

อุทกพลศาสตร์ของของผสมที่มีขนาดอนุภาคและความหนาแน่นแตกต่างกัน
ในฟลูอิดส์เบดแบบหมุนเวียน



นางสาวอ้ออำไพ ใจบุญ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDRODYNAMICS OF MIXTURE WITH DIFFERENT PARTICLE SIZES AND DENSITIES
IN CIRCULATING FLUIDIZED BED



Miss Or-ampai Jaiboon

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 2006

Copyright of Chulalongkorn University

อ้ออำไพ ใจบุญ : อุทกพลศาสตร์ของของผสมที่มีขนาดอนุภาคและความหนาแน่นแตกต่างกันในฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน. (HYDRODYNAMICS OF MIXTURE WITH DIFFERENT PARTICLE SIZES AND DENSITIES IN CIRCULATING FLUIDIZED BED) อ.ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.สุชญา นิตวิฒนานนท์, 79 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของโรเตอร์เท่ากับ 5 และ 400 เซนติเมตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วในของผสมระหว่างเม็ดแก้วกับเม็ดพลาสติก HDPE ในโรเตอร์ (ผสมเม็ดพลาสติก HDPE ในปริมาณร้อยละ 5 โดยปริมาตร) โดยเม็ดแก้วมีขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับ 512 ไมครอน และ 2200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ และเม็ดพลาสติก HDPE มีรูปทรงเป็นวงรี ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าและความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับ 4477 ไมครอน และ 860 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ความเร็วอากาศที่ใช้ในการฟลูอิดไคซ์ของผสมเท่ากับ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที จากการทดลองพบว่ารูปแบบการไหลของเม็ดแก้วภายในโรเตอร์เปลี่ยนจากการขนส่งแบบเบดหนาแน่น เป็นการขนส่งแบบฟลูอิดไคซ์ที่ความเร็วสูง เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น และพบว่าการผสมเม็ดพลาสติกหรืออนุภาคขนาดใหญ่ในเม็ดแก้วทำให้มีการสะสมของเม็ดแก้วบริเวณผนังของโรเตอร์ลดลง และความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มสูงขึ้น สามารถสรุปได้ว่าการผสมเม็ดพลาสติกช่วยให้เม็ดแก้วเคลื่อนที่ภายในอากาศได้ดีขึ้น

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....อ้ออำไพ.....ใจบุญ.....
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....สุชญา นิตวิฒนานนท์.....
 ปีการศึกษา.....2549.....

4872542523 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CFB / HYDRODYNAMIC / GLASS BEAD/ HDPE / PARTICLE VELOCITY

OR-AMPAI JAIBOON: HYDRODYNAMICS OF MIXTURE WITH DIFFERENT PARTICLE SIZES AND DENSITIES IN CIRCULATING FLUIDIZED BED. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SUCHAYA NITIVATANANON, Dr, 79 pp.

This research was conducted in a cold flow circulating fluidized bed (CFB) having diameter and height of riser of 5 and 400 cm., respectively. The objective of this research was to study the hydrodynamics of glass beads and a mixture of glass beads with 6% HDPE (high-density polyethylene). The glass beads having a mean diameter of 512 micron and particle density of 2200 kg/m^3 . The HDPE was elliptic shape having equivalent diameter of 4477 micron and particle density of 860 kg/m^3 . The superficial gas velocities were used 7, 8 and 9 m/s. The results showed that the flow patterns of glass beads in riser changed from dense phase transport regime into fast fluidization regime when superficial gas velocity increased. The existing of HDPE in the system help decreasing the accumulation of glass beads at riser wall leading to an increase of glass bead velocity. In conclusion the coarse particles in the mixture improved the flow of fine particles in the riser.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical of Technology.....
Field of study... Chemical of Technology.....
Academic year.....2006.....

Student's signature.....OR-AMPAI.....
Advisor's signature.....Suchaya N.

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์ด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

งานวิจัยเรื่อง “อุทกพลศาสตร์ของของผสมที่มีขนาดอนุภาคและความหนาแน่นแตกต่างกันในฟลูอิดไฮดรอลิกแบบหมุนเวียน” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

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

ขอขอบคุณบุคคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน 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.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 วารสารปริทัศน์.....	5
2.1 ฟลูอิดไดเซนชัน.....	5
2.2 ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	10
2.3 การจำแนกชนิดของของแข็ง.....	19
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	24
3.1 เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	24
3.2 เทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV).....	27
3.3 อนุภาคของแข็งที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.4 วิธีการทดลอง.....	31

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	35
4.1 อุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว.....	35
4.2 ผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว.....	47
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	56
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	56
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	57
รายการอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก.....	62
ภาคผนวก ข.....	65
ภาคผนวก ค.....	69
ภาคผนวก ง.....	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญัตราจ

ตาราง	หน้า
2.1 ช่วงของความเร็วอากาศในการเกิดขอบเขตพลูอิไดเซชันต่างๆ.....	10
3.1 แสดงสมบัติต่างๆ ของของแข็งที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.2 สภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	31
4.1 การเปรียบเทียบรายละเอียดการทดลองระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Kim S.H...	54
ก.1 เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ.....	62
ก.2 เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก.....	63
ก.3 อัตราการหมุนเวียนของเม็ดแก้วในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ.....	64
ก.4 อัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก.....	64
ข.1 ตัวอย่างข้อมูลระยะทางและมุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ.....	65
ข.2 ความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ.....	67
ข.3 ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ.....	67
ข.4 ร้อยละของปริมาณของเม็ดแก้วและความเร็วของเม็ดแก้วในทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นและลงในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ.....	68
ข.5 ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก.....	68
ค.1 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ.....	69
ค.2 โปรแกรมการคำนวณ Sauter mean diameter.....	70
ค.3 ข้อมูลขนาดของเม็ดพลาสติก.....	72

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 รูปแบบการไหลในระบบฟลูอิดไดเซชันระหว่างแก๊ส-ของแข็ง.....	6
2.2 ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	11
2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของCluster.....	12
2.4 ขอบเขตของ Fast Fluidization.....	14
2.5 แผนผังแสดงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน และการขนส่งของแข็งภายในโรเตอร์เมื่อลดความเร็วอากาศ.....	15
2.6 การทดลองหา Saturation carrying capacity โดย Bai และ Kato.....	16
2.7 โพรไฟล์การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน.....	18
2.8 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ Fast Bed.....	19
2.9 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart.....	20
3.1 เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลอง.....	26
3.2 การเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วบริเวณทางออกที่ไม่สมมาตร และทางออกที่ปรับปรุง ในงานวิจัยนี้.....	27
3.3 ตำแหน่งโพรบที่ใช้ในการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วในแนวรัศมี.....	27
3.4 ระบบ PIV.....	28
3.5 ตัวอย่างภาพการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่บันทึกได้จากเทคนิค PIV.....	29
3.6 ตัวอย่างของเม็ดแก้วและเม็ดพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.7 ระบบ PIV ที่มีแผ่นสี่ประกอบ.....	33
3.8 ตัวอย่างภาพที่บันทึกได้จากระบบ PIV ที่มีแผ่นสี่ประกอบ.....	33
4.1 วงจรความดันของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที.....	37
4.2 ความดันอากาศตลอดความสูงของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที.....	40
4.3 สัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเตอร์ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที.....	40
4.4 ความเร็วเม็ดแก้วตลอดความสูงของโรเตอร์ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที.....	42

ภาพประกอบ	หน้า
4.5 ความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้วในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ตำแหน่งความสูง 30, 60,180, 300 และ 370 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ ที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที.....	44
4.6 ความเร็วเม็ดแก้วตลอดความสูงโรเตอร์ ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที.....	45
4.7 ความเร็วของเม็ดแก้วที่มีทิศทางเคลื่อนที่ขึ้นและลงขึ้น และสัดส่วนของเม็ดแก้วที่มีทิศทางเคลื่อนที่ขึ้น ที่ตำแหน่งความสูง 180 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที.....	47
4.8 ความดันอากาศตลอดความสูงของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-เม็ดพลาสติก –อากาศ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที.....	50
4.9 สัดส่วนช่องว่างของอากาศตลอดความสูงของโรเตอร์ของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ -เม็ดพลาสติก ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที.....	50
4.10 ความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูงของโรเตอร์ในระบบที่มีและไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก (HDPE) 5% โดยปริมาตร ที่บริเวณกึ่งกลางและผนังของท่อโรเตอร์, ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที	52
4.11 ความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้วในระบบที่มีและไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก 5% โดยปริมาตร ที่ตำแหน่งความสูง 5 ตำแหน่ง จากตัวกระจายอากาศ ที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที	53
ข.1 ตำแหน่งของเส้นการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่นำมาเป็นตัวอย่าง.....	66
ค.1 ข้อมูลขนาดอนุภาคจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle analyzer	70
ง.1 ภาพกระจกที่ใช้ในการเปรียบเทียบและการลากเส้น.....	76
ง.2 การกำหนดชื่อไฟล์ และการบันทึกไฟล์ของหน่วยที่ได้เปรียบเทียบแล้ว.....	76
ง.3 การเปิดแฟ้มภาพพร้อมเลือกทั้งการเลือกฟังก์ชันการเปรียบเทียบ.....	77
ง.4 การเลือกฟังก์ชันการลากเส้น และการลากเส้น.....	77
ง.5 การส่งข้อมูลไปยัง Excel.....	77
ง.6 ข้อมูลที่แสดงที่ Excel.....	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed) ได้มีการนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมมาเป็นระยะเวลามากกว่า 50 ปี (Xu G. และคณะ, 2000) เช่น กระบวนการเผาไหม้ของชีวมวล (Biomass Combustion), กระบวนการผลิตแก๊สจากถ่านหิน (Coal Gasification) และกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic Cracking) เนื่องจากข้อดีของเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน คือ มีการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารที่ดี สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง กระจายความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอ และสามารถใช้ได้กับสารตั้งต้นหลายชนิด (Nakagawa N. และคณะ, 1994) เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเป็นการนำเทคนิคฟลูอิดไดซ์เบดมาประยุกต์ใช้ โดยประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ ไรเซอร์ (Riser) ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาในแต่ละกระบวนการ โดยทำงานภายใต้สภาวะของการเกิดฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed) ไฮโคลน ซึ่งทำหน้าที่แยกแก๊สและของแข็ง และท่อป้อนกลับ (Downcomer) ทำหน้าที่ป้อนกลับของแข็งกลับไปยังไรเซอร์ โดยทำงานภายใต้สภาวะฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling Fluidized Bed)

สำหรับเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดในแต่ละกระบวนการ มีสภาวะการปฏิบัติที่หลากหลาย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด เช่น ในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหิน ซึ่งถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่ำ และมีค่าพลังงานความร้อนต่ำ ซึ่งสภาวะที่ใช้ปฏิบัติต้องใช้ความเร็วอากาศสูงหรืออัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่สูง เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวลและความร้อนระหว่างแก๊สและถ่านหินในอัตราที่สูง หรือในกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน (Gasoline) ซึ่งแก๊สที่อยู่ในเบดเป็นเวลานานอาจถูกแตกไปเป็นมีเทนหรือแก๊สปิโตรเลียมเหลว ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้จึงต้องปฏิบัติการที่สภาวะความเร็วอากาศสูงมาก และเพื่อลดการผสมแบบไหลย้อนกลับของแก๊ส (Back Mixing) ดังนั้นสภาวะในการปฏิบัติจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากสภาวะในการปฏิบัติมีผลต่อการการไหลของของไหล หรือการสัมผัสกันระหว่างของแข็งและอากาศภายในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Issangya A.S. และคณะ, 1999) จึงได้มีการศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง เพื่อออกแบบและปรับปรุงเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

โดยการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของของแข็งในไรเซอร์ของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน มีจุดประสงค์เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในไรเซอร์ เช่น รูปแบบการไหลของ

อากาศ หรือการสัมผัสกันระหว่างของแข็งและแก๊ส ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ เช่น ความเร็วอากาศ ปริมาณและสมบัติของของแข็ง และอัตราการหมุนเวียนที่มีต่อรูปแบบการไหลซึ่งมีความซับซ้อน เนื่องจากแรงที่กระทำระหว่างของแข็งและแก๊สทำให้มีรูปแบบการไหลที่แตกต่างกัน (Mastellone M.L. และคณะ, 1999) ในการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของของแข็งในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้องสามารถมองด้วยตาเปล่า แต่ในกระบวนการจริงนั้น จะเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ที่มีลักษณะปิดทึบ จึงไม่สามารถเห็นถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของอนุภาคต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ แต่สามารถศึกษาได้จากตัวแปรที่วัดค่าได้ เช่น ความดันลดคร่อม, สัดส่วนช่องว่าง, อัตราการหมุนเวียน และความเร็วของอนุภาค

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงรูปแบบการไหลของของแข็งในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้องที่ประกอบขึ้นจากท่ออะคริลิกใส ทำให้สามารถมองเห็นอุทกพลศาสตร์ของสารป้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ด้วยตาเปล่า พร้อมทั้งทำการตรวจวัดตัวแปรที่วัดค่าได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยเฉพาะความเร็วของเม็ดแก้วทั้งในแนวแกน และแนวรัศมีของโรเตอร์ เนื่องจากมีผลต่อการสัมผัสกันระหว่างของแข็งกับอากาศ การถ่ายเทความร้อนและมวล ตลอดจนการกัดกร่อนที่มักเกิดขึ้นในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Zhou J. และคณะ, 1995) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วเม็ดแก้วที่ไม่มีการผสมอนุภาคขนาดใหญ่ กับความเร็วของเม็ดแก้วที่มีการผสมอนุภาคขนาดใหญ่ โดยงานวิจัยของ Kim S.H. (Kim S.H. และคณะ, 1999) ได้ศึกษาถึงผลของอนุภาคขนาดใหญ่ต่อการกวัดไกว (Fluctuation) ของความดันภายในโรเตอร์ ซึ่งพบว่าการมีอยู่ของอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้อนุภาคที่มีขนาดเล็กกรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ (Cluster) ลดลง ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่ศึกษาถึงผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่อความเร็วของอนุภาค ซึ่งข้อมูลที่ได้จะสามารถอธิบายปรากฏการณ์ภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน หรือปรับปรุงลักษณะการไหลของของไหลภายในเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนให้ดีขึ้น ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาออกแบบและปรับปรุงเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของของแข็งในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีโรเตอร์สูง 4 เมตร
2. ศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความเร็วของเม็ดแก้วโดยใช้เทคนิคกระบวนการทางภาพ (Image processing)
3. ศึกษาผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน และอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าตัวแปรต่าง ๆ
3. นำของแข็งชนิดต่างๆ มาหาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด และความหนาแน่นของอนุภาค
4. หาความดันลดคร่อมท่อไรเซอร์ และอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง
5. หาสภาวะของตัวแปรต่างๆ ที่เหมาะสมในการทดลอง
6. ทดลองหาความเร็วของแข็งตามแนวแกน และตามแนวรัศมี
7. วิเคราะห์สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปร
3. ดำเนินการสร้างเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปร
4. นำเม็ดแก้วและเม็ดพลาสติกที่ใช้ในการทดลองมาหาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ขนาด และความหนาแน่นของอนุภาค
5. ทำการใส่ของแข็งทางท่อป้อนกลับ ในปริมาณที่กำหนด
6. ทำการทดลองหาความดันของอากาศตลอดทั้งเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน และอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง เพื่อศึกษาหาสภาวะการทดลองสูงสุดและต่ำสุดที่ทำให้ระบบเกิดการหมุนเวียนอย่างต่อเนื่อง
7. เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง จึงทำการทดลองหาความเร็วของเม็ดแก้ว ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวแกน และแนวรัศมีของไรเซอร์
8. ทำการทดลองหาทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว ณ ตำแหน่งต่างๆตามแนวรัศมี โดยใช้แผ่นสีประกอบเข้ากับชุดเครื่องมือในการวัดความเร็ว
9. ทำซ้ำข้อ 5-7 โดยเปลี่ยนของแข็งที่ป้อนเป็นเม็ดแก้วผสมเม็ดพลาสติกร้อยละ 5 โดยปริมาตร
10. วิเคราะห์สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายถึงอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว และเม็ดแก้วที่ผสมเม็ดพลาสติกภายในเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน ในการออกแบบและปรับปรุงเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน
2. อธิบายถึงผลของอนุภาคขนาดใหญ่ (เม็ดพลาสติก, HDPE) ที่มีต่อลักษณะการไหลของอนุภาคขนาดเล็ก (เม็ดแก้ว, Glass bead) โดยข้อมูลที่ได้สามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ในระบบของผสม และปรับปรุงลักษณะการไหลของแข็งภายในเตาเผาฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนให้ดีขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

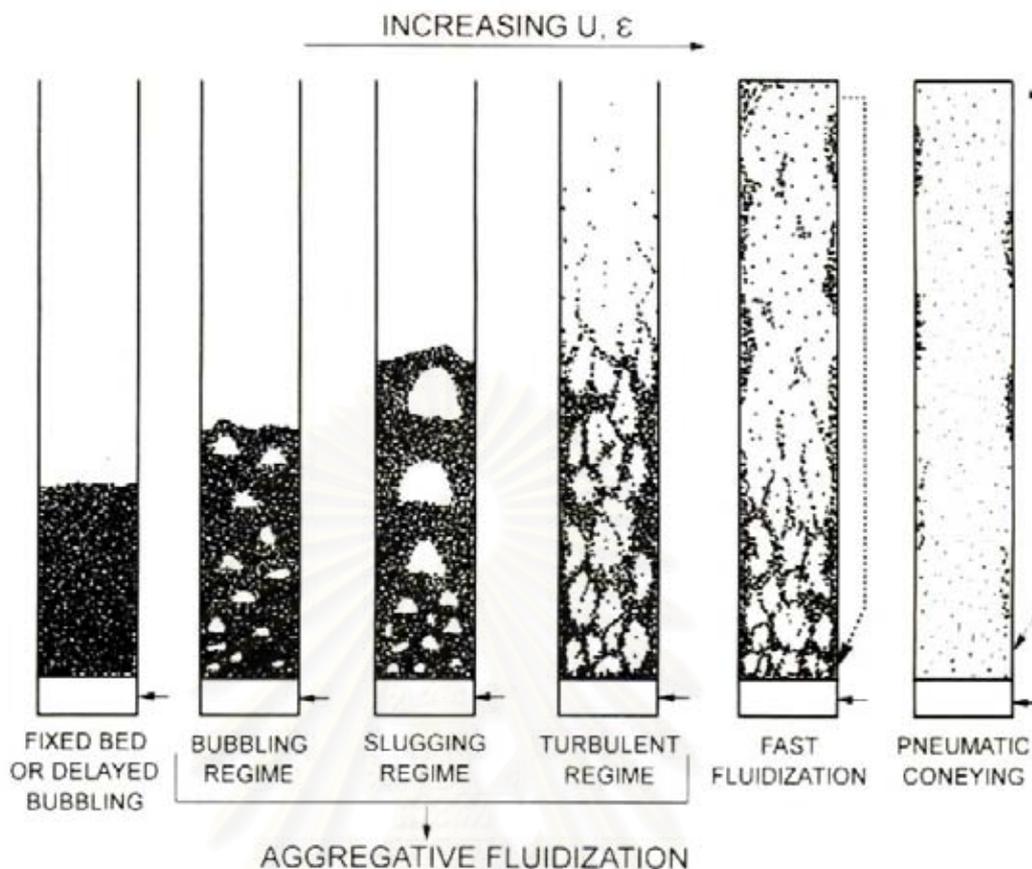
2.1 ฟลูอิดไดเซชัน

เทคนิคฟลูอิดไดเซชัน เป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมจากวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถตอบสนองความต้องการทางด้านอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิตและทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เครื่องมือฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จึงได้ถูกสร้างขึ้น และพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในยุโรปและอเมริกา (เชิดชัย และคณะ, 2533) ยกตัวอย่างเช่น เตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน หรือเครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชัน เป็นต้น

เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลภายในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายอากาศ (Gas Distributor) จนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบด

ฟลูอิดไดเซชัน คือ ปรากฏการณ์ที่ทำให้ของแข็งประพติตัวคล้ายของไหล เนื่องจากการสัมผัสกันของของแข็งกับของไหล ซึ่งได้แก่อากาศหรือของเหลว โดยการสัมผัสกับของไหลแต่ละชนิดจะส่งผลต่อลักษณะของฟลูอิดไดเซชัน คือ ฟลูอิดไดซ์เบดที่เป็นของเหลวการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบดแบบนี้ว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิดไดซ์เบดที่ของไหลเป็นอากาศลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมากเพราะว่าเมื่อความเร็วของอากาศสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์เบดแล้ว อากาศส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็ง แต่อีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองอากาศขึ้น ฟองอากาศก็จะแทรกตัวขึ้นมายังบริเวณผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ฟองอากาศลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองอากาศขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบดจึงมีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างซุกมุ่นวุ่นวาย

ลักษณะของฟลูอิดไดซ์เบดที่เกิดเนื่องจากการสัมผัสกันระหว่างอากาศและของแข็งมีความสลับซับซ้อน โดยเมื่อมีของแข็งวางบนตัวกระจายอากาศ (Air distribution) และมีอากาศเคลื่อนที่ผ่าน และค่อยๆ เพิ่มความเร็วอากาศทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งสามารถจำแนกขอบเขตของฟลูอิดไดเซชันได้ดังนี้



รูปที่ 2.1 รูปแบบการไหลในระบบฟลูอิดไอเซชันระหว่างอากาศ-ของแข็ง (Grace J.R. 1997)

เมื่ออากาศไหลผ่านของแข็งขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายอากาศจะอยู่นิ่งไม่เคลื่อนไหว อากาศจะไหลผ่านไปตามช่องว่างของของแข็งที่มีอยู่ในเบด หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังแต่ของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้เรียกว่าเบดนิ่ง (Fixed Bed) เมื่ออากาศเคลื่อนที่ผ่านของแข็งที่วางนิ่ง จะเกิดแรงเนื่องจากการไหลของของไหลที่กระทำต่อของแข็งในทิศเดียวกับทิศทางการไหล เรียกแรงนี้ว่าแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (Pressure Drop) ตกคร่อมเบดไว้ ความดันลดตกคร่อมเบดตลอดความสูงของเบดนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเบดนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่ง ของแข็งเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ซึ่งความเร็วจุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน (Minimum Fluidization Velocity; U_{mf}) และเรียกเบด ณ จุดนี้ว่า Minimum Fluidized Bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่ของแข็งประพุดิตัวคล้ายกับของไหล โดยเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากทางด้านล่างของเบด เรียกเบดที่สภาวะนี้ว่าเบดแบบฟองอากาศ (Bubbling bed) และเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วเริ่มต้นของการเกิดฟอง (Minimum bubbling velocity, U_{mb}) ซึ่ง

ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟองขึ้นอยู่กัสมบัติของของแข็งเป็นอย่างมาก โดยของแข็งที่จัดอยู่ใน Geldart กลุ่ม A จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน แต่ของแข็งที่จัดอยู่ใน Geldart กลุ่ม B และ D (อธิบายข้อมูลเกี่ยวกับการจำแนกของแข็งในหัวข้อที่ 2.3) จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศเท่ากับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน ดังนั้นรูปแบบการเกิดฟลูอิดเซชันแบบสม่ำเสมอ หรือแบบไม่มีฟองอากาศ (Bubble-free Fluidization) จึงเกิดเฉพาะในกรณีที่อนุภาคของแข็งที่อยู่ใน Geldart กลุ่ม A เท่านั้น

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$- \text{Re}_p < 20 \quad U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2 \cdot (\rho_s - \rho_g)}{150 \mu} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.1)$$

$$- \text{Re}_p > 1,000 \quad U_{mf} = \frac{\phi d_p \cdot (\rho_s - \rho_g)}{1.75 \rho_g} g \varepsilon_{mf}^3 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad (2.2)$$

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

เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศในเบดแบบฟองอากาศ ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะเกิดการรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อฟองอากาศลอยขึ้นมาของแข็งจะถูกฟองอากาศ ผลักขึ้นไปและอนุภาคของแข็งจะตกกลับลงมาอีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า สลัดกิ้ง (Slugging) เรียกความเร็วอากาศนี้ว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสลัดกิ้ง (U_{ms}) นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของฟองอากาศจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของอากาศ และความสูงของเบด ถ้าเบดมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองอากาศที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด ซึ่งจะทำให้เกิดความแปรปรวนของความดันภายในเบดอย่างมาก เมื่อความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองอากาศเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของของแข็งกับอากาศ ซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองอากาศที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว จนอาจจะดูเหมือนไม่มีฟองอากาศ เรียกว่า เบดแบบปั่นป่วน (Turbulent Bed) โดย

การเคลื่อนไหวยภายในเบตเป็นแบบปั่นป่วนลักษณะภายในเบตจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ Dense Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีของแข็งอยู่หนาแน่น และ Dilute Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีของแข็งอยู่เบาบาง โดยช่วงในการเปลี่ยนจากเบตแบบฟองอากาศเป็นเบตแบบปั่นป่วนไม่ได้เกิดขึ้นทันทีทันใดที่ความเร็วอากาศค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงความเร็วอากาศในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ จากผลการวิจัยของนักวิจัยหลายๆ ท่านพบว่า การเปลี่ยนจากขอบเขตเบตแบบฟองอากาศไปเป็นเบตแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วอากาศจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบตซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบตแบบฟองอากาศนั้น ที่บริเวณผิวหน้าเบตจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบตแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

Terminal Velocity, U_t คือ ความเร็วตกอิสระของของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอคดลงไป โดยค่า Terminal Velocity สามารถหาได้จากสมการของ Haider และ Levenspiel (Kunii D และคณะ, 1969) โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามรูปร่างของของแข็ง

- กรณีของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม (Kunii D. และคณะ, 1991)

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } \text{Rep} < 0.4 \quad 2.3$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < \text{Rep} < 500 \quad 2.4$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < \text{Rep} < 20,000 \quad 2.5$$

- กรณีของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad 2.6$$

โดยที่

$$U_t^* = U_t \left[\frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g} \right]^{1/3} \quad 2.7$$

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad 2.8$$

เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศในเบดแบบปั่นป่วนจนกระทั่งไม่สามารถระบุผิวด้านบนของเบดได้ เรียกเบดสภาวะนี้ว่า เบดที่ความเร็วสูง (Fast Bed) หรือฟลูอิไดซ์เซชันที่ความเร็วสูง (Fast Fluidization) โดยความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เบดเปลี่ยนจากเบดแบบปั่นป่วนเป็นฟลูอิไดซ์เซชันที่ความเร็วสูง เรียกความเร็วนี้ว่า Transport Velocity หรือ U_T ในขอบเขตฟลูอิไดซ์เซชันที่ความเร็วสูง มีการเคลื่อนที่ออกของอนุภาคของแข็งทางด้านบนของเบด เพื่อไม่ให้ปริมาณของแข็งในเบดหมดไป จำเป็นต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างของเบด ของแข็งจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผังของเบด โดยที่อากาศและของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านบนจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของแข็งในเบดเจือจางมากขึ้น ในภาวะที่เบดเป็นฟลูอิไดซ์เซชันที่ความเร็วสูง ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของเบด ระบบแบบนี้จะเรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed, CFB)

เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจนมากกว่า U_T พบว่าความหนาแน่นของแข็งภายในเบดเบาบางมากเนื่องจากความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นมากจนเกิดเป็นการขนส่งของแข็งด้วยอากาศ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่มีความเร่ง และของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผังของเบด เรียกเบดที่สภาวะนี้ว่า การขนส่งแบบเบดเจือจาง (Dilute phase transport regime) หรือ การขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatic conveying) ความเร็วอากาศที่ทำให้เบดในท่อเปลี่ยนจากเบดแบบเจือจางเป็นเบดแบบหนาแน่นเรียกว่า ความเร็วในการเกิดช็อคกิ้ง (Choking Velocity) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วอากาศในระบบที่เป็นเบดแบบเจือจางและมีปริมาณของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบดเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเบดเจือจางเป็นเบดหนาแน่นซึ่งความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือ ความเร็วในการเกิดช็อคกิ้ง โดยความเร็วช็อคกิ้งแบ่งได้ 3 ชนิด ได้แก่ A, B และ C โดยความเร็วอากาศที่ทำให้เบดเปลี่ยนจากขอบเขตการขนส่งแบบเจือจางเป็นเบดแบบฟลูอิไดซ์เซชันที่ความเร็วสูง เรียกความเร็วอากาศนี้ว่า ความเร็วช็อคกิ้ง ชนิด A (Type A Choking Velocity, V_{CA}) (Bi T.H. 1995) ซึ่งอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.3

ดังนั้นสามารถสรุปช่วงของความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดขอบเขตฟลูอิไดซ์เซชันต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ช่วงของความเร็วอากาศในการเกิดขอบเขตฟลูอิดิเดชันต่างๆ

ช่วงความเร็วอากาศ	ขอบเขต
$0 < U < U_{mf}$	เบตนิ่ง (Fix bed)
$U_{mf} < U < U_{mb}$	เบตแบบไม่มีฟองอากาศ (Bubble-free fluidization)
$U_{mb} < U < U_{ms}$	เบตแบบฟองอากาศ (Bubble fluidized bed)
$U_{ms} < U < U_t$	เบตแบบสลักกิ่ง (Slugging bed)
$U_t < U < U_{tr}$	เบตแบบปั่นป่วน (Turbulent bed)
$U_{tr} < U < V_{CA}$	เบตแบบฟลูอิดิเดชันที่ความเร็วสูง (Fast fluidization)
$U > V_{CA}$	การขนส่งแบบเบตเบาบาง (Dilute phase transport) หรือการขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatic conveying)

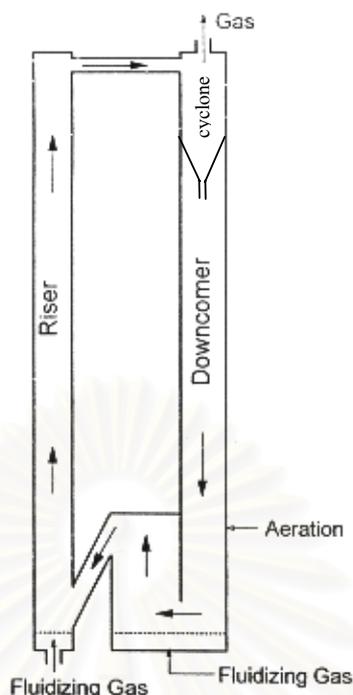
U คือ ความเร็วอากาศตามผิว (Superficial gas velocity, เมตรต่อวินาที)

V คือ ความเร็วอากาศภายในไรเซอร์ (Gas velocity in riser, เมตรต่อวินาที)

2.2 ฟลูอิดิเดชันเบตแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

กระบวนการฟลูอิดิเดชันเบตแบบหมุนเวียนเป็นกระบวนการหนึ่งซึ่งเป็นการสัมผัสกันระหว่างอากาศและของแข็ง ซึ่งถูกค้นพบครั้งแรกโดย Winkler และถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1930 (Xu G. และคณะ, 2000) โดยปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรม อย่างเช่น กระบวนการเผาไหม้ของถ่านหิน (Coal Combustion), กระบวนการผลิตแก๊สจากชีวมวล (Biomass Gasification), กระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic Cracking, FCC) และอื่นๆ (Monazam E.R., และคณะ 2005) เนื่องจากเทคนิคฟลูอิดิเดชันเบตแบบหมุนเวียนมีข้อดีดังนี้ มีอัตราการถ่ายโอนของมวลและความร้อนระหว่างแก๊สและของแข็งสูง มีการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่อง และสามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลายชนิด (Wang X. และคณะ, 2005)

ระบบฟลูอิดิเดชันเบตแบบหมุนเวียน เป็นระบบซึ่งอาศัยเทคนิคทางฟลูอิดิเดชันมาประยุกต์ใช้งาน โดยระบบจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบฟลูอิดไต์แบบหมุนเวียน (Grace, J. R. 1997)

- 1) ไรเซอร์ (Riser) เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาในแต่ละกระบวนการ เช่นเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหิน (Coal combustion) หรือเป็นส่วนที่เกิดกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันในกระบวนการแตกตัวของไอน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของ (Fluid Catalytic Cracking) หรือเป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชันในกระบวนการผลิตแก๊สจากถ่านหินหรือชีวมวล (Coal or Biomass gasification) และอื่นๆ โดยไรเซอร์ทำงานภายใต้สภาวะฟลูอิดไต์ที่ความเร็วสูง มีลักษณะเป็นท่อสูงประมาณ 5-20 เมตร ในการสร้างส่วนของไรเซอร์สำหรับการเผาไหม้ โดยมักจะพบการกัดกร่อนจากอนุภาคที่มากกระทบผนังและความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา จึงมักใช้โลหะทนความร้อน อาทิ เหล็ก หุ้มภายในด้วยอิฐทนไฟเพื่อป้องกันการกัดกร่อนและความร้อน หรือ สร้างจากโลหะผสมจำพวก สแตนเลสสตีล (Stainless steel) แล้วหุ้มภายนอกด้วยฉนวน
- 2) Gas-solid Separator ทำหน้าที่แยกแก๊สและของแข็งออกจากกัน ซึ่งในระบบฟลูอิดไต์แบบหมุนเวียนนิยมใช้ไซโคลนในการแยกแก๊สและของแข็งออกจากกัน โดยอาศัยหลักการเหวี่ยง ซึ่งจะใช้แรงเหวี่ยงในแนวรัศมีในการเหวี่ยงอนุภาคของของแข็งให้กระทบกับผนังของไซโคลนแล้วจากนั้นอนุภาคจะเคลื่อนที่ไปสู่ส่วนล่างของไซโคลน เพื่อผ่านท่อป้อนกลับต่อไป ส่วนแก๊สและอนุภาคขนาดเล็กๆ จะถูกแยกออกสู่ด้านบนของไซโคลน

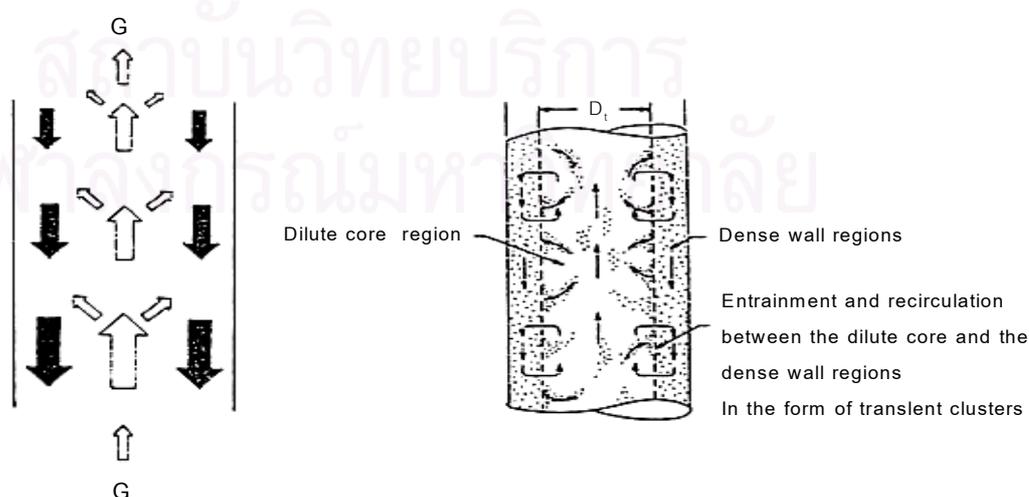
- 3) ท่อป้อนกลับ (Downcomer) ทำหน้าที่ป้อนกลับของแข็งที่ถูกดักจับจากไซโคลนไปยังด้านล่างของไรเซอร์ โดยในระบบฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนจะออกแบบท่อป้อนกลับให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับหรือใหญ่กว่าท่อไรเซอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของของแข็งได้อย่างต่อเนื่อง (เชิดชัย และคณะ, 2533)

ฟลูอิด์เซชันที่ความเร็วสูง เป็นลักษณะหนึ่งของการสัมผัสระหว่างอากาศกับของแข็ง ซึ่งอากาศจะเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของอนุภาคของแข็งที่อยู่เหนือตัวกระจายอากาศ โดยอากาศจะมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) ของอนุภาค ทำให้อนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน

- 1) Cluster phase อนุภาคของแข็งเกาะอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่มๆ เคลื่อนที่ขึ้นลง มีการสลายตัวและรวมตัวใหม่ภายในไรเซอร์
- 2) Disperse phase อนุภาคของแข็งมีเบาบางกระจายกันออกไป (อยู่ห่างกัน) และเคลื่อนที่ขึ้นไปยังท่อป้อนกลับ

อนุภาคของแข็งที่เกาะตัวกันต่อเนื่องและรวมตัวกันเป็นกลุ่มภายใน cluster phase จะเรียกว่า cluster หรือ strand หรือ streamer ซึ่งกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ และเคลื่อนที่ขึ้น ๆ ลง ๆ อยู่ใน disperse phase ซึ่งประกอบด้วย แก๊สซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นและเม็ดของแข็งเบาบาง (ปริมาณน้อยกว่าใน cluster phase) เคลื่อนที่ไปพร้อมกับแก๊ส

เม็ดของแข็งภายในเบดส่วนใหญ่จะอยู่ใน cluster phase และมีการเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแกนกลาง (ขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้น) จนเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะตกกลับลงมาตามผนังของท่อไรเซอร์ เมื่อเคลื่อนที่ตกกลับมาถึงจุด ๆ หนึ่ง cluster ก็แตกสลายตัวออกจากกัน และเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นไปอีกครั้ง โดยการรวมตัวกันเป็น cluster และการสลายตัวออกจากกันจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Cluster (Basu P. และคณะ, 1991)

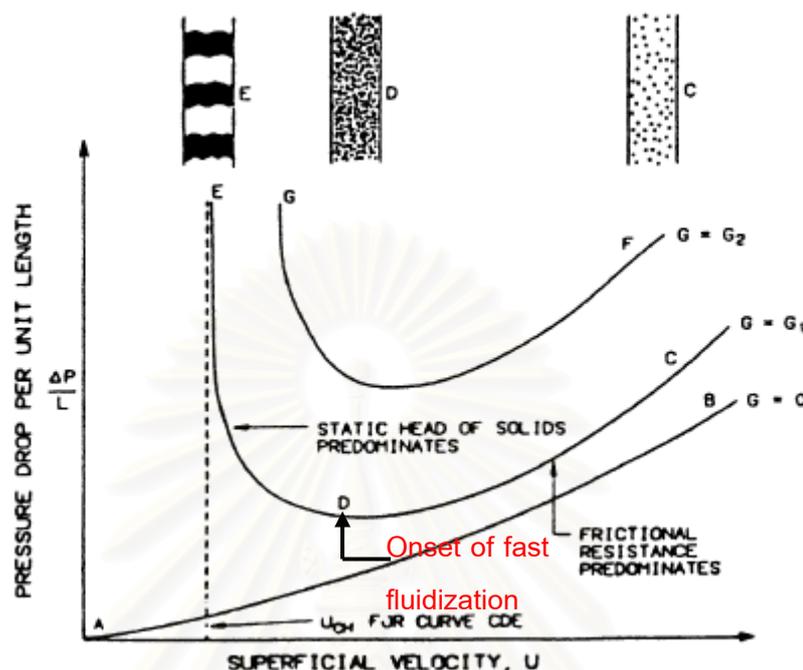
เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันของอากาศและของแข็ง และความหนาแน่นของของแข็งตลอดความยาวของท่อไรเซอร์ จะเห็นรูปแบบการกระจายตัวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- 1) บริเวณที่ของแข็งเกิดการรวมตัวเป็น Cluster และสลายตัวอยู่ตลอดเวลาจะเกิดที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ การกระจายตัวหรือความเข้มข้นของของแข็งมีค่าสูง เรียกว่า Dense Bed
- 2) บริเวณที่ของแข็งมีการกระจายตัวหรือมีความเข้มข้นน้อย ซึ่งเกิดบริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์เรียกว่า Dilute Bed

2.2.1 ขอบเขตในระบบฟลูอิดิเซชันแบบหมุนเวียน

ระบบฟลูอิดิเซชันแบบหมุนเวียนส่วนใหญ่จะทำงานอยู่ในขอบเขตของฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง ซึ่งได้มีการศึกษาเพื่อหาคำนิยามของขอบเขตของฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง โดย Yerushalmi และ Cankurt ได้นิยามขอบเขตของฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง คือ ขอบเขตที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วอากาศมากกว่า Terminal Velocity ที่ต่ำสุด ซึ่งจะไม่เกิดสภาวะช็อคกิ้งเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเปลี่ยนแปลง ซึ่งคำนิยามนี้มีความคล้ายคลึงกับคำนิยามของ Rhodes และ Geldart ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาขอบเขตการเกิดฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันลดคร่อมเบดต่อหนึ่งหน่วยความยาวและความเร็วอากาศและสามารถสรุปผลขอบเขตในการเกิด fast bed แสดงดังรูปที่ 2.4 พบว่าสำหรับการไหลของของผสมอากาศกับของแข็งที่มีความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density) หรือ Suspension Density มีค่าต่ำในแนวตั้งโดยอัตราการป้อนของแข็งเท่ากับ G_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) การกระจายตัวของเม็ดของแข็งลดลงมีความหนาแน่นมากขึ้นทำให้ความดันลดรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วอากาศลดลงจนถึงค่าหนึ่ง (ที่จุด E) อากาศจะไม่สามารถพัดพาของแข็งออกไปจากคอลัมน์ได้อีก ของแข็งเริ่มที่จะสะสมตัวอยู่ในคอลัมน์ ทำให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมากดังในรูปที่ 2.4 ดังนั้นที่จุด E จึงเป็นจุดที่เปลี่ยนจากภาวะ Fast Bed ไปเป็น Captive Fluidized Bed (Turbulent Bed) ยกเว้นกรณีนี้ที่คอลัมน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเบดจะกลายเป็น สลัคกิ้ง (Slugging) ภาวะที่จุด E จะเรียกว่า

Chocking Condition (เป็นจุดที่อากาศอิมิตัวด้วยของแข็ง) และความเร็วที่จุด E จะเรียกว่า ความเร็วช็อคกิง (Chocking Velocity)



รูปที่ 2.4 ขอบเขตของ Fast Fluidization (Basu P., และ Fraser S.A., 1991)

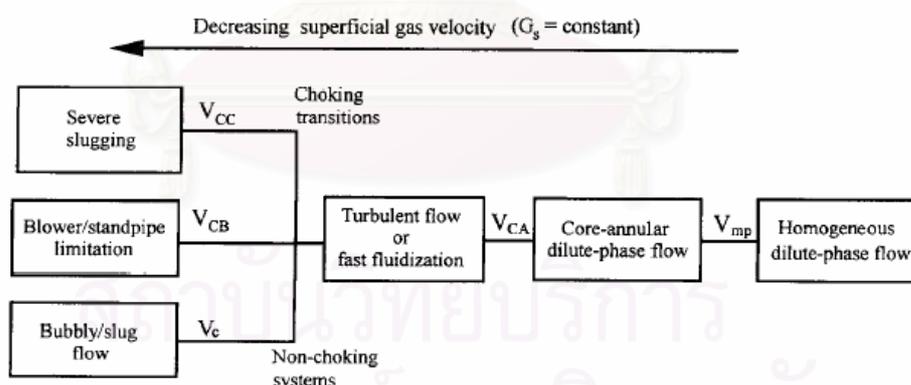
การเปลี่ยนแปลงขอบเขตไปเป็นขอบเขตฟลูอิดไอเซชันที่ความเร็วสูงมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วอากาศและอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง โดยการเปลี่ยนแปลงขอบเขตเนื่องจากการลดความเร็วอากาศ ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งคงที่ แสดงดังรูปที่ 2.5 พบว่าการเปลี่ยนแปลงขอบเขตในระบบฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียนสัมพันธ์กับความเร็วในการเกิดช็อคกิง (Chocking velocity) ซึ่งความเร็วช็อคกิงแบ่งได้ 3 ชนิด ได้แก่ A B และ C โดยสภาวะช็อคกิง (Chocking Condition) คือ สภาวะที่อากาศอิมิตัวด้วยของแข็ง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากเบดแบบเฉื่อยจางเป็นเบดแบบหนาแน่นโดยความเร็วอากาศที่สภาวะนี้เรียกว่าความเร็วช็อคกิง จากแผนผังพบว่าที่ความเร็วอากาศสูงมาก โดยความเร็วอากาศสูงกว่า V_{mp} การขนส่งภายในโรเตอร์เป็นการไหลแบบเบดเบาบางที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous dilute-phase flow) ซึ่งที่ความเร็วนี้ความดันของอากาศภายในคอลัมน์จะเท่ากันตลอดทั้งคอลัมน์ โดยเมื่อความเร็วอากาศลดลงพบว่าการไหลภายในคอลัมน์จะเปลี่ยนเป็นการไหลแบบเบดเบาบางที่เป็นคอร์-แอนนูลาร์ (Core-Annular dilute-phase flow) เมื่อความเร็วอากาศลดลงจนกระทั่งมีการแขวนลอยของแข็งภายในอากาศอย่างหนาแน่น แต่ยังมีหลุดออกของของแข็งออกจากคอลัมน์ ที่สภาวะนี้ต้องการความเร็วอากาศ และอัตราการป้อนการไหลป้อนกลับของแข็งที่สูง ซึ่งเรียกความเร็ว

อากาศที่เปลี่ยนจากการขนส่งแบบเบตเบาบางไปเป็นการขนส่งแบบเบตหนาแน่นนี้ว่าความเร็วช็อกคิงชนิด A (Type A choking velocity, V_{CA}) ซึ่งที่ความเร็วช็อกคิงชนิด A อาจเกิดการขนส่งแบบเบตหนาแน่นชนิดเบตแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) หรืออาจเป็นเบตแบบฟลูอิดิเดชันที่ความเร็วสูง (Fast Fluidization) และเมื่อความเร็วอากาศลดลงจนกระทั่งอากาศไม่สามารถนำพาของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์ พบว่าของแข็งเริ่มสะสมอยู่ทางด้านล่างของคอลัมน์ ซึ่งทำให้การขนส่งแบบเบตหนาแน่นสลายไป เรียกความเร็วอากาศนี้ว่าความเร็วช็อกคิงชนิด B (Type B choking velocity, V_{CB}) และในอีกกรณีโดยที่ความเร็วอากาศที่ลดลงยังสูงพอที่จะนำพาของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์ และยังมีอัตราการการป้อนของแข็งเข้าสู่คอลัมน์ แต่ไม่สามารถทำให้เกิดการขนส่งแบบเบตหนาแน่นได้เนื่องจากเกิดสลักกึ่งภายในคอลัมน์ เรียกความเร็วอากาศนี้ว่าความเร็วช็อกคิงชนิด C (Type C choking velocity, V_{CC}) จากแผนผังพบว่า การที่จะทำให้เกิดฟลูอิดิเดชันที่ความเร็วสูงต้องให้ความเร็วอากาศต่ำกว่า V_{CA} โดย Bi และ Fan ได้ประมาณค่า V_{CA} ไว้ดังนี้

$$\left(\frac{V_{CA}}{\sqrt{gd_p}} \right) = 21.6 Ar^{0.105} \left(\frac{G}{\rho_g V_{CA}} \right)^{0.542} \quad (2.17)$$

เมื่อ Ar คือ เลขอาร์คิมิดีส (Archimedes number = $\rho_g (\rho_p - \rho_g) g d_p^3 / \mu^2$) [-]

G คือ อัตราการหมุนเวียนของของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที)



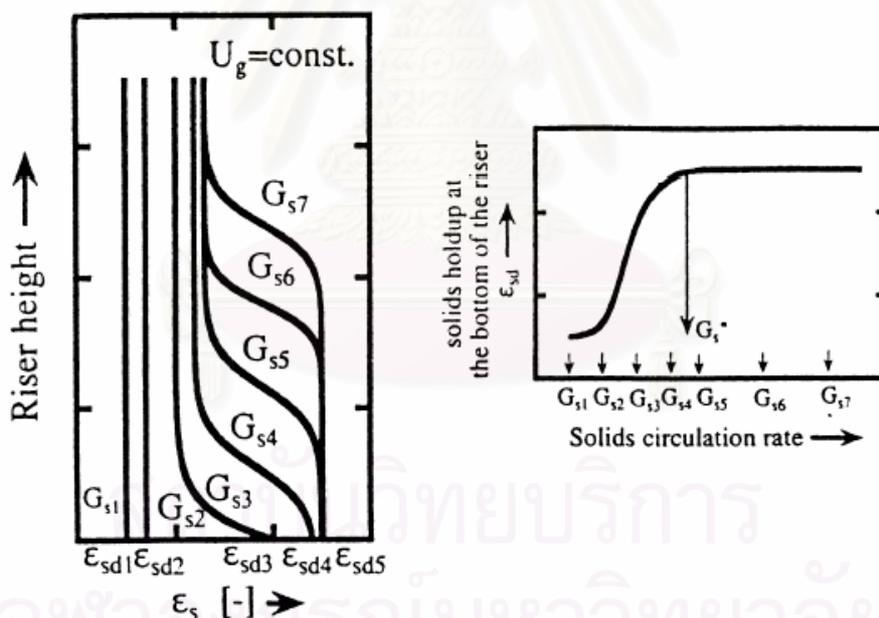
รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงภายในเครื่องฟลูอิดิเดชันเบตแบบหมุนเวียนและการขนส่งของแข็งภายในไรเซอร์เมื่อลดความเร็วอากาศ (Bi H.T. และคณะ, 1995)

ในระบบฟลูอิดิเดชันเบตแบบหมุนเวียนพบว่าอัตราการหมุนเวียนของของแข็งเป็นตัวแปรสำคัญอีกตัวแปรหนึ่ง เนื่องจากอัตราการหมุนเวียนของแข็งในระบบฟลูอิดิเดชันเบตแบบหมุนเวียนต้องมากกว่า Saturation carrying capacity หรือ G_s^* ถึงจะรักษาสภาวะเบตแบบความเร็วสูงให้คงตัวได้ (Smolder K. และคณะ, 2001) โดย Bai และ Kato ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า G_s^* แสดง

ดังรูปที่ 2.6 พบว่า G_s^* คือ อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่น้อยที่สุดที่ทำให้ปริมาณของแข็งที่อยู่ทางด้านล่างไรเซอร์มีค่ามากที่สุด โดยที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่มากกว่า G_s^* พบว่าสัดส่วนของแข็งที่สะสมอยู่ทางด้านล่างไรเซอร์จะคงที่เมื่ออัตราการหมุนเวียนหรือปริมาณของของแข็งเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไป และจะสังเกตเห็นลักษณะของการกระจายตัวของแข็งตลอดทั้งไรเซอร์มีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S-Shape) แสดงดังเส้นกราฟ G_{s3} - G_{s7} โดยสามารถแบ่งเขตเป็น 2 ส่วน ได้แก่ เขตหนาแน่นทางด้านล่างคอลัมน์ และเขตเบาบางทางด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของขอบเขตฟลูอิดไอเซชันที่ความเร็วสูง (Smolder K. และคณะ, 2001) แต่ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่น้อยกว่า G_s^* พบว่าสัดส่วนของแข็งเท่ากันตลอดทั้งไรเซอร์ดังเส้นกราฟ G_{s1} - G_{s2} โดยสามารถคำนวณค่า G_s^* ได้ดังสมการที่ 2.18

$$\frac{G_s^* d_p}{\mu} = 0.125 Fr^{1.85} Ar^{0.63} \left(\frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{-0.44} \quad (2.18)$$

โดย Fr คือ Froude number ($=U/(gD)^{0.5}$)[-]



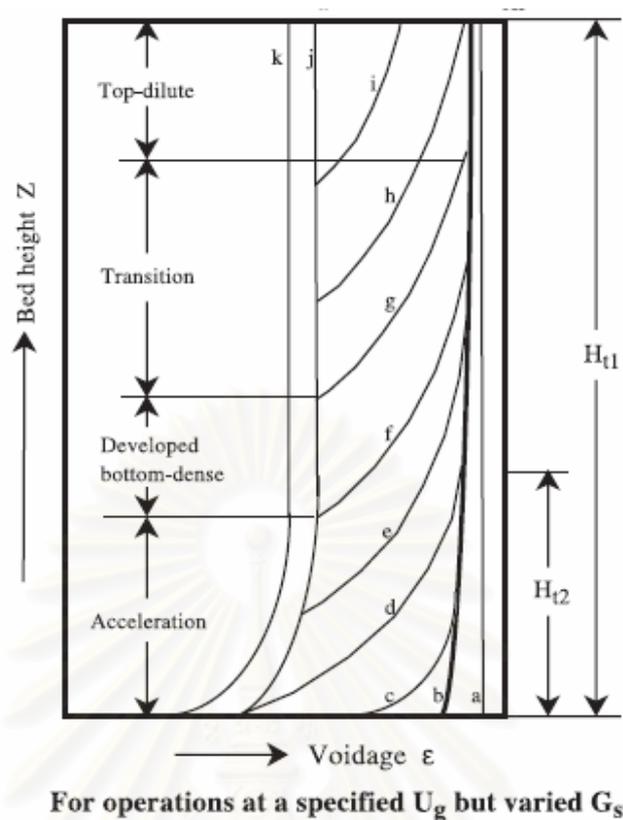
รูปที่ 2.6 การทดลองหา Saturation carrying capacity โดย Bai และ Kato (Smolder K. และคณะ, 2001)

2.2.3 โครงสร้างของเขตที่ความเร็วสูง

ในระบบฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียนนั้น การกระจายตัวของเม็ดของแข็งจะไม่สม่ำเสมอทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี

1) โพรไฟล์ของสัดส่วนช่องว่างในแนวแกน (Axial voidage profile)

การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ แสดงในรูปที่ 2.7 โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการหมุนเวียนของแข็งที่ความเร็วอากาศคงที่ค่าหนึ่ง รูปแบบสัดส่วนช่องว่างจะเปลี่ยนจากขอบเขตการขนส่งแบบเบดเจือจาง (Dilute phase transport regime) ไปเป็นขอบเขตฟลูอิไดซ์เบดที่สภาวะความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed) และรูปแบบการขนส่งแบบเบดหนาแน่น (Dense phase transport regime) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อัตราการหมุนเวียนของแข็งต่ำที่สุดพบว่าสัดส่วนช่องว่างของอากาศภายในคอลัมน์มากที่สุด โดยมีโพรไฟล์ของสัดส่วนช่องว่างคงที่ตลอดทั้งแนวแกน แสดงดังเส้นกราฟที่ a-b ซึ่งเป็นรูปแบบการขนส่งแบบเบดเจือจาง โดยเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเพิ่มขึ้นพบว่าโพรไฟล์สัดส่วนช่องว่างตลอดแนวแกนเปลี่ยนเป็นรูปตัวเอส (S-Shape) ซึ่งเป็นรูปแบบพิเศษในระบบฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง แสดงดังเส้นกราฟ c-g โดยสามารถแบ่งเบดออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เบดหนาแน่น (Dense Bed) บริเวณด้านล่าง และเบดเบาบาง (Dilute Bed) บริเวณด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งจุดเปลี่ยนจากเบดแบบหนาแน่นไปเป็นเบดแบบเบาบางอยู่สูงขึ้นไปเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือบริเวณที่เป็นเบดหนาแน่นจะเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเพิ่มขึ้นค่าสัดส่วนช่องว่างจะลดลงเนื่องจากมีปริมาณของแข็งสะสมเพิ่มมากขึ้น และลักษณะของกราฟเปลี่ยนจากรูปตัวเอสที่เบดมีการแบ่งชั้นเป็นเบดหนาแน่นและเบดเบาบางอย่างชัดเจน จนโพรไฟล์สัดส่วนช่องว่างเกือบเป็นเส้นตรง นั่นคือสัดส่วนช่องว่างเท่ากันตลอดทั้งคอลัมน์ แสดงดังเส้นกราฟ j-k แสดงถึงรูปแบบการขนส่งแบบเบดหนาแน่น



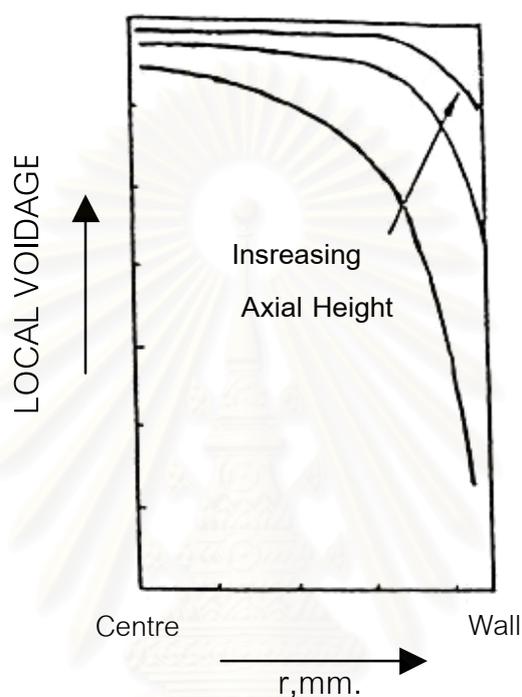
รูปที่ 2.7 โพรไฟล์การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน (Xu G. และคณะ, 2003)

2) โพรไฟล์ของสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมี (Radial voidage profiles)

สำหรับการกระจายตัวในแนวรัศมี (Radial Distribution) Bader และคณะ (Bader และคณะ, 1988) ได้ทำการศึกษา และสรุปได้ว่า สัดส่วนโดยปริมาตรของเม็ดของแข็งที่พื้นที่หน้าตัดเดียวกัน (Local Volume Fraction of Solid) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากกึ่งกลางของคอลัมน์ไปยังผนังโดยจะมีค่ามากที่สุดที่ผนัง และมีค่าต่ำสุดที่กึ่งกลางของคอลัมน์ หรือสัดส่วนช่องว่างมีค่ามากที่สุดที่กึ่งกลางท่อ และมีค่าต่ำสุดที่ผนัง และการกระจายตัวในแนวรัศมีจะมีน้อย เมื่ออัตราการป้อนของแข็งมีค่าต่ำลง หรือความเร็วอากาศลดต่ำลง นอกจากนี้แล้วที่บริเวณด้านบนของคอลัมน์การกระจายตัวก็มีน้อยลงเช่นกัน ดังรูปที่ 2.8 Basu P. และ Fraser S.A. เสนอว่าการกระจายตัวในแนวรัศมี หรือสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมีจะขึ้นอยู่กับระยะในแนวรัศมี (r) จากแกนกลาง และสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัด (ϵ_{av}) ที่พิจารณาเท่านั้น และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมี, $\epsilon(r)$ ได้ดังนี้ (Basu P. และคณะ, 1991)

$$\epsilon(r) = \epsilon_{av}^{[3.6(r/R)^{6.47} + 0.191]} \quad (2.19)$$

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



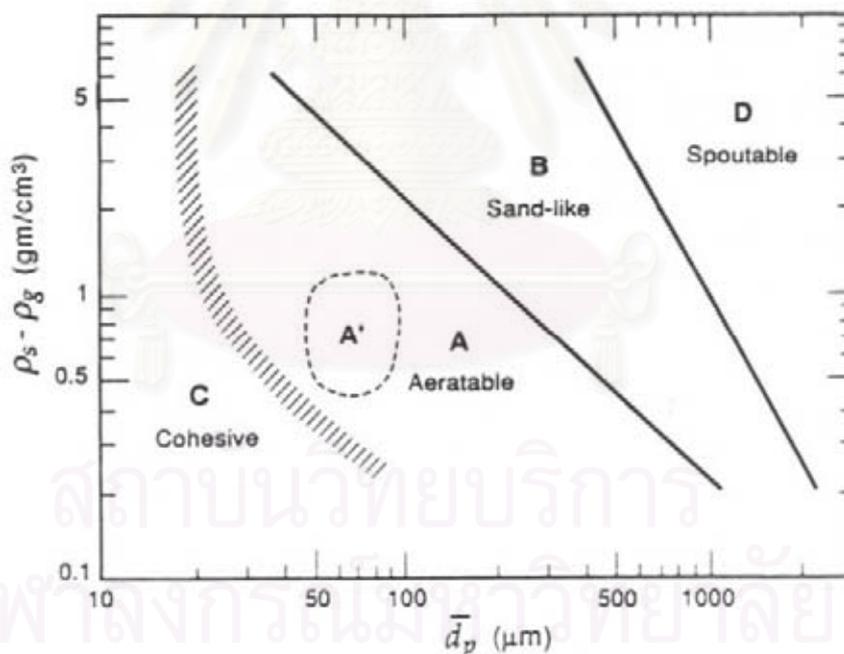
รูปที่ 2.8 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ Fast Bed (Basu P. และคณะ, 1991)

2.3 การจำแนกชนิดของของแข็ง

ในระบบฟลูอิดเซชัน คุณสมบัติของของแข็ง เช่น ขนาด, รูปร่าง และความหนาแน่น มีผลต่อการแขวนลอยของของแข็งในอากาศ หรือการถ่ายโอนมวลและความร้อนระหว่างของแข็งและอากาศ จึงได้มีการศึกษาถึงผลของสมบัติของของแข็ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบหรือปฏิบัติการในเครื่องปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Mastellone L.M. และคณะ, 1999) โดยทั่วไปของแข็งในระบบฟลูอิดเซชัน สามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่มตามวิธีของ Geldart (Geldart Powder Classification) โดยวิเคราะห์ผลต่างของความหนาแน่นของของแข็งกับอากาศ และขนาดของของแข็งเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.9 ลักษณะของอนุภาคในแต่ละกลุ่มอธิบายได้ดังนี้

Group C คือ Cohesive เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก น้อยกว่า 50 ไมโครเมตร ของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะสูงมากและมักจะจับตัวกันเป็นก้อน เช่น ผงแป้ง หรือ ซีเมนต์ เป็นต้น

- Group A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ สามารถทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ได้ง่ายเป็นฟลูอิดไดซ์แบบสม่ำเสมอ (Smooth Fluidization) ที่ความเร็วอากาศต่ำๆ และที่ความเร็วอากาศสูงๆ ก็สามารถควบคุมการเกิดฟองอากาศได้ โดยที่ในการเกิดฟลูอิดไดซ์จะไม่เกิดฟองอากาศ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมัน (FCC) เป็นต้น
- Group B คือ Sandlike เป็นของแข็งที่มีขนาด อยู่ในช่วง $50 < d_p < 500$ ไมโครเมตร. และความหนาแน่นในช่วง $1.4 < \rho_s < 4$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันยังเกิดได้ง่าย แต่อิทธิพลของฟองอากาศจะสูงขึ้น และฟองจะมีการโต เช่น ททราย เป็นต้น
- Group D คือ Spoutable เป็นของแข็งที่มีขนาดใหญ่และหรือความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงเกิดฟลูอิดไดซ์เซชันได้ยาก และมักจะเกิดปรากฏการณ์ Spouting หรือ เกิดช่องว่างของทางไหลอากาศ ซึ่งจะเกิดที่บริเวณทางด้านล่างของเบด เช่น เม็ดกาแฟ หรือเม็ดถั่วเขียว เป็นต้น



รูปที่ 2.9 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart (Grace, J. R. 1997)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Choi J.H. และคณะ (1995) ทำการศึกษาอุทกพลศาสตร์ภายในโรเตอร์และท่อป้อนกลับ โดยทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในโรเตอร์และท่อป้อนกลับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 6.8 เซนติเมตร ตามลำดับ และสูง 380

และ 250 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งใช้ผงซิลิกาเจล (Silica gel powder) ที่มีขนาดอนุภาค 46 ไมครอน เป็นวัสดุเบด พบว่าความเร็วอากาศที่ท่อป้อนกลับไม่มีผลต่อปริมาณของของแข็งภายในโรเตอร์และท่อป้อนกลับ ในสภาวะการทดลองในงานวิจัยนี้ปรากฏรูปแบบสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเตอร์เป็นรูปตัวเอส (S-shape) ซึ่งพบว่าช่วงการเปลี่ยนจากเบดแบบหนาแน่นทางด้านล่างไปเป็นเบดแบบเบาบางทางด้านบนจะอยู่ตำแหน่งสูงขึ้นเมื่อปริมาณของของแข็งเริ่มต้นเพิ่มขึ้นแต่พบว่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วอากาศ

Kim S.H. และคณะ (1995) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในโรเตอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 250 เซนติเมตร โดยทำการศึกษาผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่ผสมในอนุภาคขนาดเล็กต่อการแกว่งของความดันภายในโรเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ผงพีวีซี (PVC) และผงพอลิเอทิลีน (PE) เป็นวัสดุเบดที่มีขนาดเล็ก และเม็ดแก้วเป็นวัสดุเบดที่มีขนาดใหญ่ พบว่าการผสมอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยให้การแกว่งของความดันภายในโรเตอร์ลดลง เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือคลัสเตอร์ (Cluster) ของอนุภาคขนาดเล็ก

Mastellone L.M., และคณะ (1999) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในโรเตอร์ที่มีขนาด 12 เซนติเมตร และสูง 575 เซนติเมตร เพื่อศึกษาถึงผลของขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคต่อการไหลของของแข็งภายในท่อโรเตอร์ในการศึกษาผลของความหนาแน่นของอนุภาคพบว่าเมื่อความหนาแน่นของอนุภาคเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของเบดทางด้านล่างของโรเตอร์เพิ่มมากขึ้น โดยอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงจะมีบริเวณของแอนนูลาร์ (Annular) กว้างเพิ่มขึ้น ซึ่งอนุภาคที่อยู่ในบริเวณนี้จะไหลตกกลับไปยังทางด้านล่างของท่อโรเตอร์ และในการศึกษาถึงผลของขนาดของอนุภาคพบว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีบริเวณของแอนนูลาร์ที่มากกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

Parssinen J.H. และคณะ (2001) ศึกษาความเร็วของอนุภาคในแนวรัศมีของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีความหนาแน่นของอนุภาคสูง ทำการทดลองในโรเตอร์ขนาด 7.6 เซนติเมตร และสูง 1000 เซนติเมตร โดยใช้ Five-fiber Optic Velocity Probes ในการวัดความเร็วของอนุภาค จากการทดลองพบว่าสามารถแบ่งช่วงการไหลในแนวแกนของโรเตอร์ได้ 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงหนาแน่นทางด้านล่าง (Bottom Dense section), ช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณกลางโรเตอร์ (Middle Intermediate Dense Section), ช่วงเบดเบาบาง (Dilute Section) และช่วงทางออก (Exit Section) และพบว่าการไหลของของแข็งภายในโรเตอร์เริ่มที่บริเวณกึ่งกลางโรเตอร์และขยายบริเวณเข้าใกล้ผนังมากขึ้นเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้น

Zhang M. และคณะ (2003) ทำการศึกษารูปแบบการไหลภายในโรเตอร์และท่อป้อนกลับโดยทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดัน

บรรยากาศในโรเซออร์และท่อป้อนกลับที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 42 เซนติเมตร และสูง 1800 และ 650 เซนติเมตร ตามลำดับ พบว่าภายในโรเซออร์ประกอบด้วย 2 วัฏภาค ได้แก่ วัฏภาคคลัสเตอร์ (Cluster phase) และวัฏภาคการกระจายตัว (Dispersed phase) แต่ภายในท่อป้อนกลับประกอบด้วยวัฏภาคการกระจายตัวเพียงอย่างเดียว ซึ่งรูปแบบการไหลภายในโรเซออร์และท่อป้อนกลับที่แตกต่างกันเนื่องจากการไหลของของแข็งภายในโรเซออร์มีทิศทางตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลก แต่การไหลของของแข็งภายในท่อป้อนกลับมีทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วงของโลก

Xu G., และคณะ (2003) เสนอการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรอื่นที่มีผลต่อรูปแบบการไหลภายในโรเซออร์นอกจากความเร็วอากาศ และอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงความสูงเบดในท่อป้อนกลับ หรือวาล์วที่ควบคุมการไหลของของแข็งที่ท่อส่งผ่านมีผลให้รูปแบบสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเซออร์เปลี่ยนแปลง ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการไหลภายในโรเซออร์จากลักษณะของรูปแบบสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเซออร์ได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ การไหลแบบเบาบาง (Dilute Suspension Flow), การไหลไม่สม่ำเสมอในแนวแกน (Axially Nonuniform Flow) และการไหลแบบหนาแน่น (Fully Dense Flow)

Pandey P., และคณะ (2004) ศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศ และอัตราการไหลป้อนกลับของไม้คอร์กต่อความเร็วของไม้คอร์กขนาด 812 ไมโครเมตรที่อยู่ใกล้ ๆ กับผนังท่อโรเซออร์ ในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีท่อโรเซออร์ขนาด 30.5 เซนติเมตร และสูง 1520 เซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าความเร็วเฉลี่ยของไม้คอร์กเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและเมื่อลดอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง และความเร็วเฉลี่ยของไม้คอร์กที่กำลังเคลื่อนที่ในทิศลงหรือตรงข้ามกับอากาศคงที่ตลอดเวลาไม่เปลี่ยนแปลงตามภาวะที่ทดลอง นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเพื่อหาขนาดและความเร็วของคลัสเตอร์ (Cluster) ที่เกิดขึ้นพบว่าความเร็วของคลัสเตอร์ทั้งหมดอยู่ในทิศสวนทางกับอากาศในช่วง 0.8-1.4 เมตรต่อวินาที และขนาดของคลัสเตอร์ จะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของไม้คอร์กต่ออากาศที่ป้อนเข้าสู่ระบบเพิ่มมากขึ้น

สมชาย สวยสอาด (2004) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ในโรเซออร์ขนาด 5 เซนติเมตร สูง 200 เซนติเมตร ใช้สารป้อนผสมระหว่างทรายและซีวมวล 3 ชนิดคือ ซีลี้อย แกลบลและชานอ้อย ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยปริมาตร โดยใช้กล้องความเร็วสูงในการคำนวณความเร็วของอนุภาค พบว่าเมื่อความเร็วอากาศคงที่ ความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมทุกชนิดลดลงตามความสูงของโรเซออร์ และเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศทำให้ความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความเร็วอากาศคงที่และที่ตำแหน่งความสูงเดียวกัน สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยมีความเร็วเฉลี่ยสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนที่เป็นทรายเพียงอย่างเดียว

Kim S.H. และคณะ (2005) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในไรเซอร์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร และสูง 590 เซนติเมตร โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวของไอน้ำมัน (Fluid Catalytic Cracking, FCC) ที่มีขนาดอนุภาค 70 ไมครอน เป็นวัสดุเบด พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อขนาดของบริเวณแอนนูลาร์ที่มีการเคลื่อนที่ลงของอนุภาค ได้แก่ ความสูงของไรเซอร์และอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง โดย ความหนาของบริเวณแอนนูลาร์ที่มีการเคลื่อนที่ลงของของแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของไรเซอร์เพิ่ม สูงขึ้น โดยบริเวณแอนนูลาร์จะไม่ปรากฏที่บริเวณด้านล่างของไรเซอร์เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนเวียน ของแข็งที่ความเร็วอากาศคงที่ โดยเรียกรูปแบบการเคลื่อนที่บริเวณนี้ว่าขอบเขตการไหลขึ้นแบบ เบดหนาแน่น (Dense suspension upflow regime)

ศันสนีย์ กำธนัททรัพย์ (2005) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ อุณหภูมิและความดันบรรยากาศในไรเซอร์ขนาด 5 เซนติเมตร สูง 200 เซนติเมตร โดยใช้เม็ดแก้ว และสารป้อนผสมระหว่างเม็ดแก้วกับแคลบในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยปริมาตร โดยใช้กล้อง ความเร็วสูงในการคำนวณความเร็วของอนุภาค พบว่าความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็ว อากาศเพิ่มสูงขึ้น โดยเม็ดแก้วมีความเร็วมากที่สุดบริเวณกึ่งกลางของไรเซอร์ และค่อยๆ ลดลงเมื่อ เข้าใกล้ผนังมากขึ้น และที่ความเร็วอากาศคงที่พบว่าความเร็วของสารป้อนผสมระหว่างเม็ดแก้ว กับแคลบมีค่าน้อยกว่าความเร็วของเม็ดแก้วเพียงอย่างเดียว

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในงานวิจัยนี้ได้สร้างขึ้นใหม่ มีส่วนประกอบที่สำคัญแสดงในรูปที่ 3.1 มีดังต่อไปนี้

3.1.1 ท่อไรเซอร์ (Riser) ท่อไรเซอร์ทำจากท่อพลาสติกใส (Acrylic) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 4 เมตร เพื่อให้สามารถเห็นรูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งภายในได้อย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า บริเวณด้านล่างของไรเซอร์มีตัวกระจายอากาศ (Air Distributor) เป็นแบบแผ่นตะแกรงแผ่นเดียว (Single Perforated Plate) ที่มีความละเอียด 60 mesh (250 ไมโครเมตร) โดยส่วนบนได้ปรับปรุงทางออกของของแข็งโดยมีถังทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 เซนติเมตร และสูง 60 เซนติเมตร หรือ Splash plate ครอบอยู่ (แทนที่ทางออกที่ไม่สมมาตร) เพื่อลดผลของทางออก ทำให้ของแข็งสามารถตกลงอย่างอิสระ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แสดงการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่บริเวณทางออกที่ไม่สมมาตร และทางออกที่ปรับปรุงในงานวิจัยนี้ โดยที่ผนังท่อไรเซอร์มีการเจาะรูขนาด 1/4 นิ้วตลอดความสูง เพื่อติดตั้งจุดวัดความดันอากาศ (Pressure Tap) สำหรับวัดค่าความดันของอากาศตามความสูงของไรเซอร์ โดยแต่ละตำแหน่งห่างจากตัวกระจายอากาศเป็นระยะ -5, 5, 10, 25, 45, 65, 115, 165, 215, 265, 315 และ 365 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยตำแหน่งที่ -5 เซนติเมตร หมายถึงตำแหน่งที่อยู่ต่ำกว่าตัวกระจายอากาศ 5 เซนติเมตร ส่วนตำแหน่งอื่นๆ อยู่เหนือตัวกระจายอากาศ

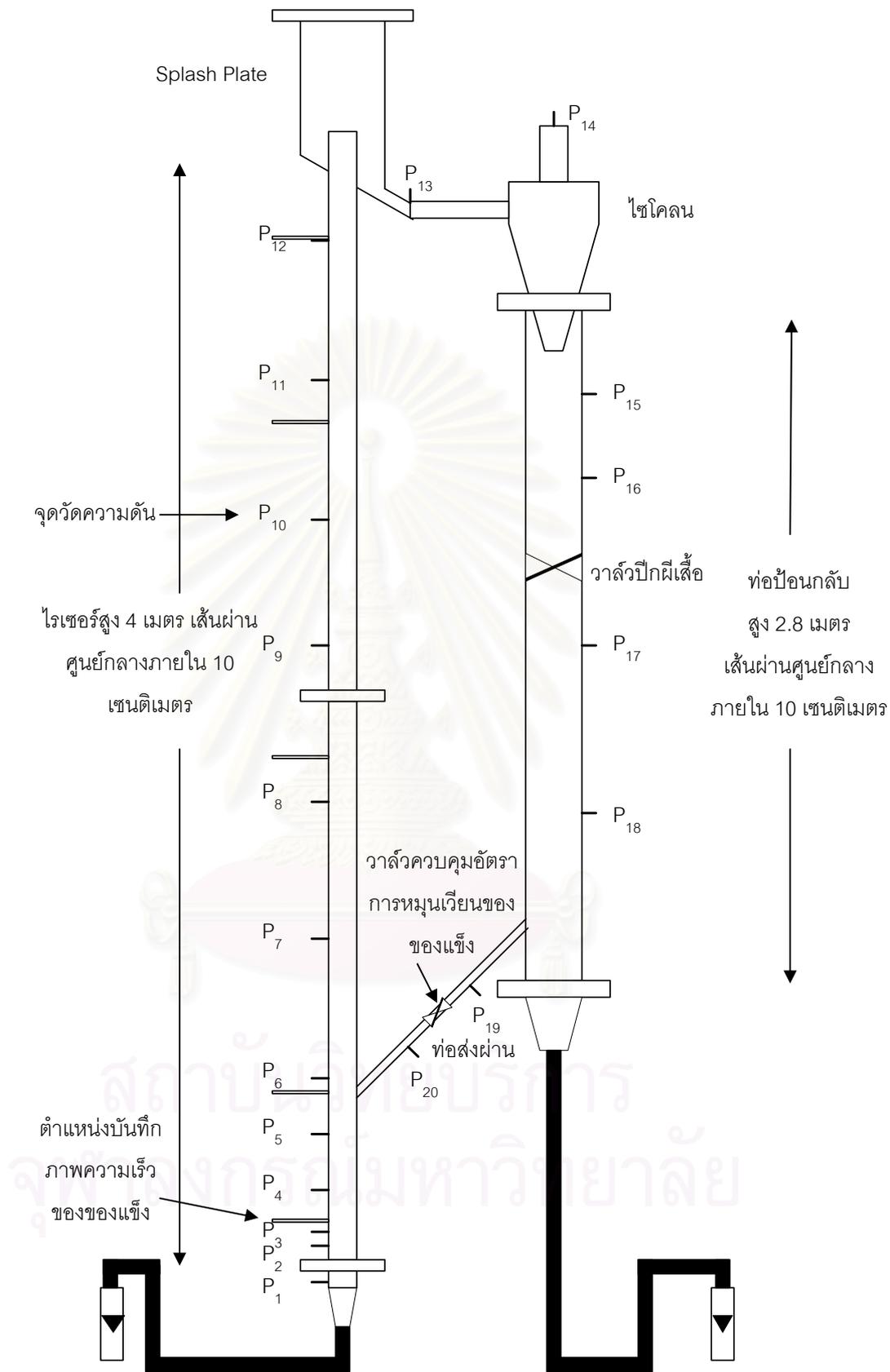
ในการบันทึกภาพของแข็งภายในท่อไรเซอร์นั้น บริเวณผนังท่อไรเซอร์จะถูกเจาะรูเพิ่มขึ้นเพื่อสอดโพรบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5 เซนติเมตร และยาว 10 เซนติเมตร สำหรับการบันทึกภาพภายในท่อไรเซอร์ตามความสูง ที่ตำแหน่งความสูง 30, 60, 180, 300 และ 370 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ แสดงดังรูปที่ 3.1 และสำหรับการบันทึกภาพของของแข็งภายในท่อไรเซอร์ตามแนวรัศมีจะสอดโพรบเข้าไปที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมี ได้แก่ตำแหน่ง 0, 0.6, 1.8 และ 2.5 เซนติเมตร จากกึ่งกลางไรเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งโพรบที่ใช้ในการบันทึกความเร็วตามแนวรัศมี

3.1.2 ไซโคลน (Cyclone) เป็นอุปกรณ์สำหรับแยกอนุภาคจากอากาศ เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจาย และยังเป็น การนำเอาของแข็งป้อนกลับเข้ามาเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนด้วย ในงานวิจัยนี้ไซโคลนทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกไซโคลน (D_c) เท่ากับ 12 เซนติเมตร และสูง 50 เซนติเมตร

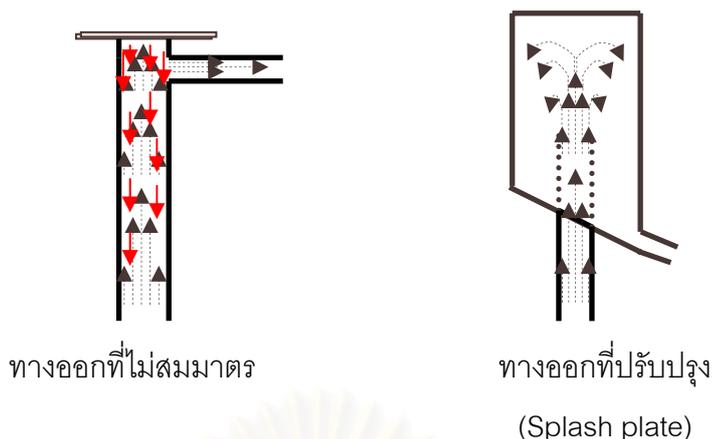
3.1.3 ท่อป้อนกลับ (Downcomer) เป็นส่วนที่ต่อจากไซโคลอน มีหน้าที่รองรับอนุภาคที่ถูกแยกโดยไซโคลอนแล้วนำไปป้อนกลับเข้าสู่ไรเซอร์อีกครั้ง โดยทำงานภายใต้ภาวะฟลูอิดไคด์แบบฟองอากาศ เพื่อให้ของแข็งสามารถเกิดการหมุนเวียนในระบบได้ง่ายยิ่งขึ้น ท่อป้อนกลับทำจากท่อพลาสติกใส (Acrylic) เช่นเดียวกับไรเซอร์ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 280 เซนติเมตร โดยที่ความสูง 150 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศได้ติดตั้งวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการวัดอัตราการหมุนเวียนของของแข็งภายในระบบ

3.1.4 ท่อส่งผ่าน (Transfer line) ทำหน้าที่ลำเลียงอนุภาคจากส่วนล่างของท่อป้อนกลับไปยังไรเซอร์ มีลักษณะเป็นท่อเฉียงเชื่อมต่อระหว่างไรเซอร์กับท่อป้อนกลับ ทำจากท่อพลาสติกใส (Acrylic) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 เซนติเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร ยาว 75 เซนติเมตร โดยวางทำมุม 45 องศากับแนวระดับ มีวาล์วปีกผีเสื้อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร เพื่อควบคุมอัตราการหมุนเวียนของของแข็งตามต้องการ

3.1.5 อุปกรณ์วัดความดัน อุปกรณ์วัดความดันที่ใช้ในการทดลองนี้คือเครื่องวัดความดันเชิงตัวเลข (Digital Pressure) ของบริษัท Yokogawa รุ่น EJA120 Style: S2 มีช่วงการวัด 0-1000 มิลลิเมตรน้ำ ความคลาดเคลื่อน 0.2%



รูปที่ 3.1 เครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.2 การเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วบริเวณทางออกที่ไม่สมมาตรและทางออกที่ปรับปรุงในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งโพรบที่ใช้ในการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วในแนวรัศมี

3.2 เทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV)

เทคนิค PIV เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวัดความเร็วและทิศทางการไหลของของไหล เนื่องจากเทคนิค PIV มีข้อดี คือ สามารถวัดความเร็วของอนุภาคที่มีความเร็วสูงได้ และเป็นการวัดความเร็วแบบทันทีทันใด (Instantaneous Velocity) ตามตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สำหรับการวัดความเร็วของของแข็งที่อยู่ในโรเซอริ ประกอบด้วยส่วนสำคัญต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

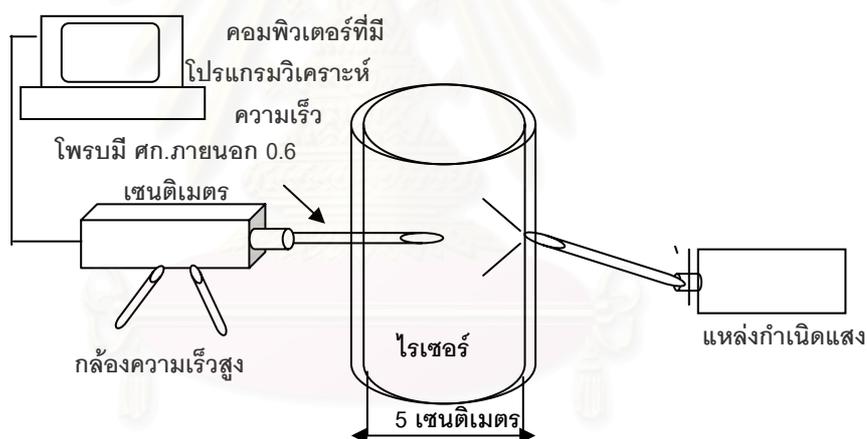
3.2.1 กล้องความเร็วสูงชนิด CCD (Charge Coupled Device) ของบริษัท Sony รุ่น SSC-DC58AP พร้อมเลนส์ สามารถปรับความเร็วหน้ากล้องได้ 10 ค่าตั้งแต่ 1/25 ถึง 1/10000 วินาที ใช้สำหรับบันทึกภาพของของแข็งที่เคลื่อนที่ในโรเซอริ โดยวางไว้ติดกับโพรบในด้านตรงข้ามกับด้านที่ใส่เข้าไปภายในท่อโรเซอริในตำแหน่งที่ต้องการ แล้วทำการปรับระยะโฟกัส กำลังขยายของเลนส์ และปรับความเร็วหน้ากล้องจนเห็นภาพเส้นการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วได้ชัดเจน นำภาพที่บันทึกได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพต่อไป

3.2.2 โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image Pro Plus V.4.5.1 ใช้ในการเก็บภาพที่บันทึกได้จากกล้องความเร็วสูง และนำภาพที่ได้มาหาความยาวของเส้นที่แสดงการเคลื่อนที่ของของแข็งแต่

ละอนุภาค โดยติดตั้งอยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้สำหรับรับภาพและทำการประมวลผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image Pro Plus V.4.5.1

โปรแกรมนี้มีความสามารถในการบันทึกภาพตามระยะเวลาที่กำหนด สามารถปรับความเข้มและความสว่างของภาพได้ อีกทั้งจะเรียงลำดับภาพที่บันทึกได้และเขียนเพิ่มข้อมูลเป็นแบบ TIFF และ BMP ในการหาเส้นความยาวของของแข็งที่เคลื่อนที่โปรแกรมจะแสดงข้อมูลการวิเคราะห์ระยะทางที่ลากได้ออกมาเป็นหน่วยตามที่ได้ทำค่าเทียบ (Calibration) และค่าเทียบยังสามารถเก็บบันทึกและสร้างใหม่เพื่อนำมาใช้ได้ ส่วนข้อมูลที่วิเคราะห์ออกมาได้นี้ก็สามารถส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Excel ได้

3.2.3 แหล่งกำเนิดแสง (Optical Fiber light source) ประกอบด้วยไฟฮาโลเจน ที่มีกำลัง 150 วัตต์สามารถปรับความเข้มแสงได้ตั้งแต่ 0 -100 % และท่อกระจายแสง (Dual Fiber Optic Gooseneck) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และความยาว 61 เซนติเมตร วางอยู่ด้านตรงข้ามกับกล้องความเร็วสูง เพื่อให้ภาพที่บันทึกได้มีความชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ภาพมากขึ้น



รูปที่ 3.4 ระบบ PIV

การเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่บันทึกภาพได้จากกล้องความเร็วสูงที่ปรากฏบนหน้าจอคอมพิวเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยเส้นการเคลื่อนที่มีขนาดต่างๆ กัน โดยเส้นที่หนาและสั้นแสดงถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จึงเคลื่อนที่ช้า และเส้นที่บางและยาว แสดงถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีขนาดเล็ก จึงเคลื่อนที่ได้เร็ว จากรูปที่ 3.5 สามารถบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วได้ทั้งหมด 9 อนุภาค เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ จะสามารถทำการวัดความยาวและมุมการเคลื่อนที่เฉพาะเส้นที่ชัดเจน ซึ่งได้ทั้งหมด 6 เส้น เนื่องจากเส้นที่เหลือมีเส้นในการเคลื่อนที่ติดกับโพรม หรือมีเส้นการเคลื่อนที่ซ้อนทับกันทำให้เห็นไม่ชัดเจน โดย

สามารถวิเคราะห์ภาพเพื่อหาระยะทางและมุมของการเคลื่อนที่ที่แท้จริงได้จากโปรแกรม วิเคราะห์ภาพ Image Pro Plus เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพทั้งหมดแล้วจึงนำข้อมูลมาคำนวณความเร็วของของแข็งจากสมการที่ 3.1 (Tartan M. และคณะ, 2004)

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

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

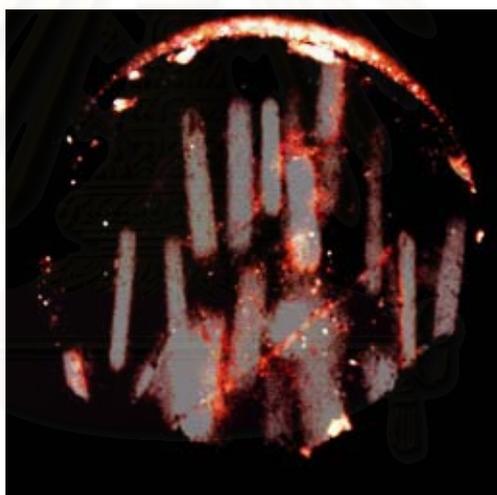
โดยที่ C_r คือ ความเร็วของของแข็งในแนวรัศมี (Radial Velocity), เมตรต่อวินาที

C_z คือ ความเร็วของของแข็งในแนวแกน (Axial Velocity), เมตรต่อวินาที

L คือ ระยะทางที่ของแข็งเคลื่อนที่ได้, เมตร

t คือ เวลาที่เม็ดแก้วใช้ในการเคลื่อนที่, วินาที หาได้จากส่วนกลับของความเร็วหน้ากล้อง

θ คือ มุมที่ของแข็งเคลื่อนที่วัดจากแกน x โดยเริ่มจากวิถีภาคที่ 1



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างภาพการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่บันทึกได้จากเทคนิค PIV

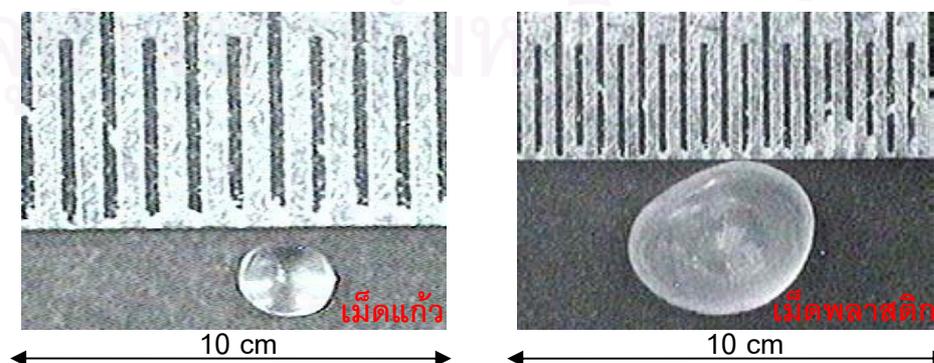
3.3 อนุภาคของแข็งที่ใช้ในการทดลอง

ของแข็งที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ เม็ดแก้วและเม็ดพลาสติก (HDPE) แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 โดยเม็ดแก้วมีลักษณะเป็นทรงกลม ใสและโปร่งแสง สำหรับเม็ดพลาสติกลักษณะเป็นวงรี สีขาวขุ่น และโปร่งแสง โดยเม็ดพลาสติกมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดแก้วประมาณ 8 เท่า และมีขนาดใหญ่กว่าโพรบที่ใช้ในการบันทึกภาพ ทำให้ไม่สามารถบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของเม็ดพลาสติกได้ ดังนั้นในการทดลองที่ใช้สารป้อนเป็นของผสมระหว่างเม็ดแก้วและเม็ดพลาสติกจึงติดตามการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วเพียงอย่างเดียว

สมบัติต่างๆ ของเม็ดแก้วและเม็ดพลาสติกแสดงดังตารางที่ 3.1 โดยทำการวัดขนาดของเม็ดแก้วด้วยเครื่องวิเคราะห์ Particle size analyzer พบว่าเม็ดแก้วที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 170-800 ไมครอน ซึ่งสามารถคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Sauter mean diameter, SMD) จากสมการ $SMD = \bar{d}_{32}$ โดย $d_{32} = 6 \times (V_p/A_p)$ ได้เท่ากับ 512 ไมครอน ดังแสดงในภาคผนวก สำหรับเม็ดพลาสติกมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ไม่สามารถวัดขนาดได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Particle size analyzer และรูปร่างของเม็ดพลาสติกไม่เป็นทรงกลม จึงแสดงขนาดของอนุภาคในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ $d_e = 1.55A^{0.625}/P^{0.2}$ ดังแสดงในภาคผนวก โดยค่าความหนาแน่นของเม็ดแก้วและเม็ดพลาสติกหาได้จากการแทนที่น้ำ ส่วนการจำแนกกลุ่มของของแข็งตามลักษณะโดยวิธีของ Geldart นั้นพบว่าเม็ดแก้วจัดอยู่ในกลุ่ม B และเม็ดพลาสติกจัดอยู่ในกลุ่ม D

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติต่างๆ ของของแข็งที่ใช้ในงานวิจัย

สมบัติทางกายภาพ	เม็ดแก้ว (Glassbead)	เม็ดพลาสติก (HDPE)	หน่วย
ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค (d_p)	512	-	ไมครอน
เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า	-	4.47	มิลลิเมตร
ความหนาแน่นของอนุภาค (ρ_s)	2200	860	กก.ต่อ ลบ.ม.
ความหนาแน่นบัลค์ (ρ_b)	1550	530	กก.ต่อ ลบ.ม.
Geldart classification	B	D	-
ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิไดซ์เซชัน (U_{mf})	0.17	1.04	เมตรต่อวินาที
ความเร็วสุดท้ายของอนุภาค (U_t)	3.70	10.00	เมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างของเม็ดแก้วและเม็ดพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัย

3.4 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว ในการทดลองส่วนนี้ศึกษาถึงผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันอากาศ สัดส่วนช่องว่าง และความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูง และศึกษารูปแบบความเร็วเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศค่าหนึ่ง
2. การศึกษาผลของอนุภาคขนาดใหญ่ต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว ในการทดลองส่วนนี้ศึกษาถึงผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันอากาศ และสัดส่วนช่องว่าง และศึกษาความเร็วของเม็ดแก้วที่อยู่ในของผสมตลอดความสูงและตลอดแนวรัศมีของไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศค่าหนึ่ง และศึกษาถึงผลของเม็ดพลาสติกที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว

สภาวะการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 3.2 สภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ของแข็ง	อุทกพลศาสตร์	U_g (เมตร ต่อวินาที)	ความสูง (ซม.)	ระยะตามแนวรัศมี (ซม.)
เม็ดแก้ว	- ความดันอากาศและอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง	7, 8, 9	-	-
	- ความเร็วตลอดความสูง	7, 8, 9	30, 60, 180, 300, 370	0
	- ความเร็วตามแนวรัศมี	9	30, 60, 180, 300, 370	0, 0.6, 1.8, 2.5
	- ทิศทางการเคลื่อนที่	9	180	0, 0.6, 1.8, 2.5
ของผสม*	- ความดันอากาศและอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง	7, 8, 9	-	-
	- ความเร็วตลอดความสูง	9	30, 60, 180, 300, 370	0
	- ความเร็วตามแนวรัศมี	9	30, 60, 180, 300, 370	0, 0.6, 1.8, 2.5

*ของผสมระหว่างเม็ดแก้วและเม็ดพลาสติกในปริมาณร้อยละ 5 โดยปริมาตร

3.4.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว

3.4.1.1 การวัดความดันอากาศ, สัดส่วนช่องว่างและอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง

1. ใส่เม็ดแก้วทางด้านบนของท่อป้อนกลับ แล้วเปิดเครื่องเป่าอากาศที่อัตราการไหลเท่ากับ 400 ลิตรต่อนาที เพื่อให้เกิดฟลูอิด์แบบเบดแบบฟองอากาศ

2. เปิดเครื่องเป่าอากาศให้อากาศผ่านเข้าสู่ท่อไรเซอร์ที่อัตราการไหลที่กำหนด แล้วเปิดวาล์วปีกผีเสื้อที่ท่อส่งผ่านที่ละน้อยจนมีร้อยละการเปิดเท่ากับ 50 เพื่อให้เม็ดแก้วจากท่อป้อนกลับไหลเข้าไปในท่อไรเซอร์และเกิดการหมุนเวียน รอให้ระบบการหมุนเวียนของเม็ดแก้วเข้าสู่ภาวะสมดุลเป็นเวลา 5 นาที
3. วัดความสูงของเม็ดแก้วที่สะสมในทางด้านล่างท่อป้อนกลับในขณะที่เกิดการหมุนเวียน
4. บันทึกค่าความดันอากาศทุกๆ ตำแหน่งในระบบ (P_1 - P_{20} ที่แสดงในรูปที่ 3.1) ที่อ่านได้จากเครื่องวัดความดันเชิงตัวเลข
5. ปิดวาล์วปีกผีเสื้อที่คั่นระหว่างกลางท่อป้อนกลับ แล้วทำการจับเวลาที่เม็ดแก้วสะสมบนวาล์วปีกผีเสื้อจนได้ปริมาณเท่ากับ 1 กิโลกรัม
6. ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ
7. นำความดันอากาศที่บันทึกได้ และเวลาที่วัดค่าได้ไปคำนวณหาสัดส่วนช่องว่าง และอัตราการหมุนเวียนของของแข็งต่อไป ตามลำดับ

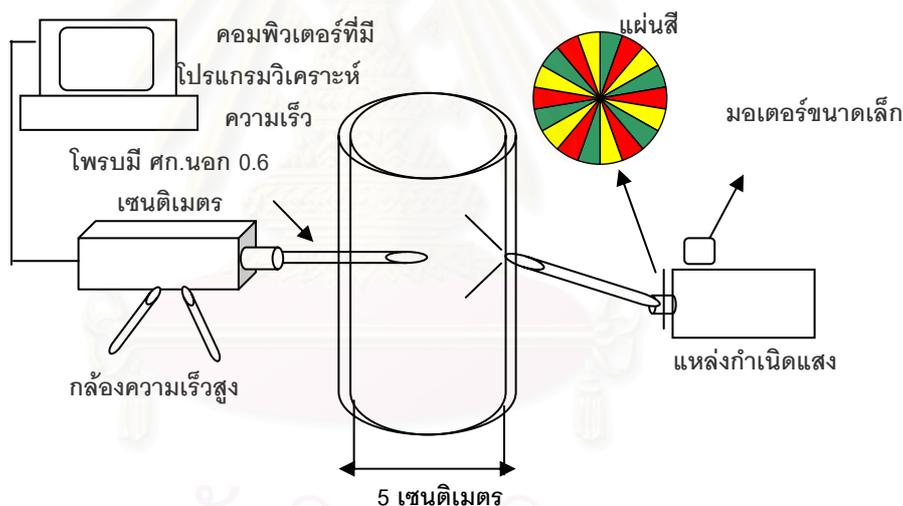
3.4.1.1 การวัดความเร็วของอนุภาคด้วยเทคนิค PIV

1. ใส่เม็ดแก้วทางด้านบนของท่อป้อนกลับ แล้วเปิดเครื่องเป่าอากาศที่อัตราการไหลเท่ากับ 400 ลิตรต่อนาที เพื่อให้เกิดฟลูอิด์แบบฟองอากาศ
2. เปิดเครื่องเป่าอากาศให้อากาศผ่านเข้าสู่ท่อไรเซอร์ที่อัตราการไหลที่กำหนด แล้วเปิดวาล์วปีกผีเสื้อที่ท่อส่งผ่านที่ละน้อยจนมีร้อยละการเปิดเท่ากับ 50 เพื่อให้เม็ดแก้วจากท่อป้อนกลับไหลเข้าไปในท่อไรเซอร์และเกิดการหมุนเวียน รอให้ระบบการหมุนเวียนของเม็ดแก้วเข้าสู่ภาวะสมดุลเป็นเวลา 5 นาที
3. วัดความสูงของเม็ดแก้วที่สะสมในทางด้านล่างของท่อป้อนกลับในขณะที่เกิดการหมุนเวียน
4. บันทึกภาพการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว

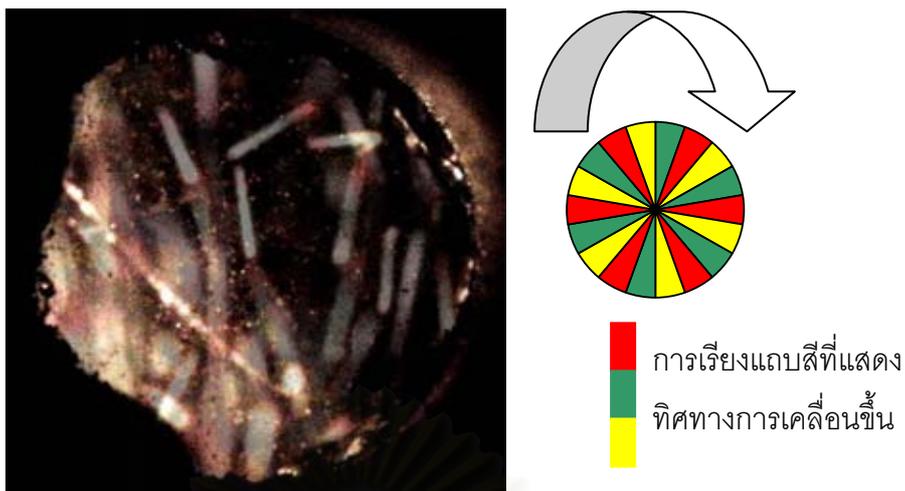
ได้มีการปรับปรุงระบบ PIV ให้สามารถแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ โดยนำแผ่นสีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 เซนติเมตร ประกอบด้วย 3 สี ได้แก่ สีแดง สีเหลือง และสีเขียวมาต่อกับมอเตอร์ที่มีการต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อให้แผ่นสีหมุนได้อัตโนมัติ นำไปวางไว้หน้าแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับเทียบความยาวมาตรฐานของ

โปรแกรมวิเคราะห์ภาพใหม่ เพื่อให้ได้ความยาวของเส้นการเคลื่อนที่ที่ถูกต้อง โดยผู้เชี่ยวชาญทางด้านโปรแกรม Image Pro Plus มาปรับเทียบให้ ซึ่งวิธีการปรับเทียบความยาวมาตรฐานแสดงดังภาคผนวก ง.

ระบบ PIV ที่ได้มีการปรับปรุงเพื่อแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยแผ่นสีที่ใช้ต้องนำมาหาขนาด จำนวนช่องและความเร็วของมอเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้ภาพที่บันทึกได้มีความชัดเจน สำหรับความเร็วของมอเตอร์ต้องสอดคล้องกับความเร็วของเม็ดแก้ว ซึ่งสามารถปรับความเร็วได้ขณะที่ทำการทดลอง ในการวิเคราะห์ทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว ให้ดูจากการเรียงของแถบสีที่ปรากฏในแต่ละเส้นการเคลื่อนที่ ซึ่งเม็ดแก้วที่มีทิศทางขึ้นและลงจะมีการเรียงของแถบสีที่แตกต่างกัน โดยรูปที่บันทึกได้แสดงดังรูปที่ 3.8 พบว่าในแต่ละเส้นมีการเรียงของแถบจากล่างขึ้นบนเป็นสีเหลือง สีเขียว และสีแดงเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจากการหมุนของแผ่นสีทวนเข็มนาฬิกา แสดงได้ว่าเม็ดแก้วส่วนใหญ่เคลื่อนที่ขึ้น



รูปที่ 3.7 ระบบ PIV ที่มีแผ่นสีประกอบ



รูปที่ 3. 8 ตัวอย่างภาพที่บันทึกได้จากระบบ PIV ที่มีแผ่นสีประกอบ

3.4.2 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ของของผสมระหว่างเม็ดแก้วและเม็ดพลาสติก (HDPE)

การทดลองในหัวข้อนี้เปลี่ยนวัสดุเบดเป็นของผสมระหว่างเม็ดแก้วและเม็ดพลาสติก โดยทำการผสมเม็ดพลาสติกในปริมาณร้อยละ 5 โดยปริมาตร ในเม็ดแก้วที่มีน้ำหนักเริ่มต้นเท่ากับ 10 กิโลกรัม ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ 6000 ลบ.ซ.ม. โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 3.4.1

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว โดยพิจารณาจาก วงจรความดันอากาศ สัดส่วนช่องว่าง ความเร็วตามแนวแกน ความเร็วในแนวรัศมีและทิศทางในการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วในแนวรัศมีโดยใช้แผ่นสี ในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว อนุภาคขนาดใหญ่ดังกล่าว คือ เม็ดโพลีเอทิลีน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดแก้วประมาณ 8 เท่า สมบัติทางกายภาพของเม็ดโพลีเอทิลีน ได้แสดงไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.1 ในตอนท้ายของบทนี้เป็นการเปรียบเทียบความเร็วของเม็ดแก้วในระบบที่มีและไม่มีอิทธิพลของเม็ดพลาสติกทั้งแนวตั้งและแนวนอน

4.1 อุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว

4.1.1 ผลของความเร็วอากาศต่อวงจรความดัน

ปริมาณเม็ดแก้วทั้งหมดที่อยู่ในระบบ หรือปริมาณของของแข็งเริ่มต้น (Solid inventory, I_v) คือ 10 กิโลกรัม หรือความสูงของเม็ดแก้วที่ท่อป้อนกลับ (H_{dc}) ก่อนเริ่มการทดลองเท่ากับ 63 เซนติเมตร ที่ความเร็วอากาศอยู่ในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที พบว่าอัตราการหมุนเวียนของของแข็งอยู่ในระหว่าง 72-80 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ความดันของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์และท่อป้อนกลับอ่านค่าได้จากเครื่องวัดความดันเชิงตัวเลข มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรน้ำ รูปที่ 4.1 แสดงวงจรความดันอากาศในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วงตลอดความสูงของโรเตอร์ ได้แก่ ช่วงทางด้านล่างของโรเตอร์ คือที่ตำแหน่งความสูงต่ำกว่า 65 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ ช่วงตอนกลาง คือที่ตำแหน่งความสูงระหว่าง 65-300 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ และช่วงตอนบนของโรเตอร์ คือที่ตำแหน่งความสูงระหว่าง 300-370 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ

เมื่อพิจารณาช่วงทางด้านล่างของโรเตอร์ พบว่าที่ความเร็วอากาศ 7 และ 8 เมตรต่อวินาที ความดันอากาศค่อนข้างคงที่ตลอดความสูงของช่วงทางด้านล่างของโรเตอร์ แต่ที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาทีพบว่าความดันอากาศค่อยๆ ลดลงเมื่อความสูงของช่วงทางด้านล่างของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเร็วอากาศ 7 และ 8 เมตรต่อวินาที พบว่าความหนาแน่นเบดในช่วงนี้ ค่อนข้างมีความสม่ำเสมอ ส่งผลให้ความดันไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที พบว่าเม็ดแก้วที่ไหลป้อนกลับไปยังโรเตอร์ถูกอากาศพัดขึ้นไปทางด้านบนของโรเตอร์ได้เกือบทั้งหมด ความหนาแน่นของเบดมีค่าไม่คงที่ โดยบริเวณใกล้กับตัวกระจาย

อากาศมีปริมาณเม็ดแก้วอยู่เบาบาง ดังนั้นความดันอากาศบริเวณนี้จึงค่อนข้างคงที่ เมื่ออากาศเริ่มสัมผัสกับเม็ดแก้วทางตอนบนความดันอากาศจะค่อยๆ ลดลง

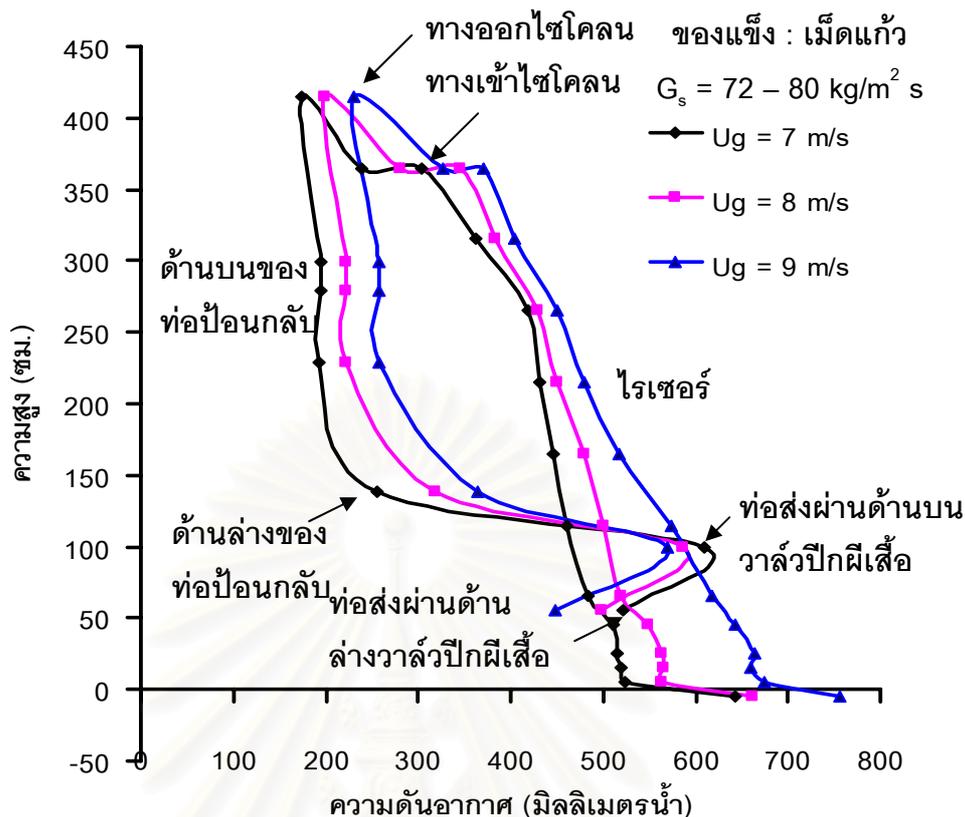
สำหรับช่วงตอนกลาง และทางตอนบนของไรเซอร์ พบว่าความดันอากาศลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันทั้ง 3 ความเร็วอากาศ โดยความดันอากาศที่ตำแหน่งบนสุดของไรเซอร์ และตำแหน่งก่อนเข้าไซโคลนมีความดันอากาศใกล้เคียงกัน เนื่องจากทั้งสองตำแหน่งอยู่ในระดับความสูงที่เท่ากัน โดยความดันอากาศที่ต่ำสุดของระบบอยู่ที่ทางออกของไซโคลน

ในทางด้านบนของท่อป้อนกลับพบว่าหลังจากเม็ดแก้วออกจากไซโคลนเข้าสู่ท่อป้อนกลับ ความดันอากาศทางส่วนบนที่อยู่เหนือระดับของเบดค่อนข้างคงที่ เนื่องจากในทางด้านบนของท่อป้อนกลับมีการตกกลับอย่างอิสระของเม็ดแก้วโดยไม่มีการสะสม ซึ่งแตกต่างจากส่วนล่างของท่อป้อนกลับที่อยู่ในสภาวะเบดแบบฟองอากาศ (Bubbling bed) มีการสะสมของเม็ดแก้วที่ความสูงคงที่

และเมื่อพิจารณาที่ท่อส่งผ่าน พบว่าความดันอากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ท่อส่งผ่านทางด้านบนวาล์วปีกผีเสื้อ เนื่องจากมีปริมาณเม็ดแก้วเต็มท่อตลอดเวลา ส่วนทางด้านล่างวาล์วปีกผีเสื้อ มีความดันอากาศลดลง เนื่องจากเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ผ่านท่อส่งผ่านทางด้านล่างวาล์วปีกผีเสื้อมีปริมาณน้อยกว่า จึงทำให้ความดันอากาศที่บริเวณนี้ลดลง

เมื่อพิจารณาถึงผลของความเร็วกาศที่มีต่อวงจรความดันพบว่า ความดันภายในระบบเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วกาศเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้รูปแบบของวงจรความดันคล้ายคลึงกันที่ทุกความเร็วกาศที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นข้อมูลจากวงจรความดันเพียงอย่างเดียวไม่สามารถจำแนกถึงรูปแบบการไหลในแต่ละความเร็วกาศได้จึงจำเป็นต้องนำข้อมูลความดันมาคำนวณสัดส่วนช่องว่างภายในท่อไรเซอร์ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 วงจรความดันของเครื่องฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที

4.1.2 ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันอากาศและสัดส่วนช่องว่าง

ความดันของอากาศในแต่ละตำแหน่งในโรเตอร์สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัดส่วนช่องว่าง ได้ดังสมการที่ (4.1) (Li Z.Q. และคณะ, 2004)

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

โดยที่

ε = สัดส่วนช่องว่าง

ΔP = ผลต่างของความดันของอากาศสองตำแหน่งที่ติดกัน, กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที²

ΔL = ระยะห่างระหว่างความดันของอากาศสองตำแหน่งติดกัน, เมตร

ρ_s = ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที²

ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันของอากาศและสัดส่วนช่องว่าง แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นความดันอากาศในโรเตอร์

เพิ่มขึ้นแต่ความดันอากาศภายในโรเซอร์ลดลงตามความสูงของโรเซอร์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ สมชาย (สมชาย , 2004), คັນสนีย์ (คັນสนีย์,2005) และยังสอดคล้องกับงานวิจัยในต่างประเทศ อื่นๆ เช่น Nieuwland J.J. (Nieuwland J.J. และคณะ, 1997) Pugsley T. S. (Pugsley T.S. และ คณะ, 1996) และ Schlichthaeile P. (Schlichthaeile P. และคณะ,1999) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบความดันภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในงานวิจัยนี้มีความถูกต้อง ในกรณีที่ ความดันอากาศภายในระบบแตกต่างจากงานวิจัยอื่นๆ ดังได้เกิดในตอนเริ่มต้นทำงานวิจัย ซึ่ง พบว่าเกิดจากการรั่วไหลของอากาศ (Leak) บริเวณรอยต่อ หรือเกิดการหมุนเวียนอย่างไม่ต่อเนื่อง หรือเกิดการอุดตันที่จุดวัดความดัน หลังจากการแก้ไขเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้วจึงได้รูปแบบความดัน อากาศตลอดโรเซอร์อย่างถูกต้องดังรูปที่ 4.2

รูปที่ 4.3 แสดงสัดส่วนช่องว่างอากาศตลอดความสูงของโรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที โดยมีอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งที่ความเร็วอากาศต่างๆ อยู่ในช่วง 72-80 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ พบว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจาก 7 ถึง 9 เมตรต่อวินาที สัดส่วนช่องว่างเพิ่มขึ้นทุกๆ ตำแหน่งตลอดความสูงของโรเซอร์ และเพิ่มขึ้นเมื่อ ความสูงของโรเซอร์เพิ่มขึ้น ที่ทุกๆ ความเร็วอากาศ เมื่อพิจารณาที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตร ต่อวินาที พบว่าทางด้านล่างของโรเซอร์มีสัดส่วนช่องว่างน้อยที่สุดและค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อความสูง ของโรเซอร์เพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ทางตอนกลางของโรเซอร์ (ความสูงประมาณ 200 เซนติเมตร) ลักษณะการไหลของเม็ดแก้วในโรเซอร์ที่เปลี่ยนจากการไหลแบบหนาแน่นทางด้านล่างเป็นการ ไหลแบบเบาบางทางด้านบน เรียกว่ารูปแบบการขนส่งแบบวัฏภาคหนาแน่น (Dense phase transport regime) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim S.W. (Kim S.W. และคณะ 1999) และที่ ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 และ 9 เมตรต่อวินาที พบว่ามีรูปแบบของสัดส่วนช่องว่างที่แตกต่างจาก รูปแบบสัดส่วนช่องว่างที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที โดยมีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S-Shape) โดยสามารถแบ่งโพรไฟล์เป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงเบดหนาแน่นทางด้านล่าง (Bottom dense section) ช่วงการเปลี่ยนแปลง (Transition section) และช่วงเบดเบาบางทางด้านบน (Dilute dense section) ช่วงการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่างช่วงเบดหนาแน่นทางด้านล่างและเบด เบาบางทางด้านบน

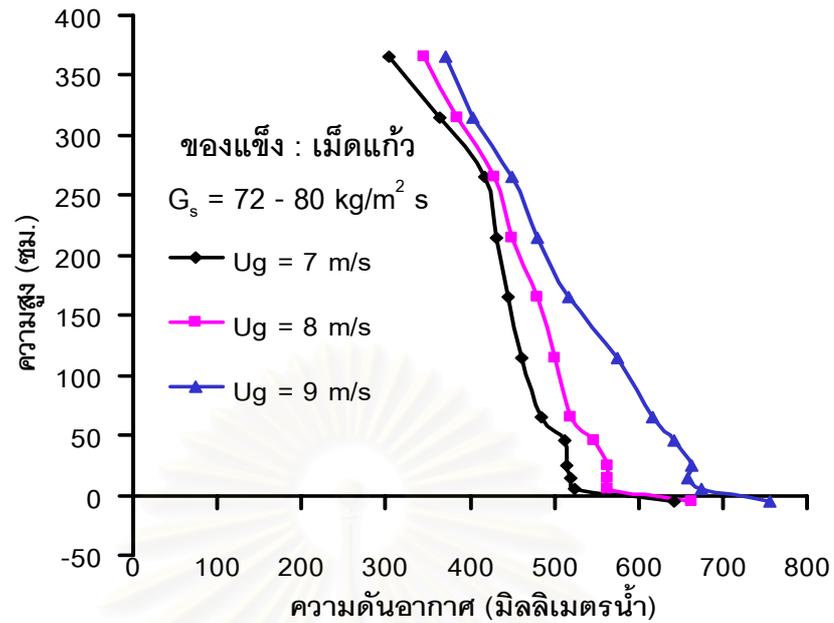
เมื่อพิจารณาในแต่ละช่วงการไหล พบว่าช่วงหนาแน่นทางด้านล่างมีสัดส่วนช่องว่างน้อย ที่สุด และค่อยๆ ลดลงเมื่อความสูงของช่วงหนาแน่นทางด้านล่างเพิ่มสูงขึ้น แสดงได้ว่าผลต่างของ ความดันอากาศต่อหนึ่งหน่วยความสูงมีค่าสูงสุด และค่อยๆ ลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับที่ป้อนกลับของเม็ดแก้วจึงทำให้มีการกระจายตัวของเม็ดแก้วอยู่อย่าง หนาแน่นสูงที่สุด และค่อยๆ ลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น

สำหรับช่วงการเปลี่ยนแปลง พบว่ามีรูปแบบสัดส่วนช่องว่างคงที่ตลอดแนวแกน เนื่องจากผลต่างของความดันอากาศต่อหนึ่งหน่วยความสูงคงที่ตลอดแนวแกน แสดงว่ามีการกระจายตัวของเม็ดแก้วสม่ำเสมอ

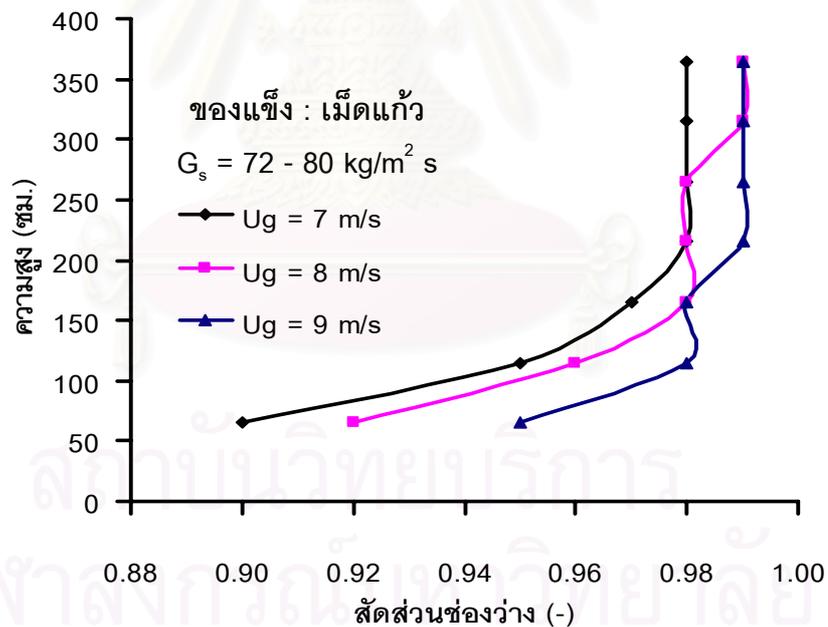
ในช่วงเบตเบาบางทางด้านบน พบว่ารูปแบบสัดส่วนช่องว่างคล้ายคลึงกับช่วงการเปลี่ยนแปลง แต่มีค่ามากกว่า เนื่องจากผลต่างของความดันอากาศต่อหนึ่งหน่วยความสูงของช่วงเบตเบาบางทางด้านบนลดลง แสดงว่ามีปริมาณของเม็ดแก้วลดลง

เมื่อพิจารณาผลของความเร็วอากาศต่อรูปแบบสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของไรเซอร์ของทั้งสองความเร็วอากาศ พบว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้เข้าสู่ช่วงการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้น และมีความกว้างของช่วงการเปลี่ยนแปลงลดลง โดยความกว้างของช่วงเบตเบาบางทางด้านบนเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 เมตรต่อวินาที พบช่วงการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ตำแหน่งความสูง 150-300 เซนติเมตร และช่วงเบตเบาบางทางด้านบนอยู่ที่ตำแหน่งความสูง 300-370 เซนติเมตร แต่ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที พบช่วงการเปลี่ยนแปลงอยู่ที่ตำแหน่งความสูง 100-200 เซนติเมตร และช่วงเบตเบาบางทางด้านบนที่ตำแหน่งความสูง 200-370 เซนติเมตร เนื่องจากความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นทำให้แรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag force) ที่กระทำต่อเม็ดแก้วเพิ่มขึ้น (Grace J.R., 1997) ดังนั้นเม็ดแก้วจึงมีการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับอากาศได้มากขึ้น จึงทำให้มีการกระจายตัวของเม็ดแก้วที่สม่ำเสมอตลอดแนวแกนมากขึ้น โดยรูปแบบสัดส่วนช่องว่างที่ความเร็วอากาศทั้งสองเป็นลักษณะพิเศษของขอบเขตฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง (Fast fluidization regime) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Monazam E.R. (Monazam E.R. และคณะ, 2005)

และจากรูปแบบสัดส่วนช่องว่างที่ความเร็วอากาศทั้งสาม สามารถแบ่งรูปแบบการไหลได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบการขนส่งแบบวิฏภาคหนาแน่น และฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu G. (Xu G. และคณะ, 2003) และ Issangya A.S. (Issangya A.S. และคณะ, 1999)



รูปที่ 4.2 ความดันอากาศตลอดความสูงของโรเซอริในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.3 สัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเซอริในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที

4.1.3 ผลของความเร็วดังกล่าวต่อความเร็วตามแนวแกนของเม็ดแก้ว

การทดลองนี้ศึกษาผลของความเร็วดังกล่าวที่มีต่อความเร็วของเม็ดแก้วตามความสูงของโรเตอร์ ที่ตำแหน่ง 30, 60, 180, 300 และ 370 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศตามลำดับ โดยสอดโพรบเข้าไปที่กึ่งกลางโรเตอร์ ดังรูปที่ 3.3 ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7, 8 และ 9 เมตรต่อวินาที อัตราการหมุนเวียนของของแข็งอยู่ระหว่าง 72-80 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที รูปที่ 4.4 แสดงความเร็วตามแนวแกนของเม็ดแก้ว ซึ่งมีรูปแบบคล้ายคลึงกันทุกความเร็วอากาศ จะเห็นว่าความเร็วตามแนวแกนของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น สามารถแบ่งโรเตอร์ออกได้เป็น 3 ช่วง ได้แก่ 1) ช่วงแรกบริเวณด้านล่างของโรเตอร์ (ความสูง 30 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ) พบว่าความเร็วของเม็ดแก้วต่ำที่สุด โดยเรียกช่วงนี้ว่า ช่วงทางด้านล่าง (Bottom section) 2) ช่วงหนาแน่นทางด้านล่าง (Bottom dense section) คือที่ความสูง 60 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ โดยความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจากช่วงทางด้านล่าง และ 3) ช่วงความเร่ง (Acceleration section) คือที่ความสูงระหว่าง 180-370 เซนติเมตร พบว่าความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้น สามารถอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้ดังนี้

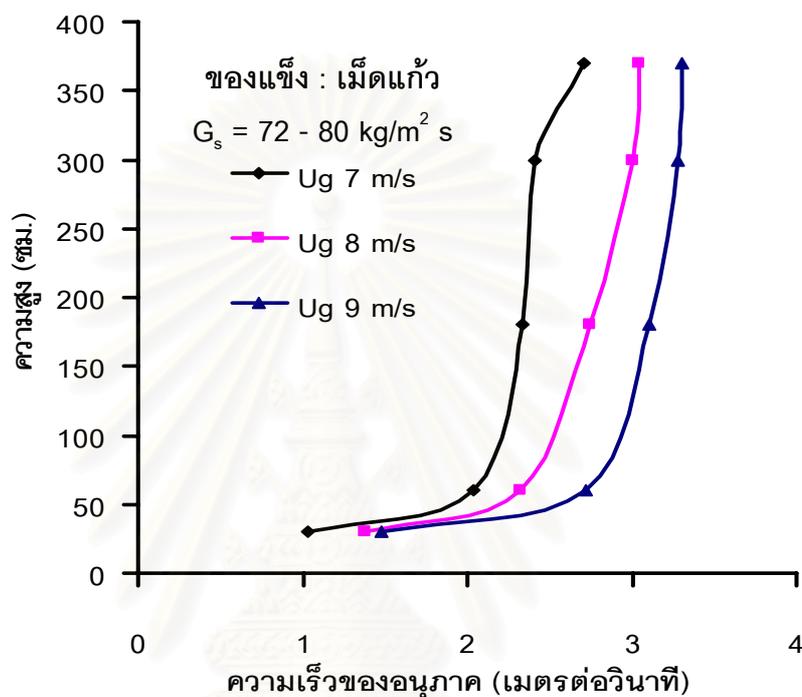
ในทางด้านล่างของโรเตอร์ ซึ่งเป็นบริเวณที่ต่ำกว่าตำแหน่งที่ป้อนกลับของของแข็ง ดังนั้นเม็ดแก้วส่วนใหญ่ที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณนี้คือเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ตกกลับลงมา จึงทำให้ความเร็วของเม็ดแก้วที่ช่วงด้านล่างของโรเตอร์ต่ำที่สุด

สำหรับช่วงหนาแน่นทางด้านล่างเป็นบริเวณที่สูงกว่าตำแหน่งป้อนกลับของเม็ดแก้ว ดังนั้นเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ผ่านส่วนใหญ่เป็นเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้น จึงทำให้ความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มสูงขึ้นจากช่วงทางด้านล่าง แต่ความเร็วของเม็ดแก้วในช่วงนี้ต่ำกว่าในช่วงความเร่ง เนื่องจากในช่วงหนาแน่นทางด้านล่างมีปริมาณของเม็ดแก้วมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.3 จึงมีการชนกันของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมากขึ้น ดังนั้นความเร็วของเม็ดแก้วในช่วงหนาแน่นทางด้านล่างจึงต่ำกว่าช่วงความเร่ง

และช่วงความเร่งมีการกระจายตัวของเม็ดแก้วตลอดความสูงของโรเตอร์ไม่เท่ากัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 โดยเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้นความหนาแน่นของเม็ดแก้วลดลง จึงมีการชนกันของเม็ดแก้วน้อยลงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานน้อยลง ดังนั้นความเร็วของเม็ดแก้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้น

รูปแบบการไหลของทั้งสามความเร็วดังกล่าวมีความสอดคล้องกับการทดลองของ Parssinen J.H. (Parssinen J.H. และคณะ, 2001) ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมันหนัก (FCC) ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 67 ไมครอน และความหนาแน่น 1500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นวัสดุเบด ในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีโรเตอร์สูง 1000 เซนติเมตร โดยแบ่งช่วงการไหลของของแข็งตลอดความสูงของโรเตอร์เป็น 4 ส่วน คือ 1) ช่วงหนาแน่นทาง

ด้านล่าง (Bottom dense section) 2) ช่วงการเปลี่ยนแปลงบริเวณกลางไรเซอร์ (Middle intermediate dense section) 3) ช่วงเบดเบาบางทางด้านบน (Dilute section) และ 4) ช่วงทางออก (Exit section) ส่วนในงานวิจัยนี้จากรูปที่ 4.4 สามารถแบ่งช่วงการไหลของของแข็งตลอดความสูงของไรเซอร์นี้ได้ 3 ช่วง ได้แก่ 1) ช่วงทางด้านล่าง 2) ช่วงหนาแน่นทางด้านล่าง และ 3) ช่วงความเร็ว



รูปที่ 4.4 ความเร็วเม็ดแก้วตลอดความสูงของไรเซอร์ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที

4.1.4 ความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้วตลอดความสูงของไรเซอร์

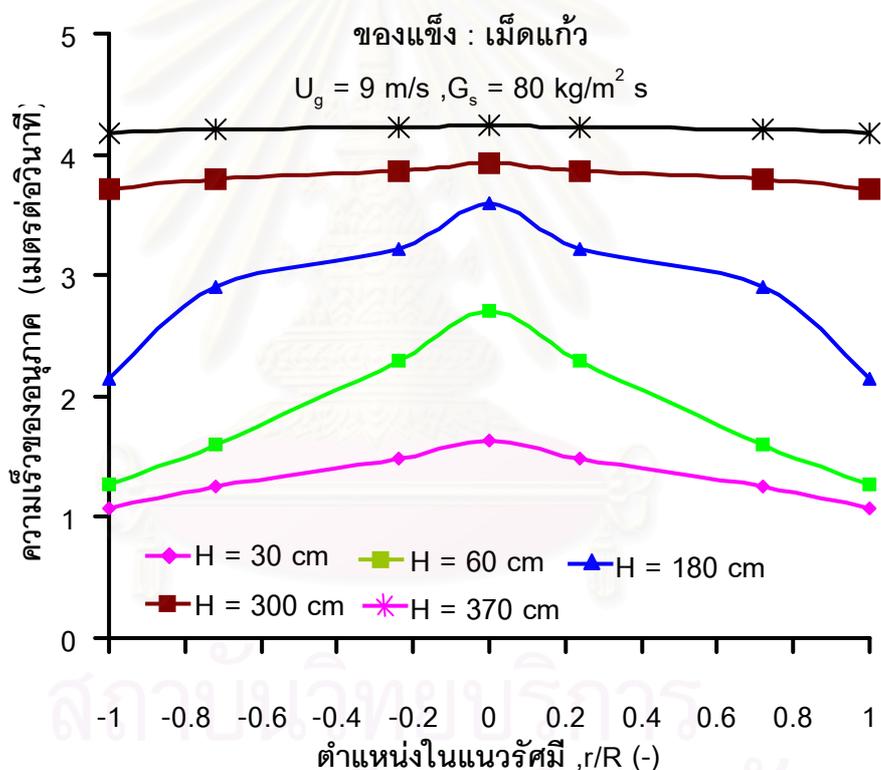
ตำแหน่งในแนวรัศมีที่ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว ได้แก่ 0, 0.6, 1.8 และ 2.5 เซนติเมตร จากกึ่งกลางไรเซอร์ ดังนั้นตำแหน่ง 2.5 เซนติเมตร จากกึ่งกลางคือที่ผนังของไรเซอร์นั่นเอง โดยตั้งสมมุติฐานว่าการเคลื่อนที่ของของแข็งมีลักษณะสมมาตร เช่น ตำแหน่งที่ 0.6 และ -0.6 จากกึ่งกลางไรเซอร์มีความเร็วเท่ากัน โดยอัตราส่วนระหว่างตำแหน่งต่างๆ ในแนวรัศมีต่อรัศมีของท่อไรเซอร์ หรือ r/R เท่ากับ $-1, -0.24, -0.72, 0, 0.24, 0.72$ และ 1 (Benyahia S. และคณะ, 2000)

รูปที่ 4.5 แสดงความเร็วตามแนวรัศมีที่อัตราส่วน r/R เท่ากับ $-1, -0.72, -0.24, 0, 0.24, 0.72$ และ 1 ที่ความสูง 30, 60, 180, 300 และ 370 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ เมื่อความเร็วอากาศคงที่เท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที และอัตราการหมุนเวียนของของแข็งเท่ากับ 80

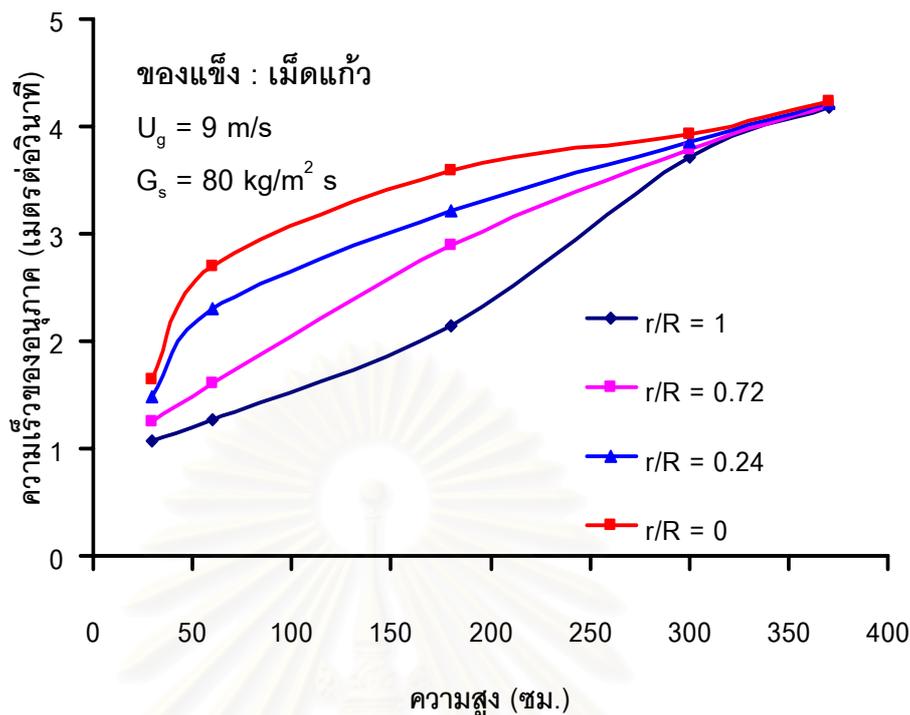
กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าที่ความสูง 30 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ ความเร็วของเม็ดแก้วสูงสุดบริเวณกึ่งกลางโรเตอร์และค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนัง โดยที่ผนังและบริเวณใกล้เคียง ($r/R = 1$ (-1) และ 0.72 (-0.72)) เม็ดแก้วมีความเร็วใกล้เคียงกัน ที่ตำแหน่ง 60 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ พบว่าเม็ดแก้วที่กึ่งกลางโรเตอร์และบริเวณใกล้เคียง ($r/R = 0$ และ 0.24 (-0.24)) มีความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ที่บริเวณผนังเม็ดแก้วยังมีความเร็วใกล้เคียงกับที่ตำแหน่งความสูง 30 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง 180 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ พบว่าความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันทุกตำแหน่งตามแนวรัศมี จะสังเกตเห็นว่าที่ตำแหน่งความสูง 60 และ 180 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ รูปแบบความเร็วในแนวรัศมีมีความแตกต่างของความเร็วบริเวณกึ่งกลางโรเตอร์และบริเวณผนังอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงรูปแบบการเคลื่อนที่ของของเม็ดแก้วเป็นแบบคอร์-แอนนูลาร์ โดยบริเวณคอร์มีปริมาณเม็ดแก้วอยู่อย่างเบาบางทำให้มีการชนกันของเม็ดแก้วน้อย จึงทำให้ความเร็วของเม็ดแก้วบริเวณคอร์สูงกว่าส่วนของแอนนูลาร์ซึ่งมีปริมาณเม็ดแก้วอยู่อย่างหนาแน่นทำให้เกิดการชนกันของเม็ดแก้วมากกว่าความเร็วของเม็ดแก้วบริเวณแอนนูลาร์จึงช้าลง สอดคล้องกับผลการวิจัยของคันทันนี (คันทันนี, 2005) ,Huilin L. (Huilin L. และคณะ, 2006) และ Gidaspow D. (Gidaspow D. และคณะ, 2004) ที่ความสูง 300 และ 370 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ พบว่าเม็ดแก้วมีความเร็วใกล้เคียงกันตลอดทั้งแนวรัศมี เนื่องจากบริเวณนี้มีความหนาแน่นของเม็ดแก้วต่ำที่สุด โอกาสที่เม็ดแก้วจะรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือคลัสเตอร์(Cluster) ลดลง อนุภาคเกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดแนวรัศมี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Parssinen J.H. (Parssinen J.H. และคณะ 2005) ที่อธิบายไว้ว่าบริเวณที่มีปริมาณของอนุภาคอยู่อย่างหนาแน่นจะมีโอกาสเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือคลัสเตอร์ของอนุภาคมากขึ้น เมื่อสังเกตรูปแบบความเร็วตลอดแนวรัศมีจนถึงด้านบนของโรเตอร์ พบว่าบริเวณคอร์ขยายบริเวณจากกึ่งกลางโรเตอร์ไปยังผนังโรเตอร์เมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Bai D. (Bai D. และคณะ, 1995) ที่ใช้ตัวเร่งปฏิบัติการแตกตัวของไอน้ำมัน (FCC) เป็นวัสดุเบด ในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีโรเตอร์สูง 3 เมตร

รูปที่ 4.6 แสดงความเร็วเม็ดแก้วตลอดความสูงของโรเตอร์ ที่อัตราส่วน r/R เท่ากับ 0, 0.24, 0.72 และ 1 เมื่อความเร็วอากาศคงที่เท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที และอัตราการหมุนเวียนของแข็งเท่ากับ 80 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าที่กึ่งกลางโรเตอร์และบริเวณใกล้เคียง ($r/R = 0$ และ 0.24) ความเร็วเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ตำแหน่ง 60 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ โดยความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มขึ้น และความเร็วของเม็ดแก้วเริ่มคงที่ที่ตำแหน่ง 300 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ บริเวณใกล้ผนัง ($r/R = 0.72$) พบว่าความเร็วของเม็ดแก้วที่ตำแหน่ง 30 และ 60 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ เพิ่มขึ้น

เล็กน้อยหรือเกือบคงที่ โดยความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ตำแหน่งความสูง 180 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ และบริเวณผนังไรเซอร์ ($r/R = 1$) ความเร็วของเม็ดแก้วเกือบคงที่ที่ตำแหน่งต่ำกว่า 300 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ โดยที่ตำแหน่ง 300 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ ความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ตำแหน่งกึ่งกลางไรเซอร์พบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วด้วยความเร่งตั้งแต่ทางด้านล่างของไรเซอร์ โดยบริเวณใกล้เคียงผนังไรเซอร์ พบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วด้วยความเร่งที่ตอนกลางของไรเซอร์ และบริเวณผนังพบการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วด้วยความเร่งที่ด้านบนของไรเซอร์ นั้นแสดงได้ว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วด้วยความเร่งจากการสัมผัสกันระหว่างเม็ดแก้วและอากาศเริ่มที่บริเวณกึ่งกลางไรเซอร์ และขยายไปยังผนังไรเซอร์เมื่อความสูงของไรเซอร์เพิ่มขึ้น Parssinen J.H.(Parssine J.H. และคณะ, 2005)



รูปที่ 4.5 ความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้วในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่ตำแหน่งความสูง 30, 60, 180, 300 และ 370 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ ที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที

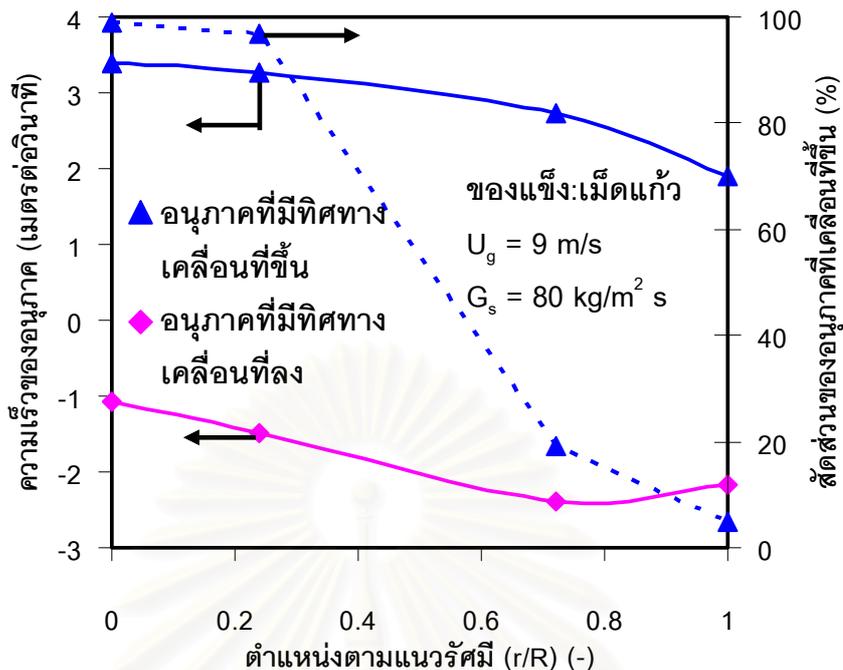


รูปที่ 4.6 ความเร็วเม็ดแก้วตลอดความสูงโรเตอร์ ที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมี ที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที

4.1.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วภายในโรเตอร์

รูปที่ 4.7 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ และสัดส่วนของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นตลอดแนวรัศมี โดยใช้แผ่นสี ที่ตำแหน่งความสูง 180 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ เมื่อความเร็วอากาศคงที่เท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที และอัตราการหมุนเวียนของของแข็งเท่ากับ 80 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที เหตุผลในการเลือกตำแหน่งความสูง 180 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ เนื่องจากในหัวข้อที่ 4.1.3 ได้สรุปว่าที่ตำแหน่งความสูง 180 เซนติเมตร เกิดการไหลแบบคอร์-แอนนูลาร์ ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันจึงได้ทำการศึกษาถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่ตำแหน่งความสูงนี้ จากรูปที่ 4.7 พบว่าเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นมีความเร็วสูงสุดที่บริเวณกึ่งกลางโรเตอร์ และค่อยลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนังโรเตอร์ แต่สำหรับเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลง มีรูปแบบความเร็วตามแนวรัศมีแตกต่างออกไป คือ บริเวณกึ่งกลางโรเตอร์เม็ดแก้วเคลื่อนที่ลงด้วยความเร็วต่ำสุด และค่อยเพิ่มขึ้นเมื่อใกล้ผนังโรเตอร์ แต่ลดลงอีกครั้งที่บริเวณผนังโรเตอร์ และเมื่อพิจารณาสัดส่วนของอนุภาคที่เคลื่อนที่ขึ้นและลงตลอดแนวรัศมี พบว่าบริเวณกึ่งกลางโรเตอร์ ($r/R = 0$ และ 0.24) เม็ดแก้วเคลื่อนที่ขึ้นประมาณร้อยละ 97-99 โดยบริเวณผนังโรเตอร์ ($r/R = 0.72$ และ 1) เม็ดแก้วเคลื่อนที่ขึ้นประมาณร้อยละ 5-20 จะเห็นได้ว่าบริเวณกึ่งกลางโรเตอร์เม็ดแก้วส่วนใหญ่เคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่บริเวณผนังโรเตอร์เม็ดแก้วส่วนใหญ่เคลื่อนที่ลง เนื่องจากในการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นมีแรงที่กระทำกับ

อนุภาค คือ แรงจากแรงโน้มถ่วง (Gravity Force) แรงลอยตัว (Buoyancy Force) และแรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag Force) (Grace J.R., และคณะ,1997 และ Parsinen J.H. และคณะ,2005) โดยในตอนที 4.1.3 สรุปไว้ว่าที่ตำแหน่งความสูงเท่ากับ 180 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศเกิดการการไหลแบบคอร์-แอนนูลาร์ ซึ่งที่บริเวณผนังและบริเวณใกล้เคียง ($r/R = 1$ และ 0.72 ตามลำดับ) เป็นการไหลแบบแอนนูลาร์ มีความหนาแน่นของเม็ดแก้วสูง ดังนั้นเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่บริเวณแอนนูลาร์จึงมีโอกาสรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือคลัสเตอร์ (Benyahia S. และคณะ, 2000) โดยขนาดของแรงโน้มถ่วงของโลกขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ดังนั้นอนุภาคที่อยู่ในบริเวณแอนนูลาร์จึงมีแรงกระทำจากแรงโน้มถ่วงของโลกเพิ่มขึ้น และผลเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนที่ลดลง (Parsinen J.H. และคณะ, 2005) จึงทำให้เม็ดแก้วเคลื่อนที่ลงเป็นส่วนใหญ่ โดยความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ขึ้นลดลง และความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนลงเพิ่มขึ้น แต่ที่บริเวณผนังมีความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลงลดลงจากบริเวณใกล้เคียงอาจเนื่องมาจากแรงเสียดทานของเม็ดแก้วกับผนัง สำหรับบริเวณกึ่งกลางไรเซอร์และบริเวณใกล้เคียง ($r/R = 0$ และ 0.24 ตามลำดับ) ความเร็วอากาศมีความเร็วสูงกว่าบริเวณผนังเนื่องจากการไหลแบบคอร์ และมี ความหนาแน่นของเม็ดแก้วต่ำ ดังนั้นเม็ดแก้วบริเวณคอร์มีโอกาสรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือคลัสเตอร์ลดลง ซึ่งทำให้แรงที่กระทำจากแรงโน้มถ่วงของโลกลดลง โดยผลของแรงต้านการเคลื่อนที่และแรงลอยตัวเพิ่มขึ้น (Grace J.R. และคณะ,1997) จึงทำให้เม็ดแก้วส่วนใหญ่เคลื่อนที่ขึ้นโดยความเร็วของเม็ดแก้วที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นมากกว่าบริเวณแอนนูลาร์ และความเร็วของเม็ดแก้วที่เคลื่อนที่ลงน้อยกว่าบริเวณแอนนูลาร์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Zhou J.(Zhou J. และคณะ, 1995) ที่ใช้ทรายเป็นวัสดุเบด ในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีไรเซอร์สูง 9.4 เมตร



รูปที่ 4.7 ความเร็วของเม็ดแก้วในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ ที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นและลง และสัดส่วนของเม็ดแก้วที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้น ในตำแหน่งความสูง 180 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที

4.2 ผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว โดยในการทดลองได้ผสมเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน (HDPE) 5% โดยปริมาตรในเม็ดแก้วที่มีปริมาณเริ่มต้น 10 กิโลกรัม

4.2.1 ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันและสัดส่วนช่องว่าง

รูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบความดันอากาศตลอดความสูงของโรเตอร์ของระบบที่มีและไม่มี การผสมเม็ดพลาสติก ที่ความเร็วอากาศ 7.8 และ 9 เมตรต่อวินาที พบอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกอยู่ในช่วง 97-106 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที เมื่อพิจารณารูปแบบความดันอากาศภายในโรเตอร์ของระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกพบว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นความดันของอากาศภายในโรเตอร์เพิ่มขึ้น แต่ความดันของอากาศลดลงเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มขึ้นที่ทุกความเร็วอากาศ ซึ่งมีรูปแบบคล้ายคลึงกับระบบที่ไม่มี การผสมเม็ดพลาสติก แต่จะเห็นว่าความชันของเส้นกราฟความดันของอากาศของระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกมากกว่าความชันของเส้นกราฟของระบบที่ไม่มี การผสมเม็ดพลาสติก นั่นคือความดันลดต่อมโรเตอร์ในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกน้อยกว่าในระบบที่ไม่มี การผสมเม็ดพลาสติก แสดง

ได้ว่าอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยให้เม็ดแก้วสะสมอยู่ทางด้านล่างลดลง และเม็ดแก้วเคลื่อนที่ขึ้นไปทางด้านบนของโรเตอร์เพิ่มขึ้น (Choi J.-H. และคณะ, 1995)

รูปที่ 4.9 แสดงสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเตอร์ของระบบเม็ดแก้วที่มีและไม่มี การผสมเม็ดพลาสติก ที่ความเร็วอากาศ 7.8 และ 9 เมตรต่อวินาที โดยอัตราการหมุนเวียนของ ของแข็งของระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกอยู่ในช่วง 97-106 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าสามารถแบ่งรูปแบบการไหลของเม็ดแก้วที่ความเร็วอากาศต่างๆ ได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ ที่ ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที พบรูปแบบการขนส่งแบบเบดหนาแน่น และที่ความเร็ว อากาศเท่ากับ 8 และ 9 เมตรต่อวินาที พบรูปแบบการขนส่งแบบฟลูอิโดซ์เบดที่สภาวะความเร็วสูง ซึ่งได้อธิบายไว้ในตอนที่ 4.1.2 เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างของระบบเม็ดแก้วที่มีและไม่มี การผสมเม็ดพลาสติก โดยแบ่งช่วงการพิจารณาออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงทางด้านล่างของโรเตอร์ ช่วงกึ่งกลางโรเตอร์ และช่วงทางด้านบนของโรเตอร์

ในทางด้านล่างของโรเตอร์ (ที่ตำแหน่งความสูง 60 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ) โดยระหว่างการทดลองสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าอย่างชัดเจนว่าปริมาณของเม็ดแก้วทาง ด้านล่างของโรเตอร์ ในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกมีปริมาณของเม็ดแก้วน้อยกว่าระบบที่ไม่มี การผสมเม็ดพลาสติก โดยสอดคล้องกับสัดส่วนช่องว่างที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งพบว่าใน ระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกมีค่าสัดส่วนช่องว่างทางด้านล่างของโรเตอร์มากกว่าระบบที่ไม่มี การผสมเม็ดพลาสติก (ยกตัวอย่างเช่น ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที ในระบบที่ไม่มี การผสมเม็ดพลาสติกพบว่าสัดส่วนช่องว่างทางด้านล่างของโรเตอร์อยู่ในช่วง 0.90 ซึ่งในระบบที่มี การผสมเม็ดพลาสติกอยู่ในช่วง 0.94) และเมื่อพิจารณาบริเวณกึ่งกลางและที่ด้านบนโรเตอร์ พบว่าสัดส่วนช่องว่างของทั้งสองระบบคล้ายคลึงกัน อาจเนื่องมาจากอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยลด การรวมกลุ่มกันของเม็ดแก้ว โดยเฉพาะบริเวณทางด้านล่างของโรเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่มีปริมาณของ เม็ดแก้วอยู่อย่างหนาแน่น จึงทำให้เม็ดแก้วสามารถเคลื่อนที่ภายในอากาศได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้การ สะสมเม็ดแก้วที่บริเวณด้านล่างโรเตอร์ลดลง และเคลื่อนที่ขึ้นไปทางด้านบนโรเตอร์เพิ่มขึ้น โดย บริเวณกึ่งกลางและทางด้านบนโรเตอร์มีการสะสมของเม็ดแก้วเบาบางกว่าที่ด้านล่างของโรเตอร์ จึงไม่ค่อยเห็นผลการเปลี่ยนแปลงมากนัก และซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kim S.H. (Kim S.H. และคณะ, 1999) ที่ทำการศึกษาผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของ อนุภาคขนาดเล็ก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของเม็ดแก้วที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ ที่ผสมในผงพอลิเอทิลีน และพีวีซี ซึ่งอนุภาคมีขนาดเล็ก สำหรับบริเวณกึ่งกลางและด้านบนของโรเตอร์

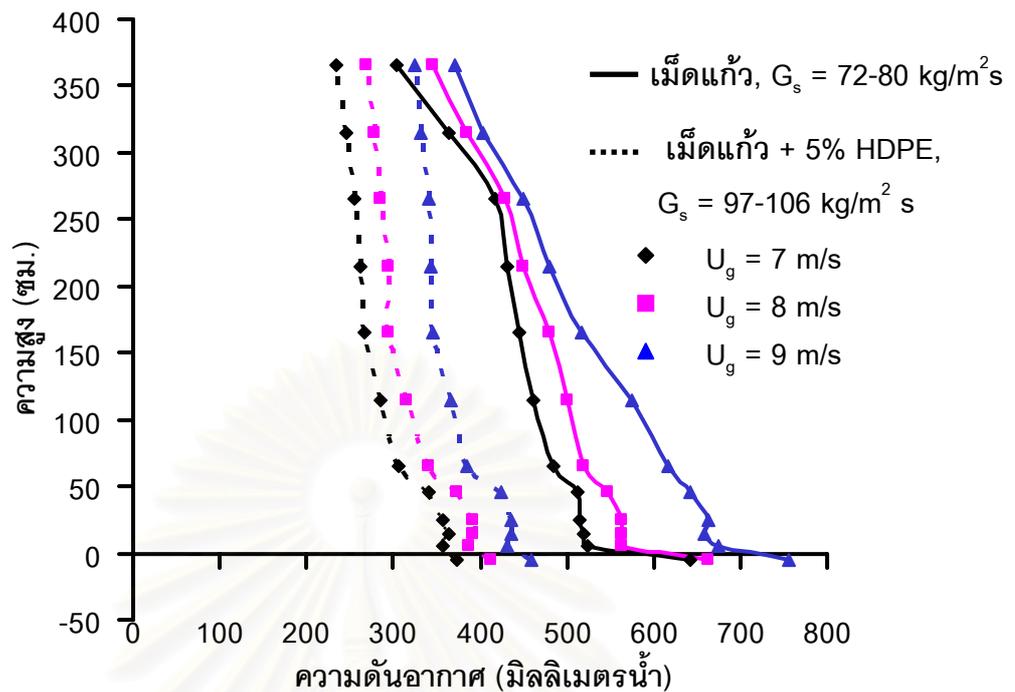
เมื่อพิจารณาที่ความเร็วอากาศ 7 เมตรต่อวินาที พบว่าที่ระบบของเม็ดแก้วที่มีการผสม เม็ดพลาสติกมีช่วงเบดหนาแน่นทางด้านล่างอยู่ในช่วงความสูง 50-150 เซนติเมตร จากตัว กระจายอากาศ สำหรับระบบของเม็ดแก้วที่ไม่มีส่วนผสมเม็ดพลาสติกมีช่วงเบดหนาแน่นทาง

ด้านล่างอยู่ในช่วงความสูง 50-200 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงเบดหนาแน่นทางด้านล่างในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกมีความกว้างน้อยกว่าในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติก

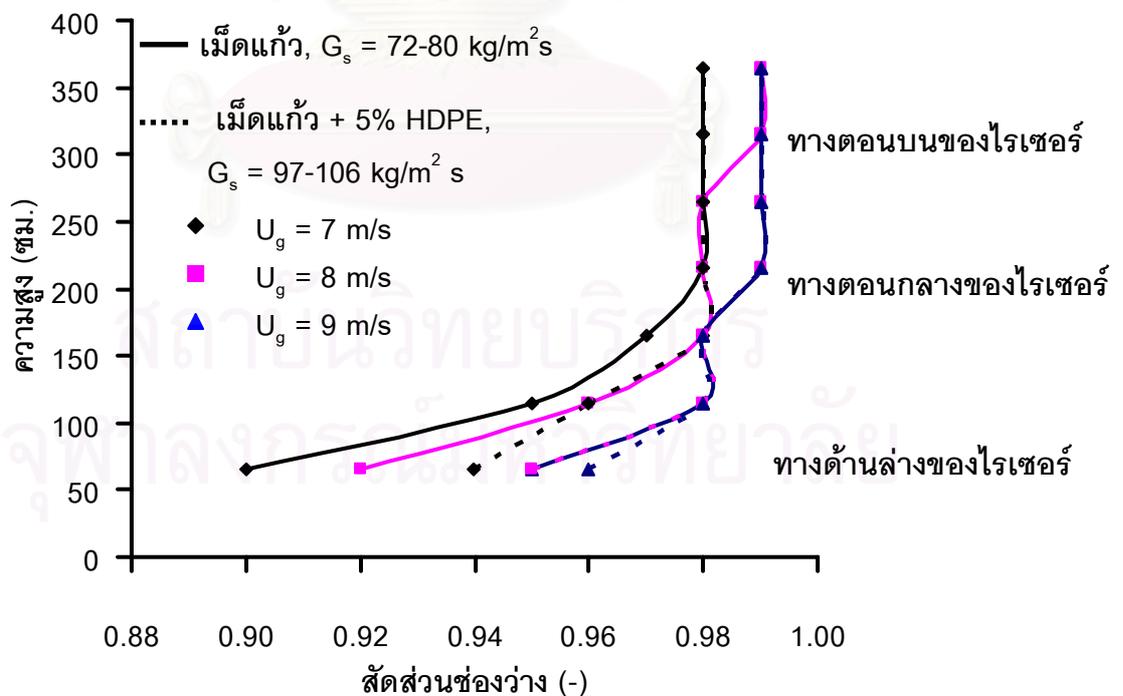
และที่ความเร็วอากาศ 8 และ 9 เมตรต่อวินาที สำหรับระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติก มีช่วงการเปลี่ยนแปลง ที่ตำแหน่งความสูง 65-200 เซนติเมตร ในทั้งสองความเร็วอากาศ โดยที่ระบบที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก มีช่วงการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 100-300 เซนติเมตร ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 เมตรต่อวินาที และอยู่ในช่วงที่ 65-200 เซนติเมตร ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที ดังนั้นจะเห็นได้ว่ารูปแบบสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 8 เมตรต่อวินาที ในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติก มีรูปแบบคล้ายคลึงกับรูปแบบสัดส่วนช่องว่างที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที ของระบบที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการผสมเม็ดพลาสติกในระบบของเม็ดแก้วทำให้รูปแบบการไหลของเม็ดแก้วคล้ายคลึงกับรูปแบบการไหลของเม็ดแก้วที่ความเร็วอากาศที่สูงกว่าในระบบที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก หรือมีการพัฒนารูปแบบการไหลที่เร็วขึ้น (Fast flow develop) แต่รูปแบบสัดส่วนช่องว่างที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที ของระบบที่มีและไม่มีการผสมเม็ดพลาสติกคล้ายคลึงกัน อาจเนื่องมาจากที่ความเร็วอากาศนี้มีการกระจายตัวของเม็ดแก้วภายในโรเตอร์อยู่อย่างเบาบาง ดังนั้นจึงไม่เห็นผลการเปลี่ยนแปลงมากนัก

จากการเปรียบเทียบรูปแบบสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเตอร์ ในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วภายในโรเตอร์ของระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกมีการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น เนื่องจากมีความกว้างของช่วงเบดหนาแน่นลดลง โดยมีความกว้างของช่วงเบดเบาบางทางด้านบนเพิ่มขึ้น และมีการพัฒนารูปแบบการไหลที่เร็วขึ้น ซึ่งแสดงว่าอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยให้เม็ดแก้วเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.8 ความดันอากาศตลอดความสูงของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ และเม็ดแก้ว-เม็ดพลาสติก -อากาศ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที



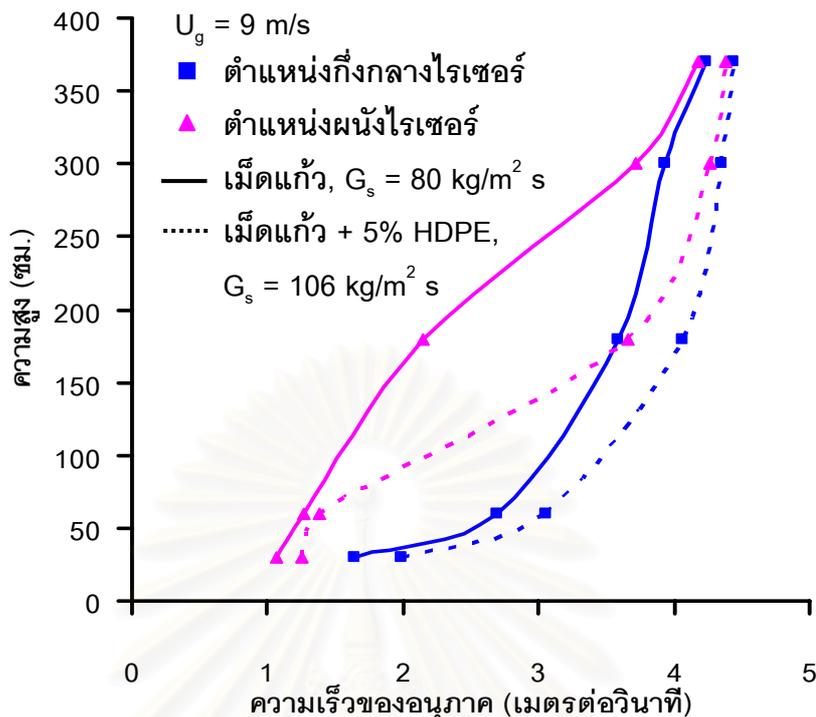
รูปที่ 4.9 สัดส่วนช่องว่างของอากาศตลอดความสูงของโรเตอร์ของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-เม็ดพลาสติก -อากาศ ที่ความเร็วอากาศในช่วง 7-9 เมตรต่อวินาที

4.2.2 ผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่อความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูงไรเซอร์

รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูงของไรเซอร์ระหว่างระบบที่มีและไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก ณ บริเวณกึ่งกลางและผนังไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที โดยอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบที่มีและไม่มีการผสมเม็ดพลาสติกเท่ากับ 106 และ 80 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ สาเหตุที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งทั้งสองระบบไม่เท่ากัน โดยระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกมีอัตราการหมุนเวียนของของแข็งมากกว่าระบบที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติกประมาณร้อยละ 32 นั้นแสดงให้เห็นว่าการผสมเม็ดพลาสติกทำให้การไหลของเม็ดแก้วดีขึ้น ที่ช่องเปิดของวาล์วควบคุมการป้อนกลับของเม็ดแก้วที่ท่อส่งผ่านคองที่ ซึ่งได้ทดลองทำการควบคุมอัตราการหมุนเวียนของของแข็งของระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกให้เท่ากับ 80 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าภายในไรเซอร์มีปริมาณของเม็ดแก้วอยู่อย่างเบาบาง ทำให้การเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วภายในไรเซอร์ไม่ได้อยู่ในขอบเขตของฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง ซึ่งเป็นรูปแบบการไหลที่ต้องการในงานวิจัยนี้

เมื่อพิจารณารูปแบบความเร็วตลอดความสูงของไรเซอร์ที่บริเวณกึ่งกลางไรเซอร์ พบว่ามีรูปแบบเช่นเดียวกันกับในระบบที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก และสามารถแบ่งช่วงการไหลของเม็ดแก้วภายในไรเซอร์ได้ 3 ช่วงเช่นเดียวกัน ได้แก่ ช่วงทางด้านล่าง ช่วงหนาแน่นทางด้านล่าง และช่วงความเร่ง ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.1.3

เมื่อพิจารณาที่รูปแบบความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูงของไรเซอร์ที่บริเวณผนัง พบว่าในระบบที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติกความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ที่ตำแหน่งความสูง 300 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ โดยความเร็วของเม็ดแก้วที่บริเวณกึ่งกลางไรเซอร์และบริเวณผนังมีความเร็วใกล้เคียงกันที่ตำแหน่งความสูงนี้ แต่ในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกพบว่าความเร็วของเม็ดแก้วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ตำแหน่งความสูง 180 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ และพบว่าความเร็วของเม็ดแก้วที่บริเวณผนังและบริเวณกึ่งกลางไรเซอร์มีค่าใกล้เคียงกันที่ตำแหน่งความสูงนี้ ซึ่งเห็นได้ว่าในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกความเร็วของเม็ดแก้วใกล้เคียงกันตลอดแนวรัศมีที่ตำแหน่งความสูงลดลง แสดงได้ว่าอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยทำให้ลักษณะการไหลของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีมีความสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากลักษณะการไหลของอนุภาคขนาดใหญ่มีทิศทางเคลื่อนที่ลง จึงมีการเคลื่อนที่บริเวณผนังท่อ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Hirschberg B. (Hirschberg B. และคณะ, 1998) ซึ่งอธิบายว่าของแข็งขนาดใหญ่ที่ผสมอยู่นั้น ส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ลงอยู่บริเวณผนังมากกว่าที่จะเคลื่อนที่ขึ้นที่บริเวณกึ่งกลางท่อ ดังนั้นการมีอนุภาคขนาดใหญ่ที่บริเวณผนัง จึงทำให้เม็ดแก้วที่มีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือคลัสเตอร์ (cluster) บริเวณผนังเกิดการแตกออกเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กลงจึงทำให้เคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น



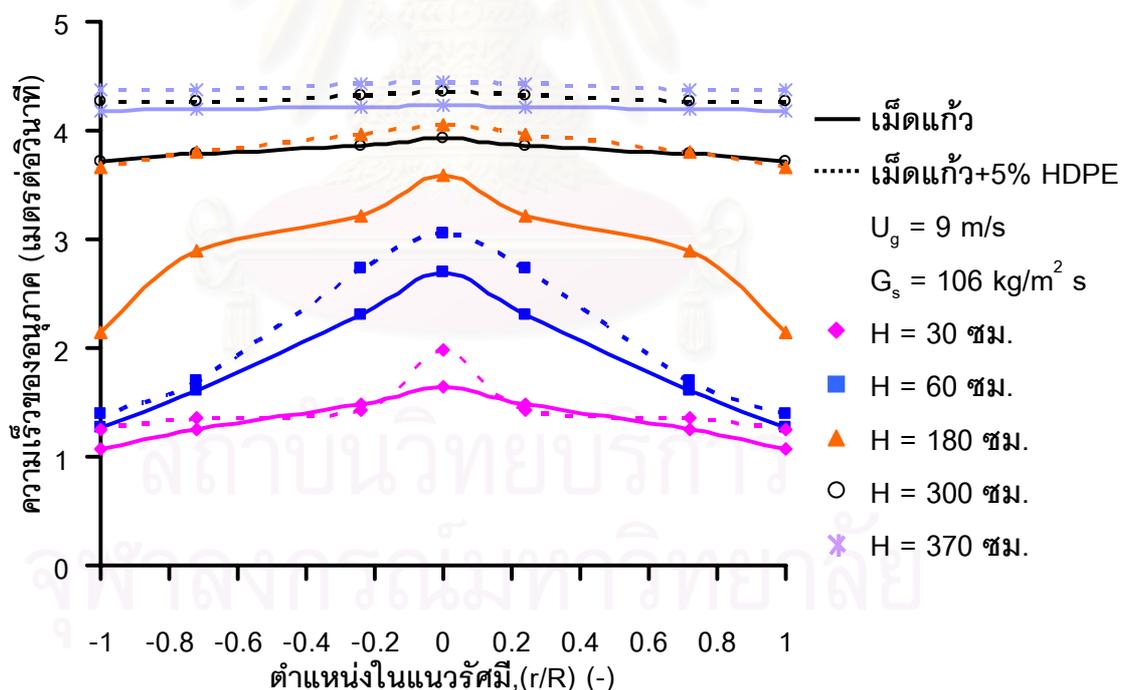
รูปที่ 4.10 ความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูงของไรเซออร์ในระบบที่มีและไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก (HDPE) 5% โดยปริมาตร ที่บริเวณกึ่งกลางและผนังของท่อไรเซออร์ ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที

4.2.3 ผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่อความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้ว

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้วในระบบที่มีและไม่มีส่วนผสมเม็ดพลาสติก ที่ 5 ตำแหน่งตามแนวความสูงของไรเซออร์ และความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที โดยอัตราการหมุนเวียนของของแข็งของระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกเท่ากับ 106 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที และสำหรับระบบที่ไม่มีส่วนผสมเม็ดพลาสติกเท่ากับ 80 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าทางด้านล่างไรเซออร์ ได้แก่ ที่ตำแหน่งความสูง 30 และ 60 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ ความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้วในระบบที่มีและไม่มีส่วนผสมเม็ดพลาสติก มีรูปแบบความเร็วที่คล้ายคลึงกัน แต่ที่ตำแหน่งความสูง 180 เซนติเมตร รูปแบบความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้วในระบบที่มีและไม่มีส่วนผสมเม็ดพลาสติก มีความแตกต่างกันอย่างมาก โดยในระบบที่มีเฉพาะเม็ดแก้วบริเวณกึ่งกลางไรเซออร์เม็ดแก้วมีความเร็วมากที่สุดและลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนัง แต่ในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติก พบว่าเม็ดแก้วมีความแตกต่างของความเร็วในแนวรัศมีเพียงเล็กน้อย ส่วนทางด้านบนไรเซออร์ รูปแบบความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้วของทั้งสองระบบมีรูปแบบคล้ายคลึงกัน โดยความเร็วของเม็ดแก้วในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกสูงกว่าความเร็วของเม็ดแก้วในระบบที่ไม่มีส่วนผสมเม็ดพลาสติกทุกๆ ตำแหน่ง แสดงถึง

ผลของอนุภาคขนาดใหญ่มีผลต่อรูปแบบความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้วที่ตำแหน่งกึ่งกลางและด้านบนของโรเตอร์ เนื่องจาก ทางด้านล่างโรเตอร์เม็ดแก้วอยู่กันอย่างหนาแน่น ทำให้มีการชนกันของอนุภาค เกิดการสูญเสียพลังงาน ถึงแม้ว่าการมีอยู่ของอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยลดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วภายในอากาศได้ง่าย แต่เม็ดแก้วก็ยังเกิดการชนกันเองโดยเฉพาะบริเวณผนังโรเตอร์ ดังนั้นความเร็วของระบบเม็ดแก้วที่มีการผสมเม็ดพลาสติกสูงกว่าระบบที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติกเฉพาะบริเวณกึ่งกลางโรเตอร์

สำหรับทางด้านบนของโรเตอร์ ในระบบของเม็ดแก้วที่มีการผสมเม็ดพลาสติก มีการกระจายตัวของอนุภาคเป็นอนุภาคขนาดเดียวกันตลอดทั้งแนวรัศมีมากขึ้น ไม่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน เนื่องจากเม็ดพลาสติกที่ผสมในระบบเม็ดแก้วส่วนใหญ่จะมีการเคลื่อนที่อยู่บริเวณผนังโรเตอร์ เป็นผลทำให้คัลล์เตอร์ของเม็ดแก้วที่บริเวณผนังโรเตอร์แตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก โดยอนุภาคขนาดเล็กส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ขึ้น (Hirschberg B. และคณะ, 1998) ดังนั้นจึงทำให้รูปแบบความเร็วตามแนวรัศมีที่ตำแหน่งความสูง 180 เซนติเมตร จากตัวกระจายอากาศ ในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกมีรูปแบบความเร็วตลอดแนวรัศมีเป็นเส้นตรง หรือมีความเร็วเท่ากันตลอดทั้งแนวรัศมี



รูปที่ 4.11 ความเร็วตามแนวรัศมีของเม็ดแก้วในระบบที่มีและไม่มีส่วนผสมเม็ดพลาสติกที่ตำแหน่งความสูง 5 ตำแหน่ง จากตัวกระจายอากาศ ที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที

4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับงานวิจัยอื่น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามวลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Kim S.H.(Kim S.H. และคณะ, 1999) ที่ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่อการกวัดไกว (Fluctuation) ของความดันภายในโรเซออร์ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบรายละเอียดการทดลองระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Kim S.H. (Kim S.H.และคณะ,1999)

รายละเอียดการทดลอง	Kim S.H. (1999)	ข้ออำเภอ (2006)
อนุภาคขนาดเล็กที่ใช้ในงานวิจัย (Fine particle)	ผงพลาสติกพอลิเอทิลีน ($d_p=538 \mu\text{m}, \rho_p=370 \text{ kg/m}^3 \text{ s}$) และพอลิไวนิลคลอไรด์ ($d_p=109 \mu\text{m}, \rho_p=530 \text{ kg/m}^3 \text{ s}$)	เม็ดแก้ว ($d_p=512 \mu\text{m}, \rho_p=2200 \text{ kg/m}^3 \text{ s}$)
อนุภาคขนาดใหญ่ที่ใช้ในงานวิจัย (Coarse particle)	เม็ดแก้ว($d_p=2000 \mu\text{m}, \rho_p=1560 \text{ kg/m}^3 \text{ s}$)	เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูง (HDPE, $d_p=4472 \mu\text{m}, \rho_p=860 \text{ kg/m}^3 \text{ s}$)
ขนาดของโรเซออร์	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 5 เซนติเมตร และสูง 250 เซนติเมตร	เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน เท่ากับ 5 เซนติเมตร และสูง 400 เซนติเมตร
ปริมาณของอนุภาคขนาดใหญ่ที่ผสม	ร้อยละ 5 โดยปริมาตรของอนุภาคขนาดเล็ก	ร้อยละ 5 โดยปริมาตรของอนุภาคขนาดเล็ก
สภาวะการทดลอง	ความเร็วอากาศ 1.3-1.6 เมตรต่อวินาที	ความเร็วอากาศ 7-9 เมตรต่อวินาที
ตัวแปรที่ทำการศึกษา	การกวัดไกวของความดันภายในโรเซออร์ (Pressure fluctuation)	1) สัดส่วนช่องว่าง 2) ความเร็วของอนุภาคขนาดเล็ก
ผลการทดลอง	การผสมอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้การกวัดไกวของความดันภายในโรเซออร์ลดลง	การผสมอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้ความเร็วของอนุภาคขนาดเล็กตามแนวรัศมีมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (ไมครอน, μm)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที, $\text{kg/m}^3 \text{ s}$)

จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Kim S.H. ซึ่งได้ใช้ของแข็งที่เป็นวัสดุเบดแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 แต่พบว่าผลการทดลองที่ได้ในงานวิจัยมีความสอดคล้องกัน นั่นคือการผสมอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยทำให้การไหลของอนุภาคขนาดเล็กภายในไรเซอร์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยลดการรวมตัวของอนุภาคขนาดเล็กเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือคลัสเตอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน ได้แก่ ตอนที่ 1 ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วในระบบที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก และตอนที่ 2 ศึกษาถึงผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้วในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติก ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

ตอนที่ 1 อุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว

- ความดันอากาศภายในโรเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น แต่ความดันอากาศภายในโรเตอร์ลดลงตามความสูงของโรเตอร์ที่เพิ่มสูงขึ้น
- สัดส่วนช่องว่างภายในโรเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศ และความสูงของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้น โดยสามารถแบ่งรูปแบบการไหลของเม็ดแก้วภายในโรเตอร์ในช่วงความเร็วอากาศเท่ากับ 7-9 เมตรต่อวินาที ได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การขนส่งแบบเบตหนาแน่น (Dense phase transport regime) และการขนส่งแบบฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูง (Fast fluidization regime)
- ความเร็วของเม็ดแก้วตลอดแนวแกนของโรเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศ และความสูงของโรเตอร์เพิ่มขึ้น โดยสามารถแบ่งช่วงการไหลตลอดแนวแกนของโรเตอร์ได้ทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ 1) ช่วงทางด้านล่าง (Bottom section) 2) ช่วงความหนาแน่นทางด้านล่าง (Bottom dense section) และ 3) ช่วงความเร่ง (Acceleration section)
- รูปแบบความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีมีการกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มสูงขึ้น

ตอนที่ 2 ผลของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของเม็ดแก้ว

- ความดันอากาศภายในโรเตอร์ในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกมีรูปแบบคล้ายคลึงกับระบบที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก แต่พบว่าความดันลดคร่อมภายในโรเตอร์ในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกต่ำกว่าระบบที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก
- ในระบบของเม็ดแก้วที่มีการผสมเม็ดพลาสติกพบว่าสัดส่วนช่องว่างทางด้านล่างของโรเตอร์มากกว่าในระบบของเม็ดแก้วที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก โดยสามารถแบ่งรูปแบบ

การไหลของเม็ดแก้วในช่วงความเร็วอากาศ 7-9 เมตรต่อวินาที ได้เช่นเดียวกับระบบของเม็ดแก้วที่ไม่มีการผสมเม็ดพลาสติก

- ในระบบที่มีการผสมเม็ดพลาสติกพบรูปแบบความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีที่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอที่ตำแหน่งความสูงของโรเตอร์ลดลง

จากผลการทดลองในตอนที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการผสมอนุภาคขนาดใหญ่ในระบบของเม็ดแก้วช่วยทำให้การไหลของเม็ดแก้วภายในโรเตอร์มีความสม่ำเสมอมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ช่วยลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่หรือคลัสเตอร์ (Cluster) ของเม็ดแก้ว

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เครื่องอัดอากาศที่ใช้ในงานวิจัย ในขณะที่ใช้งานมีผู้ร่วมใช้หลายท่าน ซึ่งทำให้อัตราการไหลของอากาศที่ป้อนเข้าสู่โรเตอร์ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นในการทดลองต้องคอยปรับอัตราการไหลของอากาศให้คงที่เสียก่อน จึงจะดำเนินการทดลองต่อไป
2. ควรปรับตำแหน่งความสูงของท่อส่งผ่านให้อยู่ใกล้กับตัวกระจายอากาศของท่อโรเตอร์มากขึ้นเพื่อให้มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคทางด้านล่างของโรเตอร์
3. อนุภาคขนาดใหญ่ที่นำมาเป็นวัสดุเบดควรที่จะให้ความหนาแน่นของอนุภาคที่ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของเม็ดแก้วเพื่อที่จะได้ศึกษาถึงผลของขนาดของอนุภาคที่มีต่อรูปแบบการไหลของเม็ดแก้วภายในโรเตอร์

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

สมชาย สวดยสะอาด. อุทกพลศาสตร์ของสารป้อนผสมในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.

วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,(2547)

คันสนีย์ กำธนาทรัพย์. ผลของอัตราการไหลอากาศต่อโปรไฟล์ความเร็วอนุภาคในฟลูอิไดซ์เบด

แบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์, (2548)

ภาษาอังกฤษ

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

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

Bai D., Shibuya E., Masuda Y., Nishio K., Nakagawa N. and Kato K. Distinction between upward and downward flow in circulating fluidized bed. Powder Technology 84 (1995), 75-81

Benyahia S., Arastoopour H., Knowlton T.M. and Massah H. Simulation of particles and gas flow behavior in the riser section of a circulating fluidized bed using the kinetic theory approach for the particulate phase. Powder Technology 112 (2000), 24-33

Choi J.-H., Park J.-H., Choung W.M., Kang Y. and Kim S.D. Hydrodynamic characteristics of fine particles in the riser and standpipe of a circulating fluidized bed. Korean Journal Chemical Engineering 12(2) (1995), 141-145

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

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

Hirschberg B. and Werther J. Factors affecting solids segregation in circulating fluidized-bed riser. AIChE Journal 44(1) (1998), 25-34

- Huilin L., Yunhua Z., Zhiheng S., Ding J. and Jiying J. Numerical simulations of gas-solid flow in tapered riser. Powder Technology 169 (2006), 89-98
- Issangya A.S., Bai D., Bi K.S., Zhu J. and Grace J.R. Suspension densities in a high density circulating fluidized bed riser. Chemical Engineering Science 54 (1999), 5451-5460
- 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
- Kim S.H. and Han G.Y. An analysis of pressure drop fluctuation in a circulating fluidized bed. Korean Journal Chemical Engineering 16(5) (1999), 677-683
- Kim S.W., Kirbas G., Bi H., Lim J.C., and Grace J.R. Flow behavior and regime transition in a high-density circulating fluidized bed riser. Chemical Engineering Science 59 (2004), 3955-3963
- Li Z.Q., Wu C.N., Wei F. and Jin F. Experimental study of high-density gas-solid flow in a new coupled circulating fluidized bed. Powder Technology 139 (2004), 214-220
- 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 regime in a circulating fluidized bed. Powder Technology 155 (2005), 17-25
- Nieuwland J.J., Delnoij E., Kuipers J.A.M. and Swaaij W.P.M van. An engineering model for dilute riser flow. Powder Technology 90(2) (1997), 115-123
- Pugsley T.S. and Berruti F. A predictive hydrodynamic model for circulating fluidized bed riser. Powder Technology 89 (1996), 57-69
- Parssiene 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

- 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
- Schlichthaerle P. and Werther J. Axial pressure profiles and solid concentration distribution in the CFB bottom zone. Chemical Engineering Science 54(22) (1999), 5485-5493
- 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
- Wang X., Gao S., Xu Y. and Zhang J. Gas-solid flow patterns in a novel dual – loop FCC riser. Powder Technology 152 (2005), 90-99
- Xu G. and Gao S. Necessary parameters for specifying the hydrodynamics of circulating fluidized bed riser- a review and reiteration. Powder Technology 13(1-2) (2003), 63-67
- 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
- Zhang M., Qian Z., Yu H. and Wei F. The solid flow structure in a circulating fluidized bed riser/downer of 0.42-m diameter. Powder Technology 129 (2003), 46-52
- Calculations [online], available from: <http://www.filtration-and-separation.com>. [2006, June 1]



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
การคำนวณอัตราการหมุนเวียนของเม็ดแก้ว

การคำนวณอัตราการหมุนเวียนของเม็ดแก้ว (G_s)

$$G_s = \frac{W}{At} \text{ (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที)}$$

โดยที่ W คือ ปริมาณของเม็ดแก้วที่สะสมบนวาล์วปีกผีเสื้อ โดยกำหนดให้เท่ากับ 1 กิโลกรัม (กิโลกรัม)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของโรเตอร์ (ตารางเมตร)

t คือ เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัม (วินาที)

ข้อมูลการทดลอง

เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อของระบบเม็ดแก้ว-อากาศ และระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก ที่สภาวะการทดลองดังนี้

- เปิดวาล์วที่ท่อส่งผ่านร้อยละ 50
- อัตราการไหลของอากาศในท่อป้อนกลับเท่ากับ 400 ลิตรต่ออนาที
- ปริมาณเริ่มต้นในท่อป้อนกลับเท่ากับ 10 กิโลกรัม

1) เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อ ที่ความเร็วอากาศ (U_g) ต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ แสดงดังตาราง ก.1

ตาราง ก.1 เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อในระบบ
เม็ดแก้ว-อากาศ

ครั้งที่	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที
	t (วินาที)	t (วินาที)	t (วินาที)
1	7.20	6.70	6.40
2	7.00	6.87	6.20
3	6.99	6.86	6.30

2) เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อ ที่ความเร็วอากาศ (U_g) ต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก แสดงดังตาราง ก.2

ตาราง ก.2 เวลาที่ใช้ในการสะสมเม็ดแก้ว 1 กิโลกรัมบนวาล์วปีกผีเสื้อในระบบ
เม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก

ครั้งที่	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที
	t (วินาที)	t (วินาที)	t (วินาที)
1	5.24	4.89	4.55
2	5.05	4.90	4.75
3	5.13	4.80	4.77

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการหมุนเวียนของของแข็งภายในโรเตอร์ (G_s)

$$\text{จากสูตรการคำนวณพื้นที่หน้าตัด (A)} = \pi D^2/4$$

$$\text{ท่อโรเตอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (D)} = 0.05 \text{ เมตร}$$

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

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

จากตาราง ก.1 การทดลองครั้งที่ 1 ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที

$$G_s = \frac{W}{At} \text{ กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที}$$

กำหนดให้ปริมาณของเม็ดแก้วที่สะสมบนวาล์วปีกผีเสื้อ หรือ W เท่ากับ 1 กิโลกรัม

$$\text{ดังนั้น} \quad G_s = \frac{1}{0.00196 \times 7.20}$$

$$= 70.77 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการหมุนเวียนของเม็ดแก้ว

1) อัตราการหมุนเวียนของเม็ดแก้วที่ความเร็วอากาศ (U_g) ต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ แสดงดังตาราง ก.3

ตาราง ก.3 อัตราการหมุนเวียนของเม็ดแก้วในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ

ครั้งที่	G_s กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที		
	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที
1	70.77	76.05	79.61
2	72.79	74.17	82.19
3	72.89	74.28	80.88

2) อัตราการหมุนเวียนของเม็ดแก้วที่ความเร็วอากาศ (U_g) ต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก แสดงดังตาราง ก.4

ตาราง ก.4 อัตราการหมุนเวียนของของแข็งในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก

ครั้งที่	G_s (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที)		
	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที
1	97.30	104.34	106.07
2	101.03	104.12	107.41
3	99.45	105.85	106.96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
การคำนวณความเร็วของเม็ดแก้ว

การคำนวณความเร็วของเม็ดแก้วเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพมาใช้ในการคำนวณ โดยข้อมูลที่น่ามาใช้ในการคำนวณแสดงดังตาราง ข.1 ตัวอย่างข้อมูลระยะทางและมุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ที่ความเร็วอากาศต่างๆ และที่สมภาวะการทดลองเช่นเดียวกับภาคผนวก ก

ตาราง ข.1 ตัวอย่างข้อมูลระยะทางและมุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

ลำดับที่	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที		$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที		$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที	
	ระยะทาง (มม.)	มุม*	ระยะทาง (มม.)	มุม*	ระยะทาง (มม.)	มุม*
1	1.31	140.57	1.24	175.84	1.83	172.96
2	0.74	154.98	1.82	166.47	1.86	172.35
3	0.83	159.62	1.62	151.92	1.93	160.30
4	1.01	177.45	1.80	175.71	1.61	167.12
5	1.28	173.99	1.42	173.65	1.76	155.07

* คือ มุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ได้วัดจากแนวแกน (องศา)

การคำนวณความเร็วของเม็ดแก้ว

การคำนวณความเร็วของเม็ดแก้วในแนวรัศมี และแนวแกนสามารถคำนวณได้จากสมการ 3.1 และ 3.2 ที่อธิบายไว้ในบทที่ 3

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

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

โดยที่ C_r คือ ความเร็วของของแข็งในแนวรัศมี (radial velocity), เมตรต่อวินาที

C_z คือ ความเร็วของของแข็งในแนวแกน (axial velocity), เมตรต่อวินาที

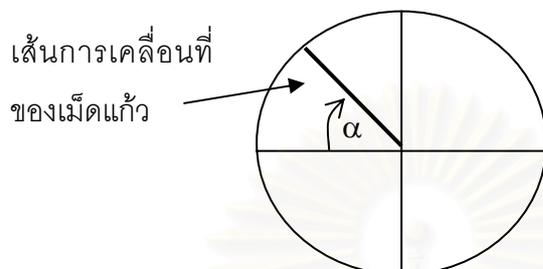
L คือ ระยะทางที่ของแข็งเคลื่อนที่ได้, เมตร

t คือ เวลาที่เม็ดแก้วใช้ในการเคลื่อนที่, วินาที หาได้จากส่วนกลับของความเร็วหน้ากล้อง

θ คือ มุมที่ของแข็งเคลื่อนที่วัดจากแนวนอน (radian)

ตัวอย่างการคำนวณความเร็วของเม็ดแก้ว

จากตาราง ข.1 ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที ข้อมูลที่ 1 ระยะทางที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่ได้เท่ากับ 1.31 มิลลิเมตร และมุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่วัดจากแนวแกนเท่ากับ 140.57 องศา โดยใช้ความเร็วหน้ากล้องเท่ากับ $1/2000$ หรือ 0.0005 วินาที ซึ่งตำแหน่งเส้นการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่นำมาเป็นตัวอย่างในการคำนวณอยู่ที่ Quadrant 2 แสดงดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ตำแหน่งของเส้นการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้วที่นำมาเป็นตัวอย่าง

- คำนวณหามุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่วัดจากแนวนอน ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก มุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่วัดจากแนวนอน (α) = | มุมที่เม็ดแก้วเคลื่อนที่วัดจากแนวแกน-90° |

$$= | 140.57 - 90 |$$

$$= 50.57 \text{ องศา}$$

α เป็นมุมที่วัดจากแนวนอนใน Quadrant 2 แสดงดังรูปที่ ข.2

- เปลี่ยน α ที่มีหน่วยเป็นองศา ให้เป็น θ ที่มีหน่วยเป็น radian โดยวิธีการเทียบบัญญัติไตรยางศ์ ดังนี้

เมื่อ มุม 180 องศา เท่ากับ π radian

ดังนั้น มุม $(180 - \alpha)$ องศา เท่ากับ $\frac{(180 - \alpha) \times \pi}{180}$ radian

เมื่อแทนค่า α จะได้

$$\theta = \frac{(180 - 50.5722) \times \pi}{180}$$

$$= 2.25 \text{ radian}$$

- แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการความเร็วของเม็ดแก้วดังแสดงในข้อที่ 1

$$C_r = (1.3102 \times 10^{-3} / 0.0005) \cos 2.25$$

$$= 1.67 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

$$C_z = (1.3102 \times 10^{-3} / 0.0005) \sin 2.25$$

$$= 2.02 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ดังนั้นค่าความเร็วของเม็ดแก้วในแนวรัศมีและในแนวแกนมีค่าเท่ากับ 1.67 และ 2.20 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ความเร็วของเม็ดแก้วในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ และในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก

- ความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ แสดงดังตาราง ข.2

ตาราง ข.2 ความเร็วของเม็ดแก้วตลอดความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ

ความสูง (ซม.)	ความเร็วของเม็ดแก้ว (เมตรต่อวินาที)		
	$U_g = 7$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 8$ เมตรต่อวินาที	$U_g = 9$ เมตรต่อวินาที
30	1.03	1.38	1.48
60	2.04	2.32	2.72
180	2.34	2.75	3.1
300	2.41	3.01	3.28
370	2.71	3.04	3.31

- ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาทีในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ แสดงดังตาราง ข.3

ตาราง ข.3 ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ

ตำแหน่งในแนวรัศมี (r/R) (-)	ความเร็วของเม็ดแก้ว (เมตรต่อวินาที)				
	H = 30 ซม.	H = 60 ซม.	H = 180 ซม.	H = 300 ซม.	H = 370 ซม.
1	1.07	1.27	2.15	3.72	4.18
0.72	1.25	1.60	2.90	3.79	4.20
0.24	1.49	2.30	3.12	3.86	4.22
0	1.64	2.70	3.59	3.93	4.24

H = ตำแหน่งความสูงของโรเตอร์จากตัวกระจายอากาศ (ซม.)

- ความเร็วของเม็ดแก้วที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นและลงตามแนวรัศมี และร้อยละของจำนวนเม็ดแก้วในทิศทางขึ้นและลง ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 9 เมตรต่อวินาที และที่ตำแหน่งความสูงของโรเตอร์ 180 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ แสดงดังตาราง ข.4

ตาราง ข.4 ร้อยละของปริมาณของเม็ดแก้วและความเร็วของเม็ดแก้วในทิศทางการเคลื่อนที่ขึ้นและลงในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ

ตำแหน่งในแนวรัศมี (r/R), (-)	ความเร็วของเม็ดแก้วในแต่ละ ทิศทาง (เมตรต่อวินาที)		ร้อยละของจำนวนเม็ดแก้วใน แต่ละทิศทาง (%)	
	ขึ้น	ลง	ขึ้น	ลง
1	3.39	-1.08	99	1
0.72	3.26	-1.48	97	3
0.24	2.74	-2.39	19	81
0	1.90	-2.16	5	95

- ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศ 9 เมตรต่อวินาที ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก แสดงดังตาราง ข.5

ตาราง ข.5 ความเร็วของเม็ดแก้วตามแนวรัศมีตลอดความสูงของโรเตอร์ในระบบเม็ดแก้ว-อากาศ-เม็ดพลาสติก

ตำแหน่งใน แนวรัศมี (r/R) (-)	ความเร็วของเม็ดแก้ว (เมตรต่อวินาที)				
	H = 30 ซม.	H = 60 ซม.	H = 180 ซม.	H = 300 ซม.	H = 370 ซม.
1	1.25	1.39	3.66	4.27	4.38
0.72	1.36	1.69	3.80	4.27	4.38
0.24	1.42	2.74	3.96	4.33	4.42
0	1.99	3.06	4.06	4.44	4.44

H = ตำแหน่งความสูงของโรเตอร์จากตัวกระจายอากาศ (ซม.)

ภาคผนวก ค
การคำนวณสมบัติของของแข็ง

ข้อมูลพื้นฐานต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ ค.1

ตาราง ค.1 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ

ข้อมูลพื้นฐาน	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ความหนาแน่นของอากาศ	ρ_g	1.16	kg/m ³
ความหนืดของอากาศ	μ_g	1.84×10 ⁻⁵	N.s/m ²
ความหนาแน่นของเม็ดแก้ว	ρ_s	2200	kg/m ³
ความหนาแน่นของเม็ดพลาสติก	ρ_s	860	kg/m ³
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	g	9.8	m/s ²

1. การคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแก้ว (Sauter mean diameter)

การคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแก้วในงานวิจัยนี้ได้คำนวณเป็น Sauter mean diameter, SMD เนื่องจากข้อมูลขนาดของเม็ดแก้วจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle analyzer พบว่าเม็ดแก้วมีขนาดอยู่ในช่วง 100-900 ไมครอน แสดงดังรูปที่ ค.2 Sauter mean diameter คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่ารูปทรงกลม โดยคำนวณได้จากปริมาตรของอนุภาคต่อพื้นที่ผิวของอนุภาค ดังแสดงในสมการ (1)

$$\text{Sauter mean diameter, SMD} = \bar{d}_{32} = 6 \sum_i \frac{V_p}{A_p} \quad (1)$$

$$\text{โดย} \quad d_{32} = 6 \frac{V_p}{A_p} \quad (2)$$

โดยสามารถที่จะคำนวณได้จากโปรแกรมการคำนวณ Sauter mean diameter, SMD (www.filtration-and-separation.com) แสดงดังตารางที่ ค.2

Analysis Result							
Sample Details							
Sample ID: 08-1	Run Number: 9	Measured: 30 Mar 2006 9:48PM					
Sample File: OTHER24	Record Number: 238	Analyzed: 30 Mar 2006 9:48PM					
Sample Path: C:\		Result Source: Analyzed					
Sample Notes: Dry Analysis System Dispersing medium: None Tested by Kaew Kajornchaiyakul							
System Details							
Range Lens: 300 mm	Beam Length: 10.00 mm	Sampler: M588	Obscuration: 0.4 %				
Presentation: 3RHA	[Particle R.I. = (1.4500, 0.1000)];	Dispersant R.I. = 1.0000]	Residual: 12.984 %				
Analysis Model: Polydisperse Modifications: None							
Result Statistics							
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.1118 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 0.0117 sq. m / g				
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 387.91 um	D (v, 0.5) = 636.92 um	D (v, 0.9) = 695.23 um				
D [4, 3] = 540.76 um	D [3, 2] = 510.95 um	Span = 5.724E-01	Uniformity = 1.812E-01				
Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.46	0.00	0.58	0.00	22.49	0.00	26.20	0.00
0.58	0.00	0.67	0.00	26.20	0.00	30.53	0.00
0.67	0.00	0.78	0.00	30.53	0.00	35.86	0.00
0.78	0.00	0.91	0.00	35.86	0.00	41.43	0.00
0.91	0.00	1.06	0.00	41.43	0.00	48.27	0.00
1.06	0.00	1.24	0.00	48.27	0.00	56.23	0.00
1.24	0.00	1.44	0.00	56.23	0.00	65.51	0.00
1.44	0.00	1.68	0.00	65.51	0.00	76.32	0.00
1.68	0.00	1.95	0.00	76.32	0.00	88.91	0.00
1.95	0.00	2.28	0.00	88.91	0.00	103.58	0.00
2.28	0.00	2.65	0.00	103.58	0.00	120.67	0.00
2.65	0.00	3.09	0.00	120.67	0.00	140.58	0.00
3.09	0.00	3.60	0.00	140.58	0.01	163.77	0.01
3.60	0.00	4.19	0.00	163.77	0.06	190.80	0.07
4.19	0.00	4.88	0.00	190.80	0.20	222.28	0.27
4.88	0.00	5.69	0.00	222.28	0.57	258.95	0.84
5.69	0.00	6.63	0.00	258.95	1.42	301.68	2.26
6.63	0.00	7.72	0.00	301.68	3.20	351.46	5.56
7.72	0.00	9.00	0.00	351.46	7.52	409.45	13.08
9.00	0.00	10.48	0.00	409.45	16.56	477.01	29.66
10.48	0.00	12.21	0.00	477.01	29.67	555.71	56.33
12.21	0.00	14.22	0.00	555.71	25.32	647.41	81.64
14.22	0.00	16.57	0.00	647.41	14.09	754.23	95.73
16.57	0.00	19.31	0.00	754.23	4.27	878.67	100.00
19.31	0.00	22.49	0.00				

รูปที่ ค.1 ข้อมูลขนาดของเม็ดแก้วจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle analyzer

ตาราง ค.2 โปรแกรมการคำนวณ Sauter mean diameter (www.filtration-andseparation.com)

Index	Top of increment (microns)	Cumulative mass undersize (%)	Mid point (microns)	Mass fraction by grade (-)	Mass fraction by mid size	Mass fraction over mid point
1	878.67	100				
2	754.23	95.73	816.45	0.0154	12.5733	0.0002
3	647.41	81.64	700.82	0.0776	54.3836	0.0036
4	555.74	56.33	601.57	0.0551	33.1467	0.0035
5	477.01	29.66	516.37	0.0716	36.9724	0.0054
6	409.45	13.08	443.23	0.0863	38.2507	0.0076
7	351.46	5.56	380.45	0.0962	36.5997	0.0098
8	301.68	2.26	326.57	0.153	49.9652	0.0112
9	258.95	0.84	280.31	0.0893	25.0321	0.0124

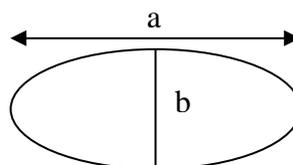
Index	Top of increment (microns)	Cumulative mass undersize (%)	Mid point (microns)	Mass fraction by grade (-)	Mass fraction by mid size	Mass fraction over mid point
10	222.28	0.27	240.61	0.0916	22.0403	0.0132
11	190.80	0.07	206.54	0.1230	25.4044	0.0134
12	163.77	0.01	177.28	0.0965	17.1080	0.0252
13	0.00	0.00	81.88	0.0444	3.6356	0.0208
	Total			1.0000	355.1125	0.1266

Mean size by mass:	355.11	micron
Specific surface area/volume	11.71×10^{-3}	micron^{-1}
Specific surface area/volume	11.71×10^{-6}	m^{-1}
Suater mean diameter	512	micron

โดยเมื่อใส่ข้อมูลในคอลัมน์ขนาดอนุภาค (Top of increment, micron) และในช่องของร้อยละการเพิ่มขึ้นของอนุภาคที่เล็กกว่ามาตรฐาน (Cumulative mass undersize, %) ของโปรแกรมการคำนวณ Sauter mean diameter ข้างต้น จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย หรือ Sauter mean diameter ของเม็ดแก้วเท่ากับ 512 ไมครอน แสดงดังรูปที่ ค.2

2. การคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติก

เม็ดพลาสติก HDPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีรูปร่างเป็นวงรี ดังนั้นจึงต้องทำการหาขนาดของอนุภาคด้วยการหาเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติก (d_e) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการของ Heyt and Diaz



$$d_e = 1.55A^{0.625} / P^{0.25}$$

โดย $A = \pi.b^2 / 4 + a.b - b^2$

$$P = \pi.b + 2.a - 2.b$$

การคำนวณ

ในการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติกได้วัดขนาดของเม็ดพลาสติกทั้งหมด 10 อนุภาค แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย โดยขนาดของเม็ดพลาสติกที่วัดได้แสดงดังตาราง

ค.2

ตาราง ค. 3 ข้อมูลขนาดของเม็ดพลาสติก

อนุภาค	a (มิลลิเมตร)	b(มิลลิเมตร)
1	6.33	5.21
2	6.52	5.76
3	6.07	5.23
4	6.24	5.74
5	6.03	5.53
6	6.28	4.63
7	6.28	5.22
8	6.66	5.89
9	6.75	5.63
10	6.65	5.89
Average	6.42	5.51

จากตาราง ค.3 จะได้ ความยาวเฉลี่ยของเส้น a เท่ากับ 6.278 และ b เท่ากับ 5.373
ทำการแทนค่า a และ b ลงในสมการ

$$A = \pi \times 5.51^2 / (4 + (6.42 \times 5.51)) - 5.51^2$$

$$A = 11.06 \text{ มิลลิเมตร}$$

และ

$$P = (\pi \times 5.51) + (2 \times 6.42) - (2 \times 5.51)$$

$$P = 15.49 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้น

$$d_e = 1.55 \times 11.06^{0.625} / 15.49^{0.25}$$

$$d_e = 4.477 \text{ มิลลิเมตร}$$

จากการคำนวณข้างต้นจะได้เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยเท่ากับ 4477 ไมครอน

3. การจำแนกของแข็งตามลักษณะของ Geldart (Geldart's Classification)

การจำแนกของแข็งตามลักษณะของ Geldart สามารถจำแนกได้ตามรูปที่ 2.9 จากรูปตัวแปรที่ต้องการคือ ผลต่างความหนาแน่นของของแข็งและอากาศ และขนาดของของแข็ง

- เม็ดแก้ว

$$\rho_s - \rho_g = 2200 - 0.0000184 = 2.19999 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{จากข้อที่ 1 } d_p = 0.000512 \text{ เมตร}$$

จากกราฟรูปที่ 2.10 เม็ดแก้วสามารถจำแนกได้อยู่ในกลุ่ม B

- เม็ดพลาสติก

$$\rho_s - \rho_g = 860 - 0.0000184 = 0.85999 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{จากข้อ 2 } d_p = 0.004477 \text{ เมตร}$$

จากกราฟรูปที่ 2.10 เม็ดพลาสติกสามารถจำแนกได้อยู่ในกลุ่ม D

4. การคำนวณความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชัน (U_{mf})

ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันสามารถคำนวณได้จากสมการของ Wen and Yu

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

จากตาราง ค.1 และ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแก้วจากข้อ 1 แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการจะได้ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันของเม็ดแก้วเท่ากับ 0.17 เมตรต่อวินาที

จากตาราง ค.1 และการคำนวณเส้นผ่านจากศูนย์กลางเทียบเท่าจากข้อ 2 แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการจะได้ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไอเซชันของเม็ดพลาสติกเท่ากับ 1.03 เมตรต่อวินาที

5. การคำนวณค่าความเร็วสุดท้าย (U_t)

- ความเร็วสุดท้ายของเม็ดแก้วสามารถคำนวณได้จากสมการของ Haider และ Levenspiel

$$U_t = \left[\frac{4 (\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \text{ เมื่อ } 0.4 < \text{Re} < 500$$

จากตาราง ค.1 และ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดแก้วจากข้อ 1 แทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการจะได้ค่าความเร็วสุดท้ายของเม็ดแก้วเท่ากับ 3.71 เมตรต่อวินาที

ตรวจค่า Re ว่าได้ตรงกับเงื่อนไขหรือไม่

$$\text{Re} = \rho_g U_t d_p / \mu_g$$

$$\text{Re} = (1.16 \times 3.71 \times 0.000512) / 0.000018$$

$$\text{Re} = 119.83$$

เมื่อแทนค่า U_t ที่คำนวณได้ ลงในค่า Re พบว่าตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ดังนั้นความเร็วสุดท้ายของเม็ดแก้วในงานวิจัยนี้เท่ากับ 3.71 เมตรต่อวินาที

- ความเร็วสุดท้ายของเม็ดพลาสติกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$U_t = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \text{ เมื่อ } 500 < \text{Re} < 20,000$$

จากตาราง ค.1 และ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของเม็ดพลาสติกจากการข้อ 2 แทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการจะได้ค่าความเร็วสุดท้ายของเม็ดแก้วเท่ากับ 10.03 เมตรต่อวินาที

ตรวจค่า Re ว่าได้ตรงกับเงื่อนไขหรือไม่

$$\text{Re} = \rho_g U_t d_p / \mu_g$$

$$\text{Re} = (1.16 \times 10.03 \times 0.000512) / 0.000018$$

$$\text{Re} = 2832.32$$

เมื่อแทนค่า U_t ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น ในค่า Re พบว่าตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ดังนั้นความเร็วสุดท้ายของเม็ดพลาสติกในงานวิจัยนี้เท่ากับ 10.03 เมตรต่อวินาที

ภาคผนวก ง
วิธีการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและ
วิเคราะห์ความเร็วของอนุภาคด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

1. การบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูง

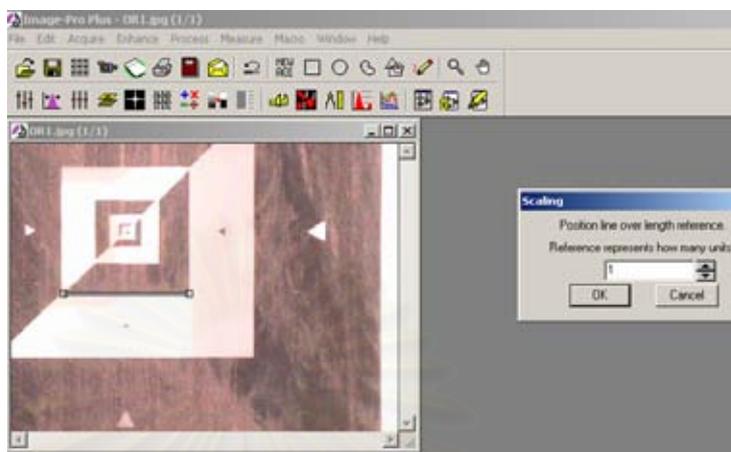
- การติดตั้งระบบการบันทึกภาพ มีขั้นตอนดังนี้
 1. ประกอบกล้องความเร็วสูงกับเลนส์เข้าด้วยกัน
 2. ต่อสายกล้องเข้ากับชุดคอมพิวเตอร์ที่เปิดโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ
 3. สอดโพรบเข้าไปในโรเตอร์โดยให้ปลายโพรบอยู่ที่ตำแหน่งที่ต้องการ และอีกด้านของโพรบที่อยู่ข้างนอกต่อโรเตอร์นำชุดกล้องความเร็วสูงมาวางให้หน้าเลนส์อยู่ติดกับหน้าโพรบ
 4. นำชุดแหล่งกำเนิดแสงมาวางด้านตรงข้ามกับกล้องความเร็วสูง และเปิดแสง
 5. เปิดเครื่องเป่าอากาศให้อากาศเข้าไปในท่อโรเตอร์ในอัตราการไหลที่กำหนด
 6. เปิดวาล์วปีกผีเสื้อที่ท่อส่งผ่านในร้อยละการเปิดที่กำหนด
 7. ทำการปรับโฟกัส, กำลังขยายของเลนส์, ความเร็วหน้ากล้อง และความสว่างจนได้ภาพที่ชัดเจน
 8. ทำการบันทึกภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

2. การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

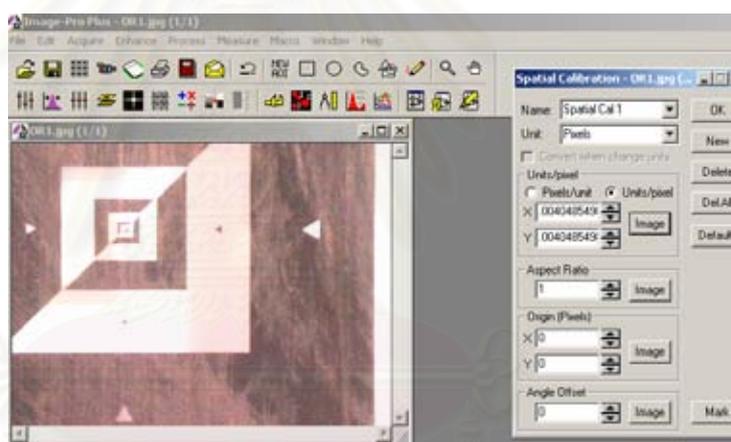
ในการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพต้องมีการปรับเทียบ (Calibrate) ซึ่งเป็น การเปรียบเทียบหน่วยความยาวของภาพกับความยาวมาตรฐาน โดยในงานวิจัยได้ทำการปรับเทียบด้วยการถ่ายภาพกระจกที่ใช้ในการเทียบมาตรฐาน กระจกที่ใช้ปรับเทียบหน่วยความยาวแสดงดังรูปที่ ง.1

- การปรับเทียบความยาวมาตรฐานมีรายละเอียดดังนี้
 1. บันทึกภาพกระจกให้ชัดเจนมากที่สุด ในโฟกัส และกำลังขยายของเลนส์ที่ใช้ในการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาค แสดงดังรูปที่ ง.1
 2. เลือกเส้นที่ชัดเจนที่สุด แล้วลากเส้นเพื่อจะได้ความยาวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ แสดงดังรูปที่ ง.1
 3. นำความยาวเส้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพในข้อ 2 ไปปรับเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ แสดงดังรูปที่ ง.2

4. กำหนดชื่อไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้ และทำการบันทึกไฟล์ไว้ดังแสดงใน แสดงดังรูปที่ ง.2

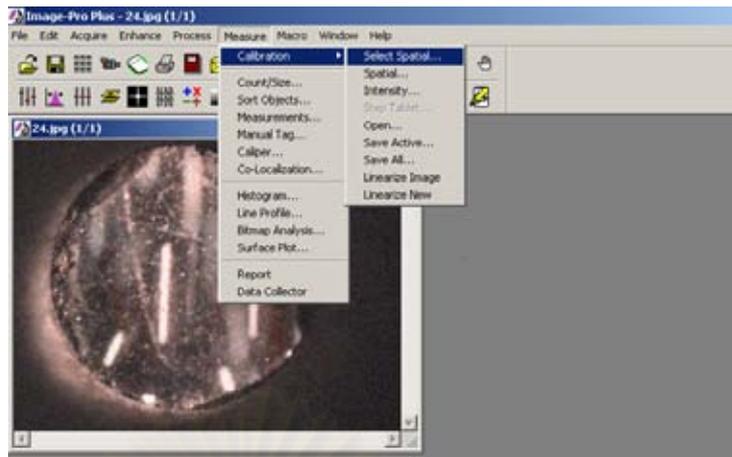


รูปที่ ง.1 ภาพกระจกที่ใช้ในการปรับเทียบและการลากเส้น

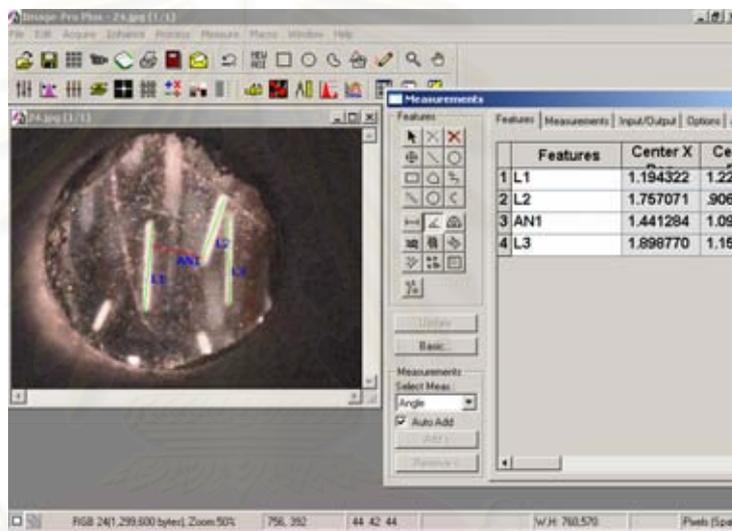


รูปที่ ง.2 การกำหนดชื่อไฟล์ และการบันทึกไฟล์ของหน่วยที่ได้ปรับเทียบแล้ว

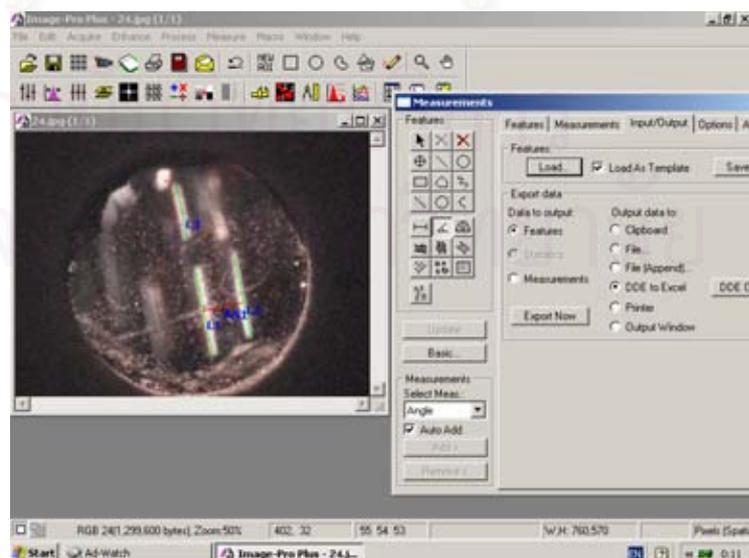
- การวิเคราะห์ภาพที่บันทึกได้ มีรายละเอียดดังนี้
 1. เปิดแฟ้มภาพที่ทำการบันทึกไว้ แล้วทำการเปิดแฟ้มที่ทำการปรับเทียบไว้ แสดงดังรูปที่ ง.3
 2. เลือกฟังก์ชันในการวัดความยาวและมุมในการเคลื่อนที่ และทำการลากเส้น แสดงดังรูปที่ ง.4
 3. ส่งข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ไปยัง Excel ดังแสดงดังรูปที่ ง.5 และข้อมูลที่ปรากฏที่ Excel แสดงดังรูปที่ ง.6



รูปที่ ง.3 การเปิดแฟ้มภาพพร้อมเลือกทั้งการเลือกฟังก์ชันการปรับเทียบ



รูปที่ ง.4 การเลือกฟังก์ชันการลากเส้น และการลากเส้น



รูปที่ ง.5 การส่งข้อมูลไปยัง Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1												
2												
3		Features	Center X	Center Y	Area	Length	Radius	Start X	Start Y	End X	End Y	Angle
4	1	L1	1.186225	1.226711		0.802635		1.166982	1.627517	1.206466	0.825904	2.8911
5	2	L3	1.910916	1.182177		0.808872		1.902818	1.587032	1.919013	0.777322	1.1457
6	3	L4	0.78137	1.663954		0.300576		0.712545	1.797556	0.850196	1.530352	27.255
7		Features	Center X	Center Y	Area	Length	Radius	Start X	Start Y	End X	End Y	Angle
8	1	L1	1.6761	0.947361		0.808872		1.668003	1.352216	1.684197	0.542506	1.1457
9	2	L2	1.109303	1.064769		0.795506		1.101206	1.457478	1.11174	0.672059	1.1811
10		Features	Center X	Center Y	Area	Length	Radius	Start X	Start Y	End X	End Y	Angle
11	1	L1	1.684197	0.85639		0.842098		1.684197	1.267439	1.684197	0.445341	
12		Features	Center X	Center Y	Area	Length	Radius	Start X	Start Y	End X	End Y	Angle
13	1	L1	0.951409	0.971652		0.744977		0.955458	1.344119	0.947361	0.599185	179.37
14	2	L2	1.611323	1.044525		0.568875		1.635614	1.327924	1.587032	0.761127	175.10
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												
23												
24												
25												

รูปที่ ง.6 ข้อมูลที่แสดงที่ Excel

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอ้ออ่าไฟ ใจบุญ เกิดวันที่ 30 มิถุนายน 2525 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย