

อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซีในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน



นายจิติ สายเชื้อ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

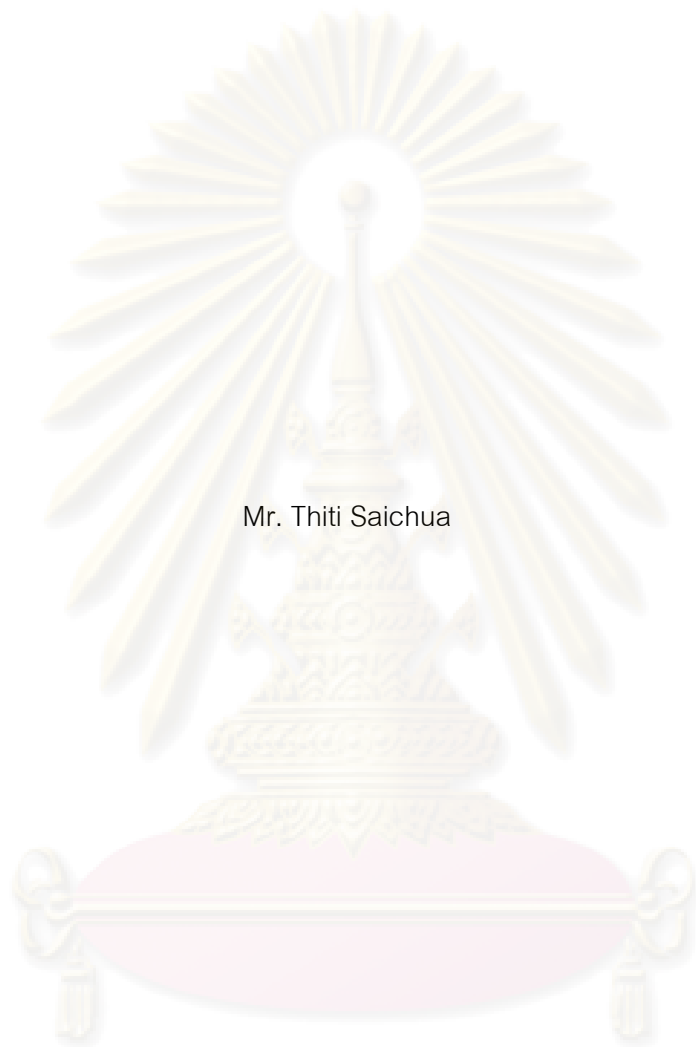
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDRODYNAMICS OF PVC PARTICLES  
IN CIRCULATING FLUIDIZED BED



Mr. Thiti Saichua

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซีในเครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน

โดย

นายฐิติ สายเชื้อ

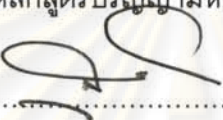
สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

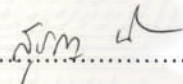
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวัดมนานนท์

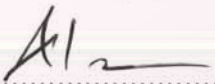
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

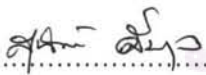
  
..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชญา นิติวัดมนานนท์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ ลิ้มตระกูล)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฐิติ สายเชื้อ : อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซีในเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน.  
(HYDRODYNAMICS OF PVC PARTICLES IN CIRCULATING FLUIDIZED BED)  
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.สุชนา นิตวิฒนานนท์, 69 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีท่อโรเตอร์สูง 2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ที่อุณหภูมิและความดันปกติ มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคพีวีซีเท่ากับ 140 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 1,410 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเร็วของอากาศที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 2.12 – 3.82 เมตรต่อวินาที ในส่วนแรกทำการทดลองเพื่อหาผลของความเร็วอากาศที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี จากการทดลองพบว่าที่ความเร็วอากาศ 2.12 และ 2.97 เมตรต่อวินาที อนุภาคพีวีซีในท่อโรเตอร์มีรูปแบบการไหลแบบฟลูอิดไรซ์ความเร็วสูง และจะมีรูปแบบการไหลแบบเบาบางเมื่อทดลองที่ความเร็วอากาศ 3.82 เมตรต่อวินาที ในส่วนของความเร็วของอนุภาคพีวีซีจะมีค่ามากที่สุดบริเวณกึ่งกลางท่อโรเตอร์ และค่อยๆลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนัง เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศให้มากขึ้นความเร็วของอนุภาคพีวีซีจะเพิ่มขึ้นในทุกๆ จุดตามแนวรัศมี และความสูงของโรเตอร์ ในการทดลองมีปัญหาที่อนุภาคพีวีซีเกาะผนังท่อโรเตอร์ทำให้สังเกตปรากฏการณ์ภายในได้ยาก ในส่วนที่สองจึงได้นำสารลดประจุไฟฟ้ามาใช้ในการแก้ปัญหาและทำการศึกษผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี จากการทดลองโดยผสมสารลดประจุไฟฟ้าปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่าสารลดประจุไฟฟ้าช่วยลดการเกาะผนังของอนุภาคพีวีซี และส่งผลต่อรูปแบบการไหลของอนุภาคพีวีซีเพียงเล็กน้อย

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2552.....

## 4972285323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : CFB / HYDRODYNAMIC / PVC PARTICLE/ ANTI-STATIC AGENT /

PARTICLE VELOCITY

THITI SAICHUA: HYDRODYNAMICS OF PVC PARTICLES IN CIRCULATING FLUIDIZED BED. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SUCHAYA NITIVATANANON, Ph.D., 69 pp.

This research was conducted in a cold flow circulating fluidized bed (CFB) having diameter and height of riser of 5 and 200 cm., respectively. The objective of this research is to study hydrodynamics of PVC particles. The PVC particles mean diameter was 140 micron while its density was  $1,410 \text{ kg/m}^3$ . The superficial gas velocities used were in the range of 2.12 - 3.82 m/s and the measurement of particle velocity profiles was achieved by a high speed camera and image processing software. In part I, the effect of superficial gas velocity on flow patterns of PVC particles in riser, it was found that at superficial gas velocity 2.12 and 2.97 m/s, PVC particles flow patterns were in fast fluidization regime and in dilute transport regime at superficial gas velocity 3.82 m/s. PVC particles velocity existed a maximum at the center of the riser and gradually decreased toward the wall. When the superficial gas velocity and the height of riser increased, the velocity of PVC particles along radius increased. For fine powders such as PVC particles, the fluidization quality is poor due to adhesive, cohesive and static force. One of the effective ways to solve this problem was an addition of anti-static agent into the system. In Part II, the effect of anti-static agent on flow patterns of PVC particles in riser, it was found that the addition of anti-static agent displayed 2 advantages: 1) a reduced electrostatic force between PVC particles and the riser, and 2) slightly effect on the flow patterns of PVC particles.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : .....Chemical Technology..... Student's Signature *Thiti Saichua*  
 Field of Study : ... Chemical Technology..... Advisor's Signature *Suchaya N.*  
 Academic Year : .....2009.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวัฒนานนท์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์ด้วยดียิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

งานวิจัยเรื่อง “อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซีในเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการ สอววิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ ลิ้มตระกูล กรรมการ สอววิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและให้คำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจจนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 ฟลูอิดไดเซชัน.....	4
2.2 การจำแนกของแข็ง.....	12
2.3 ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	14
2.4 สารลดประจุไฟฟ้า.....	23
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	26
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	28
3.1 เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน.....	28
3.2 เทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV).....	30
3.3 อนุภาคที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.4 วิธีการทดลอง.....	33

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	36
4.1 อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี.....	36
4.2 ผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี.....	45
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	50
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	51
รายการอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก.....	56
ภาคผนวก ข.....	60
ภาคผนวก ค.....	63
ภาคผนวก ง.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	69

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ของความเร็วอากาศในการเกิดขอบเขตฟลูอิดไฮดรอนต่างๆ.....	12
2.2 การจำแนกอนุภาคตามวิธีของ Geldart.....	13
2.3 แสดงชนิด และปริมาณของสารลดประจุไฟฟ้าที่ใช้กับอนุภาคต่างๆ.....	25
3.1 สภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	34
4.1 ค่า $U_{tr}$ และ $V_{CA}$ ของอนุภาคพีวีซีที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
4.2 รูปแบบการไหลของอนุภาคพีวีซีในโรเตอร์ในช่วงความเร็วอากาศต่างๆ.....	38
ก.1 ข้อมูลความดันทั้งระบบของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า.....	56
ก.2 ข้อมูลความดันทั้งระบบของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้า.....	57
ก.3 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับคำนวณความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกน- ที่ตำแหน่งกึ่งกลางโรเตอร์ ความสูง 50 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ.....	58
ก.4 ปริมาณอนุภาคพีวีซีที่เก็บได้ในภาชนะกักเก็บในการทดลอง- ที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า.....	59
ก.5 ปริมาณอนุภาคพีวีซีที่เก็บได้ในภาชนะกักเก็บในการทดลอง- ที่มีสารลดประจุไฟฟ้า.....	59
ข.1 สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า.....	60
ข.2 สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้า.....	60
ข.3 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามแนวรัศมีในการทดลอง- ที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า.....	61
ข.4 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามแนวรัศมีในการทดลอง- ที่มีสารลดประจุไฟฟ้า.....	61
ข.5 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามความสูงของโรเตอร์ในการทดลอง- ที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า.....	62
ข.6 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามความสูงของโรเตอร์ในการทดลอง- ที่มีสารลดประจุไฟฟ้า.....	62
ข.7 อัตราการหมุนเวียนของอนุภาคพีวีซีที่สภาวะต่างๆ.....	62
ค.1 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ.....	63

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ความแตกต่างระหว่างเบตนิ่งกับฟลูอิดไธเบต.....	4
2.2 ลักษณะของฟลูอิดไธเซชัน.....	5
2.3 รูปแบบการไหลของฟลูอิดไธเบตอากาศ-ของแข็ง.....	5
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วอากาศที่ไหลผ่านเบต.....	6
2.5 ลักษณะการไหลของอากาศผ่านเบต.....	7
2.6 การทดลองหาความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity, $U_{tr}$ )- ในการทดลองของ Yerushalmi และคณะ.....	10
2.7 การทดลองหาความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity, $U_{tr}$ )- ในการทดลองของ Numkung และคณะ.....	11
2.8 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart.....	13
2.9 ระบบฟลูอิดไธเบตแบบหมุนเวียน.....	14
2.10 ชนิดของไซโคลน.....	15
2.11 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Cluster.....	16
2.12 ขอบเขตของ Fast Fluidization.....	18
2.13 แผนผังแสดงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงภายในเครื่องฟลูอิดไธเบตแบบหมุนเวียน.....	19
2.14 การทดลองหา Saturation carrying capacity.....	20
2.15 รูปแบบการกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน.....	21
2.16 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ Fast Bed.....	22
2.17 ผลของการเติมสารลดประจุไฟฟ้า ATMER 129 ที่มีผลต่อค่าประจุไฟฟ้า- ในเครื่องฟลูอิดไธเบตที่ใช้ในการผลิต PE.....	23
2.18 ผลของความชื้นที่มีต่อศักย์ไฟฟ้าในเครื่องฟลูอิดไธเบตที่ใช้ PE- ในการทดลองของ Yao และคณะ.....	24
2.19 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสารลดประจุไฟฟ้า.....	25
3.1 แบบจำลองเครื่องฟลูอิดไธเบตแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.2 ระบบ Particle Image Velocimetry.....	30
3.3 ตัวอย่างภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซี.....	31
3.4 อนุภาคพีวีซีที่ใช้ในงานวิจัย.....	32
3.5 สารลดประจุไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย.....	33

ภาพประกอบ	หน้า
3.6 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดประจุไฟฟ้า ATMER 129.....	33
3.7 การวิเคราะห์ระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีด้วยโปรแกรมวิเคราะห์.....	35
4.1 ความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity, $U_p$ ) ของอนุภาคพีวีซี- ตามการทดลองของ Yerushalmi และคณะ.....	37
4.2 ความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity, $U_p$ ) ของอนุภาคพีวีซี- ตามการทดลองของ Numkung และคณะ.....	37
4.3 วงจรความดันของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ความเร็วอากาศต่างๆ.....	39
4.4 ความดันอากาศตลอดความสูงของไรเซอร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ.....	39
4.5 สัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของไรเซอร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ.....	41
4.6 รูปแบบของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกนในงานวิจัยของ Yang และคณะ.....	42
4.7 สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคพีวีซีที่ความขึ้นอากาศต่างๆ.....	42
4.8 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามแนวรัศมี ที่ความเร็วอากาศต่างๆ- ที่ความสูง 50 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ.....	44
4.9 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามความสูงของไรเซอร์ - ที่ความเร็วอากาศต่างๆ.....	45
4.10 ผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่ออนุภาคพีวีซีโดยการสังเกตด้วยตาเปล่า.....	46
4.11 ความดันอากาศตลอดความสูงของไรเซอร์ในการทดลอง- มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้าที่ความเร็วอากาศต่างๆ.....	47
4.12 สัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของไรเซอร์ในการทดลอง- ที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้าที่ความเร็วอากาศต่างๆ.....	47
4.13 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามแนวรัศมีในการทดลองที่มีและไม่มี- สารลดประจุไฟฟ้า ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ที่ความสูง 50 เซนติเมตรจาก- ตัวกระจายอากาศ.....	48
4.14 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามความสูงของไรเซอร์ในการทดลอง- ที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า ที่ความเร็วอากาศต่างๆ.....	49
ก.1 การติดตั้งระบบหาอัตราการหมุนเวียนของของแข็งในการทดลอง- ของ Mahmoud และคณะ.....	59
ง.1 ภาพกระจกที่ใช้ในการปรับเทียบและการลากเส้น.....	66
ง.2 การกำหนดชื่อไฟล์ และการบันทึกไฟล์ของหน่วยที่ได้ปรับเทียบแล้ว.....	66

ภาพประกอบ	หน้า
ง.3 การเปิดแฟ้มภาพพร้อมเลือกทั้งการเลือกฟังก์ชันการปรับเทียบ.....	67
ง.4 การเลือกฟังก์ชันการลากเส้น และการลากเส้น.....	67
ง.5 การส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Excel.....	68
ง.6 ข้อมูลที่แสดงในโปรแกรม Excel.....	68



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed) มีลักษณะแตกต่างจากฟลูอิดไดซ์เบดชนิดอื่นในเรื่องของอุทกพลศาสตร์ และลักษณะของการถ่ายเทความร้อน (Jong และคณะ, 1995) โดยฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนมีข้อดี คือ การสัมผัสระหว่างของไหลและอนุภาคทั่วถึง ทำให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพที่ดีตามไปด้วย ดังนั้นในการที่จะนำเทคนิคนี้มาประยุกต์ใช้จำเป็นต้องมีความรู้ในอุทกพลศาสตร์ที่เกิดขึ้น การศึกษาอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน มีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น เช่น ความเร็วของอนุภาค รูปแบบของการไหล ความดันภายใน รวมถึงอัตราการหมุนเวียนของอนุภาคเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพสำหรับอุตสาหกรรมนั้นๆ

ในอุตสาหกรรมทั่วไปฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนชนิดสองสถานะ คือ ก๊าซ - ของแข็งพบมากในอุตสาหกรรมปัจจุบัน โดยในไรเซอร์ (Riser) เป็นส่วนที่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกแยกออกจากด้านบน โดยที่ของแข็งที่ยังหลงเหลืออยู่จะย้อนกลับมาเข้าไรเซอร์ใหม่ผ่านทางท่อป้อนกลับ (Downcomer) ทำให้ลดการสูญเสียสารตั้งต้น พลังงาน รวมทั้งต้นทุนในการผลิต ซึ่งก่อนที่จะนำเทคนิคนี้ไปใช้จริงในอุตสาหกรรม จำเป็นต้องมีการศึกษาปัจจัยพื้นฐานในห้องปฏิบัติการก่อนในลักษณะที่เป็นการจำลองขนาดของเครื่องให้มีขนาดเล็กลง อนุภาคที่ใช้ในการทดลองอาจจะเป็นอนุภาคที่ใช้จริงในอุตสาหกรรม หรืออาจจะเป็นอนุภาคสมมุติที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นวัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องจะเป็นท่ออะคริลิกใส เพื่อให้สามารถเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงภายในเครื่องได้ ซึ่งจะแตกต่างจากความจริงที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่เครื่องปฏิกรณ์จะมีขนาดใหญ่ วัสดุที่ใช้สร้างเครื่องจะเป็นวัสดุทึบแสง และมีปัจจัยอย่างอื่น เช่น อุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้อง

อนุภาคพีวีซีเป็นหนึ่งในอนุภาคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมพลาสติก อนุภาคพีวีซีที่ใช้ในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กสีขาวนวล กระบวนการทำแห้งก่อนที่จะนำไปจำหน่าย หรือนำเข้าสู่การผลิตในปัจจุบันเป็นการทำแห้งโดยใช้เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดธรรมดา ซึ่งมีปัญหาในเรื่องการถ่ายเทความร้อนฉะนั้นการนำฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนมาประยุกต์ในกระบวนการนี้จึงเป็นความคิดที่น่าสนใจ และเนื่องจากอนุภาคพีวีซีเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็ก การเคลื่อนที่ในไรเซอร์จะประสบปัญหาเรื่องของไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้น (Mahmoud และคณะ, 2006) รวมทั้งการเกาะติดตามผนังของไรเซอร์ เพราะฉะนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น

ในการทดลองจึงจำเป็นต้องเติมสารลดประจุไฟฟ้าลงไป เพื่อลดการเกาะผนัง ( Wang และคณะ, 2000 ) และช่วยลดอันตรายที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต

งานวิจัยนี้ศึกษาความเร็วของอนุภาคพีวีซีตามความสูง และรัศมีของโรเตอร์ ที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูง แล้ววิเคราะห์ในโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ และปริมาณสารลดประจุไฟฟ้า ข้อมูลที่ได้จะสามารถอธิบายปรากฏการณ์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ของผงพีวีซีซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาการออกแบบ และปรับปรุงเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไรเซชันแบบหมุนเวียนในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี และความเร็วของอนุภาคพีวีซีด้วยกล้องความเร็วสูงในโรเตอร์ที่มีความสูง 2 เมตร
2. ศึกษาผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ รวมถึงความเร็วของอนุภาคพีวีซี

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. สร้างเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรเซชันแบบหมุนเวียน
3. นำอนุภาคพีวีซี ที่ใช้ในการทดลองมาหาคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาด ความหนาแน่น
4. หาสมภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง
5. หาความดันลดคร่อมในโรเตอร์ และอัตราหมุนเวียนของอนุภาคพีวีซี
6. หาความเร็วของอนุภาคพีวีซีตามแนวแกน และแนวรัศมี
7. ผสมสารลดประจุไฟฟ้ากับอนุภาคพีวีซีแล้วทำการทดลองหาความดันลดคร่อมโรเตอร์ สัดส่วนช่องว่าง ความเร็วของอนุภาคพีวีซีตามแนวแกน และแนวรัศมี
8. วิเคราะห์สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถอธิบายถึงอุทกพลศาสตร์ของของอนุภาคพีวีซีภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในอุตสาหกรรมการทำแห้งอนุภาคพีวีซี
2. สามารถบอกความแตกต่างระหว่างการทดลองที่มีการผสมสารลดประจุไฟฟ้ากับการทดลองที่มีเพียงอนุภาคพีวีซีเพียงอย่างเดียวได้
3. สามารถนำเทคนิคการใช้กล้องความเร็วสูงไปประยุกต์ใช้กับงานวิจัยด้านอื่นๆ



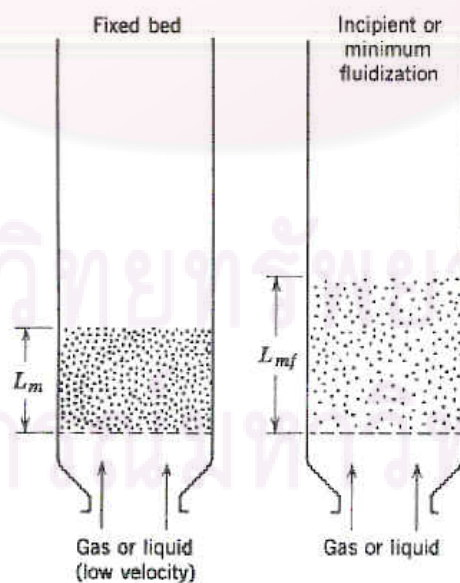
ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

### 2.1 การเกิดฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชัน เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถตอบสนองความต้องการทางด้านอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิต และทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพดี เช่น เตาเผาฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดเซชัน หน่วยของอุตสาหกรรมปิโตรเลียมในการแตกตัวของไอน้ำมันหนักด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (FCC Unit) เป็นต้น

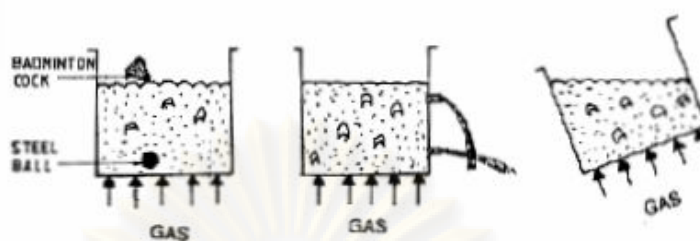
ฟลูอิดเซชัน คือ กระบวนการที่อนุภาคของแข็งประพติดตัวและมีคุณสมบัติคล้ายของไหล เปลี่ยนจากสถานะของแข็งที่อยู่นิ่ง กลายเป็นของเหลวที่สามารถไหลเทได้ กระทำได้โดยผ่านของไหล เช่น ของเหลวหรืออากาศ ไหลผ่านกลุ่มอนุภาคของแข็งที่ถูกบรรจุไว้ในส่วนล่างของภาชนะ ที่เรียกว่าอนุภาคเบด จากทางด้านล่างซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยการไหลนั้นจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคเบด ที่ความเร็วของไหลต่ำแรงเสียดทานที่เกิดจากการไหลยังมีค่าต่ำ ทำให้อนุภาคเบดอยู่นิ่งไม่เคลื่อนที่ แต่ที่ความเร็วของไหลมากขึ้นแรงเสียดทานที่เกิดจากการไหลจะมากพอที่จะต้านทานแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำในทิศตรงข้ามต่ออนุภาคเบด ทำให้อนุภาคขยับตัวหรือลอยขึ้นเป็นอิสระจากกัน และปริมาตรเบดจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วของของไหลสูงขึ้นจนแรงเสียดทานที่เกิดจากการไหลเท่ากับแรงโน้มถ่วงในขณะนี้ออนุภาคเบดจะแขวนลอยอยู่ในกระแสของไหล เรียกกระบวนการที่มีหลักการเช่นนี้ว่า ฟลูอิดไคซ์เบด ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความแตกต่างระหว่างเบดนิ่งกับฟลูอิดไคซ์เบด



เมื่อเกิดฟลูอิดเซชัน ระบายของผิวเบตจะขนานกับแนวระดับ และ อนุภาคเบตที่หนักกว่าจะตกลงสู่ส่วนล่าง ขณะที่อนุภาคที่เบากว่าจะลอยอยู่ส่วนบน ดังรูปที่ 2.2



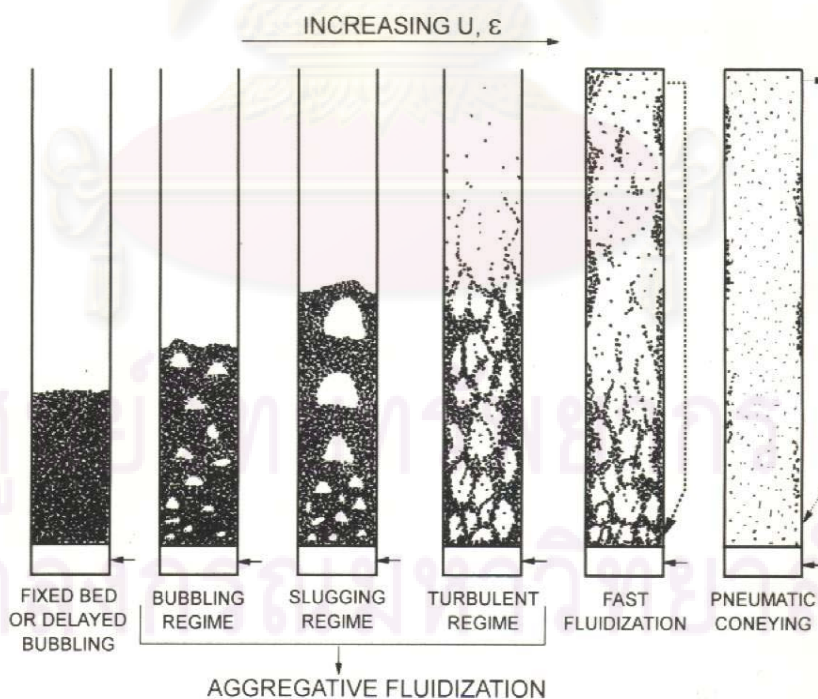
รูปที่ 2.2 ลักษณะของฟลูอิดเซชัน

ฟลูอิดเซชันสามารถจำแนกได้ 2 วิธี

### 2.1.1 จำแนกตามชนิดของไหลที่ใช้

1. ของแข็งกับของเหลว เบตจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ
2. ของแข็งกับอากาศ เบตกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และมีช่องว่างระหว่างอนุภาคเบตมาก

### 2.1.2 จำแนกตามลักษณะของฟลูอิดเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

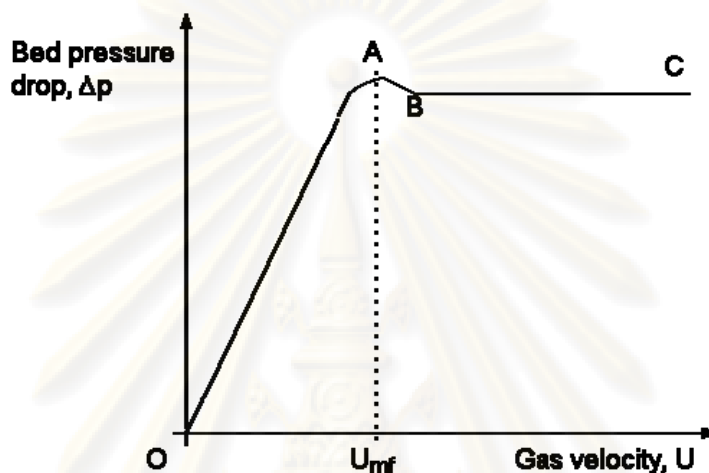


รูปที่ 2.3 รูปแบบการไหลของฟลูอิดเซชันเบตอากาศ-ของแข็ง

(Grace และคณะ, 1997)

### ก. เบดนิ่ง

เป็นช่วงที่ไม่มีการเคลื่อนที่ของเบดจากอิทธิพลการไหลของของไหล โดยของไหลจะไหลผ่านช่องว่างระหว่างเบด และเมื่อเพิ่มความเร็วของของไหลจะส่งผลต่อความดันภายในเบด เนื่องจากแรงเสียดทานในการไหลดังแสดงในรูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วอากาศที่ไหลผ่านเบด โดยช่วงเบดนิ่งจะอยู่ระหว่างจุด OA



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วก๊าซที่ไหลผ่านเบด (Rhodes และคณะ, 1998)

ความดันลดคร่อมตลอดหน้าตัดเบดจะเท่ากับน้ำหนักของเบด หรือจาก

$$\text{ความดันลด} = (\text{น้ำหนักเบด} - \text{แรงลอยตัวของอนุภาค}) / \text{พื้นที่หน้าตัดเบด}$$

หรือดั่งสมการที่ 2.1

$$\Delta P = \frac{LA(1-\varepsilon)(\rho_p - \rho_g)g}{A} \quad (2.1)$$

เมื่อ L คือ ความสูงเบด

A คือ พื้นที่หน้าตัดเบด

$\rho_p$  คือ ความหนาแน่นอนุภาคเบด

$\rho_g$  คือ ความหนาแน่นของเหลว

$\varepsilon$  คือ สัดส่วนช่องว่าง

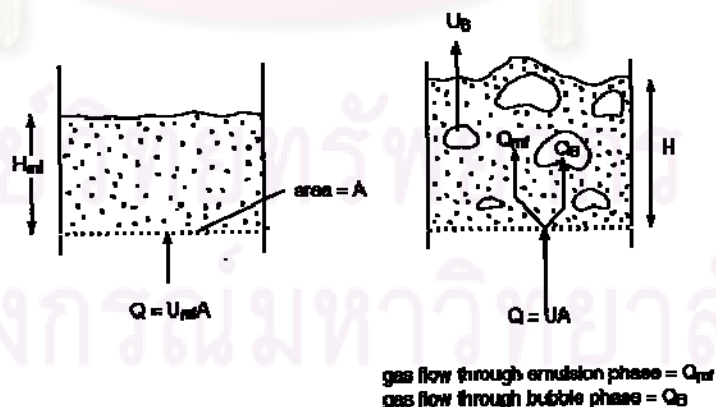
### ข. ฟลูอิดไธซ์เบด

จากรูปที่ 2.4 ช่วง BC เป็นช่วงที่เกิดการฟลูอิดไธซ์ มีการขยายตัวของปริมาตรเบด ในขณะที่แรงเสียดทานที่เกิดจากการไหลจะเท่ากับแรงโน้มถ่วง เกิดการแขวนลอยของอนุภาคเบด และความดันลดคร่อมเบดมีค่าคงที่ สามารถคำนวณความดันลดจากสมการที่ 2.1 แต่ที่จุด A พบว่ามีความดันลดสูงกว่าที่คำนวณจากสมการที่ 2.1 เนื่องจากการอัดแน่นของเบดหรือจากแรงกระทำระหว่างอนุภาค ที่จุดดังกล่าวสามารถเรียกได้ว่าเป็นความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไธซ์ (Minimum Fluidization Velocity;  $U_{mf}$ ) และเรียกเบด ณ จุดนี้ว่า Minimum Fluidized Bed และความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไธซ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดอนุภาคเบด และความหนาแน่นอนุภาค

### ค. ฟลูอิดไธซ์แบบฟองอากาศ

บริเวณที่อยู่เหนือจุดต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไธซ์ อาจพบฟองอากาศ โดยเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจนทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากทางด้านล่างของเบด เรียกเบดที่สภาวะนี้ว่าเบดแบบฟองอากาศ (Bubbling bed) และเรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วเริ่มต้นของการเกิดฟอง (Minimum bubbling velocity,  $U_{mb}$ ) ซึ่งความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟองขึ้นอยู่กับสมบัติของของแข็ง โดยของแข็งที่จัดอยู่ใน Geldart กลุ่ม A จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศสูงกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไธซ์ แต่ของแข็งที่จัดอยู่ใน Geldart กลุ่ม B และ D จะมีความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟองอากาศเท่ากับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไธซ์

ในกรณีที่เกิดฟองอากาศจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ภูมิภาค คือ ส่วนของฟองอากาศ และ ส่วนของอนุภาคเบดที่ล้อมรอบฟองอากาศนั้นจากทฤษฎีของ Toomey และ Johnstone (1952) กล่าวว่าอากาศส่วนเกินกว่าที่จุดต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไธซ์จะผ่านเบดไปในลักษณะของฟองอากาศ ดังนั้นการขยายตัวของเบดจึงเกิดจากฟองอากาศ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการไหลของอากาศผ่านเบด

การขยายตัวของเบตเป็นไปตามสมการ

$$\varepsilon_B = \frac{H - H_{mf}}{H} = \frac{Q - Q_{mf}}{AU_B} = \frac{(U - U_{mf})}{U_B} \quad (2.2)$$

โดยที่ Q คือ อัตราการไหลของอากาศ

H คือ ความสูงของเบต

$U_B$  คือ ความเร็วของฟองอากาศในเบต ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของฟองอากาศ และเส้นผ่านศูนย์กลางเบต

ตัวห้อย mf แทนภาวะต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไอเซชัน

### ง. ฟลูอิดไอเซชันแบบสลักกิ้ง

เมื่อฟองอากาศมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของอากาศ ฟองอากาศอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบต จะสังเกตเห็นฟองอากาศเคลื่อนที่ผ่านเบตและแยกของแข็งออกเป็นชั้นๆ ของแข็งจะถูกฟองอากาศผลักขึ้นไปและอนุภาคของแข็งจะตกกลับลงมาอีก ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าเกิดสลักกิ้ง (Slugging) เรียกความเร็วอากาศนี้ว่า ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสลักกิ้ง ( $U_{ms}$ ) ซึ่งจะเกิดความแปรปรวนของความดันอย่างมาก สามารถก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนในฟลูอิดไอเซชันเบตขนาดใหญ่ได้

### จ. ฟลูอิดไอเซชันเบตแบบปั่นป่วน

เมื่อความเร็วของอากาศที่เคลื่อนที่ผ่านเบตแบบฟองอากาศเพิ่มขึ้น จนมากกว่าค่า  $U_{mf}$  เบตจะเกิดการขยายตัว มีความดันลดลงที่ อนุภาคเบตจะลอยตัวอยู่ในกระแสของไหล มีแรงมากระทำจากแรงโน้มถ่วง แรงลอยตัว และแรงต้านทานการไหล เมื่อความเร็วของอากาศรอบๆอนุภาคมีความเร็วเท่ากับ Terminal Velocity ( $U_t$ ) หรือ ความเร็วตกอิสระของของแข็งในของไหล ถ้าความเร็วอากาศที่ป้อนเข้าเบตมีความเร็วมากกว่า Terminal Velocity อนุภาคจะเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอตลอด ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการไหลได้ 2 แบบ

1. การไหลแบบราบเรียบ อนุภาคจะเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงขึ้นกับตำแหน่งตามแนวรัศมีของหอตลอด เนื่องจากความเร็วมีลักษณะแบบ พาราโบลา
2. การไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งความเร็วของอากาศตามรัศมีหอตลอดจะปั่นป่วนและไม่แน่นอนที่ตำแหน่งต่างๆ

ในกรณีที่อนุภาคที่ใช้เป็นเบตมีขนาดไม่เท่ากัน จะทำให้ทิศทางการไหลของอนุภาคขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคและตำแหน่งในหอตลอด

ค่า Terminal Velocity สามารถคำนวณได้จากสมการของ Haider และ Levenspiel (Kunii and Levenspiel, 1969) โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามรูปร่างของของแข็ง กรณีของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม (Kunii and Levenspiel, 1997)

$$U_t^* = \left[ \frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{0.591}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.3)$$

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.4)$$

$$U_{t,spherical} = \left[ \frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.5)$$

$$U_{t,spherical} = \left[ \frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.6)$$

กรณีที่ของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[ \frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.7)$$

โดยที่

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

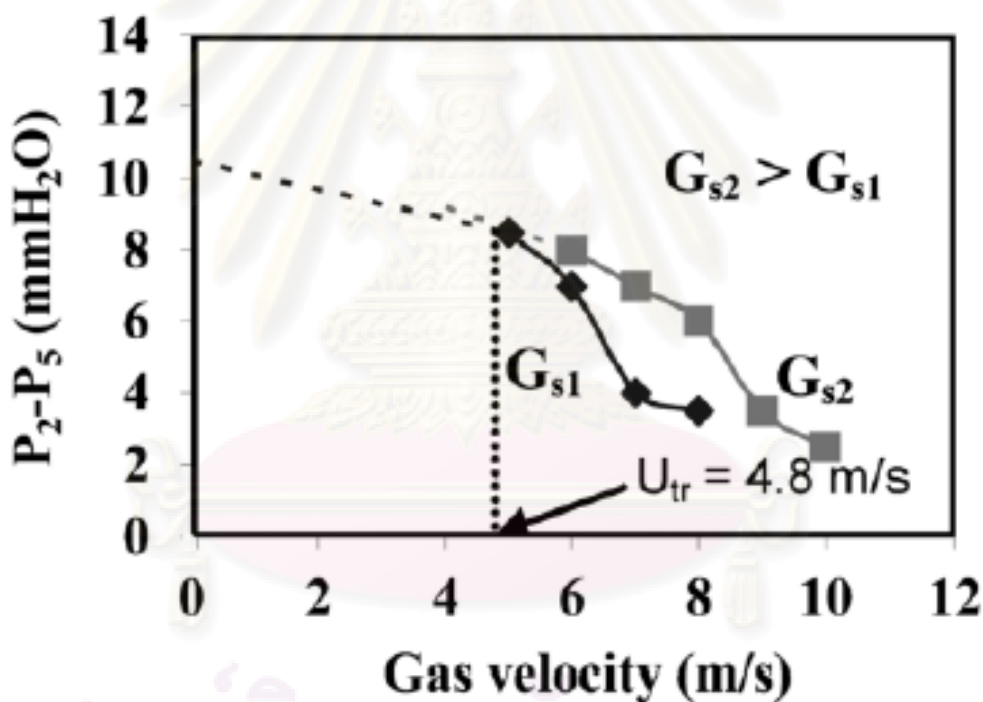
$$d_p^* = d_p \left[ \frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.9)$$

ฉ. ฟลูอิดเซชันความเร็วสูง

เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศในเบดแบบปั่นป่วนจนกระทั่งไม่สามารถระบุผิวด้านบนของเบดได้ เรียกเบดสภาวะนี้ว่า เบดที่ความเร็วสูง (Fast Bed) หรือฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง (Fast Fluidization) โดยความเร็วอากาศต่ำสุดที่ทำให้เบดเปลี่ยนจากเบดแบบปั่นป่วนเป็นฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง เรียกว่า Transport Velocity หรือ  $U_t$  ในขอบเขตฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูงมีการเคลื่อนที่ออกของอนุภาคของแข็งทางด้านบนของเบด เพื่อไม่ให้ปริมาณของแข็งในเบดหมดไป

จำเป็นต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่โดยการใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างของเบด ของแข็งจะรวมตัวกันเป็นกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผนังของเบด โดยที่อากาศและของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านในจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการไหลป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณของแข็งในเบดเจือจางมากขึ้น ในภาวะที่เบดเป็นฟลูอิดไอเซชันที่ความเร็วสูง ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบดกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของเบด ระบบแบบนี้จะเรียกว่า ฟลูอิดไอซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating fluidized bed, CFB)

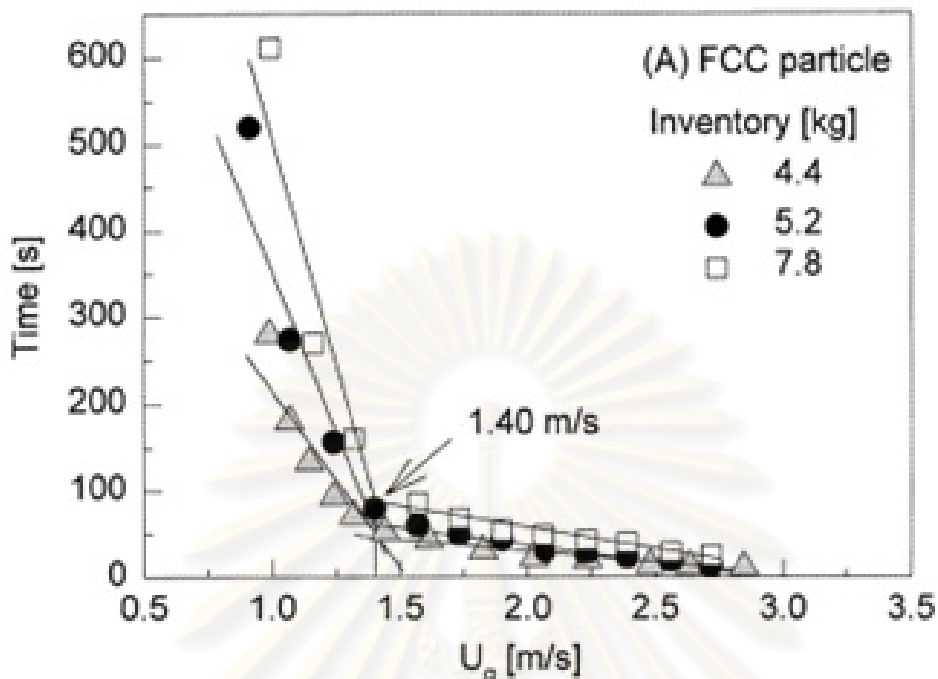
การหาค่า  $U_{tr}$  สามารถหาได้หลายวิธี เช่น จากการทดลองของ Yerushalmi และคณะ (1976) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลต่างของความดันอากาศบริเวณด้านล่างของไรเซอร์กับความเร็วอากาศที่อัตราการไหลของของแข็งต่างๆ จากนิยามของการทดลองนี้  $U_{tr}$  คือ ความเร็วอากาศที่น้อยที่สุดที่ทำให้ค่าผลต่างความดันอากาศบริเวณด้านล่างของไรเซอร์เปลี่ยนแปลงเมื่ออัตราการไหลของของแข็ง ( $G_s$ ) เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.6 การทดลองหาความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity,  $U_{tr}$ )

ในการทดลองของ Yerushalmi และคณะ (1976)

หรือหาจากการทดลองของ Numkung และคณะ (1999) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 การทดลองหา  $U_{tr}$  ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วอากาศต่างๆ กับเวลาที่ของแข็งเคลื่อนที่ออกจากไรเซอร์จนหมด จากนิยามของการทดลองนี้  $U_{tr}$  คือ ความเร็วอากาศที่น้อยที่สุดที่ทำให้เวลาที่ของแข็งใช้ในการเคลื่อนที่ออกจากไรเซอร์ลดลงอย่างรวดเร็ว โดยค่าความเร็วนี้จะมีค่าคงที่แม้จะเพิ่มปริมาณของของแข็งในระบบ



รูปที่ 2.7 การทดลองหาความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity,  $U_T$ ) ในการทดลองของ Numkung และคณะ (1999)

#### ข. ฟลูอิดไอเซนแบบส่งผ่าน

เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นจนมากกว่า  $U_T$  พบว่าความหนาแน่นของแข็งภายในเบดเบาบางมากเนื่องจากความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นมากจนเกิดเป็นการขนส่งของแข็งด้วยอากาศ ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของของแข็งในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่มีความเร่ง และของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผนังของเบด 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 โดยความเร็วอากาศที่ทำให้เบดเปลี่ยนจากขอบเขตการขนส่งแบบเจือจางเป็นเบดแบบฟลูอิดไอเซนที่ความเร็วสูง เรียกความเร็วอากาศนี้ว่า ความเร็วช็อคกิ้ง ชนิด A (Type A Choking Velocity,  $V_{CA}$ ) (Bi, 1995)

ดังนั้นสามารถสรุปช่วงของความเร็วอากาศที่ทำให้เกิดขอบเขตฟลูอิดไอเซนต่างๆ ได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ช่วงของความเร็วอากาศในการเกิดขอบเขตฟลูอิไดเซชันต่างๆ

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)
$U_{ms} < U < U_t$	เบตแบบสลักกิ้ง (Slugging bed)
$U_t < U < U_{tr}$	เบตแบบปั่นป่วน (Turbulent bed)
$U_{tr} < U < V_{CA}$	เบตแบบฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง (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 การจำแนกของแข็ง

ในการที่จะเกิดฟลูอิไดเซชันจะขึ้นกับอนุภาคของแข็งที่ใช้เป็นเบต ซึ่งมีผลต่อสภาวะที่ใช้ในการทำงาน อาทิ ความดันและอุณหภูมิ โดยทั่วไปของแข็งสามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่มตามวิธีของ Geldart โดยแบ่งตามผลของอากาศที่กระทำต่อเบต ดังรูปที่ 2.8 ลักษณะของอนุภาคในแต่ละกลุ่มอธิบายได้ดังนี้

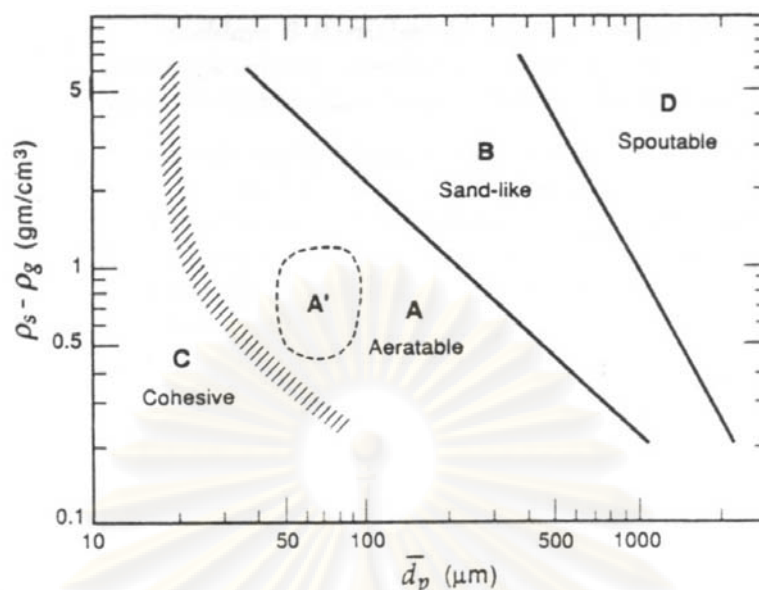
Group A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ สามารถทำให้เกิดฟลูอิไดเซชันได้และเป็นแบบสม่ำเสมอ (Smooth Fluidization) ที่ความเร็วอากาศต่ำๆ คือไม่มีฟองเกิดขึ้นและที่ความเร็วอากาศสูงๆ ก็ยังสามารถควบคุมการเกิดฟองอากาศได้

Group B คือ Sandlike เป็นของแข็งที่มีขนาด อยู่ในช่วง  $50 < d_p < 500$  ไมโครเมตร. และความหนาแน่นในช่วง  $1.4 < \rho_s < 4$  กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การเกิดฟลูอิไดเซชันยังเกิดได้ง่าย แต่จะเกิดเฉพาะฟลูอิไดเซชันแบบฟองอากาศ

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

Group D คือ Spoutable ของแข็งที่มีขนาดใหญ่และหรือความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงเกิดฟลูอิไดเซชันได้ยาก





รูปที่ 2.8 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart (Grace และคณะ, 1997)

โดยที่แต่ละกลุ่มมีลักษณะการใช้งานและสภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน ตามวัสดุแต่ละ

ประเภท สรุปได้ดังตารางที่ 2.2

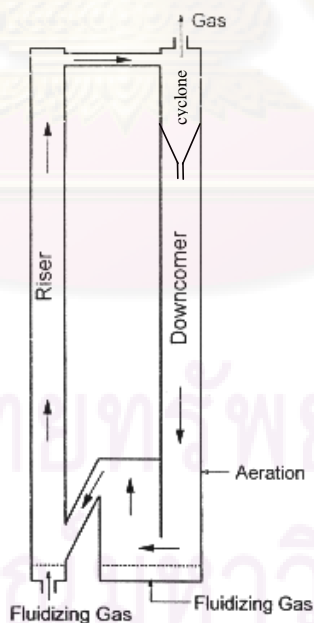
ตารางที่ 2.2 การจำแนกอนุภาคตามวิธีของ Geldart

กลุ่ม	C	A	B	D
ลักษณะสำคัญ	เกาะตัวกัน ยากต่อการเกิด ฟลูอิดไอเซชัน	เหมาะสมกับการ เกิดฟลูอิดไอเซชัน	เกิดฟองที่ความ เร็วต่ำสุดในการ เกิดฟลูอิดไอเซชัน	อนุภาคขนาดใหญ่
ตัวอย่างอนุภาค	แป้ง , ซีเมนต์	อนุภาคพีวีซี , FCC	ทราย	เม็ดล็ดพันธุ์พืช
คุณสมบัติ				
การขยายตัวของ เบด	ต่ำ	สูง	ปานกลาง	ต่ำ
ความสามารถใน การแขวนลอย	ตกกลับในตอน แรกอย่างรวดเร็ว แล้วจึงช้าลง	สูง และตกกลับ เป็นเชิงเส้นผกผัน กับความเร็ว อากาศ	ต่ำ และตกกลับ อย่างรวดเร็ว	ต่ำ และตกกลับ อย่างรวดเร็ว
ลักษณะการเกิด ฟอง	ไม่เกิดฟอง	ฟองมารวมกันมี ขนาดใหญ่ที่สุด	เกิดฟองอากาศ หลายขนาด	เกิดฟองอากาศ หลายขนาด

## 2.3 ฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียน

การนำฟลูอิดไรส์เบดมาใช้งาน นับย้อนได้ตั้งแต่ช่วงทศวรรษที่ 1940 เมื่อถูกนำไปใช้ในกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ยังมีความเร็วของอากาศต่ำอยู่เนื่องจากข้อจำกัดของตัวเร่งปฏิกิริยา จนกระทั่งราวทศวรรษที่ 70 ถึงจะมีฟลูอิดไรส์เบดความเร็วสูง

ระบบฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB) ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกโดย Winkler (Grace และคณะ, 1997) ในปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้ฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียนในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างเช่น การเผาไหม้ถ่านหิน (Coal Combustion) การผลิตแก๊สจากถ่านหิน (Coal Gasification) และ กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรคาร์บอนหนัก (Fluid Catalytic Cracking, FCC) เป็นต้น (Sabbaghan และคณะ, 2004) เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียนจะทำงานภายใต้ภาวะเบดแบบความเร็วสูงหรือเบดแบบส่งผ่าน ต้องทำการป้อนอนุภาคเข้าอย่างต่อเนื่อง เพื่อรักษาความหนาแน่นของอนุภาคภายในไรเซอร์ให้คงที่ ฉะนั้นจึงต้องมีโครงสร้างระบบหมุนเวียนเพื่อนำอนุภาคป้อนกลับเข้าส่วนล่างของไรเซอร์อีกครั้ง เทคนิคฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียนมีข้อดีดังนี้ มีอัตราการถ่ายโอนของมวลและความร้อนระหว่างแก๊สและของแข็งสูง มีการกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่อง และสามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลายชนิด (Wang และคณะ, 2005) ส่วนประกอบโดยทั่วไปของฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียน ดังรูปที่ 2.9



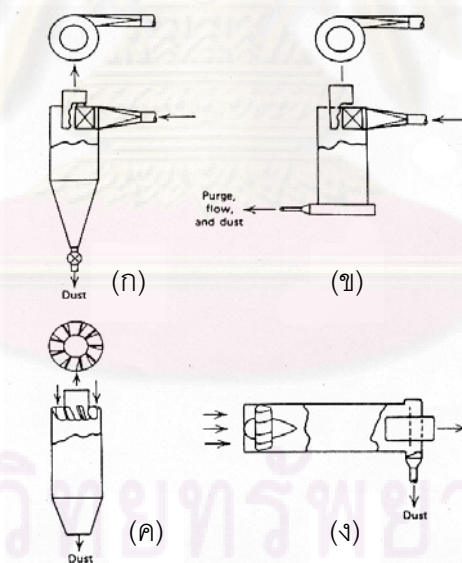
รูปที่ 2.9 ระบบฟลูอิดไรส์เบดแบบหมุนเวียน (Grace, 1997)

1. ไรเซอร์ (Riser) เป็นส่วนที่เกิดฟลูอิดไรส์เบดความเร็วสูง และปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่รวมถึงการเผาไหม้มักเกิดที่ส่วนนี้ มีลักษณะเป็นท่อสูงประมาณ 5-20 เมตร ในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน

เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Fluid Catalytic Cracking) ระหว่างไอน้ำมันหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนในเตาเผาแบบฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed Combustor: CFBC) เป็นส่วนที่เกิดการเผาไหม้ของสารเชื้อเพลิงและอาจมีการรวมส่วนแลกเปลี่ยนความร้อนมาไว้ที่โรเตอร์ ในการสร้างส่วนของโรเตอร์สำหรับการเผาไหม้ ซึ่งจะพบการกัดกร่อนจากอนุภาคที่มากกระทบผนังและความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา จึงมักใช้โลหะทนความร้อน อาทิ เหล็ก หุ้มภายในด้วยอิฐทนไฟเพื่อป้องกันการกัดกร่อนและความร้อน หรือ สร้างจากโลหะผสมจำพวก สแตนเลสสตีล แล้วหุ้มภายนอกด้วยฉนวน

2. Gas-Solid Separator เช่น Cyclone ทำหน้าที่ดักจับอนุภาคของแข็งที่หลุดจากท่อโรเตอร์ โดยอาศัยแรงเหวี่ยงสู่ศูนย์กลาง เหมาะสำหรับดักจับอนุภาคที่ร้อน มีขนาดมากกว่า 10 ไมครอน และยังคงมีความดันลดคร่อมต่ำ ส่วนบนของไซโคลอนจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกส่วนล่างจะเป็นโคน เมื่อของไหลถูกป้อนเข้าทางส่วนทรงกระบอกด้านบน และจะหมุนวนจนบิดเป็นเกลียวลงมาตามส่วนโคน ซึ่งอากาศจะแยกออกจากอนุภาคและจะหมุนวนส่วนทางเป็นเกลียวชั้นในออกทางด้านบน ซึ่งอาจออกไปสู่ไซโคลอนอีกตัวหรือ Gas-Solid Separator อีกชนิดคือ ถุงกรอง เพื่อดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า

ไซโคลอนสามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด ตามทิศทางการไหลของของไหล ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ชนิดของไซโคลอน

รูป (ก) เข้าตามแนวเส้นสัมผัสการหมุน ออกตามแนวแกน

รูป (ข) เข้าตามแนวเส้นสัมผัสการหมุน ออกตามแนวเส้นรอบนอก

รูป (ค) เข้าตามแนวแกน ออกตามแนวแกน

รูป (ง) เข้าตามแนวแกน ออกตามแนวเส้นรอบนอก

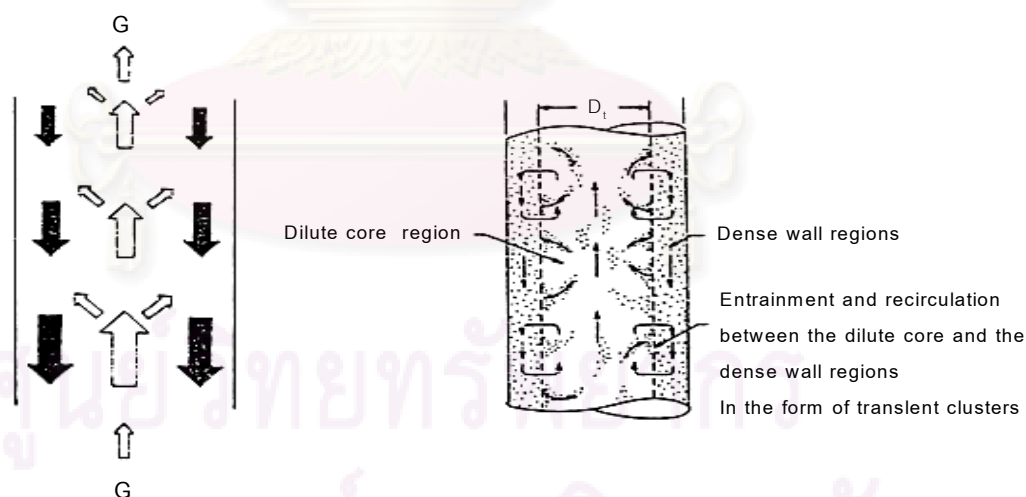
3. ท่อป้อนกลับ ( Downcomer หรือ Return Leg) ทำหน้าที่ป้อนเม็ดของแข็งที่ได้จากไซโคลนกลับไปยังด้านล่างของท่อโรเตอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดของแข็ง

4. ระบบป้อนอนุภาค อาทิ L – วาล์ว , Loop Seal หรือวาล์วปีกผีเสื้อ ควบคุมอัตราการป้อนของอนุภาคเข้าสู่โรเตอร์

ฟลูอิดไอเซชันที่ความเร็วสูง เป็นลักษณะหนึ่งของการสัมผัสระหว่างอากาศกับของแข็ง ซึ่งอากาศจะเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของอนุภาคของแข็งที่อยู่เหนือตัวกระจายอากาศ โดยอากาศจะมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาค ทำให้อนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน

1. Cluster phase อนุภาคของแข็งเกาะอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่มๆ เคลื่อนที่ขึ้นลง มีการสลายตัวและรวมตัวใหม่ภายในโรเตอร์
2. Disperse phase อนุภาคของแข็งมีเบาบางกระจายกันออกไป (อยู่ห่างกัน) และเคลื่อนที่ขึ้นไปยังท่อป้อนกลับ

เม็ดของแข็งภายในเบดส่วนใหญ่จะอยู่ใน cluster phase และมีการเคลื่อนที่ขึ้นไปจนเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะตกกลับลงมาตามผนังของท่อโรเตอร์ เมื่อเคลื่อนที่ตกกลับมาถึงจุด ๆ หนึ่ง cluster ก็แตกสลายตัวออกจากกัน และเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นไปอีกครั้ง โดยการรวมตัวกันเป็น cluster และการสลายตัวออกจากกันจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.11



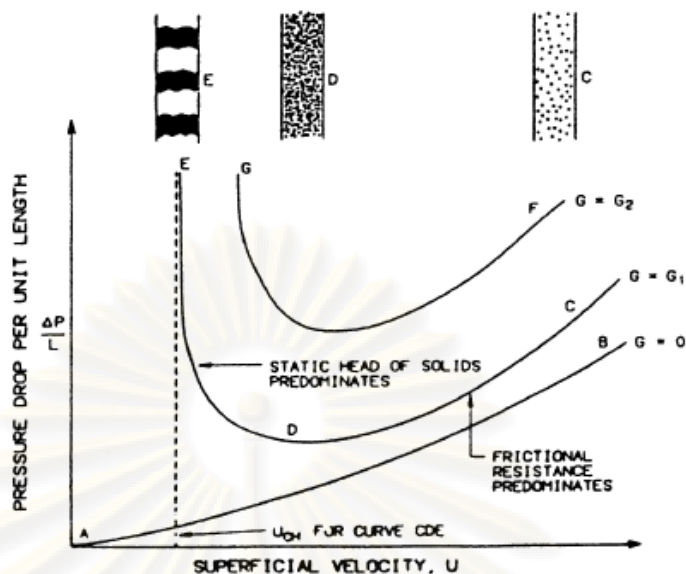
รูปที่ 2.11 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Cluster (Basu และคณะ, 1991)

เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่สัมผัสกันของอากาศและของแข็ง และความหนาแน่นของของแข็งตลอดความยาวของท่อโรเตอร์ จะเห็นรูปแบบการกระจายตัวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

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

### 2.3.1 ขอบเขตในระบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน

ระบบฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียนส่วนใหญ่จะทำงานอยู่ในขอบเขตของฟลูอิดซ์ชันที่ความเร็วสูง ซึ่งได้มีการศึกษาเพื่อหาคำนิยามของขอบเขตของฟลูอิดซ์ชันที่ความเร็วสูง โดย Yerushalmi และ Cankurt ได้นิยามขอบเขตของฟลูอิดซ์ชันที่ความเร็วสูง คือ ขอบเขตที่เกิดขึ้นเมื่อความเร็วอากาศมากกว่า Terminal Velocity ที่ต่ำสุด ซึ่งจะไม่เกิดสภาวะช็อคกิ้งเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเปลี่ยนแปลง ซึ่งคำนิยามนี้มีความคล้ายคลึงกับคำนิยามของ Rhodes และ Geldart ซึ่งได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาขอบเขตการเกิดฟลูอิดซ์ชันที่ความเร็วสูง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันลดคร่อมเบดต่อหนึ่งหน่วยความยาวและความเร็วอากาศและสามารถสรุปผลขอบเขตในการเกิด fast bed แสดงดังรูปที่ 2.12 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 2.6 ดังนั้นที่จุด E จึงเป็นจุดที่เปลี่ยนจากภาวะ Fast Bed ไปเป็น Captive Fluidized Bed (Turbulent Bed) ยกเว้นกรณีที่คอลัมน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมาก เบดจะกลายเป็น สลัดกิ้ง (Slugging) ภาวะที่จุด E จะเรียกว่า Chocking Condition (เป็นจุดที่อากาศอิมพัลส์ด้วยของแข็ง) และความเร็วที่จุด E จะเรียกว่าความเร็วช็อคกิ้ง (Chocking Velocity)



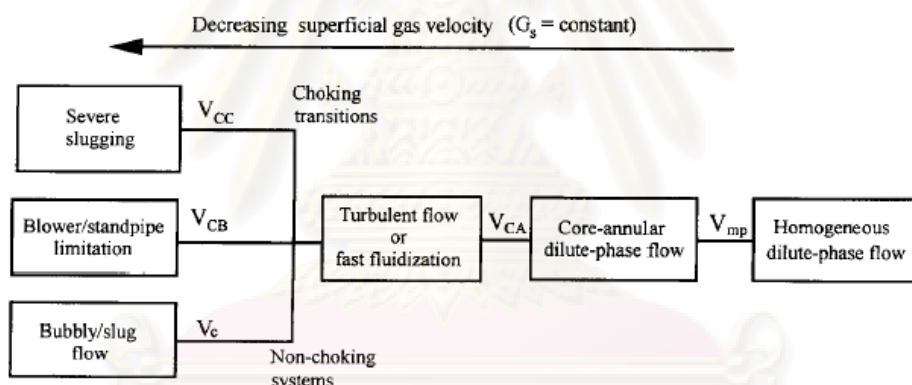
รูปที่ 2.12 ขอบเขตของ Fast Fluidization (Basu และ Fraser, 1991)

การเปลี่ยนแปลงขอบเขตไปเป็นขอบเขตฟลูอิโดเซชันที่ความเร็วสูงมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วอากาศและอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง โดยการเปลี่ยนแปลงขอบเขตเนื่องจากการลดความเร็วอากาศ ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งคงที่ แสดงดังรูปที่ 2.13 พบว่าการเปลี่ยนแปลงขอบเขตในระบบฟลูอิโดเซชันแบบหมุนเวียนสัมพันธ์กับความเร็วในการเกิดช็อคกิ้ง (Chocking velocity) ซึ่งความเร็วช็อคกิ้งแบ่งได้ 3 ชนิด ได้แก่ A B และ C โดยสภาวะช็อคกิ้ง (Chocking Condition) คือ สภาวะที่อากาศอิมพัลส์ไปด้วยของแข็ง ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากเบดแบบเฉื่อยจางเป็นเบดแบบหนาแน่นโดยความเร็วอากาศที่สภาวะนี้เรียกว่าความเร็วช็อคกิ้ง จากแผนผังพบว่าที่ความเร็วอากาศสูงมาก โดยความเร็วอากาศสูงกว่า  $V_{mp}$  การขนส่งภายในโรเตอร์เป็นการไหลแบบเบดเบาบางที่เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous dilute-phase flow) ซึ่งที่ความเร็วนี้ความดันของอากาศภายในคอลัมน์จะเท่ากันตลอดทั้งคอลัมน์ โดยเมื่อความเร็วอากาศลดลงพบว่าการไหลภายในคอลัมน์จะเปลี่ยนเป็นการไหลแบบเบดเบาบางที่เป็นคอร์-แอนนูลาร์ (Core-Annular dilute-phase flow) เมื่อความเร็วอากาศลดลงจนกระทั่งมีการแขวนลอยของแข็งภายในอากาศอย่างหนาแน่น แต่ยังมีหลุดออกของของแข็งออกจากคอลัมน์ ที่สภาวะนี้ต้องการความเร็วอากาศ และอัตราการไหลป้อนกลับของแข็งที่สูง ซึ่งเรียกความเร็วอากาศที่เปลี่ยนจากการขนส่งแบบเบดเบาบางไปเป็นการขนส่งแบบเบดหนาแน่นนี้ว่าความเร็วช็อคกิ้งชนิด A (Type A chocking velocity,  $V_{CA}$ ) ซึ่งที่ความเร็วช็อคกิ้งชนิด A อาจเกิดการขนส่งแบบเบดหนาแน่นชนิดเบดแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) หรืออาจเป็นเบดแบบฟลูอิโดเซชันที่ความสูง (Fast Fluidization) และเมื่อความเร็วอากาศลดลงจนกระทั่งอากาศไม่สามารถนำพาของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์ พบว่าของแข็งเริ่มสะสมอยู่

ทางด้านล่างของคอลัมน์ ซึ่งทำให้การขนส่งแบบเบตหนาแน่นสลายไป เรียกความเร็วอากาศนี้ว่า ความเร็วช็อกกิ้งชนิด B (Type B choking velocity,  $V_{CB}$ ) และในอีกกรณีโดยที่ความเร็วอากาศที่ลดลงยังสูงพอที่จะนำพาของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์ และยังมีอัตราการการป้อนของแข็งเข้าสู่คอลัมน์ แต่ไม่สามารถเกิดการขนส่งแบบเบตหนาแน่นได้เนื่องจากเกิดสลักกึ่งภายในคอลัมน์ เรียกความเร็วอากาศนี้ว่าความเร็วช็อกกิ้งชนิด C (Type C choking velocity,  $V_{CC}$ ) จากแผนผังพบว่า การที่จะทำให้เกิดฟลูอิดิเซชันที่ความเร็วสูงต้องให้ความเร็วอากาศต่ำกว่า  $V_{CA}$  โดย Bi และ Fan ได้ประมาณค่า  $V_{CA}$  ไว้ดังนี้

$$\left( \frac{V_{CA}}{\sqrt{gd_p}} \right) = 21.6Ar^{0.105} \left( \frac{G}{\rho_g V_{CA}} \right)^{0.542} \tag{2.10}$$

โดยที่ Ar คือ เลขอาร์คิมิดีส (Archimedes number =  $\rho_g(\rho_p - \rho_g)gd_p^3 / \mu^2$ ) [-]  
 G คือ อัตราการหมุนเวียนของของแข็ง (กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที)



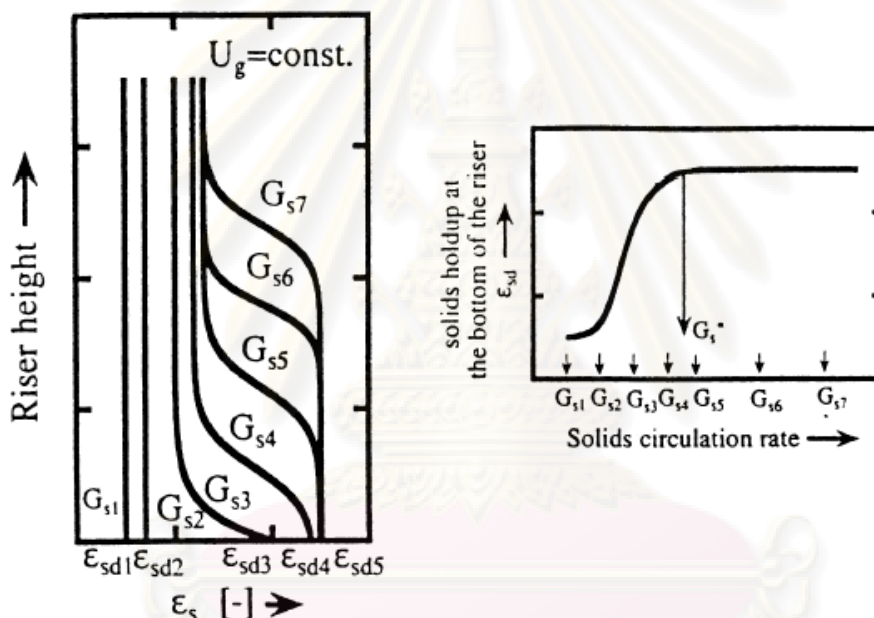
รูปที่ 2.13 แผนผังแสดงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงภายในเครื่องฟลูอิดิเดชันแบบหมุนเวียน (Bi และคณะ, 1995)

ในระบบฟลูอิดิเดชันแบบหมุนเวียนพบว่าอัตราการหมุนเวียนของของแข็งเป็นตัวแปรสำคัญอีกตัวแปรหนึ่ง เนื่องจากอัตราการหมุนเวียนของแข็งในระบบฟลูอิดิเดชันแบบหมุนเวียนต้องมากกว่า Saturation carrying capacity หรือ  $G_s^*$  ถึงจะรักษาสถานะเบตแบบความเร็วสูงให้คงตัวได้ (Smolder และคณะ, 2001) โดย Bai และ Kato ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า  $G_s^*$  แสดงดังรูปที่ 2.14 พบว่า  $G_s^*$  คือ อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่น้อยที่สุดที่ทำให้ปริมาณของแข็งที่อยู่ทางด้านล่างไรเซอร์มีค่ามากที่สุด โดยที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่มากกว่า  $G_s^*$  พบว่าสัดส่วนของแข็งที่สะสมอยู่ทางด้านล่างไรเซอร์จะคงที่เมื่ออัตราการหมุนเวียนหรือปริมาณของของแข็งเริ่มต้นเปลี่ยนแปลงไป และจะสังเกตเห็นลักษณะของการกระจายตัวของแข็งตลอดทั้ง ไรเซอร์มีลักษณะ

เป็นรูปตัวเอส (S-Shape) แสดงดังเส้นกราฟ  $G_{s3}$ - $G_{s7}$  โดยสามารถแบ่งเขตเป็น 2 ส่วน ได้แก่ เขตหนาแน่นทางด้านล่างคอลัมน์ และเขตเบาบางทางด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของขอบเขตฟลูอิดไอเซชันที่ความเร็วสูง (Smolder และคณะ, 2001) แต่ที่อัตราการหมุนเวียนของของแข็งที่น้อยกว่า  $G_s^*$  พบว่าสัดส่วนของแข็งเท่ากันตลอดทั้งไรเซอร์ดังเส้นกราฟ  $G_{s1}$ - $G_{s2}$  โดยสามารถคำนวณค่า  $G_s^*$  ได้ดังสมการที่ 2.18

$$\frac{G_s^* d_p}{\mu} = 0.125 Fr^{1.85} Ar^{0.63} \left( \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} \right)^{-0.44} \quad (2.11)$$

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



รูปที่ 2.14 การทดลองหา Saturation carrying capacity (Smolder และคณะ, 2001)

### 2.3.2 โครงสร้างของเขตที่ความเร็วสูง

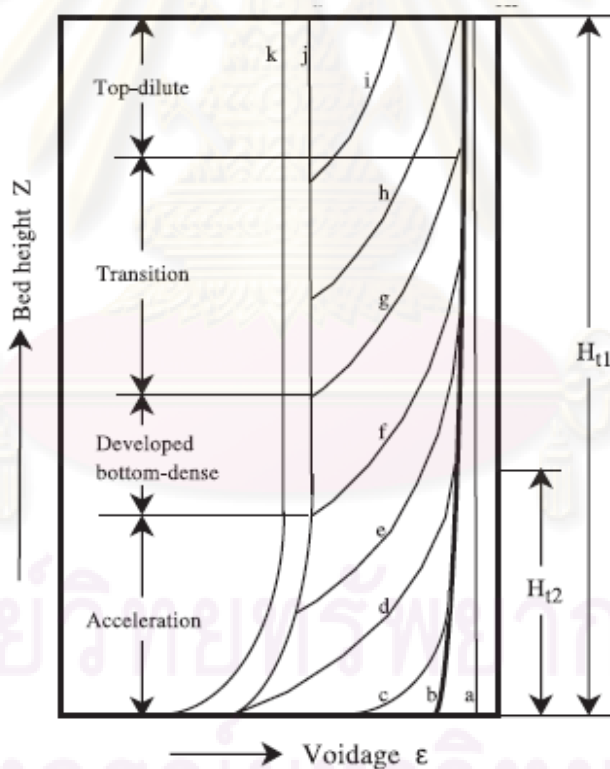
ในระบบฟลูอิดไอเซชันแบบหมุนเวียนนั้น การกระจายตัวของเม็ดของแข็งจะไม่สม่ำเสมอทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี

#### 1. รูปแบบการไหลตามแนวแกน

การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ แสดงในรูปที่ 2.15 โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการหมุนเวียนของแข็งที่ความเร็วอากาศคงที่ค่าหนึ่ง รูปแบบสัดส่วนช่องว่างจะเปลี่ยนจากขอบเขตการขนส่งแบบเบดเจือจาง (Dilute phase transport regime) ไปเป็นขอบเขตฟลูอิดไอเซชันที่สภาวะความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed) และรูปแบบการขนส่งแบบเบดหนาแน่น (Dense phase transport regime) ตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อัตราการหมุนเวียนของแข็งต่ำที่สุด



พบว่าสัดส่วนช่องว่างของอากาศภายในคอลัมน์มากที่สุด โดยมีโพรไฟล์ของสัดส่วนช่องว่างคงที่ตลอดทั้งแนวแกน แสดงดังเส้นกราฟที่ a-b ซึ่งเป็นรูปแบบการขนส่งแบบเบดเจือจาง โดยเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเพิ่มขึ้นพบว่าโพรไฟล์สัดส่วนช่องว่างตลอดแนวแกนเปลี่ยนเป็นรูปตัวเอส (S-Shape) ซึ่งเป็นรูปแบบพิเศษในระบบฟลูอิดาไดเซชันที่ความเร็วสูง แสดงดังเส้นกราฟ c-g โดยสามารถแบ่งเบดออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เบดหนาแน่น (Dense Bed) บริเวณด้านล่าง และเบดเบาบาง (Dilute Bed) บริเวณด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งจุดเปลี่ยนจากเบดแบบหนาแน่นไปเป็นเบดแบบเบาบางอยู่สูงขึ้นเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือบริเวณที่เป็นเบดหนาแน่นจะเพิ่มมากขึ้น และเมื่ออัตราการหมุนเวียนของของแข็งเพิ่มขึ้นค่าสัดส่วนช่องว่างจะลดลงเนื่องจากมีปริมาณของแข็งสะสมเพิ่มมากขึ้น และลักษณะของกราฟเปลี่ยนจากรูปตัวเอสที่เบดมีการแบ่งชั้นเป็นเบดหนาแน่นและเบดเบาบางอย่างชัดเจน จนโพรไฟล์สัดส่วนช่องว่างเกือบเป็นเส้นตรง นั่นคือสัดส่วนช่องว่างเท่ากันตลอดทั้งคอลัมน์ แสดงดังเส้นกราฟ j-k แสดงถึงรูปแบบการขนส่งแบบเบดหนาแน่น



For operations at a specified  $U_g$  but varied  $G_s$

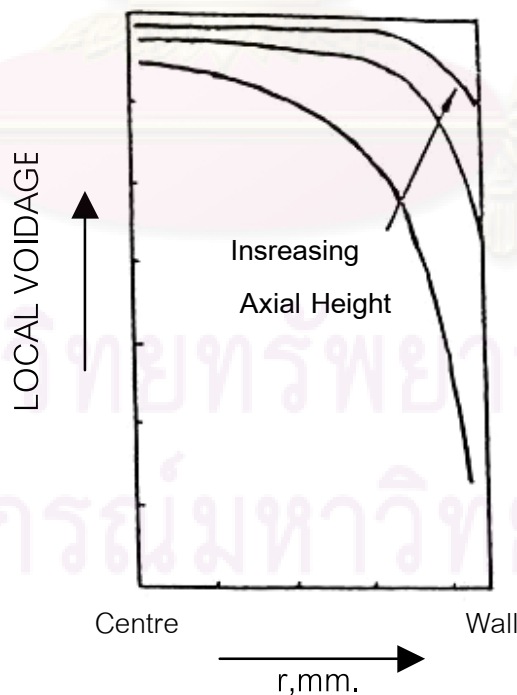
รูปที่ 2.15 รูปแบบการกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน (Xu และคณะ, 2003)

## 2. รูปแบบการไหลตามแนวรัศมี

สำหรับการกระจายตัวในแนวรัศมี (Radial Distribution) Bader และคณะ (1988) ได้ทำการศึกษา และสรุปได้ว่า สัดส่วนโดยปริมาตรของเม็ดของแข็งที่พื้นที่หน้าตัดเดียวกัน (Local Volume Fraction of Solid) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากกึ่งกลางของคอลัมน์ไปยังผนังโดยจะมีค่ามากที่สุดที่ผนัง และมีค่าต่ำสุดที่กึ่งกลางของคอลัมน์ หรือสัดส่วนช่องว่างมีค่ามากที่สุดที่กึ่งกลางท่อ และมีค่าต่ำสุดที่ผนัง และการกระจายตัวในแนวรัศมีจะมีน้อย เมื่ออัตราการป้อนของแข็งมีค่าต่ำลง หรือความเร็วอากาศลดต่ำลง นอกจากนี้แล้วที่บริเวณด้านบนของคอลัมน์การกระจายตัวก็มีน้อยลงเช่นกัน ดังรูปที่ 2.16 Basu และ Fraser เสนอว่าการกระจายตัวในแนวรัศมีหรือสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมีจะขึ้นอยู่กับระยะในแนวรัศมี ( $r$ ) จากแกนกลาง และสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัด ( $\epsilon_{av}$ ) ที่พิจารณาเท่านั้น และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมี,  $\epsilon(r)$  ได้ดังนี้ (Basu และคณะ, 1991)

$$\epsilon(r) = \epsilon_{av}^{[3.6(r/R)^{6.47} + 0.191]} \quad (2.12)$$

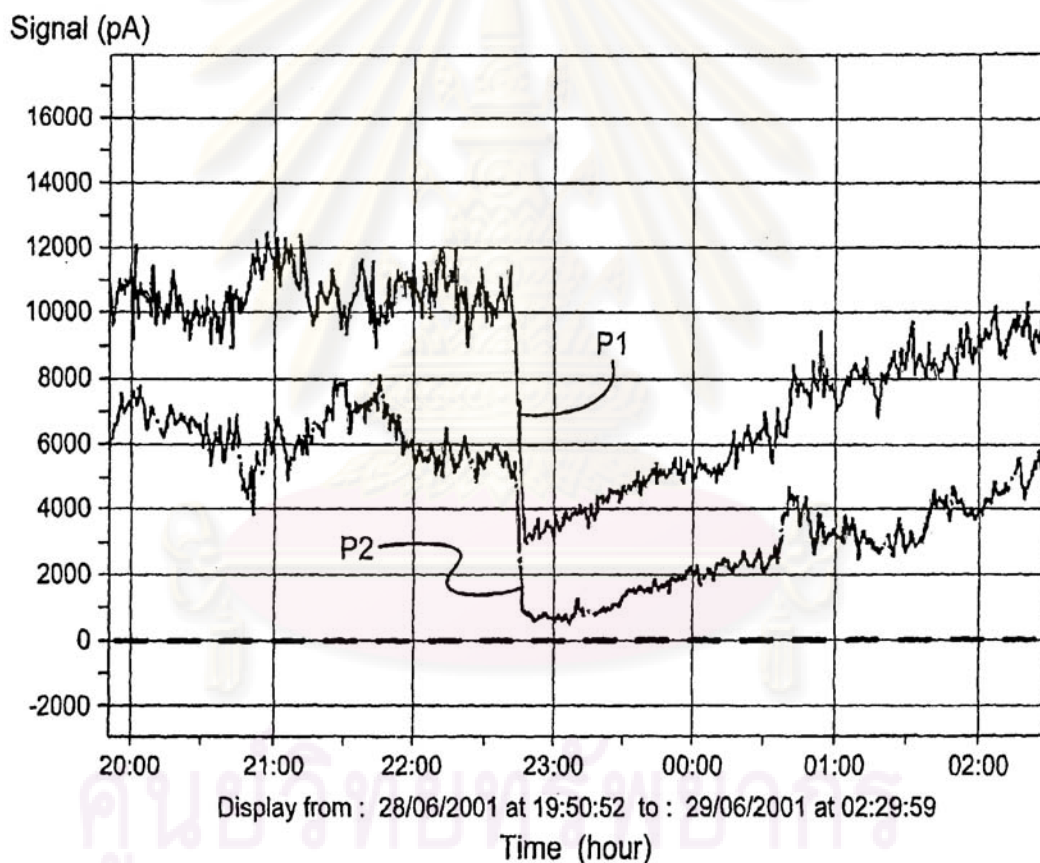
- โดยที่  $\epsilon_{av}$  คือ สัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ  
 $r$  คือ ระยะทางในแนวรัศมีที่ต้องการวัดสัดส่วนช่องว่าง, เมตร  
 $R$  คือ รัศมีของท่อไรเซอร์, เมตร



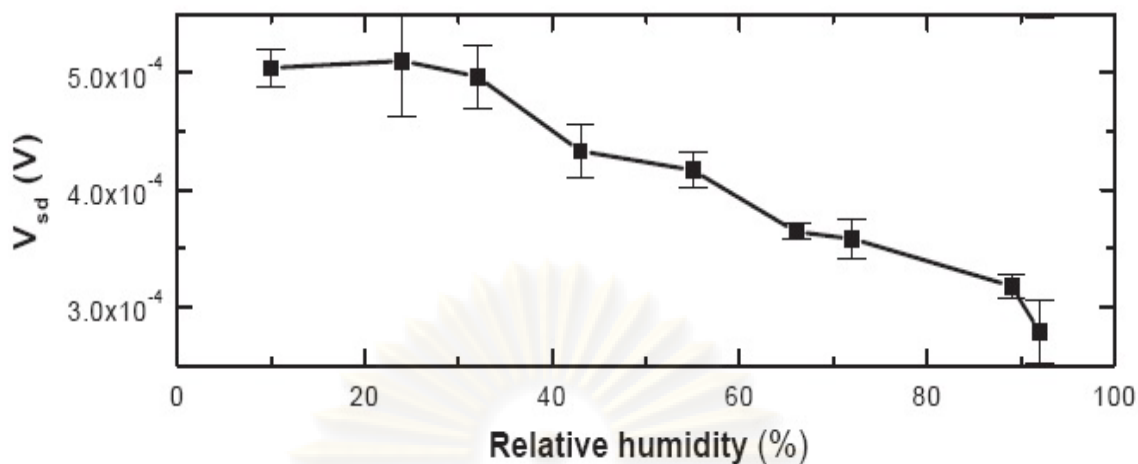
รูปที่ 2.16 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ Fast Bed (Basu และคณะ, 1991)

## 2.4 สารลดประจุไฟฟ้า

ประจุไฟฟ้าเกิดจากการชนกัน การเสียดสีกันระหว่างอนุภาค หรือการเสียดสีระหว่างอนุภาคกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ (Mehranni และคณะ, 2007) ซึ่งในระบบของฟลูอิดไฮดรอลิกการเกิดประจุไฟฟ้าจะทำให้เกิดปัญหามากมาย เช่น การเปลี่ยนแปลงอุทกพลศาสตร์ การรวมตัวกันของอนุภาค รบกวนการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ และเป็นอันตรายจากการระเบิด (Yao และคณะ, 2002) โดยวิธีการลดประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทำได้โดยการใช้สารลดประจุไฟฟ้า (Anti-static Agent) หรือการเพิ่มความชื้นให้กับระบบดังแสดงในรูปที่ 2.17 และ 2.18



รูปที่ 2.17 ผลของการเติมสารลดประจุไฟฟ้า ATMER 129 ที่มีผลต่อค่าประจุไฟฟ้าในเครื่องฟลูอิดไฮดรอลิกที่ใช้ในการผลิต PE (United States Patent 6946530)



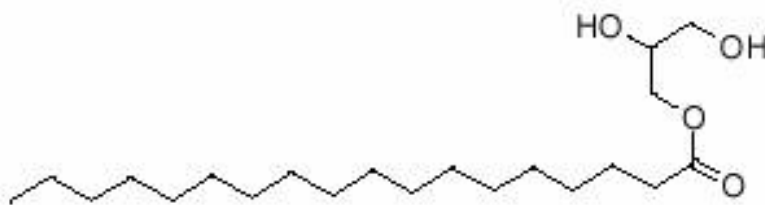
รูปที่ 2.18 ผลของความชื้นที่มีต่อศักย์ไฟฟ้าในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดที่ใช้ PE  
ในการทดลองของ Yao และคณะ (2002)

สารลดประจุไฟฟ้าส่วนใหญ่ คือ สารที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ เช่น โลหะออกไซด์ หรือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะโมเลกุลเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ยาว (Long-chain Aliphatic Hydrocarbon) ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ปลายข้างใดข้างหนึ่ง ซึ่งสามารถแบ่งสารลดประจุไฟฟ้าตาม ส่วนประกอบได้เป็น 5 ชนิด คือ

1. Glycerol Ester เช่น Glycerol Monostearate
2. Sorbitan Ester เช่น Sorbitan Polyoxyethylene Ester
3. Alkylamine Carboxylate เช่น Alkylamine Ethoxylates
4. Hydrogen Peroxide
5. Alkali Metal Halide

ตัวอย่างสารลดประจุไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.19 โดยสารลดประจุไฟฟ้าสามารถแบ่งออกตาม การใช้งานได้เป็น 2 ชนิด คือ

1. สารลดประจุไฟฟ้าชนิดผสม (Internal Anti-static Agent) คือ สารลดประจุไฟฟ้าที่ผสม เข้ากับวัสดุเบดโดยตรง
2. สารลดประจุไฟฟ้าชนิดเคลือบ (External Anti-static Agent) คือ สารลดประจุไฟฟ้าที่ เคลือบที่ผิวของวัสดุ



รูปที่ 2.19 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของสารลดประจุไฟฟ้า

ในการใช้สารลดประจุไฟฟ้าในกระบวนการต่างๆ ปัจจัยที่สำคัญในการเลือกใช้สารลดประจุไฟฟ้าคือ ชนิดของอนุภาค โดยชนิด และปริมาณของสารลดประจุไฟฟ้าที่ใช้กับอนุภาคต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.3 โดยในปัจจุบันสารลดประจุไฟฟ้ามีการใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการต่างๆ เช่น การขึ้นรูปพลาสติก การผลิตยา ช่วยลดการอุดตันภายในเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 แสดงชนิด และปริมาณของสารลดประจุไฟฟ้าที่ใช้กับอนุภาคต่างๆ

อนุภาค	สารลดประจุไฟฟ้า	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
PVC	ATMER 129	1.5 - 2.0
HDPE	ATMER 163	0.15 - 0.50
	ATMER 129/ATMER163(b)	0.15 - 0.45
PP	ATMER 129	0.20 - 0.40
	ATMER 163	0.15 - 0.30
ABS	ATMER 163	1.0 - 1.5
	ATMER 190	1.0 - 1.5
SAN	ATMER 163	1.0 - 1.5
LDPE	FINASTAT 9500	0.1 - 0.5

หมายเหตุ ATMER 129 คือ สาร Glycerol Monosterate

ATMER 163 คือ สาร Ethoxylated Amine

ATMER 190 คือ สาร Alkyl Sulphonate

FINASTAT 9500 คือ สาร Nitrogen Free Oleochemical Derivative

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Jong และคณะ (1995) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ที่อุณหภูมิห้อง ในโรเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 380 เซนติเมตรเพื่อศึกษาอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคผิวเรียบ ผลจากการศึกษาพบว่า อัตราการหมุนเวียนของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของอากาศในโรเตอร์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของอนุภาคในระบบมากขึ้นปริมาณของอนุภาคที่ตำแหน่งต่างๆ จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในส่วนกรณีที่เพิ่มค่าความเร็วของอากาศใน โรเตอร์ปริมาณของแข็งที่ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์จะมีค่าลดลง นอกจากนั้นการกระจายตัวของอนุภาคในแนวความสูงจะมีลักษณะเป็นกราฟรูปตัวเอสซึ่งเป็นการแบ่งส่วนที่มีของอนุภาคเบาบาง (Dilute Region) และ ส่วนที่มีอนุภาคหนาแน่น (Dense Region)

Sang และคณะ (1999) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนในโรเตอร์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 250 เซนติเมตร ทำการผสมอนุภาค 2 ชนิดเข้าด้วยกัน คือ เม็ดพลาสติก (Polyethylene และ Polyvinylchloride) และกับเม็ดแก้ว ซึ่งเม็ดแก้วจะมีความหนาแน่นและขนาดใหญ่กว่าเม็ดพลาสติกทั้งสองชนิด ทำการทดลองโดยผสมเม็ดแก้วเข้าไปในเม็ดพลาสติกปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล พบว่าเมื่อใส่เม็ดแก้วที่มีขนาดใหญ่ลงไปส่งผลให้ความดันลดในส่วนต่างๆ ของโรเตอร์มีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ไปส่งผลทำให้การจับตัวกันของอนุภาคที่มีขนาดเล็กนั้นแตกออกจากกัน แต่ในทางกลับกันอัตราการหมุนเวียนจะมีค่าเพิ่มขึ้น

Ibsen และคณะ (2000) ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มี โรเตอร์ทำจากแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 เซนติเมตร สูง 100 เซนติเมตร อนุภาคที่ใช้ในการทดลอง คือ เม็ดแก้วที่มีขนาดระหว่าง 105–250 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 2400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้ 1D Laser and Phase Doppler anemometry เพื่อเก็บข้อมูลของความเร็วของอนุภาค ทำการศึกษาความหนาแน่นของเม็ดแก้วที่มีต่อรูปแบบการไหล พบว่าเมื่อปริมาณของเม็ดแก้วมีมากขึ้น ความเร็วในแนวแกนที่ความสูงต่างๆ ของโรเตอร์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เช่นเดียวกับในแนวรัศมีเมื่อปริมาณของเม็ดแก้วมากขึ้น ความเร็วในแนวรัศมีก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

สมชาย สวยศอาด (2004) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง ในโรเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 200 เซนติเมตร ทำการทดลองด้วยอนุภาคผสม คือ ผสมทรายกับชีวมวล เช่น ขี้เลื่อย แกลบ และชานอ้อย ในอัตราส่วน 50 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้กล้องความเร็วสูงในการวัดความเร็วของอนุภาค พบว่าเมื่อความเร็วของอากาศขา

เข้าคองที่ ความเร็วของสารป้อนจะลดลงตามความสูงของโรเตอร์ เมื่อความเร็วอากาศคองที่และที่ ตำแหน่งความสูงเดียวกัน การที่ผสมทรายกับซีลี้อยจะทำให้มีความเร็วสูงกว่าการใช้ทรายเพียงอย่างเดียว

คันทันนีย์ กัทธนาทรัพย์ (2005) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิโดซ์เบดแบบ หมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง ในโรเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 200 เซนติเมตร อนุภาคที่ใช้ในการทดลอง คือ เม็ดแก้ว และเกลบ โดยใช้กัลดองความเร็วสูงในการวัดความเร็วของ อนุภาค พบว่าเมื่อความเร็วของอากาศเข้าเพิ่มขึ้นความเร็วของเม็ดแก้วจะเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาใน แนวรัศมีของโรเตอร์เม็ดแก้วจะมีความเร็วมากที่สุดบริเวณกึ่งกลาง และจะลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนังของ โรเตอร์ นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อความเร็วอากาศคองที่ และที่ความสูงเดียวกัน ความเร็วของเม็ดแก้วที่ ผสมเกลบจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วของเม็ดแก้วเพียงอย่างเดียว

Mahmoud และคณะ (2006) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิโดซ์เบดแบบ หมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง ในโรเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.2 เซนติเมตร สูง 200 เซนติเมตร อนุภาคที่ใช้ในการทดลอง คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวของไอน้ำมันหนัก (FCC) กับ ผง อะลูมิเนียมที่มีแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคสูง โดยอนุภาคเอพีซีซีมีขนาดใหญ่กว่า ทำการทดลองผสม ผงอะลูมิเนียมลงในอนุภาคเอพีซีซีปริมาณไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล พบว่าอนุภาคขนาดเล็กที่ผสม ลงไปในอนุภาคขนาดใหญ่จะส่งผลต่ออัตราการไหลของของแข็งเป็น 2 ส่วนตามขนาดของอนุภาค คือ ส่วนที่แรงดึงดูดระหว่างอนุภาคมีผล และไม่มีผลต่อการไหลในโรเตอร์ นอกจากนั้นพบว่าอัตรา การหมุนเวียนของของแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคขนาดเล็กมีขนาดเพิ่มขึ้น และจะมีค่าน้อยลงจนคองที่ เมื่อเพิ่มขนาดอนุภาค

Mehrani และคณะ (2007) ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดที่มีเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สูง 170 เมตร อนุภาคที่ใช้ในการทดลอง คือ สารลดประจุไฟฟ้า LAROSTAT 519, เม็ดแก้ว, อนุภาค PE, ตัวเร่งปฏิกิริยา และอนุภาคซิลิกา ทำการทดลองโดยผสม สารลดประจุไฟฟ้า และอนุภาคขนาดเล็กต่างๆ กับอนุภาค PE และเม็ดแก้วเพื่อศึกษาความสามารถ ในการลดประจุไฟฟ้า จากการทดลองพบว่าสารลดประจุไฟฟ้า และสารที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าสูงจะ ช่วยถ่ายโอนประจุไฟฟ้าออกจากอนุภาคได้ดี ทำให้ปริมาณประจุที่เหลืออยู่ในอนุภาคน้อยลง นอกจากนั้นความชื้นในอากาศยังช่วยให้ประจุไฟฟ้าลดลงด้วย

### บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### 3.1 ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

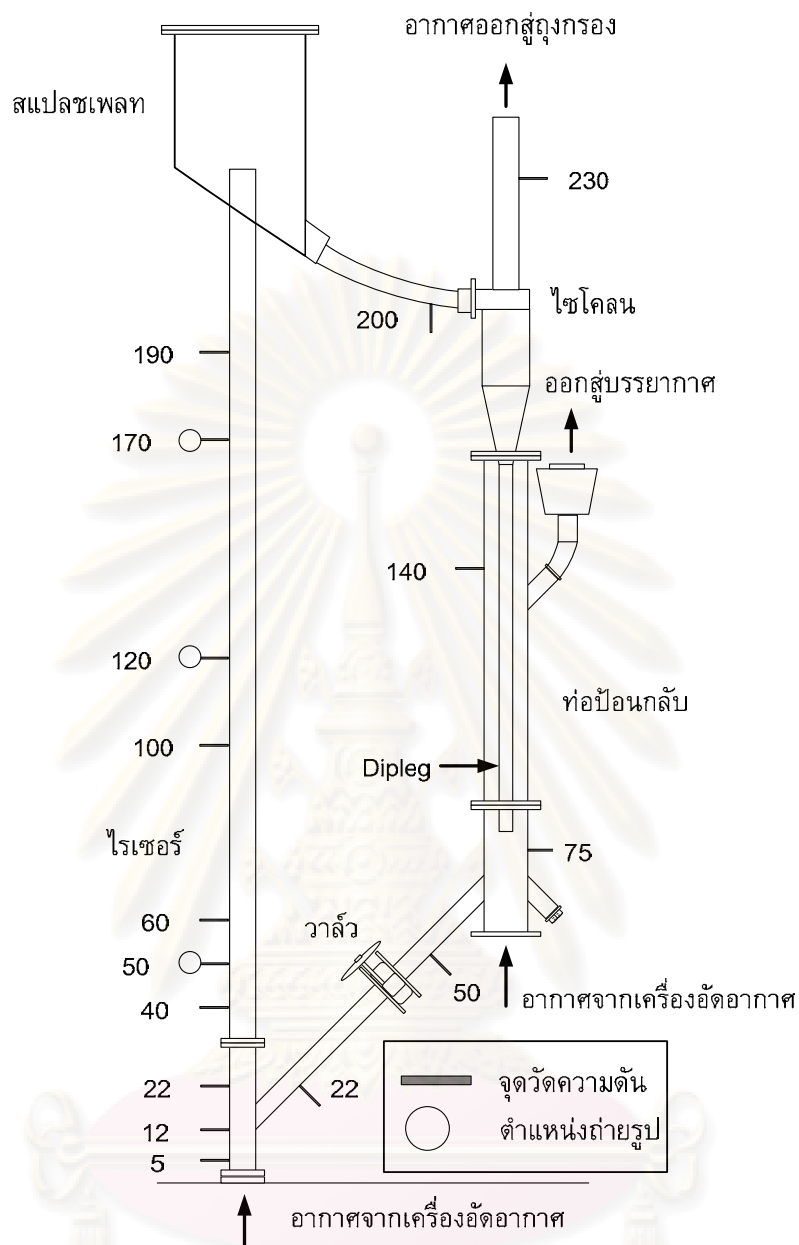
เครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งทำการปรับปรุงจากเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดเดิม (คันสนีย์, 2005) 2 ส่วนด้วยกัน คือ ส่วนที่ 1 ติดตั้งสแปลชเพลท (Splash Plate) บริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์ เพื่อป้องกันอนุภาคพีวีซีตกกลับเข้าไปในท่อไรเซอร์ ส่วนที่ 2 ติดตั้งดิพเลก (Dip Leg) บริเวณส่วนล่างของไซโคลนยื่นเข้ามาในท่อป้อนกลับ ทำให้อนุภาคที่ตกกลับลงมาในท่อป้อนกลับไม่ฟุ้งกระจาย และส่วนที่ 2 ทำจากท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ยาว 90 เซนติเมตร ส่วนประกอบของเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

**3.1.1 ท่อไรเซอร์ (Riser)** ทำจากพลาสติกใส (Acrylic) เพื่อให้สามารถเห็นรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาค ท่อไรเซอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 2 เมตร บริเวณด้านล่างติดตั้งตัวกระจายอากาศ (Air Distributor) แบบแผ่นตะแกรงที่มีความละเอียด 300 mesh (50 ไมโครเมตร) บริเวณผนังของท่อไรเซอร์ทำการติดตั้งตัววัดความดัน (Pressure Tap) 8 ตำแหน่ง สำหรับวัดค่าความดันตามความสูงของท่อไรเซอร์ นอกจากนี้ในการบันทึกภาพของอนุภาคที่เคลื่อนที่ภายในท่อไรเซอร์บริเวณผนังท่อไรเซอร์จะถูกเจาะรูเพื่อให้โพรมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 มิลลิเมตร ที่ปลายโพรมมีแผ่นกระจกใสปิดอยู่ ใส่เข้าไปด้านในท่อไรเซอร์ และสามารถเลื่อนเข้าเลื่อนออกได้สำหรับบันทึกภาพภายในท่อไรเซอร์ตามแนวรัศมีที่ -2.5, -1.8, -0.6, 0, 0.6, 1.8 และ 2.5 เซนติเมตรจากบริเวณกึ่งกลางท่อ ที่ความสูง 120 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ และสำหรับการบันทึกภาพของอนุภาคตามความสูงจะใส่โพรมเข้าไปที่บริเวณกึ่งกลางท่อไรเซอร์ ที่ความสูงต่างๆ 3 ค่า คือ 50, 120 และ 170 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศตามลำดับ

**3.1.2 สแปลชเพลท (Splash Plate)** ถังทรงกระบอกทำจากพลาสติกใส (Acrylic) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 30 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 50 เซนติเมตร ป้องกันอนุภาคพีวีซีตกกลับเข้าไปในท่อไรเซอร์

**3.1.3 ไซโคลน (Cyclone)** ทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกไซโคลน ( $D_c$ ) = 12 เซนติเมตร เป็นอุปกรณ์แยกอนุภาคจากอากาศ แล้วนำอนุภาคที่หลุดออกมาจากด้านบนของท่อไรเซอร์กลับเข้ามาให้เกิดการหมุนเวียน





รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.4 **ท่อป้อนกลับ (Downcomer)** ทำจากพลาสติกใส (Acrylic) เช่นเดียวกับท่อไรเซอร์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร สูง 1.1 เมตร ภายในชั้นนี้ไว้ด้วย ดิฟเฟอเรนเชียล ซึ่งเป็นท่อพีวีซีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร และ ยาว 90 เซนติเมตร

3.1.5 **ท่อส่งผ่าน (Transfer Line)** ทำจากพลาสติกใส (Acrylic) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ยาว 75 เซนติเมตร โดยวางทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ และมีวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve) เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง

3.1.6 อุปกรณ์วัดความดัน (Pressure Measurement) อุปกรณ์วัดความดันที่ใช้ในการทดลองนี้คือเครื่องวัดความดันเชิงตัวเลข (Digital Pressure) ของบริษัท Yokogawa รุ่น EJA120 Style: S2 มีช่วงการวัด 0-1600 มิลลิเมตรน้ำ ความคลาดเคลื่อน 0.2% และต่อเข้ากับจุดวัดความดันอากาศทั้งหมด 13 จุด ตลอดทั้งระบบด้วยสายยางพลาสติก

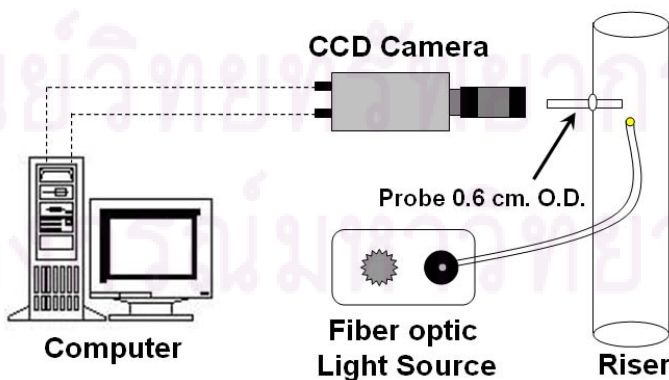
### 3.2 เทคนิค Particle Image Velocimetry (PIV)

เทคนิค PIV นี้ใช้สำหรับการวัดความเร็วของอนุภาคที่อยู่ในโรเตอร์ ประกอบด้วยส่วนสำคัญต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.2.1 กล้องความเร็วสูงชนิด CCD (Charge Coupled Device) ของบริษัท Sony รุ่น SSC-DC58AP พร้อมเลนส์ สามารถปรับความเร็วหน้ากล้องได้ 10 ค่าตั้งแต่ 1/25 ถึง 1/10000 วินาที ใช้สำหรับบันทึกภาพของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในโรเตอร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพต่อไป

3.2.2 โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image Pro Plus V.4.5.1 ใช้ในการเก็บภาพที่บันทึกได้จากกล้องความเร็วสูง และนำภาพที่ได้มาหาความยาวของเส้นที่แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคแต่ละอนุภาค โดยติดตั้งอยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้สำหรับรับภาพและทำการประมวลผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image Pro Plus V.4.5.1

3.2.3 แหล่งกำเนิดแสง (Optical Fiber light source) จากบริษัท Hollywood ประกอบด้วย Illuminator โมเดล 20 ให้ความสว่างจากหลอดไฟฮาโลเจน ที่มีกำลัง 150 วัตต์ สามารถปรับความเข้มแสงได้ตั้งแต่ 0 -100 % และ Dual Fiber Optic Gooseneck ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และความยาว 61 เซนติเมตร วางอยู่ด้านตรงข้ามกับกล้องความเร็วสูง เพื่อให้ภาพที่บันทึกได้มีความชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ภาพมากขึ้น



รูปที่ 3.2 ระบบ Particle Image Velocimetry

รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างภาพที่ได้จากการถ่ายภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีในท่อไรเซอร์ เมื่อนำภาพไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ จะสามารถหาความยาว รวมถึงมุมในการเคลื่อนที่ที่แสดงในภาพได้ เมื่อทำการวิเคราะห์ภาพทั้งหมดแล้วจึงนำข้อมูลมาคำนวณหาความเร็วของอนุภาคพีวีซีตามสมการของ Tartan และ Gidaspow (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  
 $\theta$  คือ มุมที่ของแข็งเคลื่อนที่วัดจากแกน x โดยเริ่มจากวิถีภาคที่ 1



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซี

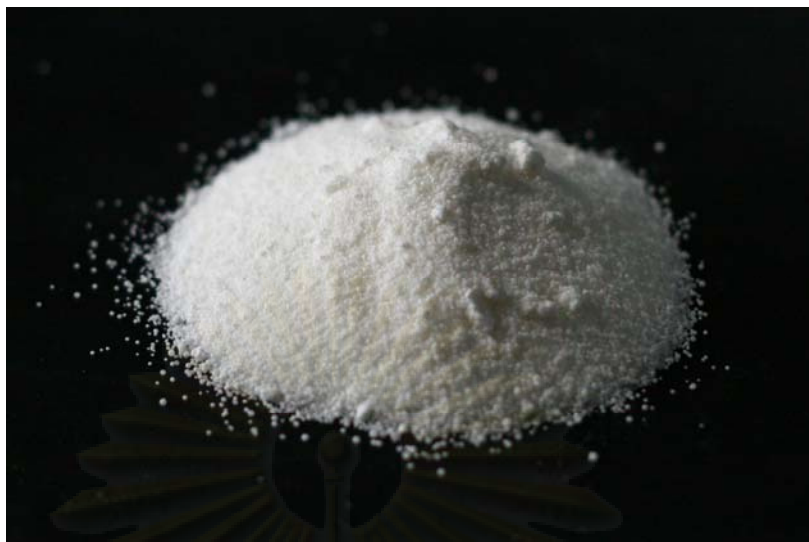
### 3.3 อนุภาคที่ใช้ในการทดลอง

อนุภาคพีวีซีที่ใช้เป็นวัสดุเบดแสดงในรูปที่ 3.4 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 140 ไมครอน และ ความหนาแน่น 1,410 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเลเซอร์แกรนูลาริตีอานาไลเซอร์ (Laser Granularity Analyzer) รุ่น Masterizer S long bed Ver.2.19 การจำแนกกลุ่มของของแข็งตามลักษณะโดยวิธีของ Geldart ในหัวข้อ 2.2 พบว่าอนุภาคพีวีซีจัดอยู่ในกลุ่ม A



รูปที่ 3.4 อนุภาคพีวีซีที่ใช้ในงานวิจัย

สารลดประจุไฟฟ้าที่ใช้เป็นสารผสมเพื่อช่วยลดประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองแสดงในรูปที่ 3.5 ชื่อทางการค้าคือ แอทเมอร์ 129 (ATMER 129) หรือชื่อทางเคมีคือ กลีเซอรอลโมโนสเตอเรท (Glycerol Monostearate) มีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเป็นไฮโดรคาร์บอนโซยาวมีหมู่ฟังก์ชันที่มีธาตุดอกซิเจนเป็นองค์ประกอบดังแสดงในรูปที่ 3.6 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 99 ไมครอน และ ความหนาแน่น 1,030 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเลเซอร์แกรนูลาริตีอานาไลเซอร์ (Laser Granularity Analyzer) รุ่น Masterizer S long bed Ver.2.19 การจำแนกกลุ่มของของแข็งตามลักษณะโดยวิธีของ Geldart ในหัวข้อ 2.2 พบว่าอนุภาคพีวีซีจัดอยู่ในกลุ่ม A



รูปที่ 3.5 สารลดประจุไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.6 โครงสร้างโมเลกุลของสารลดประจุไฟฟ้า ATMER 129

### 3.4 วิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การศึกษาอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี ในการทดลองส่วนนี้ศึกษาถึงผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันอากาศ สัดส่วนช่องว่าง และความเร็วของอนุภาคพีวีซีตลอดความสูง และแนวรัศมีของท่อโรเซออร์
2. การศึกษาผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซีทั้งความดันอากาศ สัดส่วนช่องว่าง และความเร็วของอนุภาคพีวีซีสภาวะที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

ของแข็ง	อุทกพลศาสตร์	$U_g$ (เมตรต่อวินาที)	ความสูง (เซนติเมตร)	ระยะตามแนว รัศมี (เซนติเมตร)
อนุภาค พีวีซี	- ความดันอากาศและอัตราการ การหมุนเวียนของของแข็ง	2.12, 2.97, 3.82	-	-
	- ความเร็วตลอดความสูง	2.12, 2.97, 3.82	50, 120, 170	0
	- ความเร็วตามแนวรัศมี	2.12, 2.97, 3.82	50	0,0.6,1.2,1.8,2.5
ของผสม*	- ความดันอากาศและอัตราการ การหมุนเวียนของของแข็ง	2.12, 2.97, 3.82	-	-
	- ความเร็วตลอดความสูง	2.12, 2.97, 3.82	50, 120, 170	0
	- ความเร็วตามแนวรัศมี	2.12, 2.97, 3.82	50	0,0.6,1.2,1.8,2.5

\*ของผสมระหว่างอนุภาคพีวีซีและสารลดประจุไฟฟ้าในปริมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก

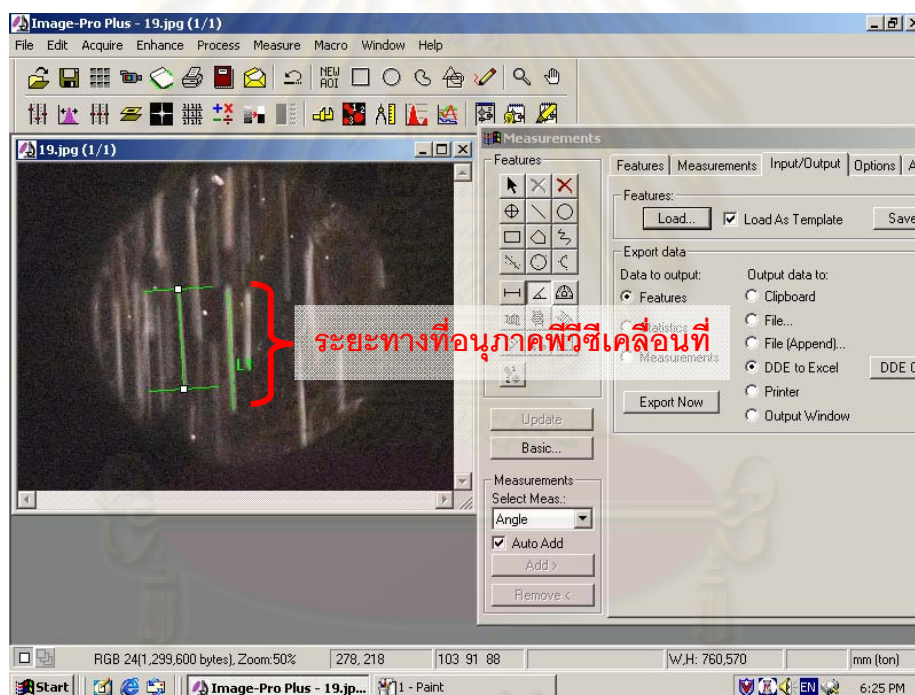
### 3.4.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี

#### 3.4.1.1 การวัดความดันอากาศ สัดส่วนช่องว่าง

- ใส่อนุภาคพีวีซีปริมาณ 2.5 กิโลกรัมเข้าไปในท่อป้อนกลับ เปิดปั๊มลมให้  
อากาศเข้าไปในท่อป้อนกลับที่ความดัน 2.5 psi
- เปิดปั๊มลมให้อากาศผ่านเข้าสู่ท่อไรเซอร์ที่อัตราการไหลที่กำหนด แล้ว  
เปิดวาล์วปีกผีเสื้อที่ท่อส่งผ่าน 75 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้อนุภาคพีวีซีจากท่อ  
ป้อนกลับไหลเข้าไปในท่อไรเซอร์ รอให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเป็นเวลา 5  
นาที
- บันทึกค่าความดันอากาศทุกๆ ตำแหน่งในระบบที่อ่านได้จากเครื่องวัด  
ความดันเชิงตัวเลข
- ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนอัตราการไหลของอากาศ
- นำความดันอากาศที่บันทึกได้ และเวลาที่วัดค่าได้ไปคำนวณหาสัดส่วน  
ช่องว่าง ตามลำดับ

### 3.4.1.1 การวัดความเร็วของอนุภาคด้วยเทคนิค PIV

1. ใส่อนุภาคพีวีซีปริมาณ 2.5 กิโลกรัมเข้าไปในท่อป้อนกลับ เปิดปั๊มลมให้ อากาศเข้าไปในท่อป้อนกลับที่ความดัน 2.5 psi
2. เปิดปั๊มลมให้อากาศผ่านเข้าสู่ท่อโรเตอร์ที่อัตราการไหลที่กำหนด แล้ว เปิดวาล์วปีกผีเสื้อที่ท่อส่งผ่าน 75 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้อนุภาคพีวีซีจากท่อ ป้อนกลับไหลเข้าไปในท่อโรเตอร์ รอให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลเป็นเวลา 5 นาที
3. บันทึกภาพการเคลื่อนที่ของเม็ดแก้ว
4. นำภาพที่ได้จากการบันทึกมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพดัง แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การวิเคราะห์ระยะทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีด้วยโปรแกรมวิเคราะห์

### 3.4.2 การศึกษาผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี

การทดลองในหัวข้อนี้จะทำการผสมสารลดประจุไฟฟ้ากับอนุภาคพีวีซี โดยจะผสม สารลดประจุไฟฟ้าเข้าไปในอัตราส่วน 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในน้ำหนักรวมของของผสมมี ค่าเท่ากับ 2.5 กิโลกรัม โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับตอนที่ 3.4.1

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบการไหลของอนุภาคพีวีซีในเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ความเร็วอากาศ ตำแหน่งตามแนวรัศมี ความสูงของโรเตอร์ และสารลดประจุไฟฟ้าที่นำมาผสม โดยในงานวิจัยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ โดยส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี ประกอบไปด้วยวงจรรวมความดัน สัดส่วนช่องว่าง ความเร็วของอนุภาคพีวีซีตามแนวรัศมี และความเร็วของอนุภาคพีวีซีตามความสูงของโรเตอร์ ในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซีในของผสมระหว่างอนุภาคพีวีซีกับสารลดประจุไฟฟ้า ประกอบไปด้วยความดันอากาศ สัดส่วนช่องว่าง ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในของผสมระหว่างอนุภาคพีวีซีกับสารลดประจุไฟฟ้าตามแนวรัศมี และตามความสูงของโรเตอร์ รวมถึงการเปรียบเทียบความเร็วระหว่างอนุภาคพีวีซีในระบบที่มีอนุภาคพีวีซีเป็นของแข็งเพียงชนิดเดียวกับอนุภาคพีวีซีที่อยู่ในของผสมระหว่างอนุภาคพีวีซีกับสารลดประจุไฟฟ้า

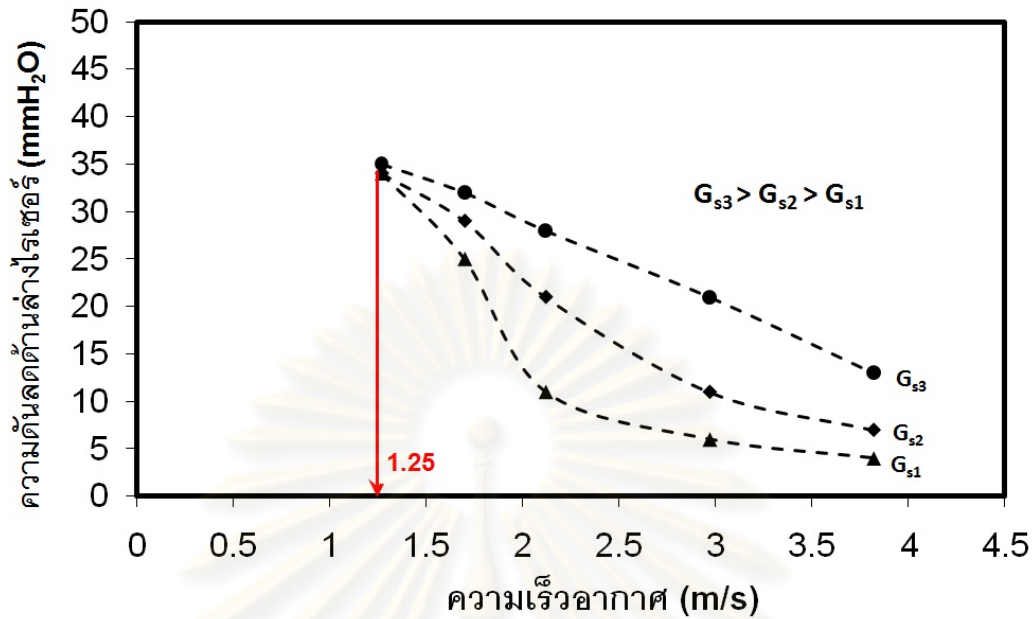
#### 4.1 อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี

##### 4.1.1 ข้อมูลพื้นฐานของอนุภาคพีวีซีในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองในเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ความเร็วอากาศ 3 ค่า คือ 2.12, 2.97 และ 3.82 เมตรต่อวินาที ปริมาณของอนุภาคพีวีซีที่ใส่เข้าไปในระบบคือ 2.5 กิโลกรัม ในการศึกษารูปแบบการไหลของของแข็งในโรเตอร์จากงานวิจัยของ Bi และ Grace (1995) พบว่าในเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียนมีรูปแบบการเคลื่อนที่ของของแข็งในโรเตอร์ได้หลายแบบ ตั้งแต่แบบปั่นป่วนถึงเบดแบบเบาบาง ขึ้นกับตัวแปรที่ใช้ เช่นความเร็วอากาศ อัตราการไหลของของแข็ง ขนาดและสมบัติทางกายภาพของของแข็ง เป็นต้น ซึ่งตัวแปรที่สำคัญในการเปลี่ยนรูปแบบการไหลคือความเร็วอากาศ ความเร็วอากาศที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ คือ

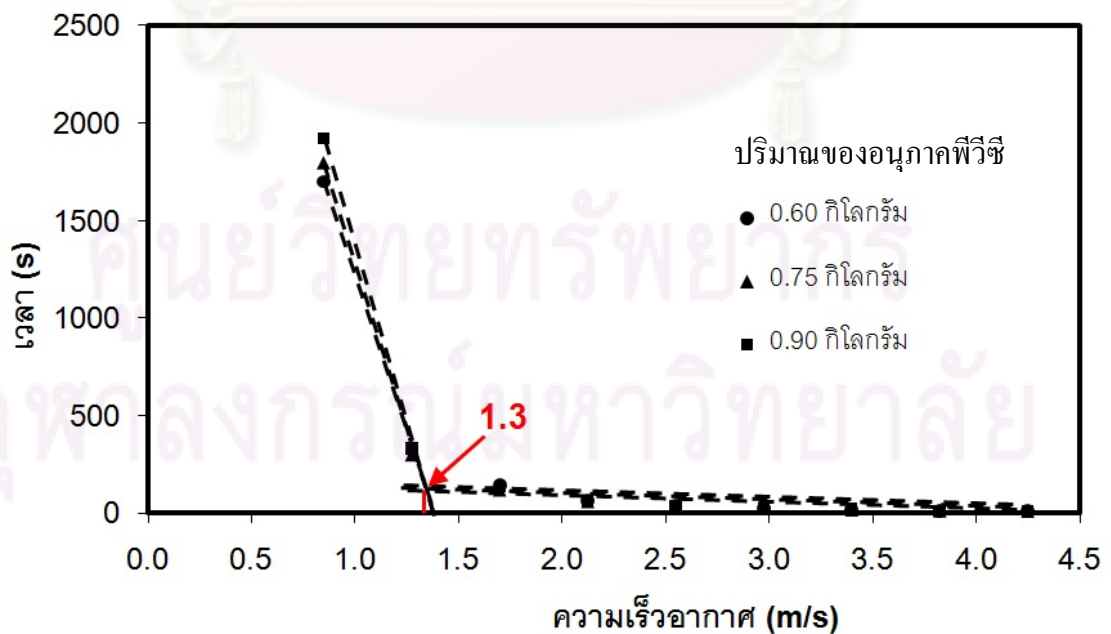
1) ความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity,  $U_t$ ) ความเร็วหลุดลอยส่งผ่านเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน เนื่องจากเป็นความเร็วอากาศที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไรซ์เบดแบบความเร็วสูง (Fast Fluidization) สามารถหาได้หลายวิธี เช่นในการทดลองของ Yerushalmi และคณะ (1976) ในรูปที่ 2.6 ในงานวิจัยนี้พบว่าอัตราการไหลของของแข็งเปลี่ยนแปลง โดยการปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดของวาล์วปีกผีเสื้อเพื่อให้อนุภาคพีวีซีไหลเข้ามาในโรเตอร์ได้มากขึ้น ความเร็วของอากาศที่สามารถทำให้เกิดการหมุนเวียนของอนุภาคพีวีซีจึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ข้อมูลผลต่างความดันที่บริเวณด้านล่างของโรเตอร์ที่ความเร็วอากาศ และอัตราการไหลต่างๆ ของอนุภาคพีวีซีแสดงในรูปที่ 4.1 โดยอัตราการไหลที่  $G_{s1}$ ,  $G_{s2}$  และ  $G_{s3}$  คืออัตราการไหลของอนุภาคพีวีซีที่ปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดของวาล์วปีกผีเสื้อ 25, 50 และ 75 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ





รูปที่ 4.1 ความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity,  $U_t$ ) ของอนุภาคพีวีซี  
ตามการทดลองของ Yerushalmi และคณะ (1976)

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่า  $U_t$  ของอนุภาคพีวีซีที่ใช้ในงานวิจัยมีค่าประมาณ 1.25 เมตรต่อวินาที นั่นคือความเร็วอากาศที่ใช้ตลอดการทดลองนี้คือ 2.12, 2.97 และ 3.82 เมตรต่อวินาที ทำให้อนุภาคพีวีซีอยู่ในสภาวะเบดแบบความเร็วสูงได้ เมื่อทำการการเปรียบเทียบกับการหาค่า  $U_t$  โดยอ้างอิงการทดลองของ Numkung และคณะ (1999) ในรูปที่ 2.7 ข้อมูลระยะเวลาในการเคลื่อนที่ออกจากโรเตอร์ ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ของอนุภาคพีวีซีแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่ง  $U_t$  ของอนุภาคพีวีซีจากการทดลองโดยวิธีนี้มีค่าประมาณ 1.30 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.2 ความเร็วหลุดลอยส่งผ่าน (Transport Velocity,  $U_t$ ) ของอนุภาคพีวีซี  
ตามการทดลองของ Numkung และคณะ (1999)

จากการทดลองดังแสดงในรูป 4.1 และ 4.2 พบว่า  $U_{tr}$  ของอนุภาคพีวีซีมีค่าเท่ากับ 1.25 และ 1.30 เมตรต่อวินาทีตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

2) ความเร็วช็อคกิ้งชนิด A (Type A choking velocity,  $V_{CA}$ ) จากรูป 2.13 เป็นความเร็วอากาศที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจากเบดแบบความเร็วสูงเป็นเบดแบบเบาบาง โดย  $V_{CA}$  สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.10 (Bi และ Grace, 1995) จากการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการพบว่า  $V_{CA}$  มีค่าเท่ากับ 3.04 เมตรต่อวินาที นั่นคือที่ความเร็ว 3.82 เมตรต่อวินาทีรูปแบบการไหลของอนุภาคพีวีซีจะอยู่ในสถานะของเบดแบบเบาบาง

ความเร็วอากาศทั้งหมดที่ใช้ในการจำแนกรูปแบบการไหลต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1 และรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีในโรเตอร์ที่ช่วงความเร็วอากาศต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่า  $U_{tr}$  และ  $V_{CA}$  ของอนุภาคพีวีซีที่ใช้ในงานวิจัย

ความเร็ว	ค่าความเร็ว (เมตรต่อวินาที)
$U_{tr}$	1.25
$V_{CA}$	3.04

หมายเหตุ  $U_{tr}$  ได้จากการทดลอง และ  $V_{CA}$  ได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 4.2 รูปแบบการไหลของอนุภาคพีวีซีในโรเตอร์ที่ช่วงความเร็วอากาศต่างๆ

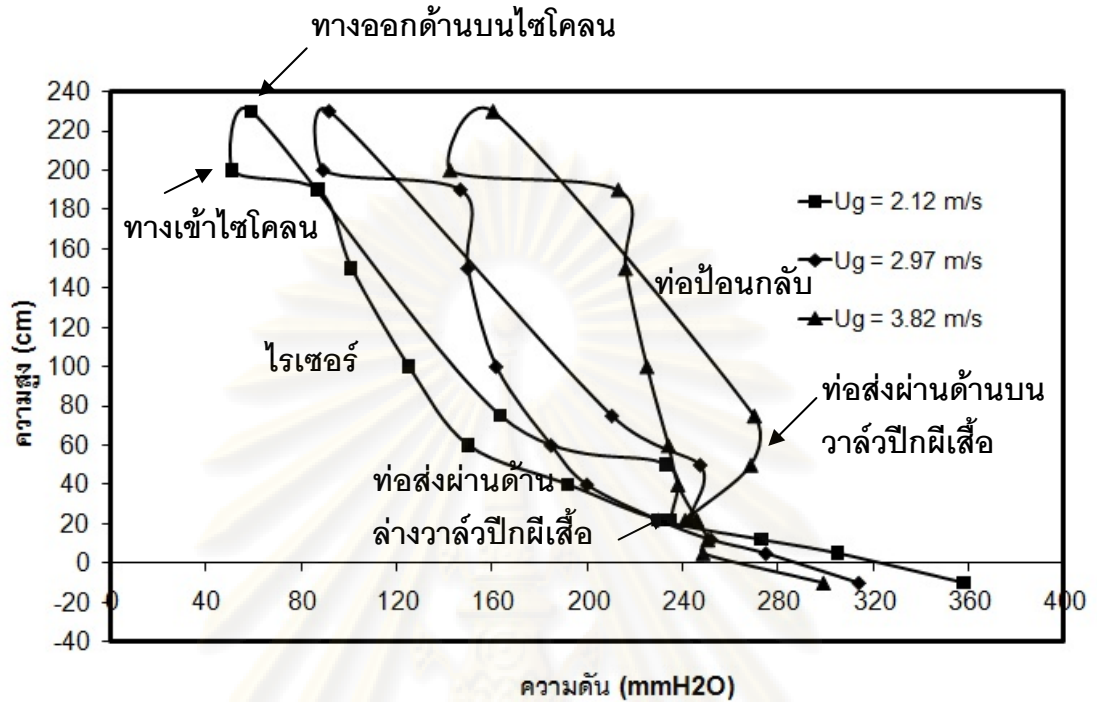
ความเร็วอากาศ (เมตรต่อวินาที)	รูปแบบการไหล
1.25-3.04	ฟลูอิดไลเซชันแบบความเร็วสูง
>3.04	เบดเบาบาง

ความเร็วที่ใช้ในการทดลองในงานวิจัยมีค่าเท่ากับ 2.12, 2.97 และ 3.82 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วอากาศในตารางที่ 4.2 พบว่าที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 2.12 และ 2.97 เมตรต่อวินาที การเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีในโรเตอร์จะเป็นแบบฟลูอิดไลเซชันแบบความเร็วสูง เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้นเป็น 3.82 เมตรต่อวินาทีจะทำให้เกิดสถานะเบดแบบเบาบางในโรเตอร์

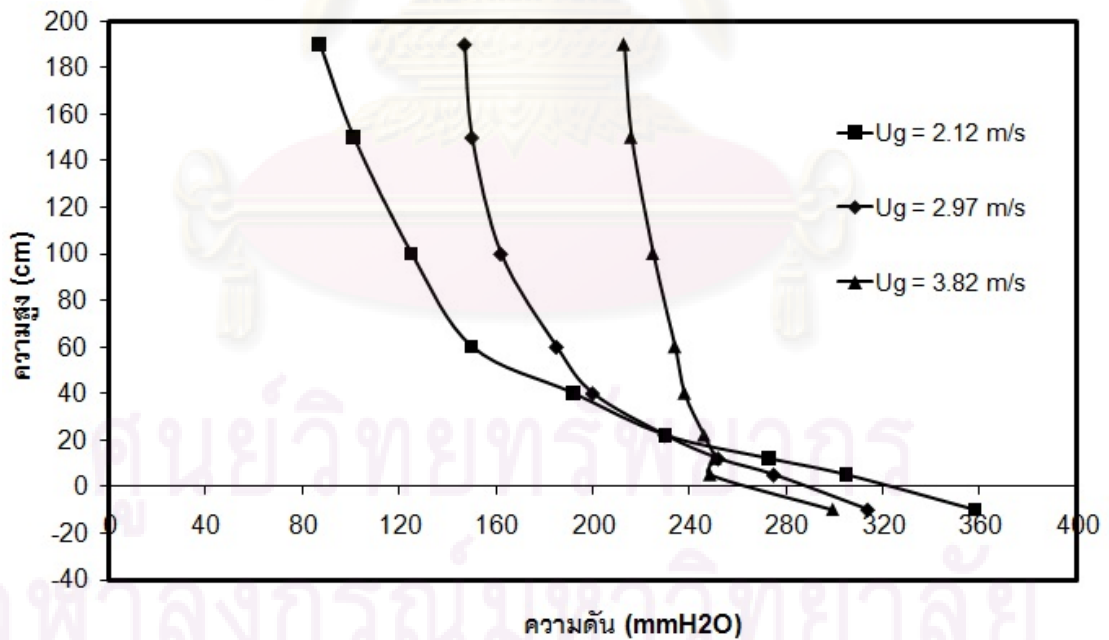
#### 4.1.2 ผลของความเร็วอากาศต่อวงจรความดัน

ความดันของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ในโรเตอร์ และท่อป้อนกลับ อ่านค่าได้โดยเครื่องวัดความดันเชิงตัวเลข มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรน้ำ ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อ

วงจรรวมความดันดังแสดงในรูปที่ 4.3 และความดันของอากาศตลอดความสูงของโรเซอรัที่ความเร็วอากาศต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 วงจรรวมความดันของเครื่องฟลูอิดิเดย์เบดแบบหมุนเวียนที่ความเร็วอากาศต่างๆ



รูปที่ 4.4 ความดันอากาศตลอดความสูงของโรเซอรัที่ความเร็วอากาศต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 เมื่อพิจารณาผลของความเร็วกาศที่มีต่อวงจรรวมความดันพบว่าที่ทุกความเร็วกาศที่ใช้ในการทดลอง ความดันของอากาศภายในโรเซอรัจะค่อยๆ ลดลงตามความสูงของโรเซอรัสอดคล้องกับงานวิจัยของ สมชาย (2004) และคันสนีย์ (2005) บริเวณส่วนบน

ของโรเซอร์ตำแหน่งระหว่างทางเข้าไซโคลนกับโรเซอร์ความดันอากาศจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากหน้าตัดของท่อได้ขยายขึ้นจากถังกระบอกที่ครอบโรเซอร์อยู่ ต่อมาอนุภาคพีวีซีจะถูกแยกออกจากอากาศที่ไซโคลน แล้วตกกลับสู่ท่อป้อนกลับซึ่งเป็นบริเวณที่มีอากาศป้อนเข้าจากทางด้านล่างเพื่อให้เบตมีลักษณะเป็นฟลูอิดเบตแบบฟองอากาศ ความดันที่วัดได้ที่จุดนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศ เนื่องจากอากาศสามารถพาอนุภาคพีวีซีกลับมาได้เร็วขึ้นทำให้ปริมาณอนุภาคพีวีซีในท่อป้อนกลับมีปริมาณมาก หลังจากนั้นอนุภาคพีวีซีจะเคลื่อนที่ผ่านท่อส่งผ่าน สำหรับความดันภายในท่อส่งผ่านระหว่างโรเซอร์ และท่อป้อนกลับนั้น ที่ตำแหน่งทางท่อป้อนกลับจะมีความดันสูงกว่าตำแหน่งทางโรเซอร์ เนื่องจากที่ตำแหน่งทางด้านท่อป้อนกลับจะมีอนุภาคพีวีซีเต็มอยู่ตลอด ต่างจากทางด้านโรเซอร์ซึ่งปริมาณอนุภาคพีวีซีที่ผ่านทางด้านนี้จะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วผีเสื้อ จากรูปแบบวงจรความดันที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นจากข้อมูลของความดันเพียงอย่างเดียวจึงไม่สามารถจำแนกได้ว่าแต่ละความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลองเกิดรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีในโรเซอร์เป็นอย่างไร

#### 4.1.3 ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อสัดส่วนช่องว่าง

ความดันของอากาศในแต่ละตำแหน่งในโรเซอร์สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัดส่วนช่องว่าง ได้ดังสมการที่ 4.1 (Li และคณะ, 2004)

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

โดยที่  $\varepsilon$  = สัดส่วนช่องว่าง

$\Delta P$  = ผลต่างของความดันของอากาศสองตำแหน่งที่ติดกัน, กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที<sup>2</sup>

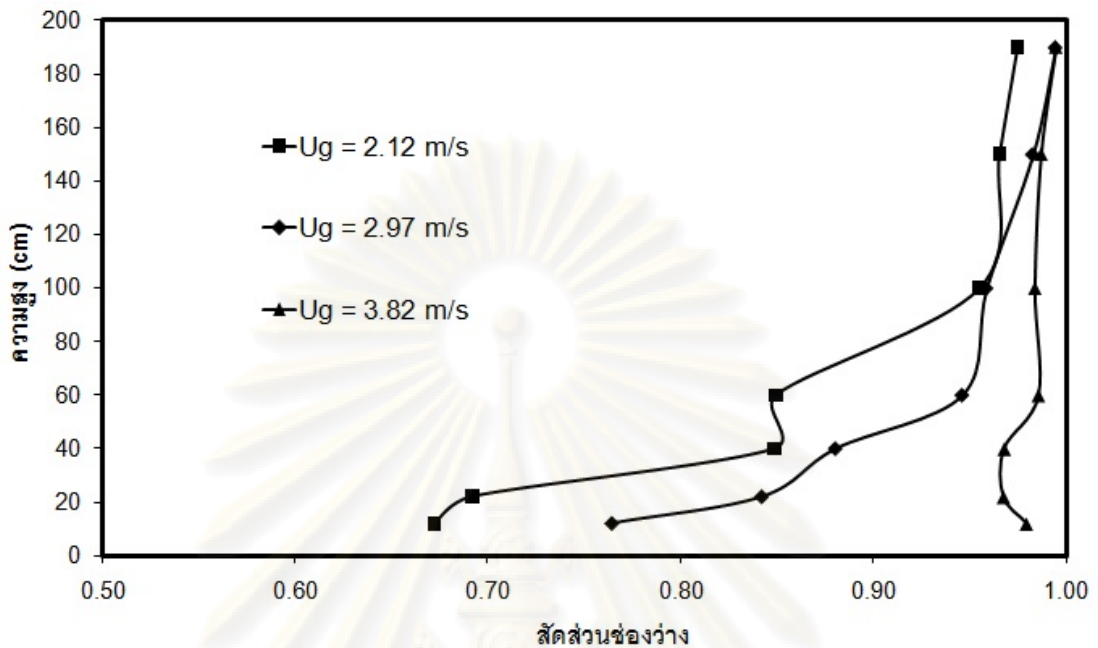
$\Delta L$  = ระยะห่างระหว่างความดันของอากาศสองตำแหน่งติดกัน, เมตร

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของของแข็ง, กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

$g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>

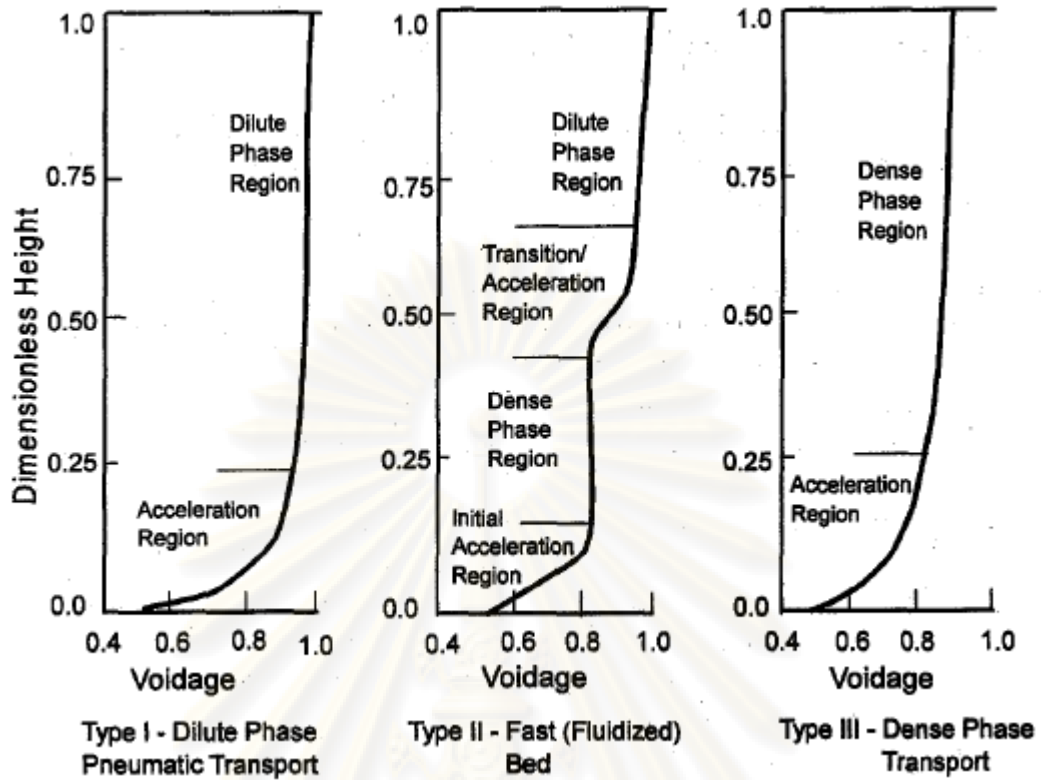
ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อสัดส่วนช่องว่างแสดงในรูปที่ 4.5

เมื่อพิจารณาในแต่ละช่วงของการไหล พบว่าช่วงหนาแน่นทางด้านล่างมีสัดส่วนช่องว่างน้อยที่สุด แสดงได้ว่าผลต่างของความดันอากาศต่อหนึ่งหน่วยความสูงมีค่าสูงสุด และค่อยๆ ลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับที่ป้อนกลับของเม็ดแก้วจึงทำให้มีการกระจายตัวของเม็ดแก้วอยู่อย่างหนาแน่นสูงที่สุด และค่อยๆ ลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น



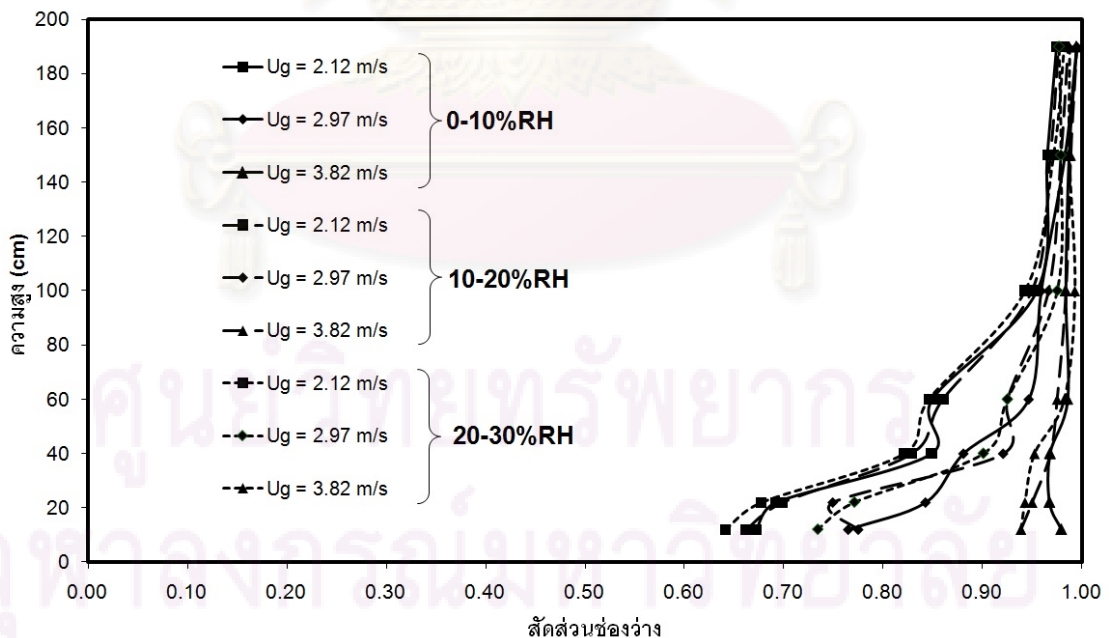
รูปที่ 4.5 สัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเซออร์ที่ความเร็วอากาศต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่าสัดส่วนช่องว่างของอนุภาคพีวีซีที่ความเร็วอากาศต่างๆ จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วอากาศลดค่าสัดส่วนช่องว่างจะมีค่าลดลง ที่ความเร็วอากาศ 2.12 และ 2.97 เมตรต่อวินาที การกระจายตัวของอนุภาคพีวีซีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนเบดหนาแน่น (Dense Bed) มีอนุภาคพีวีซีสะสมอยู่บริเวณด้านล่างของโรเซออร์ และส่วนเบดเบาบาง (Dilute Bed) มีอนุภาคพีวีซีเบาบางบริเวณด้านบนของโรเซออร์ ซึ่งเป็นรูปแบบเฉพาะของฟลูอิดไอเซชันแบบความเร็วสูง (Fast Fluidization) ที่ความเร็วอากาศ 3.82 เมตรต่อวินาทีค่าสัดส่วนช่องว่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณอากาศที่เข้าโรเซออร์เพิ่มขึ้นจึงสามารถพาอนุภาคพีวีซีไปได้ปริมาณมากขึ้น บริเวณด้านล่างของโรเซออร์มีของแข็งอยู่น้อยเนื่องจากไม่มีการสะสมของอนุภาคพีวีซี และเมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนช่องว่างตลอดทั้งโรเซออร์จากงานวิจัยของ Yang และคณะ (1988) ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งแบ่งรูปแบบการไหลของอนุภาคเป็นการเคลื่อนที่แบบเบดเจือจางเมื่อค่าสัดส่วนช่องว่างมีค่ามากกว่า 0.95 จึงสรุปได้ว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีที่ความเร็วอากาศ 3.82 เมตรต่อวินาที เป็นการเคลื่อนที่แบบเบดเบาบาง



รูปที่ 4.6 รูปแบบของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกนในงานวิจัยของ Yang และคณะ (1988)

#### 4.1.4 ผลของความชื้นอากาศที่มีต่อสัดส่วนช่องว่าง



รูปที่ 4.7 สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคพีวีซีที่ความชื้นอากาศต่างๆ

อนุภาคพีวีซีเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กความชื้นของอากาศอาจจะมีผลต่อสัดส่วนช่องว่าง จึงทำการทดลองปรับค่าความชื้นของอากาศออกเป็น 3 ช่วง คือ 0-10, 10-20 และ 20-30%RH

นำค่าความดันที่ได้จากการทดลองที่ความเร็วต่างๆ ไปคำนวณหาสัดส่วนช่องว่างตามความสูงของโรเตอร์ ผลของความขึ้นอากาศที่มีต่อสัดส่วนช่องว่างแสดงในรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 พบว่าที่ทุกความเร็วอากาศ ค่าสัดส่วนช่องว่างในทุกช่วงความขึ้นอากาศ มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย โดยบริเวณด้านล่างของโรเตอร์สัดส่วนช่องว่างจะมีค่าน้อยลงเมื่อความขึ้นอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคพีวีซีเกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ทำให้อากาศที่ผ่านเข้าสู่โรเตอร์พาอนุภาคพีวีซีเคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนได้ยากขึ้น

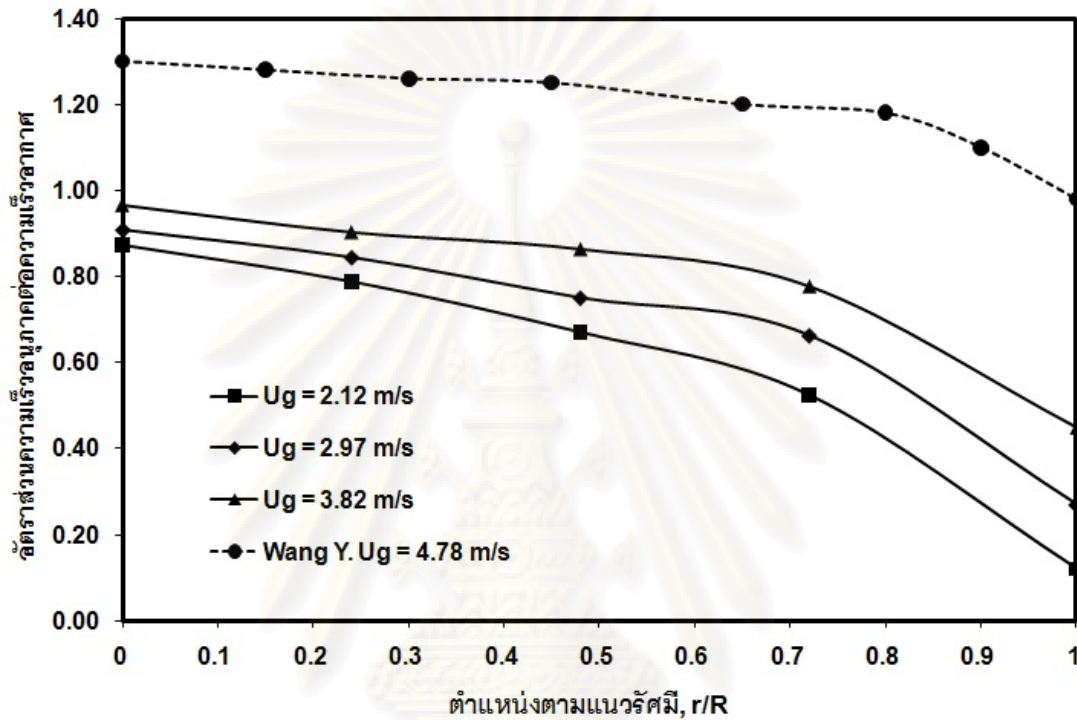
#### 4.1.5 ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความเร็วในแนวแกนตามแนวรัศมีของอนุภาคพีวีซี

การศึกษาความเร็วของของแข็งที่เคลื่อนที่อยู่ภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนมีความสำคัญมากเนื่องจากมีผลต่อการสัมผัสผิวด้านระหว่างของแข็งกับอากาศ การถ่ายเทความร้อนและมวล ตลอดจนการกัดกร่อนที่มักเกิดในฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (คันสนีย์, 2005) ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความเร็วของอนุภาคพีวีซีที่ความสูงที่เท่ากับ 50 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ ตามแนวรัศมีที่ตำแหน่ง 0, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.5 เซนติเมตรจากกึ่งกลางโรเตอร์ตามลำดับ โดยแต่ละตำแหน่งทำการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีในโรเตอร์จากกล้องความเร็วสูง 30 ครั้ง ครั้งละ 100 ภาพ แต่ละภาพใช้เวลาในการจับภาพห่างกัน 0.1 วินาที ดังนั้นในแต่ละตำแหน่งจะมีภาพ 3,000 ภาพ ต่อจากนั้นทำการเลือกภาพการเคลื่อนที่ที่เห็นได้ชัดเจน คมชัด และมีความยาวที่แน่นอน นำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพเพื่อหาความเร็วของอนุภาคพีวีซีต่อไป สัดส่วนความเร็วของอนุภาคพีวีซีต่อความเร็วของอากาศที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมีแสดงในรูปที่ 4.8

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าความเร็วของอนุภาคพีวีซีเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Wang และคณะ (1997) และคันสนีย์ (2005) รูปแบบความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามแนวรัศมีเป็นรูปพาราโบลาครึ่งซีก นั่นคืออนุภาคพีวีซีมีความเร็วมากที่สุดที่บริเวณกึ่งกลางโรเตอร์ และค่อยๆ ลดลงเมื่อเข้าใกล้ผนังเนื่องจากผลของผนัง (Wall Effect) นอกจากนี้บริเวณกึ่งกลางของโรเตอร์จะมีปริมาณของอนุภาคพีวีซีอยู่อย่างเบาบางกว่าบริเวณที่อยู่ใกล้ผนังทำให้มีการชนกันของอนุภาคน้อยกว่า ทำให้ความเร็วของอนุภาคพีวีซีบริเวณกึ่งกลางของโรเตอร์สูงกว่าอนุภาคพีวีซีบริเวณผนังซึ่งมีปริมาณของอนุภาคพีวีซีอยู่อย่างหนาแน่น

นอกจากนี้ยังพบว่าที่ทุกความเร็วของอากาศที่ใช้ในการทดลอง ความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนที่ทุกตำแหน่งตามแนวรัศมีมีค่าน้อยกว่าความเร็วอากาศ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทดลองของ Wang และคณะ (1997) ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมันหนักขนาด 36 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 1,670 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเป็นวัสดุเบด พบว่าความเร็วของตัวเร่งปฏิกิริยามีความเร็วเฉลี่ยมากกว่าความเร็วอากาศประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ใน

ขณะเดียวกันในการทดลองของ Zhang และคณะ (1995) ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไอน้ำมันหนักขนาด 70 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 1,650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเร็วของตัวเร่งปฏิกิริยากลับมีค่าน้อยกว่าความเร็วอากาศประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ความแตกต่างนี้อาจเนื่องมาจากผลของอัตราการป้อนของของแข็งกลับเข้าไปในโรเตอร์ หรือผลของสมบัติทางกายภาพของวัสดุเบดที่ใช้ในการทดลอง

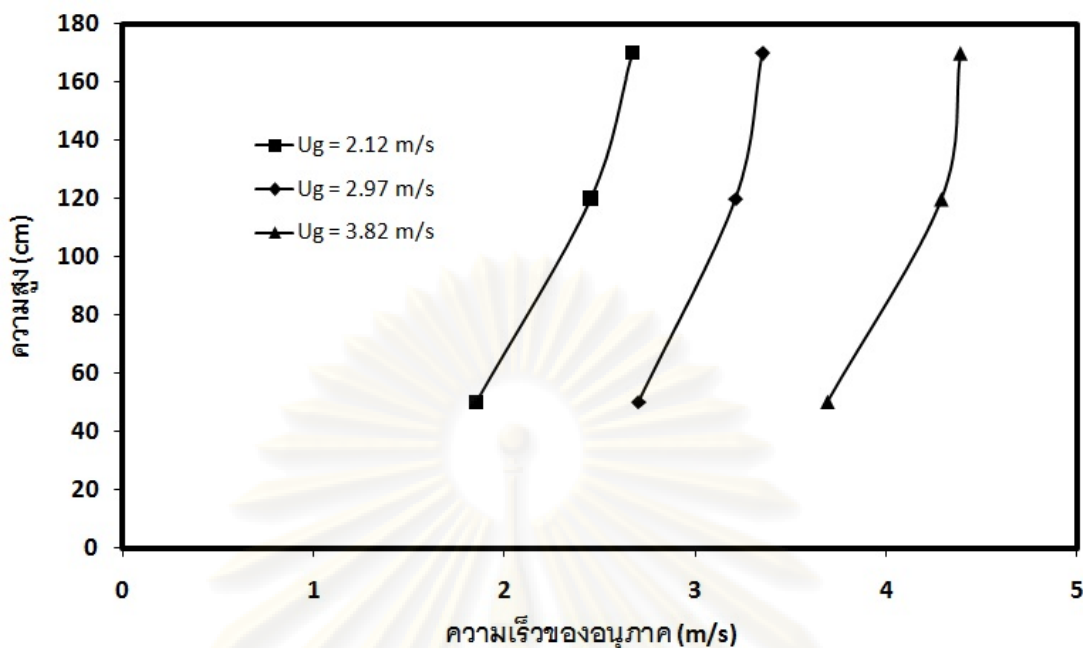


รูปที่ 4.8 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามแนวรัศมี ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ที่ความสูง 50 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ

#### 4.1.5 ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความเร็วในแนวแกนของอนุภาคพีวีซีตามความสูงของโรเตอร์

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความเร็วของอนุภาคพีวีซีบริเวณกึ่งกลางของโรเตอร์ ที่ความสูง 50, 120 และ 170 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ โดยแต่ละตำแหน่งทำการบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีในโรเตอร์จากกล้องความเร็วสูง 30 ครั้ง ครั้งละ 100 ภาพ แต่ละภาพใช้เวลาในการจับภาพห่างกัน 0.1 วินาที ดังนั้นในแต่ละตำแหน่งจะมีภาพ 3,000 ภาพ ต่อจากนั้นทำการเลือกภาพการเคลื่อนที่ที่เห็นได้ชัดเจน คมชัด และมีความยาวที่แน่นอน นำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพเพื่อหาความเร็วของอนุภาคพีวีซีต่อไปความเร็วในแนวแกนของอนุภาคพีวีซีตามความสูงของโรเตอร์ แสดงในรูปที่ 4.9



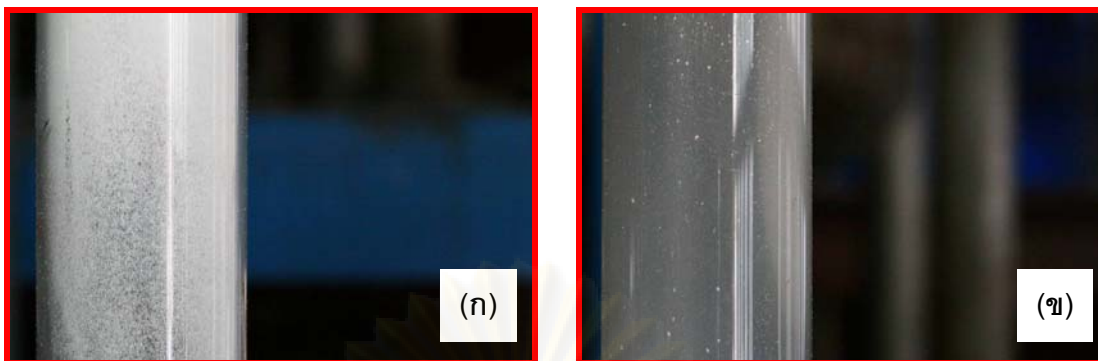


รูปที่ 4.9 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามความสูงของไรเซอร์ ที่ความเร็วอากาศต่างๆ

จากรูปที่ 4.9 แสดงความเร็วของอนุภาคพีวีซีบริเวณกึ่งกลางของไรเซอร์ที่ความสูง 50, 120 และ 170 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ จากการทดลองพบว่าในทุกๆ ความเร็วอากาศ ความเร็วของอนุภาคพีวีซีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความสูง 50 - 120 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ โดยความเร็วของอนุภาคพีวีซีเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของไรเซอร์เพิ่มขึ้น และความเร็วของอนุภาคพีวีซีจะมีค่าเกือบคงที่ในช่วงความสูงระหว่าง 120 - 170 เซนติเมตร ที่เกิดเช่นนี้เนื่องจากในช่วงแรกของไรเซอร์อนุภาคพีวีซีเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจากการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคพีวีซี และอากาศ แต่เมื่อความสูงของไรเซอร์เพิ่มขึ้นอนุภาคเบาบางลงความเร่งที่เกิดจากการชนกันของอนุภาคลดลงทำให้ความเร็วของอนุภาคพีวีซีบริเวณด้านบนของไรเซอร์มีค่าเริ่มคงที่

#### 4.2 ผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี โดยในการทดลองได้ผสมสารลดประจุไฟฟ้า ATMER 129 หรือชื่อทางเคมีคือ Glycerol Monostearate ปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในอนุภาคพีวีซีปริมาณเริ่มต้น 2.5 กิโลกรัม จากการศึกษาในเบื้องต้นได้ทำการทดลองโดยเดินเครื่องฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนเปรียบเทียบลักษณะทางภายนอกโดยการสังเกตด้วยตาเปล่าระหว่างการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้าผสมอยู่ ผลการสังเกตด้วยตาเปล่าแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่ออนุภาคพีวีซีโดยการสังเกตด้วยตาเปล่า

(ก) ไม่ได้ผสมสารลดประจุไฟฟ้า

(ข) ผสมสารลดประจุไฟฟ้า 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

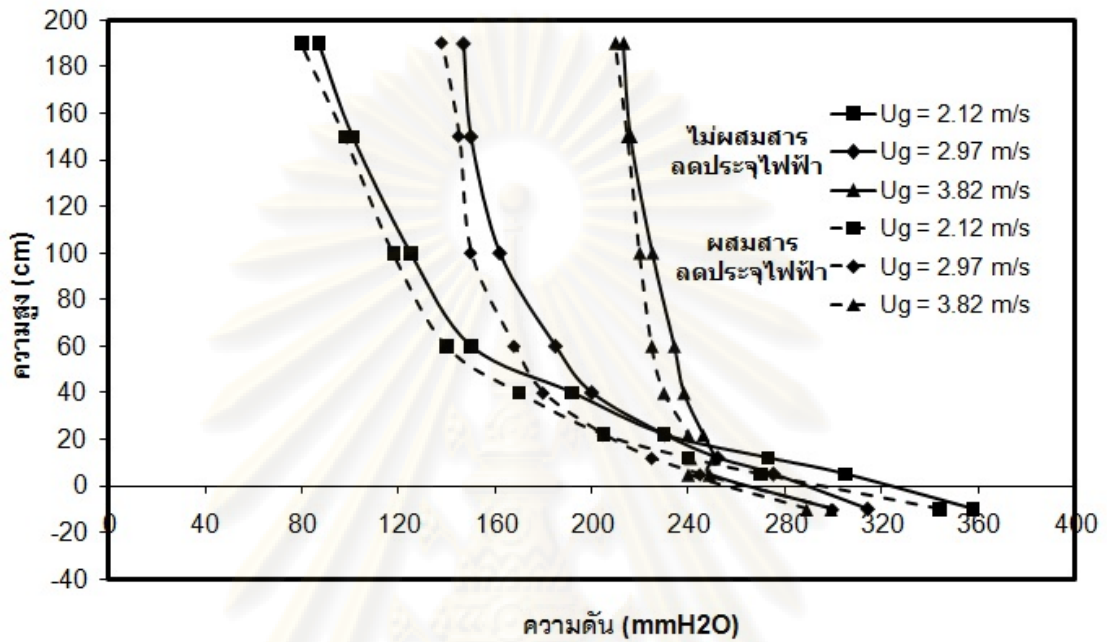
จากรูปที่ 4.10(ก) และ 4.10(ข) จะเห็นได้ว่าการทดลองที่ผสมสารลดประจุไฟฟ้าอนุภาคพีวีซีที่เกาะบริเวณผนังด้านในของโรเตอร์มีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งช่วยให้การสังเกตการเปลี่ยนแปลงของอนุภาคพีวีซีในโรเตอร์เป็นไปได้ง่ายขึ้น

#### 4.2.1 ผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่อความดัน และสัดส่วนช่องว่าง

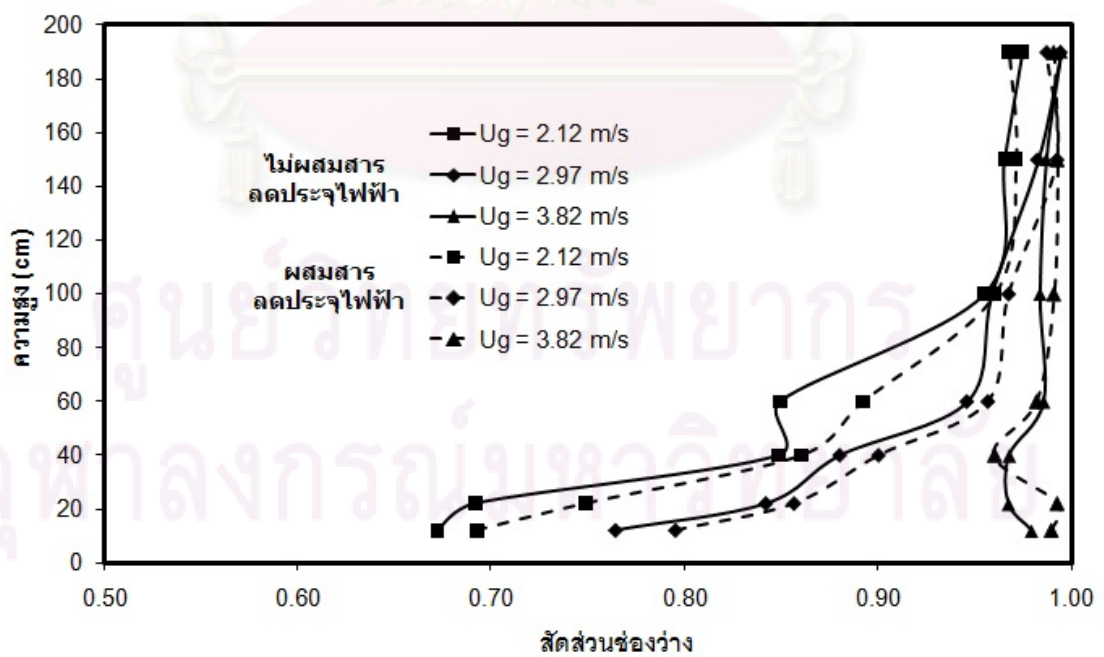
รูปที่ 4.11 แสดงรูปแบบความดันภายในโรเตอร์ของการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า ที่ความเร็วอากาศ 2.12, 2.97 และ 3.82 เมตรต่อวินาที เมื่อพิจารณารูปแบบความดันอากาศภายในโรเตอร์ของระบบที่มีการผสมสารลดประจุไฟฟ้า พบว่าเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น ความดันของอากาศภายในโรเตอร์จะเพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันความดันอากาศจะมีค่าลดลงเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มขึ้นที่ทุกความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งรูปแบบความดันนี้คล้ายกับการทดลองที่ไม่มีการผสมสารลดประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นค่าความดันที่ได้จากการทดลองมีค่าต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ผลต่างของความดันในแต่ละจุดตลอดความสูงของโรเตอร์ระหว่างทั้ง 2 การทดลองเฉลี่ยแล้วมีค่าต่างกัน 10 เปอร์เซ็นต์

รูปที่ 4.12 แสดงสัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเตอร์ในการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้าที่ความเร็วอากาศ 2.12, 2.97 และ 3.82 เมตรต่อวินาที พบว่าในการทดลองที่มีการผสมสารลดประจุไฟฟ้าสามารถแบ่งรูปแบบการไหลของอนุภาคพีวีซีได้เป็น 2 รูปแบบ คือ ที่ความเร็วอากาศ 2.12 และ 2.97 เมตรต่อวินาที การเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีจะอยู่ในรูปแบบของฟลูอิดเซชันแบบความเร็วสูง และที่ความเร็วอากาศ 3.82 เมตรต่อวินาที การเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซีจะอยู่ในรูปแบบของเบดเจ็จจาง เมื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างในการทดลองระหว่างมีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า จะเห็นได้ว่ารูปแบบการไหลของอนุภาคพีวีซีมีลักษณะเดียวกัน เพียงแต่ค่าสัดส่วนช่องว่างในกรณีที่มีการผสมสารลดประจุไฟฟ้าจะมีค่ามากกว่าในการทดลองที่ไม่ได้ผสมสารลดประจุไฟฟ้า เนื่องจากสารลดประจุไฟฟ้าจะช่วยลดการเกาะกันของอนุภาคพีวีซี

รวมทั้งช่วยลดแรงดึงดูดที่เกิดจากประจุไฟฟ้าระหว่างอนุภาคพีวีซีกับผนังของเครื่องฟลูอิดิโดซ์แบบหมุนเวียน ทำให้อนุภาคพีวีซีเกิดการสะสมบริเวณด้านล่างของโรเตอร์น้อยลง และเคลื่อนที่ขึ้นไปตามอากาศได้ดีขึ้น

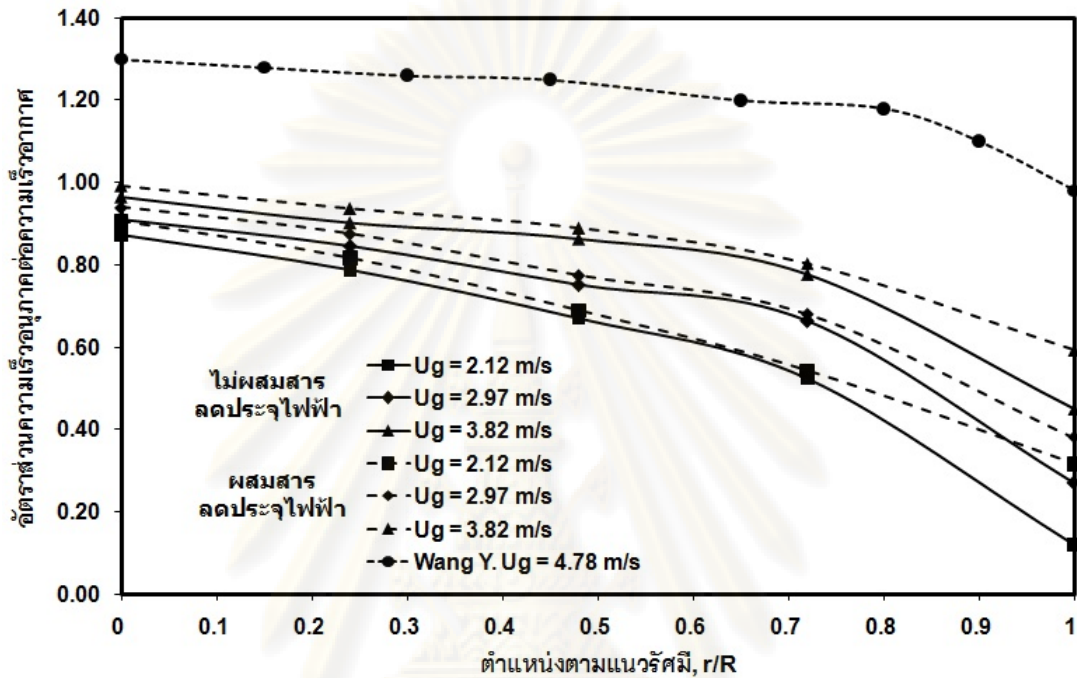


รูปที่ 4.11 ความดันอากาศตลอดความสูงของโรเตอร์ในการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้าที่ความเร็วอากาศต่างๆ



รูปที่ 4.12 สัดส่วนช่องว่างตลอดความสูงของโรเตอร์ในการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้าที่ความเร็วอากาศต่างๆ

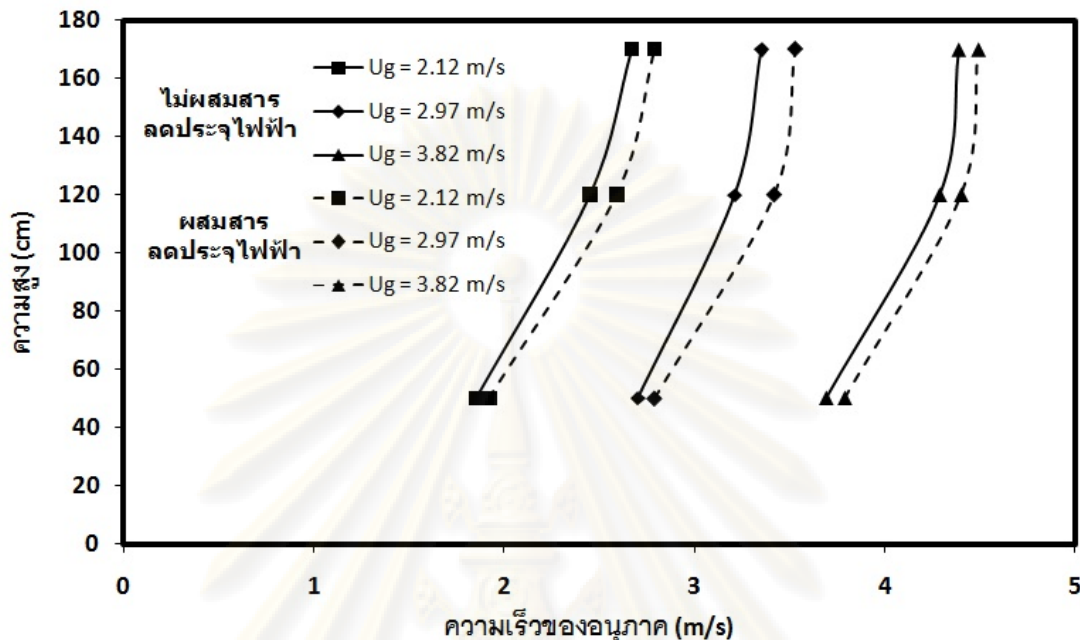
#### 4.2.2 ผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่อความเร็วในแนวแกนตามแนวรัศมีของอนุภาคพีวีซี



รูปที่ 4.13 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามแนวรัศมีในการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ที่ความสูง 50 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ

รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า ที่ความเร็วอากาศต่างๆ ที่ตำแหน่ง 50 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ ผลจากการทดลองความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้ามีรูปแบบความเร็วที่คล้ายกัน โดยความเร็วของการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้าจะมีความเร็วของอนุภาคพีวีซีมากกว่าเล็กน้อย ยกเว้นที่ตำแหน่งผนังของโรเตอร์ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในกรณีที่มีสารลดประจุไฟฟ้าจะมีค่ามากกว่าในการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้าอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากการผสมสารลดประจุไฟฟ้าในระบบจะทำให้อนุภาคพีวีซีเกาะที่ผนังน้อยลงดังแสดงในรูป 4.10 ทำให้อนุภาคพีวีซีเคลื่อนที่ได้ง่ายส่งผลให้ความเร็วของอนุภาคพีวีซีที่ผนังมีค่าเพิ่มขึ้น

#### 4.2.3 ผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่อความเร็วในแนวแกนของอนุภาคพีวีซีตามความสูงของไรเซอร์



รูปที่ 4.14 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามความสูงของไรเซอร์ในการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า ที่ความเร็วอากาศต่างๆ

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคพีวีซีตามความสูงของไรเซอร์ที่ตำแหน่ง 50, 120 และ 170 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ ระหว่างการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้าและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า ที่ความเร็วอากาศ 2.12, 2.97 และ 3.82 เมตรต่อวินาที เมื่อพิจารณารูปแบบความเร็วตลอดความสูงของไรเซอร์ที่บริเวณกึ่งกลางไรเซอร์ พบว่าความเร็วตลอดความสูงของไรเซอร์ในการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้ามีรูปแบบความเร็วที่คล้ายกัน โดยความเร็วของอนุภาคพีวีซีมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความสูง 50 - 120 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ โดยความเร็วของอนุภาคพีวีซีเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของไรเซอร์เพิ่มขึ้น และความเร็วของอนุภาคพีวีซีจะมีค่าเกือบคงที่ในช่วงความสูงระหว่าง 120 - 170 เซนติเมตร แต่ ในกรณีของการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้า ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในทุกๆ ความเร็วของอากาศ และทุกๆความสูงของไรเซอร์ จะมีค่ามากกว่าในการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้าเล็กน้อย โดยผลต่างของความเร็วของอนุภาคพีวีซีของทั้ง 2 การทดลองมีค่าแตกต่างกันประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสารลดประจุไฟฟ้าจะช่วยลดการเกาะกันของอนุภาคพีวีซี รวมทั้งช่วยลดแรงดึงดูดที่เกิดจากประจุไฟฟ้าระหว่างอนุภาคพีวีซีกับผนังของเครื่องฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียน ทำให้อากาศสามารถพาอนุภาคพีวีซีเคลื่อนที่ขึ้นไปได้ง่ายขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซีในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยศึกษาผลของความเร็วอากาศ และสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่อรูปแบบการไหล ความดันอากาศ และความเร็วของอนุภาคพีวีซี ผลการทดลองสรุปได้ดังต่อไปนี้

##### ตอนที่ 1 อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี

- ความดันอากาศภายในโรเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วอากาศเพิ่มขึ้น และความดันอากาศจะมีค่าลดลงตามความสูงของโรเตอร์
- สัดส่วนช่องว่างภายในโรเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศ และความสูงของโรเตอร์
- รูปแบบการไหลของอนุภาคพีวีซีในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนสามารถแบ่งช่วงของการไหลออกได้เป็น 2 ช่วงคือ ที่ความเร็วอากาศ 2.12 และ 2.97 เมตรต่อวินาทีจะมีรูปแบบการไหลเป็นฟลูอิดไลเซชันแบบความเร็วสูง และที่ความเร็วอากาศมากกว่า 3.82 เมตรต่อวินาทีจะมีการไหลแบบเบาบาง
- ความเร็วของอนุภาคพีวีซีตามแนวรัศมีของโรเตอร์จะมีค่าสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของโรเตอร์ และจะมีค่าลดลงเมื่อตำแหน่งเข้าใกล้ผนัง โดยเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศจะส่งผลให้ความเร็วของอนุภาคพีวีซีทุกจุดตามแนวของรัศมีจะมีค่าเพิ่มขึ้น
- ความเร็วของอนุภาคพีวีซีตามแนวแกนตลอดความสูงของโรเตอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความสูงของโรเตอร์เพิ่มขึ้น โดยบริเวณด้านล่างของโรเตอร์ความเร็วของอนุภาคพีวีซีจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเริ่มจะคงที่บริเวณด้านบนของโรเตอร์

##### ตอนที่ 2 ผลของสารลดประจุไฟฟ้าที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซี

- จากการสังเกตด้วยตาเปล่าการผสมสารลดประจุไฟฟ้าจะช่วยลดการเกาะผนังของโรเตอร์อย่างเห็นได้ชัด
- ความดันอากาศภายในโรเตอร์ในการทดลองที่มีการผสมสารลดประจุไฟฟ้าจะมีรูปแบบคล้ายกับการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า โดยความดันภายในโรเตอร์ในการทดลองที่มีการผสมสารลดประจุไฟฟ้าจะมีค่าต่ำกว่าระบบที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้าเล็กน้อย

- สัดส่วนช่องว่างในการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้าจะมีรูปแบบคล้ายกับการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า โดยจะสามารถแบ่งรูปแบบการไหลได้เช่นเดียวกันทั้ง 2 การทดลอง
- ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้า ความเร็วตลอดแนวรัศมี และตลอดความสูงของโรเตอร์จะมีรูปแบบคล้ายกับการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า โดยความเร็วของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้าจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยในทุกๆ จุดที่ทำการทดลอง
- การผสมสารลดประจุไฟฟ้าปริมาณ 2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักส่งผลต่ออุทกพลศาสตร์ของอนุภาคพีวีซีเพียงเล็กน้อย

จากผลการทดลองในตอนที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการผสมสารลดประจุไฟฟ้าในการทดลองของอนุภาคพีวีซีจะช่วยลดประจุทางไฟฟ้า ช่วยลดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคพีวีซี และแรงดึงดูดกับผนังของโรเตอร์ ทำให้อนุภาคพีวีซีเกิดการรวมตัว และสะสมบริเวณด้านล่างของโรเตอร์น้อยลง ทำให้อนุภาคพีวีซีเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ในการใช้กล้องความเร็วสูงถ่ายรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคควรนำกระดาษสีดำมาติดไว้บริเวณด้านตรงข้ามของกล้องเพื่อลดการกระเจิงของแสง จะช่วยให้ถ่ายรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้ดียิ่งขึ้น
- เครื่องอัดอากาศที่ใช้ในงานวิจัยมีผู้ใช้งานร่วมกันหลายคน ฉะนั้นก่อนทำการทดลองควรปรับอัตราการไหลของอากาศให้คงที่เสียก่อน หรือนำหัวปรับละเอียดมาต่อเข้ากับสายอากาศเพื่อความถูกต้องมากขึ้น
- อนุภาคที่มีขนาดเล็กก่อนที่จะใช้ทำการทดลองควรทำการอบเพื่อกำจัดความชื้นก่อนทำการทดลองทุกครั้ง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

คันสนีย์ย์ กำธนาทรัพย์. ผลของอัตราการไหลอากาศต่อโพรไฟล์ความเร็วอนุภาคในฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

สมชาย สวดยสะอาด. อุทกพลศาสตร์ของสารป้อนผสมในเครื่องฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

### ภาษาอังกฤษ

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.

Basu P., and Fraser S.A. Circulating Fluidized Bed Boiler. London: 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.

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.

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

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, 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.
- Mahmoud E.A., Nakazato T., Nakagawa N. and Kato K. Solid Circulation Rate in a Circulating Fluidized Bed in the Presence of Fine Powders. Chemical Engineering Science 61 (2005): 766-774.
- Mahmoud E.A., Nakazato T., Nakagawa N. and Kato K. Evaluation of the Turnover Times of the Bed Particles and of the Fine Powders in a Circulating Powder-particle Fluidized Bed (CPPEB). Powder Technology 153 (2005): 81-89.
- Mehrani P., Bi H.T. and Grace J.R. Electrostatic Behavior of Different Fines Added to a Faraday Cup Fluidized Bed. Journal of Electrostatics 65 (2007): 1-10.
- 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.
- Namkung W., Kim S.W. and Kim S.D. Flow Regimes and Axial Pressure Profiles in a Circulating Fluidized Bed. Chemical Engineering Journal 72 (1999): 245-252.
- Rhodes M.J. Introduction to Particle Technology. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- Sabbaghan H., Gharebagh R.S. and Mostoufi N. Modeling the Acceleration Zone in the Riser of Circulating Fluidized Beds. Powder Technology 142 (2004): 129-135.
- 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.
- Wang Y., Wei F., Wang Z., Lin Y. and Yu Z. Radial Profiles of Solids Concentration and Velocity in a Very Fine Particle (36  $\mu\text{m}$ ) Riser. Powder Technology 96 (1998): 262-266.
- 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.
- Yerushalmi J., Turner D.H. and Squires A.M. The Fast Fluidized Bed. Ind. Eng. Chem., Process Des. Dev. 15(1): 47-53.
- Yao L., Bi H.T. and Park A.H. Characterization of Electrostatic Charges in Freely Bubbling Fluidized Beds with Dielectric Particles. Journal of Electrostatics 56 (2002): 183-197.
- 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.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**ภาคผนวก ก**  
**ข้อมูลการทดลอง**

1. ข้อมูลความดันทั้งระบบของอนุภาคพีวีซี

ทำการทดลองโดยกำหนดปริมาณอนุภาคพีวีซีเริ่มต้น 2.5 กิโลกรัม ความดันอากาศฝั่งท่อป้อนกลับ 2.0 psi ปริมาณการเปิดวาล์วปีกผีเสื้อ 75 เปอร์เซ็นต์

- โดย P0 คือ ตำแหน่งก่อนถึงตัวกระจายอากาศ  
P2 – P9 คือ ตำแหน่งตามความสูงของโรเตอร์  
P10 คือ ตำแหน่งก่อนเข้าไซโคลน  
P11 คือ ตำแหน่งทางออกด้านบนของไซโคลน  
P12 คือ ตำแหน่งท่อป้อนกลับ  
P13 คือ ตำแหน่งท่อส่งผ่านด้านท่อป้อนกลับ  
P14 คือ ตำแหน่งท่อส่งผ่านด้านโรเตอร์

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลความดันทั้งระบบของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ความดัน	ความสูง (cm)	ความเร็วอากาศ (m/s)		
		2.12	2.97	3.82
P <sub>0</sub>	-10	358	314	299
P <sub>1</sub>	5	305	275	249
P <sub>2</sub>	12	273	252	251
P <sub>3</sub>	22	230	230	246
P <sub>4</sub>	40	192	200	238
P <sub>5</sub>	60	150	185	234
P <sub>6</sub>	100	125	162	225
P <sub>7</sub>	150	101	150	216
P <sub>8</sub>	190	87	147	213
P <sub>9</sub>	200	51	90	143
P <sub>10</sub>	230	59	92	161
P <sub>11</sub>	75	164	211	270
P <sub>12</sub>	50	233	248	269
P <sub>13</sub>	22	235	243	241

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลความดันทั้งระบบของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ความดัน	ความสูง (cm)	ความเร็วอากาศ (m/s)		
		2.12	2.97	3.82
P0	-10	344	300	289
P1	5	270	245	240
P2	12	240	225	241
P3	22	205	205	240
P4	40	170	180	230
P5	60	140	168	225
P6	100	118	150	220
P7	150	98	145	215
P8	190	80	138	210
P9	200	51	89	143
P10	230	58	92	161
P11	75	159	208	270
P12	50	228	244	269
P13	22	231	239	241

2. ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการคำนวณความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามแนวรัศมี

ตัวอย่างข้อมูลทำการทดลองโดยกำหนดปริมาณอนุภาคพีวีซีเริ่มต้น 2.5 กิโลกรัม ความดันอากาศฝั่งท่อป้อนกลับ 2.0 psi ปริมาณการเปิดวาล์วปีกผีเสื้อ 75 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของโรเตอร์ ( $r = 0$  เซนติเมตร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.3 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับคำนวณความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกน  
ที่ตำแหน่งกึ่งกลางโรเตอร์ ความสูง 50 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ

ข้อมูล	Ug = 2.12 m/s		Ug = 2.97 m/s		Ug = 3.82 m/s	
	ความยาว (mm)	องศา	ความยาว (mm)	องศา	ความยาว (mm)	องศา
1	0.453218	179.2462	0.698743	175.1009	0.946879	178.3634
2	0.462138	179.2462	0.700014	175.0303	0.956123	178.3397
3	0.495315	179.2361	0.685479	174.2894	0.476326	178.3397
4	0.451238	179.2361	0.692145	173.4181	0.940123	178.2902
5	0.459876	179.2258	0.713458	173.1909	0.941576	178.2101

### 3. ข้อมูลสำหรับการคำนวณอัตราการหมุนเวียนของอนุภาคพีวีซี

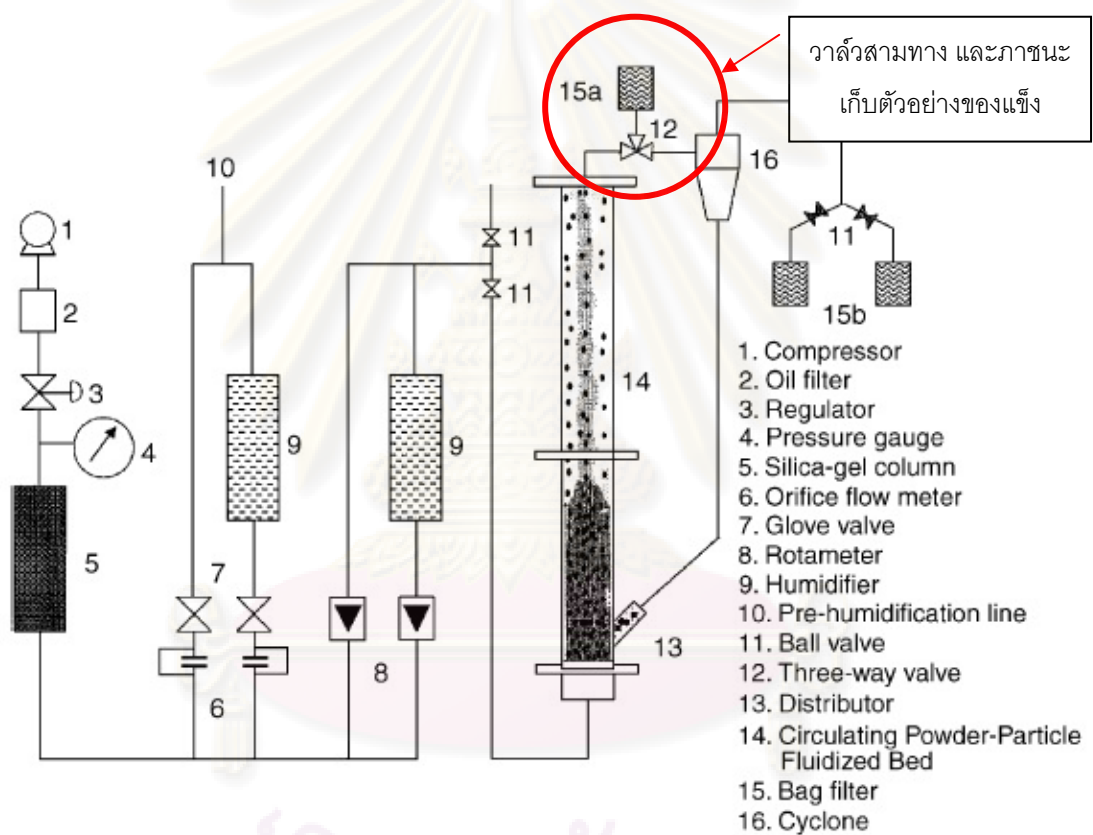
ทำการทดลองโดยกำหนดปริมาณอนุภาคพีวีซีเริ่มต้น 2.5 กิโลกรัม ความดันอากาศฝั่งท่อป้อนกลับ 2.0 psi ปริมาณการเปิดวาล์วปีกผีเสื้อ 75 เปอร์เซ็นต์ ทำการทดลองวัดอัตราการหมุนเวียนของของแข็งเช่นเดียวกับการทดลองของ Mahmoud E.A. และคณะ (2006) ดังแสดงในรูปที่ ก.1 โดยการสับวาล์วสามทางบริเวณรอยต่อระหว่างโรเตอร์กับไซโคลนให้อนุภาคไหลเข้าสู่ภาชนะกักเก็บ แล้วทำการจับเวลาในการเก็บของแข็ง นำของแข็งที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก แล้วคำนวณอัตราการหมุนเวียน

ตารางที่ ก.4 ปริมาณอนุภาคพีวีซีที่เก็บได้ในภาชนะกักเก็บในการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ความเร็วอากาศ (m/s)	เวลา (s)	ปริมาณอนุภาคพีวีซี (kg)
2.12	10	0.325
2.97	10	0.349
3.82	10	0.380

ตารางที่ ก.5 ปริมาณอนุภาคพีวีซีที่เก็บได้ในภาชนะกักเก็บในการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ความเร็วอากาศ (m/s)	เวลา (s)	ปริมาณอนุภาคพีวีซี (kg)
2.12	10	0.324
2.97	10	0.347
3.82	10	0.387



รูปที่ ก.1 การติดตั้งระบบหาอัตราการหมุนเวียนของของแข็ง  
ในการทดลองของ Mahmoud และคณะ (2006)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

1. สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคพีวีซี

นำข้อมูลความดันจากตารางที่ ก.1 และ ก.2 มาคำนวณสัดส่วนช่องว่างของอนุภาคพีวีซีตามความสูงของโรเตอร์ในการทดลองที่มีและไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ตารางที่ ข.1 สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ตำแหน่ง	$\Delta H$ (m)	ความสูง (m)	สัดส่วนช่องว่าง, $\epsilon$		
			ความเร็วอากาศ (m/s)		
			2.12	2.97	3.82
P <sub>1</sub> -P <sub>2</sub>	0.07	12	0.6724	0.7645	0.9795
P <sub>2</sub> -P <sub>3</sub>	0.10	22	0.6918	0.8423	0.9678
P <sub>3</sub> -P <sub>4</sub>	0.18	40	0.8487	0.8806	0.9681
P <sub>4</sub> -P <sub>5</sub>	0.20	60	0.8495	0.9463	0.9857
P <sub>5</sub> -P <sub>6</sub>	0.40	100	0.9552	0.9588	0.9839
P <sub>7</sub> -P <sub>8</sub>	0.50	150	0.9656	0.9828	0.9871
P <sub>8</sub> -P <sub>9</sub>	0.40	190	0.9749	0.9946	0.9946

ตารางที่ ข.2 สัดส่วนช่องว่างของอนุภาคพีวีซีในการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ตำแหน่ง	$\Delta H$ (m)	ความสูง (m)	สัดส่วนช่องว่าง, $\epsilon$		
			ความเร็วอากาศ (m/s)		
			2.12	2.97	3.82
P <sub>1</sub> -P <sub>2</sub>	0.07	12	0.6929	0.7952	0.9898
P <sub>2</sub> -P <sub>3</sub>	0.10	22	0.7492	0.8567	0.9928
P <sub>3</sub> -P <sub>4</sub>	0.18	40	0.8607	0.9005	0.9602
P <sub>4</sub> -P <sub>5</sub>	0.20	60	0.8925	0.9570	0.9821
P <sub>5</sub> -P <sub>6</sub>	0.40	100	0.9606	0.9678	0.9910
P <sub>7</sub> -P <sub>8</sub>	0.50	150	0.9713	0.9928	0.9928
P <sub>8</sub> -P <sub>9</sub>	0.40	190	0.9678	0.9875	0.9910



2. ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวรัศมี

ทำการทดลองตามแนวรัศมีของโรเตอร์ที่ตำแหน่ง 0, 0.6, 1.2, 1.8 และ 2.5 เซนติเมตร จากเส้นผ่านศูนย์กลางโดยที่ตำแหน่ง 0 เซนติเมตร คือตำแหน่งกึ่งกลางโรเตอร์ และที่ตำแหน่ง 2.5 เซนติเมตร คือตำแหน่งผนังของโรเตอร์

ตารางที่ ข.3 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามแนวรัศมี  
ในการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ตำแหน่งจากจุดศูนย์กลาง (cm)	ความเร็วของอนุภาคพีวีซี (m/s)		
	Ug=2.12 m/s	Ug=2.97 m/s	Ug=3.82 m/s
0	1.85	2.70	3.69
0.6	1.67	2.51	3.45
1.2	1.42	2.23	3.30
1.8	1.11	1.97	2.97
2.5	0.65	1.10	2.12

ตารางที่ ข.4 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามแนวรัศมี  
ในการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ตำแหน่งจากจุดศูนย์กลาง (cm)	ความเร็วของอนุภาคพีวีซี (m/s)		
	Ug=2.12 m/s	Ug=2.97 m/s	Ug=3.82 m/s
0	1.92	2.79	3.79
0.6	1.73	2.60	3.58
1.2	1.45	2.30	3.40
1.8	1.15	2.02	3.07
2.5	0.67	1.13	2.27

### 3. ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามความสูงของไรเซอร์

ทำการทดลองตามความสูงของไรเซอร์ที่ตำแหน่ง 50, 120 และ 170 เซนติเมตรจากตัวกระจายอากาศ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของไรเซอร์

ตารางที่ ข.5 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามความสูงของไรเซอร์  
ในการทดลองที่ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ตำแหน่งตามความสูง (cm)	ความเร็วของอนุภาคพีวีซี (m/s)		
	Ug=2.12 m/s	Ug=2.97 m/s	Ug=3.82 m/s
50	1.85	2.70	3.69
120	2.45	3.21	4.29
170	2.67	3.35	4.39

ตารางที่ ข.6 ความเร็วของอนุภาคพีวีซีในแนวแกนตามความสูงของไรเซอร์  
ในการทดลองที่มีสารลดประจุไฟฟ้า

ตำแหน่งตามความสูง (cm)	ความเร็วของอนุภาคพีวีซี (m/s)		
	Ug=2.12 m/s	Ug=2.97 m/s	Ug=3.82 m/s
50	1.92	2.79	3.79
120	2.59	3.42	4.40
170	2.79	3.53	4.49

### 4. อัตราการหมุนเวียนของอนุภาคพีวีซี

จากตารางที่ ก.4 และ ก.5 สามารถนำไปคำนวณหาอัตราการหมุนเวียนของอนุภาคพีวีซีที่สภาวะต่างๆ ได้ดังแสดงในตารางที่ ข.7

ตารางที่ ข.7 อัตราการหมุนเวียนของอนุภาคพีวีซีที่สภาวะต่างๆ

ความเร็วอากาศ (m/s)	อัตราการหมุนเวียนอนุภาคพีวีซี (kg/m <sup>2</sup> s)	
	ไม่มีสารลดประจุไฟฟ้า	มีสารลดประจุไฟฟ้า
2.12	16.56	16.66
2.97	17.78	17.99
3.82	19.36	19.72

**ภาคผนวก ค**  
**การคำนวณสมบัติของของแข็ง**

ข้อมูลพื้นฐานต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตารางที่ ค.1

ตาราง ค.1 ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณค่าต่างๆ

ข้อมูลพื้นฐาน	ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ความหนาแน่นของอากาศ	$\rho_g$	1.16	kg/m <sup>3</sup>
ความหนืดของอากาศ	$\mu_g$	$1.84 \times 10^{-5}$	N.s/m <sup>2</sup>
ความหนาแน่นของอนุภาคพีวีซี	$\rho_s$	1,410	kg/m <sup>3</sup>
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคพีวีซี	$d_p$	0.000140	m
ความหนาแน่นของสารลดประจุไฟฟ้า	$\rho_s$	1,030	kg/m <sup>3</sup>
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของสารลดประจุไฟฟ้า	$d_p$	0.000099	m
ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	$g$	9.8	m/s <sup>2</sup>

1. การจำแนกของแข็งตามลักษณะของ Geldart

การจำแนกของแข็งตามลักษณะของ Geldart สามารถจำแนกได้ตามรูปที่ 2.6 จากรูปตัวแปรที่ต้องการคือ ผลต่างความหนาแน่นของของแข็งและอากาศ และขนาดของของแข็งอนุภาคพีวีซี

$$\rho_s - \rho_g = 1.410 - 0.00116 = 1.4088 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{จากตารางที่ ค.1 } d_p = 0.000140 \text{ เมตร}$$

จากกราฟรูปที่ 2.6 อนุภาคพีวีซีสามารถจำแนกได้อยู่ในกลุ่ม A

สารลดประจุไฟฟ้า

$$\rho_s - \rho_g = 1.030 - 0.00116 = 1.0288 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

$$\text{จากข้อ 2 } d_p = 0.000099 \text{ เมตร}$$

จากกราฟรูปที่ 2.6 สารลดประจุไฟฟ้าสามารถจำแนกได้อยู่ในกลุ่ม A

2. 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 แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการจะได้ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไฮเซนซ์ของอนุภาคพีวีซีเท่ากับ 0.00889 เมตรต่อวินาที

จากตาราง ค.1 แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการจะได้ค่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดไฮเซนซ์ของสารลดประจุไฟฟ้าเท่ากับ 0.00325 เมตรต่อวินาที

### 3. การคำนวณค่าความเร็วสุดท้าย ( $U_t$ )

ความเร็วสุดท้ายของเม็ดแก้วสามารถคำนวณได้จากสมการของ Haider และ Levenspiel

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

จากตาราง ค.1 แทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการจะได้ค่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาคพีวีซีเท่ากับ 0.76 เมตรต่อวินาที

ตรวจค่า Re ว่าได้ตรงกับเงื่อนไขหรือไม่

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

$$\text{Re} = (1.16 \times 0.76 \times 0.00014) / 0.000018$$

$$\text{Re} = 6.86$$

เมื่อแทนค่า  $U_t$  ที่คำนวณได้ ลงในค่า Re พบว่าตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ดังนั้นความเร็วสุดท้ายของอนุภาคพีวีซีในงานวิจัยนี้เท่ากับ 0.76 เมตรต่อวินาที

จากตาราง ค.1 แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการจะได้ค่าความเร็วสุดท้ายสารลดประจุไฟฟ้าเท่ากับ 0.43 เมตรต่อวินาที

ตรวจค่า Re ว่าได้ตรงกับเงื่อนไขหรือไม่

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

$$\text{Re} = (1.16 \times 0.43 \times 0.000099) / 0.000018$$

$$\text{Re} = 2.74$$

เมื่อแทนค่า  $U_t$  ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น ในค่า Re พบว่าตรงกับเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ดังนั้นความเร็วสุดท้ายของสารลดประจุไฟฟ้าในงานวิจัยนี้เท่ากับ 0.43 เมตรต่อวินาที

**ภาคผนวก ง**  
**วิธีการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงและ**  
**วิเคราะห์ความเร็วของอนุภาคด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ**

1. การบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูง

การติดตั้งระบบบันทึกภาพ มีขั้นตอนดังนี้

1. ประกอบกล้องความเร็วสูงกับเลนส์
2. ต่อสายเชื่อมระหว่างกล้องกับชุดคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ
3. สอดโพรบเข้าไปในโรเตอร์โดยให้ปลายโพรบอยู่ที่ตำแหน่งที่ต้องการ และอีกด้านของโพรบที่อยู่ข้างนอกต่อโรเตอร์นำชุดกล้องความเร็วสูงมาวางแล้วปรับระยะให้กล้องจับภาพผ่านท่อกึ่งกลางโพรบ
4. นำชุดแหล่งกำเนิดแสงมาวางด้านตรงข้ามกับกล้องความเร็วสูง และเปิดแสงให้แสงสว่างภายในโรเตอร์
5. เปิดเครื่องอัดอากาศให้อากาศเข้าไปในท่อโรเตอร์ในอัตราการไหลที่กำหนด
6. เปิดวาล์วปีกผีเสื้อที่ท่อส่งผ่านในปริมาณที่กำหนด
7. ทำการปรับเลนส์ รวมทั้งความเร็วชัตเตอร์จนได้ภาพที่ชัดเจน
8. ทำการบันทึกภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

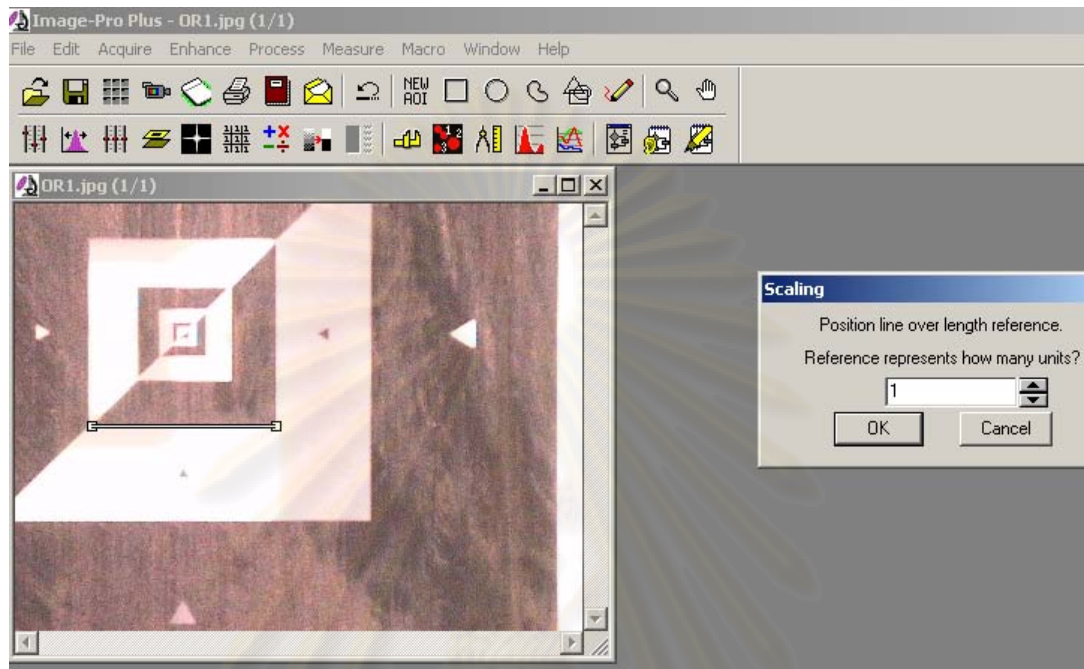
2. การวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

ในการวิเคราะห์ภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพต้องมีการปรับเทียบ (Calibrate) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบหน่วยความยาวของภาพกับความยาวมาตรฐาน โดยในงานวิจัยได้ทำการปรับเทียบด้วยการถ่ายภาพกระจกที่ใช้ในการเทียบมาตรฐาน กระจกที่ใช้ปรับเทียบหน่วยความยาวแสดงดังรูปที่ ง.1

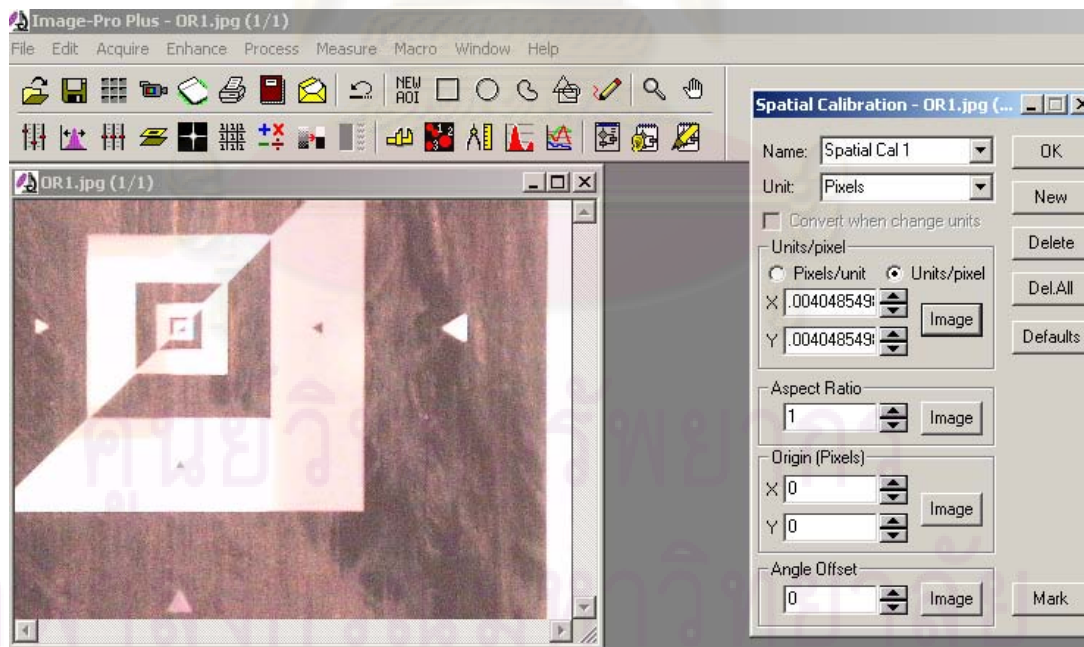
การปรับเทียบความยาวมาตรฐานมีรายละเอียดดังนี้

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

4. กำหนดชื่อไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้ และทำการบันทึกไฟล์ไว้ดังแสดง  
ในรูปที่ ง.2



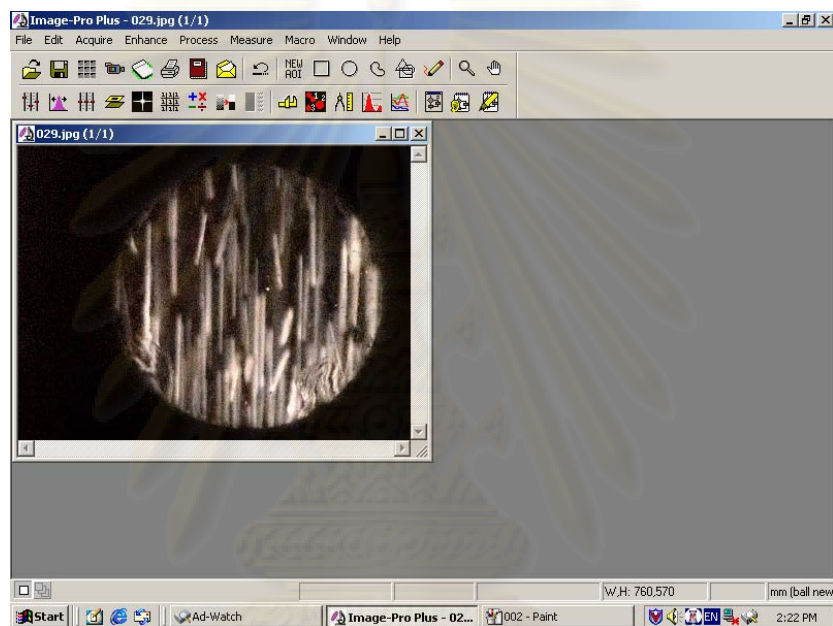
รูปที่ ง.1 ภาพกระจกที่ใช้ในการปรับเทียบและการลากเส้น



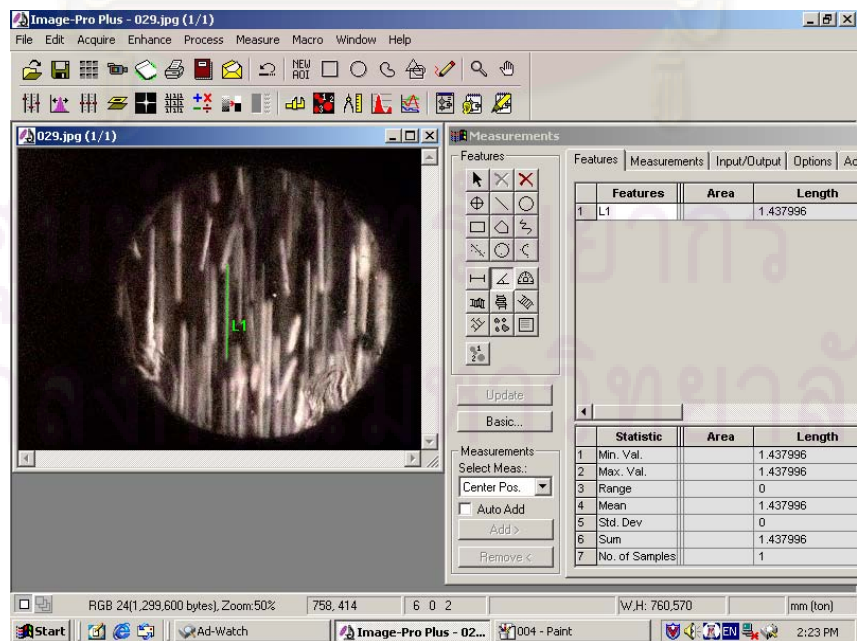
รูปที่ ง.2 การกำหนดชื่อไฟล์ และการบันทึกไฟล์ของหน่วยที่ได้ปรับเทียบแล้ว

การวิเคราะห์ภาพมีขั้นตอนดังนี้

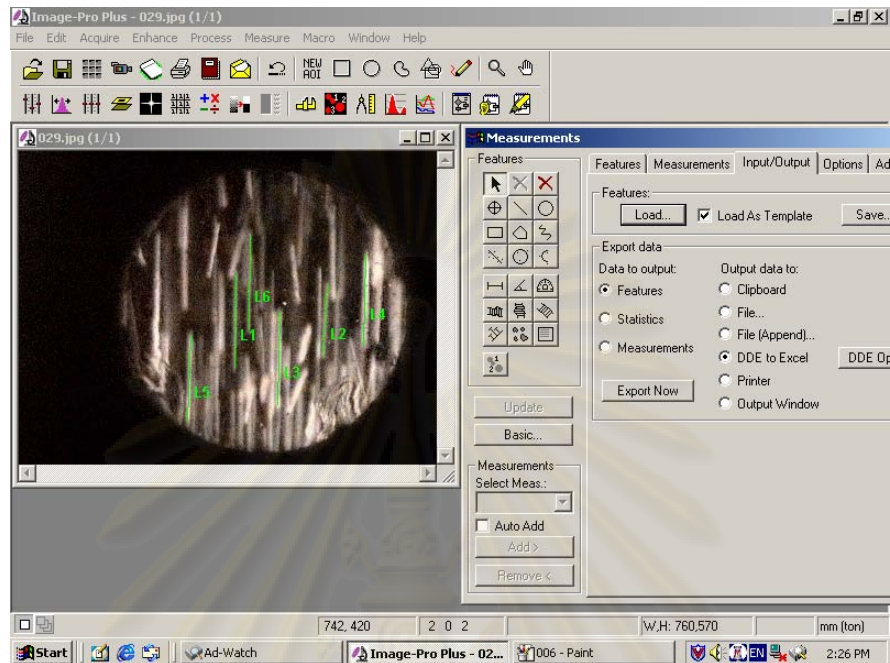
1. เปิดแฟ้มภาพที่ทำการบันทึกรูปการเคลื่อนที่ของอนุภาคพีวีซี แสดงดังรูปที่ ง.3
2. เลือกฟังก์ชันในการวัดเป็นการวัดความยาวและมุมในการเคลื่อนที่ และทำการลากเส้น แสดงดังรูปที่ ง.4
3. ส่งข้อมูลทีวิเคราะห์ได้จากโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ไปยังโปรแกรม Excel ดังแสดงในรูปที่ ง.5 จะได้ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณปรากฏที่โปรแกรม Excel ซึ่งประกอบไปด้วยความยาวของเส้น มุม และตำแหน่งของเส้นภายในภาพดังแสดงในรูปที่ ง.6



รูปที่ ง.3 การเปิดแฟ้มภาพพร้อมเลือกฟังก์ชันการเปรียบเทียบ



รูปที่ ง.4 การเลือกฟังก์ชันการลากเส้น และการลากเส้น



รูปที่ ง.5 การส่งข้อมูลไปยังโปรแกรม Excel

The screenshot shows the Microsoft Excel interface with a table containing data for six features. The table has the following columns: Features, Center X P, Center Y P, Area, Length, Radius, Start X Pos, Start Y Pos, End X Pos, End Y Pos, Angle, and Avg. Dist. The data is as follows:

	Features	Center X P	Center Y P	Area	Length	Radius	Start X Pos	Start Y Pos	End X Pos	End Y Pos	Angle	Avg. Dist.
1	L1	3.210773	2.516331		1.405319		3.218943	1.813719	3.202603	3.218943	0.6862	
2	L2	4.542467	2.508161		1.064097		4.575147	1.977117	4.509788	3.039205	3.521453	
3	L3	3.856195	3.080054		1.389268		3.872535	2.385612	3.839855	3.774496	1.347887	
4	L4	5.1307	2.214044		1.356598		5.14704	1.535942	5.114361	2.892146	1.380354	
5	L5	2.524501	3.374171		1.291775		2.54901	2.728748	2.499991	4.019593	2.174744	
6	L6	3.42319	1.944437		1.405319		3.43136	1.241826	3.41502	2.647049	0.6862	

รูปที่ ง.6 ข้อมูลที่แสดงในโปรแกรม Excel



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายฐิติ สายเชื้อ เกิดวันที่ 6 พฤษภาคม 2527 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย