

การออกแบบฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน: ผลของลักษณะแอลวาล์วในการไหลที่อุณหภูมิห้อง



นาย พีรพล จูตอินันท์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2995-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED: THE EFFECT OF L-VALVE CONFIGURATION IN  
COLD-FLOW.

Mr. Peerapol Thititanan

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2995-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบพลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน: ผลของลักษณะแอสวาล์วใน
	การไหลที่อุณหภูมิห้อง
โดย	นาย พีรพล ฐิติอนันท์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์.ดร.สุชญา นิติวฒนานนท์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตรศักดิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์)

..... กรรมการ  
(ดร. บุญรอด สัจจุลนุกิจ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบุญ)

พีรพล ลีตตินันท์ : การออกแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน: ผลของลักษณะแอลวาล์วในการไหลที่อุณหภูมิห้อง (DESIGN OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED: THE EFFECT OF L-VALVE CONFIGURATION IN COLD-FLOW) อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร. เลอสรอง เมฆสุต อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : ดร. สุชญา นิติวัดมนานนท์ จำนวนหน้า 137 หน้า. ISBN 974-17-2995-2.

แอลวาล์วใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อกับในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ทำหน้าที่ป้อนของแข็งย้อนกลับเข้ามาในระบบ(ท่อไรเซอร์)ใหม่ โดยงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของตำแหน่งช่องเติมอากาศ มุมของแอลวาล์ว ปริมาณของแข็งในระบบ และปริมาณอากาศที่ให้ที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ ที่มีต่ออัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งในการไหลที่อุณหภูมิห้อง โดยของแข็งที่ใช้ศึกษาเป็นถ่านหินที่มีความหนาแน่น  $1381 \text{ kg/m}^3$  ขนาดระหว่าง 500 ถึง 5000 ไมครอน ซึ่งอยู่ในกลุ่ม B และ D ของการจำแนกด้วยวิธี Geldart โดยมีขนาดเฉลี่ย 740 ไมครอน พบว่าที่ตำแหน่งเหนือจุดศูนย์กลางของแอลวาล์วขึ้นมา 6 เซนติเมตร จะให้อัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหินดีที่สุดในเมื่อเทียบกับตำแหน่ง 0 และ 12 เซนติเมตร โดยการศึกษาในส่วนนี้จะเลือกศึกษาเฉพาะในกรณีที่มีมุมแอลวาล์วเป็นศูนย์องศาเท่านั้น และยังพบอีกว่าอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหินจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ มุมของแอลวาล์วเพิ่มขึ้น แต่ไม่ขึ้นกับปริมาณของแข็งที่สะสมในระบบ และได้นำผลที่ได้มาสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหินกับตัวแปรต่างๆ ที่ศึกษา

## สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....	ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2545.....	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4372355023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : CIRCULATING FLUIDIZED BED / L-VALVE / COLD-FLOW / COAL

PEERAPOL THITIANAN : DESIGN OF A CIRCULATING FLUIDIZED BED: THE EFFECT OF L-VALVE CONFIGURATION IN COLD-FLOW. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.LURSUANG MEKASUT THESIS CO-ADVISOR : SUCHAYA NITIVATTANANON, 137 pp. ISBN 974-17-2995-2.

In this research, L-valve was used in the circulating fluidized bed to control solid circulation rate. The effect of L-valve configuration in cold-flow (the position of aeration tap, angle of L-valve, solid inventory and aeration flow rate) was studied by measuring the solid circulation rate. Coal which has the density of  $1381 \text{ kg/m}^3$ , particle size distribution between 500 and 5000  $\mu\text{m}$ , average particle size of 740  $\mu\text{m}$  and was categorized in group B and D in Geldart's classification was used. From this study, solid circulation rate at the position of 6 cm above the center of horizontal L-valve was higher than the position of 0 and 12 cm only when horizontal L-valve. The solid circulation rate was increased when aeration flow rate and angle of L-valve increased and it didn't depend on the solid inventory. Finally, the relationship between the solid circulation rate and these parameter was studied.



department.....Chemical Technology..... Student's signature.....

Field of study... Chemical Technology..... Advisor's signature.....

Academic year.....2002..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมารวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

งานวิจัยเรื่อง“การออกแบบฟลูอิดไซค์เบดแบบหมุนเวียน: ผลของลักษณะแอดวาล์วในการไหลที่อุณหภูมิต่ำ” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และทุนบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ และรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ที่กรุณาได้รับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณสังข์ ชมชื่น และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจอย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ณ
สารบัญภาพ .....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์ .....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัยการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ลักษณะของอนุภาค .....	3
2.1.1 การหาขนาดของอนุภาค .....	3
2.1.2 การหา Sauter mean diameter .....	3
2.1.3 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart .....	4
2.2 ฟลูอิดไอเซน .....	5
2.1.1 นิยาม .....	5
2.1.2 ประเภทของฟลูอิดไอเซน .....	5
2.1.3 ลักษณะของฟลูอิดไอซ์เบด .....	6
2.1.4 ก๊าซฟลูอิดไอเซน .....	7
2.3 ฟลูอิดไอเซนแบบหมุนเวียน .....	14
2.4 Standpipes และระบบป้อนกลับ .....	15
2.4.1 Standpipes .....	15
2.4.2 ระบบป้อนกลับของแข็ง .....	20

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.4.3 ระบบป้อนกลับของแข็งใน CFBC .....	25
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	28
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง .....	31
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ .....	31
3.1.1 เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน(CFB) .....	31
3.1.2 เครื่องบดหยาบ.....	37
3.1.3 เครื่องบดละเอียด.....	37
3.1.4 เครื่องคัดขนาด.....	37
3.2 วิธีการทดลอง .....	39
3.2.1 วิธีการทดลองตอนที่ 1.....	39
3.2.2 วิธีการทดลองตอนที่ 2.....	40
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	41
4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองส่วนที่ 1 .....	41
4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองส่วนที่ 2 .....	44
4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองส่วนที่ 3 .....	47
4.3.1 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับงานของนักวิจัยท่านอื่น .....	47
4.3.2 การหาสมการสหสัมพันธ์เพื่อใช้อธิบายผลที่ได้จากงานวิจัย .....	50
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	55
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	55
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	56
รายการอ้างอิง .....	58
ภาคผนวก .....	59
ภาคผนวก ก .....	60
ภาคผนวก ข .....	102
ภาคผนวก ค .....	105
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	137



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของของแข็งที่ Arena U. และคณะ ใช้ในการทดลอง .....	48
4.2 แสดงภาวะในการทดลองของ Arena U. และคณะ .....	49



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart .....	4
2.2 ลักษณะการเกิดฟลูอิดไรส์เซชันของเบดที่มีของไหลต่างชนิดกันไหลผ่าน .....	6
2.3 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดไรส์เบดก๊าซ-ของแข็ง .....	7
2.4 ลักษณะของเบดนิ่งที่ไม่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผนัง .....	8
2.5 ลักษณะการเกิด wake .....	10
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วในช่วงการเกิดเบดแบบปั่นป่วน .....	11
2.7 เครื่อง CFBC ในรูป (a) และ FCC ในรูป (b) .....	14
2.8 ลักษณะ standpipe แบบต่างๆ .....	15
2.9 การเคลื่อนที่ของเบดแบบ Overflow standpipe .....	15
2.10 กรณีต่างๆ ของความเร็วสัมพันธ์ระหว่างก๊าซกับของแข็ง .....	16
2.11 ความแตกต่างของ fluidization curve ระหว่างของแข็งกลุ่ม A และ B .....	17
2.12 ลักษณะของ Standpipe แบบ Overflow และ Underflow .....	19
2.13 ลักษณะของ Seal pot และ Loop seal .....	20
2.14 ลักษณะของวิวาล์ว .....	21
2.15 ลักษณะของแอลวาล์วในหมวดอัดโนมิติ .....	22
2.16 ลักษณะของอุปกรณ์ในหมวดวาล์ว .....	23
2.17 ลักษณะการไหลของก๊าซผ่านส่วนงอของแอลวาล์ว .....	24
2.18 ชนิดพื้นฐานของระบบป้อนกลับของแข็งใน CFBC .....	26
3.1 แบบเครื่อง CFB ที่ใช้ในงานวิจัย .....	32
3.2 ลักษณะต่างๆ ของแอลวาล์ว สำหรับใช้ในงานวิจัย .....	33
3.3 แบบไซโคลน สำหรับใช้ในงานวิจัย .....	33
3.4 เครื่องเป่าอากาศ Globe valve และ flow meter .....	34
3.5 เครื่องอัดอากาศ .....	34
3.6 อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ .....	35
3.7 Differential Pressure Transmitter .....	36
3.8 มานอมิเตอร์น้ำ .....	37
3.9 เครื่องบดหยาบในรูป (ก) และเครื่องบดละเอียดในรูป (ข) .....	38
3.10 เครื่องคัดขนาด .....	38

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $Q_A$ กับ $G_S$ ที่ $W_t = 6.05$ kg และ $h_{AT}/d_D$ ต่างๆ กัน .....	42
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_S$ ที่ $W_t = 6.05$ kg และ $h_{AT}/d_D$ ต่างๆ กัน .....	43
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_S$ ที่ $h_{AT}/d_D = 1$ และ $W_t$ ต่างๆ กัน .....	44
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_S$ ที่แอลวาล์วมุม 0 องศา $W_t$ ต่างๆ กัน .....	45
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_S$ ที่แอลวาล์วมุมต่างๆ .....	45
4.6 แสดงทิศทางของแรงต่างๆ ที่กระทำกับของแข็งในการเคลื่อนที่ผ่านแอลวาล์ว .....	46
4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการของ Pham H. L. และ Bhattacharya S. C. ....	48
4.8 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการของ Arena U. และคณะ .....	49
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_S$ ที่แอลวาล์วมุม 0 องศา .....	51
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $G_S^{0.1679}$ กับ $\Delta P_{L-valve}$ ที่แอลวาล์วมุมต่างๆ .....	51
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมแอลวาล์วกับผลต่างของความดัน .....	52
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(142.65-3.9795\theta)G_S$ กับ $\Delta P_{L-valve}$ ที่แอลวาล์วมุม 0 องศา .....	53
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(0.1844-0.00514\theta)(G_S^{0.1679} \rho_B^{0.996} d_D^{-0.574} d_{Sm}^{-0.237})$ กับ $\Delta P/L_{L-valve}$ .....	54
ผ1 กราฟผลการทำ calibration อุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิด rotameter .....	61
ผ2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_S$ ที่ $W_t = 6.5$ kg และ $h_{AT}/d_D$ ต่างๆ กัน .....	109
ผ3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_S$ ที่ $W_t = 7$ kg และ $h_{AT}/d_D$ ต่างๆ กัน .....	109
ผ4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_S$ ที่ $W_t = 7.5$ kg และ $h_{AT}/d_D$ ต่างๆ กัน .....	110

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ผ5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_s$ ที่แอลวาล์วมุม 10 องศา $W_t$ ต่างๆ กัน .....	119
ผ6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_s$ ที่แอลวาล์วมุม 20 องศา $W_t$ ต่างๆ กัน .....	119
ผ7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta P_{L-valve}$ กับ $G_s$ ที่แอลวาล์วมุม -10 องศา $W_t$ ต่างๆ กัน .....	122
ผ8 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ Downcomer ที่แอลวาล์วมุม 0 องศา .....	135
ผ9 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ Downcomer ที่แอลวาล์วมุม 10 องศา .....	135
ผ10 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ Downcomer ที่แอลวาล์วมุม 20 องศา .....	136
ผ11 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ Downcomer ที่แอลวาล์วมุม -10 องศา .....	136

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$A$	= พื้นที่หน้าตัดของหอคดลอง (m)
$d_D$	= เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน Downcomer
$d_p$	= เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง ( $\mu\text{m}$ )
$d_{pi}$	= เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคของแข็งในช่วง $i$ ( $\mu\text{m}$ )
$d_p^*$	= ตัวแปรไร้หน่วยของเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง
$d_{scr}$	= ความกว้างของรูตะแกรง ( $\mu\text{m}$ )
$d_{Sm}$	= Sauter mean diameter ( $\mu\text{m}$ )
$d_{sph}$	= เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของอนุภาค (m)
$D$	= เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหอคดลอง (m)
$D_v, D_{L-valve}$	= เส้นผ่านศูนย์กลางภายในแวลวาล์ว (m)
$f$	= แรงต้านการไหลของของแข็งผ่านแวลวาล์ว ( $\text{kgm/s}^2$ )
$F_D$	= แรงลากเนื่องจากการไหล (Drag force, $\text{kgm/s}^2$ )
$g$	= ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ $9.8 \text{ m/s}^2$
$G_s$	= อัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )
$G_{S1}, G_{S2}$	= อัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งที่ได้จากสมการสหสัมพันธ์ขั้นที่ 1 และ 2 ของ Pham H.L. และ Bhattacharya S.C. ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )
$G_{S,Ch}$	= อัตราการไหลของของแข็งออกจากเบดต่อพื้นที่หน้าตัดของหอคดลอง ณ ที่ความเร็วก๊าซเท่ากับความเร็ว Choking ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ )
$h_{AT}$	= ความสูงของตำแหน่งช่องเติมอากาศ โดยอ้างอิงจุดศูนย์กลางท่อแนวระดับของแวลวาล์ว (m)
$H_R$	= ความสูงของไรเซอร์หรือหอคดลอง (m)
$H_1, H_2, H_3$	= ระดับของของแข็งที่อยู่เหนือตำแหน่งช่องเติมก๊าซของแวลวาล์วแบบอัตโนมัติ (m)
$L$	= ความสูงเบด (m)
$L_f$	= ความสูงเบดขณะเกิดฟลูอิดไลเซชัน (m)
$L_{L-valve}$	= ความยาวตามแนวระดับของแวลวาล์ว (m)
$L_{mf}$	= ความสูงของเบดขณะเกิดเริ่มเกิดฟลูอิดไลเซชัน (m)
$P_1, P_2$	= ความดันที่ตำแหน่ง 1 และ 2 ( $\text{mmH}_2\text{O}$ หรือ atm)
$P_{AT}$	= ความดันที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ ( $\text{mmH}_2\text{O}$ หรือ Pa)
$\Delta P$	= ความดันตกคร่อม ( $\text{mmH}_2\text{O}$ )

## คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

$\Delta P_{cy}$	= ความดันตกคร่อมไซโคลน (mmH <sub>2</sub> O)
$\Delta P_{ls}$	= ความดันตกคร่อม loop seal (mmH <sub>2</sub> O)
$\Delta P_{L-vavle}$	= ความดันตกคร่อมแวลวาล์ว (mmH <sub>2</sub> O หรือ Pa)
$\Delta P_{riser}$	= ความดันตกคร่อมท่อไรเซอร์ (mmH <sub>2</sub> O)
$\Delta P_{sp}$	= ความดันตกคร่อม standpipe (mmH <sub>2</sub> O)
$\Delta P_{surg}$	= ความดันตกคร่อม surge vessel (mmH <sub>2</sub> O)
Q	= อัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิ (m <sup>3</sup> /s)
Q <sub>A</sub>	= อัตราการไหลของอากาศผ่านช่องเติมอากาศ (m <sup>3</sup> /s)
Q <sub>sp</sub>	= อัตราการไหลของก๊าซผ่าน standpipe (m <sup>3</sup> /s)
Q <sub>T</sub>	= อัตราการไหลของก๊าซผ่านส่วนโค้งของแวลวาล์ว (m <sup>3</sup> /s)
Re <sub>p</sub>	= ตัวแปรไร้หน่วยของ particle Reynolds number มีค่าเท่ากับ $d_p U \rho_g / \mu$
t	= เวลาที่เบดนิ่งใช้ในการเคลื่อนที่ได้ระยะทาง x cm. (s)
U	= ความเร็วอากาศภายในไรเซอร์ หาได้โดยนำอัตราการไหลของอากาศปฐุมภูมิหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของไรเซอร์ (m/s)
U <sub>A</sub>	= ความเร็วก๊าซที่เติมเข้ามา หาโดยนำอัตราการไหลของก๊าซที่เติมเข้ามหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของ Return leg หรือท่อป้อนกลับ (m/s)
U <sub>ch</sub>	= choking velocity (m/s)
U <sub>mb</sub>	= ความเร็วก๊าซที่ทำให้เริ่มมีฟองก๊าซเกิดขึ้นในเบด (m/s)
U <sub>mf</sub>	= ความเร็วก๊าซที่ทำให้เริ่มเกิดฟลูอิไดเซชัน (m/s)
U <sub>ms</sub>	= ความเร็วก๊าซที่ทำให้ฟองก๊าซเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับหอตกลง (m/s)
U <sub>t</sub>	= ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง (Terminal velocity, m/s)
U <sub>t,spherical</sub>	= ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งที่เป็นทรงกลมในของไหลที่อยู่นิ่ง (m/s)
U <sub>t</sub> <sup>*</sup>	= ตัวแปรไร้หน่วยของความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง
V	= ปริมาตรของอนุภาคของแข็ง (m <sup>3</sup> )
V <sub>mb</sub>	= ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างก๊าซกับของแข็ง ขณะเริ่มมีฟองก๊าซเกิดขึ้นในเบด (m/s)
V <sub>mf</sub>	= ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างก๊าซกับของแข็ง ขณะเริ่มเกิดฟลูอิไดเซชัน (m/s)
V <sub>g</sub>	= ความเร็วก๊าซที่ไหลผ่านเบด (m/s)
V <sub>r</sub>	= ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างก๊าซกับของแข็ง (m/s)
V <sub>s</sub>	= ความเร็วของของแข็ง (m/s)

### คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

$W_t$	= ปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ (kg)
$W_1, W_2, W_3$	= อัตราการป้อนของแข็งเข้ามาใน standpipe (kg/s)
$x$	= ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนโดยน้ำหนัก
$x_i$	= ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนโดยน้ำหนักของของแข็งในช่วง $i$
$X$	= ระยะทางที่เบดเคลื่อนที่ได้ใน standpipe (cm.)
$\phi$	= ตัวแปรไร้หน่วยของค่าความเป็นทรงกลม
$\theta$	= มุมของแอลวาล์ว (องศา)
$\rho_B$	= ความหนาแน่นบัลค์ของเบด ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_g$	= ความหนาแน่นของก๊าซ ( $\text{kg/m}^3$ )
$\rho_s$	= ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ( $\text{kg/m}^3$ )
$\mu$	= สัมประสิทธิ์ความหนืดของก๊าซ (g/cm.s)
$\varepsilon$	= ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนของช่องว่าง
$\varepsilon_{ch}$	= ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนของช่องว่าง ขณะที่ก๊าซมีความเร็วเท่ากับ $U_{ch}$
$\varepsilon_{mf}$	= ตัวแปรไร้หน่วยของสัดส่วนของช่องว่าง ขณะที่ก๊าซมีความเร็วเท่ากับ $U_{mf}$

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

การเผาไหม้ถ่านหินในกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไอเซชัน เป็นกระบวนการที่ทำให้ของแข็ง(ถ่านหิน)ซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหล(อากาศร้อน) แล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหลทำให้ถ่านหินสัมผัสกับอากาศร้อนได้อย่างทั่วถึง โดยกระบวนการนี้ได้พัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ถ่านหิน แต่ก็มีข้อเสียเนื่องจากถ่านหินเมื่อถูกเผาไหม้ไประยะหนึ่งจะมีขนาดเล็กลง ทำให้หลุดลอยออกจากคอลัมน์ไปพร้อมกับของไหลก่อนที่จะถูกเผาไหม้หมดทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานและทรัพยากร ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนามาเป็นกระบวนการเผาไหม้แบบฟลูอิดไอเซชันที่มีการหมุนเวียน เพื่อนำเอาถ่านหินที่ยังเผาไหม้ไม่หมดกลับเข้ามาเผาไหม้ใหม่ กระบวนการใหม่นี้จะทำให้สามารถใช้ทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดพลังงานที่สูญเสียไปพร้อมกับถ่านหินที่หลุดออกจากคอลัมน์และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการควบคุมปัญหาด้านมลภาวะทางอากาศด้วย

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนไปของแอลวาล์ว (เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการป้อนของแข็งเข้าสู่ระบบ) ได้แก่ มุม และตำแหน่งของช่องเติมอากาศของแอลวาล์วของเครื่องฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียน โดยมุมของแอลวาล์ว ที่ศึกษาได้แก่ 0 10 20 และ -10 องศา กับแนวระดับ ส่วนตำแหน่งของช่องเติมอากาศศึกษาที่ตำแหน่ง 0 6 และ 12 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับจุดที่อยู่ตรงข้ามกับจุดศูนย์กลางของปากทางออกของท่อป้อนกลับ โดยพิจารณาอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งว่าส่งผลเช่นไรเมื่อมุมของแอลวาล์วและตำแหน่งของช่องเติมอากาศเปลี่ยนไป ซึ่งมุมแอลวาล์วที่เปลี่ยนไปควรแปรผันตรงกับอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง เนื่องจากเมื่อมุมมากขึ้นจะทำให้แรงเสียดทานระหว่างผนังท่อกับอนุภาคมีค่าน้อยลง และตำแหน่งช่องเติมอากาศที่เหมาะสมจะต้องทำให้อนุภาคในส่วนล่างของท่อป้อนกลับ มีอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหินคงที่ และสามารถปรับอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหินได้สูง

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างเครื่องฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียน พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าตัวแปรต่างๆ
2. ศึกษาลักษณะของแอลวาล์วที่มีผลต่ออัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหิน โดยพิจารณา มุมแอลวาล์วและตำแหน่งช่องเติมอากาศ ที่ภาวะอุณหภูมิห้อง



### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนในภาวะอุณหภูมิห้อง (Cold-model)
2. ศึกษาโดยใช้ของแข็งเพียงชนิดเดียว คือ ถ่านหิน
3. หาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแอลวาล์วกับอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหิน

### 1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ศึกษาวัสดุที่ใช้สร้างเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนและอุปกรณ์วัดค่าตัวแปรต่างๆ
3. ออกแบบเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 ซม. สูง 6 ม.) แล้วดำเนินการสร้างเครื่อง พร้อมติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าตัวแปรต่างๆ
4. คัดขนาดของแข็งที่ใช้ทำการทดลอง (ขนาดถ่านหินอยู่ในช่วง 500 – 4750 ไมครอน) พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพของของแข็ง
5. หาความเร็วอากาศปฐมภูมิ(Primary air) ที่เหมาะสมในการทำการทดลอง
6. ทำการทดลองหาอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งและความดันที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล โดยตัวแปรปรับค่าที่สนใจคือ ปริมาณของแข็งในระบบ ตำแหน่งที่เติมอากาศ ปริมาณอากาศที่เติม และมุมแอลวาล์ว
7. สร้างความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแอลวาล์วกับอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหิน
8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุป และเขียนวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. สามารถออกแบบเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนได้
2. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปปรับปรุงเครื่องฟลูอิดซ์เบดหรือฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเหมาะสมกับชนิดของงาน
3. สามารถนำความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นไปใช้ในการทำงานจริงได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ลักษณะของอนุภาค

เนื่องจากอนุภาคที่ใช้ในการทดลองมีรูปร่างลักษณะต่างกัน จึงจำเป็นต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคที่ใช้ทดลองกับอนุภาคทรงกลมเพื่อสะดวกในการคำนวณและกล่าวอ้าง

##### 2.1.1 การหาขนาดของอนุภาค( $d_p$ ) การหาขนาดของอนุภาคสามารถหาได้ 2 วิธี ดังนี้

1. เมื่อทราบปริมาตรของอนุภาค จะได้

$$d_{sph} = \left( \frac{6V}{\pi} \right)^{1/3} \quad (2.1)$$

และ

$$\text{Particle sphericity } \phi = \frac{\text{สัดส่วนของพื้นผิวทรงกลม}}{\text{พื้นผิวของอนุภาคที่ปริมาตรเท่ากัน}} \quad (2.2)$$

จากข้อกำหนดด้านบน สามารถหาขนาดของอนุภาค( $d_p$ ) ที่แขวนลอยในเครื่องปฏิกรณ์ได้

$$d_p = \phi d_{sph} \quad (2.3)$$

2. screen analysis เป็นการหาค่า  $d_p$  โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $d_p$  กับ  $d_{scr}$  ดังนี้

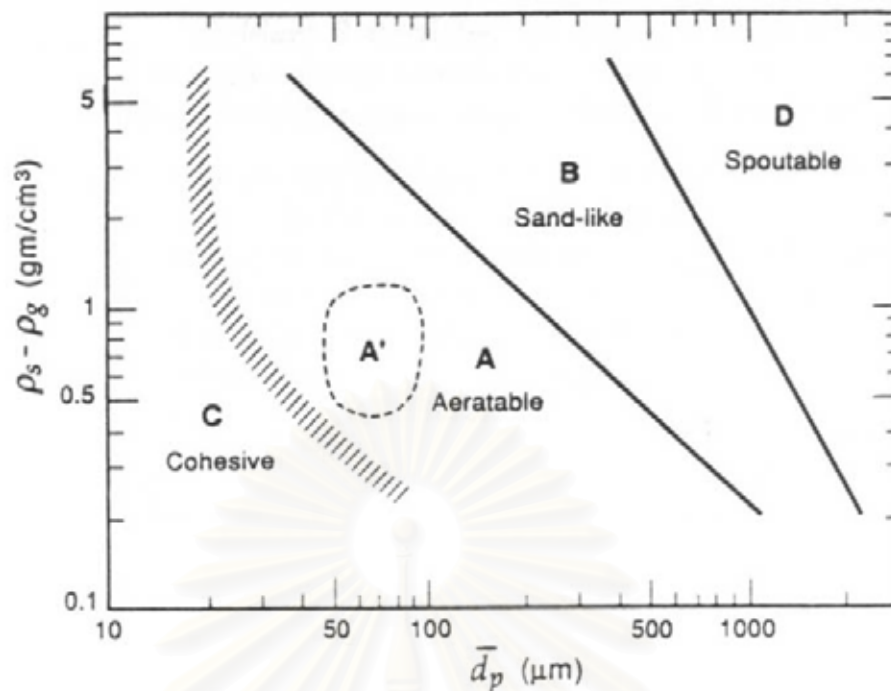
$d_p = \phi d_{scr}$  เมื่ออนุภาคไม่เป็นทรงกลม แต่ไม่ยาวหรือสั้นมาก

$d_p = d_{scr}$  เมื่ออนุภาคไม่เป็นทรงกลม มีลักษณะยาวมากแต่ต้องมีอัตราส่วนไม่เกิน 2:1

$d_p = \phi^2 d_{scr}$  เมื่ออนุภาคไม่เป็นทรงกลม มีลักษณะสั้นด้านยาวด้าน แต่ต้องมีอัตราส่วนไม่น้อยกว่า 1:2

2.1.2 การหา Sauter mean diameter( $d_{sm}$ ) เป็นการหาขนาดเฉลี่ยของกลุ่มอนุภาคที่ศึกษา เนื่องจากในงานวิจัยทั่วไปจะใช้ขนาดของอนุภาคของแข็งเป็นช่วง โดยค่า Sauter mean diameter สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$d_{sm} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.1 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart<sup>(1)</sup>

### 2.1.3 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart<sup>(1)</sup>

งานวิจัยทั่วไปจะจำแนกขนาดของอนุภาคออกเป็นกลุ่มๆ ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมากก็คือ Geldart powder classification เป็นการจำแนกขนาดของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart โดยอาศัยค่าผลต่างของความหนาแน่นของของแข็งกับก๊าซและขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.1 ลักษณะของอนุภาคในแต่ละกลุ่มอธิบายได้ดังนี้

Group C คือ เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก (Cohesive หรือ very fine powders) ของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิไดซ์ได้ยาก เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะสูงมาก และมักจะจับตัวกันเป็นก้อน

Group A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ สามารถทำให้เกิดฟลูอิไดซ์ได้ง่ายเป็นฟลูอิไดซ์แบบสม่ำเสมอ (smooth fluidization) ที่ความเร็วก๊าซต่ำๆ และที่ความเร็วก๊าซสูงๆ ก็สามารถควบคุมการเกิดฟองได้

Group B คือ Sandlike เป็นของแข็งที่มีขนาด อยู่ในช่วง  $40 < d_p < 500 \mu\text{m}$ . และความหนาแน่นในช่วง  $1.4 < \rho_s < 4 \text{ g/CC}$  การเกิดฟลูอิไดซ์ยังเกิดได้ง่าย แต่อิทธิพลของฟองจะสูงขึ้น และฟองจะมีการโต

Group D คือ Spoutable ของแข็งที่มีขนาดใหญ่และหรือความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงเกิดฟลูอิไดซ์ได้ยาก

## 2.2 ฟลูอิดไอเซชัน

ในปัจจุบันฟลูอิดไอเซชันเป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจจากวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถตอบสนองความต้องการทางอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิต และทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เครื่องมือฟลูอิดไอเซชันเบดที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จึงได้ถูกสร้างขึ้น และพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในยุโรปและอเมริกา เช่น เครื่องทำนมผงให้โตขึ้น (agglomeration) เครื่องอบแห้งเมล็ดพืช เต้าเผา ระบบฟลูอิดไอเซชันเบด เป็นต้น

### 2.2.1 นิยาม

คำว่า ฟลูอิดไอเซชัน เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น เมื่อสัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้น เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงในหอคอดลองแล้วให้ของไหล (ก๊าซ ของเหลว) ไหลผ่านจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็งเหล่านั้น ของไหลก็จะผ่านชั้นของเม็ดของแข็งและไหลออกทางส่วนบนของหอคอดลอง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่在这个时候จะมีสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไอเซชันเบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไอเซชัน

### 2.2.2 ประเภทของฟลูอิดไอเซชัน

งานของฟลูอิดไอเซชัน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปัจจุบันพอที่จะสรุปประเภทของงานได้เป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะและฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ

1. ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ(Two-phase Fluidization) หมายความว่าในหอคอดลองหรือในเบดที่ใช้งานประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นก๊าซหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นฟลูอิดไอเซชัน 2 สถานะจึงแบ่งย่อยได้เป็น ก๊าซฟลูอิดไอเซชัน (Gas Fluidization) และฟลูอิดไอเซชันของเหลว(Liquid Fluidization)

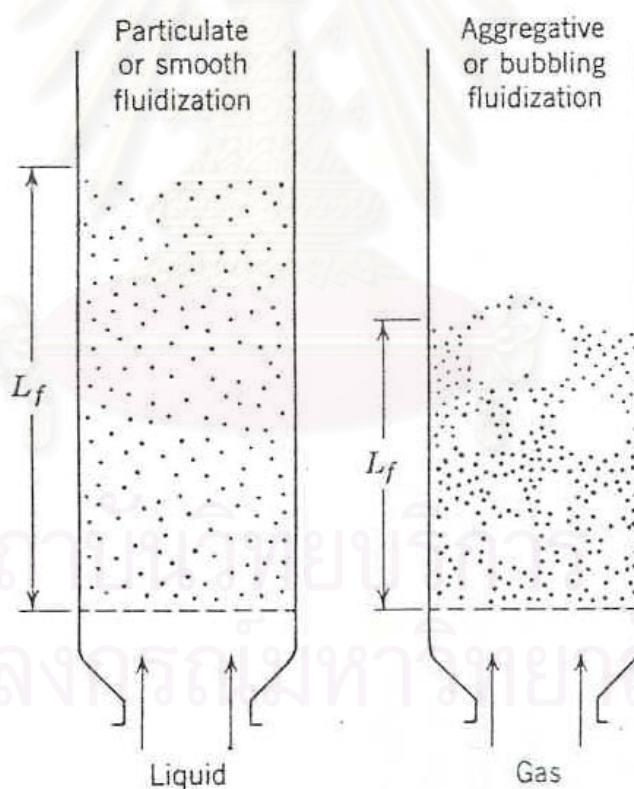
2. ฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ(Three-phase Fluidization) หมายความว่าในหอคอดลองหรือในเบดจะประกอบด้วยของสามสถานะอยู่พร้อม คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

สำหรับฟลูอิดไอเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ (หอคอดลองที่เป็นฟอง(bubble column) และหอคอดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง(Packed bed)) ดังนั้นจึงมีกลไกที่ซับซ้อนมากกว่า การคำนวณต้องใช้หลักคณิตศาสตร์ขั้นสูง

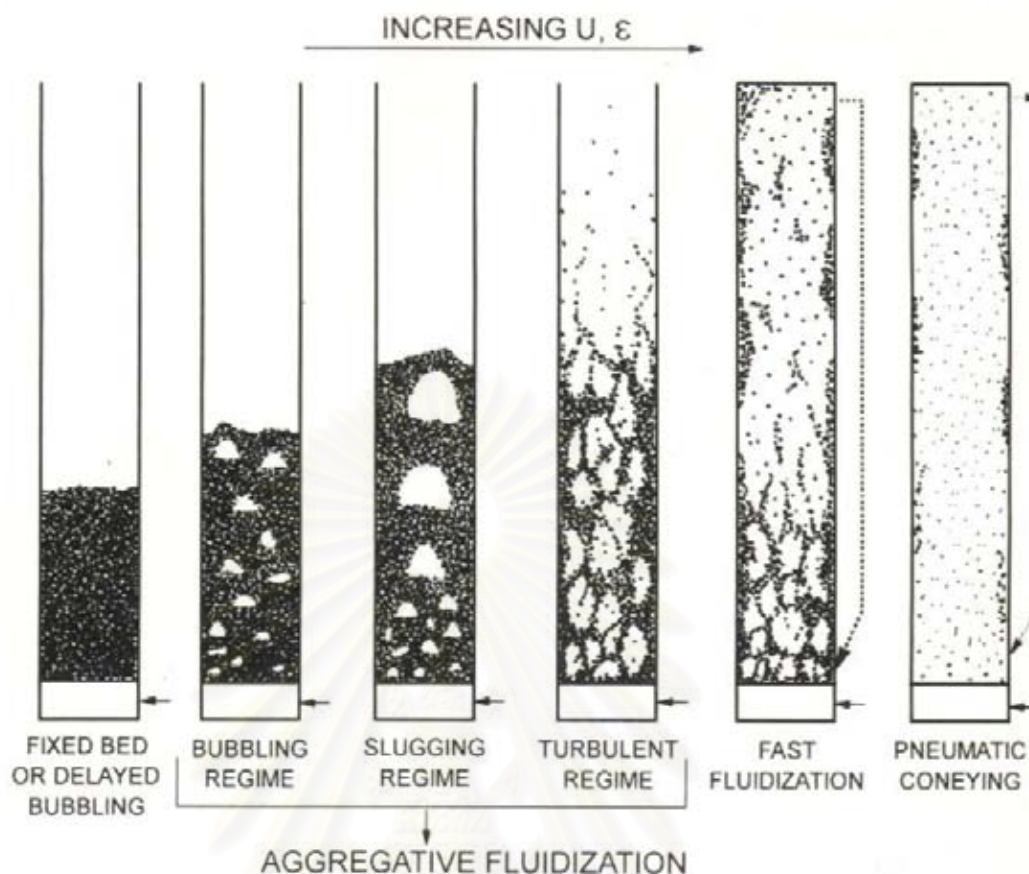
### 2.2.3 ลักษณะของฟลูอิด์เบด

คำว่า เบด (bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายก๊าซ (gas distributor) จนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบด

ฟลูอิด์เบดที่เป็นของเหลวการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบดแบบนี้ว่าเบดสม่ำเสมอหรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิด์เบดที่ของไหลเป็นก๊าซ ลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมากเพราะว่าเมื่อความเร็วของก๊าซสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิด์เบดแล้ว ก๊าซส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองก๊าซขึ้น ฟองก๊าซก็จะแทรกตัวขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ฟองก๊าซลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองก๊าซขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบดจึงมีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างซุกมุ่น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดฟลูอิด์เซชันของเบดที่มีของไหลต่างชนิดกันไหลผ่าน<sup>(3)</sup>



รูปที่ 2.3 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดเบดก๊าซ-ของแข็ง<sup>(1)</sup>

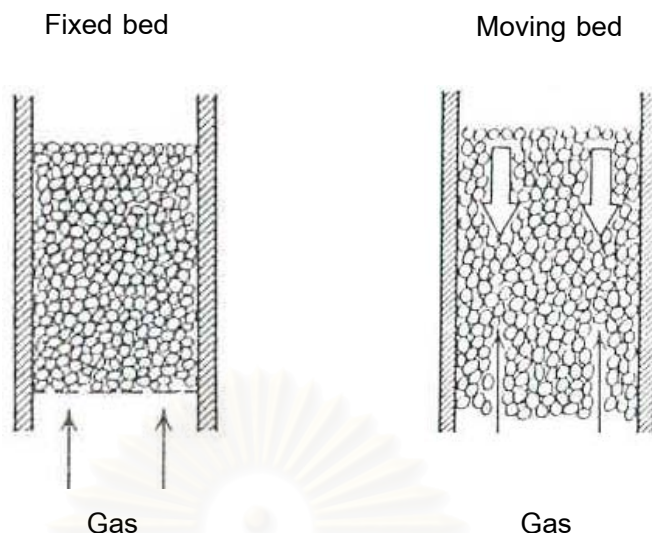
## 2.2.4 ก๊าซฟลูอิดไอเซนชัน

ก๊าซฟลูอิดไอเซนชันเป็นการเกิดฟลูอิดเบดสองสถานะระหว่างของไหลที่เป็นก๊าซกับของแข็ง ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ขอบเขตของฟลูอิดเบด (Regime of Fluidization) สามารถแบ่งได้ดังรูปที่ 2.3

เมื่อเบดวางตัวบนตะแกรงหรือตัวกระจายก๊าซ (gas distributor) และมีก๊าซเคลื่อนที่ผ่านขึ้นมา (upward flowing) ซึ่งความความเร็วที่เพิ่มขึ้น และ hydrodynamic ที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้

- เบดนิ่ง (Pack Bed หรือ fixed bed)

เมื่อก๊าซไหลผ่านเบดขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายก๊าซจะวางตัวนิ่งไม่เคลื่อนไหว ก๊าซจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบด เรียกลักษณะเบดแบบนี้ว่า เบดนิ่ง หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังแต่อนุภาคของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้เรียกว่า เบดเคลื่อนที่ (moving bed) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของเบตนิ่งที่ไม่มีและมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผนัง<sup>(3)</sup>

เมื่อก๊าซเคลื่อนที่ผ่านเบตนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหล กระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศทางการไหล เรียกแรงนี้ว่าแรงลากเนื่องจากการไหล(drag force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด(drop) ตกคร่อมเบตไว้

ความดันตกคร่อมเบตตลอดความสูงของเบตนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของก๊าซที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Ergun Equation<sup>(2)</sup> ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U (1-\varepsilon)^2}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho_g U^2 (1-\varepsilon)}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} \quad (2.5)$$

- เบตแบบฟองก๊าซ(Bubbling Fluidized Bed)

เมื่อความเร็วก๊าซที่เคลื่อนที่ผ่านเบตนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วที่จุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดิเซชัน(minimum fluidization velocity,  $U_{mf}$ ) และเรียกเบต ณ จุดนี้ว่า minimum fluidized bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบต ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบต ดังนั้น แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล(drag force;  $F_D$ ) ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$F_D = \Delta P \cdot A = AL(1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.6)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้ภาวะต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชัน(minimum fluidization condition) ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf}) (\rho_s - \rho_g) g \quad (2.7)$$

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{- Re}_p < 20 \quad U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\mu} g \left( \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.8)$$

$$\text{- Re}_p > 1,000 \quad U_{mf} = \frac{\phi d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \varepsilon_{mf}^3 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.9)$$

ส่วนความเร็วของก๊าซที่ทำให้เริ่มมีฟองก๊าซเกิดขึ้นในเบด(minimum bubbling fluidization velocity,  $U_{mb}$ ) ในกรณีของอนุภาคของแข็งกลุ่ม A ของ Geldart ค่า  $U_{mb}$  จะมีค่ามากกว่า  $U_{mf}$  ส่วนในกรณีของกลุ่ม B และ D ค่า  $U_{mb}$  จะเท่ากับ  $U_{mf}$  ดังนั้น รูปแบบการเกิดฟลูอิดไอเซชันแบบสม่ำเสมอ หรือแบบไม่มีฟองก๊าซ(Bubble-free fluidization) จึงเกิดเฉพาะในกรณีที่อนุภาคของแข็งเป็นกลุ่ม A เท่านั้น ซึ่งในปี ค.ศ. 1978 Geldart และ Abrahamsen<sup>(1)</sup> ได้ประมาณไว้ในหน่วย SI เป็น

$$U_{mb} = 33 d_p \left( \frac{\rho_g}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad \text{SI units} \quad (2.10)$$

สำหรับอนุภาคของแข็งกลุ่ม A B และ D ของ Geldart ถ้าเพิ่มความเร็วของก๊าซจนพบว่าจะเริ่มเกิดฟองก๊าซขึ้น เบดจะเริ่มแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. ส่วนที่เป็นฟองก๊าซเรียกว่า bubble phase อาจมีอนุภาคของแข็งอยู่บ้างแต่น้อยมาก

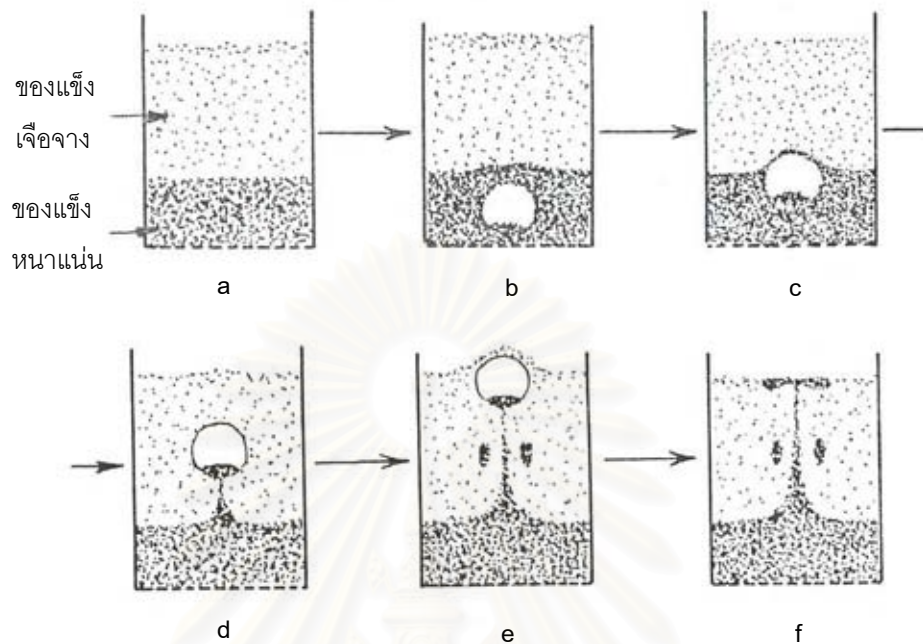
2. ส่วนที่ไม่ใช่ฟองก๊าซหรือส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น เรียกว่า emulsion phase ขนาดของฟองก๊าซที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม

- ขนาดของอนุภาคของแข็ง ;  $d_p$  ที่เพิ่มขึ้น
- ความเร็วก๊าซ ;  $(U - U_{mb})$  ที่เพิ่มขึ้น
- ตำแหน่งที่อยู่เหนือตะแกรงรองรับ หรือตัวกระจายก๊าซที่เพิ่มขึ้น

ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกขึ้นไป และอาจมีการรวมตัวกันผ่าน emulsion phase โดยที่อาจจะมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองก๊าซ และบางส่วนวิ่งตามฟองก๊าซขึ้นมาด้วย จนกระทั่งถึงผิวบนก็จะเคลื่อนที่หลุดออกไปแล้วแตกกระจายอยู่เหนือผิว อนุภาคของแข็งที่ติดอยู่เกือบทั้งหมดจะตกกลับลงมายังเบดใหม่ โดยเรียกปรากฏการณ์ที่ของแข็งเคลื่อนที่ตามฟองก๊าซนี้ว่าการเกิด wake ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การเกิด wake เกิดจากความดันที่อยู่ใต้ล่างฟองก๊าซน้อยกว่า



ความดันบริเวณ emulsion phase ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่จากบริเวณที่ความดันสูงมาอยู่ในบริเวณที่มีความดันต่ำ



รูปที่ 2.5 ลักษณะการเกิด Wake<sup>(3)</sup>

ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบตขึ้นไป ซึ่งฟองก๊าซจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองก๊าซจะตกลงมายังเบตอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่าบริเวณอิสระ (freeboard) อย่างไรก็ตามอาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วน (น้อยมาก) ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับก๊าซด้วย (ไม่ตกกลับลงมา) ณ ความสูงค่าหนึ่งใน freeboard ซึ่งอนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลงมาเบตจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน หรือ transport disengaged height (TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดไปกับก๊าซด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า elutriation rate

- เบทแบบสลัก (Slugging bed)

ดังกล่าวมาแล้วว่าขนาดของฟองก๊าซจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของก๊าซ และความสูงของเบต ถ้าเบตบรรจุอยู่ในหอทดลองซึ่งมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบต (หอทดลอง) ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองก๊าซเคลื่อนที่ผ่านเบตและแยกอนุภาคของแข็งออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิดสลัก และที่ความเร็วของก๊าซที่ทำให้ฟองก๊าซเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบตหรือหอทดลองก็คือ Minimum slugging velocity ( $U_{ms}$ ) ซึ่งในปี ค.ศ. 1967 Stewart และ Davidson<sup>(1)</sup> ได้ประมาณไว้ดังนี้

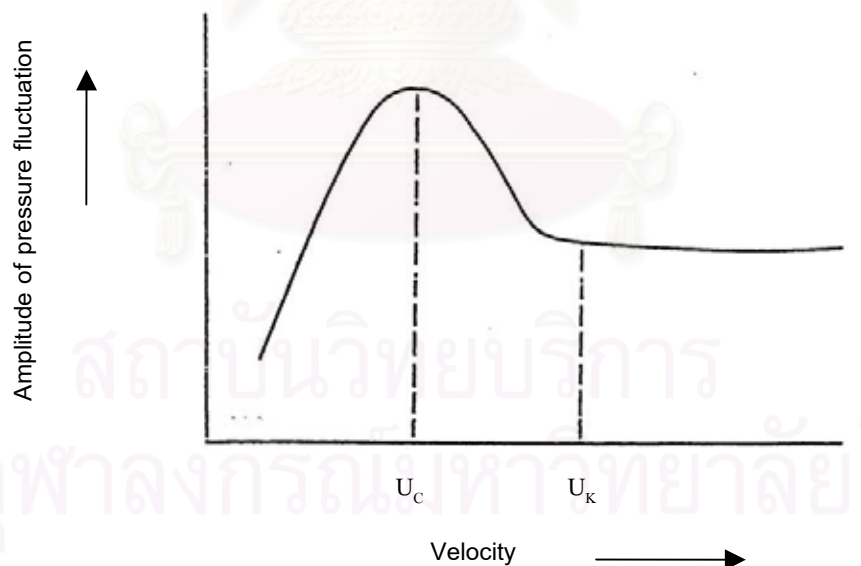
$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07\sqrt{gD} \quad (2.11)$$

- เบบดแบบปั่นป่วน (Turbulent Bed)

เมื่อความเร็วของก๊าซที่เคลื่อนที่ผ่านเบบบดแบบฟองก๊าซเพิ่มขึ้น จนมากกว่า  $U_{mf}$  เบบดจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับก๊าซ ซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว (จนดูเหมือนไม่มีฟองก๊าซ) การเคลื่อนที่ไหลภายในเบบบดเป็นแบบปั่นป่วน ลักษณะภายในเบบบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. dense phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น
2. dilute phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง

สำหรับช่วงในการเปลี่ยนแปลงภาวะจากเบบบดแบบฟองก๊าซไปเป็นเบบบดแบบปั่นป่วนนั้นไม่ได้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงของความเร็วในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ จากผลการวิจัยของนักวิจัยหลายๆ ท่านพบว่า การเปลี่ยนภาวะจากเบบบดแบบฟองก๊าซไปเป็นเบบบดแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบบดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบบบดแบบฟองก๊าซนั้น ที่บริเวณผิวหน้าของเบบบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบบบดแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเบบบดที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนภาวะได้ดังนี้ รูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับความเร็วจนถึงเบบบดแบบปั่นป่วน<sup>(12)</sup>

Terminal velocity คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอตกลงไป โดย Haider และ Levenspiel<sup>(5)</sup> ได้ประมาณไว้ในปี ค.ศ. 1989 โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของอนุภาคของแข็ง

กรณีอนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[ \frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{0.591}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.12)$$

หรือ

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.13)$$

$$U_{t,spherical} = \left[ \frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.14)$$

$$U_{t,spherical} = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.15)$$

และสำหรับกรณีที่อนุภาคของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[ \frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ 2.12 และ 2.16 จะติดอยู่ในตัวแปร  $U_t^*$  และ  $d_p^*$  ซึ่งเป็นเทอมของตัวแปรไร้หน่วย โดยที่

$$d_p^* = d_p \left[ \frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.17)$$

และ

$$U_t^* = U_t \left[ \frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g} \right]^{1/3} \quad (2.18)$$

ดังนั้นจาก  $U_t^*$  ที่ได้จากสมการที่ 2.12 และ 2.16 นำมาหา  $U_t$  โดยอาศัยสมการที่ 2.18 ได้

- Fast Fluidized Bed

$$U_t = U_t^* \left[ \frac{\mu(\rho_s - \rho_g)g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (2.19)$$

ไม่สามารถระบุพื้นผิวด้านบนของเบดได้ อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ออกทางด้านบนหรือตกลงและต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างของหอคอย อนุภาคของแข็งจะรวมกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผนังของหอคอย ขณะที่ยกและอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านในจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งในหอคอยเจือจางมากขึ้น ที่ภาวะนี้อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.98

จากรูปที่ 2.3 ในภาวะที่เป็น fast fluidization ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดหรือหอคอยตกลงกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของหอคอย ระบบแบบนี้จะเรียกว่าฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน(circulating fluidized bed, CFB)

**หมายเหตุ** ฟลูอิไดซ์เซชันที่ผ่านมาทั้งหมด(ยกเว้น fast fluidized bed) อาจเรียกรวมกันว่า captive fluidized bed เพราะว่า อนุภาคของแข็งทั้งหมดซึ่งสัมผัสกับก๊าซจะถูกจำกัดบริเวณอยู่ภายในระยะความสูงหนึ่งจากตัวกระจายก๊าซเท่านั้น หรือในบางกรณีที่มีการพัดพาเกิดขึ้นก็มีอนุภาคของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ถูกพัดพาไป

- Dilute-phase transport หรือ Pneumatic conveying

เป็นการขนถ่ายอนุภาคของแข็งด้วยก๊าซ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่อนุภาคของแข็งมีความเร่ง และอนุภาคของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผนังของหอคอย ความเร็วก๊าซที่ทำให้เบดในท่อเปลี่ยนจากเบดเจือจางเป็นเบดหนาแน่นเรียกว่า ความเร็วในการเกิดโซกิง(choking velocity,  $U_{ch}$ ) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วก๊าซในระบบที่เป็นเฟสเจือจางและมีปริมาณอนุภาคของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบดเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเฟสเจือจางเป็นเฟสหนาแน่น ซึ่งความเร็วก๊าซที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือความเร็วในการเกิดโซกิงนั่นเอง ปริมาณของแข็งที่ไหลออกจากเบดภาวะนี้ Zenz<sup>(1)</sup> ได้เสนอความสัมพันธ์ไว้ว่า

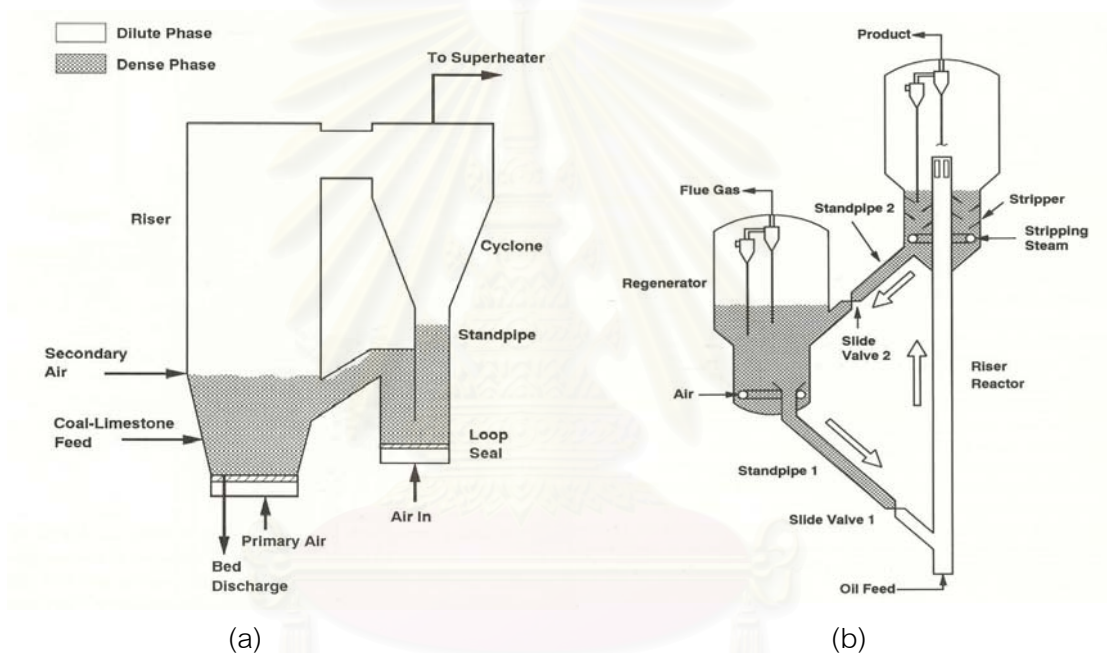
$$G_{s,ch} = \rho_s (1 - \epsilon_{ch})(U_{ch} - U_t) \quad (2.20)$$

โดยค่า  $\epsilon_{ch}$  หรืออัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบดในภาวะ Choking พบว่าค่านี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.943 ถึง 0.987

## 2.3 ฟลูอิดไดเซชันแบบหมุนเวียน (Circulation Fluidized Bed ; CFB)

ระบบฟลูอิดไดเซชันแบบหมุนเวียน เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการสัมผัสระหว่างก๊าซกับเม็ดของแข็งถูกค้นพบเป็นครั้งแรกโดย Winkler และถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมโดย Warren Lewis และ Edwin Gilliland แห่ง Massachusetts Institute of Technology ,MIT ซึ่งพยายามที่จะหารูปแบบของการสัมผัสกันระหว่างก๊าซกับเม็ดของแข็งที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการ fluid catalytic cracking(FCC) และพบว่าระบบฟลูอิดไดเซชันแบบหมุนเวียน ซึ่งมี hydrodynamic เป็นแบบ fast fluidized bed เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง และเหมาะสมในการใช้งาน

การนำระบบฟลูอิดไดเซชันแบบหมุนเวียนไปใช้งานโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น circulating fluidized bed combustion(CFBC) และ fluid catalytic cracking(FCC) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 เครื่อง CFBC ในรูป (a) และ FCC ในรูป (b) <sup>(1)</sup>

ระบบฟลูอิดไดเซชันแบบหมุนเวียนจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

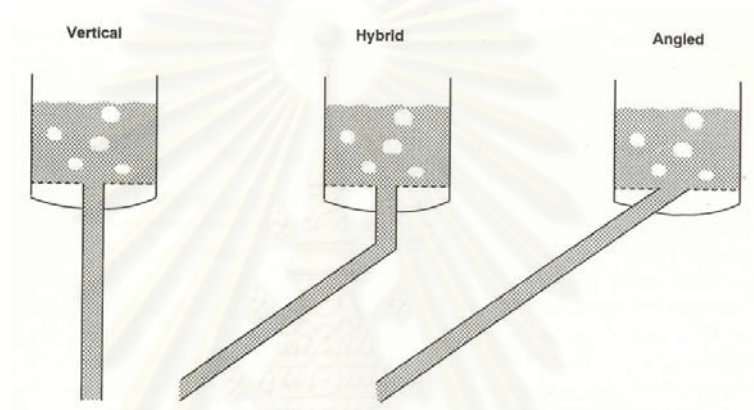
1. ส่วนที่ทำงานภายใต้สภาวะการเกิดฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วสูง (fast fluidized bed) ทางด้านท่อไรเซอร์
2. Gas-Solid Separator เช่น Cyclone ทำหน้าที่ดักจับเม็ดของแข็งที่หลุดออกมาจากท่อไรเซอร์
3. Standpipe และระบบท่อป้อนกลับ(return system) ทำหน้าที่ป้อนเม็ดของแข็งที่ได้จาก cyclone กลับไปยังด้านล่างของท่อไรเซอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดของแข็งในระบบ

## 2.4 Standpipes และระบบป้อนกลับ

กระบวนการฟลูอิดิเซชันแบบหมุนเวียน ทุกกระบวนการจะประกอบด้วยระบบป้อนกลับของแข็ง(solids return system) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็น standpipe และส่วนที่ทำหน้าที่ป้อนกลับ(return system)

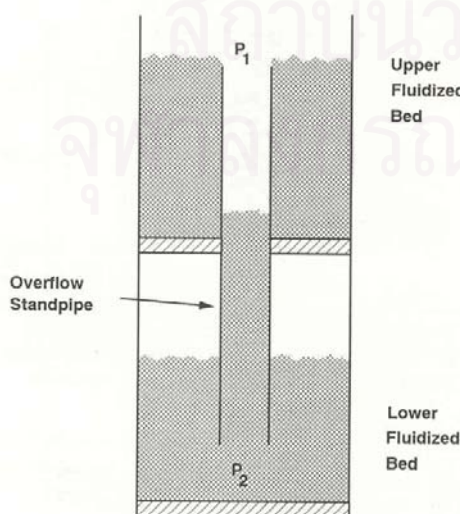
### 2.4.1 Standpipes

Standpipe เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ของแข็งสามารถไหลผ่าน standpipe ได้ทั้งที่เป็นเฟสหนาแน่นหรือเฟสเจือจาง standpipe เป็นได้ทั้งแบบแนวตั้ง(vertical) แบบเอียงเป็นมุม(angled) และแบบผสมระหว่างเอียงเป็นมุมกับแนวตั้ง(angled and vertical) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะ standpipe แบบต่างๆ<sup>(1)</sup>

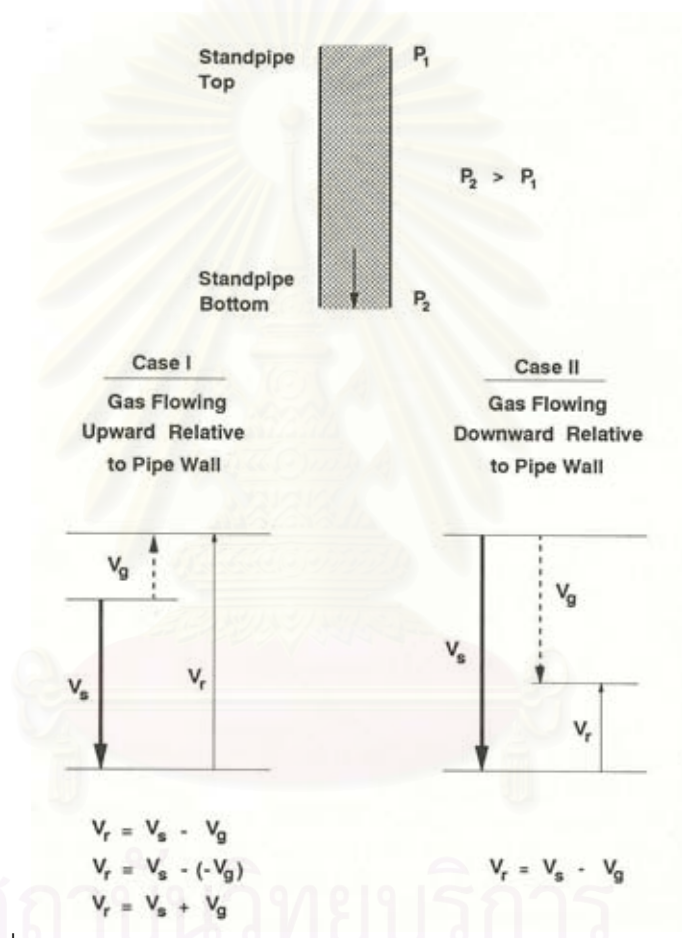
Jersey Standard in 1940s<sup>(1)</sup> ได้เริ่มศึกษาเรื่อง standpipe โดยการพัฒนาหน่วย FCC เพื่อผลิตก๊าซโซลีน ได้เสนอว่าการเคลื่อนที่ของของแข็งใน standpipe คือของแข็งจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความดันต่ำไปสู่บริเวณที่มีความดันสูงดังแสดงในรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นว่าของแข็งเคลื่อนที่จากบริเวณฟลูอิดิเซชันที่มีความดัน  $P_1$  ไปสู่บริเวณฟลูอิดิเซชันที่มีความดัน  $P_2$  ซึ่งมีความดันสูงกว่า  $P_1$



รูปที่ 2.9 การเคลื่อนที่ของเบดแบบ Overflow standpipe<sup>(1)</sup>

ของแข็งจะสามารถเคลื่อนที่โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงซึ่งตรงกันข้ามกับการลดลงของความดัน ถ้าก๊าซไหลขึ้นจะสัมพันธ์กับการไหลลงของของแข็ง

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างการไหลของก๊าซและของแข็งสามารถหาเป็นความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างก๊าซกับของแข็ง ทิศทางของก๊าซที่ไหลจริงใน standpipe สามารถไหลได้ทั้งขึ้นและลงใน standpipe ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.10 และสามารถหาความเร็วสัมพัทธ์ได้ โดยความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างก๊าซกับของแข็งกำหนดให้เป็น  $V_r$  และมีค่าเป็นค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างความเร็วของก๊าซกับของแข็ง



รูปที่ 2.10 กรณีต่างๆ ของความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างก๊าซกับของแข็ง<sup>(1)</sup>

ในรูปที่ 2.10 ของแข็งจะเคลื่อนที่ลงใน standpipe จากตำแหน่งที่มีความดัน  $P_1$  สู่อำนาจที่มีความดันสูงกว่า  $P_2$  โดยความเร็วของแข็งจะแสดงถึงความยาวของลูกศรที่บ ความเร็วก๊าซจะแสดงถึงความยาวของลูกศรประ และความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างก๊าซกับของแข็งจะแสดงถึงความยาวของลูกศรบาง

ในกรณีที่ 1 ของแข็งจะเคลื่อนที่ลงและก๊าซจะไหลขึ้น ทำให้ความเร็วสัมพัทธ์มีทิศทางขึ้นด้วยและมีค่าเท่ากับผลรวมของความเร็วของแข็งกับความเร็วของก๊าซ

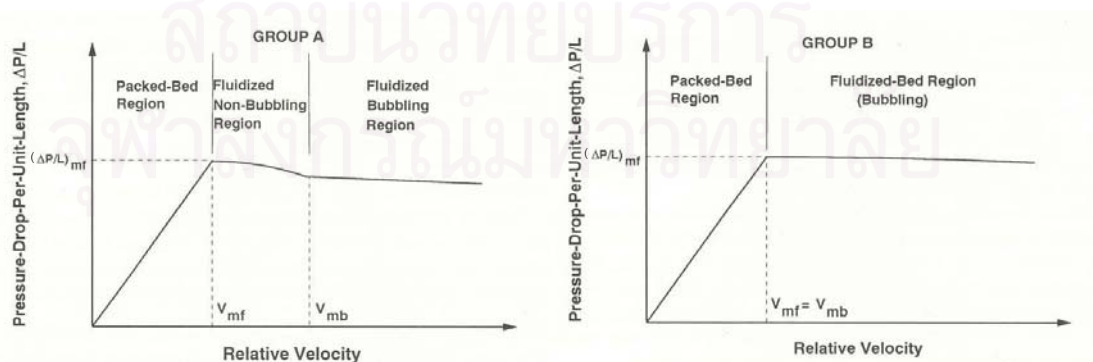
$$V_r = V_s - (-V_g) = V_s + V_g \quad (2.21)$$

สำหรับในกรณีที่ 2 ทั้งของแข็งและก๊าซจะเคลื่อนที่ลง แต่ความเร็วจะน้อยกว่าของแข็ง ฉะนั้นความเร็วสัมพัทธ์จะมีทิศทางขึ้นและมีค่าเท่ากับผลต่างของความเร็วของแข็งกับความเร็วของก๊าซ

$$V_r = V_s - V_g \quad (2.22)$$

การที่ก๊าซไหลขึ้นจะไปสัมพันธ์กับการเกิดความดันตกคร่อมเนื่องจากของแข็งเกิดการเสียดสีกับของไหล ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมต่อหน่วยความยาว (pressure drop per unit length,  $\Delta P/L$ ) และความเร็วสัมพัทธ์สำหรับอนุภาคของแข็งชนิดหนึ่งสามารถอธิบายโดยใช้กราฟฟลูอิดิเดชัน (fluidization curve) สำหรับอนุภาคชนิดนั้น ซึ่งกราฟนี้ โดยทั่วไปแล้วจัดทำในหอตดลองฟลูอิดิเดชันในกรณีที่ของแข็งไม่มีการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์นี้จะนำมาประยุกต์ใช้สำหรับกรณีที่ของแข็งเคลื่อนที่ใน standpipe

โดยทั่วไปแล้วในระบบฟลูอิดิเดชันแบบหมุนเวียนเกือบทั้งหมดจะใช้ของแข็งในกลุ่ม A หรือ B ของการจำแนกด้วยวิธีของ Geldart ซึ่งกราฟฟลูอิดิเดชันของของแข็งกลุ่ม A จะแตกต่างจากกลุ่ม B อยู่บางส่วน แต่สำหรับในส่วนที่เหมือนกัน ความสัมพันธ์ของความเร็วก๊าซที่ไหลผ่านเบดที่เพิ่มขึ้นจากศูนย์จะทำให้ความดันตกคร่อมต่อหนึ่งหน่วยความยาวมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกับความเร็วสัมพัทธ์ ในส่วนนี้จะเรียกว่าเบดนิ่ง (packed-bed หรือ fixed bed) และที่ค่าความเร็วสัมพัทธ์ที่ทำให้เกิดความดันตกคร่อมเนื่องจากก๊าซไหลผ่านของแข็งมีค่าเท่ากับน้ำหนักของแข็งต่อหน่วยพื้นที่ จะเป็นความเร็วเริ่มต้นในการเกิดฟลูอิดิเดชัน (interstitial minimum fluidization velocity,  $V_{mf}$  หรือ  $U/\epsilon_{mf}$ ) ความดันตกคร่อมต่อหนึ่งหน่วยความยาวที่ความเร็วสัมพัทธ์เท่ากับ  $V_{mf}$  เขียนแทนด้วย  $(\Delta P/L)_{mf}$  และเมื่อหารด้วย  $g$  ซึ่งจะใช้อ้างอิงบ่อยในกรณีความหนาแน่นของฟลูอิดิเดชันเบดที่สภาวะต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดิเดชัน เนื่องจาก  $(\Delta P/Lg)_{mf}$  เป็นหน่วยของความหนาแน่น



รูปที่ 2.11 ความแตกต่างของ fluidization curve ของของแข็งกลุ่ม A กับ B<sup>(1)</sup>



การเพิ่ม  $V_r$  ให้สูงกว่า  $V_{mf}$  จะไม่ทำให้ความดันตกคร่อมต่อหน่วยความยาวเพิ่มขึ้นสำหรับอนุภาคที่จัดอยู่ในกลุ่ม B ของการจำแนกด้วยวิธีของ Geldart เมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซจน  $V_r$  มีค่าเกิน  $V_{mf}$  จะทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นและฟองก๊าซจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตาม  $V_r$  ที่เพิ่มขึ้น แต่ความดันตกคร่อมต่อหน่วยความยาวจะคงที่

สำหรับอนุภาคที่จัดอยู่ในกลุ่ม A ของการจำแนกด้วยวิธีของ Geldart เมื่อเพิ่มปริมาณก๊าซจน  $V_r$  มีค่าเกิน  $V_{mf}$  เบดจะขยายตัวสูงขึ้นแต่จะไม่มีฟองก๊าซเกิดขึ้น สถานะนี้จะเกิดในช่วงความเร็วช่วงหนึ่ง และเมื่อพ้นจากช่วงนี้ไปจะเริ่มเกิดฟองก๊าซขึ้น โดยความเร็วสัมพัทธ์ที่ทำให้เกิดฟองก๊าซเกิดขึ้นเป็นฟองแรกเรียกว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองก๊าซ (minimum bubbling velocity,  $V_{mb}$ ) ชนิดของ fluidization curve ของอนุภาคในกลุ่ม A และ B ของการจำแนกด้วยวิธีของ Geldart แสดงในรูปที่ 2.11

ระบบการไหลใน standpipe มีอยู่ 3 ระบบด้วยกัน คือ การไหลแบบเบดนิ่ง (pack-bed flow) การไหลแบบฟลูอิดิไดซ์เบด (fluidized-bed flow) และการไหลแบบเฟสเจือจาง (dilute-phase flow) หรือเรียกว่า การไหลแบบสตรีมมิ่ง (streaming flow) ซึ่งความแตกต่างระหว่างการใช้ทั้ง 3 ระบบอธิบายได้ดังนี้

#### 1. การไหลแบบเบดนิ่ง (pack-bed flow)

ในกรณีนี้ ค่า  $V_r$  จะน้อยกว่า  $V_{mf}$  และเมื่อเพิ่ม  $V_r$  ขึ้นจะทำให้ความดันตกคร่อมต่อหน่วยความยาวเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อ standpipe ทำงานในระบบที่กลุ่มอนุภาคเคลื่อนที่แบบเบดนิ่ง ภาวะการไหลในบางครั้ง standpipe จะสั่น และเกิดเสียงดัง ซึ่งเป็นภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง แต่ยังไม่มียุติวิธีที่ใช้ทำนายได้ว่าจะเกิดภาวะเหล่านี้ขึ้น

#### 2. การไหลแบบฟลูอิดิไดซ์เบด (fluidized-bed flow)

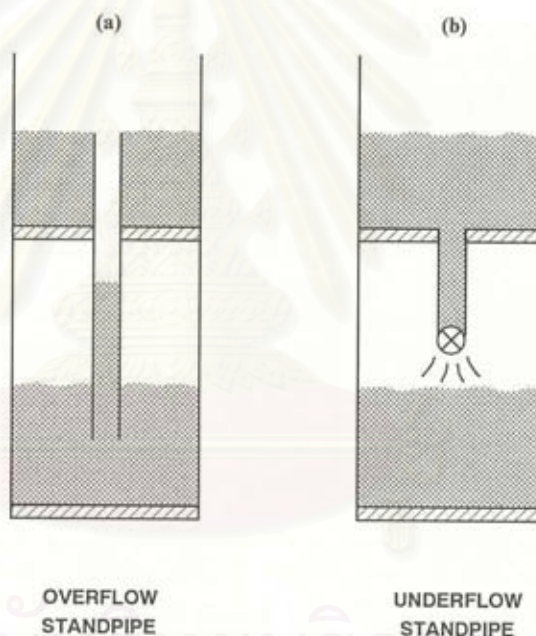
ในการไหลแบบนี้ ค่าความเร็วสัมพัทธ์  $V_r$  จะเท่ากับหรือมากกว่า  $V_{mf}$  สัดส่วนช่องว่างมีการเปลี่ยนแปลงตลอดความยาวของ standpipe และความดันตกคร่อมต่อหน่วยความยาวจะไม่ขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของ  $V_r$  โดยแบ่งการไหลในระบบฟลูอิดิไดซ์เบดได้เป็น 2 ประเภท

- การไหลแบบฟลูอิดิไดซ์เบดแบบมีฟองก๊าซ (bubbling fluidized-bed flow) เกิดได้ทั้งอนุภาคที่อยู่ในกลุ่ม A และ B ของการจำแนกด้วยวิธีของ Geldart โดยในกลุ่ม B จะเกิดในช่วงที่ค่า  $V_r$  เกิน  $V_{mf}$  และในกลุ่ม A จะเกิดในช่วงที่ค่า  $V_r$  เกิน  $V_{mb}$
- การไหลแบบฟลูอิดิไดซ์เบดแบบไม่มีฟองก๊าซ (non-bubbling fluidized-bed flow) จะเกิดได้เฉพาะในกลุ่ม A ของการจำแนกด้วยวิธีของ Geldart โดยจะเกิดในช่วงที่ค่า  $V_r$  อยู่ระหว่าง  $V_{mf}$  กับ  $V_{mb}$

#### 3. การไหลแบบสตรีมมิ่ง (streaming flow)

การไหลแบบสตรีมมิ่งจะอาศัย standpipe ที่มีโครงสร้างเป็นแบบ underflow standpipe (จะกล่าวอธิบายในตอนต่อไป) การทำงานจะเป็นแบบเฟสเจือจาง(dilute-phase) ลักษณะของการไหลแบบสตรีมมิ่งจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของช่องว่าง(voidages)

โดยพื้นฐานแล้วลักษณะโครงสร้างของ standpipe แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบบ overflow standpipe และแบบ underflow standpipe ดังแสดงในรูปที่ 2.12a และ 2.12b ตามลำดับ การที่เรียกว่า overflow standpipe ก็เนื่องจากของแข็งจะไหลจากทางด้านบนของฟลูอิด์เบดลงใน standpipe และไม่มีเบดของของแข็งอยู่เหนือ standpipe ในส่วนของ underflow standpipe ของแข็งจะถูกส่งผ่านเข้าสู่ standpipe ทางด้านล่างหรือส่วนล่างของเบดหรือถังเก็บ (hopper) และเบดของของแข็งจะอยู่เหนือ standpipe และจากคำจำกัดความนี้ทำให้ท่อตรงที่ยื่นออกมาทางส่วนล่างของไซโคลน(cyclone dipleg) จัดอยู่ใน standpipe ประเภท overflow standpipe เพราะว่าไม่มีเบดของของแข็งอยู่เหนือทางเข้าของ standpipe



รูปที่ 2.12 ลักษณะของ Standpipe แบบ Overflow และ Underflow<sup>(1)</sup>

### 2.4.2 ระบบป้อนกลับของแข็ง(Solids return systems)

ระบบป้อนกลับจะทำหน้าที่ป้อนของแข็งที่ถูกแยกด้วยไซโคลนแล้วตกผ่าน standpipe กลับเข้าไปในท่อไรเซอร์(riser) ใหม่ ในระบบที่เป็น CFBC ระบบป้อนกลับจะใช้อุปกรณ์ที่เป็น non-mechanical solids flow device ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยก๊าซที่เติมเข้ามาและการออกแบบรูปร่างของอุปกรณ์ที่เป็นสาเหตุให้อนุภาคของแข็งสามารถเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์เหล่านี้ไปได้ โดยข้อดีของ non-mechanical solids flow control devices เมื่อเปรียบเทียบกับ mechanical solids flow devices คือ

- จะไม่มีส่วนที่เป็นกลไกเคลื่อนที่หรือขยับได้ประกอบอยู่ ดังนั้นในอนาคตจะมีประโยชน์สำคัญมากเมื่อต้องปรับเพิ่มอุณหภูมิและความดันของเครื่อง
- มีราคาไม่แพง เนื่องจากเป็นประกอบด้วยท่อ และช่องธรรมชาติ
- สามารถสร้างขึ้นได้เอง ทำให้ประหยัดเวลาที่สูญเสียไปในการจัดซื้อ และขนส่ง พร้อมทั้งใช้เวลาน้อยกว่าในการติดตั้ง หรือแทนที่อุปกรณ์เก่า

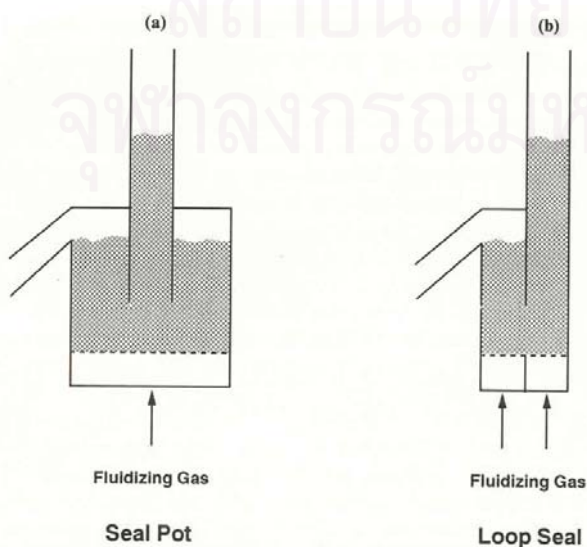
Non-mechanical devices สามารถใช้งานได้สองหมวด คือ

1. หมวดอัตโนมัติ คือ ของแข็งที่ตกลงมาจะถูกส่งผ่านออกไปหมด
2. หมวดวาล์ว คือ สามารถควบคุมอัตราการไหลของอนุภาคของแข็งในระบบ

โดยการทำงานของทั้งสองหมวดจะอธิบายได้ดังนี้

#### 2.4.2.1 หมวดอัตโนมัติ(non-mechanical automatic mode)

Non-mechanical devices ในระบบอัตโนมัติ อุปกรณ์เหล่านี้จะทำหน้าที่ให้ของแข็งไหลผ่านโดยไม่มีการควบคุม และถ้าอัตราการไหลของของแข็งเปลี่ยนแปลง อุปกรณ์จะปรับระดับของแข็งที่สะสมอยู่ในอุปกรณ์โดยอัตโนมัติเพื่อปรับอัตราการไหลของของแข็งให้เข้าสู่สมดุลใหม่ ในระบบ CFB อุปกรณ์ non-mechanical ในหมวดอัตโนมัติที่ใช้กันได้แก่ Seal pot Loop seal วิววาล์ว แอลวาล์ว ซึ่งอธิบายอุปกรณ์แต่ละชนิดดังนี้

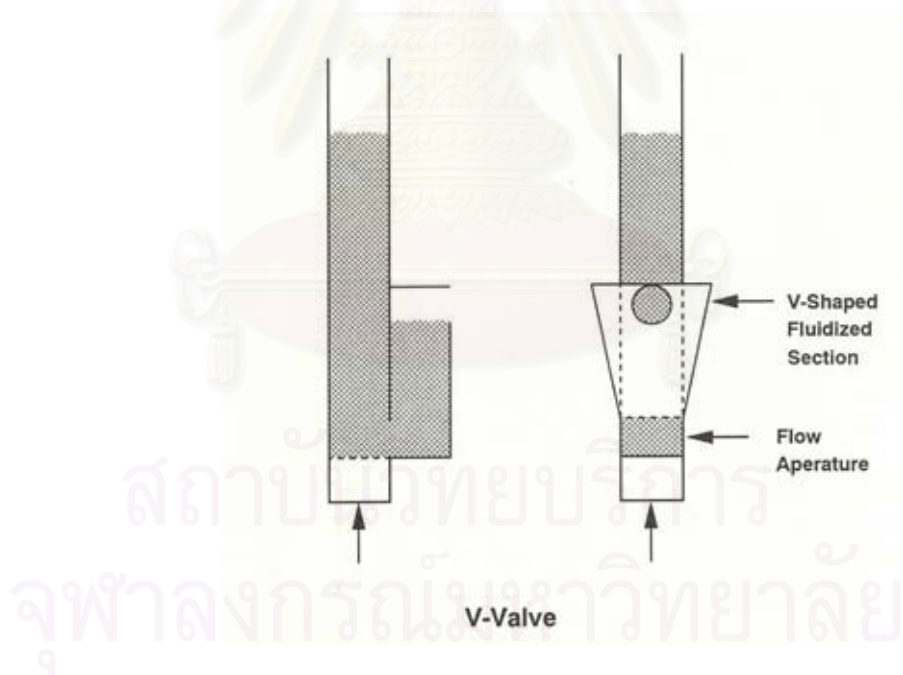


รูปที่ 2.13 ลักษณะของ Seal pot และ Loop seal<sup>(1)</sup>

ก. Seal pot. ในระบบประเภทนี้จะเกิดฟลูอิดไอเซชันด้านนอก(external fluidized bed)ที่ตรง(staight dipleg)ที่ทำหน้าที่ส่งผ่านอนุภาคของแข็งที่ถูกจับโดยไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 2.13a ของแข็งและก๊าซที่มาจากไซโคลนและฟลูอิดไอเซชันก๊าซ(fluidizing gas) จาก Seal pot จะถูกป้อนออกมาทางท่อเอียงทำมุมลงทางด้านบนของ seal pot ย้อนกลับเข้า CFBC

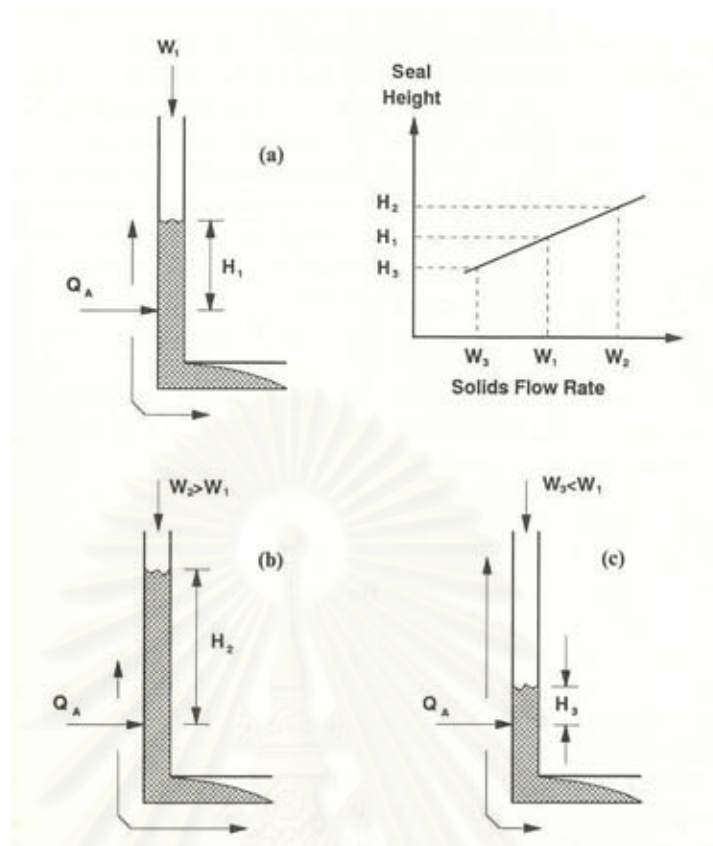
ข. Loop seal แสดงในรูปที่ 2.13b ได้พัฒนามาจาก seal pot โดยประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ ส่วนของท่อตรง(standpipe) และส่วนที่เกิดฟลูอิดไอเซชัน(fluidized-bed section) เหมือน seal pot แต่อย่างไรก็ตามของแข็งจากท่อตรงจะเข้าสู่บริเวณที่เกิดฟลูอิดไอเซชันทางด้านข้าง โดยยอมให้เกิดฟลูอิดไอเซชันได้ในส่วนหนึ่งของเครื่องมือที่มีขนาดเล็ก ผลที่ได้ของการเคลื่อนที่ผ่านส่วนนี้คือต้องการปริมาณก๊าซสำหรับเกิดฟลูอิดไอเซชันต่ำ และให้ประสิทธิภาพสูง

ค. วิวาล์วแสดงในรูปที่ 2.14 มีลักษณะใกล้เคียงกับ loop seal โดยวิวาล์วประกอบด้วยส่วนที่กางออกเป็นมุม(angled diverging section)ซึ่งติดกับ standpipe มีรูวงกลมที่เชื่อมต่อระหว่างส่วนที่กางออกเป็นมุมกับ standpipe เพื่อให้ของแข็งเคลื่อนที่จาก standpipe เข้ามาในส่วนที่กางออกเป็นมุมนี้ได้ ในส่วนของมุมที่กางออกจะมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 องศา ซึ่งในกรณีที่มีมุมที่กว้างกว่านี้จะทำให้การกระจายตัวของของแข็งและก๊าซไม่ราบเรียบ



รูปที่ 2.14 ลักษณะของวิวาล์ว<sup>(1)</sup>

วิวาล์วจะทำงานโดยของแข็งจะเคลื่อนที่จาก standpipe ผ่านรูวงกลมเข้ามาในส่วนที่กางออกเป็นมุม และของแข็งจะไหลขึ้นในส่วนนี้เป็นแบบฟลูอิดไอเซชัน ถ้าของแข็งที่ไหลขึ้นในส่วนนี้ไม่เป็นฟลูอิดไอเซชัน วิวาล์วจะไม่ทำงาน คือไม่มีการเคลื่อนที่ของของแข็งเช่นเดียวกับในกรณีของ loop seal



รูปที่ 2.15 ลักษณะของแวลวาล์วในหมวดอัดโนมิติ<sup>(1)</sup>

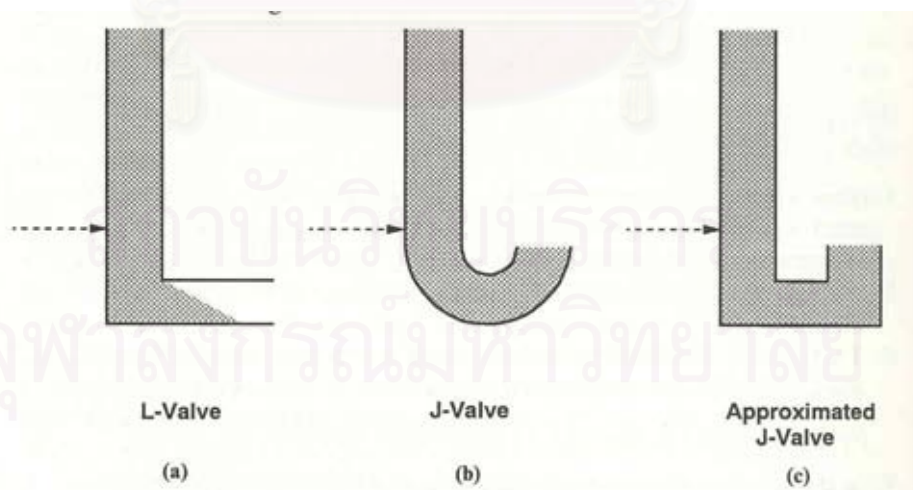
ง. แวลวาล์วแสดงในรูปที่ 2.15 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถใช้ได้ทั้งในหมวดวาล์วและหมวดอัดโนมิติ หมวดอัดโนมิติแสดงการทำงานในรูปที่ 2.15a แสดงหลักการทำงานของแวลวาล์วเมื่อเติมก๊าซเข้ามาที่ตำแหน่งเติมก๊าซของแวลวาล์วด้วยอัตราการคงที่  $Q_A$  ของแข็งเคลื่อนที่ผ่านแวลวาล์วด้วยอัตรา  $W_1$  ของแข็งที่อยู่เหนือตำแหน่งช่องเติมก๊าซจะเคลื่อนที่แบบฟลูอิดซ์ และที่สมดุลมีความสูง  $H_1$  ถ้าของแข็งเข้ามาใน standpipe ที่อยู่เหนือแวลวาล์วด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นจาก  $W_1$  ไปเป็น  $W_2$  แสดงในรูปที่ 2.15b จะทำให้ระดับของแข็งใน standpipe เริ่มเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการป้อนของแข็งเข้ามายังแวลวาล์วเร็วกว่าการป้อนของแข็งออกจากแวลวาล์ว และการที่ของแข็งใน standpipe มีระดับสูงขึ้นจะเป็นเหตุให้ความดันที่ตำแหน่งช่องเติมก๊าซสูงขึ้น และสัดส่วนของปริมาณก๊าซที่เคลื่อนที่ลงผ่านแวลวาล์วมีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ผ่านแวลวาล์วได้มากขึ้น และถ้าปริมาณก๊าซที่เติมเข้ามาที่มีปริมาณมากพอจะทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลใหม่ เนื่องจากจะทำให้มีสัดส่วนของปริมาณก๊าซที่เคลื่อนที่ลงผ่านแวลวาล์วมีค่ามากพอที่จะทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ออกจากแวลวาล์วด้วยอัตรา  $W_2$  ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราการไหลของของแข็งที่เข้า standpipe ที่อยู่เหนือแวลวาล์ว และระดับความสูงของของแข็งที่อยู่เหนือตำแหน่งช่องเติมก๊าซเพิ่มขึ้นเป็น  $H_2$  ส่วนในกรณีที่อัตราการไหลของของแข็งเข้ามาใน standpipe ลดลงจาก  $W_1$  ไปเป็น  $W_3$  ดังแสดงในรูปที่ 2.15c ระดับของแข็งที่อยู่เหนือช่องเติมก๊าซของแวลวาล์วจะต่ำลง ทำให้ความ

ตันที่ตำแหน่งช่องเติมก๊าซ และสัดส่วนของปริมาณก๊าซที่ไหลลงผ่านแวลวาล์วลดลง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ของแข็งมีอัตราการไหลออกจากแวลวาล์วลดลง สมดุลของระบบจะเปลี่ยนไปเป็นอัตราการไหลของของแข็งผ่านแวลวาล์วเท่ากับ  $W_3$  และระดับความสูงของของแข็งเหนือตำแหน่งช่องเติมก๊าซของแวลวาล์วเป็น  $H_3$

#### 2.4.2.2 หมวดวาล์ว(Non-mechanical valve mode)

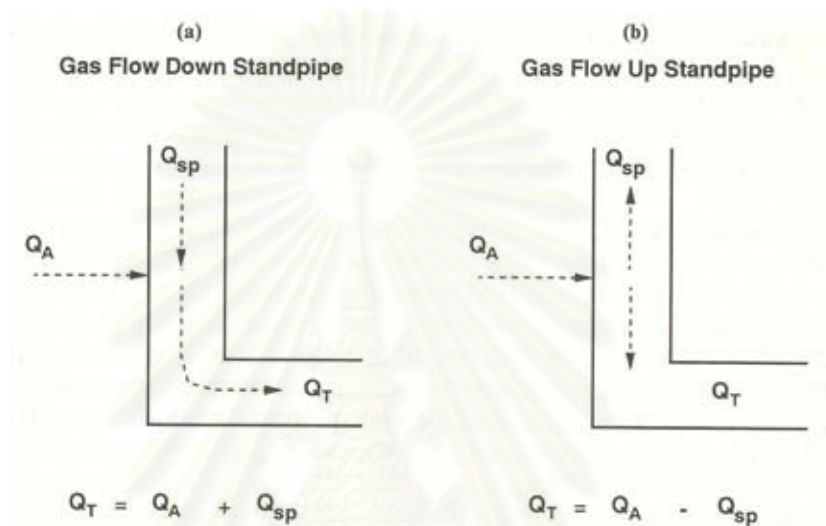
การทำงานในหมวดของวาล์ว กล่าวคือ อนุภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ผ่านวาล์วจะถูกควบคุมโดยปริมาณก๊าซที่เติมเข้าไปที่วาล์ว ประเภทของ Non-mechanical valve mode ที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ แวลวาล์วและเจวาล์ว(J-valve) โดยอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2.16 ข้อแตกต่างระหว่างอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้ที่สังเกตเห็นได้ คือ รูปร่างลักษณะของอุปกรณ์ และทิศทางที่ป้อนของแข็งออกจากอุปกรณ์ ส่วนหลักการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้เหมือนกัน แต่ในความเป็นจริงการสร้างอุปกรณ์ประเภทเจวาล์วทำได้ยาก ทั้งนี้เนื่องจากไม่สามารถทำให้ท่อขนาดใหญ่มีความโค้ง 180 องศา โดยที่ยังคงราบเรียบ เพราะฉะนั้น เจวาล์วอาจสร้างโดยอาศัยรูปทรงแบบเรขาคณิตต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.16c และให้ชื่อว่า Approximated J-valve

แวลวาล์วเป็นอุปกรณ์ประเภท Non-mechanical valve ที่นิยมใช้กันมากที่สุด(การที่มีชื่อว่า แวลวาล์วก็เนื่องมาจากที่อุปกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะโครงสร้างเหมือนตัวอักษร L) เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่สร้างง่ายและมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเจวาล์วเพียงเล็กน้อย (Knowlton และคณะได้ศึกษาไว้ในปี ค.ศ. 1981<sup>(1)</sup>) และเนื่องจากหลักการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสองเป็นประเภท Non-mechanical valve เหมือนกัน ดังนั้นจึงอธิบายในกรณีของแวลวาล์ว



รูปที่ 2.16 ลักษณะอุปกรณ์ในหมวดวาล์ว<sup>(1)</sup>

ของแข็งจะไหลผ่าน Non-mechanical valve โดยอาศัยแรงดึง (drag force) ที่เกิดขึ้นบนอนุภาคของของแข็งอันเนื่องมาจากก๊าซที่เติมเข้ามา ซึ่งเมื่อเติมก๊าซเข้ามาใน Non-mechanical valve ก๊าซจะไหลลงผ่านอนุภาคและส่วนโค้งของ Non-mechanical valve ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างก๊าซและของแข็งจะทำให้เกิด frictional drag force ขึ้นบนอนุภาคในทิศทางที่ไหล และเมื่อ drag force มีค่ามากกว่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของของแข็งผ่านส่วนโค้ง ของแข็งก็จะสามารถไหลผ่านวาล์วไปได้



รูปที่ 2.17 ลักษณะการไหลของก๊าซผ่านส่วนโค้งของแอลวาล์ว<sup>(1)</sup>

ปริมาณก๊าซที่ใช้จริงที่ทำให้ของแข็งเคลื่อนผ่านแอลวาล์วไม่ใช่เป็นปริมาณที่ก๊าซเติมเข้ามาซึ่งปริมาณก๊าซที่ใช้จริงนี้แยกออกได้เป็นสองกรณี คือ กรณีแรกก๊าซเคลื่อนที่ลงผ่านเบดนิ่งที่กำลังเคลื่อนที่ (moving packed-bed) ลงใน standpipe ดังนั้น ปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านส่วนโค้งของแอลวาล์ว ( $Q_T$ ) จะมีค่าเท่ากับผลรวมของปริมาณก๊าซที่มาจาก standpipe ( $Q_{sp}$ ) กับปริมาณก๊าซที่เติมเข้ามา ( $Q_A$ ) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.17a ส่วนกรณีที่สองก๊าซจะไหลขึ้นใน standpipe ดังนั้น ปริมาณก๊าซที่ไหลผ่านส่วนโค้งของแอลวาล์ว ( $Q_T$ ) จะมีค่าเท่ากับผลต่างของปริมาณปริมาณก๊าซที่เติมเข้ามา ( $Q_A$ ) กับก๊าซที่มาจาก standpipe ( $Q_{sp}$ ) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.17b

เมื่อเติมก๊าซเข้ามาใน non-mechanical valve ของแข็งยังไม่ไหลทันที เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เติมเข้ามาในตอนแรกไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิด frictional force ที่มากพอจะทำให้ของแข็งเริ่มเคลื่อนที่ เพราะการที่จะให้ของแข็งเริ่มเคลื่อนที่ที่จะต้องใช้ปริมาณก๊าซที่มากพอ

Non-mechanical valves จะทำงานได้ดีกับอนุภาคที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 100 ถึง 5000 ไมครอน ซึ่งเป็นอนุภาคที่อยู่ในกลุ่ม B และ D ของการจำแนกด้วยวิธีของ Geldart อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 2000 ไมครอน จะต้องการปริมาณก๊าซที่ตำแหน่งเติมก๊าซมากขึ้นเพื่อทำให้เกิด

drag force ทั้งนี้เนื่องมาจาก เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคกับก๊าซในการเกิด drag force น้อยลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ปริมาณก๊าซมากขึ้นเพื่อเพิ่ม drag force ทำให้อนุภาคไหลผ่าน non-mechanical valve ได้ และในกรณีที่ผสมอนุภาคขนาดเล็กเข้ามา จะทำให้อนุภาคขนาดเล็กเข้ามาแทรกตัวอยู่บริเวณช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้สัดส่วนช่องว่างลดลง เพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอนุภาคกับก๊าซ ดังนั้นจะทำให้ drag force สูงขึ้นเมื่อให้ก๊าซเข้ามา การไหลของอนุภาคของแข็งผ่าน non-mechanical valve ดีขึ้น

โดยทั่วไป ของแข็งกลุ่ม A ของการจำแนกด้วยวิธีของ Geldart (มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ระหว่างประมาณ 30 ถึง 100 ไมครอน) จะไม่เหมาะสมกับการใช้งานในแอลวาล์ว เนื่องจากอนุภาคในกลุ่ม A จะรักษาก๊าซในช่องว่างไว้ทำให้ยังคงเป็นฟลูอิดอยู่ ดังนั้นเมื่ออนุภาคในกลุ่ม A ไหลผ่านแอลวาล์วจะทำให้การไหลเป็นลักษณะเหมือนน้ำ แอลวาล์วจึงไม่สามารถควบคุมปริมาณของแข็งได้

ในกลุ่ม C ของการจำแนกด้วยวิธีของ Geldart (มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยน้อยกว่า 30 ไมครอน) ในกลุ่มนี้จะมีแรงกระทำระหว่างอนุภาคสูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้จับตัวกันเป็นก้อน อนุภาคไม่สามารถไหลได้ในท่อ ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในแอลวาล์ว

ดังนั้น non-mechanical valve จึงนิยมใช้งานในระบบ CFBC เนื่องจากในระบบ CFBC จะใช้อนุภาคในกลุ่ม B และไม่เหมาะที่จะใช้ในระบบ FCC เนื่องจากอนุภาคในระบบ FCC จะเป็นอนุภาคในกลุ่ม A

### 2.4.3 ระบบป้อนกลับของแข็งใน CFBC

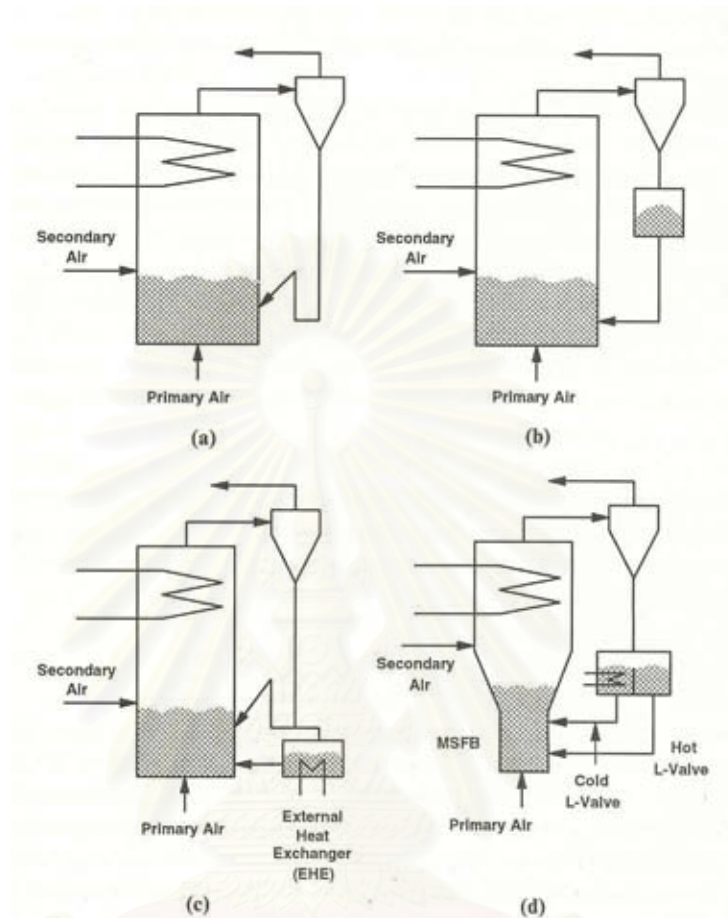
#### 2.4.3.1 หมวดอัดโนมตี

ชนิดพื้นฐานของระบบป้อนกลับที่นำมาใช้ใน CFBCs แสดงในรูปที่ 2.18a โดยชนิดของระบบป้อนกลับนี้ ถ้ำ หินปูน และถ่านหิน จะผสมกันใน CFBC ต่อมาถูกแยกด้วยไซโคลน และไหลลงสู่ Overflow standpipe ของแข็งจะผ่าน standpipe ไปจนกระทั่งถึง Loop seal (บางครั้งเรียกว่า J-valve, fluoseal, or siphon seal) และจะไหลย้อนกลับไปใน CFBC ในการออกแบบระบบป้อนกลับชนิดนี้ ของแข็งที่ถูกแยกโดยไซโคลนจะไหลผ่านช่องทางของ loop seal ไปสู่เบดโดยอัดโนมตี ทั้งนี้เพราะ loop seal ไม่ใช่วาล์ว(loop seal ไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลของของแข็งได้) แต่เป็นเครื่องมือที่จะทำหน้าที่ป้อนของแข็งกลับเข้าไปเข้าไปในเบดด้วยอัตราที่เท่ากับที่เข้ามาใน standpipe จึงกล่าวได้ว่าเป็นแบบอัดโนมตี

Lurgi<sup>(1)</sup> ได้ทำการปรับปรุงแบบของระบบป้อนกลับ โดยเพิ่มการแลกเปลี่ยนความร้อนกับภายนอก external heat exchanger(EHE) ในระบบป้อนกลับเพื่อช่วยถ่ายโอนความร้อน(heat removal)ดังแสดงในรูปที่ 2.18c ขดลวดหล่อเย็นจะใส่อยู่ในส่วนที่เกิดฟลูอิดเบด ซึ่งของแข็งที่



มาจาก standpipe ผ่านมายังส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ จะถูกทำให้เย็นและย้อนกลับเข้าไปในเบตใหม่อีกครั้ง คุณสมบัติของปฏิกิริยาจะสูงพอสมควรเพื่อให้เกิดการหล่อเย็น



รูปที่ 2.18 ชนิดพื้นฐานของระบบป้อนกลับของแข็งใน CFBC<sup>(1)</sup>

ในกรณีของระบบป้อนกลับชนิดนี้ ตำแหน่งด้านล่างของ standpipe จะเป็นตำแหน่งที่มีความดันสูงสุด ซึ่งผลรวมของความดันตกคร่อมส่วนของที่ช่องแข็งเคลื่อนที่ขึ้น loop seal ( $\Delta P_{ls}$ ) ความดันตกคร่อมไรเซอร์ ( $\Delta P_{riser}$ ) ความดันตกคร่อมไซโคลน ( $\Delta P_{cy}$ ) จะเท่ากับความดันตกคร่อม standpipe ( $\Delta P_{sp}$ )

$$\Delta P_{ls} + \Delta P_{riser} + \Delta P_{cy} = \Delta P_{sp} \quad (2.23)$$

สมการที่แสดงข้างต้น เมื่อความดันตกคร่อมในส่วนที่เป็นอิสระของวงจรเพิ่มขึ้นหรือลดลง ความดันตกคร่อมในส่วนของ overflow standpipe จะปรับเปลี่ยนให้ระดับของของแข็งที่เกิดฟลูอิดไซใน standpipe เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามลำดับด้วย

### 2.4.3.2 หมวดวาล์วควบคุม

ข้อแตกต่างของระบบป้อนกลับนี้กับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น คือ อัตราการป้อนกลับของของแข็งกลับเข้าไปยัง CFBC จะไม่เป็นแบบอัดโนมิติ แต่สามารถควบคุมได้ ซึ่งแบบที่นิยมใช้กันแสดงในรูปที่ 2.18b ในระบบนี้ ของแข็งจากไซโคลนจะผ่านเข้าสู่ surge vessel และ ผ่าน underflow standpipe และ แอลวาล์ว ก่อนถูกป้อนกลับเข้าไปใน CFBC ในกรณีนี้วงจรป้อนกลับจะแตกต่างจากรูปที่ 2.18a และ 2.18c ดังนี้

- standpipe จะเป็นแบบ underflow standpipe ไม่ใช่แบบ overflow standpipe
- การทำงานใน standpipe จะเป็นการไหลแบบเบดนิ่ง (packed-bed flow) ไม่ใช่เป็นการไหลแบบฟลูอิดิซด์เบด (fluidized-bed flow) และ
- ของแข็งในวงจรป้อนกลับสามารถควบคุมอัตราการป้อนกลับเข้าสู่ CFBC ได้โดยใช้แอลวาล์ว ซึ่งไม่เป็นการป้อนกลับแบบอัดโนมิติดังเช่น loop seal

ในกรณีนี้คุณสมบัติใน CFBC สามารถควบคุมได้โดยปริมาณของของแข็งที่ย้อนกลับเข้าไปในฟลูอิดิซด์เบดโดยผ่านทางแอลวาล์ว

สำหรับในระบบป้อนกลับประเภทนี้ ที่ตำแหน่งช่องเติมก๊าซของแอลวาล์วจะมีความดันสูงสุด และ

$$\Delta P_{L\text{-valve}} + \Delta P_{\text{riser}} + \Delta P_{\text{cy}} = \Delta P_{\text{sp}} + \Delta P_{\text{surg}} \quad (2.24)$$

ความดันตกคร่อม surge vessel จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมมูลความดันจึงเขียนใหม่ได้เป็น

$$\Delta P_{L\text{-valve}} + \Delta P_{\text{riser}} + \Delta P_{\text{cy}} = \Delta P_{\text{sp}} \quad (2.25)$$

ในระบบป้อนกลับประเภทนี้ การเปลี่ยนแปลงของความดันตกคร่อม return leg เป็นผลเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วสัมพัทธ์ (relative velocity) ใน underflow standpipe ถ้า  $\Delta P/L$  ใน standpipe มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึง minimum fluidization ( $\Delta P/L_{\text{mf}}$ ) standpipe จะไม่สามารถรองรับที่ความดันตกคร่อมสูงกว่านี้ได้ และจะเป็นขอบเขตสูงสุดของอัตราการไหลของของแข็งในระบบ

ระบบป้อนกลับอีกชนิดหนึ่งถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Batelle<sup>(1)</sup> แสดงในรูปที่ 2.18d ในระบบนี้ของแข็งที่ถูกแยกโดยไซโคลนจะไหลลงมาในส่วนของฟลูอิดิซด์เบดที่ถูกแยกออกเป็นสองส่วน โดยทางด้านหนึ่งจะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ลดคุณสมบัติของเบด ขณะที่อีกส่วนหนึ่งเบดยังคงมีคุณสมบัติสูงอยู่ และอัตราการไหลย้อนกลับเข้า CFBC ของของแข็งทั้งคุณสมบัติสูงและคุณสมบัติต่ำจะถูกควบคุมโดย underflow standpipe และ แอลวาล์ว ซึ่งชนิดของระบบป้อนกลับนี้จะคล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 2.18b คือในส่วนของ standpipe ในวงจรป้อนกลับจะเป็นแบบ underflow standpipe แต่อย่างไรก็ตามก็มีบางอย่างที่แตกต่างกันคือในเรื่องของสมมูลความดันตกคร่อม ซึ่งมีสาเหตุมาจาก

surge vessel ในระบบนี้จะเป็นฟลูอิดไดซ์ แต่ในระบบที่แสดงในรูปที่ 2.18b ไม่เป็นฟลูอิดไดซ์ เพราะฉะนั้นความดันตกคร่อม surge vessel ในระบบนี้จึงไม่สามารถตัดทิ้งได้ และสมมูลความดันตกคร่อมของระบบจะเป็น

$$\Delta P_{L\text{-valve}} + \Delta P_{\text{riser}} + \Delta P_{\text{cy}} = \Delta P_{\text{sp}} + \Delta P_{\text{surg}} \quad (2.26)$$

สิ่งสำคัญที่ต้องระมัดระวังในการใช้งานในระบบป้อนกลับนี้ คือ ต้องให้ระดับความสูงของฟลูอิดไดซ์ใน surge vessel ไม่สูงเกินไป เพราะถ้าสูงเกินไปจะทำให้ความดันในส่วนนี้สูงขึ้นด้วย และความดันจะกระจายไปในส่วนของแอลวาล์ว โรเซออร์ และไซโคลน ซึ่งจะส่งผลให้ความดันตกคร่อมในส่วน of standpipe มีค่าเป็นลบ นั้นหมายความว่าก๊าซจะไหลผ่านลงมาใน standpipe ด้วยความเร็วสูงกว่าความเร็วของของแข็งมาก และถ้าความเร็วก๊าซสูงพอที่จะทำให้ของแข็งเคลื่อนที่ผ่านส่วนของเครื่องสร้างเครื่องได้ แอลวาล์วจะไม่สามารถหยุดการไหลของของแข็งได้ ซึ่งในกรณีนี้แอลวาล์วไม่ใช่สาเหตุที่ทำให้ระบบไม่สามารถหยุดได้ แต่สาเหตุของกรณีมาจากการออกแบบระบบที่ไม่ดี

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup> ศึกษาแอลวาล์วใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลกลับของของแข็งเข้าโรเซออร์(solid discharge flux) โดยงานวิจัยนี้จะดำเนินการภายใต้ภาวะการทดลองที่ต่างกันของของแข็ง 5 แบบ คือ ทราย 3 แบบ FCC(Fluid Catalytic Cracking) และ Magnetite อีกอย่างละแบบ ของแข็งทั้ง 5 แบบนี้จัดอยู่ในกลุ่ม A และ B ของการจำแนกด้วยวิธี Geldart's classification ซึ่งจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของขนาดและความหนาแน่นของของแข็งที่มีต่อพฤติกรรมของแอลวาล์วสำหรับของแข็งแต่ละชนิดจะประมาณช่วงการใช้งานโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณก๊าซที่ให้กับแอลวาล์วแล้ววัดอัตราการไหลของของแข็ง(solid flow rate)ที่ผ่านวาล์ว การทำสมมูล static pressure รอบๆ ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ก็เพื่อประมาณภาวะในการทดลอง และนำเอาข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้พร้อมทั้งข้อมูลที่เคยมีผู้ศึกษามาก่อนมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแอลวาล์วกับอัตราการไหลกลับของของแข็งเข้าโรเซออร์ ซึ่งผลที่ได้คือ เมื่อขนาดของของแข็งเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้องการก๊าซที่แอลวาล์วสูงขึ้น ช่วงความสามารถในการทำงานลดลง และความดันตกคร่อมแอลวาล์วจะไม่สามารถระบุได้ถ้าเป็นของแข็งละเอียด ถ้าเป็นของแข็งหยาบจะทำให้ความดันตกคร่อมแอลวาล์วลดลง ส่วนกรณีที่ของแข็งมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจะทำให้ความต้องการก๊าซที่แอลวาล์วสูงขึ้น ช่วงความสามารถในการทำงานลดลง และความดันตกคร่อมแอลวาล์วจะเพิ่มขึ้น ส่วนความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองพบว่าเป็นที่ยอมรับได้ในช่วง  $\pm 20\%$  และเมื่อนำ

ไปเปรียบเทียบกับผลของงานวิจัยอื่น พบว่าอยู่ในช่วง  $\pm 20\%$  เช่นเดียวกันยกเว้นกรณีของงานวิจัยที่ใช้อนุภาคของแข็งเป็น resin

Kunii D, Levenspiel O<sup>(5)</sup> ทำการวิจัยเรื่อง Circulating fluidized-bed reactors ซึ่งงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาอัตราการไหลของก๊าซและทำการลดรูป Model ที่ใช้แทนกระบวนการ CFB โดยศึกษาในช่วง turbulent ช่วง fast fluidized และ pneumatic transport ของ CFB การสร้าง Model จะอาศัยการทำสมมูลมวล และในตอนท้ายของงานวิจัยนี้ยังได้ทำการแสดงสมการการเปลี่ยนแปลงสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง solid-catalyzed gas-phase reactions

Pham H.L. และ Bhattacharya S.C.<sup>(6)</sup> ศึกษาอัตราการไหลย้อนกลับของอนุภาคใน CFB ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้โรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m. และมีความสูง 4.5 m. อนุภาคที่ใช้คือทรายมีขนาด 200 400 และ 500 ไมครอน อัตราการไหลของอนุภาคในโรเตอร์มีค่าระหว่าง 1400-2000 l/min และน้ำหนักของทรายจะมีค่าระหว่าง 15-25 kg. อัตราการไหลย้อนกลับหาได้จากการวัดความเร็วของทรายที่ผ่าน Perspex tube ซึ่งเป็นส่วนล่างของท่อป้อนกลับ จากการทดลองพบว่าทรายขนาด 200 ไมครอน อัตราการไหลย้อนกลับมีค่า 2.8-12.3 kg/m<sup>2</sup>s ทรายขนาด 400 ไมครอน อัตราการไหลย้อนกลับ 0.07-9.1 kg/m<sup>2</sup>s และทรายขนาด 500 ไมครอน อัตราการไหลย้อนกลับมีค่า 0.12-2.23 kg/m<sup>2</sup>s ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ว่า อัตราการไหลย้อนกลับของอนุภาคเป็นฟังก์ชันกับอัตราการไหลในท่อโรเตอร์ อัตราการไหลของก๊าซ รวมทั้งขนาดและน้ำหนักของอนุภาคที่ใช้ด้วย และในการวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการวางตัวของแอลวาล์ว 3 แบบ คือ ในมุม -10 องศา 0 องศา และ +10 องศา กับแนวแกนนอนของโรเตอร์ พบว่า การวางตัวของแอลวาล์วในมุม +10 องศา 0 องศา และ -10 องศา กับแนวแกนนอนของโรเตอร์ จะให้อัตราการไหลย้อนกลับของอนุภาคลดลงตามลำดับ

Geldart D. และ Jones P.<sup>(7)</sup> ศึกษาพฤติกรรมของแอลวาล์ว โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ของแข็ง ซึ่งเป็นทรายที่มีสมบัติทางกายภาพต่างกัน 3 ชนิด แต่จัดอยู่ในกลุ่ม B ของการจำแนกด้วยวิธีของ Geldart เหมือนกัน เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแอลวาล์ว 3 ขนาด คือ 40 70 และ 100 มม. รัศมีความโค้งของแอลวาล์ว 2 แบบ จำนวนตำแหน่งช่องเติมอากาศ 1 และ 3 ตำแหน่ง และความลาดเอียงของ horizontal section 4 ค่า โดยในระบบนี้ที่ตำแหน่ง feed hopper และตำแหน่งป้อนของแข็งออกเป็นที่ความดันบรรยากาศทั้งคู่ ค่าสูงสุดของฟลักซ์ของของแข็งหาได้โดยอาศัยการคำนวณจากความสัมพันธ์ในการป้อนของ hopper และได้เป็นในช่วง 600 - 1200 kg/m<sup>2</sup>s ส่วนค่าต่ำสุดของก๊าซที่เติมเข้ามาในตำแหน่งช่องเติมก๊าซ (minimum aeration gas) หาได้โดยอาศัยค่าความเร็วเริ่มต้นในการเกิดฟลูอิดเซชันของอนุภาคของแข็ง จากความสัมพันธ์ร่วมระหว่างอัตราการไหลของก๊าซผ่านช่องเติมก๊าซ และความดันตกคร่อมแอลวาล์วสามารถคำนวณฟลักซ์ของของแข็งได้

Daous M.A. และ Al-Zahrani A.A. <sup>(8)</sup> ได้จัดโปรแกรมการทดลองขึ้นเพื่อนำไปศึกษาการไหลของอนุภาคของแข็งกับก๊าซผ่านแวลวาล์ว โดยอนุภาคของแข็งที่ศึกษาจะมีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาด ส่วนแวลวาล์วที่ใช้มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน 3 ขนาด (25 36 และ 50 มม.) และความยาวต่างกัน 2 ขนาด (170 และ 290 มม.) สำหรับเครื่องมือประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ถังป้อน (feed hopper) ท่อ Down-comer และแวลวาล์วในส่วนของทั้งถังป้อนและทางออกของแข็งของแวลวาล์วจะเป็นที่ความดันบรรยากาศ สมการทางคณิตศาสตร์อาศัยพื้นฐานของ modified Ergun equation ที่เขียนไว้สำหรับการเคลื่อนที่ของเบดในท่อ Down-comer และ horizontal section ของแวลวาล์วสามารถนำมาทำนายค่า superficial gas velocity ในส่วนทั้งสองได้ที่ทุกภาวะในการทำงานของแวลวาล์ว และความสัมพันธ์ที่ได้จาก external aeration และความดันตกคร่อมแวลวาล์วสามารถนำมาทำนายหาค่าอัตราการไหลของของแข็งได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

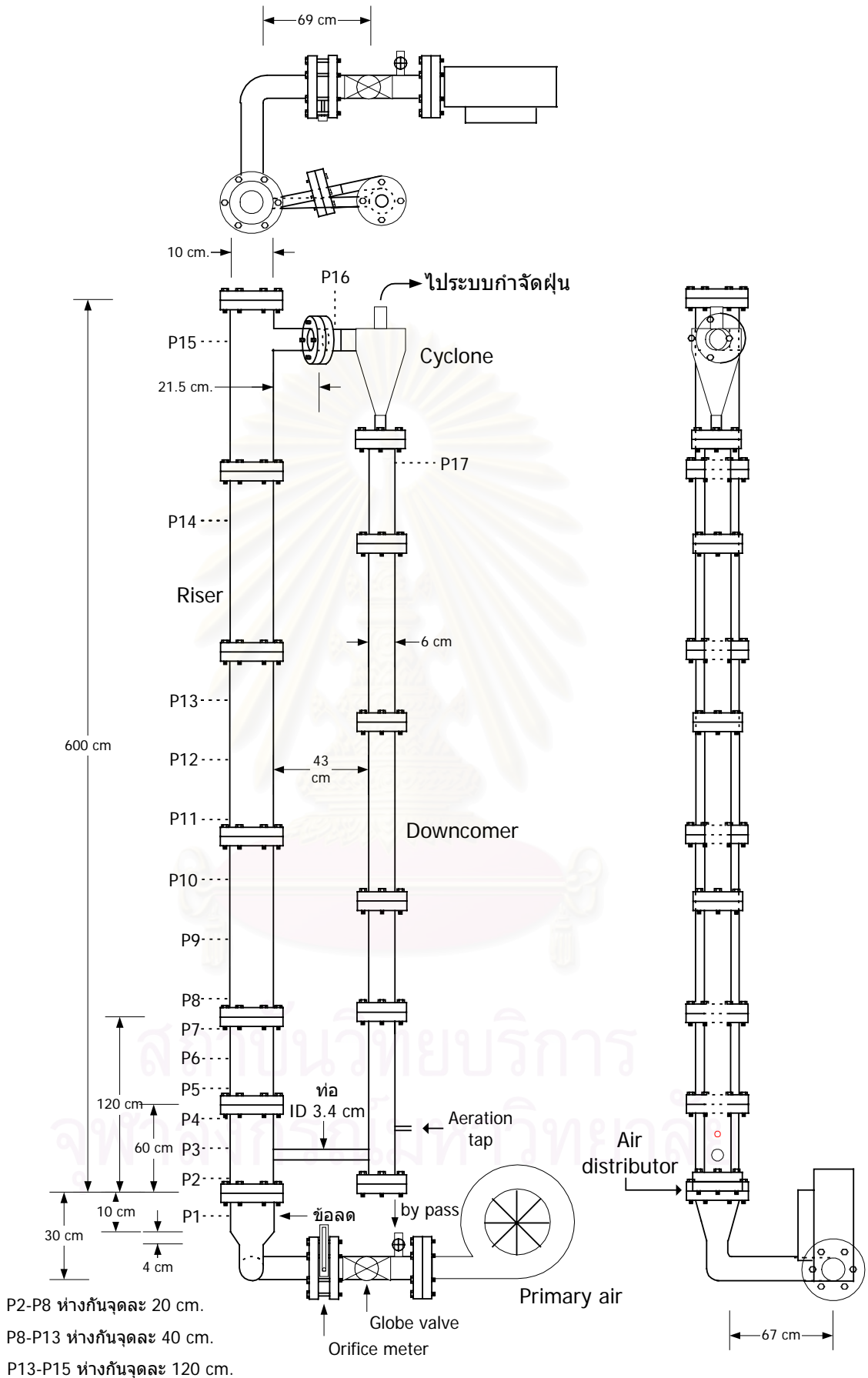
### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

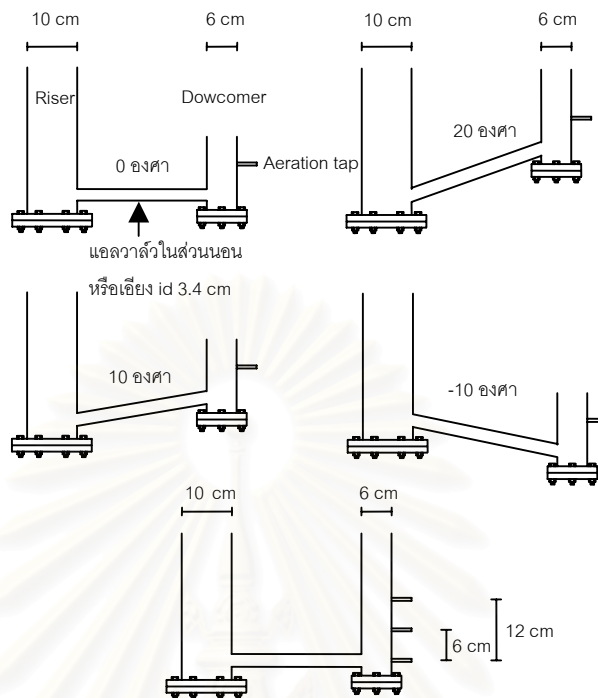
##### 3.1.1 เครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน(CFB)

เครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- 1) ท่อไรเซอร์(Riser) ทำจากท่ออะคริลิกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 ซม. สูง 6 ม. ความหนา 5 มม. ติดตั้งมาอมิเตอร์น้ำ 14 จุดตลอดความสูงของท่อ
- 2) ระบบป้อนกลับของแข็ง
  - ท่อ Downcomer ทำจากอะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 ซม. หนา 5 มม. เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างไซโคลนกับแอลวาล์ว
  - แอลวาล์ว แสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.2 ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นท่อตรงตามแนวดิ่ง และส่วนที่สองเป็นท่อนอนหรือท่อเอียง มีความยาวของท่อนอน 43 ซม. เครื่อง CFB นี้สามารถถอนเปลี่ยนมุมแอลวาล์วได้ 4 มุม คือ มุม 0 10 20 และ -10 องศาจากแนวระดับ และที่มุม 0 สามารถปรับตำแหน่งช่องเติมก๊าซได้ 3 ตำแหน่ง คือที่ 0 6 และ 12 ซม. โดยอ้างอิงจากจุดศูนย์กลางท่อทางออก Downcomer
- 3) ไซโคลน(Cyclone) ทำจาก stainless steel แสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.3
- 4) ตัวกระจายอากาศ(air distributor) ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ เป็นแบบแผ่นตะแกรงแผ่นเดี่ยว(single perforated plate) ความละเอียด 60 mesh
- 5) เครื่องเป่าอากาศ(Blower) สำหรับให้อากาศปฐมภูมิ(Primary air) แสดงในรูปที่ 3.4 ใช้มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 4 กิโลวัตต์ ไบพาสเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 ซม.
- 6) เครื่องอัดอากาศ(Air compressor) สำหรับให้อากาศที่ช่องเติมอากาศ(Aeration air) แสดงในรูปที่ 3.5 ใช้มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 0.38 กิโลวัตต์ ลูกสูบมี Bore 51 ม.ม. และ Stroke 42 ม.ม. ความเร็วรอบ 515 รอบต่อนาทีที่ความถี่ 50 Hz และ 620 รอบต่อนาทีที่ความถี่ 60 Hz ขนาดถังเส้นผ่านศูนย์กลางคูณความยาวเป็น 325x970 มม. ความจุถัง 76 ลิตร ความดันที่ใช้งาน 7 กก.ต่อ ตร.ม. และความดันสูงสุด 10 กก.ต่อ ตร.ม.

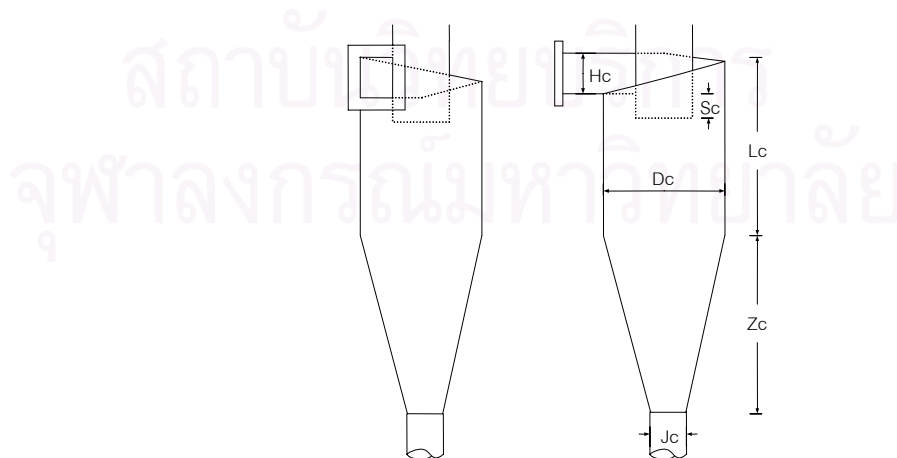
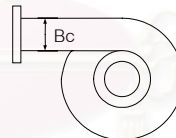


รูปที่ 3.1 แบบเครื่อง CFB ที่ใช้ในงานวิจัย



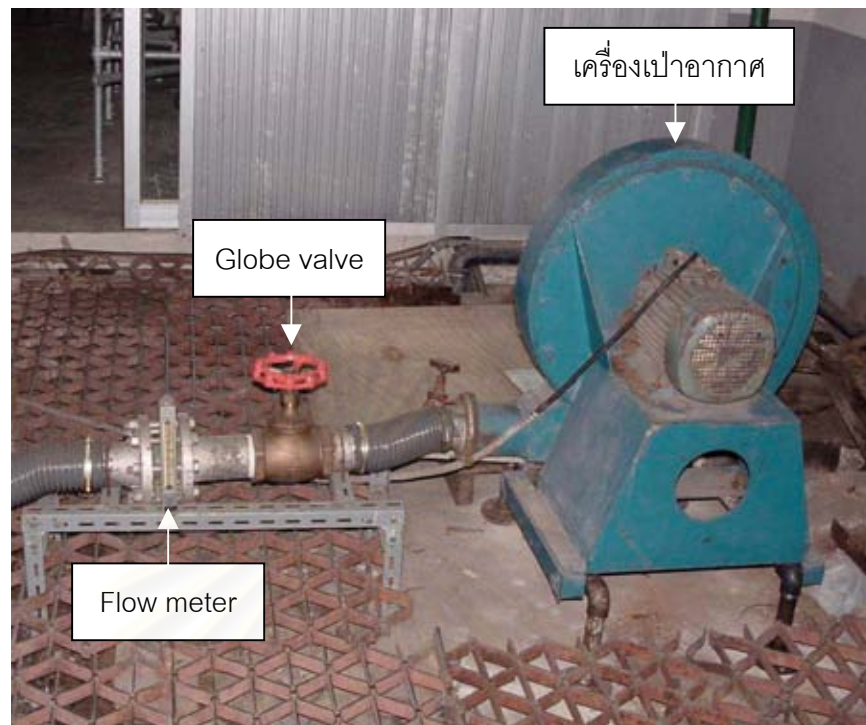
รูปที่ 3.2 ลักษณะต่างๆ ของแอลวาล์ว สำหรับใช้ในการวิจัย

$B_c = D_c/4$      $D_e = D_c/2$   
 $H_c = D_c/2$      $L_c = 2xD_c$   
 $Sc = D_c/8$      $Z_c = 2xD_c$   
 $J_c = \text{arbitrary, usually}$   
 true size of  $D_c = 16 \text{ cm}$



รูปที่ 3.3 แบบไซโคลน สำหรับใช้ในการวิจัย





รูปที่ 3.4 เครื่องเป่าอากาศ Globe valve และ flow meter



รูปที่ 3.5 เครื่องอัดอากาศ

นอกจากส่วนประกอบต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เครื่อง CFB ยังต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ควบคุมในส่วนต่างๆ ด้วยดังนี้

- อุปกรณ์ควบคุม

- 1 อุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ(Primary air) สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ Globe valve เป็นอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 Globe valve ที่ใช้เป็นวาล์วของเหล็กขนาด 3 นิ้ว
- 2 อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ (Aeration air) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เป็นอุปกรณ์ของบริษัท Dwyer รุ่น VFB68 ทำหน้าที่ควบคุมและวัดปริมาณอากาศ โดยการควบคุมจะใช้วาล์วเข็ม(needle valve) ส่วนการวัดจะใช้ระบบลูกลอย ที่มีลูกลอยทรงกลมทำจาก stainless steel วัดค่าได้ในช่วง 3-30 ลิตรต่ออนาที ความแม่นยำ 3% เต็มสเกล

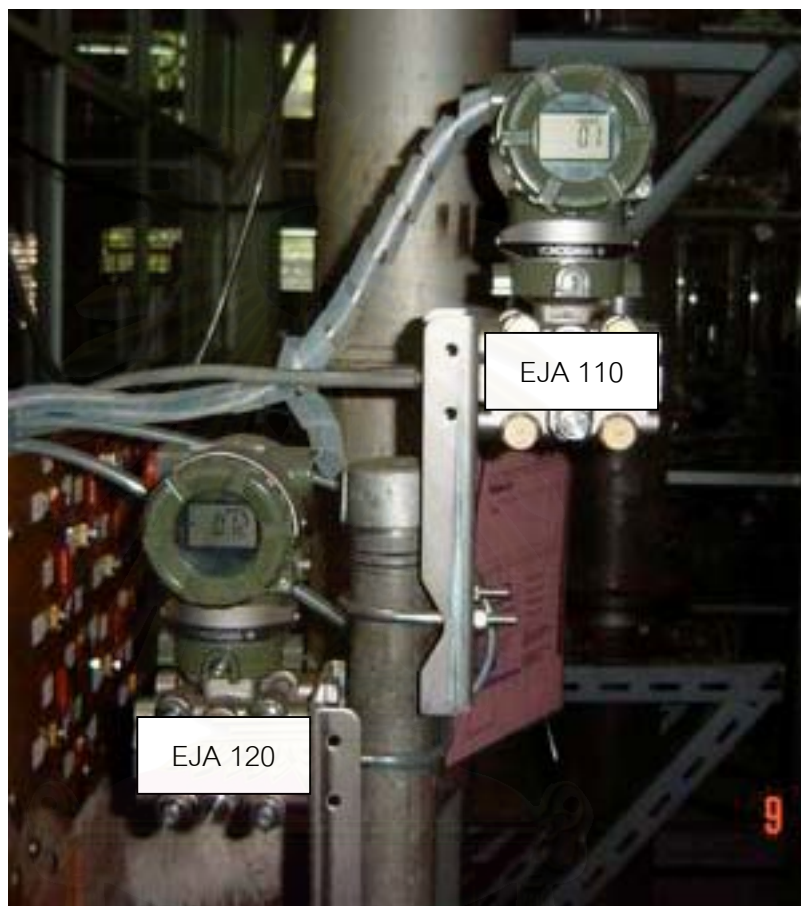


รูปที่ 3.6 อุปกรณ์วัดและควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ

- อุปกรณ์วัด

- 1 flow meter ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของอากาศปฐมภูมิ เป็น flow meter ชนิด orifice วัดค่าได้ระหว่าง 50 – 400 ลบ.ม.ต่อ ชม. ความแม่นยำ 5% เต็มสเกล
- 2 flow meter แบบ Rotameter สำหรับวัดค่าอัตราการไหลของอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศในทดลองตอนที่ 1 เป็นอุปกรณ์วัดที่อ่านค่าออกมาเป็น % ดังนั้นจึงต้องทำการ calibrate ก่อน ซึ่งวิธีการและผลการทำ calibrate แสดงในภาคผนวก ก

- 3 Differential Pressure Transmitter(DPT) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดความดันต่างระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่ง โดยงานวิจัยนี้จะใช้ DPT 2 ตัว คือ Yokogawa รุ่น EJA110 Style:S2 และรุ่น EJA120 Style:S2 มีช่วงการวัด 0-600 และ 0-100 มม.น้ำ ความแม่นยำ 0.3% และ 0.2% ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 Differential Pressure Transmitter

- 4 มานอมิเตอร์น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ทำจากท่อแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1/8 นิ้ว สูง 75 ซม. สำหรับวัดความดันตลอดเครื่อง CFB ซึ่งมีทั้งสิ้น 17 ตำแหน่ง(P1-P17 ในรูปที่ 3.1)
- 5 มานอมิเตอร์ปรอท ลักษณะเหมือนมานอมิเตอร์น้ำ ใช้วัดเพียงตำแหน่งเดียวคือ ความดันที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ(Aeration tapในรูปที่ 3.1)
- 6 นาฬิกาจับเวลา ใช้สำหรับจับเวลาที่เบดเคลื่อนที่ในท่อ Downcomer ในหน่วย วินาที ทศนิยม 2 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.8 มานอมิเตอร์น้ำ

3.1.2 **เครื่องบดหยาบ** แสดงเครื่องมือในรูปที่ 3.9(ก) ใช้บดถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงเหลือไม่เกิน 5 มม. เป็นแบบ Impact Crusher ใช้มอเตอร์ขนาด 3.8 กิโลวัตต์ 3 เฟส

3.1.3 **เครื่องบดละเอียด** แสดงในรูปที่ 3.9(ข) เป็นแบบ Hammermill ของบริษัท Retsch GmbH รุ่น VRB80 มอเตอร์ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ 1 เฟส ใช้บดถ่านหินให้อยู่ในช่วงขนาดต่างๆ ที่ศึกษา

3.1.4 **เครื่องคัดขนาด** แสดงในรูปที่ 3.10 ใช้แยกถ่านหินที่บดได้ออกเป็นช่วงต่างๆ โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งช่วงของขนาดออกเป็นช่วง 0-500 500-600 600-850 850-1180 1180-2360 และ 2360-4750 ไมครอน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.9 เครื่องบดหยาบในรูป (ก) และเครื่องบดละเอียดในรูป (ข)



รูปที่ 3.11 เครื่องคัดขนาด

### 3.2 วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน คือ

#### 3.2.1 การทดลองตอนที่ 1

การทดลองหาตำแหน่งช่องเติมอากาศที่เหมาะสม และอิทธิพลของปริมาณของแข็งในระบบ (solid inventory,  $W_s$ ) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการทดลองต่างๆ ดังนี้

- 1) เตรียมเบด
  - นำถ่านหินให้มีขนาดเล็กกว่า 5 มม.
  - นำถ่านหินที่บดแล้วไปคัดแยกขนาด โดยอยู่ระหว่าง 500–600 600–850 850–1180 1180–2360 และ 2360–4750 ไมครอน ใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักของถ่านหินแต่ละช่วงเป็น 0.292 0.467 0.117 0.083 และ 0.041 ตามลำดับ (เพื่อปรับให้ภาวะในท่อโรเตอร์เป็น Fast fluidization) เพื่อเตรียมเบด 7.5 7 6.5 และ 6.05 กก.
  - นำเบดที่เตรียมแล้วส่วนหนึ่งไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นถ่านหิน และความหนาแน่นบัลค์ของถ่านหิน(แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข)
- 2) คำนวณหา  $U_t$  เพื่อกำหนดค่าความเร็วของ Primary air,  $U$  โดยความเร็วของ Primary air ที่เลือกใช้ คือ 1.75 เท่าของ  $U_t$
- 3) เตรียมเครื่อง CFB โดยเลือกใช้แอลวาล์วมุม 0 องศา
- 4) บรรจุเบด 7.5 กก. ลงในเครื่อง CFB ทางด้านบนของไซโคลน
- 5) เลือกตำแหน่งช่องเติมอากาศที่ 0 ซม. หรือ  $h_{AT}/d_D = 0$
- 6) ให้อากาศป้อนตามทีคำนวณได้ในข้อที่ 2
- 7) วัดค่าความดันที่ตำแหน่งต่างๆ
- 8) ให้อากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ  $Q_A$  ค่าหนึ่งที่ทำให้ถ่านหินเคลื่อนที่ผ่านแอลวาล์ว
- 9) รอจนระบบเข้าสู่สมดุล จากนั้นวัดความดันตกคร่อมแอลวาล์ว ความดันตกคร่อมโรเตอร์ และความดันที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ พร้อมทั้งเวลาที่ถ่านหินเคลื่อนที่ใน Downcomer ได้ระยะทาง  $x$  ซม.
- 10) เปลี่ยนปริมาณอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศแล้วทำตามข้อ 9 จนครบ 4 ค่า
- 11) ปิดพักเครื่องประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต
- 12) ทำการทดลองซ้ำข้อ 6 ถึง 11 อีกรอบเพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกัน
- 13) ทำการทดลองซ้ำข้อ 5 ถึง 12 อีก 2 รอบโดยใช้ตำแหน่งช่องเติมอากาศที่ 6 และ 12 ซม. หรือ  $h_{AT}/d_D = 1$  และ 2 ตามลำดับ

14) ทำการทดลองซ้ำข้อ 4 ถึง 13 อีก 3 รอบ โดยใช้เบดเป็น 7 6.5 และ 6.05 กก.

### 3.2.2 วิธีการทดลองตอนที่ 2

การทดลองศึกษาอิทธิพลของมุมแอลวาล์วและอิทธิพลของปริมาณของแข็งในระบบ(solid inventory,  $W_s$ ) ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการทดลองต่างๆ ดังนี้

- 1) เตรียมเบดเช่นเดียวกับในการทดลองตอนที่ 1 แต่เลือกศึกษาเบด 7.5 6.5 5.5 และ 4.5 กก. แทน
- 2) ความเร็วของ Primary air,  $U$  ที่เลือกใช้ คือ 2.2 เท่าของ  $U_c$
- 3) เตรียมเครื่อง CFB ที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศที่ 6 ซม. หรือ  $h_{AT}/d_D = 1$
- 4) ใช้แอลวาล์วมุม 0 องศา
- 5) บรรจุเบด 7.5 กก. ลงในเครื่อง CFB ทางด้านบนของไซโคลน
- 6) ให้อากาศปฐมภูมิตามที่คำนวณได้ในข้อที่ 2
- 7) วัดค่าความดันที่ตำแหน่งต่างๆ
- 8) ให้อากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ  $Q_A$  ค่าหนึ่งที่ทำให้ถ่านหินเคลื่อนที่ผ่านแอลวาล์ว
- 9) รอจนระบบเข้าสู่สมดุล จากนั้นวัดความดันตกคร่อมแอลวาล์ว ความดันตกคร่อมไรเซอร์ และความดันที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ พร้อมทั้งเวลาที่ถ่านหินเคลื่อนที่ใน Downcomer ได้ระยะทาง  $x$  ซม.
- 10) เปลี่ยนปริมาณอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ แล้วทำตามข้อ 9) จนครบ 4 ค่า
- 11) ปิดพักเครื่องประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต
- 12) ทำการทดลองซ้ำข้อ 6 ถึง 11 อีกรอบเพื่อนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกัน
- 13) ทำการทดลองซ้ำข้อ 5 ถึง 12 อีก 3 รอบโดยใช้เบดเป็น 6.5 5.5 และ 4.5 กก.
- 14) ทำการทดลองซ้ำข้อ 4 ถึง 13 อีก 3 รอบโดยใช้แอลวาล์วมุม 10 20 และ -10 องศา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้จะศึกษาลักษณะของแอลวาล์วที่ส่งผลต่ออัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหินที่ภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ 1 จะอาศัยผลการทดลองตอนที่ 1 มาวิเคราะห์หาตำแหน่งช่องเติมอากาศที่เหมาะสมและแนวโน้มของอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหินเมื่อปริมาณอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศและปริมาณถ่านหินทั้งหมดในระบบเปลี่ยนแปลงไป

ส่วนการวิเคราะห์ผลการทดลองในส่วนที่ 2 จะอาศัยผลการทดลองตอนที่ 2 มาวิเคราะห์หาแนวโน้มของอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหินเมื่อมุมแอลวาล์วและปริมาณถ่านหินทั้งหมดในระบบเปลี่ยนแปลงไป

เนื่องจากแอลวาล์วเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานได้ทั้งในโหมดวาล์ว (valve mode) และโหมดอัตโนมัติ (automatic mode) ดังนั้นจากผลการทดลองตอนที่ 1 และ 2 จะสามารถอธิบายลักษณะการทำงานของแอลวาล์วได้ว่า แอลวาล์วที่ใช้ในงานวิจัยจัดอยู่ในอุปกรณ์โหมดใด

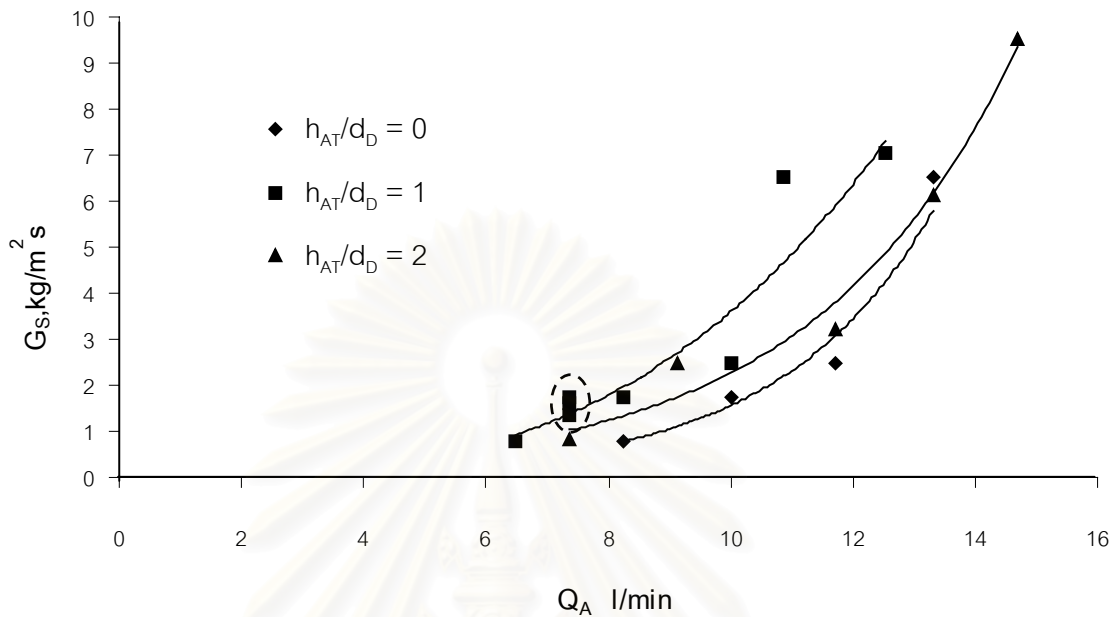
ส่วนที่ 3 จะนำข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับสมการสัมพันธ์ของ Pham H.L และ Bhattacharya S.C.<sup>(6)</sup> และกับ Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup> จากนั้นนำมาสร้างเป็นความสัมพันธ์ขึ้นมาใหม่ให้เหมาะสมกับภาวะและลักษณะของแอลวาล์วที่ศึกษา

#### 4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองส่วนที่ 1

ภาวะในการทดลองตอนที่ 1 กำหนดให้ความเร็วอากาศปฐมภูมิ (U) เป็น  $1.75U_c$  มุมแอลวาล์ว 0 องศา ถ่านหินขนาดเฉลี่ย ( $d_{sm}$ ) 740 ไมครอน ความหนาแน่น  $1381 \text{ kg/m}^3$  และความหนาแน่นบัลค์  $674 \text{ kg/m}^3$  เก็บข้อมูลโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ (Aeration flowrate,  $Q_A$ ) ตำแหน่งช่องเติมอากาศ และปริมาณถ่านหินทั้งหมดในระบบ (Solid inventory,  $W_p$ ) เมื่อนำผลที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Q_A$  กับอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหิน (Solid circulation rate,  $G_s$ ) โดยแสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาคผนวก ข) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าการเพิ่ม  $Q_A$  จะทำให้  $G_s$  เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการที่ถ่านหินจะเคลื่อนที่ผ่านแอลวาล์วได้ต้องอาศัยแรงลากเนื่องจากการไหล (Drag force,  $F_D$ ) ของอากาศผ่านถ่านหินที่มากพอที่จะเอาชนะแรงต้านทานการเคลื่อนที่ของถ่านหินผ่านแอลวาล์ว (f) ดังนั้น เมื่อ  $Q_A$  เพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณอากาศเคลื่อนที่ผ่านมาทางแอลวาล์วเพิ่มขึ้น  $F_D$  ก็เพิ่มขึ้น ในขณะที่ f คงที่ ทำให้ถ่านหินเคลื่อนที่ผ่านแอลวาล์วได้เร็วขึ้น  $G_s$  จึงเพิ่มขึ้น



กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Q_A$  กับ  $G_S$  ที่  $W_t = 6.05 \text{ kg}$ .



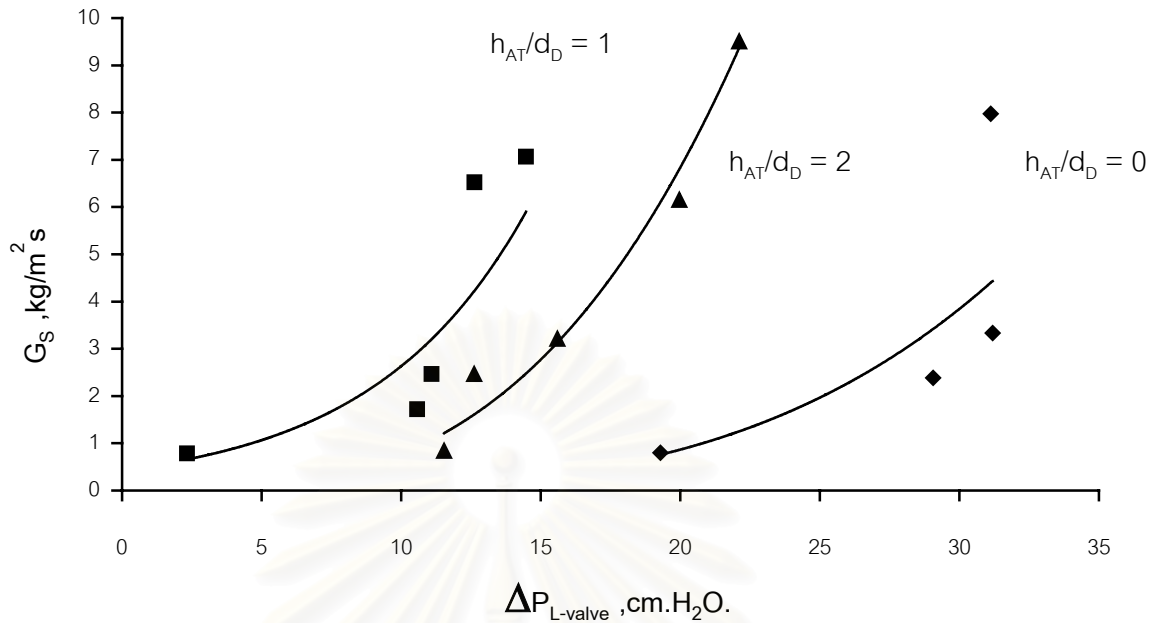
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $Q_A$  กับ  $G_S$  ที่  $W_t = 6.05 \text{ kg}$  และ  $h_{AT}/d_D$  ต่างๆ กัน

จากรูปที่ 4.1 ในวงกลมประพอบว่า  $Q_A$  ค่าหนึ่งสามารถให้  $G_S$  ได้มากกว่า 1 ค่า ทั้งนี้เพราะในการทำการทดลอง การปรับ  $Q_A$  สามารถทำให้งั้นได้แต่ความดันตกคร่อมแวลวาล์ว ( $\Delta P_{L\text{-valve}}$ ) ไม่สามารถทำได้เพราะภาวะในท่อโรเซอร์เป็นแบบ Fast fluidization ของก๊าซกับของแข็ง จึงทำให้ความดันในท่อโรเซอร์แกว่ง เมื่อความดันในท่อโรเซอร์แกว่ง ก็แสดงว่าความดันที่ปากทางออกแวลวาล์วซึ่งอยู่ในท่อโรเซอร์แกว่งด้วย และเนื่องจากค่า  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  เป็นผลต่างของความดันที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ ( $P_{AT}$ ) กับปากทางออกแวลวาล์ว จึงทำให้ค่า  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  แกว่งตามไปด้วย และเมื่อค่า  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  แกว่งก็จะทำให้  $G_S$  แกว่งตาม ซึ่งแสดงว่า  $G_S$  จะตอบสนองต่อ  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  ได้ดีกว่า  $Q_A$  ดังนั้นการเสนอผลการทดลองจะอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  แทนการเสนอด้วย  $Q_A$  กับ  $G_S$  เพราะจะได้ความสัมพันธ์ที่ถูกต้องมากกว่า

จากรูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  พบว่าที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศสูงขึ้นมา 6 ซม. หรือ  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 1 จะให้ค่า  $G_S$  สูงกว่าที่ 0 และ 12 ซม. หรือ  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 2 และ 0 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะว่า

สำหรับที่  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 1 กับ  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 2 สามารถอธิบายได้ว่า ที่  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 2 อากาศต้องเคลื่อนที่ผ่านถ่านหินเพื่อออกทางแวลวาล์วเป็นระยะทางที่มากกว่าที่  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 1 จึงทำให้มีความต้านทานการไหลของอากาศที่  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 2 สูงกว่าที่  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 1 ดังนั้น

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L-valve}$  กับ  $G_S$  ที่  $W_t = 6.05$  kg.



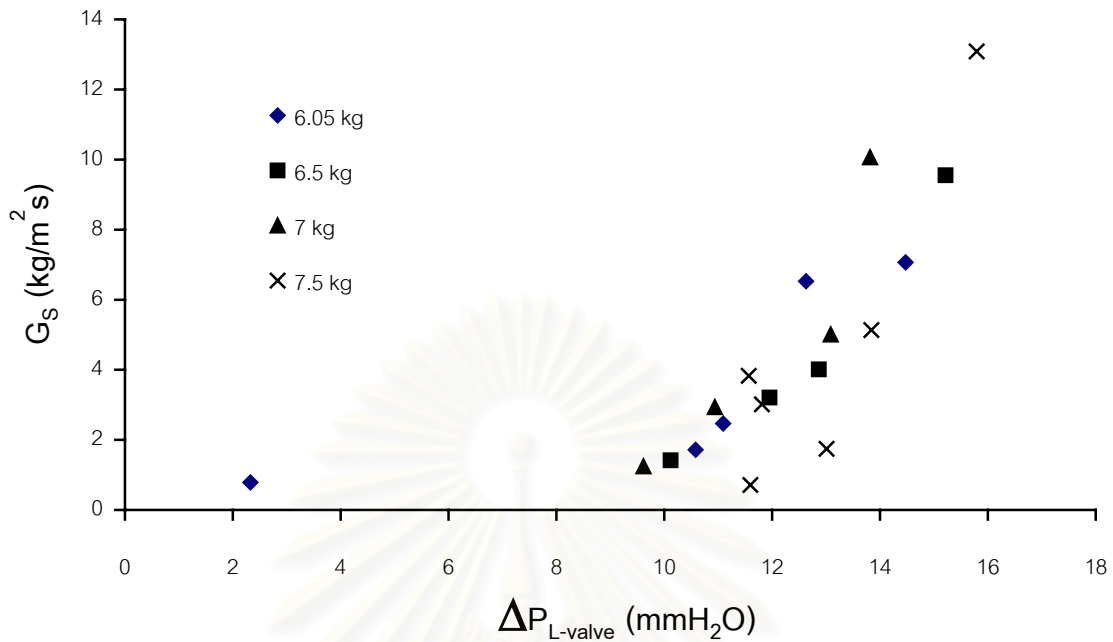
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L-valve}$  กับ  $G_S$  ที่  $W_t = 6.05$  kg และ  $h_{AT}/d_D$  ต่างๆ กัน

พลังงานที่อากาศใช้เคลื่อนที่ผ่านแอลวาล์วที่  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 2 จะมากกว่าที่  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 1

สำหรับที่  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 1 กับ  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 0 สามารถอธิบายได้ว่า การที่ของแข็งในท่อจะเคลื่อนที่ได้ขึ้นขึ้นขึ้นอยู่กับ Drag force,  $F_D$  ดังที่อธิบายมาแล้วในความสัมพันธ์ระหว่าง  $Q_A$  กับ  $G_S$  โดย  $F_D$  จะเกิดขึ้นบนผิวถ่านหินที่สัมผัสกับอากาศ ซึ่งต้องมากพอที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ผ่านแอลวาล์ว(f) ดังนั้นผลการทดลองที่ได้เป็นเช่นนี้ อาจเนื่องมาจากที่ตำแหน่งช่องเดิมอากาศ  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 0 อากาศที่เดิมเข้ามาจะเคลื่อนที่ผ่านและออกทางแอลวาล์วได้ง่ายกว่าที่ตำแหน่ง  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 1 แต่เกิด  $F_D$  น้อยกว่าที่ตำแหน่ง  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 1 เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับของแข็งมีน้อยกว่า ดังนั้น ถ้าต้องการให้อัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหินเท่ากัน อากาศจึงต้องมีพลังงานมากกว่า ส่วนในกรณีที่ปริมาณถ่านหินในระบบเป็น 6.5 7 และ 7.5 kg แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L-valve}$  กับ  $G_S$  ไว้ในภาคผนวก ค

ผลของ  $W_t$  สำหรับการทดลองตอนที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.3 พบว่าแนวโน้มของ  $G_S$  เมื่อ  $W_t$  เปลี่ยนไปยังไม่สามารถสรุปได้ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L-valve}$  กับ  $G_S$  ในแต่ละ  $W_t$  ต่างกันไม่มาก ส่วนในกรณีที่  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 0 และ 2 (แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L-valve}$  กับ  $G_S$  ไว้ในภาคผนวก ค) ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน จึงจะขอเสนอข้อในการวิเคราะห์ผลการทดลองส่วนที่ 2 โดยจะอาศัยการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งจะปรับเปลี่ยนค่า  $W_t$  ในมีช่วงกว้างขึ้นเป็น 4.5 ถึง 7.5 กก. เพื่อให้เห็นเกิดความแตกต่างมากขึ้น

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่แวลวาล์วมุม 0 องศา



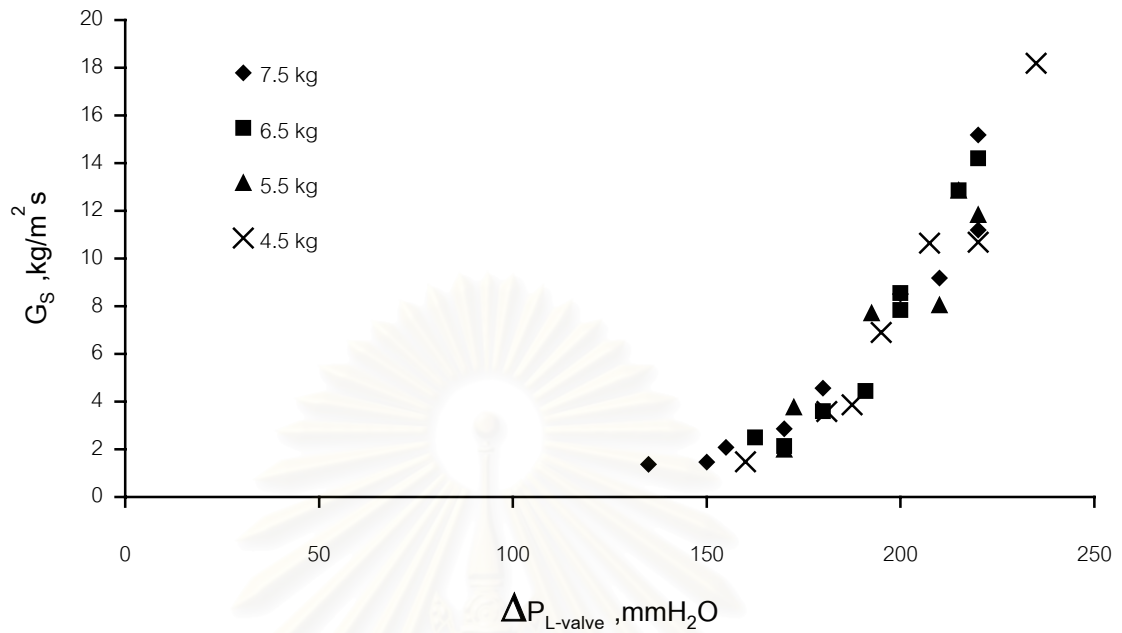
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่  $h_{AT}/d_D = 1$  และ  $W_t$  ต่างๆ กัน

#### 4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองส่วนที่ 2

ภาวะในการทดลองตอนที่ 2 กำหนดให้ความเร็วอากาศปฐมภูมิ( $U$ ) เป็น  $2.2U_t$  ตำแหน่งช่องเติมอากาศที่  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 1(ได้จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองส่วนที่ 1) ถ่านหินขนาดเฉลี่ย( $d_{sm}$ ) 740 ไมครอน ความหนาแน่น  $1381 \text{ kg/m}^3$  และความหนาแน่นบัลด์  $674 \text{ kg/m}^3$  เก็บข้อมูลโดยการปรับเปลี่ยนปริมาณอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ(Aeration flowrate,  $Q_A$ ) ปริมาณถ่านหินทั้งหมดในระบบ(Solid inventory,  $W_t$ ) และมุมแวลวาล์ว

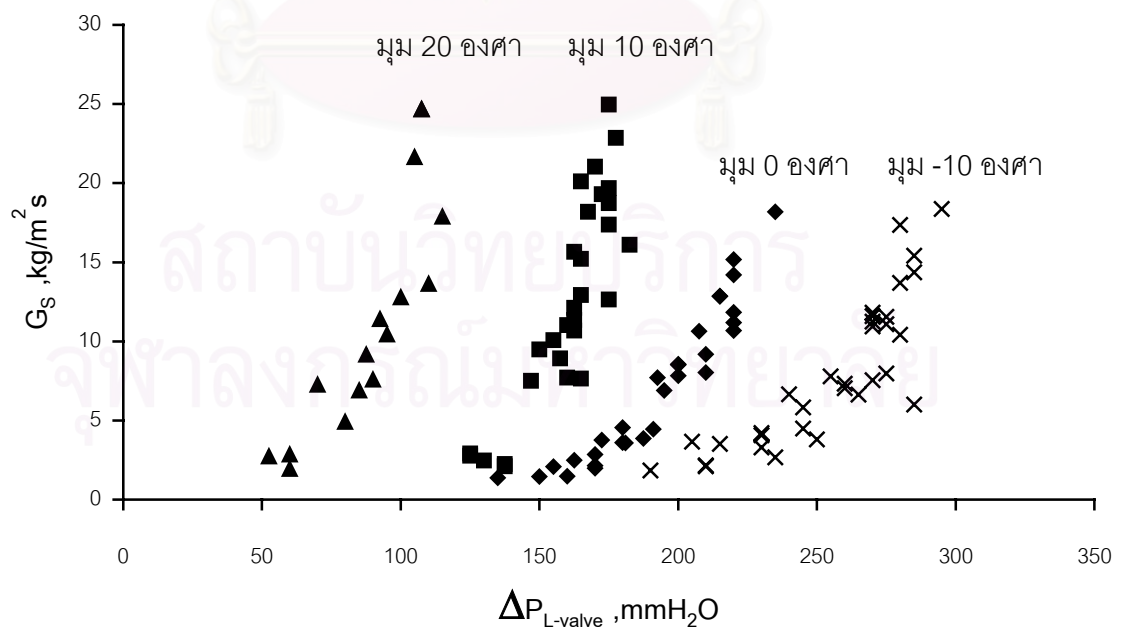
จากผลการทดลองที่ได้เมื่อนำมาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่ค่า  $W_t$  ต่างๆ กัน สำหรับกรณีมุมแวลวาล์ว( $\theta$ ) 0 องศา ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.4 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $W_t$  กับ  $G_S$  ไม่สามารถหาแนวโน้มที่ชัดเจนได้เช่นเดียวกับผลการทดลองตอนที่ 1 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณถ่านหินที่อยู่เหนือตำแหน่งช่องเติมอากาศในแต่ละ  $W_t$  ที่ศึกษาให้ค่าความต้านทานการไหลของอากาศใกล้เคียงกันจึงทำให้ปริมาณอากาศเคลื่อนที่ผ่านทางแวลวาล์วพอกๆ กัน  $G_S$  จึงมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นแวลวาล์วที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้ จึงเป็นแวลวาล์วที่จัดอยู่ในประเภทอุปกรณ์ควบคุม(valve mode) เพราะ  $G_S$  ขึ้นอยู่กับ  $Q_A$  แต่ไม่ขึ้นกับ  $W_t$  ส่วนในกรณีที่มุมแวลวาล์วอื่นๆ ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่ค่า  $W_t$  ต่างๆ ไว้ในภาคผนวก ค

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์วมุม 0 องศา



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์วมุม 0 องศา  $W_t$  ต่างๆ กัน

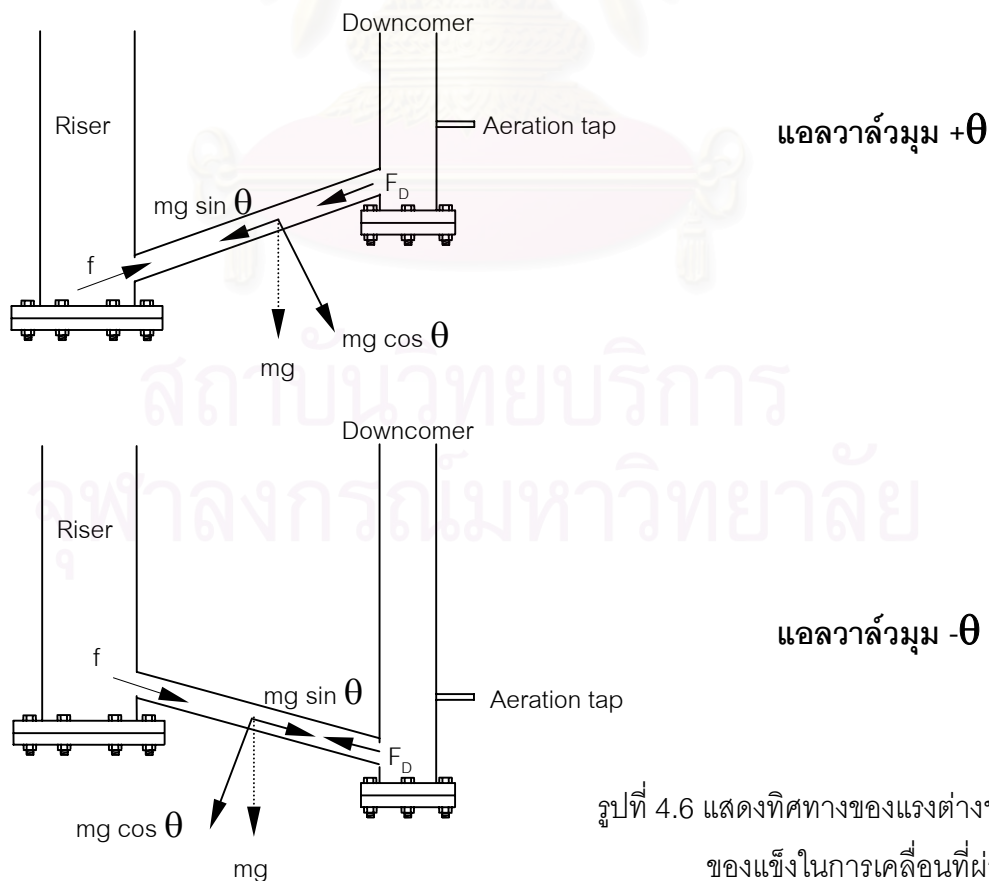
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์วมุมต่างๆ

ผล  $\theta$  ที่มีต่อ  $G_s$  แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่า มุมของแอลวาล์วที่เพิ่มขึ้นจะทำให้  $G_s$  เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะผลจากแรงโน้มถ่วงของโลกที่ทำต่อถ่านหินดังแสดงในรูปที่ 4.6 กล่าวคือ ในกรณีที่  $\theta$  มากกว่า 0 จะทำให้เกิดแรงเพิ่มขึ้นมาอีกหนึ่งแรงเป็นแรงที่เกิดจากการแตกแรง  $mg$  ของถ่านหิน คือ แรง  $mg \sin \theta$  ซึ่งเกิดในทิศทางเดียวกันกับแรง  $F_D$  และในทางกลับกันจะทำให้แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของถ่านหินผ่านแอลวาล์ว( $f$ )ลดลง เนื่องจากแรงที่เกิดจากน้ำหนักถ่านหินที่กดลงบนผนังท่อลดลง ทำให้ถ่านหินสามารถเคลื่อนที่ผ่านแอลวาล์วด้วยแรง  $F_D$  ที่น้อยลง ดังนั้นพลังงานที่อากาศต้องการใช้เพื่อให้เกิด  $F_D$  จึงน้อยลงตามไปด้วย ส่วนในกรณีที่  $\theta$  น้อยกว่า 0 ก็จะทำให้เกิดแรง  $mg \sin \theta$  ในทิศทางตรงกันข้ามกับแรง  $F_D$  และ  $f$  จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากถ่านหินต้องเคลื่อนที่ผ่านท่อที่มีความชันเพิ่มขึ้น ทำให้ต้องใช้แรง  $F_D$  สูงขึ้นเพื่อให้ถ่านหินเคลื่อนที่ผ่านแอลวาล์วได้ ดังนั้นพลังงานที่อากาศต้องใช้เพื่อให้เกิด  $F_D$  ที่เพียงพอจึงมากขึ้นตามไปด้วย

จากผลการทดลองของแอลวาล์วมุม 20 กับ -10 องศา พบว่า ในกรณีที่มุมแอลวาล์ว 20 องศา เมื่อปรับ  $Q_A$  จาก 3 ไปจนถึง 6 l/min ค่า  $G_s$  จะเปลี่ยนจากประมาณ 2 ไปเป็น 25 kg/m<sup>2</sup>s ส่วนที่มุมแอลวาล์ว -10 องศา เมื่อปรับ  $Q_A$  จาก 8 ไปจนถึง 11 l/min ค่า  $G_s$  จะเปลี่ยนจากประมาณ 1.5 ไปเป็น 12 kg/m<sup>2</sup>s ดังนั้น ในกรณีที่มุมแอลวาล์วมีค่ามากจะสามารถปรับ  $G_s$  ได้สูง แต่ความละเอียดในการปรับหรือการควบคุมจะทำได้ยากกว่าในกรณีที่มุมแอลวาล์วมีค่าน้อย



รูปที่ 4.6 แสดงทิศทางของแรงต่างๆ ที่กระทำกับของแข็งในการเคลื่อนที่ผ่านแอลวาล์ว

### 4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองส่วนที่ 3

#### 4.3.1 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับงานของนักวิจัยท่านอื่น

1. สมการสหสัมพันธ์ของ Pham H.L. และ Bhattacharya S.C.<sup>(6)</sup> แบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นที่ 1 ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\frac{G_{S1}}{U_{mf} \rho_p} = -0.062 + 0.118 \left( \frac{U}{U_t} \right) - 0.036 \left( \frac{U_A}{U} \right) + 0.190 \left( \frac{W_t}{AH_R \rho_p} \right) \quad (4.1)$$

ชั้นที่ 2 ได้ความสัมพันธ์เป็น

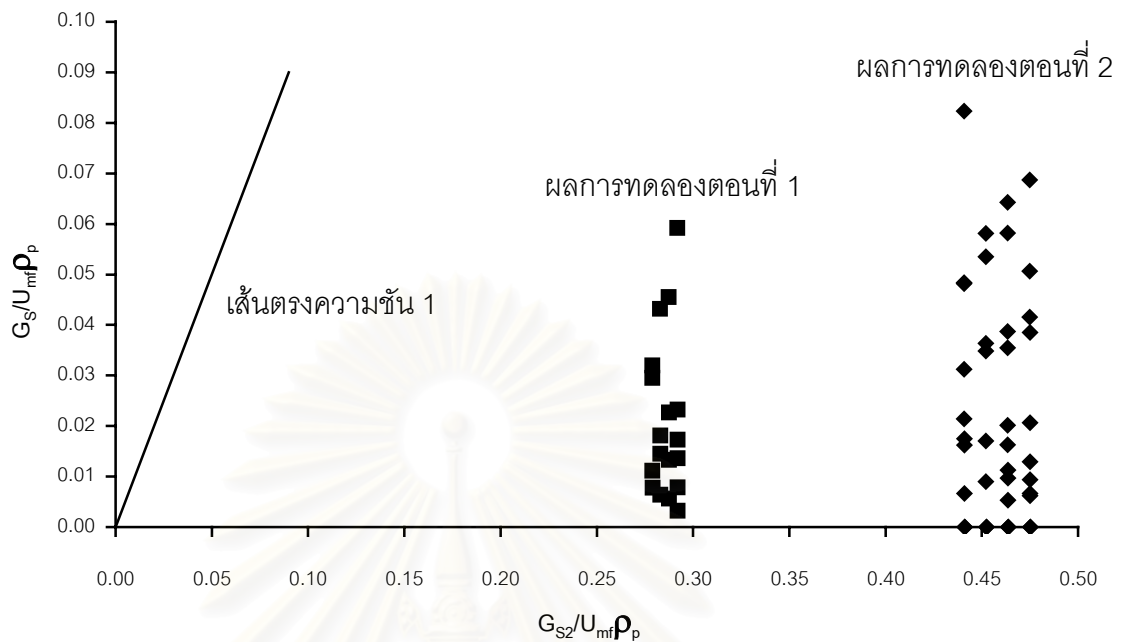
$$\frac{G_{S2}}{U_{mf} \rho_p} = 0.00283 + 0.36653 \left( \frac{G_{S1}}{U_{mf} \rho_p} \right) + 8.26644 \left( \frac{G_{S1}}{U_{mf} \rho_p} \right)^2 \quad (4.2)$$

สมการสหสัมพันธ์ของ Pham H.L. และ Bhattacharya S.C.<sup>(6)</sup> เป็นสมการที่ได้จากการทดลองที่ภาวะดังนี้

- อนุภาคของแข็งที่ใช้เป็นทรายขนาด 200 400 และ 500 ไมครอน
- ความเร็วอากาศปฐมภูมิ(U) อยู่ระหว่าง 1400 ถึง 2000 ลิตรต่อนาที
- ความเร็วอากาศที่ตำแหน่งช่องเดิมอากาศ(U<sub>A</sub>) อยู่ระหว่าง 60 ถึง 80 ลิตรต่อนาที
- ปริมาณทรายทั้งหมดในระบบ(W<sub>t</sub>) อยู่ระหว่าง 15 ถึง 20 กก.
- ท่อไรเซอร์สูง(H<sub>R</sub>) 4.5 ม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.15 ม.

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1(เฉพาะที่  $h_{AT}/d_D = 1$ ) และ 2 มาเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Pham H.L. และ Bhattacharya S.C.<sup>(6)</sup> พบว่าค่า  $G_S/U_{mf} \rho_p$  ที่ได้จากการทดลองกับค่า  $G_{S2}/U_{mf} \rho_p$  ที่ได้จากการคำนวณจากสมการสหสัมพันธ์ชั้นที่ 2 มีค่าไม่สอดคล้องกัน ความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นที่มีความชันเท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.1 พบว่าเทอมของตัวแปรไร้หน่วย  $U/U_t$  จะส่งผลต่อ  $G_{S1}/U_{mf} \rho_p$  สูงกว่าเทอมไร้หน่วยเทอมอื่น และเมื่อนำเทอมของ  $G_{S1}/U_{mf} \rho_p$  ที่ได้ มาปรับปรุงค่าในสมการที่ 4.2 ก็จะทำให้เทอม  $G_{S2}/U_{mf} \rho_p$  ที่เป็นเทอมปรับปรุงมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้น ค่า  $G_{S2}/U_{mf} \rho_p$  ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 2 (ใช้  $U/U_t = 2.2$ ) จึงมีค่าสูงกว่า  $G_{S2}/U_{mf} \rho_p$  ที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1(ใช้  $U/U_t = 1.75$ ) มาก ดังนั้นในกรณีที่มีการกำหนดค่า U ให้คงที่ตลอดการทดลองเช่นในงานวิจัยนี้ ค่า  $G_{S1}/U_{mf} \rho_p$  และ  $G_{S2}/U_{mf} \rho_p$  ที่คำนวณได้จากสมการสหสัมพันธ์ของ Pham H.L. และ Bhattacharya S.C.<sup>(6)</sup> จึงค่อนข้างคงที่

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการของ Pham H.L. และ Bhattacharya S.C.



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการของ Pham H.L. และ Bhattacharya S.C.

2. สมการสหสัมพันธ์ของ Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup> ได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\frac{\Delta P_{L-valve}}{L_{L-valve}} = 0.0649 G_s^{0.178} \rho_{B,LP}^{0.996} D_v^{-0.574} d_{Sm}^{-0.237} \quad (4.3)$$

สมการสหสัมพันธ์ของ Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup> ได้จากการนำสมการสหสัมพันธ์ของ Geldart D. และ Jones P.<sup>(7)</sup> มาปรับปรุงให้เหมาะสมกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยการเพิ่มเทอมของความหนาแน่นบัลค์( $\rho_B$ )เข้าไปในสมการ ภาวะที่ Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup> ใช้ในการทดลองเป็นดังนี้

- อนุภาคของแข็งที่ใช้มี 5 ชนิดเป็นทราย 3 ชนิด FCC ที่ใช้แล้วและ Magnetite อีกอย่างละชนิด แสดงสมบัติในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงสมบัติทางกายภาพของของแข็งที่ Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup> ใช้ในการทดลอง

อนุภาค	FCC ใช้แล้ว	ทราย 1	ทราย 2	Magnetite	ทราย 3
ขนาดเฉลี่ย $d_{sm}$ (ไมครอน)	68	73	156	170	341
ความหนาแน่นอนุภาค $\rho_p$ (กก. ต่อ ลบ.ม.)	1770	2550	2550	4460	2550
ความหนาแน่นบัลค์ $\rho_B$ (กก. ต่อ ลบ.ม.)	960	1370	1410	2710	1510

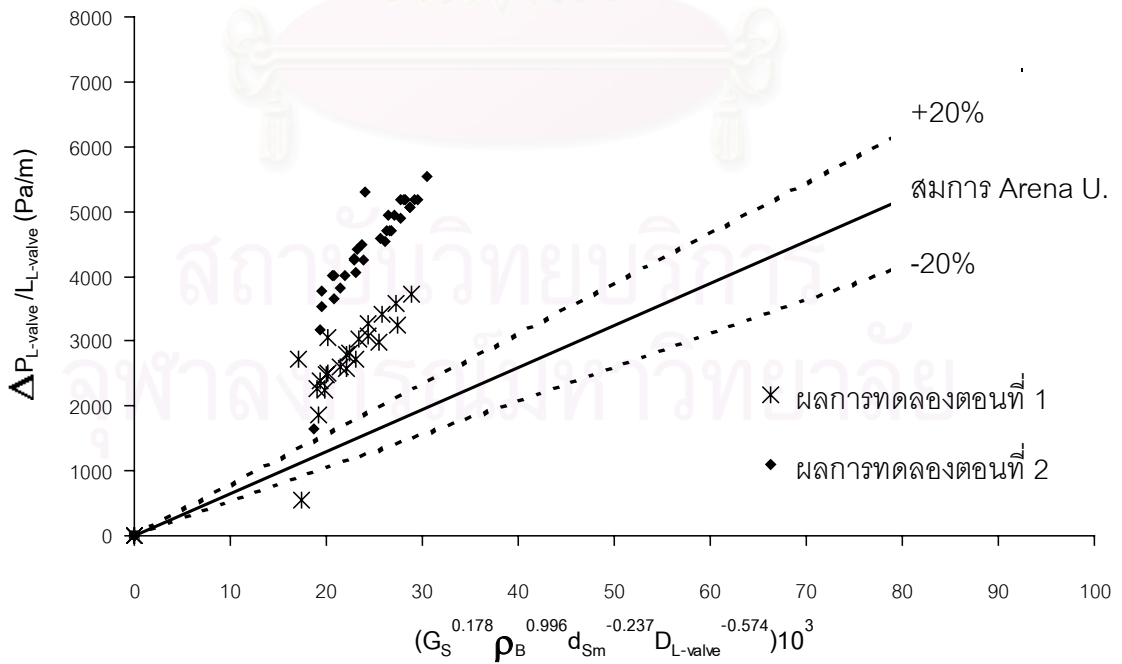
- แอลวาล์วมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.027 ม. แอลวาล์วในแนวระดับ (Horizontal L-valve) ยาว 0.317 ม.
- ภาวะในการทดลอง แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงภาวะในการทดลองของ Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup>

อนุภาค	ความเร็วอากาศป้อนใน ส่วนล่าง ม. ต่อวินาที	ปริมาณอากาศที่ช่องเติมอากาศ Q <sub>A</sub> ลบ. ม. ต่อชั่วโมง
FCC ใช้แล้ว	1	0.006 – 0.015
ทราย 1	1	0.010 – 0.053
ทราย 2	1	0.041 – 0.0159
Magnetite	2.5	0.061 – 0.373
ทราย 3	1	0.134 – 0.600

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 (เฉพาะที่  $h_{AT}/d_D = 1$ ) และ 2 มาเปรียบเทียบกับงานสมการสหสัมพันธ์ของ Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup> พบว่าผลที่ได้ไม่สอดคล้องกันดังแสดงในรูปที่ 4.8 จากรูปจะเห็นว่าผลที่ได้จากการทดลองนี้จะแยกออกเป็นสองกลุ่มคือในกลุ่มของผลการทดลองตอนที่ 1 และกลุ่มของผลการทดลองตอนที่ 2 ซึ่งทั้งสองการทดลองจะมีภาวะที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันเพียงอย่างเดียวคือ อัตราส่วนของ  $U/U_c$  เป็น 1.75 และ 2.2 ตามลำดับ

เปรียบเทียบโดยอาศัย correlation ของ U. Arena และคณะ



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการของ Arena U. และคณะ



ซึ่งเมื่อนำงานวิจัยของ Geldart D. และ Jones P.<sup>(7)</sup> (เป็นงานวิจัยที่ Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup> นำเอาสมการสหสัมพันธ์มาปรับปรุงขึ้นใหม่) มาวิเคราะห์จะพบว่า ภาวะที่ Geldart D. และ Jones P.<sup>(7)</sup> ใช้ศึกษาเพื่อสร้างสมการสหสัมพันธ์เป็นระบบเปิดที่ทางออกแอลวาล์วเปิดสู่บรรยากาศ จึงไม่มีผลเนื่องจากความดันที่ปากทางออกแอลวาล์วหรือความเร็วอากาศป้อนภูมิต่ออัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหิน ดังนั้น ผลที่เกิดขึ้นจึงน่าเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ  $U/U_t$  ที่ทำให้ผลที่ได้จากการทดลองนี้ไม่เป็นไปตามสมการสหสัมพันธ์ของ Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup>

แต่สิ่งที่น่าสนใจคือ จากความสัมพันธ์ของ Pham H.L. และ Bhattacharya S.C.<sup>(6)</sup> ในสมการที่ 4.1 จะเห็นว่า  $G_s$  จะแปรผันตามอัตราส่วนของ  $U/U_t$  แต่จากผลที่ได้จากงานวิจัยกลับได้ผลว่า การเพิ่มอัตราส่วนของ  $U/U_t$  จะทำให้  $G_s$  ลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกรณีที่อัตราส่วนของ  $U/U_t$  เพิ่มสูงขึ้นจาก 1.75 ไปเป็น 2.2 จะทำให้ความดัน ที่ตำแหน่งปากทางออกของแอลวาล์วเพิ่มสูงขึ้น(จากข้อมูลการทดลองเพิ่มจากประมาณ 80 ถึง 125 ไปเป็น 115 ถึง 195 mmH<sub>2</sub>O) ดังนั้นปริมาณอากาศหรือความดันที่ตำแหน่งช่องเดิมอากาศจึงต้องมีค่าสูงขึ้นเพื่ออากาศที่เดิมเข้ามา (Aeration air) จะได้ไหลผ่านแอลวาล์วได้เช่นเดิม ส่วนในงานวิจัยของ Pham H.L. และ Bhattacharya S.C.<sup>(6)</sup> จะใช้  $U/U_t$  อยู่ในช่วงประมาณ 0.4 ถึง 1.2 ซึ่งอัตราส่วนของ  $U/U_t$  ในช่วงนี้เมื่อเพิ่มขึ้นอาจทำให้ความหนาแน่นของของแข็งในท่อไรเซอร์ลดลง ค่าความดันที่ปากทางออกแอลวาล์วก็จะลดลง ค่า  $\Delta P_{L-valve}$  จึงเพิ่มขึ้น และเมื่อ  $\Delta P_{L-valve}$  เพิ่มขึ้นก็จะทำให้  $G_s$  เพิ่มขึ้นด้วย

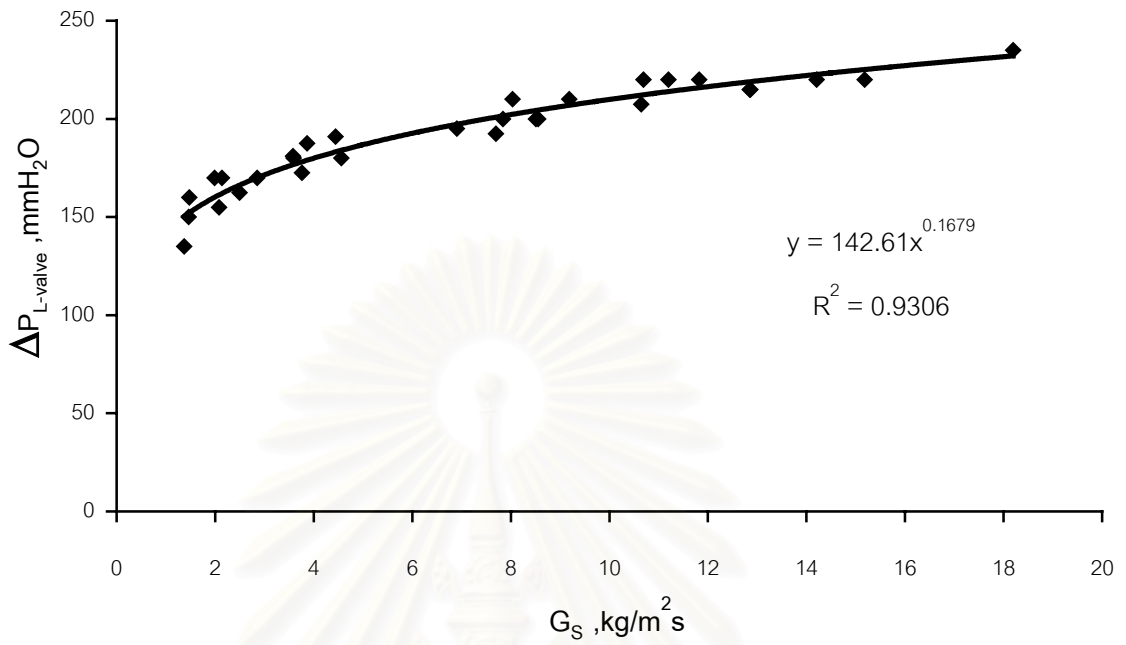
#### 4.3.2 การหาสมการสหสัมพันธ์เพื่อใช้อธิบายผลที่ได้จากงานวิจัย

จากการเปรียบเทียบกับสมการสหสัมพันธ์ของ Pham H.L. และ Bhattacharya S.C.<sup>(6)</sup> และ Arena U.<sup>(4)</sup> และคณะพบว่าสมการสหสัมพันธ์ทั้งสองไม่สามารถอธิบายผลที่ได้จากภาวะที่ใช้สำหรับการทดลองนี้ได้ ดังนั้นในส่วนนี้จึงจะแสดงการวิเคราะห์หาสมการสหสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับภาวะที่ใช้ในงานวิจัยนี้

จากผลการทดลองตอนที่ 2 เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L-valve}$  กับ  $G_s$  ในทุกๆ ค่าของ  $W_t$  ที่มุมของแอลวาล์ว 0 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L-valve}$  กับ  $G_s$  เป็นแบบสมการกำลังมากกว่าแบบอื่น โดยพิจารณา  $R^2$  ในแต่ละสมการ และเนื่องจากการทดลองในส่วนนี้ตัวแปรต่างๆ ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ทั้งหมด มีเพียงการปรับเปลี่ยนค่า  $Q_A$  ซึ่งเป็นตัวแปรต้นซึ่งสัมพันธ์กับค่า  $\Delta P_{L-valve}$  และมี  $G_s$  เป็นตัวแปรตามเท่านั้น ดังนั้นเลขชี้กำลัง 0.1679 ที่แสดงในสมการ  $y = 142.61x^{0.1679}$  ในรูปที่ 4.9 จึงเป็นเลขชี้กำลังของค่า  $G_s$

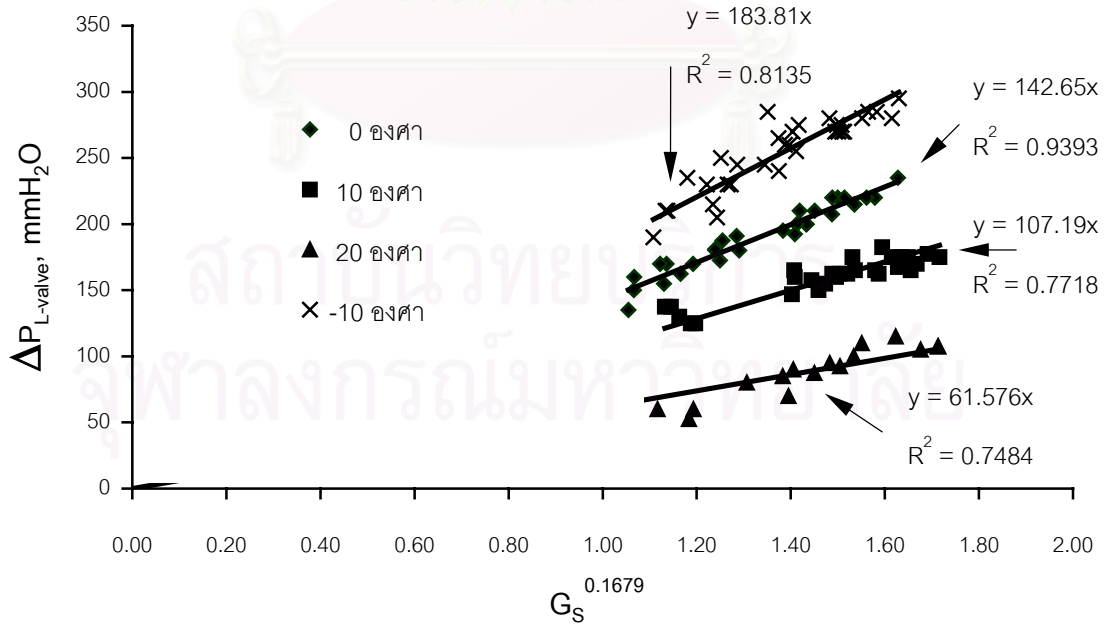
เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L-valve}$  กับ  $G_s^{0.1679}$  ในข้อมูลทุกๆ  $W_t$  ในทุกมุมของแอลวาล์ว และสร้างสมการความสัมพันธ์ในแต่ละชุดข้อมูลออกมาในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้น

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L-valve}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์วมุม 0 องศา



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L-valve}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์วมุม 0 องศา

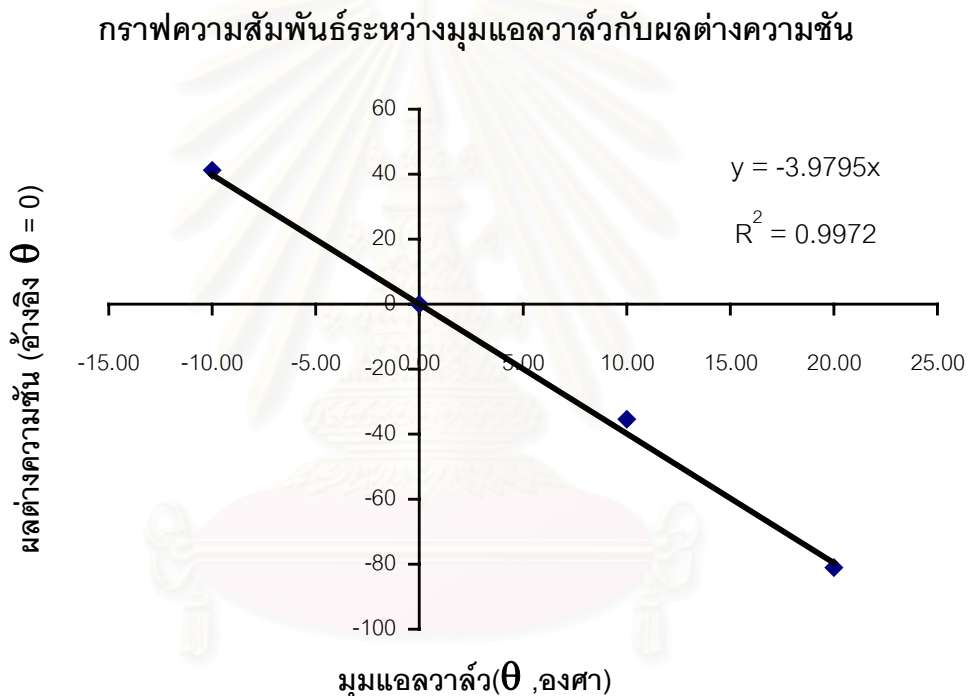
กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $G_S^{0.1679}$  กับ  $\Delta P_{L-valve}$



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $G_S^{0.1679}$  กับ  $\Delta P_{L-valve}$  ที่แอลวาล์วมุมต่างๆ

ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ข้อมูลที่แสดงทั้ง 4 ชุดเป็นการทำการทดลองที่ภาวะเดียวกันต่างกันเพียงมุม แอลวาล์วที่ใช้ต่างกันเท่านั้น ดังนั้นผลที่ทำให้ข้อมูลในแต่ละชุดมีความแตกต่างกันจึงเป็นผลมาจากมุมของแอลวาล์ว

เมื่อพิจารณาตัวแปรมุมแอลวาล์วจะเห็นว่ามุมของแอลวาล์วคงที่ในแต่ละชุดข้อมูล ดังนั้นผลของมุมแอลวาล์วจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ชุดข้อมูลแต่ละชุดมีความชันแตกต่างกัน ดังนั้นจึงอาศัยค่าความชันต่างระหว่างความชันในชุดการทดลองมุมแอลวาล์วต่างๆ กันความชันในชุดการทดลองมุมแอลวาล์ว 0 องศา มาวิเคราะห์หาตัวแปรมุมของแอลวาล์ว ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากรูปจะเห็นว่าผลต่างของความชันในแต่ละชุดข้อมูลจะลดลงเมื่อมุมแอลวาล์วเพิ่มมากขึ้น และสามารถสร้างความสัมพันธ์ออกมาในรูปเชิงเส้นได้เป็น  $y = -3.9795x$  มีค่า  $R^2 = 0.9972$



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมแอลวาล์วกับผลต่างของความชัน

ผลจากการวิเคราะห์โดยอาศัยข้อมูลต่างๆ ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_s$  และมุมแอลวาล์ว  $\theta$  ได้ดังนี้

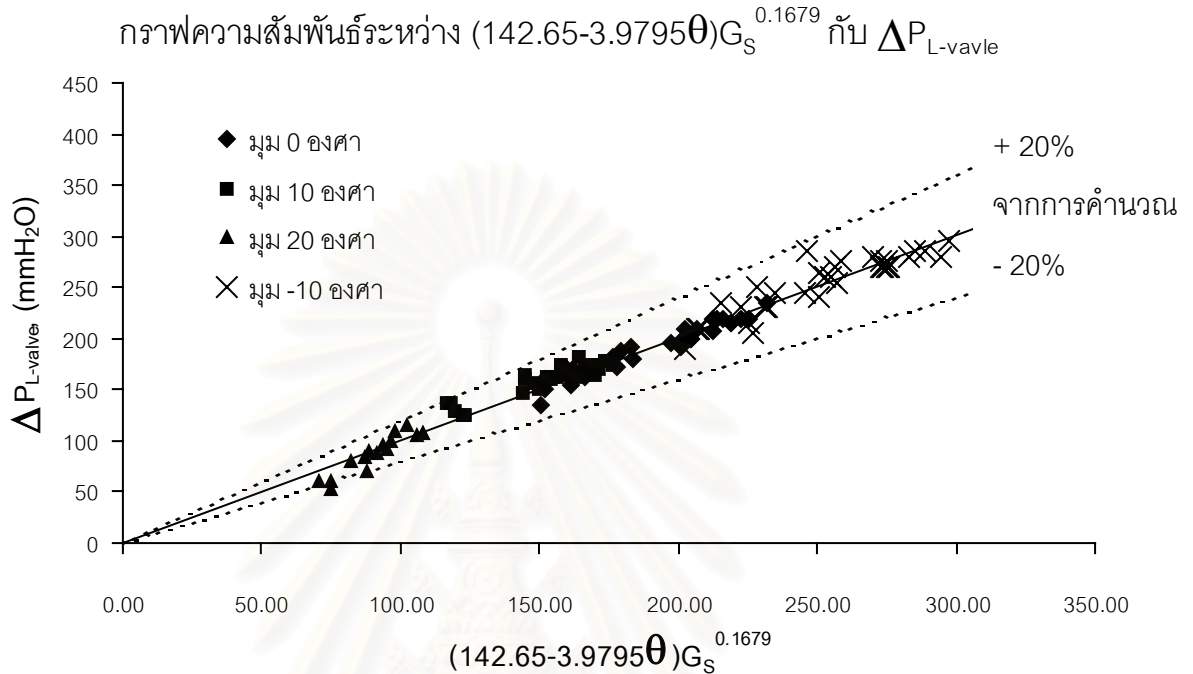
$$\Delta P_{L\text{-valve}} = (142.65 - 3.9795\theta) G_s^{0.1679} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  วัดในหน่วย mmH<sub>2</sub>O

$\theta$  วัดในหน่วย องศา

$G_s$  วัดในหน่วย kg/m<sup>2</sup>s

นำสมการที่ 4.5 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$  อยู่ในช่วง  $\pm 20\%$  ของค่าที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(142.61-3.9783\theta)G_S$  กับ  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  ที่มุมแวลวาล์วต่างๆ

สมการที่ 4.5 จะใช้ได้ดีเมื่อระบบอยู่ในภาวะดังนี้

- ถ่านหินขนาดเฉลี่ย 740 ไมครอน มีความหนาแน่นอนุภาค  $1381 \text{ kg/m}^3$  และมีความหนาแน่นบัลค์  $674 \text{ kg/m}^3$
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ Downcomer และความยาวท่อ horizontal ของแวลวาล์ว เป็น 6 และ 43 ซม. ตามลำดับ
- ความเร็วอากาศปฐุมภูมิเป็น 2.2 เท่าของ  $U_t$
- มุมแวลวาล์วอยู่ในช่วง  $-10$  ถึง  $20$  องศา
- อัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหินอยู่ในช่วง  $0 - 25 \text{ kg/m}^2\text{s}$

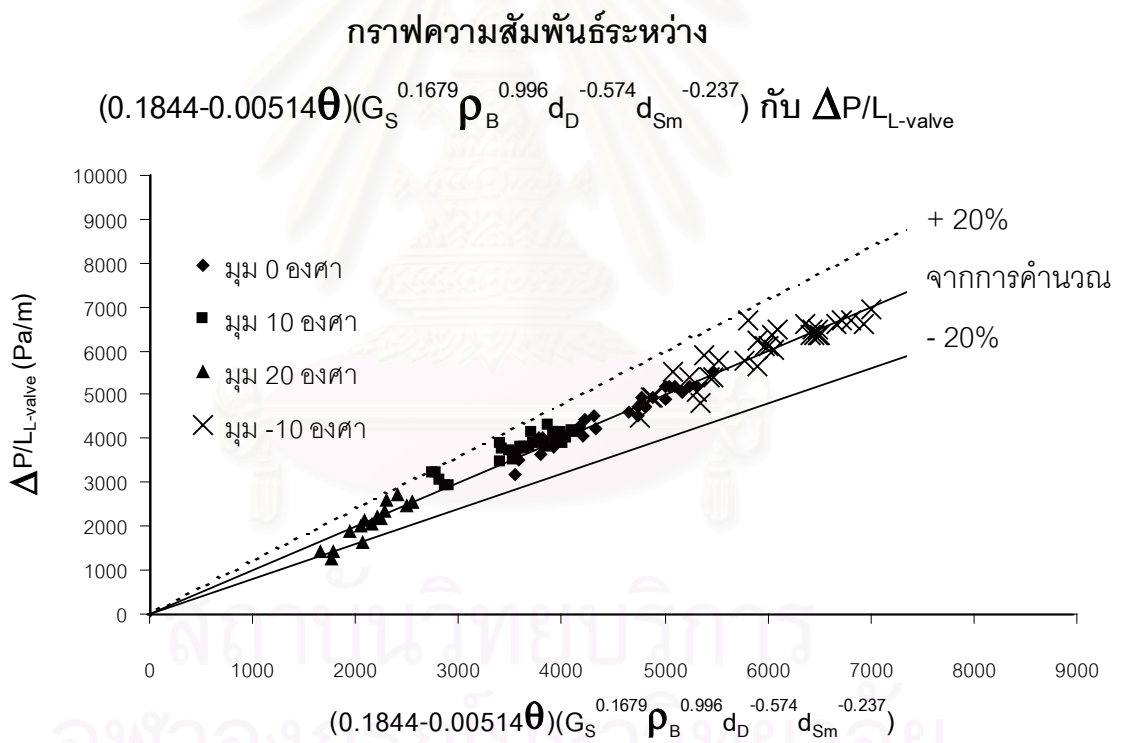
และอาจอาศัยสมการสหสัมพันธ์ของ U. Arena และคณะ<sup>(4)</sup> เพื่อช่วยลดข้อจำกัดในการใช้งานของสมการที่ 4.5 ลง ได้สมการสหสัมพันธ์เป็น

$$\frac{\Delta P_{L\text{-valve}}}{L_{L\text{-valve}}} = (0.1844 - 0.00514\theta)G_S^{0.1679} \rho_B^{0.996} d_D^{-0.574} d_{Sm}^{-0.237} \quad (4.6)$$

เมื่อ  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  ใช้หน่วย Pa

$L_{L\text{-valve}}$	จากงานวิจัยนี้จะหมายถึงระยะห่างระหว่าง Riser กับ Downcomer ใช้หน่วย m
$\theta$	ใช้หน่วย องศา
$G_S$	ใช้หน่วย $\text{kg/m}^2\text{s}$
$\rho_B$	ใช้หน่วย $\text{kg/m}^3$
$d_D$	ใช้หน่วย m
$d_{Sm}$	ใช้หน่วย m

สมการที่ 4.6 อาจจะช่วยทำให้ลดข้อจำกัดในการใช้งานสมการที่ 4.5 ในเรื่องชนิดของของแข็ง ขนาด ความหนาแน่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ Downcomer และความยาวท่อ Horizontal ของแฉลวาล์ว ให้คงเหลือเพียงความเร็วอากาศปฐมภูมิ ช่วงมุมแฉลวาล์ว และช่วงอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหิน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมการที่ 4.6 กับผลการทดลองในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(0.1844-0.0514\theta)(G_S^{0.1679} \rho_B^{0.996} d_D^{-0.574} d_{Sm}^{-0.237})$

กับ  $\Delta P/L_{L\text{-valve}}$

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การเพิ่มปริมาณอากาศที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ( $Q_A$ ) จะทำให้ความดันตกคร่อมแวลวาล์ว ( $\Delta P_{L-valve}$ ) และอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง( $G_S$ ) เพิ่มสูงขึ้น
2. ที่  $Q_A$  ค่าหนึ่งความดันตกคร่อมแวลวาล์ว( $\Delta P_{L-valve}$ ) จะไม่นิ่ง และจะทำให้  $G_S$  ในระบบแกว่งตามไปด้วย
3. ตำแหน่งของช่องเติมอากาศที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ คือที่สูงขึ้นมาจากจุดศูนย์กลางท่อทางออก Downcomer 6 ซม. หรือที่อัตราส่วน  $h_{AT}/d_D$  เท่ากับ 1 สำหรับแวลวาล์วมุม 0 องศา
4. ปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ(Solids inventory,  $W_t$ ) ไม่มีผล  $G_S$  ดังนั้นแวลวาล์วในระบบเป็นอุปกรณ์ควบคุมอัตราการไหลของของแข็งที่จัดอยู่ในโหมดวาล์ว(valve mode)
5. การเพิ่มมุมแวลวาล์ว( $\theta$ ) จะทำให้  $G_S$  เพิ่มขึ้น แต่ความละเอียดในการปรับค่า  $G_S$  และการควบคุมจะยากขึ้น
6. การปรับเพิ่มความเร็วอากาศปฐมภูมิ(Primary air,  $U$ ) จะทำให้  $G_S$  ลดลง
7. ได้สมการสหสัมพันธ์เป็น

$$\Delta P_{L-valve} = (142.65 - 3.9795\theta)G_S^{0.1679} \quad (4.5)$$

เมื่อ  $\Delta P_{L-valve}$  ใช้หน่วย mmH<sub>2</sub>O

$G_S$  ใช้หน่วย kg/m<sup>2</sup>s

$\theta$  ใช้หน่วย องศา

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับสมการที่ 4.5 คือ

- ถ่านหินขนาดเฉลี่ย 740 ไมครอน มีความหนาแน่นอนุภาค 1381 kg/m<sup>3</sup> และมีความหนาแน่นบัลค์ 674 kg/m<sup>3</sup>
- เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ Downcomer และความยาวท่อ horizontal ของแวลวาล์ว เป็น 6 และ 43 ซม. ตามลำดับ
- ความเร็วของ primary air ประมาณ 2.2 เท่าของ  $U_t$
- มุมของแวลวาล์วอยู่ระหว่าง -10 ถึง 20 องศา
- $G_S$  อยู่ในช่วง 0 – 25 kg/m<sup>2</sup>s

และอาจอาศัยงานวิจัยของ Arena U. และคณะ<sup>(4)</sup> เพื่อลดข้อจำกัดของสมการ 4.5 ได้เป็น

$$\frac{\Delta P_{L-valve}}{L_{L-valve}} = (0.1844 - 0.00514\theta) G_S^{0.1679} \rho_B^{0.996} d_D^{-0.574} d_{Sm}^{-0.237} \quad (4.6)$$

เมื่อ  $\Delta P_{L-valve}$  ใช้หน่วย Pa

$L_{L-valve}$  จากงานวิจัยนี้จะหมายถึงระยะห่างระหว่าง Riser กับ Downcomer ใช้หน่วย m

$\theta$  ใช้หน่วย องศา

$G_S$  ใช้หน่วย  $\text{kg/m}^2\text{s}$

$\rho_B$  ใช้หน่วย  $\text{kg/m}^3$

$d_D$  ใช้หน่วย m

$d_{Sm}$  ใช้หน่วย m

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับสมการที่ 4.6 คือ ความเร็วของ primary air ประมาณ 2.2 เท่าของ  $U_t$  และมุมของแอลลวาล์วอยู่ระหว่าง  $-10$  ถึง  $20$  องศา  $G_S$  อยู่ในช่วง  $0 - 25 \text{ kg/m}^2\text{s}$

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับงานวิจัยนี้ ตำแหน่งช่องเติมอากาศที่เลือกใช้ในการทดลองตอนที่ 2 จะอาศัยข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองตอนที่ 1 ซึ่งศึกษากรณีแอลลวาล์วมุม  $0$  องศา และเมื่อนำไปใช้ในการทดลองตอนที่ 2 ที่แอลลวาล์วมุมต่างๆ ตำแหน่งช่องเติมอากาศที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 อาจใช้หรือไม่ใช้ตำแหน่งที่ดีที่สุดสำหรับแอลลวาล์วมุมอื่นๆ ดังนั้น ผู้ที่สนใจอาจใช้ประเด็นนี้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ interaction ระหว่างตำแหน่งช่องเติมอากาศกับแอลลวาล์วมุมต่างๆ
2. ปริมาณอากาศปฐมภูมิ( $Q$ ) มีผลต่อ  $G_S$  อย่างมาก ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ดังนั้น ผู้ที่สนใจอาจศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความสัมพันธ์ของตัวแปร  $Q$  หรือ  $U/U_t$  เข้าไปในสมการ
3. สำหรับเครื่อง CFB ที่ใช้ในงานวิจัยนี้พบว่า เมื่อให้  $Q_A$  ค่าหนึ่งแล้วทำให้ความดันตกคร่อมโรเตอร์มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆ แสดงว่าค่า  $Q_A$  นี้สูงเกินไปจนทำให้อัตราการป้อนถ่านหินเข้าสู่โรเตอร์สูงกว่าอัตราการถ่ายถ่านหินออกสู่ไซโคลน ทำให้ถ่านหินสะสมเพิ่มมากขึ้นในโรเตอร์ และถ้าปล่อยไว้จนถ่านหินมีปริมาณมากพอ(เครื่องเป่าอากาศไม่สามารถยกเบตได้) ถ่านหินที่กระจายตัวอยู่ในโรเตอร์จะยุบตัวลงเกิดเป็นเบตนิ่งแล้วระบบจะหยุด สามารถคาดเดาปรากฏการณ์นี้ได้จากค่าความดันตกคร่อมโรเตอร์ ถ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเกิน  $180 \text{ mmH}_2\text{O}$  ให้หยุดการให้อากาศที่ช่องเติมอากาศ( $Q_A = 0$ ) และปรับให้ปริมาณอากาศปฐมภูมิสูงขึ้นทันที

4. ในการทดลอง  $Q_A$  จะใช้ได้ในช่วงแคบๆ และปริมาณไม่สูงมากดังกล่าวไว้แล้วในข้อเสนอนี้ ข้อที่ 3 ดังนั้นในการทดลองจึงไม่สามารถทำให้เบดที่อยู่เหนือตำแหน่งช่องเดิมอากาศอยู่ในภาวะฟลูอิไดเซชันแบบฟองก๊าซ(bubbling fluidization) ได้ ซึ่งที่ภาวะดังกล่าวจะทำให้  $G_s$  มีค่าสูงสุด และอาจจะทำให้เห็นผลของ  $W_t$  ที่มีต่อ  $G_s$  อย่างชัดเจนขึ้น
5. เครื่อง CFB ที่ใช้ในการทดลองเมื่อใช้งานติดต่อกันนานเกิน 2 ชั่วโมง จะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตขึ้นซึ่งสังเกตได้จากถ่านหินที่เคลื่อนที่ขึ้นในท่อโรเตอร์ หยุดนิ่งอยู่บริเวณผนังท่อ และอัตราการไหลของถ่านหินลดลง จึงควรหยุดพักเครื่องประมาณ 1 – 2 ชั่วโมง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

1. Grace, J. R., Avedan, A. A., and Knowlton, T. M. Circulating Fluidized Beds, London: Chapman & Hall, 1997.
2. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดเซชัน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
3. Kunii, D., and Levenspiel, O. Fluidization engineering, New York: John Wiley and Sons Inc, 1969.
4. Arena, U.; Langeli, C. B.; and Cammarota A. L-valve Behaviour with Solids of Different Size and Density. Powder Technology 98 (1998): 231-240.
5. Kunii, D.; and Levenspiel, O. Circulating fluidized-bed reactors. Chemical Engineering Science 52 (1997): 2471-2482.
6. Pham, H. L.; and Bhattacharya, S. C. A study of solid circulation rate in a circulating fluidized bed. International journal of energy research 17 (1993): 479-490.
7. Geldart, D.; and Jonnes, P. The behaviour of L-valve with granular powders. Powder Technology 67 (1991): 163-174.
8. Daous, M. A.; and Al-Zahrani, A. A. Modeling solids and gas flow through an L-valve. Powder Technology 99 (1998): 86-98.
9. Huilin, L.; Guangbo, Z.; Rushan, B.; et al. A coal combustion model for circulating fluidized bed boilers. Fuel 79 ( 2000): 165-172.
10. Fujima, Y.; Deguchi, S.; and Endo T. Simulation of solid concentration profile in CFB with different fluid/solid density ratios. Chemical Engineering Science 54 (1999): 5507-5513.
11. Yang, W. C.; and Knowlton, T. M. L-valve equations. Powder Technology 77 (1993): 49-54.
12. เข็ดชัย วุฒิการณณ์ และ เกียรติกร ไกร ตั้งสกุล. การออกแบบสร้างเพื่อศึกษาการทำงานของฟลูอิดไดเซชันชนิดหมุนเวียน วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2533.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลการหาความหนาแน่นบัลด์ และความหนาแน่นของถ่านหิน  
วิธีการหาความหนาแน่นบัลด์และความหนาแน่นของถ่านหิน
  - 1) เตรียมปิกเกอร์ที่แห้งขนาด 500 มิลลิตร บันทึกน้ำหนักปิกเกอร์
  - 2) ใส่ถ่านหินลงในปิกเกอร์ดังกล่าวให้ได้ระดับ 500 มิลลิตร บันทึกน้ำหนักที่ได้
  - 3) ทำซ้ำข้อ 1 และ 2 อย่างน้อย 3 ครั้ง
  - 4) นำปิกเกอร์ที่บรรจุถ่านหินแล้วในการทดลองครั้งใดครั้งหนึ่งมาแทนที่อากาศด้วยน้ำ (เติมน้ำจนระดับถ่านหิน + น้ำ ได้ 500 มิลลิตรพอดี และไม่มีฟองอากาศอยู่ภายใน) บันทึกน้ำหนักที่ได้

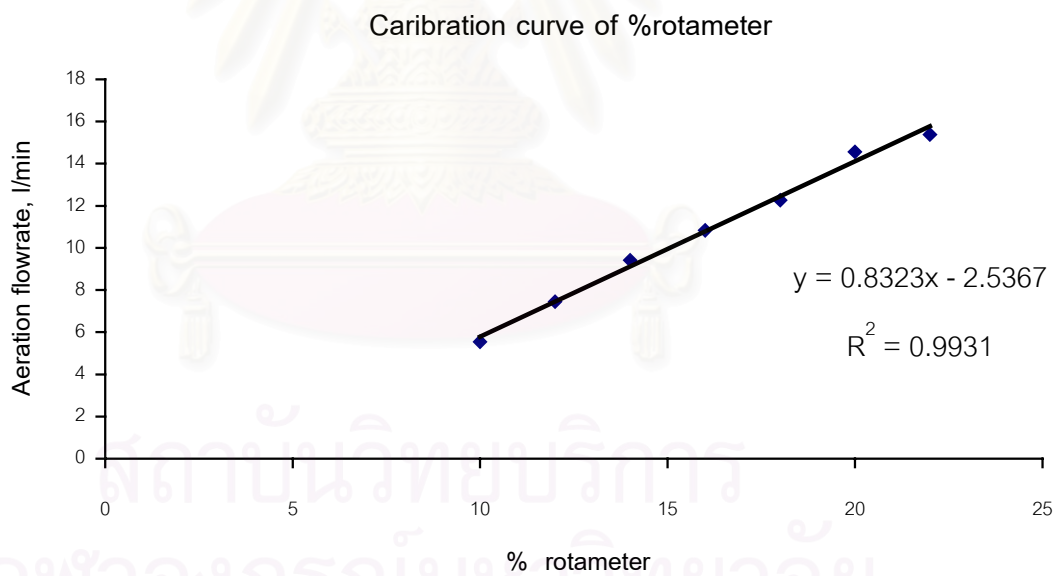
ข้อมูลที่ได้จากวิธีการหาความหนาแน่นบัลด์และความหนาแน่นถ่านหินข้างต้น มีดังนี้

- 1) น้ำหนักปิกเกอร์แห้ง เท่ากับ 241 กรัม
  - 2) น้ำหนักปิกเกอร์แห้ง+เบต 500 มิลลิตร สำหรับข้อมูลชุดที่ 1 เท่ากับ 573.8 กรัม  
สำหรับข้อมูลชุดที่ 2 เท่ากับ 580.8 กรัม  
สำหรับข้อมูลชุดที่ 3 เท่ากับ 579.4 กรัม
  - 3) น้ำหนักปิกเกอร์แห้ง+เบต 500 มิลลิตร+น้ำ(อาศัยข้อมูลชุดที่ 3) เท่ากับ 834.6 กรัม
2. ข้อมูลแสดงสัดส่วนโดยน้ำหนักของการกระจายขนาดถ่านหินที่ใช้ทดลอง  
งานวิจัยนี้จะศึกษากรณีที่มีขนาดถ่านหินคงที่ ดังนั้น สัดส่วนโดยน้ำหนักของการกระจายขนาดถ่านหินที่ใช้ทดลองจะเท่ากันทุกปริมาณของแข็งในระบบที่เปลี่ยนไป โดยมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของการกระจายขนาดถ่านหินในแต่ละช่วง ดังแสดงในตารางข้างล่างนี้

ช่วงขนาดของถ่านหิน (ไมครอน)	สัดส่วนโดยน้ำหนักของ ถ่านหิน
500 – 600	0.294
600 – 850	0.467
850 – 1180	0.117
1180 – 2360	0.081
2360 – 4750	0.041

3. ข้อมูลการ calibrate อุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิด rotameter จาก % เป็นลิตรต่อนาที สำหรับใช้ในการทดลองตอนที่ 1 ได้ดังตารางข้างล่างนี้

% rotameter	เวลาที่อากาศไหลได้ 500 ซม. <sup>3</sup>			Q <sub>A</sub>	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	l/min	m <sup>3</sup> /hr
10	5.26	5.56	5.41	5.55	0.333
12	4.03	4.03	4.03	7.44	0.447
14	3.21	3.16	3.19	9.42	0.565
16	2.76	2.78	2.77	10.83	0.650
18	2.45	2.44	2.45	12.27	0.736
20	2.06	2.06	2.06	14.56	0.874
22	1.96	1.94	1.95	15.38	0.923



รูปที่ ๘1 กราฟผลการทำ calibration อุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิด rotameter

- หมายเหตุ ใช้ bubble flow meter ขนาด 500 ซม.<sup>3</sup> เป็นอุปกรณ์ในการ calibrate

#### 4. ข้อมูลการทดลองตอนที่ 1

ใช้แอลกอฮอล์ 0 องศา ปริมาณอากาศป้อน =  $200 \text{ m}^3/\text{hr}$

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 0 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 6.05 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
$Q_A = 0.0 \%$	10.3	9.0	7.0	6.5	6.5	4.2	0.9	0.0	0.0	0	0
$Q_A = 13.0 \%$	10.3	9.0	7.0	6.5	6.5	4.0	1.8	2.2	1.0	8.57	8.34
$Q_A = 15.0 \%$	11.1	9.1	8.3	7.2	6.3	3.4	2.5	2.9	2.0	5.47	5.85
$Q_A = 17.0 \%$	12.0	9.6	8.5	7.0	6.5	3.6	2.6	3.1	2.0	4.01	4.08
$Q_A = 19.0 \%$	14.5	12.3	11.2	8.2	6.8	3.0	2.0	3.3	5.0	4.2	4.25

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 6 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 6.05 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	10.3	9.0	7.0	6.5	6.5	4.2	0.9	0.00	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 11.0 %	10.5	8.2	7.1	6.5	6.4	4.0	1.8	0.80	2.0	17.19	17.16
Q <sub>a</sub> = 13.0 %	10.3	8.5	7.2	6.4	6.3	3.6	2.0	1.45	2.0	7.89	7.78
Q <sub>a</sub> = 15.0 %	11.5	9.3	8.0	6.6	6.4	3.7	2.7	1.55	2.0	5.25	5.69
Q <sub>a</sub> = 16.0 %	12.5	10.4	9.3	7.6	6.5	3.4	2.5	1.75	5.0	5.26	5.07
Q <sub>a</sub> = 18.0 %	14.5	12.5	11.5	8.0	6.7	3.2	2.0	2.05	5.0	4.75	4.79
Q <sub>a</sub> = 12.0 %	10.5	8.2	7.2	7.0	7.0	4.4	1.1	1.35	2.0	8.45	8.33
Q <sub>a</sub> = 12.0 %	10.8	8.5	7.3	6.8	6.6	4.0	1.8	1.25	2.0	9.87	10.26
Q <sub>a</sub> = 12.0 %	11.8	9.1	8.3	7.8	7.6	4.7	3.6	1.50	2.0	7.55	7.9

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 12 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 6.05 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	10.8	8.5	7.3	7.0	6.9	4.4	0.4	0.0	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 12.0 %	10.6	8.2	7.5	6.5	6.3	4.0	1.8	1.5	2.0	16.18	15.84
Q <sub>a</sub> = 14.0 %	11.6	9.1	7.6	6.6	6.5	4.0	3.0	1.7	2.0	5.68	5.27
Q <sub>a</sub> = 17.0 %	11.6	9.4	8.0	6.7	6.5	3.7	2.7	1.9	2.0	4.17	4.23
Q <sub>a</sub> = 19.0 %	12.5	10.3	9.2	7.8	6.6	3.4	2.0	2.3	5.0	5.54	5.42
Q <sub>a</sub> = 21.0 %	14.5	12.1	10.3	8.2	6.6	3.4	2.2	2.6	5.0	3.54	3.55

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 0 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 6.5 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	10.4	8.0	7.3	7.0	7.0	4.5	0.7	0.0	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 12.0 %	10.1	7.7	7.0	6.6	6.6	4.0	1.8	2.5	2.0	10	11.45
Q <sub>a</sub> = 13.5 %	11.0	8.5	7.6	6.9	6.9	4.2	3.0	2.9	2.0	4.91	5.34
Q <sub>a</sub> = 15.0 %	12.0	9.6	8.4	7.1	6.6	3.9	2.8	3.3	2.0	3.93	4.05
Q <sub>a</sub> = 17.0 %	13.5	11.2	9.7	8.0	6.7	3.4	2.5	3.5	5.0	4.52	4.43
Q <sub>a</sub> = 18.0 %	14.5	12.5	12.0			3.4	2.0	3.8	5.0	2.93	2.88



ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 6 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 6.5 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	10.0	7.3	7.0	6.9	6.8	4.2	0.9	0.0	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 12.0 %	11.0	8.3	7.6	6.9	6.8	4.2	3.0	1.4	2.0	9.58	9.5
Q <sub>a</sub> = 13.0 %	11.5	9.1	8.0	7.1	6.9	4.3	3.2	1.6	2.0	4.27	4.14
Q <sub>a</sub> = 14.5 %	12.0	9.5	8.3	7.2	6.6	3.8	2.7	1.7	2.0	3.31	3.42
Q <sub>a</sub> = 18.0 %	13.2	11.1	9.8	8.2	7.0	3.3	2.2	2.0	5.0	3.57	3.49

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 12 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 6.5 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	10.2	8.0	7.1	6.8	6.7	4.3	1.0	0.00	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 12.5 %	11.2	8.8	7.7	7.2	6.9	3.7	2.0	1.50	2.0	9.48	10.01
Q <sub>a</sub> = 14.5 %	11.5	9.0	7.9	6.8	6.6	3.8	3.0	1.65	2.0	5.69	5.33
Q <sub>a</sub> = 17.0 %	13.0	10.8	9.6	7.9	6.8	3.4	2.4	2.35	5.0	5.17	5.48
Q <sub>a</sub> = 18.0 %	13.5	12.0	11.0	8.8	6.8	3.2	2.0	2.40	5.0	4.9	4.76
Q <sub>a</sub> = 18.5 %	14.0	12.0	11.2	8.8	6.9	3.5	2.1	2.60	5.0	3.28	3.32

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 0 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 7 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	10.8	8.7	7.7		7.1	4.7	0.2	0.0	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 12.0 %	11.2	9.0	8.0	7.2	7.0	4.5	3.5	2.6	2.0	14.71	14.66
Q <sub>a</sub> = 13.0 %	11.3	8.8	7.6	6.9	6.7	4.0	3.0	3.0	2.0	5.65	5.33
Q <sub>a</sub> = 14.0 %	11.6	9.3	8.0	7.0	6.6	4.0	2.9	3.1	2.0	4.94	4.6
Q <sub>a</sub> = 16.0 %	13.1	10.8	9.8	7.5	6.7	3.3	2.0	3.3	5.0	5.46	5.5
Q <sub>a</sub> = 17.0 %	14.3	12.2	11.4	8.5	6.7	3.2	2.0	3.4	5.0	3.38	3.42

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 6 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 7 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	10.3	8.0	7.1	6.8	6.7	4.3	0.8	0.0	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 11.0 %	10.4	8.2	7.1	6.6	6.5	4.0	1.9	1.4	2.0	10.705	10.935
Q <sub>a</sub> = 13.5 %	11.1	8.8	7.7	6.8	6.6	3.8	2.8	1.5	2.0	4.42	4.78
Q <sub>a</sub> = 15.0 %	12.8	10.6	9.2	7.5	6.6	3.5	2.5	1.8	5.0	6.68	6.79
Q <sub>a</sub> = 17.0 %	13.5	12.5	11.3	8.2	7.0	3.3	2.1	2.0	5.0	3.39	3.31

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 12 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 7 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	10.6	8.2	7.2	6.7	6.7	4.2	1.0	0.0	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 12.5 %	10.7	8.3	7.2	6.6	6.4	3.6	2.0	1.5	2.0	9.49	9.96
Q <sub>a</sub> = 14.0 %	11.3	9.1	7.9	6.9	6.7	4.0	2.9	1.8	2.0	4.96	4.56
Q <sub>a</sub> = 15.5 %	12.4	10.1	8.6	7.2	6.5	3.3	2.5	2.0	2.0	3.69	3.22
Q <sub>a</sub> = 16.5 %	12.9	10.5	9.4	7.8	6.8	3.5	2.4	2.3	5.0	4.41	4.85

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 0 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 7.5 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	10.0	7.9	7.3	7.0	7.0	4.5	0.7	0.00	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 10.5 %	10.0	7.9	7.3	7.0	7.0	4.5	0.7	2.10	1.0	18.72	18.94
Q <sub>a</sub> = 12.0 %	10.0	7.9	7.2	6.7	6.6	4.0	2.0	2.55	2.0	12.42	12.15
Q <sub>a</sub> = 14.0 %	10.8	8.5	7.6	6.9	6.8	4.2	3.2	2.80	2.0	6.19	6.32
Q <sub>a</sub> = 16.0 %	13.0	10.9	8.3	7.5	6.6	3.2	2.0	3.40	5.0	3.79	3.84
Q <sub>a</sub> = 17.0 %	16.5	14.8	13.8	8.8	6.6	3.0	1.9	3.60	5.0	2.84	3.03

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 6 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 7.5 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	11.0	8.5	7.4	6.5	6.5	4.0	1.2	0.00	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 11.0 %	11.2	8.8	7.4	6.5	6.5	3.8	1.9	1.55	2.0	18.74	19.12
Q <sub>a</sub> = 12.0 %	11.3	8.7	7.5	6.5	6.5	3.1	2.0	1.65	2.0	7.54	7.95
Q <sub>a</sub> = 13.0 %	112.0	9.9	8.5	7.0	6.7	3.8	2.8	1.65	2.0	4.4	4.56
Q <sub>a</sub> = 15.0 %	13.0	10.8	9.3	7.2	6.5	3.3	2.3	1.70	2.0	3.4	3.66
Q <sub>a</sub> = 16.0 %	12.8	10.5	9.4	7.5	7.0	3.4	2.3	1.85	5.0	6.61	6.52
Q <sub>a</sub> = 17.0 %	14.0	12.5	11.3	8.3	7.0	3.3	2.3	2.15	5.0	2.55	2.6

ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 12 cm

ปริมาณถ่านหินในระบบ 7.5 kg

% Rotameter	ความดัน (cmH <sub>2</sub> O) ณ ตำแหน่ง							ความดันตำแหน่งช่องเติมอากาศ (cmHg)	เวลาที่เบดเคลื่อนที่ใน Downcomer(sec)		
	1	2	3	14	15	16	17		ระยะทาง(cm)	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
Q <sub>a</sub> = 0.0 %	10.6	8.1	7.2	6.8	6.7	4.2	0.9	0.0	0.0	0	0
Q <sub>a</sub> = 11.0 %	10.6	8.2	7.2	6.6	6.5	3.9	2.0	1.7	2.0	16.95	16.57
Q <sub>a</sub> = 11.5 %	10.6	8.3	7.3	6.7	6.5	6.4	2.0	1.5	2.0	12.48	12.2
Q <sub>a</sub> = 12.5 %	10.2	8.0	7.1	6.8	6.5	4.0	2.1	1.6	2.0	6.53	6.81
Q <sub>a</sub> = 13.5 %	11.9	9.1	8.1	7.1	6.7	3.6	2.7	1.7	2.0	2.91	2.95
Q <sub>a</sub> = 14.0 %	11.0	8.8	7.8	6.8	6.7	4.0	3.1	1.7	2.0	4.33	4.58
Q <sub>a</sub> = 15.0 %	12.7	10.5	9.3	7.8	6.8	3.2	2.2	2.0	5.0	7.4	7.68
Q <sub>a</sub> = 16.0 %	113.3	11.0	10.1	7.6	6.8	3.3	2.3	2.1	2.0	2.21	2.28
Q <sub>a</sub> = 17.0 %	14.0	12.3	11.2	8.2	7.0	3.3	2.3	2.6	5.0	3.66	3.71



## 5. ข้อมูลการทดลองตอนที่ 2

มุมแอลวาล์ว                      0 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ        7.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O												เวลาที่เบดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)					
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลวาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x = ครั้งที่ 1      ครั้งที่ 2			
0	ครั้งที่ 1	126	ครั้งที่ 1	5	ครั้งที่ 1	-2.1	ครั้งที่ 1	75	ครั้งที่ 1	134	ครั้งที่ 1	37	ครั้งที่ 1	29.2			x =	0
	ครั้งที่ 2	128	ครั้งที่ 2	5.5	ครั้งที่ 2	-2.8	ครั้งที่ 2	77	ครั้งที่ 2	136	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	30.1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
	เฉลี่ย	127	เฉลี่ย	5.25	เฉลี่ย	-2.45	เฉลี่ย	76	เฉลี่ย	135	เฉลี่ย	38.5	เฉลี่ย	29.65	เฉลี่ย	0		
6	ครั้งที่ 1	240	ครั้งที่ 1	7	ครั้งที่ 1	120	ครั้งที่ 1	21	ครั้งที่ 1	170	ครั้งที่ 1	34	ครั้งที่ 1	27	x =	2	cm.	
	ครั้งที่ 2	260	ครั้งที่ 2	6	ครั้งที่ 2	150	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	200	ครั้งที่ 2	37	ครั้งที่ 2	28	ครั้งที่ 1	7.64	ครั้งที่ 2	12.01
	เฉลี่ย	250	เฉลี่ย	6.5	เฉลี่ย	135	เฉลี่ย	21.5	เฉลี่ย	185	เฉลี่ย	35.5	เฉลี่ย	27.5	เฉลี่ย	9.825		
8	ครั้งที่ 1	270	ครั้งที่ 1	20	ครั้งที่ 1	140	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	240	ครั้งที่ 1	40	ครั้งที่ 1	26	x =	3	cm.	
	ครั้งที่ 2	300	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	170	ครั้งที่ 2	16	ครั้งที่ 2	270	ครั้งที่ 2	44	ครั้งที่ 2	27	ครั้งที่ 1	9.67	ครั้งที่ 2	9.81
	เฉลี่ย	285	เฉลี่ย	21	เฉลี่ย	155	เฉลี่ย	15	เฉลี่ย	255	เฉลี่ย	42	เฉลี่ย	26.5	เฉลี่ย	9.74		
10	ครั้งที่ 1	350	ครั้งที่ 1	40	ครั้งที่ 1	200	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	290	ครั้งที่ 1	43	ครั้งที่ 1	23	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	370	ครั้งที่ 2	46	ครั้งที่ 2	220	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	310	ครั้งที่ 2	52	ครั้งที่ 2	24	ครั้งที่ 1	3.57	ครั้งที่ 2	3.77
	เฉลี่ย	360	เฉลี่ย	43	เฉลี่ย	210	เฉลี่ย	17.5	เฉลี่ย	300	เฉลี่ย	47.5	เฉลี่ย	23.5	เฉลี่ย	3.67		
12	ครั้งที่ 1	400	ครั้งที่ 1	100	ครั้งที่ 1	210	ครั้งที่ 1	19	ครั้งที่ 1	380	ครั้งที่ 1	52	ครั้งที่ 1	20	x =	10	cm.	
	ครั้งที่ 2	430	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	230	ครั้งที่ 2	18	ครั้งที่ 2	410	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 1	4.48	ครั้งที่ 2	4.4
	เฉลี่ย	415	เฉลี่ย	105	เฉลี่ย	220	เฉลี่ย	18.5	เฉลี่ย	395	เฉลี่ย	56	เฉลี่ย	21	เฉลี่ย	4.44		

ครั้งที่ 2

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เบดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)				
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลวาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x =			
0	ครั้งที่ 1	126	ครั้งที่ 1	5	ครั้งที่ 1	-0.2	ครั้งที่ 1	60	ครั้งที่ 1	113	ครั้งที่ 1	36	ครั้งที่ 1	27.5	x =	0	cm.	
	ครั้งที่ 2	127	ครั้งที่ 2	6	ครั้งที่ 2	-0.7	ครั้งที่ 2	62	ครั้งที่ 2	114	ครั้งที่ 2	39	ครั้งที่ 2	28	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	เฉลี่ย	126.5	เฉลี่ย	5.5	เฉลี่ย	-0.45	เฉลี่ย	61	เฉลี่ย	113.5	เฉลี่ย	37.5	เฉลี่ย	27.75	เฉลี่ย	0		
6	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	6	ครั้งที่ 1	140	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	210	ครั้งที่ 1	37	ครั้งที่ 1	27	x =	3	cm.	
	ครั้งที่ 2	280	ครั้งที่ 2	7	ครั้งที่ 2	160	ครั้งที่ 2	16	ครั้งที่ 2	230	ครั้งที่ 2	41	ครั้งที่ 2	28	ครั้งที่ 1	13.31	ครั้งที่ 2	14.32
	เฉลี่ย	270	เฉลี่ย	6.5	เฉลี่ย	150	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	220	เฉลี่ย	39	เฉลี่ย	27.5	เฉลี่ย	13.815		
7	ครั้งที่ 1	270	ครั้งที่ 1	7	ครั้งที่ 1	150	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	42	ครั้งที่ 1	26.5	x =	3	cm.	
	ครั้งที่ 2	320	ครั้งที่ 2	10	ครั้งที่ 2	190	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	270	ครั้งที่ 2	46	ครั้งที่ 2	27.5	ครั้งที่ 1	7.03	ครั้งที่ 2	7.14
	เฉลี่ย	295	เฉลี่ย	8.5	เฉลี่ย	170	เฉลี่ย	16	เฉลี่ย	260	เฉลี่ย	44	เฉลี่ย	27	เฉลี่ย	7.085		
8	ครั้งที่ 1	290	ครั้งที่ 1	20	ครั้งที่ 1	165	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	270	ครั้งที่ 1	41	ครั้งที่ 1	26	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	320	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	195	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	280	ครั้งที่ 2	48	ครั้งที่ 2	27	ครั้งที่ 1	7.67	ครั้งที่ 2	7.12
	เฉลี่ย	305	เฉลี่ย	21	เฉลี่ย	180	เฉลี่ย	15	เฉลี่ย	275	เฉลี่ย	44.5	เฉลี่ย	26.5	เฉลี่ย	7.395		
9	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	28	ครั้งที่ 1	180	ครั้งที่ 1	17	ครั้งที่ 1	280	ครั้งที่ 1	43	ครั้งที่ 1	22	x =	10	cm.	
	ครั้งที่ 2	370	ครั้งที่ 2	79	ครั้งที่ 2	220	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	340	ครั้งที่ 2	78	ครั้งที่ 2	25	ครั้งที่ 1	9.89	ครั้งที่ 2	5.95
	เฉลี่ย	335	เฉลี่ย	53.5	เฉลี่ย	200	เฉลี่ย	19.5	เฉลี่ย	310	เฉลี่ย	60.5	เฉลี่ย	23.5	เฉลี่ย	7.92		
10	ครั้งที่ 1	330	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	200	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	21	x =	10	cm.	
	ครั้งที่ 2	470	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	240	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	440	ครั้งที่ 2	66	ครั้งที่ 2	26	ครั้งที่ 1	9.3	ครั้งที่ 2	2.74
	เฉลี่ย	400	เฉลี่ย	74	เฉลี่ย	220	เฉลี่ย	18.5	เฉลี่ย	370	เฉลี่ย	55.5	เฉลี่ย	23.5	เฉลี่ย	6.02		

มุมแอลวาล์ว                      0 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ        6.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เบดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)		
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลวาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x =            cm. ครั้งที่ 1                      ครั้งที่ 2	
0	ครั้งที่ 1	110	ครั้งที่ 1	4	ครั้งที่ 1	-1.8	ครั้งที่ 1	54	ครั้งที่ 1	100	ครั้งที่ 1	35	ครั้งที่ 1	29.2		
	ครั้งที่ 2	128	ครั้งที่ 2	5.5	ครั้งที่ 2	-2.8	ครั้งที่ 2	77	ครั้งที่ 2	136	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	30.1		
	เฉลี่ย	119	เฉลี่ย	4.75	เฉลี่ย	-2.3	เฉลี่ย	65.5	เฉลี่ย	118	เฉลี่ย	37.5	เฉลี่ย	29.65	เฉลี่ย	0
7	ครั้งที่ 1	265	ครั้งที่ 1	9	ครั้งที่ 1	152	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	233	ครั้งที่ 1	41	ครั้งที่ 1	28	ครั้งที่ 1                      ครั้งที่ 2	
	ครั้งที่ 2	295	ครั้งที่ 2	8	ครั้งที่ 2	188	ครั้งที่ 2	15	ครั้งที่ 2	250	ครั้งที่ 2	44	ครั้งที่ 2	29		
	เฉลี่ย	280	เฉลี่ย	8.5	เฉลี่ย	170	เฉลี่ย	14	เฉลี่ย	241.5	เฉลี่ย	42.5	เฉลี่ย	28.5	เฉลี่ย	9.46
8	ครั้งที่ 1	290	ครั้งที่ 1	16	ครั้งที่ 1	170	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	230	ครั้งที่ 1	41	ครั้งที่ 1	26	ครั้งที่ 1                      ครั้งที่ 2	
	ครั้งที่ 2	350	ครั้งที่ 2	26	ครั้งที่ 2	212	ครั้งที่ 2	18	ครั้งที่ 2	300	ครั้งที่ 2	53	ครั้งที่ 2	26.7		
	เฉลี่ย	320	เฉลี่ย	21	เฉลี่ย	191	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	265	เฉลี่ย	47	เฉลี่ย	26.35	เฉลี่ย	7.58
9	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	30	ครั้งที่ 1	180	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	290	ครั้งที่ 1	44	ครั้งที่ 1	25	ครั้งที่ 1                      ครั้งที่ 2	
	ครั้งที่ 2	370	ครั้งที่ 2	42	ครั้งที่ 2	220	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	330	ครั้งที่ 2	63	ครั้งที่ 2	26		
	เฉลี่ย	335	เฉลี่ย	36	เฉลี่ย	200	เฉลี่ย	17	เฉลี่ย	310	เฉลี่ย	53.5	เฉลี่ย	25.5	เฉลี่ย	7.88
10	ครั้งที่ 1	330	ครั้งที่ 1	30	ครั้งที่ 1	210	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	24	ครั้งที่ 1                      ครั้งที่ 2	
	ครั้งที่ 2	400	ครั้งที่ 2	66	ครั้งที่ 2	230	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	360	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	25		
	เฉลี่ย	365	เฉลี่ย	48	เฉลี่ย	220	เฉลี่ย	17	เฉลี่ย	330	เฉลี่ย	57.5	เฉลี่ย	24.5	เฉลี่ย	4.745



มุมแอลกอลัว 0 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ 5.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เบดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)		
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลกอลัว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x = _____ cm. ครั้งที่ 1 _____ ครั้งที่ 2 _____	
0	ครั้งที่ 1	117	ครั้งที่ 1	3	ครั้งที่ 1	-2	ครั้งที่ 1	73	ครั้งที่ 1	100	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	28.3		
	ครั้งที่ 2	119	ครั้งที่ 2	4	ครั้งที่ 2	-3	ครั้งที่ 2	75	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	29		
	เฉลี่ย	118	เฉลี่ย	3.5	เฉลี่ย	-2.5	เฉลี่ย	74	เฉลี่ย	105	เฉลี่ย	39	เฉลี่ย	28.65	เฉลี่ย	0
7	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	8	ครั้งที่ 1	150	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	220	ครั้งที่ 1	43	ครั้งที่ 1	32	x = _____ cm. ครั้งที่ 1 _____ ครั้งที่ 2 _____	
	ครั้งที่ 2	290	ครั้งที่ 2	10	ครั้งที่ 2	190	ครั้งที่ 2	15	ครั้งที่ 2	240	ครั้งที่ 2	47	ครั้งที่ 2	33		
	เฉลี่ย	275	เฉลี่ย	9	เฉลี่ย	170	เฉลี่ย	14.5	เฉลี่ย	230	เฉลี่ย	45	เฉลี่ย	32.5	เฉลี่ย	10.175
8	ครั้งที่ 1	280	ครั้งที่ 1	12	ครั้งที่ 1	160	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	240	ครั้งที่ 1	44	ครั้งที่ 1	30.5	x = _____ cm. ครั้งที่ 1 _____ ครั้งที่ 2 _____	
	ครั้งที่ 2	310	ครั้งที่ 2	10	ครั้งที่ 2	185	ครั้งที่ 2	15	ครั้งที่ 2	260	ครั้งที่ 2	49	ครั้งที่ 2	31.5		
	เฉลี่ย	295	เฉลี่ย	11	เฉลี่ย	172.5	เฉลี่ย	14	เฉลี่ย	250	เฉลี่ย	46.5	เฉลี่ย	31	เฉลี่ย	8.955
9	ครั้งที่ 1	310	ครั้งที่ 1	26	ครั้งที่ 1	180	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	280	ครั้งที่ 1	46	ครั้งที่ 1	30	x = _____ cm. ครั้งที่ 1 _____ ครั้งที่ 2 _____	
	ครั้งที่ 2	370	ครั้งที่ 2	45	ครั้งที่ 2	205	ครั้งที่ 2	16	ครั้งที่ 2	320	ครั้งที่ 2	57	ครั้งที่ 2	30		
	เฉลี่ย	340	เฉลี่ย	35.5	เฉลี่ย	192.5	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	300	เฉลี่ย	51.5	เฉลี่ย	30	เฉลี่ย	8.755
10	ครั้งที่ 1	310	ครั้งที่ 1	32	ครั้งที่ 1	200	ครั้งที่ 1	18	ครั้งที่ 1	315	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	28	x = _____ cm. ครั้งที่ 1 _____ ครั้งที่ 2 _____	
	ครั้งที่ 2	390	ครั้งที่ 2	55	ครั้งที่ 2	230	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	360	ครั้งที่ 2	64	ครั้งที่ 2	29		
	เฉลี่ย	350	เฉลี่ย	43.5	เฉลี่ย	215	เฉลี่ย	19	เฉลี่ย	337.5	เฉลี่ย	54.5	เฉลี่ย	28.5	เฉลี่ย	5.245









มุมแฉลวาล์ว 10 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ 7.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เบดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)			
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแฉลวาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x =	cm.	
0	ครั้งที่ 1	108	ครั้งที่ 1	3.5	ครั้งที่ 1	-2	ครั้งที่ 1	49	ครั้งที่ 1	92	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	31			ครั้งที่ 1
	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	4	ครั้งที่ 2	-2.5	ครั้งที่ 2	53	ครั้งที่ 2	93	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	32			
	เฉลี่ย	109	เฉลี่ย	3.75	เฉลี่ย	-2.25	เฉลี่ย	51	เฉลี่ย	92.5	เฉลี่ย	39	เฉลี่ย	31.5	เฉลี่ย	0	
5	ครั้งที่ 1	215	ครั้งที่ 1	6.3	ครั้งที่ 1	115	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	70	ครั้งที่ 1	39	ครั้งที่ 1	32.1	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	x = 3 cm. 7.31 7.23
	ครั้งที่ 2	245	ครั้งที่ 2	8.3	ครั้งที่ 2	135	ครั้งที่ 2	16	ครั้งที่ 2	200	ครั้งที่ 2	45	ครั้งที่ 2	32.5			
	เฉลี่ย	230	เฉลี่ย	7.3	เฉลี่ย	125	เฉลี่ย	14.5	เฉลี่ย	135	เฉลี่ย	42	เฉลี่ย	32.3	เฉลี่ย	7.27	
6	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	26	ครั้งที่ 1	120	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	240	ครั้งที่ 1	44	ครั้งที่ 1	27.2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	x = 10 cm. 10.73 3.48
	ครั้งที่ 2	400	ครั้งที่ 2	100	ครั้งที่ 2	180	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	370	ครั้งที่ 2	72	ครั้งที่ 2	22			
	เฉลี่ย	330	เฉลี่ย	63	เฉลี่ย	150	เฉลี่ย	16.5	เฉลี่ย	305	เฉลี่ย	58	เฉลี่ย	24.6	เฉลี่ย	7.105	
7	ครั้งที่ 1	285	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	155	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	46	ครั้งที่ 1	26.7	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	x = 20 cm. 10.86 2.55
	ครั้งที่ 2	400	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	175	ครั้งที่ 2	25	ครั้งที่ 2	370	ครั้งที่ 2	67	ครั้งที่ 2	22.2			
	เฉลี่ย	342.5	เฉลี่ย	74	เฉลี่ย	165	เฉลี่ย	20	เฉลี่ย	310	เฉลี่ย	56.5	เฉลี่ย	24.45	เฉลี่ย	6.705	
8	ครั้งที่ 1	330	ครั้งที่ 1	63	ครั้งที่ 1	160	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	310	ครั้งที่ 1	44	ครั้งที่ 1	26.5	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	x = 20 cm. 8.82 3.99
	ครั้งที่ 2	420	ครั้งที่ 2	125	ครั้งที่ 2	180	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	390	ครั้งที่ 2	63	ครั้งที่ 2	21.4			
	เฉลี่ย	375	เฉลี่ย	94	เฉลี่ย	170	เฉลี่ย	17.5	เฉลี่ย	350	เฉลี่ย	53.5	เฉลี่ย	23.95	เฉลี่ย	6.405	



มุมแฉลวาล์ว 10 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ 6.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O												เวลาที่เปิดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)		
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแฉลวาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit			ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ	
0	ครั้งที่ 1	107	ครั้งที่ 1	3	ครั้งที่ 1	-0.7	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	89	ครั้งที่ 1	37	ครั้งที่ 1	25.6	x = 0 cm.
	ครั้งที่ 2	111	ครั้งที่ 2	4	ครั้งที่ 2	-0.9	ครั้งที่ 2	50	ครั้งที่ 2	92	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	26.9	ครั้งที่ 1 14.61 ครั้งที่ 2 3.37
	เฉลี่ย	109	เฉลี่ย	3.5	เฉลี่ย	-0.8	เฉลี่ย	47.5	เฉลี่ย	90.5	เฉลี่ย	38.5	เฉลี่ย	26.25	เฉลี่ย 0
6	ครั้งที่ 1	258	ครั้งที่ 1	30	ครั้งที่ 1	138	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	239	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	24.3	x = 10 cm.
	ครั้งที่ 2	288	ครั้งที่ 2	35	ครั้งที่ 2	156	ครั้งที่ 2	16	ครั้งที่ 2	252	ครั้งที่ 2	50	ครั้งที่ 2	25.2	ครั้งที่ 1 14.61 ครั้งที่ 2 3.37
	เฉลี่ย	273	เฉลี่ย	32.5	เฉลี่ย	147	เฉลี่ย	14.5	เฉลี่ย	245.5	เฉลี่ย	47.5	เฉลี่ย	24.75	เฉลี่ย 8.99
7	ครั้งที่ 1	290	ครั้งที่ 1	39	ครั้งที่ 1	150	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	26	x = 20 cm.
	ครั้งที่ 2	400	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	180	ครั้งที่ 2	23	ครั้งที่ 2	360	ครั้งที่ 2	68	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 1 13.45 ครั้งที่ 2 4.28
	เฉลี่ย	345	เฉลี่ย	74.5	เฉลี่ย	165	เฉลี่ย	18	เฉลี่ย	310	เฉลี่ย	56.5	เฉลี่ย	23	เฉลี่ย 8.865
8	ครั้งที่ 1	330	ครั้งที่ 1	30	ครั้งที่ 1	140	ครั้งที่ 1	12	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	48	ครั้งที่ 1	24	x = 20 cm.
	ครั้งที่ 2	420	ครั้งที่ 2	140	ครั้งที่ 2	185	ครั้งที่ 2	21	ครั้งที่ 2	390	ครั้งที่ 2	73	ครั้งที่ 2	19	ครั้งที่ 1 14.58 ครั้งที่ 2 2.64
	เฉลี่ย	375	เฉลี่ย	85	เฉลี่ย	162.5	เฉลี่ย	16.5	เฉลี่ย	345	เฉลี่ย	60.5	เฉลี่ย	21.5	เฉลี่ย 8.61
9	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	50	ครั้งที่ 1	150	ครั้งที่ 1	12	ครั้งที่ 1	270	ครั้งที่ 1	50	ครั้งที่ 1	23.3	x = 20 cm.
	ครั้งที่ 2	450	ครั้งที่ 2	160	ครั้งที่ 2	200	ครั้งที่ 2	25	ครั้งที่ 2	390	ครั้งที่ 2	67	ครั้งที่ 2	19	ครั้งที่ 1 12.31 ครั้งที่ 2 2.09
	เฉลี่ย	375	เฉลี่ย	105	เฉลี่ย	175	เฉลี่ย	18.5	เฉลี่ย	330	เฉลี่ย	58.5	เฉลี่ย	21.15	เฉลี่ย 7.2



มุมแอลกาวล์ 10 องศา  
 ปริมาณถ่านหินในระบบ 5.5 kg  
 ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เปิดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)			
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลกาวล์		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x =	cm.	
0	ครั้งที่ 1	109	ครั้งที่ 1	3.5	ครั้งที่ 1	0	ครั้งที่ 1	47	ครั้งที่ 1	90	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	29			ครั้งที่ 1
	ครั้งที่ 2	111	ครั้งที่ 2	4	ครั้งที่ 2	-0.1	ครั้งที่ 2	50	ครั้งที่ 2	92	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	30	ครั้งที่ 1	8.61	ครั้งที่ 2
	เฉลี่ย	110	เฉลี่ย	3.75	เฉลี่ย	-0.05	เฉลี่ย	48.5	เฉลี่ย	91	เฉลี่ย	39	เฉลี่ย	29.5	เฉลี่ย	0	
5	ครั้งที่ 1	240	ครั้งที่ 1	7	ครั้งที่ 1	130	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	190	ครั้งที่ 1	41	ครั้งที่ 1	28.5	ครั้งที่ 1	3	ครั้งที่ 2
	ครั้งที่ 2	260	ครั้งที่ 2	8	ครั้งที่ 2	145	ครั้งที่ 2	16	ครั้งที่ 2	200	ครั้งที่ 2	49	ครั้งที่ 2	29.5	ครั้งที่ 1	8.61	ครั้งที่ 2
	เฉลี่ย	250	เฉลี่ย	7.5	เฉลี่ย	137.5	เฉลี่ย	14.5	เฉลี่ย	195	เฉลี่ย	45	เฉลี่ย	29	เฉลี่ย	9.005	
6	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	135	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	210	ครั้งที่ 1	47	ครั้งที่ 1	28	ครั้งที่ 1	10	ครั้งที่ 2
	ครั้งที่ 2	360	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	180	ครั้งที่ 2	21	ครั้งที่ 2	320	ครั้งที่ 2	67	ครั้งที่ 2	25	ครั้งที่ 1	12.04	ครั้งที่ 2
	เฉลี่ย	305	เฉลี่ย	37.5	เฉลี่ย	157.5	เฉลี่ย	17	เฉลี่ย	265	เฉลี่ย	57	เฉลี่ย	26.5	เฉลี่ย	7.55	
7	ครั้งที่ 1	270	ครั้งที่ 1	25	ครั้งที่ 1	135	ครั้งที่ 1	11	ครั้งที่ 1	220	ครั้งที่ 1	48	ครั้งที่ 1	27	ครั้งที่ 1	20	ครั้งที่ 2
	ครั้งที่ 2	380	ครั้งที่ 2	100	ครั้งที่ 2	185	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	330	ครั้งที่ 2	69	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 1	20.02	ครั้งที่ 2
	เฉลี่ย	325	เฉลี่ย	62.5	เฉลี่ย	160	เฉลี่ย	16.5	เฉลี่ย	275	เฉลี่ย	58.5	เฉลี่ย	24.5	เฉลี่ย	12.22	
8	ครั้งที่ 1	310	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	170	ครั้งที่ 1	12	ครั้งที่ 1	280	ครั้งที่ 1	49	ครั้งที่ 1	27	ครั้งที่ 1	20	ครั้งที่ 2
	ครั้งที่ 2	390	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	195	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	350	ครั้งที่ 2	72	ครั้งที่ 2	21	ครั้งที่ 1	13.44	ครั้งที่ 2
	เฉลี่ย	350	เฉลี่ย	82.5	เฉลี่ย	182.5	เฉลี่ย	17	เฉลี่ย	315	เฉลี่ย	60.5	เฉลี่ย	24	เฉลี่ย	8.375	



มุมแฉลวาล์ว 10 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ 4.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เปิดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)				
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแฉลวาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x =	cm.		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2				
0	ครั้งที่ 1	107	ครั้งที่ 1	3.5	ครั้งที่ 1	-1	ครั้งที่ 1	40	ครั้งที่ 1	88	ครั้งที่ 1	37	ครั้งที่ 1	28.8	x =	0	cm.	
	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	4	ครั้งที่ 2	-2	ครั้งที่ 2	50	ครั้งที่ 2	90	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	29.5	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
	เฉลี่ย	108.5	เฉลี่ย	3.75	เฉลี่ย	-1.5	เฉลี่ย	45	เฉลี่ย	89	เฉลี่ย	38.5	เฉลี่ย	29.15	เฉลี่ย	0		
5	ครั้งที่ 1	240	ครั้งที่ 1	7	ครั้งที่ 1	130	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	200	ครั้งที่ 1	42	ครั้งที่ 1	29	x =	3	cm.	
	ครั้งที่ 2	260	ครั้งที่ 2	8	ครั้งที่ 2	145	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	220	ครั้งที่ 2	46	ครั้งที่ 2	30	ครั้งที่ 1	11.03	ครั้งที่ 2	8.25
	เฉลี่ย	250	เฉลี่ย	7.5	เฉลี่ย	137.5	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	210	เฉลี่ย	44	เฉลี่ย	29.5	เฉลี่ย	9.64		
6	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	20	ครั้งที่ 1	150	ครั้งที่ 1	11	ครั้งที่ 1	220	ครั้งที่ 1	44	ครั้งที่ 1	27.2	x =	10	cm.	
	ครั้งที่ 2	310	ครั้งที่ 2	24	ครั้งที่ 2	170	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	270	ครั้งที่ 2	55	ครั้งที่ 2	28.3	ครั้งที่ 1	11.16	ครั้งที่ 2	6.34
	เฉลี่ย	285	เฉลี่ย	22	เฉลี่ย	160	เฉลี่ย	14	เฉลี่ย	245	เฉลี่ย	49.5	เฉลี่ย	27.75	เฉลี่ย	8.75		
7	ครั้งที่ 1	290	ครั้งที่ 1	36	ครั้งที่ 1	155	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	26.5	x =	20	cm.	
	ครั้งที่ 2	310	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	170	ครั้งที่ 2	15	ครั้งที่ 2	270	ครั้งที่ 2	52	ครั้งที่ 2	27.5	ครั้งที่ 1	13.78	ครั้งที่ 2	8.46
	เฉลี่ย	300	เฉลี่ย	38	เฉลี่ย	162.5	เฉลี่ย	14.5	เฉลี่ย	265	เฉลี่ย	48.5	เฉลี่ย	27	เฉลี่ย	11.12		
8	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	10	ครั้งที่ 1	160	ครั้งที่ 1	12	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	47	ครั้งที่ 1	27	x =	20	cm.	
	ครั้งที่ 2	380	ครั้งที่ 2	100	ครั้งที่ 2	190	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	340	ครั้งที่ 2	64	ครั้งที่ 2	24	ครั้งที่ 1	9	ครั้งที่ 2	4.7
	เฉลี่ย	340	เฉลี่ย	55	เฉลี่ย	175	เฉลี่ย	17	เฉลี่ย	300	เฉลี่ย	55.5	เฉลี่ย	25.5	เฉลี่ย	6.85		





มุมแอลกาวล์ 20 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ 7.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เบดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)		
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลกาวล์		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x = ครั้งที่ 1      ครั้งที่ 2	
0	ครั้งที่ 1	131	ครั้งที่ 1	4	ครั้งที่ 1	0	ครั้งที่ 1	19	ครั้งที่ 1	63	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	29.5		
	ครั้งที่ 2	132	ครั้งที่ 2	5	ครั้งที่ 2	-0.5	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	64	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	30.5	ครั้งที่ 1      ครั้งที่ 2	
	เฉลี่ย	131.5	เฉลี่ย	4.5	เฉลี่ย	-0.25	เฉลี่ย	19.5	เฉลี่ย	63.5	เฉลี่ย	39	เฉลี่ย	30	เฉลี่ย 0	
3	ครั้งที่ 1	160	ครั้งที่ 1	8	ครั้งที่ 1	60	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	125	ครั้งที่ 1	43	ครั้งที่ 1	32.5	x = 5 cm.	
	ครั้งที่ 2	240	ครั้งที่ 2	45	ครั้งที่ 2	100	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	200	ครั้งที่ 2	59	ครั้งที่ 2	29	ครั้งที่ 1 11.43      ครั้งที่ 2 2.28	
	เฉลี่ย	200	เฉลี่ย	26.5	เฉลี่ย	80	เฉลี่ย	17	เฉลี่ย	162.5	เฉลี่ย	51	เฉลี่ย	30.75	เฉลี่ย 6.855	
4	ครั้งที่ 1	80	ครั้งที่ 1	18	ครั้งที่ 1	65	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	140	ครั้งที่ 1	43	ครั้งที่ 1	27.5	x = 10 cm.	
	ครั้งที่ 2	280	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	21	ครั้งที่ 2	240	ครั้งที่ 2	68	ครั้งที่ 2	31.2	ครั้งที่ 1 11.55      ครั้งที่ 2 3.17	
	เฉลี่ย	180	เฉลี่ย	44	เฉลี่ย	87.5	เฉลี่ย	17	เฉลี่ย	190	เฉลี่ย	55.5	เฉลี่ย	29.35	เฉลี่ย 7.36	
5	ครั้งที่ 1	220	ครั้งที่ 1	35	ครั้งที่ 1	85	ครั้งที่ 1	12	ครั้งที่ 1	180	ครั้งที่ 1	49	ครั้งที่ 1	23.5	x = 10 cm.	
	ครั้งที่ 2	330	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	135	ครั้งที่ 2	23	ครั้งที่ 2	290	ครั้งที่ 2	65	ครั้งที่ 2	29	ครั้งที่ 1 7.14      ครั้งที่ 2 2.75	
	เฉลี่ย	275	เฉลี่ย	77.5	เฉลี่ย	110	เฉลี่ย	17.5	เฉลี่ย	235	เฉลี่ย	57	เฉลี่ย	26.25	เฉลี่ย 4.945	
6	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	60	ครั้งที่ 1	95	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	220	ครั้งที่ 1	52	ครั้งที่ 1	28.5	x = 20 cm.	
	ครั้งที่ 2	340	ครั้งที่ 2	140	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	21	ครั้งที่ 2	300	ครั้งที่ 2	74	ครั้งที่ 2	24	ครั้งที่ 1 7.82      ครั้งที่ 2 3.11	
	เฉลี่ย	300	เฉลี่ย	100	เฉลี่ย	107.5	เฉลี่ย	17.5	เฉลี่ย	260	เฉลี่ย	63	เฉลี่ย	26.25	เฉลี่ย 5.465	

มุมแอลกอลวี 20 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ 6.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เปิดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)				
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลกอลวี		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x =	cm.		
0	ครั้งที่ 1	117	ครั้งที่ 1	5	ครั้งที่ 1	0	ครั้งที่ 1	17	ครั้งที่ 1	59	ครั้งที่ 1	36	ครั้งที่ 1	29			ครั้งที่ 1	1
	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	5.5	ครั้งที่ 2	-1	ครั้งที่ 2	18	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	30	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
	เฉลี่ย	118.5	เฉลี่ย	5.25	เฉลี่ย	-0.5	เฉลี่ย	17.5	เฉลี่ย	59.5	เฉลี่ย	38	เฉลี่ย	29.5	เฉลี่ย	0		
3	ครั้งที่ 1	140	ครั้งที่ 1	7	ครั้งที่ 1	40	ครั้งที่ 1	11	ครั้งที่ 1	100	ครั้งที่ 1	42	ครั้งที่ 1	28	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	200	ครั้งที่ 2	30	ครั้งที่ 2	80	ครั้งที่ 2	15	ครั้งที่ 2	160	ครั้งที่ 2	56	ครั้งที่ 2	31.4	ครั้งที่ 1	18.75	ครั้งที่ 2	4.86
	เฉลี่ย	170	เฉลี่ย	18.5	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	13	เฉลี่ย	130	เฉลี่ย	49	เฉลี่ย	29.7	เฉลี่ย	11.805		
4	ครั้งที่ 1	180	ครั้งที่ 1	19	ครั้งที่ 1	70	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	140	ครั้งที่ 1	43	ครั้งที่ 1	30	x =	10	cm.	
	ครั้งที่ 2	250	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	19	ครั้งที่ 2	210	ครั้งที่ 2	63	ครั้งที่ 2	27	ครั้งที่ 1	11.92	ครั้งที่ 2	5.83
	เฉลี่ย	215	เฉลี่ย	39.5	เฉลี่ย	90	เฉลี่ย	17	เฉลี่ย	175	เฉลี่ย	53	เฉลี่ย	28.5	เฉลี่ย	8.875		
5	ครั้งที่ 1	200	ครั้งที่ 1	30	ครั้งที่ 1	80	ครั้งที่ 1	16	ครั้งที่ 1	160	ครั้งที่ 1	27	ครั้งที่ 1	26	x =	10	cm.	
	ครั้งที่ 2	270	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	25	ครั้งที่ 2	230	ครั้งที่ 2	64	ครั้งที่ 2	29	ครั้งที่ 1	7.51	ครั้งที่ 2	3.04
	เฉลี่ย	235	เฉลี่ย	50	เฉลี่ย	100	เฉลี่ย	20.5	เฉลี่ย	195	เฉลี่ย	45.5	เฉลี่ย	27.5	เฉลี่ย	5.275		
6	ครั้งที่ 1	230	ครั้งที่ 1	40	ครั้งที่ 1	95	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	190	ครั้งที่ 1	50	ครั้งที่ 1	26	x =	20	cm.	
	ครั้งที่ 2	350	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	310	ครั้งที่ 2	66	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 1	6.56	ครั้งที่ 2	4.36
	เฉลี่ย	290	เฉลี่ย	80	เฉลี่ย	107.5	เฉลี่ย	18	เฉลี่ย	250	เฉลี่ย	58	เฉลี่ย	24	เฉลี่ย	5.46		

มุมแอลงาล์ว 20 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ 5.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เบดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)			
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลงาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x =	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
0	ครั้งที่ 1	118	ครั้งที่ 1	6	ครั้งที่ 1	-1	ครั้งที่ 1	17	ครั้งที่ 1	60	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	25.5			
	ครั้งที่ 2	123	ครั้งที่ 2	7	ครั้งที่ 2	-2	ครั้งที่ 2	18	ครั้งที่ 2	61	ครั้งที่ 2	42	ครั้งที่ 2	26.5	ครั้งที่ 1 20.01 ครั้งที่ 2 4.75		
	เฉลี่ย	120.5	เฉลี่ย	6.5	เฉลี่ย	-1.5	เฉลี่ย	17.5	เฉลี่ย	60.5	เฉลี่ย	40	เฉลี่ย	26	เฉลี่ย 0		
3	ครั้งที่ 1	160	ครั้งที่ 1	7	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	110	ครั้งที่ 1	44	ครั้งที่ 1	27.5	x = 5 cm.		
	ครั้งที่ 2	190	ครั้งที่ 2	15	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	16	ครั้งที่ 2	140	ครั้งที่ 2	49	ครั้งที่ 2	26	ครั้งที่ 1 20.01 ครั้งที่ 2 4.75		
	เฉลี่ย	175	เฉลี่ย	11	เฉลี่ย	52.5	เฉลี่ย	15	เฉลี่ย	125	เฉลี่ย	46.5	เฉลี่ย	26.75	เฉลี่ย 12.38		
4	ครั้งที่ 1	160	ครั้งที่ 1	8	ครั้งที่ 1	50	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	120	ครั้งที่ 1	44	ครั้งที่ 1	26	x = 10 cm.		
	ครั้งที่ 2	250	ครั้งที่ 2	35	ครั้งที่ 2	90	ครั้งที่ 2	18	ครั้งที่ 2	210	ครั้งที่ 2	57	ครั้งที่ 2	23	ครั้งที่ 1 13.2 ครั้งที่ 2 5.36		
	เฉลี่ย	205	เฉลี่ย	21.5	เฉลี่ย	70	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	165	เฉลี่ย	50.5	เฉลี่ย	24.5	เฉลี่ย 9.28		
5	ครั้งที่ 1	210	ครั้งที่ 1	35	ครั้งที่ 1	70	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	170	ครั้งที่ 1	44	ครั้งที่ 1	24.5	x = 10 cm.		
	ครั้งที่ 2	290	ครั้งที่ 2	80	ครั้งที่ 2	115	ครั้งที่ 2	21	ครั้งที่ 2	250	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 1 8.75 ครั้งที่ 2 3.07		
	เฉลี่ย	250	เฉลี่ย	57.5	เฉลี่ย	92.5	เฉลี่ย	17.5	เฉลี่ย	210	เฉลี่ย	57	เฉลี่ย	23.25	เฉลี่ย 5.91		
6	ครั้งที่ 1	240	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	90	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	19	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	24	x = 20 cm.		
	ครั้งที่ 2	310	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	23	ครั้งที่ 2	260	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	21	ครั้งที่ 1 8.29 ครั้งที่ 2 4.16		
	เฉลี่ย	275	เฉลี่ย	82.5	เฉลี่ย	105	เฉลี่ย	18.5	เฉลี่ย	139.5	เฉลี่ย	57.5	เฉลี่ย	22.5	เฉลี่ย 6.225		

มุมแอลกาวล์ 20 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ 4.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เบดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)		
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลกาวล์		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x = $\frac{\text{ครั้งที่ 1}}{\text{ครั้งที่ 2}}$ cm.	ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2
0	ครั้งที่ 1	128	ครั้งที่ 1	4.5	ครั้งที่ 1	-0.5	ครั้งที่ 1	19	ครั้งที่ 1	63	ครั้งที่ 1	37	ครั้งที่ 1	25		
	ครั้งที่ 2	130	ครั้งที่ 2	5.5	ครั้งที่ 2	-1.2	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	64	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	26		
	เฉลี่ย	129	เฉลี่ย	5	เฉลี่ย	-0.85	เฉลี่ย	19.5	เฉลี่ย	63.5	เฉลี่ย	38.5	เฉลี่ย	25.5	เฉลี่ย	0
3	ครั้งที่ 1	160	ครั้งที่ 1	7	ครั้งที่ 1	50	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	120	ครั้งที่ 1	44	ครั้งที่ 1	25.5	x = $\frac{5}{26.13}$ cm.	ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2
	ครั้งที่ 2	190	ครั้งที่ 2	8	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	16	ครั้งที่ 2	130	ครั้งที่ 2	47	ครั้งที่ 2	26		
	เฉลี่ย	175	เฉลี่ย	7.5	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	15	เฉลี่ย	125	เฉลี่ย	45.5	เฉลี่ย	25.75	เฉลี่ย	17.435
4	ครั้งที่ 1	200	ครั้งที่ 1	27	ครั้งที่ 1	80	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	170	ครั้งที่ 1	48	ครั้งที่ 1	24	x = $\frac{10}{10.61}$ cm.	ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2
	ครั้งที่ 2	230	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	90	ครั้งที่ 2	19	ครั้งที่ 2	190	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	25		
	เฉลี่ย	215	เฉลี่ย	24.5	เฉลี่ย	85	เฉลี่ย	16.5	เฉลี่ย	180	เฉลี่ย	54	เฉลี่ย	24.5	เฉลี่ย	9.77
5	ครั้งที่ 1	220	ครั้งที่ 1	33	ครั้งที่ 1	90	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	180	ครั้งที่ 1	49	ครั้งที่ 1	23.5	x = $\frac{10}{7.61}$ cm.	ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2
	ครั้งที่ 2	250	ครั้งที่ 2	38	ครั้งที่ 2	100	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	210	ครั้งที่ 2	64	ครั้งที่ 2	24.5		
	เฉลี่ย	235	เฉลี่ย	35.5	เฉลี่ย	95	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	195	เฉลี่ย	56.5	เฉลี่ย	24	เฉลี่ย	6.455
6	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	105	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	210	ครั้งที่ 1	51	ครั้งที่ 1	23	x = $\frac{20}{9.31}$ cm.	ครั้งที่ 1 ครั้งที่ 2
	ครั้งที่ 2	290	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	125	ครั้งที่ 2	21	ครั้งที่ 2	250	ครั้งที่ 2	72	ครั้งที่ 2	21.5		
	เฉลี่ย	270	เฉลี่ย	54	เฉลี่ย	115	เฉลี่ย	18	เฉลี่ย	230	เฉลี่ย	61.5	เฉลี่ย	22.25	เฉลี่ย	7.535

มุมแอสเวลวาล์ว -10 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ 7.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เปิดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)		
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอสเวลวาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x = _____ cm. ครั้งที่ 1 _____ ครั้งที่ 2	(sec)
0	ครั้งที่ 1	108	ครั้งที่ 1	3	ครั้งที่ 1	-3	ครั้งที่ 1	53	ครั้งที่ 1	93	ครั้งที่ 1	37	ครั้งที่ 1	28		
	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	4	ครั้งที่ 2	-4	ครั้งที่ 2	55	ครั้งที่ 2	95	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	29.2		
	เฉลี่ย	109	เฉลี่ย	3.5	เฉลี่ย	-3.5	เฉลี่ย	54	เฉลี่ย	94	เฉลี่ย	38.5	เฉลี่ย	28.6	เฉลี่ย	0
8	ครั้งที่ 1	340	ครั้งที่ 1	17	ครั้งที่ 1	240	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	43	ครั้งที่ 1	28	x = _____ cm. ครั้งที่ 1 _____ ครั้งที่ 2	
	ครั้งที่ 2	400	ครั้งที่ 2	21	ครั้งที่ 2	260	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	350	ครั้งที่ 2	50	ครั้งที่ 2	29		
	เฉลี่ย	370	เฉลี่ย	19	เฉลี่ย	250	เฉลี่ย	15	เฉลี่ย	325	เฉลี่ย	46.5	เฉลี่ย	28.5	เฉลี่ย	8.85
9	ครั้งที่ 1	360	ครั้งที่ 1	23	ครั้งที่ 1	270	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	330	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	27	x = _____ cm. ครั้งที่ 1 _____ ครั้งที่ 2	
	ครั้งที่ 2	410	ครั้งที่ 2	35	ครั้งที่ 2	300	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	370	ครั้งที่ 2	53	ครั้งที่ 2	27.5		
	เฉลี่ย	385	เฉลี่ย	29	เฉลี่ย	285	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	350	เฉลี่ย	49	เฉลี่ย	27.25	เฉลี่ย	5.615
10	ครั้งที่ 1	350	ครั้งที่ 1	44	ครั้งที่ 1	240	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	370	ครั้งที่ 1	46	ครั้งที่ 1	25.1	x = _____ cm. ครั้งที่ 1 _____ ครั้งที่ 2	
	ครั้งที่ 2	450	ครั้งที่ 2	80	ครั้งที่ 2	300	ครั้งที่ 2	19	ครั้งที่ 2	420	ครั้งที่ 2	69	ครั้งที่ 2	26.3		
	เฉลี่ย	400	เฉลี่ย	62	เฉลี่ย	270	เฉลี่ย	16.5	เฉลี่ย	395	เฉลี่ย	57.5	เฉลี่ย	25.7	เฉลี่ย	5.81
0	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		x = _____ cm. ครั้งที่ 1 _____ ครั้งที่ 2	
	ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2			
	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0

ครั้งที่ 2

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เปิดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)				
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลวาส์		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x =	cm.		
0	ครั้งที่ 1	108	ครั้งที่ 1	3	ครั้งที่ 1	-3	ครั้งที่ 1	53	ครั้งที่ 1	93	ครั้งที่ 1	37	ครั้งที่ 1	28			x =	0
	ครั้งที่ 2	110	ครั้งที่ 2	4	ครั้งที่ 2	-4	ครั้งที่ 2	55	ครั้งที่ 2	95	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	29.2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
	เฉลี่ย	109	เฉลี่ย	3.5	เฉลี่ย	-3.5	เฉลี่ย	54	เฉลี่ย	94	เฉลี่ย	38.5	เฉลี่ย	28.6	เฉลี่ย	0		
7	ครั้งที่ 1	290	ครั้งที่ 1	8	ครั้งที่ 1	170	ครั้งที่ 1	12	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	26	x =	3	cm.	
	ครั้งที่ 2	330	ครั้งที่ 2	9	ครั้งที่ 2	210	ครั้งที่ 2	15	ครั้งที่ 2	250	ครั้งที่ 2	43	ครั้งที่ 2	28	ครั้งที่ 1	10.75	ครั้งที่ 2	11.26
	เฉลี่ย	310	เฉลี่ย	8.5	เฉลี่ย	190	เฉลี่ย	13.5	เฉลี่ย	275	เฉลี่ย	40.5	เฉลี่ย	27	เฉลี่ย	11.005		
8	ครั้งที่ 1	340	ครั้งที่ 1	20	ครั้งที่ 1	220	ครั้งที่ 1	12	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	40	ครั้งที่ 1	27.7	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	360	ครั้งที่ 2	21	ครั้งที่ 2	240	ครั้งที่ 2	15	ครั้งที่ 2	320	ครั้งที่ 2	43	ครั้งที่ 2	29	ครั้งที่ 1	10.39	ครั้งที่ 2	10.11
	เฉลี่ย	350	เฉลี่ย	20.5	เฉลี่ย	230	เฉลี่ย	13.5	เฉลี่ย	310	เฉลี่ย	41.5	เฉลี่ย	28.35	เฉลี่ย	10.25		
9	ครั้งที่ 1	350	ครั้งที่ 1	26	ครั้งที่ 1	230	ครั้งที่ 1	12	ครั้งที่ 1	340	ครั้งที่ 1	43	ครั้งที่ 1	25	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	450	ครั้งที่ 2	50	ครั้งที่ 2	300	ครั้งที่ 2	19	ครั้งที่ 2	420	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	28	ครั้งที่ 1	6.63	ครั้งที่ 2	3.54
	เฉลี่ย	400	เฉลี่ย	38	เฉลี่ย	265	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	380	เฉลี่ย	51.5	เฉลี่ย	26.5	เฉลี่ย	5.085		
10	ครั้งที่ 1	390	ครั้งที่ 1	40	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	12	ครั้งที่ 1	350	ครั้งที่ 1	4	ครั้งที่ 1	23	x =	10	cm.	
	ครั้งที่ 2	450	ครั้งที่ 2	80	ครั้งที่ 2	290	ครั้งที่ 2	19	ครั้งที่ 2	410	ครั้งที่ 2	64	ครั้งที่ 2	25.5	ครั้งที่ 1	8.18	ครั้งที่ 2	3.23
	เฉลี่ย	420	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	270	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	380	เฉลี่ย	34	เฉลี่ย	24.25	เฉลี่ย	5.705		
11	ครั้งที่ 1	415	ครั้งที่ 1	55	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	11	ครั้งที่ 1	370	ครั้งที่ 1	50	ครั้งที่ 1	21	x =	20	cm.	
	ครั้งที่ 2	510	ครั้งที่ 2	142	ครั้งที่ 2	300	ครั้งที่ 2	19	ครั้งที่ 2	470	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	24.5	ครั้งที่ 1	11.56	ครั้งที่ 2	3.98
	เฉลี่ย	462.5	เฉลี่ย	98.5	เฉลี่ย	280	เฉลี่ย	15	เฉลี่ย	420	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	22.75	เฉลี่ย	7.77		

มุมแอลงาล์ว                      -10 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ        6.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เปิดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)				
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลงาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2				
0	ครั้งที่ 1	117	ครั้งที่ 1	4	ครั้งที่ 1	-1.5	ครั้งที่ 1	70	ครั้งที่ 1	117	ครั้งที่ 1	37	ครั้งที่ 1	29.6	x =	0	cm.	
	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	4.5	ครั้งที่ 2	-1	ครั้งที่ 2	72	ครั้งที่ 2	118	ครั้งที่ 2	39	ครั้งที่ 2	31	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
	เฉลี่ย	118.5	เฉลี่ย	4.25	เฉลี่ย	-1.25	เฉลี่ย	71	เฉลี่ย	117.5	เฉลี่ย	38	เฉลี่ย	30.3	เฉลี่ย	0		
8	ครั้งที่ 1	320	ครั้งที่ 1	8	ครั้งที่ 1	210	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	280	ครั้งที่ 1	42	ครั้งที่ 1	30	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	360	ครั้งที่ 2	11	ครั้งที่ 2	250	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	310	ครั้งที่ 2	51	ครั้งที่ 2	31	ครั้งที่ 1	11.48	ครั้งที่ 2	5.07
	เฉลี่ย	340	เฉลี่ย	9.5	เฉลี่ย	230	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	295	เฉลี่ย	46.5	เฉลี่ย	30.5	เฉลี่ย	8.275		
9	ครั้งที่ 1	360	ครั้งที่ 1	19	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	320	ครั้งที่ 1	47	ครั้งที่ 1	28	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	430	ครั้งที่ 2	43	ครั้งที่ 2	300	ครั้งที่ 2	18	ครั้งที่ 2	390	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	29.7	ครั้งที่ 1	6.56	ครั้งที่ 2	1.9
	เฉลี่ย	395	เฉลี่ย	31	เฉลี่ย	275	เฉลี่ย	16	เฉลี่ย	355	เฉลี่ย	53.5	เฉลี่ย	28.85	เฉลี่ย	4.23		
10	ครั้งที่ 1	390	ครั้งที่ 1	36	ครั้งที่ 1	270	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	350	50	46	26.8	25.1	10	10	cm.	
	ครั้งที่ 2	450	ครั้งที่ 2	50	ครั้งที่ 2	290	ครั้งที่ 2	18	ครั้งที่ 2	400	ครั้งที่ 2	54	ครั้งที่ 2	27.7	ครั้งที่ 1	8.71	ครั้งที่ 2	4.24
	เฉลี่ย	420	เฉลี่ย	43	เฉลี่ย	280	เฉลี่ย	16.5	เฉลี่ย	375	เฉลี่ย	50	เฉลี่ย	26.4	เฉลี่ย	6.475		
11	ครั้งที่ 1	440	ครั้งที่ 1	60	ครั้งที่ 1	280	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	410	ครั้งที่ 1	55	ครั้งที่ 1	26	x =	20	cm.	
	ครั้งที่ 2	470	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	310	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	440	ครั้งที่ 2	67	ครั้งที่ 2	27	ครั้งที่ 1	8.56	ครั้งที่ 2	6.12
	เฉลี่ย	455	เฉลี่ย	65	เฉลี่ย	295	เฉลี่ย	16	เฉลี่ย	425	เฉลี่ย	61	เฉลี่ย	26.5	เฉลี่ย	7.34		

ครั้งที่ 2

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เบดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)				
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลวาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		x =	cm.		
0	ครั้งที่ 1	112	ครั้งที่ 1	3	ครั้งที่ 1	-1	ครั้งที่ 1	53	ครั้งที่ 1	96	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	30			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
	ครั้งที่ 2	112	ครั้งที่ 2	4	ครั้งที่ 2	-2	ครั้งที่ 2	55	ครั้งที่ 2	98	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	31	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
	เฉลี่ย	112	เฉลี่ย	3.5	เฉลี่ย	-1.5	เฉลี่ย	54	เฉลี่ย	97	เฉลี่ย	39	เฉลี่ย	30.5	เฉลี่ย	0		
8	ครั้งที่ 1	320	ครั้งที่ 1	20	ครั้งที่ 1	190	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	280	ครั้งที่ 1	43	ครั้งที่ 1	28	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	360	ครั้งที่ 2	23	ครั้งที่ 2	220	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	320	ครั้งที่ 2	47	ครั้งที่ 2	30	ครั้งที่ 1	8.58	ครั้งที่ 2	9.82
	เฉลี่ย	340	เฉลี่ย	21.5	เฉลี่ย	205	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	300	เฉลี่ย	45	เฉลี่ย	29	เฉลี่ย	9.2		
9	ครั้งที่ 1	360	ครั้งที่ 1	21	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	330	ครั้งที่ 1	51	ครั้งที่ 1	30	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	410	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	230	ครั้งที่ 2	17	ครั้งที่ 2	370	ครั้งที่ 2	43	ครั้งที่ 2	29	ครั้งที่ 1	5.68	ครั้งที่ 2	4.45
	เฉลี่ย	385	เฉลี่ย	21.5	เฉลี่ย	240	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	350	เฉลี่ย	47	เฉลี่ย	29.5	เฉลี่ย	5.065		
10	ครั้งที่ 1	370	ครั้งที่ 1	31	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	330	ครั้งที่ 1	47	ครั้งที่ 1	29	x =	10	cm.	
	ครั้งที่ 2	470	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	300	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	420	ครั้งที่ 2	73	ครั้งที่ 2	26	ครั้งที่ 1	8.41	ครั้งที่ 2	3.26
	เฉลี่ย	420	เฉลี่ย	45.5	เฉลี่ย	275	เฉลี่ย	17.5	เฉลี่ย	375	เฉลี่ย	60	เฉลี่ย	27.5	เฉลี่ย	5.835		
11	ครั้งที่ 1	410	ครั้งที่ 1	48	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	370	ครั้งที่ 1	48	ครั้งที่ 1	25.5	x =	20	cm.	
	ครั้งที่ 2	500	ครั้งที่ 2	120	ครั้งที่ 2	310	ครั้งที่ 2	20	ครั้งที่ 2	460	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	27.5	ครั้งที่ 1	11.27	ครั้งที่ 2	6.21
	เฉลี่ย	455	เฉลี่ย	84	เฉลี่ย	285	เฉลี่ย	17	เฉลี่ย	415	เฉลี่ย	59	เฉลี่ย	26.5	เฉลี่ย	8.74		
0	ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 1		x =		cm.	
	ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 2		ครั้งที่ 1		ครั้งที่ 2	
	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0	เฉลี่ย	0		



มุมแอลกาวล์ -10 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ 5.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เปิดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)				
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอลกาวล์		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2				
0	ครั้งที่ 1	110	ครั้งที่ 1	3.4	ครั้งที่ 1	-0.4	ครั้งที่ 1	55	ครั้งที่ 1	97	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	26	x =	0	cm.	
	ครั้งที่ 2	115	ครั้งที่ 2	3.7	ครั้งที่ 2	-0.7	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	99	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	27	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2		
	เฉลี่ย	112.5	เฉลี่ย	3.55	เฉลี่ย	-0.55	เฉลี่ย	57.5	เฉลี่ย	98	เฉลี่ย	39	เฉลี่ย	26.5	เฉลี่ย	0		
8	ครั้งที่ 1	340	ครั้งที่ 1	8	ครั้งที่ 1	210	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	42	ครั้งที่ 1	27.6	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	370	ครั้งที่ 2	11	ครั้งที่ 2	260	ครั้งที่ 2	18	ครั้งที่ 2	330	ครั้งที่ 2	49	ครั้งที่ 2	28.8	ครั้งที่ 1	14.13	ครั้งที่ 2	11.03
	เฉลี่ย	355	เฉลี่ย	9.5	เฉลี่ย	235	เฉลี่ย	15.5	เฉลี่ย	315	เฉลี่ย	45.5	เฉลี่ย	28.2	เฉลี่ย	12.58		
9	ครั้งที่ 1	350	ครั้งที่ 1	22	ครั้งที่ 1	230	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	45	ครั้งที่ 1	26.9	x =	5	cm.	
	ครั้งที่ 2	380	ครั้งที่ 2	25	ครั้งที่ 2	260	ครั้งที่ 2	18	ครั้งที่ 2	340	ครั้งที่ 2	52	ครั้งที่ 2	28.2	ครั้งที่ 1	8.42	ครั้งที่ 2	3.14
	เฉลี่ย	365	เฉลี่ย	23.5	เฉลี่ย	245	เฉลี่ย	16	เฉลี่ย	320	เฉลี่ย	48.5	เฉลี่ย	27.55	เฉลี่ย	5.78		
10	ครั้งที่ 1	360	ครั้งที่ 1	28	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	14	ครั้งที่ 1	350	50	46	26.8	23	10	10	cm.	
	ครั้งที่ 2	450	ครั้งที่ 2	62	ครั้งที่ 2	300	ครั้งที่ 2	22	ครั้งที่ 2	420	ครั้งที่ 2	64	ครั้งที่ 2	27.5	ครั้งที่ 1	9.02	ครั้งที่ 2	3.14
	เฉลี่ย	405	เฉลี่ย	45	เฉลี่ย	275	เฉลี่ย	18	เฉลี่ย	385	เฉลี่ย	55	เฉลี่ย	25.25	เฉลี่ย	6.08		
11	ครั้งที่ 1	390	ครั้งที่ 1	35	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	17	ครั้งที่ 1	360	ครั้งที่ 1	48	ครั้งที่ 1	25.9	x =	20	cm.	
	ครั้งที่ 2	430	ครั้งที่ 2	70	ครั้งที่ 2	310	ครั้งที่ 2	20	380	440	54	67	26.5	26.5	ครั้งที่ 1	11.35	ครั้งที่ 2	8.34
	เฉลี่ย	410	เฉลี่ย	52.5	เฉลี่ย	280	เฉลี่ย	18.5	เฉลี่ย	400	เฉลี่ย	57.5	เฉลี่ย	26.2	เฉลี่ย	9.845		



มุมแอสเวลวาล์ว                      -10 องศา

ปริมาณถ่านหินในระบบ              4.5 kg.

ครั้งที่ 1

Aeration flowrate (l/min)	ความดัน mmH <sub>2</sub> O													เวลาที่เปิดเคลื่อนที่ลงใน downcomer ได้ระยะทาง x cm (sec)	
	ความดันช่อง เติมอากาศ		ความดันตกคร่อม โรเตอร์		ความดันตก คร่อมแอสเวลวาล์ว		ความดันตกคร่อม ไซโคลน		ความดันตก คร่อม		ความดันตก คร่อม T-Exit		ความดันตกคร่อม ตัวกระจายอากาศ		
0	ครั้งที่ 1	111	ครั้งที่ 1	3.5	ครั้งที่ 1	-1.8	ครั้งที่ 1	54	ครั้งที่ 1	93	ครั้งที่ 1	38	ครั้งที่ 1	26.7	x = 0 cm. ครั้งที่ 1                      ครั้งที่ 2
	ครั้งที่ 2	112	ครั้งที่ 2	4	ครั้งที่ 2	-2.3	ครั้งที่ 2	60	ครั้งที่ 2	97	ครั้งที่ 2	40	ครั้งที่ 2	27.6	
	เฉลี่ย	111.5	เฉลี่ย	3.75	เฉลี่ย	-2.05	เฉลี่ย	57	เฉลี่ย	95	เฉลี่ย	39	เฉลี่ย	27.15	เฉลี่ย
8	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	7	ครั้งที่ 1	190	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	270	ครั้งที่ 1	43	ครั้งที่ 1	27.7	x = 5 cm. ครั้งที่ 1                      16.53                      ครั้งที่ 2                      14.75
	ครั้งที่ 2	340	ครั้งที่ 2	10	ครั้งที่ 2	230	ครั้งที่ 2	16	ครั้งที่ 2	280	ครั้งที่ 2	51	ครั้งที่ 2	26.5	
	เฉลี่ย	320	เฉลี่ย	8.5	เฉลี่ย	210	เฉลี่ย	14.5	เฉลี่ย	275	เฉลี่ย	47	เฉลี่ย	27.1	เฉลี่ย
9	ครั้งที่ 1	340	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	235	ครั้งที่ 1	13	ครั้งที่ 1	300	ครั้งที่ 1	47	ครั้งที่ 1	27.4	x = 5 cm. ครั้งที่ 1                      9.21                      ครั้งที่ 2                      5.83
	ครั้งที่ 2	370	ครั้งที่ 2	18	ครั้งที่ 2	255	ครั้งที่ 2	16	ครั้งที่ 2	340	ครั้งที่ 2	51	ครั้งที่ 2	26.5	
	เฉลี่ย	355	เฉลี่ย	16.5	เฉลี่ย	245	เฉลี่ย	14.5	เฉลี่ย	320	เฉลี่ย	49	เฉลี่ย	26.95	เฉลี่ย
10	ครั้งที่ 1	370	ครั้งที่ 1	27	ครั้งที่ 1	250	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	340	50	47	26.8	25.7	10                      10                      cm. ครั้งที่ 1                      11.75                      ครั้งที่ 2                      7.41
	ครั้งที่ 2	390	ครั้งที่ 2	30	ครั้งที่ 2	270	ครั้งที่ 2	19	ครั้งที่ 2	360	ครั้งที่ 2	53	ครั้งที่ 2	26.7	
	เฉลี่ย	380	เฉลี่ย	28.5	เฉลี่ย	260	เฉลี่ย	17	เฉลี่ย	350	เฉลี่ย	50	เฉลี่ย	26.2	เฉลี่ย
11	ครั้งที่ 1	400	ครั้งที่ 1	35	ครั้งที่ 1	260	ครั้งที่ 1	15	ครั้งที่ 1	360	ครั้งที่ 1	49	ครั้งที่ 1	25.2	x = 20 cm. ครั้งที่ 1                      12.82                      ครั้งที่ 2                      11.15
	ครั้งที่ 2	420	ครั้งที่ 2	45	ครั้งที่ 2	280	ครั้งที่ 2	17	380	380	54	57	26.5	27.1	
	เฉลี่ย	410	เฉลี่ย	40	เฉลี่ย	270	เฉลี่ย	16	เฉลี่ย	370	เฉลี่ย	53	เฉลี่ย	26.15	เฉลี่ย



## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณความหนาแน่นบัลด์์ของเบตการคำนวณความหนาแน่นของถ่านหิน

จากข้อมูลที่แสดงในภาคผนวก ก จะได้น้ำหนักเบต 500 มิลลิตร เท่ากับ

$$573.8 - 241 = 332.8 \text{ กรัม}$$

$$580.8 - 241 = 339.8 \text{ กรัม}$$

$$579.4 - 241 = 338.4 \text{ กรัม}$$

$$\text{จะได้ เบต 500 มิลลิตรหนักเฉลี่ย} = (332.8 + 339.8 + 338.4) / 3 = 337 \text{ กรัม}$$

$$\begin{aligned} \text{ฉะนั้น ความหนาแน่นบัลด์์} (\rho_B) &= (337/1000) \text{ กก.} / (500/10^6) \text{ ม.}^3 \\ &= 674 \text{ กก.ต่อ ลบ.ม.} \end{aligned}$$

จากข้อมูลชุดที่ 3 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เท่ากับ 255.2 กรัม

เนื่องจากความหนาแน่นน้ำมากกว่าอากาศมาก(ความหนาแน่นน้ำและอากาศเท่ากับ 1000 และ 1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ) ดังนั้นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจึงให้เป็นน้ำหนักน้ำที่แทนที่อากาศทั้งหมดในเบต

ดังนั้นถ่านหิน 338.4 กรัม จะมีปริมาตร =  $500 - 255.2$  ลบ.ซม. =  $244.8$  ลบ.ซม.

$$\begin{aligned} \text{จะได้ความหนาแน่นถ่านหิน} (\rho_s) &= (338.4/1000) \text{ กก.} / (244.8/10^6) \text{ ลบ.ม.} \\ &= 1381 \text{ กก.ต่อ ลบ.ม.} \end{aligned}$$

2. การคำนวณค่า Sauter mean diameter,  $d_{Sm}$

จากข้อมูลที่แสดงในภาคผนวก ก ข้อ 2

และสมการที่ 2.4

$$d_{Sm} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}}$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการข้างต้น จะได้

$$d_{Sm} = \frac{1}{\left( \frac{0.294}{550} + \frac{0.467}{725} + \frac{0.117}{1015} + \frac{0.081}{1770} + \frac{0.041}{3555} \right)}$$

ดังนั้น Sauter diameter เท่ากับ 740 ไมครอน

3. การคำนวณค่า terminal fluidization velocity,  $U_t$

จากสมการที่ 2.13

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4$$

เมื่อ

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\rho_s = 1381 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_g = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$d_p = d_{sm} = 0.00074 \text{ m}$$

$$\mu = 0.00002 \text{ kg/ms}$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการ 2.13 จะได้

$$U_{t,spherical} = \frac{9.8(1381-1)0.00074^2}{18(0.00002)}$$

$$U_{t,spherical} = 20.57$$

ตรวจค่า  $Re_p$  ว่าตรงตามเงื่อนไขหรือไม่

$$Re_p = \rho_g d_p U_t / \mu = (1 \times 0.00074 \times 20.57) / 0.00002$$

$$= 761.146$$

ดังนั้น  $U_t$  ที่หาได้โดยสมการที่ 2.13 จึงไม่ถูกต้องเนื่องจากค่า  $Re_p$  ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข

หาใหม่โดยอาศัยสมการที่ 2.14

$$U_{t,spherical} = \left[ \frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการ 2.14 จะได้

$$U_{t,spherical} = \left[ \frac{4(1381-1)^2 9.8^2}{225 \cdot 1(0.00002)} \right]^{1/3} 0.00074$$

$$U_{t,spherical} = 4.04$$

ตรวจค่า  $Re_p$  ว่าตรงตามเงื่อนไขหรือไม่

$$Re_p = \rho_g d_p U_t / \mu = (1 \times 0.00074 \times 4.04) / 0.00002$$

$$= 149$$

ดังนั้น  $U_t$  ที่หาได้โดยสมการที่ 2.14 จึงให้ค่าที่ถูกต้องเนื่องจากค่า  $Re_p$  เป็นไปตามเงื่อนไข

**หมายเหตุ** ถ้าค่า  $U_t$  ที่หาได้จากสมการที่ 2.14 ยังไม่เป็นไปตามเงื่อนไขอีก ให้ทำโดยอาศัยสมการที่ 2.15 ต่อไป

4. การเปลี่ยนอัตราการไหลในการทดลองตอนที่ 1 จาก % rotameter เป็นลิตรต่อนาที โดยอาศัยสมการเส้นตรงที่ได้จากการทำ calibrate ในภาคผนวก ก ข้อ 3 ดังนี้

$$y = 0.8323x - 2.5367$$

เมื่อ  $x$  = ค่าอัตราการไหลของอากาศผ่าน rotameter หน่วย %

$y$  = ค่าอัตราการไหลของอากาศผ่าน rotameter หน่วย ลิตรต่อนาที

ถ้าอ่าน rotameter ได้ 13% อัตราการไหลจริงจะเป็น  $0.8323(13) - 2.5367 = 8.28$  ลิตรต่อนาที

5. การหาความดันตกคร่อมแอลวาล์วในการทดลองตอนที่ 1

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ที่ตำแหน่งช่องเดิมอากาศ 0 ซม. ปริมาณของแก๊สในระบบ 6.05 กก. ที่อัตราการไหลของอากาศผ่าน rotameter 13%

ความดันที่ตำแหน่งช่องเดิมอากาศอ่านได้ 2.2 cmHg

ความดันที่ตำแหน่ง P2 อ่านได้ 9 cmH<sub>2</sub>O

ดังนั้น ความดันตกคร่อมแอลวาล์วเป็น  $2.2(1000/76) - 9 = 19.95$  cmH<sub>2</sub>O

**หมายเหตุ** ค่า (1000/76) คือการแปลงหน่วยจาก cmHg ไปเป็น cmH<sub>2</sub>O

6. การคำนวณอัตราการไหลย้อนกลับของถ่านหิน  $G_s$

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองตอนที่ 1 ที่ตำแหน่งช่องเดิมอากาศ 0 ซม. ปริมาณของแก๊สในระบบ 6.05 กก. ที่อัตราการไหลของอากาศผ่าน rotameter 13%

เบดเคลื่อนที่ในท่อ Downcomer ได้ระยะทาง 1 ซม. หรือ 0.01 เมตร ใช้เวลาครั้งที่ 1 เท่ากับ 8.57 วินาที ครั้งที่ 2 เท่ากับ 8.34 วินาที

$$G_s = \rho_B(\text{ความเร็วเบด})$$

$$= 674(0.01/8.57) = 0.786 \text{ kg/m}^2\text{s} \text{ (สำหรับครั้งที่ 1)}$$

และ  $G_s = 674(0.01/8.34) = 0.808 \text{ kg/m}^2\text{s} \text{ (สำหรับครั้งที่ 2)}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แอลวาล์วมุม 0 องศา

$$Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$$

ปริมาณ ถ่านหินใน ระบบ $W_t$ (kg)	ตำแหน่งของ Aeration โดยอ้างอิงที่จุดศูนย์กลางท่อที่ออกจาก Downcomer																	
	สูงขึ้นมา 0 cm หรือ ( $h_{AT}/d_D = 0$ )						สูงขึ้นมา 6 cm หรือ ( $h_{AT}/d_D = 1$ )						สูงขึ้นมา 12 cm หรือ ( $h_{AT}/d_D = 2$ )					
	ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับของ ถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง		ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับของ ถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง		ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับของ ถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)
7.5	6.20	0.36	0.36	0.36	2.10	19.73	6.62	0.72	0.71	0.71	1.55	11.59	6.62	0.80	0.81	0.80	1.70	14.17
	7.45	1.09	1.11	1.10	2.55	25.65	7.45	1.79	1.70	1.74	1.65	13.01	7.03	1.08	1.10	1.09	1.50	11.44
	9.12	2.18	2.13	2.16	2.80	28.34	8.28	3.06	2.96	3.01	1.65	11.81	7.87	2.06	1.98	2.02	1.60	13.05
	10.78	8.89	8.78	8.83	3.40	33.84	9.95	3.96	3.68	3.82	1.70	11.57	8.70	4.63	4.57	4.60	1.70	13.27
	11.61	11.87	11.12	11.49	3.60	32.57	10.78	5.10	5.17	5.13	1.85	13.84	9.12	3.11	2.94	3.03	1.70	13.57
							11.61	13.22	12.96	13.09	2.15	15.79	9.95	4.55	4.39	4.47	1.95	15.16
													10.78	6.10	5.91	6.01	2.10	16.63
													11.61	9.21	9.08	9.15	2.55	21.25

หมายเหตุ ผลการทดลองที่แสดงข้างต้นจะไม่นำผลการทดลองกรณีนี้  $Q_A$  เท่ากับ 0 มาศึกษา



แวลวาล์วมุม 0 องศา

$$Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$$

ปริมาณ ถ่านหินใน ระบบ $W_t$ (kg)	ตำแหน่งของ Aeration โดยอ้างอิงที่จุดศูนย์กลางท่อที่ออกจาก Downcomer																	
	สูงขึ้นมา 0 cm หรือ ( $h_{AT}/d_D = 0$ )						สูงขึ้นมา 6 cm หรือ ( $h_{AT}/d_D = 1$ )						สูงขึ้นมา 12 cm หรือ ( $h_{AT}/d_D = 2$ )					
	ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับของ ถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง		ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับของ ถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง		ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับของ ถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)
7	7.45	0.92	0.92	0.92	2.55	24.55	6.62	1.26	1.23	1.25	1.35	9.61	7.87	1.42	1.35	1.39	1.50	11.44
	8.28	2.39	2.53	2.46	2.95	30.02	8.70	3.05	2.82	2.93	1.50	10.94	9.12	2.72	2.96	2.84	1.75	13.93
	9.12	2.73	2.93	2.83	3.10	31.49	9.95	5.04	4.96	5.00	1.80	13.08	10.36	3.65	4.19	3.92	2.00	16.22
	10.78	6.17	6.13	6.15	3.25	31.96	11.61	9.94	10.18	10.06	2.00	13.82	11.20	7.64	6.95	7.30	2.30	19.76
	11.61	9.97	9.85	9.91	3.40	32.54												

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แอลวาล์วมุม 0 องศา

$$Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$$

ปริมาณ ถ่านหินใน ระบบ $W_t$ (kg)	ตำแหน่งของ Aeration โดยอ้างอิงที่จุดศูนย์กลางท่อที่ออกจาก Downcomer																	
	สูงขึ้นมา 0 cm. หรือ ( $h_{AT}/d_D = 0$ )						สูงขึ้นมา 6 cm. หรือ ( $h_{AT}/d_D = 1$ )						สูงขึ้นมา 12 cm. หรือ ( $h_{AT}/d_D = 2$ )					
	ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับ ของถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง		ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับ ของถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง		ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับ ของถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)
6.5	7.45	1.35	0.42	0.89	2.45	24.54	7.45	1.41	1.42	1.41	1.40	10.12	7.87	1.42	1.35	1.38	1.50	10.94
	8.70	2.75	0.91	1.83	2.90	29.66	8.28	3.16	3.26	3.21	1.60	11.95	9.53	2.37	2.53	2.45	1.65	12.71
	9.95	3.43	1.20	2.31	3.25	33.16	9.53	4.07	3.94	4.01	1.70	12.87	11.61	6.52	6.15	6.33	2.35	20.12
	11.61	7.46	2.74	5.10	3.50	34.85	12.44	9.44	9.66	9.55	2.00	15.22	12.44	6.88	7.08	6.98	2.40	19.58
	12.44	11.50	4.21	7.86	3.80	37.50							12.86	10.27	10.15	10.21	2.60	22.21

## ภาคผนวก ค

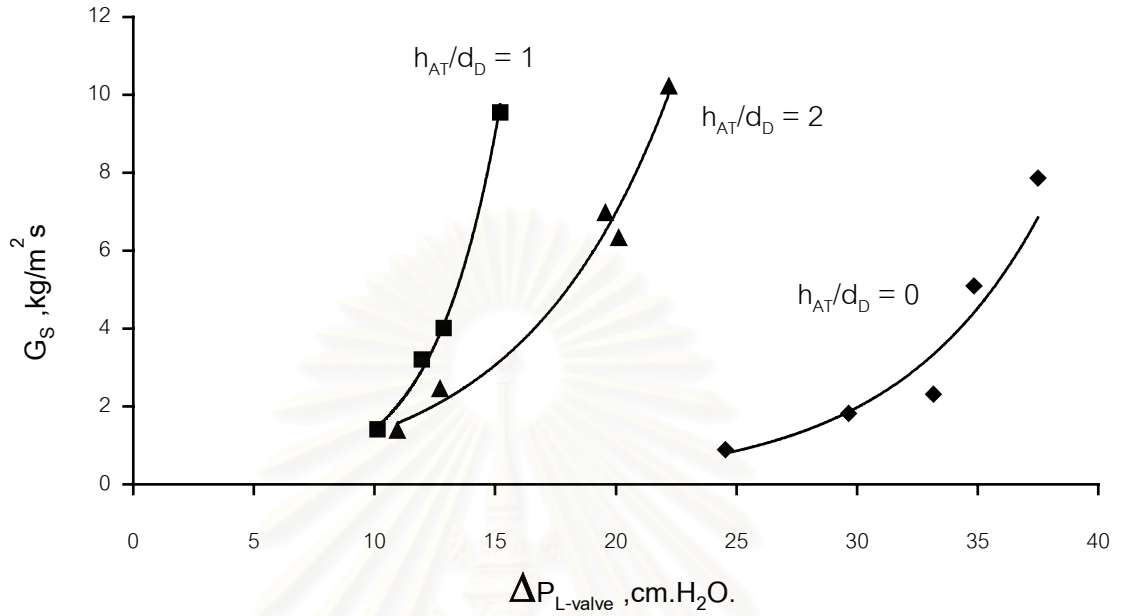
## 1. ผลการทดลองตอนที่ 1

แฉลววลัวมุม 0 องศา

$$Q = 200 \text{ m}^3/\text{hr}$$

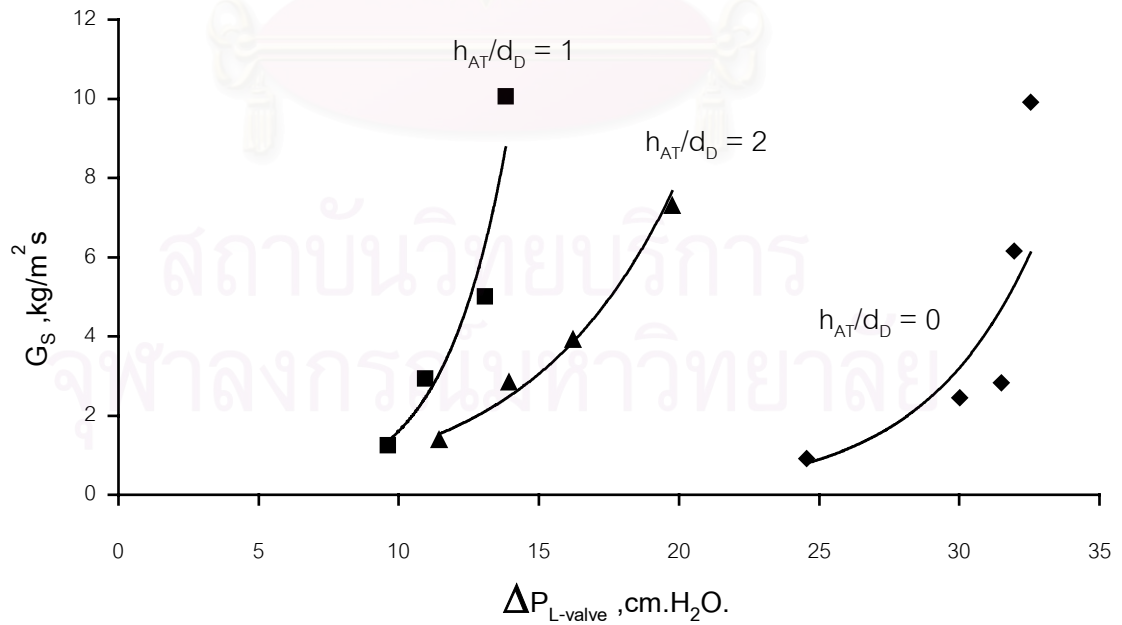
ปริมาณ ถ่านหินใน ระบบ $W_t$ (kg)	ตำแหน่งของ Aeration โดยอ้างอิงที่จุดศูนย์กลางท่อที่ออกจาก Downcomer																	
	สูงขึ้นมา 0 cm หรือ ( $h_{AT}/d_D = 0$ )						สูงขึ้นมา 6 cm หรือ ( $h_{AT}/d_D = 1$ )						สูงขึ้นมา 12 cm หรือ ( $h_{AT}/d_D = 2$ )					
	ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับ ของถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง		ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับ ของถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง		ปริมาณ Aeration $Q_A$ (l/min)	อัตราการไหลย้อนกลับของ ถ่านหิน $G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)			ความดันตำแหน่ง	
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	$P_{AT}$ (cmHg)	$\Delta P_{L-valve}$ (cmH <sub>2</sub> O)
6.05							6.62	0.78	0.79	0.78	0.80	2.33						
							8.28	1.71	1.73	1.72	1.45	10.58						
	8.28	0.79	0.81	0.80	2.15	19.29	9.95	2.57	2.37	2.47	1.55	11.09	7.45	0.83	0.85	0.84	1.50	11.54
	9.95	2.46	2.30	2.38	2.90	29.06	10.78	6.41	6.65	6.53	1.75	12.63	9.12	2.37	2.56	2.47	1.65	12.61
	11.61	3.36	3.30	3.33	3.10	31.19	12.44	7.09	7.04	7.07	2.05	14.47	11.61	3.23	3.19	3.21	1.90	15.60
	13.28	8.02	7.93	7.98	3.30	31.12	7.45	1.60	1.62	1.61	1.35	9.56	13.28	6.08	6.22	6.15	2.30	19.96
								7.45	1.37	1.31	1.34	1.25	7.95	14.94	9.52	9.49	9.51	2.60
							7.45	1.79	1.71	1.75	1.50	10.64						

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่  $W_t = 6.5 \text{ kg}$ .



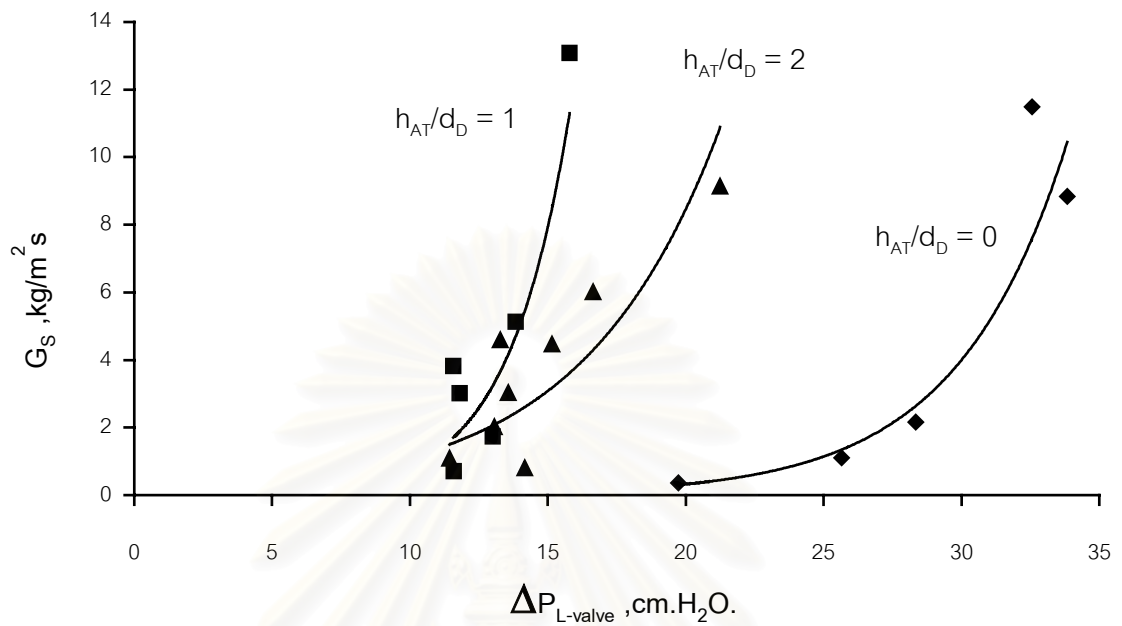
รูปที่ ๘2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่  $W_t = 6.5 \text{ kg}$  และ  $h_{AT}/d_D$  ต่างๆ กัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่  $W_t = 7 \text{ kg}$ .



รูปที่ ๘3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่  $W_t = 7 \text{ kg}$  และ  $h_{AT}/d_D$  ต่างๆ กัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่  $W_t = 7.5 \text{ kg}$ .



รูปที่ ๔4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่  $W_t = 7.5 \text{ kg}$  และ  $h_{AT}/d_D$  ต่างๆ กัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2. ผลการทดลองตอนที่ 2

ข้อมูลการทดลองศึกษาอิทธิพลของมุมของแฉลวาล์ว

$$Q = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณ ถ่านหินใน ระบบ $W_t$ (kg)	มุมแฉลวาล์ว (องศา)							
	0				10			
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)
7.5	6.00	250.00	135.00	1.37	5.00	230.00	125.00	2.78
	8.00	285.00	155.00	2.08	6.00	330.00	150.00	9.49
	10.00	360.00	210.00	9.18	7.00	342.50	165.00	20.10
	12.00	415.00	220.00	15.18	8.00	375.00	170.00	21.05
	6.00	270.00	150.00	1.46	5.00	245.00	125.00	2.92
	7.00	295.00	170.00	2.85	6.00	310.00	155.00	10.07
	8.00	305.00	180.00	4.56	7.00	350.00	172.50	19.30
	9.00	335.00	200.00	8.51	8.00	370.00	177.50	22.87
	10.00	400.00	220.00	11.20				

ข้อมูลการทดลองศึกษาอิทธิพลของมุมของแฉลวาล์ว

$$Q = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณ ถ่านหินใน ระบบ $W_t$ (kg)	มุมแฉลวาล์ว (องศา)							
	20				-10			
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)
7.5	3.00	200.00	80.00	4.92	8.00	370.00	250.00	3.81
	4.00	180.00	87.50	9.16	9.00	385.00	285.00	6.00
	5.00	275.00	110.00	13.63	10.00	400.00	270.00	11.60
	6.00	300.00	107.50	24.67				
					7.00	310.00	190.00	1.84
					8.00	350.00	230.00	3.29
					9.00	400.00	265.00	6.63
					10.00	420.00	270.00	11.81
					11.00	462.50	280.00	17.35

ข้อมูลการทดลองศึกษาอิทธิพลของมุมของแฉลวาล์ว

$$Q = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณ ถ่านหินใน ระบบ $W_t$ (kg)	มุมแฉลวาล์ว (องศา)							
	0				10			
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)
6.5	7.00	280.00	170.00	2.14	6.00	273.00	147.00	7.50
	8.00	320.00	191.00	4.45	7.00	345.00	165.00	15.21
	9.00	335.00	200.00	8.55	8.00	375.00	162.50	15.66
	10.00	365.00	220.00	14.20	9.00	375.00	175.00	18.72
	5.00	245.00	130.00	2.46				
	7.00	275.00	162.50	2.50	6.00	320.00	165.00	7.64
	8.00	300.00	180.00	3.59	7.00	330.00	162.50	11.35
	9.00	330.00	200.00	7.84	8.00	375.00	175.00	17.37
	10.00	365.00	215.00	12.86				



ข้อมูลการทดลองศึกษาอิทธิพลของมุมของแฉลวาล์ว

$$Q = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณ ถ่านหินใน ระบบ $W_t$ (kg.)	มุมแฉลวาล์ว (องศา)							
	20				-10			
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)
6.5	3.00	170.00	60.00	2.85	8.00	340.00	230.00	4.07
	4.00	215.00	90.00	7.59	9.00	395.00	275.00	7.97
	5.00	235.00	100.00	12.78	10.00	420.00	280.00	10.41
	6.00	290.00	107.50	24.69	11.00	455.00	295.00	18.37
					8.00	340.00	205.00	3.66
					9.00	385.00	240.00	6.65
					10.00	420.00	275.00	11.55
					11.00	455.00	285.00	15.42

ข้อมูลการทดลองศึกษาอิทธิพลของมุมของแฉลวาล์ว

$$Q = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณถ่าน หินในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแฉลวาล์ว (องศา)							
	0				10			
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)
5.5	7.00	275.00	170.00	1.99	5.00	250.00	137.50	2.25
	8.00	295.00	172.50	3.76	6.00	305.00	157.50	8.93
	9.00	340.00	192.50	7.70	7.00	325.00	160.00	11.03
	10.00	350.00	215.00	12.85	8.00	350.00	182.50	16.10
	9.00	340.00	210.00	8.04	7.50	345.00	162.50	10.67
	10.00	365.00	220.00	11.82	8.00	340.00	165.00	12.92
					8.50	370.00	175.00	12.64



ข้อมูลการทดลองศึกษาอิทธิพลของมุมของแฉลวาล์ว

$$Q = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณถ่าน หินในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแฉลวาล์ว (องศา)							
	0				10			
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)
4.5	7.00	270.00	160.00	1.47	5.00	250.00	137.50	2.10
	8.00	300.00	181.00	3.58	6.00	285.00	160.00	7.70
	10.00	360.00	220.00	10.69	7.00	300.00	162.50	12.12
					8.00	340.00	175.00	19.68
	8.00	300.00	187.50	3.87	8.00	335.00	167.50	18.19
	9.00	335.00	195.00	6.90	9.00	400.00	175.00	24.96
	10.00	370.00	207.50	10.65				
	11.00	400.00	235.00	18.19				

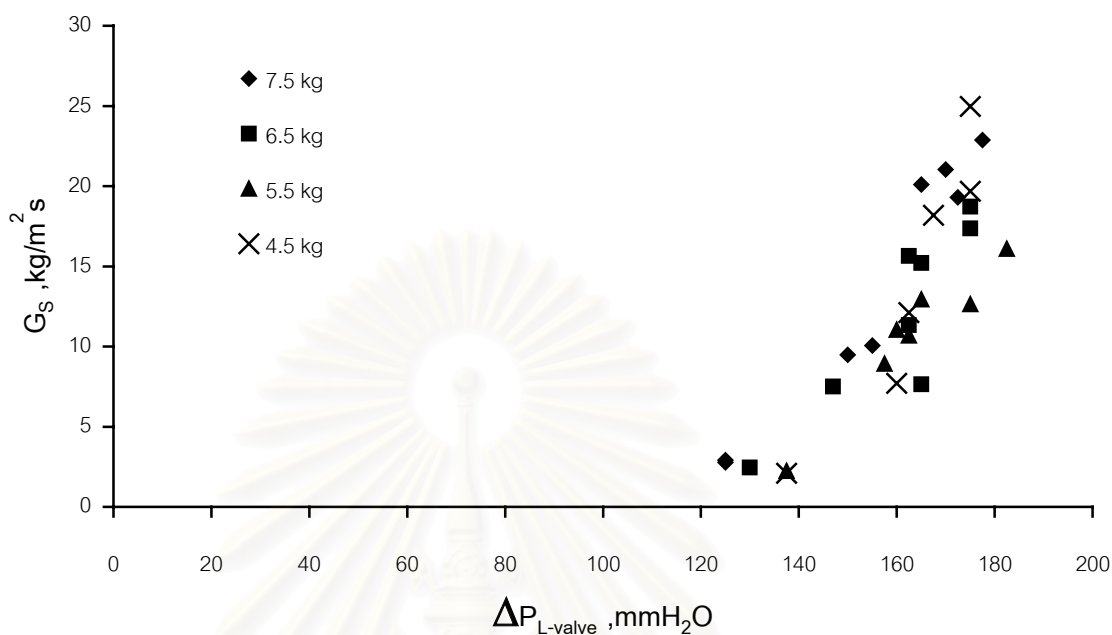
ข้อมูลการทดลองศึกษาอิทธิพลของมุมของแฉลวาล์ว

$$Q = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณถ่าน หินในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแฉลวาล์ว (องศา)							
	20				-10			
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)
4.5	3.00	175.00	60.00	1.93	8.00	320.00	210.00	2.15
	4.00	215.00	85.00	6.90	9.00	355.00	245.00	4.48
	5.00	235.00	95.00	10.44	10.00	380.00	260.00	7.04
	6.00	270.00	115.00	17.89	11.00	410.00	270.00	11.25
					8.00	330.00	210.00	2.11
					9.00	355.00	230.00	4.20
					10.00	365.00	255.00	7.78
					11.00	390.00	270.00	10.95

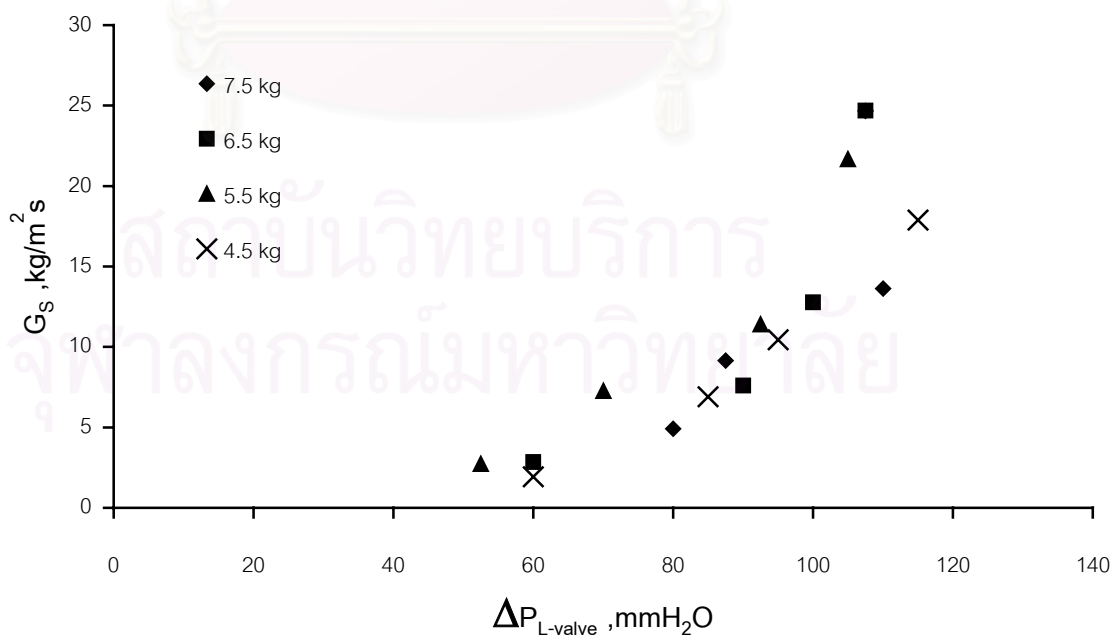
หมายเหตุ ผลการทดลองที่แสดงข้างต้นจะไม่นำผลการทดลองกรณีที่มี  $Q_A$  เท่ากับ 0 มาศึกษา

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์ววม 10 องศา



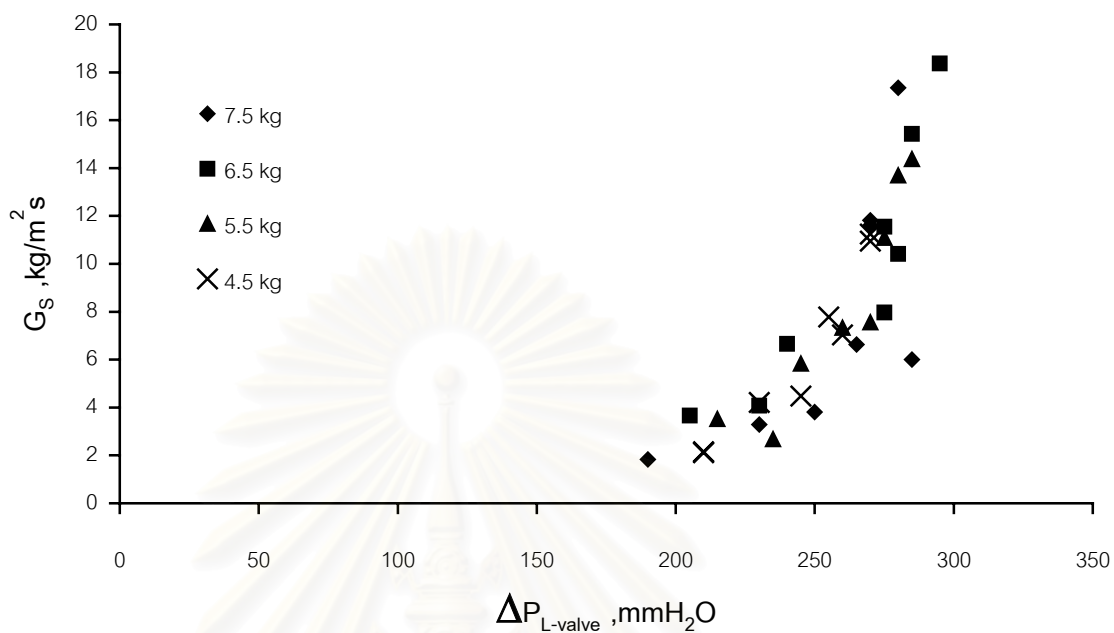
รูปที่ ๕5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์ววม 10 องศา  $W_t$  ต่างๆ กัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์ววม 20 องศา



รูปที่ ๕6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์ววม 20 องศา  $W_t$  ต่างๆ กัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์ววม -10 องศา



รูปที่ ๗7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\Delta P_{L\text{-valve}}$  กับ  $G_S$  ที่แอลวาล์ววม -10 องศา  $W_t$  ต่างๆ กัน

3.1 แสดงผลการเปรียบเทียบผลการทดลองกับสมการสหสัมพันธ์ของ Pham H. L. และ Bhattacharya S. C.<sup>(6)</sup> และของ U. Arena และคณะ<sup>(4)</sup>  
ผลการทดลองตอนที่ 1 ที่ตำแหน่งช่องเดิมอากาศ 6 cm  $Q_A = 200 \text{ m}^3/\text{hr}$

ปริมาณของ แข็งในระบบ $W_t$ (kg)	มุมของ L-valve (องศา)								
	0								
	$Q_A$ (l/min)	$U_A$ (m/s)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}/L_{L\text{-valve}}$ (Pa/m)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S1}/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S2}/(U_{mf}\rho_p)$	$(G_S^{0.178} \rho_B^{0.996} d_{Sm}^{-0.237} D_{L\text{-valve}}^{-0.574}) 10^3$
6.05	6.62	0.014	23.3	548.90	0.78	0.00	0.16	0.28	24.16
	8.28	0.02	105.79	2492.20	1.72	0.01	0.16	0.28	27.81
	9.95	0.02	110.95	2613.71	2.47	0.01	0.16	0.28	29.66
	10.78	0.02	126.26	2974.53	6.53	0.03	0.16	0.28	35.26
	12.44	0.03	144.74	3409.73	7.07	0.03	0.16	0.28	35.76
	7.45	0.016	95.6	2252.15	1.61	0.01	0.16	0.28	27.48
	7.45	0.016	79.5	1872.87	1.34	0.01	0.16	0.28	26.60
	7.45	0.016	106.4	2506.58	1.75	0.01	0.16	0.28	27.90
6.5	7.45	0.02	101.21	2384.33	1.41	0.01	0.16	0.28	26.85
	8.28	0.02	119.53	2815.82	3.21	0.01	0.16	0.28	31.07
	9.53	0.02	128.68	3031.56	4.01	0.02	0.16	0.28	32.33
	12.44	0.03	152.16	3584.56	9.55	0.04	0.16	0.28	37.73



ผลการทดลองตอนที่ 1 ที่ตำแหน่งช่องเติมอากาศ 6 cm  $Q_A = 200 \text{ m}^3/\text{hr}$

ปริมาณถ่าน หินในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแอลวาล์ว (องศา)								
	0								
	$Q_A$ (l/min)	$U_A$ (m/s)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}/L_{L\text{-valve}}$ (Pa/m)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S1}/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S2}/(U_{mf}\rho_p)$	$(G_S^{0.178} \rho_B^{0.996} d_{Sm}^{-0.237} D_{L\text{-valve}}^{-0.574}) 10^3$
7	6.62	0.01	96.13	2264.68	1.25	0.01	0.16	0.29	26.26
	8.70	0.02	109.37	2576.52	2.93	0.01	0.16	0.29	30.58
	9.95	0.02	130.84	3082.40	5.00	0.02	0.16	0.29	33.63
	11.61	0.02	138.16	3254.74	10.06	0.05	0.16	0.29	38.08
7.5	6.62	0.01	115.95	2731.50	0.71	0.00	0.17	0.29	23.77
	7.45	0.02	130.11	3065.04	1.74	0.01	0.17	0.29	27.87
	8.28	0.02	118.11	2782.34	3.01	0.01	0.17	0.29	30.72
	9.95	0.02	115.68	2725.30	3.82	0.02	0.17	0.29	32.06
	10.78	0.02	138.42	3260.94	5.13	0.02	0.17	0.29	33.78
	11.61	0.03	157.89	3719.71	13.09	0.06	0.17	0.29	39.91

ผลการทดลองตอนที่ 2  $Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$

ปริมาณถ่าน หินในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแวลวาล์ว (องศา)								
	0								
	$Q_A$ (l/min)	$U_A$ (m/s)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}/L_{L\text{-valve}}$ (Pa/m)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S1}/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S2}/(U_{mf}\rho_p)$	$(G_S^{0.178} \rho_B^{0.996} d_{Sm}^{-0.237} D_{L\text{-valve}}^{-0.574})10^3$
7.5	0.00	0.00	-2.45	-57.72	0.00	0.00	0.22	0.48	0.00
	6.00	0.01	135.00	3180.35	1.37	0.01	0.22	0.48	26.71
	8.00	0.02	155.00	3651.51	2.08	0.01	0.22	0.48	28.76
	10.00	0.02	210.00	4947.21	9.18	0.04	0.22	0.47	37.47
	12.00	0.03	220.00	5182.79	15.18	0.07	0.22	0.47	40.98
	0.00	0.00	-0.45	-10.60	0.00	0.00	0.22	0.48	0.00
	6.00	0.01	150.00	3533.72	1.46	0.01	0.22	0.48	27.02
	7.00	0.01	170.00	4004.88	2.85	0.01	0.22	0.48	30.43
	8.00	0.02	180.00	4240.47	4.56	0.02	0.22	0.48	33.08
	9.00	0.02	200.00	4711.63	8.51	0.04	0.22	0.47	36.97
	10.00	0.02	220.00	5182.79	11.20	0.05	0.22	0.47	38.82

ผลการทดลองตอนที่ 2  $Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$

ปริมาณถ่าน หินในระบบ $W_t$ (kg)	มุมของ L-valve (องศา)								
	0								
	$Q_A$ (l/min)	$U_A$ (m/s)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}/L_{L\text{-valve}}$ (Pa/m)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S1}/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S2}/(U_{mf}\rho_p)$	$(G_S^{0.178} \rho_B^{0.996} d_{Sm}^{-0.237} D_{L\text{-valve}}^{-0.574})10^3$
6.5	0.00	0.00	-2.30	-54.18	0.00	0.00	0.22	0.46	0.00
	7.00	0.01	170.00	4004.88	2.14	0.01	0.22	0.46	28.91
	8.00	0.02	191.00	4499.60	4.45	0.02	0.22	0.46	32.93
	9.00	0.02	200.00	4711.63	8.55	0.04	0.22	0.46	37.00
	10.00	0.02	220.00	5182.79	14.20	0.06	0.22	0.46	40.49
	0.00	0.00	-1.50	-35.34	0.00	0.00	0.22	0.46	0.00
	6.00	0.01	70.00	1649.07	1.17	0.01	0.22	0.46	25.97
	7.00	0.01	162.50	3828.20	2.50	0.01	0.22	0.46	29.72
	8.00	0.02	180.00	4240.47	3.59	0.02	0.22	0.46	31.71
	9.00	0.02	200.00	4711.63	7.84	0.04	0.22	0.46	36.43
	10.00	0.02	215.00	5065.00	12.86	0.06	0.22	0.46	39.79

ผลการทดลองตอนที่ 2  $Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$

ปริมาณถ่าน หินในระบบ $W_t$ (kg)	มุมของ L-valve (องศา)								
	0								
	$Q_A$ (l/min)	$U_A$ (m/s)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}/L_{L\text{-valve}}$ (Pa/m)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S1}/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S2}/(U_{mf}\rho_p)$	$(G_S^{0.178} \rho_B^{0.996} d_{Sm}^{-0.237} D_{L\text{-valve}}^{-0.574}) 10^3$
5.5	0.00	0.00	-2.50	-58.90	0.00	0.00	0.21	0.45	0.00
	7.00	0.01	170.00	4004.88	1.99	0.01	0.21	0.45	28.53
	8.00	0.02	172.50	4063.78	3.76	0.02	0.21	0.45	31.97
	9.00	0.02	192.50	4534.94	7.70	0.03	0.21	0.45	36.31
	10.00	0.02	215.00	5065.00	12.85	0.06	0.21	0.45	39.78
	0.00	0.00	-3.00	-70.67	0.00	0.00	0.21	0.45	0.00
	9.00	0.02	210.00	4947.21	8.04	0.04	0.21	0.45	36.59
	10.00	0.02	220.00	5182.79	11.82	0.05	0.21	0.45	39.19

ผลการทดลองตอนที่ 2  $Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$

ปริมาณถ่าน หินในระบบ $W_t$ (kg)	มุมของ L-valve (องศา)								
	0								
	$Q_A$ (l/min)	$U_A$ (m/s)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}/L_{L\text{-valve}}$ (Pa/m)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S1}/(U_{mf}\rho_p)$	$G_{S2}/(U_{mf}\rho_p)$	$(G_S^{0.178} \rho_B^{0.996} d_{Sm}^{-0.237} D_{L\text{-valve}}^{-0.574}) 10^3$
4.5	0.00	0.00	-2.50	-58.90	0.00	0.00	0.21	0.44	0.00
	7.00	0.01	160.00	3769.30	1.47	0.01	0.21	0.44	27.05
	8.00	0.02	181.00	4264.02	3.58	0.02	0.21	0.44	31.69
	9.00	0.02	225.00	5300.58	4.73	0.02	0.21	0.44	33.30
	10.00	0.02	220.00	5182.79	10.69	0.05	0.21	0.44	38.50
	0.00	0.00	-2.50	-58.90	0.00	0.00	0.21	0.44	0.00
	8.00	0.02	187.50	4417.15	3.87	0.02	0.21	0.44	32.12
	9.00	0.02	195.00	4593.84	6.90	0.03	0.21	0.44	35.61
	10.00	0.02	207.50	4888.31	10.65	0.05	0.21	0.44	38.47
	11.00	0.02	235.00	5536.16	18.19	0.08	0.21	0.44	42.32

### 3.2 แสดงผลการความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแวลวาล์วและมุมแวลวาล์วกับอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง

$$Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณถ่านหิน ในระบบ $W_i$ (kg)	มุมแวลวาล์ว $\theta$ (องศา)											
	0						10					
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_s^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_s^{0.1679}$	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_s^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_s^{0.1679}$
7.5	6.00	250.00	135.00	1.37	1.05	150.39	5.00	230.00	125.00	2.78	1.19	122.09
	8.00	285.00	155.00	2.08	1.13	161.22	6.00	330.00	150.00	9.49	1.46	150.02
	10.00	360.00	210.00	9.18	1.45	206.93	7.00	342.50	165.00	20.10	1.66	170.19
	12.00	415.00	220.00	15.18	1.58	225.16	8.00	375.00	170.00	21.05	1.67	171.50
	6.00	270.00	150.00	1.46	1.07	152.03	5.00	245.00	125.00	2.92	1.20	123.10
	7.00	295.00	170.00	2.85	1.19	170.07	6.00	310.00	155.00	10.07	1.47	151.53
	8.00	305.00	180.00	4.56	1.29	183.97	7.00	350.00	172.50	19.30	1.64	169.02
	9.00	335.00	200.00	8.51	1.43	204.31	8.00	370.00	177.50	22.87	1.69	173.91
	10.00	400.00	220.00	11.20	1.50	213.94						

แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแฉลวาล์วและมุมแฉลวาล์วกับอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง

$$Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณถ่านหิน ในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแฉลวาล์ว $\theta$ (องศา)											
	0						10					
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$
6.5	7.00	280.00	170.00	2.14	1.14	162.01	6.00	273.00	147.00	7.50	1.40	144.21
	8.00	320.00	191.00	4.45	1.28	183.21	7.00	345.00	165.00	15.21	1.58	162.39
	9.00	335.00	200.00	8.55	1.43	204.48	8.00	375.00	162.50	15.66	1.59	163.19
	10.00	365.00	220.00	14.20	1.56	222.66	9.00	375.00	175.00	18.72	1.64	168.17
	7.00	275.00	162.50	2.50	1.17	166.29	5.00	245.00	130.00	2.46	1.16	119.59
	8.00	300.00	180.00	3.59	1.24	176.78	6.00	320.00	165.00	7.64	1.41	144.68
	9.00	330.00	200.00	7.84	1.41	201.50	7.00	330.00	162.50	11.35	1.50	154.60
	10.00	365.00	215.00	12.86	1.54	218.98	8.00	375.00	175.00	17.37	1.61	166.06

แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแอลวาล์วและมุมแอลวาล์วกับอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง

$$Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณถ่านหิน ในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแอลวาล์ว $\theta$ (องศา)											
	0						10					
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$
5.5	7.00	275.00	170.00	1.99	1.12	160.04	5.00	250.00	137.50	2.25	1.15	117.79
	8.00	295.00	172.50	3.76	1.25	178.15	6.00	305.00	157.50	8.93	1.44	148.50
	9.00	340.00	192.50	7.70	1.41	200.90	7.00	325.00	160.00	11.03	1.50	153.87
	10.00	350.00	215.00	12.85	1.54	218.95	8.00	350.00	182.50	16.10	1.59	163.95
	9.00	340.00	210.00	8.04	1.42	202.36	7.50	345.00	162.50	10.67	1.49	153.02
	10.00	365.00	220.00	11.82	1.51	215.91	8.00	340.00	165.00	12.92	1.54	158.02
							8.50	370.00	175.00	12.64	1.53	157.43



แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแวลวาล์วและมุมแวลวาล์วกับอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง

$$Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณถ่านหิน ในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแวลวาล์ว $\theta$ (องศา)											
	0						10					
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_s^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_s^{0.1679}$	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_s^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_s^{0.1679}$
4.5	7.00	270.00	160.00	1.47	1.07	152.19	5.00	250.00	137.50	2.10	1.13	116.45
	8.00	300.00	181.00	3.58	1.24	176.67	6.00	285.00	160.00	7.70	1.41	144.87
	10.00	360.00	220.00	10.69	1.49	212.28	7.00	300.00	162.50	12.12	1.52	156.33
	8.00	300.00	187.50	3.87	1.25	178.97	8.00	340.00	175.00	19.68	1.65	169.58
	9.00	335.00	195.00	6.90	1.38	197.25	8.00	335.00	167.50	18.19	1.63	167.36
	10.00	370.00	207.50	10.65	1.49	212.14	9.00	400.00	175.00	24.96	1.72	176.49
	11.00	400.00	235.00	18.19	1.63	232.10						

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแอลวาล์วและมุมแอลวาล์วกับอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง

$Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$

ปริมาณถ่านหิน ในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแอลวาล์ว $\theta$ (องศา)											
	20						-10					
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L-valve}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L-valve}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$
7.5	3.00	200.00	80.00	4.92	1.31	82.37	8.00	370.00	250.00	3.81	1.25	228.30
	4.00	180.00	87.50	9.16	1.45	91.44	9.00	385.00	285.00	6.00	1.35	246.42
	5.00	275.00	110.00	13.63	1.55	97.75	10.00	400.00	270.00	11.60	1.51	275.25
	6.00	300.00	107.50	24.67	1.71	107.99	7.00	310.00	190.00	1.84	1.11	202.01
							8.00	350.00	230.00	3.29	1.22	222.74
							9.00	400.00	265.00	6.63	1.37	250.56
							10.00	420.00	270.00	11.81	1.51	276.10
							11.00	462.50	280.00	17.35	1.61	294.50

แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแวลวาล์วและมุมแวลวาล์วกับอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง

$$Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$$

ปริมาณถ่านหิน ในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแวลวาล์ว $\theta$ (องศา)											
	20						-10					
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L\text{-valve}}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$
6.5	3.00	170.00	60.00	2.85	1.19	75.19	8.00	340.00	230.00	4.07	1.27	230.89
	4.00	215.00	90.00	7.59	1.41	88.61	9.00	395.00	275.00	7.97	1.42	258.43
	5.00	235.00	100.00	12.78	1.53	96.70	10.00	420.00	280.00	10.41	1.48	270.29
	6.00	290.00	107.50	24.69	1.71	108.01	11.00	455.00	295.00	18.37	1.63	297.33
							8.00	340.00	205.00	3.66	1.24	226.82
							9.00	385.00	240.00	6.65	1.37	250.73
							10.00	420.00	275.00	11.55	1.51	275.06
							11.00	455.00	285.00	15.42	1.58	288.74

แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแฉลวาล์วและมุมแฉลวาล์วกับอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง

$Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$

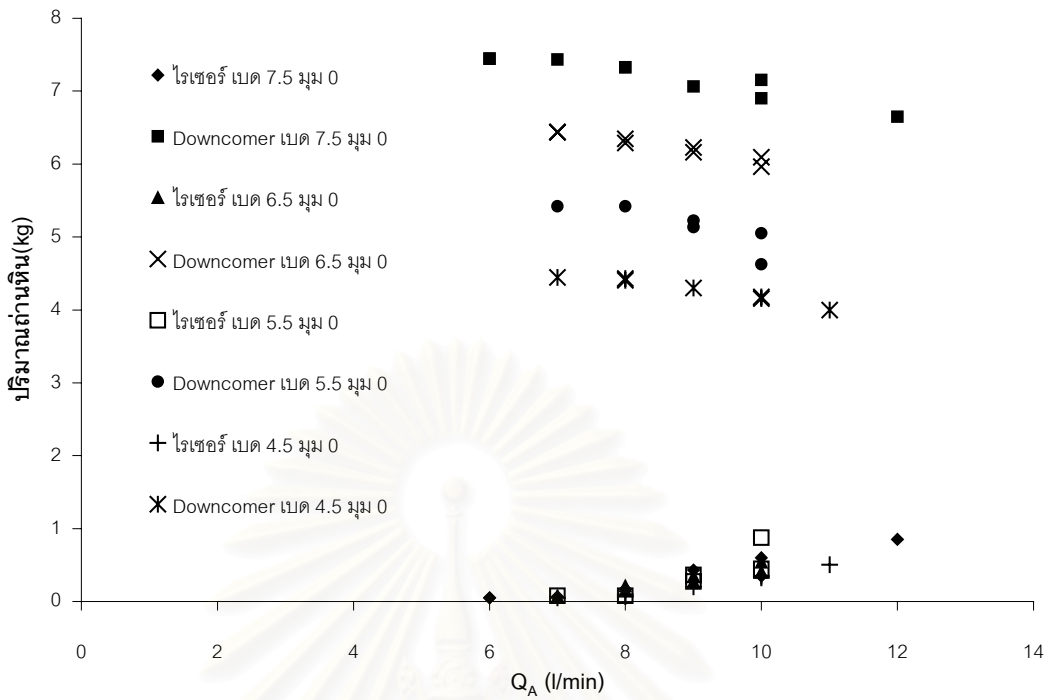
ปริมาณถ่านหิน ในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแฉลวาล์ว $\theta$ (องศา)											
	20						-10					
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L-valve}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L-valve}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_S$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_S^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_S^{0.1679}$
5.5	3.00	175.00	52.50	2.72	1.18	74.59	8.00	355.00	235.00	2.68	1.18	215.21
	4.00	205.00	70.00	7.26	1.40	87.95	9.00	365.00	245.00	5.83	1.34	245.23
	5.00	250.00	92.50	11.40	1.50	94.87	10.00	405.00	275.00	11.09	1.50	273.16
	6.00	275.00	105.00	21.65	1.68	105.65	11.00	410.00	280.00	13.69	1.55	283.02
							8.00	340.00	215.00	3.51	1.23	225.20
							9.00	390.00	260.00	7.33	1.40	254.81
							10.00	400.00	270.00	7.55	1.40	256.09
							11.00	440.00	285.00	14.37	1.56	285.33

แสดงผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมแฉลวาล์วและมุมแฉลวาล์วกับอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง

$Q_A = 250 \text{ m}^3/\text{hr}$

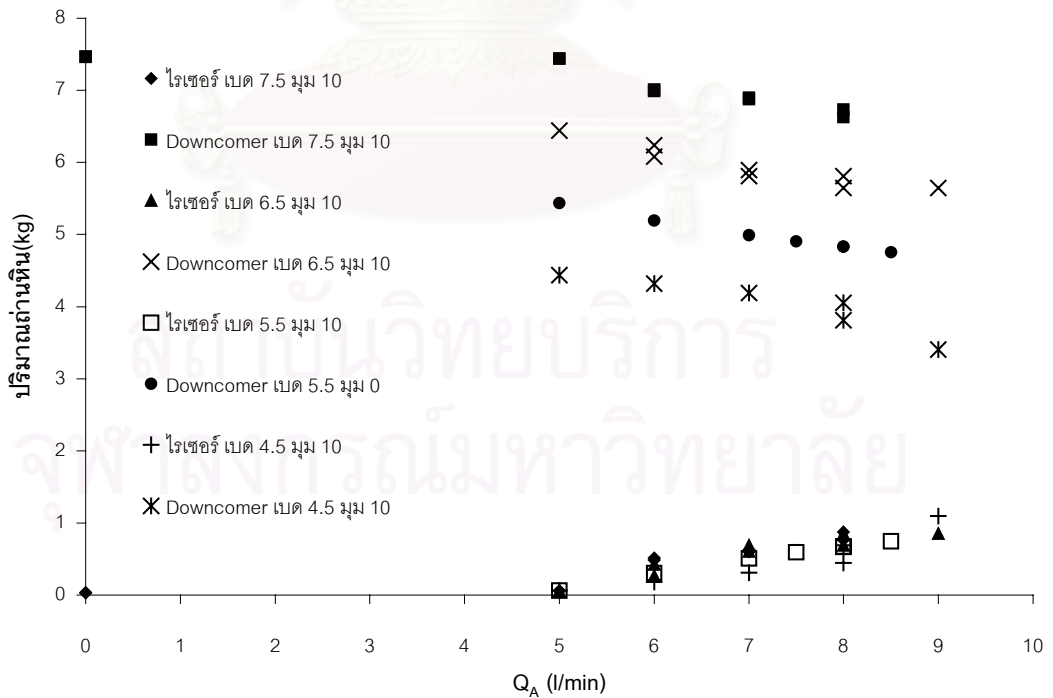
ปริมาณถ่านหิน ในระบบ $W_t$ (kg)	มุมแฉลวาล์ว $\theta$ (องศา)											
	20						-10					
	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L-valve}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_s^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_s^{0.1679}$	$Q_A$ (l/min)	$P_{AT}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$\Delta P_{L-valve}$ (mmH <sub>2</sub> O)	$G_s$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$G_s^{0.1679}$	$(142.65-3.9795\theta)G_s^{0.1679}$
4.5	3.00	175.00	60.00	1.93	1.12	70.42	8.00	320.00	210.00	2.15	1.14	207.48
	4.00	215.00	85.00	6.90	1.38	87.19	9.00	355.00	245.00	4.48	1.29	234.63
	5.00	235.00	95.00	10.44	1.48	93.47	10.00	380.00	260.00	7.04	1.39	253.09
	6.00	270.00	115.00	17.89	1.62	102.32	11.00	410.00	270.00	11.25	1.50	273.83
							8.00	330.00	210.00	2.11	1.13	206.79
							9.00	355.00	230.00	4.20	1.27	232.13
							10.00	365.00	255.00	7.78	1.41	257.41
							11.00	390.00	270.00	10.95	1.49	272.58

กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ downcomer ที่มุมแอลวาล์ว 0 องศา



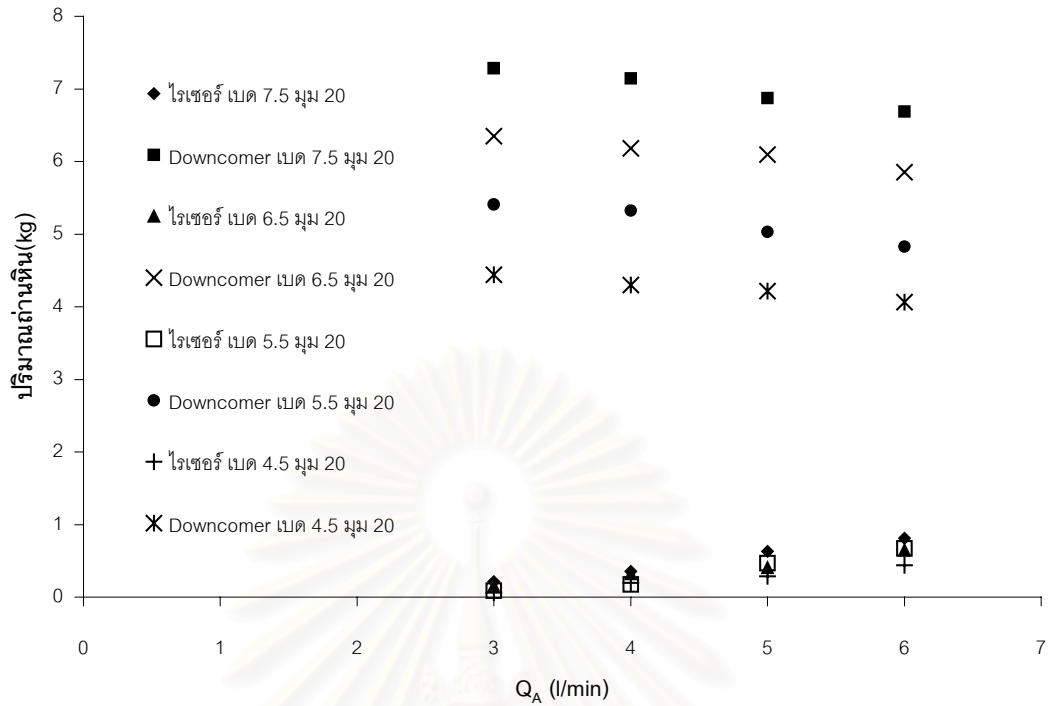
รูปที่ ๘8 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ Downcomer ที่มุมแอลวาล์ว 0 องศา

กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ downcomer ที่มุมแอลวาล์ว 10 องศา



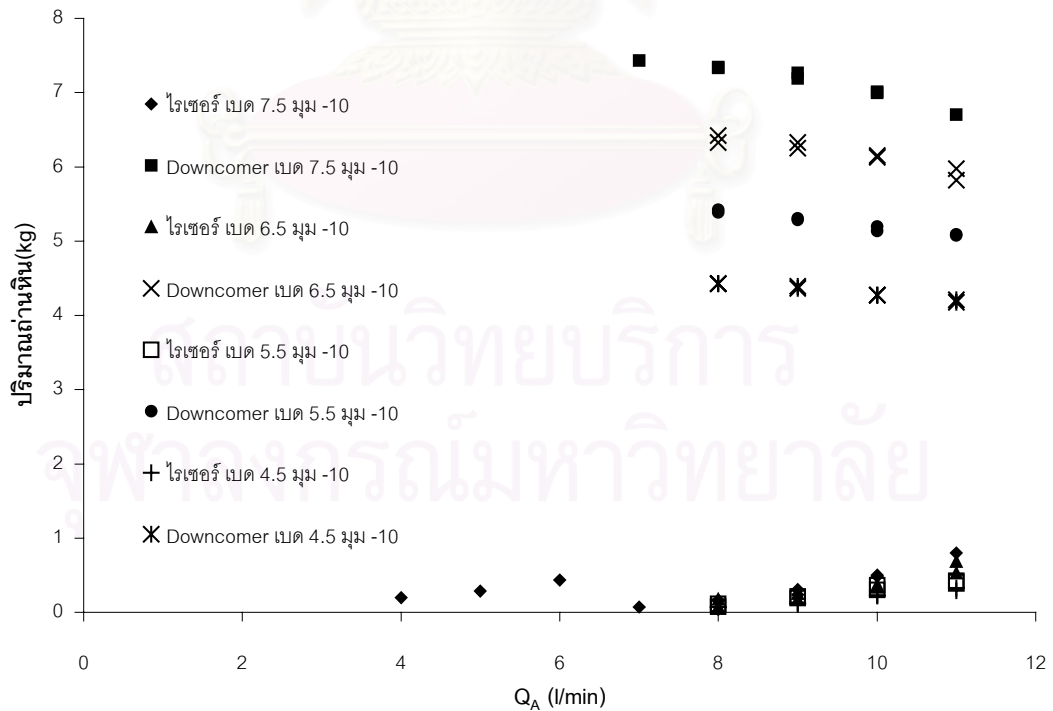
รูปที่ ๘9 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ Downcomer ที่มุมแอลวาล์ว 10 องศา

กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ downcomer ที่มุมแฉลวาล์ว 20 องศา



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ Downcomer ที่มุมแฉลวาล์ว 20 องศา

กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ downcomer ที่มุมแฉลวาล์ว -10 องศา



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณถ่านหินในโรเตอร์และ Downcomer ที่มุมแฉลวาล์ว -10 องศา

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพีรพล ฐิติอนันท์ เกิดวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย