

อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคถ่านหินในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน



นางสาวปาจริย์ ตั้งผดุงรัชต์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3637-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDRODYNAMICS OF COAL PARTICLE IN CIRCULATING FLUIDIZED BED

Ms. Pajaree Tangphadungrat

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3637-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคถ่านหินในเครื่องฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน
โดย	นางสาวปาจรรย์ ตั้งผดุงรัชต์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สุชญา นิติวัดมนานนท์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีรพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. สุชญา นิติวัดมนานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด)

..... กรรมการ
(ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบุญรณ์)

ปาจารย์ยั ตั้งผดุงรัชตั้ : อุกทพลศาสตรั้ของอนุภคถ่านหึนในเครื่งฟลูอึได้ช้เบดเบบหมุนเวึยน
(HYDRODYNAMICS OF COAL PARTICLE IN CIRCULATING FLUIDIZED BED) อคจารย์
ที่ปรึภค : อคจารย์ ดร. สุธญน นึตึวิฒนณนถั้ อคจารย์ที่ปรึภคสร่วม : รศ.ดร. เลอสรวง เมฆสุต
จ่านวนหน้า 102 หน้า. ISBN 974-17-3637-1.

ในงนวิจยันี้ อุกทพลศาสตรั้ของอนุภคถ่านหึนในเครื่งฟลูอึได้ช้เบดเบบหมุนเวึยนถูกศึภคที่
อุณหภูมิห้งในเครื่งปรึภคถั้ทำคจากอะครึลึคไสเพื่อให้เห็นถึงการเคลื่อนตั้วของอนุภค โดยศึภค
ผลของขนาดอนุภคและอัตราการไหลของอคภคที่มึต่อควมเร็วของอนุภค และควมดันที่ต่ำแห่ง
ต่าๆ ตมควมสูงของไรเซอรั โดยคค่าควมดันในเครื่งปรึภคถั้เปลี่ยนเปล่งไปตมควมสูงสคภค
น้คค่านวนหสั้ตส่วนของอนุภคได้ ควมเร็วของอนุภคถ่านหึนสคภคค่านวนโดยใช้เทคนึคการ
บันทึภคพด้ยกล้ง CCD ร่วมถึกับการใช้โปรแกรม Image Pro Plus ขนาดอนุภคถ่านหึนเจลึยที่ใช่ค
400 600 800 และ1000 ไมครอน อัตราการไหลของอคภคอยู่ในช่วง 400-700 ลิตรต่อนาที อนุภค
ถ่านหึนที่ใช่คมีควมหนาแน่น 1380 กึลอรึมตอลูกบาศก์เมตร ผลการทดลองพบว่ที่ทุก ๆ อัตราการไหล
ของอคภค ควมเร็วของถ่านหึนและควมดันในเครื่งปรึภคถั้มีคค่าลดลงตมควมสูงของไรเซอรั และ
เมื่อัตราการไหลของอคภคเปลี่นขึ้น ควมเร็วของถ่านหึนจะมึคค่าเปลี่นขึ้นที่ต่ำแห่งควมสูงเดึยกันและ
สั้ตส่วนของอนุภคจะมึคค่าลดลง ยกเว็นที่บริเวณส่วบนของเครื่งปรึภคถั้พบว่าอนุภคถ่านหึนมา
ร่วมตั้กันหนาแน่น เมื่อน้ควมเร็วของถ่านหึนที่ได้จกการทดลองมาปรึยบเทึยกับควมเร็วของ
ถ่านหึนที่ได้จกค่านวนโดยใช้สมการถดถอยเช้งเส้น พบว่มีคค่าตคต่ากันไม่เก็นร้อยละ 20

สถาบันวิทยปรึภค จุฬาลงกรณั้มหาวิทยาลัย

ภควิชค.....เคมึเทคนึค.....	ลายมือช้อนึสึต.....
สคควิชค.....เคมึเทคนึค.....	ลายมือช้อคจารย์ที่ปรึภค.....
ปรึภคศึภค.....2546.....	ลายมือช้อคจารย์ที่ปรึภคสร่วม.....

4372333223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : CIRCULATING FLUIDIZED BED / HYDRODYNAMICS / PARTICLE VELOCITY / COAL

PAJAREE TANGPHADUNGRAT : HYDRODYNAMICS OF COAL PARTICLE IN CIRCULATING FLUIDIZED BED. THESIS ADVISOR : SUCHAYA NITIVATTANANON
 THESIS CO-ADVISOR : ASSOC.PROF.LURSUANG MEKASUT, 102 pp. ISBN 974-17-3637-1.

In this research, hydrodynamic of coal particle in Circulating Fluidized Bed (CFB) was studied at room temperature in a visible acrylic reactor to detect particle movement. The effect of particle sizes and air flow rates on particle velocity and pressure in the CFB riser were studied. Pressure changed inside the reactor was used to calculate particle voidage. Particle velocity was recorded and computed by using CCD camera with Image Pro Plus Program technique. The average particle sizes were 400, 600, 800 and 1000 μm and the range of air flow rate was 400-700 l/min. The density of coal particle was 1380 kg/m^3 . It was found that at every air flow rate particle velocity and pressure inside the reactor decreased along the riser. At the same position, as the air flow rate increased the particle velocity increased. The voidage was found to decrease along the riser height except at the top of the reactor. The differences between particle velocity recorded from experiment and that calculated from linear regression equation were found to be the range of 20%.

department.....Chemical Technology..... Student's signature.....
 Field of study... Chemical Technology..... Advisor's signature.....
 Academic year.....2003..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. สุชนา นิตวัฒน์านนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

งานวิจัยเรื่อง “อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคถ่านหินในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้าน เชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และทุนบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ และรองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ที่กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณสังข์ ชมชื่น และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ อย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ณ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 วารสารปริทัศน์.....	3
2.1 ฟลูอิดไอเซน.....	3
2.2 ก๊าซฟลูอิดไอเซน.....	11
2.3 ฟลูอิดไอเซนแบบหมุนเวียน	17
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	31
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	31
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	43
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	49
4.1 ผลการทดลองการหาความเร็ว	49
4.2 ผลการทดลองการวัดความดัน	54
4.3 ผลการทดลองการหาสัดส่วนอนุภาค.....	56
4.4 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น.....	60

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 64
5.1	สรุปผลการทดลอง..... 64
5.2	ข้อเสนอแนะ..... 64
รายการอ้างอิง.....	66
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	88
ภาคผนวก ค.....	95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	105



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	แสดงการกำหนดเครื่องหมายพีชคณิตสำหรับการคำนวณ.....	60
4.2	การกำหนดเครื่องหมายพีชคณิตสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยต่างๆ.....	61
4.3	การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	61
4.4	ข้อมูลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นของความเร็วอนุภาค	61
ก.1	ข้อมูลการวิเคราะห์ความหนาแน่นบัลด์์ และความหนาแน่นของถ่านหิน	69
ก.2	ปริมาณของถ่านหินในแต่ละช่วงก่อนทำการทดลอง สำหรับถ่านหินขนาด 400 600 800 และ1000 μm	70
ก.3	ปริมาณของถ่านหินในแต่ละช่วงหลังการทดลอง สำหรับถ่านหินขนาด 400 600 800 และ1000 μm	70
ก.4	อัตราการป้อนกลับของถ่านหินเข้าสู่โรเตอร์ผ่านแอลวาล์ว ที่อัตราการเปิดหมายเลขต่าง ๆ.....	71
ก.5	การแปลงค่าอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนจากหน่วย l/min เป็นหน่วย m^3/s และเป็นอัตราเร็วอากาศ(Ug)	71
ก.6	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหล ของอากาศ 400 l/min ที่ความสูง 30 cm. จากตัวกระจายอากาศ	72
ก.7	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหล ของอากาศ 400 l/min ที่ความสูง 80 cm. จากตัวกระจายอากาศ	72
ก.8	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหล ของอากาศ 400 l/min ที่ความสูง 130 cm. จากตัวกระจายอากาศ	73
ก.9	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหล ของอากาศ 400 l/min ที่ความสูง 180 cm. จากตัวกระจายอากาศ	74
ก.10	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm อัตราการไหล ของอากาศ 450 l/min ที่ความสูง 30 cm. จากตัวกระจายอากาศ	74
ก.11	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหล ของอากาศ 450 l/min ที่ความสูง 80 cm. จากตัวกระจายอากาศ	75
ก.12	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหล ของอากาศ 450 l/min ที่ความสูง 130 cm. จากตัวกระจายอากาศ	76

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.27 ข้อมูลความดันที่ความสูงต่าง ๆ ของถ่านหินขนาด 600 μm	86
ก.28 ข้อมูลความดันที่ความสูงต่าง ๆ ของถ่านหินขนาด 800 μm	87
ก.29 ข้อมูลความดันที่ความสูงต่าง ๆ ของถ่านหินขนาด 1000 μm	87
ข.1 สัดส่วนของน้ำหนักในแต่ละช่วงขนาดของถ่านหินก่อนการทดลอง ขนาด 400 μm	89
ข.2 การคำนวณค่าเบี่ยงเบนของขนาดอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 400 μm	90
ข.3 การกรอกข้อมูลตัวแปรต่างๆ และผลลัพธ์การคำนวณประสิทธิภาพ ของไซโคลอนในโปรแกรมสำเร็จรูป 93	93
ค.1 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับอนุภาคขนาด 400 μm	95
ค.2 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับอนุภาคขนาด 600 μm	95
ค.3 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับอนุภาคขนาด 800 μm	96
ค.4 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับอนุภาคขนาด 1000 μm	96
ค.5 ผลความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคขนาด 400 μm	97
ค.6 ผลความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคขนาด 600 μm	97
ค.7 ผลความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคขนาด 800 μm	98
ค.8 ผลความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคขนาด 1000 μm	98
ค.9 ความดันลด ณ ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ถ่านหินขนาด 400 μm	99
ค.10 ความดันลด ณ ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ถ่านหินขนาด 600 μm	99
ค.11 ความดันลด ณ ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ถ่านหินขนาด 800 μm	100
ค.12 ความดันลด ณ ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ถ่านหินขนาด 1000 μm	100
ค.13 สัดส่วนของอนุภาค ณ ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ถ่านหินขนาด 400 μm	101
ค.14 สัดส่วนของอนุภาค ณ ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ถ่านหินขนาด 600 μm	101
ค.15 สัดส่วนของอนุภาค ณ ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ถ่านหินขนาด 800 μm	102
ค.16 สัดส่วนของอนุภาค ณ ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ถ่านหินขนาด 1000 μm	102
ค.17 การหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(SD) ของถ่านหินก่อนและหลังการทดลอง.....	103

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart.....	5
2.2 ระดับของเบดในหอทดลอง	5
2.3 ลักษณะของฟลูอิดไธด์เบด.....	6
2.4 ลักษณะของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกระจายของไหล	7
2.5 ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบต่างๆ	9
2.6 ปรากฏการณ์ฟลูอิดไธด์เซชันแบบต่างๆ เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น.....	12
2.7 ลักษณะฟลูอิดไธด์เซชันแบบเบดนิ่ง.....	12
2.8 การกระจายตัวในฟลูอิดไธด์เบดแบบฟองอากาศ	14
2.9 ลักษณะฟลูอิดไธด์เบดแบบสลัก.....	15
2.10 ลักษณะฟลูอิดไธด์เบดแบบปั่นป่วน.....	16
2.11 ความสัมพันธ์ของความดันลดกับความเร็วในช่วงเกิด turbulent bed.....	16
2.12 ระบบฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนเวียน.....	18
2.13 ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดของแข็งในระบบ fast bed.....	19
2.14 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ cluster	20
2.15 ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดของแข็งตามความสูงของท่อ riser.....	21
2.16 แบบจำลองการเกิด cluster	22
2.17 ขอบเขตของ fast fluidization	22
2.18 ขอบเขตของ fast fluidization ที่เปลี่ยนแปลงกับอัตราหมุนเวียนเม็ดของแข็ง	23
2.19 การเปลี่ยนแปลงเวลาที่เม็ดของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์	24
2.20 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อการเปลี่ยนภาวะขอบเขตของฟลูอิดไธด์เซชัน.....	24
2.21 โปรไฟล์การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน	25
2.22 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ fast bed.....	26
2.23 วงจรความดันของระบบฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนเวียน.....	28
2.24 ลักษณะการเคลื่อนที่ใน fast fluidized bed	29
3.1 แบบจำลองเครื่องฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนเวียน.....	31
3.2 เครื่องฟลูอิดไธด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลอง.....	32
3.3 ไซโคลน (cyclone).....	33
3.4 ท่อป้อนกลับ (downcomer).....	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

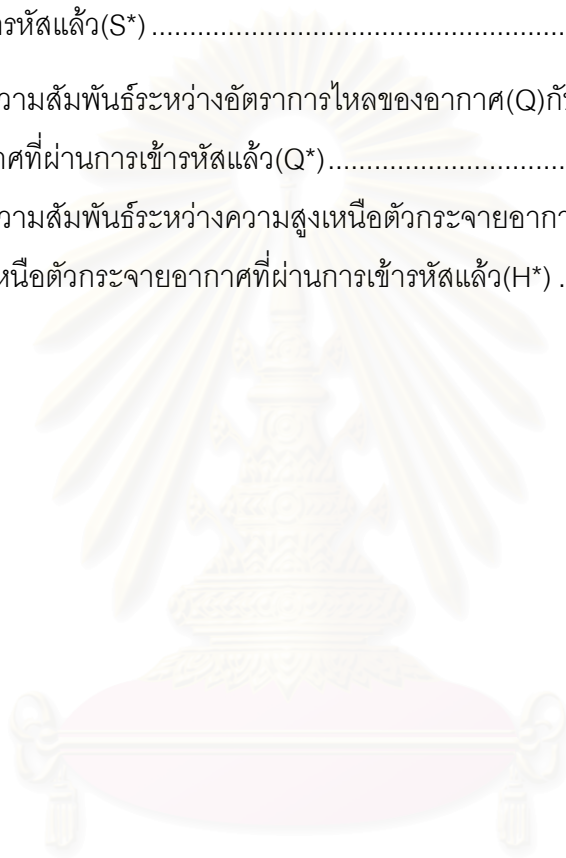
รูปที่	หน้า
3.5 แอลวาล์ว(L-valve)	34
3.6 เครื่องเป่าอากาศ (Blower)	35
3.7 โรตاميเตอร์ (Rotameter).....	35
3.8 pressure transmitter	36
3.9 กล้อง CCDและเลนส์	36
3.10 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม Image Pro Plus.....	37
3.11 เครื่องบดหยาบ	38
3.12 เครื่องบดละเอียด	42
3.13 เครื่องร่อนและตะแกรงร่อนแยกขนาด.....	42
3.14 ตัวอย่างภาพการเคลื่อนที่ของถ่านหินที่บันทึกได้ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus	42
3.15 ภาพเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์และการลากเส้นความยาว.....	45
3.16 การกำหนดไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้.....	46
3.17 การเปิดไฟล์ภาพพร้อมทั้งเลือกไฟล์calibrate และการเลือกฟังก์ชันความยาว	46
3.18 การลากเส้นการเคลื่อนที่ของอนุภาค	47
3.19 การส่งข้อมูลไปยัง Excel	47
3.20 ข้อมูลที่ปรากฏในไฟล์ Excel.....	48
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 400 μm	50
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วของอนุภาค ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 400 μm	50
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 600 μm	51
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วของอนุภาค ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 600 μm	51
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด800 μm	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วของอนุภาค ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 800 μm	52
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 1000 μm	53
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วของอนุภาค ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 1000 μm	53
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วของอนุภาค ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ เปรียบเทียบอนุภาคขนาด 400 และ 800 μm	54
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 400 μm	55
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 600 μm	55
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 800 μm	56
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 1000 μm	56
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของอนุภาคกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 400 μm	57
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของอนุภาคกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 600 μm	58
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของอนุภาคกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 800 μm	59
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของอนุภาคกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคขนาด 1000 μm	59
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-0.7255 S^* + 0.1735 Q^* - 0.1219 H^* + 1.6992$ กับ V	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคจากการทดลอง กับที่คำนวณจากสมการสำหรับอนุภาคขนาด 600 μm	63
ค.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค(S)กับขนาดอนุภาค ที่ผ่านการเข้ารหัสแล้ว(S*)	103
ค.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศ(Q)กับอัตราการ ไหลของอากาศที่ผ่านการเข้ารหัสแล้ว(Q*).....	104
ค.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตัวกระจายอากาศ(H) กับความสูงเหนือตัวกระจายอากาศที่ผ่านการเข้ารหัสแล้ว(H*)	104



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัดของหอยทาดลอง (m)
Ar	=	Archimedes number
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาคของแข็ง (μm)
d_{pi}	=	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคของแข็งในช่วง i (μm)
d_{Sm}	=	Sauter mean diameter (μm)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของหอยทาดลอง (m)
F_D	=	แรงลากเนื่องจากความหนืด (Drag force, kgm/s^2)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.8 m/s^2
g_c	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 1 m/s^2
h	=	ระยะห่างระหว่างจุดที่วัดความดัน (m)
$Z_1, Z_2 \dots Z_4$	=	ตำแหน่งที่วัดความเร็วอนุภาค ตามความสูงของโรเตอร์ (m)
L	=	ความสูงเบด (m)
L_{mf}	=	ความสูงของเบดขณะเกิดเริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน (m)
$P_1, P_2 \dots P_6$	=	ความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความสูงของโรเตอร์ (mmH_2O)
ΔP	=	ความดันตกคร่อม (mmH_2O)
r	=	ระยะในแนวรัศมีจากแกนกลาง (mm)
R	=	ระยะรัศมี (mm)
Re_p	=	ตัวแปรไร้หน่วยของ particle Reynolds number มีค่าเท่ากับ $d_p U_p \rho_g / \mu$
s	=	ความยาวเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค (mm.)
t	=	ความเร็ว shutter (1/sec)
U	=	ความเร็วอากาศภายในโรเตอร์ (m/s)
U_{ch}	=	choking velocity (m/s)
U_{mb}	=	ความเร็วก๊าซที่ทำให้เริ่มมีฟองก๊าซเกิดขึ้นในเบด (m/s)
U_{mf}	=	ความเร็วก๊าซที่ทำให้เริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน (m/s)
U_t	=	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลที่อยู่นิ่ง (Terminal velocity, m/s)
$U_{t,spherical}$	=	ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งที่เป็นทรงกลมในของไหลที่อยู่นิ่ง (m/s)
U_{tr}	=	ความเร็วส่งผ่าน (m/s)
v	=	ความเร็วของอนุภาค (m/s)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

x_i	=	สัดส่วนโดยน้ำหนักของของแข็งในช่วง i
ϕ_s	=	ค่าความเป็นทรงกลม
ρ_b	=	ความหนาแน่นบัลค์ของเบด (kg/m^3)
ρ_g	=	ความหนาแน่นของก๊าซ (kg/m^3)
ρ_s	=	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (kg/m^3)
μ	=	สัมประสิทธิ์ความหนืดของก๊าซ (g/cm.s)
ϵ	=	สัดส่วนของช่องว่าง
ϵ_{av}	=	สัดส่วนของช่องว่างเฉลี่ย
ϵ_{mf}	=	สัดส่วนของช่องว่าง ขณะที่ก๊าซมีความเร็วเท่ากับ U_{mf}

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ถ่านหินเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีปริมาณมากในประเทศไทย และเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ ในกระบวนการอุตสาหกรรมต่างๆ เทคโนโลยีการแปรรูปถ่านหินให้เป็นพลังงานมีอยู่มากมาย เช่น การแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลว(Liquid fraction) การแปรรูปเป็นแก๊สเชื้อเพลิง(Gasification) ตลอดจนกระบวนการเผาไหม้เพื่อนำความร้อนที่ได้ไปใช้งานโดยตรง ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง จากอดีตกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในเตาเผาแบบตะกรับได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีฟลูอิดไอเซชัน(fluidization) จนในปัจจุบันได้มีการพัฒนามาเป็น เตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียน(Circulating Fluidized Bed , CFB) ซึ่งการเผาไหม้โดยวิธีนี้จะมีประสิทธิภาพสูง ปริมาณ NO_x และ SO_x ต่ำ สามารถนำเชื้อเพลิงที่เกิดการเผาไหม้ไม่หมดกลับเข้ามาเผาไหม้ได้อีก ทำให้สามารถใช้ทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังสามารถนำเอาพืชน้ำหรือชีวมวล(Biomass) มาผสมกับถ่านหินเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิง เช่น ชานอ้อย เปลือกข้าว เศษไม้ แก่นไม้ เปลือกไม้ เป็นต้น ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีชีวมวลเหล่านี้เป็นจำนวนมาก การนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมจึงเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

กระบวนการเผาไหม้จริงที่เกิดขึ้นในเตาเผาฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียน จะเกิดในเครื่องฟลูอิดไอส์เบดที่มีลักษณะที่บดบังไม่สามารถเห็นถึงลักษณะการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นภายใน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการเคลื่อนตัวของอนุภาคในเครื่องฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง โดยสร้างเครื่องฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียนที่ทำมาจากท่อพลาสติกใส (Plexiglass) อนุภาคที่ใช้คือถ่านหิน ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ ขนาดของถ่านหิน อัตราการไหลของอากาศที่มีต่อความดัน สัดส่วนของถ่านหิน และความเร็วของถ่านหิน ณ ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของด้านไรเซออร์

1.2 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างเครื่องฟลูอิดไอส์เบดแบบหมุนเวียน พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่างๆ
2. ศึกษาผลของขนาดถ่านหิน และอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อความดัน สัดส่วนของอนุภาคและความเร็วของถ่านหิน ณ ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของด้านไรเซออร์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ภาวะอุณหภูมิต่ำ (Coldflow)
2. อนุภาคที่ใช้ในการศึกษา คือ ถ่านหิน
3. ศึกษาถึงความเร็วของถ่านหินภายในคอลัมน์ โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ขนาดถ่านหิน และอัตราการไหลของอากาศ

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่างๆ
3. ออกแบบเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 2 เมตร) แล้วดำเนินการสร้างเครื่องตามทีออกแบบไว้ พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่างๆ
4. นำถ่านหินที่ใช้ในการทดลองมาบดและคัดขนาดตามต้องการ (ถ่านหินที่ใช้มีขนาดอยู่ในช่วง 300-1180 ไมครอน) พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพของถ่านหิน
5. ทำการทดลองหาความเร็วของถ่านหิน ณ ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของด้านโรเตอร์ ด้วยเทคนิคการบันทึกภาพจากกล้อง CCD แล้วใช้โปรแกรม Image Pro Plus ในการวิเคราะห์ภาพ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ ขนาดของถ่านหิน และอัตราการไหลของอากาศ
6. วิเคราะห์ และสรุปผลการวิจัย แล้วเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและสร้างเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนได้
2. เข้าใจถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของอนุภาคภายในโรเตอร์ และผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อลักษณะการเคลื่อนตัวของอนุภาค
3. สามารถหาความเร็วของอนุภาค โดยใช้เทคนิคการบันทึกภาพจากกล้อง CCD แล้ววิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus

บทที่ 2 วารสารปริทัศน์

2.1 ฟลูอิดิเซชัน (Fluidization)

ฟลูอิดิเซชันแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed : CFB)

เทคนิคฟลูอิดิเซชัน เป็นเทคนิคที่ได้รับความสนใจจากวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถตอบสนองของความต้องการทางด้านอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิตและทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เครื่องมือฟลูอิดิเซชันที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จึงได้ถูกสร้างขึ้น และพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในยุโรปและอเมริกา

ระบบ CFB เป็นรูปแบบหนึ่งของเทคนิคฟลูอิดิเซชัน ซึ่งมี hydrodynamics ที่เรียกว่า fast bed ดังนั้นในการศึกษาระบบ CFB จึงควรทำความเข้าใจกับเทคนิคฟลูอิดิเซชันก่อน

ฟลูอิดิเซชัน

ฟลูอิดิเซชัน เป็นกระบวนการหรือวิธีการที่ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้นสัมผัสกับของไหล ซึ่งไหลผ่านเม็ดของแข็งด้วยความเร็วสูงพอที่จะทำให้ของแข็งดังกล่าวเคลื่อนที่และประพัตติตัวคล้ายของไหล

เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงที่รองรับแล้วให้ของไหล(แก๊ส , ของเหลว) ไหลผ่าน เมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพัตติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดิเซชัน และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดิเซชัน เนื่องจากของไหลที่ไหลผ่าน เม็ดของแข็งเป็นได้ทั้งแก๊สและของเหลว ฟลูอิดิเซชัน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.1.1 ประเภทของฟลูอิดิเซชัน

ฟลูอิดิเซชัน แบ่งเป็นประเภทต่างๆได้ดังนี้

- 1) ฟลูอิดิเซชันสองสถานะ (Two-phase Fluidization) ซึ่งระบบจะประกอบด้วย 2 สถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลอาจจะเป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้น ฟลูอิดิเซชันสองสถานะ จึงแบ่งย่อยได้เป็น
 - แก๊สฟลูอิดิเซชัน (Gas Fluidization)
 - ฟลูอิดิเซชันของเหลว (Liquid Fluidization)
- 2) ฟลูอิดิเซชันสามสถานะ (Three-phase Fluidization) ซึ่งระบบจะประกอบไปด้วยสามสถานะอยู่พร้อมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส สำหรับฟลูอิดิเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดิเซชันสองสถานะ หอทดลองที่เป็นฟอง (bubble

column) และหอตกลงที่บรรจุด้วยของแข็ง (packed bed) จึงมีกลไกการเกิดที่ซับซ้อนมาก

2.1.2 การขนาดและการจำแนกอนุภาค

2.1.2.1 การหา Sauter mean diameter(d_{sm}) เป็นการหาขนาดเฉลี่ยของกลุ่มอนุภาคที่ศึกษา เนื่องจากในงานวิจัยทั่วไปจะใช้ขนาดของอนุภาคของแข็งเป็นช่วง โดยค่า Sauter mean diameter สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้⁽¹⁾

$$d_{sm} = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (2.1)$$

2.1.2.2 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart⁽²⁾

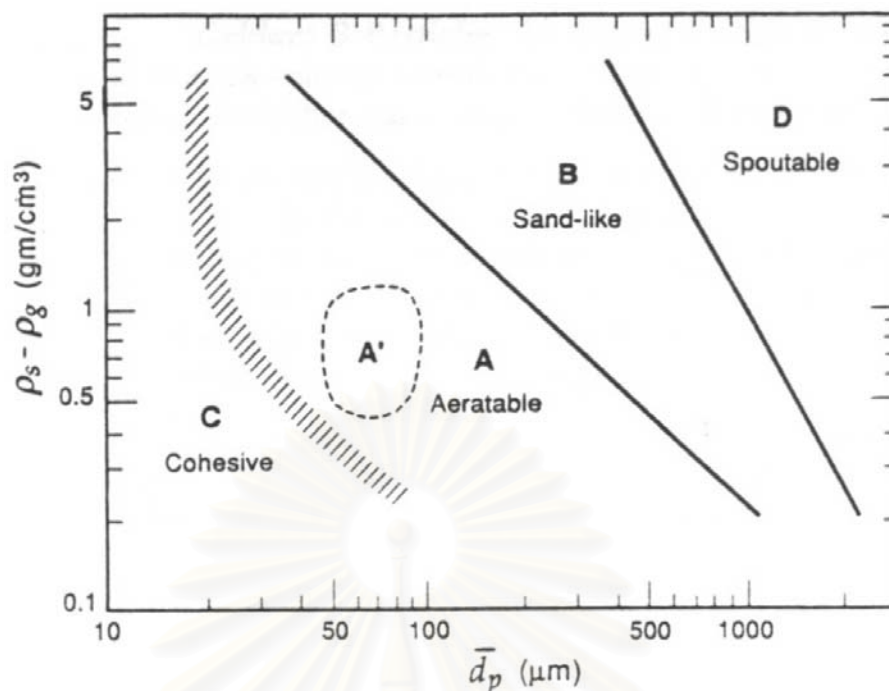
งานวิจัยทั่วไปจะจำแนกขนาดของอนุภาคออกเป็นกลุ่มๆ ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ Geldart powder classification เป็นการจำแนกขนาดของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart โดยอาศัยค่าผลต่างของความหนาแน่นของของแข็งกับแก๊สและขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.1 ลักษณะของอนุภาคในแต่ละกลุ่มอธิบายได้ดังนี้

Group C คือ เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก(Cohesive หรือ very fine powders) ของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดไดซ์ได้ยาก เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะสูงมากและมักจะจับตัวกันเป็นก้อน

Group A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ สามารถทำให้เกิดฟลูอิดไดซ์ได้ง่ายเป็นฟลูอิดไดซ์แบบสม่ำเสมอ(smooth fluidization) ที่ความเร็วแก๊สต่ำๆ และที่ความเร็วแก๊สสูงๆ ก็สามารถควบคุมการเกิดฟองได้

Group B คือ Sandlike เป็นของแข็งที่มีขนาด อยู่ในช่วง $40 < d_p < 500 \mu\text{m}$. และความหนาแน่นในช่วง $1.4 < \rho_s < 4 \text{ g/cm}^3$ การเกิดฟลูอิดไดซ์ยังเกิดได้ง่าย แต่อิทธิพลของฟองจะสูงขึ้น และฟองจะมีการโต

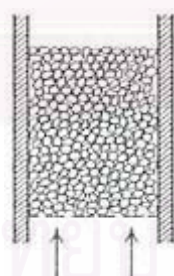
Group D คือ Spoutable ของแข็งที่มีขนาดใหญ่และหรือความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงเกิดฟลูอิดไดซ์ได้ยาก



รูปที่ 2.1 การจำแนกกลุ่มของผงแข็งโดยวิธีของ Geldart⁽²⁾

2.1.3 ลักษณะของฟลูอิไดซ์เบด

คำว่า เบด หมายถึงอาณาเขตในหอทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ ไม่ว่าของแข็งจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลองจะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายของไหล (distributor) จนถึงระดับสูงสุด คือผิวหน้าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในหอทดลอง ดังรูปที่ 2.2

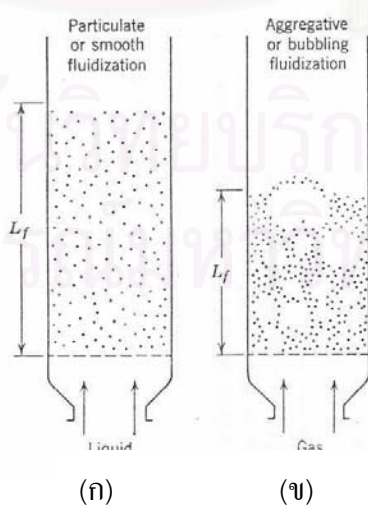


รูปที่ 2.2 ระดับของเบดในหอทดลอง⁽¹⁾

เมื่อบรรจุเม็ดของแข็งในหอทดลองเรียบร้อยตามความต้องการแล้ว เริ่มปล่อยของไหลเข้าทางด้านล่างของหอทดลองอย่างช้าๆ ขณะนี้ของไหลความเร็วยังน้อยอยู่เม็ดของแข็งจะไม่ขยับตัวเลย ลักษณะของเบดเช่นนี้จะเรียกว่า เบดนิ่ง (fixed bed) เมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วของของไหลให้มากขึ้นทีละน้อยจนถึงความเร็วระดับหนึ่งเม็ดของแข็งจะเริ่มขยับตัว และจัดตัวอย่างเป็นระเบียบ เมื่อความเร็วของของไหลเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย ของแข็งจะหลุดออกจากกันลอยตัวเป็นอิสระ ลักษณะ

เช่นนี้เรียกว่า จุดเริ่มฟลูอิดิเซชัน (incipiently fluidized bed หรือ bed at minimum fluidization หรือ onset of fluidization หรือ fluidizing point) ความเร็วของไหล ณ. จุดนี้จะเรียกว่า ความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดิเซชัน (minimum fluidization velocity) หลังจากจุดนี้ไปแล้วความเร็วของไหลที่เพิ่มขึ้นจะไปทำให้เบดขยายตัวตามความเร็วของของไหล เม็ดของแข็งยังอยู่ชิดกันมากจนดูเหมือนว่าเม็ดของแข็งยังจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดิเซชันแบบหนาแน่น (dense-phase fluidized bed) เมื่อความเร็วของของไหลมากขึ้นจนเกือบจะพาเม็ดของแข็งหลุดออกไปจากหอตลอด เบดลักษณะนี้เรียกว่า ฟลูอิดิเซชันแบบเจือจาง (dilute-phase fluidized bed) หลังจากนั้นถ้าเพิ่มความเร็วของไหลอีกเล็กน้อยเม็ดของแข็งจะหลุดออกจากหอตลอด ลักษณะนี้จะใช้ประโยชน์ในการขนส่งของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ ถ้าใช้อากาศก็เป็นการขนส่งด้วยอากาศ (Pneumatic transport) เช่น การลำเลียงผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ เป็นต้น ถ้าเป็นของเหลวก็เรียกว่า การขนส่งด้วยของเหลว (Hydraulic transport) เช่น การขนส่งเม็ดแร่ เป็นต้น

ฟลูอิดิเซชันแบบที่เป็นของเหลวการขยายตัวของเบดเป็นไปสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเองเป็นไปอย่างช้าๆ เราเรียกเบดนี้ว่า เบดสม่ำเสมอหรือเบดเป็นเนื้อเดียวกัน (smoothly fluidized bed หรือ liquid fluidized bed) ดังรูปที่ 2.3 ก สำหรับฟลูอิดิเซชันแบบที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะของเบดที่เกิดขึ้น จะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมากเพราะว่าเมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วที่ทำให้เกิดฟลูอิดิเซชันแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สเกิดขึ้น ฟองแก๊สก็จะแทรกตัวสูงขึ้นมายังบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมานี้จะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นไปด้วย ภายในเบดจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของเม็ดของแข็งเป็นไปอย่างซุกซม วุ่นวาย เบดชนิดนี้เรียกว่า ฟลูอิดิเซชันแบบวุ่นวาย ดังรูปที่ 2.3 ข

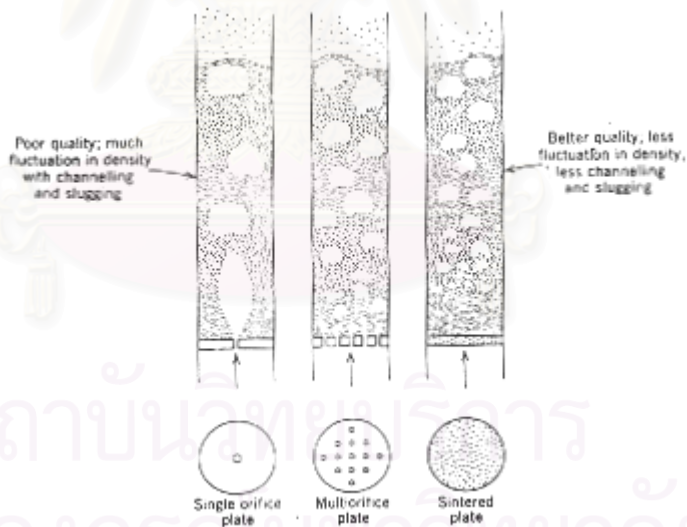


รูปที่ 2.3 ลักษณะของฟลูอิดิเซชันเบด⁽¹⁾

ปรากฏการณ์ฟลูอิดเซชันที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งสำหรับระบบของแข็ง-แก๊ส คือการที่ฟองแก๊สเกิดการรวมตัวกัน และมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อฟองแก๊สลอยขึ้นมาจึงทำให้ชั้นของแข็งถูกฟองแก๊สผลักดันไป และอนุภาคของแข็งจะตกกลับลงมาอีก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดสลักกิ้ง (Slugging) ในกระบวนการฟลูอิดไรเซชันแบบมักไม่ต้องการให้เกิดสลักกิ้ง เนื่องจากเพิ่มปัญหาของการพัดพาอนุภาคและยังลดประสิทธิภาพในการทำงานของเบดอีกด้วย ปรากฏการณ์นี้มักพบในฟลูอิดไรเซชันเบดที่มีลักษณะแคบและยาว

2.1.4 ชนิดของแผ่นกระจายของไหล

การเกิดฟองแก๊สในระบบฟลูอิดไรเซชัน จะมีขนาดใหญ่หรือเล็กนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของแผ่นกระจายของไหล (ดังรูปที่ 2.4) เมื่อให้อากาศผ่านเข้าไปในเบดเพียงเล็กน้อยความหนาแน่นของอนุภาคจะยังไม่เปลี่ยนแปลงนั่นคือ ความสูงของอนุภาคและช่องว่างของแก๊สจะคงที่ แต่ถ้าเพิ่มอากาศที่เข้าไปมากๆ ความหนาแน่นของอนุภาคก็จะเป็นระเบียบมากขึ้น จะเกิดเป็นฟองแก๊สเล็กๆขึ้นและการสัมผัสกันของแก๊สกับของแข็งก็จะมากขึ้นซึ่งช่องว่างของแก๊สจะน้อยลง แต่การใส่แผ่นกระจายของไหลจะทำให้ความดันลดมีค่าสูง ซึ่งจะทำให้พลังงานที่เครื่องเป่าอากาศต้องการมากขึ้น จึงทำให้ค่าใช้จ่ายนั้นสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.4 ลักษณะฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเมื่ออากาศไหลผ่านแผ่นกระจายของไหล⁽¹⁾

ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบต่างๆ มีดังนี้(ดังรูปที่ 2.5)

1. แบบแผ่นเจาะรู (Perforated plate) แผ่นกระจายของไหลแบบแผ่นเจาะรูนั้น ทำได้โดยการนำเอาแผ่นวัสดุมาเจาะรูให้มีขนาดตามที่เรากำลังต้องการคือ เพื่อไม่ให้อนุภาคหลุดลงมาข้างล่าง และให้ของไหลไหลผ่านได้ สามารถกระจายของไหลออกได้เต็มผิวหน้าตัดของตัวเครื่อง โดยที่ความเร็วของของไหลที่เหนือแผ่นกระจายของไหลควรจะเท่ากันทุกจุด โดยทั่วไปถ้าเจาะรูน้อย

ลักษณะของกลุ่มอนุภาคเหนือแผ่นกระจายของไหลขณะลอยตัวหรืออยู่ในภาวะเสมือนของไหล เช่น ความหนาแน่นจะไม่สม่ำเสมอ จะมีฟองขนาดใหญ่เกิดมากขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความเร็วสูงๆ ดังนั้นการเจาะรูหรือจำนวนรูมีส่วนสำคัญ องค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ลักษณะของกลุ่มอนุภาคที่อยู่ในภาวะเสมือนของไหลดีหรือไม่ขึ้นก็คือความดันลดของของไหลที่ไหลผ่านแผ่นกระจายของไหล ถ้าหากความดันลดน้อยเกินไปจะไม่ดี ความดันลดโดยทั่วไปจะต้องไม่ต่ำกว่า 10% ของความดันลดที่เกิดจากการไหลของของไหลผ่านกลุ่มอนุภาคขณะลอยตัวหรือจะต้องไม่น้อยกว่า 250 มิลลิเมตรน้ำ แผ่นกระจายของไหลแบบแผ่นเจาะรูมักจะมีปัญหาเรื่องอนุภาคที่มีขนาดเล็กหล่นลงมาข้างล่างได้

2. **แบบตะแกรง (Sieves)** แผ่นกระจายของไหลแบบนี้เป็นตะแกรงเหมือนมุ้งลวดเหมาะสำหรับตัวเครื่องขนาดเล็กเพราะตะแกรงจะรับน้ำหนักมากๆ ไม่ได้ และอีกประการหนึ่งความดันลดของการไหลผ่านตะแกรงจะต่ำมาก ดังนั้นมักจะมีการบรรจุกลุ่มอนุภาคไว้ด้านล่างของตะแกรงเป็น Fixed bed นอกจากนี้จะทำให้ความดันลดของแผ่นกระจายของไหลเป็นแบบราบเรียบไม่เหมือนกับสภาพการไหลที่อยู่ในท่อทั่วๆ ไปซึ่งความเร็วบริเวณตรงกลางท่อจะสูงกว่าข้างๆ

ตะแกรงนั้นถ้าจะใช้ในกรณีรับน้ำหนักมากๆ อาจใช้ร่วมกับแผ่นเจาะรูโดยใส่ตะแกรงให้อยู่ระหว่างแผ่นเจาะรู นอกจากจะทำให้แข็งแล้วยังไม่จำเป็นต้องเจาะรูบนแผ่นให้เล็กมากซึ่งจะเสียเวลามากกว่า

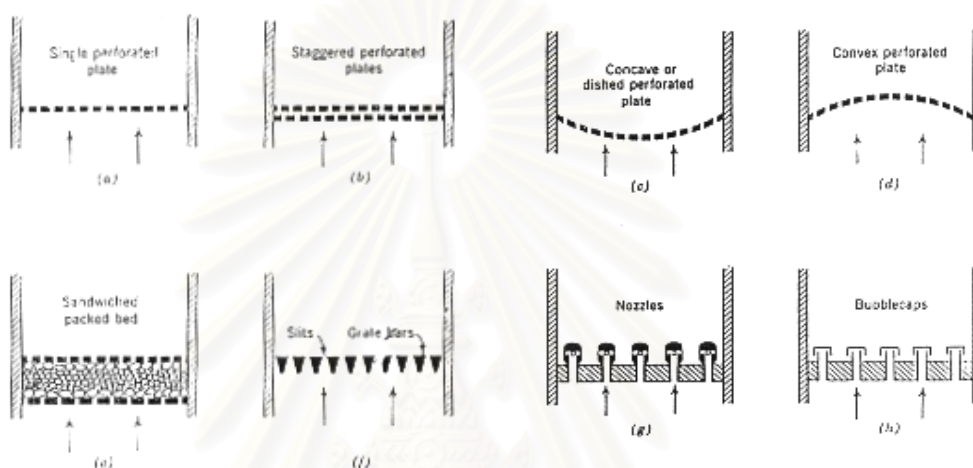
3. **แบบแผ่นอัด (Sintered plate)** เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่ทำจากการนำเอาวัสดุที่จะนำเอามาทำแผ่นกระจายของไหลที่มีขนาดเล็กและอัดเป็นก้อนติดกันโดยที่แผ่นวัสดุดังกล่าวเมื่อถูกอัดแล้วก็ยังยอมให้ของไหลผ่านได้

แผ่นกระจายของไหลแบบนี้เป็นแผ่นที่ดีที่สุดทำให้เกิดภาวะเสมือนของไหลที่ดีมาก การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของกลุ่มภาวะเสมือนของไหลน้อยมาก ขนาดของฟองเล็กลงมีการใช้กันตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงปานกลาง ข้อเสียของแผ่นกระจายของไหลแบบนี้ ก็คือ เวลาของไหลไหลผ่านจะเกิดความดันลดอย่างมากทำให้สูญเสียพลังงาน

4. **แบบแซนวิช (Sandwiched)** เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่มีลักษณะคล้ายกับแบบที่ 1 และ 2 แต่มีกลุ่มอนุภาคของอยู่ระหว่างแผ่นด้วย ระบบกระจายของไหลแบบนี้จะทำให้การกระจายของไหลสม่ำเสมอขึ้น และในกรณีที่มีความร้อนเกิดขึ้นจะสามารถแยกส่วนล่างของแผ่นกระจายของไหลออกจากความร้อนได้ดี แต่ไม่เหมาะสำหรับกรณีที่เป็นของไหลมีอนุภาคที่เล็กๆ ปนอยู่เพราะจะทำให้เกิดการอุดตันได้เมื่อใช้งานไปได้สักระยะหนึ่ง ทำให้ของไหลไหลผ่านไม่สะดวกเกิดความดันลดสูงกว่าที่ต้องการ

5. **แบบท่อ หรือ ท่อเจาะรู** ในกรณีที่เป็อนุภาคขนาดใหญ่ อาจใช้ท่อวางขนานกันแล้วให้ของไหลไหลผ่านท่อหรือเจาะรูบนท่อแล้วของไหล

6. แบบมีหมวก (Bubble caps) เป็นแผ่นกระจายของไหลแบบที่ใช้ในหอกลั่น เพื่อไม่ให้อนุภาคไหลผ่านแผ่นกระจายของไหลไปสู่ด้านล่าง ข้อเสียคืออาจทำให้เกิดการไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติภายในตัวเครื่องเกิดการติดกันบนแผ่น และยากต่อการสร้าง
7. แบบแผ่นกรอง (Multiple filter plates) เป็นแผ่นกระจายของไหลเหมาะกับอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่ไม่ต้องการให้หล่นผ่านแผ่นกระจายของไหลไปข้างล่าง
8. แบบระบบผสม (Mixing nozzle system) เป็นระบบกระจายของไหลโดยใช้หัวพ่นของไหลอยู่ทางด้านล่างของกลุ่มอนุภาคทำให้เกิดการหมุนเวียนภายในเบดดีขึ้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบต่างๆ⁽¹⁾

2.1.5 ปัจจัยที่ทำให้การเกิดฟลูอิไดซ์ที่ดี⁽³⁾

1. อนุภาคของของแข็งขนาดเล็ก และขนาดของเบดที่พอเหมาะกับขนาดของอนุภาคของของแข็งดังกล่าว คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดไม่มากหรือน้อยเกินไป
2. ขนาดอนุภาคของของแข็งต้องไม่แตกต่างกันมากเกินไป
3. รูปร่างทางกายภาพของอนุภาคของของแข็งควรใกล้เคียงกันกับทรงกลม
4. ตัวกระจายของไหล (distributor) ต้องสามารถกระจายของไหลได้อย่างสม่ำเสมอ ไม่อุดตันง่าย หรือหลวมเหลวติดกันเมื่อโดนความร้อนสูง
5. ความเร็วของของไหลในเบดต้องพอเหมาะกับขนาดของเบดที่ใช้ในการทดลอง คือ ถ้าความเร็วสูงมากเกินไปก็จะพัดพาให้อนุภาคของของแข็งหลุดจากเบดออกไปได้

อย่างไรก็ตามถ้าอนุภาคของของแข็งมีขนาดเล็กมาก และมีแรงดึงดูดระหว่างผิวของอนุภาคของของแข็งสูงก็อาจทำให้เกิดฟลูอิไดซ์ได้ยาก เช่น อนุภาคของของแข็งที่เป็นฝุ่น เป็นผงละเอียด เป็นต้น อีกประการหนึ่ง ถ้าอนุภาคมีความหนาแน่นต่ำเกินไป แรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อ

อนุภาคของของแข็งจะลดน้อยลง ดังนั้นโอกาสที่ของไหลจะผ่านทะลุขึ้นมาเป็นช่อง (channelling) นั้นง่ายและรุนแรงมาก

2.1.6 ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบของเทคนิคฟลูอิดไอเซชัน⁽³⁾

เมื่อพิจารณาสมบัติของเทคนิคฟลูอิดไอเซชันเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งหรือเบดบรรจุ พบว่ามีข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบสรุปได้ดังต่อไปนี้

ข้อได้เปรียบ

1. ในสภาพฟลูอิดไอเซชันเบด อนุภาคของแข็งจะเกิดการเคลื่อนที่หมุนเวียนอยู่ตลอดเวลาทำให้เกิดการสัมผัสกันได้อย่างรวดเร็ว อุณหภูมิภายในเบดคงที่ตลอดซึ่งต่างจากเบดนิ่งหรือเบดบรรจุ อุณหภูมิจะไม่เท่ากันตลอดทั้งเบด

2. มีการจัดเรียงตัวของอนุภาคของแข็ง อนุภาคที่มีน้ำหนักน้อยจะอยู่ส่วนบนและที่มีน้ำหนักมากจะอยู่ส่วนล่าง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการแยกขนาดอนุภาคของแข็งได้ นอกจากนี้แรงเสียดทานต่อการไหลของของไหลมีค่าน้อยกว่าเบดนิ่งมาก

3. จากสมบัติที่คล้ายกับของไหล ฟลูอิดไอเซชันเบดจึงสามารถทำงานแบบต่อเนื่องได้ คือ ปล่อยให้ของแข็งไหลออกจากเบดและไหลเติมเข้าไปในเบดได้ การควบคุมก็จะทำได้ง่าย

4. การที่อนุภาคของแข็งไหลหมุนเวียนอยู่ในเบด เม็ดของแข็งนี้สามารถที่จะเป็นตัวนำความร้อนจากผนังแหล่งความร้อนให้กับของไหลได้มากกว่า เพราะมีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของไหลเท่ากัน ฟลูอิดไอเซชันเบดจึงเหมาะสมกับกระบวนการที่มีปฏิกิริยาให้ความร้อนหรือดูดความร้อนจำนวนมากๆ

5. พื้นที่สัมผัสระหว่างอนุภาคของแข็งกับของไหลมีมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเบดนิ่งที่ใช้จำนวนอนุภาคของแข็งเท่ากัน ฟลูอิดไอเซชันเบดจึงมีประโยชน์ในการขยายงานที่มีทั้งการถ่ายโอนความร้อนและการถ่ายโอนมวลสาร

6. การทำงานด้วยฟลูอิดไอเซชันเบดจะเสียพลังงานน้อยกว่า เพราะแรงเสียดทานและความดันลดภายในเบดน้อยกว่าในเบดบรรจุมาก

7. สามารถกำจัดขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กมากๆ โดยไม่ต้องหยุดเครื่องทำงาน

8. สามารถใช้ในการขนส่งอนุภาคของแข็งจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้

ข้อเสียเปรียบ

1. ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไอเซชันเบด เวลาที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคของแข็งสั้นมากจึงต้องใช้เบดสูงๆหรือเบดหลายชั้น ทำให้สิ้นเปลืองเงินลงทุนมาก

2. เนื่องจากเกิดการสัมผัสกันอย่างรวดเร็ว บางครั้งเวลาที่อนุภาคของแข็งอยู่ในเบดสั้นเกินไป เมื่อทำงานแบบต่อเนื่องทำให้ผลลัพธ์ที่ได้แย่งลง

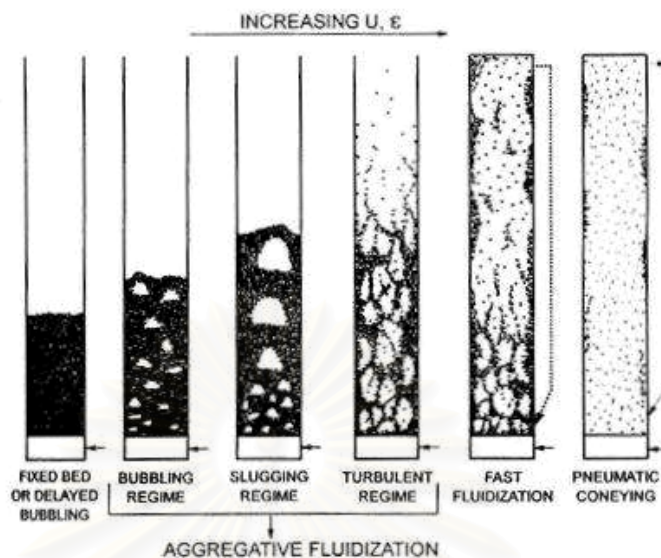
3. การทำงานมีข้อจำกัด เพราะถ้าให้ความเร็วของของไหลสูงเกินไปอนุภาคของของแข็งก็จะออกจากเบดไปพร้อมกับของไหล
4. ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบด จะเกิดการสั่นสะเทือนของหอตลอดหรือเกิดการกัดกร่อนเนื่องจากอนุภาคของแข็งกระทบกับผนังหอตลอด
5. เทคนิคนี้ใช้กับอนุภาคของแข็งที่เปื่อยหรือเป็นยางไม่ได้ เพราะจะเกิดการเกาะเป็นก้อนใหญ่และเกิดตกตะกอนมายังส่วนล่างของเบด

2.2 แก๊สฟลูอิไดเซชัน (Gas Fluidization)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าลักษณะของฟลูอิไดซ์เบดที่เกิดจากแก๊สนั้นมีความสลับซับซ้อนจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยแฟกเตอร์หลายตัว เช่นความเร็วของแก๊สที่ผ่านเข้ามาในเบด และขนาดของเม็ดของแข็งที่ใช้เป็นเบด มาผสมผสานกันให้เกิดความพอเหมาะขึ้นในเบด เบดนั้นจึงจะมีสมบัติคล้ายของไหลได้ แฟกเตอร์หรือตัวแปรสำคัญลำดับแรก คือ ความเร็วของของไหล ดังได้กล่าวมาแล้วว่า ความเร็วของของไหลที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นนั้นจะทำให้ฟลูอิไดซ์เบดค่อยๆพัฒนาขึ้น และสามารถแบ่งชนิดของฟลูอิไดเซชันได้ตามลักษณะทาง hydrodynamics ที่เกิดขึ้นได้ ดังอธิบายต่อไป

พิจารณาฟลูอิไดซ์เบดที่มีฝุ่นผงละเอียดถ้าเพิ่มความเร็วของแก๊สจนเกินความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชันแล้ว บริเวณที่เกิดการฟลูอิไดซ์ก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดยที่เบดแบบฟองอากาศ (bubbling bed) จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นเบดแบบสลักกิ้ง (slugging bed) ถ้าเพิ่มความเร็วของแก๊สขึ้นจะเกิดการแกว่งของความดัน (fluctuation) พร้อมกันนั้นการซูดมุนของเบดจะลดลงอย่างรวดเร็ว การลดลงของการเกิดการแกว่งของความดันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพจากภาวะเบดหนาแน่นอย่างต่อเนื่องไปเป็นของผสมระหว่างของแข็งกับแก๊สที่มีการกระจายตัวมากขึ้นเรียกว่า เบดแบบปั่นป่วน (turbulent bed) ยิ่งเพิ่มความเร็วแก๊สมากขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นในแนวแกนลดลง และมีการพาเบด (carryover) หลุดออกไปเพิ่มขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องมีไซโคลนต่อเข้ามาในระบบเพื่อทำหน้าที่ป้อนของแข็งกลับเข้ามายังระบบ ภาวะที่ความเร็วสูงเช่นนี้เรียกว่า ฟลูอิไดซ์เบดที่ความเร็วสูง (fast bed) ถ้ายังคงเพิ่มความเร็วขึ้นไป และไม่มีการหมุนเวียนเม็ดของแข็งจะทำให้เม็ดของแข็งมีการขยายตัวสูงขึ้นมาก เกิดภาวะที่เรียกว่า ภาวะเบดแบบเจือจางหรือภาวะการขนส่งอนุภาคด้วยลม (pneumatic transport) ถ้าความเร็วยังคงเพิ่มขึ้นต่อไป การกระจายตัวจะเจือจางมากขึ้นจนกระทั่งไม่มีเม็ดของแข็งเหลืออยู่ในระบบอีกเลย

2.2.1 ขอบเขตของฟลูอิดิเซชัน (Regime of Fluidization)

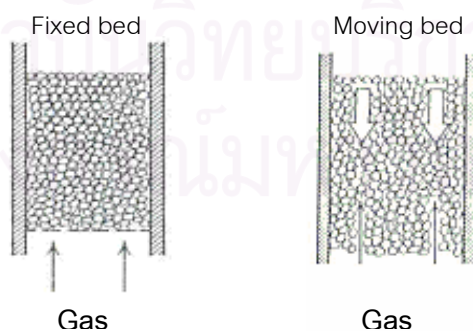


รูปที่ 2.6 ปรัชการณฟลูอิดิเซชันแบบต่างๆ เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น⁽²⁾

เมื่อเบตวางตัวบนตะแกรงหรือตัวกระจายแก๊ส (gas distributor) และมีแก๊สเคลื่อนที่ผ่าน (upward flowing) โดยค่อยๆเพิ่มความเร็วเรื่อยๆ จะสามารถแบ่งชนิดของฟลูอิดิเซชันตามความเร็วที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.6 แสดงปรัชการณฟลูอิดิเซชันแบบต่างๆ ซึ่ง hydrodynamics ที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้

2.2.1.1 เบตนิ่ง (Packed bed)

เมื่อแก๊สไหลผ่านเบตด้วยความเร็วต่ำของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายแก๊สจะวางตัวนิ่ง ไม่เคลื่อนไหว กรณีนี้จะเรียกว่า fixed bed จากนั้นแก๊สจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบต หรือเบตอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังแต่อนุภาคของแข็งในเบตไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้จะเรียกว่า moving bed ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะฟลูอิดิเซชันแบบเบตนิ่ง⁽¹⁾

เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบดที่วางนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของอนุภาค กระทำต่ออนุภาค ในทิศทางของการไหล เรียกแรงนี้ว่า แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (drag force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (pressure drop) ตกคร่อมเบดไว้

ความดันลดตกคร่อมเบดตลอดความสูงของ packed bed ที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Ergun equation ดังนี้⁽¹⁾

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = 150 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})^2}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\mu U_0}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3} \frac{\rho_g U_0^2}{\phi_s d_p} \quad (2.2)$$

2.2.1.2 เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling Fluidized Bed)

เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่าน fixed bed เพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่งอนุภาคจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ ความเร็วที่จุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน (minimum fluidization velocity ; U_{mf}) และเรียกเบด ณ.จุดนี้ว่า minimum fluidized bed ซึ่งเป็นจุดที่อนุภาคเริ่มประพฤติตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบด ณ.จุดนี้จะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบด ดังนั้น drag force , F_D ที่เกิดขึ้น ณ.จุดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้⁽¹⁾

$$F_D = \Delta P * A = AL(1 - \varepsilon)(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.3)$$

โดยที่ A และ L หมายถึงพื้นที่หน้าตัดและความสูงของเบดตามลำดับ

จัดรูปสมการใหม่จะได้ภาวะต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชัน (minimum fluidization condition) ดังนี้⁽¹⁾

$$\frac{\Delta P}{L_{mf}} = (1 - \varepsilon_{mf})(\rho_s - \rho_g)g \quad (2.4)$$

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้⁽¹⁾

$$U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2}{150} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\mu} g \left(\frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad ; \text{เมื่อ } Re_p < 20 \quad (2.5)$$

$$U_{mf} = \frac{\phi d_p}{1.75} \cdot \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} g \varepsilon_{mf}^3 = \frac{d_p (\rho_s - \rho_g) g}{24.5 \rho_g} \quad ; \text{เมื่อ } Re_p > 1,000 \quad (2.6)$$

ส่วนความเร็วของแก๊สที่ทำให้เริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในเบด (minimum bubbling fluidization velocity, U_{mb}) ในกรณีของอนุภาคของแข็งกลุ่ม A ของ Geldart ค่า U_{mb} จะมีค่ามากกว่า U_{mf} ส่วนในกรณีของกลุ่ม B และ D ค่า U_{mb} จะเท่ากับ U_{mf} ดังนั้น รูปแบบการเกิดฟลูอิดไอเซชันแบบสม่ำเสมอ

หรือแบบไม่มีฟองแก๊ส(Bubble-free fluidization) จึงเกิดเฉพาะในกรณีที่อนุภาคของแข็งเป็นกลุ่ม A เท่านั้น ซึ่งในปี ค.ศ. 1978 Geldart และ Abrahamsen ได้ประมาณไว้ในหน่วย SI เป็น⁽¹⁾

$$U_{mb} = 33d_p \left(\frac{\rho_g}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad \text{SI units} \quad (2.7)$$

สำหรับอนุภาคของแข็งกลุ่ม A B และ D ของ Geldart ถ้าเพิ่มความเร็วของแก๊ส พบว่าจะเริ่มเกิดฟองแก๊ส (bubble) ขึ้น เบดจะเริ่มแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2.8 คือ

1. ส่วนที่เป็นฟองแก๊ส เรียกว่า bubble phase อาจมีอนุภาคอยู่บ้างแต่น้อยมาก
2. ส่วนไม่ใช่ฟองแก๊สหรือส่วนที่มีอนุภาคอยู่หนาแน่น เรียกว่า emulsion phase ขนาดของฟองแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม
 - 1) ขนาดของอนุภาค : d_p
 - 2) ความเร็วของแก๊ส : $U - U_{mf}$
 - 3) ตำแหน่งที่อยู่เหนือตะแกรงรองรับ หรือตัวกระจายอากาศที่เพิ่มขึ้น



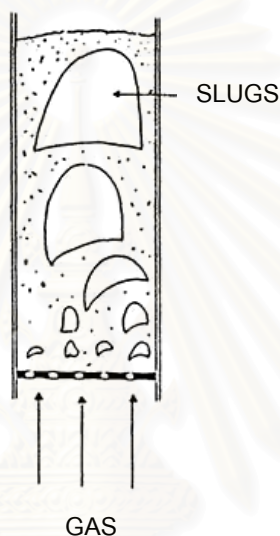
รูปที่ 2.8 การกระจายตัวในฟลูอิดไอดีส์เบดแบบฟองอากาศ⁽⁴⁾

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะแทรกขึ้นไปและอาจมีการรวมตัวกันผ่าน emulsion phase โดยที่อาจมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองแก๊สและบางส่วนวิ่งตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วยจนกระทั่งถึงผิวบน ก็จะเคลื่อนที่หลุดออกไปแล้วแตกกระจายอยู่เหนือผิว อนุภาคของแข็งที่ติดอยู่เกือบทั้งหมดจะตกลงมายังเบดใหม่ บริเวณที่อยู่เหนือเบดขึ้นไปซึ่งฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองแก๊สจะตกลงมายังเบดอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่า บริเวณอิสระ (freeboard) อย่างไรก็ตามอาจจะมีของแข็งบางส่วน(น้อยมาก) ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับแก๊สด้วย (ไม่ตกลงกลับลงมา) ณ. ความสูงค่าหนึ่งใน freeboard ซึ่งอนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดตกลงกลับลงมายังเบด จะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน หรือ transport disengaged height

(TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดออกไปกับแก๊สโดยอัตราที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้ เรียกว่า elutriation rate

2.2.1.3 เบริดแบบสลัก (slugging bed)

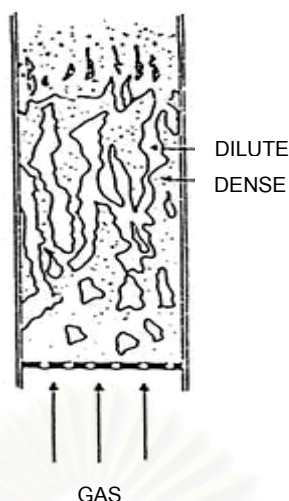
ดังที่กล่าวมาแล้วว่า ขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของแก๊สและความสูงของเบด ถ้าเบดบรรจุอยู่ในหอทดลองซึ่งมีขนาดเล็กและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจมีขนาดใหญ่เกือบเท่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบด (หอทดลอง) ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบด และแยกอนุภาคออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิด slugging ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะฟลูอิดไดซ์เบดแบบสลัก⁽⁴⁾

2.2.1.4 เบริดแบบปั่นป่วน (turbulent bed)

เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่าน bubbling bed เพิ่มขึ้น (มากกว่า minimum bubbling velocity) เบดจะเกิดการขยายตัว เมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคกับแก๊สซึ่งเกิดการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นเกิดการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว (จนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส) การเคลื่อนไหวภายในเบดมีลักษณะปั่นป่วน ดังรูปที่ 2.10

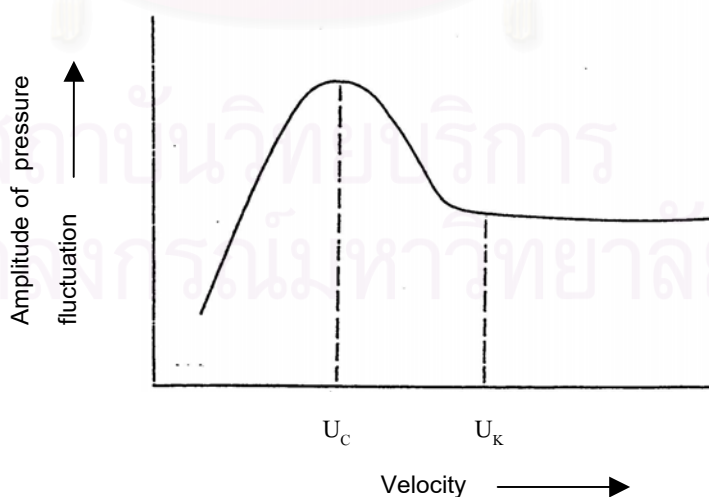


รูปที่ 2.10 ลักษณะฟลูอิดไดซ์เบดแบบปั่นป่วน⁽⁴⁾

Turbulent bed ที่เกิดขึ้นจะแบ่งได้ 2 ส่วน คือ

- 1) Dense phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น
- 2) Dilute phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง

สำหรับช่วงในการเปลี่ยนแปลงภาวะจาก bubbling bed ไปเป็น turbulent bed นั้นไม่ได้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงของความเร็วในการเปลี่ยนของภาวะทั้งสองนี้ จากผลการวิจัยของนักวิจัยหลายๆท่าน การเปลี่ยนภาวะจาก bubbling bed ไปเป็น turbulent bed นั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆเพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆหนึ่ง เบดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะ bubbling bed นั้น บริเวณผิวหน้าของเบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็น turbulent bed เกิดขึ้นโดยสมบูรณ์ด้วย สามารถแสดงความสัมพันธ์ลดคร่อมเบดที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนภาวะได้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ของความผันผวนกับความเร็วในช่วงเกิด turbulent bed⁽⁴⁾

Terminal velocity คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่นิ่ง ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอยทาดลงไป โดย Haider และ Levenspiel⁽¹⁾ ได้ประมาณไว้ในปี ค.ศ. 1989 โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของอนุภาคของแข็ง

กรณีอนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad ; \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.8)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{\rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad ; \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.9)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad ; \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.10)$$

2.2.1.5 Fast fluidized bed

เนื่องจากในระบบ CFB การสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับอนุภาคเป็นแบบ fast fluidization ดังนั้น hydrodynamics ที่เกิดขึ้นจึงจะขออธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

หมายเหตุ

ฟลูอิดไอส์ตันที่ผ่านมาทั้งหมด (ยกเว้น fast fluidized bed) อาจเรียกรวมกันว่า capative fluidized bed เพราะว่อนุภาคของแข็งทั้งหมดซึ่งสัมผัสกับแก๊สจะถูกจำกัดบริเวณอยู่ในระยะความสูงหนึ่งจากตัวกระจายอากาศเท่านั้น หรือในบางกรณีที่มีการพัดพาเกิดขึ้นก็มีอนุภาคเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ถูกพัดพาไป

2.3 ฟลูอิดไอส์ตันแบบหมุนเวียน (circulating fluidized bed, CFB)

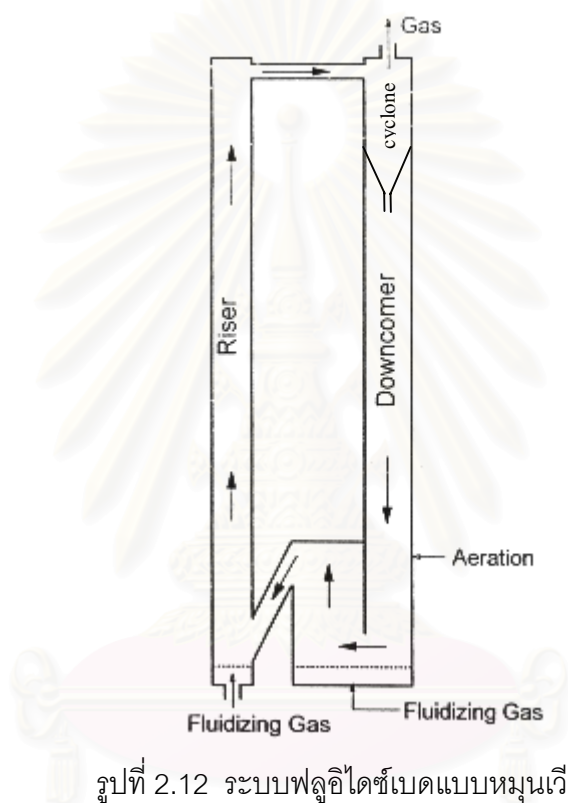
ระบบฟลูอิดไอส์ตันแบบหมุนเวียน เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการสัมผัสระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็งเป็นระบบที่ค้นพบเป็นครั้งแรกโดย winkler และได้ถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมโดย Warren Lewis และ Edwin Gilliland แห่ง Massachusetts Institute of Technology , MIT ซึ่งพยายามที่จะหารูปแบบของการสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็งที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการ Fluid Catalytic Cracking(FCC) และพบว่าระบบฟลูอิดไอส์ตันแบบหมุนเวียน ซึ่งมี

hydrodynamics เป็นแบบ fast fluidized bed เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมในการใช้งาน

2.3.1 ลักษณะของระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

(characteristics of circulating fluidized bed)

ระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นระบบซึ่งอาศัยเทคนิคทางฟลูอิดไคซ์ขึ้นมาประยุกต์ใช้งาน ระบบจะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน (ดังรูปที่ 2.12) คือ



รูปที่ 2.12 ระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน⁽²⁾

- 1) ท่อไรเซอร์ เป็นส่วนที่ทำงานภายใต้ภาวะการเกิดฟลูอิดไคซ์เบดที่ความเร็วสูง (fast fluidized bed)
- 2) Gas-solid separator เช่น cyclone ทำหน้าที่ดักจับเม็ดของแข็งที่หลุดออกมาจากท่อไรเซอร์
- 3) ท่อป้อนกลับ (downcomerหรือreturn leg) ทำหน้าที่ป้อนเม็ดของแข็งที่ได้จาก cyclone กลับไปยังด้านล่างของท่อไรเซอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดของแข็ง

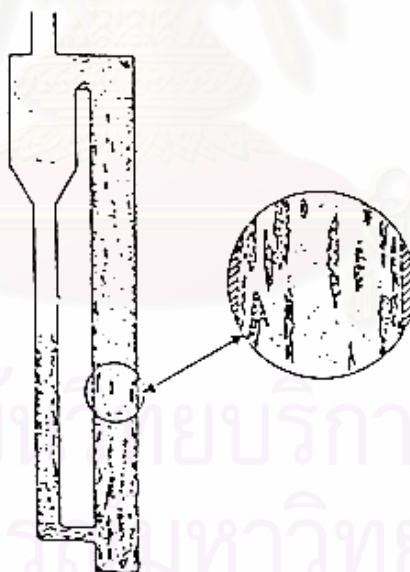
2.3.2 ลักษณะของฟลูอิดไรซ์เบดที่ความเร็วสูง

(characteristic of fast fluidized bed)

Circulating fluidized bed เป็นเทคนิคหนึ่งของการ fluidization โดยจะเกิดขึ้นที่ความเร็วของแก๊สภายในท่อไรเซอร์มีค่าสูงและมีการป้อนกลับ (recirculation) ของเบดที่เคลื่อนที่กลับมาทางด้านล่างของท่อไรเซอร์ โดยใช้ท่อป้อนกลับ (return leg) ด้วยอัตราการป้อนที่สูงพอที่จะทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่เนื่องจากการไหลของแก๊สภายในท่อด้านไรเซอร์มีลักษณะเป็นแบบ fast fluidization

fast fluidization หรือ dilute phase refluxing เป็นลักษณะหนึ่งของการสัมผัสระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็ง(ซึ่งแก๊สจะเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของอนุภาคของแข็งที่อยู่เหนือตัวกระจายอากาศ โดยแก๊สจะมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) ของอนุภาค ทำให้อนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ (ดังรูปที่ 2.13)

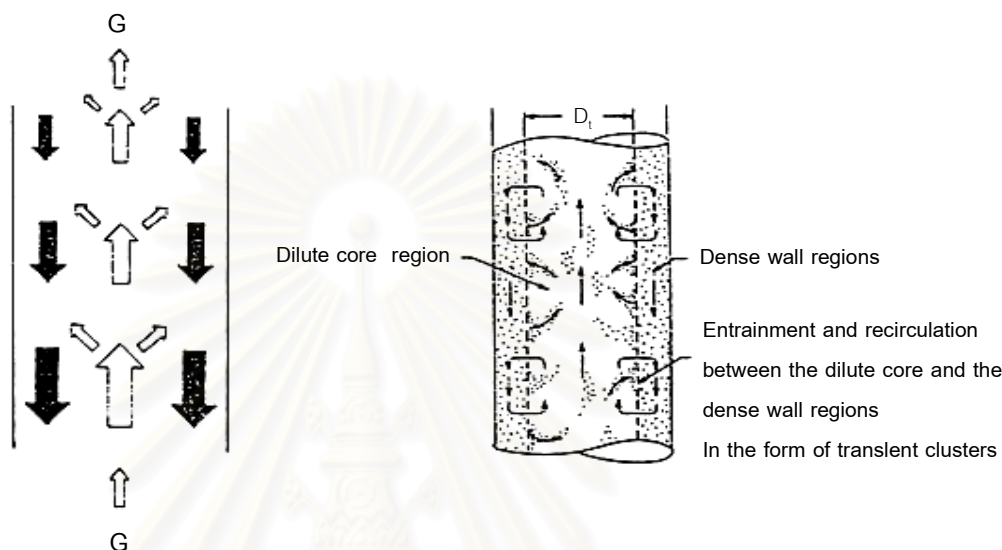
- 1) cluster phase อนุภาคของแข็งเกาะอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่ม ๆ เคลื่อนที่ขึ้นลง (มีการสลายตัวและจัดตัวใหม่) ภายในท่อไรเซอร์
- 2) disperse phase อนุภาคของแข็งมีเบาบางกระจายกันออกไป (อยู่ห่างกัน) และเคลื่อนที่ขึ้นผ่านไปยัง return leg



รูปที่ 2.13 ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดของแข็งในระบบ fast bed⁽⁴⁾

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

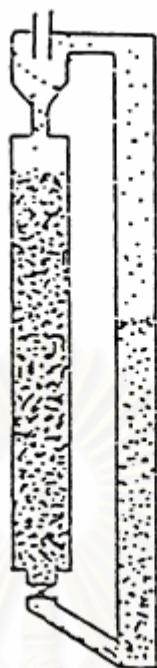
เม็ดของแข็งภายในเบดส่วนใหญ่จะอยู่ใน cluster phase และมีการเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแกนกลาง(ขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้น) จนเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะตกกลับลงมาตามผนังของท่อไรเซอร์ เมื่อเคลื่อนที่ตกกลับมาถึงจุด ๆ หนึ่ง cluster ก็แตกสลายตัวออกจากกัน และเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นไปอีกครั้งหนึ่ง การรวมตัวกันเป็น cluster และการสลายตัวออกจากกันจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ cluster⁽⁴⁾

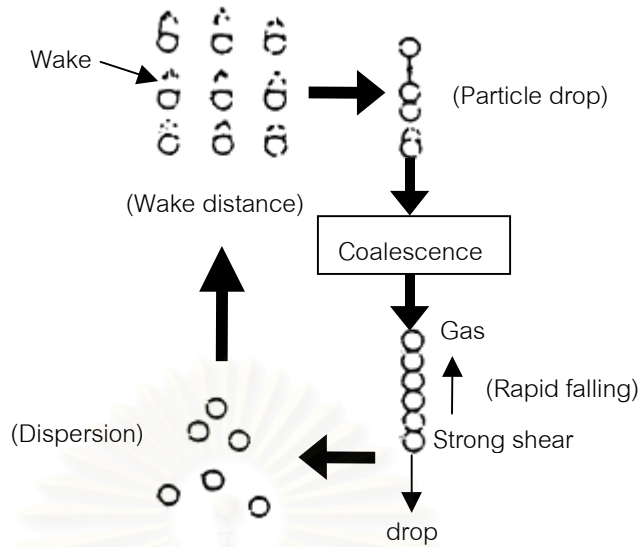
เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนที่สัมผัสของแก๊สและเม็ดของแข็ง และความหนาแน่นของเม็ดของแข็งตลอดความยาวท่อไรเซอร์ จะเห็นรูปแบบการกระจายตัวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (ดังรูปที่ 2.15) ดังนี้

- 1) บริเวณที่เม็ดของแข็งเกิดการรวมตัวเป็น cluster และสลายตัวอยู่ตลอดเวลาจะเกิดที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ การกระจายตัวหรือความเข้มข้นของเม็ดของแข็งมีค่าสูงเรียกว่า dense bed
- 2) บริเวณที่เม็ดของแข็งมีการกระจายตัวหรือมีความเข้มข้นน้อย ซึ่งเกิดบริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์เรียกว่า dilute bed



รูปที่ 2.15 ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดของแข็งตามความสูงของท่อโรเซอร์⁽⁴⁾

เมื่อป้อนของแข็งเข้าไปในหลอดลงแนวตั้งที่มีแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาทางด้านล่าง ในกรณีที่อัตราป้อนเม็ดของแข็งเข้ามามีค่าต่ำและความเร็วแก๊สสูงจนระบบอยู่ในภาวะการส่งผ่านด้วยลม (pneumatic transport) การกระจายตัวของอนุภาคจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ผลเนื่องมาจากความเร็วระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็งจะทำให้เกิด wake ขึ้นบริเวณด้านหลังของเม็ดของแข็งที่ความเร็วของแก๊สเดียวกัน เมื่ออัตราการป้อนของแข็งเข้ามามีค่าเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มากพอที่ทำให้เม็ดของแข็งมีความเข้มข้นสูง เม็ดของแข็งจะเริ่มเข้าไปอยู่ใน wake ของเม็ดของแข็งที่อยู่ใกล้กัน ทำให้แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (fluid drag) ของแก๊สที่กระทำต่อเม็ดของแข็งที่อยู่ด้านบนมีค่าน้อยลง เม็ดของแข็งที่อยู่ด้านบนจึงเคลื่อนที่ตกลงมาเกาะติดกับเม็ดของแข็งที่อยู่ด้านล่าง เมื่อเม็ดของแข็งทั้งสองเกาะติดกันจะทำให้พื้นที่สัมผัสกับแก๊สมีค่าลดลง เม็ดของแข็งที่เกาะติดกันแล้วก็จะเคลื่อนที่ตกลงมา (แต่ยังคงเคลื่อนที่ขึ้นสัมพันธ์กับผนัง) แล้วเกิดการเกาะติดกับเม็ดของแข็งที่อยู่ด้านล่างต่อไปเพิ่มจำนวนเม็ดของแข็งขึ้นเรื่อยๆ เกิดเป็นลักษณะสายยาวต่อกันที่เรียกว่า cluster หรือ strand ดังรูปที่ 2.16

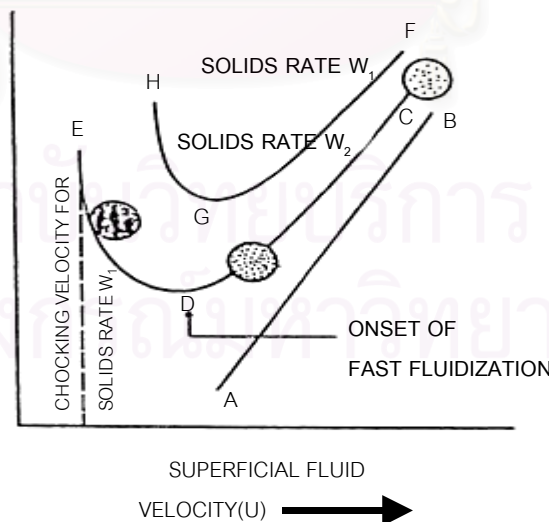


รูปที่ 2.16 แบบจำลองการเกิด cluster⁽⁴⁾

2.3.3 การเปลี่ยนภาวะไปเป็นฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง
(Transition to Fast Fluidization)

คำว่า fast bed ถูกนิยามโดย Yerushalmi และคณะผู้ร่วมงานเพื่อใช้อธิบายภาวะหรือขอบเขตของฟลูอิดเซชันที่อยู่ระหว่าง turbulent bed และ pneumatic transport

ต่อมา Reddy Karri และ Knowlton (1991) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาขอบเขตการเกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันลดคร่อมเบดต่อหน่วยความยาวกับความเร็วแก๊สที่ใช้และสามารถสรุปผลขอบเขตในการเกิด fast bed ได้ดังนี้ (ดังรูปที่ 2.17)

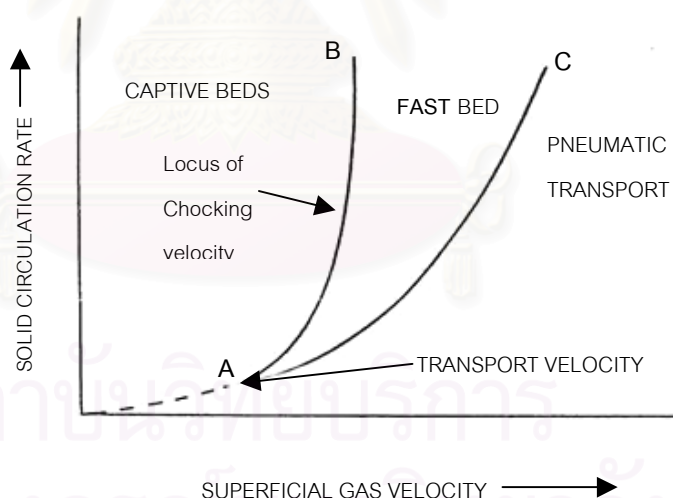


รูปที่ 2.17 ขอบเขตของ fast fluidization⁽⁴⁾

สำหรับการไหลของของผสมแก๊สกับของแข็งที่มีความหนาแน่นบัลค์ (bulk density) หรือ suspension density มีค่าต่ำในแนวตั้งโดยอัตราการป้อนของแข็งเท่ากับ W_1 เมื่อลดความเร็วแก๊ส

ลงจากจุด C ซึ่งเป็นจุดที่มีความเร็วแก๊สสูง การกระจายตัวของเม็ดของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตาม เมื่อลดความเร็วลงจนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับจุด D ค่าความดันเนื่องจากน้ำหนักเม็ดของแข็ง static head กับความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานในการไหลของของผสม จะมีค่าต่ำสุด เรียกจุด D นี้ว่าจุดที่เริ่มเกิด fast bed (onset of fast fluidization) หรือจุดที่เปลี่ยนจาก pneumatic transport ไปเป็น fast bed เมื่อความเร็วแก๊สยังคงลดลงต่อไป (จากจุด D ไป E) การกระจายตัวของเม็ดของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นมากทำให้ความดันลดรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วแก๊สลดลงจนถึงค่าหนึ่ง (ที่จุด E) แก๊สจะไม่สามารถพัดพาเม็ดของแข็งออกไปจากคอลัมน์ได้อีก เม็ดของแข็งเริ่มที่จะสะสมตัวอยู่ในคอลัมน์ ทำให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้นสูงมากดังในรูป ดังนั้นที่จุด E จึงเป็นจุดที่เปลี่ยนจากภาวะ fast bed ไปเป็น captive fluidized bed (turbulent bed ยกเว้นกรณีที่คอลัมน์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเบดจะกลายเป็น slugging) ภาวะที่จุด E จะเรียกว่า choking condition (เป็นจุดที่แก๊สอึดตัวด้วยของแข็ง) และความเร็วที่จุด E จะเรียกว่าความเร็วช็อคกิ้ง (choking velocity)

Reddy-Karri และ Knowlton (1991) ได้เสนอไดอะแกรมการเปลี่ยนภาวะของเบดไว้ (ดังรูปที่ 2.18) และอธิบายว่าเส้น A-B เป็นเส้นแบ่งขอบเขตระหว่าง captive และ fast bed และเมื่ออัตราการหมุนเวียนเม็ดของแข็งสูงขึ้นการเปลี่ยนภาวะไปเป็นฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วสูง จะต้องใช้ความเร็วสูงขึ้นด้วย

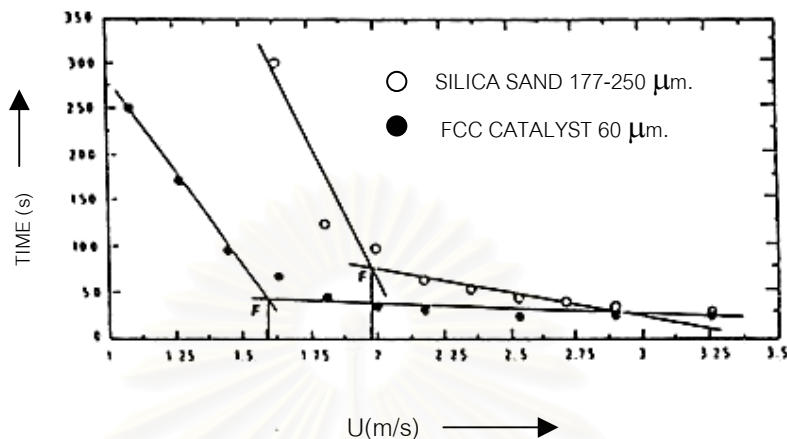


รูปที่ 2.18 ขอบเขตของ fast fluidization ที่เปลี่ยนแปลงกับอัตราการหมุนเวียนเม็ดของแข็ง⁽⁴⁾

ความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วต่ำสุดซึ่งไม่สามารถเกิดฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วสูงได้ โดยไม่มีการหมุนเวียนเม็ดของแข็ง เราเรียกว่า ความเร็วส่งผ่าน (transport velocity) สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.19 เมื่อเบดมีความเร็วเหนือความเร็วสุดท้าย (terminal velocity) อนุภาคจะแยกกันอย่างอิสระ เม็ดของแข็งทั้งหมดจะถูกพัดพาออกจากคอลัมน์โดยใช้เวลาจำกัด ถ้าลดความเร็วลงเรื่อย ๆ แต่ยังมีค่าเกินความเร็วสุดท้ายอยู่ เวลาที่ใช้จะเพิ่มขึ้น ในการที่เม็ดของแข็งถูกพัดพาออกจาก

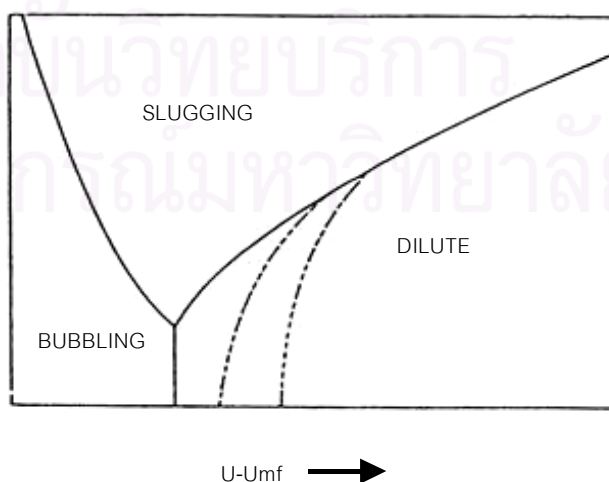
คอลัมน์จนหมด ถ้าลดความเร็วลงจนถึงค่าที่ต่ำกว่าความเร็ววิกฤติ (จุด F) เวลาที่ใช้จะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด เรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วส่งผ่าน

(2.11)



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงเวลาที่เม็ดของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์⁽⁴⁾

ที่อัตราการหมุนเวียนเม็ดของแข็งค่าหนึ่ง ถ้าเราวัดความดันลดของหน้าตัดที่อยู่สูงกว่าและหน้าตัดที่อยู่ต่ำกว่าตามแนวแกนของคอลัมน์ในช่วงที่เป็นการส่งผ่านอนุภาคด้วยลม ซึ่งความเร็วของแก๊สมีค่าสูง เราจะพบว่าค่าความดันของ 2 จุดนี้มีค่าใกล้เคียงกัน ถ้าความเร็วของแก๊สลดลงโดยที่อัตราการหมุนเวียนของเม็ดของแข็งมีค่าคงที่ ค่าความดันลดของ 2 จุดนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าความเร็วของแก๊สลดลงอีกจนทำให้เบดเปลี่ยนภาวะจากการส่งผ่านอนุภาคด้วยลมไปเป็นฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วสูง โดยเบดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอตามแนวแกนคอลัมน์ ดังนั้นจึงไม่มีสหสัมพันธ์ใดที่จะทำนายค่าความเร็วนี้ได้ มีเพียงข้อมูลจากการทดลองเท่านั้นที่ใช้เป็นแนวทางอธิบายการเปลี่ยนภาวะจากการส่งผ่านอนุภาคด้วยลมมาเป็นฟลูอิดไดเซชันที่ความเร็วสูง



รูปที่ 2.20 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อการเปลี่ยนภาวะขอบเขตของฟลูอิดไดเซชัน⁽⁴⁾

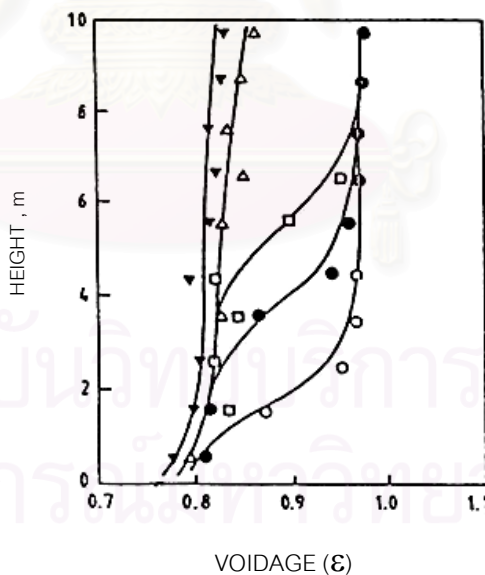
จากรูปที่ 2.18 และ 2.20 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนภาวะเบตไปเป็นฟลูอิดไดซ์เซชันที่ความเร็วสูงไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับ ความเร็วของแก๊ส ขนาดของอนุภาค และความหนาแน่นของอนุภาคเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับขนาดของหอตดลอง ความหนาแน่นและความหนืดของแก๊ส แต่ถ้าหากเป็นระบบหมุนเวียนยังขึ้นอยู่กับอัตราการหมุนเวียนของเม็ดของแข็งในระบบด้วย

2.3.4 โครงสร้างของเบตที่ความเร็วสูง (Structure of Fast Beds)

ในระบบฟลูอิดไดซ์เบตแบบหมุนเวียนนั้น การกระจายตัวของเม็ดของแข็งจะไม่สม่ำเสมอทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี

2.3.4.1 โปรไฟล์ของสัดส่วนช่องว่างในแนวแกน (Axial Voidage profile)

การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ จะมีค่าลดลงเมื่อความสูงของเบตมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 สรุปได้ว่าที่ด้านล่างของคอลัมน์ เบตจะหนาแน่นกว่าด้านบน ความหนาแน่นของเบตจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จากด้านล่างขึ้นไปด้านบนของคอลัมน์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของเม็ดของแข็งตลอดความสูงของคอลัมน์ สามารถแบ่งเบตออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เบตหนาแน่น (dense bed) บริเวณด้านล่าง และ เบตเจือจาง (dilute bed) บริเวณด้านบนของคอลัมน์



รูปที่ 2.21 โปรไฟล์การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน⁽⁴⁾

2.3.4.2 การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมี (Radial Distribution of Voidage)

สำหรับการกระจายตัวในแนวรัศมี (radial distribution) Bader et al (1988) ได้ทำการศึกษา และสรุปได้ว่า สัดส่วนโดยปริมาตรของเม็ดของแข็งที่พื้นที่หน้าตัดเดียวกัน (local

volume fraction of solid) จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากกึ่งกลางของคอลัมน์ไปยังผนังโดยจะมีค่ามากที่สุดที่ผนัง และมีค่าต่ำสุดที่กึ่งกลางของคอลัมน์ หรือสัดส่วนช่องว่างมีค่ามากที่สุดที่กึ่งกลางท่อ และมีค่าต่ำสุดที่ผนัง และการกระจายตัวในแนวรัศมีจะมีน้อย เมื่ออัตราการป้อนของแข็งมีค่าต่ำลง นอกจากนี้แล้วที่บริเวณด้านบนของคอลัมน์การกระจายตัวก็มีน้อยลงเช่นกัน ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ fast bed⁽⁴⁾

Basu (1990) เสนอว่าการกระจายตัวในแนวรัศมีหรือสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมีจะขึ้นอยู่กับระยะในแนวรัศมี (r) จากแกนกลาง และสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัด (ϵ_{av}) ที่พิจารณาเท่านั้น และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมีได้ดังนี้⁽⁴⁾

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

2.3.5 ฟลูอิดไคต์เบดและวงจรรวมดัน (Pressure Loop)

ฟลูอิดไคต์เบดส่วนใหญ่มักจะมีส่วนที่ทำหน้าที่ป้อนของแข็งกลับเข้ามาใหม่ สำหรับระบบที่เกิดแบบฟองอากาศ, แบบสลัก (slugging) และเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งมีเม็ดของแข็งที่เคลื่อนที่หลุดออกไปจากระบบมีน้อย โดยทั่วไปแล้วจะมีไซโคลนซึ่งมีขาจุ่มอยู่ในเบด เพื่อป้อนกลับของแข็งจะเห็นว่า อนุภาคของแข็งที่อยู่ในหอจะลอยตัวขึ้นเนื่องจากถูกเป่าด้วยแก๊สที่มาจากส่วนล่างของหอของแข็งบางส่วนที่อยู่ในขาไซโคลนจะถูกดันขึ้น อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากจะหลุดลอยไปจากไซโคลนเมื่อทำการวัดความดันที่จุดต่างๆ แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูงของหอ ในลักษณะวงจรรวมดัน พบว่าผลต่างระหว่างระดับความสูงของอนุภาคของแข็งในไซโคลนและในเบด เป็นความสูงที่เกิดขึ้นที่เพิ่มขึ้นเพื่อสมดุลความดันในไซโคลน เนื่องจากความดันรวมรอบวงจรต้องมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ

สำหรับฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (ฟลูอิดไดซ์เบดความเร็วสูง) จะต้องออกแบบให้ท่อป้อนกลับ (return leg) มีขนาดใหญ่กว่าหรือใกล้เคียงกับท่อไรเซอร์ เพื่อให้สามารถป้อนของแข็งกลับมาได้ทันเวลา ระบบประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ ด้านไรเซอร์ ซึ่งเกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง ส่วนบนของท่อป้อนกลับซึ่งเกิดการหมุนวนของอนุภาคแล้วตกกลับลงมาเนื่องจากถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เหมือนไซโคลน และส่วนล่างของท่อป้อนกลับซึ่งเกิด ฟลูอิดเซชันแบบฟองอากาศ โดยที่แก๊สจะถูกเป่าเข้าที่ส่วนล่างของท่อไรเซอร์และท่อป้อนกลับเพื่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง และฟลูอิดเซชันแบบฟองอากาศตามลำดับ เมื่อทำการวัดความดันที่จุดต่างๆแล้วนำมาเขียนกราฟเทียบกับความสูงในลักษณะของวงจรมัดความดันพบว่า ส่วนบนของท่อป้อนกลับที่อยู่เหนือระดับของเบด ความดันจะคงที่ตลอดเนื่องจากการตกของอนุภาคอิสระ ส่วนด้านเบดที่เกิดฟองอากาศที่อยู่ในภาวะเฟสหนาแน่นซึ่งมีความหนาแน่นบัลค์สูง จะเกิดความดันลดคร่อมเบดสูงกว่าทางด้านไรเซอร์ ซึ่งเกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูงและมีความหนาแน่นบัลค์ต่ำมีสัดส่วนช่องว่างมาก อนุภาคจะกระจายตัวตลอดความสูงของหอ ผลต่างระหว่างจุดความดัน P1 และ P3 คือความดันลดคร่อมวาล์วควบคุมอัตราการหมุนเวียนของอนุภาคที่ติดตั้งระหว่างท่อไรเซอร์และท่อป้อนกลับนั่นเอง

ดังกล่าวมาแล้วว่าระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนทางด้านท่อไรเซอร์ซึ่งอยู่ในภาวะฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง ซึ่งมีการกระจายตัวของเม็ดของแข็งในแนวแกน (axial distribution) จะเกิดการแบ่งเป็น 2 เฟส คือ แบบหนาแน่น (dense phase) ที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์และแบบเจือจาง (dilute phase) ที่บริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์

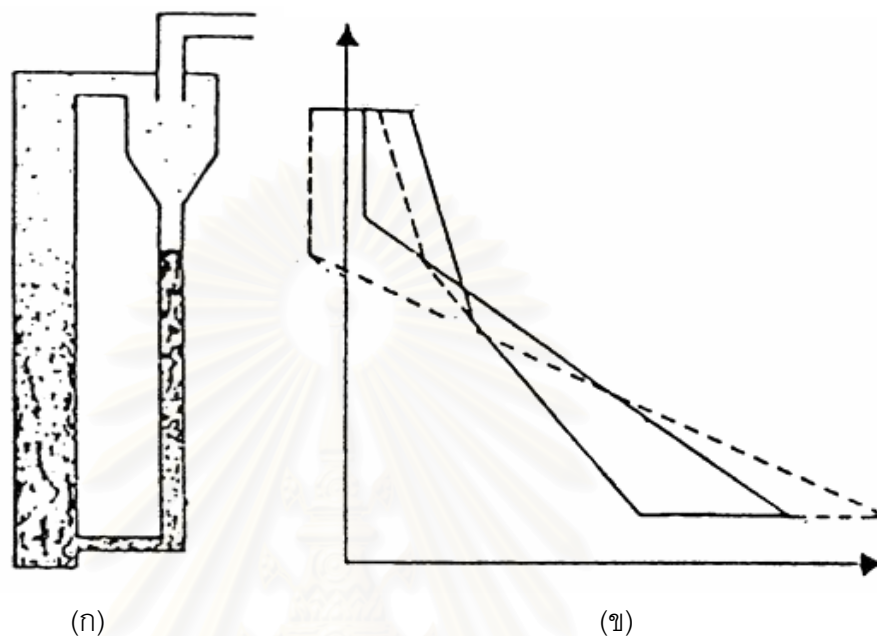
โดยปกติแล้วการกระจายตัวของเม็ดของแข็งตลอดความสูงจะลดลงตลอดความสูงอย่างสม่ำเสมอยกเว้นตรงบริเวณที่เป็นช่วงเปลี่ยนจาก dense phase ไปเป็น dilute phase ดังรูปที่ 2.23

พิจารณาวงจรมัดความดันในรูปทั้งสอง (รูปที่ 2.23 ก และ ข) จะเห็นว่าช่วงที่เปลี่ยนจาก dense ไปเป็น dilute นั้น เส้นกราฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความชัน ซึ่งในช่วง dilute นั้น จะมีความดันลดต่ำกว่าในช่วง dense เพราะจะมีการกระจายตัวของเม็ดของแข็งต่ำกว่า และความชันของกราฟในช่วงนี้จะมีค่าสูงกว่าในช่วง dense phase ซึ่งแสดงว่าในช่วง dilute นั้น การกระจายตัวตามแนวรัศมีจะเกิดขึ้นน้อยกว่าในช่วง dense phase แต่การกระจายตัวก็ลดลงอย่างสม่ำเสมอตลอดความสูงในอัตราส่วนที่น้อยมาก

ช่วงเปลี่ยนจาก dense ไปเป็น dilute นั้น เป็นฟังก์ชันกับอัตราการหมุนเวียนเม็ดของแข็งและปริมาณเม็ดของแข็งในระบบ พิจารณาระบบซึ่งมีปริมาณเม็ดของแข็งคงแต่เปลี่ยนอัตราการหมุนเวียนของเม็ดของแข็ง ดังรูปที่ 2.23(ข) เส้นประในรูปแสดงถึงการหมุนเวียนของแข็งที่ลดลง จะเห็นว่าความสูง ณ จุดที่เปลี่ยนจาก dense ไปเป็น dilute phase จะมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาสมดุลย์ความดัน (Pressure balance) รอบวงจร หรือ ระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนตามรูปที่ 2.23(ก) ที่ส่วนล่างของท่อไรเซอร์เบดจะหนาแน่นกว่าด้านบนทำให้ความ

ต้นลดต่อความสูงที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์มีค่าสูงกว่าด้านบน โดยที่เม็ดของแข็งในระบบ CFB จะกระจายอยู่ในท่อไรเซอร์และท่อป้อนกลับ โดยที่ความดันลดในทั้งสองท่อจะสมดุลกันอยู่นั้นคือผลรวมของความดันลดทั้งระบบจะมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2.23 วงจรความดันของระบบฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน⁽⁴⁾

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

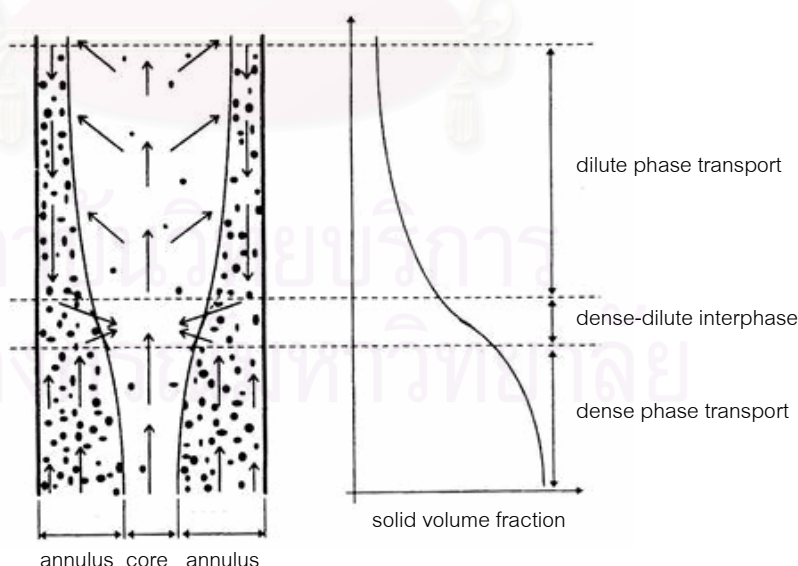
P.H. Luong and S.C. Bhattacharya (1993)⁽⁵⁾ การทดลองนี้เป็นการทดลองภายใต้ภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง เพื่อศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ และรูปร่างของ L - valve ที่มีต่ออัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งในเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน โดยท่อไรเซอร์ (riser) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 m. และมีความสูง 4.5 m. ของแข็งที่ใช้คือ ททราย ซึ่งมีขนาด 200 μm., 400 μm. และ 500 μm., อัตราการไหลของอากาศในท่อไรเซอร์มีค่าระหว่าง 1400-2000 liters/min และน้ำหนักของทรายทั้งหมดในระบบมีค่าระหว่าง 15-25 kg. อัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง (solid circulation rate) สามารถหาได้จากการวัดความเร็วของทรายที่ผ่านส่วนที่เป็นพลาสติกใส (perspex tube) ซึ่งอยู่ส่วนล่างของท่อป้อนกลับ (return leg) จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งใน ฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของอากาศในท่อไรเซอร์ อัตราการไหลของอากาศเพิ่ม และ น้ำหนักของของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น อัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งจะลดลง เมื่อขนาดของแข็งใหญ่ขึ้น และอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็ง

เพิ่มขึ้น เมื่อ L-valve ทำมุมเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคจะเคลื่อนตัวดีขึ้น ในขณะที่ L-valve ทำมุมลดลง จะเป็นเหตุให้ อัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งลดลง

F. Wei and J. Zhu (1996)⁽⁶⁾ ได้ทำการวิจัยผลของทิศทางการไหลของอนุภาคแนวแกน ในระบบที่ของไหลกับอนุภาคเคลื่อนที่ขึ้นและลงในแนวเดียวกัน อนุภาคที่ใช้คือ phosphorescent ผสมกับ alumina พบว่าเมื่อของไหลไหลในแนวเดียวกับแรงโน้มถ่วงโลก การกระจายตัวของอนุภาคในแนวแกนน้อยมากและของไหลจะประพฤติตัวแบบ plug flow แต่เมื่อของไหลไหลในแนวตรงข้ามพบว่า การกระจายตัวของอนุภาคในแนวแกนมีความสำคัญมากขึ้นและของไหลจะไม่ประพฤติตัวเป็นแบบ plug flow

Weinell C.E. และคณะ (1997)⁽⁷⁾ ศึกษาการประพฤติของอนุภาคชนิดหนึ่งในเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน อนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือ ททราย ขนาด 0.15mm. มีความหนาแน่น 2.6 g/cm³ โดยใช้เทคนิค radioactive tracer ในการหาความเร็วอนุภาค พบว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วของอนุภาคจะลดลง นอกจากนี้ยังสามารถหาการกระจายตัวของอนุภาคจากการวัดความดัน

M.J.Rhodes , M.Sollaart และคณะ (1998)⁽⁸⁾ ศึกษา flow structure ใน riser ของCFB ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.09 m. สูง 7.2 m. อนุภาคที่ใช้คือ ททราย ขนาด 100 μm . มีความหนาแน่น 2650 kg/m³ จากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับปริมาณของของแข็ง จะมีลักษณะเป็น s-shape โดยจะแบ่งเป็น dense phase , interface และ dilute phase และเมื่อพิจารณาในแนวรัศมีจะแบ่งเป็น core region และ annulus region ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ลักษณะการเคลื่อนที่ใน fast fluidized bed

Fei Wei, Hongfei Lin และคณะ (1998)⁽⁹⁾ ศึกษาแนวโน้มของความเร็ว และปริมาณของอนุภาคใน riserที่มีความหนาแน่นสูง โดย riser มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 186 mm. สูง 8 m

อนุภาคที่ใช้คือ FCC ขนาด $54 \mu\text{m}$. มีความหนาแน่น 1398 kg/m^3 พบว่าสามารถแบ่ง ความเร็ว และปริมาณของอนุภาคในแนวรัศมีเป็น

- core region ($r/R < 0.4$) ความเร็วของอนุภาคจะมีค่าสูง ปริมาณของอนุภาคน้อย และจะมีการเปลี่ยนแปลงตามแนวรัศมีเล็กน้อย
- steep velocity region ($0.4 < r/R < 0.85$) การเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีของความเร็ว และปริมาณของอนุภาคมีค่าค่อนข้างมาก
- annulus region ($r/R > 0.85$) ความเร็วของอนุภาคจะค่อยๆลดลง และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อภาวะเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณของของแข็งจะมีค่าสูงที่สุด และเปลี่ยนแปลง เล็กน้อยตามแนวรัศมี

M.L. Mastellone and U. Arena(1999)⁽¹⁰⁾ ทำการวิจัยเกี่ยวกับผลของขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ใน riser อนุภาคที่ใช้คือ ซิลิกาขนาด $310 \mu\text{m}$, FCC ขนาด $70 \mu\text{m}$. Ballotini1 ขนาด $67 \mu\text{m}$. และ Ballotini ขนาด $89 \mu\text{m}$. พบว่าเมื่อความหนาแน่นของอนุภาคมากขึ้น ปริมาณอนุภาคที่ส่วนล่างของ riser จะสูง การกระจายตัวแนวแกนจะไม่แตกต่างกันมาก ตลอดความยาวของ riser และเมื่ออนุภาคใหญ่ขึ้นจะไม่มี การเคลื่อนตัวลงของอนุภาคที่ผนังแนวโน้มจะราบเรียบ แต่ถ้าอนุภาคขนาดเล็กจะมีวงแหวนเกิดขึ้นที่ด้านบนของ riser

Zevenhoven R. และคณะ (1999)⁽¹¹⁾ ศึกษาเกี่ยวกับความเร็วและความหนาแน่นของอนุภาคบริเวณผนังในเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน โดยเทคนิคการบันทึกภาพวิดีโอ อนุภาคที่ใช้คือ ควอร์ทซ์ ขนาด 310 mm . มีความหนาแน่น 1700 kg/m^3 พบว่าที่ตำแหน่งความสูง 2.25 m . อนุภาคมีความเร็วเฉลี่ยมากกว่าที่ตำแหน่งความสูง 2.75 m .

K. Smolders and J. Baeyens (2000)⁽¹²⁾ ทำการวิจัยในเรื่องการเคลื่อนตัวของอนุภาค และเวลาที่อนุภาคอยู่ใน riser ในเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน โดยใช้ทรายขนาด $90 \mu\text{m}$. มีความหนาแน่น 2200 kg/m^3 พบว่าเวลาที่อนุภาคอยู่ในคอลัมน์มีความสัมพันธ์กับความเร็วของแก๊สและอัตราการไหลย้อนกลับ คือ เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊ส จะทำให้อนุภาคมีความเร็วเพิ่มขึ้น ดังนั้นเวลาที่อนุภาคอยู่ในคอลัมน์ก็จะน้อยลง อัตราการไหลย้อนกลับจะมากขึ้น

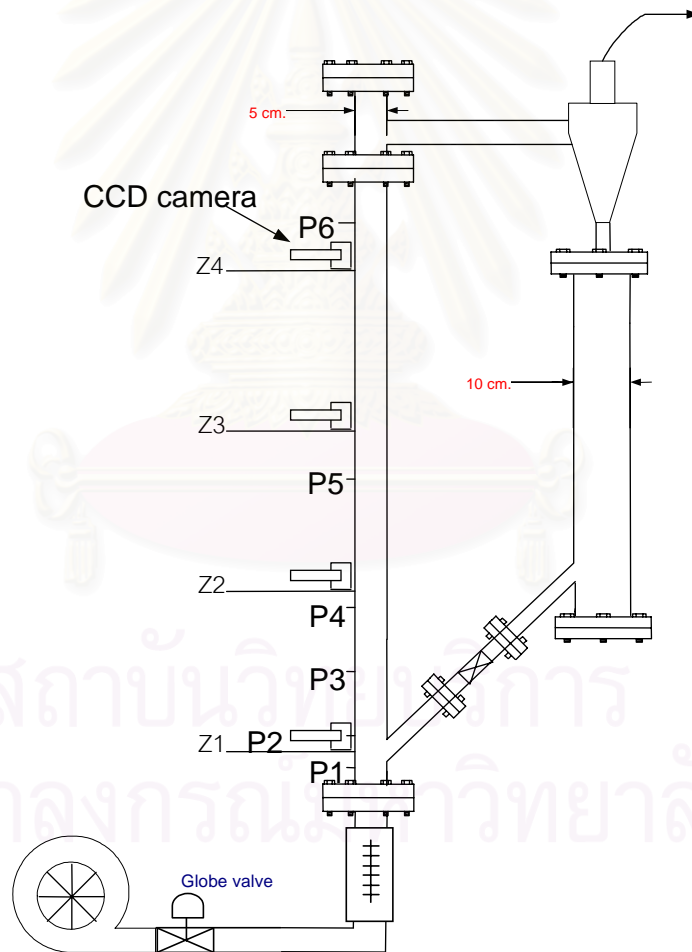
W. Namkung and S.D. Kim (2000)⁽¹³⁾ ได้ทำการวิจัยเรื่องการผสมกันของแก๊สในแนวรัศมีในเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน อนุภาคที่ใช้ คือ ซิลิกาที่มีขนาด $125 \mu\text{m}$. โดยศึกษาผลของความเร็วแก๊ส อัตราการไหลย้อนกลับของอนุภาค และอัตราส่วนของอากาศครั้งที่ 2 พบว่าเมื่ออัตราการไหลย้อนกลับและอัตราส่วนของอากาศครั้งที่ 2 มากขึ้น สัมประสิทธิ์ของการผสมกันในแนวรัศมีจะมากขึ้น แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วแก๊ส และมีงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าเมื่อขนาดของคอลัมน์ใหญ่ขึ้น สัมประสิทธิ์ของการผสมกันในแนวรัศมีก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

3.1.1 เครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed : CFB) ส่วนประกอบที่สำคัญแสดงในรูปที่ 3.1

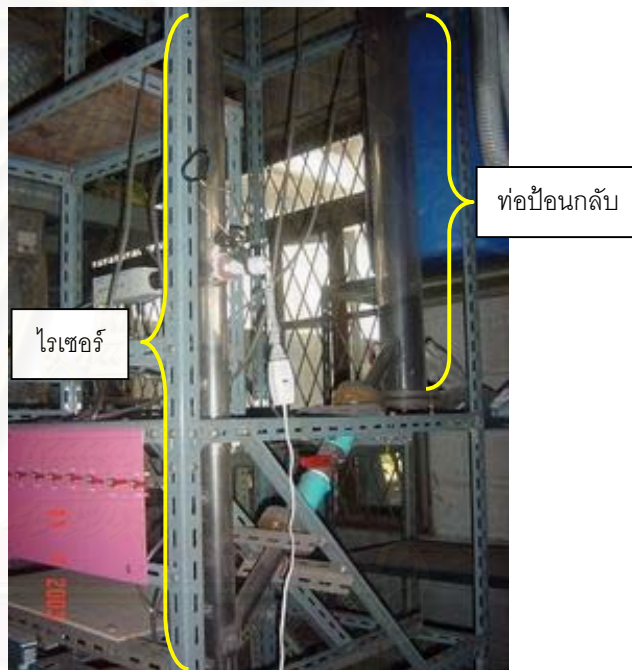
Circulating Fluidized Bed Reactor



รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

ส่วนประกอบของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่สร้างขึ้นมีดังต่อไปนี้

1. เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (CFB) ประกอบด้วย
 - 1.1 ท่อไรเซอร์(Riser) ทำจากท่อพลาสติกใส(Plexiglass) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 2 เมตร บริเวณด้านล่างของไรเซอร์จะมีตัวกระจายอากาศ (air distributor) เป็นแบบแผ่นตะแกรงแผ่นเดียว(single perforated plate) ที่มีความละเอียด 60 mesh (250 μ m.) ส่วนบริเวณด้านบนของไรเซอร์จะมีฝาเปิด-ปิด สำหรับบรรจุถ่านหินที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งทำมาจากแผ่นอะครีลิก ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลอง

บริเวณผนังท่อด้านไรเซอร์มีการเจาะรูขนาด 1/4 นิ้ว เพื่อติด pressure tap ที่ตำแหน่ง P_1 P_2 P_3 P_4 P_5 และ P_6 ดังในรูปที่ 3.1 สำหรับวัดค่าความดันตามความสูงของไรเซอร์ โดยแต่ละตำแหน่งห่างจากตัวกระจายอากาศเป็นระยะ 10 20 40 60 100 และ 180 เซนติเมตร ตามลำดับ

บริเวณผนังท่อด้านไรเซอร์อีกด้านหนึ่ง มีการเจาะรูเพื่อให้ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ซึ่งปลายท่อมีแผ่นพลาสติกใสปิดอยู่ ยื่นเข้าไปบริเวณกลางท่อสำหรับการบันทึกภาพภายในไรเซอร์ ที่ตำแหน่ง Z_1 Z_2 Z_3 และ Z_4 ดังในรูปที่ 3.1 โดยแต่ละตำแหน่งห่างจากตัวกระจายอากาศเป็นระยะ 30 80 130 และ 180 เซนติเมตร ตามลำดับ

1.2 ไชโคลน (Cyclone) เป็นอุปกรณ์สำหรับแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่หลุดจากโรเตอร์ออกจากแก๊สเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของอากาศ ตัวไชโคลนทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร ความเร็วอากาศเข้าไชโคลน(U_g)ประมาณ 19.5 m/s(ภาคผนวก ข) มีประสิทธิภาพ 92.2%(ภาคผนวก ข) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกไชโคลน (D_c) = 12 ซม.

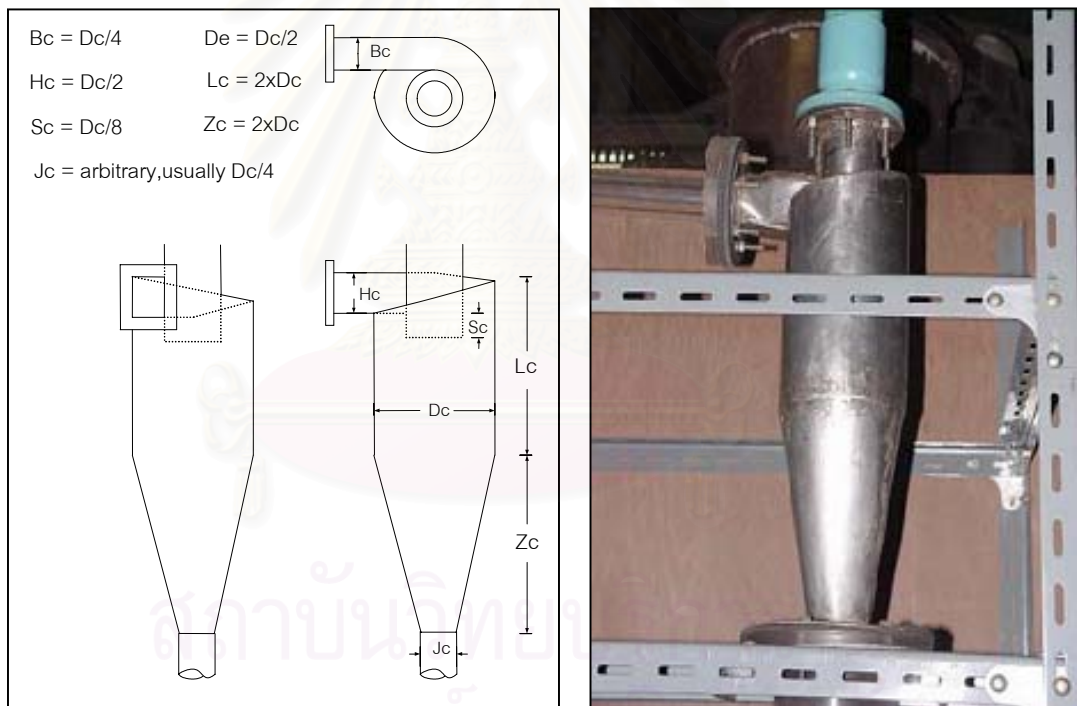
ทางเข้าของแก๊สและอนุภาค ($B_c \times H_c$) = 3x6 ซม.

เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส (D_e) = 12 ซม.

ความสูงของกระบอกไชโคลน (L_c) = 24 ซม.

ความสูงของกรวยไชโคลน (Z_c) = 24 ซม.

เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของอนุภาค (J_c) = 3 ซม.



รูปที่ 3.3 ไชโคลน (cyclone)

1.3 ท่อป้อนกลับ(Downcomer) เป็นส่วนที่นำอนุภาคที่ถูกดักจับโดยไซโคลอนป้อนกลับสู่โรเตอร์อีกครั้ง ทำจากท่อพลาสติกใส(Plexiglass)เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 1.2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4

1.4 แอลวาล์ว(L-valve) เป็นส่วนที่ป้อนกลับอนุภาคจากท่อป้อนกลับสู่ท่อโรเตอร์ทำจากท่อพลาสติกใส(Plexiglass)เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4 เซนติเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร ยาว 75 เซนติเมตร โดยทำมุม 45 องศากับแนวระดับ และมีวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) เป็นตัวควบคุมอัตราการป้อนกลับอนุภาคถ่านหินมีค่าคงที่เท่ากับ 58.96 kg/hr(ภาคผนวก ข) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ท่อป้อนกลับ (downcomer)



รูปที่ 3.5 แอลวาล์ว(L-valve)

2. อุปกรณ์เป่าอากาศ(Air blower)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเป่าอากาศในการทดลองนี้คือเครื่องเป่าอากาศที่มีขนาด 5 กำลังม้า อากาศจะถูกส่งตามท่อผ่านการควบคุมโดยโกลบวาล์ว (globe valve) ขนาด 2 นิ้ว ดังแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องเป่าอากาศ (Blower)

3. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ

อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศที่ใช้คือ Rotameter ที่ทำมาจากอะครีลิคใส ภายในบรรจุลูกกลอยที่ทำมาจากสแตนเลส ช่วงอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้ 70-700 l/min. ดังแสดงในรูป 3.7



รูปที่ 3.7 โรตاميเตอร์ (Rotameter)

4. อุปกรณ์วัดความดัน

อุปกรณ์วัดความดันที่ใช้ในการทดลองนี้คือ pressure transmitter ของบริษัทYokogawa รุ่น EJA120 Style:S2 มีช่วงการวัด 0-100 มิลลิเมตรน้ำ ความแม่นยำ 0.2% ดังแสดงในรูป 3.8



รูปที่ 3.8 pressure transmitter

5. กล้องบันทึกภาพ CCD cameraของบริษัท Sony รุ่น SSC-DC58AP พร้อมเลนส์ สามารถปรับความเร็ว shutter ได้ตั้งแต่ 1/25 ถึง 1/10000 วินาที ดังแสดงในรูป 3.9 เพื่อบันทึกภาพจากการทดลอง แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมต่อไป



รูปที่ 3.9 กล้อง CCDและเลนส์

6. เครื่องคอมพิวเตอร์ อินเทลเพนเทียมทรี ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 450 MHz หน่วยความจำ 256 Mbyte ใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 2000 สำหรับรับภาพและทำการประมวลผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image Pro Plus V.4.5.1 ดังแสดงในรูป 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม Image Pro Plus

7. โปรแกรม Image-Pro Plus เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ซึ่งมีความสามารถดังนี้

1. การนับจำนวนและขนาด

- นับและวัดขนาดของวัตถุในภาพโดยอัตโนมัติ
- สามารถทำการวัดได้มากกว่า 50 รายการ เช่น Area, Perimeter, Length, Roundness, Major Axis, Minor Axis, Aspect, Angle, Centroids, Hold Area, Integrated Optical Density
- สามารถกำหนดค่าของการวัดล่วงหน้า เพื่อแยกวัตถุที่ไม่เกี่ยวข้องออกไปได้
- สามารถวัดแบ่งวัตถุออกเป็นกลุ่มๆ ตามค่าที่วัดได้และแสดงสีบนวัตถุต่างๆ กัน (สีจำลอง) โดยจำแนกตามกลุ่มนั้นๆ
- สามารถแยกวัตถุที่ซ้อนกันหรือติดกัน ออกจากกันโดยวิธี Watershed และ Auto – Split นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ลักษณะกลุ่มก้อน และแสดงจำนวนวัตถุในกลุ่มก้อนของวัตถุต่างๆ ได้ (Measure – Cluster)]

- สามารถใช้สีเพื่อแยกวัตถุให้เด่นชัด ในกรณีที่เป็นภาพสี
- สามารถโอนย้าย ส่งผ่านข้อมูลที่ได้จากการวัดเข้าไปสู่ Software ประเภท Spread Sheet เช่น Excel ได้โดยเทคนิค DDE (Dynamic Data Exchange)
- แสดงผลที่วิเคราะห์เป็น Histogram, Scattergram ได้
- สามารถทำเครื่องหมายบนวัตถุใดๆ ด้วยตัวผู้ใช้งานเพื่อจุดประสงค์ในการนับและแบ่งกลุ่ม (Manual Tag)
- สามารถใช้กับงานประจำเพื่อทดสอบ Pass/Fail ได้
- สามารถวัดความกว้าง, พื้นที่, เส้นรอบวง และวัดมุมได้
- สามารถกำหนดเส้นรอบวัตถุได้โดยอัตโนมัติ

2. การวิเคราะห์

- สามารถแสดงภาค 3 มิติ ตามความเข้มของสีได้
- แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ และ Histogram
- สามารถกำหนดและการจัดการกับ Multiple Area of Interest (AOI) ได้ในภาพเดียวกัน
- สามารถคำนวณและแสดงข้อมูลทางสถิติ
- สามารถทำการวิเคราะห์สีในลักษณะของ RGB, HIS, HSV และ YIQ ได้จากภาพสีใดๆ
- สามารถรวมภาพเข้าด้วยกันพร้อมปรับแก้ค่าของสีพื้น (Background Correction) เพื่อวัดความเข้มสีหรือวัดความเข้มแสงที่แม่นยำ

3. การปรับแต่ง

- สามารถปรับ Contrast และ Brightness ของภาพโดยใช้เทคนิค Equalization, Gamma Correction, Contouring, Thresholding, Background Subtraction ได้
- สามารถแก้ไขข้อบกพร่องของภาพโดยใช้ Filters ต่างๆ เช่น Well, Hi - Pass, Low - Pass, Sobel, Edeg detection, Laplace, Roberts, erosion, dilation, opening, closing, thinning, Watershed และ Filter ที่ผู้ใช้งานสร้างขึ้นเอง
- สามารถเลือกรูปร่างและขนาดของ Kernel สำหรับใช้กับ Morphological filter ได้

4. การปรับเทียบค่าอ้างอิง (Calibration)

- สามารถนำค่าปรับเทียบไปใช้กับความเข้มสี เพื่อวัดความเข้มสีหรือปรับเทียบหน่วยวัดระยะ เพื่อวัดระยะมาตรฐานได้
- สามารถแสดงแถบมาตราส่วนของระยะบนภาพได้
- สามารถเก็บบันทึกและเรียกค่าเทียบต่างๆ กลับมาใช้ใหม่ได้

5. การสนับสนุนรูปแบบของแฟ้มข้อมูล แบบต่างๆ

- สามารถอ่านและเขียนแฟ้มข้อมูลด้วยรูปแบบต่างๆ กัน เป็น TIFF, BMP, PHOTO, CD, TGA, FLAT (Binary)
- อ่านข้อมูลจากภาพชนิด 8, 12, 16, 24, 32 และ 48 BIT ได้
- สามารถบีบอัดแฟ้มข้อมูล โดยใช้ JPEG, LZW Encoding หรือ RLE
- แปลงไฟล์พร้อมกันเป็น Batch ได้ (ทีละหลายๆไฟล์)
- สามารถนำส่งข้อมูลออกไปยัง program อื่นๆ ได้เช่น Excel

6. ระบบฐานข้อมูลภาพ

- สามารถเก็บภาพในลักษณะฐานข้อมูล
- สามารถใช้คำเฉพาะสำหรับการค้นหาภาพได้
- สามารถพิมพ์ภาพขนาดใหญ่หรือภาพเล็กๆเรียงกัน จากโปรแกรมได้

7. ระบบการพิมพ์

- พิมพ์ภาพเป็นส่วนๆแล้วนำมารวมกันเป็นภาพใหญ่ภายหลังได้
- สามารถพิมพ์ภาพตัวอย่างเล็กๆเรียงกัน โดยแต่ละภาพจะมีความแตกต่างของ Brightness หรือ Contrast 1 หรือ Gamma เพื่อเลือกกว่าภาพใดมีค่าที่ดีที่สุดสำหรับการพิมพ์ได้
- สามารถบันทึกภาพหน้าจอ Monitor เพื่อเก็บภาพได้โดยรวมทั้ง (Client Area)
- สามารถบันทึกข้อมูลเป็นภาษาไทยบนภาพ และพิมพ์ออกมาทางเครื่องพิมพ์ได้

8. การนำภาพเข้าสู่โปรแกรม

- สามารถนำภาพจากวีดีโอ กล้องดิจิตอล สแกนเนอร์ เครื่องมือวิทยาศาสตร์และฐานข้อมูลภาพเข้าสู่โปรแกรมได้
- สามารถนำภาพเข้าสู่โปรแกรมได้ในลักษณะภาพเรียงลำดับ (Sequence) ได้
- สามารถบันทึกภาพตามระยะห่างของเวลาที่กำหนดได้ (Multiple Images)

9. ระบบติดต่อสื่อสาร

- สามารถส่งภาพไปพร้อมกับ E-mail ได้ จากตัวโปรแกรมโดยตรง
- สนับสนุนการติดต่อเครือข่ายด้วย FTP Protocols

10. ระบบสร้างรายงาน

- สามารถพิมพ์รายงานผลการวิเคราะห์ ภาพก่อนการวิเคราะห์ ภาพหลังการวิเคราะห์ ได้
- สามารถสร้างรูปแบบรายงาน ข้อความตามแบบที่ผู้ใช้งานต้องการไว้ล่วงหน้าได้ (Template)

11. ความสามารถเพิ่มเติม

- Extended Depth of Field (EDF) : รวมภาพที่มีโฟกัสต่างระดับกันเป็นภาพที่คมชัดภาพเดียวได้
- Color Composite Module : การสร้างและปรับแต่งภาพถ่ายขาวดำของ ฟลูออเรสเซนต์ ให้เป็นภาพสี
- Large Spectral Filter (LSF) : สามารถใช้ฟิลเตอร์ขนาดใหญ่ได้ (4000 x 4000) โดยยังคงมีความเร็วเหมือนเดิม
- Co – Localization : วัดผล, วิเคราะห์, เปรียบเทียบ ภาพถ่ายตัวอย่างเดียวกันใน 2 ช่วงคลื่นตรงตำแหน่งเดียวกันเพื่อหาความสัมพันธ์ในตำแหน่งที่ตรงกันสำหรับงาน fluorescence
- Sequence Gallery : สามารถนำภาพถ่ายต่อเนื่องเก็บไว้เป็นแกลเลอรีได้ สามารถแสดงผลและดูภาพต่อเนื่องได้ทันที นอกจากนั้นผู้ใช้งานยังสามารถดูผลการวิเคราะห์ภาพได้ก่อนที่จะมีการดำเนินการจริงกับข้อมูล
- Auditing and File Authenticity Features : สามารถใช้ความเชื่อถือในงานที่ดำเนินการจาก Image – Pro ได้ดังนี้
 - Audit Trail เป็นการบันทึกปูมการทำงานทั้งหมดในโปรแกรมไว้เพื่อการตรวจสอบภายหลัง
 - Image Signature เพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบได้ว่าข้อมูลภาพของตนเองนั้นมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่

- File Signature เพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบได้ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของไฟล์มีการเปลี่ยนแปลงไป

- สนับสนุนไฟล์กราฟิกมากขึ้น : Image – Pro ได้เพิ่มความสามารถในการอ่านข้อมูลของไฟล์มากขึ้น เช่น ไฟล์ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบ Confocal เปิดไฟล์ภาพจากโปรแกรมของ Nikon, BioRAD, Olympus, Zeiss, Leica, โปรแกรม Autoquant's auto Deblum™ และ AutoVisualaiza 3D™ และ AutoVisualaize 3D™ และไฟล์แบบ Stack จากโปรแกรม Metamorph™, Digital Micrograph™ ทำให้สามารถนำ Image – Pro มาใช้งานร่วมกับกล้อง Electron ได้โดยตรงมากขึ้น

- PhotoShop Plug – in Support : Image – Pro สนับสนุนการใช้งาน Filter และ Import Plug – in ของ PhotoShop ทำให้เพิ่มขีดความสามารถของโปรแกรมที่ไม่เคยมีได้

- Apply to Sequence : ผู้ใช้สามารถดำเนินการกับภาพต่อเนื่องได้ทั้งหมดด้วยการสั่งงานเพียงครั้งเดียวไม่ต้องทำทีละครั้งเหมือนแต่ก่อน

- Standard Position Information : Image – Pro 4.5 สามารถบอกตำแหน่ง X, Y ในภาพและยังสามารถบอกตำแหน่ง Z ของภาพได้ด้วย (เฉพาะภาพแบบ Stack หรือ ภาพจาก Confocal)

- Link to Solutions Zone : ใน Help ของโปรแกรมมี Link ที่สามารถเข้าสู่ Solution Zone ที่ให้ลูกค้าสามารถค้นหาข้อมูลการใช้งานที่ตรงกับงานที่กำลังทำอยู่ ซึ่งเป็นการบริการของ Media Cybernetics ผ่านทางเว็บไซต์

การใช้ Image-Pro Plus ในสาขาวิชาอื่นๆ สามารถวิเคราะห์ภาพที่ต้องการความละเอียดสูงๆ ได้แก่ การวิเคราะห์องค์ประกอบของแร่ทางธรณีวิทยา ใช้ในวงการแพทย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องบดหยาบ เป็นแบบ Impact Crusher ใช้มอเตอร์ขนาด 3.8 กิโลวัตต์ 3 เฟส ใช้บด ถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงเหลือไม่เกิน 5 ม.ม. ดังแสดงในรูปที่ 3.11
2. เครื่องบดละเอียด เป็นแบบ Hammermill ของบริษัท Retsch GmbH รุ่น VRB80 มอเตอร์ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ 1 เฟส ใช้บดถ่านหินให้อยู่ในช่วงขนาดต่างๆ ที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 เครื่องบดหยาบ



รูปที่ 3.12 เครื่องบดละเอียด

3. เครื่องร่อนและตะแกรงร่อนแยกขนาด ใช้แยกถ่านหินที่บดออกเป็นช่วงๆ โดยงานวิจัยนี้จะแบ่งขนาดออกเป็นช่วง ดังนี้ 300-425 425-500 500-600 600-850 850-1180 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 เครื่องร่อนและตะแกรงร่อนแยกขนาด

3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมถ่านหินเพื่อใช้ในการทดลอง

1. บดถ่านหินให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบดหยาบ
2. นำถ่านหินจากข้อ 1 มาบดต่อด้วยเครื่องบดละเอียด สามารถเปลี่ยนขนาดตะแกรงได้ตามต้องการ
3. นำถ่านหินที่บดแล้วไปร่อนแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนแยกขนาดและเครื่องร่อนแยก

3.2.2 วิเคราะห์สมบัติต่างๆของถ่านหิน

1. ความหนาแน่นบัลก์ (bulk density) แสดงในภาคผนวก ข
2. ความหนาแน่นของถ่านหิน (solid density) แสดงในภาคผนวก ข
3. ขนาดเฉลี่ยของถ่านหิน (Sauter mean diameter) แสดงในภาคผนวก ค

3.2.3 การทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

1. ชั่งตัวอย่างถ่านหินแต่ละขนาดตามที่คำนวณไว้ ในแต่ละการทดลองถ่านหินที่ใช้มีน้ำหนักรวม 2 กิโลกรัม
2. บรรจุถ่านหินที่เตรียมไว้ในเครื่องปฏิกรณ์ ทางด้านบนของท่อไรเซอร์ แล้วเป่าอากาศให้อุณหภูมิถ่านหินเคลื่อนที่ไปยังท่อป้อนกลับเพื่อเตรียมที่จะทำการทดลอง ซึ่งความสูงของถ่านหินในท่อป้อนกลับประมาณ 30 เซนติเมตร
3. เปิดเครื่องเป่าอากาศ ให้อากาศไหลเข้าทางด้านล่างของไรเซอร์ผ่านตัวกระจายอากาศ(distributor) เปิดวาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly valve) ให้ถ่านหินเริ่มไหลเข้าสู่ไรเซอร์โดยควบคุมอัตราการป้อนอนุภาคถ่านหินมีค่าคงที่ประมาณ 58.96 kg/hr ทุกการทดลอง (แสดงในภาคผนวก ข)
4. ปรับอัตราการไหลของอากาศโดยใช้วาล์วให้ได้ตามที่ต้องการโดยอ่านค่าอัตราการไหลของอากาศที่ Rotameter
5. รอให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล (steady state) ประมาณ 5 นาที
6. บันทึกค่าความดันจาก pressure transmitter ณ.ตำแหน่งต่างๆ ตามความสูงของไรเซอร์
7. ทำการบันทึกภาพ โดยใช้กล้อง CCD
8. ทำการทดลองซ้ำข้อ 4 ด้วยการปรับอัตราการไหลของอากาศเพิ่มขึ้น

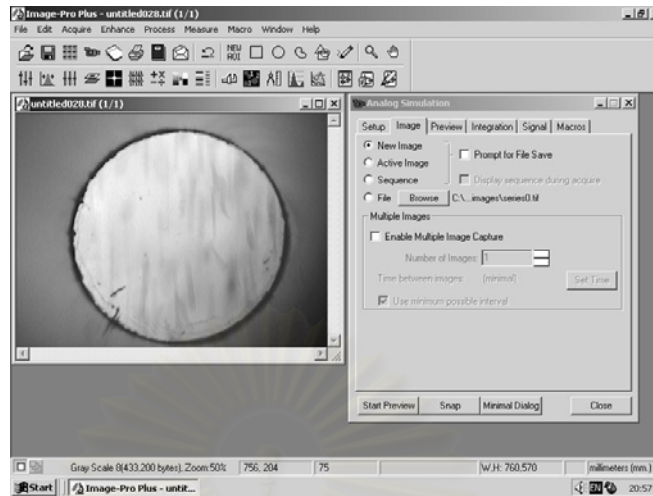
9. เมื่อปรับอัตราการไหลของอากาศครบตามที่ต้องการแล้ว นำถ่านหินที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ออกมาทางด้านล่างของท่อป้อนกลับ แล้วนำมาอุ่นแยกขนาดอีกครั้งเพื่อหาขนาดของถ่านหินหลังการทดลอง
 10. แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 1 โดยเปลี่ยนขนาดของถ่านหิน
 11. นำภาพบันทึกได้ไปวิเคราะห์หาความเร็วอนุภาคด้วยโปรแกรม Image Pro Plus V.
- 4.5.1

3.2.4 การบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus

3.2.4.1 การบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD

- 1) ประกอบกล้องและเลนส์เข้าด้วยกัน
- 2) ต่อสายของกล้องเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่เปิดโปรแกรม Image Pro Plus เพื่อรับภาพที่มาจากกล้อง CCD
- 3) นำกล้องไปวางบริเวณหน้าต่างพลาสติกที่ยื่นเข้าไปในไรเซอร์ เพื่อที่จะทำการบันทึกภาพ
- 4) เปิดไฟที่อยู่ด้านตรงข้ามท่อพลาสติก ระยะห่างจากหลอดไฟถึงท่อไรเซอร์ประมาณ 2 เซนติเมตร เพื่อให้มีแสงเพียงพอในการบันทึกภาพ
- 5) เมื่อเปิดเครื่องเป่าอากาศ และปรับอัตราการไหลตามที่ต้องการ จากนั้นทำการปรับความเร็ว shutter ปรับระยะภาพ(focus) และแสงสว่างจนกว่าจะได้ภาพที่ชัดเจน สำหรับถ่านหินขนาด 400 ไมครอนจะใช้ความเร็ว shutter 1/1000 sec สำหรับถ่านหินขนาด 600 800 และ 1000 μm จะใช้ความเร็ว shutter 1/500 sec 1/500 sec และ 1/250 sec ตามลำดับ
- 6) ทำการบันทึกภาพด้วย โปรแกรม Image Pro Plus จะได้ภาพดังแสดงในรูป 3.14

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างภาพที่บันทึกได้ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus

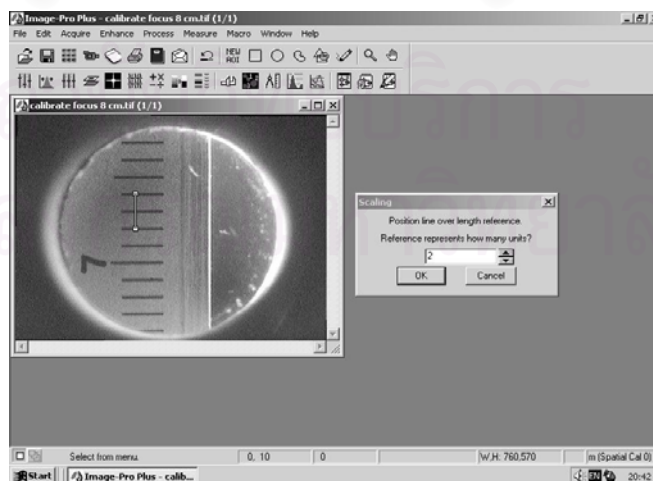
3.2.4.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus

ก่อนจะวิเคราะห์ภาพที่บันทึกจากการทดลอง จะต้องมีการปรับเทียบ(calibrate) หน่วยความยาวของภาพที่ถ่ายได้กับค่ามาตรฐาน โดยในที่นี้จะทำการบันทึกภาพหน่วยวัดความยาวจากเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์ โดยปรับระยะภาพ (focus) ที่ 8 เซนติเมตร จะให้ภาพชัดจนที่สุด ซึ่งระยะนี้จะเป็นระยะภาพที่ใช้ในทุกการทดลอง

- การปรับเทียบความยาวมาตรฐาน(calibration) มีรายละเอียดดังนี้

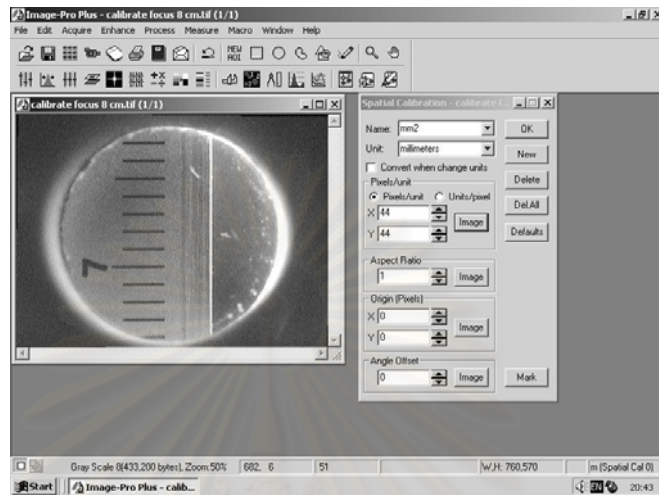
1. บันทึกภาพเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์
2. ลากเส้นความยาวจากภาพ พร้อมทั้งกำหนดความยาวของเส้นที่ลาก ดังแสดงใน

รูป 3.15



รูปที่ 3.15 ภาพเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์และการลากเส้นความยาว

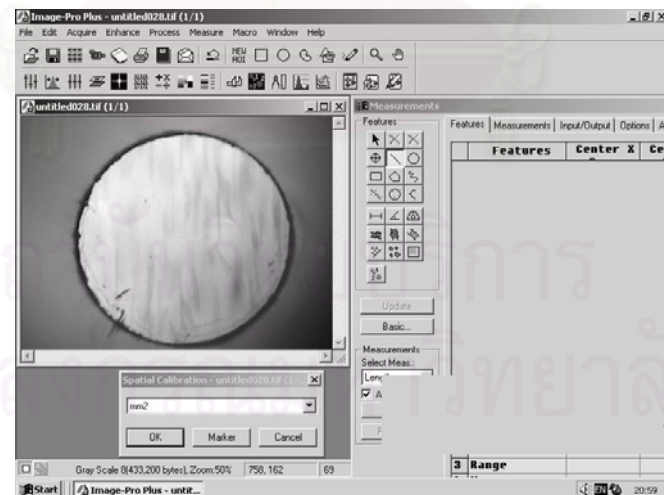
3. กำหนดชื่อไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้ แล้วทำการบันทึกไฟล์ไว้ ดังแสดงในรูป 3.16



รูปที่ 3.16 การกำหนดไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้

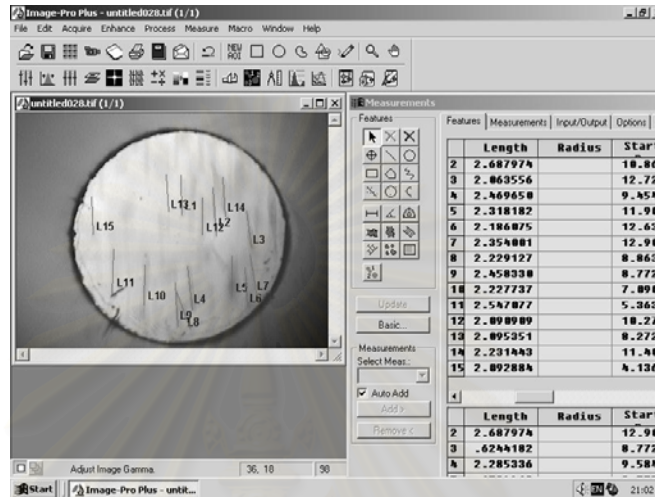
- การวิเคราะห์ภาพที่บันทึกจากการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

1. เปิดไฟล์ภาพที่ทำการบันทึกไว้ พร้อมทั้งเลือกไฟล์ที่ทำการ calibrate ไว้ จากนั้นเลือกฟังก์ชันการลากเส้นความยาว ดังแสดงในรูป 3.17



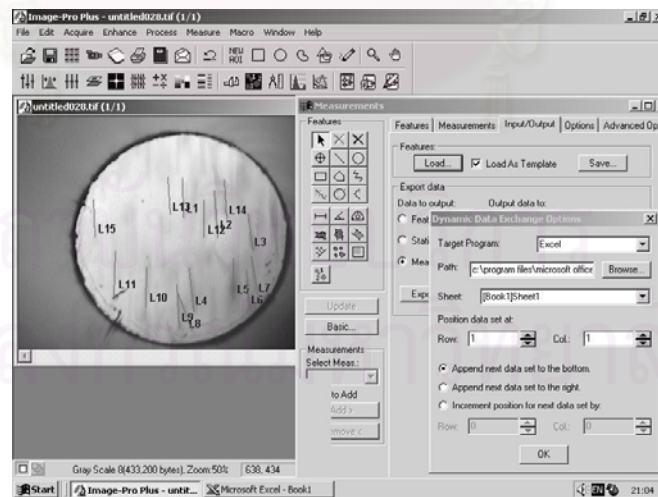
รูปที่ 3.17 การเปิดไฟล์ภาพพร้อมทั้งเลือกไฟล์ calibrate และการเลือกฟังก์ชันความยาว

2. ภาพที่บันทึกไว้มีลักษณะเป็นเส้นของอนุภาค ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง แล้วลากเส้นความยาวของอนุภาคที่เคลื่อนที่ จากนั้นโปรแกรมจะแสดงความยาวของแต่ละเส้น ดังแสดงในรูป 3.18



รูปที่ 3.18 การลากเส้นการเคลื่อนที่ของอนุภาค

3. ทำการส่งข้อมูลความยาวที่ได้ไปยังโปรแกรม Excel ดังแสดงในรูป 3.19 โดยข้อมูลจะไปปรากฏในไฟล์ Excel ดังแสดงในรูป 3.20 แล้วทำการบันทึกเก็บไว้เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณต่อไป



รูปที่ 3.19 การส่งข้อมูลไปยัง Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		Features	Measurment	Value	Nominal V	Min. Tol.	Max. Tol.	Pass / Fail				
2	1	L1	Length	2.227737	2.227737	-0.001	0.001	Pass				
3	2	L2	Length	2.687974	2.687974	-0.001	0.001	Pass				
4	3	L3	Length	2.063556	2.063556	-0.001	0.001	Pass				
5	4	L4	Length	2.46965	2.46965	-0.001	0.001	Pass				
6	5	L5	Length	2.318182	2.318182	-0.001	0.001	Pass				
7	6	L6	Length	2.186075	2.186075	-0.001	0.001	Pass				
8	7	L7	Length	2.354001	2.354001	-0.001	0.001	Pass				
9	8	L8	Length	2.229127	2.229127	-0.001	0.001	Pass				
10	9	L9	Length	2.45833	2.45833	-0.001	0.001	Pass				
11	10	L10	Length	2.227737	2.227737	-0.001	0.001	Pass				
12	11	L11	Length	2.547077	2.547077	-0.001	0.001	Pass				
13	12	L12	Length	2.090909	2.090909	-0.001	0.001	Pass				
14		average		2.321696								

รูปที่ 3.20 ข้อมูลที่ปรากฏในไฟล์ Excel

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

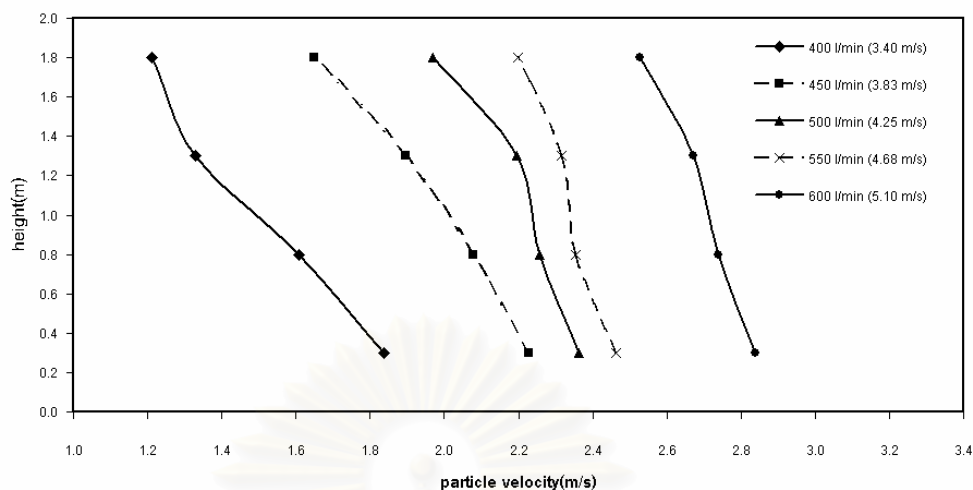
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการเคลื่อนตัวของอนุภาคในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนด้านไรเซอร์ โดยจะศึกษาถึงผลของขนาดอนุภาค และอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อความดัน สัดส่วนอนุภาค และความเร็วของอนุภาคตามความสูงของไรเซอร์ ซึ่งผลของความดันที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาหาสัดส่วนของอนุภาคโดยประมาณ ส่วนความเร็วของอนุภาคสามารถคำนวณจากความยาวของเส้นที่อนุภาคเคลื่อนที่ไป จากการบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD และนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus V.4.5.1

4.1 ผลการทดลองของความเร็วอนุภาค

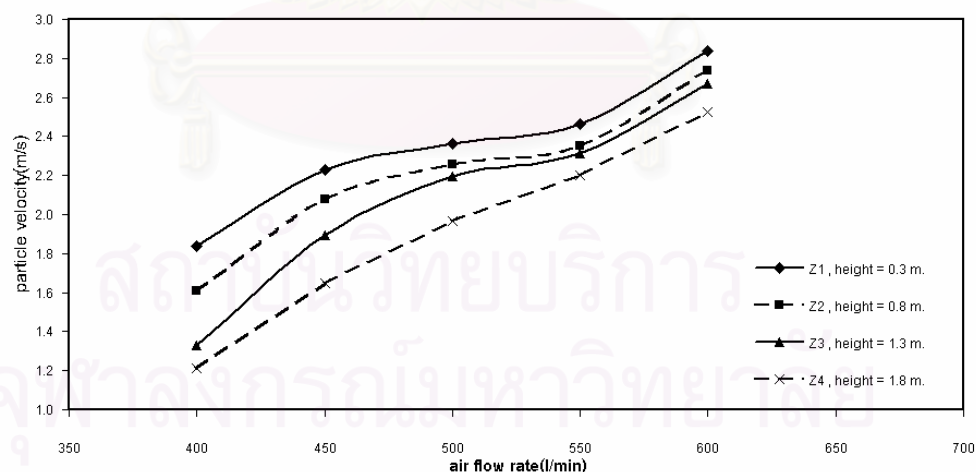
จากข้อมูลการทดลองวัดความเร็วของอนุภาคถ่านหินขนาด $400\ \mu\text{m}$ ที่ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของไรเซอร์ (ตาราง ค.5) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอนุภาคกับความสูง ณ ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ดังแสดงในรูป 4.1 เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของอากาศเท่ากับ $400\ \text{l/min}$. พบว่าความเร็วของอนุภาคจะมีค่าลดลง เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเป็น $450\ 500\ 550$ และ $600\ \text{l/min}$. จะได้แนวโน้มความสัมพันธ์ของความเร็วอนุภาคและความสูงเช่นเดียวกันทุกอัตราการไหลของอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากอากาศที่เป็นตัวกลางทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาค เกิดการสูญเสียความเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านชั้นอนุภาค (bed) ทำให้ความเร็วของอากาศค่อยๆลดลง ส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่ช้าลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นบริเวณด้านบนของไรเซอร์อนุภาคจึงเคลื่อนที่ช้ากว่าด้านล่าง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Zevenhoven R.(1999)⁽¹¹⁾ ซึ่งจากการทดลองที่ได้ก็พบว่า เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วของอนุภาคจะลดลง และเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ความเร็วของอนุภาคจะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของความเร็วอนุภาคในช่วงที่อัตราการไหลอากาศน้อยๆมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับอัตราการไหลอากาศมากๆ ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคที่ใช้ในการทดลองเป็นของผสมของถ่านหินช่วงขนาดต่างๆ ที่มีทั้งขนาดใหญ่และเล็ก (ตาราง ก.2) เมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่าน้อยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีอัตราการลดความเร็วมากจนไม่สามารถหลุดออกจากไรเซอร์ และเนื่องจากภาพที่บันทึกได้จะสามารถเห็นเส้นการเคลื่อนที่ไปของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ได้ชัดเจนกว่า ดังนั้นความเร็วที่ได้จากการวัดเส้นที่บันทึกภาพของอนุภาคจึงเป็นเส้นของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่มีความเร็วลดลงมาก และเมื่ออัตราการไหลอากาศมากๆ อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ด้วยความเร็วที่ค่อนข้างคงที่มากกว่า จึงทำให้ความเร็วของอนุภาคที่วัดได้เปลี่ยนแปลงน้อย



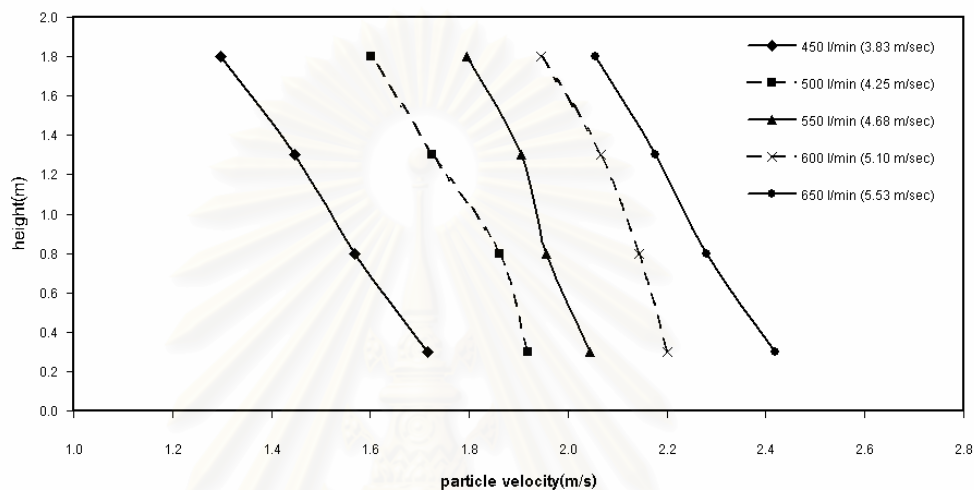
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของถ่านหินกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับถ่านหินขนาด 400 μm .

จากรูป 4.2 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วของอนุภาค เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งความสูงเดียวกัน พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ความเร็วของอนุภาคก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราการป้อนอากาศทำให้ความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น จึงสามารถพาอนุภาคถ่านหินเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

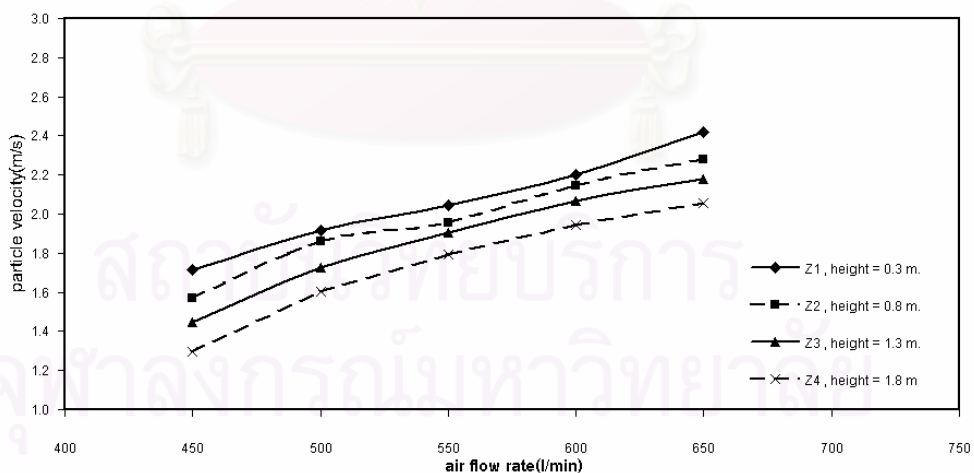


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วของถ่านหิน ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับถ่านหินขนาด 400 μm .

จากข้อมูลการทดลอง เมื่อถ่านหินมีขนาด 600 800 และ 1000 μm . พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคถ่านหินกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับอนุภาคถ่านหินขนาด 400 μm . คือความเร็วของอนุภาคถ่านหินจะลดลง เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4.3 4.5 และ 4.7 และพบว่าอัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคถ่านหินมีความเร็วเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4.4 4.6 และ 4.8

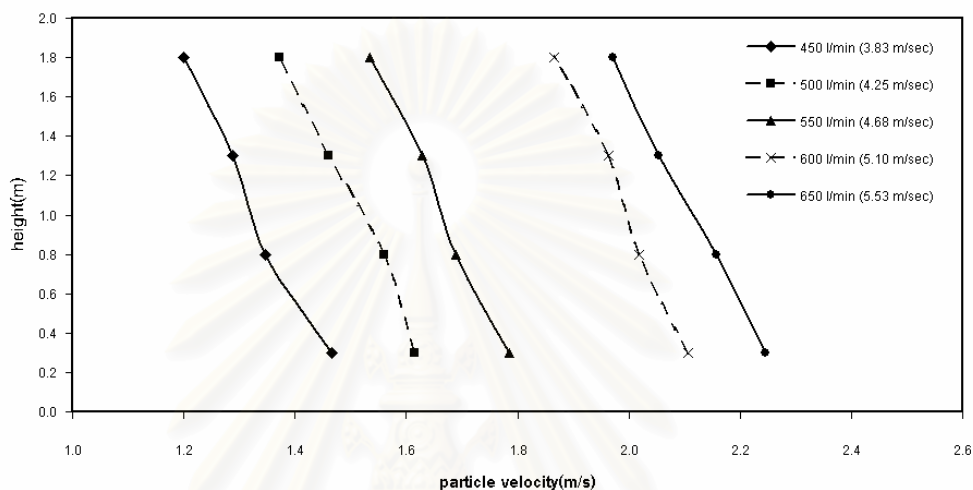


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของถ่านหินกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับถ่านหินขนาด 600 μm .

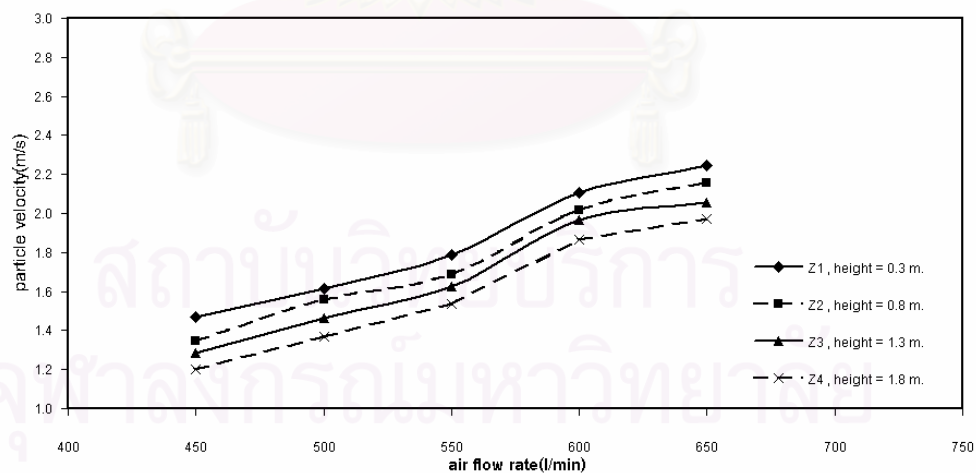


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วของถ่านหิน ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับถ่านหินขนาด 600 μm .

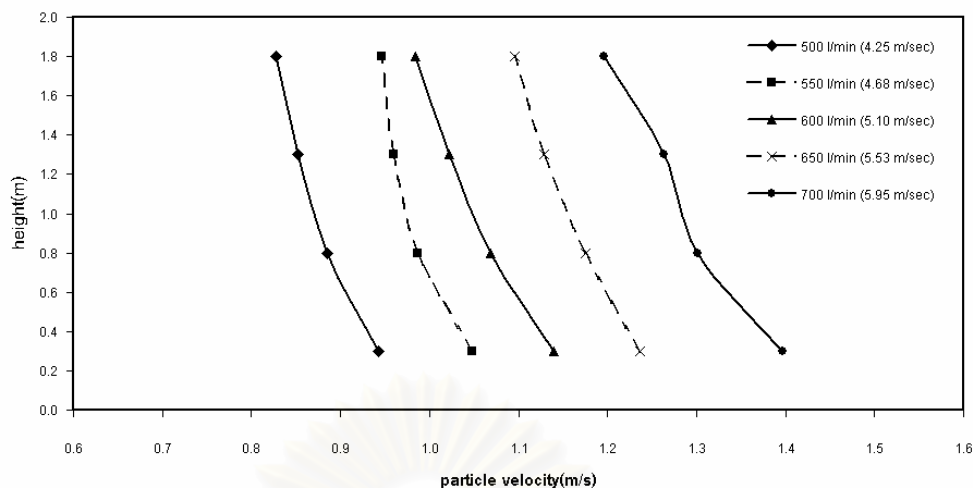
จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอนุภาคค่อนข้างคงที่ เมื่ออัตราการไหลของอากาศมีค่ามากและน้อยซึ่งแตกต่างจากรูปที่ 4.1 ทั้งนี้เพราะการกระจายตัวของอนุภาคที่ใช้ในการทดลองขนาด $800 \mu\text{m}$. ส่วนมากเป็นขนาดใหญ่ จึงทำให้ภาพที่บันทึกบริเวณด้านบนและด้านล่างเป็นภาพของอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกันทุกอัตราการไหลของอากาศ ดังนั้นความชันที่อัตราการไหลต่างๆจึงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก



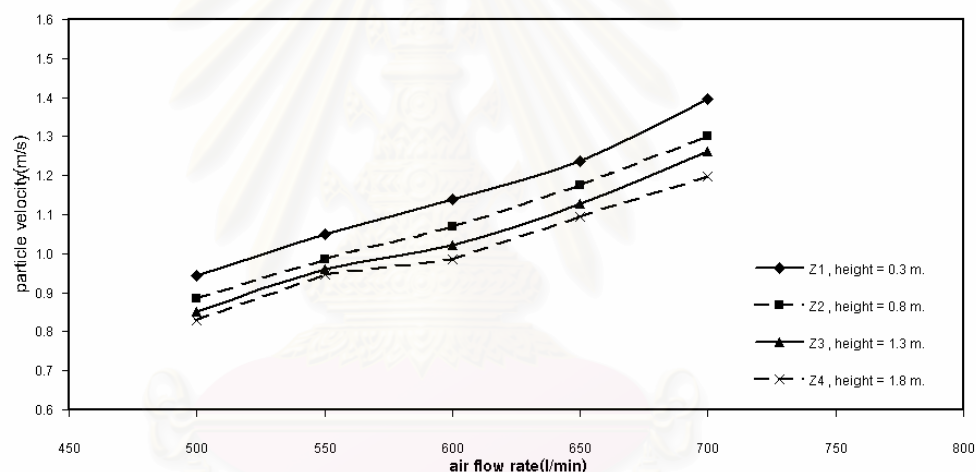
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของถ่านหินกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับถ่านหินขนาด $800 \mu\text{m}$.



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วของถ่านหิน ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์สำหรับถ่านหินขนาด $800 \mu\text{m}$.

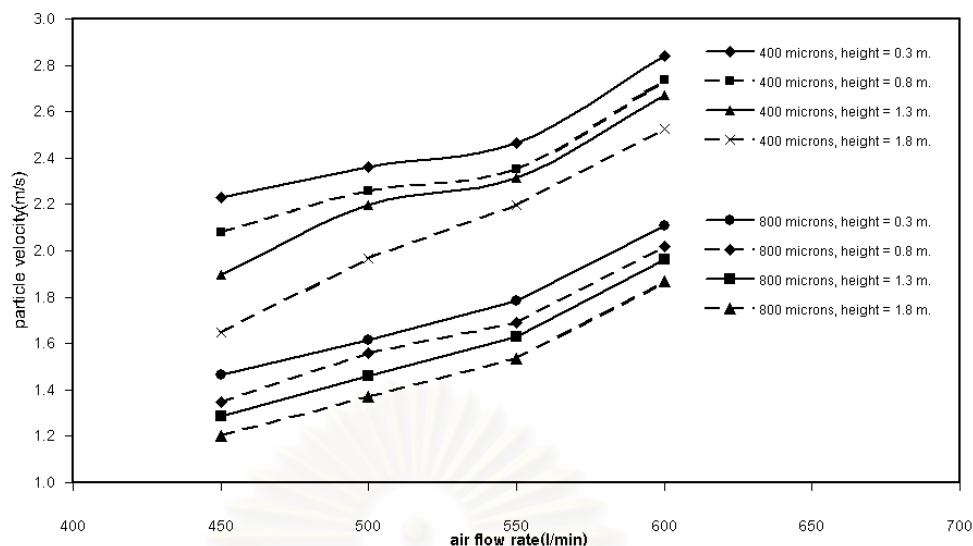


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของถ่านหินกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับถ่านหินขนาด $1000 \mu\text{m}$.



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วของถ่านหิน ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับถ่านหินขนาด $1000 \mu\text{m}$.

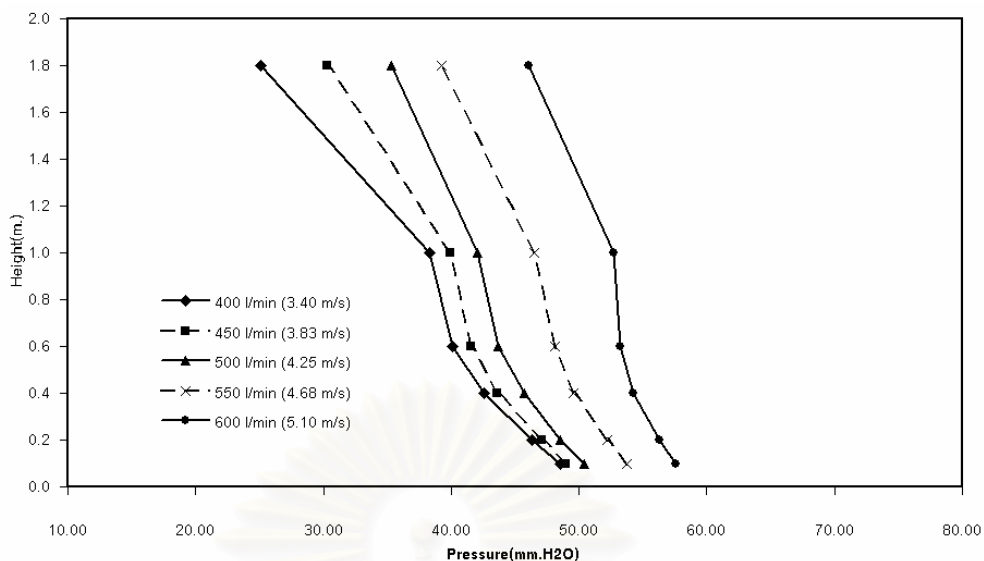
จากรูปที่ 4.9 เมื่อพิจารณาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อความเร็วของอนุภาค พบว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วของอนุภาคจะลดลง ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการทดลองของ Weinell C.E.(1997)⁽⁷⁾ และคณะ อนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือ ทราบ ขนาด 0.15mm . มีความหนาแน่น 2.6 g/cm^3 โดยใช้เทคนิค radioactive tracer ในการหาความเร็วอนุภาค พบว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วของอนุภาคจะลดลง



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศกับความเร็วยกานหิน ณ ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ เปรียบเทียบขนาดกานหินขนาด 400 และ 800 μm .

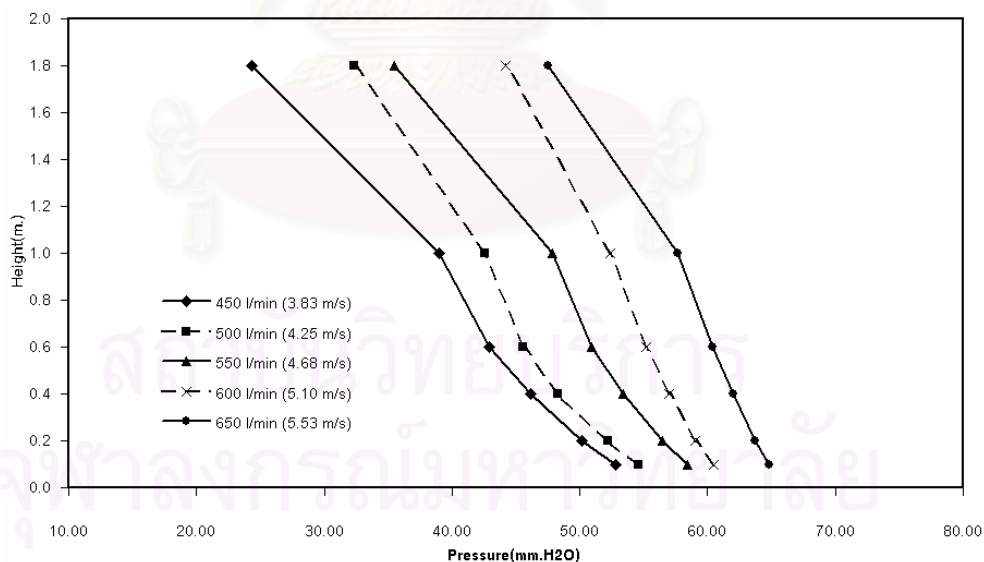
4.2 ผลการทดลองของของความดัน

จากข้อมูลการทดลองวัดความดัน ณ ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับอนุภาคกานหินขนาด 400 μm . (ตาราง ก.26) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูงกานหิน ณ ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ ดังแสดงในรูป 4.10 พบว่าความดันในระบบจะมีค่าลดลงตามความสูงของโรเตอร์และเมื่อพิจารณาถึงความดันลด (pressure drop) คร่อมจุดต่างๆ ได้แก่ ΔP_{1-2} ΔP_{2-3} ΔP_{3-4} ΔP_{4-5} และ ΔP_{5-6} พบว่า ΔP_{1-2} ΔP_{2-3} ΔP_{3-4} และ ΔP_{4-5} (ตารางภาคผนวก ค.9) จะมีความดันลดน้อยลงดังจะเห็นได้จากความชันของกราฟในแต่ละช่วงจะเพิ่มขึ้น แสดงว่าบริเวณด้านล่างของโรเตอร์มีอนุภาคกระจายตัวอยู่อย่างหนาแน่นและค่อยๆเบาบางลง เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาการประพฤติตัวของอนุภาคและแก๊สในโรเตอร์และท่อป้อนกลับของ Zhang H.(2001)⁽¹⁶⁾ โดยใช้ FCC Catalyst ขนาด 67 μm . มีความหนาแน่น 1500 kg/m^3 พบว่า pressure gradient ภายในโรเตอร์มีค่าเป็นลบเสมอ นั่นคือความดันบริเวณด้านบนจะมีค่าน้อยกว่าด้านล่าง เพราะอากาศมีการสูญเสียความดัน เนื่องจากการทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่และกระจายตัว ดังนั้นอนุภาคจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความดันสูงไปบริเวณที่มีความดันต่ำ โดยที่ความดันลดจะมีค่าลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ยกเว้น ΔP_{5-6} จะมีค่ามากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งขัดแย้งกับงานวิจัยข้างต้น ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณด้านบนของโรเตอร์ซึ่งเป็นตำแหน่ง P_6 จะมีอนุภาคอยู่อย่างหนาแน่น เพราะเป็นบริเวณที่อนุภาคมาสะสมกันก่อนที่จะเคลื่อนตัวออกจากโรเตอร์ไปยังท่อป้อนกลับจึงทำให้ความดันลดบริเวณดังกล่าวมีค่าสูง

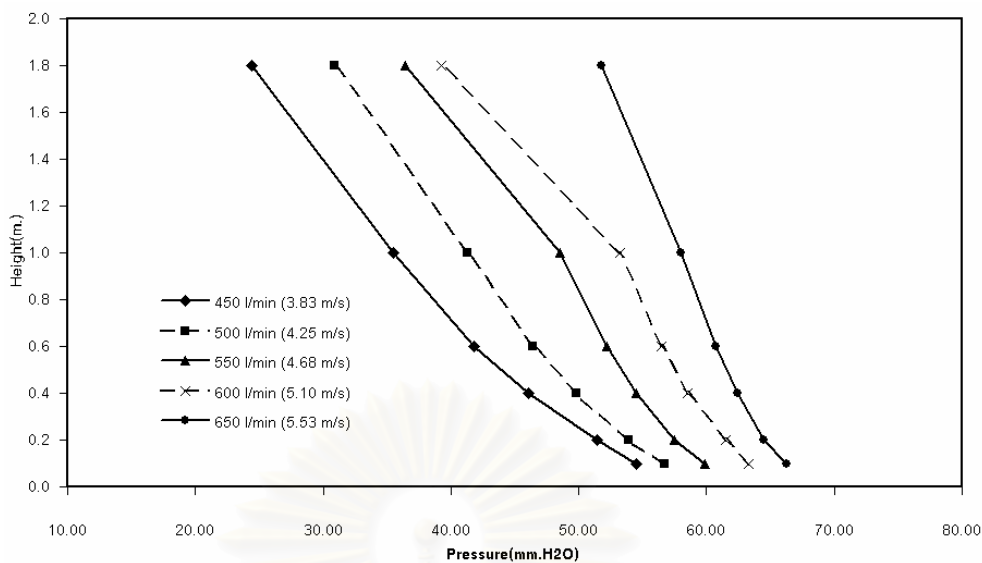


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเซออร์ สำหรับถ่านหินขนาด 400 μm .

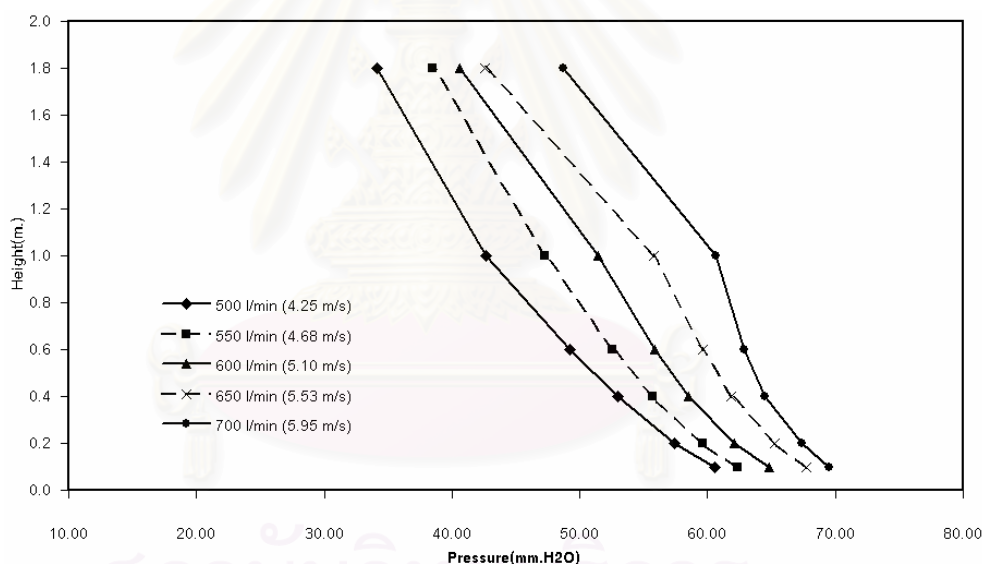
จากข้อมูลการทดลอง เมื่อถ่านหินมีขนาด 600 800 และ 1000 μm .พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเซออร์ มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับอนุภาคถ่านหินขนาด 400 μm . คือความดันของอนุภาคถ่านหินจะลดลง เมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4.11 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเซออร์ สำหรับถ่านหินขนาด 600 μm .



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของโรเซอ์ สำหรับถ่านหินขนาด 800 μm.



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆ ของโรเซอ์ สำหรับถ่านหินขนาด 1000 μm.

4.3 ผลการทดลองของสัดส่วนอนุภาค

จากข้อมูลการทดลองวัดความดัน ณ.ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของโรเซอ์ (ตาราง ก.84 ตาราง ก.85 ตาราง ก.86 และตาราง ก.87) สามารถนำมาคำนวณหาสัดส่วนของอนุภาคได้ โดยใช้การคำนวณตามความสัมพันธ์

$$\Delta P = \rho_s \epsilon_s g h$$

เมื่อ ΔP - ความดันลดคร่อมจุด

ε_s – สัดส่วนของอนุภาค

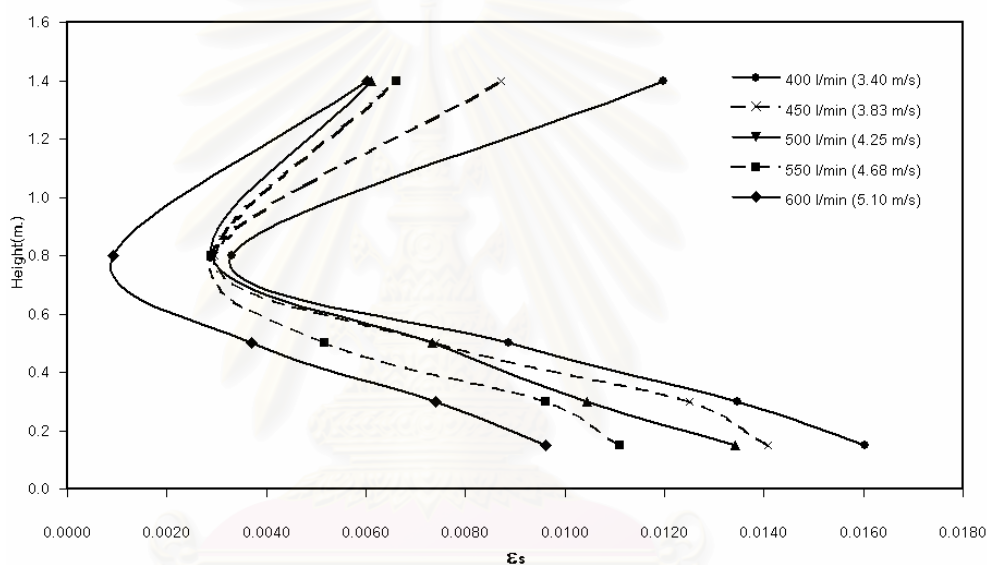
ρ_s – ความหนาแน่นของถ่านหิน

g – แรงโน้มถ่วงของโลก

h – ระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด

จะได้ผลการคำนวณสัดส่วนอนุภาค ณ ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของโรเตอร์ ของอนุภาค ถ่านหินขนาด 400 600 800 และ 1000 μm . ดังแสดงในตาราง ค.9 ตาราง ค.10 ตาราง ค.11 ตาราง ค.12 ตามลำดับ

สำหรับอนุภาคถ่านหินขนาด 400 μm . เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนอนุภาคกับความสูง จะได้กราฟดังรูป 4.14



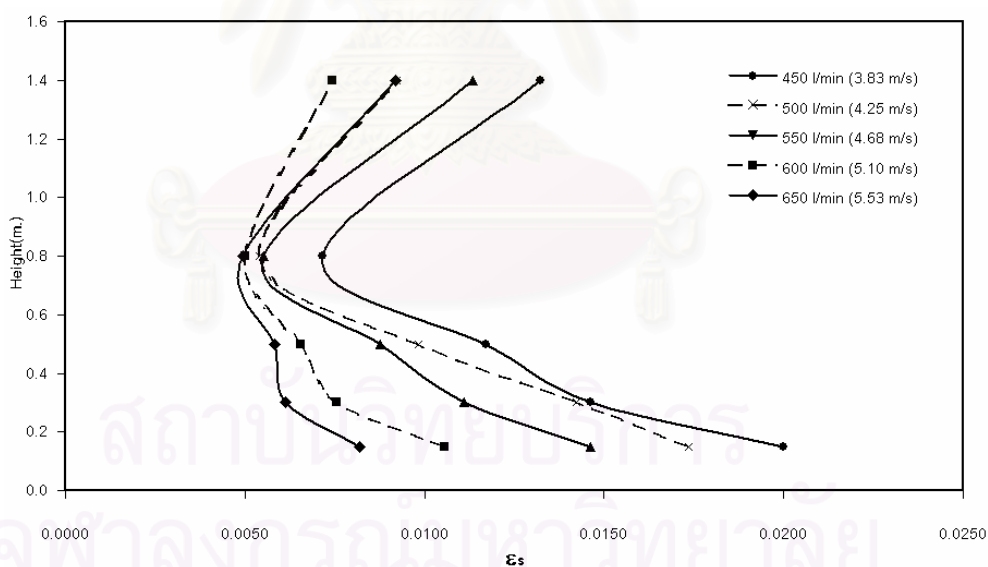
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของอนุภาคกับความสูง ณ ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ สำหรับถ่านหินขนาด 400 μm .

จากกราฟ เมื่อพิจารณาที่อัตราการไหลของอากาศค่าหนึ่ง จะเห็นว่าสัดส่วนของอนุภาคในช่วงความสูงตั้งแต่ P_1 - P_5 จะมีค่าลดลงตามความสูงของโรเตอร์ นั่นคือบริเวณด้านล่างของโรเตอร์จะมีความหนาแน่นของอนุภาคสูง และค่อยๆลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ยกเว้นบริเวณช่วงบนสุด P_5 - P_6 สัดส่วนของอนุภาคกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะบริเวณบนสุดของคอลัมน์มีอนุภาคมาสะสมอยู่อย่างหนาแน่น และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ พบว่าแนวโน้มของสัดส่วนอนุภาคกับความสูงเป็นเช่นเดิม ในขณะที่ตำแหน่งความสูงเดียวกัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ จะทำให้สัดส่วนอนุภาคลดลง

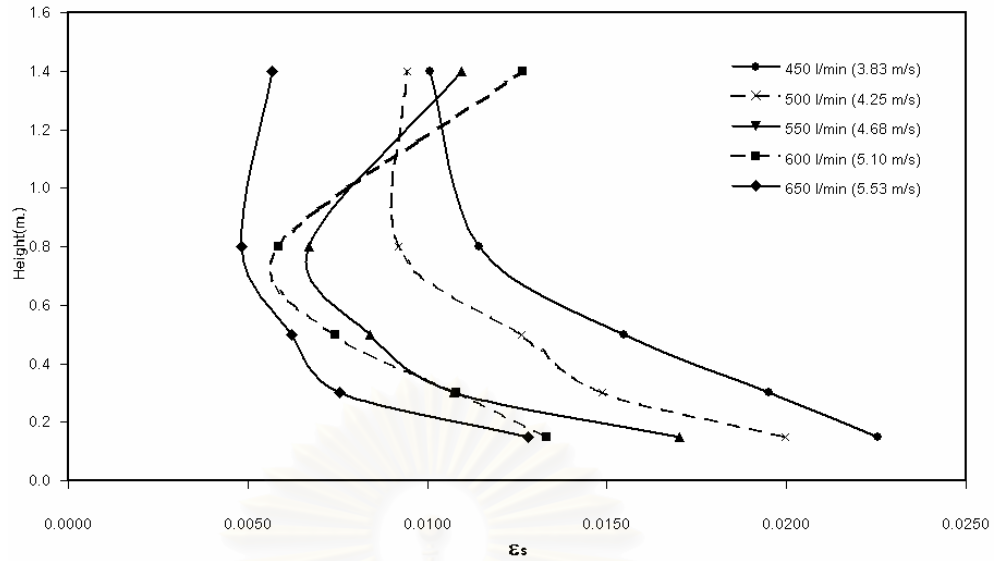
จากการศึกษาของ Cheng Y.(1998)⁽¹⁷⁾ และคณะ ได้ทำการศึกษาสัดส่วนของช่องว่างในโรเตอร์โดยอนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือ FCC catalyst ขนาด 54 μm . มีความหนาแน่น 1545 kg/m^3 และได้ทำการวัดสัดส่วนของช่องว่างโดยเทคนิค optical density probe พบว่าสัดส่วนของ

อนุภาคจะลดลงตามความสูง เช่นเดียวกันกับการศึกษาของ Matellone M.L. ซึ่งได้ศึกษาถึงสัดส่วนของช่องว่างในโรเซอร์ โดยอนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือ ททราย และ FCC catalyst ขนาด 310 และ 70 μm . มีความหนาแน่น 2600 และ 1770 kg/m^3 ตามลำดับ ซึ่งก็พบว่าสัดส่วนของอนุภาคจะลดลงตามความสูงเช่นเดียวกัน และพบว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นการกระจายตัวตามแนวแกนตลอดความสูงของโรเซอร์จะไม่มี ความแตกต่างกันมากนัก ซึ่งเมื่อนำผลการทดลองที่ได้มาเทียบกับงานวิจัยดังกล่าว พบว่าสัดส่วนอนุภาคจะลดลงตามความสูงของโรเซอร์ในช่วง P_1 - P_5 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Cheng Y. และ Matellone M.L. ยกเว้นบริเวณด้านบนของโรเซอร์ (P_5 - P_6) สัดส่วนอนุภาคกลับเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับงานวิจัย Cheng Y. และ Matellone M.L. ทั้งนี้เนื่องจากเป็นลักษณะเฉพาะของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดของทางออกโรเซอร์ไปยังไซโคลอนมีขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคที่บริเวณด้านบนมาก

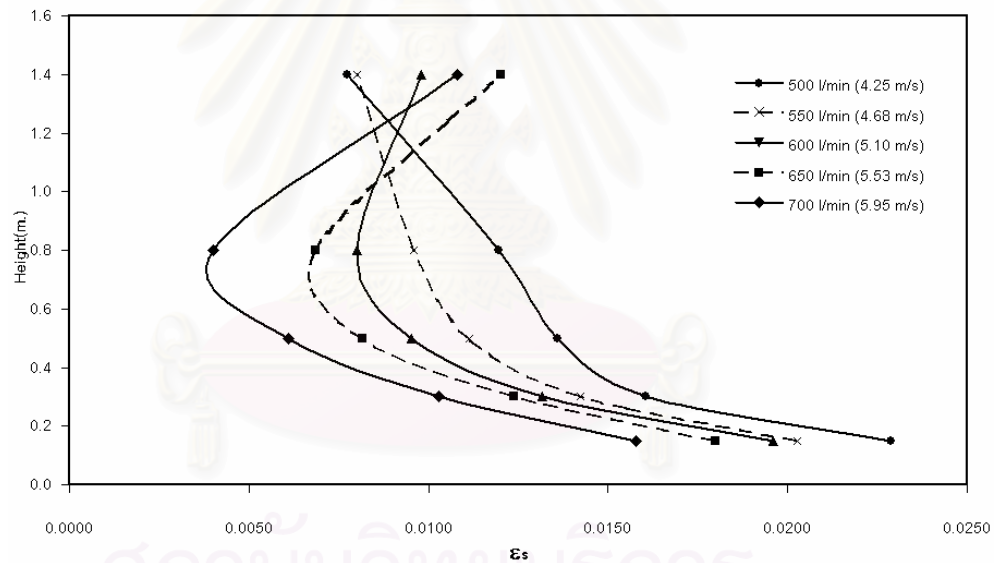
สำหรับอนุภาคถ่านหินขนาด 600 800 และ 1000 μm . ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนอนุภาคกับความสูงที่อัตราการไหลของอากาศต่างๆ จะได้แนวโน้มเช่นเดียวกับอนุภาคถ่านหินขนาด 400 μm . คือ สัดส่วนอนุภาคจะค่อยๆลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ สัดส่วนอนุภาคจะค่อยๆลดลง ณ.ตำแหน่งความสูงเดียวกัน



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของอนุภาคกับความสูง ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเซอร์ สำหรับถ่านหินขนาด 600 μm .



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของอนุภาคกับความสูง ณ ตำแหน่งต่างๆ
ของโรเตอร์ สำหรับถ่านหินขนาด $800 \mu\text{m}$.



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของอนุภาคกับความสูง ณ ตำแหน่งต่างๆ
ของโรเตอร์ สำหรับถ่านหินขนาด $1000 \mu\text{m}$.

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 จะเห็นว่าที่อัตราการไหลอากาศน้อยๆ (450-550 l/min.) สัดส่วนของอนุภาคที่บริเวณด้านบนน้อยลง ซึ่งหมายความว่าไม่มีการสะสมของอนุภาคบริเวณด้านบน ทั้งนี้ อาจเนื่องจากเป็นช่วงความเร็วที่ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากโรเตอร์ได้พอดี ไม่มีการเคลื่อนที่หมุนวนและสะสมอยู่บริเวณดังกล่าว

4.4 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น⁽²⁰⁾

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาความเร็วของอนุภาคในไอเซออร์ เมื่อขนาดของอนุภาค อัตราการไหลของอากาศ และความสูงเหนือตัวกระจายอากาศเปลี่ยนแปลงไป จึงนำข้อมูลจากการทดลองมาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น

4.4.1 กำหนดตัวแปรหลักและตั้งสมมติฐาน

ตัวแปรหลักมีดังนี้

S คือ ขนาดของอนุภาค

Q คือ อัตราการไหลของอากาศ

H คือ ความสูงเหนือตัวกระจายอากาศ

สมมติฐานที่เป็นไปได้ คือ

H_0 : ตัวแปรหลักทุกตัวไม่มีผลต่อความเร็วของอนุภาค

H_1 : ตัวแปรหลักบางตัวมีผลต่อความเร็วของอนุภาค

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถทำได้โดย

- 1) พิจารณาว่าตัวแปรหลักใดมีความสัมพันธ์กับความเร็วอนุภาค
- 2) นำตัวแปรหลักนั้นมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

4.4.2 การทดสอบค่าสถิติ (T-test) และความน่าจะเป็น (P-value) ของตัวทดสอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.1 (90%) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป excel

ตารางที่ 4.1 แสดงการกำหนดเครื่องหมายทางพีชคณิตสำหรับการคำนวณ โดยกำหนดระดับของตัวแปรที่ศึกษา 2 ระดับคือ ระดับต่ำสุดแทนด้วยเครื่องหมาย (-) และระดับสูงสุดแทนด้วยเครื่องหมาย (+)

ตัวแปรหลัก	ค่าต่ำสุด (-)	ค่าสูงสุด (+)
ขนาดของอนุภาค (S)	400 μm	1000 μm
อัตราการไหลของอากาศ (Q)	500 l/min*	600 l/min*
ความสูงเหนือตัวกระจายอากาศ (H)	0.3 m	1.8 m

หมายเหตุ (*) ในการทดลองอัตราการไหลของอากาศจะทดลองในช่วงค่าต่ำสุดและสูงสุดโดยมีค่าอัตราการไหลดังนี้ 400, 450, 500, 550, 600, 650 และ 700 l/min ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของถ่านหิน

ตารางที่ 4.2 การกำหนดเครื่องหมายทางพีชคณิตสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติของปัจจัยต่างๆ

Particle size (S)	Air flow rate (Q)	Height (H)	SQ	SH	QH	Particle velocity (y^*)
-1	-1	-1	1	1	1	2.36307
1	-1	-1	-1	-1	1	0.9426
-1	1	-1	-1	1	-1	2.83887
1	1	-1	1	-1	-1	1.13969
-1	-1	1	1	-1	-1	1.96912
1	-1	1	-1	1	-1	0.8281
-1	1	1	-1	-1	1	2.52763
1	1	1	1	1	1	0.98457

หมายเหตุ : y^* คือ ความเร็วอนุภาคที่ได้จากการทดลอง (ภาคผนวก ค) และเครื่องหมายของอิตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัยหลักมาจากการคูณกันของเครื่องหมายแต่ละปัจจัยหลัก

ค่าความเร็วของอนุภาคในตาราง 4.1 มาจากผลการทดลองที่ภาวะต่างๆ ตัวอย่างเช่น ค่า y^* = 2.36307 มาจากความเร็วของอนุภาคขนาด 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 500 l/min. ความสูงเหนือตัวกระจายอากาศเท่ากับ 0.3 m.

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

	df	SS	MS	ค่า F ที่ได้จากการ	
				คำนวณ	$F_{0.05,6,1}$
Regression	6	4.6518	0.7753	407.78	234*
Residual	1	0.0019	0.0019		
Total	7	4.6537			

หมายเหตุ : $F_{0.05,6,1}$ เปิดได้จากตารางมาตรฐานของการกระจายตัว F โดยมีระดับความเชื่อมั่น 90 % จากตาราง 4.3 พบว่าค่าสถิติ F ที่คำนวณได้ (407.78) ได้มีค่าสูงกว่าค่าสถิติ $F_{0.05,6,1}$ (234) แสดงว่าปฏิเสธสมมุติฐาน H_0 กล่าวคือ ตัวแปรหลักบางตัวมีผลต่อความเร็วของอนุภาคที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.10

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นของความเร็วอนุภาค

	Standard		t Stat	P-value	Lower	Upper	Lower	Upper
	Coefficients	Error			95%	95%	90.0%	90.0%
Intercept	1.6992	0.0154	110.2218	0.0058	1.5033	1.8951	1.6019	1.7965
S	-0.7255	0.0154	-47.0585	0.0135	-0.9213	-0.5296	-0.8228	-0.6281
Q	0.1735	0.0154	11.2533	0.0564	-0.0224	0.3694	0.0761	0.2708
H	-0.1219	0.0154	-7.9041	0.0801	-0.3177	0.0740	-0.2192	-0.0245
SQ	-0.0851	0.0154	-5.5197	0.1141	-0.2810	0.1108	-0.1824	0.0122
SH	0.0544	0.0154	3.5317	0.1757	-0.1414	0.2503	-0.0429	0.1518
QH	0.0053	0.0154	0.3413	0.7906	-0.1906	0.2011	-0.0921	0.1026

จากตาราง 4.4 เมื่อพิจารณาค่า P-value ของตัวแปรหลักพบว่าที่มีค่าน้อยกว่า 0.10 พบว่าตัวแปรหลักที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเร็วของอนุภาค ได้แก่ ขนาดของอนุภาค อัตราการไหลของอากาศ ความสูงเหนือตัวกระจายอากาศ

4.4.3 การสรุปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในที่นี้จะวิเคราะห์จากค่าความน่าจะเป็น โดยเลือกค่าความน่าจะเป็นที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ จากตาราง 4.3 สามารถสรุปตัวแปรที่

นำมาใช้ในสมการพยากรณ์ได้ดังนี้

ตัวแปรหลัก S มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ -0.7255

ตัวแปรหลัก Q มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 0.1735

ตัวแปรหลัก H มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ -0.1219

จุดตัดมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 1.6992

สรุปสมการพยากรณ์ได้ดังนี้ $V = -0.7255S^* + 0.1735Q^* - 0.1219H^* + 1.6992$ (4.1)

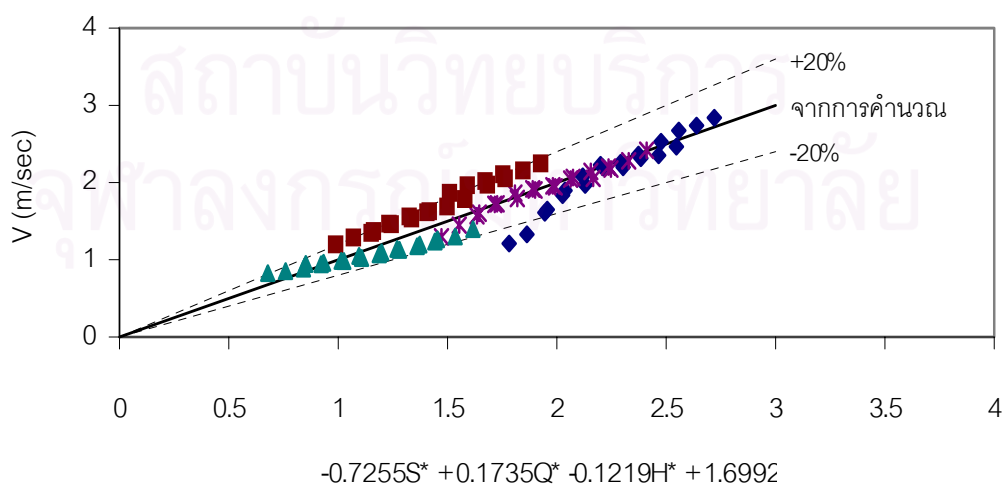
เมื่อ V คือ ความเร็วของอนุภาค

S^* คือ ขนาดอนุภาคที่ผ่านการเข้ารหัส (coding)

Q^* คือ อัตราการไหลของอากาศที่ผ่านการเข้ารหัส (coding)

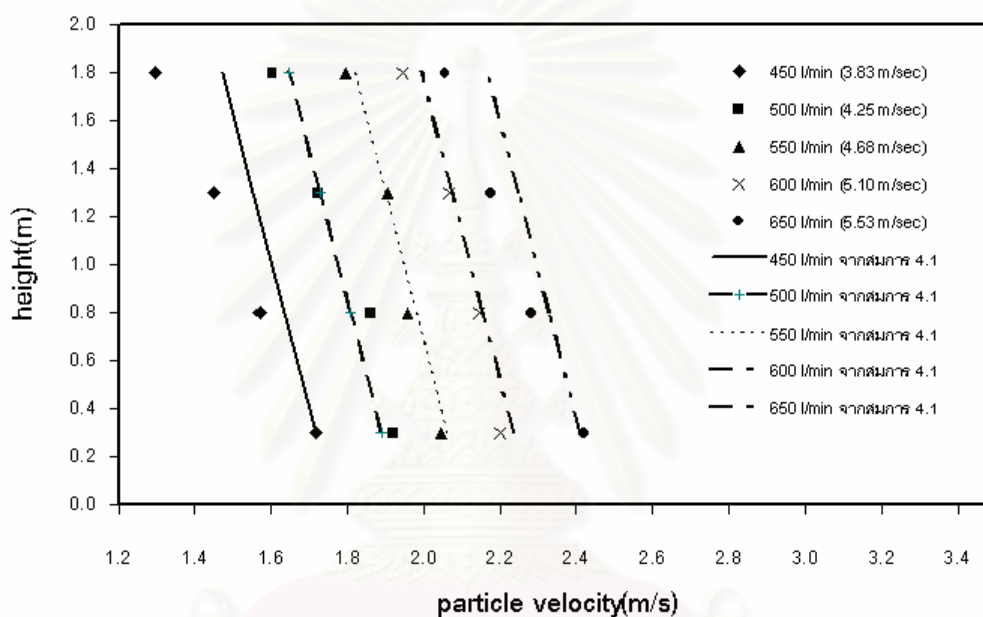
H^* คือ ความสูงเหนือตัวกระจายอากาศที่ผ่านการเข้ารหัส (coding)

นำสมการที่ 4.1 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง V กับ $-0.7255S^* + 0.1735Q^* - 0.1219H^* + 1.6992$ อยู่ในช่วง $\pm 20\%$ ของค่าที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-0.7255S^* + 0.1735Q^* - 0.1219H^* + 1.6992$ กับ V

จากรูปที่ 4.3 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของถ่านหินและความสูง ถ. ตำแหน่งต่างๆ สำหรับถ่านหินที่มีขนาด $600 \mu\text{m}$. เมื่อนำมาแทนค่าในสมการ 4.1 จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความเร็วของอนุภาคจากการทดลองกับที่คำนวณจากสมการ พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง และจะเห็นว่าช่วงอัตราการไหล 500-600 l/min. ค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากเป็นช่วงที่ใช้กำหนดเป็นสมมติฐานในการคำนวณสมการ 4.1



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบความเร็วอนุภาคจากการทดลองกับที่คำนวณจากสมการ สำหรับอนุภาคขนาด $600 \mu\text{m}$.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ความเร็วของอนุภาคจะมีค่าลดลงตามความสูงของโรเตอร์ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศความเร็วของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น
2. ณ.ที่ตำแหน่งเดียวกัน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีความเร็วของอนุภาคน้อยกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก
3. ความดันจะมีค่าลดลงตามความสูงของโรเตอร์ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ ความดันในระบบจะเพิ่มขึ้น
4. สัดส่วนของอนุภาคจะค่อยๆลดลงตามความสูง ยกเว้นบริเวณด้านบนสุดกลับเพิ่มขึ้น
5. ณ.ที่ตำแหน่งเดียวกัน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ สัดส่วนของอนุภาคก็จะน้อยลง
6. จากข้อมูลและผลการทดลองสามารถสร้างสหสัมพันธ์จากการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นได้ดังนี้ $V = -0.7255S^* + 0.1735Q^* - 0.1219H^* + 1.6992$

$$\text{เมื่อ } S^* = (S-700)/300$$

$$Q^* = (Q-550)/50$$

$$H^* = (H-1.05)/0.75$$

โดยที่ S คือขนาดของอนุภาค

Q คืออัตราการไหลของอากาศ

H คือความสูงเหนือตัวกระจายอากาศ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการใช้โปรแกรม Image-Pro Plus เพื่อวัดค่าต่างๆควรเลือกการปรับเทียบ(calibration) ที่ได้ทำไว้แล้ว ก่อนทำการวัดและควรใช้ค่านั้นทุกการทดลอง
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเทียบ ควรมีความละเอียดและถูกต้อง เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ
3. เพื่อให้ภาวะคล้ายกับเตาเผาจริงมากยิ่งขึ้น ควรเพิ่มอากาศป้อนครั้งที่ 2 เข้าไปในระบบ
4. ติดตั้งอุปกรณ์วัดความดัน(Pressure tap) ที่บริเวณเหนือตัวกระจายอากาศ เพื่อให้สามารถนำผลไปใช้จำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้
5. เพื่อแก้ปัญหการสะสมของอนุภาคบริเวณด้านบนของโรเตอร์อาจจะแก้ไขลักษณะเฉพาะของเครื่องโดยเปลี่ยนส่วนทางออกจากโรเตอร์ไปยังไซโคลนเป็นช่องอลด

6. การถ่ายภาพโดยใช้กล้อง CCD และการใช้โปรแกรม Image-Pro Plus ในการวิเคราะห์ความเร็ว มีข้อดีและข้อเสียดังนี้

ข้อดี : สามารถหาความเร็ว ณ ตำแหน่งใดๆได้ โดยความเร็วอนุภาคที่ได้นั้นเป็นความเร็ว ณ ตำแหน่งนั้นเลย ไม่ใช่ความเร็วของอนุภาคในช่วงความสูงระหว่าง 2 ตำแหน่ง

: เป็นวิธีการหาความเร็วอนุภาคที่สะดวก และปลอดภัย

: สามารถบันทึกภาพได้อัตโนมัติ

: สามารถนำข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม Excel เพื่อง่ายต่อการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อเสีย : ในการทดลอง Probe ที่ยื่นเข้าไปในโรเตอร์ เพื่อบันทึกภาพอาจมีขนาดใหญ่เกินไป ทำให้เป็นการรบกวนระบบ

: อนุภาคที่ใช้ในการทดลองต้องมีขนาดเล็กกว่า probe พอสมควร เพื่อที่จะทำการบันทึกการเคลื่อนที่ของอนุภาคเพื่อนำไปหาความเร็ว

: การถ่ายภาพที่เกิดจากการเคลื่อนที่ ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กมากและ สีอ่อนจะทำให้ภาพที่ได้ไม่ชัดเจนเท่าที่ควร

รายการอ้างอิง

1. Kunii, D., and Levenspiel, O. Fluidization Engineering. New York: John Wiley and Sons Inc, 1969.
2. Grace, J. R., Avedan, A. A., and Knowlton, T. M. Circulating Fluidized Beds, London: Chapman & Hall, 1997.
3. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดเซชัน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
4. Basu, P.; and Fraser, S.A. Circulating Fluidized Bed Boiler, Butterworth-Heinemann, 1994.
5. Pham, H. L.; and Bhattacharya, S. C. A study of solid circulation rate in a circulating fluidized bed. International journal of energy research 17 (1993): 479-490.
6. Wei, F.; and Zhu J. Effect of Flow Direction on Axial Solid Dispersion in Gas-solids Cocurrent Upflow and Downflow Systems. The Chemical Engineering Journal 64 (1996): 345-352.
7. Weinell, C. E.; Dam-Johansen, K.; and Johnsson, J. E. Single-particle behavior in circulating fluidized beds. Powder Technology 92 (1997): 241-252.
8. Rhodes, M.J.; Sollaart, M.; and Wang, X. S. Flow structure in a fast fluid bed. Powder Technology 99 (1998): 194-200.
9. Wei, F.; Lin H.; Cheng Y.; Wang Z.; and Jin Y. Profiles of particle velocity and solids fraction in a high-density riser. Powder Technology 100 (1998): 183-189.
10. Mastellone, M.L.; and Arena, U. The Effect of Particle Size and Density on Solids Distribution Along The Riser of a Circulating Fluidized Bed. Chemical Engineering Science 54 (1999): 5383-5391.
11. Zevenhoven, R.; Kohlmann, J.; and Laukkanen, T. Near-wall particle velocity and concentration measurements in circulating fluidized beds. 15th International conference on fluidized bed May (1999)
12. Smolders, K.; and Baeyens, J. Overall Solids Movement and Solids Residence Time Distribution in a CFB-riser. Chemical Engineering Science 55(2000): 4104 – 4116.

13. Namkung, W.; and Kim, S.D. Radial Gas Mixing in Circulating Fluidized Bed. Powder technology, 113 (2000): 23-29.
14. Rhodes, M.J. Introduction to Particle technology. John Wiley & Sons, 1998
15. Kunii, D.; and Levenspiel, O. Circulating fluidized-bed reactors. Chemical Engineering Science 52 (1997): 2471-2482.
16. Cheng, Y.; Wei, F.; and Yang, G. Inlet and Outlet effects on flow patterns in gas-solid risers. Powder technology 98 (1998): 151-156.
17. Ball, J. S.; and Zhu, J.X. A preliminary study into the local solids fluxes in a downer reactor. Powder Technology 114 (2001): 96-101.
18. Zhang, H.; Huang, W. X.; and Zhu, J. X. Gas-solids flow behavior : CFB riser vs. downer. AIChE Journal 47 (2001): 2000-2011.
19. เชิดชัย วุฒิการณั และ เกรียงไกร ตั้งสกุล. การออกแบบสร้างเพื่อศึกษาการทำงานของฟลูอิดไรเซอร์แบบชนิดหมุนเวียน วิทยานิพนธ์ปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2533.
20. ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลการวิเคราะห์หสมบัติถ่านหิน

- การหาความหนาแน่นบัลค์ และความหนาแน่นของถ่านหิน

วิธีการทดลอง

- 1) เตรียมปิกเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร ชั่งและบันทึกน้ำหนักปิกเกอร์
- 2) ใส่ถ่านหินลงในปิกเกอร์ดังกล่าวให้ได้ระดับ 500 มิลลิลิตร ชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- 3) นำปิกเกอร์ที่บรรจุถ่านหินแล้วมาแทนที่อากาศด้วยน้ำ โดยการเติมน้ำลงไปจนกระทั่งถ่านหินและน้ำ ได้ระดับ 500 มิลลิลิตรพอดี และไม่มีฟองอากาศอยู่ภายใน ชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- 4) ทำซ้ำข้อ 1-3 อีก 3 ครั้ง

ข้อมูลที่ได้จากวิธีการทดลองข้างต้น มีดังนี้

ตาราง ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ความหนาแน่นบัลค์ และความหนาแน่นของถ่านหิน

ครั้งที่	น้ำหนัก(กรัม)		
	ปิกเกอร์	ปิกเกอร์ + ถ่านหิน	ปิกเกอร์ + ถ่านหิน + น้ำ
1	241	578.2	833.6
2	241	578.5	833.1
3	241	580.1	834.7

2. ข้อมูลขนาดของถ่านหินที่ใช้ในการทดลอง

2.1. ก่อนการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงถ่านหินขนาดต่าง ๆ ได้แก่ 400 600 800 และ 1000 μm . ซึ่งขนาดอนุภาคเฉลี่ยจริงมีค่าเท่ากับ 404 599 799 และ 991 μm . ตามลำดับ โดยแต่ละขนาดของถ่านหินจะใช้ปริมาณถ่านหิน 2 กิโลกรัม ทุกๆการทดลอง โดยการกระจายสัดส่วนโดยน้ำหนักของถ่านหินแต่ละขนาดในแต่ละช่วงแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตาราง ก.2 ปริมาณของถ่านหินในแต่ละช่วงก่อนทำการทดลอง
สำหรับถ่านหินขนาด 400 600 800 และ1000 μm .

ช่วงขนาดถ่านหิน (μm .)	น้ำหนักของถ่านหิน (g)			
	ขนาด 400 μm .	ขนาด 600 μm .	ขนาด 800 μm .	ขนาด 1000 μm .
300-425	1400	67	20	7
425-500	300	133	133	10
500-600	133	1000	47	10
600-850	100	667	1067	40
850-1180	67	133	833	1933

2.2 หลังการทดลอง

เมื่อทำการทดลองเสร็จเรียบร้อยแล้ว หลังการทดลองจะนำถ่านหินที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ออกมาคัดแยกขนาดอีกครั้ง เพื่อทราบถึงสัดส่วนโดยน้ำหนักของถ่านหินในแต่ละช่วงว่ามีการเปลี่ยนแปลงเช่นไรแล้วนำไปหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยหลังการทดลอง

ตาราง ก. 3 ปริมาณของถ่านหินในแต่ละช่วงหลังการทดลอง
สำหรับถ่านหินขนาด 400 600 800 และ1000 μm .

ช่วงขนาดถ่านหิน (μm .)	น้ำหนักของถ่านหิน (g)			
	ขนาด 400 μm .	ขนาด 600 μm .	ขนาด 800 μm .	ขนาด 1000 μm .
<300	83	13	51	11
300-425	1312	80	40	15
425-500	291	124	47	11
500-600	121	950	214	22
600-850	107	639	957	187
850-1180	54	127	685	1720

3. การหาอัตราการป้อนกลับของถ่านหินเข้าสู่ไรเซอร์ผ่านแอลวาล์ว

- 3.1 บรรจุกถ่านหินที่ด้านท่อป้อนกลับให้สูงประมาณ 40 ซม.
- 3.2 ถอดแผ่นกระจายอากาศบริเวณด้านล่างไรเซอร์ออก
- 3.3 เปิดวาล์วที่อัตราการเปิดหมายเลข 1 ให้ถ่านหินไหลผ่านแอลวาล์วสู่ไรเซอร์
- 3.4 นำภาชนะมารองรับถ่านหินที่ร่วงลงมาจากไรเซอร์และจับเวลา

3.5 นำถ่านหินที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก

3.6 ทำซ้ำโดยเปลี่ยนเป็นอัตราการเปิดหมายเลข 2 และ 3 ตามลำดับ

ตาราง ก.4 อัตราการป้อนกลับของถ่านหินเข้าสู่โรเตอร์ผ่านแอลวาล์วที่อัตราการเปิดหมายเลขต่าง ๆ

อัตราการเปิด หมายเลข	ครั้งที่	เวลา (sec)	น้ำหนัก (g)	kg/hr	เฉลี่ย
1	1	14.01	40.4	10.38	10.83
	2	7.02	22.0	11.28	
2	1	5.86	93.4	57.38	58.96
	2	5.53	93.0	60.54	
3	1	5.17	162.4	113.08	108.48
	2	3.49	100.7	103.87	

4. การแปลงค่าอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนจากหน่วย l/min เป็นหน่วย m^3/s และเป็นอัตราเร็วอากาศ(Ug)

ตาราง ก.5 การแปลงค่าอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนจากหน่วย l/min เป็นหน่วย m^3/s

และเป็นอัตราเร็วอากาศ(Ug)

l/min	m^3/s	Ug(m/s)
400	0.00667	3.40136
450	0.0075	3.82653
500	0.00833	4.2517
550	0.00917	4.67687
600	0.01	5.10204
650	0.01083	5.52721
700	0.01167	5.95238

5. ข้อมูลจากการทดลอง

5.1 ข้อมูลของความยาวเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคถ่านหิน

5.2 ความดัน

5.1. ข้อมูลของความยาวเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคถ่านหิน

- ถ่านหินขนาด 400 μm .

ตาราง ก.6 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 400 l/min ที่ความสูง 30 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value		
L2	1.523498	L9	1.747731	L8	1.894007	L2	1.749545	L2	2.073558	L10	1.776522	L2	1.844246	L12	1.933223	L7	1.701149	L7	1.935954
L3	1.523498	L10	1.67106	L9	1.752563	L3	1.853393	L3	2.122923	L11	2.06948	L3	1.859655	L13	1.793103	L8	1.887299	L8	1.965752
L4	1.890097	L1	1.8142	L10	1.63267	L4	1.939772	L4	2.068966	L12	1.580031	L4	1.84138	L1	1.703633	L9	1.756779	L9	2.031331
L5	1.79546	L2	1.625533	L12	1.979149	L5	1.517241	L5	1.894007	L13	1.83908	L5	1.706732	L2	1.56389	L10	1.785424	L10	1.756779
L6	1.890097	L3	1.977011	L13	1.885618	L6	1.887299	L6	1.885057	L14	1.977011	L6	1.990332	L3	2.16092	L11	2.16873	L11	1.885618
L7	1.859655	L4	1.798401	L1	1.716929	L7	1.79546	L7	1.585374	L15	2.023511	L7	1.844246	L4	1.80251	L1	1.752563	L12	1.740459
L8	1.587373	L5	1.899023	L2	1.672778	L8	1.749545	L8	1.615096	L1	1.793103	L8	1.965752	L5	1.979149	L2	1.839655		
L9	1.83908	L6	1.749545	L3	1.857753	L9	1.844246	L9	1.79546	L2	1.711062	L9	1.885618	L6	2.022989	L3	1.981817		
L10	1.655811	L7	1.596005	L4	1.96165	L10	1.931034	L10	1.839655	L4	1.461172	L10	2.101406	L7	1.67106	L4	1.885618		
L11	1.762186	L8	1.890097	L5	1.714286	L11	1.793693	L11	1.67106	L5	1.657725	L11	2.16092	L8	2.022989	L5	2.081698		
L12	1.887299	L9	1.885057	L6	2.293637	L12	1.615096	L12	1.79546	L7	1.839655	L12	1.848253	L9	2.230241	L6	1.798401		
L13	1.887299	L10	1.776522	L7	1.963384	L13	1.703633	L13	1.661546	L8	1.985547	L1	1.80251	L10	1.793693	L7	1.79546		
L14	1.752563	L11	1.931582	L8	2.067457	L14	2.031331	L14	1.931034	L9	1.701149	L2	2.1274	L11	1.985547	L8	2.101406		
L15	1.655811	L12	1.731326	L9	1.777919	L1	1.426029	L1	2.260368	L10	1.756779	L3	1.985547	L12	1.752563	L9	1.706732		
L1	1.569292	L13	1.67106	L10	1.813279	L3	1.615096	L2	2.1274	L11	1.703633	L4	2.023511	L13	1.747126	L10	1.931034		
L2	1.885057	L14	1.977546	L11	1.942484	L5	1.887299	L3	2.073558	L12	1.935954	L5	1.905136	L14	1.977011	L11	1.841378		
L3	1.61967	L1	1.885618	L12	1.815154	L6	1.985015	L4	1.563894	L13	1.887299	L6	2.116941	L1	2.022989	L1	2.230241		
L4	1.80251	L2	1.931582	L13	1.952381	L7	1.752563	L5	1.933223	L14	1.611821	L7	2.101406	L2	2.300689	L2	2.022989		
L5	1.756779	L3	1.920056	L14	1.825121	L8	1.907353	L6	1.841378	L15	2.010936	L8	1.981817	L3	2.161409	L3	2.184755		
L6	1.66091	L4	1.701149	L15	2.144973	L9	1.657725	L7	1.985547	L16	1.841378	L9	1.920607	L4	1.887299	L4	1.933223		
L7	1.747731	L5	1.885057	L16	1.690979	L10	1.979149	L8	2.02142	L17	1.996165	L10	2.031331	L5	2.027685	L5	1.996165		
L8	1.844246	L6	1.756779	L1	1.611821	L1	1.798401	L9	1.573999	L1	1.935954	L11	1.477716	L6	2.073558	L6	2.192		

ตาราง ก.7 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 400 l/min ที่ความสูง 80 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	1.334126	L2	1.661546	L5	2.115442	L3	1.317384	L1	1.517938	L13	1.79546	L6	1.426029	L12	1.563218	L10	1.437103
L2	1.431946	L3	1.63267	L6	1.563894	L4	1.611821	L2	1.437103	L14	1.44371	L7	1.853393	L13	1.661546	L11	1.580031
L3	1.112036	L4	1.382372	L7	1.471264	L5	1.563894	L3	1.79546	L15	1.482714	L8	1.65773	L14	1.609195	L1	1.523498
L6	1.398336	L5	1.391517	L8	1.66091	L6	1.609852	L4	1.366995	L1	1.655811	L9	1.563218	L1	1.71661	L2	1.80251
L7	1.706732	L6	1.885618	L9	1.686172	L7	1.701771	L5	1.716612	L2	1.665358	L10	1.686172	L2	1.890097	L3	1.70673
L8	1.428251	L7	1.563894	L10	1.428251	L8	1.655811	L6	1.83908	L3	2.077123	L11	1.749545	L3	1.609852	L4	1.528347
L9	1.38619	L8	1.615096	L11	1.79546	L9	1.471264	L7	1.528347	L4	1.66091	L12	1.703633	L4	1.3365	L5	1.747731
L10	1.665358	L9	1.615096	L12	1.701149	L10	1.701149	L8	1.471264	L5	1.333333	L13	1.609852	L5	1.655811	L6	1.573999
L11	1.517241	L1	1.673588	L1	1.528347	L11	1.426029	L9	1.625533	L6	1.79546	L14	1.665358	L6	1.609195	L7	1.890097
L12	1.517938	L2	1.442975	L2	1.471264	L2	1.569292	L10	1.340449	L7	2.073558	L15	1.673588	L7	1.875501	L8	1.841378
L13	1.345957	L3	1.517938	L3	1.655811	L3	1.749545	L1	1.534558	L8	1.565921	L16	1.768771	L8	1.555763	L9	1.716612
L2	1.655172	L4	1.471983	L4	1.406626	L4	1.844246	L2	1.569292	L9	2.077123	L1	2.116941	L10	1.563894	L10	1.931582
L3	1.609852	L5	1.333333	L5	1.587373	L5	1.706732	L3	1.471264	L10	1.899023	L2	1.762186	L11	1.520025	L11	1.67106
L4	1.747731	L6	1.701771	L6	1.426029	L6	1.650696	L4	1.24223	L11	1.67106	L3	1.425287	L1	1.294724	L12	1.821757
L5	1.747731	L7	1.703633	L7	1.528347	L7	1.426029	L5	1.482714	L12	1.501134	L4	1.920607	L2	1.723371	L13	1.747731
L6	1.61967	L8	1.42751	L8	1.749545	L8	1.569292	L6	1.474135	L13	1.703633	L5	1.785424	L3	1.428251	L1	1.80778
L7	1.655172	L9	1.517241	L9	1.474135	L9	1.756779	L7	1.426029	L14	1.793103	L6	1.749545	L4	1.517241	L2	1.426029
L10	1.520025	L10	1.398336	L10	1.474135	L10	1.334126	L8	1.334126	L1	1.79546	L7	1.703633	L5	1.716612	L3	1.844246
L11	1.762186	L1	1.609852	L11	1.382372	L11	1.3365	L9	1.38619	L2	2.132858	L8	1.37931	L6	1.79546	L4	1.523498
L12	1.382372	L2	1.611821	L12	1.569292	L12	1.569292	L10	1.22682	L3	1.431946	L9	1.614441	L7	1.747731	L5	1.534558
L13	1.706732	L3	1.565921	L13	1.63267	L13	1.474135	L11	1.416361	L4	1.625533	L10	1.63267	L8	1.617058	L6	1.706732
L1	1.67106	L4	1.933223	L2	1.747731	L14	1.551	L12	1.661546	L5	1.520025	L11	1.703633	L9	1.609852	L7	1.749545

ตาราง ก.7 (ต่อ)

Features	Value	Features	Value
L8	1.61967	L1	1.461172
L9	1.66091	L2	1.345957
L10	1.756779	L3	1.425287
L11	1.580031	L4	1.437103
L12	1.655811	L5	1.506054
L13	1.74773	L6	1.426029
L14	1.887299	L7	1.503244
L15	1.747731	L8	1.371626
L16	1.752563	L9	1.380076
L2	1.573999	L10	1.701771
L3	1.844246	L11	1.609852
L5	1.80778	L12	1.54143
L6	1.747731	L13	1.912334
L7	1.565921	L14	1.747731
L8	1.665358	L15	1.580031
L10	1.793103		
L11	1.793693		
L12	1.471983		
L13	1.406626		
L14	1.290636		
L15	1.520025		
L16	1.609852		

ตาราง ก.8 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 400 l/min ที่ความสูง 130 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	1.300426	L2	1.195402	L3	1.249019	L7	1.203334	L3	1.47619	L5	1.111678	L7	1.294724	L9	1.426029
L2	1.020855	L3	1.288177	L4	1.425287	L8	1.294724	L5	1.299747	L6	1.31017	L8	1.254928	L1	1.203334
L3	1.149425	L4	1.482714	L5	1.290636	L9	1.428251	L6	1.495268	L7	1.394027	L9	1.24902	L2	1.428251
L4	1.028077	L5	1.461172	L6	1.383136	L10	1.149425	L7	1.239011	L8	1.099371	L10	1.425287	L3	1.30772
L6	1.249019	L6	1.288177	L7	1.294724	L11	1.290636	L8	1.354425	L9	1.448277	L1	1.440042	L4	1.380076
L7	1.172188	L7	1.471983	L8	1.050451	L1	1.149425	L9	1.340965	L1	1.38619	L2	1.288177	L5	1.217306
L8	0.97532	L8	1.24478	L9	1.426029	L2	1.382372	L10	1.431743	L2	1.149425	L3	1.217306	L6	1.24478
L9	1.153098	L9	1.195402	L10	1.290636	L3	1.3365	L11	1.238095	L3	1.307721	L4	1.625533	L7	1.471983
L10	1.352224	L10	1.288177	L1	1.448277	L4	1.288177	L12	1.334183	L4	1.290636	L5	1.352224	L8	1.290636
L11	1.196286	L1	1.333333	L2	1.429365	L5	1.24478	L13	1.252662	L5	1.164045	L6	1.361572	L9	1.383136
L1	1.195402	L2	1.442975	L3	1.384233	L6	1.382372	L1	1.517938	L6	1.398336	L7	1.520025	L10	1.382372
L2	1.254928	L3	1.294724	L4	1.526783	L7	1.249019	L2	1.287356	L7	1.290636	L8	1.371626		
L3	1.241379	L4	1.520025	L5	1.435697	L9	1.561189	L3	1.164045	L8	1.38619	L9	1.512357		
L4	1.24223	L5	1.572656	L6	1.495268	L2	1.429365	L4	1.3365	L10	1.316581	L10	1.308529		
L5	1.307721	L6	1.353006	L7	1.526783	L3	1.289237	L5	1.38619	L11	1.352224	L1	1.22682		
L6	1.104406	L7	1.241379	L8	1.47619	L4	1.24631	L6	1.241379	L12	1.182065	L2	1.406626		
L7	1.249019	L8	1.37931	L1	1.573999	L5	1.479259	L7	1.195402	L1	1.150344	L3	1.678003		
L8	1.249019	L9	1.517938	L2	1.426029	L6	1.289237	L8	1.496903	L2	1.24478	L4	1.461172		
L10	1.615096	L10	1.334126	L3	1.382372	L8	1.456863	L1	1.526783	L3	1.3365	L5	1.198934		
L11	1.280771	L11	1.528347	L4	1.528347	L9	1.33673	L2	1.354425	L4	1.107273	L6	1.32618		
L12	1.334126	L1	1.196286	L5	1.206842	L10	1.252662	L3	1.328221	L5	1.471264	L7	1.437103		
L1	1.195402	L2	1.471983	L6	1.24478	L1	1.340965	L4	1.205618	L6	1.287356	L8	1.523498		

ตาราง ก.9 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 400 l/min ที่ความสูง 180 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	1.196286	L1	1.193633	L2	1.198934	L1	1.103448	L6	1.157672	L6	1.30043	L2	1.191428	L6	1.118669	L8	1.24223
L2	1.112036	L2	1.307721	L3	1.241379	L2	1.353006	L7	1.288177	L7	1.237969	L3	1.43174	L7	1.198934	L9	1.112036
L3	1.012539	L3	1.198934	L4	1.340449	L4	1.340406	L8	1.262486	L9	1.30043	L4	1.286596	L8	1.21731	L10	1.12714
L4	1.24478	L4	1.149425	L5	1.300426	L4	1.217306	L9	1.300426	L2	1.345957	L5	1.285714	L9	1.153098	L11	1.24478
L5	1.3365	L5	1.104406	L6	1.340449	L5	1.08217	L10	1.24223	L4	1.377777	L6	1.42937	L10	1.150344	L1	1.249019
L6	0.874772	L6	1.198934	L1	1.287356	L6	1.195402	L1	1.149425	L5	1.308529	L7	1.24631	L11	1.249019	L2	1.340449
L7	1.3365	L7	1.103448	L2	1.150344	L7	1.241379	L2	1.24223	L6	1.307721	L8	1.289237	L1	1.23901	L3	1.345957
L8	1.383136	L8	1.203334	L3	1.42751	L8	1.290636	L3	1.107273	L10	1.103448	L1	1.095238	L2	1.095238	L4	1.153098
L9	1.066429	L9	1.334126	L4	1.12714	L1	1.087968	L4	1.195402	L11	1.307721	L2	1.190476	L3	1.205618	L5	1.04844
L10	1.137408	L10	1.195402	L5	1.340449	L2	1.17803	L5	1.066429	L12	1.12714	L3	1.238095	L4	1.340965	L6	1.198934
L1	1.066429	L11	1.196286	L6	1.428251	L3	1.381773	L6	1.011494	L13	1.066429	L4	1.095238	L5	1.431743	L7	1.249019
L2	1.3365	L12	1.172188	L8	1.012539	L4	1.099371	L7	1.150344	L15	1.118669	L5	1.286596	L7	1.381773	L8	1.290636
L3	1.203334	L1	1.178483	L9	1.196286	L5	1.131892	L8	1.254928	L1	1.137408	L6	1.17803	L8	1.260781	L9	1.340449
L4	1.012539	L2	1.290636	L1	1.020855	L6	1.095238	L9	1.150344	L2	1.104406	L7	1.299747	L9	1.190476	L10	1.213828
L5	1.073344	L3	1.241379	L2	1.206842	L7	1.289237	L10	1.24478	L3	1.326977	L8	1.205618	L10	1.158621	L11	1.195402
L6	1.103448	L4	1.334126	L3	1.3365	L8	1.381773	L11	1.290636	L4	1.203334	L9	1.381773	L11	1.095238	L2	1.149425
L7	1.104406	L5	1.264995	L4	1.092861	L9	1.299747	L12	1.249019	L5	1.149425	L10	1.384233	L1	1.196286	L3	1.104406
L8	1.24223	L6	1.25071	L5	1.020855	L10	1.293626	L1	1.249019	L6	1.061462	L1	1.209466	L2	1.073344	L4	1.061462
L9	0.966611	L7	1.288177	L6	1.118669	L1	1.05847	L2	1.262486	L7	1.241379	L2	1.3365	L3	1.334126	L5	1.3365
L10	1.3365	L8	1.198934	L7	1.104406	L2	1.24223	L3	1.24223	L9	1.24223	L3	1.262486	L4	0.966611	L6	1.209466
L11	0.924127	L9	1.241379	L8	1.24478	L4	1.137408	L4	1.198934	L10	1.209466	L4	1.209466	L6	1.294724	L7	1.198934
L12	1.073344	L1	1.334126	L9	1.05847	L5	1.262486	L5	1.092861	L1	1.381773	L5	1.380076	L7	1.198934	L8	1.241379

ตาราง ก.10 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 450 l/min ที่ความสูง 30 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	2.027685	L17	2.397868	L8	1.977011	L7	2.310316	L7	2.004619	L7	2.428571	L4	2.360999	L5	2.224071	L10	2.252874
L2	1.885618	L18	2.184755	L9	2.335795	L8	2.1274	L8	2.34663	L8	2.380952	L5	2.073558	L6	2.300689	L1	2.345278
L3	2.207375	L19	2.245355	L10	2.264105	L9	2.207375	L9	2.392572	L9	2.451341	L6	2.257092	L7	2.390805	L2	1.990332
L4	1.935954	L21	2.168731	L11	2.056154	L10	2.245355	L10	2.165317	L10	2.156044	L7	2.115442	L9	2.69858	L3	2.252874
L5	2.390805	L22	2.437215	L1	2.036008	L11	2.405789	L11	2.493379	L11	2.142857	L8	2.071008	L10	2.119436	L4	2.29931
L7	1.935954	L23	2.398749	L2	2.114943	L1	1.841378	L12	2.254749	L12	2.429038	L9	2.071008	L11	2.440682	L5	2.252874
L8	2.010936	L24	2.1274	L3	2.257092	L3	2.115442	L1	2.401831	L13	2.049833	L11	2.29931	L1	2.348881	L6	2.074577
L9	2.069476	L25	2.093848	L4	2.282702	L4	1.996165	L2	2.401831	L1	2.238095	L12	2.003036	L2	2.260368	L7	2.345278
L10	2.345278	L27	2.254749	L5	2.173113	L5	2.116941	L3	2.39478	L2	2.209031	L1	2.168731	L3	2.493379	L8	2.493379
L12	2.155042	L1	2.302985	L6	2.275746	L6	2.392572	L4	2.419806	L3	2.19513	L2	2.093848	L5	2.348881	L9	2.264572
L1	2.13929	L2	1.931582	L7	2.483184	L7	2.453639	L5	1.985547	L4	2.103878	L3	2.114943	L6	2.168731	L1	2.574713
L2	2.482759	L3	1.887299	L8	2.345278	L8	2.116941	L7	2.1274	L5	2.198742	L4	1.950639	L7	2.483184	L2	2.621093
L3	2.622302	L4	2.074577	L9	2.132858	L9	2.453639	L8	2.218837	L6	2.209031	L5	1.977546	L8	2.206897	L3	1.841378
L4	2.489561	L5	2.275746	L10	2.115442	L12	2.025077	L9	2.100903	L8	2.151306	L6	2.529154	L1	2.218837	L4	2.253343
L5	2.486587	L6	2.116941	L11	2.161409	L14	2.224071	L10	2.257092	L9	2.335276	L7	2.023511	L2	1.977011	L5	2.224071
L6	2.023511	L8	2.302985	L12	2.252874	L15	2.211203	L11	2.2697	L10	2.168628	L8	2.208811	L3	2.16092	L6	2.443712
L7	2.161409	L1	1.885057	L13	2.073558	L1	2.119436	L12	2.161409	L11	2.333819	L9	2.41237	L4	2.119436	L7	2.315343
L8	2.282702	L2	2.165317	L2	2.224071	L2	1.996165	L1	2.677275	L12	2.048173	L10	2.1274	L5	2.35607	L8	2.214546
L13	2.257092	L3	2.207375	L3	2.185722	L3	1.974872	L2	2.108723	L13	2.143386	L1	2.529154	L6	2.254749	L9	2.493379
L14	2.003036	L5	2.275746	L4	2.257092	L4	2.392572	L3	2.582428	L1	2.114943	L2	2.437215	L7	2.214546	L1	2.211203
L15	1.905136	L6	2.161409	L5	2.122923	L5	2.306195	L4	2.414056	L2	2.298851	L3	2.660715	L8	2.401831	L2	1.933223
L16	2.218837	L7	2.392572	L6	2.022989	L6	2.253343	L6	2.429038	L3	2.530407	L4	2.254749	L9	2.35607	L3	2.252874

ตาราง ก.10 (ต่อ)

Features	Value	Features	Value	Features	Value
L4	2.390805	L6	2.101406	L6	2.260368
L5	2.162875	L7	2.264572	L7	2.254749
L6	2.077123	L1	2.253343	L8	2.200181
L7	2.155042	L2	2.29931	L9	2.1274
L8	2.041711	L3	2.344828	L1	1.859583
L9	2.254749	L4	2.165317	L2	2.325546
L10	2.29931	L5	2.543323	L3	2.203378
L1	2.275746	L6	2.211203	L4	2.246186
L2	1.950639	L7	2.302985	L5	2.388559
L3	2.352029	L9	2.348881	L6	2.432769
L4	1.977546	L1	2.438516	L7	2.337702
L5	2.048429	L2	2.302985	L8	2.100103
L6	2.366812	L3	2.484461	L9	2.19513
L7	2.2697	L4	2.162875	L10	2.578474
L8	2.041711	L5	1.990332	L11	2.278759
L9	2.214546	L6	2.035489	L12	2.114629
L10	2.165317	L7	2.264572		
L1	2.437215	L1	2.087275		
L2	2.438516	L2	2.010936		
L3	1.951723	L3	2.532495		
L4	2.119436	L4	2.003036		
L5	2.08322	L5	2.064875		

ตาราง ก.11 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 450 l/min ที่ความสูง 80 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	2.023511	L8	1.887299	L7	2.155042	L4	2.493379	L9	2.022989	L5	2.132858	L8	1.885057	L6	1.875501	L2	1.615096
L2	2.165317	L9	2.071008	L8	1.935954	L5	2.048429	L1	2.027685	L7	2.208811	L9	2.211203	L7	1.933223	L3	1.793693
L3	2.023511	L1	2.208811	L9	2.036008	L7	1.996165	L2	2.391247	L8	2.208811	L10	2.161409	L8	1.933769	L4	2.457943
L4	2.253343	L2	1.979149	L1	2.027685	L8	2.041711	L3	2.003036	L1	2.274817	L11	1.887299	L9	1.785424	L5	1.85111
L5	2.041711	L3	2.025077	L2	1.83908	L11	1.977011	L4	2.207375	L2	2.168731	L12	1.905136	L10	2.237338	L6	2.237338
L6	1.905136	L4	2.206897	L3	2.391247	L12	2.003036	L5	2.165317	L3	2.162875	L13	1.844246	L11	2.115442	L7	2.071008
L7	2.069476	L5	1.859655	L4	2.132858	L1	2.115442	L6	2.025077	L4	2.20929	L1	2.161409	L13	2.391247	L8	2.027685
L8	1.985547	L6	1.8142	L5	2.253343	L2	1.950639	L7	2.165317	L5	2.211203	L2	2.264105	L1	2.345278	L1	1.905136
L1	1.788382	L2	2.132858	L6	1.985547	L3	1.844246	L8	2.114943	L6	2.447601	L3	2.115442	L2	1.79546	L2	2.093848
L2	1.839655	L3	2.116941	L7	2.119436	L6	2.069476	L9	2.025077	L7	1.905136	L4	2.162875	L3	1.83908	L3	1.890097
L3	2.077123	L4	2.366812	L8	2.042228	L7	2.16092	L1	2.069476	L8	2.218837	L5	1.747731	L4	2.39478	L4	1.798401
L4	1.974872	L5	2.168731	L1	2.208811	L8	2.029769	L2	1.933223	L9	2.116941	L6	1.887299	L5	2.192	L5	1.759785
L5	2.025077	L6	2.344828	L2	1.887299	L9	2.168731	L3	2.023511	L10	1.977011	L7	2.352029	L6	2.35607	L6	1.894007
L6	1.931582	L7	2.482759	L3	2.1274	L10	2.027685	L4	1.977011	L11	2.025077	L8	2.027685	L7	2.165317	L7	2.257092
L7	2.208811	L9	1.887299	L4	2.207375	L1	1.920607	L5	1.996165	L12	2.207375	L9	2.093848	L8	1.844246	L8	2.161409
L8	2.031331	L10	1.747731	L5	2.069476	L2	1.844246	L6	1.872117	L1	2.483184	L10	1.629429	L1	2.218837	L10	2.253343
L1	2.031331	L1	2.168731	L6	2.068966	L3	1.867029	L7	2.161409	L2	2.253343	L11	1.839655	L2	2.271097	L11	2.298851
L2	2.208811	L2	2.392572	L7	2.392572	L4	1.990332	L8	2.16092	L3	1.383136	L1	2.162875	L3	2.023511	L1	2.498037
L3	1.94467	L3	2.116941	L8	2.230241	L5	2.254749	L1	1.933223	L4	1.894007	L2	1.798401	L4	2.274817	L2	1.981817
L5	2.257092	L4	2.436782	L1	1.985547	L6	1.935954	L2	2.022989	L5	2.023511	L3	1.839655	L5	2.214546	L3	2.081698
L6	2.168731	L5	2.35607	L2	2.077123	L7	2.119436	L3	2.392572	L6	2.208811	L4	1.859655	L6	2.119436	L5	1.893449
L7	1.974872	L6	2.178457	L3	1.990332	L8	2.185722	L4	2.101406	L7	1.731326	L5	1.981817	L1	1.899023	L6	2.298851

ตาราง ก.11 (ต่อ)

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L7	2.022989	L4	1.996165	L8	2.132858	L1	2.161409
L8	2.260368	L5	1.974872	L9	2.390805	L2	2.29931
L1	2.253343	L6	2.39478	L10	2.119436	L3	1.876628
L2	1.894007	L7	2.155042	L11	2.345278	L4	2.436782
L3	1.964139	L8	2.129882	L12	1.996165	L5	2.253343
L4	2.211203	L1	1.899023	L13	1.859655	L6	1.899023
L5	2.254749	L2	1.885057	L1	2.224071	L7	1.894007
L6	2.211681	L3	2.019851	L2	2.306195	L8	2.023511
L7	1.979149	L4	2.087275	L3	2.224071	L1	2.146688
L8	2.1274	L5	2.119436	L4	1.929939	L2	1.841378
L1	1.981817	L6	2.300689	L5	1.979149	L3	2.162875
L2	2.022989	L7	1.734985	L6	2.101406	L4	2.071008
L3	2.253343	L8	2.15357	L7	2.165317	L6	2.39478
L4	1.821757	L9	2.34663	L8	2.081698	L7	2.29931
L5	1.785424	L10	2.366812	L9	2.008306		
L6	2.436782	L11	1.872117	L1	2.023511		
L7	2.39478	L12	1.938137	L2	2.155042		
L8	1.981817	L13	2.071008	L3	2.208811		
L9	1.885057	L4	1.935954	L4	2.207375		
L1	1.985547	L5	2.275746	L5	1.931582		
L2	1.885618	L6	2.211203	L6	1.957671		
L3	1.744705	L7	2.1274	L7	1.929939		

ตาราง ก.12 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 450 l/min ที่ความสูง 130 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L4	1.489116	L5	1.657725	L3	1.890097	L5	1.899023	L8	1.756104	L9	2.031331	L10	1.80251	L10	1.793693	L1	1.933223
L5	1.443707	L6	1.981817	L4	2.214546	L6	2.025077	L9	1.866885	L10	1.731326	L11	1.706732	L11	1.931034	L2	1.981817
L6	1.563894	L7	1.990332	L5	1.768771	L7	2.245355	L10	1.905357	L11	1.841378	L1	1.931582	L2	1.80251	L3	1.890097
L7	1.695548	L8	1.686172	L6	1.965752	L8	1.79546	L11	1.812028	L12	1.844246	L2	2.397868	L4	1.933223	L4	2.214546
L8	1.885618	L9	1.701771	L7	2.031331	L9	1.83908	L12	2.100103	L1	1.703633	L3	1.790744	L5	2.116941	L5	1.731326
L10	1.913992	L10	1.885057	L8	2.027685	L10	2.161409	L1	1.747126	L2	1.844246	L4	1.979149	L6	1.931034	L6	1.921157
L11	1.981817	L11	1.981817	L9	1.8142	L1	1.793693	L2	1.899023	L3	1.990332	L5	2.023511	L7	1.749545	L7	1.711062
L12	1.695548	L12	1.977546	L10	2.031331	L2	2.161409	L3	1.80778	L4	1.990332	L6	1.885057	L8	1.981817	L8	1.655172
L13	1.885618	L1	1.701771	L1	1.977546	L3	1.798401	L4	1.701771	L5	1.798401	L7	1.859655	L9	1.931582	L9	1.747126
L14	1.793693	L2	1.798401	L2	1.885057	L4	1.977011	L5	1.603932	L6	1.611821	L8	1.94467	L11	1.977546	L2	1.615096
L15	1.678003	L3	2.068966	L3	2.16092	L5	1.853393	L6	1.609852	L7	1.701771	L9	1.686172	L12	1.711062	L3	2.048429
L2	1.83908	L4	1.79546	L4	2.077123	L6	1.933223	L7	1.990332	L8	1.611821	L10	1.848253	L13	1.848253	L4	1.79546
L3	1.596005	L5	2.122923	L5	2.031331	L7	2.207375	L8	1.920607	L9	1.844246	L11	1.793103	L1	1.839655	L5	1.985547
L4	1.701149	L6	1.752563	L6	1.785424	L8	1.695548	L9	1.935954	L10	1.747126	L1	2.114943	L2	1.61967	L6	1.920607
L7	1.931034	L7	2.168731	L7	1.890097	L9	1.756779	L10	1.655811	L1	2.023511	L2	1.890097	L3	2.211203	L7	1.747126
L9	1.572656	L8	1.756779	L9	2.023511	L1	1.966845	L1	1.841378	L2	2.162875	L3	2.071008	L4	2.211203	L9	1.83908
L10	1.793693	L9	1.83908	L10	1.80661	L2	1.905357	L2	1.887299	L3	1.977011	L4	1.931034	L5	1.885057	L10	1.749545
L11	1.931034	L10	1.657725	L11	1.887299	L3	2.168628	L3	1.979149	L5	1.655811	L5	1.885618	L6	1.793693	L11	1.931034
L12	2.224071	L11	1.609852	L1	2.081698	L4	2.143386	L4	1.747731	L6	1.940317	L6	1.977546	L7	2.041711	L12	1.839655
L2	1.703633	L12	1.747126	L2	2.114943	L5	2.129589	L5	1.730715	L7	1.979149	L7	1.977546	L8	1.749545	L1	1.747731
L3	1.885057	L1	2.161409	L3	1.706732	L6	1.905357	L6	1.655811	L8	1.979149	L8	1.931582	L9	1.996165	L2	1.798401
L4	1.931034	L2	1.931582	L4	1.990332	L7	1.849189	L8	1.907353	L9	2.073558	L9	2.119436	L10	1.996165	L3	1.752563

ตาราง ก.12 (ต่อ)

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L4	1.839655	L3	2.20929	L6	1.894007	L5	1.793693
L5	1.867029	L4	1.965752	L7	2.39478	L6	1.727659
L6	1.853393	L5	2.096874	L8	2.031331	L7	1.885618
L7	1.939772	L6	1.905136	L9	2.146688	L9	2.093848
L8	1.894007	L7	1.611821	L10	1.762186	L1	1.762548
L9	2.192	L8	1.762186	L11	2.298851	L2	1.574312
L10	1.957671	L9	2.023511	L12	1.899023	L3	1.839969
L11	1.905136	L10	2.253343	L1	1.703633	L4	1.973176
L1	1.83908	L1	2.207375	L2	1.79546	L5	1.954702
L2	2.207375	L2	2.254749	L3	1.83908	L7	1.857753
L3	1.740459	L3	2.025077	L4	2.027685	L8	1.952962
L4	1.706732	L4	1.839655	L5	2.027685	L9	1.724835
L5	1.957671	L5	1.80778	L6	1.935954	L10	2.293637
L6	2.077123	L6	1.867029	L7	1.885057		
L7	1.885618	L7	1.977011	L8	2.29931		
L8	1.706732	L8	1.747731	L9	2.023511		
L9	1.752563	L9	1.974872	L10	1.793103		
L10	2.16092	L1	1.931582	L11	2.074577		
L11	2.165317	L2	1.977011	L1	2.010936		
L12	1.793693	L3	1.711062	L2	1.686799		
L1	2.077123	L4	1.803096	L3	1.848253		
L2	1.84023	L5	1.517241	L4	1.83908		

ตาราง ก.13 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 450 l/min ที่ความสูง 180 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	1.241379	L4	1.477716	L12	1.625533	L7	1.905136	L11	1.52381	L6	1.625533	L9	1.70965	L5	1.528347
L2	1.431946	L5	1.334126	L13	1.528347	L8	1.489116	L12	1.762548	L7	1.701771	L10	1.762548	L6	1.587373
L4	1.153098	L6	1.254928	L2	1.474135	L9	1.655172	L13	1.683588	L8	2.122923	L11	1.815154	L7	2.003036
L5	1.334126	L7	1.563218	L3	1.198934	L10	1.425287	L1	1.288177	L9	1.678003	L12	1.551095	L8	1.711062
L6	1.340449	L8	1.609852	L4	1.563218	L11	1.657725	L2	1.382372	L1	1.528347	L1	1.428251	L9	1.573999
L7	1.61967	L9	1.899023	L5	1.573999	L12	1.61967	L3	1.563894	L2	1.990332	L2	1.793103	L10	1.482714
L8	1.153098	L10	1.611821	L6	1.534558	L13	1.711062	L4	1.391517	L3	1.706732	L3	1.484139	L11	1.469108
L9	1.426029	L11	1.655172	L7	1.3365	L14	1.79546	L5	1.615096	L4	1.85111	L4	1.701771	L1	1.907141
L10	1.403617	L12	1.752563	L8	1.425287	L15	1.38619	L6	1.482714	L5	1.523498	L5	1.832171	L2	1.479259
L1	1.477716	L13	1.839655	L9	1.461172	L16	1.517241	L7	1.839655	L6	1.561189	L6	1.756779	L3	1.756104
L2	1.38619	L14	1.569292	L10	1.451738	L17	1.85111	L8	1.701149	L7	1.79546	L7	1.580031	L4	2.014122
L3	1.431946	L1	1.484139	L12	1.474135	L18	1.83908	L9	1.752563	L8	1.471983	L8	1.752563	L5	1.733359
L4	1.471264	L2	1.563894	L13	1.673588	L1	1.621846	L10	1.747126	L9	1.489116	L9	1.482714	L6	1.9576
L5	1.290636	L3	1.345957	L14	1.587373	L2	1.571429	L11	1.605908	L10	1.523498	L10	1.752563	L7	2.035958
L6	1.517938	L4	1.3365	L15	1.489116	L3	2.151306	L12	1.650696	L1	1.619748	L11	1.665993	L8	1.815154
L7	1.517938	L5	1.426029	L16	1.711062	L4	1.772171	L13	1.534558	L2	1.737932	L12	2.1274	L9	1.669386
L8	1.383136	L6	1.665358	L1	1.899023	L5	2.151306	L14	1.912334	L3	1.793159	L13	1.703633	L1	1.885057
L9	1.573999	L7	1.357685	L2	1.520025	L6	2.143386	L1	1.287356	L4	1.859583	L14	2.003036	L2	1.609852
L10	1.391517	L8	1.615096	L3	1.528347	L7	1.667347	L2	1.887299	L5	1.526783	L1	1.985547	L3	1.517241
L1	1.092861	L9	1.665358	L4	1.520025	L8	1.456863	L3	1.655811	L6	1.625338	L2	1.66091	L4	1.563894
L2	1.066429	L10	1.985547	L5	1.695548	L9	1.435697	L4	1.80661	L7	1.762548	L3	1.848253	L5	1.985547
L3	1.150344	L11	1.563894	L6	1.798401	L10	1.384233	L5	2.119436	L8	1.756104	L4	1.939772	L6	1.565921

ตาราง ก.13 (ต่อ)

Features	Value	Features	Value	Features	Value
L4	1.66091	L12	1.798401	L11	1.706732
L5	1.520025	L1	2.211203	L1	1.657725
L6	1.520025	L2	1.561189	L2	1.752563
L7	1.426029	L3	1.885057	L3	1.657725
L8	1.605908	L4	1.912334	L4	1.66091
L9	1.716612	L5	1.573999	L5	1.950639
L10	1.706732	L6	2.025077	L6	1.79546
L11	1.661546	L7	1.661546	L7	1.79546
L12	1.563894	L8	1.747126	L8	1.471983
L13	1.8142	L9	1.933223	L9	1.611821
L14	1.686172	L10	1.629429	L10	1.61967
L1	1.887299	L11	1.931582	L11	1.517241
L2	1.391517	L1	1.756779	L12	1.749545
L3	1.703633	L2	1.506054	L13	1.572656
L4	1.565921	L3	1.706732	L14	1.747731
L5	1.523498	L4	1.981817		
L6	1.716612	L5	1.701149		
L7	1.437103	L6	1.569292		
L8	1.899023	L7	1.979149		
L9	1.79546	L8	1.80778		
L10	1.716612	L9	2.168731		
L11	1.569292	L10	1.940317		

ตาราง ก.14 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 500 l/min ที่ความสูง 30 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	2.192	L8	2.200181	L3	2.095779	L1	2.381059	L3	2.168731	L4	2.406667	L1	2.443712	L6	2.348881	L11	2.621093	L7	2.489561
L2	2.119436	L10	2.252874	L4	2.380952	L2	2.165317	L4	2.211203	L5	2.073558	L2	2.713033	L7	2.306195	L1	2.896917	L8	1.981817
L3	2.584955	L1	2.122923	L5	2.535016	L3	2.488711	L5	2.245355	L6	2.391247	L3	2.529154	L8	2.165317	L2	2.116941	L9	2.184755
L4	2.533746	L2	2.440682	L6	2.290174	L5	2.218837	L6	2.264572	L7	2.443712	L4	2.087275	L9	2.535414	L3	2.440682		
L5	2.667063	L3	2.39478	L7	2.285714	L6	2.345278	L7	2.161409	L8	2.392572	L5	2.245355	L1	2.298082	L4	2.161409		
L6	1.80661	L4	2.068966	L8	2.34545	L7	2.426349	L8	2.578814	L9	2.165317	L6	2.143239	L2	2.240121	L5	2.073558		
L7	2.667063	L5	2.168731	L1	2.302985	L8	2.260368	L1	2.852057	L1	2.390805	L1	2.768183	L3	2.505323	L6	2.575123		
L8	2.165317	L6	2.069476	L2	2.440682	L1	2.532495	L2	2.302985	L2	1.939772	L2	2.184755	L4	2.428571	L7	2.437215		
L1	2.335795	L7	2.218837	L3	2.360999	L2	2.345278	L3	2.529154	L3	2.041711	L3	2.714202	L5	2.147614	L8	2.115442		
L2	2.041711	L9	2.211203	L4	2.581272	L3	2.438516	L5	2.392572	L4	2.850945	L4	2.310316	L6	2.625965	L1	2.527849		
L3	2.345278	L1	2.040675	L5	2.237338	L4	2.254749	L6	2.392572	L5	2.214546	L5	2.064875	L7	2.667092	L2	2.811138		
L4	1.841378	L2	2.392572	L7	2.207375	L5	2.310316	L8	2.257092	L6	2.440682	L6	1.957671	L8	2.56834	L3	2.335276		
L6	2.392572	L3	1.887299	L8	2.208811	L7	2.345278	L9	1.981817	L7	2.574713	L7	2.164341	L9	2.144973	L4	2.530987		
L7	2.489561	L4	2.440682	L1	1.985547	L1	2.437215	L10	2.165317	L8	2.397868	L8	2.230241	L1	2.315343	L5	2.388559		
L8	2.581272	L5	2.122923	L2	2.166781	L2	2.483184	L2	2.34663	L9	2.484461	L9	2.286403	L3	2.622302	L6	2.114629		
L1	2.360999	L6	2.025077	L3	2.621093	L3	2.29931	L3	2.667063	L2	2.759004	L10	2.254749	L4	2.713033	L7	2.52381		
L2	2.391247	L7	2.673001	L4	2.850945	L4	2.530407	L4	2.298851	L3	2.344828	L11	2.392572	L5	2.758621	L8	2.429038		
L3	2.282702	L8	2.581272	L5	2.721979	L5	2.392572	L5	2.208811	L4	2.670231	L1	2.489561	L6	2.16092	L9	2.381429		
L4	2.807987	L9	2.49846	L6	2.578405	L6	2.34663	L6	2.035489	L5	2.436782	L2	2.168731	L7	2.34663	L1	2.731669		
L5	2.576354	L10	2.344828	L7	2.39478	L8	2.686018	L7	2.115442	L6	2.624317	L3	2.777331	L8	2.257092	L4	2.758621		
L6	2.438516	L1	2.215693	L8	2.464385	L9	2.254749	L2	2.168731	L7	2.345278	L4	2.483184	L9	2.443712	L5	2.064875		
L7	2.713033	L2	2.364227	L9	2.484461	L2	2.260368	L3	2.184755	L9	2.41237	L5	2.390805	L10	2.440682	L6	2.29931		

ตาราง ก.15 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 500 l/min ที่ความสูง 80 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	2.345278	L10	2.115442	L10	2.240121	L6	2.39478	L2	2.404172	L8	2.575123	L8	1.887299	L3	2.114943	L3	2.005096	L2	2.667063		
L2	2.254749	L11	2.252874	L11	2.238602	L7	2.622302	L3	2.381429	L1	2.452347	L9	2.162875	L4	2.530407	L5	2.285714	L3	2.392572		
L4	1.977011	L12	2.254749	L1	2.206897	L8	2.254749	L4	2.168731	L2	2.257092	L10	1.981817	L5	2.119436	L6	2.309892	L4	2.306195		
L5	1.793693	L13	2.345278	L2	2.443712	L9	2.022989	L5	2.206897	L3	2.529154	L3	2.252874	L6	1.939772	L7	2.599494	L5	2.230241		
L6	2.168731	L1	1.853393	L3	2.482759	L11	2.116941	L6	2.003036	L4	2.115442	L4	2.025077	L7	1.979149	L8	2.192546	L6	2.2697		
L7	2.162875	L2	1.749545	L4	2.025077	L12	2.535414	L8	2.069476	L5	2.20929	L5	2.437215	L8	2.257092	L9	2.525606	L7	2.452347		
L8	2.165317	L3	1.890097	L5	2.162875	L1	1.907353	L9	2.052553	L6	2.073558	L6	2.686018	L9	2.483184	L1	2.401831	L8	2.482759		
L1	1.931034	L4	2.214546	L6	2.224071	L2	2.115442	L10	2.115442	L7	2.1274	L7	1.985015	L10	2.254281	L2	2.253343				
L2	1.701771	L5	2.302985	L7	2.031331	L5	2.087275	L11	2.300689	L8	2.535414	L9	2.214546	L1	2.493379	L3	2.483184				
L3	2.484461	L6	1.985547	L2	2.391247	L6	2.109939	L1	2.162875	L9	2.08322	L10	2.164341	L3	1.981817	L4	2.254749				
L4	2.345278	L7	2.115442	L3	2.218837	L7	2.206897	L3	2.549134	L1	2.391247	L1	2.345278	L4	2.115442	L6	2.391247				
L5	2.208811	L8	2.162875	L4	2.254749	L8	1.974872	L4	2.32809	L2	2.32127	L2	2.673001	L5	2.029769	L2	2.39478				
L7	2.022989	L9	2.549134	L5	2.34663	L10	2.162875	L5	2.077123	L3	2.214546	L3	2.440682	L6	2.315343	L3	2.443712				
L8	1.750752	L10	2.257092	L6	2.027685	L2	2.264105	L6	2.391247	L4	1.931034	L4	2.257092	L7	2.206897	L4	1.977546				
L1	2.483184	L1	1.982348	L7	1.809533	L3	2.254749	L7	2.264105	L5	2.348881	L5	2.300689	L1	2.34545	L5	2.529154				
L2	1.665358	L2	1.907141	L8	1.785424	L4	2.438516	L1	2.624317	L6	2.34663	L6	2.115442	L2	2.238602	L6	2.713033				
L3	1.935954	L3	1.857753	L9	2.069476	L5	2.437215	L2	2.335795	L1	2.391247	L7	2.116941	L3	2.238602	L8	2.165317				
L4	2.069476	L4	2.28621	L1	1.979149	L6	2.132858	L3	2.027685	L3	2.804975	L8	1.887299	L7	2.333819	L9	2.214546				
L5	2.041711	L5	2.483506	L2	1.839655	L8	2.069476	L4	2.437215	L4	2.168731	L9	2.16092	L8	2.429038	L10	2.306195				
L6	2.071008	L6	2.198742	L3	2.260368	L9	2.068966	L9	2.022989	L5	2.574713	L11	2.1274	L9	2.333333	L11	2.529154				
L7	2.252874	L8	2.47619	L4	2.073558	L10	2.391247	L6	2.35607	L6	1.939772	L1	2.431571	L1	2.47619	L12	2.440682				
L9	2.206897	L9	2.097401	L5	2.050492	L1	2.382856	L7	2.29931	L7	1.830439	L2	1.8142	L2	2.677275	L1	2.41237				

ตาราง ก.16 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 500 l/min ที่ความสูง 130 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L2	1.887299	L14	2.023511	L8	2.073558	L1	2.549134	L6	1.931034	L10	2.264105	L3	2.524259	L1	2.392572	L8	2.302985				
L3	2.218837	L15	2.16092	L9	2.260368	L2	2.360999	L7	2.119436	L11	2.436782	L4	2.428105	L2	2.165317						
L4	2.39478	L16	2.335795	L1	2.252874	L3	2.152588	L8	1.939772	L1	2.392572	L5	2.667092	L3	2.391247						
L5	2.165317	L18	2.208811	L2	2.298851	L4	2.168731	L9	1.859655	L2	2.071008	L6	2.246186	L4	2.34663						
L6	2.162875	L19	1.985547	L3	2.207375	L5	2.391247	L10	2.34663	L3	2.39478	L8	2.480308	L8	2.162875						
L7	1.703633	L20	2.16092	L4	2.503532	L7	2.418933	L11	1.977546	L4	2.122923	L9	2.192546	L9	2.036008						
L9	2.392572	L9	2.207375	L5	2.726634	L8	2.214546	L1	2.426349	L5	2.483184	L10	2.100103	L1	2.116941						
L10	2.630753	L10	2.34663	L6	2.254749	L9	2.027685	L2	2.254749	L6	2.509856	L1	2.254749	L2	2.116941						
L1	2.025077	L11	2.437215	L7	2.484461	L1	2.208811	L3	1.798401	L7	1.977546	L2	2.503532	L3	2.41237						
L2	1.887299	L13	1.905136	L8	2.1274	L2	2.397868	L4	2.064875	L8	2.369935	L3	2.397868	L4	1.996165						
L3	2.114943	L14	2.116941	L9	1.900692	L3	2.437215	L5	2.257092	L9	2.119436	L4	2.007253	L6	2.162875						
L4	2.373501	L15	2.031331	L1	2.484461	L5	2.437215	L6	1.931582	L10	2.344828	L5	2.489561	L8	2.253343						
L5	2.440682	L16	1.964139	L2	2.023511	L6	2.022989	L7	2.315343	L11	2.310316	L8	1.839655	L9	2.179912						
L6	1.94467	L17	2.081698	L3	2.528736	L1	2.300689	L1	2.300689	L12	1.985547	L9	2.436782	L10	1.875501						
L7	2.206897	L18	2.252874	L4	2.122923	L2	2.214546	L2	2.260368	L13	1.996165	L10	2.528736	L11	2.207375						
L8	2.39478	L1	2.562368	L5	1.894007	L3	2.164341	L3	1.615096	L14	2.048429	L1	2.437215	L1	2.207375						
L9	2.211203	L2	1.990332	L6	2.13929	L4	2.390805	L4	2.132858	L1	2.264572	L2	2.027685	L2	2.162875						
L10	1.844246	L3	2.482759	L2	2.211203	L1	2.178457	L5	2.264572	L2	2.344828	L3	2.214546	L3	2.302985						
L11	1.85111	L4	2.389478	L3	2.29931	L2	2.489561	L6	2.440682	L3	2.242057	L4	1.977546	L4	2.073558						
L11	2.208811	L5	2.438516	L4	2.29056	L3	2.680897	L7	2.253343	L4	2.025077	L5	2.010936	L5	2.326273						
L12	1.841378	L6	2.381059	L5	2.390805	L4	2.344377	L8	2.271097	L5	2.119436	L6	2.109939	L6	2.237338						
L13	2.173113	L7	2.453639	L6	2.443712	L5	2.115442	L9	2.025077	L2	2.309892	L7	2.452347	L7	2.161409						

ตาราง ก.17 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 500 l/min ที่ความสูง 180 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	1.981817	L2	1.657725	L2	2.122923	L3	1.939772	L5	2.003036	L8	1.890097	L8	2.087275	L7	2.132858	L9	1.79546				
L2	1.977011	L3	1.912334	L3	1.569292	L4	2.073558	L6	2.162875	L9	1.933223	L9	2.027685	L8	1.839655	L10	1.899023				
L3	1.706732	L4	1.79546	L4	1.933223	L5	2.252874	L7	2.146688	L10	1.839655	L10	1.890097	L9	2.161409	L1	1.853393				
L4	2.208811	L5	1.80778	L5	2.119436	L6	2.16092	L8	2.132858	L11	1.793693	L11	1.887299	L1	2.206897	L2	1.844246				
L5	2.109939	L6	1.569292	L6	1.853393	L7	2.300689	L9	1.977546	L12	1.798401	L12	2.260368	L2	2.352029	L3	1.706732				
L6	1.890097	L7	2.077123	L7	1.935954	L8	1.950639	L1	1.931034	L1	2.426349	L1	2.114943	L3	2.348881	L4	2.254749				
L7	2.206897	L8	1.756779	L8	1.678003	L9	1.841378	L2	2.073558	L2	1.979149	L2	1.933223	L4	2.069476	L5	2.122923				
L8	2.254749	L9	1.747731	L9	1.990332	L10	2.319448	L3	2.027685	L3	1.749545	L3	1.985547	L5	1.853393	L6	1.990332				
L9	1.931034	L10	1.935954	L10	1.931582	L11	1.793693	L4	1.625533	L4	1.731326	L4	1.517241	L6	1.905136	L7	1.964139				
L10	1.885618	L11	1.793103	L1	2.056154	L12	1.931034	L5	2.019851	L5	1.853393	L5	1.996165	L7	1.749545	L8	2.41237				
L1	1.61967	L1	1.66091	L2	2.282702	L1	1.990332	L6	2.252874	L6	1.977011	L6	2.29931	L8	1.950639	L9	2.031331				
L2	2.116941	L2	1.573999	L3	1.596005	L2	2.115442	L7	2.224546	L7	2.071008	L9	2.253343	L9	1.609852	L10	1.977011				
L4	1.785424	L3	1.977546	L4	1.887299	L3	2.254749	L8	2.132858	L8	2.122923	L10	2.438516	L10	2.077123	L11	2.025077				
L5	1.981817	L4	1.885057	L5	1.939772	L4	1.981817	L9	1.650696	L9	2.208811	L11	2.073558	L11	1.990332	L12	1.844246				
L6	1.821757	L5	1.793693	L6	1.887299	L5	1.933769	L10	1.965752	L10	1.844246	L12	2.16092	L1	2.069476	L13	2.200181				
L7	1.752563	L6	1.641064	L7	1.615096	L7	1.990332	L1	1.935954	L11	1.839655	L13	1.885057	L2	2.298851	L15	2.360999				
L8	1.885618	L7	1.931582	L8	1.528347	L8	1.895681	L2	2.010936	L1	2.207375	L1	1.931582	L3	2.077123	L1	2.077123				
L9	1.474135	L8	1.609852	L9	2.224071	L9	1.977546	L3	2.207375	L2	1.655172	L2	1.931582	L4	2.443712	L2	1.894007				
L10	1.885057	L9	1.580031	L10	1.931582	L1	2.161409	L4	1.818854	L4	2.114943	L3	2.114943	L5	2.003036	L3	2.022989				
L11	1.841378	L10	2.025077	L11	1.66091	L2	2.29931	L5	2.031331	L5	1.885057	L4	2.115442	L6	1.887299	L4	1.939772				
L12	1.609852	L11	1.79546	L1	1.425287	L3	2.168731	L6	2.064875	L6	1.752563	L5	2.119436	L7	2.068966	L5	1.885618				
L1	1.561189	L1	1.848253	L2	1.979149	L4	1.964139	L7	1.756779	L7	2.114943	L6	2.115442	L8	1.853393	L6	1.848253				

ตาราง ก.17 (ต่อ)

Features	Value	Features	Value
L7	1.749545	L8	2.122923
L8	1.747126	L1	2.165317
L9	1.733156	L2	2.041711
L10	1.977546	L4	2.207375
L11	1.94467	L5	1.935954
L1	2.036008	L6	1.844246
L2	1.79546	L7	2.071008
L3	2.081698		
L4	1.933223		
L5	1.933223		
L6	1.981817		
L7	1.939772		
L8	2.071008		
L9	2.282702		
L10	2.025077		
L1	2.116941		
L2	2.184755		
L3	2.207375		
L4	2.115442		
L5	2.254749		
L6	2.161409		
L7	2.040675		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.18 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 550 l/min ที่ความสูง 30 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	2.29931	L6	2.392572	L4	2.310316	L1	2.69858	L5	2.532495	L9	2.484461	L6	2.397868
L2	2.673001	L1	2.214546	L5	2.479777	L2	2.718871	L6	2.406667	L10	2.535414	L7	2.479777
L3	2.310316	L2	2.532495	L6	2.581272	L3	2.673001	L7	2.41237	L2	2.214546	L8	2.440682
L4	2.437215	L3	2.549134	L7	2.360999	L4	2.440682	L8	2.452347	L3	2.245355	L9	2.39478
L5	2.39478	L4	2.581272	L1	2.69858	L5	2.077123	L10	2.575123	L4	2.418933	L1	2.581272
L5	2.253343	L5	2.714202	L2	2.600853	L1	2.260368	L1	2.714202	L5	2.539163	L2	2.486587
L6	2.686018	L1	2.758621	L3	2.896917	L3	2.348881	L2	2.401831	L6	2.345278	L3	2.581272
L7	2.498037	L2	2.722367	L4	2.94827	L4	2.509856	L4	2.300689	L7	2.529154	L4	2.680897
L8	2.549134	L3	2.562368	L5	2.850945	L5	2.122923	L5	2.578405	L8	2.254749	L5	2.310316
L9	2.539163	L4	2.532495	L6	2.348881	L6	2.306195	L6	2.027685	L9	2.528736	L6	2.214546
L10	2.576354	L5	2.575123	L7	2.673001	L7	2.621093	L7	2.200181	L10	2.081698	L2	2.401831
L1	2.391247	L6	2.653156	L1	2.760153	L1	2.447601	L8	2.122923	L1	2.39478	L3	2.35607
L2	2.484461	L3	2.712644	L2	2.760153	L2	2.807987	L9	2.493379	L2	2.438516	L4	2.646375
L3	2.539163	L4	2.211681	L3	2.581272	L3	2.173113	L10	2.498037	L3	2.437215	L5	2.543738
L4	2.503532	L5	2.731669	L4	2.584955	L4	2.535414	L1	2.214546	L4	2.081698	L6	2.39478
L5	2.532495	L6	2.406667	L5	2.498037	L5	2.401831	L2	2.211203	L5	2.576354		
L6	2.539163	L7	2.589449	L1	2.493379	L6	2.509856	L3	2.315343	L6	2.493379		
L1	2.517005	L8	2.438516	L2	2.62069	L7	2.489561	L4	2.391247	L7	2.486587		
L2	2.532495	L9	2.581272	L3	2.464385	L8	2.627135	L5	2.306195	L1	2.282702		
L3	2.40007	L1	2.093848	L4	2.254749	L2	2.207375	L6	2.669044	L3	2.282702		
L4	2.29931	L2	2.484461	L5	2.578814	L3	2.275746	L7	2.275746	L4	2.447601		
L5	2.381059	L3	2.397868	L6	2.524971	L4	2.245355	L8	2.360999	L5	2.62069		

ตาราง ก.19 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 550 l/min ที่ความสูง 80 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	2.206897	L6	2.214546	L6	2.1274	L2	2.254749	L1	2.192	L6	2.02142	L6	2.302985	L2	2.904762
L3	2.230241	L7	2.646375	L7	2.242057	L3	2.850945	L2	2.310316	L1	2.390805	L7	2.584955	L3	2.634586
L4	2.484461	L8	2.074577	L8	2.200181	L4	2.041711	L3	2.330812	L2	2.392572	L8	2.077123	L4	2.287698
L5	2.621093	L9	2.254749	L9	2.064875	L5	2.581272	L5	2.391247	L3	2.224071	L9	2.960077	L5	2.432769
L6	2.208811	L1	2.763546	L10	2.2697	L6	2.023511	L6	2.29931	L4	2.686018	L10	2.119436	L6	2.335276
L1	3.221345	L2	2.392828	L1	2.622302	L8	2.286403	L7	1.996165	L5	2.406667	L1	2.230241	L8	2.724708
L2	2.489561	L3	2.185294	L2	2.530407	L9	2.306195	L8	2.464385	L6	2.207375	L2	2.064875	L1	2.464385
L5	2.621093	L4	2.388559	L3	2.344828	L1	2.581272	L9	2.071008	L1	2.39478	L3	2.443712	L2	2.41237
L6	2.390805	L5	2.190994	L4	2.575123	L2	2.373501	L11	2.207375	L2	2.344377	L4	2.366812	L3	2.640378
L7	2.022989	L6	1.973176	L5	2.116941	L3	2.486587	L1	2.352029	L3	2.443712	L5	2.714202	L4	2.315343
L1	2.300689	L7	2.209031	L7	2.535414	L4	2.211203	L2	2.622302	L4	2.529154	L7	2.390805	L5	2.364131
L2	2.344828	L8	2.250724	L8	2.762067	L5	2.073558	L3	2.162875	L5	2.025077	L8	2.397868	L6	2.352029
L3	2.16092	L1	2.224071	L9	2.345278	L6	1.940317	L5	2.132858	L6	2.484461	L9	2.29056	L7	2.391247
L4	2.300689	L5	2.29931	L10	2.207375	L7	2.081698	L6	2.069476	L7	2.352029	L10	2.114943	L1	2.726634
L5	2.206897	L6	2.360999	L1	2.59475	L8	2.077123	L7	2.713033	L8	2.027685	L1	2.760153	L2	2.850945
L6	2.300689	L7	2.360999	L2	2.214546	L9	2.174572	L9	2.254281	L10	2.260368	L2	2.581272	L3	2.39478
L7	2.173113	L8	2.39478	L3	2.62069	L10	2.438516	L10	2.253343	L11	2.025077	L3	2.366812	L6	2.073558
L8	2.452347	L9	2.29931	L4	2.896917	L1	2.764744	L1	2.434612	L1	2.093848	L4	2.896917	L7	2.254749
L1	2.489561	L1	2.437215	L5	2.192	L2	2.224071	L2	2.621093	L2	1.931582	L5	2.622302	L8	2.162875
L2	2.041711	L2	2.471665	L6	2.484461	L3	2.069476	L3	2.019851	L3	2.208811	L6	2.010936	L9	2.257092
L3	2.762067	L3	2.397868	L7	2.207375	L4	2.828614	L4	2.440682	L4	2.310316	L7	2.208811	L10	2.173113
L4	2.436782	L5	2.068966	L1	2.274817	L5	2.330812	L5	2.834959	L5	2.097378	L1	2.34545	L11	2.302985

ตาราง ก.20 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 550 l/min ที่ความสูง 130 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	2.437215	L1	2.804598	L5	2.94576	L7	2.630753	L4	2.482759	L6	2.115442
L2	2.254749	L2	2.670231	L6	2.155042	L1	2.275746	L5	2.257092	L7	2.027685
L3	2.576354	L3	2.207375	L7	2.406667	L2	1.933769	L6	2.621093	L8	2.437215
L4	2.087275	L4	2.437215	L8	1.793103	L3	2.341219	L7	2.252874	L1	2.230241
L6	1.933223	L5	2.069476	L9	2.023511	L4	2.211203	L8	2.666667	L2	2.302985
L1	2.344828	L6	2.178457	L1	2.578405	L5	2.344828	L1	2.002266	L5	2.02142
L2	2.539163	L7	1.939772	L2	2.16092	L6	2.440682	L2	2.246186	L6	2.211203
L4	2.484461	L1	2.406667	L3	2.310316	L1	2.667063	L3	2.478021	L10	2.302985
L5	1.899023	L2	2.434612	L4	2.344828	L2	2.348881	L4	2.052596	L1	2.302985
L6	2.162875	L3	2.068966	L5	2.132858	L3	2.482759	L5	2.372365	L2	2.751331
L1	2.584955	L4	2.073558	L6	2.555346	L4	2.392572	L7	2.287698	L3	2.39478
L2	2.624317	L1	2.722367	L8	2.206897	L5	2.224071	L8	2.571869	L4	2.031331
L3	2.115442	L2	2.35607	L1	2.207375	L6	2.352029	L1	2.406667	L5	2.310316
L4	2.529154	L3	1.899023	L2	2.29931	L1	2.341219	L2	2.549134	L7	2.630753
L5	2.069476	L4	2.397868	L3	2.282702	L2	2.852057	L3	2.16092	L8	2.101406
L6	1.981817	L5	1.887299	L4	2.35607	L3	2.345278	L4	2.071008	L9	2.1274
L7	2.16092	L6	1.931582	L1	2.352029	L5	2.16092	L5	2.254749		
L1	2.114943	L7	2.253343	L2	2.447601	L6	2.666667	L6	2.162875		
L2	2.254749	L1	2.34663	L3	2.093848	L7	2.62069	L1	2.806105		
L3	1.935954	L2	2.489561	L4	2.031331	L8	2.207375	L2	2.436782		
L5	2.116941	L3	2.621093	L5	2.34663	L1	2.85391	L3	2.390805		
L6	1.981817	L4	2.666667	L6	2.085249	L2	2.622302	L4	2.345278		

ตาราง ก.21 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 550 l/min ที่ความสูง 180 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	1.701771	L3	1.979149	L9	2.264572	L2	2.484461	L6	2.240121	L12	2.208811	L1	2.192	L3	1.977011	L8	2.436782		
L2	2.440682	L4	2.161409	L10	2.077632	L3	2.077123	L7	2.382856	L13	2.069476	L2	2.115442	L4	2.298851	L9	2.224071		
L3	2.068966	L5	2.360999	L11	2.087275	L4	1.793103	L8	2.240121	L1	2.667092	L3	1.979149	L6	2.528736	L10	2.207375		
L4	1.846537	L6	2.260368	L1	2.218837	L5	2.114943	L9	2.578474	L2	2.527849	L4	2.208811	L7	2.048429	L11	2.34663		
L5	2.031331	L7	2.254749	L2	2.253343	L6	2.352029	L1	2.624317	L3	2.240121	L5	2.008306	L8	2.300689	L1	2.443712		
L1	2.484461	L1	2.430438	L3	2.224071	L7	2.211203	L2	1.977011	L4	2.095779	L6	2.264572	L9	2.027685	L2	2.254749		
L2	2.069476	L2	2.095779	L4	2.35607	L8	2.440682	L3	2.115442	L5	1.9576	L7	1.905136	L10	1.935954	L3	2.162875		
L3	2.345278	L3	2.762315	L5	2.184755	L1	2.143386	L4	1.80251	L6	2.238602	L9	2.252874	L11	2.35607	L4	2.345278		
L4	1.931582	L4	2.190476	L6	2.302985	L2	2.209031	L5	1.747731	L7	2.43603	L10	2.206897	L12	2.161409	L5	2.010936		
L5	1.839655	L5	2.238602	L7	2.486587	L3	2.095779	L6	2.031331	L8	2.238602	L11	2.484461	L1	2.300689	L6	1.981817		
L6	2.529154	L6	2.005096	L8	2.114943	L4	2.714703	L7	2.218837	L9	2.357023	L1	2.081698	L2	1.935954	L7	1.929939		
L1	2.333333	L7	2.100103	L9	1.790744	L5	1.667347	L8	1.894007	L10	1.975473	L2	1.885618	L3	2.627135	L8	2.168731		
L2	2.85754	L8	2.000567	L10	2.218837	L6	1.980632	L9	2.073558	L11	2.527849	L3	2.161409	L4	2.116941	L9	2.242057		
L3	2.381429	L9	2.622941	L11	1.900692	L7	2.287698	L3	2.116941	L1	2.67049	L4	2.115442	L5	2.168731	L1	2.575123		
L4	1.942484	L1	1.981817	L1	1.952962	L8	2.005096	L4	1.80251	L2	2.095779	L5	1.83908	L6	1.920607	L2	2.02142		
L5	2.380952	L2	2.165317	L2	2.192546	L9	2.432769	L5	1.981817	L4	2.333333	L6	2.438516	L7	2.443712	L3	2.068966		
L6	2.573192	L3	2.115442	L3	2.223356	L10	2.28621	L6	1.859655	L5	2.382856	L7	2.207375	L8	2.022989	L4	1.977546		
L7	2.380952	L4	1.750752	L4	2.240121	L1	2.625965	L7	1.706732	L6	2.238602	L8	2.310316	L3	2.392572	L5	2.29931		
L8	2.287698	L5	2.306195	L5	2.429038	L2	2.432769	L8	1.920607	L7	1.904762	L9	2.275746	L4	2.077123	L6	2.254749		
L9	1.895812	L6	2.211203	L6	2.429038	L3	1.980632	L9	2.282702	L8	2.430438	L10	2.081698	L5	2.437215	L7	1.776522		
L1	2.437215	L7	2.575123	L7	2.132249	L4	2.432769	L10	2.29056	L9	2.28621	L1	1.931582	L6	2.575123	L8	2.161409		
L2	2.252874	L8	2.543738	L1	1.818854	L5	2.005096	L11	2.165317	L10	2.335276	L2	2.027685	L7	1.615096	L9	2.539163		

ตาราง ก.21 (ต่อ)

Features	Value	Features	Value
L10	1.985547	L1	2.29931
L1	2.589449	L2	2.589449
L2	2.081698	L3	2.122923
L3	2.071008	L4	2.161409
L4	1.931582	L5	2.161409
L5	2.302985	L6	2.168731
L6	1.939772	L7	1.979149
L1	2.257092	L8	2.34663
L2	2.254749	L9	2.165317
L3	2.352029	L10	2.071008
L4	2.310316		
L5	2.401831		
L6	2.1274		
L7	2.543738		
L1	2.440682		
L2	2.373501		
L3	2.253343		
L4	2.408862		
L5	1.793103		
L6	2.437215		
L7	1.977546		
L8	2.025077		

ตาราง ก.22 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 600 l/min ที่ความสูง 30 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L3	2.756007	L2	2.5217	L4	2.916565	L4	2.57475	L7	2.57774	L7	2.71864	L2	3.11931	L5	2.807266
L4	2.748755	L4	3.14226	L5	2.986502	L6	3.16479	L8	3.05076	L8	2.81749	L3	2.772344	L7	2.801367
L5	2.584385	L5	3.01	L6	3.501242	L8	3.06723	L9	2.82737	L9	2.92587	L4	2.813464	L9	2.918969
L6	3.096506	L6	2.781733	L7	2.685024	L9	2.81006	L10	2.71832	L2	2.60556	L6	3.042645	L10	2.761357
L7	2.899089	L7	2.822123	L1	2.66534	L10	3.12442	L1	2.81749	L3	2.49279	L7	2.947686	L2	2.996801
L8	3.036837	L2	2.556716	L4	2.63019	L11	2.94769	L2	2.60556	L4	2.93754	L2	2.560063	L4	2.756637
L9	2.945003	L3	2.756007	L5	2.6016	L12	2.7911	L3	2.60556	L5	2.8544	L3	2.588697	L6	3.174598
L10	2.761357	L4	2.945003	L6	2.83322	L13	2.82212	L4	2.72182	L6	2.87879	L4	3.134058	L7	2.736107
L1	3.11931	L5	2.423666	L9	2.71864	L1	2.64488	L5	2.548	L1	2.9806	L5	3.042645	L8	2.833224
L3	2.685024	L6	3.3607	L10	2.76387	L2	3.00502	L6	2.69659	L2	2.97617	L6	2.639341		
L4	2.959286	L7	2.682128	L11	3.26316	L3	2.84674	L1	2.78173	L3	3.17264	L7	2.580732		
L5	2.736107	L8	2.718636	L13	2.66954	L4	3.25577	L3	2.63706	L4	2.75664	L8	2.961661		
L6	2.456693	L1	2.781733	L14	2.62823	L5	2.63934	L4	2.87302	L5	2.95929	L9	2.805094		
L2	3.024682	L2	2.980603	L3	3.12868	L6	3.01	L5	2.72595	L6	2.81749	L1	2.748755		
L3	2.688129	L3	2.873015	L4	3.08103	L7	2.51458	L6	2.68502	L1	3.03567	L2	3.00502		
L4	2.955839	L4	2.634443	L5	3.32532	L8	2.58306	L7	3.14706	L2	2.62003	L3	2.96996		
L5	3.086403	L5	2.990919	L7	2.90784	L1	2.63444	L8	3.14706	L3	2.69145	L5	2.905125		
L7	2.881405	L6	2.601598	L8	3.09651	L2	2.78173	L9	2.94769	L4	2.945	L6	2.947686		
L8	3.003035	L7	2.580732	L9	2.71066	L3	2.86326	L2	2.86784	L5	2.69049	L7	2.756007		
L9	3.172739	L1	2.990331	L10	2.8544	L4	3.05076	L3	2.91867	L6	2.62823	L1	2.57774		
L10	2.430458	L2	2.907838	L2	2.93665	L5	2.87302	L4	2.945	L7	2.80137	L2	2.626591		
L1	2.599286	L3	2.529478	L3	2.57475	L6	3.16479	L5	2.82212	L1	2.70139	L4	2.863262		

ตาราง ก.23 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 600 l/min ที่ความสูง 80 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	2.5443	L4	2.756322	L8	3.082756	L3	3.039451	L8	2.57774
L2	2.713547	L7	3.032475	L9	2.756637	L4	2.669544	L9	2.813464
L3	2.687094	L8	2.945003	L1	2.605557	L5	2.572414	L10	2.665663
L4	2.931844	L9	2.894555	L2	2.626591	L2	2.810056	L1	2.894253
L5	2.781288	L1	2.786314	L3	2.725953	L3	2.810056	L3	2.628228
L11	3.080746	L2	2.734694	L4	2.853177	L4	2.718317	L5	2.851033
L12	2.457039	L3	3.067903	L5	2.621345	L5	2.626591	L6	2.895463
L13	2.764185	L4	2.793003	L2	2.85593	L6	2.593665	L7	2.665663
L14	2.618719	L5	2.498533	L3	2.342529	L7	2.57774	L8	2.527789
L15	2.621345	L8	2.828902	L4	2.986207	L2	2.713217	L1	2.733673
L16	2.664692	L1	3.07931	L5	2.710664	L3	2.573746	L2	2.573746
L17	2.443178	L2	2.942916	L7	2.667281	L4	2.553701	L3	2.848582
L18	2.941424	L3	2.34576	L8	2.451502	L5	2.761357	L4	2.48046
L1	2.508128	L4	2.863262	L9	2.669544	L6	3.036837	L5	2.853177
L2	2.942916	L2	2.688818	L1	2.672452	L7	2.514582		
L4	2.986207	L3	2.643693	L2	2.526775	L1	2.894253		
L5	2.851033	L4	2.876517	L3	2.849502	L2	2.851033		
L6	2.451502	L5	2.884335	L4	2.534877	L3	2.802609		
L7	3.00502	L6	2.821289	L5	2.621345	L4	2.664368		
L8	2.803541	L3	2.817487	L6	2.526775	L5	2.685024		
L2	2.664692	L6	2.993567	L1	2.669544	L1	2.986502		
L3	2.480803	L7	2.480803	L2	2.851033	L4	2.895463		

ตาราง ก.24 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 600 l/min ที่ความสูง 130 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	3.032184	L4	2.757581	L5	3.180194	L7	2.599286	L3	2.894253
L2	3.080746	L5	2.114202	L1	2.619704	L9	2.759155	L4	2.849502
L3	2.986502	L6	2.710664	L2	2.483546	L10	2.756637	L5	2.360077
L4	2.913558	L8	2.25391	L4	2.669544	L1	2.849502	L7	2.580732
L5	2.456693	L1	2.987386	L5	2.388859	L2	2.682128	L8	2.34827
L6	2.434831	L2	3.170395	L5	3.216369	L3	2.787667	L9	2.527789
L8	2.378232	L3	3.078448	L6	3.034802	L4	2.873015	L11	2.437616
L1	2.38992	L4	3.171236	L7	2.942916	L5	2.895463	L1	2.986502
L2	2.805094	L5	3.078161	L8	2.526775	L6	2.982963	L2	2.945003
L3	2.021093	L7	2.38992	L9	2.996801	L2	2.665663	L3	2.718317
L4	2.126634	L8	2.623641	L1	2.485945	L3	2.761357	L5	2.526437
L6	2.397334	L1	2.713217	L2	2.355431	L4	2.669544	L6	2.443178
L7	2.481832	L2	2.446996	L3	2.623641	L5	2.619704	L9	2.456693
L1	2.802299	L3	2.665663	L5	2.644883	L6	2.909043	L1	2.802299
L2	2.710664	L4	2.502341	L6	2.803541	L1	2.894555	L2	2.848582
L3	1.976354	L6	2.434483	L8	2.802609	L2	2.664368	L4	2.621345
L4	2.314377	L8	2.664368	L1	2.894253	L3	2.851033	L6	2.572747
L5	2.388506	L9	2.531841	L2	2.214003	L4	2.665663	L7	2.443178
L6	2.443178	L1	3.492212	L3	2.435876	L5	2.526437	L8	2.618391
L1	2.945003	L2	3.078161	L4	2.480803	L6	2.664692	L10	2.776416
L2	2.206105	L3	2.759155	L5	2.669544	L7	2.572414		
L3	2.462566	L4	3.034802	L6	2.711622	L2	2.572414		

ตาราง ก.25 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค 400 μm . อัตราการไหลของอากาศ 600 l/min ที่ความสูง 180 cm. จากตัวกระจายอากาศ

Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value	Features	Value
L1	2.4443	L3	2.871746	L7	2.47774	L3	2.840528	L2	2.109927	L18	2.28886
L2	2.538445	L4	2.253917	L9	2.47774	L4	2.625953	L3	2.588129	L1	2.5802
L3	2.395604	L5	2.065597	L10	2.567281	L5	2.841424	L4	2.396703	L2	2.65758
L4	2.418593	L7	2.347991	L12	2.702299	L6	2.702299	L5	2.779125	L4	2.70354
L5	2.349107	L8	2.4443	L13	2.150575	L1	2.657581	L6	2.53319	L5	2.28886
L9	2.380803	L9	2.718305	L14	2.288859	L2	2.427789	L7	2.538445		
L10	2.427789	L10	2.398533	L1	2.472414	L3	2.335876	L1	2.518719		
L11	2.484385	L1	2.473746	L2	2.564692	L4	2.749502	L3	2.97931		
L12	2.442958	L2	2.242529	L3	2.473746	L5	2.380803	L4	2.47774		
L13	2.621819	L3	2.214377	L4	2.567281	L1	2.794555	L5	2.84023		
L14	2.565663	L4	2.255431	L5	2.288859	L2	2.301211	L6	2.642121		
L15	2.701367	L5	2.38046	L6	2.519704	L3	2.567281	L7	2.539341		
L16	2.564692	L6	2.611622	L7	2.291687	L4	2.705094	L8	2.484385		
L1	2.472414	L7	2.346996	L8	2.334483	L5	2.427789	L9	2.859286		
L2	2.291687	L8	2.63864	L1	2.656637	L7	2.518719	L10	2.38046		
L3	2.243965	L9	2.431841	L2	2.657581	L1	2.992215	L11	2.84023		
L4	2.521345	L10	2.518391	L3	2.982756	L2	2.710056	L12	2.702299		
L5	2.702609	L4	2.521345	L4	2.618317	L3	2.841424	L13	2.713464		
L6	2.472747	L5	2.044023	L5	2.749502	L4	2.933348	L14	2.537056		
L10	2.334483	L6	2.083034	L6	2.656637	L5	2.291687	L15	2.942645		
L1	2.408397	L7	2.618317	L1	2.75593	L6	2.426775	L16	2.369461		
L2	2.586059	L8	2.343178	L2	2.84023	L1	2.460484	L17	2.565663		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2 ข้อมูลความดัน

ตาราง ก.26 ข้อมูลความดันที่ความสูงต่าง ๆ ของถ่านหินขนาด 400 μm

Position	pressure (mm.H ₂ O)																			
	Q=400 l/min				Q=450 l/min				Q=500 l/min				Q=550 l/min				Q=600 l/min			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
P ₁	48.98	48.18	48.34	48.50	49.38	48.48	49.14	49.00	51.06	50.06	50.14	50.42	53.77	53.79	53.6	53.72	57.59	57.63	57.55	57.60
P ₂	46.69	46.06	46.12	46.29	47.38	46.75	47.06	47.06	48.41	48.78	48.51	48.57	51.87	51.89	52.81	52.19	55.71	56.25	56.85	56.27
P ₃	43.07	42.58	42.9	42.58	44.9	44.21	44.71	43.61	45.6	45.95	45.51	45.69	49.06	49.53	50.03	49.54	54.28	54.26	54.15	54.23
P ₄	40.06	40.14	40.16	40.13	41.61	41.75	41.35	41.57	43.71	43.65	43.63	43.66	47.89	48.25	48.19	48.11	53.12	53.33	53.21	53.22
P ₅	38.36	38.42	38.39	38.31	39.73	40.05	40.01	39.93	42.03	41.66	42.58	42.07	46.24	46.47	46.85	46.52	52.76	52.76	52.61	52.71
P ₆	25.09	25.16	25.1	25.10	30.15	30.45	30.36	30.32	35.2	35.55	35.21	35.32	39.4	39.55	38.68	39.23	46.21	45.91	46.09	46.07
P ₇	10.48	10.54	10.25	10.42	11.79	11.42	11.8	11.67	12.05	12.25	12.16	12.15	14.25	14.18	14.17	14.20	15.3	15.22	15.69	15.40
P ₈	9.4	9.43	9.51	9.45	10.91	10.89	10.84	10.88	11.9	11.8	11.67	11.79	13.5	13.56	13.47	13.51	14.74	14.72	14.87	14.78

ตาราง ก.27 ข้อมูลความดันที่ความสูงต่าง ๆ ของถ่านหินขนาด 600 μm

Position	pressure (mm.H ₂ O)																			
	Q=450 l/min				Q=500 l/min				Q=550 l/min				Q=600 l/min				Q=650 l/min			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
P ₁	52.74	52.71	52.98	52.81	54.53	54.72	54.45	54.57	58.42	58.34	58.6	58.45	60.51	60.56	60.46	60.51	64.89	64.89	64.69	64.82
P ₂	50.44	50.19	49.91	50.18	52.12	52.31	52.09	52.17	56.28	56.45	56.59	56.44	58.95	58.88	59.32	59.05	63.87	63.5	63.71	63.69
P ₃	46.09	46.32	46.14	46.14	48.16	48.23	48.36	48.25	53.65	53.42	53.34	53.37	57.02	57.15	56.74	56.97	61.85	62.03	62.15	62.01
P ₄	42.85	42.99	42.89	42.91	45.58	45.55	45.46	45.53	51.19	51.1	50.56	50.95	55.1	55.15	55.2	55.16	60.37	60.34	60.49	60.40
P ₅	39.21	38.78	28.86	38.95	42.61	42.6	42.47	42.56	48.19	47.93	47.58	47.90	52.44	52.33	52.4	52.39	55.84	55.65	55.55	57.68
P ₆	24.33	24.28	24.47	24.36	32	32.75	32.39	32.38	35.15	35.24	36.05	35.48	44.01	44.8	43.79	44.20	47.53	47.56	47.5	47.53
P ₇	11.82	11.83	11.7	11.78	14.01	14.25	14.13	14.13	16.42	16.48	16.6	16.50	19.72	19.75	19.85	19.77	22.64	22.57	22.86	22.69
P ₈	11.54	11.63	11.67	11.61	13.59	13.43	13.46	13.49	15.7	15.69	15.86	15.75	18.91	18.94	18.79	18.88	21.36	21.23	21.48	21.36

ตาราง ก.28 ข้อมูลความดันที่ความสูงต่าง ๆ ของถ่านหินขนาด 800 μm

Position	pressure (mm.H ₂ O)																			
	Q=450 l/min				Q=500 l/min				Q=550 l/min				Q=600 l/min				Q=650 l/min			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
P ₁	54.5	54.67	54.45	54.54	56.19	56.91	57	56.70	59.95	59.8	59.77	59.84	63.25	63.21	63.44	63.30	66.59	66.18	66.02	66.26
P ₂	51.38	51.5	51.41	51.43	53.8	53.99	54.06	53.95	57.56	57.4	57.51	57.49	61.23	61.88	61.27	61.46	64.52	64.43	64.54	64.49
P ₃	46.13	46.25	45.77	46.05	49.95	49.9	49.7	49.85	54.41	54.56	54.62	54.53	58.49	58.46	58.52	58.49	62.34	62.47	62.42	62.41
P ₄	41.78	41.76	41.8	41.78	46.25	46.3	46.56	46.37	52.1	52.2	52.33	52.21	56.25	56.78	56.27	56.43	60.52	60.87	60.68	60.69
P ₅	35.54	35.36	35.3	35.48	41.12	41.18	41.57	41.29	48.44	48.62	48.47	48.51	53.88	53.45	52.3	53.21	51	51.04	51.08	58.04
P ₆	24.32	24.2	24.59	24.37	30.63	30.78	31.26	30.89	36.77	36.27	36.19	36.41	39.37	39.16	39.21	39.25	51.8	51.78	51.79	51.79
P ₇	12.56	12.44	12.29	12.43	14.78	14.74	14.79	14.77	16.66	16.5	16.56	16.57	17.15	17.25	17.3	17.23	19.64	19.92	19.65	19.74
P ₈	11.16	11.17	11.2	11.18	14.27	14.28	14.33	14.29	14.63	14.6	14.61	14.61	16.64	16.71	16.81	16.72	19.07	19.09	19.14	19.10

ตาราง ก.29 ข้อมูลความดันที่ความสูงต่าง ๆ ของถ่านหินขนาด 400 μm

Position	pressure (mm.H ₂ O)																			
	Q=500 l/min				Q=550 l/min				Q=600 l/min				Q=650 l/min				Q=700 l/min			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
P ₁	60.51	60.58	60.59	60.56	62.26	62.52	62.37	62.38	64.86	64.71	64.84	64.81	67.81	67.83	67.75	67.73	69.53	69.42	69.64	69.54
P ₂	57.3	57.35	58.55	57.40	59.56	59.71	59.49	59.58	62.1	62.15	62.08	62.11	65.18	65.23	65.34	65.25	67.28	67.43	67.4	67.37
P ₃	52.98	52.97	52.99	52.98	55.84	55.57	55.57	55.66	58.26	58.88	58.27	58.47	56.46	56.41	56.54	61.84	64.56	64.52	63.58	64.52
P ₄	49.3	49.23	49.16	49.23	52.56	52.74	52.47	52.59	55.9	55.96	55.69	55.85	59.98	59.32	59.44	59.58	56.28	56.52	56.47	62.84
P ₅	42.92	42.54	42.46	42.64	47.25	47.26	47.36	47.29	51.41	51.46	51.45	51.44	56.02	55.77	55.61	55.80	60.43	60.87	60.56	60.62
P ₆	34.02	34.07	34.27	34.12	38.06	38.48	38.78	38.44	40.38	40.51	41	40.63	42.35	42.2	43.04	42.53	48.32	48.44	49.4	48.72
P ₇	16.15	16.08	16.21	16.15	19.58	19.63	19.6	19.60	22.51	22.42	22.58	22.50	24.3	24.25	24.22	24.26	29.06	29.06	29.14	29.09
P ₈	14.94	14.95	14.83	14.91	18.4	18.62	18.66	18.56	20.2	20.09	20.12	20.14	23.16	23.14	23.2	23.17	27.8	27.83	27.66	27.76

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณความหนาแน่นบัลค์ของเบด ความหนาแน่นของถ่านหินและสัดส่วนช่องว่าง

จากข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1 แสดงในตารางภาคผนวก ก. 1

$$\begin{aligned} \text{จาก ความหนาแน่นบัลค์}(\rho_b) &= \text{น้ำหนักถ่านหิน} / \text{ปริมาตรภาชนะบรรจุ} \\ &= (578.2 - 241.0) / 500 \\ &= 0.6724 \text{ g/cm}^3 \\ &= 674.4 \text{ kg/ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จากสัดส่วนช่องว่าง}(\epsilon_g) &= \text{ปริมาตรอากาศ} / \text{ปริมาตรภาชนะ} \cdot 1.374489 \\ &= \text{ปริมาตรน้ำที่เต็ม} / \text{ปริมาตรภาชนะ} \\ &= (833.6 - 578.2) / 500 \\ &= 0.5108 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก ความหนาแน่นถ่านหิน}(\rho_g) &= \text{ความหนาแน่นบัลค์}(\rho_b) / (1 - \text{สัดส่วนช่องว่าง}(\epsilon_g)) \\ &= 672.4 / (1 - 0.5108) \\ &= 1378.6 \text{ kg/ m}^3 \end{aligned}$$

และจากข้อมูลการทดลองครั้งที่ 2 และ 3 ความหนาแน่นถ่านหินมีค่าเท่ากับ 1371.3 และ 1381.8 kg/ m³ ตามลำดับ

ดังนั้น ความหนาแน่นเฉลี่ยของถ่านหินมีค่าเท่ากับ 1378.6 kg/ m³ (ประมาณ 1380 kg/ m³)

2. การคำนวณค่า Sauter mean diameter, d_{Sm}

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

จากข้อมูลในตาราง ก.2 เมื่อนำมาคำนวณหาสัดส่วนของน้ำหนักในแต่ละช่วงขนาดของถ่านหินของถ่านหินขนาด 400 μm จะได้ดังแสดงในตาราง ข.1

ตาราง ข.1 สัดส่วนของน้ำหนักในแต่ละช่วงขนาดของถ่านหินก่อนการทดลอง

ของถ่านหินขนาด 400 μm

size	Dpi (Micron)	weight (grams)	(xi)
300-425	362.5	1400	0.0035
425-500	462.5	300	0.0050
500-600	550	133	0.0050
600-850	725	100	0.0200
850-1180	1015	67	0.9665
total		2000	1.00

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

$$d_{Sm} = \frac{1}{\left(\frac{0.0035}{362.5} + \frac{0.0050}{462.5} + \frac{0.0050}{550} + \frac{0.0200}{725} + \frac{0.9665}{1015} \right)}$$

$$= 1/0.002052$$

$$= 404 \mu\text{m}$$

3. การคำนวณหาอัตราการป้อนกลับของถ่านหินเข้าสู่โรเตอร์ผ่านแอลวาล์ว

จากข้อมูลในตาราง ก.4 ที่อัตราการเปิดเบอร์ 2 ครั้งที่ 1

$$\text{จะได้ อัตราการป้อนกลับของถ่านหิน} = 93.4 / 5.86 \text{ g/s}$$

$$= 57.38 \text{ kg/hr}$$

4. การแปลงค่าอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนจากหน่วย l/min เป็นหน่วย m^3/s และเป็นอัตราเร็วอากาศ (Ug)

$$\text{ที่อัตราการไหลของอากาศ} = 400 \text{ l/min}$$

$$= 0.00667 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{พ.ท.หน้าตัดโรเตอร์} = \pi(0.05)^2/4$$

$$= 0.00196 \text{ m}^2$$

$$\text{อัตราเร็วอากาศ} = \text{อัตราการไหลอากาศ/พ.ท.หน้าตัดโรเตอร์}$$

$$= 0.00667/0.00196$$

$$= 3.40 \text{ m/s}$$

5. การหาความเร็วอากาศที่เข้าไซโคลน

$$\begin{aligned} \text{จาก อัตราการไหลของอากาศ} &= \text{ความเร็วของอากาศ} \times \text{พื้นที่หน้าตัด} \\ \text{พื้นที่หน้าตัดก่อนเข้าไซโคลน} &= \pi(0.03)^2/4 \\ &= 0.0071 \text{ m}^2 \\ \text{อัตราการไหลของอากาศ} &= 550 \text{ l/min} \\ &= 0.0092 \text{ m}^3/\text{s} \\ \text{ความเร็วของอากาศที่เข้าไซโคลน} &= 0.0092/0.0071 \\ &= 12.96 \text{ m/s} \end{aligned}$$

6. การคำนวณค่า SD. ของขนาดอนุภาคก่อนและหลังการทดลอง

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \text{SD.} &= [\Sigma(\text{ybar}-y_i)^2/(n-1)]^{1/2} \\ \text{เมื่อ} \quad \text{ybar} &= \Sigma(x_i/Dp_i) = \Sigma((1/Dp_i)*w_i)/n \\ Y_i &= 1/Dp_i \\ n &= \text{จำนวนข้อมูลทั้งหมด (น้ำหนักถ่านหิน)} \end{aligned}$$

- การหา SD. ของขนาดอนุภาคก่อนการทดลอง สำหรับอนุภาคขนาด 400 μm .

จากตาราง ก.2 ข้อมูลน้ำหนักของอนุภาคในแต่ละช่วงก่อนการทดลอง สำหรับอนุภาคในแต่
ละขนาด นำมาหาค่าต่างๆได้ดังนี้

ตาราง ข.2 การคำนวณค่าเบี่ยงเบนของขนาดของอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 400 μm .

Size (μm .)	Dp _i	weight (g)	(1/Dp _i)*w _i	(1/Dp _i)	(ybar-y _i)	(ybar-y _i) ²	(ybar-y _i) ² *w _i
300-425	362.5	1400	3.862069	0.0027586	-0.0002802	7.85364E-08	0.000109951
425-500	462.5	300	0.6486486	0.0021622	0.0003162	9.99919E-08	2.99976E-05
500-600	550	133	0.2424242	0.0018182	0.0006602	4.35858E-07	5.81144E-05
600-850	725	100	0.137931	0.0013793	0.0010991	1.20795E-06	0.000120759
850-1180	1015	67	0.0656814	0.0009852	0.0014932	2.22951E-05	0.000148634
Total(Σ)		2000	4.9567543				0.000467492

$$\begin{aligned} \text{ybar} &= \Sigma((1/Dp_i)*w_i)/n \\ &= 4.9567543/2000 \\ &= 0.0024784 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าลงในสูตร} \quad \text{SD.} &= \{(0.000467492)/(2000-1)\}^{1/2} \\ &= 0.000483594 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{range} &= (\text{ybar}+\text{SD}) \text{ และ } (\text{ybar}-\text{SD}) \\ &= (0.0024784+0.000483594) \text{ และ } (0.0024784-0.000483594) \\ &= 0.002961971 \text{ และ } 0.001994783 \end{aligned}$$

นำค่าที่ได้ไปแทนในสูตร Sauter mean diameter = $1/0.002961971$ และ $1/0.001994783$

ดังนั้นอนุภาคก่อนการทดลองมีค่าเบี่ยงเบนอยู่ในช่วง 337-501 μm . โดยมีค่าเฉลี่ยอนุภาคเท่ากับ 400 μm .

7. การคำนวณค่า terminal fluidization velocity, U_t

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

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

$$\rho_s = 1380 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_g = 1.28 \text{ kg/m}^3$$

$$d_p = d_{sm} = 400 * 10^{-6} \text{ m}$$

$$\mu = 0.000018 \text{ kg/ms}$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการจะได้

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

$$U_{t,spherical} = 2.08$$

ตรวจค่า Re_p ว่าตรงตามเงื่อนไขหรือไม่

$$Re_p = \rho_g d_p U_t / \mu$$

$$= (1.28 * (400 * 10^{-6}) * 2.08) / 0.000018$$

$$= 59$$

ดังนั้น U_t ที่หาได้เป็นค่าที่ถูกต้องเนื่องจากค่า Re_p เป็นไปตามเงื่อนไข

8. การหาค่าความเร็วของอนุภาค (particle velocity)

$$\text{จาก } v = s/t$$

จากตารางภาคผนวก ก.4 ค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค
= 1.84 mm. โดยใช้ความเร็ว shutter = 1/1000 sec

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า } s &= 1.84 \\ t &= 1/1000 \\ v &= 1.84 \cdot 10^{-3} / (1/1000) \\ &= 1.84 \end{aligned}$$

ดังนั้นความเร็วของอนุภาคมีค่าเท่ากับ 1.84 m/s

9. การหาสัดส่วนช่องว่างของอนุภาค(ϵ_s)

$$\text{จาก } \Delta P = \epsilon_s \rho_s g h$$

เมื่อ ΔP – ความดันลดคร่อมจุด

ϵ_s – สัดส่วนของอนุภาค

ρ_s – ความหนาแน่นของถ่านหิน

g – แรงโน้มถ่วงของโลก

h – ระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด

จากตาราง ก.84 ขนาดอนุภาค 400 μm . และที่อัตราการไหลของอากาศ 400l/min.

จะได้ ความดันลดระหว่าง P_1 และ P_2 มีค่าเท่ากับ 2.2 mm.H₂O (21.67kg/ms²)

ระยะห่างระหว่าง P_1 และ P_2 มีค่าเท่ากับ 0.1 m.

$$\text{แทนค่า } \Delta P = 21.67 \text{ kg/ms}^2$$

$$\rho_s = 1380 \text{ kg/m}^3$$

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

$$h = 0.1 \text{ m.}$$

$$\text{จะได้ } \epsilon_s = 21.67 / (1380 \cdot 9.8 \cdot 0.1)$$

$$= 0.016$$

ดังนั้น สัดส่วนของอนุภาคในช่วงความสูง P_1 และ P_2 มีค่าเท่ากับ 0.016

10. การคำนวณประสิทธิภาพของไซโคลน

คำนวณประสิทธิภาพของไซโคลนโดยโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งสามารถใส่ค่าตัวแปร ภาวะการทดลองต่างๆ ขนาดของไซโคลน แล้วคำนวณอัตโนมัติได้ดังต่อไปนี้

ตาราง ข.3 แสดงการกรอกข้อมูลตัวแปรต่างๆ และผลรับการคำนวณประสิทธิภาพของไซโคลน

ในโปรแกรมสำเร็จรูป

Geometry	Symbol	Unit	Input	Working
Dia	D	m	0.12	0.39
Inlet ht	a	m	0.06	2.36
Inlet width	b	m	0.03	1.18
Outlet length	S	m	0.06	0.20
Outlet dia	De	m	0.06	2.36
Cylinder ht	h	m	0.24	0.79
Overall ht	H	m	0.48	1.57
Dust outlet dia	B	m	0.03	1.18
Gas data				
Flow rate	Q	m ³ /h	50	29.42
Density	ρ_g	kg/m ³	1.2800	0.0799
Viscosity	μ	cP	0.018	0.018
Temperature	T	°C	27	81
Salt. temp fact	fT		1.00	1
Salt dens. fact	fp		1.00	1
Particle data				
Log mean dia	d_p	μm	400	
Specific gravity			1.38	86.112
Overall efficiency			92.2%	

ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปของ

Website www.mnsi.net/~pas/esco.htm

Esco Engineering

179 Lansdowne Avenue,

Kingsville, Ontario N9Y 3J2 Canada

ph 519 733 3122

fax 519 733 6094

Contact: Neil Stone, Chief Engineer

e-mail jnstone@mnsi.net



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

1. ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้

-ขนาด 400 μm .

จากตาราง ก.6-ก.25 นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของความยาวเส้น

ตาราง ค.1 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับอนุภาคขนาด 400 μm

ตำแหน่ง	ความยาวเฉลี่ย(mm.)				
	อัตราการไหลของอากาศ(l/min)				
	400	450	500	550	600
Z ₁	1.83636	2.22911	2.36307	2.46418	2.83887
Z ₂	1.60903	2.07874	2.25644	2.35282	2.7381
Z ₃	1.32999	1.89626	2.19558	2.31476	2.67198
Z ₄	1.21077	1.6487	1.96912	2.19854	2.52763

-ขนาด 600 μm .ตาราง ค.2 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับอนุภาคขนาด 600 μm

ตำแหน่ง	ความยาวเฉลี่ย(mm.)				
	อัตราการไหลของอากาศ(l/min)				
	450	500	550	600	650
Z ₁	3.43414	3.83775	4.0897	4.40192	4.83729
Z ₂	3.13897	3.72209	3.91384	4.28802	4.56185
Z ₃	2.89526	3.44767	3.80932	4.13222	4.35218
Z ₄	2.59421	3.20454	3.5905	3.88883	4.10965

-ขนาด 800 μ m.

ตาราง ค.3 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับอนุภาคขนาด 800 μ m

ตำแหน่ง	ความยาวเฉลี่ย(mm.)				
	อัตราการไหลของอากาศ(l/min)				
	450	500	550	600	650
Z ₁	2.93354	3.22956	3.57132	4.21294	4.49302
Z ₂	2.69424	3.11968	3.3789	4.03796	4.31461
Z ₃	2.57502	2.92194	3.25667	3.92884	4.1082
Z ₄	2.39922	2.74228	3.0683	3.73256	3.94362

-ขนาด 1000 μ m.

ตาราง ค.4 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับอนุภาคขนาด 1000 μ m

ตำแหน่ง	ความยาวเฉลี่ย(mm.)				
	อัตราการไหลของอากาศ(l/min)				
	500	550	600	650	700
Z ₁	3.77041	4.19368	4.55875	4.94375	5.58793
Z ₂	3.54089	3.94723	4.27731	4.70054	5.20733
Z ₃	3.40832	3.84009	4.09137	4.51614	5.05344
Z ₄	3.31239	3.78324	3.93827	4.38313	4.78601

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ผลการหาความเร็วของอนุภาค จากความยาวเส้นเฉลี่ยที่ลากได้

นำค่าเฉลี่ยของความยาวเส้น(ตาราง ค.1-ค.4)มาคำนวณหาความเร็วอนุภาค จะได้ความเร็วของอนุภาคณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ดังนี้

-ขนาด $400\mu\text{m}$.

ตาราง ค.5 ผลความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคขนาด $400\mu\text{m}$

ตำแหน่ง	ความเร็ว(m/s)				
	อัตราการไหลของอากาศ(l/min)				
	400	450	500	550	600
Z ₁	1.83636	2.22911	2.36307	2.46418	2.83887
Z ₂	1.60903	2.07874	2.25644	2.35282	2.7381
Z ₃	1.32999	1.89626	2.19558	2.31476	2.67198
Z ₄	1.21077	1.6487	1.96912	2.19854	2.52763

-ขนาด $600\mu\text{m}$.

ตาราง ค.6 ผลความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคขนาด $600\mu\text{m}$

ตำแหน่ง	ความเร็ว(m/s)				
	อัตราการไหลของอากาศ(l/min)				
	450	500	550	600	650
Z ₁	1.71707	1.91887	2.04485	2.20096	2.41864
Z ₂	1.56949	1.86104	1.95692	2.14401	2.28093
Z ₃	1.44763	1.72384	1.90466	2.06611	2.17609
Z ₄	1.2971	1.60227	1.79525	1.94441	2.05483

-ขนาด 800 μ m.

ตาราง ค.7 ผลความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคขนาด 800 μ m

ตำแหน่ง	ความเร็ว(m/s)				
	อัตราการไหลของอากาศ(l/min)				
	450	500	550	600	650
Z ₁	1.46677	1.61478	1.78566	2.10647	2.24651
Z ₂	1.34712	1.55984	1.68945	2.01898	2.15731
Z ₃	1.28751	1.46097	1.62833	1.96442	2.0541
Z ₄	1.19961	1.37114	1.53415	1.86628	1.97181

-ขนาด 1000 μ m.

ตาราง ค.8 ผลความเร็วเฉลี่ยของอนุภาคขนาด 1000 μ m

ตำแหน่ง	ความเร็ว(m/s)				
	อัตราการไหลของอากาศ(l/min)				
	500	550	600	650	700
Z ₁	0.9426	1.04842	1.13969	1.23594	1.39698
Z ₂	0.88522	0.98681	1.06933	1.17513	1.30183
Z ₃	0.85208	0.96002	1.02284	1.12904	1.26336
Z ₄	0.8281	0.94581	0.98457	1.09578	1.1965

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ผลการหาความดันลดคร่อมจุดต่าง ๆ

นำข้อมูลความดัน(ตาราง ก.26 -ก.29)มาคำนวณหาความดันลดคร่อมจุดต่าง ๆ จะได้ความดันลดคร่อมจุดต่าง ๆ ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเซอรัดังนี้

-ขนาด 400 μ m.

ตาราง ค.9 ความดันลด ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเซอรั ถ่านหินขนาด 400 μ m

position	ΔL (m.)	height average(m.)	pressure drop ΔP mmH ₂ O				
			400 l/min	450 l/min	500 l/min	550 l/min	600 l/min
P ₁ -P ₂	0.1	0.15	2.2	1.9	1.8	1.5	1.3
P ₂ -P ₃	0.2	0.30	3.7	3.5	2.9	2.7	2.0
P ₃ -P ₄	0.2	0.50	2.4	2.0	2.0	1.4	1.0
P ₄ -P ₅	0.4	0.80	1.8	1.6	1.6	1.6	0.5
P ₅ -P ₆	0.8	1.40	13.2	9.6	6.7	7.3	6.6

-ขนาด 600 μ m.

ตาราง ค.10 ความดันลด ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเซอรั ถ่านหินขนาด 600 μ m

position	ΔL (m.)	height average(m.)	pressure drop ΔP mmH ₂ O				
			450 l/min	500 l/min	550 l/min	600 l/min	650 l/min
P ₁ -P ₂	0.1	0.15	2.6	2.4	2.0	1.5	1.1
P ₂ -P ₃	0.2	0.30	4.0	3.9	3.1	2.1	1.7
P ₃ -P ₄	0.2	0.50	3.2	2.7	2.4	1.8	1.6
P ₄ -P ₅	0.4	0.80	4.0	3.0	3.1	2.8	2.7
P ₅ -P ₆	0.8	1.40	14.6	10.2	12.5	8.2	10.1

-ขนาด 800 μ m.

ตาราง ค.11 ความดันลด ณ.ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ถ่านหินขนาด 800 μ m

position	ΔL (m.)	height average(m.)	pressure drop ΔP mmH ₂ O				
			450 l/min	500 l/min	550 l/min	600 l/min	650 l/min
P ₁ -P ₂	0.1	0.15	3.1	2.8	2.3	1.8	1.8
P ₂ -P ₃	0.2	0.30	5.4	4.1	3.0	3.0	2.1
P ₃ -P ₄	0.2	0.50	4.3	3.5	2.3	2.1	1.7
P ₄ -P ₅	0.4	0.80	6.3	5.1	3.7	3.2	2.7
P ₅ -P ₆	0.8	1.40	11.1	10.4	12.1	14.0	6.2

-ขนาด 1000 μ m.

ตาราง ค.12 ความดันลด ณ.ตำแหน่งต่างๆของไรเซอร์ ถ่านหินขนาด 1000 μ m

position	ΔL (m.)	height average(m.)	pressure drop ΔP mmH ₂ O				
			500 l/min	550 l/min	600 l/min	650 l/min	700 l/min
P ₁ -P ₂	0.1	0.15	3.2	2.8	2.7	2.5	2.2
P ₂ -P ₃	0.2	0.30	4.4	3.9	3.6	3.4	2.8
P ₃ -P ₄	0.2	0.50	3.8	3.1	2.6	2.3	1.7
P ₄ -P ₅	0.4	0.80	6.6	5.3	4.4	3.8	2.2
P ₅ -P ₆	0.8	1.40	8.5	8.9	10.8	13.3	11.9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ผลการหาสัดส่วนของอนุภาค จากความดัน

นำข้อมูลความดัน(ตาราง ก.26 - ก.29)มาคำนวณหาสัดส่วนของอนุภาค จะได้สัดส่วนของอนุภาค ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ดังนี้

-ขนาด 400 μ m.

ตาราง ค.13 สัดส่วนของอนุภาค ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ ถ่านหินขนาด 400 μ m

position	ΔL (m.)	height average(m.)	ϵ_s				
			400 l/min	450 l/min	500 l/min	550 l/min	600 l/min
P ₁ -P ₂	0.1	0.15	0.0160	0.0141	0.0134	0.0111	0.0096
P ₂ -P ₃	0.2	0.30	0.0135	0.0125	0.0104	0.0096	0.0074
P ₃ -P ₄	0.2	0.50	0.0089	0.0074	0.0073	0.0052	0.0037
P ₄ -P ₅	0.4	0.80	0.0033	0.0030	0.0029	0.0029	0.0009
P ₅ -P ₆	0.8	1.40	0.0120	0.0087	0.0061	0.0066	0.0060

-ขนาด 600 μ m.

ตาราง ค.14 สัดส่วนของอนุภาค ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ ถ่านหินขนาด 600 μ m

position	ΔL (m.)	height average(m.)	ϵ_s				
			450 l/min	500 l/min	550 l/min	600 l/min	650 l/min
P ₁ -P ₂	0.1	0.15	0.0200	0.0174	0.0146	0.0106	0.0082
P ₂ -P ₃	0.2	0.30	0.0146	0.0142	0.0111	0.0076	0.0061
P ₃ -P ₄	0.2	0.50	0.0117	0.0098	0.0088	0.0066	0.0058
P ₄ -P ₅	0.4	0.80	0.0072	0.0054	0.0055	0.0050	0.0049
P ₅ -P ₆	0.8	1.40	0.0132	0.0092	0.0113	0.0074	0.0092

-ขนาด 800 μ m.

ตาราง ค.15 สัดส่วนของอนุภาค ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเซอ์ ถ่านหินขนาด 800 μ m

position	ΔL (m.)	height average(m.)	ϵ_s				
			450 l/min	500 l/min	550 l/min	600 l/min	650 l/min
P ₁ -P ₂	0.1	0.15	0.0226	0.0200	0.0170	0.0133	0.0128
P ₂ -P ₃	0.2	0.30	0.0195	0.0149	0.0108	0.0108	0.0076
P ₃ -P ₄	0.2	0.50	0.0155	0.0126	0.0084	0.0074	0.0062
P ₄ -P ₅	0.4	0.80	0.0114	0.0092	0.0067	0.0058	0.0048
P ₅ -P ₆	0.8	1.40	0.0101	0.0094	0.0110	0.0127	0.0057

-ขนาด 1000 μ m.

ตาราง ค.16 สัดส่วนของอนุภาค ณ.ตำแหน่งต่างๆของโรเซอ์ ถ่านหินขนาด 1000 μ m

position	ΔL (m.)	height average(m.)	ϵ_s				
			500 l/min	550 l/min	600 l/min	650 l/min	700 l/min
P ₁ -P ₂	0.1	0.15	0.0229	0.0203	0.0196	0.0180	0.0158
P ₂ -P ₃	0.2	0.30	0.0160	0.0142	0.0132	0.0124	0.0103
P ₃ -P ₄	0.2	0.50	0.0136	0.0111	0.0095	0.0082	0.0061
P ₄ -P ₅	0.4	0.80	0.0119	0.0096	0.0080	0.0069	0.0040
P ₅ -P ₆	0.8	1.40	0.0077	0.0080	0.0098	0.0120	0.0108

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. ผลการทำ sauter mean diameter และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(SD)ของถ่านหินก่อนและหลังการทดลอง

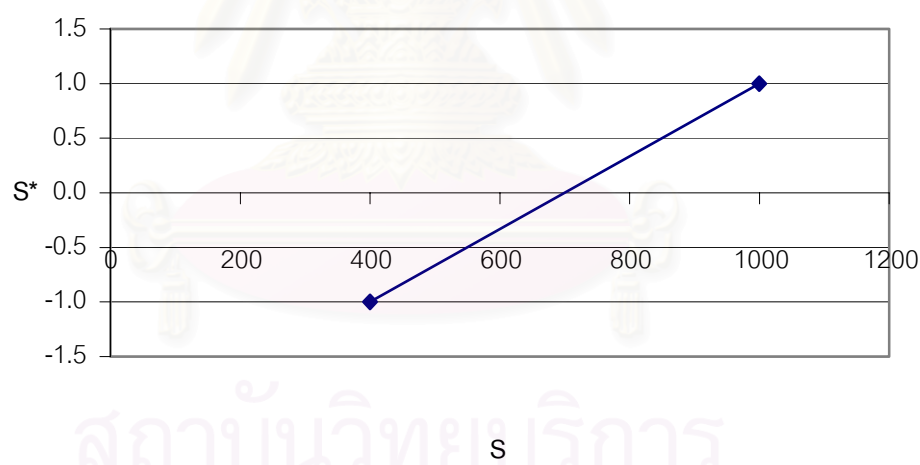
ตาราง ค.17 การหาค่า ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน(SD)ของถ่านหินก่อนและหลังการทดลอง

ขนาดถ่านหิน μm .	ก่อนการทดลอง		หลังการทดลอง	
	Dsm	SD	Dsm	SD
400	404	338-501	378	275-597
600	599	494-760	584	443-857
800	799	650-1036	679	419-1794
1000	991	860-1168	924	644-1630

6. การแปลงรหัสของขนาดอนุภาค อัตราการไหลของอากาศ และความสูงเหนือตัวกระจายอากาศ

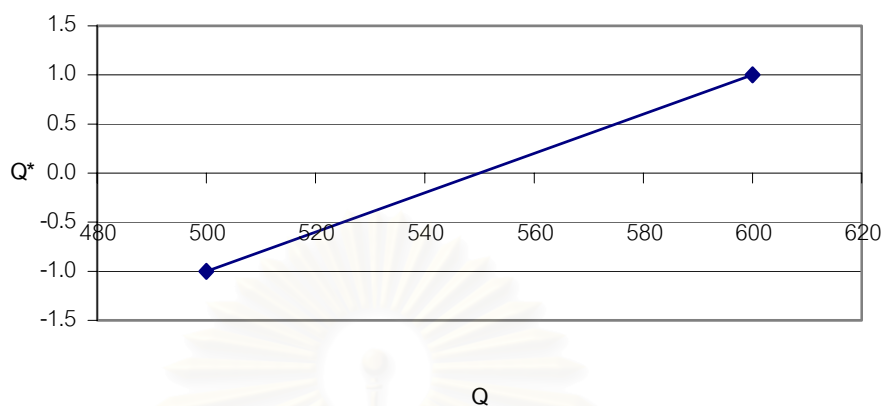
S^* มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ซึ่งหาได้โดยเทียบกับอนุภาคขนาด(S) 400 ถึง 1000 μm .

ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้ $S^* = (S-700)/300$



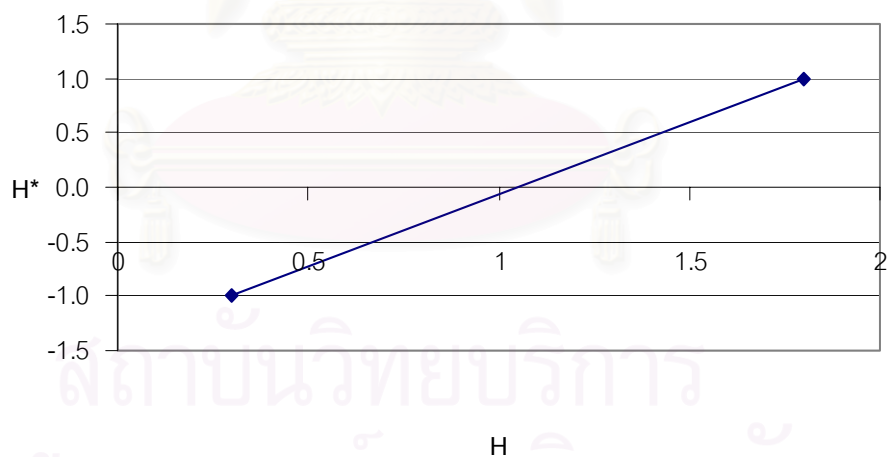
รูปที่ ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาค(S)กับขนาดอนุภาคที่ผ่านการเข้ารหัส(S^*)

Q^* มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ซึ่งหาได้โดยเทียบกับอัตราการไหลของอากาศ(Q) 500 ถึง 600 l/min. ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้ $Q^* = (Q-550)/50$



รูปที่ ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของอากาศ(Q) กับอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านการเข้ารหัส(Q^*)

H^* มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 ซึ่งหาได้โดยเทียบกับความสูง (H) 0.3 ถึง 1.8 m. ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้ $H^* = (H-1.05)/0.75$



รูปที่ ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงเหนือตัวกระจายอากาศ(H) กับความสูงเหนือตัวกระจายอากาศที่ผ่านการเข้ารหัส(H^*)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปาจรรย์ ตั้งผดุงรัชต์ เกิดวันที่ 7 ธันวาคม 2521 เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานครสำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย