บทที่ 5

ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อกระบวนการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน โดยตัวแปรของการสั่นสะเทือนที่ทำการศึกษาได้แก่ ความถี่ของการสั่นสะเทือน และแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน สัดส่วนช่องว่างภายในฟลูอิดไดซ์เบด

5.1 การทดลองฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือน

การทดลองระบบฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยกำหนดให้การสั่นสะเทือนเป็นแบบการสั่นสะเทือนเชิงกลในแนวขนานกับแรงโน้มถ่วงของโลก อนุภาคแก้วที่ใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มม. และ 3 มม. โดยทำการบันทึกค่าความเร็วอากาศ ความดันลดคร่อมเบด และค่าความเร่งของการสั่นสะเทือน ค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนถูกปรับด้วยการปรับระยะเยื้องศูนย์กลางของมอเตอร์เขย่า ค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการทดลอง คือ 35 Hz 40 Hz และ 45 Hz

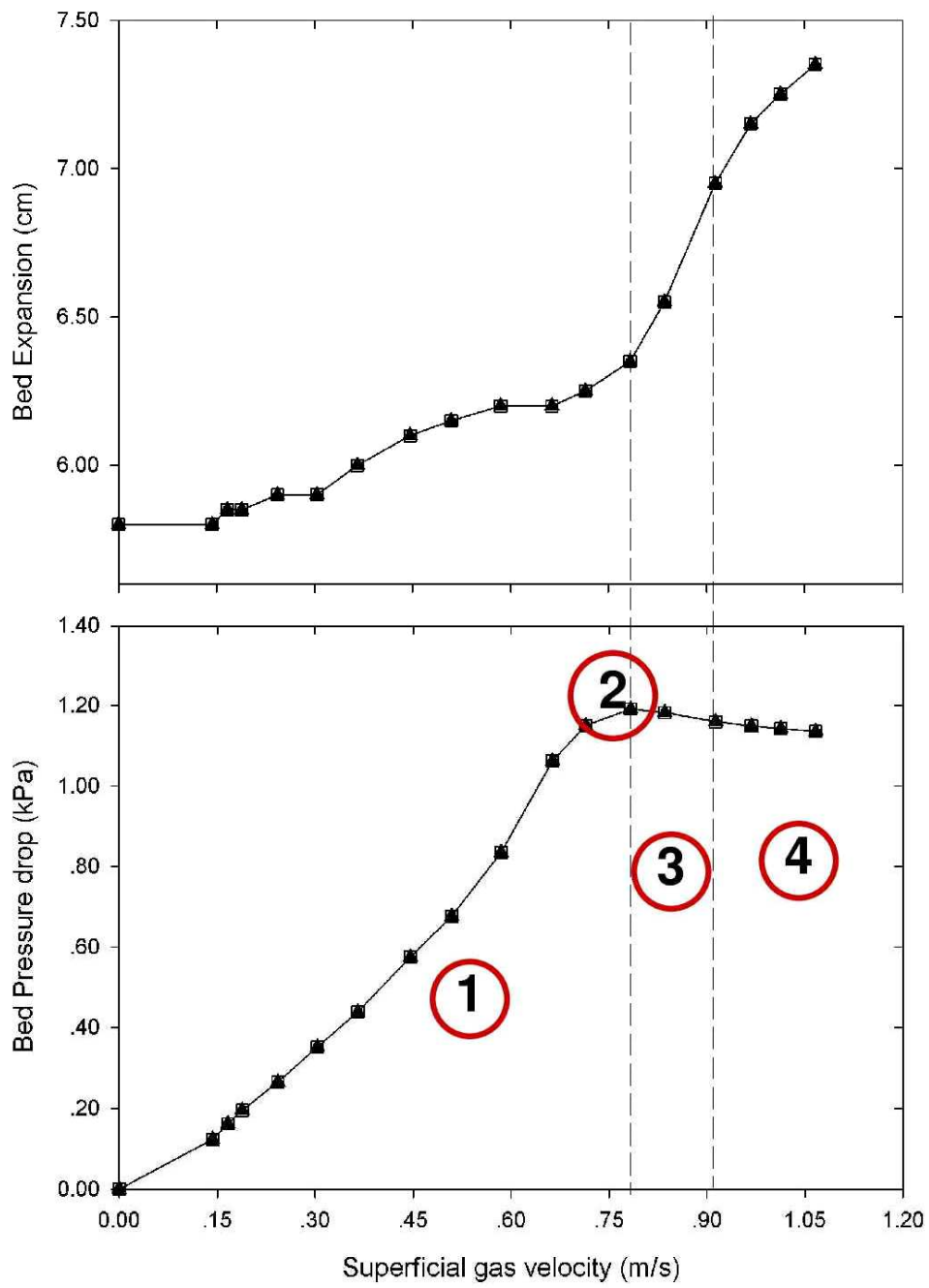
จากผลการทดลองเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ของการเกิดฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือนสามารถวิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อสถานะการเกิดฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือนได้ดังนี้

1. ผลของการสั่นสะเทือนประกอบด้วย ความถี่ และแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่มีต่อความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน
2. ผลของการสั่นสะเทือนประกอบด้วย ความถี่ และแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนที่มีต่อสัดส่วนช่องว่างภายในเบด

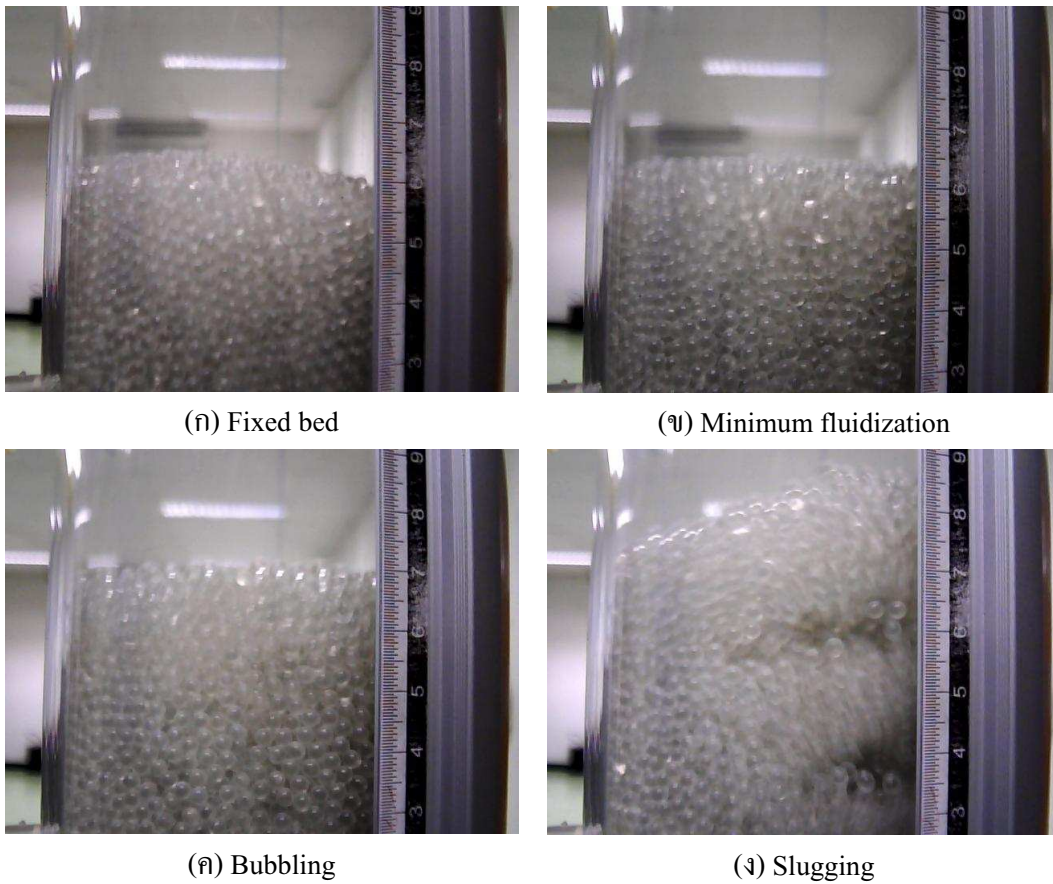
3. ผลของขนาดของอนุภาคที่มีต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั้น
4. การเปรียบเทียบผลการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั้นสะท้อนและผลจากการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนาขึ้นของงานวิจัยนี้

5.1.1 ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั้น

ลักษณะของการเกิดฟลูอิดไดเซชันแบบสั้นสะท้อนสามารถอธิบายปรากฏการณ์เกิดฟลูอิดไดเซชันแบบสั้นสะท้อนซึ่งได้จากการทดลองดังรูปที่ 5.1 สามารถแบ่งลักษณะหรือปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั้นสะท้อน ออกเป็น 4 ลักษณะดังนี้ คือ ช่วงแรกเมื่อทำการเพิ่มความเร็วก๊าซ ความดันลดคร่อมเบดจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็ว และผลจากการสั้นสะท้อนของเบดทำให้อนุภาคแก้วภายในเบดมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา และขยับชิดติดกัน ทำให้เบดมีลักษณะอัดแน่นขึ้นซึ่งทำให้ช่องว่างภายในเบดลดลง และการเปลี่ยนแปลงความสูงของเบด เมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซในช่วงแรกๆ นั้นพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงความสูงเบดของไม่มากนัก ดังรูปที่ 5.2 (ก) ช่วงที่สอง เมื่อปรับเพิ่มความเร็วก๊าซจนถึงระดับหนึ่งสังเกตได้ว่าเบดภายใต้การสั้นสะท้อนจะมีลักษณะคล้ายกับของเหลวกำลังเดือด อนุภาคแก้วมีการเคลื่อนที่ แยกห่างออกจากกัน ค่าความดันลดคร่อมเบดเริ่มคงที่ ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน (Minimum fluidization velocity) ของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั้นสะท้อน ดังรูปที่ 5.2(ข) และช่วงที่สาม เมื่อมีการเพิ่มความเร็วก๊าซขึ้นเล็กน้อยลักษณะของเบดจะมีการเกิดฟองก๊าซเล็กๆ กระจายอยู่บริเวณด้านล่างของเบด และจะเกิดเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่เมื่อลอยสู่ด้านบนของเบดหรือผิวหน้าของเบด จุดนี้จะเรียกว่า Bubbling bed ดังรูปที่ 5.2 (ค) และช่วงที่สี่ เมื่อทำการเพิ่มความเร็วก๊าซอีกพบว่าลักษณะภายในเบดจะมีฟองก๊าซขนาดใหญ่เกิดขึ้น และความดันลดคร่อมเบดเริ่มลดลง เบดลักษณะนี้เรียกว่า Slugging ดังรูปที่ 5.2 (ง) และเมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซต่อไปเรื่อยๆ พบว่าเบดจะมีลักษณะปั่นป่วนเกิดช่องว่างขนาดใหญ่ภายในเบด อนุภาคแก้วมีการกระจายตัวน้อยลงและความดันลดคร่อมเบดเริ่มลดลงเรื่อยๆ



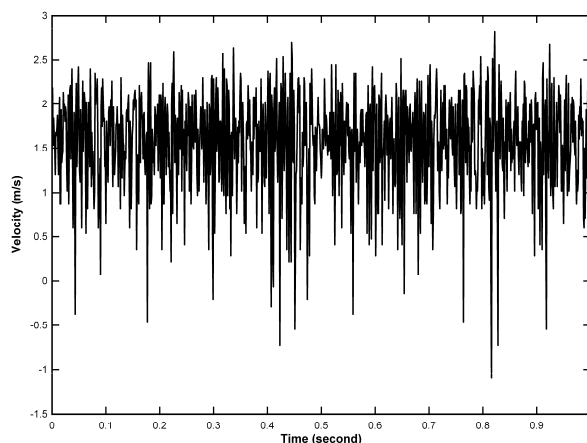
รูปที่ 5.1 ลักษณะการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์แบบเบบสันสะเทือน



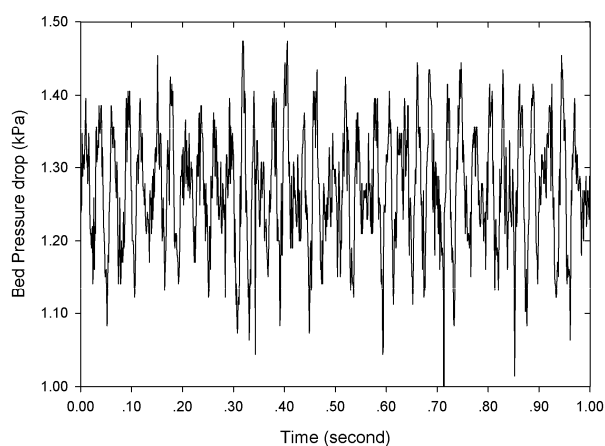
รูปที่ 5.2 ปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะท้อน

5.1.2 การหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (u_{mf})

ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน คือค่าความเร็วของของไหลที่ทำให้อนุภาคแก้วภายในเบดเริ่มขยับตัวหรือจัดเรียงตัว ในขณะเดียวกันค่าความดันลดคร่อมเบดเริ่มคงที่จากการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะท้อนสามารถหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของของไหลกับค่าความดันลดคร่อมเบด โดยค่าความเร็วของของไหลและความดันลดคร่อมเบดจะถูกบันทึกเทียบกับเวลา ดังรูปที่ 5.3 (ก) และ (ข) โดยรูปที่ 5.3 (ก) แสดงค่าความเร็วของก๊าซป้อนซึ่งวัดค่าด้วยเซนเซอร์ และกราฟในรูปที่ 5.3 (ข) แสดงค่าความดันลดคร่อมเบด



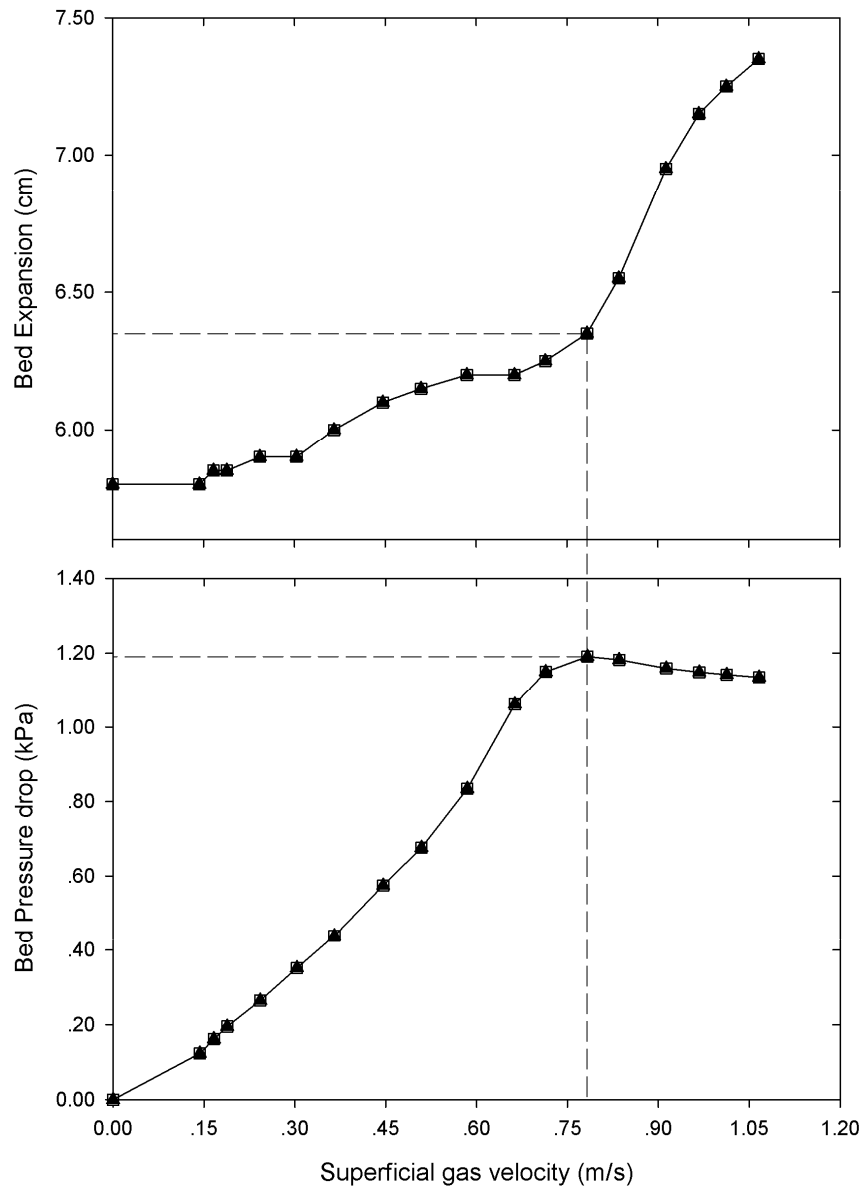
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.3 (ก) ความเร็วก๊าซป้อน และ (ข) ความดันลดคร่อมเบด
(กรณีอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. ที่ความถี่ 35 Hz)

จากรูปที่ 5.3 (ก) และ (ข) เฉลี่ยค่าความเร็วของก๊าซป้อนและค่าความดันลดคร่อมเบดในช่วงเวลาที่บันทึกเพื่อหาค่าความเร็วก๊าซป้อนเฉลี่ยและค่าความดันลดคร่อมเบดเฉลี่ยในช่วงเวลานั้น นำค่าที่ได้จากการเฉลี่ยมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซป้อนและความดันลดคร่อมเบด ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ความเร็วก๊าซป้อนกับความดันลดคร่อมเบด
(กรณีของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.)

รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซป้อนกับความดันลดคร่อมเบด และความเร็วก๊าซป้อนและความสูงของเบด การหาจุดเริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบด แบบสันสะท้อนในงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลของความดันลดคร่อมเบดเป็นหลัก และเลือกจุดที่ค่าความดันมีค่าสูงสุดเป็นจุดที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน เมื่อลากเส้นตรงจากจุดที่เริ่มเกิดฟลูอิดไดเซชัน

ตั้งฉากกับแกนของความเร็วก๊าซป้อน (เส้นประที่แสดงในรูป 5.4) และตัดกับกราฟความสูงเบด จะทำให้ได้ตำแหน่งของค่าความเร็วต่ำสุดและค่าความสูงเบดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะเทือน

5.2 การวิเคราะห์ผลของการสันสะเทือนที่มีต่อกระบวนการฟลูอิดไดเซชัน

ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะเทือนจะมีคุณลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น ขนาดของอนุภาค ความเร็วก๊าซ ความถี่ของการสันสะเทือน และแอมพลิจูด โดยการวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยหัวข้อต่อไปนี้

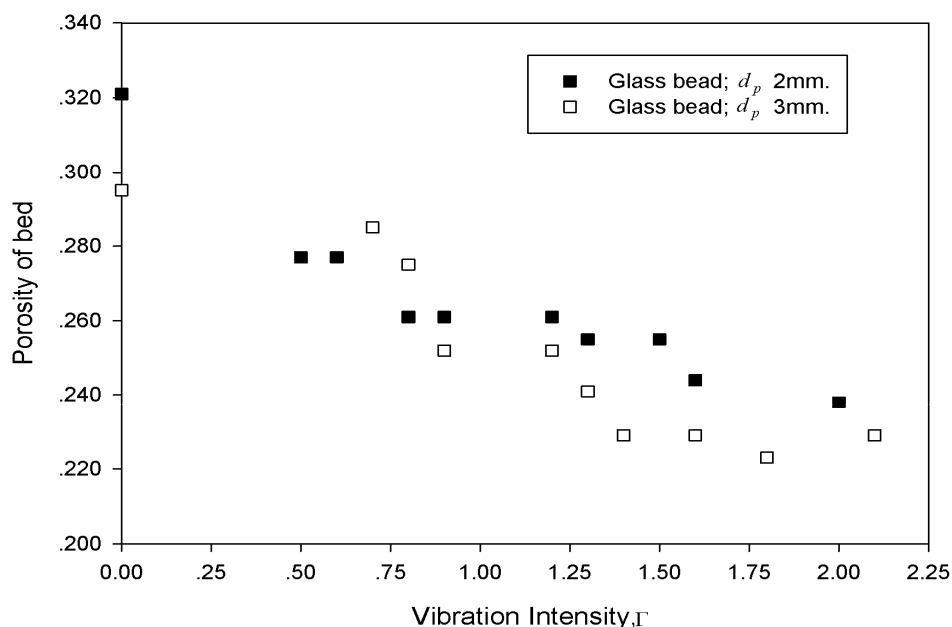
5.2.1 อิทธิพลของการสันสะเทือนที่มีต่อสัดส่วนช่องว่างภายในเบด (ε_{mf})

สำหรับอนุภาคภายในเบดไม่ว่าจะเป็นอนุภาคชนิดใดก็ตาม ย่อมมีช่องว่างของของไหลอยู่ภายในเบดเสมอ โดยขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของอนุภาค สัดส่วนช่องว่างสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาและขึ้นกับความเร็วก๊าซป้อน ความเข้มของการสันสะเทือน ความหนาแน่นของอนุภาคแก้ว สำหรับงานวิจัยนี้ใช้อนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. ความหนาแน่น 2570 kg/m^3 และอนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. ความหนาแน่น 2600 kg/m^3

จากการทดลองพบว่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบดก็มีค่าลดลงเมื่อมีการสันสะเทือนของเบดทั้งในกรณีที่มีอนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. และ 3 มม. ดังแสดงในรูปที่ 5.5 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความเข้มของการสันสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นสัดส่วนช่องว่างจะมีค่าลดลงเนื่องจากเบดรับแรงสันสะเทือนทำให้เม็ดอนุภาคอัดตัวกันแน่นขึ้น ส่งผลให้ความสูงของเบดลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Tatemoto และคณะ [16] และ Mawatari และคณะ [19] ที่สรุปว่าการสันสะเทือนสามารถทำให้สัดส่วนช่องว่างภายในเบดมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการทดลองฟลูอิดไดเซชันในกรณีที่ไม่มีการสันสะเทือนของเบด

เมื่อเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อค่าสัดส่วนช่องว่างขณะเกิดฟลูอิดไดเซชันดังแสดงในรูปที่ 5.5 พบว่า เมื่อขนาดของอนุภาคแก้วเพิ่มขึ้น ค่าสัดส่วนช่องว่างขณะเกิดฟลูอิดไดเซชันมีค่าลดลง เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. มีค่ามากกว่าของอนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. ดังสมการที่ 2.1 (ในบทที่ 2) แสดงให้เห็นว่า

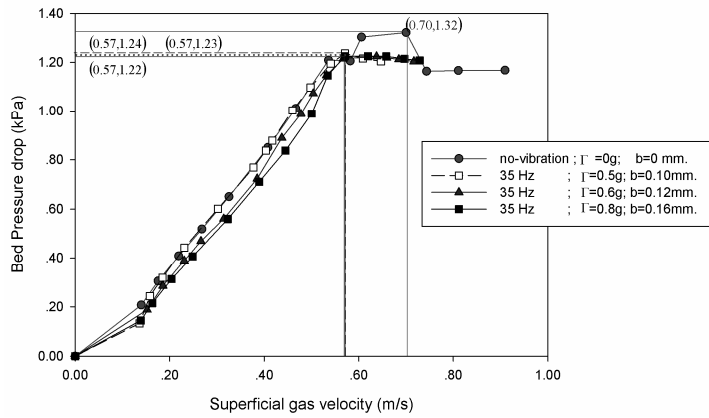
ความหนาแน่นอนุภาคมีผลต่อค่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบด เมื่อการทดลองกำหนดให้มวลของอนุภาคแก้วมีค่าเท่ากับ 1 kg.



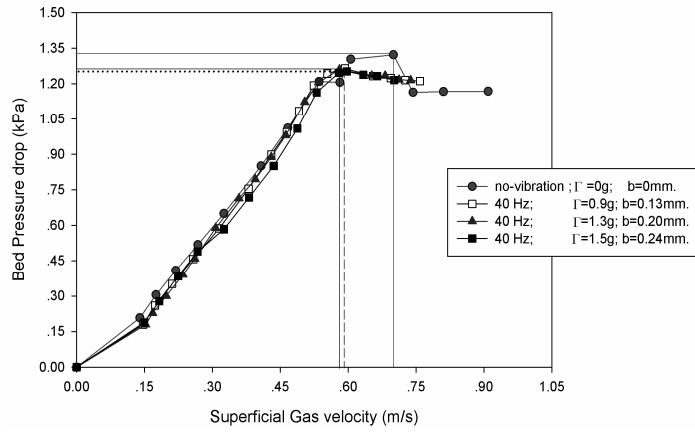
รูปที่ 5.5 ผลความเข้มของการสั่นสะเทือน (Γ) ต่อค่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบด (ε_{mf}) ขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน

5.2.2 อิทธิพลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อค่าความดันลดคร่อมเบด (ΔP_{mf})

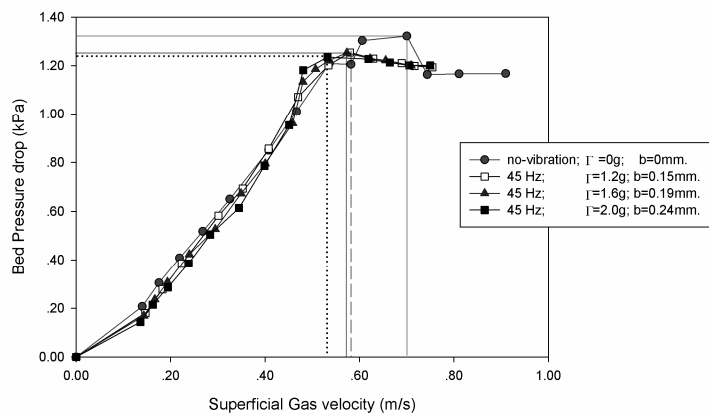
จากรูปที่ 5.6 และ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วอากาศและความดันลดคร่อมเบดที่ความถี่ของการสั่นสะเทือน 35 Hz 40 Hz 45Hz และกรณีที่ไม่มีการสั่นสะเทือนของเบด เมื่อเปรียบเทียบความดันลดคร่อมเบดที่ความถี่ของการสั่นสะเทือนเดียวกัน พบว่าเมื่อค่าความเข้มการสั่นสะเทือนหรือแอมพลิจูดการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ความดันลดคร่อมเบดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชันมีค่าลดลง และมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่มีการสั่นเบด เนื่องจากการสั่นสะเทือนมีส่วนช่วยให้อนุภาคแก้วภายในเบดเคลื่อนที่แยกจากกันตลอดเวลา จัดเรียงตัวเป็นระเบียบ และอากาศสามารถผ่านเบดได้ง่ายกว่ากรณีที่ไม่มีการสั่นสะเทือนของเบด จึงทำให้ค่าความดันลดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชันลดลง



(ก)

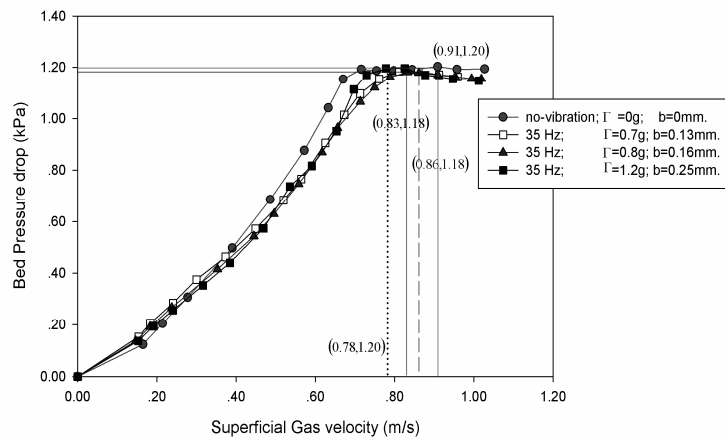


(ข)

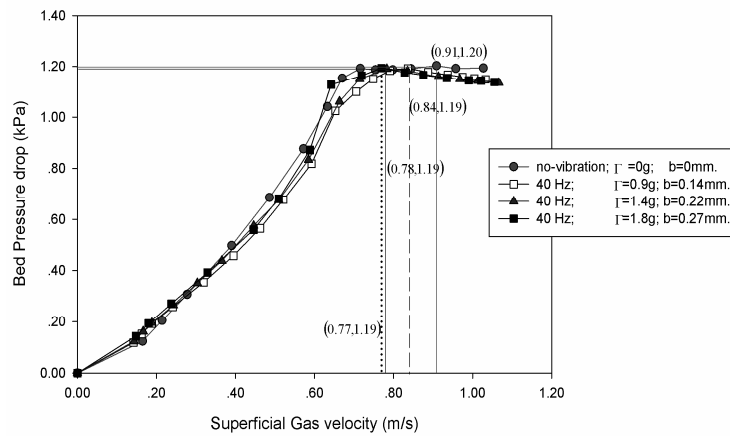


(ค)

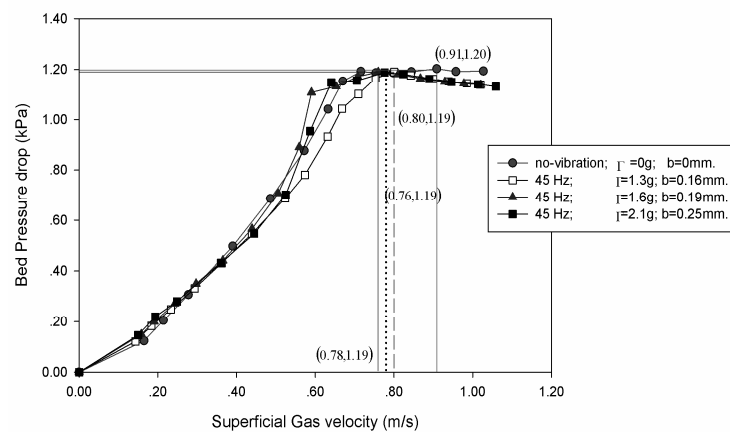
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซและความดันลดคร่อมเบด กรณีการสั่นสะเทือนของเบดที่ (ก) 35 Hz (ข) 40 Hz (ค) 45Hz สำหรับอนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม.



(ก)



(ข)



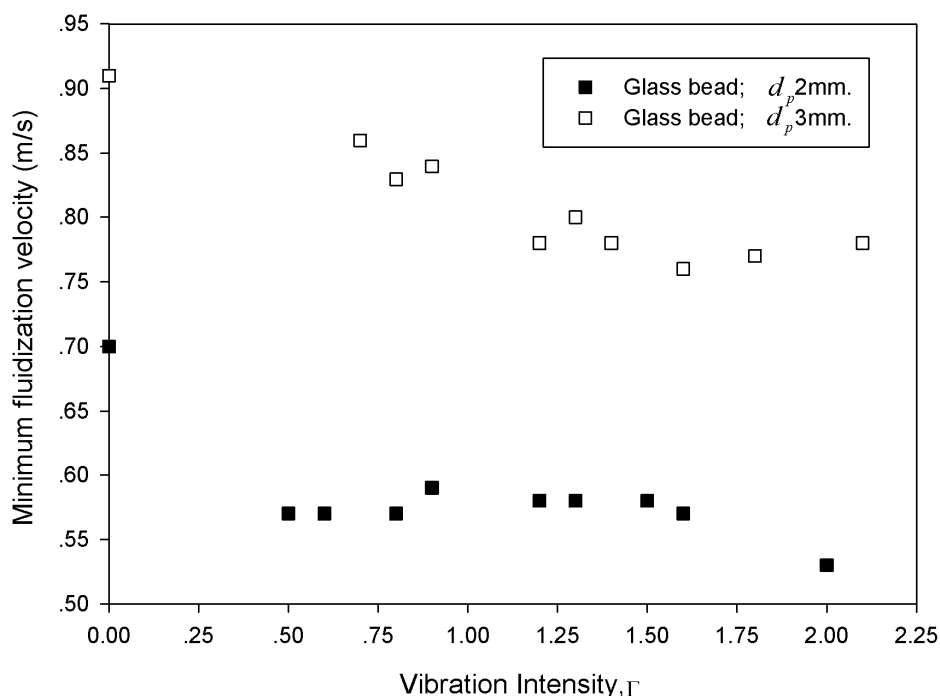
รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วก๊าซและความดันลดคร่อมเบด กรณีการสั่นสะเทือนของเบดที่ (ก) 35 Hz (ข) 40 Hz (ค) 45 Hz สำหรับอนุภาคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.

5.2.3 อิทธิพลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน

ชัน (u_{mf})

ผลความเข้มของการสั่นสะเทือนต่อค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันแสดงในรูปที่ 5.8 พบว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันมีค่าน้อยกว่าฟลูอิดไดเซชันแบบไม่มีการสั่นสะเทือน และมีค่าลดลงเมื่อค่าความเข้มของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากฟลูอิดไดเซชันเกิดเมื่อน้ำหนักของอนุภาคมีค่าเท่ากับแรงพยุงจากของไหล (แรงเสียดทานร่วมกับแรงต้านการไหล) เมื่อมีการสั่นสะเทือนทำให้อนุภาคแกว่งภายในเบดอัดแน่นขึ้นส่งผลให้ของแข็งลอยได้ง่ายขึ้นหรือแรงพยุงจากของไหลลดลง ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันจึงลดลงและเกิดฟลูอิดไดเซชันได้เร็วขึ้นเมื่อความเข้มของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น

ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยศึกษาและทดลองด้วยอนุภาคนาเด็กมา (Geldart group A และ C) ที่ผ่านมา [16] [19] คือ เมื่อความเข้มของการสั่นสะเทือนมีค่ามากกว่า 1 ค่าความเร็วต่ำสุดจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับการสั่นสะเทือนเป็นสำคัญ



รูปที่ 5.8 ผลความเข้มของการสั่นสะเทือนต่อค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน

5.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง

สำหรับในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการที่ได้พัฒนาขึ้นซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 3 กับผลการทดลองเพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของสมการ

ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันแบบสันหาได้จากสมการที่ 3.23 ซึ่งประกอบด้วยเทอมของตัวแปรสามเทอมคือ เทอมแรกเป็นเทอมของ Exponential ซึ่งไม่นำมาพิจารณา เทอมที่สองเป็นเทอม Complex ของผลเฉลย ซึ่งอาจเขียนในรูปของ Sin หรือ Cos และเทอมที่สามเป็นเทอมของค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับเวลา

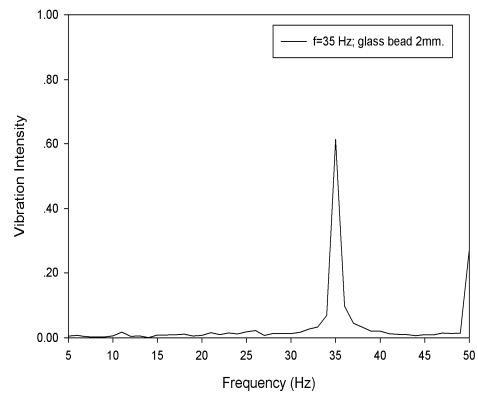
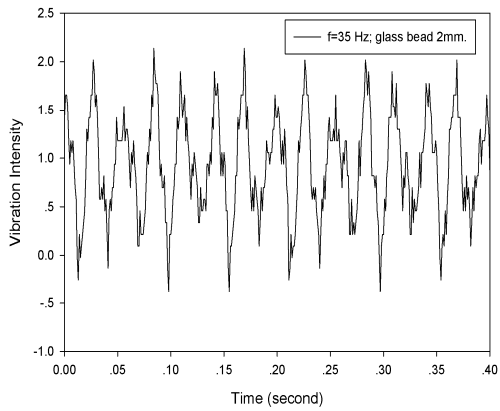
พิจารณาเทอมที่สองของสมการ 3.23 จะเห็นว่าความเร็วของของไหลเป็นฟังก์ชันกับเวลาและมีความถี่เดียวกับความถี่ของการสั่นสะเทือน ดังนั้นในขั้นตอนนี้เป็นการพิสูจน์ว่าความถี่ของความเร็วของอากาศป้อนและความดันลดคร่อมเบดมีค่าเท่ากับความถี่ของการสั่นสะเทือน โดยการวิเคราะห์ Fast Fourier Transforms (FFT) ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.9 ในกรณีที่มีการสั่นสะเทือนเท่ากับ 35 Hz

จากรูปที่ 5.9 ผลของการวิเคราะห์ Fast Fourier Transforms (FFT) แสดงว่าแอมพลิจูดสูงสุดของความเร็วอากาศป้อนและความดันลดคร่อมเบดเกิดขึ้นที่ความถี่เท่ากับ 35 Hz ซึ่งเป็นความถี่ของการสั่นสะเทือน นั่นก็คือความเร็วอากาศป้อนและความดันลดคร่อมเบดมีความถี่เดียวกับการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นไปตามสมการ 3.23

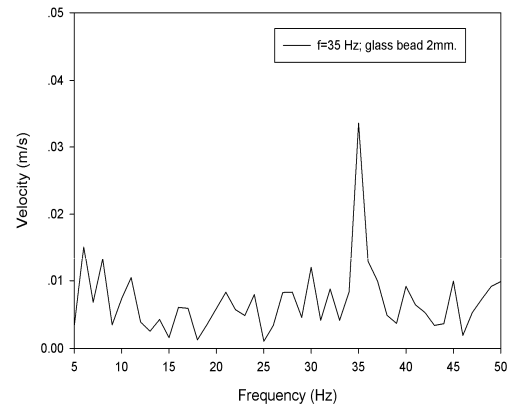
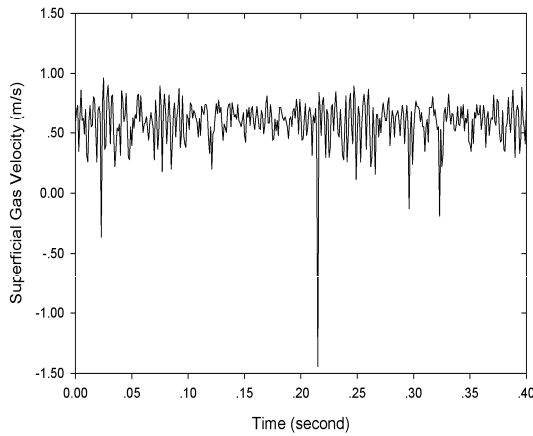
สำหรับเทอมที่สามของผลเฉลยสมการสำหรับการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันเป็นค่าคงที่ ประกอบด้วยตัวแปรที่สำคัญคือ ค่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบด และค่าของสัมประสิทธิ์ของแรงปฏิภักิริยาระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็ง (Fluid-particles interaction coefficient, β) เนื่องจากผลการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันหาของงานวิจัยนี้มีค่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบดอยู่ในช่วง 0.23-0.34 และค่า Re_p อยู่ในช่วง 65-171 ดังนั้นจึงเลือกสมการ 2.21 (สมการ Ergun) สำหรับค่า β ของเทอมที่สามของสมการ 3.23 และความเร็วก๊าซป้อน u มีค่าเท่ากับ ϵu_f จะได้

$$u^2(t) \left[\frac{(1-\epsilon)1.75\rho_f}{d_p \epsilon^3} \right] + u(t) \left[\frac{150(1-\epsilon)^2 \mu_f}{d_p^2 \epsilon^3} \right] + (1-\epsilon)(\langle \rho_f \rangle - \langle \rho_p \rangle)g = 0 \quad 5.1$$

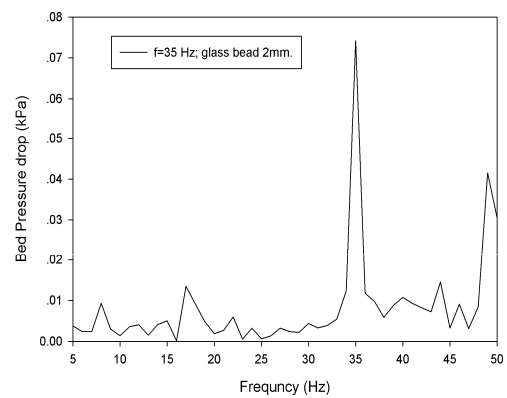
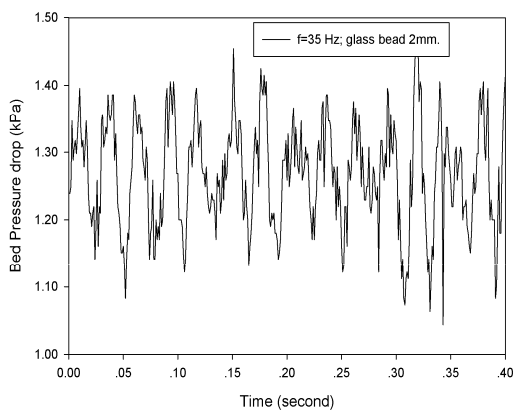
ผลการคำนวณด้วยสมการนี้เปรียบเทียบกับผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 5.10 และ 5.11



(ก)



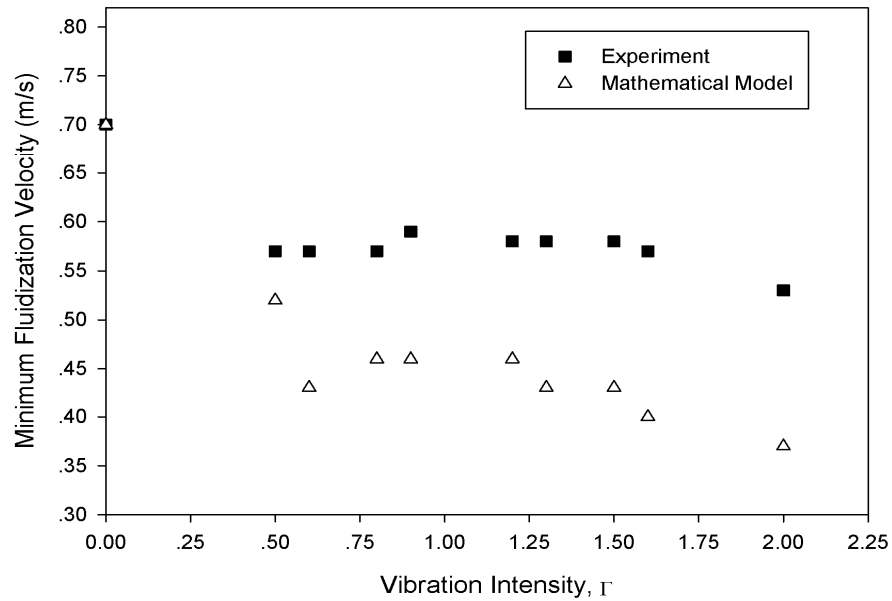
(ข)



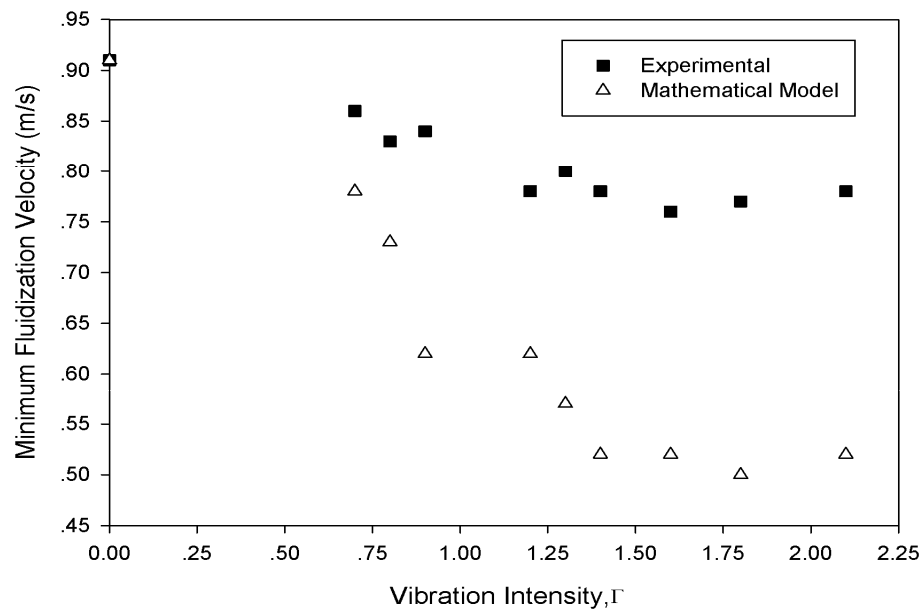
(ค)

รูปที่ 5.9 การวิเคราะห์ Fast Fourier Transforms ของอนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม.

ณ ความถี่การสั่นสะเทือน 35 Hz



รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันระหว่างการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นของงานวิจัยนี้สำหรับอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม.



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันระหว่างการทดลองกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นของงานวิจัยนี้สำหรับอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.

จากกราฟในรูปที่ 5.10 และ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนกับการคำนวณด้วยสมการ 5.1 พบว่าผลของการคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์มีลักษณะการลดลงของค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันมีลักษณะเหมือนกัน และจากกราฟทั้งสองสังเกตได้ว่าเมื่อค่าความเข้มของการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นค่าความเร็วของการเกิดฟลูอิดไดเซชันระหว่างการทดลองและการคำนวณด้วยสมการจะแยกห่างออกจากกัน ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะเหมือนกับการทดลองของ Tatemoto และคณะ [16] ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับการคำนวณด้วยสมการ Ergun แสดงในรูปที่ 2.4 (บทที่ 2 ของรายงานวิจัย) และค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับกรณีที่ไม่มีการสั่นสะเทือนจากการคำนวณด้วยสมการที่พัฒนาขึ้นและการทดลองจะมีค่าเท่ากัน

เนื่องจาก β ของสมการที่พัฒนาขึ้นถูกแทนค่าด้วยสมการ Ergun จึงทำให้ได้สมการ 5.1 ซึ่งเหมือนกับสมการที่ Tatemoto และคณะ [16] ใช้เปรียบเทียบกับผลการทดลองสำหรับอนุภาคกลุ่ม A กับ C ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการนี้ใช้ทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ดีเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กมาก (น้อยกว่า 0.001 mm) แต่ที่อนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.001 mm ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันที่คำนวณด้วยสมการมีค่าน้อยกว่าผลจากการทดลอง และจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มของการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ ดังนั้นสมการ 2.21 (สมการ Ergun) ที่ใช้แทนค่า β ใช้ได้ไม่ดีสำหรับอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 0.001 mm แม้ว่าสัดส่วนช่องว่างน้อยกว่า 0.8

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่มีการสั่นสะเทือนของเบดและฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน และปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระบวนการฟลูอิดไดเซชันสำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นได้แก่ ความถี่ของการสั่นสะเทือน ความเข้มการสั่นสะเทือน แอมพลิจูด และคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้งการพิสูจน์สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน สามารถสรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์ของงานวิจัยได้ดังนี้

1. การทดลองเปรียบเทียบระหว่างฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่มีการสั่นสะเทือนของเบด และระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน พบว่าฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนสามารถเกิดปรากฏการณ์ฟลูอิดไดเซชันเร็วกว่า (ค่าความเร็วก๊าซมีค่าน้อยกว่า) ฟลูอิดไดซ์เบดแบบไม่มีการสั่นสะเทือน เนื่องจากการสั่นสะเทือนทำให้อนุภาคจัดเรียงตัว ชิดติดกันเป็นระเบียบ และมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา

2. การศึกษาอิทธิพลของความเข้มการสั่นสะเทือนที่มีต่อค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน และความดันลดคร่อมเบดของระบบฟลูอิดไดเซชัน พบว่าเมื่อความเข้มของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันและค่าความดันลดคร่อมเบดมีค่าลดลง เนื่องจากแรงจากการสั่นสะเทือนสามารถลดแรงพุงจากของไหล และการสั่นสะเทือนจะทำให้เบดเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง ตลอดเวลาจึงทำให้อากาศผ่านเบดได้ง่ายกว่ากรณีที่ไม่มีการสั่นสะเทือน จากการทดลองของงานวิจัยนี้ พบว่าอนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2

มม. ที่ค่าความเข้มการสั่นสะเทือน 2.0g ความถี่การสั่นสะเทือน 45 Hz มีค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน 0.53 m/s และพบว่าอนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. ที่ค่าความเข้มการสั่นสะเทือน 2.1g ความถี่การสั่นสะเทือน 45 Hz มีค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน 0.78 m/s

3. การศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อสัดส่วนช่องว่างภายในเบด พบว่าเมื่อความเข้มของการสั่นสะเทือนและค่าแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสัดส่วนช่องว่างจะมีค่าลดลง เนื่องจากผลของการสั่นสะเทือนทำให้อนุภาคภายในเบดอัดแน่นขึ้น (ความสูงเบดลดลง) อนุภาคแก้วภายในเบดจะมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา จากการทดลองอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. ที่ค่าความเข้มการสั่นสะเทือน 2.0g ความถี่การสั่นสะเทือน 45 Hz มีค่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบดที่ 0.238 และอนุภาคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. ที่ค่าความเข้มการสั่นสะเทือน 2.1g ความถี่การสั่นสะเทือน 45 Hz มีค่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบดที่ 0.229

4. ความเร็วอากาศและความดันลดคร่อมเบดมีความถี่เดียวกับความถี่ของการสั่นสะเทือน ซึ่งสอดคล้องกับผลเฉลยสมการสำหรับการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน

5. การเปรียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือนระหว่างผลจากการทดลองและผลจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันที่คำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้นเหมือนกับการทดลอง แต่ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณคือ ค่าสัดส่วนช่องว่างยังต้องได้มาจากการทดลอง และเมื่อพิจารณาเฉพาะเทอมของค่าคงที่ของผลเฉลยสมการสำหรับการทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ถ้าแทนค่า β ด้วยสมการ 2.21 จะได้สมการของ Ergun ซึ่งใช้สำหรับทำนายค่าความเร็วของการเกิดฟลูอิดไดเซชันแบบไม่มีการสั่นเบดที่ใช้กันทั่วไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมปรากฏการณ์ของฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วก๊าซป้อนสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน
2. ควรทำการทดลองที่ความถี่ของการสั่นสะเทือนมากกว่า 45 Hz เพื่อศึกษาพฤติกรรมของฟลูอิดไดเซชันที่ความถี่ของการสั่นสะเทือนสูงๆ

3. ควรศึกษาผลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อค่า β หรือสัมประสิทธิ์ของแรงปฏิกริยาระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็ง (Fluid-Particles Interaction Coefficient) สำหรับการนำมาใช้แทนค่าในการคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์

4. จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์การใช้งานในด้านต่างๆเพื่อให้เกิดความเหมาะสมและเจือจางที่ต้องการได้ เช่น การประยุกต์ใช้ในระบบอบแห้งผลิตภัณฑ์ต่างๆที่มีการเกาะกันแน่น ความชื้นสูง การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การนำฟลูอิดไดซ์เบคไปใช้ในกระบวนการแช่แข็งอาหาร หรือนำไปใช้ในการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวล เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kunii, D. and Levenspiel, O. 1999. Fluidization Engineering. 2nd ed. McGraw-Hill. New York.
- [2] Ergun, S. 1952. Fluid flow through packed columns, Chemical Engineering Progress. 48: 89-94.
- [3] Anderson, T.B. and Jackson, R. 1967. A fluid mechanical description of fluidized bed, Industrial and Engineering Chemistry Fundamental. 6: 527-539.
- [4] Ishii, M. 1975. Thermo-fluid Dynamic Theory of Two-phase Flow. Eyrolles. Paris.
- [5] Pritchett, J.W., Blake, T.R. and Garg, S.K., 1978. A numerical model of gas fluidized beds, AIChE symposium series. 74: 134-148.
- [6] Wen, C.Y. and Y.H. Yu. 1966. A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity, American Institute of Chemical Engineers Journal. 12: 610-612.
- [7] Geldart, D. 1973. Types of gas fluidization, Powder Technology. 7: 285-292.
- [8] Gupta, D. and Mujumdar, A.S. 1980. Aerodynamic and Thermal Characteristics of Vibrated Fluid Beds-A review. In Proceeding of second International Symposium at McGill University. 1: 141-150.
- [9] Gupta, D. Leung, P. and Mujumdar, A.S. 1980. Drying of Granular Material in A Vibrated Fluidized Bed. In Proceeding of second International Symposium at McGill University (Dry'80). Vol. II. (Mujumdar, A.S., ed.). p. 201-207. Hemisphere. Washington.
- [10] Ringer, D. and Mujumdar, A.S. 1982. Flow and Immersed Surface Heat Transfer in Vibro-Fluidized Bed. *In* Drying'82. (Mujumdar, A.S., ed.). p. 67-73. Hemisphere. New York.
- [11] Erdesz, K., Mujumdar, A.S. and Ringer, D.U. 1986. Hydrodynamic Similarity of Conventional and Vibrated Fluidized Beds. In Proceeding of Fifth International Symposium on Drying at Massachusetts Institute of Technology. Vol. I. (Mujumdar, A.S., ed.). p. 169-176. Hemisphere. Washington.
- [12] Kuipers, N.J.M. Stamhuis, E.J. and Beenaker, A.A.C.M. 1996. Fluidization on potato starch in a stirred vibrating fluidized bed, Chemical Engineering Science. 15: 2727-2732.

- [13] Noda, K. Mawatari, Y. and Uchida, S. 1998. Flow patterns of particles in a vibrated fluidized bed under atmospheric or reduce pressure, *Powder Technology*. 99: 11-14.
- [14] Mawatari, Y. Koide, T. Tatemoto, Y. Takeshita, T. and Noda, K. 2001. Comparison of three vibrational modes (twist, vertical and horizontal) for fluidization of fine particles, *Advanced Powder Technology*. 12: 157-168.
- [15] Zhou, T. Kage, H. Funaoka, S. Ogura, H. and Matsuno, Y. 2001. Fluidization behavior of glass beads under different vibration modules, *Advanced Powder Technology*. 12: 559-575.
- [16] Tatemoto, Y., Mawatari, Y. and Noda, K. 2004. Prediction of minimum fluidization velocity for vibrated fluidized bed, *Powder Technology*. 131: 66-70.
- [17] Xu, C. and Zhu, J. 2005. Experimental and theoretical study on the agglomeration arising from fluidization of cohesive particles-effects of mechanical vibration, *Chemical Engineering Science*. 60: 6529-6541.
- [18] Xu, C. and Zhu, J. 2006. Parametric of fine particle fluidization under mechanical vibration, *Powder Technology*. 60: 135-144.
- [19] Mawatari, Y. Koide, T. Tatemoto, Y. Uchida, S. and Noda, K. 2002. Effect of particle diameter on fluidization under vibration, *Powder Technology*. 123: 69-74.
- [20] Jin, H. Zhang, J. and Zhang, B. 2007. The effect of vibration on bed voidage behaviors in fluidized beds with large particles, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 24: 389-397.
- [21] Barletta, D., Donsi, G., Ferrari, G., Poletto, M., Russo, P. 2008. The effect of mechanical vibration on gas fluidization of fine aeratable powder, *Chemical Engineering Research and Design*. 86: 359-369.
- [22] Valverde, J.M. Quintanilla, M.A.S, Castellanos. A, Lepek. Pfeffer, R. and Dave, R.N. 2008. Nanofluidization as affected by vibration and electrostatic fields, *Chemical Engineering Science*. 63: 5559-5569.
- [23] Zhou, T. Yang, J. and Song, L. 2009. Agglomerating vibro-fluidization behavior of nano-particle, *Advanced Powder Technology*. 20: 158-163.

- [24] Lin, J.S. Chen, M.N. and Chao, B.T. 1985. A novel radioactive particles tracking facility for measurement of solid motion in gas fluidized beds, American Institute of Chemical Engineers Journal. 31: 465-577.
- [25] Cundall, P.A. and Strack, O.D. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies, Geotechnique. 29: 47-65.
- [26] Tatemoto, Y., Mawatari, Y. and Noda, K. 2005. Numerical simulation of particle motion in vibrated fluidized bed, Powder Technology. 59: 437-447.
- [27] Tatemoto, Y., Mawatari, Y. and Noda, K. 2005. Numerical simulation of cohesive particle motion in vibrated fluidized bed, Powder Technology. 60: 5010-5021.
- [28] Limtrakul, S. Rotjanavijit, W. and Vatanatham, T. 2007. Lagrangian modeling and simulation of effect of vibration on cohesive particle movement in a fluidized bed, Chemical Engineering Science. 62: 232-245.
- [29] Huilin, L. Xiang, L. Shuyan, W. Goudong, L. Juhui, C. and Yikun, L. 2010. Numerical simulation of particle motion in vibrated fluidized beds, Powder Technology. 197: 25-35.
- [30] สุวัฒน์ ทรุฑ์ศนวินท์. 2542. แนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการอบแห้งข้าวเปลือกโดยเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [31] ชัยชาญ แสงจันทร์. 2545. การจำลองแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นในสามมิติโดยวิธีการวิเคราะห์หอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [32] วรณวรพงศ์ ไรจนวิจิตร. 2545. การสร้างแบบและจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [33] สุวิณี สุนทรสมัย. 2545. การจำลองการถ่ายเทโมเมนตัมและความร้อนในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [34] ศุภฤกษ์ วงศ์ศิริวรรณ. 2546. การจำลองแบบการอบแห้งในฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นในสามมิติโดยการวิเคราะห์หอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- [35] Deen, N.G., Van Sint Annaland, M. Vander Hoef, M.A. and Kuipers, J.A.M. 2007. Review of discrete particle modeling of fluidized bed, *Chemical Engineering Science*. 62: 28–44.
- [36] Whitaker, S. 1969. *Advance in Theory of Fluid Motion in Porous Media*, Industrial and Engineering Chemistry. 61: 14-28.
- [37] Drew, D.A., Segel, L.A., 1971. Averaged equations for two-phase flows, *Studies in Applied Mathematics*. 50: 205-231.
- [38] Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier. New York.
- [39] Slattery, J.C. 1967. General Balance Equation for a Phase Interface, *Industrial and Engineering Chemistry Fundamental*. 6: 108-115.
- [40] Zhang, D.Z. and Prosperetti, A. 1994. Averaged equations for inviscid disperse two-phase flow, *Journal of Fluid Mechanics*. 267: 185-219.
- [41] Kreyszig, E. 1998. *Advanced Engineering Mathematical*. 8th Edition. Abridaged International Student Edition. p. 104-105. John Wiley & Sons.

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

การทดลองฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือน

1. กรณีของอนุภาคนาคนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. การสั่นสะเทือนที่ 35 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์กลาง $e = 50\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.10 มม. ความเข้มข้นการสั่นสะเทือน 0.5g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.061	0.188
0.14	0.13	0.061	0.188
0.16	0.24	0.061	0.188
0.18	0.32	0.061	0.188
0.23	0.44	0.0615	0.194
0.30	0.60	0.062	0.201
0.38	0.77	0.063	0.214
0.40	0.84	0.0635	0.220
0.42	0.88	0.064	0.226
0.46	1.00	0.065	0.238
0.50	1.10	0.066	0.249
0.54	1.19	0.0675	0.266
0.57	1.24	0.0685	0.277
0.61	1.22	0.0715	0.307
0.65	1.20	0.074	0.331

2. กรณีของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. การสั่นสะเทือนที่ 40 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 50\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.13 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 0.9g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.0595	0.167
0.15	0.18	0.0595	0.167
0.17	0.26	0.060	0.174
0.21	0.35	0.061	0.188
0.26	0.46	0.062	0.201
0.32	0.59	0.0625	0.207
0.38	0.75	0.063	0.214
0.43	0.90	0.0645	0.232
0.46	0.99	0.0645	0.232
0.49	1.08	0.0645	0.232
0.52	1.19	0.0655	0.244
0.55	1.24	0.066	0.249
0.59	1.26	0.067	0.261
0.65	1.23	0.068	0.271
0.69	1.22	0.07	0.292
0.73	1.22	0.0735	0.326
0.76	1.21	0.0745	0.335

3. กรณียของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. การสั่นสะเทือนที่ 45 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 50\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.15 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 1.2g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.0590	0.160
0.15	0.18	0.0595	0.167
0.18	0.28	0.0595	0.167
0.22	0.39	0.0605	0.181
0.30	0.58	0.0615	0.194
0.35	0.69	0.0620	0.201
0.41	0.86	0.0625	0.207
0.47	1.07	0.0625	0.207
0.53	1.20	0.0635	0.220
0.58	1.25	0.0670	0.261
0.63	1.23	0.0665	0.255
0.69	1.21	0.0675	0.266
0.72	1.20	0.071	0.302
0.75	1.19	0.0735	0.326

4. กรณียของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. การสั่นสะเทือนที่ 35 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 70\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.16 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 0.8g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.0605	0.181
0.15	0.19	0.0605	0.181
0.19	0.29	0.0610	0.188
0.23	0.39	0.0615	0.194
0.27	0.47	0.0620	0.201
0.31	0.56	0.0625	0.207
0.38	0.72	0.0640	0.226
0.44	0.89	0.0650	0.238
0.48	0.99	0.0655	0.244
0.50	1.07	0.0665	0.255
0.53	1.15	0.0670	0.261
0.57	1.22	0.0670	0.261
0.64	1.22	0.0710	0.302
0.66	1.22	0.0720	0.312
0.68	1.21	0.0730	0.321
0.72	1.20	0.0740	0.331

5. กรณียของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. การสั่นสะเทือนที่ 40 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 70\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.20 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 1.3g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.06	0.174
0.15	0.18	0.06	0.174
0.17	0.23	0.0605	0.181
0.20	0.30	0.061	0.188
0.24	0.39	0.0615	0.194
0.26	0.46	0.062	0.201
0.31	0.59	0.0635	0.220
0.36	0.71	0.0645	0.232
0.39	0.79	0.065	0.238
0.43	0.89	0.065	0.238
0.46	0.98	0.066	0.249
0.50	1.12	0.0665	0.255
0.53	1.21	0.0665	0.255
0.58	1.26	0.0665	0.255
0.65	1.23	0.0705	0.297
0.68	1.23	0.071	0.302
0.71	1.22	0.0735	0.326
0.74	1.22	0.0745	0.335

6. กรณียของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. การสั่นสะเทือนที่ 45 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 70\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.19 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 1.9g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.0605	0.181
0.14	0.17	0.061	0.188
0.17	0.24	0.061	0.188
0.19	0.31	0.0615	0.194
0.24	0.42	0.062	0.201
0.29	0.53	0.0635	0.220
0.35	0.67	0.063	0.214
0.40	0.80	0.064	0.226
0.46	0.96	0.064	0.226
0.48	1.13	0.0635	0.220
0.51	1.19	0.0635	0.220
0.53	1.22	0.0635	0.220
0.57	1.25	0.0655	0.244
0.62	1.23	0.0665	0.255
0.66	1.22	0.0675	0.266
0.71	1.20	0.0725	0.317
0.75	1.20	0.0745	0.335

7. กรณีของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. การสั่นสะเทือนที่ 35 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 90\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.12 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 0.6g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.0610	0.201
0.14	0.15	0.0610	0.201
0.16	0.22	0.0615	0.220
0.20	0.31	0.0620	0.232
0.25	0.41	0.0625	0.232
0.32	0.56	0.0635	0.226
0.39	0.71	0.0645	0.238
0.44	0.84	0.0655	0.232
0.50	0.99	0.0665	0.232
0.53	1.15	0.0670	0.238
0.57	1.23	0.0665	0.255
0.62	1.23	0.0670	0.261
0.66	1.22	0.0715	0.277
0.70	1.21	0.0735	0.287
0.73	1.21	0.0745	0.317

8. กรณีของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. การสั่นสะเทือนที่ 40 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 90\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.24 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 1.5g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.06	0.174
0.15	0.19	0.06	0.174
0.18	0.28	0.061	0.188
0.22	0.38	0.0615	0.194
0.27	0.49	0.064	0.226
0.33	0.58	0.065	0.238
0.38	0.72	0.065	0.238
0.44	0.85	0.065	0.238
0.49	1.01	0.066	0.249
0.53	1.16	0.0665	0.255
0.58	1.25	0.0665	0.255
0.60	1.25	0.069	0.282
0.63	1.24	0.0715	0.307
0.66	1.23	0.0725	0.317
0.70	1.22	0.0735	0.326

9. กรณีของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. การสั่นสะเทือนที่ 45 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 90\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.24 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 2.0g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.10	0.062	0.201
0.14	0.14	0.062	0.201
0.16	0.22	0.0635	0.220
0.19	0.29	0.0645	0.232
0.24	0.39	0.0645	0.232
0.28	0.51	0.064	0.226
0.34	0.61	0.065	0.238
0.40	0.79	0.0645	0.232
0.45	0.95	0.0645	0.232
0.48	1.18	0.065	0.238
0.53	1.24	0.065	0.238
0.62	1.23	0.0685	0.277
0.66	1.21	0.0695	0.287
0.71	1.20	0.0725	0.317
0.75	1.20	0.0735	0.326

10. กรณีของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. การสั่นสะเทือนที่ 35 Hz
 ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 50\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.13 มม. ความเข้มการ
 สั่นสะเทือน 0.7g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.0585	0.163
0.15	0.15	0.058	0.156
0.18	0.21	0.058	0.156
0.24	0.28	0.059	0.170
0.30	0.38	0.059	0.170
0.37	0.46	0.0595	0.177
0.45	0.57	0.06	0.184
0.52	0.68	0.0605	0.191
0.56	0.77	0.061	0.197
0.63	0.91	0.0615	0.204
0.67	1.01	0.0625	0.216
0.71	1.10	0.0635	0.229
0.76	1.15	0.065	0.247
0.81	1.18	0.067	0.269
0.86	1.18	0.0685	0.285
0.91	1.17	0.0715	0.315
0.96	1.16	0.0735	0.334

11. กรณีของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. การสั่นสะเทือนที่ 40 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 50\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.14 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 0.9g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.058	0.156
0.14	0.12	0.058	0.156
0.16	0.15	0.0585	0.163
0.19	0.19	0.0585	0.163
0.24	0.26	0.0585	0.163
0.32	0.36	0.059	0.170
0.39	0.46	0.0595	0.177
0.46	0.56	0.0595	0.177
0.52	0.68	0.061	0.197
0.59	0.82	0.0615	0.204
0.65	1.02	0.0615	0.204
0.71	1.10	0.0625	0.216
0.75	1.15	0.063	0.223
0.79	1.18	0.0645	0.241
0.84	1.19	0.0655	0.252
0.89	1.18	0.067	0.269
0.94	1.17	0.0675	0.275
0.97	1.16	0.0715	0.315
1.00	1.15	0.072	0.320
1.03	1.15	0.074	0.338

12. กรณีของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. การสั่นสะเทือนที่ 45 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 50\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.16 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 1.3g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.058	0.156
0.14	0.12	0.0575	0.148
0.18	0.18	0.0585	0.163
0.23	0.25	0.058	0.156
0.29	0.33	0.0595	0.177
0.36	0.43	0.0595	0.177
0.44	0.55	0.06	0.184
0.52	0.69	0.0605	0.191
0.57	0.78	0.061	0.197
0.63	0.93	0.061	0.197
0.67	1.04	0.061	0.197
0.71	1.10	0.0615	0.204
0.75	1.16	0.0625	0.216
0.80	1.19	0.0645	0.241
0.84	1.18	0.065	0.247
0.90	1.16	0.0665	0.264
0.94	1.15	0.0675	0.275
0.98	1.15	0.072	0.320
1.02	1.14	0.074	0.338

13. กรณีของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. การสั่นสะเทือนที่ 35 Hz
 ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 70\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.16 มม. ความเข้มการ
 สั่นสะเทือน 0.8g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.057	0.141
0.15	0.14	0.058	0.156
0.18	0.19	0.0585	0.163
0.24	0.27	0.0585	0.163
0.35	0.42	0.059	0.170
0.44	0.54	0.0595	0.177
0.50	0.63	0.0605	0.191
0.56	0.75	0.061	0.197
0.62	0.87	0.062	0.210
0.66	0.96	0.063	0.223
0.71	1.07	0.0645	0.241
0.75	1.12	0.0655	0.252
0.79	1.16	0.067	0.269
0.83	1.18	0.0675	0.275
0.86	1.18	0.0685	0.285
0.91	1.17	0.0715	0.315
0.95	1.16	0.0735	0.334
0.99	1.16	0.074	0.338
1.02	1.15	0.0745	0.343

14. กรณีของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. การสั่นสะเทือนที่ 40 Hz
 ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 70\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.22 มม. ความเข้มการ
 สั่นสะเทือน 1.4g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.058	0.156
0.14	0.12	0.058	0.156
0.17	0.16	0.0585	0.163
0.19	0.20	0.0585	0.163
0.24	0.26	0.059	0.170
0.30	0.35	0.059	0.170
0.37	0.44	0.06	0.184
0.45	0.58	0.061	0.197
0.51	0.68	0.0615	0.204
0.58	0.83	0.062	0.210
0.66	1.06	0.062	0.210
0.71	1.15	0.0625	0.216
0.78	1.19	0.0635	0.229
0.84	1.18	0.0655	0.252
0.91	1.16	0.0695	0.295
0.97	1.15	0.0715	0.315
1.01	1.14	0.0725	0.325
1.07	1.14	0.0735	0.334

15. กรณีของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. การสั่นสะเทือนที่ 45 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 70\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.19 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 1.6g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.057	0.141
0.16	0.15	0.057	0.141
0.19	0.20	0.0575	0.148
0.24	0.27	0.0585	0.163
0.30	0.35	0.058	0.156
0.37	0.44	0.0585	0.163
0.44	0.57	0.059	0.170
0.51	0.71	0.059	0.170
0.56	0.89	0.0595	0.177
0.59	1.11	0.0595	0.177
0.65	1.13	0.06	0.184
0.71	1.17	0.0615	0.204
0.76	1.19	0.0635	0.229
0.81	1.18	0.065	0.247
0.87	1.16	0.0685	0.285
0.93	1.15	0.071	0.310
0.98	1.14	0.0725	0.325
1.02	1.14	0.0735	0.334

16. กรณีของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. การสั่นสะเทือนที่ 35 Hz
 ระยะเวลาปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 90\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.25 มม. ความเข้มการ
 สั่นสะเทือน 1.2g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.0575	0.148
0.15	0.14	0.0575	0.148
0.19	0.19	0.058	0.156
0.24	0.26	0.058	0.156
0.32	0.35	0.058	0.156
0.38	0.44	0.0585	0.163
0.47	0.57	0.059	0.170
0.54	0.74	0.0615	0.204
0.59	0.82	0.0615	0.204
0.65	0.95	0.062	0.210
0.70	1.11	0.062	0.210
0.73	1.17	0.0635	0.229
0.78	1.20	0.0655	0.252
0.83	1.20	0.0675	0.275
0.88	1.17	0.069	0.290
0.95	1.15	0.072	0.320
1.01	1.15	0.074	0.338

17. กรณีของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. การสั่นสะเทือนที่ 40 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 90\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.27 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 1.8g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.057	0.141
0.15	0.14	0.0575	0.148
0.18	0.19	0.058	0.156
0.24	0.27	0.0585	0.163
0.33	0.39	0.059	0.170
0.45	0.56	0.06	0.184
0.51	0.68	0.0605	0.191
0.59	0.87	0.06	0.184
0.64	1.13	0.06	0.184
0.72	1.16	0.0615	0.204
0.77	1.19	0.063	0.223
0.83	1.18	0.066	0.258
0.88	1.17	0.068	0.280
0.93	1.15	0.069	0.290
0.99	1.15	0.0715	0.315
1.02	1.14	0.073	0.329
1.05	1.14	0.074	0.338

18. กรณีของอนุภาคนาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม. การสั่นสะเทือนที่ 45 Hz ระยะการปรับมอเตอร์เชิงศูนย์ที่ $e = 90\%$ แอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน 0.25 มม. ความเข้มการสั่นสะเทือน 2.1g

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.058	0.156
0.15	0.15	0.058	0.156
0.19	0.22	0.059	0.170
0.25	0.28	0.059	0.170
0.36	0.43	0.059	0.170
0.44	0.55	0.0595	0.177
0.53	0.70	0.059	0.170
0.59	0.95	0.0595	0.177
0.64	1.15	0.0595	0.177
0.71	1.16	0.0615	0.204
0.78	1.19	0.0635	0.229
0.82	1.18	0.0645	0.241
0.89	1.16	0.0685	0.285
0.95	1.15	0.0715	0.315
1.01	1.14	0.073	0.329
1.06	1.13	0.074	0.338

การทดลองฟลูอิดไดเซชันกรณีไม่มีการสั่นสะเทือน

1. กรณีของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม.

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.0665	0.255
0.14	0.21	0.0665	0.255
0.18	0.31	0.0665	0.255
0.22	0.41	0.0665	0.255
0.27	0.52	0.0665	0.255
0.33	0.65	0.0665	0.255
0.41	0.85	0.0665	0.255
0.47	1.01	0.0665	0.255
0.54	1.21	0.0665	0.255
0.58	1.21	0.069	0.282
0.61	1.30	0.07	0.292
0.70	1.32	0.073	0.321
0.74	1.16	0.076	0.348
0.81	1.17	0.077	0.357
0.91	1.17	0.0775	0.361

2. กรณียของอนุภาคนาโนเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.

ความเร็วอากาศป้อน u_f (m/s)	ความดันลดคร่อมเบด ΔP (kPa)	ความสูงเบด L (m)	สัดส่วนช่องว่าง ε
0.00	0.00	0.0625	0.216
0.16	0.12	0.0625	0.216
0.21	0.20	0.0625	0.216
0.28	0.31	0.0625	0.216
0.39	0.50	0.0625	0.216
0.49	0.69	0.0625	0.216
0.57	0.88	0.0625	0.216
0.63	1.04	0.0625	0.216
0.67	1.15	0.0625	0.216
0.72	1.19	0.0635	0.229
0.75	1.19	0.065	0.247
0.80	1.19	0.068	0.280
0.84	1.19	0.0695	0.295
0.91	1.20	0.0715	0.315
0.96	1.19	0.072	0.320
1.03	1.19	0.0745	0.343

ผลการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1. การคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดของอนุภาคขนาด 2 มม. ความหนาแน่นอนุภาค
2570 kg/m³

ความเข้มการสั่นสะเทือน	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไลเซชัน
0.0	0.70
0.5	0.52
0.6	0.43
0.8	0.46
0.9	0.46
1.2	0.46
1.3	0.43
1.5	0.43
1.6	0.40
2.0	0.37

2. การคำนวณค่าความเร็วต่ำสุดของอนุภาคขนาด 3 มม. ความหนาแน่นอนุภาค
2600 kg/m³

ความเข้มการสั่นสะเทือน	ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน
0.0	0.91
0.7	0.78
0.8	0.73
0.9	0.62
1.2	0.57
1.3	0.52
1.4	0.52
1.6	0.52
1.8	0.50
2.1	0.52

ภาคผนวก ข
เซนเซอร์ความดัน MPXV 5004 DP

Freescale Semiconductor

MPXV5004G
Rev 12, 09/2009

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPxx5004 series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This sensor combines a highly sensitive implanted strain gauge with advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- 1.5% Maximum Error for 0 to 100 mm H₂O over +10° to +60°C with Auto Zero
- 2.5% Maximum Error for 100 to 400 mm H₂O over +10° to +60°C with Auto Zero
- 6.25% Maximum Error for 0 to 400 mm H₂O over +10° to +60°C without Auto Zero
- Temperature Compensated over 10° to 60°C
- Available in Gauge Surface Mount (SMT) or Through-Hole (DIP) Configurations
- Durable Thermoplastic (PPS) Package

MPXV5004 MPVZ5004 Series

0 to 3.92 kPa
(0 to 400 mm H₂O)
1.0 to 4.9 V Output

Application Examples

- Washing Machine Water Level
- Ideally Suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Appliance Liquid Level and Pressure Measurement
- Respiratory Equipment

ORDERING INFORMATION

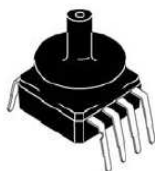
Device Name	Case No.	# of Ports			Pressure Type			Device Marking
		None	Single	Dual	Gauge	Differential	Absolute	
Small Outline Package (MPXV5004 Series)								
MPXV5004DP	1351			•		•		MPXV5004DP
MPXV5004GC6T1	482A		•		•			MPXV5004G
MPXV5004GC6U	482A		•		•			MPXV5004G
MPXV5004GC7U	482C		•		•			MPXV5004G
MPXV5004GP	1369		•		•			MPXV5004GP
MPXV5004GPT1	1369		•		•			MPXV5004GP
MPXV5004GVP	1368		•		•			MPXV5004GVP
Small Outline Package (Media Resistant Gel) (MPVZ5004 Series)								
MPVZ5004G6T1	482	•			•			MPVZ5004G
MPVZ5004G6U	482	•			•			MPVZ5004G
MPVZ5004G7U	482B	•			•			MPVZ5004G
MPVZ5004GC6U	482A		•		•			MPVZ5004G
MPVZ5004GW6U	1735		•		•			MZ5004GW
MPVZ5004GW7U	1560		•		•			MZ5004GW

Pressure

SMALL OUTLINE PACKAGES THROUGH-HOLE



MPVZ5004G7U
CASE 482B-03



MPXV5004GC7U
CASE 482C-03



MPVZ5004GW7U
CASE 1560-02

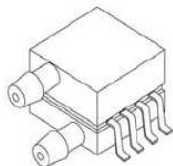
SMALL OUTLINE PACKAGES SURFACE MOUNT



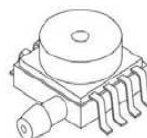
MPVZ5004G6U/6T1
CASE 482-01



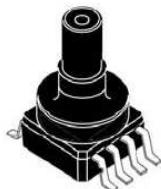
MPXV5004G6U/6T1, MPVZ5004GC6U
CASE 482A-01



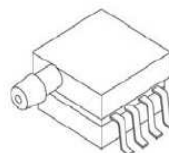
MPXV5004DP
CASE 1351-01



MPXV5004GVP
CASE 1368-01



MPVZ5004GW6U
CASE 1735-01



MPXV5004GP/GPT1
CASE 1369-01

Operating Characteristics

Table 1. Operating Characteristics ($V_S = 5.0 V_{DC}$, $T_A = 25^\circ C$ unless otherwise noted, $P_1 > P_2$)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Units	
Pressure Range	P_{OP}	0	—	3.92 400	kPa mm H ₂ O	
Supply Voltage ⁽¹⁾	V_S	4.75	5.0	5.25	V_{DC}	
Supply Current	I_S	—	—	10	mAdc	
Span @ 306 mm H ₂ O (3 kPa) ⁽²⁾ Full Scale Span @ 400 mm H ₂ O (3.92 kPa) ⁽²⁾	V_{FSS}	—	3.0 4.0	—	V	
Offset ⁽³⁾	V_{OFF}	0.75	1.0	1.25	V	
Sensitivity	V/P	—	1.0	—	V/kPa	
Accuracy ^{(4) (5)}	0 to 100 mm H ₂ O (10 to 60°C)	—	—	—	±1.5	% V_{FSS} with auto zero
	100 to 400 mm H ₂ O (10 to 60°C)	—	—	—	±2.5	% V_{FSS} with auto zero
	0 to 400 mm H ₂ O (10 to 60°C)	—	—	—	±6.25	% V_{FSS} without auto zero

1. Device is ratiometric within this specified excitation range.
2. Span is defined as the algebraic difference between the output voltage at specified pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
3. Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
4. Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.
 - Offset Stability: Output deviation, after 1000 temperature cycles, -30 to 100°C, and 1.5 million pressure cycles, with minimum rated pressure applied.
 - TcSpan: Output deviation over the temperature range of 10 to 60°C, relative to 25°C.
 - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 10 to 60°C, relative to 25°C.
 - Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} , at 25°C.
5. Auto Zero at Factory Installation: Due to the sensitivity of the MPVZ5004G, external mechanical stresses and mounting position can affect the zero pressure output reading. Autozeroing is defined as storing the zero pressure output reading and subtracting this from the device's output during normal operations. Reference AN1636 for specific information. The specified accuracy assumes a maximum temperature change of ±5°C between autozero and measurement.

Pressure

Maximum Ratings

Table 2. Maximum Ratings⁽¹⁾

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure (P1 > P2)	P _{MAX}	16	kPa
Storage Temperature	T _{STG}	-30 to +100	°C
Operating Temperature	T _A	0 to +85	°C

1. Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

Figure 1 shows a block diagram of the internal circuitry integrated on a pressure sensor chip.

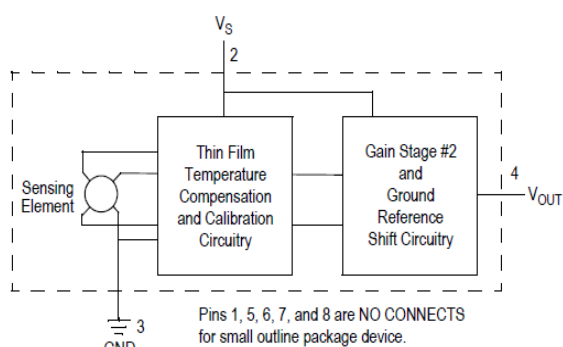


Figure 1. Integrated Pressure Sensor Schematic

On-chip Temperature Compensation and Calibration

The performance over temperature is achieved by integrating the shear-stress strain gauge, temperature compensation, calibration and signal conditioning circuitry onto a single monolithic chip.

Figure 2 illustrates the gauge configuration in the basic chip carrier (Case 482). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the silicon diaphragm.

The MPxx5004G series sensor operating characteristics are based on use of dry air as pressure media. Media, other than dry air, may have adverse effects on sensor performance and long-term reliability. Internal reliability and

qualification test for dry air, and other media, are available from the factory. Contact the factory for information regarding media tolerance in your application.

Figure 3 shows the recommended decoupling circuit for interfacing the output of the MPxx5004G to the A/D input of the microprocessor or microcontroller. Proper decoupling of the power supply is recommended.

Typical, minimum and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 10°C to 60°C using the decoupling circuit shown in Figure 3. The output will saturate outside of the specified pressure range.

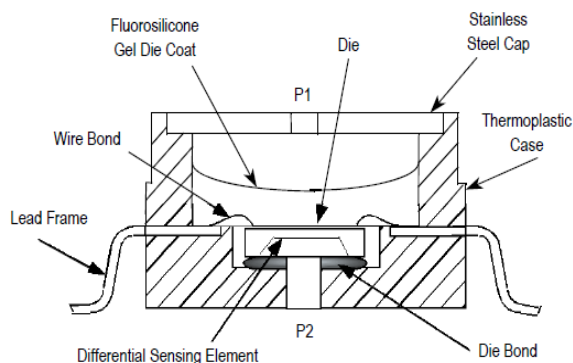


Figure 2. Cross-Sectional Diagram (Not to Scale)

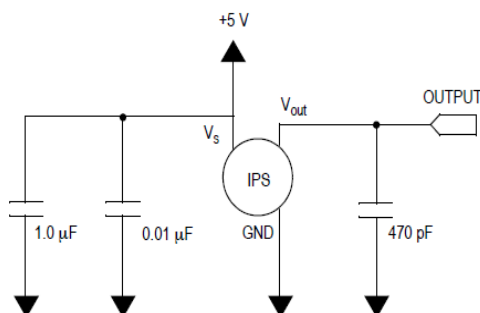


Figure 3. Recommended Power Supply Decoupling and Output Filtering
(For additional output filtering, please refer to AN1646.)

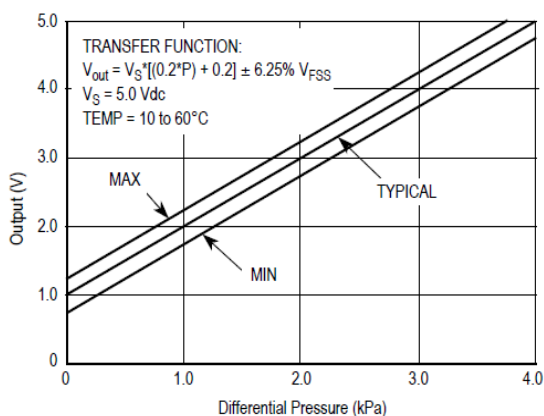


Figure 4. Output vs. Pressure Differential
at $\pm 6.25\% V_{FSS}$ (without auto zero, Table 1., note 5)

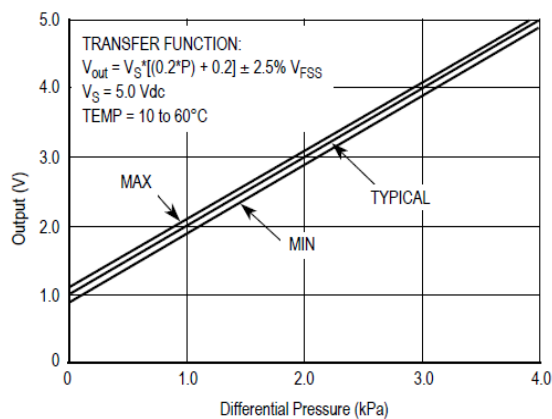


Figure 5. Output vs. Pressure Differential
at $\pm 2.5\% V_{FSS}$ (with auto zero, Table 1., note 5)

PRESSURE (P1)/VACUUM (P2) SIDE IDENTIFICATION TABLE

Freescale Semiconductor designates the two sides of the pressure sensor as the Pressure (P1) side and the Vacuum (P2) side. The Pressure (P1) side is the side containing silicone gel which isolates the die from the environment.

The Freescale Semiconductor pressure sensor is designed to operate with positive differential pressure applied, $P1 > P2$.

The Pressure (P1) side may be identified by using the table below.

Part Number	Case Type	Pressure (P1) Side Identifier
MPXV5004DP	1351	Side with Part Marking
MPXV5004GC6U/6T1, MPVZ5004GC6U	482A	Side with Port Attached
MPXV5004GC7U	482C	Side with Port Attached
MPXV5004GP/GPT1	1369	Side with Port Attached
MPXV5004GVP	1368	Stainless Steel Cap
MPVZ5004G6U/6T1	482	Stainless Steel Cap
MPVZ5004G7U	482B	Stainless Steel Cap
MPVZ5004GW6U	1735	Vertical Port Attached
MPVZ5004GW7U	1560	Vertical Port Attached

ภาคผนวก ค
เซนเซอร์วัดความเร่ง ADXL 210



Low Cost $\pm 2 g/\pm 10 g$ Dual Axis iMEMS[®] Accelerometers with Digital Output

ADXL202/ADXL210

FEATURES

- 2-Axis Acceleration Sensor on a Single IC Chip
- Measures Static Acceleration as Well as Dynamic Acceleration
- Duty Cycle Output with User Adjustable Period
- Low Power <0.6 mA
- Faster Response than Electrolytic, Mercury or Thermal Tilt Sensors
- Bandwidth Adjustment with a Single Capacitor Per Axis
- 5 mg Resolution at 60 Hz Bandwidth
- +3 V to +5.25 V Single Supply Operation
- 1000 g Shock Survival

APPLICATIONS

- 2-Axis Tilt Sensing
- Computer Peripherals
- Inertial Navigation
- Seismic Monitoring
- Vehicle Security Systems
- Battery Powered Motion Sensing

GENERAL DESCRIPTION

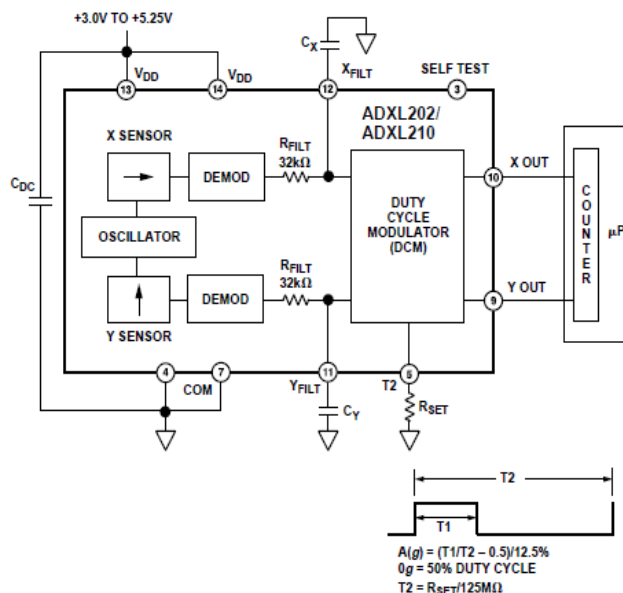
The ADXL202/ADXL210 are low cost, low power, complete 2-axis accelerometers with a measurement range of either $\pm 2 g/\pm 10 g$. The ADXL202/ADXL210 can measure both dynamic acceleration (e.g., vibration) and static acceleration (e.g., gravity).

The outputs are digital signals whose duty cycles (ratio of pulse-width to period) are proportional to the acceleration in each of the 2 sensitive axes. These outputs may be measured directly with a microprocessor counter, requiring no A/D converter or glue logic. The output period is adjustable from 0.5 ms to 10 ms via a single resistor (R_{SET}). If a voltage output is desired, a voltage output proportional to acceleration is available from the X_{FILT} and Y_{FILT} pins, or may be reconstructed by filtering the duty cycle outputs.

The bandwidth of the ADXL202/ADXL210 may be set from 0.01 Hz to 5 kHz via capacitors C_X and C_Y . The typical noise floor is $500 \mu g/\sqrt{Hz}$ allowing signals below 5 mg to be resolved for bandwidths below 60 Hz.

The ADXL202/ADXL210 is available in a hermetic 14-lead Surface Mount CERPAK, specified over the $0^\circ C$ to $+70^\circ C$ commercial or $-40^\circ C$ to $+85^\circ C$ industrial temperature range.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



iMEMS is a registered trademark of Analog Devices, Inc.

REV. B

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
 Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>
 Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

ADXL202/ADXL210—SPECIFICATIONS ($T_A = T_{MIN}$ to T_{MAX} , $T_A = +25^\circ\text{C}$ for J Grade only, $V_{DD} = +5\text{ V}$, $R_{SET} = 125\text{ k}\Omega$, Acceleration = 0 g , unless otherwise noted)

Parameter	Conditions	ADXL202/JQC/AQC			ADXL210/JQC/AQC			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
SENSOR INPUT	Each Axis							
Measurement Range ¹		±1.5	±2		±8	±10		g
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.2			0.2		% of FS
Alignment Error ²			±1			±1		Degrees
Alignment Error	X Sensor to Y Sensor		±0.01			±0.01		Degrees
Transverse Sensitivity ³			±2			±2		%
SENSITIVITY	Each Axis							
Duty Cycle per g	T1/T2 @ +25°C	10	12.5	15	3.2	4.0	4.8	%/g
Sensitivity, Analog Output	At Pins X _{FILT} , Y _{FILT}		312			100		mV/g
Temperature Drift ⁴	Δ from +25°C		±0.5			±0.5		% Rdg
ZERO g BIAS LEVEL	Each Axis							
0 g Duty Cycle	T1/T2	25	50	75	42	50	58	%
Initial Offset			±2			±2		g
0 g Duty Cycle vs. Supply			1.0	4.0		1.0	4.0	%/V
0 g Offset vs. Temperature ⁴	Δ from +25°C		2.0			2.0		mg/°C
NOISE PERFORMANCE								
Noise Density ⁵	@ +25°C		500	1000		500	1000	μg/√Hz
FREQUENCY RESPONSE								
3 dB Bandwidth	Duty Cycle Output		500			500		Hz
3 dB Bandwidth	At Pins X _{FILT} , Y _{FILT}		5			5		kHz
Sensor Resonant Frequency			10			14		kHz
FILTER								
R _{FILT} Tolerance	32 kΩ Nominal		±15			±15		%
Minimum Capacitance	At X _{FILT} , Y _{FILT}	1000			1000			pF
SELF TEST								
Duty Cycle Change	Self-Test "0" to "1"		10			10		%
DUTY CYCLE OUTPUT STAGE								
F _{SET}			125 MΩ/R _{SET}			125 MΩ/R _{SET}		
F _{SET} Tolerance	R _{SET} = 125 kΩ	0.7		1.3	0.7		1.3	kHz
Output High Voltage	I = 25 μA		V _S - 200 mV			V _S - 200 mV		mV
Output Low Voltage	I = 25 μA			200			200	mV
T2 Drift vs. Temperature			35			35		ppm/°C
Rise/Fall Time			200			200		ns
POWER SUPPLY								
Operating Voltage Range		3.0		5.25	2.7		5.25	V
Specified Performance		4.75		5.25	4.75		5.25	V
Quiescent Supply Current			0.6	1.0		0.6	1.0	mA
Turn-On Time ⁶	T _O 99%		160 C _{FILT} + 0.3			160 C _{FILT} + 0.3		ms
TEMPERATURE RANGE								
Operating Range	JQC	0		+70	0		+70	°C
Specified Performance	AQC	-40		+85	-40		+85	°C

NOTES

¹For all combinations of offset and sensitivity variation.

²Alignment error is specified as the angle between the true and indicated axis of sensitivity.

³Transverse sensitivity is the algebraic sum of the alignment and the inherent sensitivity errors.

⁴Specification refers to the maximum change in parameter from its initial at +25°C to its worst case value at T_{MIN} to T_{MAX}.

⁵Noise density (μg/√Hz) is the average noise at any frequency in the bandwidth of the part.

⁶C_{FILT} in μF. Addition of filter capacitor will increase turn on time. Please see the Application section on power cycling.

All min and max specifications are guaranteed. Typical specifications are not tested or guaranteed.

Specifications subject to change without notice.

ADXL202/ADXL210

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

Acceleration (Any Axis, Unpowered for 0.5 ms)	1000 <i>g</i>
Acceleration (Any Axis, Powered for 0.5 ms)	500 <i>g</i>
+V _S	-0.3 V to +7.0 V
Output Short Circuit Duration (Any Pin to Common)	Indefinite
Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-65°C to +150°C

*Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; the functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Drops onto hard surfaces can cause shocks of greater than 1000 *g* and exceed the absolute maximum rating of the device. Care should be exercised in handling to avoid damage.

PIN FUNCTION DESCRIPTIONS

Pin	Name	Description
1	NC	No Connect
2	V _{TP}	Test Point, Do Not Connect
3	ST	Self Test
4	COM	Common
5	T2	Connect R _{SET} to Set T2 Period
6	NC	No Connect
7	COM	Common
8	NC	No Connect
9	Y _{OUT}	Y Axis Duty Cycle Output
10	X _{OUT}	X Axis Duty Cycle Output
11	Y _{FILT}	Connect Capacitor for Y Filter
12	X _{FILT}	Connect Capacitor for X Filter
13	V _{DD}	+3 V to +5.25 V, Connect to 14
14	V _{DD}	+3 V to +5.25 V, Connect to 13

PACKAGE CHARACTERISTICS

Package	θ _{JA}	θ _{JC}	Device Weight
14-Lead CERPAK	110°C/W	30°C/W	5 Grams

PIN CONFIGURATION

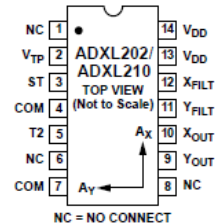


Figure 1 shows the response of the ADXL202 to the Earth's gravitational field. The output values shown are nominal. They are presented to show the user what type of response to expect from each of the output pins due to changes in orientation with respect to the Earth. The ADXL210 reacts similarly with output changes appropriate to its scale.

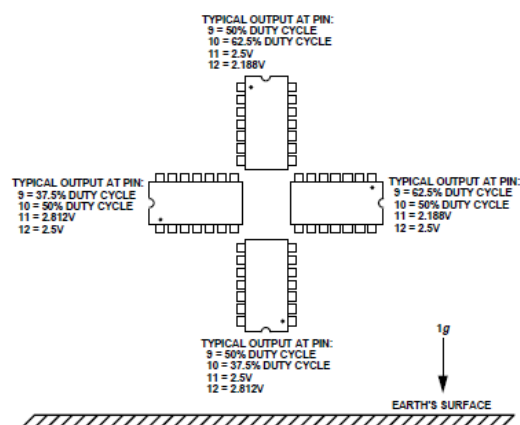


Figure 1. ADXL202/ADXL210 Nominal Response Due to Gravity

ORDERING GUIDE

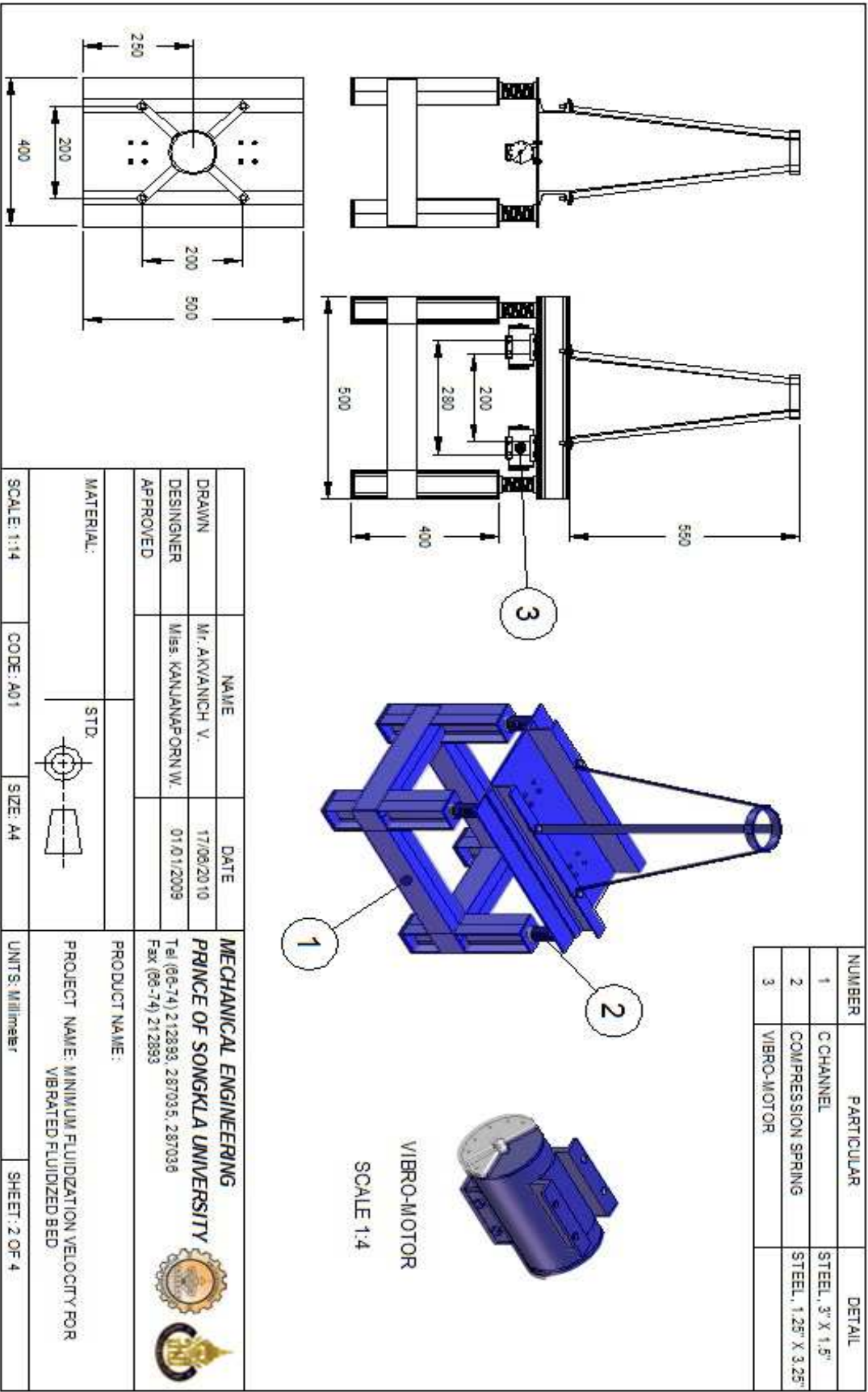
Model	<i>g</i> Range	Temperature Range	Package Description	Package Option
ADXL202JQC	±2	0°C to +70°C	14-Lead CERPAK	QC-14
ADXL202AQC	±2	-40°C to +85°C	14-Lead CERPAK	QC-14
ADXL210JQC	±10	0°C to +70°C	14-Lead CERPAK	QC-14
ADXL210AQC	±10	-40°C to +85°C	14-Lead CERPAK	QC-14

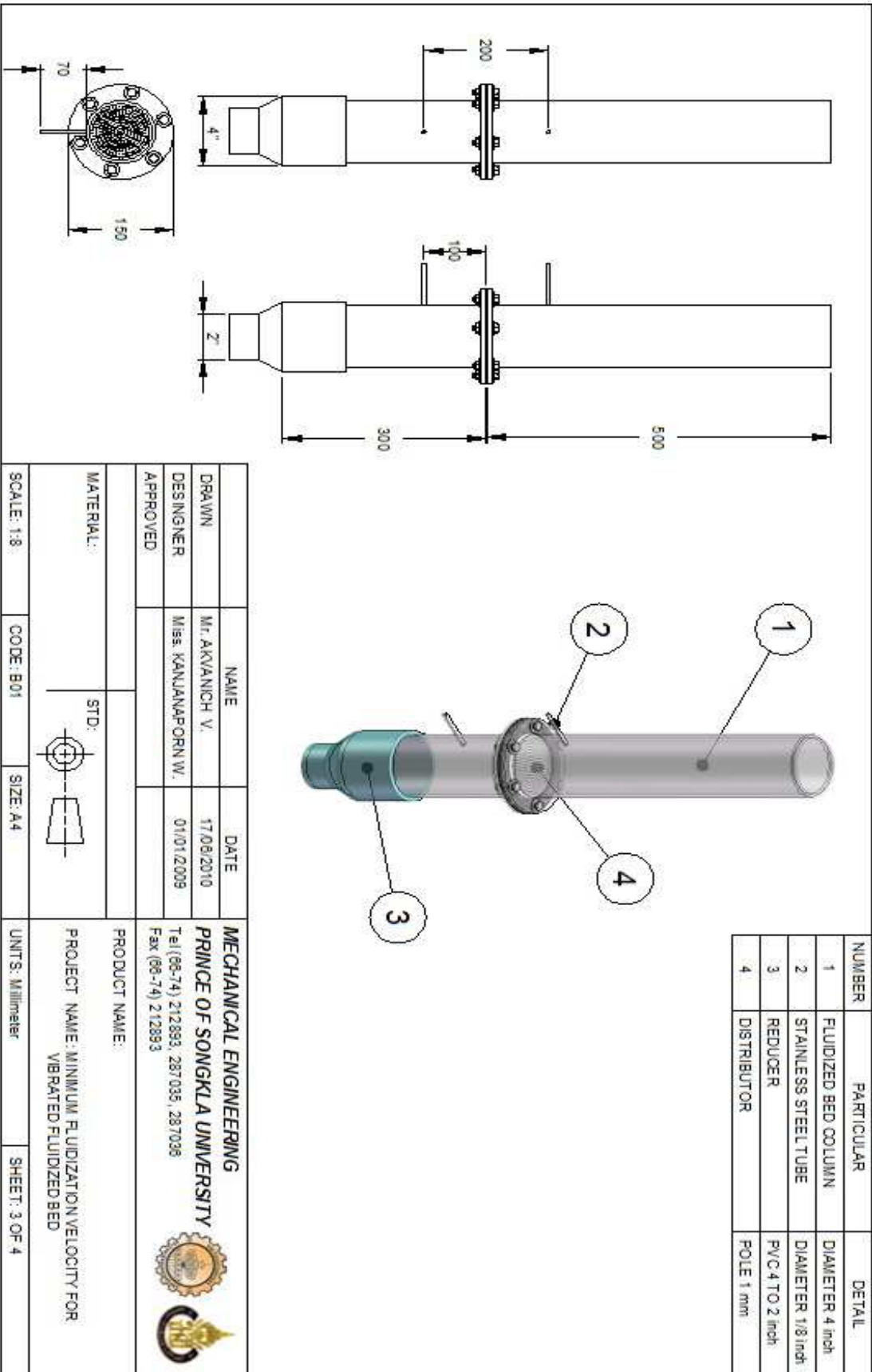
CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the ADXL202/ADXL210 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



ภาคผนวก ง
แบบของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสันสะท้อน

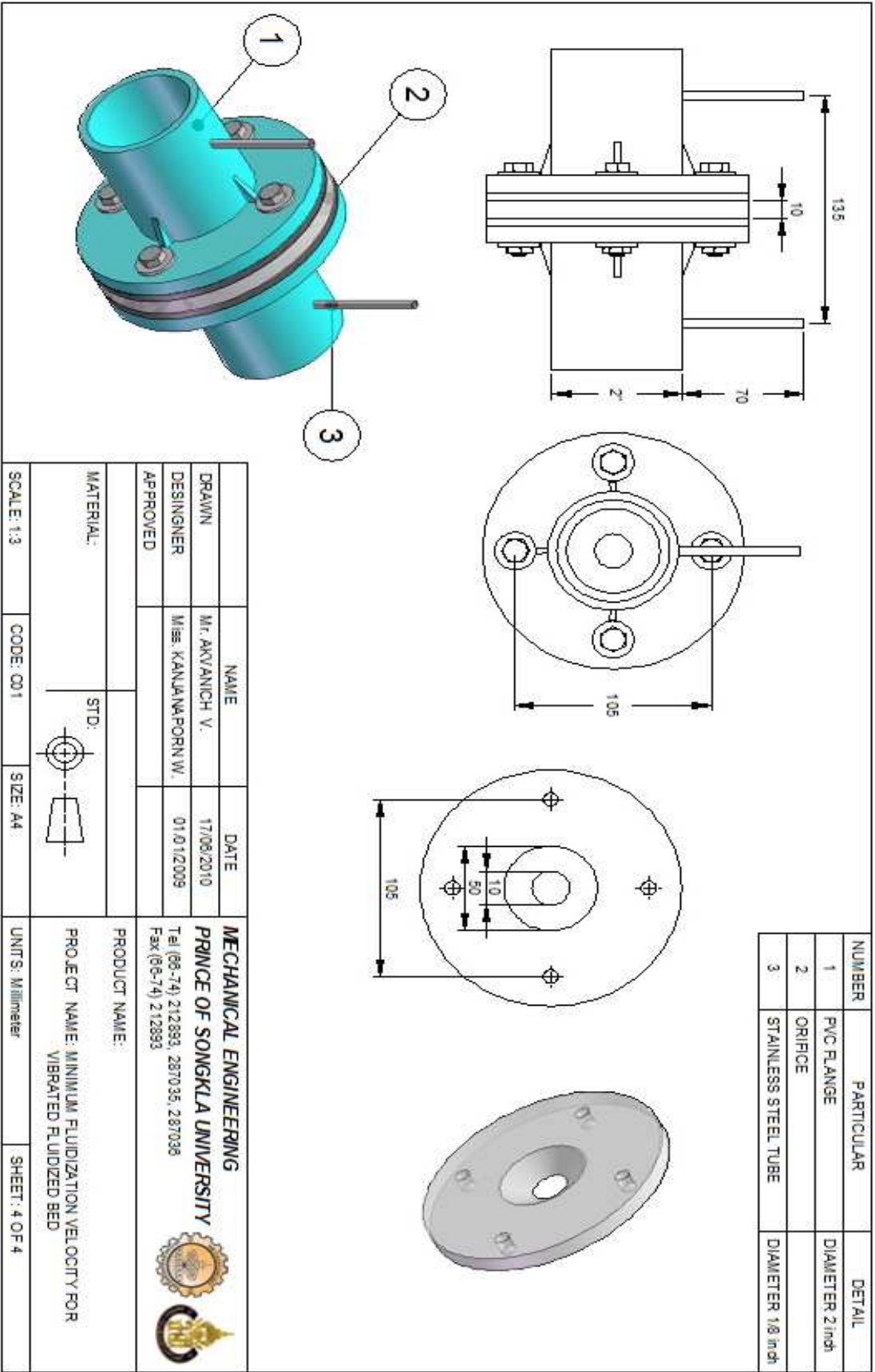




DRAWN		NAME		DATE	
DESIGNER		MIS. KANJANAPORN W.		17/09/2010	
APPROVED				01/01/2009	
MATERIAL:		STD:		PRODUCT NAME:	
SCALE: 1:8		CODE: B01		PROJECT NAME: MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY FOR VIBRATED FLUIDIZED BED	
SIZE: A4		UNITS: Millimeter		SHEET: 3 OF 4	

MECHANICAL ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
 Tel (066-74) 212893, 287035, 287036
 Fax (066-74) 212893

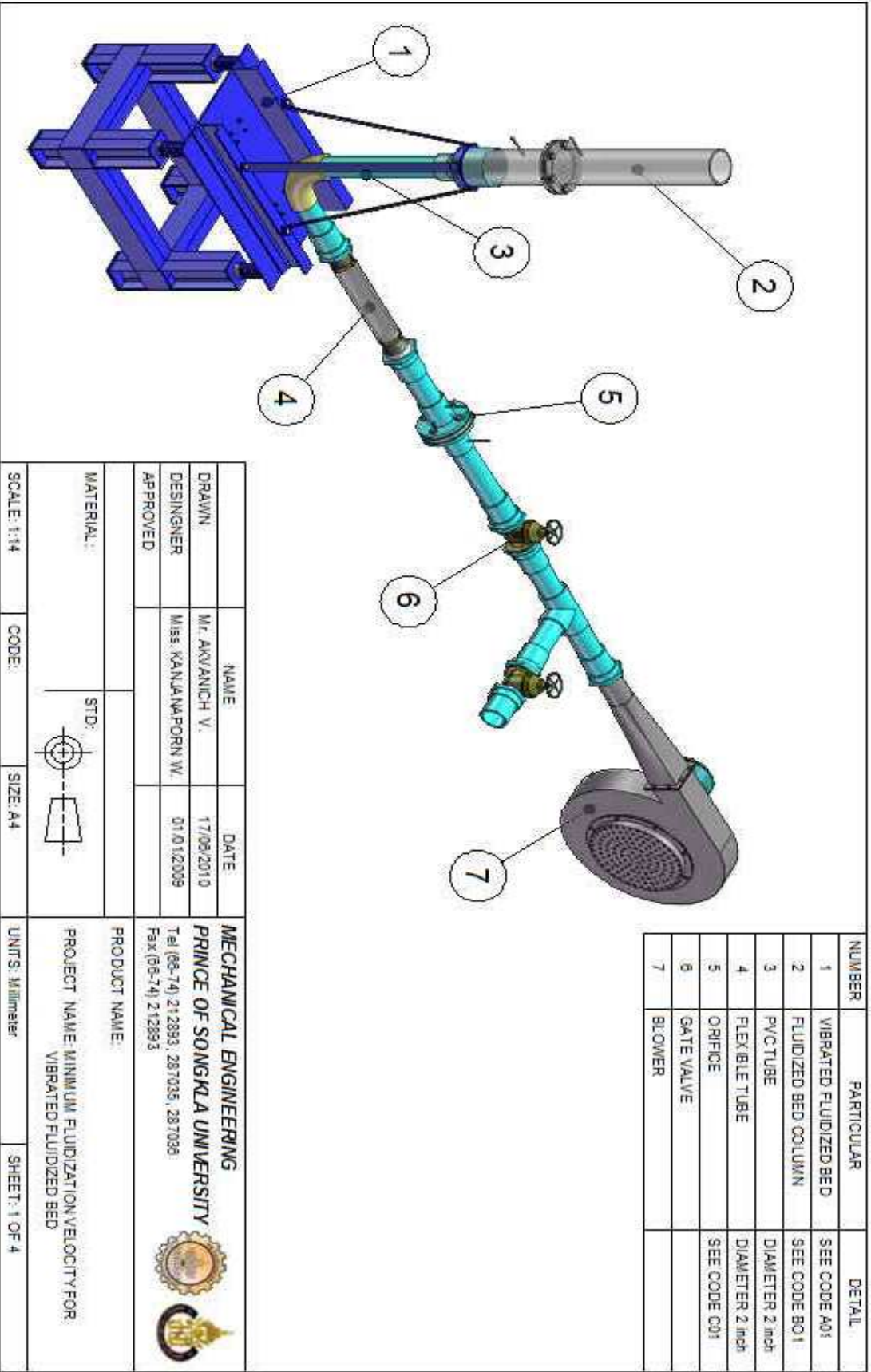




DRAWN		NAME		DATE	
DESIGNER		M. AKYANICH V.		17/06/2010	
APPROVED		MRS. KANJANA PORN W.		01/01/2009	
MATERIAL:		STD:		PROJECT NAME: MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY FOR VIBRATED FLUIDIZED BED	
SCALE: 1:3		CODE: 001		SIZE: A4	
		UNITS: Millimeter		SHEET: 4 OF 4	

MECHANICAL ENGINEERING
PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY
 Tel (66-74) 212893, 287035, 287036
 Fax (66-74) 212893





DRAWN		NAME	DATE
DESIGNER		M. ANJANICH V.	17/09/2010
APPROVED		MRS. KANJANA PORH W.	01/01/2009
MECHANICAL ENGINEERING PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY Tel: (66-74) 212893, 287035, 287036 Fax: (66-74) 212893			
PRODUCT NAME: PROJECT NAME: MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY FOR VIBRATED FLUIDIZED BED			
MATERIAL:			
STD:			
SCALE: 1:14		CODE:	SIZE: A4
UNITS: Millimeter		SHEET: 1 OF 4	

ภาคผนวก จ
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์

ผลของการสั่นสะเทือนเชิงกลต่อความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน

The effect of mechanical vibration on minimum fluidization velocity

วันวิสาข์ กาญจนารณ^{1*} กิตตินันท์ มลิวรรณ² พุทธิกร สมิตไมตรี³

^{1,2,3}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: wkanjanaporn@hotmail.com*

Wanwisa Kanjanaporn^{1*} Kittinan Maliwan² Pnuitikorn Smithmaitrie³

^{1,2,3}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90112

E-mail: wkanjanaporn@hotmail.com *

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการสั่นสะเทือนเชิงกลที่มีต่อความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ตัวแปรที่การศึกษาคือ ความถี่ของการสั่นสะเทือน และค่าความเข้มของการสั่นสะเทือน โดยทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนและพิจารณาการสั่นสะเทือนเชิงกลแบบฮาร์โมนิก ในแนวตั้งขนานกับแรงโน้มถ่วงของโลก โดยใช้อนุภาคแก้วกลุ่ม B ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 มม. ความหนาแน่นอนุภาค 2570 kg/m^3 และ 3 มม. ความหนาแน่นอนุภาค 2600 kg/m^3 ตามลำดับ สั่นสะเทือนที่ความถี่ 35 40 และ 45 Hz จากการทดลองพบว่า การสั่นสะเทือนทำให้สัดส่วนช่องว่างภายในเบดมีค่าลดลง และเป็นผลให้ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มการสั่นสะเทือน

คำหลัก ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน สัดส่วนช่องว่าง ความเข้มการสั่นสะเทือน

Abstract

The aim of this research was to study the effect of mechanical vibration on minimum fluidization velocity. The parameters studied were vibration frequency and vibration intensity. The experiments were carried out with the vibration in harmonic mode in the vertical direction parallel with the earth gravity. The particles used in the experiments were glass beads (Geldart's group B) with of 2mm diameter, 2570 kg/m^3 density and 3mm diameter, 2600 kg/m^3 density respectively. The vibrating frequency of 35, 40, 45 Hz were tested. It was found that the effect of vibration caused void fraction to decrease and minimum fluidization velocity decreased due to the increase in vibration intensity.

Keywords: Minimum fluidization velocity, Vibrated fluidized bed, Void fraction, Vibration intensity

1. บทนำ

ฟลูอิดไดเซชันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ใช้ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ และการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น อุตสาหกรรมอาหาร การแช่แข็ง บีโตร์เคมี การอบแห้ง และการคัดขนาดของอนุภาคที่เป็นผง ฟลูอิดไดเซชันสามารถช่วยให้อนุภาคมีการผสมกันอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอ สามารถทำงานได้ต่อเนื่อง และสูญเสียพลังงานน้อย อย่างไรก็ตามสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 ไมโครเมตร หรือมีขนาดที่เล็กมาก มีคุณสมบัติตามการแบ่งกลุ่มอนุภาคของ Geldart [1] โดยทั่วไปแล้วอนุภาคในกลุ่ม A และกลุ่ม C จะเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ยาก ดังนั้นจึงมีการเสนอเทคนิคเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น และเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน ด้วยการนำวิธีการสั่นสะเทือนเชิงกลมาใช้ร่วมกับระบบฟลูอิดไดซ์เบด หรือเรียกว่า ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนเชิงกลสามารถช่วยปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพของอนุภาคกลุ่ม A และกลุ่ม C ที่มีขนาดเล็ก และติดกันเป็นก้อน ให้เกิดฟลูอิดไดเซชันได้ดีขึ้น ซึ่งการสั่นสะเทือนจะช่วยลดแรงยึดเกาะระหว่างอนุภาค เพิ่มการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคและอนุภาคมากขึ้น

ปัจจุบันพบว่าการศึกษาและงานวิจัยเกี่ยวกับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะการศึกษาในอนุภาคกลุ่ม C หรืออนุภาคผงแป้งที่มีความชื้นสูง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับผลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันในอนุภาคขนาดเล็ก (กลุ่ม A และ C) Gupta และ Mujumdar [2] พบว่าความดันลดคร่อมเบดและความเร็วต่ำสุดลดลงเนื่องจากการสั่นสะเทือน และการสั่นสะเทือนทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชันได้สมบูรณ์มากขึ้น Kuiper และคณะ [3] ศึกษาและนำ

เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นมาแก้ปัญหาการจับตัวเป็นกลุ่มก้อนของอนุภาค ทดลองเพื่อเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของแป้งมันฝรั่งซึ่งเป็นอนุภาคในกลุ่ม C ให้เป็นไปตามอนุภาคกลุ่ม A โดยการกวนบริเวณก้นเบดและการสั่นเบด พบว่าการกวนที่ก้นเบดเพียงอย่างเดียวไม่สามารถเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ แต่กรณีของการสั่นเบดมีผลให้อนุภาคของแป้งมันฝรั่งแตกตัวและเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ และผลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันในอนุภาคกลุ่ม C ซึ่งศึกษาและยืนยันโดย Noda และคณะ [4] ผลการทดลองพบว่าอนุภาคไม่สามารถเกิดฟลูอิดไดเซชันได้หากไม่มีการสั่นสะเทือนและความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันจะลดลงเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น ต่อมา Mawatari และคณะ [5,6] ทำการทดลองศึกษาผลของขนาดของอนุภาคที่มีต่อฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่น พบว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคกลุ่ม C ลดลงเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้น แต่สำหรับอนุภาคในกลุ่ม A จะมีค่าคงที่ นอกจากนี้ยังใช้สมการ Ergun [7] ทำนายค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยเปรียบเทียบผลจากการคำนวณกับการทดลอง พบว่าสมการ Ergun สามารถใช้ทำนายความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันได้ดีสำหรับอนุภาคกลุ่ม A แต่ค่าสัดส่วนช่องว่างของของไหลขณะเกิดฟลูอิดไดเซชันยังคงได้จากการศึกษาของ Xu และ Zhu [8,9] ได้ศึกษาและทดลองขนาดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาคลดลงเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือนเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อความเข้มมีค่ามากกว่าค่าวิกฤต นอกจากนี้ยังได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อฟลูอิดไดเซชันของอนุภาคขนาดเล็กภายใต้การสั่นสะเทือนเชิงกล และพบว่าผลการสั่นสะเทือนขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของอนุภาค (กลุ่มอนุภาค การกระจายของขนาดและรูปร่าง) และทิศทางของการสั่นสะเทือน คือการสั่นสะเทือนในทิศทางขนานกับแรงโน้มถ่วงของโลกจะมีผลดีต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันมากที่สุด และจะน้อยที่สุดเมื่อทิศทางของการสั่นสะเทือนตั้งฉากกับแรงโน้มถ่วงของโลก และ Diego และคณะ[10] ได้ทำการศึกษาและทดลองผลของการสั่นสะเทือนเชิงกลที่มีต่อฟลูอิดไดเซชันสำหรับอนุภาคผงแป้ง

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นการศึกษาสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม A และ C

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรของการสั่นสะเทือน ได้แก่ ความถี่ของการสั่นสะเทือน และค่าความเข้มการสั่นสะเทือน (Vibration Intensity) ที่มีผลต่อสัดส่วนช่องว่างภายในเบด ความดันลดคร่อมเบด ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดเซชัน โดยทำการทดลองด้วยอนุภาคแก้วกลุ่ม B และพิจารณาระบบการสั่นสะเทือนในกรณีที่เกิดถูกสั่นด้วยการสั่นสะเทือนเชิงกลแบบฮาร์โมนิก (Harmonic) ในแนวตั้งขนานกับแรงโน้มถ่วงของโลก

2. ทฤษฎี

ฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามปัจจัยต่าง เช่น ขนาดของอนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาค ความเร็วอากาศ แอมพลิจูด และความถี่ของการสั่นสะเทือน โดยจะ

มีผลต่อคุณลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด

2.1 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน

ความเร็วของของไหลที่ทำให้อนุภาคภายในเบดเริ่มขยับตัวหรือเริ่มจัดเรียงตัว ในขณะที่ความดันลดคร่อมเบดมีค่าสูงสุดและเริ่มคงที่ เรียกว่า ความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน (Minimum fluidization velocity) ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความดันลดคร่อมเบดจากสมการ (1) และคำนวณหาความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน จากสมการของ Ergun

- ค่าความดันลดคร่อมเบด

$$\frac{\Delta p_{mf}}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_p - \rho_f) g \quad (1)$$

โดยที่ Δp_{mf} คือความดันลดคร่อมเบดต่ำสุดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน L_{mf} คือความสูงเบดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน ε_{mf} คือสัดส่วนช่องว่างภายในเบดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน ρ_p คือความหนาแน่นของอนุภาคหรือเม็ดแก้ว ρ_f คือความหนาแน่นของอากาศ และ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก

-ความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน (u_{mf})

$$\frac{\Delta p}{L_{mf}} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu_f u_{mf}}{d_p^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \rho_f \frac{u_{mf}^2}{d_p} \quad (2)$$

โดยที่ u_{mf} คือความเร็วอากาศต่ำสุดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน d_p

คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

-สัดส่วนช่องว่างภายในเบดขณะเกิดฟลูอิดไดเซชัน

$$\varepsilon_{mf} = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{L_0}{L_{mf}} \quad (3)$$

โดยที่ ε_0 คือสัดส่วนช่องว่างของอากาศขณะเบดนิ่ง L_0 คือความสูงของเบดนิ่ง

2.2 ความเข้มการสั่นสะเทือน

ความเข้มการสั่นสะเทือน (Vibration Intensity) คือตัวแปรไร้หน่วยที่อัตราส่วนความเร่งในการสั่นสะเทือนกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก สามารถคำนวณหาได้ดังนี้

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} \quad (4)$$

โดยที่ Γ คือความเข้มการสั่นสะเทือน A คือแอมพลิจูดของการสั่น f คือความถี่ของการสั่นสะเทือน

ความเข้มการสั่นสะเทือนสามารถใช้จำแนกชนิดของฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนได้ดังนี้

1. Vibrated state เกิดขึ้นเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือนมีค่าน้อยกว่า 1 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเบดจะมีลักษณะคล้ายกับฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดา การสั่นสะเทือนจะช่วยให้มีเสถียรภาพ และเกิดฟลูอิดไดเซชันได้สมบูรณ์มากขึ้น การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะขึ้นกับความเร็วอากาศเพียงอย่างเดียว

2. Vibrofluidized bed เกิดขึ้นเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือนมีค่าเท่ากับ 1 โดยที่ความเร็วอากาศและการสั่นสะเทือนมีอิทธิพล

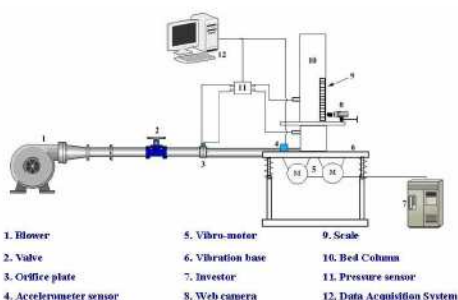
ต่อการเกิดฟลูอิดไดเซชันเท่า ๆ กัน (ขึ้นกับว่าปัจจัยตัวใดมีผลต่อการเคลื่อนที่มากกว่ากัน)

3. Vibrated fluidized layer เกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นการสั่นสะเทือนมีค่ามากกว่า 1 การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในเบดจะขึ้นกับแรงสั่นสะเทือนเป็นหลัก อากาศที่ผ่านเบดเป็นเพียงตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน การถ่ายเทระหว่างมวลเท่านั้น และแรงเนื่องจากการสั่นสะเทือนจะทำให้เกิดความดันลดคร่อมเบด

โดยผลของการสั่นสะเทือนจะลดลงเมื่อความสูงเบดมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นการสั่นสะเทือน (Γ) มีค่ามากกว่า 4 แล้ว การกระจายตัวของอากาศภายในเบดอย่างสม่ำเสมอมีแนวโน้มลดลง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนและมวลมีค่าลดลง

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์สำหรับทดลองฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือนแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องเป่าลม วาล์วสำหรับปรับความเร็วลม เซนเซอร์วัดความดัน (MPXV5004DP 3.92 kPa (0-400 mm H₂O) 1-4.9 volt output: Free Scale) เซนเซอร์วัดความเร่ง (ADXL 210 ± 10g: Analog Device) มอเตอร์เขย่า (OMB ขนาด 0.75 แรงม้า 50 Hz) ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ (60 Hz) หอทดลองอะคลิลิกทรงกระบอก (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 1 เมตร) สเกลวัดไม้บรรทัดและกล้องดิจิทัลสำหรับวัดความสูงเบด และบันทึกภาพการเปลี่ยนแปลงของเบดขณะทำการทดลอง และใช้ USB DAQ 6008 National Instrument และโปรแกรม LabView SinalExpress 3.0 สำหรับการเก็บและบันทึกข้อมูลจากการทดลอง



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์สำหรับทดลองระบบฟลูอิดไดเซชันเบด

วัสดุที่ใช้สำหรับทดลองประกอบด้วยอนุภาคกลุ่ม B คือ อนุภาคแก้ว (Glass beads) จำนวน 1 kg ทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2mm. ความหนาแน่น 2570 kg/m^3 และ 3mm. ความหนาแน่น 2600 kg/m^3

3.1 วิธีการทดลอง

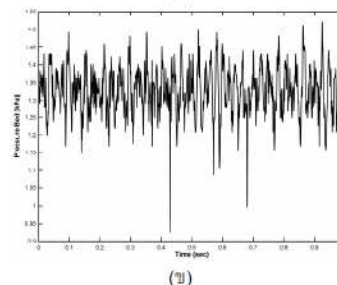
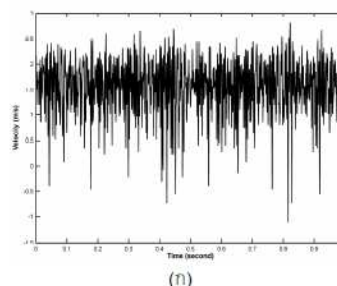
การทดลองฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือน เริ่มจากการเปิดเครื่องเป่าลม (Blower) ปรับอัตราการไหลของอากาศด้วยวาล์ว วัดค่าความเร็วอากาศโดยใช้เซนเซอร์วัดความดันต่อเข้ากับแผ่นออริฟิส นำผลที่ได้มาคำนวณหาความเร็วอากาศด้วยสมการที่ได้จากการปรับเทียบระหว่างอุปกรณ์วัดความเร็วลมกับเซนเซอร์วัดความดัน ส่วนค่าความดันลดคร่อมเบดคำนวณได้จากสมการการปรับเทียบระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและความดันอากาศ ซึ่งเป็นสมการปรับเทียบของเซนเซอร์วัดความดัน (MPXV5004DP 3.92 kPa: Free Scale) วัดค่าความสูงของเบดด้วยสเกลไม้บรรทัดซึ่งติดตั้งบริเวณฟลูอิดไดเซชันเบดคอลัมน์ และบันทึกการเปลี่ยนแปลงความสูงของเบดโดยใช้กล้องดิจิทัล

สำหรับระบบของการสั่นสะเทือนนั้น กำหนดให้การสั่นสะเทือนมีความถี่อยู่ในช่วง 35 40 และ 45 Hz โดยสามารถปรับและควบคุมความถี่ของมอเตอร์เขย่าด้วยอินเวอร์เตอร์

4. ผลการทดลอง และวิจารณ์

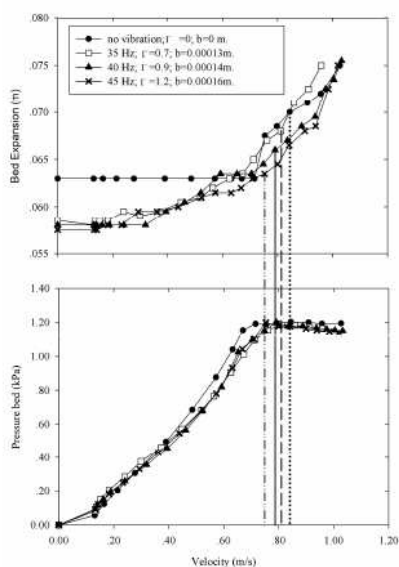
4.1 ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน

ผลของค่าความเร็วและค่าความดันลดคร่อมเบด ของการทดลองฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือนจากการทดลองนี้เป็นการเก็บค่าความเร็วและความดันเทียบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) และ 2 (ข) ตามลำดับ (กรณีอนุภาคขนาด 3 มม. ความถี่ของการสั่นสะเทือน 35 Hz) ซึ่งนำค่าที่ได้จากการทดลองมาเฉลี่ยในแต่ละช่วงของความเร็วอากาศ



รูปที่ 2 (ก) ความเร็วอากาศ และ (ข) ความดันลดคร่อมเบด (อนุภาคขนาด d_p 3 มม.)

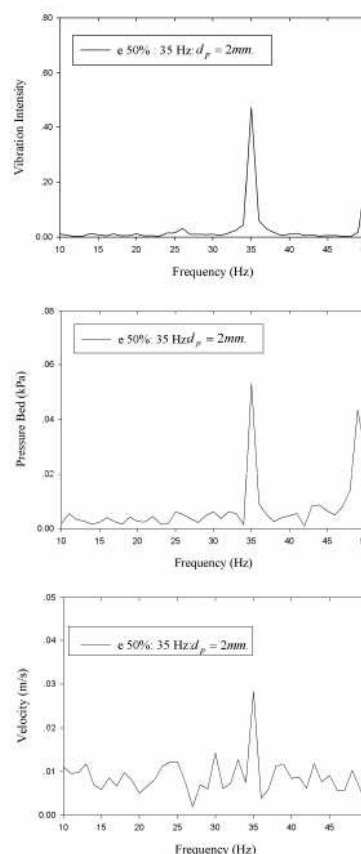
จากกราฟในรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศและความดันลดคร่อมเบด การขยายตัวของฟลูอิดไดซ์เบด (ความสูงเบด) และความเร็วอากาศ (กรณีอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มม.) ทดลองในช่วงความถี่การสั่นสะเทือน 35 Hz 40 Hz และ 45 Hz ซึ่งจากการทดลองพบว่าความดันลดคร่อมเบดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นในช่วงแรก และความดันลดคร่อมเบดเริ่มคงที่เมื่อปรับความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น (อนุภาคภายในเบดเริ่มขยับและจัดเรียงตัว) ซึ่งความเร็วอากาศจุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชัน และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างฟลูอิดไดซ์เบดแบบธรรมดาและฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือน พบว่าค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชันในช่วงความถี่ของการสั่นสะเทือน 45 Hz และความความเข้มการสั่นสะเทือนที่ 1.2 เท่าของแรงโน้มถ่วงโลกจะมีค่าความเร็วอากาศต่ำสุดที่ 0.75 m/s และความสูงเบด 0.0635 เมตร จะเกิดฟลูอิดไดซ์ชันได้เร็ว และกรณีทดลองด้วยอนุภาคขนาด 2 มม. ผลการทดลองมีลักษณะเช่นเดียวกับอนุภาคขนาด 3 มม. ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Mawatari และคณะ [5] Tatemoto และคณะ [6] พบว่าเมื่อค่าความถี่และค่าความเข้มการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วอากาศของการเกิดฟลูอิดไดซ์ชันจะมีค่าลดลง (ศึกษาด้วยอนุภาคขนาดเล็กกลุ่ม A และ C)



รูปที่ 3 ผลของค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนที่มีต่อความเร็วอากาศและค่าความดันลดคร่อมเบด (อนุภาคขนาด d_p 3 มม.)

และจากการทดลองฟลูอิดไดซ์เบดแบบสั่นสะเทือนเพื่อศึกษาอิทธิพลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อความเร็วอากาศ และความดันลดคร่อมเบด พบว่าค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนที่ให้กับระบบฟลูอิดไดซ์เบดมีค่าเดียวกับกับค่าความถี่ของความเร็วอากาศ และ

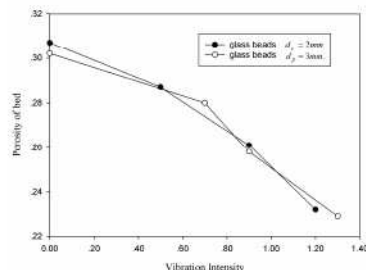
ค่าความถี่ของความเร็วอากาศ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 เป็นการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของฟลูอิดไดซ์เบดที่ความถี่ 35 Hz ของอนุภาคขนาด 2 มม.



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ความถี่ของการสั่นสะเทือน (อนุภาคขนาด d_p 2 มม.)

4.2 สัดส่วนช่องว่างภายในเบด

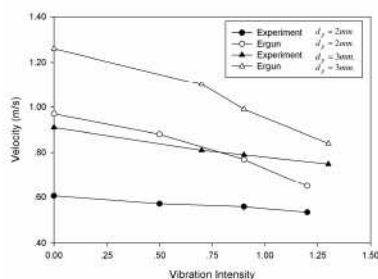
สัดส่วนช่องว่างภายในเบดหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและความสูงเบด และนำผลความสูงของเบดมาคำนวณด้วยสมการที่ (3) แสดงดังกราฟรูปที่ 5 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มการสั่นสะเทือนกับสัดส่วนช่องว่างภายในเบดของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มม. และ 3 มม. ขณะเกิดฟลูอิดไดซ์ชัน โดยจากผลการทดลองพบว่าเมื่อความเข้มการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น อนุภาคภายในเบดจะรับแรงสั่นสะเทือนที่ให้อัดตัวกันแน่นขึ้น จึงทำให้สัดส่วนช่องว่างภายในเบดลดลง และน้อยกว่ามีค่ากรณีที่ไม่มีการสั่นเบด และความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาซึ่งศึกษาโดย Mawatari และคณะ [6]



รูปที่ 5 ผลความเข้มข้นการสั่นสะเทือนต่อค่าสัดส่วนช่องว่างภายในเบด

4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองและการคำนวณ

การเปรียบเทียบผลการทดลองความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน สามารถหาได้จากคำนวณด้วยสมการที่ (3) และ (4)



รูปที่ 6 ความเข้มข้นของการสั่นสะเทือนต่อค่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไดเซชัน

จากกราฟในรูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบเทียบค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันระหว่างการทดลองและการคำนวณความเร็วจากทฤษฎีตามสมการข้างต้น สำหรับกรณีที่ไม่มีการสั่นเบด ค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชันจากผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการคำนวณด้วยสมการ สำหรับอนุภาค 2 มม. ผลการคำนวณค่าความเร็วอากาศมีค่าเท่ากับ 0.91 m/s และจากผลการทดลองมีค่าความเร็วอากาศเท่ากับ 0.61 m/s มม. และในกรณีที่มีอนุภาคมีขนาด 3 มม.ค่าที่ได้จากการคำนวณคือ 0.97 m/s และค่าจากการทดลองคือ 1.21 m/s สำหรับกรณีที่มีการสั่นเบดผลจากการคำนวณมีความแตกต่างกับการทดลองมาก เนื่องจากอิทธิพลของการสั่นสะเทือนที่มีต่อสภาวะการเกิดฟลูอิดไดเซชันภายในฟลูอิดไดเซชันเบด แต่ลักษณะการลดลงของค่าความเร็วจากกราฟจะมีแนวโน้มเหมือนกัน

5. สรุป

จากการทดลองศึกษาผลของตัวแปรการสั่นสะเทือนของฟลูอิดไดเซชันแบบสั่นสะเทือนของอนุภาคขนาดกลุ่ม B แสดงให้เห็น

ว่าการสั่นสะเทือนสามารถช่วยให้เกิดฟลูอิดไดเซชันได้เร็วขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการสั่นสะเทือนของฟลูอิดไดเซชันเบด และนอกจากนี้การสั่นสะเทือนของฟลูอิดไดเซชันเบดมีผลทำให้ค่าความเร็วอากาศของการเกิดฟลูอิดไดเซชันมีค่าลดลง เมื่อค่าความเข้มข้นการสั่นสะเทือนและความถี่ของการสั่นสะเทือนมีค่าเพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Geldart, D. 1973. Type of gas fluidization. *Powder Technology*, 7: 285-292.
- [2] Gupta, R. and Mujumdar, A.S. 1980. Aerodynamic of a vibrated fluid bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 58: 332.
- [3] Kuiper, N.J.M., Stamhuis, E.J., Beenackers. 1996. Fluidization of potato starch in a stirred vibrating fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 51: 2727-2732.
- [4] Noda, K., Mawatari, Y., Uchida S. 1998. Flow patterns of fine particles in a vibrated fluidized bed under atmospheric or reduced pressure. *Powder Technology*, 99: 11-14.
- [5] Mawatari, Y., Koide, T., Tatemoto, Y., Uchida, S., Noda, K. 2002. Effect of particle diameter on fluidization under vibration. *Powder Technology*, 123: 69-72.
- [6] Mawatari, Y., Tatemoto, Y., Noda, K. 2003. Prediction of minimum fluidization velocity for vibrated fluidized bed. *Powder Technology*, 131: 66-70.
- [7] Ergun, S. 1952. Fluid flow through packed bed columns. *Chemical Engineering Progress*, 48: 89-94.
- [8] Xu, C., Zhu, J. 2005. Experimental and theoretical study on the agglomeration arising from fluidization of cohesive particles-effects of mechanical vibration. *Chemical Engineering Science*, 60: 6529-6541.
- [9] Xu, C., Zhu, J. 2006. Parametric of fine particle fluidization under mechanical vibration. *Powder Technology*, 161: 135-144.
- [10] Barletta, D., Donsi, G., Ferrari, G., Poletto, M., Russo, P. 2008, 86: 359-369.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาววันวิสาข์ กาญจนารณ์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	4812121	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วันวิสาข์ กาญจนารณ์, กิตตินันท์ มลิวรรณ และ พงุทธิกร สมิตไมตรี “ผลของการสั้นสะเทือนเชิงกลต่อความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดเซชัน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 8 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 22-23 เมษายน หน้า 769-773.