


ผลของอัตราการไหลอากาศต่อโพรไฟล์ความเร็วอนุภาคในฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน



นางสาวศันสนีย์ กำธนทรัพย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-14-1826-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF AIR FLOWRATE ON PARTICLE VELOCITY PROFILE IN A
CIRCULATING FLUIDIZED BED

Miss Sansanee Kumthanasup



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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science


Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-14-1826-4

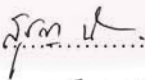
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของอัตราการใช้พลังงานต่อโพสไฟล์ความเร็วอนุภาคในพลาสมาโอดีแบบ
หมุนเวียน
โดย นางสาวศันสนีย์ กำธนาทรัพย์
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวัดมนานนท์


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....รองคณบดีฝ่ายบริหาร
รักษาราชการแทนคณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐราพงษ์ วิทิตศานต์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. กัทพรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวัดมนานนท์)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมษสุต)


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

คันสนีย์ กำธนাত্রัย : ผลของอัตราการไหลอากาศต่อโพรไฟล์ความเร็วอนุภาคในฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน (EFFECT OF AIR FLOWRATE ON PARTICLE VELOCITY PROFILE IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. สุชนา นิติวฒนานนท์, 96 หน้า. ISBN 974-14-1826-4

งานวิจัยนี้ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของโรเตอร์เท่ากับ 5 และ 200 ซม. ตามลำดับ ที่อุณหภูมิและความดันปกติ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วและเม็ดแก้วที่อยู่ในช่องผสมระหว่างเม็ดแก้วกับเกลบ ขนาดและความหนาแน่นของเม็ดแก้วเท่ากับ 547 ไมครอนและ 2400 กก.ต่อลบ.ม. การวัดความเร็วของอนุภาคทำได้โดยใช้กล้องความเร็วสูงและโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ในส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อหาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อรูปแบบการไหลของของแข็งพบว่า ความเร็วอากาศที่ใช้จำแนกรูปแบบการไหลคือ ความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน ความเร็วที่ทำให้เกิดคอร์-แอนนูลัส และความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดนิวเมติก เนื่องจากความเร็วอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที ทำให้เม็ดแก้วในโรเตอร์มีรูปแบบการไหลเป็นแบบ ฟลูอิดไรซ์ชั้นความเร็วสูง, คอร์-แอนนูลัส และเบดเบาบางแบบสม่ำเสมอตลอดทั้งโรเตอร์ ตามลำดับ ผลการทดลองในส่วนที่ 2 พบว่าที่ความสูงเท่ากับ 110 ซม. เมื่อความเร็วอากาศน้อย ความเร็วของเม็ดแก้วมีค่ามากที่สุดบริเวณกึ่งกลางของโรเตอร์และค่อยๆลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนัง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศให้มากขึ้น ความเร็วของเม็ดแก้วมีค่าใกล้เคียงกันที่ทุกตำแหน่งตามแนวรัศมี และเมื่อใช้แผ่นสีวางหน้าแหล่งกำเนิดแสงเพื่อกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว พบว่าเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลงมีความเร็วคงที่ไม่ขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ผลการทดลองในส่วนสุดท้าย พบว่าความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในช่องผสมระหว่างเม็ดแก้วและเกลบบริเวณส่วนล่างและส่วนกลางโรเตอร์มีค่าต่ำกว่าความเร็วของเม็ดแก้วในการทดลองที่ใช้เม็ดแก้วเป็นเบดเพียงอย่างเดียว แต่ที่บริเวณส่วนบนของโรเตอร์พบว่าความเร็วของเม็ดแก้วในช่องผสมมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วของเม็ดแก้วในการทดลองที่ใช้เม็ดแก้วเป็นเบดเพียงอย่างเดียว

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....
ปีการศึกษา.....2548.....

ลายมือชื่อนิสิต...ศันสนีย์...
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4772495623 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CFB, glass beads, particle velocity profile, PIV technique

SANSANEE KUMTHANASUP : EFFECT OF AIR FLOWRATE ON PARTICLE VELOCITY PROFILE IN A CIRCULATING FLUIDIZED BED. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. SUCHAYA NITIVATTANANON, Dr., 96 PP. ISBN 974-14-1826-4

The research was conducted in a cold flow CFB having diameter and height of riser of 5 and 200 cm., respectively. The objective of this research is to study hydrodynamics of glass beads and of mixture of glass beads and rice husk by mean of particle velocity profile. The glass beads mean diameter was 547 micron while its density was 2400 kg/m³. The measurement of particle velocity profiles was achieved by a high speed camera and an image processing software. In part I, the effect of gas velocity on flow pattern in riser, it was found that Transport Velocity (U_{tr}), Core-Annulus Velocity (V_{CA}) and Minimum Pneumatic Velocity (V_{mp}) could be used to determine the flow regime. For all three gas velocity used, it was found that the flow pattern were Fast Fluidization, Core-Annulus and Homogeneous Dilute Bed, respectively. In Part II, at 110 cm from distributor, it was found that at low gas velocity the glass beads velocity existed a maximum at the center of the riser and gradually decreased toward the wall. But at higher gas velocity the velocity of glass beads along radius was slightly different. When a rotating disk was inserted in front of a light source to identify the direction of solid, it was observed that the velocity of solid moving in the downward direction was relatively insensitive to operating conditions. Finally, the results showed that glass beads velocity in the mixture of glass beads and 20% by volume of rice husk was lower than that of without rice husk in the lower and middle part of riser. However, at the top of riser, the glass beads velocities from both conditions were almost identical.

Department.....Chemical Technology.....	Student's signature..... <i>Sansa nee Kumthanasup</i>
Field of study.....Chemical Technology.....	Advisor's signature..... <i>Suchaya N</i>
Academic year...2005.....	Co-Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวัฒนานนท์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์ด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

งานวิจัยเรื่อง “ผลของอัตราการไหลอากาศต่อโพรไฟล์ความเร็วอนุภาคในฟลูอิดไคต์แบบหมุนเวียน” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุน จากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษา และวิจัยด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี รวมถึงทุนวิจัยรัชดาภิเษกสมโภชน์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรธน์ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวงเมฆสุด กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและให้คำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจจนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และ ให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ

บทที่

1	บทนำ	1
1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2	วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3	ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4	ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.3	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2	วารสารปริทัศน์.....	5
2.1	ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบด	5
2.2	แก๊สฟลูอิดไดเซชัน.....	5
2.3	การจำแนกของแข็ง.....	14
2.4	ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	15
2.5	คุณสมบัติแกรนูลาร์.....	24
2.6	ชีวมวล.....	26
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	33
3.1	เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	33
3.2	เทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV)	36

	หน้า
3.3 อนุภาคของแข็งที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.4 วิธีการทดลอง	41
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	50
4.1 การทดลองเพื่อหาข้อมูลพื้นฐานประกอบงานวิจัย	50
4.2 อุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว	54
4.3 อุทกพลศาสตร์ของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบ.....	71
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	78
5.1 สรุปผลการทดลอง	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	79
รายการอ้างอิง.....	80
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก.....	83
ภาคผนวก ข.....	87
ภาคผนวก ค.....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 เทคนิคที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นและความเร็วของอนุภาคในฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน	2
2.1 สมการแสดงความสัมพันธ์เพื่อหา Transport Velocity.....	11
2.2 ซิวมวลที่ได้จากข้าว ตันน้อย และน้ำมันปาล์ม ในปี 2004	27
3.1 สมบัติทางกายภาพของเม็ดแก้วและแกลบ.....	40
3.2 ภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	41
4.1 ความเร็วหลุดลอยส่งผ่านที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Reynold's Number และ Archimedes' Number	52
4.2 ค่า U_{tr} , V_{CA} และ V_{mp} ของเม็ดแก้วที่ใช้ในงานวิจัยนี้	53
4.3 รูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งในโรเตอร์ที่ช่วงความเร็วอากาศต่างๆ.....	54
4.4 ผลรวมของความดันทั้งระบบที่ความเร็วอากาศต่างๆ	56
ก.1 ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการไหลป้อนกลับของเม็ดแก้วที่มีความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 17 เซนติเมตร	83
ก.2 ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการไหลป้อนกลับของเม็ดแก้วที่มีความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตร	83
ก.3 ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการไหลป้อนกลับของเม็ดแก้วที่มีความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตรและมี aeration	84
ก.4 ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการไหลป้อนกลับของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบที่มีความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตร.....	83
ก.5 ข้อมูลสำหรับคำนวณความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน	85
ก.6 ข้อมูลความดันทั้งระบบของเม็ดแก้ว.....	85
ก.7 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการคำนวณความเร็วเม็ดแก้วที่ตำแหน่งกึ่งกลางโรเตอร์ ($r=0$ เซนติเมตร)	86
ก.8 ข้อมูลความดันทั้งระบบของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบ	86
ข.1 อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งที่ภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	87
ข.2 สัดส่วนช่องว่างของเม็ดแก้ว ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์	87
ข.3 ความเร็วของเม็ดแก้วที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมี	88

ตาราง	หน้า
ข.4 ค่าเฉลี่ยความเร็วอุทกพลศาสตร์ ความเค้นตึงฉากและอุณหภูมิแกร์นูลาร์ ของเม็ดแก้ว	88
ข.5 ความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ลง ณ.ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมี	88
ข.6 รัยยะของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลง ณ.ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมี.....	89
ข.7 สัดส่วนช่องว่างของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบ ณ.ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์.....	89
ข.8 ความเร็วของเม็ดแก้วที่ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของโรเตอร์.....	89
ข.9 ความเร็วของเม็ดแก้วในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบ ณ.ตำแหน่งต่างๆ ตามความสูงของโรเตอร์.....	90
ค.1 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ.....	91

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิด์เบดแก๊ส-ของแข็ง	6
2.2 วิธีการทดลองที่ใช้ในการหา Transport Velocity	11
2.3 แผนผังแสดงลักษณะการไหลที่เกิดในฟลูอิด์เบดแก๊ส-ของแข็ง	13
2.4 การจำแนกกลุ่มของแข็งโดยวิธีของ Geldart	15
2.5 ระบบฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน	16
2.6 การเคลื่อนที่ของ Cluster	17
2.7 ขอบเขตของ Fast Fluidization	19
2.8 ขอบเขตของ Fast Fluidization ที่เปลี่ยนแปลงกับอัตรา การไหลย้อนกลับของของแข็ง	19
2.9 โพรไฟล์การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน	21
2.10 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ Fast Bed	22
2.11 วงจรความดันของระบบฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน	24
2.12 ร้อยละการใช้แก๊สในกระบวนการต่างๆ	28
3.1 แบบจำลองเครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน	34
3.2 การเพิ่มอากาศส่วนที่ 2 จากเครื่องเป่าอากาศ	34
3.3 การเพิ่มทางเข้าและทางออกของของแข็ง	34
3.4 เครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลอง	35
3.5 ระบบ PIV และตำแหน่งของโพรบ	37
3.6 ตัวอย่างภาพการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่บันทึกได้จากเทคนิค PIV	38
3.7 ตัวอย่างของเม็ดแก้วและแก๊สที่ใช้ในงานวิจัย	39
3.8 การกระจายตัวของขนาดของเม็ดแก้วที่ใช้ในการทดลอง	40
3.9 ภาพเครื่องมือวัดเวกเตอร์เนียร์และการลากเส้นความยาว	45
3.10 การกำหนดไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการเปรียบเทียบไว้	45
3.11 การเปิดไฟล์ภาพพร้อมทั้งเลือกไฟล์การเปรียบเทียบและ การเลือกฟังก์ชันความยาว	46
3.12 การส่งข้อมูลไปยัง Excel	46
3.13 ข้อมูลที่ปรากฏในไฟล์ Excel	46
3.14 ระบบ PIV ที่มีการประกอบแผ่นสี่ และตำแหน่งของโพรบ	47

ภาพประกอบ	หน้า
3.15 ตัวอย่างภาพที่ถ่ายได้จากระบบ PIV ที่มีแผ่นสี่ประกอบ และการวิเคราะห์แถบสี	48
4.1 ความเร็วหลุดลอยส่งผ่านของเม็ดแก้วขนาด 547 ไมครอน	52
4.2 วงจรความดันของเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ความเร็วอากาศต่างๆ	55
4.3 ความดันของอากาศตลอดความสูงของไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที	57
4.4 สัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที	58
4.5 ตำแหน่งของมุมที่ใช้ในการคำนวณและที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ	59
4.6 ความเร็วในแนวแกนของเม็ดแก้วตามแนวรัศมี (c_z) ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ที่ความสูง 110 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ	61
4.7 ความเร็วในแนวรัศมีของเม็ดแก้วตามแนวรัศมี (c_r) ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ที่ความสูง 110 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ	62
4.8 ความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ความสูง 110 ซม.จากตัวกระจายอากาศ ความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที	64
4.9 ความเค้นตั้งฉากของเม็ดแก้ว ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ความสูง 110 ซม.จากตัวกระจายอากาศ ความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที	65
4.10 อุณหภูมิเกร์นูลาร์ของเม็ดแก้ว ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ความสูง 110 ซม.จากตัวกระจายอากาศ ความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที	67
4.11 อุณหภูมิเกร์นูลาร์ของอนุภาคกรุป A และกรุป B	67
4.12 ความเร็วในแนวแกนของเม็ดแก้วตามแนวรัศมี ที่ความสูง 110 ซม.จากตัวกระจายอากาศ ที่ความเร็วอากาศต่างๆ	69
4.13 ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ตามแนวรัศมี ที่ความสูง 110 ซม. จากตัวกระจายอากาศ ที่ความเร็วอากาศต่างๆ	70
4.14 แผนภาพแสดงลักษณะการไหลแบบคอร์-แอนนูลัส	71
4.15 เปรียบเทียบขนาดและรูปร่างของเม็ดแก้วและเกลบ	72
4.16 ความดันตลอดความสูงของไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที (เกลบร้อยละ 20 โดยปริมาตร)	73

ภาพประกอบ	หน้า
4.17 สัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที (แกลบริ้อยละ 20 โดยปริมาตร).....	73
4.18 ความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในช่องผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบตามความสูงของไรเซอร์ ความเร็วอากาศ 7,8 และ 9 เมตรต่อวินาที (แกลบริ้อยละ 20 โดยปริมาตร) .	75
4.19 แผนภาพของเครื่องฟลูอิดไรซ์แบบหมุนเวียน	75
4.20 เปรียบเทียบความเร็วของเม็ดแก้วและเม็ดแก้วที่อยู่ในช่องผสมตามความสูงที่ความเร็วอากาศ 7,8 และ 9 เมตรต่อวินาที (แกลบริ้อยละ 20 โดยปริมาตร)	77



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียนมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการต่างๆทั้งในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเลียม ในอดีตจึงได้มีการพยายามอย่างมากที่จะปรับปรุงกระบวนการต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม อย่างเช่น เตาเผาฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียน กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหิน (Coal Gasification) และกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic Cracking, FCC) การผลิตโพลีโอเลฟิน และกระบวนการแคลซิเนชัน (Calcination) เป็นต้น (Zhang H. และคณะ, 2001) ในฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียนมีรูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งในไรเซอร์เป็นแบบฟลูอิดไรส์เบดแบบความเร็วสูง (Fast Fluidization) หรือเบดแบบส่งผ่าน (Transported Bed) ทำให้มีข้อได้เปรียบมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งมักจะเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดฟองอากาศ (Bubbling Bed) หรือเบดแบบปั่นป่วน (Turbulent Bed) หลายข้อ อย่างเช่น มีประสิทธิภาพในการสัมผัสกันระหว่างอากาศกับของแข็งค่อนข้างสูง การกระจายตัวในแนวแกนของอากาศและของแข็งเกิดขึ้นน้อย สามารถอนุรักษ์พลังงานที่เกิดขึ้นในระบบการกระจายตัวของอนุภาค อัตราการถ่ายเทโมเมนตัม มวลและความร้อนในไรเซอร์เกิดขึ้นได้ดี เป็นต้น ซึ่งจากการทดลองของผู้วิจัยหลายๆท่าน พบว่าคุณสมบัติเหล่านี้เกิดจากการชนกันอย่างอิสระแบบเกือบยืดหยุ่นสมบูรณ์ (Inelastic Collision) ของของแข็งที่ลอยอยู่ในของไหล

ฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียนเป็นกระบวนการที่มีอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamics) ที่ซับซ้อนเนื่องจากเกิดแรงเสียดทานระหว่างอากาศและของแข็ง ความเร็วของของแข็งจัดเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญต่ออุทกพลศาสตร์ของระบบต่างๆ เนื่องจากความเร็วของของแข็งจะส่งผลกระทบต่อ การสัมผัสกันของอากาศและของแข็ง อัตราการถ่ายเทความร้อน มวลและโมเมนตัม และการกีดกันที่มักจะเกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์ (Pandey P. และคณะ, 2004) ดังนั้นในการออกแบบและปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป อย่างเช่น อุตสาหกรรมเคมี ปิโตรเลียมและโรงงานผลิตไฟฟ้า เป็นต้น จึงจำเป็นต้องทราบถึงอุทกพลศาสตร์ของของแข็งที่อยู่ภายในฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียน (Jung J. และคณะ, 2005) ตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียน คือความหนาแน่นและความเร็วของของแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ ในท่อไรเซอร์ ในการหาค่าตัวแปรเหล่านี้ทำได้ยาก เนื่องจากของแข็งมีรูปร่างและขนาดเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาและนอกจากนี้รูปแบบการไหลของของผสมที่ตำแหน่งต่างๆก็ต่างกัน

อย่างไรก็ตามได้มีความพยายามที่จะหาวิธีวัดค่าตัวแปรเหล่านี้โดยใช้เทคนิคหลากหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เทคนิคที่ใช้วัดความเข้มข้นและความเร็วของอนุภาค
ในฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน (Liu, 2003)

เทคนิคที่ใช้	ความหนาแน่นของอนุภาค	ความเร็วของอนุภาค	ข้อดี/ข้อเสีย
Pitot Tube	วัดไม่ได้	วัดได้	ข้อมูลที่ได้ไม่ค่อยแม่นยำเนื่องจาก อนุภาคขนาดเล็กมักจะไปอุดต้นโพรบ
X-ray or γ -ray	วัดได้	วัดไม่ได้	มีราคาแพง ต้องใช้คอลลิเมอร์ที่มีขนาดพอเหมาะ ข้อดีคือไม่รบกวนระบบ
Laser Doppler Anemometry	วัดไม่ได้	วัดได้	ต้องใช้กับระบบที่มีความหนาแน่นของอนุภาคต่ำๆ ข้อดีคือมีความแม่นยำสูง
Photographic And video techniques	วัดได้	วัดได้	จะเก็บข้อมูลได้มาก ใช้งานได้ง่าย การวิเคราะห์ข้อมูลค่อนข้างยาก
Optical-Fibre Probe	วัดได้	วัดได้	ใช้งานง่าย มีความแม่นยำสูง สามารถใช้งานที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ
Capacitance Probe	วัดได้	วัดไม่ได้	ปริมาณที่วัดได้ไม่ค่อยถูกต้อง

กระบวนการและปฏิกิริยาเคมีต่างๆที่เกิดขึ้นในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนนี้ จะเกิดในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ที่มีลักษณะปิดทึบ จึงไม่สามารถเห็นถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของของแข็งต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการเคลื่อนตัวของของแข็งคือเม็ดแก้วและของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบ ในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ อุณหภูมิและความดันห้อง โดยเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้เป็นท่อพลาสติกใส (Acrylic) ทำให้สามารถเห็นอุทกพลศาสตร์ของสารป้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ด้วยตาเปล่า ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีของเม็ดแก้ว และความเร็วของเม็ดแก้วในของผสมระหว่างเม็ดแก้วและชีวมวลตามความสูงของไรเซอร์ เมื่อความเร็วของอากาศที่ใช้ในการทดลองเปลี่ยนแปลงไป โดยใช้กล้องความเร็วสูงและโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image-Pro Plus V.4.5.1) ในการวิเคราะห์ข้อมูล ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่อัตราการไหลของอากาศและชนิดของของแข็ง ข้อมูลที่ได้จะสามารถอธิบายปรากฏการณ์ภายในเตาเผาซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการ พัฒนาการออกแบบและปรับปรุงเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. ปรับปรุงเทคนิคการวัดความเร็วของอนุภาค โดยใช้กล้องความเร็วสูง
2. ศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศ ที่มีต่อความเร็วในแนวรัศมีของอนุภาค
3. ศึกษาชนิดของเบด ได้แก่ เม็ดแก้วและชีวมวล ที่มีต่อความเร็วของอนุภาค

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ทำการสร้างเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่างๆ
3. นำเม็ดแก้วและชีวมวลมาหาขนาด พร้อมทั้งหาสมบัติทางกายภาพ
4. ทำการทดลองหาภาวะของตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมในการทดลอง
5. ทำการทดลองหาความเร็วของเม็ดแก้ว ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ อัตราการไหลของอากาศและชีวมวลที่นำมาผสม
6. ทำการทดลองหาทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว
7. วิเคราะห์สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่างๆ
3. ดำเนินการปรับปรุงเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่างๆ
4. นำเม็ดแก้วและชีวมวลที่ใช้ในการทดลองมาหาขนาด พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพ
5. ทำการทดลองหาความดันของอากาศตลอดทั้งระบบภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและนำผลของความดันของอากาศที่วัดค่าได้ไปคำนวณหาการกระจายตัวของของแข็งภายในไรเซอร์ โดยใช้เม็ดแก้วเป็นเบด ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ อัตราการไหลของอากาศ
6. ทำการทดลองหาความเร็วของเม็ดแก้ว ณ.ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมีของไรเซอร์ โดยใช้ชุดเครื่องมือในการวัดความเร็วที่ประกอบไปด้วย กล้องความเร็วสูงชนิด CCD เพื่อใช้ในการบันทึกภาพ ต้นกำเนิดแสง และโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ (Image Pro Plus V. 4.5.1) ในการวิเคราะห์ภาพ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ อัตราการไหลของอากาศ
7. ทำซ้ำข้อ 5-6 โดยเปลี่ยนเบดที่ใช้เป็นเม็ดแก้วผสมชีวมวล
8. ทำการทดลองหาทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว ณ.ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมี โดยใช้แผ่นสีประกอบเข้ากับชุดเครื่องมือในการวัดความเร็ว ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ อัตราการไหลของอากาศ
9. วิเคราะห์สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายถึงอุทกพลศาสตร์ของเบดภายในเครื่องเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน
2. สามารถนำเทคนิคการใช้กล้องความเร็วสูงไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยด้านอื่นๆ

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ลักษณะของฟลูอิดไคซ์เบด (สมศักดิ์, 2528)

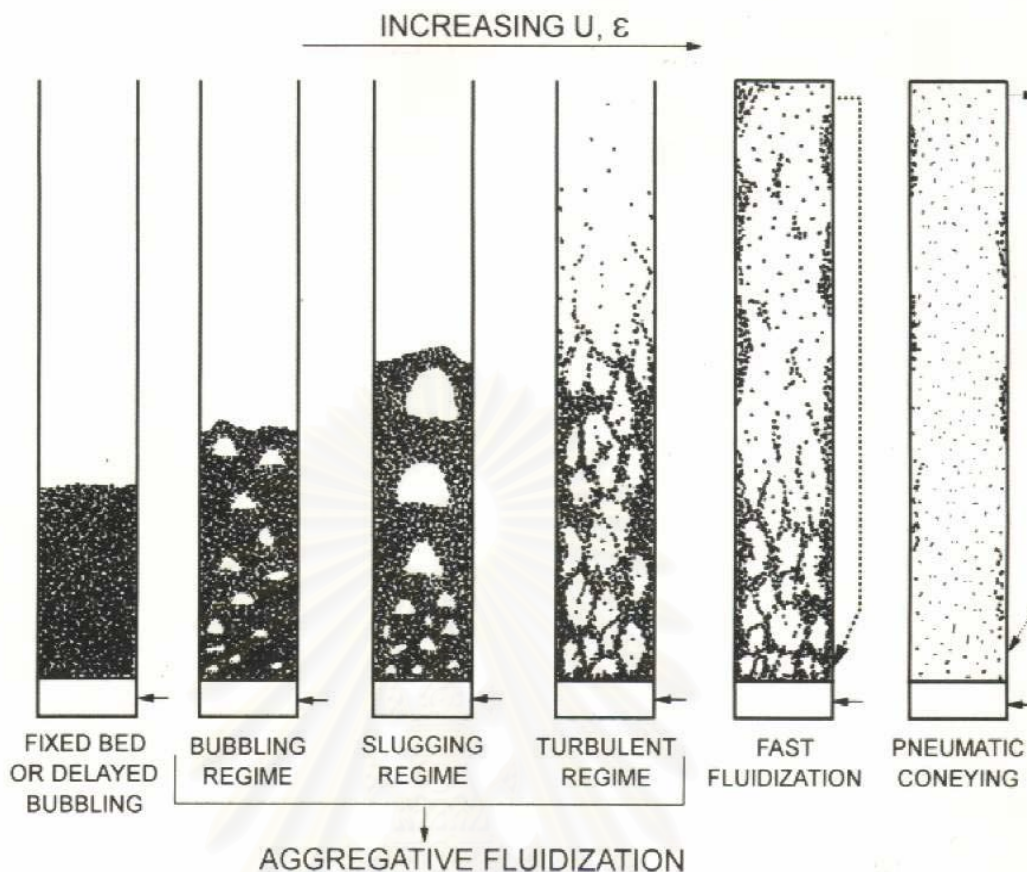
ฟลูอิดไคซ์ชัน คือกระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นสัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้น เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงในหอคอดลงแล้วให้ของไหล ซึ่งอาจจะเป็นอากาศหรือของเหลว ไหลผ่านจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะผ่านชั้นของเม็ดของแข็ง และไหลออกทางส่วนบนของหอคอดลง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไคซ์เบด และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไคซ์ชัน

คำว่า เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอคอดที่เม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอคอดลง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะที่ทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (Distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอคอดลง

ฟลูอิดไคซ์เบดที่เป็นของเหลวการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบดแบบนี้ว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิดไคซ์เบดที่ของไหลเป็นอากาศ ลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของอากาศสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไคซ์เบดแล้ว อากาศส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟองอากาศขึ้น ฟองอากาศก็จะแทรกตัวขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ฟองอากาศลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองอากาศขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบดจึงมีการเคลื่อนที่อย่างซุกมุนุ่นวาย

2.2 แก๊สฟลูอิดไคซ์ชัน (Gas Fluidization) (Grace J.R. และคณะ, 1997)

แก๊สฟลูอิดไคซ์ชันเป็นการเกิดฟลูอิดไคซ์เบดสองสถานะระหว่างอากาศกับของแข็ง ขอบเขตของฟลูอิดไคซ์เบด (Regime of Fluidization) สามารถแบ่งได้ดังรูปที่ 2.1 เมื่อมีของแข็งวางตัวบนตะแกรงหรือตัวกระจายอากาศ (Gas Distributor) และมีอากาศเคลื่อนที่ผ่านขึ้นมา (Upward Flowing) เมื่อค่อยๆเพิ่มความเร็วอากาศ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดไชน์เบดแก๊ส-ของแข็ง (Grace J. R., 1997)

เมื่ออากาศไหลผ่านของแข็งขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายอากาศจะอยู่นิ่งไม่เคลื่อนไหว อากาศจะไหลผ่านไปตามช่องว่างของของแข็งที่มีอยู่ในเบด หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังแต่ของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้เรียกว่า Moving Bed เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านของแข็งที่วางนิ่ง จะเกิดแรงเนื่องจากการไหลของของไหลที่กระทำต่อของแข็งในทิศเดียวกับทิศทางการไหล เรียกแรงนี้ว่าแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (Pressure Drop) ตกคร่อมเบดไว้ ความดันลดตกคร่อมเบดตลอดความสูงของเบดนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น สามารถคำนวณได้จากสมการของ Ergun ดังแสดงในสมการที่ 2.1 ดังนี้ (Kunii และ Levenspiel, 1969)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150\mu U (1-\varepsilon)^2}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho_g U^2 (1-\varepsilon)}{(\phi d_p)^2 \varepsilon^3} \quad (2.1)$$

เมื่อความเร็วอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง ของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วจุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไชน์ (Minimum

Fluidization Velocity; U_{mf}) และเรียกเบด ณ จุดนี้ว่า Minimum Fluidized Bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่ของแข็งประพฤติตัวคล้ายกับของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบด ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบด ดังนั้น แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force; F_D) ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

$$F_D = \Delta P \cdot A = AL(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.2)$$

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเบด, ตร.ม

L คือ ความสูงของเบด, เมตร

จัดรูปสมการใหม่จะได้ภาวะต่ำสุดของฟลูอิไดเซชัน (Minimum Fluidization Condition) ดังนี้

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.3)$$

โดยที่ ตัวห้อย mf แทนภาวะต่ำสุดที่เกิดฟลูอิไดเซชัน

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$- \text{Re}_p < 20 \quad U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\mu} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.4)$$

$$- \text{Re}_p > 1,000 \quad U_{mf} = \frac{\phi d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \varepsilon_{mf}^3 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.5)$$

ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบดขึ้นไป ซึ่งฟองอากาศจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองอากาศจะตกลงมายังเบดอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่าบริเวณอิสระ (Freeboard) อย่างไรก็ตามอาจจะมีของแข็งบางส่วนที่มีปริมาณน้อยมาก ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับอากาศด้วยทำให้ไม่ตกย้อนกลับลงมาในเบดอีก ณ ความสูงค่าหนึ่งใน Freeboard ซึ่งของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลงมาเบดจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน หรือ Transport Disengaged Height (TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดไปกับอากาศด้วยอัตราการลอยออกที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า Elutriation Rate

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่าขนาดของฟองอากาศจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของอากาศ และความสูงของเบด ถ้าเบดบรรจุอยู่ในหอทดลองที่มีขนาดเล็กหรือแคบและยาว

ฟองอากาศที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด (หอตดลอง) ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านเบดและแยกของแข็งออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิดสลักกิ้ง (Slugging) เบดจะเริ่มเข้าสู่สภาวะปั่นป่วน (Turbulent Bed) เมื่อความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองอากาศเพิ่มขึ้น จนมากกว่าค่า U_{mf} เบดจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ อีก จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของของแข็งกับอากาศ ซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว จนอาจจะดูเหมือนไม่มีฟองอากาศ การเคลื่อนไหวภายในเบดเป็นแบบปั่นป่วน ลักษณะภายในเบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. Dense Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีของแข็งอยู่หนาแน่น
2. Dilute Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีของแข็งอยู่เบาบาง

สำหรับช่วงในการเปลี่ยนแปลงภาวะจากเบดแบบฟองอากาศไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้น ไม่ได้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงของความเร็วในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ จากผลการวิจัยของนักวิจัยหลายๆ ท่านพบว่า การเปลี่ยนภาวะจากเบดแบบฟองอากาศไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบดแบบฟองอากาศนั้น ที่บริเวณผิวหน้าของเบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

Terminal Velocity คือ ความเร็วตกอิสระของของแข็งในของไหลที่อยู่หนึ่ง ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอตดลองไป โดยค่า Terminal Velocity สามารถหาได้จากสมการของ Haider และ Levenspiel (Kunii and Levenspiel, 1969) โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามรูปร่างของของแข็ง

- กรณีของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม (Kunii and Levenspiel, 1991)

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{0.591}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.6)$$

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.7)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.8)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.9)$$

- กรณีที่ของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.10)$$

โดยที่

$$U_t^* = U_t \left[\frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g} \right]^{1/3} \quad (2.11)$$

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.12)$$

เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้นไปอีกจนไม่สามารถระงับพื้นผิวด้านบนของเบดได้ ของแข็งจะเคลื่อนที่ออกจากด้านบนหอตกลงเพื่อไม่ให้ปริมาณของแข็งในหอตกลงหมดไป จำเป็นต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างหอตกลง ของแข็งจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผังของหอตกลง ขณะที่อากาศและของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านบนจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของแข็งในหอตกลงเจือจางมากขึ้น

จากรูปที่ 2.1 ในภาวะที่เป็นฟลูอิไดเซชันความเร็วสูง (Fast Fluidization) ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดหรือหอตกลงวนกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของหอตกลง ระบบแบบนี้จะเรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

เมื่อความหนาแน่นของแข็งภายในเบดเบาบางมากเนื่องจากความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นมากเป็นจะเกิดเป็นการขนส่งของแข็งด้วยอากาศ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่มีความเร่ง และของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผังของหอตกลง ความเร็วอากาศที่ทำให้เบดในท่อเปลี่ยนจากเบดแบบเจือจางเป็นเบดแบบหนาแน่น เรียกว่า ความเร็วในการเกิดช็อคกิ้ง (Choking Velocity, U_{ch}) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วอากาศในระบบที่เป็นเบดแบบเจือจางและมีปริมาณของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบดเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเบดเจือจางเป็นเบดหนาแน่น ซึ่งความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือ ความเร็วในการเกิดช็อคกิ้งนั่นเอง ปริมาณของแข็งที่ไหลออกจากเบดในตอนนี้ Zen (Grace,1997) ได้เสนอความสัมพันธ์ไว้ว่า

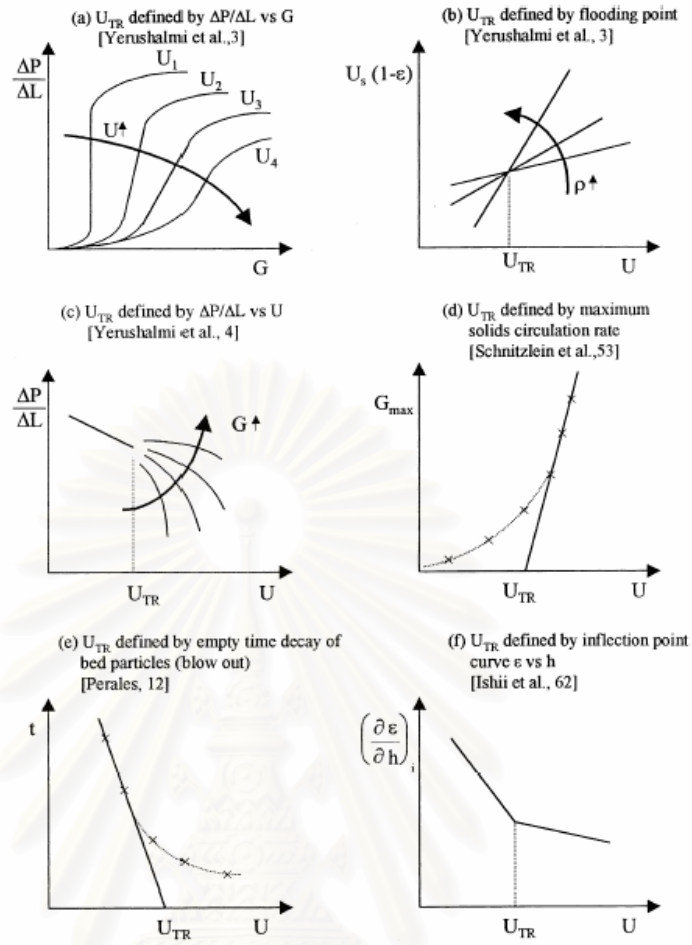
$$G_{s, ch} = \rho_s (1 - \varepsilon_{ch})(U_{ch} - U_t) \quad (2.13)$$

โดยที่ $G_{s, ch}$ คือ อัตราการไหลของของแข็งออกจากเบดต่อพื้นที่หน้าตัดของหอดูดอง

ε_{ch} คือ อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบดในภาวะ Choking พบว่าค่านี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.943 ถึง 0.987

Transport Velocity (U_t) หรือความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนภาวะจากเบดแบบปั่นป่วนไปเป็นเบดแบบความเร็วสูง (Monazam et.al., 2005) สามารถหาได้หลายวิธี ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากรูป (a) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดต่อหน่วยความสูงกับอัตราการไหลย้อนกลับของแข็งที่ความเร็วอากาศต่างๆ จากการทดลองของ Yerushalmi และ Cankurt (Yerushalmi และ Cankurt, 1979) พบว่า U_t คือความเร็วอากาศวิกฤติค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันลดต่อหน่วยความสูงน้อยที่สุดเมื่ออัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งเพิ่มขึ้น จากกราฟ U_t คือ U_4 ส่วนวิธีอื่นๆที่มีการใช้อย่างกว้างขวางแสดงได้ดังรูป (b) และ (c) ซึ่งได้จากการทดลองของ Yerushalmi และ Cankurt เช่นเดียวกัน โดยรูป (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของของแข็งที่เคลื่อนที่ในโรเซออร์ กับความเร็วอากาศที่ปริมาณของของแข็งต่างๆ จุดตัดของเส้นกราฟที่ได้เรียกว่า Flooding Point และความเร็วอากาศที่จุดตัดนี้คือ U_t รูป (c) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดต่อความสูงที่บริเวณด้านล่างโรเซออร์ กับความเร็วอากาศที่อัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งต่างๆ U_t คือความเร็วอากาศที่น้อยที่สุดที่ความดันลดเปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการไหลย้อนกลับเปลี่ยนแปลง ส่วนวิธีของ Schnitzlein และ Weinstein (Schnitzlein และคณะ, 1988) แสดงได้ดังรูป (d) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งที่มากที่สุดที่ความเร็วอากาศ รูป (e) เป็นการบันทึกเวลาที่ใช้ในการพาของแข็งทั้งหมดหลุดออกจากโรเซออร์ รูปสุดท้ายคือรูป (f) แสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนช่องว่างต่อความสูงกับความเร็วอากาศ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ยากในการทดลอง

นอกจากนี้ค่า U_t ยังสามารถคำนวณได้จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ (Reynold's Number) และเลขอาร์คิมิดีส (Archimedes Number) ที่มีผู้วิจัยในอดีตหลายท่านเสนอไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 วิธีการทดลองที่ใช้ในการหา Transport Velocity, U_{tr}
(Smolders K. และ Baeyens J., 2001)

ตารางที่ 2.1 สมการแสดงความสัมพันธ์เพื่อหาค่า Transport Velocity (U_{tr})
(Monazam E.R. และคณะ, 2005)

ผู้วิจัย	สมการ
Perales และคณะ (1990)	$Re_t = 1.41 Ar^{0.483}$
Lee และ Kim (1990)	$Re_t = 2.916 Ar^{0.345}$
Bi และ Fan (1991)	$Re_t = 2.28 Ar^{0.419}$
Mori และคณะ (1992)	$Re_t = 1.46 Ar^{0.56}$
Adanez และคณะ (1993)	$Re_t = 2.078 Ar^{0.463}$
Bi และ Grace (1995)	$Re_t = 1.53 Ar^{0.50}$
Chebouni และคณะ (1995)	$Re_t = 0.169 Ar^{0.545} (D/d_p)^{0.3}$
Smolders และ Baeyen (2001)	$Re_t = 1.75 Ar^{0.468}$

โดยสรุปแล้วรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในแก๊สพลูอิโดเซชันสามารถแสดงเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 2.3 เมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งคงที่ เมื่อความเร็วอากาศที่ใช้น้อยกว่า V_{mf} ทำให้เกิดเบตนิ่ง เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นมากกว่า V_{mf} แต่น้อยกว่า V_{ms} ทำให้เกิดเบตแบบฟองอากาศ ต่อมาเพิ่มความเร็วอากาศจนมากกว่า V_{ms} แต่น้อยกว่า V_c จึงเกิดเบตแบบสลักกิ่ง ต่อด้วยเบตแบบปั่นป่วน ที่ความเร็วอากาศมากกว่า V_c แต่น้อยกว่า V_{CA} แล้วจึงเกิดเบตแบบความเร็วสูงที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นแบบ คอรั-แอนนูลัส ที่ความเร็วอากาศมากกว่า V_{CA} แต่น้อยกว่า V_{mp} และสุดท้ายจึงเกิดเป็นเบตแบบเจือจาง (Dilute Flow) ที่ความเร็วอากาศมากกว่า V_{mp} ส่วนการไหลแบบหนาแน่นที่ไม่เกิดฟองอากาศเกิดเฉพาะของแข็งที่อยู่ใน กรู๊ป A เท่านั้น และเบตแบบสลักกิ่งจะไม่เกิดขึ้นเมื่อหอตกลงมีขนาดใหญ่ ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆที่ปรากฏในรูปที่ 2.2 สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_{mf} = U_{mf} + \left(\frac{G_s \varepsilon_{mf}}{\rho_p (1 - \varepsilon_{mf})} \right) \quad (2.14)$$

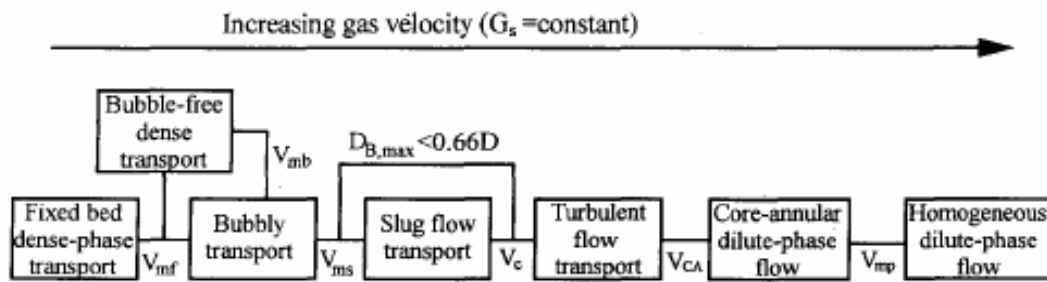
$$V_{mb} = U_{mb} + \left(\frac{G_s \varepsilon_{mb}}{\rho_p (1 - \varepsilon_{mb})} \right) \quad (2.15)$$

$$V_{ms} = U_{ms} + \left(\frac{G_s \varepsilon_{ms}}{\rho_p (1 - \varepsilon_{ms})} \right) \quad (2.16)$$

$$V_c = U_c + \left(\frac{G_s \varepsilon_c}{\rho_p (1 - \varepsilon_c)} \right) \quad (2.17)$$

$$\frac{V_{CA}}{\sqrt{gd_p}} = 21.6 Ar^{0.105} \left(\frac{G_s}{\rho_g V_{CA}} \right)^{0.542} \quad (2.18)$$

$$V_{mp} = 10.1 (gd_p)^{0.347} \left(\frac{G_s}{\rho_g} \right)^{0.310} \left(\frac{d_p}{D} \right)^{-0.139} Ar^{-0.021} \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.3 แผนผังแสดงลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในแก๊สฟลูอิดไอเซชัน

(Bi H.T., และ Grace J.R., 1995)

โดยที่	V_{mf}, U_{mf}	คือ ความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันในท่อส่งอากาศ และในเบดตามลำดับ, เมตรต่อวินาที
	G_s	คือ อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง, กก.ต่อตร.เมตรต่อวินาที
	ρ_p	คือ ความหนาแน่นของของแข็ง, กก.ต่อตร.เมตร
	V_{mb}, U_{mb}	คือ ความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟองอากาศในท่อส่งอากาศและในเบดตามลำดับ, เมตรต่อวินาที โดยที่
		$U_{mb} = 33d_p(\rho_g/\mu_g)^{0.1}$ (2.20)
	$\epsilon_{mf}, \epsilon_{mb}, \epsilon_{ms}$	คือ สัดส่วนช่องว่างที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ฟลูอิดไอเซชัน เกิดเบดแบบฟองอากาศ และเกิดสลักกิ้ง (โดยทั่วไปใช้ค่าประมาณ 0.55) ตามลำดับ
	V_{ms}, U_{ms}	คือ ความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เกิดสลักกิ้งในท่อส่งอากาศ และในเบดตามลำดับ, เมตรต่อวินาที โดย
		$U_{ms} = U_{mf} + 0.07\sqrt{gD}$ (2.21)
	V_c, U_c	คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดเบดแบบปั่นป่วนในท่อส่งอากาศ และในเบดตามลำดับ, เมตรต่อวินาที
	ϵ_c	คือ สัดส่วนช่องว่างที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดเบดแบบปั่นป่วน โดยทั่วไปใช้ค่า 0.65 หรือคำนวณได้จากสมการ
		$\epsilon_c = \epsilon_{Bc} + (1 - \epsilon_{Bc})\epsilon_{mf}$ (2.22)
		โดย $\epsilon_{Bc} = 0.30Ar^{0.04}$ ($2 < Ar < 2 \times 10^6$) (2.23)

V_{CA}	คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิด Core-Annulus, เมตรต่อวินาที
g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่า 9.8 เมตรต่อวินาที ²
d_p	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของแข็ง, เมตร
ρ_g	คือ ความหนาแน่นของอากาศ, กก.ต่อลบ.ม.
Ar	คือ Archimedes number หาได้จากสมการ

$$Ar = \frac{\rho_g (\rho_p - \rho_g) d_p^3 g}{\mu_g^2} \quad (2.24)$$

V_{mp}	คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดเบดเบาบางแบบสม่ำเสมอตลอดทั้งไรเซอร์, เมตรต่อวินาที
D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไรเซอร์, เมตร

2.3 การจำแนกของแข็ง (Grace J. R., และคณะ 1997)

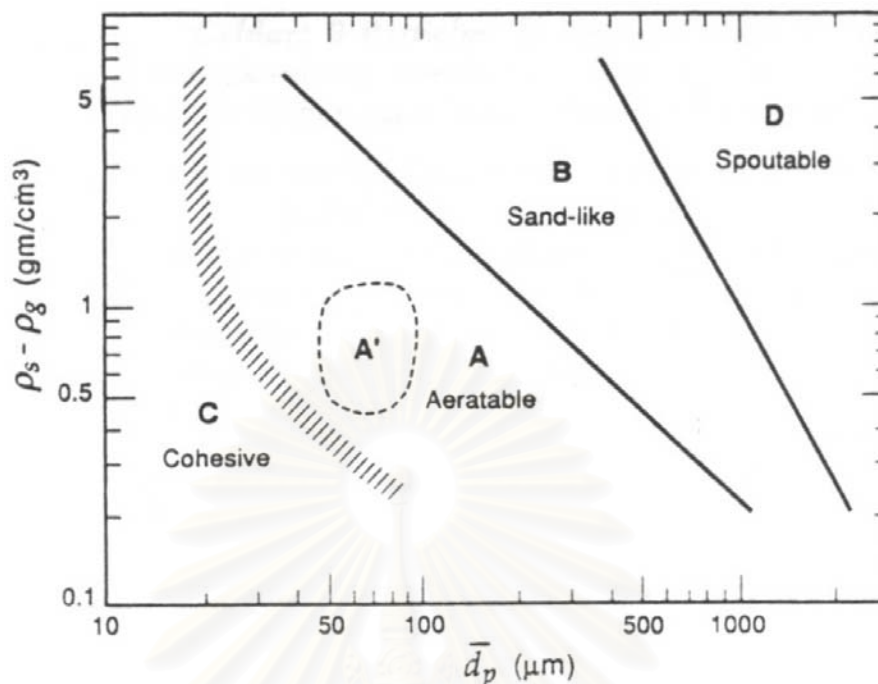
โดยทั่วไปของแข็งสามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่มตามวิธีของ Geldart (Geldart Powder Classification) โดยวิเคราะห์ผลต่างของความหนาแน่นของของแข็งกับอากาศและขนาดของของแข็งเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.4 ลักษณะของอนุภาคในแต่ละกลุ่มอธิบายได้ดังนี้

Group C คือ Cohesive หรือ Very Fine Powders เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก น้อยกว่า 50 ไมโครเมตร ของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดิไดซ์ได้ยาก เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะสูงมากและมักจะจับตัวกันเป็นก้อน

Group A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ สามารถทำให้เกิดฟลูอิดิไดซ์ได้ง่ายเป็นฟลูอิดิไดซ์แบบสม่ำเสมอ (Smooth Fluidization) ที่ความเร็วอากาศต่ำๆ และที่ความเร็วอากาศสูงๆ ก็สามารถควบคุมการเกิดฟองอากาศได้

Group B คือ Sandlike เป็นของแข็งที่มีขนาด อยู่ในช่วง $50 < d_p < 500$ ไมโครเมตร. และความหนาแน่นในช่วง $1.4 < \rho_s < 4$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การเกิดฟลูอิดิไดซ์เซชันยังเกิดได้ง่าย แต่อธิพลของฟองอากาศจะสูงขึ้น และฟองจะมีการโต

Group D คือ Spoutable ของแข็งที่มีขนาดใหญ่และหรือความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงเกิดฟลูอิดิไดซ์เซชันได้ยาก



รูปที่ 2.4 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart (Grace, J. R. 1997)

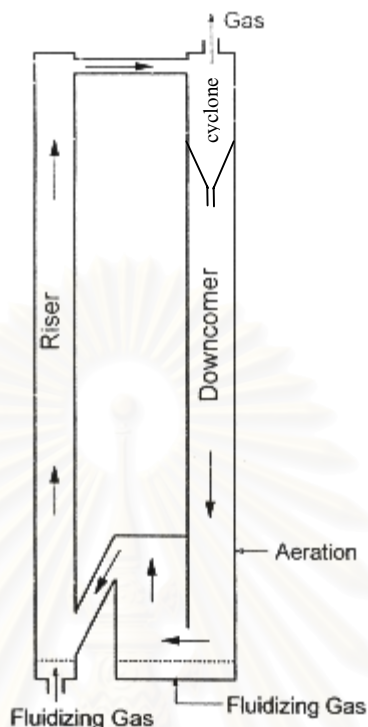
2.4 ฟลูอิดไลซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

ระบบฟลูอิดไลซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการสัมผัสระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็งเป็นระบบที่ค้นพบเป็นครั้งแรกโดย Winkler (Grace J. R., 1997) ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ฟลูอิดไลซ์เบดแบบหมุนเวียนในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างเช่น การเผาไหม้ถ่านหิน (Coal Combustion) การผลิตแก๊สจากถ่านหิน (Coal Gasification) และ กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic Cracking, FCC) เป็นต้น (Sabbaghan H. และคณะ, 2004) เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นฟลูอิดไลซ์เบดแบบหมุนเวียนจะทำงานภายใต้ภาวะเบดแบบความเร็วสูงหรือเบดแบบส่งผ่าน ทำให้มีข้อได้เปรียบหลายอย่างเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบทั่วไป ที่มักจะเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบฟองอากาศหรือฟลูอิดไลซ์เบดแบบปั่นป่วน อย่างเช่น ประสิทธิภาพการสัมผัสกันระหว่างอากาศกับของแข็งมีค่าสูง ลดการกระจายตัวในแนวแกนของทั้งของแข็งและอากาศ เป็นต้น (Zhang H. และคณะ, 2001)

2.4.1 ลักษณะของระบบฟลูอิดไลซ์เบดแบบหมุนเวียน (Characteristics of Circulating Fluidized Bed)

ระบบฟลูอิดไลซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นระบบซึ่งอาศัยเทคนิคทางฟลูอิดไดเซชันมาประยุกต์ใช้งาน ระบบจะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 คือ

1) ท่อไรเซอร์ เป็นส่วนที่สำคัญที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่รวมถึงการเผาไหม้มักเกิดที่ส่วนนี้ มีลักษณะเป็นท่อสูงประมาณ 5-20 เมตร ทำงานภายใต้ภาวะการเกิดฟลูอิดไดซ์



รูปที่ 2.5 ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Grace, J. R. 1997)

เบดที่ความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed) ในอุตสาหกรรมน้ำมัน ส่วนของท่อไรเซอร์เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอน้ำมันหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นของแข็งในกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic Cracking) และในเตาเผาในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Combustor) การเผาไหม้ของถ่านหินและชีวมวลก็เกิดขึ้นในส่วนของไรเซอร์เช่นกัน

2) Gas-Solid Separator เช่น Cyclone ทำหน้าที่ดักจับเม็ดของแข็งที่หลุดออกมาจากท่อไรเซอร์ โดยอาศัยแรงเหวี่ยงสู่ศูนย์กลาง

3) ท่อป้อนกลับ (Downcomer หรือ Return Leg) ทำหน้าที่ป้อนเม็ดของแข็งที่ได้จาก Cyclone กลับไปยังด้านล่างของท่อไรเซอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดของแข็ง

Fast Fluidization หรือ Dilute Phase Refluxing เป็นลักษณะหนึ่งของการสัมผัสกันระหว่างอากาศกับเม็ดของแข็ง ซึ่งอากาศจะเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของของแข็งที่อยู่เหนือตัวกระจายอากาศ โดยอากาศจะมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) ของอนุภาค ทำให้อนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ

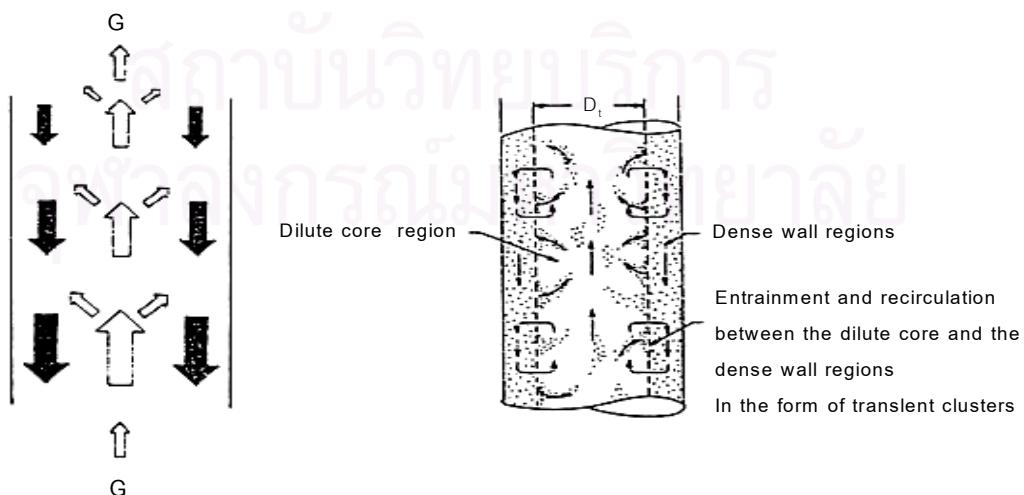
- 1) Cluster Phase ของแข็งจะเกาะอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่ม ๆ เคลื่อนที่ขึ้นลง (มีการสลายตัวและจัดตัวใหม่) ภายในท่อโรเซอรั
- 2) Disperse Phase ของแข็งมีเบาบางกระจายกันออกไป (อยู่ห่างกัน) และเคลื่อนที่ขึ้นผ่านไปยังท่อป้อนกลับ

ของแข็งที่เกาะตัวกันต่อเนื่องและรวมตัวกันเป็นกลุ่มภายใน Cluster Phase จะเรียกว่า Cluster หรือ Strand หรือ Streamer ซึ่งกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ และเคลื่อนที่ขึ้น ๆ ลง ๆ อยู่ใน Disperse Phase ซึ่งประกอบด้วย อากาศซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นและเม็ดของแข็งเบาบาง (ปริมาณน้อยกว่าใน Cluster Phase) เคลื่อนที่ไปพร้อมกับอากาศ

ของแข็งภายในเบดส่วนใหญ่จะอยู่ใน Cluster Phase และมีการเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแกนกลาง (ขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นจะมีขนาดกลุ่มของ Cluster ใหญ่ขึ้น) จนเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะตกกลับลงมาตามผนังของท่อโรเซอรั เมื่อเคลื่อนที่ตกกลับมาถึงจุด ๆ หนึ่ง Cluster ก็แตกสลายตัวออกจากกัน และเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นไปอีกครั้งหนึ่ง การรวมตัวกันเป็น Cluster และการสลายตัวออกจากกันจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.6

เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่สัมผัสกันของอากาศและของแข็ง และความหนาแน่นของของแข็งตลอดความยาวของท่อโรเซอรั จะเห็นรูปแบบการกระจายตัวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- 1) บริเวณที่ของแข็งเกิดการรวมตัวเป็น Cluster และสลายตัวอยู่ตลอดเวลาจะเกิดที่บริเวณด้านล่างของท่อโรเซอรั การกระจายตัวหรือความเข้มข้นของของแข็งมีค่าสูง เรียกว่า Dense Bed
- 2) บริเวณที่ของแข็งมีการกระจายตัวหรือมีความเข้มข้นน้อย ซึ่งเกิดบริเวณด้านบนของท่อโรเซอรัเรียกว่า Dilute Bed



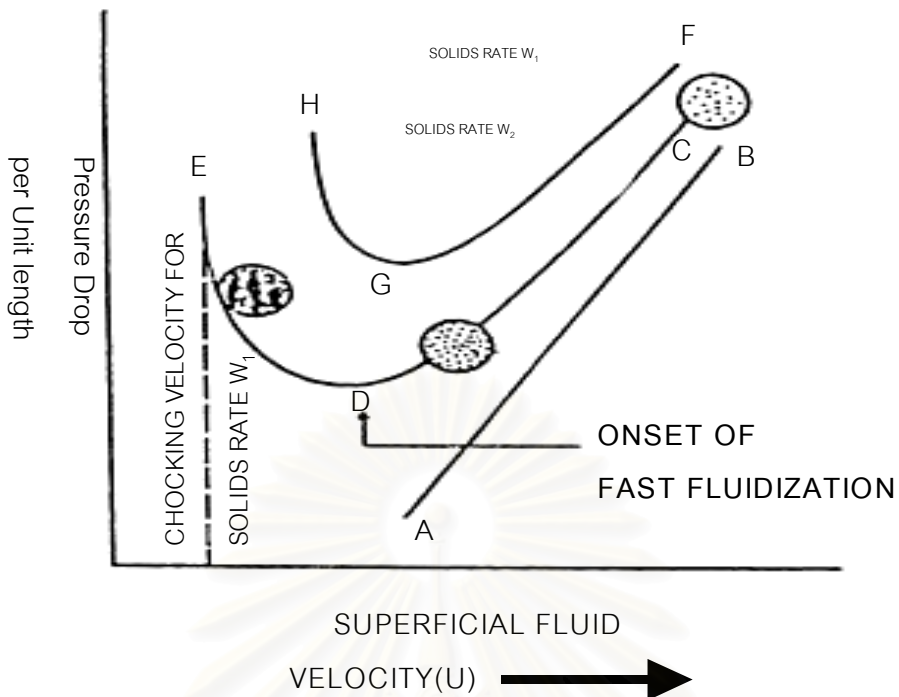
รูปที่ 2.6 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Cluster (Basu P., และ Fraser S.A., 1991)

คำว่า Fast Bed ถูกนิยามโดย Yerushalmi (Basu P., และ Fraser S.A., 1991) เพื่อใช้อธิบายภาวะหรือขอบเขตของฟลูอิดเซชันที่อยู่ระหว่างเบดแบบปั่นป่วน (Turbulent Bed) และเบดแบบส่งผ่าน (Pneumatic Transport) ต่อมา Reddy Karri และ Knowlton (1991) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาขอบเขตการเกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบดต่อหน่วยความยาวกับความเร็วกาศที่ใช้และสามารถสรุปผลขอบเขตในการเกิด Fast Bed ได้ดังรูปที่ 2.7

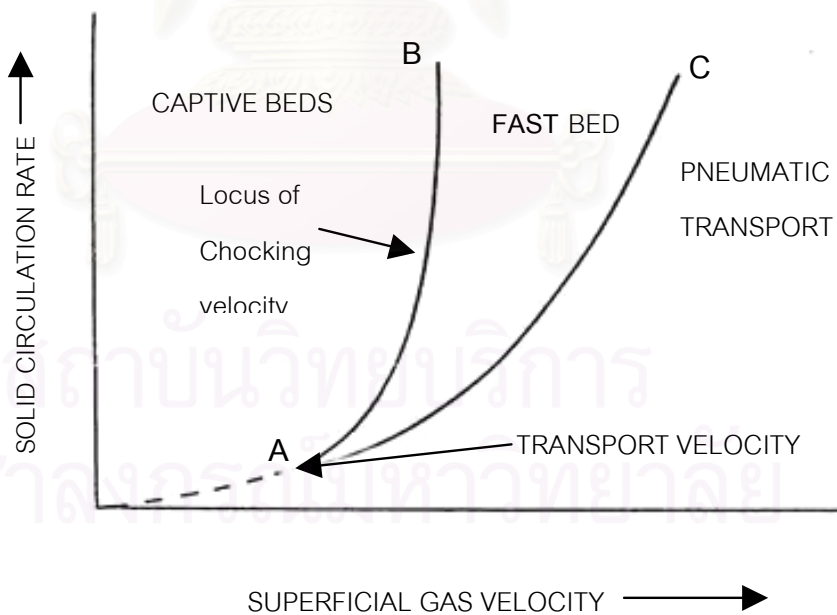
จากรูปที่ 2.7 พบว่าสำหรับการไหลของของผสมอากาศกับของแข็งที่มีความหนาแน่นบัลด์ (Bulk Density) หรือ Suspension Density มีค่าต่ำในแนวตั้งโดยอัตราการป้อนของแข็งเท่ากับ W_1 เมื่อลดความเร็วอากาศลงจากจุด C ซึ่งเป็นจุดที่มีความเร็วอากาศสูง การกระจายตัวของเม็ดของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเร็วอากาศที่สูงขึ้น เมื่อลดความเร็วลงจนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับจุด D ค่าความดันเนื่องจากน้ำหนักเม็ดของแข็ง Static Head กับความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานในการไหลของของผสม จะมีค่าต่ำที่สุด เรียกจุด D นี้ว่าจุดที่เริ่มเกิดเบดแบบความเร็วสูง, Fast Bed (Onset of Fast Fluidization) หรือจุดที่เปลี่ยนจากเบดแบบส่งผ่าน (Pneumatic Transport) ไปเป็นเบดแบบความเร็วสูง (Fast Bed) เมื่อความเร็วอากาศยังคงลดลงต่อไป (จากจุด D ไป E) การกระจายตัวของเม็ดของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นมากทำให้ความดันลดรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วอากาศลดลงจนถึงค่าหนึ่ง (ที่จุด E) อากาศจะไม่สามารถพัดพาของแข็งออกไปจากคอลัมน์ได้อีกของแข็งเริ่มที่จะสะสมตัวอยู่ในคอลัมน์ ทำให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมากดังในรูป ดังนั้นที่จุด E จึงเป็นจุดที่เปลี่ยนจากภาวะ Fast Bed ไปเป็น Captive Fluidized Bed (Turbulent Bed) ยกเว้นกรณีที่คอลัมน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเบดจะกลายเป็น สลักกิ้ง (Slugging) ภาวะที่จุด E จะเรียกว่า Chocking Condition (เป็นจุดที่อากาศอิมพัลด์ด้วยของแข็ง) และความเร็วที่จุด E จะเรียกว่าความเร็วช็อคกิ้ง (Chocking Velocity)

Reddy-Karri และ Knowlton (Basu P., และ Fraser S.A., 1991) ได้เสนอแผนภาพการเปลี่ยนภาวะขอบเขตของเบดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และอธิบายว่าเส้น A-B เป็นเส้นแบ่งขอบเขตระหว่าง Captive และ Fast Bed และเมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งสูงขึ้นการเปลี่ยนภาวะไปเป็นฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง จะต้องใช้ความเร็วสูงขึ้นด้วย

จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนภาวะเบดไปเป็นฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูงไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับความเร็วของอากาศ ขนาดของอนุภาค และความหนาแน่นของอนุภาคเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับขนาดของหอตลอด ความหนาแน่นและความหนืดของอากาศ แต่ถ้าหากเป็นระบบหมุนเวียนยังขึ้นอยู่กับอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งในระบบด้วย



รูปที่ 2.7 ขอบเขตของ Fast Fluidization (Basu P., และ Fraser S.A., 1991)



รูปที่ 2.8 ขอบเขตของ Fast Fluidization ที่เปลี่ยนแปลงกับอัตราไหลป้อนกลับของของแข็ง (Basu P., และ Fraser S.A., 1991)

2.4.2 โครงสร้างของเบตความเร็วสูง (Structure of Fast Beds)

ในระบบฟลูอิดเบตแบบหมุนเวียนนั้น การกระจายตัวของเม็ดของแข็งจะไม่สม่ำเสมอทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นระเบียบและการถ่ายเทพลังงานที่ไม่สมบูรณ์ ดังนั้นการศึกษาโครงสร้างของเบตความเร็วสูงจึงสามารถศึกษาได้จากตัวแปรดังต่อไปนี้

2.4.2.1 โพรไฟล์ของสัดส่วนช่องว่างในแนวแกน (Axial Voidage Profile)

การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ แสดงในรูปที่ 2.9 โดยเส้นที่ใช้สัญลักษณ์วงกลมโปร่งและวงกลมทึบ แสดงสัดส่วนช่องว่างที่ปริมาณของแข็งเริ่มต้น (Solid Inventory, I) ต่างๆ เมื่อความเร็วอากาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งคงที่ โดยที่ปริมาณของแข็งเริ่มต้นของเส้นที่ใช้สัญลักษณ์วงกลมทึบมีค่ามากกว่าเส้นที่ใช้สัญลักษณ์วงกลมโปร่ง ($I_1 > I_2$) พบว่า เมื่อปริมาณของแข็งเริ่มต้นมากขึ้นสัดส่วนช่องว่างในแนวแกนมีค่าน้อยลง และเส้นกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S-shape) เส้นกราฟแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ที่บริเวณด้านล่างปริมาณของแข็งหนาแน่นกว่าด้านบน และความหนาแน่นของของแข็งจะลดลงอย่างต่อเนื่องจากด้านล่างขึ้นไปด้านบนของไรเซอร์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของเม็ดของแข็งตลอดความสูงของคอลัมน์ สามารถแบ่งเบต ออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เบตหนาแน่น (Dense Bed) บริเวณด้านล่าง และ เบตเบาบาง (Dilute Bed) บริเวณด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งจุดเปลี่ยนจากเบตแบบหนาแน่นไปเป็นเบตแบบเบาบางอยู่สูงขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งเริ่มต้นมากขึ้น นั่นคือบริเวณที่เป็นเบตหนาแน่นจะมากขึ้น

เส้นที่ใช้สัญลักษณ์สามเหลี่ยมทึบ สามเหลี่ยมโปร่งและสี่เหลี่ยมโปร่ง แสดงสัดส่วนช่องว่างที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง (Solid Circulation Rate, G) ต่างๆ เมื่อความเร็วอากาศคงที่ โดยที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของเส้นที่ใช้สัญลักษณ์สามเหลี่ยมทึบมากกว่าเส้นที่ใช้สัญลักษณ์สามเหลี่ยมโปร่งและสี่เหลี่ยมโปร่ง ตามลำดับ ($G_1 > G_2 > G_3$) พบว่าเมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งเพิ่มขึ้นค่าสัดส่วนช่องว่างจะน้อยลง และเมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งเพิ่มมากขึ้น ลักษณะของกราฟเปลี่ยนจากรูปตัวเอส (G_3) ที่เบตมีการแบ่งชั้นเป็นเบตหนาแน่นและเบตเบาบางอย่างชัดเจน จนเกือบเป็นเส้นตรง (G_2 และ G_1) ที่เบตมีสัดส่วนช่องว่างใกล้เคียงกันตลอดทั้งคอลัมน์

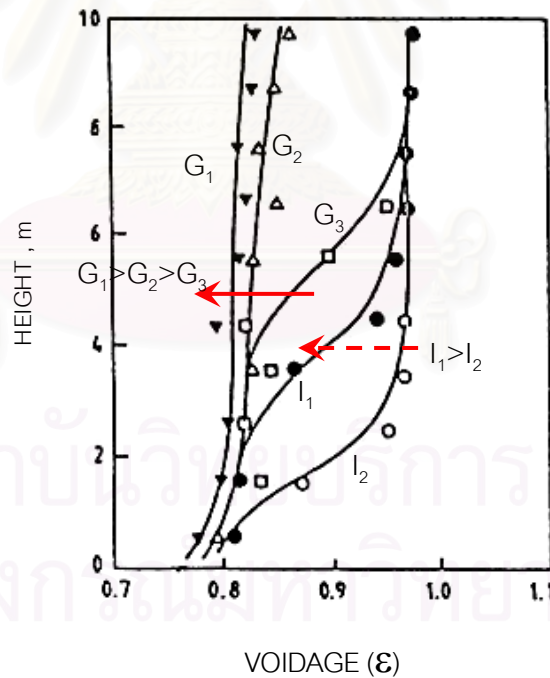
2.4.2.2 การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมี (Radial Distribution of Voidage)

สำหรับการกระจายตัวในแนวรัศมี (Radial Distribution) Bader และคณะ (Bader และคณะ, 1988) ได้ทำการศึกษา และสรุปได้ว่า สัดส่วนโดยปริมาตรของเม็ดของแข็งในพื้นที่หน้าตัดเดียวกัน (Local Volume Fraction of Solid) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากกึ่งกลางของคอลัมน์ไปยังผนังโดยจะมีค่ามากที่สุดที่ผนัง และมีค่าต่ำสุดที่กึ่งกลางของคอลัมน์ หรือสัดส่วนช่องว่างมีค่ามากที่สุดที่กึ่งกลางท่อ และมีค่าต่ำสุดที่ผนัง และการกระจายตัวในแนวรัศมีจะมีน้อย เมื่ออัตรา

การป้อนของแข็งมีค่าต่ำลง นอกจากนี้แล้วที่บริเวณด้านบนของคอลัมน์การกระจายตัวก็มีน้อยลงเช่นกัน ดังรูปที่ 2.10 Basu P. และ Fraser S.A. เสนอว่าการกระจายตัวในแนวรัศมีหรือสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมีจะขึ้นอยู่กับระยะในแนวรัศมี (r) จากแกนกลาง และสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัด (ϵ_{av}) ที่พิจารณาเท่านั้น และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมี, $\epsilon(r)$ ได้ดังนี้ (Basu P., และ Fraser S.A., 1991)

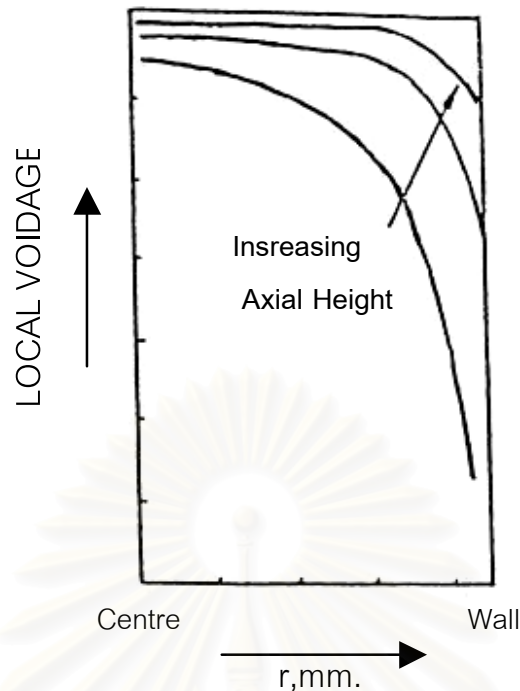
$$\epsilon(r) = \epsilon_{av}^{[3.6(r/R)^{6.47} + 0.191]} \quad (2.25)$$

โดยที่ ϵ_{av} คือ สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ
 r คือ ระยะทางในแนวรัศมีที่ต้องการวัดสัดส่วนช่องว่าง, เมตร
 R คือ รัศมีของท่อโรเซออร์, เมตร



รูปที่ 2.9 โพรไฟล์การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน

(Basu P., และ Fraser S.A., 1991)



รูปที่ 2.10 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ Fast Bed (Basu P., และ Fraser S.A., 1991)

2.4.3 ฟลูอิดเบดและวงจรความดัน (Pressure Loop) (สมชาย, 2004)

ฟลูอิดเบดส่วนใหญ่จะมีหน้าที่ทำหน้าที่ป้อนของแข็งกลับเข้ามาใหม่ สำหรับระบบที่เกิดแบบฟองอากาศ, แบบสลักกิ่ง และเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งมีเม็ดของแข็งที่เคลื่อนที่หลุดออกไปจากระบบมีน้อย โดยทั่วไปแล้วจะมีไซโคลนซึ่งมีขาคู่อยู่ในเบด เพื่อป้อนกลับของแข็งจะเห็นว่าของแข็งที่อยู่ในหอยจะลอยตัวขึ้นเนื่องจากถูกเป่าด้วยแก๊สที่มาจากส่วนล่างของหอย ของแข็งบางส่วนที่อยู่ในไซโคลนจะถูกดันขึ้น อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากจะหลุดลอยไปจากไซโคลน เมื่อทำการวัดความดันที่จุดต่างๆ แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูงของหอยในลักษณะวงจรความดัน พบว่าผลต่างระหว่างระดับความสูงของของแข็งในไซโคลนและในเบด เป็นความสูงที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นเพื่อสมดุลความดันในไซโคลน เนื่องจากความดันรวมรอบวงจรต้องมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ

สำหรับฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน (ฟลูอิดเบดความเร็วสูง) จะต้องออกแบบให้ท่อป้อนกลับมีขนาดใหญ่กว่าหรือใกล้เคียงกับท่อไรเซอร์ เพื่อให้สามารถป้อนของแข็งกลับมาได้ทันเวลา ระบบประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ ด้านไรเซอร์ ซึ่งเกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง ส่วนบนของท่อป้อนกลับซึ่งเกิดการหมุนวนของอนุภาคแล้วตกกลับลงมาเนื่องจากถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เหมือนไซโคลน และส่วนล่างของท่อป้อนกลับซึ่งเกิด ฟลูอิดเซชันแบบฟองอากาศ โดยที่อากาศจะถูกเป่าเข้าที่ส่วนล่างของท่อไรเซอร์และท่อป้อนกลับเพื่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง และฟลูอิดเซชันแบบฟองอากาศตามลำดับ เมื่อทำการวัดความดันที่จุดต่างๆแล้วนำมาเขียน

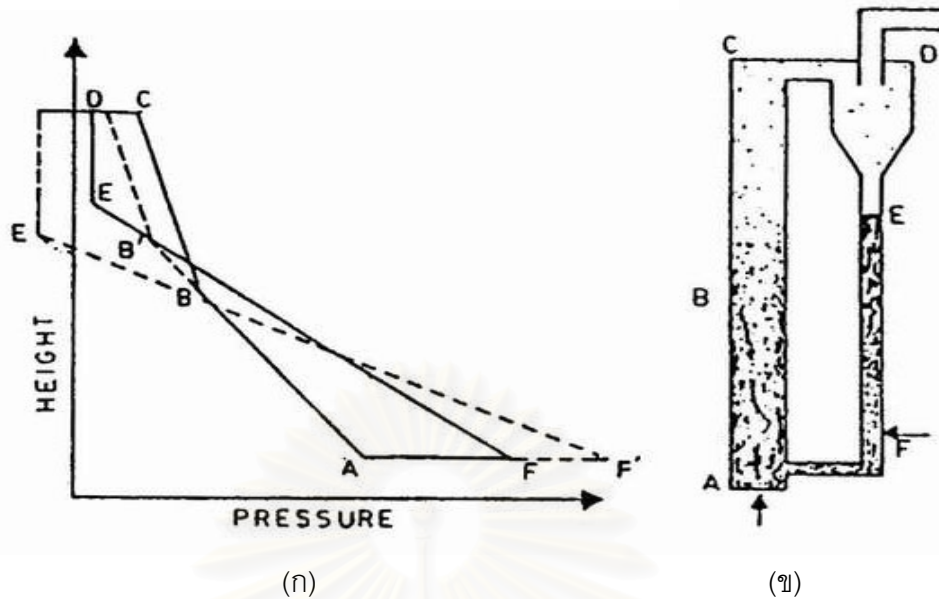
กราฟเทียบกับความสูงในลักษณะของวงจรรวมความดันพบว่า ส่วนบนของท่อป้อนกลับที่อยู่เหนือระดับของเบด ความดันจะคงที่ตลอดเนื่องจากมีการตกของอนุภาคอิสระ ส่วนด้านเบดที่เกิดฟองอากาศที่อยู่ในภาวะเฟสหนาแน่นซึ่งมีความหนาแน่นบัลค์สูง จะเกิดความดันลดคร่อมเบดสูงกว่าทางด้านไรเซอร์ ซึ่งเกิดฟลูอิโดเซชันที่ความเร็วสูงและมีความหนาแน่นบัลค์ต่ำมีสัดส่วนช่องว่างมาก อนุภาคจะกระจายตัวตลอดความสูงของหอ

ดังกล่าวมาแล้วว่าระบบฟลูอิโดเซชันแบบหมุนเวียนทางด้านท่อไรเซอร์ซึ่งอยู่ในภาวะฟลูอิโดเซชันที่ความเร็วสูง ซึ่งมีการกระจายตัวของเม็ดของแข็งในแนวแกน (Axial Distribution) จะเกิดการแบ่งเป็น 2 เฟส คือ แบบหนาแน่น (Dense Phase) ที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์และแบบเจือจาง (Dilute Phase) ที่บริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์

พิจารณาวงจรรวมความดันในรูปทั้งสอง (รูปที่ 2.11 ก และ ข) จะเห็นว่าช่วงที่เปลี่ยนจากเบดแบบหนาแน่น (Dense Phase) ไปเป็นเบดแบบเบาบาง (Dilute Phase) นั้น เส้นกราฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความชัน ซึ่งในช่วงเบดแบบเบาบางนั้น จะมีความดันลดต่ำกว่าในช่วงเบดแบบหนาแน่น เพราะจะมีการกระจายตัวของเม็ดของแข็งต่ำกว่า และความชันของกราฟในช่วงนี้จะมีค่าสูงกว่าในช่วงเบดแบบหนาแน่น ซึ่งแสดงว่าในช่วงเบดแบบเบาบางนั้น การกระจายตัวตามแนวรัศมีจะเกิดขึ้นน้อยกว่าในช่วงเบดแบบหนาแน่น แต่การกระจายตัวของแข็งก็ลดลงอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูงในอัตราส่วนที่น้อยมาก

ช่วงเปลี่ยนจากเบดแบบหนาแน่น ไปเป็นเบดแบบเบาบางนั้น เป็นฟังก์ชันกับอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งและปริมาณเม็ดของแข็งในระบบ พิจารณาระบบซึ่งมีปริมาณของแข็งคงที่แต่เปลี่ยนอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง ดังรูปที่ 2.11(ข) เส้นประในรูปแสดงถึงการหมุนเวียนของแข็งที่ลดลง จะเห็นว่าความสูง ณ จุดที่เปลี่ยนจากเบดแบบหนาแน่น ไปเป็นเบดแบบเบาบาง จะมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาสมดุลความดัน (Pressure Balance) รอบวงจรรวม หรือ ระบบฟลูอิโดเซชันแบบหมุนเวียนตามรูปที่ 2.11(ก) ที่ส่วนล่างของท่อไรเซอร์เบดจะหนาแน่นกว่าด้านบนทำให้ความดันลดต่อความสูงที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์มีค่าสูงกว่าด้านบน โดยที่ของแข็งในระบบฟลูอิโดเซชันแบบหมุนเวียนจะกระจายอยู่ในท่อไรเซอร์และท่อป้อนกลับ โดยที่ความดันลดในทั้งสองท่อจะสมดุลกันอยู่ นั่นคือผลรวมของความดันลดทั้งระบบจะมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2.11 วงจรความดันของระบบฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

(Basu P., และ Fraser S.A., 1991)

2.5 อุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular Temperature) (Gidaspow D. และคณะ, 2004)

ในอุตสาหกรรมทั่วไป โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเคมี มีการประยุกต์ใช้กระบวนการฟลูอิด์เบดเช่นกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง และมีอัตราการถ่ายเทความร้อนและมวลสูง เนื่องจากในกระบวนการฟลูอิด์เบดของแข็งที่ลอยตัวอยู่ในของไหลจะเกิดการเคลื่อนที่อย่างอิสระ เกิดการชนแบบไม่มีทิศทางที่แน่นอน ดังนั้นทฤษฎีที่เหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ของของแข็งที่เกิดการชนดังกล่าว คือ ทฤษฎีจลนพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเม็ดแกรนูลาร์ (Kinetic Theory of Granular Flow) ซึ่งทฤษฎีนี้แสดงให้เห็นว่า สมบัติการเคลื่อนที่ของของแข็ง อย่างเช่น ความหนืดของของแข็ง สามารถหาได้จากกรวัดการแกว่งอย่างไม่มีทิศทางที่แน่นอนของความเร็วของของแข็ง นอกจากนี้ยังสามารถนำทฤษฎีนี้ไปประยุกต์ใช้ เพื่อทำนายรูปแบบการเคลื่อนที่แบบคอร์-แอนนูลัส ที่มักเกิดขึ้นภายในไรเซอร์ในฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนและทำนายการเกิดคลัสเตอร์ เป็นต้น

หลักการพื้นฐานที่สำคัญใน คือ อุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular Temperature) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดการแกว่งอย่างไม่มีทิศทางแน่นอนของความเร็วของของแข็ง คล้ายกับเทอมที่ใช้วัดอุณหภูมิของอากาศ (Thermal Temperature) ในทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของแก๊ส โดยที่เทอมที่ใช้วัดอุณหภูมิของอากาศเป็นตัวแปรที่ใช้สำหรับเปลี่ยนจากพลังงานเป็นความร้อน เรียกว่า ค่าคงที่ของโบลท์แมน (Boltzmann Constant) ในขณะที่ในทฤษฎีจลนพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของเม็ดแกรนูลาร์ ค่าคงที่นี้เท่ากับหนึ่ง ในการเคลื่อนที่แบบแกรนูลาร์ (Granular Flow) ของแข็งเกิด

การกระจายพลังงานต่อกัน เนื่องจากมีการชนกันอย่างไม่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ของของแข็ง ดังนั้น พลังงานที่เกิดขึ้นในระบบจึงไม่คงที่ อุณหภูมิแกร์นูลาร์จึงเป็นพลังงานจลน์ต่อหนึ่งหน่วยมวล เท่ากับค่าเฉลี่ยของความเร็วกำลังสองของของแข็งในทั้งสามทิศทาง

ในไรเซอร์ที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งที่มีการถ่ายทอดพลังงานระหว่างของแข็ง อย่างสมบูรณ์ เมื่อความเร็วในแนวแกนของของแข็งมีค่าคงที่ สมดุลอุณหภูมิแกร์นูลาร์คำนวณได้ จากการนำความร้อน และความร้อนที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาไรเซอร์ที่เป็นทรงกระบอก อุณหภูมิแกร์นูลาร์สามารถคำนวณได้เมื่อสมมติฐานที่ใช้ คือ การนำความร้อน (Conductivity, \mathbf{K}) และ ความหนืดของของแข็ง (Particle Viscosity, μ_s) มีค่าคงที่ ดังแสดงในสมการที่ 2.26

$$\frac{\kappa}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\theta}{dr} \right) = -\mu_s \left(\frac{\partial u_s}{\partial r} \right)^2 \quad (2.26)$$

สมมติฐานที่ใช้ต่อมาคือ การกระจายของพลังงานที่เกิดจากการชนของของแข็งทั้งหมด เกิดขึ้นที่ผนังเท่านั้น ดังนั้นอุณหภูมิแกร์นูลาร์ที่บริเวณผนัง ($r=R$) ของไรเซอร์ แสดงในสมการที่ 2.27

$$\theta(R) = \theta_w \quad (2.27)$$

ความเร็วของของแข็ง (U_s) สามารถประมาณค่าได้จากผลต่างระหว่างความเร็วอากาศกับความเร็วสุดท้ายของของแข็ง การประมาณค่าความหนืดของตัวเร่งปฏิกิริยาคำนวณจาก สมดุลโมเมนตัมของของผสมระหว่างอากาศและของแข็ง และความเร็วของของแข็งตามแนวรัศมี แสดงได้ดังสมการที่ 2.28

$$\frac{\mu_s}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du_m}{dr} \right) = \frac{dP}{dz} - \rho_m g \quad (2.28)$$

เมื่อผลต่างระหว่างความเร็วของอากาศกับความเร็วของของผสมระหว่างอากาศกับของแข็ง ($U_g - U_m$) และผลต่างระหว่างความเร็วของอากาศกับความเร็วของของแข็ง ($U_g - U_s$) มีค่าใกล้เคียงกัน หลังจากอินทิเกรตสมการที่ 2.28 ความเร็วของของแข็งที่อยู่ในเทอม $\frac{\partial u_s}{\partial r}$ จากสมการที่ 2.26 สามารถประมาณได้ดังแสดงในสมการที่ 2.29

$$u_s = 2\bar{u}_s \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2.29)$$

โดยที่ \bar{u}_s คือความเร็วของแข็งเฉลี่ยเคลื่อนที่ในทิศเดียวกับอากาศ คำนวณได้จากสมการ

$$\bar{u}_s = -\frac{R^2}{8\mu_s} \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \rho_m g \right) \quad (2.30)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของโรเตอร์

หลังจากอินทิเกรตสมการที่ 2.26 สามารถคำนวณอุณหภูมิแก๊รนูลาร์ได้ดังสมการที่ 2.31

$$\theta - \theta_w = \left(\frac{\mu_s}{\kappa} \right) \bar{u}_s^2 \left(1 - \frac{r^4}{R^4} \right) \quad (2.31)$$

ความเร็วของแข็งเฉลี่ยเคลื่อนที่ในทิศเดียวกับอากาศ จากสมการที่ 2.30 สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแก๊รนูลาร์ที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางโรเตอร์ (θ_{\max}) และความเร็วเฉลี่ยของของแข็ง (u_s) ได้ดังสมการที่ 2.32

$$\theta_{\max} - \theta_w = \left(\frac{\mu_s}{\kappa} \right) \bar{u}_s^2 \quad (2.32)$$

จากสมการที่ 2.32 พบว่าอุณหภูมิแก๊รนูลาร์จะขึ้นอยู่กับความเร็วกำลังสองของของแข็ง นั่นคือเมื่อความเร็วอากาศน้อยทำให้อุณหภูมิแก๊รนูลาร์มีค่าน้อยลงด้วย

2.6 ชีวมวล (Biomass) (Seksan P. และคณะ, 2002)

ชีวมวลจัดเป็นต้นกำเนิดพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญ โดยเฉพาะในแถบชนบทของประเทศ ไทย อุตสาหกรรมขนาดเล็กส่วนใหญ่ใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลเป็นแหล่งกำเนิดของพลังงาน อย่างเช่นกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากการเกษตร กระบวนการแปรรูปอาหาร อุตสาหกรรมเกี่ยวกับไม้ เป็นต้น และในปัจจุบัน ประเทศไทยยังมีการใช้ชีวมวลในการผลิตไฟฟ้า ความร้อน รวมไปถึงเชื้อเพลิงเหลว อย่างเช่น เอทานอลอีกด้วย ชีวมวลจัดเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูกที่สุด และในอนาคตยังเป็นทางเลือกที่สำคัญที่จะนำมาเป็นต้นกำเนิดพลังงานในเชิงพาณิชย์อีกด้วย นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพราะชีวมวลเป็นของเหลือจากการเกษตรที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถนำไปใช้เพื่อผลิตเป็นพลังงาน มีต้นกำเนิดมาจากธรรมชาติหลายแหล่งด้วยกัน สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- ผลผลิตที่ได้จากการเกษตร อย่างเช่น ต้นอ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นต้น โดยผลผลิตเหล่านี้มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น คาร์โบไฮเดรต แป้ง และน้ำตาล รวมทั้งพลังงานสามารถเปลี่ยนจากน้ำมันพืชไปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้
- ของเหลือจากการเกษตร อย่างเช่น ฟางข้าวจากนาข้าว ชังข้าวโพดจากไร่ข้าวโพด เป็นต้น

- ไม้และของเหลือจากไม้ อย่างเช่น ต้นไม้ที่โตเร็วมากๆ ของเสียที่เป็นไม้ที่เกิดจากการบดไม้ และของเสียจากกระบวนการย่อยกระดาษ เป็นต้น
- ของเสียจากกระบวนการต่างๆ อย่างเช่น ขี้ขาวเปลือกจากการบดข้าว ชานอ้อยและกากน้ำตาลจากการผลิตน้ำตาล กากจากการสกัดน้ำมันปาล์ม เป็นต้น

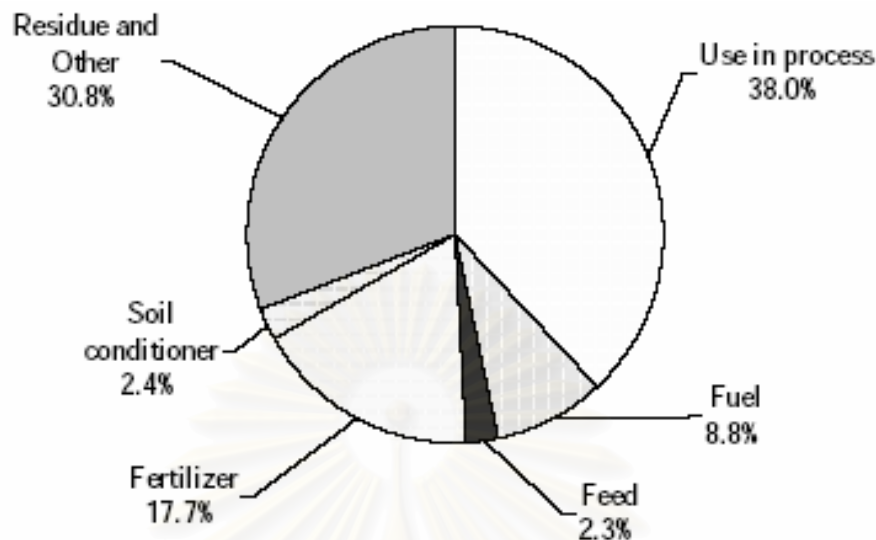
ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ดังนั้นจึงมีปริมาณของชีวมวลมากด้วย ตารางที่ 2.2 แสดงถึงปริมาณของชีวมวลในประเทศไทยในปี 2004 ที่ได้จาก ต้นอ้อย ข้าว และน้ำมันปาล์ม

แกลบเป็นชีวมวลที่ได้จากการบดข้าวเปลือก มีปริมาณคิดเป็นร้อยละ 23 ของน้ำหนักข้าวเปลือกทั้งหมด ในแต่ละปีมีข้าวเปลือก 25 ล้านตันสามารถผลิตแกลบได้ทั้งหมด 5.75 ล้านตัน แกลบสามารถใช้เป็นพลังงานได้โดยการเผาไหม้โดยตรง หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตถ่านไม้ ในปัจจุบันแกลบยังสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า โดยแกลบ 9800 ตันสามารถให้พลังงานไฟฟ้าได้ 1 เมกะวัตต์ การใช้ประโยชน์จากแกลบในกระบวนการอื่นๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12

ตารางที่ 2.2 ชีวมวลที่ได้จากข้าว ต้นอ้อย และน้ำมันปาล์ม ในปี 2004 (หน่วย:1000 ตันต่อปี)

(Seksan P. และคณะ, 2002)

ชนิด	ปริมาณการผลิต	ของเหลือจากการเกษตร	ปริมาณที่เหลือ	ปริมาณที่เหลือที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์
ต้นอ้อย	70,101	ชานอ้อย	20,399	4,223
		Trash	21,171	20,874
ข้าว	26,841	แกลบ	6,173	3,044
		ฟางข้าว	11,998	8,207
น้ำมันปาล์ม	4,903	กึ่งต้นปาล์ม	1,226	716
		เส้นใย	721	97
		เปลือก	240	9
		Fronds	12,767	12,767
รวม			74,695	49,936



รูปที่ 2.12 ร้อยละการใช้แคลบในกระบวนการต่างๆ (Seksan P. และคณะ, 2002)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhou J., และคณะ (1995) ทำการทดลองโดยใช้ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่มีโรเตอร์เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 146x146 มิลลิเมตร ในการหาความเร็วของทรายขนาด 213 ไมโครเมตร โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลป้อนกลับของทรายและ อัตราการไหลของอากาศ เทคนิคที่ใช้คือ Optical Fibre Probe พบว่าความเร็วของทรายที่เคลื่อนที่ขึ้นมีค่าน้อยที่สุดบริเวณผนังของโรเตอร์ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นมากที่สุดที่กึ่งกลางคอลัมน์ที่ทุกภาวะที่ศึกษา

Choi J.H., และคณะ (1995) ศึกษาผลของความเร็วอากาศและปริมาณของของแข็งเริ่มต้นที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ในเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน ที่มีโรเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. สูง 3.8 เมตร โดยใช้ผงซิลิกาเจล ขนาด 46 ไมครอนเป็นเบด พบว่า เมื่อความเร็วอากาศและปริมาณของของแข็งเริ่มต้นเพิ่มขึ้นทำให้อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งเพิ่มขึ้นสัดส่วนของแข็งตามความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ได้กราฟเป็นรูปตัว S (S-Curve) นั่นคือด้านล่างเป็นบริเวณเบดแบบหนาแน่นและด้านบนเป็นบริเวณเบดแบบเบาบาง

Bi H.T. และ Grace J.R. (1995) เสนอรูปแบบการไหลของระบบฟลูอิดเซชันเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศเรียงตามลำดับ จะเริ่มจากเบดนิ่ง ฟลูอิดเบดแบบหนาแน่นที่ไม่มีฟองอากาศ ต่อด้วยฟลูอิดเบดแบบฟองอากาศ ฟลูอิดเบดแบบสลักกิ่ง ฟลูอิดเบดแบบปั่นป่วน ฟลูอิดเบด

เขตแบบความเร็วสูง และทำที่สุดคือฟลูอิไดซ์เขตแบบเบาบาง และยังเสนอด้วยว่า ในเครื่องฟลูอิไดซ์เขตแบบหมุนเวียน ลักษณะการไหลของของแข็งในโรเตอร์จะเริ่มตั้งแต่ฟลูอิไดซ์เขตแบบปั่นป่วนเป็นต้นไป เนื่องจากข้อจำกัดของระบบ

Fei W. และคณะ (1998) ศึกษาความเร็วและปริมาณของของแข็งในโรเตอร์ ที่มีความหนาแน่นสูง โดยโรเตอร์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 18.6 ซม. สูง 8 เมตร อนุภาคที่ใช้คือ FCC ขนาด 54 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1398 กก.ต่อลบ.ม. โดยใช้เทคนิค LDV ในการหาความเร็วของ FCC พบว่าสามารถแบ่ง ความเร็ว และปริมาณของ FCC ในแนวรัศมีเป็น Core Region ($r/R < 0.4$) ความเร็วของ FCC จะมีค่าสูง ปริมาณน้อย และจะมีการเปลี่ยนแปลงตามแนวรัศมีเล็กน้อย Steep Velocity Region ($0.4 < r/R < 0.85$) การเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีของความเร็ว และปริมาณของ FCC ค่อนข้างมาก และ Annulus Region ($r/R > 0.85$) ความเร็วของ FCC จะค่อยๆ ลดลง และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อภาวะเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณของ FCC จะสูงที่สุด และเปลี่ยนแปลง เล็กน้อยตามแนวรัศมี

Mastellone และ Arena (1999) ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่น และขนาดของของแข็งที่มีต่อการกระจายตัวของของแข็งในโรเตอร์ตามแนวแกน และอัตราการไหลของของแข็งในแนวรัศมี ในฟลูอิไดซ์เขตแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันปกติ โดยของแข็งที่ใช้คือ ททราย FCC และ เม็ด ballotini ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม A และ B ตามเกณฑ์ของ Geldart โดยมีขนาดตั้งแต่ 67 ถึง 310 ไมโครเมตร พบว่าความหนาแน่นและขนาดของอนุภาคมีผลต่อ ระบบที่เฉพาะบริเวณทางเข้าด้านล่างของโรเตอร์เท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อใช้อนุภาคขนาดใหญ่จะไม่มีอนุภาคที่เคลื่อนที่ลงบริเวณผนังและอัตราการไหลของของแข็งในแนวรัศมีมีค่าใกล้เคียงกัน

Namkung W., และคณะ (1999) ทำการศึกษากฎการไหลแบบเขตความเร็วสูง (Fast Fluidization) ของ FCC และทราย ที่มีขนาด 65 และ 125 ไมโครเมตร ตามลำดับ ในโรเตอร์ที่มีขนาด 10 ซม. และสูง 5.3 เมตร และยังทำการทดลองเพื่อหาค่า Transport Velocity (U_{tr}) โดยวิธี Emptying Time และ Flooding Point พบว่า ค่า U_{tr} ของ FCC และทราย เท่ากับ 1.4 และ 2.4 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ จากผลการทดลองยังพบว่า เขตแบบความเร็วสูงสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ Fast Transition และ Fully Developed Fast Fluidization โดยใช้ความเร็ว U_{FT} (Fast Transition Velocity) ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$Re_{FT} = 0.395 Ar^{0.572} (G_s / \rho_g U_t)^{0.345} \quad (2.33)$$

Ibsen C. H., และคณะ. (2000) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้ลูกแก้วขนาด 105-250 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้คอลัมน์แก้วที่มีขนาดของท่อโรเซออร์ 3.2 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร เพื่อศึกษาความหนาแน่นของลูกแก้วที่มีต่อรูปแบบการไหล โดยใช้ 1D Laser and Phase Doppler anemometry เพื่อเก็บข้อมูลของความเร็ว และขนาดของลูกแก้ว พบว่าเมื่อปริมาณของลูกแก้วมีมากขึ้น ความเร็วในแนวแกนของอนุภาคก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะบริเวณด้านล่างของท่อโรเซออร์

Smolders K. และ Baeyens J. (2001) ทำการทดลองเพื่อหาความเร็ว U_{tr} ของทรายขนาด 90 ไมครอนและ FCC ขนาด 70 ไมครอน โดยการบันทึกค่าความดันที่อัตราการไหลป้อนกลับ ที่ความเร็วอากาศต่างๆ แล้วนำไปวาดกราฟ ได้ค่า U_{tr} ของทรายและ FCC เท่ากับ 3.4 และ 2.4 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ และยังได้เสนอสมการเพื่อหาค่า U_{tr} ดังนี้

$$Re_{TR} = 1.67Ar^{0.524} \quad 1 < Ar < 90 \quad (2.34)$$

$$Re_{TR} = 1.75Ar^{0.468} \quad 1 < Ar < 10^5 \quad (2.35)$$

Zhang H., และคณะ (2001) ทำการทดลองเพื่อวัดปริมาณและความเร็วของ FCC ขนาด 67 ไมครอนมีความหนาแน่นเท่ากับ 1500 กก./ลบ.ม. ตามแนวรัศมีในโรเซออร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 15.1 เมตร โดยใช้ Optical Fiber Solids Concentration Probe และ Optical Fiber Particle Velocity Probe ตามลำดับ พบว่าการกระจายตัวของ FCC ตามแนวรัศมีไม่สม่ำเสมอมีปริมาณน้อยที่กลางคอลัมน์และค่อยๆมากขึ้นเมื่อเข้าใกล้ผนัง ในขณะที่ความเร็วของ FCC แสดงลักษณะแบบ Core-Annulus นั่นคือมีความเร็วมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางคอลัมน์และค่อยๆน้อยลงเมื่อเข้าใกล้ผนัง

Shadle L.J., และคณะ (2003) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีโรเซออร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. ความสูง 15 เมตร โดยใช้ไม้คอร์กขนาด 189 ไมครอนเป็นเบด พบว่าที่ความเร็วอากาศคงที่ค่าหนึ่งเมื่อเพิ่มอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง กราฟของสัดส่วนช่องว่างกับความสูงของโรเซออร์ จะเปลี่ยนจาก C-shape ไปเป็น S-shape จนมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความสูงในที่สุด และยังพบว่าผลกระทบของลักษณะทางออกต่อค่าสัดส่วนช่องว่างที่บริเวณใกล้ทางออกจะเกิดขึ้นที่ความเร็วอากาศน้อยๆ แต่ความเร็วอากาศสูงๆ ลักษณะของทางออกจะไม่ส่งผลต่อค่าสัดส่วนช่องว่างอีกต่อไป

สมชาย สวยสอาด (2004) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง ในโรเซออร์ที่มีขนาด 5 เซนติเมตรความสูง 2 เมตร ใช้สารป้อนผสมระหว่างทรายและ

ชีวมวล 3 ชนิดคือ ชี้อ่อน แกลบและชานอ้อย โดยใช้กล้องความเร็วสูงในการวัดความเร็วของอนุภาค พบว่าเมื่อความเร็วอากาศคงที่ ความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมทุกชนิดลดลงตามความสูงของโรเตอร์ และเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศทำให้ความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วอากาศคงที่และที่ตำแหน่งความสูงเดียวกัน สารป้อนผสมระหว่างทรายกับชี้อ่อนมีความเร็วเฉลี่ยสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนที่เป็นทรายเพียงอย่างเดียว

Pandey P., และคณะ (2004) ศึกษาความเร็วของไม้คอร์กขนาด 812 ไมโครเมตรที่อยู่ใกล้ ๆ กับผนังท่อโรเตอร์ในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีท่อโรเตอร์ขนาด 30.5 เซนติเมตร และสูงถึง 15.2 เมตรเทคนิคที่ใช้ในการหาความเร็วของไม้คอร์กคือ Laser Doppler Velocimetry ตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ อัตราการไหลของอากาศและอัตราการไหลป้อนกลับของไม้คอร์ก พบว่าความเร็วเฉลี่ยของไม้คอร์กเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและเมื่อลดอัตราการไหลป้อนกลับ ความเร็วเฉลี่ยของไม้คอร์กที่กำลังเคลื่อนที่ในทิศลงหรือสวนทางกับอากาศคงที่ตลอดเวลาไม่เปลี่ยนแปลงตามภาวะที่ทดลอง นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเพื่อหาขนาดและความเร็วของคลัสเตอร์ (Cluster) ที่เกิดขึ้นพบว่าความเร็วของ คลัสเตอร์ทั้งหมดอยู่ในทิศสวนทางกับอากาศในช่วง 0.8-1.4 เมตรต่อวินาที และขนาดของคลัสเตอร์ จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วน ของไม้คอร์กต่ออากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มมากขึ้น

Rhodes M. J. และคณะ (2004) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ความเร็วของอากาศในช่วง 2.8-5 เมตรต่อวินาทีและที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งในช่วง 5-80 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที เพื่อศึกษาการผสมกันของของแข็งในแนวแกนตั้งโดยใช้ท่อโรเตอร์ 2 ขนาด คือ 15.2 และ 30.5 เซนติเมตร ของแข็งที่ใช้มีขนาด 71 ไมโครเมตรมีความหนาแน่นเท่ากับ 2,456 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตัวติดตาม (Tracer) ที่ใช้ผสมร่วมกับของแข็งคือโซเดียมคลอไรด์ ผลการศึกษาพบว่า การผสมกันของของแข็งตามแนวตั้งจะลดลงเมื่อขนาดของโรเตอร์เพิ่มขึ้น

Monazam E.R., และคณะ (2005) ทำการทดลองในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้โรเตอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 ซม. ของแข็งที่ใช้คือไม้คอร์ก อยู่ในกรู๊ป B ตามการแบ่งกรู๊ปของ Geldart ใช้วิธี Emptying Time ในการหาลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน จากการทดลองได้ค่าความเร็วที่เป็นรอยต่อ 2 ค่า คือ 2.2 และ 3.35 เมตรต่อวินาที ทำให้สามารถแบ่งกราฟออกได้เป็น 3 ช่วงที่สอดคล้องกับลักษณะการไหลแบบเบดปั่นป่วน เบดแบบความเร็วสูง และเบดเบาบางตามลำดับ

Jung J., และคณะ (2005) ทำการทดลองในฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ โดยใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุเบด และใช้เทคนิคกล้องความเร็วสูงในการหาค่าอุณหภูมิแก๊รน้ำในเบดแบบ 2 มิติ ในไรเซอร์ค่าอุณหภูมิแก๊รน้ำที่วัดได้แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ แบบที่เกิดจากการแกว่งของอนุภาคหาได้จากค่าเฉลี่ยความเร็วของอนุภาคในแต่ละเฟรม และแบบที่สองเกิดจากการเคลื่อนที่ของฟองอากาศเรียกว่าค่าความเครียดเรย์โนลด์ ซึ่งค่าอุณหภูมิแก๊รน้ำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของฟองอากาศมีค่ามากกว่าที่เกิดจากการแกว่งของอนุภาคในเบดแบบฟองอากาศและเบดแบบปั่นป่วน แต่ในการไหลแบบที่ไม่มีฟองอากาศมีค่าตรงข้ามกันและความเค้นตั้งฉากของอนุภาคในแนวแกนมีค่ามากกว่าในแนวขนานเนื่องจากการแกว่งของความเร็วมากกว่า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

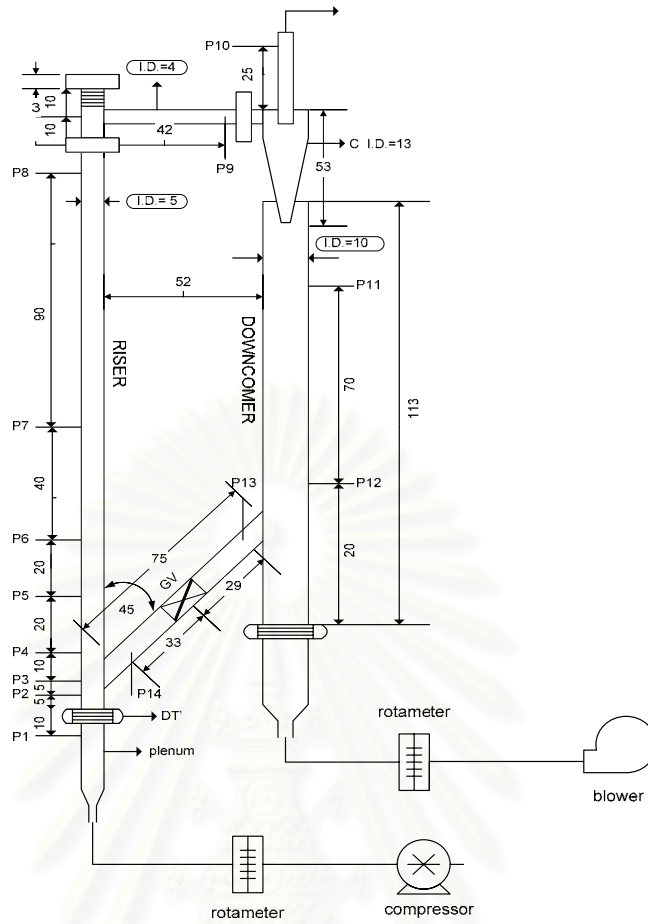
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

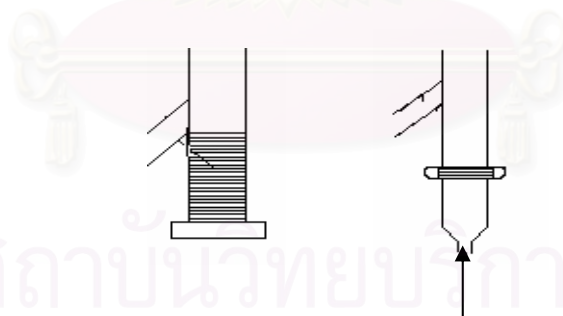
เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนมีส่วนประกอบที่สำคัญแสดงในรูปที่ 3.1 เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงจากเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดเดิม (สมชาย, 2004) 3 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ 1 มีการเพิ่มอากาศส่วนที่ 2 (Secondary Air) จากเครื่องเป่าอากาศ (blower) เข้าไปทางด้านล่างของท่อป้อนกลับ แสดงในรูปที่ 3.2 เพื่อให้ทางด้านท่อป้อนกลับเกิดฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling Bed) ส่งผลให้ของแข็งในระบบเกิดการหมุนเวียนได้ดีขึ้น ส่วนที่ 2 ทำการเพิ่มทางเข้าของของแข็งที่ทำจากท่อพลาสติกใสที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 20 เซนติเมตร ทางด้านบนของโรเซออร์ ดังรูปที่ 3.3 (ก) เพื่อให้การป้อน วัสดุเบดต่างๆ เข้าไปในระบบง่ายขึ้น และส่วนที่ 3 ทำการเพิ่มทางออกของของแข็งที่ทำจากท่อพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาว 10 เซนติเมตร ทางด้านล่างของท่อป้อนกลับ ดังรูปที่ 3.3 (ข) ทำให้สะดวกต่อการถ่ายเทวัสดุเบดจากระบบ ส่วนประกอบของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่สร้างขึ้นมีดังต่อไปนี้

3.1.1 ท่อโรเซออร์ (Riser) จากรูปที่ 3.1 ท่อโรเซออร์ทำจากท่อพลาสติกใส (Acrylic) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 2 เมตร เพื่อให้สามารถเห็นรูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งภายในได้อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า บริเวณด้านล่างของโรเซออร์มีตัวกระจายอากาศ (Air Distributor) เป็นแบบแผ่นตะแกรงแผ่นเดียว (Single Perforated Plate) ที่มีความละเอียด 60 mesh (250 ไมโครเมตร) ทางออกของโรเซออร์มีลักษณะเป็น L-shape หักมุมไปทางด้านขวา 90° ก่อนเข้าสู่ไซโคลน บริเวณผนังท่อด้านโรเซออร์มีการเจาะรูขนาด 1/4 นิ้ว เพื่อติดตั้ง Pressure Tap ที่ตำแหน่ง P_1 - P_8 ในรูปที่ 3.1 สำหรับวัดค่าความดันของอากาศตามความสูงของโรเซออร์ โดยแต่ละตำแหน่งห่างจากตัวกระจายอากาศเป็นระยะ -10, 5, 10, 20, 40, 60, 100 และ 190 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยตำแหน่งที่เป็นเครื่องหมายลบ (P_1) คือตำแหน่งที่อยู่ต่ำกว่าตัวกระจายอากาศ และตำแหน่งที่เป็นเครื่องหมายบวก (P_2 ถึง P_8) คือตำแหน่งที่อยู่เหนือกว่าตัวกระจายอากาศ

ในการบันทึกภาพของแข็งภายในท่อโรเซออร์นั้น บริเวณผนังท่อด้านโรเซออร์จะถูกเจาะรูเพื่อให้โพรบ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5 ซม. ความยาว 10 ซม. ที่ปลายท่อมีแผ่นกระจกใสปิดอยู่เพื่อป้องกันของแข็งจากโรเซออร์ไม่ให้หลุดเข้าไปในโพรบ ใสเข้าไปด้านในท่อโรเซออร์ และสามารถเลื่อนเข้าเลื่อนออกได้ สำหรับการบันทึกภาพภายในท่อโรเซออร์ตามแนวรัศมีที่



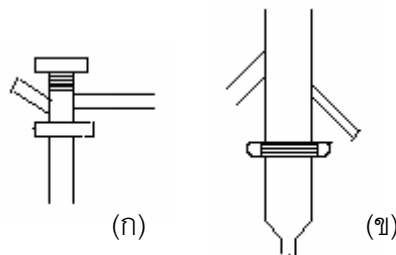
รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องฟลูอิดไรด์แบบหมุนเวียน



สมชาย (2004)

งานวิจัยนี้

รูปที่ 3.2 การเพิ่มอากาศส่วนที่ 2 จากเครื่องเป่าอากาศ



(ก)

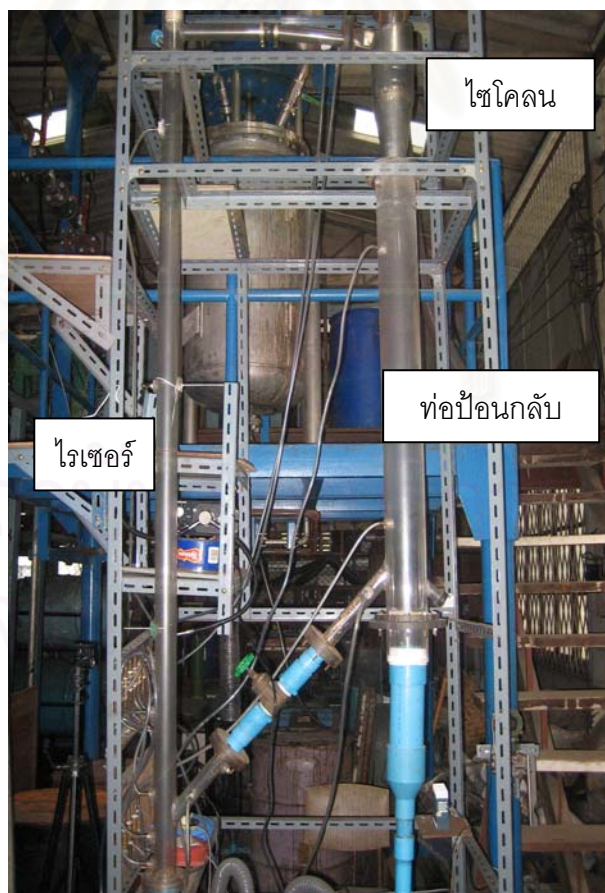
(ข)

รูปที่ 3.3 การเพิ่มทางเข้าและออกของของแข็ง (ก) ทางเข้า (ข) ทางออก

ตำแหน่ง $-1.8, -0.6, 0, 0.6, 1.8$ ซม. จากบริเวณกึ่งกลางท่อ ที่ความสูงคงที่เท่ากับ 110 ซม. จากตัวกระจายอากาศ และสำหรับการบันทึกภาพของของแข็ง ภายในท่อไรเซอร์ตามความสูง จะใส่ไฟรบเข้าไปที่บริเวณกึ่งกลางท่อไรเซอร์ ($r=0$ เซนติเมตร) ที่ความสูงต่างๆ 3 ค่า คือ 60, 110, และ 170 ซม. จากตัวกระจายอากาศ ตามลำดับ และรูปเครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลองจริงจะแสดงในรูปที่ 3.4

3.1.2 ไซโคลน (Cyclone) เป็นอุปกรณ์สำหรับแยกอนุภาคจากอากาศ เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจาย และยังเป็นการนำเอาของแข็งที่หลุดออกจากด้านบนของไรเซอร์ป้อนกลับเข้ามา เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนด้วย ในงานวิจัยนี้ไซโคลนทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกไซโคลน (D_c) = 12 ซม.

3.1.3 ท่อป้อนกลับ (Downcomer) เป็นส่วนที่จัดเก็บอนุภาคที่ถูกดักจับโดยไซโคลนแล้วนำไปป้อนกลับเข้าสู่ไรเซอร์อีกครั้ง ทำจากท่อพลาสติกใส (Acrylic) เช่นเดียวกับไรเซอร์ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 1.2 เมตร ทำงานภายใต้ภาวะฟลูอิด์เบดแบบพองอากาศ เพื่อให้ของแข็งสามารถเกิดการหมุนเวียนในระบบได้ง่ายยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.4 เครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลอง

3.1.4 ท่อส่งผ่าน (Transfer line) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างโรเตอร์กับท่อป้อนกลับมีหน้า ที่นำอนุภาคจากท่อป้อนกลับส่งผ่านเข้าสู่ท่อโรเตอร์ ทำจากท่อพลาสติกใส (Acrylic) เส้นผ่าน ศูนย์กลางภายนอก 4 เซนติเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร ยาว 75 เซนติเมตร โดยวางทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ และมีเกทวาล์ว (Gate Valve) เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลป้อนกลับของของ แข็ง

3.1.5 อุปกรณ์วัดความดัน อุปกรณ์วัดความดันที่ใช้ในการทดลองนี้คือเครื่องวัดความ ดันเชิงตัวเลข (Digital Pressure) ของบริษัท Yokogawa รุ่น EJA120 Style: S2 มีช่วงการวัด 0- 660 มิลลิเมตรน้ำ ความคลาดเคลื่อน 0.2%

3.2 เทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV)

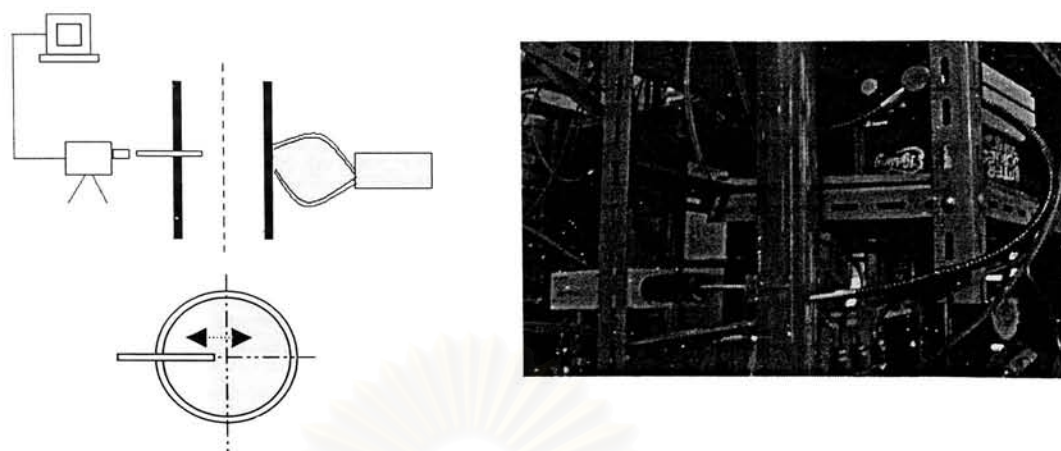
เทคนิค PIV นี้ใช้สำหรับการวัดความเร็วของของแข็งที่อยู่ในโรเตอร์ ประกอบด้วยส่วน สำคัญต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.5

3.2.1 กล้องความเร็วสูงชนิด CCD (Charge Coupled Device) ของบริษัท Sony รุ่น SSC-DC58AP พร้อมเลนส์ สามารถปรับความเร็วหน้ากล้องได้ 10 ค่าตั้งแต่ 1/25 ถึง 1/10000 วินาที ใช้สำหรับบันทึกภาพของของแข็งที่เคลื่อนที่ในโรเตอร์ โดยวางไว้ด้านหน้าติดกับโพรบ ที่ใส่ เข้าไปภายในท่อโรเตอร์ในตำแหน่งที่ต้องการบันทึกภาพ แล้วจึงทำการปรับความเร็วหน้ากล้อง รวมถึงระยะโฟกัสและกำลังขยายของกล้องที่เหมาะสม แล้วนำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ด้วย โปรแกรมวิเคราะห์ภาพต่อไป

3.2.2 โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image Pro Plus V.4.5.1 ใช้ในการเก็บภาพที่บันทึก ได้จากกล้องความเร็วสูง และนำภาพที่ได้มาหาความยาวของเส้นที่แสดงการเคลื่อนที่ของของ แข็งแต่ละอนุภาค โดยติดตั้งอยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้สำหรับรับภาพและทำการประมวลผล ที่ได้จากการทดลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image Pro Plus V.4.5.1

โปรแกรมนี้มีความสามารถในการบันทึกภาพตามระยะเวลาที่กำหนด สามารถ ปรับความเข้มและความสว่างของภาพได้ อีกทั้งจะเรียงลำดับภาพที่บันทึกได้และเขียนเพิ่มข้อมูล เป็นแบบ TIFF และ BMP ในการหาเส้นความยาวของของแข็งที่เคลื่อนที่โปรแกรมจะแสดงข้อมูล การวิเคราะห์ระยะทางที่ลากได้ออกมาเป็นหน่วยตามที่ได้ทำค่าเทียบ (Calibration) และค่าเทียบ ยังสามารถเก็บบันทึกและสร้างใหม่เพื่อนำมาใช้ได้ ส่วนข้อมูลที่วิเคราะห์ออกมาได้นี้ก็สามารถส่ง ข้อมูลออกไปยังโปรแกรม Excel ได้

3.2.3 แหล่งกำเนิดแสง (Optical Fiber light source) จากบริษัท Hollywood ประกอบด้วย Illuminator โมเดล 20 ให้ความสว่างจากหลอดไฟฮาโลเจน ที่มีกำลัง 150 วัตต์สามารถปรับ ความเข้มแสงได้ตั้งแต่ 0 -100 % และ Dual Fiber Optic Gooseneck ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง



รูปที่ 3.5 ระบบ PIV และตำแหน่งของโพรบ

8 มม. และความยาว 61 ซม. วางอยู่ด้านตรงข้ามกับกล้องความเร็วสูง เพื่อให้ภาพที่บันทึกได้มีความชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ภาพมากขึ้น

รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วในโรเตอร์ที่ปรากฏบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่บันทึกได้จากกล้องความเร็วสูง พบว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วมีลักษณะเป็นเส้นที่แสดงถึงระยะทางที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ได้ที่ความเร็วหน้ากล้องค่าหนึ่ง จะเห็นว่าเส้นที่ได้มีขนาดต่างๆกัน โดยที่เส้นที่บางและยาวแสดงว่าเป็นเม็ดแก้วที่มีขนาดเล็กจึงเคลื่อนที่ได้เร็ว ในขณะที่บางเส้นที่หนาและสั้นกว่าแสดงว่าเป็นเม็ดแก้วที่มีขนาดใหญ่จึงเคลื่อนที่ได้ช้ากว่า เมื่อนำภาพไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ จะสามารถหาความยาวและมุมของแต่ละเส้นที่อยู่ในภาพได้ จากรูปที่ 3.5 พบว่ามีอนุภาคที่พบการเคลื่อนที่อย่างชัดเจน ที่สามารถนำมาหาความยาวและมุมของเส้นได้ทั้งหมด 8 เส้น ส่วนอนุภาคที่เหลือ พบว่าเป็นเส้นที่ติดกับขอบของโพรบ จึงไม่สามารถหาความยาวของเส้นที่แท้จริงได้ เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพทั้งหมดแล้วจึงนำข้อมูลมาคำนวณความเร็วของของแข็งจากสมการที่ 3.1 (Tartan M. และ Gidaspow D., 2004)

$$C_r = (L/t) \cos \alpha \quad (3.1)$$

$$C_z = (L/t) \sin \alpha \quad (3.2)$$

โดยที่ C_r คือ ความเร็วของของแข็งในแนวรัศมี (Radial Velocity), เมตรต่อวินาที

C_z คือ ความเร็วของของแข็งในแนวแกน (Axial Velocity), เมตรต่อวินาที

L คือ ระยะทางที่ของแข็งเคลื่อนที่ได้, เมตร

t คือ เวลาที่เม็ดแก้วใช้ในการเคลื่อนที่, วินาที หาได้จากส่วนกลับของความเร็วหน้ากล้อง

α คือ มุมที่ของแข็งเคลื่อนที่วัดจากแกน x โดยเริ่มจากวงภาคที่ 1



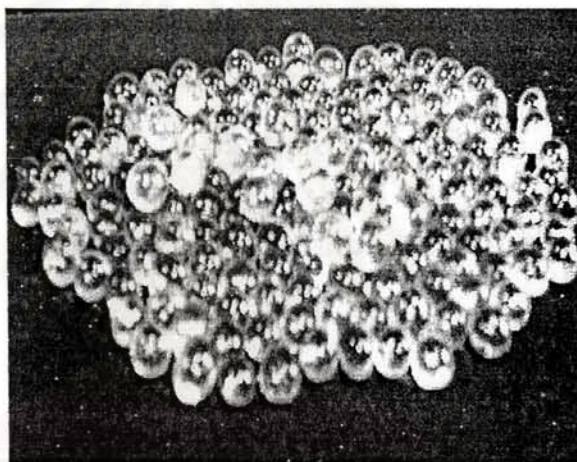
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างภาพการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่บันทึกได้จากเทคนิค PIV

3.3 อนุภาคของแข็งที่ใช้ในการทดลอง

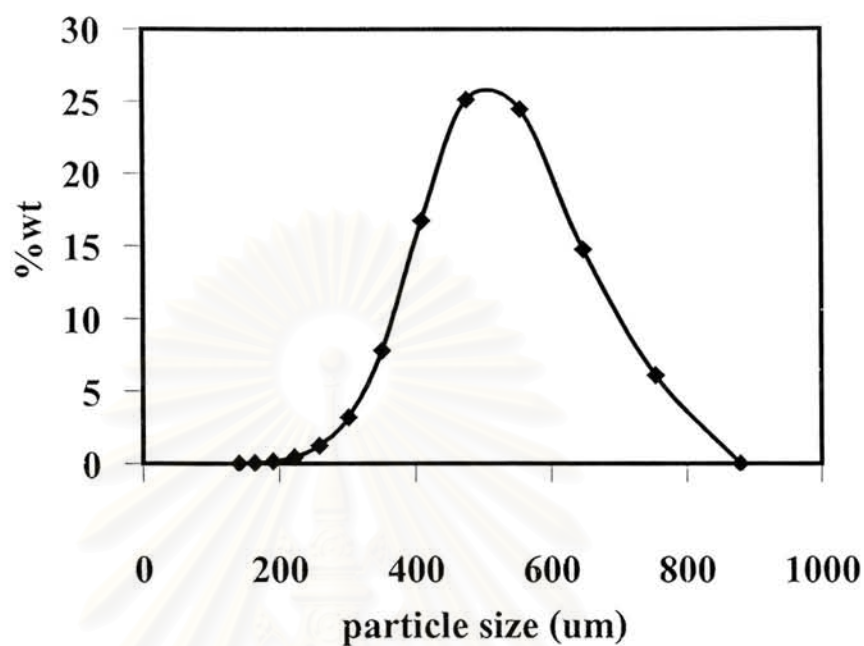
ของแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เม็ดแก้วและแกลบ แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 พบว่าเม็ดแก้วมีลักษณะกลมและใสทำให้สะดวกต่อการติดตั้งระบบในการบันทึกภาพ และภาพที่บันทึกได้จากกล้องความเร็วสูง มีความชัดเจนมากกว่าการใช้ทรายในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (สมชาย, 2004) ส่วนแกลบมีลักษณะยาวรีเหมือนเรือใบและทึบแสง มีขนาดใหญ่กว่าโพรบ ที่ใช้ในการทดลองทำให้ไม่สามารถบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของแกลบได้ ดังนั้นในการทดลองที่ใช้สารป้อนเป็นของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบจึงสนใจการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วเพียงอย่างเดียว

รูปที่ 3.8 แสดงการกระจายตัวของขนาดของเม็ดแก้วที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง Particle Size Laser Analyzer (Malvern Instruments Ltd.) พบว่าเม็ดแก้วที่ใช้ในงานวิจัย มีขนาดตั้งแต่ 140-847 ไมโครเมตร และมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 547 ไมโครเมตร สำหรับแกลบนั้นไม่สามารถหาการกระจายตัวของขนาดเช่นเดียวกับเม็ดแก้วได้ เนื่องจากแกลบมีน้ำหนักเบาและลอยน้ำทำให้ไม่สามารถทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle Size Laser Analyzer และเนื่องจากแกลบไม่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมแต่มีลักษณะยาวรีเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าคล้ายเรือใบที่มีขนาดโดยประมาณจากการวัดด้วยเวอร์เนียเท่ากับ $1 \times 0.1 \times 0.01$ ซม. จึงต้องแสดงขนาดของแกลบในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของแกลบ สามารถคำนวณได้จากสมการ $d_p = (6V_p/\pi)^{1/3}$ ดังแสดงในภาคผนวก ค. โดย V_p คือปริมาตรของแกลบ, ลบ.ม. และสมบัติทางกายภาพของเม็ดแก้วและแกลบแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 โดยค่าความหนาแน่นของเม็ดแก้วเป็นค่ามาตรฐานที่ได้จากบริษัท A.P.C.I. Thailand Ltd. ส่วนค่าความหนา

แน่นของเกลบสามารถหาได้โดยวิธีการแทนที่น้ำ ขนาดของเม็ดแก้วได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle Size Laser Analyzer ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ส่วนการจำแนกของแข็งตามลักษณะของ Geldart ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.3 พบว่าเม็ดแก้วอยู่ในกรุป B เกิดการฟลูอิไดเซชันได้ง่าย ส่วนเกลบอยู่ในกรุป D จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.3 ของแข็งที่อยู่ในกรุป D จะเกิดการฟลูอิไดซ์ได้ยาก แต่เนื่องจากเกลบมีความหนาแน่นน้อยมากและน้ำหนักเบา เมื่อทำการผสมเข้ากับเม็ดแก้ว จะช่วยให้เกิดฟลูอิไดเซชันได้ง่ายขึ้น ค่าความเร็วสุดท้าย (U_t) และความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (U_{mf}) ของเม็ดแก้วและเกลบได้จากการคำนวณดังแสดงใน ภาคผนวก ค. และจากรูปที่ 3.7 เห็นว่าเม็ดแก้วมีรูปร่างเป็นทรงกลมตันใส ค่าความกลมของเม็ดแก้วจึงมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนค่าความกลมของเกลบคำนวณได้จากสมการ $\phi = 6V_p/d_p S_p$ ดังแสดงในภาคผนวก ค. โดย S_p คือพื้นที่ผิวของเกลบ, ตร.ม.



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างของเม็ดแก้วและเกลบที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.8 การกระจายตัวของขนาดของเม็ดแก้วที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพของเม็ดแก้วและเกลบ

สมบัติทางกายภาพ	เม็ดแก้ว	เกลบ	หน่วย
ความหนาแน่น (ρ_s)	2400	500	กก./ลบ.ม.
ความหนาแน่นบัลค์ (ρ_b)	1500	122	กก./ลบ.ม.
ขนาดเฉลี่ยของของแข็ง (d_p)	547	-	ไมครอน
เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า*	-	1240	ไมครอน
Geldart's classification	B	D	-
ความเร็วสุดท้าย (U_t)	4.2	0.34	เมตร/วินาที
ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดเซชัน (U_{mf})	0.21	0.012	เมตร/วินาที
ค่าความกลม (Sphericity, ϕ)	1	0.22	-

* $d_p = (6V_p/\pi)^{1/3}$

3.4 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ

1. งานวิจัยพื้นฐานเพื่อศึกษารูปแบบการไหลของแข็งในโรเตอร์ ในการทดลองส่วนนี้จะครอบคลุมถึงการหารูปแบบการไหลของของแข็งในโรเตอร์ ซึ่งมีได้หลายรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วอากาศ เช่น ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast Fluidization) การเคลื่อนที่แบบ คอร์-แอนนูลัส (Core-Annulus) และเบดเบาบางแบบสม่ำเสมอตลอดทั้งโรเตอร์ (Homogeneous Dilute Phase Flow) ซึ่งความเร็วอากาศที่จำแนกรูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งรูปแบบต่างๆ คือ ความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (U_p), ความเร็วที่ทำให้เกิดคอร์-แอนนูลัส (V_{CA}), และความเร็วน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดนิวมเมติก (V_{mp}) ตามลำดับ

2. อุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว ในการทดลองส่วนนี้ทำการศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันของอากาศและสัดส่วนช่องว่างของเม็ดแก้ว รวมถึงการปรับปรุงเทคนิค PIV จากการทดลองของสมชาย (สมชาย, 2004) ในการศึกษาความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีในโรเตอร์ โดยเปลี่ยนโพรบที่ใช้ให้มีขนาดเล็กลงจาก 1 ซม. เหลือเพียง 0.5 ซม. ทำให้รบกวนต่อการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วในโรเตอร์น้อยลง และยังมีเพิ่มแหล่งกำเนิดแสงทำให้ภาพที่บันทึกได้จากกล้องความเร็วสูง มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น

3. อุทกพลศาสตร์ของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบ ในการทดลองส่วนนี้ทำการศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันของอากาศและสัดส่วนช่องว่างของของผสมและความเร็วของเม็ดแก้วในของผสมตามความสูงของโรเตอร์ รวมถึงการเปรียบเทียบความเร็วของเม็ดแก้วและเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมด้วย


ภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

ของแข็ง	ความสูง(ซม.)	ระยะตามแนวรัศมี(ซม)	U_g (m/s)	H_{dc}^* (cm)
(1) เม็ดแก้ว	110	-1.8,-0.6,0,0.6,1.8	7,8,9	17
(2) เม็ดแก้ว ^a	110	1.8,0.6,0	7,8,9	17
(3) เม็ดแก้ว	60,110,170	0	7,8,9	30
(4) เม็ดแก้วผสมแคลบ	60,110,170	0	7,8,9	30

(ร้อยละ 20 โดยปริมาตร)

* H_{dc} คือ ความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับ

^aมีการเพิ่มแผ่นสี่เข้าไปในระบบ PIV ที่ใช้ในการวัดความเร็วของเม็ดแก้ว 

3.4.1 งานวิจัยพื้นฐานเพื่อศึกษารูปแบบการไหลของของแข็งในโรเตอร์

การหาความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (U_{cr})

1. บรรจุมัดแก๊วลงไปด้วยด้านบนของโรเตอร์แล้วเปิดเครื่องอัดอากาศ ให้อากาศผ่านเข้าไปในโรเตอร์เพื่อเป่ามัดแก๊วให้ไปสะสมอยู่ทางด้านท่อป้อนกลับ จนมัดแก๊วมีความสูงเท่ากับ 30 เซนติเมตรแล้วปิดเครื่องอัดอากาศ
2. เปิดเครื่องเป่าอากาศ ให้อากาศผ่านเข้าสู่ท่อป้อนกลับที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที ให้ด้านท่อป้อนกลับเกิดฟลูอิดซ์เซชันแบบฟองอากาศ
3. เปิดเครื่องอัดอากาศให้อากาศผ่านเข้าสู่โรเตอร์ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 650 ลิตรต่อนาที
4. เปิดเกทวาล์วจำนวน 1 รอบ เพื่อให้มัดแก๊วไหลเข้าสู่โรเตอร์ แล้วรอให้เกิดการหมุนเวียนของมัดแก๊วในระบบจนเข้าสู่ภาวะสมดุลประมาณ 10 นาที
5. บันทึกความดันทางด้านโรเตอร์ในตำแหน่งที่ 2 และ 5 (P_2 และ P_5)
6. ทำการทดลองซ้ำโดยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็น 750, 850 และ 950 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ
7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปิดเกทวาล์วจำนวน 2 รอบ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 750, 850, 950, 1050 และ 1150 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ

3.4.2 อุทกพลศาสตร์ของมัดแก๊ว

3.4.2.1 อัตราการไหลป้อนกลับของมัดแก๊วในโรเตอร์

1. บรรจุมัดแก๊วลงไปด้วยด้านบนของโรเตอร์แล้วเปิดเครื่องอัดอากาศ ให้อากาศผ่านเข้าไปในโรเตอร์ เพื่อเป่ามัดแก๊วให้ไปสะสมด้านท่อป้อนกลับ จนมัดแก๊วมีความสูงเท่ากับ 17 เซนติเมตรแล้วปิดเครื่องอัดอากาศ
2. เปิดเครื่องเป่าอากาศ ให้อากาศผ่านเข้าสู่ท่อป้อนกลับที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที ให้ด้านท่อป้อนกลับเกิดฟลูอิดซ์เซชันแบบฟองอากาศแล้วเปิดเครื่องอัดอากาศให้อากาศผ่านเข้าสู่โรเตอร์ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 750 ลิตรต่อนาที
3. เปิดเกทวาล์วจำนวน 2 รอบ เพื่อให้มัดแก๊วไหลเข้าสู่โรเตอร์ แล้วรอให้เกิดการหมุนเวียนของมัดแก๊วในระบบจนเข้าสู่ภาวะสมดุลประมาณ 10 นาที
4. บันทึกความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับ ขณะที่มัดแก๊วเกิดการหมุนเวียนภายในระบบ

5. ปิดเกทวาล์ว พร้อมกับจับเวลาที่เม็ดแก้วหลุดลอยออกจากโรเตอร์จนหมดทันที แล้วบันทึกค่าไว้
6. บันทึกความสูงของเม็ดแก้วที่เพิ่มขึ้นด้านท่อป้อนกลับ
7. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเป็น 850 และ 950 ลิตร ต่อนาทีตามลำดับ

3.4.2.2 ความดันของอากาศและสัดส่วนช่องว่าง

1. บรรจุเม็ดแก้วลงในด้านบนของโรเตอร์ แล้วเปิดเครื่องอัดอากาศให้อากาศผ่านเข้าไปในโรเตอร์ เพื่อเป่าเม็ดแก้วให้ไปอยู่ด้านท่อป้อนกลับจนเม็ดแก้วมีความสูงเท่ากับ 17 เซนติเมตรแล้วปิดเครื่องอัดอากาศ
2. เปิดเครื่องเป่าอากาศ ให้อากาศผ่านเข้าสู่ท่อป้อนกลับที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที ให้ด้านท่อป้อนกลับเกิดฟลูอิดซ์เซชันแบบฟองอากาศ
3. เปิดเครื่องอัดอากาศให้อากาศผ่านเข้าสู่โรเตอร์ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 750 ลิตรต่อนาที
4. เปิดเกทวาล์วจำนวน 2 รอบ เพื่อให้เม็ดแก้วไหลเข้าสู่โรเตอร์ แล้วรอให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดแก้วในระบบจนเข้าสู่ภาวะสมดุลประมาณ 10 นาที
5. บันทึกค่าความดันทั้งระบบตั้งแต่ตำแหน่งที่ 1 ถึง 14 (P_1 - P_{14}) ที่อ่านได้จากเครื่องวัดความดันเชิงตัวเลข
6. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศเป็น 850 และ 950 ลิตร ต่อนาทีตามลำดับ
7. นำค่าความดันของอากาศที่บันทึกได้ไปคำนวณสัดส่วนช่องว่างต่อไป

3.4.2.3 ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมี

1. บรรจุเม็ดแก้วลงไปด้านบนของโรเตอร์แล้วเปิดเครื่องอัดอากาศ ให้อากาศผ่านเข้าไปในโรเตอร์ เพื่อเป่าเม็ดแก้วให้ไปอยู่ด้านท่อป้อนกลับจนเม็ดแก้วมีความสูงเท่ากับ 17 เซนติเมตรแล้วปิดเครื่องอัดอากาศ
2. เปิดเครื่องเป่าอากาศ ให้อากาศผ่านเข้าสู่ท่อป้อนกลับที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที ให้ด้านท่อป้อนกลับเกิดฟลูอิดซ์เซชันแบบฟองอากาศ

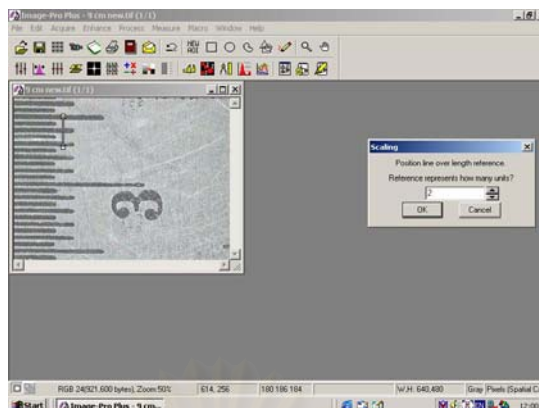
3. เปิดเครื่องอัดอากาศให้อากาศผ่านเข้าสู่โรเซอ์ ที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ 750 ลิตรต่อนาที
4. เปิดเกทวาล์วจำนวน 2 รอบ เพื่อให้เม็ดแก้วไหลเข้าสู่โรเซอ์ แล้วรอให้เกิด การหมุนเวียนของเม็ดแก้วในระบบจนเข้าสู่ภาวะสมดุลประมาณ 10 นาที
5. การบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูง
 - ประกอบกล้องและเลนส์เข้าด้วยกัน
 - ต่อสายของกล้องเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่เปิดโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ เพื่อรับภาพที่มาจากกล้องความเร็วสูง
 - นำกล้องไปวางบริเวณด้านหน้าติดกับโพรบ ที่สอดเข้าไปในโรเซอ์ ที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมี 5 ตำแหน่งคือ -1.8, -0.6, 0, 0.6, 1.8 เซนติเมตร จากกึ่งกลางโรเซอ์ที่ความสูง 110 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ เพื่อที่จะทำการบันทึกภาพ
 - เปิดไฟจากแหล่งกำเนิดแสง (Fiber Optic Light Source) ที่อยู่ด้านตรงข้ามกล้องความเร็วสูง
 - เมื่อเปิดเครื่องอัดอากาศ และปรับอัตราการไหลตามที่ต้องการ จากนั้นทำการปรับความเร็วชัตเตอร์ และแสงสว่างจนกว่าจะได้ภาพที่ชัดเจน
 - ทำการบันทึกภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

6. การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

ก่อนจะวิเคราะห์ภาพที่บันทึกจากการทดลอง จะต้องมีการปรับเทียบ (Calibrate) หน่วยความยาวของภาพที่ถ่ายได้กับค่ามาตรฐาน โดยในที่นี้จะทำการบันทึกภาพหน่วยวัดความยาวจากเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์

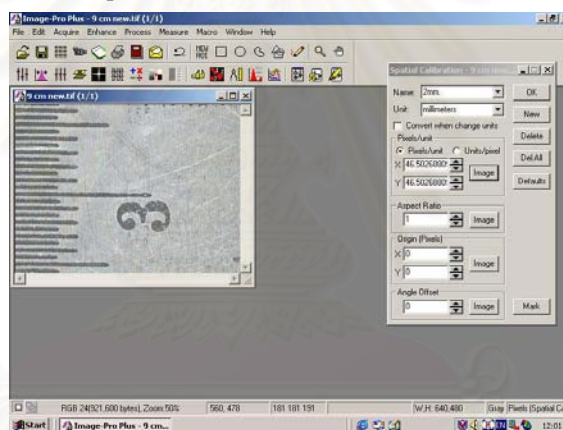
การปรับเทียบความยาวมาตรฐาน (Calibration) มีรายละเอียดดังนี้

1. บันทึกภาพเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์
2. ลากเส้นความยาวจากภาพ พร้อมทั้งกำหนดความยาวของเส้นที่ลาก ดังแสดงในรูป 3.9



รูปที่ 3.9 ภาพเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์และการลากเส้นความยาว

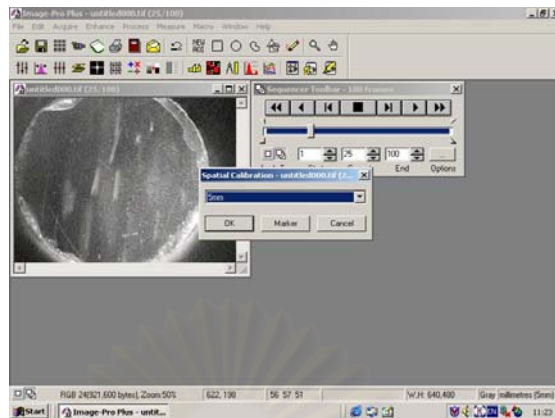
- กำหนดชื่อไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้ แล้วทำการบันทึกไฟล์ไว้ ดังแสดงในรูป 3.10



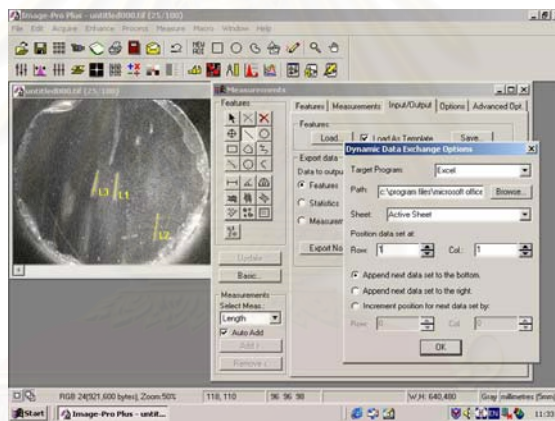
รูปที่ 3.10 การกำหนดไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้

การวิเคราะห์ภาพที่บันทึกจากการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

- เปิดไฟล์ภาพที่ทำการบันทึกไว้ พร้อมทั้งเลือกไฟล์ที่ทำการปรับเทียบไว้ จากนั้นเลือกฟังก์ชันการลากเส้นความยาว ดังแสดงในรูป 3.11
- ทำการส่งข้อมูลความยาวของเส้นที่วิเคราะห์ได้ไปยังโปรแกรม Excel ดังแสดงในรูป 3.12 และ รูป 3.13 แสดงข้อมูลที่รับมาจากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ข้อมูลที่ได้จะถูกทำการบันทึกเก็บไว้ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาความเร็วของของแข็งต่อไป
- ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการไหลอากาศเป็น 950 และ 1050 ลิตรต่อ นาทีตามลำดับ



รูปที่ 3.11 การเปิดไฟล์ภาพพร้อมทั้งเลือกไฟล์การปรับเทียบและการเลือกฟังก์ชันความยาว



รูปที่ 3.12 การส่งข้อมูลไปยัง Excel

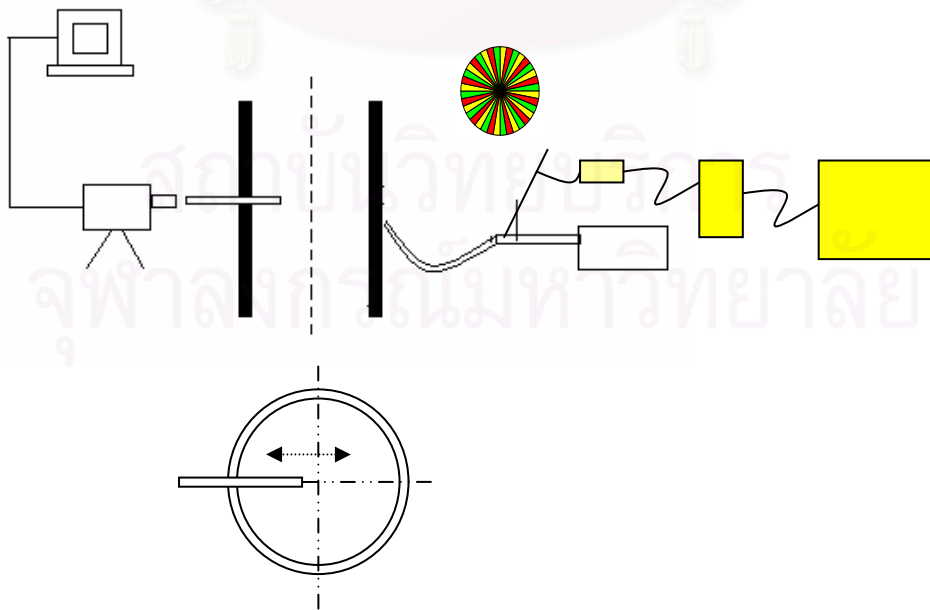
	Features	Measurement	Value	Nominal V	Min. Tol	Max. Tol	Pass / Fail
1	L1	Length	2.227737	2.227737	-0.001	0.001	Pass
2	L2	Length	2.687974	2.687974	-0.001	0.001	Pass
3	L3	Length	2.063556	2.063556	-0.001	0.001	Pass
4	L4	Length	2.456965	2.456965	-0.001	0.001	Pass
5	L5	Length	2.318182	2.318182	-0.001	0.001	Pass
6	L6	Length	2.186075	2.186075	-0.001	0.001	Pass
7	L7	Length	2.354001	2.354001	-0.001	0.001	Pass
8	L8	Length	2.229127	2.229127	-0.001	0.001	Pass
9	L9	Length	2.45833	2.45833	-0.001	0.001	Pass
10	L10	Length	2.227737	2.227737	-0.001	0.001	Pass
11	L11	Length	2.547077	2.547077	-0.001	0.001	Pass
12	L12	Length	2.090909	2.090909	-0.001	0.001	Pass
13	average		2.321696				

รูปที่ 3.13 ข้อมูลที่ปรากฏในไฟล์ Excel

3.4.2.4 ความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ลง ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมี

ในการหาทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว จำเป็นต้องมีการปรับปรุงระบบ PIV ที่ใช้ในการวัดความเร็วของเม็ดแก้ว โดยการนำแผ่นสีที่มีการต่อวงจรเข้ากับมอเตอร์เพื่อใช้ในการหมุน และตัวควบคุมมอเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วในการหมุนแผ่นสี ไปวางไว้หน้าแหล่งกำเนิดแสง (Optical Fiber Light Source) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 แผ่นสีที่ใช้นี้ได้มีการทำการทดลองเพื่อหาขนาด จำนวนช่องและความเร็วมอเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้แถบสีที่ปรากฏในแต่ละภาพมีความชัดเจนและสามารถนำมาวิเคราะห์หาทิศทางการเคลื่อนที่ได้ จากการทดลองพบว่า แผ่นสีที่เหมาะสมที่สุดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร มีแถบสี 3 สีคือ เหลือง แดงและเขียว รวมทั้งสิ้น 51 ช่อง ในการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของของแข็ง ให้ดูจากลำดับของแถบสีที่ปรากฏอยู่ในแต่ละเส้น ตัวอย่างของภาพที่บันทึกได้ แสดงดังรูปที่ 3.15 จากรูปพบว่าแต่ละเส้นมีแถบสีเรียงตามลำดับจากด้านล่างขึ้นไปบนคือ เหลือง เขียว แดง เมื่อแผ่นสีที่ใช้หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกาแสดงว่าอนุภาคส่วนใหญ่ในภาพนี้กำลังเคลื่อนที่ขึ้น

ในการทดลอง ทำการทดลองเหมือนกับตอนที่ 3.4.2.3 ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี 3 ตำแหน่งคือ 1.8, 0.6, 0 เซนติเมตรจากกึ่งกลางไรเซอร์ ตามลำดับ และความสูงคงที่เท่ากับ 110 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ



รูปที่ 3.14 ระบบ PIV ที่มีการประกอบแผ่นสี และตำแหน่งของไฟรบ



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างภาพที่ถ่ายได้จากระบบ PIV ที่มีแผ่นสีประกอบ และการวิเคราะห์แถบสี

3.4.3 อุทกพลศาสตร์ของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบ

3.4.3.1 หาปริมาณแกลบที่เหมาะสมในการผสมกับเม็ดแก้ว

1. ทำการผสมแกลบกับเม็ดแก้วเริ่มต้นที่ปริมาณร้อยละ 50 โดยปริมาตร โดยปริมาตรรวมทั้งหมดเท่ากับ 3000 ลบ.ซม.
2. ป้อนของผสมลงไปในระบบ แล้วเปิดเครื่องอัดอากาศและเครื่องเป่าอากาศให้ของผสมเกิดการหมุนเวียนในระบบ
3. เพิ่มอากาศเข้าไปทางด้านท่อส่งผ่าน (Transfer Line) เพื่อให้ของผสมเกิดการหมุนเวียนได้ดียิ่งขึ้น
4. บันทึกลักษณะการเคลื่อนที่ของของผสมในระบบ
5. ทำการทดลองซ้ำที่ปริมาณแกลบต่างๆ

3.4.3.2 อัตราการไหลป้อนกลับของของผสมระหว่างเม็ดแก้วและแกลบในโรเตอร์

ทำการทดลองเหมือนกับตอนที่ 3.4.2.1 โดยเปลี่ยนสารป้อนเป็นของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบที่ปริมาณ ร้อยละ 20 โดยปริมาตร

3.4.3.3 ความดันของอากาศและสัดส่วนช่องว่าง

ทำการทดลองเหมือนกับตอนที่ 3.4.2.2 โดยเปลี่ยนสารป้อนผสมเป็นของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบที่ปริมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตร

3.4.3.4 ความเร็วของเม็ดแก้วตามความสูงของไรเซอร์

ทำการทดลองเหมือนกับตอนที่ 3.4.2.3 โดยเปลี่ยนตำแหน่งที่สอดโพรบเป็น 3 ตำแหน่งตามความสูง คือ 60, 110, 170 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศตาม ลำดับและทำการสอดโพรบเข้าไปที่กึ่งกลางไรเซอร์

3.4.3.5 ความเร็วของเม็ดแก้วในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบตามความสูงของ ไรเซอร์

ทำการทดลองเหมือนกับตอนที่ 3.4.2.3 โดยเปลี่ยนสารป้อนเป็นของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบที่ปริมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตร และเปลี่ยนตำแหน่งที่สอดโพรบเป็น 3 ตำแหน่งตามความสูง คือ 60, 110, 170 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศตามลำดับ และทำการสอดโพรบเข้าไปที่กึ่งกลางไรเซอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

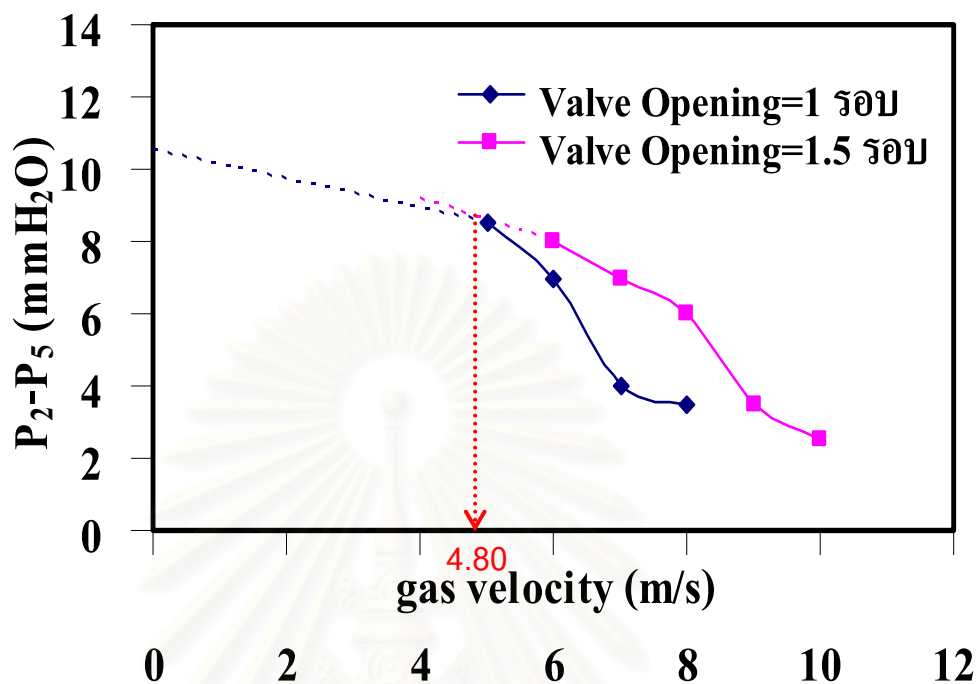
ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งในเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยมีตัวแปรที่ใช้ศึกษา คือ ความเร็วอากาศ ตำแหน่งตามแนวรัศมีและตามความสูงของโรเตอร์และชีวมวลที่นำมาผสม โดยในงานวิจัยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ โดย ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองเพื่อหาข้อมูลพื้นฐานประกอบงานวิจัย ในการทดลองส่วนนี้ครอบคลุมถึงการหาความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity, U_{tr}) และการจำแนกรูปแบบการไหลของของแข็งที่อยู่ในโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว ประกอบไปด้วย วงจรความดันอากาศ สัดส่วนช่องว่าง อุณหภูมิแก๊สรัลาร์ ความเร็วและทิศทางในการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วตามแนวรัศมี ในส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบ ประกอบไปด้วย ความดันอากาศ สัดส่วนช่องว่าง ความเร็วของเม็ดแก้วในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบตามความสูงของโรเตอร์ รวมถึงการเปรียบเทียบความเร็วระหว่างเม็ดแก้วในระบบที่มีเม็ดแก้วเป็นวัสดุเบดเพียงชนิดเดียวกับเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบ ตามความสูงของโรเตอร์

4.1 การทดลองเพื่อหาข้อมูลพื้นฐานประกอบงานวิจัย (Fundamental Research)

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองในฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน ที่ความเร็วอากาศ 3 ค่า คือ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที จากตารางที่ 3.1 พบว่าความเร็วอากาศทั้ง 3 ค่าที่ใช้ในการทดลองมีค่ามากกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเซชัน (U_{mf}) และความเร็วสุดท้าย (U) ของของแข็งที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ของแข็งจึงสามารถเคลื่อนที่ในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนได้อย่างสมบูรณ์ ในการทดลองส่วนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงรูปแบบการไหลของของแข็งในโรเตอร์ ที่ความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง จากงานวิจัยของ Bi และ Grace พบว่า ในฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนมีรูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งในโรเตอร์ได้หลายแบบ ตั้งแต่เบดแบบปั่นป่วนจนถึงเบดแบบเบาบาง (Bi H.T., และ Grace J.R., 1995) ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ใช้เช่น ความเร็วอากาศ อัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง อัตราการลอยออกของของแข็งจากโรเตอร์ ขนาดและสมบัติทางกายภาพของของแข็ง เป็นต้น (Monazam E.R. และคณะ, 2005) จากรูปที่ 2.3 พบว่าตัวแปรที่สำคัญในการเปลี่ยนรูปแบบการไหลของของแข็งในโรเตอร์คือความเร็วอากาศ ความเร็วอากาศที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้คือ

1. ความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity, U_T) ความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน เป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน เนื่องจาก U_T เป็นความเร็วอากาศที่น้อยที่สุด ที่ทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์เบดแบบความเร็วสูง (Fast Fluidization) (Monazam E.R. และคณะ, 2005) U_T สามารถหาได้หลายวิธีจากการทดลองดังได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.2 ในตอนต้นของงานวิจัย ผู้วิจัยได้พยายามทำการทดลองเพื่อหา U_T โดยอ้างอิงจากวิธีการทดลองของ Perales (Perales J.F. และคณะ, 1991) ดังรูป 2.2 (e) ซึ่งทำการทดลองโดยวิธีบันทึกเวลาที่ใช้ในการพาของแข็งทั้งหมดออกจากโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ (Emptying Time) แต่เนื่องจากของแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือเม็ดแก้วที่มีความหนาแน่นค่อนข้างสูงและมีขนาดแตกต่างกันมากตั้งแต่ 140-847 ไมครอน พบว่าที่ความเร็วอากาศค่อนข้างต่ำ เม็ดแก้วขนาดใหญ่ไม่สามารถออกจากโรเตอร์ได้ทั้งหมด จึงไม่สามารถบันทึกเวลาได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้วิธีที่อ้างอิงจากการทดลองของ Yerushalmi (Yerushalmi และคณะ, 1976) ดังรูป 2.2 (c) จากรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างของความดันอากาศบริเวณด้านล่างของโรเตอร์ กับความเร็วอากาศที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งต่างๆ จากนิยามของ Yerushalmi U_T คือความเร็วอากาศที่น้อยที่สุดที่ทำให้ค่าผลต่างความดันอากาศบริเวณด้านล่างของโรเตอร์เปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งเปลี่ยนแปลงไป ในงานวิจัยนี้พบว่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งเพิ่มขึ้นโดยการปรับช่องเปิดของเกทวาล์วเพื่อให้เม็ดแก้วไหลลงไปที่บริเวณส่วนล่างของโรเตอร์มากขึ้น ความเร็วอากาศที่สามารถทำให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดแก้วจึงเพิ่มขึ้นด้วย ข้อมูลผลต่างความดันอากาศที่บริเวณด้านล่างของโรเตอร์ ($P_2 - P_5$) ที่ความเร็วอากาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งค่าต่างๆ แสดงในภาคผนวก ก ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่า U_T ของเม็ดแก้วที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 4.8 เมตรต่อวินาที นั่นคือความเร็วอากาศที่ใช้ทดลองงานวิจัยนี้ (7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที) ทำให้เบดอยู่ในสภาวะที่เป็นเบดแบบความเร็วสูง (Fast Fluidization) ได้ นอกจากนี้ตารางที่ 4.1 แสดง U_T ที่ได้จากการสมการความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold's number, Re) กับอาร์คิมิดีสนัมเบอร์ (Archimedes' number, Ar) ที่มีการเสนอโดยผู้วิจัยในอดีต จากการคำนวณในภาคผนวก (ค) อาร์คิมิดีสนัมเบอร์ของเม็ดแก้วมีค่าเท่ากับ 13183 เนื่องจากอาร์คิมิดีสนัมเบอร์นี้เป็นค่าคงที่ไร้หน่วยที่แสดงถึงสัดส่วนระหว่างแรงโน้มถ่วงของโลกต่อความหนืดของของไหล เมื่ออาร์คิมิดีสนัมเบอร์มีค่ามากนั่นคือ ของแข็งจะสามารถเคลื่อนที่ไปกับของไหลได้ง่าย จากตารางที่ 3.1 พบว่ามี U_T บางค่าที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ ส่วน U_T ที่มีความคลาดเคลื่อนมากนั้น อาจะเกิดจากการที่ผู้วิจัยใช้วิธี Inflection Method ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (f) ในการรวบรวมข้อมูลซึ่งวิธีนี้จะเกิดความคลาดเคลื่อนมาก (Smolders and Baeyens, 2001) ดังนั้นสมการที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการทำนาย U_T ใน



รูปที่ 4.1 ความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity, U_{tr}) ของเม็ดแก้วขนาด 547 ไมครอน

ตาราง 4.1 ความเร็วหลุดลอยส่งผ่านที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง Reynold's number และ Archimedes' number

ผู้วิจัย	ความสัมพันธ์	U_{tr} (m/s)
Bi and Grace	$Re_t = 1.53 Ar^{0.5}$	5.09
Smolders and Baeyen	$Re_t = 1.75 Ar^{0.468}$	4.30
Perales et. al.	$Re_t = 1.41 Ar^{0.483}$	4.00
Adanez et. al.	$Re_t = 2.078 Ar^{0.463}$	4.87
Bi and Fan	$Re_t = 2.28 Ar^{0.419}$	3.52
Lee and Kim	$Re_t = 2.916 Ar^{0.345}$	2.23
Mori et. al.	$Re_t = 1.46 Ar^{0.56}$	8.59
Chehbouni et. al.	$Re_t = 0.169 Ar^{0.545} (D/d_p)^{0.3}$	3.34

งานวิจัยนี้คือสมการที่เสนอโดย Adanez และคณะ (Adanez และคณะ, 1993) ที่ใช้กำหนดและทราบเป็นเบ็ด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียง 1.5% เท่านั้น

2. ความเร็วที่ทำให้เกิดคอร์-แอนนูลัส (Core Annulus Velocity, V_{CA}) จากรูปที่ 2.3 V_{CA} เป็นความเร็วอากาศน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนภาวะจาก เบดแบบความเร็วสูงไปเป็นรูปแบบการไหลแบบคอร์-แอนนูลัส โดย V_{CA} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.18 (Bi H.T., และ Grace J.R., 1995) ตัวแปรต่างๆที่ใช้แทนค่าในสมการ คือ ขนาดของเม็ดแก้วเท่ากับ 547 ไมโครเมตร ความหนาแน่นของอากาศและเม็ดแก้วเท่ากับ 1.16 และ 2400 กก.ต่อลบ.ม.ตามลำดับ ความหนืดของอากาศเท่ากับ 1.84×10^{-5} นิวตันวินาทีต่อตร.ม. อัตราการไหลย้อนกลับเฉลี่ยเท่ากับ 27.5 กก.ต่อตร.ม.ต่อวินาที (ค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งที่ความเร็วอากาศ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที, ภาคผนวก ข) จากการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการที่ 2.18 พบว่า V_{CA} เท่ากับ 7.8 เมตรต่อวินาที นั่นคือที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาทีไม่สามารถเกิดรูปแบบการไหลแบบ คอร์-แอนนูลัส ได้ ส่วนที่ความเร็วอากาศสูงขึ้นเท่ากับ 8 และ 9 เมตรต่อวินาทีสามารถเกิดรูปแบบการไหลแบบ คอร์-แอนนูลัส ได้

3. ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดนิวมติก (Minimum Pneumatic Velocity, V_{mp}) จากรูปที่ 2.3 V_{mp} เป็นความเร็วอากาศที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งจากคอร์-แอนนูลัส เป็นฟลูอิโดเซชันแบบสม่ำเสมอตลอดทั้งไรเซอร์ (Bi H.T., และ Grace J.R., 1995) ซึ่ง V_{mp} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.19 ตัวแปรต่างๆที่ใช้แทนค่าในสมการคล้ายกับการคำนวณค่า V_{CA} โดยเพิ่มตัวแปรคือเส้นผ่านศูนย์กลางไรเซอร์ เมื่อแทนค่าตัวแปรทั้งหมดลงในสมการที่ 2.19 พบว่า V_{mp} มีค่าเท่ากับ 8.3 เมตรต่อวินาที แสดงว่าที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 และ 8 เมตรต่อวินาทีไม่สามารถเกิดเบดแบบบางแบบสม่ำเสมอตลอดทั้งไรเซอร์ได้ ส่วนที่ความเร็วอากาศที่มากที่สุดเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาทีสามารถเกิดเบดแบบบางแบบสม่ำเสมอตลอดทั้งไรเซอร์ได้

ความเร็วอากาศทั้งหมดที่ใช้ในการจำแนกรูปแบบการเคลื่อนที่ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 และรูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วในไรเซอร์ที่ช่วงความเร็วอากาศต่างๆ ตามอ้างอิงในรูป 2.3 แสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตาราง 4.2 ค่า U_{tr} , V_{CA} และ V_{mp} ของเม็ดแก้วที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ความเร็ว	ค่าความเร็ว (เมตรต่อวินาที)
U_{tr}^a	4.8
V_{CA}^b	7.8
V_{mp}^c	8.3

^aค่าที่ได้จากการทดลอง, ^bคำนวณจากสมการที่ 2.18, ^cคำนวณจากสมการที่ 2.19

ตาราง 4.3 รูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งในโรเตอร์ที่ช่วงความเร็วอากาศต่างๆ

ความเร็วอากาศ (เมตรต่อวินาที)	รูปแบบการไหล
4.8 – 7.8	ฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง
7.8 – 8.3	Core-Annulus
>8.3	เบดเบาบางแบบสม่ำเสมอตลอดโรเตอร์

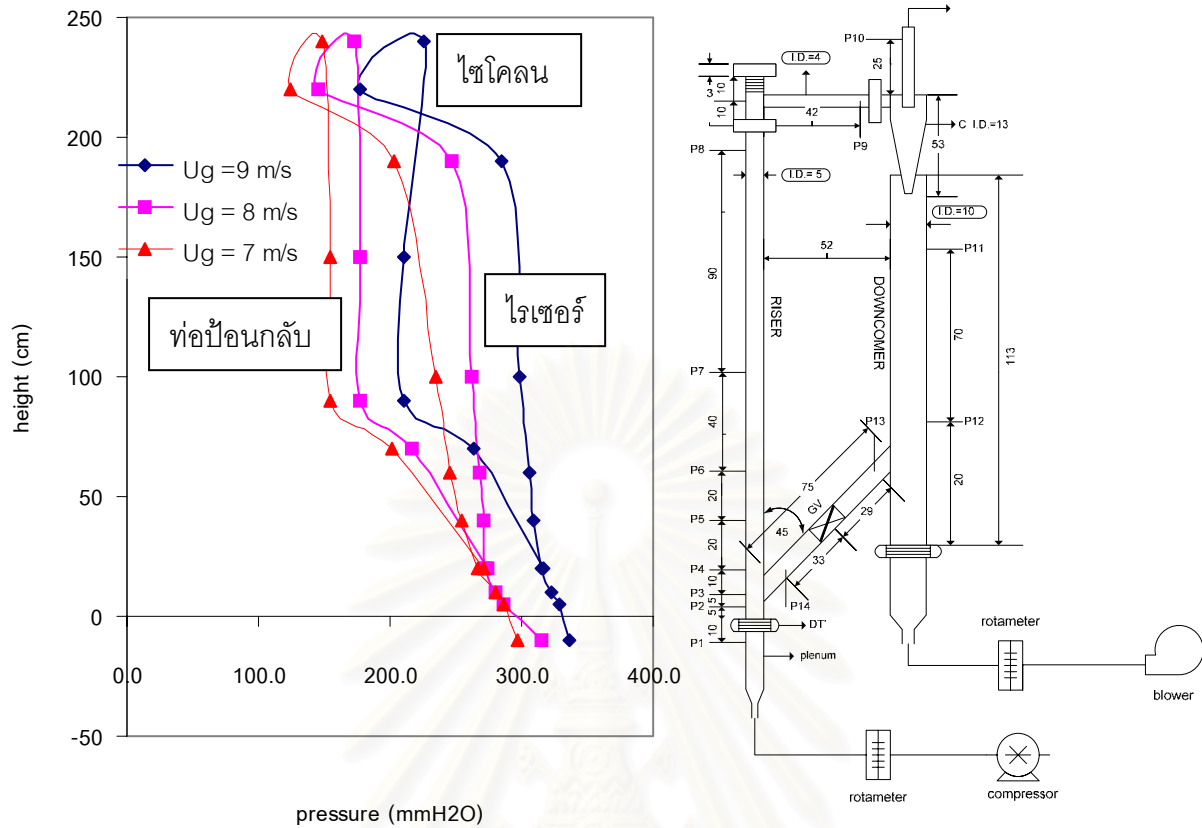
จากตารางที่ 3.2 ความเร็วอากาศที่ใช้ทดลองในงานวิจัยนี้ มีค่าเท่ากับ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วอากาศในตารางที่ 4.3 พบว่าที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที จะทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง เมื่อความเร็วอากาศเท่ากับ 8 เมตรต่อวินาที จะเกิดเป็น Core-Annulus และเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 9 เมตรต่อวินาที ทำให้เกิดเป็นเบดเบาบางแบบสม่ำเสมอตลอดโรเตอร์ ดังจะได้แสดงในหัวข้อถัดไป

4.2 อุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว

4.2.1 วงจรความดัน

ความดันของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์และท่อป้อนกลับ อ่านค่าได้โดยเครื่องวัดความดันเชิงตัวเลข มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรน้ำ ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อวงจรความดัน โดยมีความสูงเริ่มต้นของเม็ดแก้วด้านท่อป้อนกลับ (H_{dc}) เท่ากับ 17 เซนติเมตร รูปที่ 4.2 แสดงวงจรความดันของอากาศในเครื่องฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าที่ทุกความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง ความดันของอากาศ (P_1 - P_8) ในด้านโรเตอร์ จะค่อยๆ ลดลงตามความสูงของโรเตอร์ที่เพิ่มขึ้น ความดันของอากาศต่ำสุดของระบบอยู่ที่ทางเข้าของไซโคลน (P_9) ในด้านท่อป้อนกลับพบว่าความดันของอากาศมีค่าใกล้เคียงกัน (P_{11} และ P_{12}) เนื่องจากอยู่ในช่วงการตกอย่างอิสระของเม็ดแก้วที่ออกมาจากไซโคลน และความดันของอากาศจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณด้านล่างของโรเตอร์เหนือตัวกระจายอากาศ (P_2) ซึ่งเป็นจุดที่ของแข็งไหลเข้าไปในด้านโรเตอร์อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากบริเวณนี้ได้รับอากาศจากสองทางคืออากาศที่มาจากด้านล่างของท่อโรเตอร์หรือ Primary Air ที่เข้ามาฟลูอิดไอเซชันเม็ดแก้วจากตัวกระจายอากาศ และอากาศจากด้านท่อส่งผ่านที่มีส่วนในการช่วยพาเม็ดแก้วกลับเข้ามาสู่ด้านโรเตอร์

เมื่อพิจารณาถึงผลของความเร็วอากาศที่มีต่อวงจรความดันพบว่า รูปแบบของวงจรความดันคล้ายคลึงกัน ที่ทุกความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นจากข้อมูลความดันเพียงอย่างเดียวจึงไม่สามารถจำแนกได้ว่าแต่ละความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง เกิดรูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วในโรเตอร์เป็นอย่างไร



รูปที่ 4.2 วงจรความดันของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ที่ความเร็วอากาศต่างๆ

เมื่อพิจารณาสมดุลความดัน (Pressure Balance) รอบวงจร หรือ ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนตามรูปที่ 4.2 ที่ส่วนล่างของท่อโรเซอรั ความหนาแน่นของของแข็งมีมาก เบดจะหนาแน่นกว่าด้านบนทำให้ความดันลดต่อความสูงที่บริเวณด้านล่างของท่อโรเซอรัมีค่าสูงกว่าด้านบน โดยที่เม็ดของแข็งในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะกระจายอยู่ในท่อโรเซอรัและท่อป้อนกลับ โดยที่ความดันลดในทั้งสองท่อจะสมดุลกันอยู่ นั่นคือผลรวมของความดันลดทั้งระบบควรมีค่าเป็นศูนย์ (Basu P., 1991) สมการที่ 1 แสดงความดันรวมของทั้งระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย

$$(P_2 - P_8) + (P_8 - P_9) + (P_9 - P_{11}) + (P_{11} - P_{13}) + (P_{13} - P_{14}) + (P_{14} - P_2) = 0 \dots\dots (1)$$

- โดยที่ $P_2 - P_8$ คือ ผลต่างของความดันอากาศในโรเซอรั
- $P_8 - P_9$ คือ ผลต่างของความดันอากาศระหว่างทางออกโรเซอรักับทางเข้าไซโคลน
- $P_9 - P_{11}$ คือ ผลต่างของความดันอากาศระหว่างทางเข้าและทางออกของไซโคลน
- $P_{11} - P_{13}$ คือ ผลต่างของความดันอากาศในท่อป้อนกลับ
- $P_{13} - P_{14}$ คือ ผลต่างของความดันอากาศในเกตวาล์ว

จากข้อมูลการทดลอง ในภาคผนวก ก ดังตาราง ก.6 ผลรวมของความดันทั้งระบบฟลูอิดิกส์แบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย ที่ความเร็วอากาศต่างๆ แสดงดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ผลรวมของความดันทั้งระบบที่ความเร็วอากาศต่างๆ

ตำแหน่ง	ความดันลด (มม.น้ำ)		
	$U_g=7$ m/s	$U_g=8$ m/s	$U_g=9$ m/s
P_2-P_8	83.8	40.8	44.0
P_8-P_9	78.8	100.8	107.5
P_9-P_{11}	-31.0	-32.0	-34.0
$P_{11}-P_{13}$	-46.5	-39.0	-53.0
$P_{13}-P_{14}$	-70.0	-58.0	-53.0
ความดันรวม	15.1	12.6	11.5

จะเห็นว่าความดันรวมของทั้งระบบฟลูอิดิกส์แบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ อาจเนื่องมาจากเกิดการรั่วของอากาศ (leak) ที่บริเวณหน้าแปลนหรือรอยต่อของท่อต่างๆ หรืออาจเกิดจากการที่เม็ดแก้วที่มีขนาดเล็กมากเข้าไปอุดตัน แล้วสะสมอยู่ในระบบวัดความดันของอากาศที่บางตำแหน่ง ทำให้ค่าความดันของอากาศที่อ่านได้จากเครื่องวัดความดันเชิงตัวเลขมีความคลาดเคลื่อน

4.2.2 ผลของความเร็วกาศที่มีต่อความดันของอากาศและสัดส่วนช่องว่าง

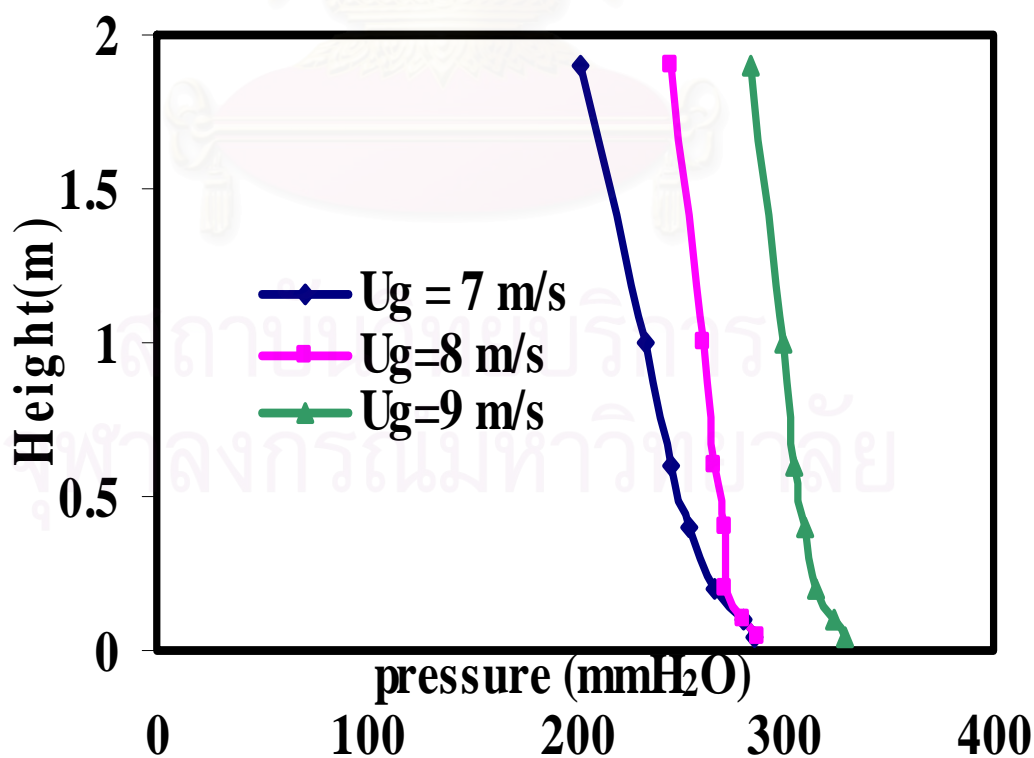
ความดันของอากาศแต่ละตำแหน่งในไรเซอร์ สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัดส่วนช่องว่างได้ดังสมการที่ (4.1) (Li Z.Q. และคณะ, 2004)

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta P}{\Delta L g \rho_s} \quad (4.1)$$

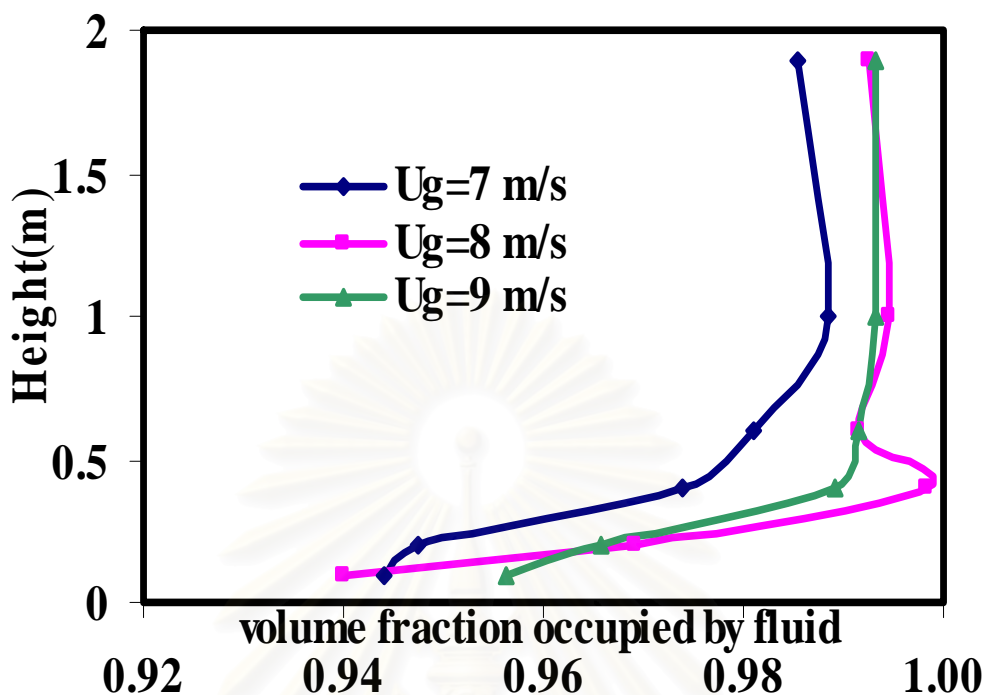
- โดยที่
- ε คือ สัดส่วนช่องว่าง
 - ΔP คือ ผลต่างของความดันของอากาศสองตำแหน่งติดกัน, มม.น้ำ
 - ΔL คือ ระยะห่างระหว่างความดันของอากาศสองตำแหน่งติดกัน, เมตร
 - ρ_s คือ ความหนาแน่นของของแข็ง, กก.ต่อลบ.เมตร
 - g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที²

ผลของความเร็วกากาศที่มีต่อความดันของอากาศและสัดส่วนช่องว่าง แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อความเร็วกากาศเพิ่มขึ้นความดันของอากาศในโรเซอรัเพิ่มขึ้นแต่ความดันของอากาศภายในโรเซอรัลดลงตามความสูงของโรเซอรั สอดคล้องกับงานวิจัยของ สมชาย (สมชาย , 2004) ที่ใช้ทรายเป็นวัสดุเบด ทำการทดลองที่ความเร็วกากาศในช่วง 4-7 เมตรต่อวินาที และ Monazam E.R.และคณะ (Monazam E.R. และคณะ, 2005) ที่ทำการทดลองในโรเซอรัขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 30 เซนติเมตร และใช้ไม้คอร์ก ที่อยู่ในกรุป B ตามการจำแนกของ แซ็งของ Geldart เป็นวัสดุเบด

เมื่อความเร็วกากาศเพิ่มขึ้นจาก 7 ถึง 9 เมตรต่อวินาที โดยมีอัตราการไหลบ่อนกลับของของแข็งที่ความเร็วกากาศต่างๆ อยู่ในช่วง 23-31 กก.ต่อตร.ม.ต่อวินาที ตามลำดับ (จากภาคผนวก ข)จากรูปที่ 4.4 พบว่า ที่ความเร็วกากาศต่ำสุดเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที ลักษณะการไหลของของแข็งในโรเซอรัเปลี่ยนจากการไหลแบบหนาแน่นเป็นการไหลแบบเบาบาง เมื่อพิจารณาจากสัดส่วนช่องว่างตามความสูงของโรเซอรั พบว่าที่บริเวณด้านล่างของโรเซอรั (50 เซนติเมตรเหนือตัวกระจายอากาศ) สัดส่วนช่องว่างมีค่าน้อยกว่าด้านบน อยู่ในช่วง 0.94-0.96 แสดงว่ามีปริมาณของแข็งมาก จึงเป็นบริเวณที่มีเบดหนาแน่น และสัดส่วนช่องว่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของโรเซอรัเพิ่มขึ้นจึงเป็นบริเวณที่มีเบดเบาบาง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Mastellone และ Arena (Mastellone และ Arena, 1999) และ Shadle และคณะ (Shadle L.J. และคณะ, 2002)



รูปที่ 4.3 ความดันของอากาศตลอดความสูงของโรเซอรั ที่ความเร็วกากาศ 7,8 และ 9 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.4 สัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเตอร์ ที่ความเร็วอากาศ 7,8 และ 9 เมตรต่อวินาที

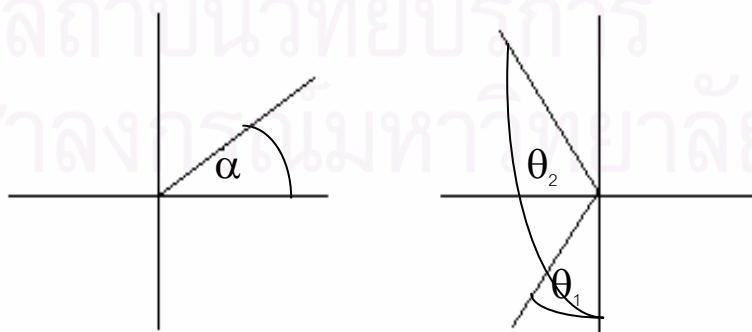
นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาทีที่มีปริมาณของแข็ง สะสมอยู่ในโรเตอร์เป็นจำนวนมากตลอดช่วงความสูงของโรเตอร์ แต่ที่ส่วนบนของโรเตอร์ใกล้กับทางออกของของแข็ง ค่าสัดส่วนช่องว่างมีค่าน้อยลง เป็นผลจากบริเวณทางออกของโรเตอร์ทำมุมกับทางเข้าของไซโคลนแบบ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.1 จึงทำให้เม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นกระทบกับส่วนปลายของโรเตอร์ซึ่งเป็นท่อตัน แล้วตกกลับมาที่ส่วนล่างบริเวณจุดวัดความดันที่ P_7 และ P_8 อีกครั้ง จึงทำให้ค่าสัดส่วนช่องว่างที่บริเวณนี้มีค่าน้อยลง (Gupta S.K., 2000) ที่ความเร็วอากาศ 8 และ 9 เมตรต่อวินาทีที่ส่วนขอบเขตหนาแน่น (สัดส่วนช่องว่าง 0.94 ถึง 0.97) ทางด้านล่างของโรเตอร์ลดลง (ประมาณ 20 ซม.เหนือตัวกระจายอากาศ) และสัดส่วนช่องว่างมีค่าใกล้เคียงกันตลอดความสูงของโรเตอร์ ประมาณ 0.99 และผลกระทบของทางออกต่อสัดส่วนช่องว่างจะมีน้อยมากเมื่อความเร็วอากาศที่ใช้มากขึ้น (Shadle และคณะ, 2002) เนื่องจากปริมาณของเม็ดแก้วในโรเตอร์มีน้อยลง

4.2.3 ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้ว

การศึกษาความเร็วของของแข็งที่เคลื่อนที่ที่อยู่ภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนมีความสำคัญมากเนื่องจากมีผลต่อการสัมผัสกันระหว่างของแข็งกับอากาศ การถ่ายเทความร้อนและมวล ตลอดจนการกัดกร่อนที่มักเกิดในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Zhou J. และคณะ, 1995)

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความเร็วของเม็ดแก้วที่ความสูงคงที่เท่ากับ 110 ซม. จากตัวกระจายอากาศ ตามแนวรัศมีที่ตำแหน่ง -1.8, -0.6, 0, 0.6, 1.8 ซม. จากกึ่งกลางไรเซอร์ตามลำดับ โดยแต่ละตำแหน่ง ทำการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของของแข็งในไรเซอร์จากกล้องความเร็วสูง 40 ครั้งๆละ 30 ภาพแต่ละภาพใช้เวลาห่างกัน (Time Between Image) 0.001 วินาที ดังนั้นในแต่ละตำแหน่งจะมีภาพ 1200 ภาพ ต่อจากนั้นทำการเลือกภาพที่มีการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วอย่างชัดเจนแสดงโดยเส้นที่คมชัดและมีความยาวที่แน่นอน นำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ เพื่อบันทึกความยาวของเส้นและมุมที่ทำกับแกน y แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้แทนค่าลงในสมการที่ 3.1 เพื่อคำนวณความเร็วของเม็ดแก้ว จากสมการที่ 3.1 α คือมุมที่เส้นแสดงการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วทำกับแกน x ในวิถีภาคที่ 1 แสดงในรูป 4.5 (ก) แต่มุมที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพเป็นมุมที่ทำกับแกน y ในวิถีภาคที่ 3 ดังแสดงในรูป 4.5 (ข) จึงต้องย้ายมุมของเส้นแสดงการเคลื่อนที่จากวิถีภาคที่ 3 ไปอยู่ในวิถีภาคที่ 1 ซึ่งมี 2 กรณีคือ (1) ถ้ามุมที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพน้อยกว่า 90° , θ_1 ต้องนำมุมนี้หักออกจาก 90° แล้วจึงนำไปแทนค่า (2) ถ้ามุมที่ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ ภาพมากกว่า 90° , θ_2 ต้องนำมุมไปลบด้วย 90° แล้วจึงนำไปแทนค่าเพื่อหาความเร็วของเม็ดแก้วต่อไป

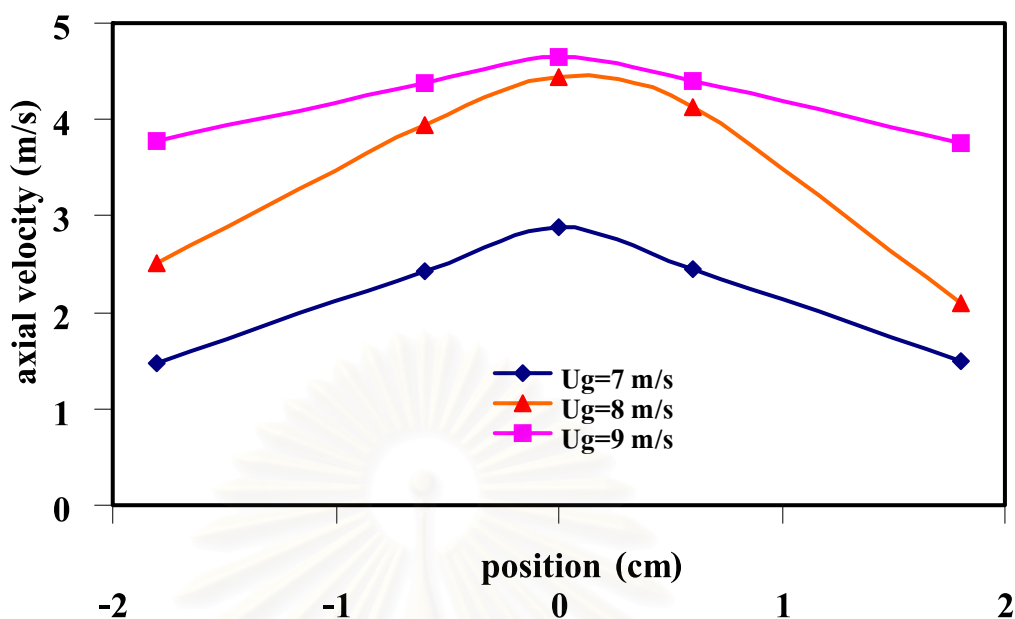
ความเร็วของเม็ดแก้วในแนวแกน (Axial Velocity, c_z) ที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมีแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นว่าความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Pandey P. และคณะ (Pandey P. และคณะ, 2004) และ Nieuwland J. และคณะ (Nieuwland J. และคณะ, 1996) จากหัวข้อที่ 4.1.2 พบว่าที่ความเร็วอากาศต่ำสุดที่ใช้ในการทดลอง (7 เมตรต่อวินาที) รูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่เกิดขึ้นภายในไรเซอร์เป็นฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง (Fast Fluidization) จึงทำให้ความเร็วของเม็ดแก้วที่ได้ตามแนวรัศมี จากรูปที่



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งของมุมที่ใช้ในการคำนวณและที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ
(ก) ใช้ในการคำนวณ (ข) วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

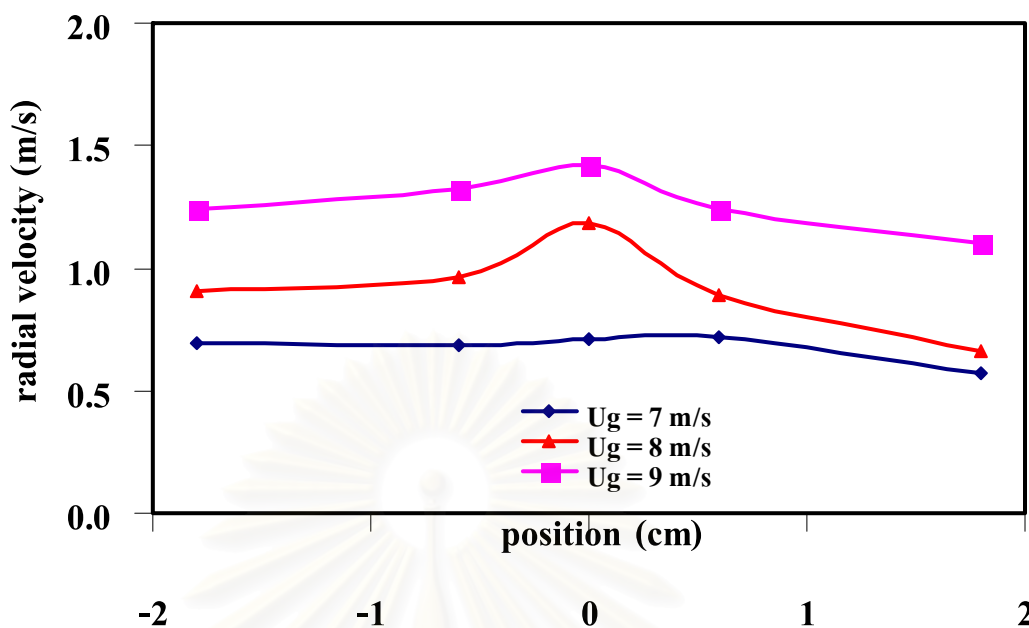
4.6 เป็นรูปพาราโบลา นั่นคือเม็ดแก้วมีความเร็วมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางไรเซอร์และค่อยๆลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนัง เนื่องมาจากมีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมเกิดขึ้นระหว่างอากาศกับของแข็ง เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศเป็น 8 เมตรต่อวินาที รูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วเป็นแบบ คอร์-แอนนูลัส โพรไฟล์ความเร็วจะคล้ายกับที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที เนื่องจากฟลูอิดิเซชันแบบความเร็วสูงจะสามารถแบ่งไรเซอร์ออกได้เป็น 2 ส่วนคือ (1) เขตแบบหนาแน่นที่บริเวณด้านล่าง ซึ่งรูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งจะเป็นแบบ downflow-annulus และ (2) เขตแบบเบาบางที่บริเวณด้านบน รูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งเป็นแบบ คอร์-แอนนูลัส (Bai D. และคณะ, 1995) เมื่อความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที รูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วในไรเซอร์เป็นเขตเบาบางแบบสม่ำเสมอตลอดไรเซอร์ นั่นคือความเร็วของเม็ดแก้วในแนวรัศมีมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยความแตกต่างของความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่กึ่งกลางไรเซอร์กับบริเวณผนังมีค่าน้อยกว่า 18 % โดยเฉพาะที่บริเวณกึ่งกลางไรเซอร์ ความเร็วของเม็ดแก้วแตกต่างกันน้อยมากเพียง 5 % เท่านั้น เนื่องจากปริมาณของเม็ดแก้วที่อยู่ในไรเซอร์มีค่าน้อยและกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ทำให้เม็ดแก้วเกิดการชนกันน้อยลง การถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นน้อยลง ความเร็วของอนุภาคจึงค่อนข้างคงที่ แต่ที่บริเวณผนัง ความเร็วของเม็ดแก้วมีค่าน้อยกว่าที่บริเวณกึ่งกลางไรเซอร์เล็กน้อยเนื่องจากผลของผนัง (Wall Effect) และจากรูปที่ 4.6 ที่ตำแหน่งกึ่งกลางไรเซอร์ พบว่าที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 และ 9 เมตรต่อวินาที ความเร็วของเม็ดแก้วมีค่าไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากที่ความเร็วอากาศทั้ง 2 ค่านี้ เม็ดแก้วในไรเซอร์มีปริมาณน้อยสุด คล้ายกับค่าสัดส่วนช่องว่างที่มีค่าใกล้เคียงกัน ที่ทั้งสองความเร็วอากาศ

นอกจากนี้ยังพบว่าที่ทุกความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง ความเร็วเฉลี่ยของเม็ดแก้วที่ทุกตำแหน่งตามแนวรัศมีมีค่าน้อยกว่าความเร็วอากาศประมาณร้อยละ 50 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang Y. F. และ Arastoopour H. (Zhang Y.F. และ Arastoopour H., 1995) ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว ขนาด 70 ไมโครเมตรและความหนาแน่น 1650 กก.ต่อลบ.ม. เป็นวัสดุเบด ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งอยู่ในช่วง 10-100 กก.ต่อตร.ม.ต่อวินาที พบว่าที่ความเร็วอากาศ 5.3 เมตรต่อวินาที ความเร็วเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 3 เมตรต่อวินาที แต่ไม่สอดคล้องกับการงานวิจัยของ Wei และคณะ (Wei F. และคณะ, 1998) ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว ขนาด 54 ไมโครเมตรและความหนาแน่น 1390 กก.ต่อลบ.ม. เป็นวัสดุเบด ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งมากกว่า 100 กก.ต่อตร.ม.ต่อวินาที พบว่าความเร็วของตัวเร่งปฏิกิริยา มากกว่าความเร็วอากาศประมาณ 2 เท่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลของอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งและสมบัติทางกายภาพของวัสดุเบดที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 4.6 ความเร็วในแนวแกนของเม็ดแก้วตามแนวรัศมี (c_r) ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ที่ความสูง 110 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ

ความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ในแนวรัศมี (Radial Velocity, c_r) ตามแนวรัศมีของโรเตอร์คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 เช่นเดียวกับความเร็วของเม็ดแก้วในแนวแกน (Axial Velocity, c_z) แสดงดังได้ดังรูปที่ 4.7 จากรูปพบว่าความเร็วของเม็ดแก้วในแนวรัศมีเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วอากาศที่ใช้เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับความเร็วของเม็ดแก้วในแนวแกน และที่ทุกความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลองความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ในแนวรัศมีมีค่าน้อยกว่าความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ในแนวแกน ประมาณร้อยละ 70 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tartan M. และ Gidaspow D. (Tartan M. และ Gidaspow D., 2004) และที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตร ต่อวินาที ความเร็วของเม็ดแก้วในแนวรัศมี มีค่าใกล้เคียงกันไม่ขึ้นกับตำแหน่งที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที ปริมาณของแข็งในโรเตอร์มีอยู่หนาแน่นทำให้เม็ดแก้วมีโอกาสเกิดการชนกันแนวรัศมีได้ง่ายกว่าในแนวแกน การถ่ายเทพลังงานจึงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ ส่วนที่ความเร็วอากาศมากขึ้นเท่ากับ 8 และ 9 เมตรต่อวินาที ความเร็วของเม็ดแก้วในแนวรัศมีมีค่ามากที่สุดที่ตรงกึ่งกลางโรเตอร์แต่ที่ตำแหน่งอื่นๆ ความเร็วของเม็ดแก้วในแนวรัศมีมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.7 ความเร็วในแนวรัศมีของเม็ดแก้วตามแนวรัศมี (c_r) ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ที่ความสูง 110 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ

4.2.4 ความเค้นตั้งฉากของเม็ดแก้ว (Normal Stresses) และอุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular Temperature)

งานวิจัยในส่วนนี้ ทำการทดลองโดยบันทึกภาพต่อเนื่องจากกล้องความเร็วสูง จำนวน 50 ภาพที่ความถี่ 10 ภาพต่อวินาที ติดต่อกันเป็นเวลา 5 วินาที ที่ความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที ที่ตำแหน่งตามแนวรัศมี 2 ตำแหน่งคือ กึ่งกลางไรเซอร์ ($r=0$ เซนติเมตร) และบริเวณผนัง ($r=1.8$ เซนติเมตร) ตามลำดับ ที่ความสูง 110 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ ความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว (Hydrodynamic Velocity, v) คือ ค่าเฉลี่ยของความเร็วชั่วขณะของเม็ดแก้ว (Instantaneous Velocity, c) ที่หาได้จากสมการที่ 3.1 ความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 4.1 (Jung J. และคณะ, 2005)

$$v_i(r, t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n c_{ik}(r, t) \quad (4.1)$$

โดยที่ v_i คือ ความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว, เมตรต่อวินาที

c คือ ความเร็วชั่วขณะของเม็ดแก้ว, เมตรต่อวินาที

i คือ ทิศทางในแนวแกน r, θ , หรือ z

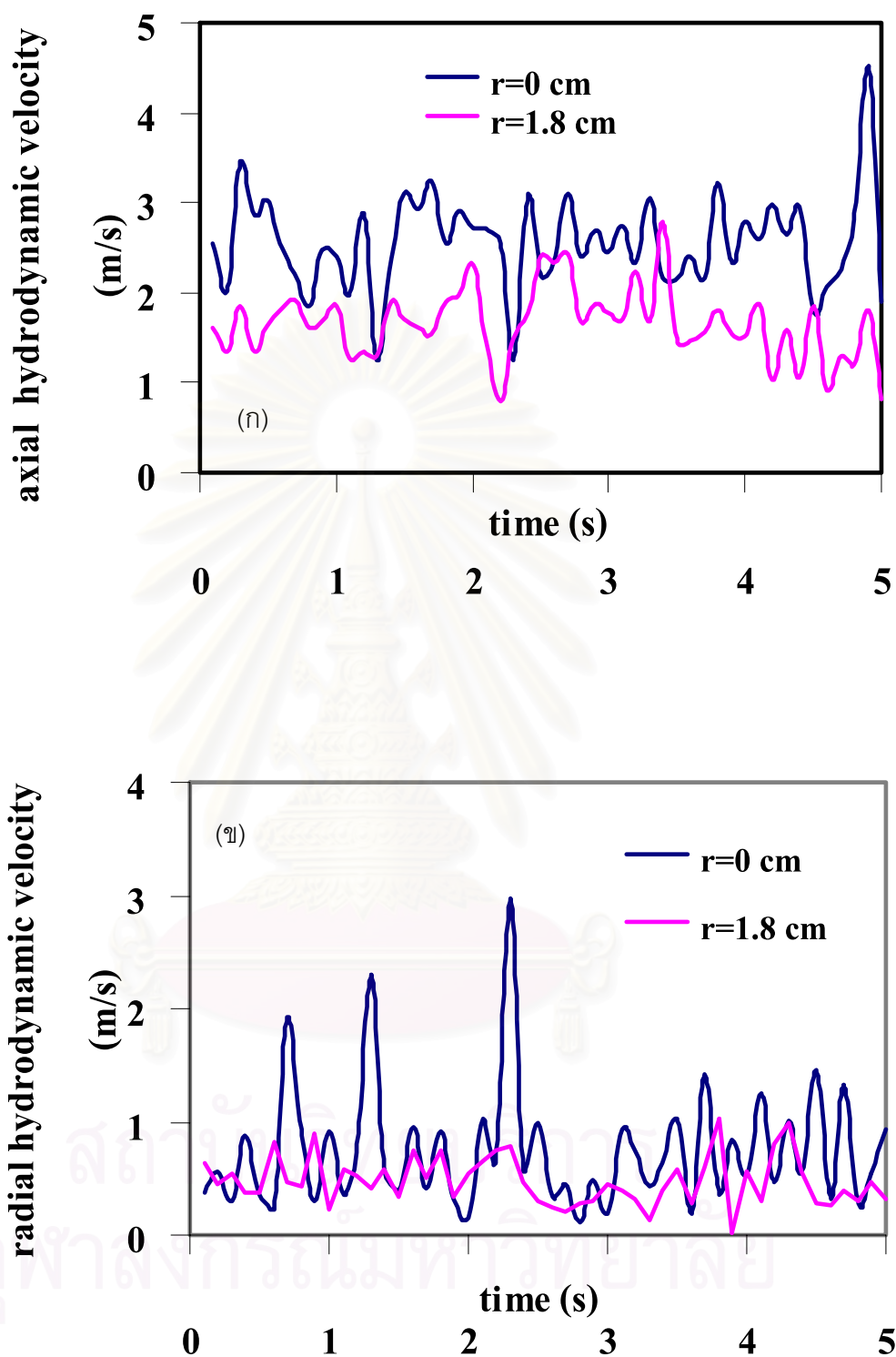
n, k คือ จำนวนของเม็ดแก้วในแต่ละภาพที่บันทึกได้

รูปที่ 4.8 (ก) และ (ข) แสดงความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วในแนวแกน (Axial Hydrodynamic Velocity, v_z) และความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วในแนวรัศมี (Radial Hydrodynamic Velocity, v_r) ที่เวลาต่างๆ พบว่า ความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วทั้งในแนวแกนและในแนวรัศมี ที่ทั้ง 2 ตำแหน่ง คือกึ่งกลางโรเตอร์และบริเวณผนัง เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ตำแหน่งกึ่งกลางโรเตอร์มีค่าเฉลี่ยของความเร็วในแนวแกนและในแนวรัศมีเท่ากับ 2.89 และ 0.71 เมตรต่อวินาที ที่บริเวณผนังมีค่าเฉลี่ยของความเร็วในแนวแกนและในแนวรัศมีเท่ากับ 1.48 และ 0.58 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และจะเห็นว่า ความเร็วอุทกพลศาสตร์ในแนวแกนมีค่ามากกว่าในแนวรัศมี ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Jung J. และคณะ (Jung J. และคณะ, 2005) ที่ทำการทดลองในฟลูอิดเบดแบบฟองอากาศ โดยใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุเบด เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้ จากรูปที่ 4.8 (ก) และ (ข) พบว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางโรเตอร์ความเร็วอุทกพลศาสตร์มีการแกว่งมากกว่าที่บริเวณผนังเนื่องจากบริเวณกึ่งกลางโรเตอร์เม็ดแก้วมีความเร็วมากกว่า และความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วทั้งในแนวแกนและในแนวรัศมี มีค่ามากกว่าที่บริเวณผนัง โดยลดลงร้อยละ 48 และ 18 ตามลำดับ

ความเค้นตั้งฉากของเม็ดแก้ว (Normal Stresses) ในสมการที่ 4.2 (Jung J. และคณะ, 2005) คือค่าเฉลี่ยของผลรวมของผลต่างระหว่างความเร็วชั่วขณะกับความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วในแต่ละทิศทางการกำลังสอง ซึ่งแสดงถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วของของแข็งในระบบ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดความปั่นป่วน (Turbulent) ของระบบได้ โดยคำนวณได้จากค่าความเร็วชั่วขณะของเม็ดแก้วที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.1 และความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.1

$$\langle C_i C_j \rangle (r, t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [c_{ik}(r, t) - v_i(r, t)] [c_{jk}(r, t) - v_j(r, t)] \quad (4.2)$$

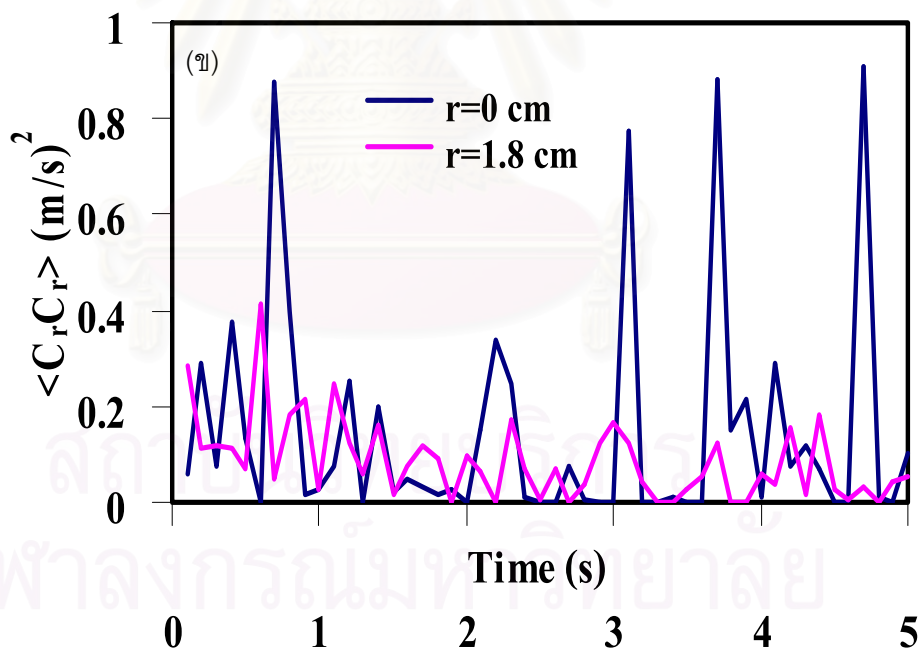
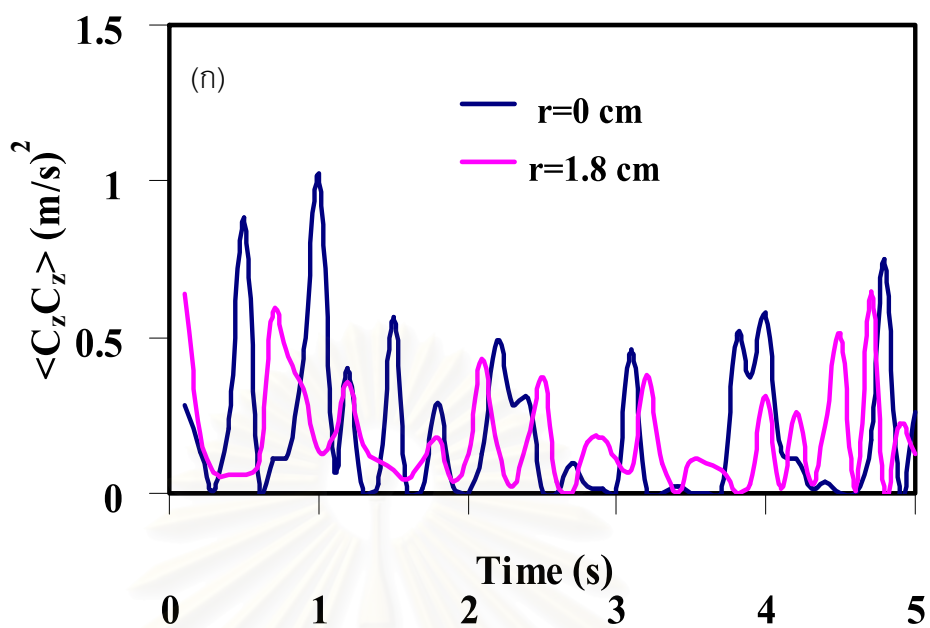
รูปที่ 4.9 (ก) และ (ข) แสดงค่าความเค้นตั้งฉากของเม็ดแก้วในแนวแกน (Axial Normal Stresses, $\langle C_z C_z \rangle$) และค่าความเค้นตั้งฉากของเม็ดแก้วในแนวรัศมี (Radial Normal Stresses, $\langle C_r C_r \rangle$) ตามลำดับที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่า ความเค้นตั้งฉากของเม็ดแก้วทั้งในแนวแกนและในแนวรัศมี ที่ทั้ง 2 ตำแหน่ง คือกึ่งกลางโรเตอร์และบริเวณผนัง เปลี่ยนแปลงตามเวลาและตำแหน่งที่เปลี่ยนไป โดยที่ตำแหน่งกึ่งกลางโรเตอร์ความเค้นตั้งฉากในแนวแกนและในแนวรัศมีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.19 และ 0.15 (เมตรต่อวินาที)² ที่บริเวณผนังความเค้นตั้งฉากในแนวแกนและในแนวรัศมีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.18 และ 0.09 (เมตรต่อวินาที)² ตามลำดับ ความเค้นในแนวแกนมีค่ามากกว่าในแนวรัศมี โดยเฉพาะที่บริเวณผนังมีค่ามากกว่าถึง 2 เท่า เนื่องจากบริเวณผนังเม็ดแก้วมีความเร็ว



รูปที่ 4.8 ความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ความสูง 110 ซม. จากตัวกระจายอากาศ ความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที

(ก) ความเร็วอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วในแนวแกน (Axial Hydrodynamic Velocity, v_z)

(ข) ความเร็วของอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วในแนวรัศมี (Radial Hydrodynamic Velocity, v_r)



รูปที่ 4.9 ความเค้นตึงฉากของเม็ดแก้ว ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ความสูง 110 ซม. จากตัวกระจาย

อากาศ ความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที

(ก) ความเค้นตึงฉากของเม็ดแก้วในแนวแกน (Axial Normal Stresses, $\langle C_z C_z \rangle$)

(ข) ความเค้นตึงฉากของเม็ดแก้วในแนวรัศมี (Radial Normal Stresses, $\langle C_r C_r \rangle$)

น้อยกว่าที่บริเวณกึ่งกลางไรเซอร์ เนื่องจากผลของผนังต่อเม็ดแก้ว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Tartan M. และ Gidaspow D. (Tartan M. และ Gidaspow D., 2004) และที่ตำแหน่งกึ่งกลางไรเซอร์ความเค้นตั้งฉากในแนวรัศมีมีค่ามากกว่าที่บริเวณผนัง แต่ความเค้นตั้งฉากในแนวแกนมีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับผลการทดลองของ Gidaspow D. และคณะ (Gidaspow D. และคณะ, 2004)

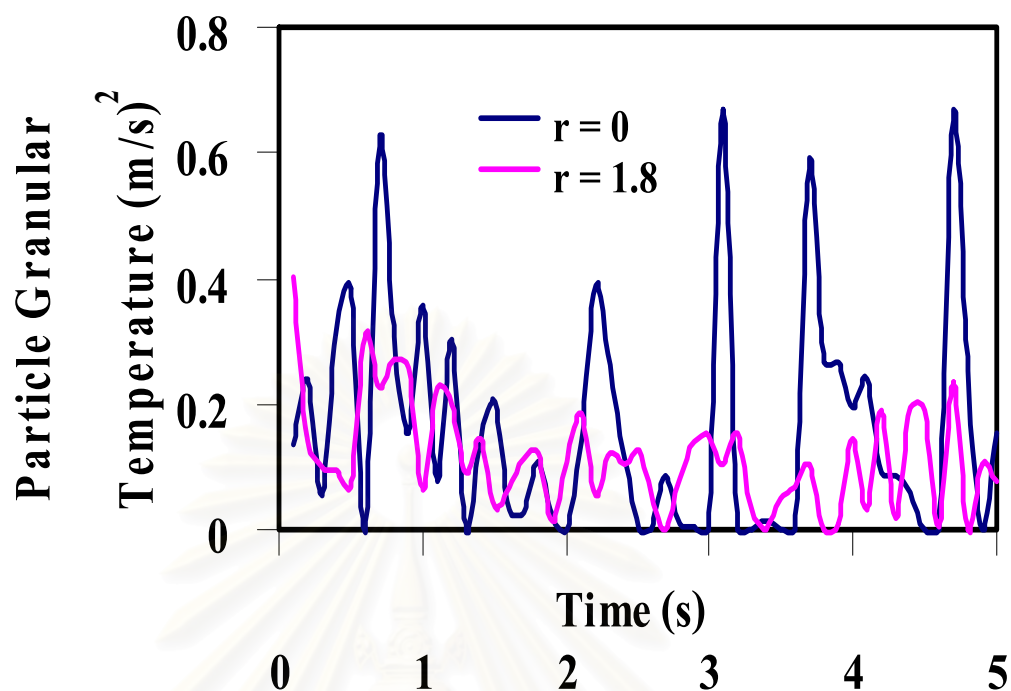
อุณหภูมิแกรนูลาร์ (Granular Temperature) คือ ตัวแปรสำหรับวัดการแกว่งอย่างไม่มีทิศทางที่แน่นอน (Random Oscillation) ของความเร็วอนุภาค ที่เกิดจากการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ของอนุภาคนั้นเอง (Inelastic Collision) ซึ่งก็คือผลรวมของค่าเบี่ยงเบนของความเร็วชั่วขณะจากความเร็วอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคในทั้ง 3 แกนคือ r, θ, z ดังแสดงในสมการที่ 4.3

$$\theta_{particle}(r, t) = \frac{1}{3} \langle C_z C_z \rangle + \frac{1}{3} \langle C_r C_r \rangle + \frac{1}{3} \langle C_\theta C_\theta \rangle \quad (4.3)$$

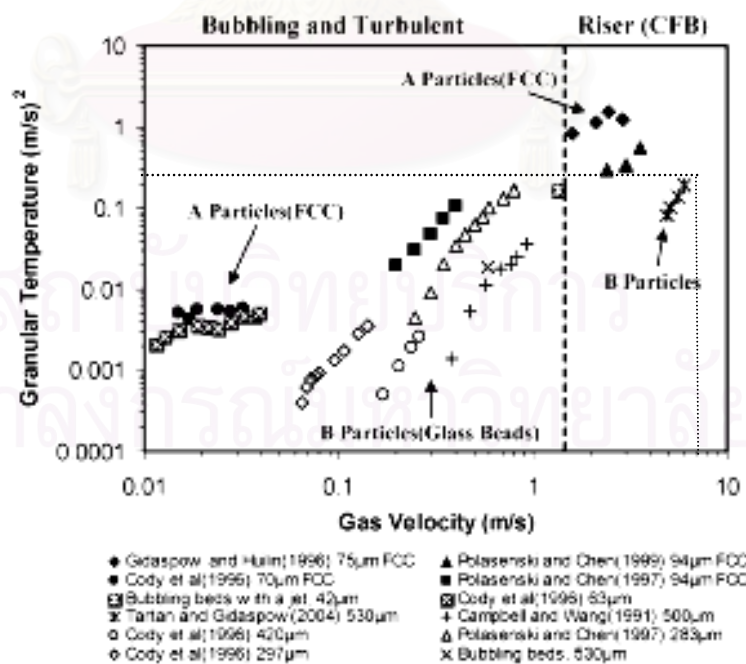
จากงานวิจัยของ Breault R. W. และคณะ (Breault R. W. และคณะ, 2005) เสนอว่า เมื่อทำการทดลองที่ความเร็วอากาศสูงๆ ความเค้นตั้งฉากในแนวรัศมี ($\langle C_r C_r \rangle$) มีค่าใกล้เคียงกับความเค้นตั้งฉากในแนวตั้งฉากกับแนวรัศมี ($\langle C_\theta C_\theta \rangle$) ดังนั้นอุณหภูมิแกรนูลาร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.4

$$\theta_{particle}(r, t) \cong \frac{1}{3} \langle C_z C_z \rangle + \frac{2}{3} \langle C_r C_r \rangle \quad (4.4)$$

รูปที่ 4.10 แสดงอุณหภูมิแกรนูลาร์ของเม็ดแก้ว ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา พบว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์ของเม็ดแก้วเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งและเวลาที่เปลี่ยนไป โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.17 และ 0.11 (เมตรต่อวินาที)² ที่กึ่งกลางไรเซอร์และบริเวณผนัง ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Tartan M. และ Gidaspow D. (Tartan M. และ Gidaspow D., 2004) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 จากรูปพบว่าอุณหภูมิแกรนูลาร์มีค่าประมาณ 0.2 (เมตรต่อวินาที)² จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางไรเซอร์อุณหภูมิแกรนูลาร์มีค่ามากกว่าที่บริเวณผนัง ประมาณ 2 เท่า แสดงว่าที่กึ่งกลางไรเซอร์มีการแกว่งของความเร็วเม็ดแก้วมากกว่าที่บริเวณผนัง เนื่องจากที่ตำแหน่งกึ่งกลางไรเซอร์มีปริมาณเม็ดแก้วน้อยและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจึงทำให้เกิดความปั่นป่วนมาก



รูปที่ 4.10 อุณหภูมิแกรนูลาร์ของเม็ดแก้ว ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ความสูง 110 ซม.เหนือตัวกระจายอากาศ ความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที



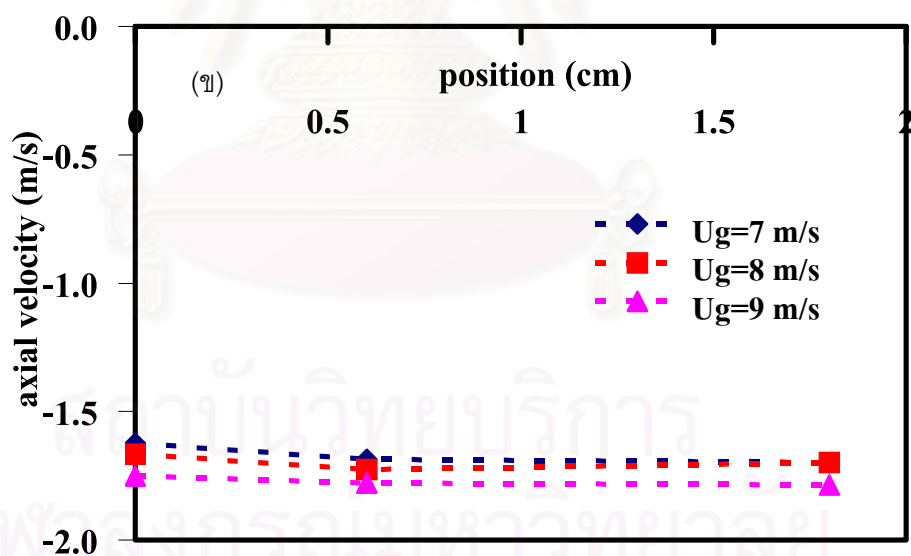
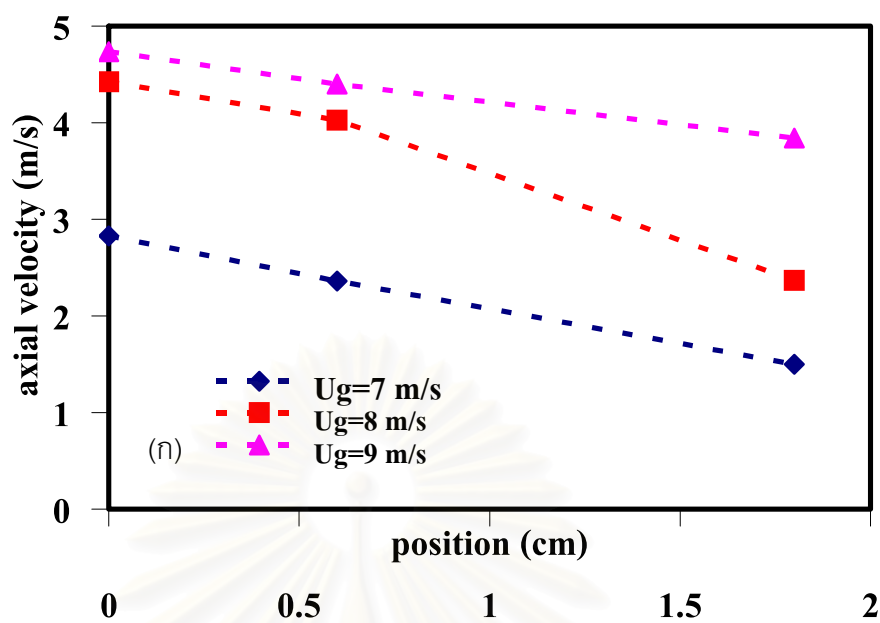
รูปที่ 4.11 อุณหภูมิแกรนูลาร์ของอนุภาคกลุ่ม A และ กลุ่ม B (Tartan M. และ Gidaspow D., 2004)

⊗ อุณหภูมิแกรนูลาร์ในงานวิจัยนี้

4.2.5 ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว

จากรูปที่ 4.12 (ก) แสดงความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นตามแนวรัศมี ที่ความเร็วอากาศต่างๆ พบว่าความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ขึ้นมีแนวโน้มเดียวกับการทดลองในส่วนที่ 4.2.2 คือที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 และ 8 เมตรต่อวินาที ความเร็วของเม็ดแก้วมีค่ามากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางไรเซอร์และค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนัง ส่วนที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที ความเร็วของเม็ดแก้วมีค่าใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.12 (ข) แสดงความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลงตามแนวรัศมี ที่ความเร็วอากาศต่างๆ พบว่าความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลงมีค่าค่อนข้างคงที่ อยู่ในช่วง 1.63-1.79 เมตรต่อวินาที ไม่ขึ้นกับความเร็วอากาศและตำแหน่งที่ทำการทดลอง สอดคล้องกับการทดลองของ Pandey P. และคณะ (Pandey P. และคณะ, 2004) ที่ใช้ไม้คอร์ก เป็นวัสดุเบด ใช้ความเร็วอากาศ 3 ค่าคือ 3.75, 4.58 และ 5.4 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ และการทดลองของ Zhou J. และคณะ (Zhou J. และคณะ, 1995) ที่ทำการทดลองใน ไรเซอร์ที่เป็นสี่เหลี่ยม โดยใช้ทรายที่มีความหนาแน่นและขนาดของอนุภาคเท่ากับ 2640 กก.ต่อ ลบ.ม. และ 213 ไมโครเมตรตามลำดับ เป็นวัสดุเบด และทำการทดลองในช่วงความเร็วอากาศเท่ากับ 5.5-7 เมตรต่อวินาที เนื่องจากในการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นมีแรงที่กระทำกับของแข็งอยู่ 3 แรงคือ แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Gravity Force) แรงลอยตัว (Buoyancy Force) และแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับของแข็ง (Drag Force) เมื่อแรงลอยตัวและแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับของแข็งน้อยกว่าแรงโน้มถ่วงของโลก จะทำให้เม็ดแก้วเคลื่อนที่ลง โดยแรงโน้มถ่วงคือน้ำหนักของเม็ดแก้วนั่นเอง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันเพราะเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงทำให้ความเร็วมีค่าใกล้เคียงกัน

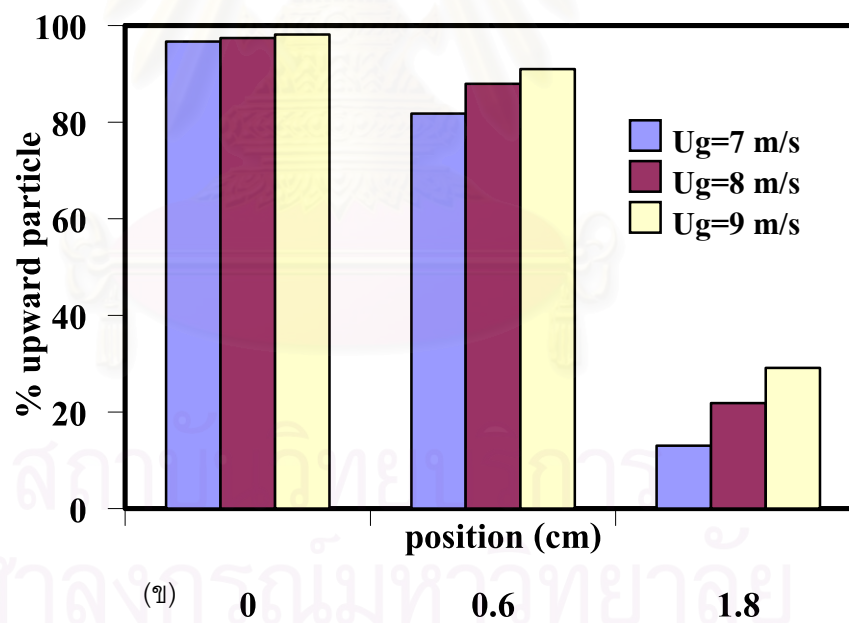
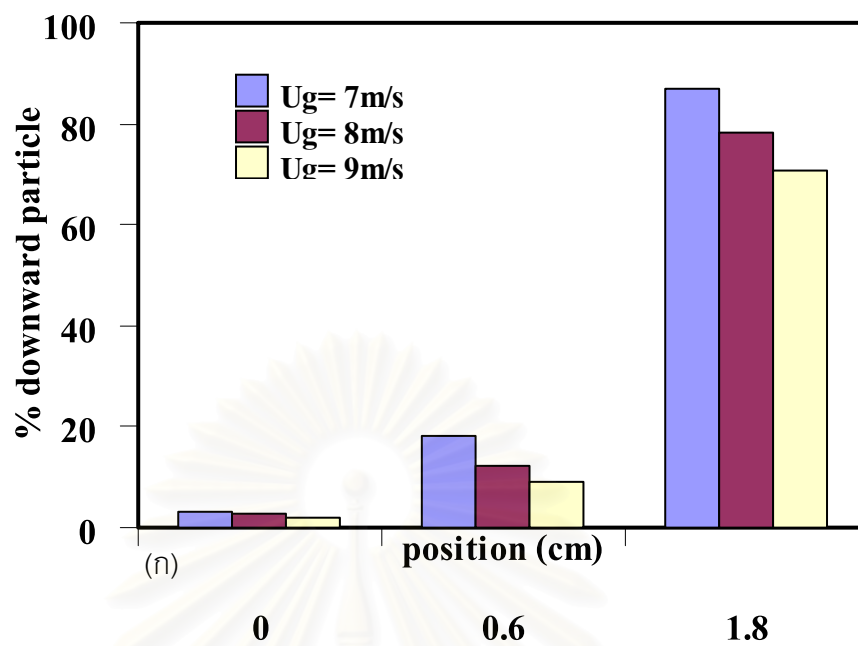
รูปที่ 4.13 แสดงจำนวนของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลง (ก) และเคลื่อนที่ขึ้น (ข) ตามแนวรัศมี ที่ความเร็วอากาศต่างๆ จากรูปพบว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลงมีน้อยลง แต่ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นมีมากขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองของ Pandey P. และคณะ (Pandey P. และคณะ, 2004) และการทดลองของ Zhou และคณะ (Zhou J. และคณะ, 1995) ที่รายงานว่าบริเวณกึ่งกลางไรเซอร์เม็ดแก้วส่วนใหญ่เคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่บริเวณผนังเม็ดแก้วส่วนใหญ่เคลื่อนที่ลง และจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.2 สามารถสรุปได้ว่า ที่ความเร็วอากาศ 7 และ 8 เมตรต่อวินาที เกิดรูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว เป็นแบบคอร์-แอนนูลัส คือของแข็งส่วนใหญ่ที่บริเวณกึ่งกลางคอลัมน์มีความเร็วสูงและเคลื่อนที่ขึ้น เรียกส่วนนี้ว่า คอร์ ในขณะที่บริเวณผนังของแข็งส่วนใหญ่เคลื่อนที่ลงและมีความเร็วต่ำกว่าที่ บริเวณกึ่งกลางคอลัมน์ เรียกส่วนนี้ว่า แอนนูลัส แสดงได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.12 ความเร็วในแนวแกนของเม็ดแก้วตามแนวรัศมี ที่ความสูง 110 ซม. เหนือตัวกระจายอากาศที่ความเร็วอากาศต่างๆ

(ก) เม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้น

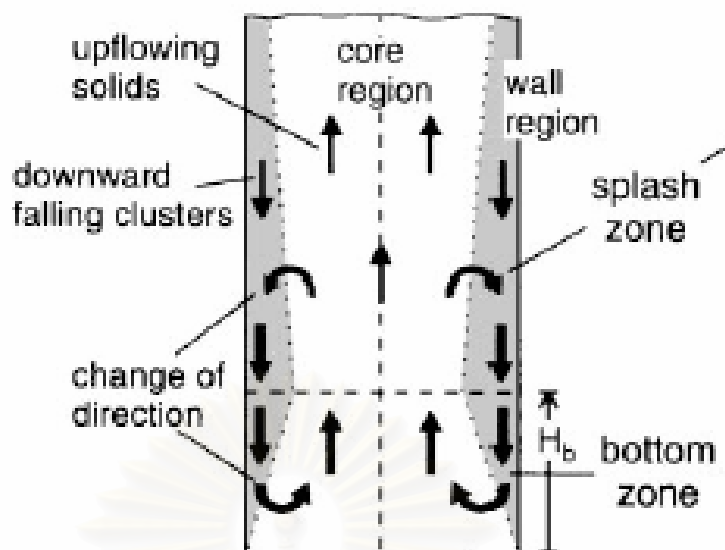
(ข) เม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลง



รูปที่ 4.13 ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ตามแนวรัศมี ที่ความสูง 110 ซม.เหนือตัวกระจายอากาศ ที่ความเร็วอากาศต่างๆ

(ก) เม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลง

(ข) เม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้น



รูปที่ 4.14 แผนภาพแสดงลักษณะการไหลแบบ คอร์-แอนนูลัส (Werther และคณะ, 1999)

4.3 อุทกพลศาสตร์ของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับเกลบ

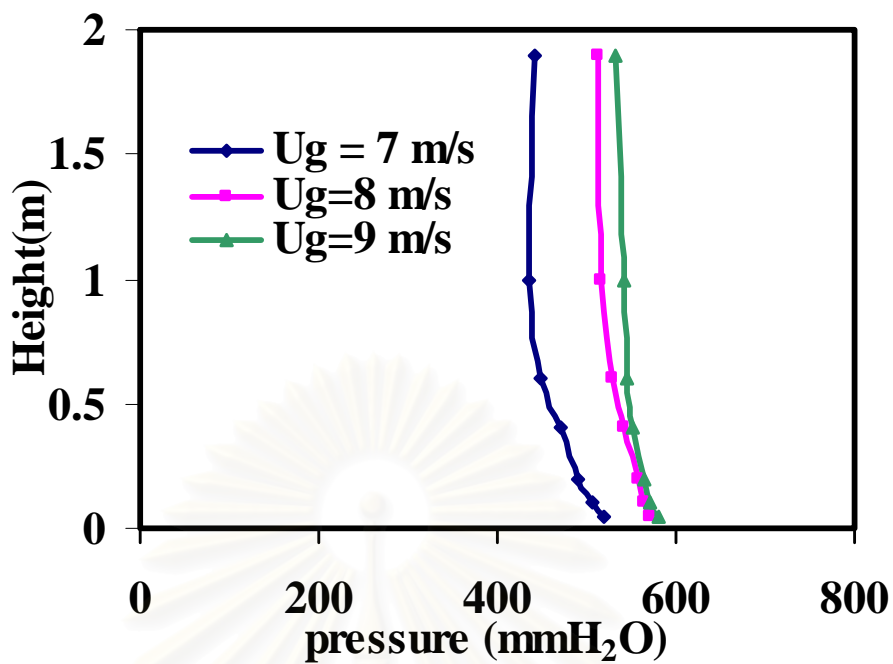
จากงานวิจัยของสมชาย (สมชาย, 2004) ทำการทดลองใน ฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน โดยใช้วัสดุเบด คือ ททรายผสมกับซีวมวล 3 ชนิดคือ เกลบ ซีลี้อยและชานอ้อยเป็นวัสดุเบด แล้วพบว่าของผสมระหว่างทรายและเกลบที่ปริมาณร้อยละ 50 โดยมีปริมาตร สามารถเกิดการหมุนเวียนในระบบได้ดีที่สุด ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสารป้อนผสมระหว่างเม็ดแก้วกับเกลบเป็นวัสดุเบดในฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน จากรูปที่ 4.15 แสดงขนาดเปรียบเทียบของเกลบกับเม็ดแก้วที่ใช้ในการทดลอง พบว่าขนาดของเกลบที่ใช้ในการทดลองมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดแก้วมาก และจากตารางที่ 3.1 พบว่าเกลบมีความหนาแน่นน้อยกว่าเม็ดแก้วประมาณ 5 เท่า ซึ่งตัวแปรทั้ง 2 นี้คือขนาดและความหนาแน่นของของแข็ง ทำให้เกิดปัญหาในการทำให้ของผสมเคลื่อนที่ในฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน นั่นคือในขณะที่ผสมเกลบลงไปร้อยละ 50 โดยปริมาตรในของผสม ทำให้ของผสมเกิดการอัดตัวกันแน่นอยู่ในท่อส่งผ่าน (Transfer Line) เกิดการหมุนเวียนของของผสมในระบบน้อยมากและในที่สุดเกิดการอุดตัน ดังนั้นจึงต้องมีการทดลองเพื่อหาปริมาณ ของเกลบที่เหมาะสมเพื่อเป็นวัสดุเบดในการทดลอง โดยลดปริมาณของเกลบลงเป็นลำดับ เมื่อลดปริมาณเกลบจนถึงร้อยละ 20 โดยปริมาตร พบว่าสารป้อนผสมสามารถเกิดการหมุนเวียนได้ดี ดังนั้นในการทดลองต่อไปนี้จะใช้สารป้อนผสมระหว่างเม็ดแก้วกับเกลบที่อัตราส่วนของเกลบร้อยละ 20 โดยปริมาตร



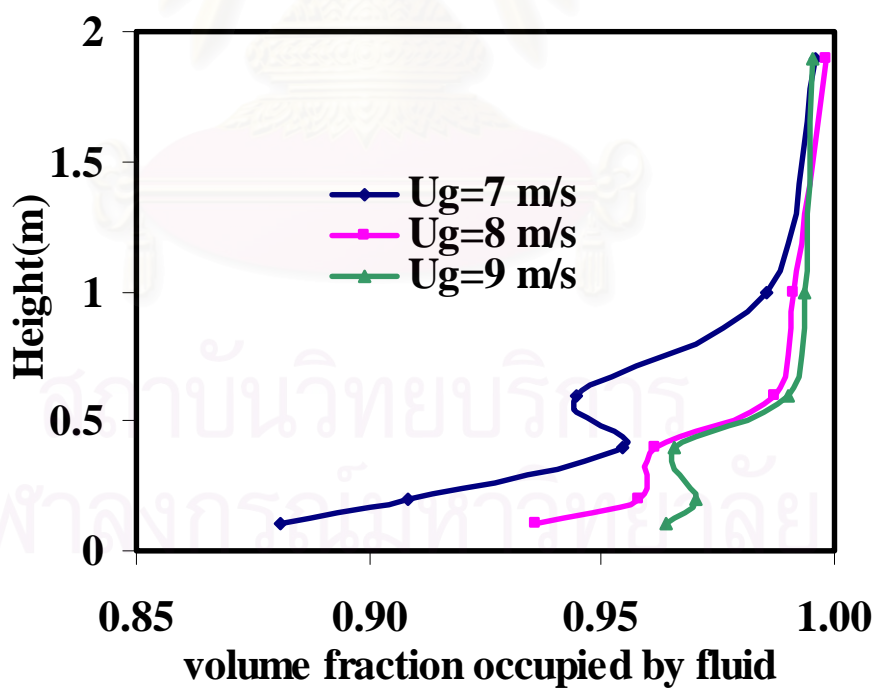
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบขนาดและรูปร่างของเม็ดแก้วและเกลบ

4.3.1 ผลของความเร็วกาศที่มีต่อความดันอากาศและสัดส่วนช่องว่าง

รูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงความดันของอากาศและสัดส่วนช่องว่างตามความสูงของโรเตอร์ โดยวัสดุเบดคือของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับเกลบ ที่ความเร็วกาศ 7, 8 และ 9 เมตร ต่อวินาที โดยมีอัตราการไหลป้อนกลับของของผสมที่ความเร็วกาศต่างๆ เท่ากับ 20.4, 20.9 และ 19.5 กก. ต่อตร.ม.ต่อวินาที ตามลำดับ (ภาคผนวก ข) ความสูงเริ่มต้นของของผสม ด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ (H_{dc}) 30 เซนติเมตร ผลการทดลองที่ได้คล้ายกับการทดลองที่ใช้เม็ดแก้วเป็นวัสดุเบด (ในรูปที่ 4.3 และ 4.4) นั่นคือความดันของอากาศในโรเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วกาศเพิ่มขึ้นแต่มีค่าลดลงตามความสูงของโรเตอร์ จากรูปที่ 4.17 ที่บริเวณด้านล่างของโรเตอร์ (50 ซม.เหนือตัวกระจายอากาศ) สัดส่วนช่องว่างมีค่าน้อยนั่นคือมีปริมาณของแข็งมาก ทำให้เกิดเป็นบริเวณเบดแบบหนาแน่น ที่ความเร็วกาศน้อยที่สุด คือ 7 เมตรต่อวินาที บริเวณส่วนล่างของโรเตอร์มีปริมาณของแข็งสะสมอยู่มากที่สุด (สัดส่วนช่องว่างอยู่ในช่วง 0.88-0.95) และปริมาณของแข็งจะลดลงเมื่อความเร็วกาศเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มขึ้น สัดส่วนช่องว่างก็จะมากขึ้น ทำให้เกิดเป็นบริเวณเบดแบบเบาบางและพบว่าที่บริเวณด้านบนสัดส่วนช่องว่างมีค่าใกล้เคียงกัน ประมาณ 0.99 ที่ทุกความเร็วกาศและไม่มีผลกระทบจากลักษณะทางออกของโรเตอร์ อาจเนื่องมาจาก ในระบบที่วัสดุเบดเป็นของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับเกลบมีอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งน้อยกว่าเมื่อใช้วัสดุเบดเป็นเม็ดแก้วอย่างเดียว จึงทำให้ภายในโรเตอร์มีปริมาณของของแข็งน้อยลง และมีเกลบที่เบาเคลื่อนที่ได้ง่ายมาช่วยในการพาเม็ดแก้วออกไปจากโรเตอร์ได้ง่ายขึ้น ผล



รูปที่ 4.16 ความดันตลอดความสูงของไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที (แกลบริยละเอียด 20 โดยปริมาตร)

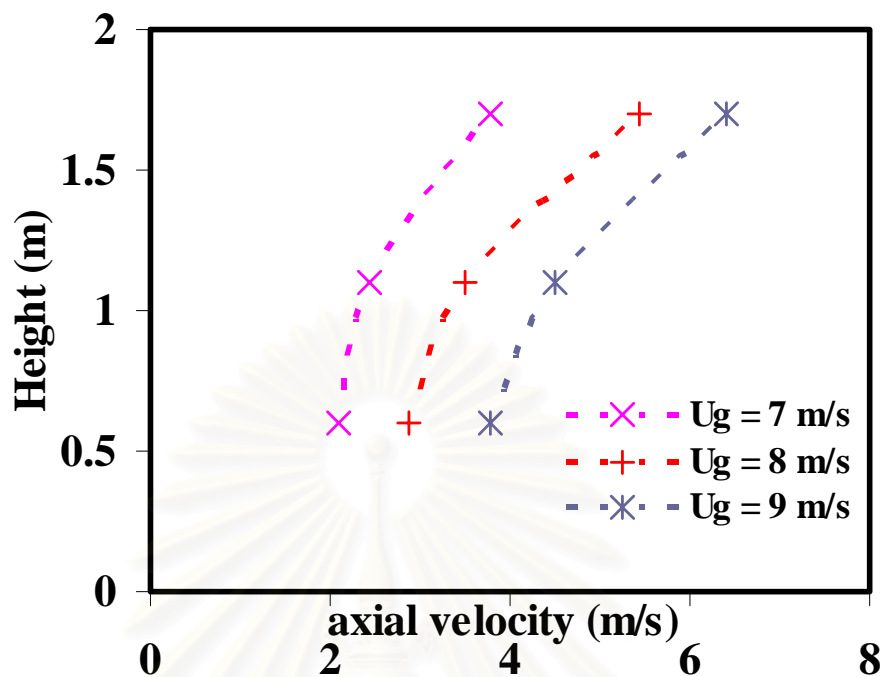


รูปที่ 4.17 สัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที (แกลบริยละเอียด 20 โดยปริมาตร)

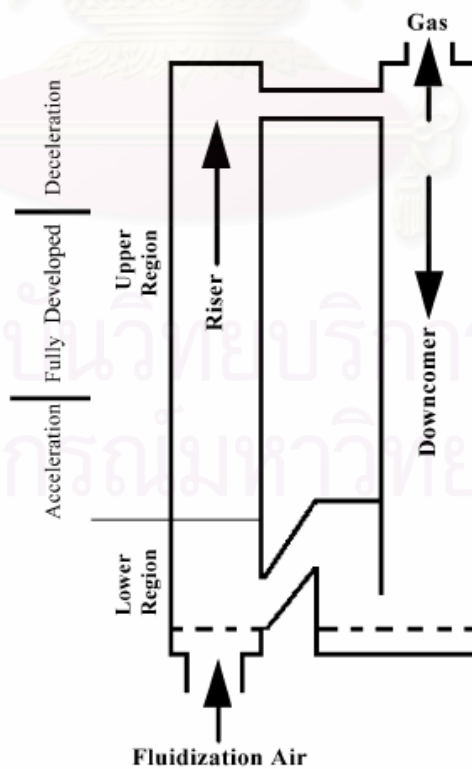
การทดลองนี้ไม่สอดคล้องกับการทดลองของ Wei F. และคณะ (Wei F. และคณะ, 1995) ที่ทำการทดลองผสมอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีขนาด 1810 ไมครอน ความหนาแน่น 1473 กก.ต่อลบ.ม. กับอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาด 54 ไมครอน ความหนาแน่น 1710 กก.ต่อลบ.ม. พบว่าอนุภาคขนาดเล็กจะมีการกระจายตัวของอนุภาคตามแนวแกนคงที่ การกระจายตัวของอนุภาคในแนวรัศมีเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งต่างจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่มีการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอนุภาคตามแนวแกนโดยเฉพาะที่บริเวณด้านล่างของโรเตอร์ อาจเนื่องมาจากอนุภาคขนาดใหญ่ในการทดลองของ Wei F. และคณะ มีค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน (U_{mf}) และความเร็วสุดท้าย (U_f) มากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก แต่ในงานวิจัยนี้กลับซึ่งเป็นอนุภาคขนาดใหญ่มีความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันและความเร็วสุดท้ายน้อยกว่าเม็ดแก้วที่เป็นอนุภาคขนาดเล็ก ประมาณ 20 เท่า

4.3.2 ผลของความเร็วกาศที่มีต่อความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมตามความสูงของโรเตอร์

รูปที่ 4.18 แสดงความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับเกลบตามความสูงของโรเตอร์ ที่ความเร็วกาศต่างๆ ที่ความสูง 60, 110 และ 170 ซม. จากตัวกระจายอากาศตามลำดับ และทำการถ่ายภาพเพื่อวิเคราะห์เพียงตำแหน่งเดียว คือที่บริเวณกึ่งกลางโรเตอร์ ($r=0$ เซนติเมตร) เท่านั้น พบว่าที่ทุกความเร็วกาศที่ใช้ ความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มมากขึ้น โดยในช่วงแรกที่ความสูง 60-110 ซม. เนื้อตัวกระจายอากาศความเร็วของเม็ดแก้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 16 ที่ทุกความเร็วกาศ และในช่วงที่สองที่ความสูง 110-170 ซม. เนื้อตัวกระจายอากาศความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วประมาณร้อยละ 35 ที่ทุกความเร็วกาศเช่นกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในระบบฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียนนั้น สามารถแบ่งโรเตอร์ออกได้เป็น 2 ส่วนตามความสูงที่มักจะเกิดควบคู่กันเสมอ คือ ส่วนที่เป็นเบดแบบหนาแน่นบริเวณบริเวณด้านล่างเนื้อตัวกระจายอากาศ และส่วนที่เป็นเบดแบบเบาบางที่มักเกิดขึ้นด้านบน (Sabbaghan H. และคณะ, 2004) ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จะเห็นว่า บริเวณด้านบนของโรเตอร์ (Upper Region) ยังสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ (1) ส่วนที่ของแข็งเกิดความเร่ง (Acceleration Zone) เกิดขึ้นที่ส่วนล่างสุดของด้านบนโรเตอร์ เป็นบริเวณที่ของแข็งถูกเร่งแล้วมีความเร็วเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนมีค่าคงที่ (2) ส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์ (Fully Developed Zone) เกิดขึ้นเหนือส่วนที่มีความเร่ง เป็นบริเวณที่ความเร็วของของแข็งไม่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของโรเตอร์ และ (3) ส่วนที่เกิดความหน่วง (Deceleration Zone) เกิดขึ้นเหนือส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์ เป็นบริเวณที่ของแข็งมีความเร็วลดลงหรือเกิดความหน่วงขึ้นเนื่องจากลักษณะทางออกของโรเตอร์



รูปที่ 4.18 ความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบตามความสูงของไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที (แคลบร้อยละ 20 โดยปริมาตร)

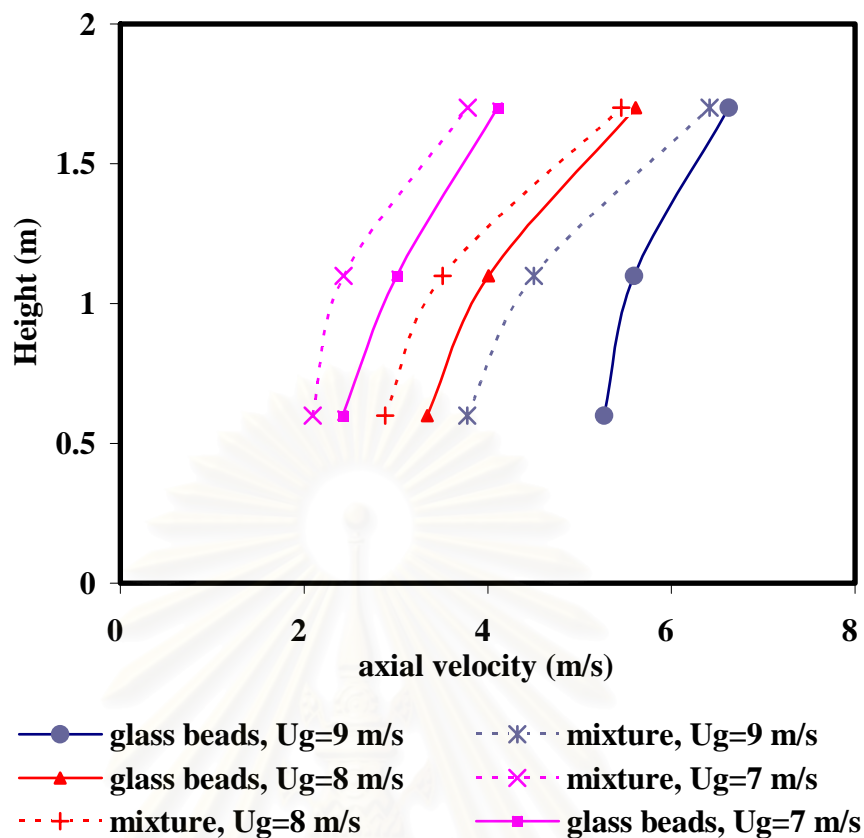


รูปที่ 4.19 แผนภาพของเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Sabbaghan H. และคณะ, 2004)

ดังนั้นจากผลการทดลองอาจสรุปได้ว่า ตลอดความสูงของไรเซอร์นั้นอยู่ในช่วงที่เม็ดแก้วมีความเร็ว จึงทำให้ความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของไรเซอร์เพิ่มขึ้น และเนื่องจากไรเซอร์ที่ใช้ในการทดลองอาจจะมีขนาดสั้นเกินไป (200 เซนติเมตร) ทำให้ภายในไรเซอร์ปรากฏเพียงส่วนที่อนุภาคมีความเร็วเท่านั้น ไม่ได้ปรากฏส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์ และ ส่วนที่มีความหน่วง

4.3.3 เปรียบเทียบความเร็วของเม็ดแก้วกับเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสม

จากตาราง 3.1 ตัวแปรที่สำคัญในงานวิจัยนี้ คือ ขนาดและความหนาแน่นของของแข็ง จากการทดลองของ Sankar และ Smith (Sankar R. และ Smith, 1986) พบว่าความหนาแน่นของของแข็งมีผลน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของขนาดของของแข็ง จากรูปที่ 4.20 เป็นการเปรียบเทียบความเร็วของเม็ดแก้วในระบบที่มีเม็ดแก้วเป็นวัสดุเบดเพียงชนิดเดียวกับเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบ ที่ความเร็วอากาศต่างๆ พบว่า ความเร็วของเม็ดแก้วที่มีเม็ดแก้วเป็นวัสดุเบดเพียงอย่างเดียวเพิ่มมากขึ้นเมื่อความสูงของไรเซอร์เพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มคล้ายกับความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบ และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Parssinen J.H. และ Zhu J.X. (Parssinen J.H. และ Zhu J.X., 2001) ที่ทำการทดลองโดยใช้ FCC ขนาด 67 ไมครอนและความหนาแน่น 1600 กก.ต่อตร.ม.ต่อวินาทีเป็นวัสดุเบด และที่ทุกความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง ความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบน้อยกว่าความเร็วของระบบที่มีเม็ดแก้วเป็นวัสดุเบดเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะที่บริเวณส่วนล่างของไรเซอร์มีความแตกต่างของความเร็วของเม็ดแก้วค่อนข้างมาก ที่ความเร็วอากาศน้อยคือ 7 เมตรต่อวินาทีและความแตกต่างของความเร็วของเม็ดแก้วที่บริเวณด้านล่างของไรเซอร์น้อยลงเมื่อความเร็วอากาศมากขึ้น ในขณะที่บริเวณด้านบนของไรเซอร์ความเร็วของเม็ดแก้วมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ที่ทุกความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง สอดคล้องกับผลการทดลองของ Mastellone และ Arena (Mastellone และ Arena, 1999) ที่ศึกษาถึงผลของความหนาแน่นและขนาดของของแข็งที่มีต่อการกระจายตัวของของแข็งในไรเซอร์ แล้วพบว่าตัวแปรทั้ง 2 ตัวที่ศึกษาส่งผลกระทบต่อเฉพาะที่บริเวณทางเข้าของไรเซอร์เท่านั้น



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบความเร็วของเม็ดแก้วและเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมตามความสูง ที่ความเร็วอากาศ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที (แกลบริยละเอียด 20 โดยปริมาตร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วในเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยศึกษาถึงผลของความเร็วอากาศและแถบที่นำมาผสมที่มีต่อ รูปแบบการเคลื่อนที่ ความดันของอากาศ และความเร็วของเม็ดแก้ว ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

ตอนที่ 1

1. ความเร็วหลุดลอยส่งผ่านของเม็ดแก้ว ได้จากการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง ความดัน ลดที่บริเวณด้านล่างของโรเตอร์ กับความเร็วอากาศที่อัตราการไหลย้อนกลับ ของของแข็งค่าต่างๆ เท่ากับ 4.8 เมตรต่อวินาที ในขณะที่ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิด ฟลูอิดเซชันและความเร็วสุดท้ายของเม็ดแก้วเท่ากับ 0.21 และ 4.2 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ
2. รูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วในเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการ ทดลอง สามารถเกิดได้ 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความเร็วอากาศที่ใช้ คือ
 - ความเร็วอากาศในช่วง 4.8-7.8 เมตรต่อวินาที เม็ดแก้วมีรูปแบบการเคลื่อนที่เป็น ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed)
 - ความเร็วอากาศในช่วง 7.8-8.3 เมตรต่อวินาที เม็ดแก้วมีรูปแบบการเคลื่อนที่ แบบ คอร์-แอนนูลัส (Core-Annulus)
 - ความเร็วอากาศมากกว่า 8.3 เมตรต่อวินาที เม็ดแก้วมีรูปแบบการเคลื่อนที่เป็น เบดเบาบางแบบสม่ำเสมอตลอดทั้งโรเตอร์ (Homogeneous Dilute Flow)

ตอนที่ 2

1. ความดันของอากาศในโรเตอร์มีค่ามากขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มมากขึ้น แต่มีค่าน้อยลงเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่สัดส่วนช่องว่างในโรเตอร์มีค่ามากขึ้น เมื่อความเร็วอากาศและความสูงของโรเตอร์เพิ่มมากขึ้น
2. ลักษณะทางออกของโรเตอร์มีผลต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของแข็งภายในโรเตอร์ รวมถึง ความดันลดที่บริเวณใกล้ทางออก แต่จะมีผลน้อยลงเมื่อความเร็วอากาศที่ใช้มีค่าสูงขึ้น
3. ที่ความเร็วอากาศ 7 และ 8 เมตรต่อวินาที เม็ดแก้วมีรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นแบบ ฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง ในช่วงเบดเบาบาง และ คอร์-แอนนูลัส ตามลำดับ ทำให้โพรไฟล์ความเร็วของเม็ดแก้วมีลักษณะคล้ายกัน คือ ความเร็วเม็ดแก้วมีค่ามากที่สุด

ที่กึ่งกลางไรเซอร์ เท่ากับ 2.89 และ 4.45 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ และความเร็วของเม็ดแก้วจะค่อยๆลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนัง

4. ที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที เม็ดแก้วมีรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นเบดเบาบางแบบสม่ำเสมอตลอดทั้งไรเซอร์ ความเร็วของเม็ดแก้วมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันประมาณ 4.19 เมตรต่อวินาที ที่ทุกตำแหน่งในแนวรัศมี
5. ความเร็วอุทกพลศาสตร์และความเค้นในแนวตั้งฉากของเม็ดแก้วในแนวแกนมีค่ามากกว่าในแนวรัศมี และที่ตำแหน่งกึ่งกลางไรเซอร์มีค่ามากกว่าบริเวณผนัง
6. คุณหมุมิแกร์นูลาร์ของเม็ดแก้วที่ตำแหน่งกึ่งกลางไรเซอร์มีค่ามากกว่าที่บริเวณผนัง และมีค่าเท่ากับ 0.17 และ 0.11 ตามลำดับ
7. เม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลงมีความเร็วค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง
8. ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลง ลดลงเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มมากขึ้น และน้อยที่สุดที่กึ่งกลางไรเซอร์

ตอนที่

3

1. ความเร็วของเม็ดแก้วและเม็ดแก้วในของผสมระหว่างเม็ดแก้วและแกลบมีค่าเพิ่มขึ้นมากขึ้นเมื่อความสูงของไรเซอร์เพิ่มมากขึ้น อาจสรุปได้ว่าเม็ดแก้วอยู่ในช่วงที่มีความเร่งตลอดความสูงของไรเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย
2. การผสมแกลบลงไปเม็ดแก้วร้อยละ 20 โดยปริมาตร มีผลต่อความเร็วของเม็ดแก้วที่บริเวณด้านล่างของไรเซอร์เท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องอัดอากาศที่ใช้ในงานวิจัยมีการใช้งานจากผู้วิจัยหลายท่าน ทำให้ปริมาณลมที่มาจากเครื่องอัดอากาศเพื่อป้อนเข้าสู่ไรเซอร์ไม่คงที่
2. ควรมีการเพิ่มความเข้มของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง เนื่องจากเมื่อมีการประกอบแผ่นดีเข้าไปในระบบ PIV ทำให้ความชัดเจนของภาพที่ได้น้อยลง
3. ควรมีการเพิ่มความสูงของไรเซอร์ที่ใช้ในการทดลอง เพื่อให้สามารถเห็นลักษณะการเคลื่อนที่ของของแข็งในไรเซอร์ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

สมชาย สวดยสะอาด, อุทกพลศาสตร์ของสารป้อนผสมในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, (2547)

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, ฟลูอิดไดเซชัน, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, (2528)

ภาษาอังกฤษ

Adanez J., Diego L.F., and Gayan P., Transport Velocities of Coal and Sand Particles, Powder Technology, 77, (1995), 61-68

Basu P., and Fraser S.A., Circulating Fluidized Bed Boiler, Butterworth-Heinemann, (1991)

Bi H.T., and Fan L.S., Existence of Turbulent Regime in Gas-Solid Fluidization, AIChE Journal, 38, (1992), 297-301

Bi H.T., and Grace J.R., Flow Regime Diagrams for Gas-Solid Fluidization and Upward Transport, Int. J. Multiphase Flow, 21(6), (1995), 1229-1236

Breault R. W., Ludlow C. J., and Yue P. C., Cluster Particle Number and Granular Temperature for Cork Particles at the Wall in the Riser of a CFB, Powder Technology, 149, (2005), 68-77

Chehbouni A., Chaouki J., Guy C., and Klvana D., Effects de Differentes Parameters Sur Les Vitesses De Transition De la Fluidisation En Regime Turbulent, Can. J. Chem. Eng., 73, (1995), 41-50

Gidaspow D., Jung J., and Singh R.K., Hydrodynamics of Fluidization Using Kinetic Theory: An Emerging Paradigm 2002 Flour-Daniel Lecture, Powder Technology, 148, (2004), 123-141

Grace J. R., Avedan A., and Knowlton T. M., Circulating Fluidized Beds, London: Chapman & Hall., (1997)

Ibsen C.H., Solberg T., and Hjertager B.H., A Study of Dilute to Dense Flow in a Circulating Fluidized Bed, presented at MFTP-2000, International Symposium on Multiphase Flow and Transport Phenomena, (Antalya, Turkey), 5-10 November, (2000)

- Kunii D., and Levenspiel O., Fluidization Engineering, New York: John Wiley and Sons Inc., (1969)
- Kunii D., and Levenspiel O., Circulating fluidized-bed reactors, Chemical Engineering Science, 52, (1997), 2471-2482
- Mastellone M.L., and Arena U., The Effect of Particle Size and Density on Solids Distribution Along The Riser of a Circulating Fluidized Bed, Chemical Engineering Science, 54, (1999), 5383-5391
- Monazam E.R., Shadle L.J., Mei J.S., and Spenik J., Identification and Characteristics of Different Flow Regimes in a Circulating Fluidized Bed, Powder Technology, 155, (2005), 17-25
- Mori S., Kato K., Kobayashi E., Liu D., Hasatani M., Matsuda H., Hattori M., Hiramata T., and Takeuchi H., Effect of Apparatus Design on Hydrodynamics of Circulating Fluidized Bed, AIChE Symp. Ser., 289(88), (1992), 17-25
- Motte J., and Molodtsov Y., Predicting Transport Velocities, Powder Technology, 120, (2001), 120-126
- Namkung W., Kim S.W., and Kim S.D., Flow Regimes and Axial Pressure Profiles in a Circulating Fluidized Bed, Chemical Engineering Journal, 72, (1999), 245 – 252
- Pandey P., Turton R., Yue P., and Shadle L., Non Intrusive Particle Motion Studies in The Near Wall Region of a Pilot-scale Circulating Fluidized Bed, Industrial Engineering and Chemistry Research, 43 (15), (2004), 4155-4165
- Parssinen J.H., and Zhu J.X., Particle Velocity and Flow Development in a Long and High-Flux Circulating Fluidized Bed Riser, Chemical Engineering Science, 56, 2001, 5295-5303
- Perales J.F., Coll T., Llop M.F., Puigjaner L., Arnaldos J., and Casal J., On the Transition from Bubbling to Fast Fluidization Regimes, in: P. Basu, M. Horio, M. Hasatani (Eds.), Circulating Fluidized Bed Technology III, Pergamon, 4-1-1 preliminary, (1991)
- Rhodes M.J., Mineo H., and Hiramata T., (1990), Particle Motion at the Wall of 305 mm Diameter Riser of a Cold Model Circulation Fluidized Beds, Circulating Fluidized Bed Technology III (Edited by P. Basu, M. Herio and M. Hasatani), 171-176

- Sabbaghan H., Gharebagh R.S., and Mostoufi N., Modeling the Acceleration Zone in the Riser of Circulating Fluidized Beds, Powder Technology, 142, (2004), 129-135
- Seksan P., Yuvaniyama C., Lohsomboon P., and Malakul P., Overview of Biomass Utilization in Thailand, Cleaner Technology Advancement Program, National Metal and Materials Technology Center., (2002)
- Shadle L.J., Monazam E.R., and Mei J.S., Circulating Fluidized Bed Operating Regimes, 7th Int'l CFB Conference, Niagara Falls, New York., (2003), 255 – 262
- Smolders K., and Baeyens J., Gas Fluidized Beds Operating at High Velocities: A Critical Review of Occurring Regimes, Powder Technology, 119, (2001), 269-291
- Tartan M., and Gidaspow D., Measurement of Granular Temperature and Stresses in Risers, AIChE Journal, 50(8), (2004), 1760-1775
- Wei F., Jin Y., Yu Z. Q., Chen W. and Mori S., (1995), Lateral and Axial Mixing of the Dispersed Particles in CFB, Journal of Chemical Engineering of Japan, 28, 506-510
- Wei F., Lin H., Cheng Y., Wang Z., and Jin Y., Profiles of Particle Velocity and Solids Fraction in a High-Density Riser, Powder Technology, 100, (1998), 183 -189
- Zhang F.Z., and Arastoopour H., Dilute Fluidized Cracking Catalyst Particles-Gas Flow Behavior in the Riser of a Circulating Fluidized Bed, Powder Technology, 84, 1995, 221-229
- Zhang H., and Zhu J.X., Hydrodynamics in Downflow Fluidized Beds (2): Particle Velocity and Solids Flux Profiles, Chemical Engineering Science, 55, (2000), 4367-4377
- Zhang H., Huang W.X., and Zhu J.X., Gas-Solids Flow Behavior: CFB Risers vs. Downer, AIChE Journal, 47(9), (2001), 2000-2011.
- Zhou J., Grace J.R., Jim C.J., and Brereton C.M.H., Particle Velocity Profile in a Circulating Fluidized Bed Riser of Square Cross Section, Chemical Engineering Science, 50, (1995), 237-244



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งเข้าสู่โรเตอร์ (G_s) ที่

- จำนวนรอบในการเปิดวาล์วเท่ากับ 2 รอบ
- อัตราการไหลของอากาศด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที

1.1 ความสูงเริ่มต้นของเม็ดแก้วด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 17 เซนติเมตร

ตาราง ก.1 ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการไหลย้อนกลับของเม็ดแก้วที่มีความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 17 เซนติเมตร

ครั้งที่	$U_g = 7 \text{ m/s}$		$U_g = 8 \text{ m/s}$		$U_g = 9 \text{ m/s}$	
	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)
1	5.27	1.3	4.23	1.2	3.77	1.2
2	5.79	1.4	4.32	1.3	3.73	1.1
3	5.82	1.4	4.4	1.3	3.12	1.1

* Δh_{dc} คือ ความสูงที่เพิ่มขึ้นด้านท่อป้อนกลับ, เซนติเมตร

1.2 ความสูงเริ่มต้นของเม็ดแก้วด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตร

ตาราง ก.2 ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการไหลย้อนกลับของเม็ดแก้วที่มีความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตร

ครั้งที่	$U_g = 7 \text{ m/s}$		$U_g = 8 \text{ m/s}$		$U_g = 9 \text{ m/s}$	
	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)
1	6.34	1.7	5.06	1.6	4.04	1.4
2	7.15	1.7	4.93	1.5	4.42	1.4
3	6.74	1.7	5.12	1.5	4.14	1.4

1.3 ความสูงเริ่มต้นของเม็ดแก้วด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตร และมี aeration ตาราง ก.3 ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการไหลป้อนกลับของเม็ดแก้วที่มีความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตร และมี aeration

ครั้งที่	Ug= 7 m/s		Ug= 8 m/s		Ug=9 m/s	
	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)
1	6.55	2.5	5.01	2.2	3.84	1.8
2	7.13	2.2	5.34	2.2	4.1	1.8
3	7.35	2.5	5.37	1.9	4.23	1.8

1.4 ความสูงเริ่มต้นของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตร และมี aeration

ตาราง ก.4 ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการไหลป้อนกลับของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบที่มีความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตร และมี aeration

ครั้งที่	Ug= 7 m/s		Ug= 8 m/s		Ug= 9 m/s	
	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)	t(s)	Δh_{dc}^* (cm)
1	5.61	1.4	5.23	1.3	4.06	1
2	5.42	1.3	5.17	1.4	4.71	1.1
3	5.24	1.4	5.03	1.3	4.9	1.2

2. ข้อมูลสำหรับการคำนวณความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (U_p) ของเม็ดแก้ว

- ความสูงเริ่มต้นของเม็ดแก้วด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตร
- อัตราการไหลของอากาศด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 150 ลิตรต่ออนาที

ตาราง ก.5 ข้อมูลสำหรับการคำนวณความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (U_r)

U_g (m/s)	วาล์วเปิด 1 รอบ		วาล์วเปิด 1.5 รอบ	
	P_2^* (mmH ₂ O)	P_5^* (mmH ₂ O)	P_2^* (mmH ₂ O)	P_5^* (mmH ₂ O)
5	232.5	224	-	-
6	286.5	279.5	338.5	330.5
7	317	313	338.5	331.5
8	335.5	332	382.5	376.5
9	-	-	399	395.5
10	-	-	470.5	468

* P_2 คือ ความดัน ณ. ตำแหน่งที่ 2 เหนือตัวกระจายอากาศ 5 เซนติเมตร

* P_5 คือ ความดัน ณ. ตำแหน่งที่ 5 เหนือตัวกระจายอากาศ 40 เซนติเมตร

3. ข้อมูลความดันทั้งระบบของเม็คแก้ว

ตาราง ก.6 ข้อมูลความดันทั้งระบบของเม็คแก้ว

ความดัน	ความสูง (cm)	$U_g = 7$ m/s	$U_g = 8$ m/s	$U_g = 9$ m/s
P_1	-10	296.5	314.5	336.5
P_2	5	286.6	287.1	328.3
P_3	10	279.9	279.9	323.0
P_4	20	267.3	272.5	314.8
P_5	40	254.7	271.6	309.5
P_6	60	245.6	267.5	305.5
P_7	100	234.5	262.2	299.0
P_8	190	202.8	246.3	284.3
P_9	220	124.0	145.5	176.8
P_{10}	240	149.0	172.5	226.0
P_{11}	150	155.0	177.5	210.8
P_{12}	90	155.0	177.5	211.3
P_{13}	70	201.5	216.5	263.8
P_{14}	20	271.5	274.5	316.8

4. ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการคำนวณความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมี

- ความสูงเริ่มต้นของเม็ดแก้วด้านท่อน้อนกลับเท่ากับ 17 เซนติเมตร
- อัตราการไหลของอากาศด้านท่อน้อนกลับเท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที
- ตำแหน่งกึ่งกลางโรเตอร์ ($r=0$ เซนติเมตร)

ตาราง ก.7 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการคำนวณความเร็วเม็ดแก้วที่ตำแหน่งกึ่งกลางโรเตอร์
($r=0$ เซนติเมตร)

	$U_g = 7 \text{ m/s}$		$U_g = 8 \text{ m/s}$		$U_g = 9 \text{ m/s}$	
	Length(mm)	Angle	Length(mm)	Angle	Length(mm)	Angle
1	4.104642	167.0054	4.212977	96.70984	4.57322	113.8059
2	4.213426	151.1892	4.495568	149.5742	4.037683	172.1169
3	6.497879	155.3764	3.805991	124.4608	4.542485	171.4309
4	3.270427	175.684	3.210253	167.8285	3.891574	124.6952
5	5.80647	170.2382	6.246551	153.6874	4.916722	134.493

6. ข้อมูลความดันทั้งระบบของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบ

ตาราง ก.8 ข้อมูลความดันทั้งระบบของของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบ

ความดัน	ความสูง (cm)	$U_g = 7 \text{ m/s}$	$U_g = 8 \text{ m/s}$	$U_g = 9 \text{ m/s}$
P_1	-10	528	595	611
P_2	5	520	571.5	581.5
P_3	10	508	565	575
P_4	20	489.5	556.5	574
P_5	40	471	541	557
P_6	60	448.5	528.5	546
P_7	100	436.5	515	541
P_8	190	443.5	512	532
P_9	220	32	35.5	85.5
P_{10}	240	344	410	423
P_{11}	150	362	442	454
P_{12}	90	476.5	503.5	558
P_{13}	70	495.5	559	584
P_{14}	20	271.5	274.5	316.8

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

1. อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง (G_s)

จากตารางที่ ก.1-ก.4 สามารถนำไปคำนวณหาอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งที่ภาวะต่างๆ ได้ดังตารางที่ ข.1

ตาราง ข.1 อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งที่ภาวะต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

Gs (kg/m ² .s)				
U _g (m/s)	เม็ดแก้ว ^a	เม็ดแก้ว ^b	เม็ดแก้ว ^c	ของผสม ^d
7	23.3	33	24.3	20.4
8	28.2	38.6	29.2	20.9
9	30.9	42.7	32	19.5

^a ความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 17 เซนติเมตร

^b ความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตรและมี aeration

^c ความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตร

^d ความสูงเริ่มต้นด้านท่อป้อนกลับเท่ากับ 30 เซนติเมตรและมี aeration

2. สัดส่วนช่องว่าง (ϵ) ของเม็ดแก้ว

นำข้อมูลความดันจากตารางที่ ก.6 มาคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างของเม็ดแก้ว ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์ได้ดังตาราง ข.2

ตาราง ข.2 สัดส่วนช่องว่าง (ϵ) ของเม็ดแก้ว ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเตอร์

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ		
			7 m/s	8 m/s	9 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.9583	0.9625	0.9640
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.9792	0.9729	0.9563
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.9885	0.9875	0.9854
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.9771	0.9874	0.9896
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.9865	0.9910	0.9932
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.9903	0.9921	0.9919

3. ความเร็วเม็ดแก้วที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมี

ตาราง ข.3 ความเร็วของเม็ดแก้วที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมี

position	particle velocity, Vz (m/s)		
	Ug=7 m/s	Ug=8 m/s	Ug=9 m/s
-1.8	1.48	2.51	3.78
-0.6	2.42	3.95	4.37
0	2.89	4.45	4.65
0.6	2.45	4.13	4.39
1.8	1.48	2.10	3.75

4. ค่าเฉลี่ยความเร็วอุทกพลศาสตร์ ความเครียดดอร์มัลและอุณหภูมิแกรนูลาร์ของเม็ดแก้ว

ตาราง ข.4 ค่าเฉลี่ยความเร็วอุทกพลศาสตร์ ความเครียดเค้นในแนวตั้งฉากและอุณหภูมิแกรนูลาร์ของเม็ดแก้ว

สัญลักษณ์	r=0	r=1.8	ตัวแปร
v_z	2.58	1.64	Axial Hydrodynamic Velocity
v_r	0.66	0.48	Radial Hydrodynamic Velocity
$\langle C_z C_z \rangle$	0.187	0.176	Axial Normal Stresses
$\langle C_r C_r \rangle$	0.148	0.085	Radial Normal Stresses
Θ	0.161	0.116	Granular Temperature

4. ความเร็วและร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ลงที่ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมี

ตาราง ข.5 ความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ลง ณ ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมี

position (cm)	Upward Velocity (m/s)			Downward Velocity (m/s)		
	7 m/s	8 m/s	9 m/s	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0	2.83	4.42	4.73	-1.63	-1.67	-1.75
0.6	2.36	4.03	4.40	-1.69	-1.73	-1.78
1.8	1.50	2.37	3.84	-1.70	-1.70	-1.79

ตาราง ข. 6 ร้อยละของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลง ณ. ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมี

position (cm)	Downward particle (%)		
	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0	3.32	2.60	1.83
0.6	18.21	12.06	9.00
1.8	86.94	78.16	70.8791

5. สัดส่วนช่องว่าง (ϵ) ของของผสมระหว่างเม็ดแก้วและแกลบ

นำข้อมูลความดันจากตารางที่ ก.8 มาคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างของของผสมระหว่างเม็ดแก้วและแกลบ ณ ตำแหน่งต่างๆในโรเซอรีได้ดังตาราง ข.6

ตาราง ข.7 สัดส่วนช่องว่าง (ϵ) ของของผสมระหว่างเม็ดแก้วและแกลบ

ณ. ตำแหน่งต่างๆในโรเซอรี

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ		
			7 m/s	8 m/s	9 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.8812	0.9357	0.9640
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.9084	0.9579	0.9703
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.9542	0.9616	0.9654
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.9443	0.9874	0.9901
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.9852	0.9910	0.9938
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.9962	0.9984	0.9951

6. ความเร็วของเม็ดแก้วที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความสูงของโรเซอรี

ตาราง ข.8 ความเร็วของเม็ดแก้วที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความสูงของโรเซอรี

Height (cm)	Axial velocity (m/s)		
	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0.6	2.42	3.34	5.27
1.1	3.01	4.01	5.59
1.6	4.11	5.61	6.63

7. ความเร็วของเม็ดแก้วในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความสูงของไรเซอร์

ตาราง ข.9 ความเร็วของเม็ดแก้วในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแกลบ ณ. ตำแหน่งต่างๆ ตามความสูงของไรเซอร์

Height (cm)	Axial velocity (m/s)		
	7 m/s	8 m/s	9 m/s
0.6	2.09	2.88	3.78
1.1	2.43	3.51	4.50
1.6	3.79	5.45	6.42

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

ข้อมูลพื้นฐานต่างๆที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ ค.1

ตาราง ค.1 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ρ_g	1.16	kg/m ³
μ_g	0.0000184	N.s/m ²
ρ_s (เม็ดแก้ว)	2400	kg/m ³
ρ_s (แกลบ)	500	kg/m ³
d_p (เม็ดแก้ว)	0.000547	m
g	9.8	m/s ²
V_p (แกลบ)	1×10^{-3}	m ³

1. การคำนวณอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง (G_s)

ท่อป้อนกลับมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.1 เมตร

$$\text{จากสูตรการหาพื้นที่หน้าตัด} = \pi D^2/4$$

$$\text{ดังนั้นท่อป้อนกลับมีพื้นที่หน้าตัด} = \pi(0.1)^2/4$$

$$= 7.85 \times 10^{-3} \text{ ตารางเมตร}$$

ท่อโรเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.05 เมตร

$$\text{ดังนั้นท่อโรเตอร์มีพื้นที่หน้าตัด} = \pi(0.05)^2/4$$

$$= 1.96 \times 10^{-3} \text{ ตารางเมตร}$$

จากข้อมูลในตาราง ก.1 การทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที

ปริมาตรของเม็ดแก้วทั้งหมดที่เคลื่อนที่ในเวลา 5.27 วินาที = $1.7 \times 7.85 \times 10^{-3}$

$$= 1.33 \times 10^{-4} \text{ ลบ.ม.}$$

คิดเป็นน้ำหนัก = $2400 \times 1.33 \times 10^{-4} = 0.32$ กิโลกรัม

ดังนั้น $G_s = 0.32 / (1.96 \times 10^{-3} \times 5.27) = 23.3$ กก.ต่อตร.ม.ต่อวินาที

2. การคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเกลบ

เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเกลบคำนวณได้จากสมการ

$$d_p = (6V_p / \pi)^{1/3}$$

โดยที่ V_p คือ ปริมาตรของเม็ดแก้ว, ลบ.ม.

จากตาราง ค.1 สามารถคำนวณได้ $d_p = 1240$ ไมโครเมตร

3. การจำแนกของแข็งตามลักษณะของ Geldart (Geldart's Classification)

การจำแนกของแข็งตามลักษณะของ Geldart สามารถจำแนกได้ตามรูปที่ 2.4 จากรูปตัวแปรที่ต้องการคือ ผลต่างความหนาแน่นของของแข็งและอากาศ และขนาดของของแข็ง

- เม็ดแก้ว

$$\rho_s - \rho_g = 2400 - 0.0000184 = 2.39884 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{จากตาราง ค.1 } d_p = 0.000547 \text{ เมตร}$$

จากกราฟรูปที่ 2.4 เม็ดแก้วสามารถจำแนกได้อยู่ในกลุ่ม B

- เกลบ

$$\rho_s - \rho_g = 500 - 0.0000184 = 0.49884 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{จากข้อ 1 } d_p = 0.00124 \text{ เมตร}$$

จากกราฟรูปที่ 2.4 เกลบสามารถจำแนกได้อยู่ในกลุ่ม D

4. การคำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน (U_{mf})

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U_{mf} = \frac{\mu}{d_p \rho_g} \left[\left\{ (33.7)^2 + 0.0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right\}^{0.5} - 33.7 \right]$$

จากตาราง ค.1 แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการจะได้ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันของเม็ดแก้วเท่ากับ 0.21 เมตรต่อวินาที

จากตาราง ค.1 และการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางจากศูนย์กลางเทียบเท่าจากข้อ 1 แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการจะได้ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันของเกลบเท่ากับ 0.012 เมตรต่อวินาที

5. การคำนวณ Archimedes Number (Ar)

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

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการจะได้

- เม็ดแก้ว $Ar = 13183$

- แกลบ $Ar = 31936$

6. การคำนวณค่าความเร็วสุดท้าย (U_t)

จาก
$$\frac{d_p U_t \rho_g}{\mu_g} = \left(\frac{Ar}{7.5} \right)^{0.666} \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500$$

เมื่อ $Ar = \text{Archimedes Number}$

แทนค่าต่างๆ ในสมการจะได้

- เม็ดแก้ว $U_t = 4.2$ เมตรต่อวินาที

ตรวจค่า Re_p ว่าตรงตามเงื่อนไขหรือไม่

$$\begin{aligned} Re_p &= \rho_g d_p U_t / \mu \\ &= (1.16 * (547 * 10^{-6}) * 4.2) / 0.0000184 \\ &= 145 \end{aligned}$$

ดังนั้น U_t ที่หาได้เป็นค่าที่ถูกต้องเนื่องจากค่า Re_p เป็นไปตามเงื่อนไข

- แกลบ $U_t = 0.34$ เมตรต่อวินาที

ตรวจค่า Re_p ว่าตรงตามเงื่อนไขหรือไม่

$$\begin{aligned} Re_p &= \rho_g d_p U_t / \mu_g \\ &= (1.16 * (1240 * 10^{-6}) * 0.34) / 0.0000184 \\ &= 27 \end{aligned}$$

ดังนั้น U_t ที่หาได้เป็นค่าที่ถูกต้องเนื่องจากค่า Re_p เป็นไปตามเงื่อนไข

7. การคำนวณค่าความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (U_r)

จากตารางที่ 4.1 ความเร็วหลุดลอยส่งผ่านจากสมการของ Bi and Grace คำนวณได้จาก

$$Re_r = 1.53 Ar^{0.5}$$

$$\rho_g d_p U_r / \mu_g = 1.53 Ar^{0.5}$$

แทนค่าต่างๆ ลงไปในสมการจะได้ $U_r = 5.09$ เมตรต่อวินาที

8. การคำนวณสัดส่วนช่องว่าง (ϵ)

$$\text{จาก} \quad \epsilon = 1 - \frac{\Delta P}{\Delta L g \rho_s}$$

จากตาราง ก.6 ที่ความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที

จะได้ ความดันลดระหว่าง P_2 และ P_3 มีค่าเท่ากับ 6.7 มิลลิเมตรน้ำ (65.65 กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที²)

ระยะห่างระหว่าง P_2 และ P_3 มีค่าเท่ากับ 0.05 เมตร

$$\text{แทนค่า} \quad \Delta P = 65.65 \text{ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที}^2$$

$$\rho_s = 2400 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$g = 9.8 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

$$\Delta L = 0.05 \text{ เมตร}$$

$$\text{จะได้} \quad \epsilon = 1 - (65.65 / (2400 * 9.8 * 0.05))$$

$$= 0.9442$$

ดังนั้น สัดส่วนช่องว่างในช่วงความสูง P_2 และ P_3 มีค่าเท่ากับ 0.9442

9. การคำนวณความเร็วของของแข็ง (Particle Velocity)

ความเร็วของของแข็งสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1 ดังนี้

$$C_r = (L/t) \cos \alpha$$

$$C_z = (L/t) \sin \alpha \quad (3.1)$$

โดยที่ C_r คือ ความเร็วของของแข็งในแนวรัศมี (radial velocity), เมตรต่อวินาที

C_z คือ ความเร็วของของแข็งในแนวแกน (axial velocity), เมตรต่อวินาที

L คือ ระยะทางที่ของแข็งเคลื่อนที่ได้, เมตร

t คือ เวลาที่เม็ดแก้วใช้ในการเคลื่อนที่, วินาที หาได้จากส่วนกลับของ

ความเร็วหน้ากลิ้ง

α คือ มุมที่ของแข็งเคลื่อนที่วัดจากแนวนอน

จากตารางภาคผนวก ก.7 ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที ข้อมูลที่ 1 ค่าความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคเท่ากับ 4.104642 มิลลิเมตร มุมที่เส้นทำกับแนวแกนเท่ากับ 167.0054 องศา โดยใช้ความเร็วหน้ากลิ้งเท่ากับ 1/500 วินาที

$$\text{แทนค่า} \quad \alpha = 167.0054 - 90 = 77.0054 \text{ องศา}$$

$$t = 1/500 = 0.002 \text{ วินาที}$$

$$C_r = (4.104642 \cdot 10^{-3} / 0.002) \cos 77.0054$$

$$= 0.46 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$C_z = (4.104642 \cdot 10^{-3} / 0.002) \sin 77.0054$$

$$= 2 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้นค่าความเร็วของเม็ดแก้วในแนวรัศมีและในแนวแกนมีค่าเท่ากับ 0.46 และ 2 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศันสนีย์ กำธนาทรัพย์ เกิดวันที่ 21 พฤษภาคม 2525 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2547



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย