

อุทกพลศาสตร์ของสารป้อนผสมในเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน



ว่าที่เรีอตรี สมชาย สวยสะอาด

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

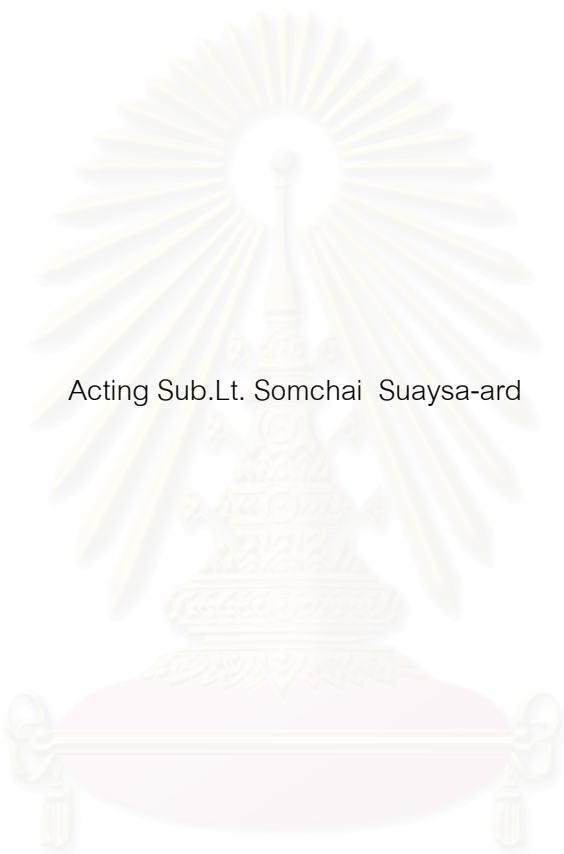
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6038-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDRODYNAMICS OF MIXED FEED IN CIRCULATING FLUIDIZED BED



Acting Sub.Lt. Somchai Suaysa-ard

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2004

ISBN 974-17-6038-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อุทกพลศาสตร์ของสารป้อนผสมในเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดแบบหมุนเวียน
โดย ว่าที่เรือตรี สมชาย สวดยสะอาด
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต)

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

สมชาย สวยศอาด : อุทกพลศาสตร์ของสารป้อนผสมในเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน.
(HYDRODYNAMICS OF MIXED FEED IN CIRCULATING FLUIDIZED BED) อ.ที่ปรึกษา:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชนา นิติวัดมนานนท์ 147 หน้า. ISBN 974-17-6038-8.

งานวิจัยนี้ศึกษาการทำงานของเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง โดยท่อ
โรเตอร์สร้างจากท่อพลาสติกใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโรเตอร์ 0.05 เมตร สูง 2 เมตร และท่อ
ป้อนกลับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร สูง 1.20 เมตร เพื่อให้เห็นถึงการเคลื่อนตัวของสาร
ป้อนผสมที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอัตราการไหลของอากาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของ
แข็งที่มีต่อความดันและความเร็วของอนุภาคที่ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของโรเตอร์ โดยค่า
ความดันไปคำนวณหาสัดส่วนของแข็ง และใช้เทคนิคการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูง CCD
Camera ร่วมกับการใช้โปรแกรม Image Pro Plus V.4.5.1 เพื่อหาความเร็วของของแข็ง อัตราการ
ไหลของอากาศอยู่ในช่วง 300-500 ลิตรต่อนาที ของแข็งที่นำมาศึกษา คือ ททราย, ชี้เลื่อย, แกลบ
และขานอ้อยที่มีความหนาแน่น 2312, 1583, 1484 และ 630 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตาม
ลำดับ ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 250-425 ไมโครเมตร ความเร็วของสารป้อนผสมและความดันใน
ระบบมีค่าลดลงตามความสูงของโรเตอร์ และบริเวณด้านล่างของโรเตอร์จะมีสัดส่วนของแข็งมาก
กว่าด้านบน และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ สัดส่วนของแข็งจะมีค่าลดลงแต่ความเร็วของ
อนุภาคจะมีค่าเพิ่มขึ้นและสัดส่วนของแข็งจะสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งสูงขึ้น
การกระจายตัวของของแข็งตลอดโรเตอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับชี้เลื่อยมีค่าสูงกว่าสาร
ป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบ ที่ตำแหน่งความสูงเดียวกันความเร็วของทรายจะมีค่าต่ำกว่า
ความเร็วของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้มูล และความเร็วของสารป้อนผสมระหว่างทราย
กับชี้เลื่อยมีค่าสูงที่สุด

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2547.....

4572522723 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CIRCULATING FLUIDIZED BED / HYDRODYNAMICS / PARTICLE VELOCITY / MIXED FEED

SOMCHAI SUAYSA-ARD : HYDRODYNAMICS OF MIXED FEED IN CIRCULATING
FLUIDIZED BED. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. SUCHAYA NITIVATTANANON,
Ph.D. 147 pp. ISBN 974-17-6038-8.

An experimental study of hydrodynamics of mixed feed in a circulating fluidized bed was carried out in a cold flow Plexiglas reactor. Tests were conducted in a circulating fluidized bed riser having a diameter of 5 cm. and 2.0 m. height and downcomer with a diameter of 0.10 m. and 1.2 m. height. Four solids (Sand, Sawdust, Rice husk and Bagasse) were selected in this experiment. The average particle sizes were 250 - 425 μm . The particle densities were of 2312, 1583, 1484 and 630 kg/m^3 , respectively. The effect of air flow rate on particle velocity and pressure in CFB riser were studied. The range of air flow rate was 300-500 l/min. The pressure data obtained from the experiment can be used for determining the voidage in riser column. A CCD camera with Image Pro Plus V4.5.1 Program was used to find the particle velocity. It was found that particle velocity and pressure decreased along the riser at constant air flow rate. At the same position, the particle velocity increased with the increasing of air flow rate whereas voidage decreased so that the particle at the lower part was denser than the upper part. It can be seen that an increased solid circulation fluxes results in an increase in the solid holdup. The solid hold up along the riser of sand/saw dust mixer was higher than sand/rice husk mixer, when superficial gas velocity is fixed. In addition, sand velocity was lower than mixer velocity and sand/saw dust mixer velocity was highest.

Department.....Chemical Technology..... Student's signature.....

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

Academic year.....2004.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชญา นิติวฒนานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีตลอดมารวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำในงานวิจัยนี้

งานวิจัยเรื่อง “อุทกพลศาสตร์ของสารป้อนผสมในเครื่องฟลูอิดิโดซ์เบดแบบหมุนเวียน” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์ปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี และทุนบัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุด และ รองศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณสุภัทรรักษ์ จันทสิทธิ์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้าง ซ่อมแซมเครื่องมือและอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ อย่างดีและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา รวมทั้งขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ชาวเคมีเทคนิคทุกคนที่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำด้วยดีเสมอมา

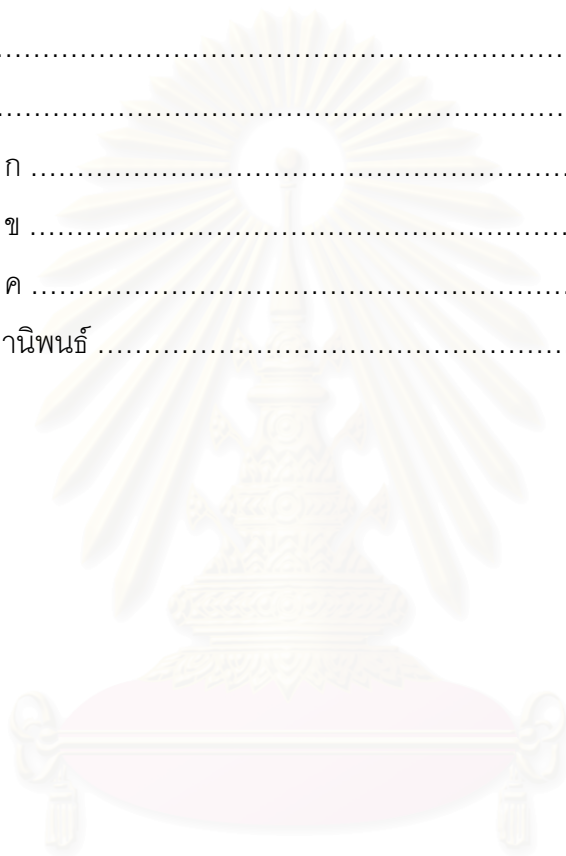
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญภาพ	ด
คำอธิบายสัญลักษณ์	ธ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 ฟลูอิดิเดชั่น.....	4
2.2 ฟลูอิดิเดชั่นแบบหมุนเวียน.....	14
2.3 ซีวมวล.....	25
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	34
3.1 เครื่องฟลูอิดิเดชั่นแบบหมุนเวียน.....	34
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกภาพ.....	39
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	41
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	42
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	47
4.1 ผลของความเร็วอากาศและอัตราการไหลปั่นกลับของของแข็งที่มีต่อความดันและ สัดส่วนของแข็ง.....	47
4.2 ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความเร็วของสารปั่นผสม.....	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 เปรียบเทียบผลของสารป้อนในด้านไรเซอร์.....	72
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	74
5.1 สรุปผลการทดลอง	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
รายการอ้างอิง	76
ภาคผนวก	79
ภาคผนวก ก	80
ภาคผนวก ข	135
ภาคผนวก ค	144
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	147



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ศักยภาพของชีวมวลในการนำมาผลิตไฟฟ้า.....	26
2.2	สัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล.....	28
4.1	ความหนาแน่นของสารป้อนผสม.....	57
ก.1	ข้อมูลการวิเคราะห์ความหนาแน่นบัลค์ และความหนาแน่นของของแข็ง.....	81
ก.2	อัตราการไหลป้อนกลับของสารป้อนผสมเข้าสู่โรเตอร์ผ่านแอลวาล์วที่อัตราการไหลค่าต่างๆของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เลื่อย.....	82
ก.3	อัตราการไหลป้อนกลับของสารป้อนผสมเข้าสู่โรเตอร์ผ่านแอลวาล์วที่อัตราการไหลค่าต่างๆของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบ.....	83
ก.4	ข้อมูลการทำการปรับเทียบของโรตاميเตอร์.....	84
ก.5	ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เลื่อยที่อัตราไหลอากาศ 300 และ 320 ลิตรต่อนาที.....	85
ก.6	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เลื่อยที่อัตราการไหลอากาศ 300, 340 และ 380 ลิตรต่อนาที	86
ก.7	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เลื่อยที่อัตราการไหลอากาศ 320, 360 และ 400 ลิตรต่อนาที	87
ก.8	ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เลื่อย..... ที่อัตราไหลอากาศ 340 และ 360 ลิตรต่อนาที.....	88
ก.9	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เลื่อยที่อัตราการไหลอากาศ 340, 360 และ 400 ลิตรต่อนาที	89
ก.10	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เลื่อยที่อัตราการไหลอากาศ 360, 380 และ 420 ลิตรต่อนาที	90
ก.11	ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เลื่อยที่อัตราไหลอากาศ 380 ลิตรต่อนาที.....	91
ก.12	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เลื่อยที่อัตราการไหลอากาศ 380, 400 และ 440 ลิตรต่อนาที	92
ก.13	ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ 340 และ 360 ลิตรต่อนาที.....	93

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.14	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราการไหลอากาศ 340, 360 และ 400 ลิตรต่อนาที	94
ก.15	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราการไหลอากาศ 360, 380 และ 420 ลิตรต่อนาที	95
ก.16	ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ 380 และ 400 ลิตรต่อนาที.....	96
ก.17	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราการไหลอากาศ 380, 400 และ 440 ลิตรต่อนาที.....	97
ก.18	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราการไหลอากาศ 400, 420 และ 460 ลิตรต่อนาที	98
ก.19	ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ 420 ลิตรต่อนาที.....	99
ก.20	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราการไหลอากาศ 420, 440 และ 480 ลิตรต่อนาที	100
ก.21	ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีซาน้อยที่อัตราการไหลอากาศ 320, 360 และ 380 ลิตรต่อนาที.....	101
ก.22	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทรายอัตราการไหลอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.	102
ก.23	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทรายอัตราการไหลอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.	103
ก.24	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทรายอัตราการไหลอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.	104
ก.25	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทรายอัตราการไหลอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.	105
ก.26	ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทรายอัตราการไหลอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.	107

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.1 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของทรายกับที่Gs 10.18, 14.96 และ 20.95 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที	135
ข.2 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่Gs 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....	135
ข.3 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่Gs 9.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....	136
ข.4 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่Gs 11.6 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....	136
ข.5 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่Gs 14.9 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....	137
ข.6 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่Gs 18.7 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....	137
ข.7 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่Gs 0.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....	138
ข.8 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่Gs 1.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....	138
ข.9 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่Gs 3.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....	139
ข.10 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่Gs 12.9 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....	139
ข.11 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่Gs 18.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....	140
ข.12 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับชานอ้อย.....	140
ข.13 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับทราย	141
ข.14 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์.	141
ข.15 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบ.	142
ข.16 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับสารป้อนผสมระหว่างทรายกับชานอ้อย.....	142

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.17	ผลความเร็วเฉลี่ยของทราย.....	142
ข.18	ผลความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์	143
ข.19	ผลความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบ	143
ข.20	ผลความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขาน้อย	143



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะของเบดที่มีของไหลต่างชนิดกัน.....	5
2.2	รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิด์เบดแก๊ส-ของแข็ง.....	6
2.3	ลักษณะของเบดนิ่ง.....	7
2.4	ลักษณะการเกิด Wake.....	9
2.5	ลักษณะของแผ่นกระจายของไหลแบบต่างๆ.....	10
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความเร็วในช่วงการเกิดเบดแบบปั่นป่วน.....	12
2.7	การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart	14
2.8	ระบบฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน	15
2.9	ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดของแข็งในระบบ Fast Bed.....	16
2.10	ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Cluster	16
2.11	ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดของแข็งตามความสูงของท่อไรเซอร์.....	17
2.12	แบบจำลองการเกิด Cluster	18
2.13	ขอบเขตของ Fast Fluidization.....	19
2.14	ขอบเขตของ Fast Fluidization ที่เปลี่ยนแปลงกับอัตราไหลป้อนกลับของของแข็ง.....	20
2.15	การเปลี่ยนแปลงเวลาที่เม็ดของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์	20
2.16	ผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อการเปลี่ยนภาวะขอบเขตของฟลูอิด์เบด.....	21
2.17	โพรไฟล์การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน.....	22
2.18	สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ Fast Bed.....	22
2.19	วงจรความดันของระบบฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน.....	24
2.20	ลักษณะการเคลื่อนที่ใน Fast Fluidized Bed.....	30
3.1	แบบจำลองเครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียน.....	34
3.2	เครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลอง	36
3.3	ไซโคลน(Cyclone).....	37
3.4	ท่อป้อนกลับ(Downcomer).....	38
3.5	แวลวาล์ว(L-valve).....	38
3.6	เครื่องเป่าอากาศ (Blower).....	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7	โรตاميเตอร์ (Rotameter)..... 39
3.8	เครื่องวัดความเร็วอากาศ..... 39
3.9	Pressure Transmitter 40
3.10	กล้อง CCD และเลนส์..... 40
3.11	เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม Image Pro Plus..... 40
3.12	เครื่องหั่นย่อยซากพืช..... 41
3.13	เครื่องบดละเอียด..... 41
3.14	เครื่องร่อนและตะแกรงร่อนแยกขนาด..... 41
3.15	เครื่องอบแห้ง..... 41
3.16	การต่ออุปกรณ์ในการบันทึกภาพ..... 43
3.17	ตัวอย่างภาพที่บันทึกได้ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus..... 44
3.18	ภาพเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์และการลากเส้นความยาว. 44
3.19	การกำหนดไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้ 45
3.20	การเปิดไฟล์ภาพพร้อมทั้งเลือกไฟล์calibrate และการเลือกฟังก์ชันความยาว ... 45
3.21	การลากเส้นการเคลื่อนที่ของอนุภาค..... 46
3.22	การส่งข้อมูลไปยัง Excel..... 46
3.23	ข้อมูลที่ปรากฏใน Excel..... 46
4.1	วงจรรวดตันของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเมื่อสารป้อนผสมเป็นทรายกับซีลี้อยู่ ที่ความเร็วอากาศ 4.2 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 5.5 กิโลกรัมต่อ ตารางเมตรต่อวินาที 47
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยู่ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที..... 50
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยู่ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 9.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที..... 50

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	ความสัมพันธระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 11.6 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....
	50
4.5	ความสัมพันธระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 14.9 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....
	51
4.6	ความสัมพันธระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 18.7 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....
	51
4.7	ความสัมพันธระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 4.8 เมตรต่อวินาที.....
	52
4.8	ความสัมพันธระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์ : สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 5.1 เมตรต่อวินาที.....
	52
4.9	ความสัมพันธระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 5.4 เมตรต่อวินาที.....
	52
4.10	ความสัมพันธระหว่างอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งกับสัดส่วนของแข็ง ณ ตำแหน่งที่เบดหนาแน่นสำหรับสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์.....
	53
4.11	ความสัมพันธของความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านไรเซอร์ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งต่างกัน.....
	53
4.12	ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านไรเซอร์ที่ อัตราการไหลป้อนกลับของแข็ง 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที.....
	54
4.13	ความสัมพันธของความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านไรเซอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง.....
	55
4.14	เปรียบเทียบค่าของสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและจากการสมการความสัมพันธ.....
	56
4.15	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากการไหลของแข็ง รูปทรงกลม , แผ่น และทรงกระบอก.....
	57

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16	วงจรมอเตอร์ของเครื่องฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนเมื่อสารป้อนผสมเป็นทรายกับเกลบที่ความเร็วอากาศ 4.8 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 0.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที 58
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 0.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที..... 59
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 1.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที..... 59
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 3.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที..... 59
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 12.9 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที..... 60
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 18.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที..... 60
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 5.4 เมตรต่อวินาที..... 61
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 5.7 เมตรต่อวินาที..... 61
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 5.9 เมตรต่อวินาที..... 61
4.25	ความสัมพันธ์ของความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านโรเตอร์ที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งต่างกัน..... 62
4.26	ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านโรเตอร์ที่อัตราการไหลป้อนกลับของแข็ง 0.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที..... 62

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ความสัมพันธ์ของความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านไรเซอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง.....	63
4.28 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากสมการความสัมพันธ์.....	64
4.29 วงจรความดันของเครื่องฟลูอิดไคเบตเมื่อสารป้อนผสมเป็นทรายกับซานอ้อยที่ความเร็วอากาศเท่ากับ 4.5 เมตรต่อวินาที.....	65
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซานอ้อย.....	65
4.31 ความสัมพันธ์ของความสูงของไรเซอร์กับความเร็วของแข็งที่ความเร็วอากาศต่างกัน: ทราย.....	67
4.32 ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความเร็วอากาศที่มีต่อความเร็วของแข็งจากการทดลองกับการคำนวณจากสมการของ Zhu J.X. et al. (2001): ทราย....	67
4.33 ความสัมพันธ์ของความสูงของไรเซอร์กับความเร็วของแข็งที่ความเร็วอากาศต่างกัน: ทรายผสมซีลี้อย.....	69
4.34 ความสัมพันธ์ของความสูงของไรเซอร์กับความเร็วของแข็งที่ความเร็วอากาศต่างกัน: ทรายผสมแกลบ.....	69
4.35 ความสัมพันธ์ของความสูงของไรเซอร์กับความเร็วของแข็งที่ความเร็วอากาศต่างกัน: ทรายผสมซานอ้อย.....	69
4.36 ความสัมพันธ์ของความสูงของไรเซอร์กับความเร็วของแข็งที่มีสารป้อนต่างชนิดกันที่ความเร็วอากาศ 4.2 เมตรต่อวินาที.....	71
4.37 ความสัมพันธ์ของความสูงของไรเซอร์กับความเร็วของแข็งที่มีสารป้อนต่างชนิดกันที่ความเร็วอากาศ 4.9 เมตรต่อวินาที.....	71
4.38 ความสัมพันธ์ของความสูงของไรเซอร์กับความเร็วของแข็งที่มีสารป้อนต่างชนิดกันที่ความเร็วอากาศ 5.7 เมตรต่อวินาที.....	71
4.39 ความสัมพันธ์ของความสูงของไรเซอร์กับความเร็วของแข็งที่มีสารป้อนต่างชนิดกันที่ความเร็วอากาศคงที่ 5.7 เมตรต่อวินาที.....	72
4.40 ผลของความดันสำหรับสารป้อนชนิดต่างๆที่ความเร็วอากาศคงที่ 5.7 เมตรต่อวินาที.....	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41	
สัดส่วนของแข็งสำหรับสารป้อนชนิดต่างๆที่ความเร็วอากาศคงที่ 5.7 เมตรต่อวินาที.....	73
ก.1	
กราฟผลการทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดโรตาริเตอร์โดยใช้ Thermo - Anemometer เป็นอุปกรณ์ในการเปรียบเทียบ.....	84



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่หน้าตัดของหลอดทดลอง (m)
A_r	=	Archimedes Number
d_p	=	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคของแข็ง (μm)
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหลอดทดลอง (m)
F_D	=	แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force, kgm/s^2)
g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.8 m/s^2
g_c	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 1 m/s^2
h	=	ระยะห่างระหว่างจุดที่วัดความดัน (m)
$V_1, V_2 \dots V_3$	=	ตำแหน่งที่วัดความเร็วอนุภาค ตามความสูงของโรเซออร์ (m)
L	=	ความสูงเบด (m)
L_{mf}	=	ความสูงของเบดขณะเกิดเริ่มเกิดฟลูอิดไอเซชัน (m)
$P_1, P_2 \dots P_8$	=	ความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ตามความสูงของโรเซออร์ (mmH_2O)
ΔP	=	ความดันลดคร่อม (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_g	=	ความเร็วอากาศภายในโรเซออร์ (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)
U_s	=	ความเร็วของแข็ง (m/s)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ด้วยภาวะการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วด้านอุตสาหกรรมเคมีอีกทั้งการแข่งขันทางด้าน การตลาดอย่างสูง ทำให้ประเด็นการพัฒนาด้านเทคโนโลยีการผลิตให้มีประสิทธิภาพเต็มที่เป็นที่สนใจ อย่างกว้างขวางและเปิดโอกาสให้มีการค้นคว้าวิจัยอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นอุตสาหกรรมเคมีส่วน ใหญ่จึงได้นำเทคโนโลยีฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเข้ามาใช้กันมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการ ฟลูอิดไดซ์เป็นกระบวนการที่นำมาประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้โดยเฉพาะเชื้อเพลิงแข็งเช่น ถ่านหินและชีวมวลต่างๆ โดยการให้อากาศร้อนไหลจากด้านล่างขึ้นมาสัมผัสกับอนุภาคของของ แข็งและเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้นจนกระทั่งของแข็งเหล่านี้มีสมบัติคล้ายของไหลทำให้เชื้อ เพลิงแข็งนี้สัมผัสกับอากาศได้อย่างทั่วถึงและเนื่องจากเชื้อเพลิงเมื่อทำการเผาไหม้ไประยะเวลา หนึ่งเชื้อเพลิงก็จะมีขนาดเล็กลงทำให้อากาศที่ป้อนเข้ามาพัดพาอนุภาคเชื้อเพลิงที่มีขนาดเล็กออกไป จากคอลัมน์ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานดังนั้นเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจึงถูกคิดค้น ขึ้นและนำมาใช้เพื่อนำอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กและยังสามารถเผาไหม้ต่อได้กลับมาทำการ เผาไหม้ต่อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเผาไหม้

ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่งของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งคือ การเผาไหม้ที่ทำได้ค่อนข้าง ยากและไม่สมบูรณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ เนื่องจากในการเผาไหม้ ของเชื้อเพลิงแข็งนั้น ก่อนเชื้อเพลิงจะติดไฟที่ผิวหน้าก่อน แล้วจึงค่อยๆ ลามเข้าไปข้างในก่อนเชื้อ เพลิง ขี้เถ้าที่เกิดขึ้นภายนอกจะขัดขวางการลามเข้าไปในก้อนเชื้อเพลิงของเปลวไฟ จึงทำให้เชื้อ เพลิงมักจะเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เท่าของเชื้อเพลิงเหลวหรือก๊าซ การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้กันอยู่ ในปัจจุบัน จะเป็นระบบการเผาไหม้แบบที่ทำให้เชื้อเพลิงมีการเคลื่อนที่มากขึ้นและทำให้เชื้อเพลิง มีขนาดเล็กลง เพื่อที่จะลดปัญหาดังกล่าวข้างต้น ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีให้สามารถ เพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้ดียิ่งขึ้นโดยให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น และช่วยลดผลกระทบต่อสิ่ง แวดล้อมให้น้อยลง เทคโนโลยีใหม่ๆ ที่แพร่หลายในเชิงพาณิชย์ซึ่งใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ Advanced Steam Conditions (ASC), Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) และ Circulating Fluidized Bed Combustor, CFBC)

CFBC หรือเตาเผาฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน มีหลักการง่าย ๆ คือภายในเครื่องปฏิกรณ์ จะมีตัวกลางไหลหมุนเวียนเพื่อช่วยในการเผาไหม้ภายในเตา ตัวกลางนี้อาจเป็นทรายหรือสาร

ช่วยกำจัดก๊าซมีเทนออกจากถ่านหินเช่น หินปูน โดยอาศัยอากาศทำให้ตัวกลางเคลื่อนที่ การออกแบบตัวกระจายอากาศที่ดีจะทำให้มีเชื้อเพลิงมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ส่งผลให้ความร้อนภายในเตากระจายตัวได้ดีจึงทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น ตัวกลางจะถูกหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ สิ่งสำคัญของเทคโนโลยีนี้ ก็คือต้องควบคุมอุณหภูมิภายในเตาให้อยู่ประมาณ 800 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการเกาะตัวกันเป็นก้อน และจะช่วยลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ กระบวนการนี้ได้มีการพัฒนามาใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว เทคโนโลยีนี้ได้รับความนิยมเนื่องจากมีข้อดีคือใช้ได้กับเชื้อเพลิงหลายประเภทเช่น ถ่านหิน และเชื้อเพลิงผสมระหว่างถ่านหินและชีวมวล (Biomass) เช่น ชานอ้อย เปลือกข้าว เศษไม้ แก่นไม้ เปลือกไม้ เป็นต้น ข้อดีอีกประการหนึ่งคือประสิทธิภาพของกระบวนการสูง เนื่องจากสามารถนำเชื้อเพลิงที่ยังเผาไหม้ไม่หมดกลับเข้ามาเผาในเตาได้อีก ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีชีวมวลเหล่านี้เป็นจำนวนมาก การนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมจึงเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

กระบวนการเผาไหม้จริงที่เกิดขึ้นในเตาเผาแบบฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนนี้ จะเกิดในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ที่มีลักษณะปิดทึบ จึงไม่สามารถเห็นถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของอนุภาคในของอนุภาคต่างๆได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการเคลื่อนตัวของอนุภาคในเครื่องฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิห้อง โดยเครื่องฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนที่ใช้เป็นท่อพลาสติกใส (Plexiglass) ทำให้สามารถเห็นอุทกพลศาสตร์ของสารป้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ได้ด้วยตาเปล่า โดยสารป้อนและตัวกลางที่ใช้คือชีวมวลและทราย ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้จะศึกษาสารป้อนผสมระหว่างทรายและชีวมวล 3 ชนิดคือ แกลบ ชานอ้อยและขี้เลื่อย ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของอากาศที่มีผลต่อความดัน สัดส่วนของแข็ง และความเร็วของสารป้อนผสมระหว่างชีวมวลและทราย ณ ตำแหน่งต่างๆ ตามความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ ข้อมูลที่ได้ สามารถอธิบายปรากฏการณ์ภายในเตาเผาซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาการออกแบบและปรับปรุงเตาเผาแบบฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาภาวะฟลูอิโดเบดของสารป้อนผสมในเครื่องฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียน
2. ศึกษาผลของอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อความเร็วและการกระจายตัวของอนุภาคของสารป้อนผสมในโรเตอร์โดยใช้กล้อง CCD

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาเครื่องฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (Cold flow)
2. อนุภาคที่ใช้ในการศึกษา คือ ทราย ขี้เลื่อย แกลบ และชานอ้อย

3. ศึกษาถึงความเร็วของสารป้อนผสมภายในคอลัมน์ โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของอากาศ
4. ศึกษาการกระจายตัวของของแข็งภายในคอลัมน์ โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของอากาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. จัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่างๆ
3. ดำเนินการปรับปรุงเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าตัวแปรต่างๆ
4. นำทรายและซีวมวลที่ใช้ในการทดลองมาบดและคัดขนาด พร้อมทั้งศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด
5. ทำการทดลองหาความดันตลอดทั้งระบบภายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและนำผลของความดันที่วัดค่าได้ไปคำนวณหาการกระจายตัวของของแข็งภายในไรเซอร์โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ อัตราการไหลของอากาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง
6. ทำการทดลองหาความเร็วของทรายและของผสมระหว่างทรายกับซีวมวล ณ ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของด้านไรเซอร์ ด้วยเทคนิคการบันทึกภาพจากกล้อง CCD แล้วใช้โปรแกรม Image Pro Plus ในการวิเคราะห์ภาพ ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ อัตราการไหลของอากาศ
7. วิเคราะห์สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจโครงสร้างของเครื่องและสามารถปรับปรุงเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนได้
2. เข้าใจถึงลักษณะการเคลื่อนตัวของของแข็งทั้งแบบเดี่ยวๆและแบบผสมของวัสดุภายในไรเซอร์ และผลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อลักษณะการเคลื่อนตัวของของแข็ง
3. พัฒนาเทคนิคการหาความเร็วของแข็ง โดยใช้เทคนิคการบันทึกภาพจากกล้อง CCD และวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image-Pro Plus V.4.5.1

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ฟลูอิดไอเซชัน

ในปัจจุบันฟลูอิดไอเซชันเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมจากวงการอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถตอบสนองความต้องการทางอุตสาหกรรมในการลดต้นทุนการผลิตและทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เครื่องมือฟลูอิดไอเซชันที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จึงได้ถูกสร้างขึ้น และพัฒนาอย่างรวดเร็วทั้งในยุโรปและอเมริกา เช่น เครื่องทำนมผงให้โตขึ้น (Agglomeration) เครื่องอบแห้งเม็ดพืช เต้าเผาแบบฟลูอิดไอเซชัน เป็นต้น

2.1.1 นิยาม

คำว่า ฟลูอิดไอเซชัน เป็นนิยามที่ใช้อธิบายกระบวนการหรือวิธีการที่ทำให้ของแข็งซึ่งมีรูปร่างลักษณะเป็นเม็ดหรือชิ้น สัมผัสกับของไหลแล้วเม็ดของแข็งเหล่านี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล ดังนั้น เมื่อนำเม็ดของแข็งกลุ่มหนึ่งมาวางไว้บนตะแกรงในหอคอดลงแล้วให้ของไหล (แก๊ส, ของเหลว) ไหลผ่านจากด้านล่างของตะแกรงที่รองรับเม็ดของแข็ง ของไหลก็จะผ่านชั้นของเม็ดของแข็ง และไหลออกทางส่วนบนของหอคอดลง เมื่อเพิ่มความเร็วของไหลขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดจะเห็นเม็ดของแข็งขยับตัวและลอยตัวขึ้นเป็นอิสระไม่เกาะติดกัน ของแข็งที่อยู่ในลักษณะนี้จะมีสมบัติคล้ายของไหล เรียกของแข็งที่ประพฤติตัวในลักษณะนี้ว่า ฟลูอิดไอเซชัน และเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า ฟลูอิดไอเซชัน

2.1.2 ประเภทของฟลูอิดไอเซชัน

งานของฟลูอิดไอเซชัน ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปัจจุบันพอที่จะสรุปประเภทของงานได้เป็น 2 แบบด้วยกัน คือ ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะและฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ

1. ฟลูอิดไอเซชันสองสถานะ (Two-Phase Fluidization) หมายความว่าในหอคอดลงหรือในเบดที่ใช้งานประกอบด้วยสองสถานะ คือ ของแข็งกับของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นแก๊สหรือของเหลวอย่างใดอย่างหนึ่ง ดังนั้นฟลูอิดไอเซชัน 2 สถานะจึงแบ่งย่อยได้เป็น ฟลูอิดไอเซชันของแก๊ส (Gas Fluidization) และ ฟลูอิดไอเซชันของเหลว (Liquid Fluidization)

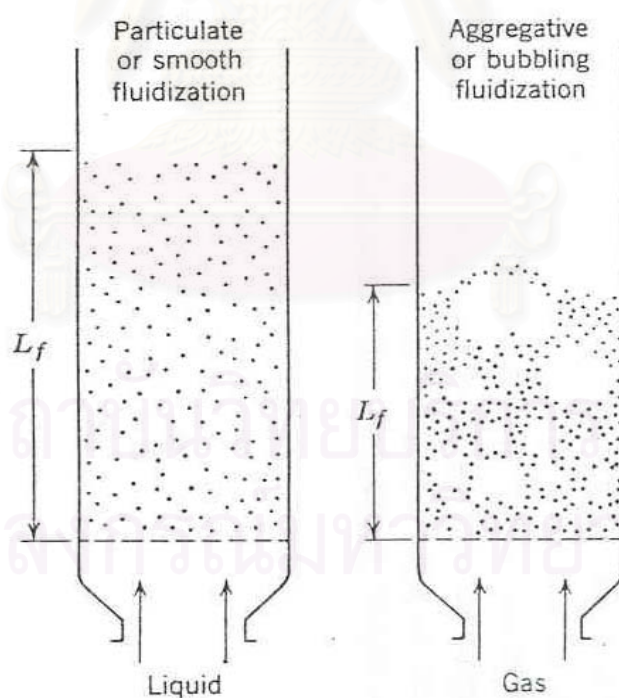
2. ฟลูอิดไอเซชันสามสถานะ (Three-Phase Fluidization) หมายความว่าในหอคอดลงหรือในเบดจะประกอบด้วยสามสถานะอยู่พร้อมกัน คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

สำหรับฟลูอิดเซชันสามสถานะนั้นเป็นกระบวนการที่พัฒนาไปจากฟลูอิดเซชันสองสถานะ หอทดลองที่เป็นฟอง (Bubble Column) และหอทดลองที่บรรจุด้วยของแข็ง (Packed Bed) ดังนั้นจึงมีกลไกที่ซับซ้อนมาก การคำนวณต้องใช้หลักคณิตศาสตร์ขั้นสูง

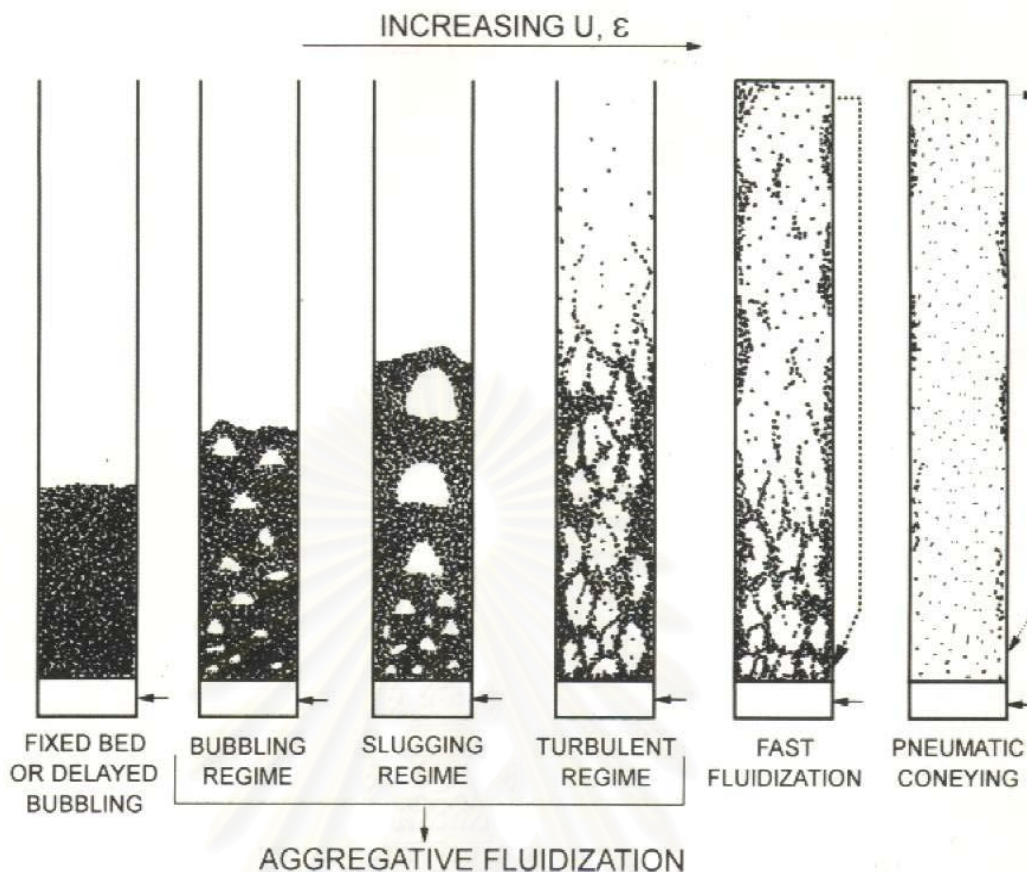
2.1.3 ลักษณะของฟลูอิดเบด

คำว่า เบด (Bed) หมายถึง อาณาเขตในหอการทดลองที่มีปริมาณเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ไม่ว่าของแข็งนั้นจะอยู่นิ่งหรือเคลื่อนไหวด้วยของไหลในหอทดลอง จะมีระดับตั้งแต่แผ่นโลหะทำเป็นตะแกรงรองรับหรือเป็นตัวกระจายแก๊ส (Distributor) จนถึงระดับสูงสุดหรือผิวหน้าของเม็ดเบด

ฟลูอิดเบดที่เป็นของเหลวการขยายตัวของเบดเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ การลอยตัวและการหมุนรอบตัวเป็นไปอย่างช้าๆ เรียกเบดแบบนี้ว่า เบดสม่ำเสมอ หรือเบดที่เป็นเนื้อเดียวกัน สำหรับฟลูอิดเบดที่ของไหลเป็นแก๊ส ลักษณะเบดที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากที่เป็นของเหลวมาก เพราะว่าเมื่อความเร็วของแก๊สสูงกว่าความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดฟลูอิดเบดแล้ว แก๊สส่วนหนึ่งยังทำหน้าที่ให้เกิดการลอยตัวของเม็ดของแข็งเหมือนเดิม แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สขึ้น ฟองแก๊สก็จะแทรกตัวขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด แต่ขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย เม็ดของแข็งภายในเบดจึงมีการเคลื่อนที่เป็นไปอย่างสุ่มวุ่นวาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของเบดที่มีของไหลต่างชนิดกันไหลผ่านด้วยความเร็วมากกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (Kunii, D., and Levenspiel, O. 1991)



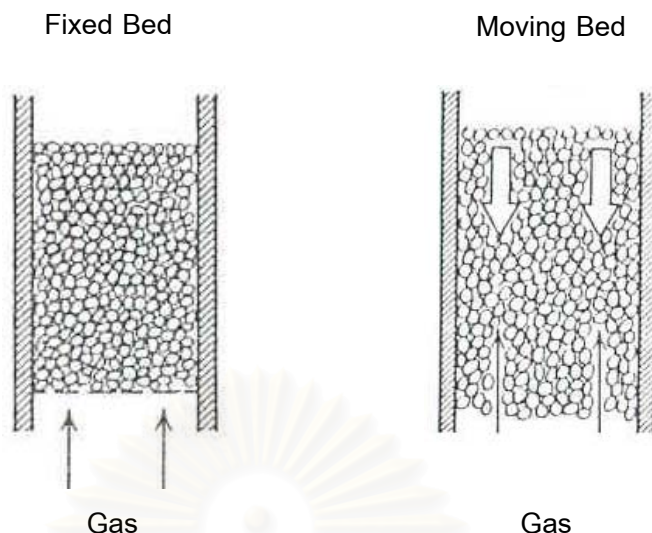
รูปที่ 2.2 รูปแบบการไหลสำหรับฟลูอิดไชน์เบดแก๊ส-ของแข็ง (Grace, J. R. 1997)

2.1.4 แก๊สฟลูอิดไชน์

แก๊สฟลูอิดไชน์เป็นการเกิดฟลูอิดไชน์เบดสองสถานะระหว่างของไหลที่เป็นแก๊สกับของแข็งดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ขอบเขตของฟลูอิดไชน์เบด (Regime of Fluidization) จะสามารถแบ่งได้ดังรูปที่ 2.2

เมื่อเบดวางตัวบนตะแกรงหรือตัวกระจายแก๊ส (Gas Distributor) และมีแก๊สเคลื่อนที่ผ่านขึ้นมา (Upward Flowing) ซึ่งความเร็วที่เพิ่มขึ้น และ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอธิบายได้ดังนี้

เมื่อแก๊สไหลผ่านเบดขึ้นมาด้วยความเร็วต่ำ ของแข็งที่วางตัวอยู่บนตัวกระจายแก๊สจะวางตัวนิ่งไม่เคลื่อนไหว แก๊สจะไหลคดเคี้ยวไปตามช่องว่างที่มีอยู่ในเบด หรือเบดอาจมีการเคลื่อนที่สัมผัสกับผนังแต่อนุภาคของแข็งในเบดไม่มีการเคลื่อนที่สัมผัสต่อกัน กรณีนี้เรียกว่า Moving Bed ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของเบตนิ่งที่ไม่มีและมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับผนัง(Kunii, D., and Levenspiel,O. 1991)

เมื่อแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบตที่วางนิ่งจะมีแรงเนื่องจากการไหลของของไหล กระทำต่ออนุภาคของแข็งในทิศทางการไหล เรียกแรงนี้ว่าแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force) ซึ่งจะก่อให้เกิดความดันลด (Pressure Drop) ตกคร่อมเบตไว้

ความดันตกคร่อมเบตตลอดความสูงของเบตนิ่งที่เกิดขึ้น จะเพิ่มตามความเร็วของแก๊สที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก Ergun Equation ดังนี้ (Kunii and Levenspiel, 1991)

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

เมื่อความเร็วแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบตนิ่งเพิ่มขึ้นจนถึงความเร็วค่าหนึ่งอนุภาคของแข็งจะเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ขึ้น ความเร็วจุดนี้เรียกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิไดเซชัน (Minimum Fluidization Velocity; U_{mf}) และเรียกเบต ณ จุดนี้ว่า Minimum Fluidized Bed ซึ่งเป็นจุดแรกที่อนุภาคของแข็งประพฤติตัวคล้ายของไหล สำหรับค่าความดันตกคร่อมเบต ณ จุดนี้มีค่าเท่ากับน้ำหนักของเบต ดังนั้น แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force; F_D) ที่เกิดขึ้น ณ จุดนี้สามารถแสดงได้ดังนี้

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

A = พื้นที่หน้าตัดของเบต

L = ความสูงของเบต

นี้

จัดรูปสมการใหม่จะได้ภาวะต่ำสุดของฟลูอิดไอเซชัน (Minimum Fluidization Condition) ดัง

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

โดยที่ ตัวห้อย mf แทนภาวะต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไอเซชัน

สำหรับความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดไอเซชัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

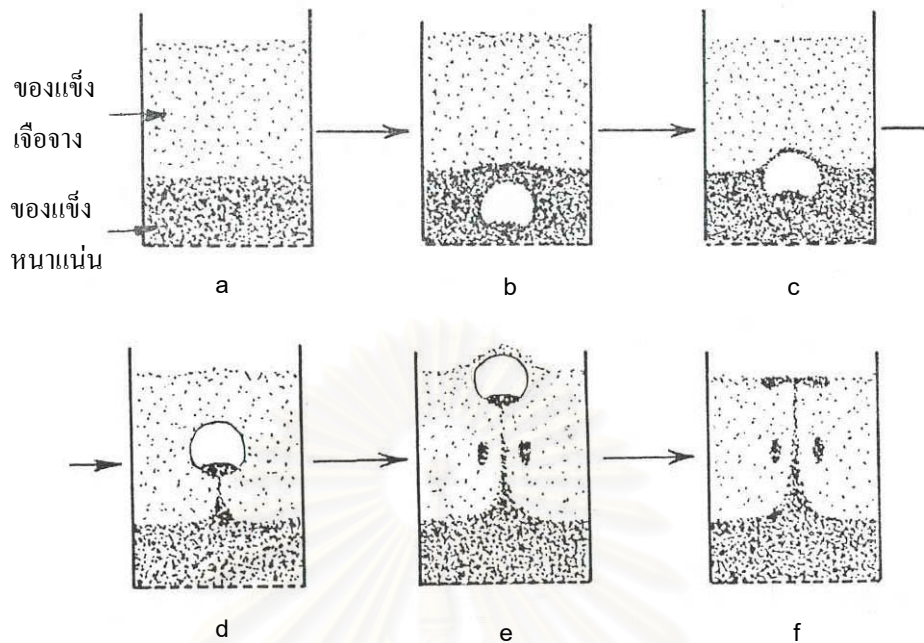
$$\text{- } Re_p < 20 \quad U_{mf} = \frac{(\phi d_p)^2 \cdot (\rho_s - \rho_g)}{150 \mu} g \left(\frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} \right) = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad (2.4)$$

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

ส่วนความเร็วของแก๊สที่ทำให้เริ่มมีฟองแก๊สเกิดขึ้นในเบด (Minimum Bubbling Fluidization Velocity, U_{mb}) ในกรณีของอนุภาคของแข็งกลุ่ม A ของ Geldart (Grace, J. R. 1997) U_{mb} จะมีค่ามากกว่า U_{mf} ส่วนในกรณีของกลุ่ม B และ D U_{mb} จะเท่ากับ U_{mf} ดังนั้น รูปแบบการเกิดฟลูอิดไอเซชันแบบสม่ำเสมอ หรือแบบไม่มีฟองแก๊ส (Bubble-Free Fluidization) จึงเกิดเฉพาะในกรณีที่อนุภาคของแข็งเป็นกลุ่ม A เท่านั้น ซึ่งในปี ค.ศ. 1978 Geldart และ Abrahamsen (Grace, J. R. 1997) ได้ประมาณไว้ในหน่วย SI เป็น

$$U_{mb} = 33 d_p \left(\frac{\rho_g}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (2.6)$$

ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่แทรกขึ้นไป และอาจมีการรวมตัวกันผ่าน Emulsion Phase โดยที่อาจจะมีของแข็งบางส่วนติดไปด้านบนของฟองแก๊ส และบางส่วนวิ่งตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วย จนกระทั่งถึงผิวบนก็จะเคลื่อนที่หลุดออกไปแล้วแตกกระจายอยู่เหนือผิว อนุภาคของแข็งที่ติดอยู่เกือบทั้งหมดจะตกกลับลงมายังเบดใหม่ โดยเรียกปรากฏการณ์ที่ของแข็งเคลื่อนที่ตามฟองแก๊สนี้ว่าการเกิด Wake ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การเกิด Wake เกิดจากความดันที่อยู่ใต้ล่างฟองแก๊สน้อยกว่าความดันบริเวณ Emulsion Phase ทำให้ของแข็งเคลื่อนที่จากบริเวณที่ความดันสูงมาอยู่ในบริเวณที่มีความดันต่ำ



รูปที่ 2.4 ลักษณะการเกิด Wake (Kunii, D., and Levenspiel, O. 1991)

ส่วนบริเวณที่อยู่เหนือเบตขึ้นไป ซึ่งฟองแก๊สจะเกิดการแตกตัวและของแข็งที่ติดไปกับฟองแก๊สจะตกลงมายังเบตอีกครั้งด้วยผลของแรงโน้มถ่วง เรียกว่าบริเวณอิสระ (Freeboard) อย่างไรก็ตามอาจจะมีอนุภาคของแข็งบางส่วน (น้อยมาก) ซึ่งมีขนาดเล็กถูกพัดพาเคลื่อนที่ไปกับแก๊สด้วย (ไม่ตกกลับลงมา) ณ ความสูงค่าหนึ่งใน Freeboard ซึ่งอนุภาคของแข็งเกือบทั้งหมดตกกลับลงมา ยังเบตจะเรียกความสูงนี้ว่า ความสูงหลุดลอยส่งผ่าน หรือ Transport Disengaged Height (TDH) เหนือความสูงนี้ไปจะมีของแข็งเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งอาจหลุดไปกับแก๊สด้วยอัตราที่สม่ำเสมอ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของของแข็งในช่วงนี้จะเรียกว่า Elutriation Rate

ดังกล่าวมาแล้วว่าขนาดของฟองแก๊สจะมีขนาดเพิ่มตามความเร็วของแก๊ส และความสูงของเบต ถ้าเบตบรรจุอยู่ในหอทดลองซึ่งมีขนาดเล็กหรือแคบและยาว ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นอาจจะมีขนาดใหญ่เกือบเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของเบต (หอทดลอง) ในกรณีนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเบตและแยกอนุภาคของแข็งออกเป็นชั้นๆ เรียกว่าเกิดสลักกิ้ง และที่ความเร็วของแก๊สที่ทำให้ฟองแก๊สเริ่มมีขนาดใหญ่เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของเบตหรือหอทดลอง ก็คือ Minimum Slugging Velocity (U_{ms}) ซึ่งในปี ค.ศ. 1967 Stewart และ Davidson (Grace, J. R. 1997) ได้ประมาณไว้ ดังนี้

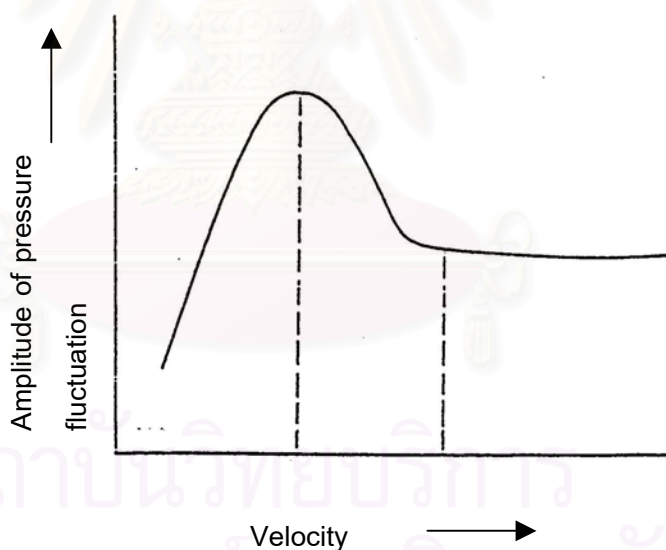
$$U_{ms} = U_{mf} + 0.07\sqrt{gD} \quad (2.7)$$

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในหอทดลอง

เบดจะเริ่มเข้าสู่สภาวะปั่นป่วนหรือ Turbulent bed เมื่อความเร็วของแก๊สที่เคลื่อนที่ผ่านเบดแบบฟองแก๊สเพิ่มขึ้น จนมากกว่า U_{mf} เบดจะเกิดการขยายตัว และเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นเรื่อยๆ จะเริ่มสังเกตเห็นรูปแบบการสัมผัสของอนุภาคของแข็งกับแก๊ส ซึ่งมีการขยายตัวเปลี่ยนแปลงไป ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวและแตกกระจายออกจากกันอย่างรวดเร็ว (จนดูเหมือนไม่มีฟองแก๊ส) การเคลื่อนไหวภายในเบดเป็นแบบปั่นป่วน ลักษณะภายในเบดจะแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

1. Dense Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่หนาแน่น
2. Dilute Phase ซึ่งเป็นส่วนที่มีอนุภาคของแข็งอยู่เบาบาง

สำหรับช่วงในการเปลี่ยนแปลงภาวะจากเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้นไม่ได้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดที่ความเร็วค่าหนึ่ง แต่จะมีช่วงของความเร็วในการเปลี่ยนภาวะทั้งสองนี้ จากผลการวิจัยของนักวิจัยหลายๆ ท่านพบว่า การเปลี่ยนภาวะจากเบดแบบฟองแก๊สไปเป็นเบดแบบปั่นป่วนนั้นจะมีช่วงของการเปลี่ยน โดยเมื่อค่อยๆ เพิ่มความเร็วขึ้นจนถึงค่าๆ หนึ่ง เบดซึ่งเดิมอยู่ในภาวะเบดแบบฟองแก๊สนั้น ที่บริเวณผิวหน้าของเบดจะเริ่มเปลี่ยนไปเป็นเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ สามารถแสดงความสัมพันธ์ของความดันตกคร่อมเบดที่เกิดขึ้นในช่วงการเปลี่ยนภาวะได้ดังนี้ รูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกกับความเร็วในช่วงการเกิดเบดแบบปั่นป่วน

(Basu, P., and Fraser, S.A. 1994)

Terminal Velocity คือ ความเร็วตกอิสระของเม็ดของแข็งในของไหลอยู่หนึ่ง ซึ่งความเร็วนี้จะมีค่าเท่ากับความเร็วของไหลที่ทำให้เม็ดของแข็งเคลื่อนตัวหลุดออกจากหอยตกลงไป โดย Haider และ Levenspiel (Kunii, D.; and Levenspiel 1991) ได้ประมาณไว้ในปี ค.ศ. 1989 โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ตามลักษณะของอนุภาคของแข็ง

กรณีอนุภาคของแข็งมีรูปร่างเป็นทรงกลม (Kunii and Levenspiel, 1991)

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{0.591}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.8)$$

หรือ

$$U_{t,spherical} = \frac{g(\rho_s - \rho_g)d_p^2}{18\mu} \quad \text{เมื่อ } Re_p < 0.4 \quad (2.9)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{4(\rho_s - \rho_g)^2 g^2}{225 \rho_g \mu} \right]^{1/3} d_p \quad \text{เมื่อ } 0.4 < Re_p < 500 \quad (2.10)$$

$$U_{t,spherical} = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho_g)d_p}{\rho_g} \right]^{1/2} \quad \text{เมื่อ } 500 < Re_p < 200,000 \quad (2.11)$$

และสำหรับกรณีอนุภาคของแข็งไม่เป็นทรงกลม

$$U_t^* = \left[\frac{18}{(d_p^*)^2} + \frac{2.335 - 1.744\phi}{(d_p^*)^{1/2}} \right]^{-1} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ (2.8) และ (2.12) จะติดอยู่ในตัวแปร U_t^* และ d_p^* ซึ่งเป็นเทอมของตัวแปรไร้หน่วย โดยที่

$$d_p^* = d_p \left[\frac{\rho_g(\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (2.13)$$

และ

$$U_t^* = U_t \left[\frac{\rho_g^2}{\mu(\rho_s - \rho_g)g} \right]^{1/3} \quad (2.14)$$

ดังนั้นจาก U_t^* ที่ได้จากสมการที่ (2.8) และ (2.12) นำมาหา U_t โดยอาศัยสมการที่ (2.14) ได้

$$U_t = U_t^* \left[\frac{\mu(\rho_s - \rho_g)g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (2.15)$$

เมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศมากขึ้นไปอีกจนไม่สามารถระบุพื้นผิวด้านบนของเบดได้ออนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ออกจากด้านบนหอตกลงและต้องเติมอนุภาคของแข็งเข้ามาแทนที่ได้

การใส่เข้ามาใกล้ๆ ส่วนล่างของหอตดลอง อนุภาคของแข็งจะรวมกลุ่มและเคลื่อนที่ลงบริเวณใกล้ๆ ผนังของหอตดลอง ขณะที่แก๊สและอนุภาคของแข็งที่กระจายตัวอยู่ด้านบนจะเคลื่อนที่ขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนของแข็งคงที่ที่ความเร็วแก๊สเพิ่มขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งในหอตดลองเจือจางมากขึ้น

จากรูปที่ 2.2 ในภาวะที่เป็น Fast Fluidization ถ้านำเอาของแข็งที่หลุดออกจากเบตหรือหอตดลองกลับเข้ามาในระบบใหม่ตรงบริเวณส่วนล่างของหอตดลอง ระบบแบบนี้จะเรียกว่า ฟลูอิดิซ์เบตแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

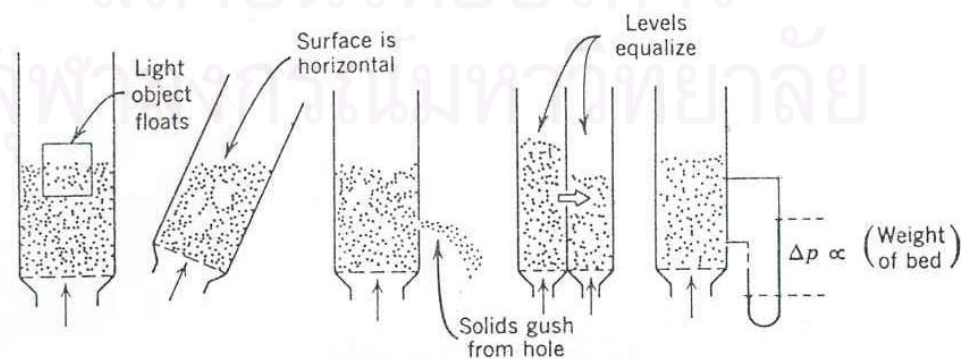
เมื่อความหนาแน่นของแก๊สภายในเบตเบาบางมากเนื่องจากความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นมากเป็นการขนถ่ายอนุภาคของแข็งด้วยแก๊สไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแก๊สในแนวแกนยกเว้นในส่วนล่างที่อนุภาคของแข็งมีความเร่ง และอนุภาคของแข็งบางส่วนอาจหยุดนิ่งอยู่ใกล้ๆ ผนังของหอตดลอง ความเร็วแก๊สที่ทำให้เบตในท่อเปลี่ยนจากเบตเจือจางเป็นเบตหนาแน่น เรียกว่า ความเร็วในการเกิดช็อกกิ้ง (Choking Velocity, U_{ch}) ค่าความเร็วนี้สามารถหาได้จากการทำการทดลอง โดยการปรับลดความเร็วแก๊สในระบบที่เป็นเฟสเจือจางและมีปริมาณอนุภาคของแข็งในระบบคงที่ลงจนกระทั่งเบตเกิดการยุบตัวลงอย่างรวดเร็วเปลี่ยนจากเฟสเจือจางเป็นเฟสหนาแน่น ซึ่งความเร็วแก๊สที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว คือ ความเร็วในการเกิดช็อกกิ้งนั่นเอง ปริมาณของแข็งที่ไหลออกจากเบตในตอนนั้น Zen (Grace, J. R. 1997) ได้เสนอความสัมพันธ์ไว้ว่า

$$G_{s,ch} = \rho_s (1 - \epsilon_{ch}) (U_{ch} - U_t) \quad (2.16)$$

เมื่อ $G_{s,ch}$ คือ อัตราการไหลของของแข็งออกจากเบตต่อพื้นที่หน้าตัดของหอตดลอง

ϵ_{ch} คือ อัตราส่วนของปริมาตรของช่องว่างต่อปริมาตรของเบตในภาวะ Choking พบว่าค่านี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.943 ถึง 0.987

2.1.5 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดิซ์เบต



รูปที่ 2.6 ลักษณะคล้ายของไหลของฟลูอิดิซ์เบต (Kunii, D., and Levenspiel, O. 1991)

ในขณะที่เม็ดของแข็งลอยตัวอยู่ในลักษณะฟลูอิดเซชันแบบหนาแน่นแล้วนั้น ผิวหน้าของเบตจะเรียบสม่ำเสมอเหมือนผิวหน้าของของไหลที่ใสอยู่ในภาชนะ โดยเฉพาะถ้าเป็นฟลูอิดเซชันแบบเดียวกัน หรือว่าจัดหอดทดลองเอนไปทางซ้ายหรือขวาก็ตาม ผิวหน้าก็ยังเรียบอยู่อย่างเดิม ดังรูปที่ 2.6 ถ้านำวัตถุของแข็งที่มีความจำเพาะน้อยกว่าของเม็ดของแข็งที่อยู่ในเบตใส่ลงไปบนเบตวัตถุของแข็งนั้นจะลอยอยู่บนผิวหน้าของเบต นอกจากนี้ถ้าเจาะรูด้านข้างของเบต เม็ดของแข็งจะไหลออกทางรูนั้นได้เหมือนของเหลว หรือถ้านำเอาเบต 2 เบตมาต่อท่อถึงกัน เม็ดของแข็งจากเบตสูงกว่าจะไหลไปยังเบตที่มีเม็ดของแข็งต่ำกว่า

2.1.6 การจำแนกอนุภาค

การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart (Grace, J. R. 1997)

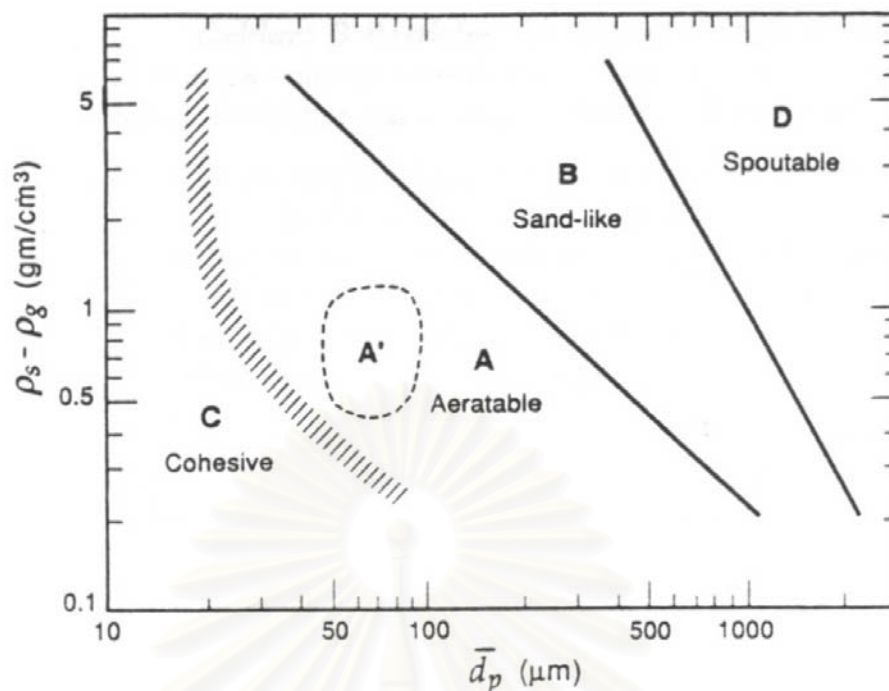
งานวิจัยทั่วไปจะจำแนกขนาดของอนุภาคออกเป็นกลุ่มๆ ซึ่งวิธีที่นิยมใช้กันมากก็คือ Geldart Powder Classification เป็นการจำแนกขนาดของอนุภาคด้วยวิธีของ Geldart โดยอาศัยค่าผลต่างของความหนาแน่นของของแข็งกับแก๊สและขนาดอนุภาคเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.7 ลักษณะของอนุภาคในแต่ละกลุ่มอธิบายได้ดังนี้

Group C คือ เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก (Cohesive หรือ Very Fine Powders) ของแข็งกลุ่มนี้จะเกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคจะสูงมากและมักจะจับตัวกันเป็นก้อน

Group A คือ Aeratable เป็นของแข็งที่มีขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ สามารถทำให้เกิดฟลูอิดเซชันได้ง่ายเป็นฟลูอิดเซชันแบบสม่ำเสมอ (Smooth Fluidization) ที่ความเร็วแก๊สต่ำๆ และที่ความเร็วแก๊สสูงๆ ก็สามารถควบคุมการเกิดฟองได้

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

Group D คือ Spoutable ของแข็งที่มีขนาดใหญ่และหรือความหนาแน่นสูง ดังนั้นจึงเกิดฟลูอิดเซชันได้ยาก



รูปที่ 2.7 การจำแนกกลุ่มของของแข็งโดยวิธีของ Geldart (Grace, J. R. 1997)

2.2 ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed, CFB)

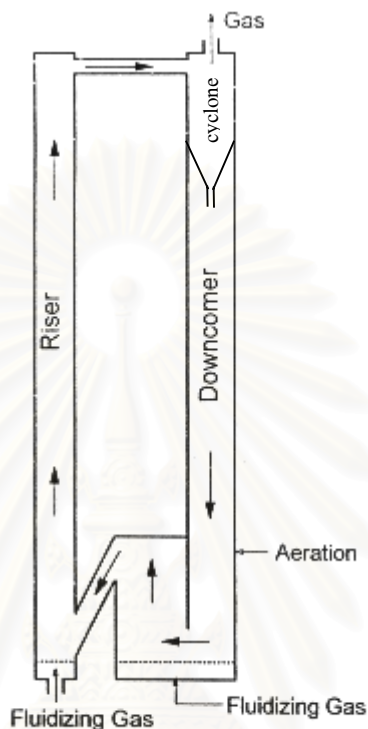
ระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นรูปแบบหนึ่งของกระบวนการสัมผัสระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็งเป็นระบบที่ค้นพบเป็นครั้งแรกโดย Winkler (Grace, J. R. 1997) และได้ถูกนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรม โดย Warren Lewis และ Edwin Gilliland แห่ง Massachusetts Institute of Technology, MIT ซึ่งพยายามที่จะหารูปแบบของการสัมผัสกันระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็งที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการ Fluid Catalytic Cracking (FCC) และพบว่าระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน ซึ่งมี hydrodynamics เป็นแบบ fast fluidized bed เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมในการใช้งาน

2.2.1 ลักษณะของระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Characteristics of Circulating Fluidized Bed)

ระบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน เป็นระบบซึ่งอาศัยเทคนิคทางฟลูอิดไคซ์เบดขั้นมาประยุกต์ใช้งาน ระบบจะประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วน (ดังรูปที่ 2.8) คือ

- 1) ท่อไรเซอร์ เป็นส่วนที่ทำงานภายใต้ภาวะการเกิดฟลูอิดไคซ์เบดที่ความเร็วสูง (Fast Fluidized Bed)
- 2) Gas-Solid Separator เช่น Cyclone ทำหน้าที่ดักจับเม็ดของแข็งที่หลุดออกมาจากท่อไรเซอร์

- 3) ท่อป้อนกลับ (Downcomer หรือ Return Leg) ทำหน้าที่ป้อนเม็ดของแข็งที่ได้จาก Cyclone กลับไปยังด้านล่างของท่อโรเตอร์ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของเม็ดของแข็ง

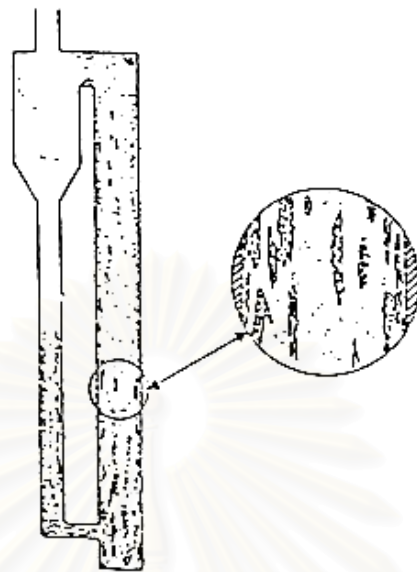


รูปที่ 2.8 ระบบฟลูอิดไรเซชันแบบหมุนเวียน (Grace, J. R. 1997)

Fast Fluidization หรือ Dilute Phase Refluxing เป็นลักษณะหนึ่งของการสัมผัสระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็ง ซึ่งแก๊สจะเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของอนุภาคของแข็งที่อยู่เหนือตัวกระจายอากาศ โดยแก๊สจะมีความเร็วสูงกว่าความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) ของอนุภาค ทำให้อนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ (ดังรูปที่ 2.9)

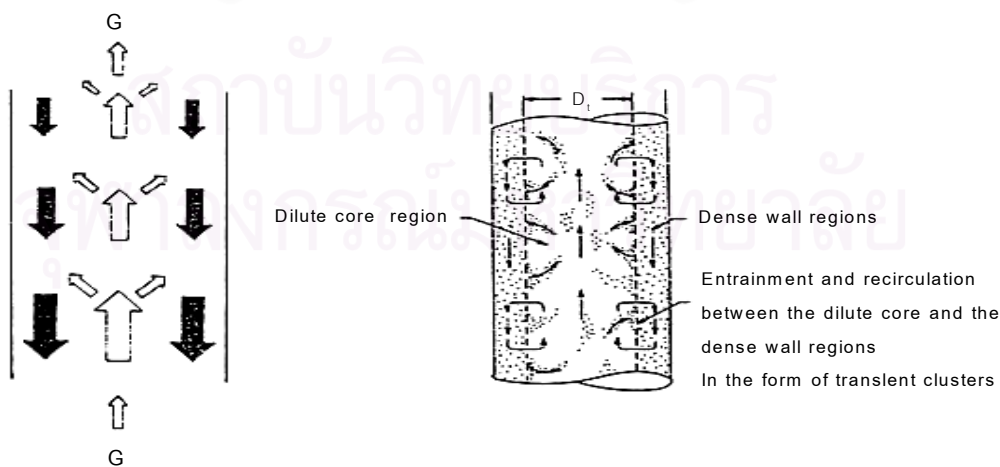
- 1) Cluster Phase อนุภาคของแข็งเกาะอยู่ด้วยกันเป็นกลุ่ม ๆ เคลื่อนที่ขึ้นลง (มีการสลายตัวและจัดตัวใหม่) ภายในท่อโรเตอร์
- 2) Disperse Phase อนุภาคของแข็งมีเบาบางกระจายกันออกไป (อยู่ห่างกัน) และเคลื่อนที่ขึ้นผ่านไปยังท่อป้อนกลับ

อนุภาคของแข็งที่เกาะตัวกันต่อเนื่องและรวมตัวกันเป็นกลุ่มภายใน Cluster Phase จะเรียกว่า Cluster หรือ Strand หรือ Streamer ซึ่งกระจายตัวอย่างไม่สม่ำเสมอ และเคลื่อนที่ขึ้น ๆ ลง ๆ อยู่ภายใน Disperse Phase ซึ่งประกอบด้วย แก๊สซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นและเม็ดของแข็งเบาบาง (ปริมาณน้อยกว่าใน Cluster Phase) เคลื่อนที่ไปพร้อมกับแก๊ส



รูปที่ 2.9 ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดของแข็งในระบบ Fast Bed (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

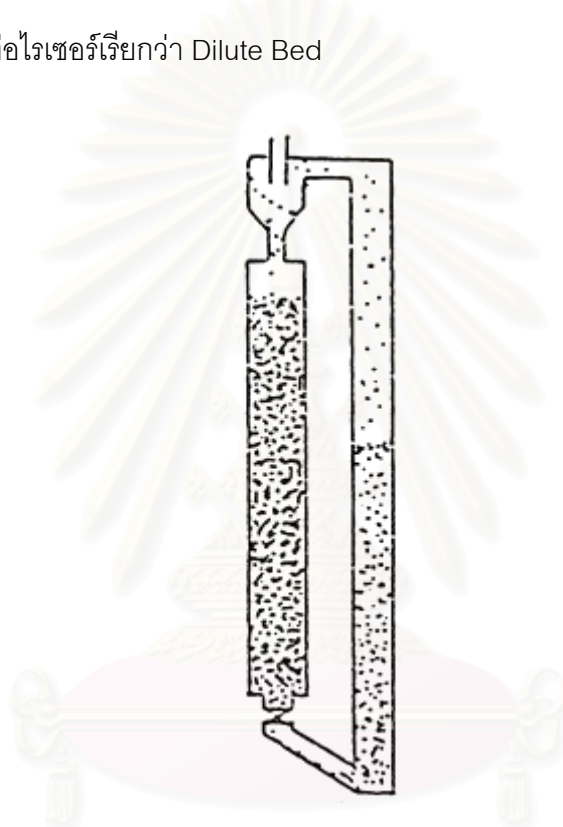
เม็ดของแข็งภายในเบดส่วนใหญ่จะอยู่ใน Cluster Phase และมีการเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแกนกลาง (ขณะที่เคลื่อนที่ขึ้นจะมีขนาดกลุ่มของ Cluster ใหญ่ขึ้น) จนเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งก็จะตกกลับลงมาตามผนังของท่อไรเซออร์ เมื่อเคลื่อนที่ตกกลับมาถึงจุด ๆ หนึ่ง Cluster ก็จะถูกแตกสลายตัวออกจากกัน และเกิดการเคลื่อนที่ขึ้นไปอีกครั้งหนึ่ง การรวมตัวกันเป็น Cluster และการสลายตัวออกจากกันจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ลักษณะการเคลื่อนที่ของ Cluster (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนตัวของแก๊สและเม็ดของแข็ง และความหนาแน่นของเม็ดของแข็งตลอดความยาวท่อไรเซอร์ จะเห็นรูปแบบการกระจายตัวแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (ดังรูปที่ 2.11) ดังนี้

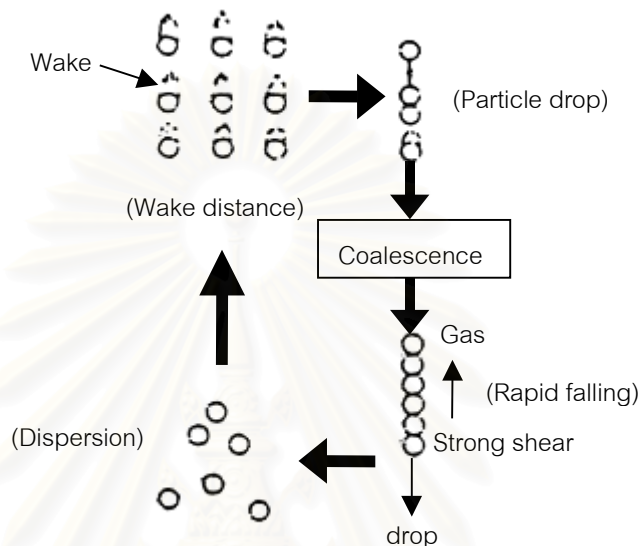
- 1) บริเวณที่เม็ดของแข็งเกิดการรวมตัวเป็น Cluster และสลายตัวอยู่ตลอดเวลาจะเกิดที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์ การกระจายตัวหรือความเข้มข้นของเม็ดของแข็งมีค่าสูงเรียกว่า Dense Bed
- 2) บริเวณที่เม็ดของแข็งมีการกระจายตัวหรือมีความเข้มข้นน้อย ซึ่งเกิดบริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์เรียกว่า Dilute Bed



รูปที่ 2.11 ลักษณะการกระจายตัวของเม็ดของแข็งตามความสูงของท่อไรเซอร์ (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

เมื่อป้อนของแข็งเข้าไปในหอทดลองแนวตั้งที่มีแก๊สเคลื่อนที่ผ่านเข้ามาทางด้านล่าง ในกรณีที่อัตราป้อนเม็ดของแข็งเข้ามามีค่าต่ำและความเร็วแก๊สสูงจนระบบอยู่ในภาวะการส่งผ่านด้วยลม (Pneumatic Transport) การกระจายตัวของอนุภาคจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ผลเนื่องมาจากความเร็วระหว่างแก๊สกับเม็ดของแข็งจะทำให้เกิด Wake ขึ้นบริเวณด้านหลังของเม็ดของแข็งที่ความเร็วของแก๊สเดียวกัน เมื่ออัตราการป้อนของแข็งเข้ามามีค่าเพิ่มขึ้นในปริมาณที่มากพอที่ทำให้เม็ดของแข็งมีความเข้มข้นสูง เม็ดของแข็งจะเริ่มเข้าไปอยู่ใน Wake ของเม็ดของแข็งที่อยู่ใกล้กัน ทำให้แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Fluid Drag) ของแก๊สที่กระทำต่อเม็ดของแข็งที่อยู่ด้าน

บนมีค่าน้อยลง เม็ดของแข็งที่อยู่ด้านบนจึงเคลื่อนที่ตกลงมาเกาะติดกับเม็ดของแข็งที่อยู่ด้านล่าง เมื่อเม็ดของแข็งทั้งสองเกาะติดกันจะทำให้พื้นที่สัมผัสกับแก๊สมีค่าลดลง เม็ดของแข็งที่เกาะติดกันแล้วก็จะเคลื่อนที่ตกลงมา (แต่ยังคงเคลื่อนที่ขึ้นสัมผัสกับผนัง) แล้วเกิดการเกาะติดกับเม็ดของแข็งที่อยู่ด้านล่างต่อไปเพิ่มจำนวนเม็ดของแข็งขึ้นเรื่อย ๆ เกิดเป็นลักษณะสายยาวต่อกันที่เรียกว่า Cluster หรือ Strand ดังรูปที่ 2.12

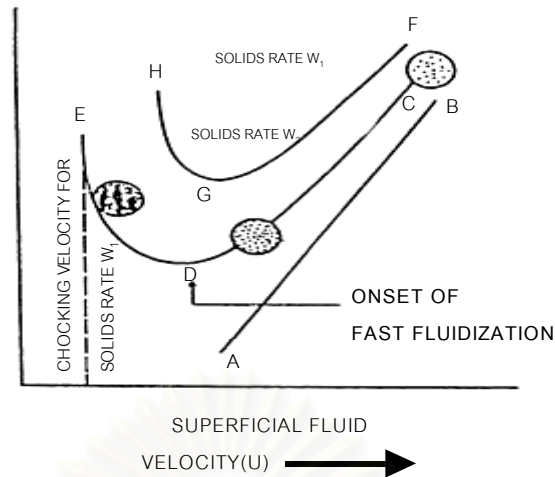


รูปที่ 2.12 แบบจำลองการเกิด Cluster (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

2.2.2 การเปลี่ยนภาวะไปเป็นฟลูอิดไอเซชันที่ความเร็วสูง (Transition to Fast Fluidization)

คำว่า Fast Bed ถูกนิยามโดย Yerushalmi (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991) เพื่อใช้อธิบายภาวะหรือขอบเขตของฟลูอิดไอเซชันที่อยู่ระหว่าง Turbulent Bed และ Pneumatic Transport

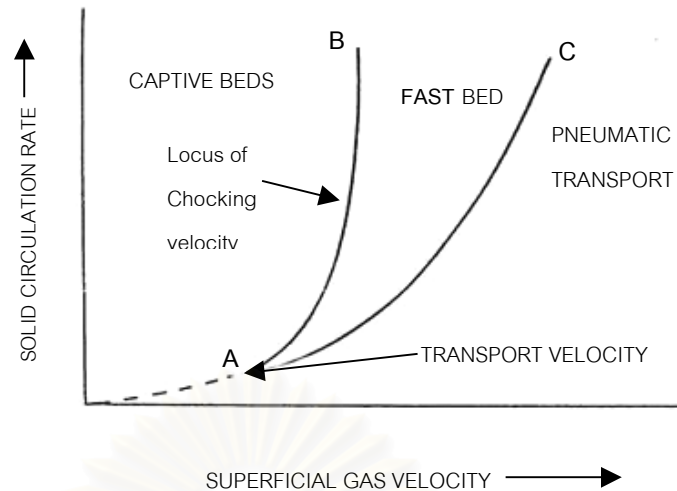
ต่อมา Reddy Karri และ Knowlton (1991) ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาขอบเขตการเกิดฟลูอิดไอเซชันที่ความเร็วสูง โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันลดคร่อมเบดต่อหน่วยความยาวกับความเร็วแก๊สที่ใช้และสามารถสรุปผลขอบเขตในการเกิด Fast Bed ได้ดังนี้ (ดังรูปที่ 2.13)



รูปที่ 2.13 ขอบเขตของ Fast Fluidization (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

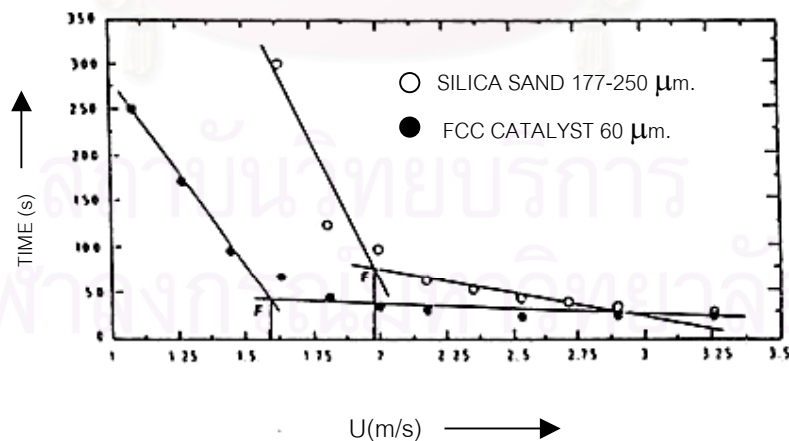
สำหรับการไหลของของผสมแก๊สกับของแข็งที่มีความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density) หรือ Suspension Density มีค่าต่ำในแนวตั้งโดยอัตราการป้อนของแข็งเท่ากับ W_1 เมื่อลดความเร็วแก๊สลงจากจุด C ซึ่งเป็นจุดที่มีความเร็วแก๊สสูง การกระจายตัวของเม็ดของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นตาม เมื่อลดความเร็วลงจนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับจุด D ค่าความดันเนื่องจากน้ำหนักเม็ดของแข็ง Static Head กับความดันลดลงเนื่องจากแรงเสียดทานในการไหลของของผสม 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 Chocking Condition (เป็นจุดที่แก๊สอิมพัลส์ด้วยของแข็ง) และความเร็วที่จุด E จะเรียกว่าความเร็วช็อกกิ้ง (Chocking Velocity)

Reddy-Karri และ Knowlton (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991) ได้เสนอไดอะแกรมการเปลี่ยนภาวะขอบเขตของเบดไว้ (ดังรูปที่ 2.14) และอธิบายว่าเส้น A-B เป็นเส้นแบ่งขอบเขตระหว่าง Captive และ Fast Bed และเมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งสูงขึ้นการเปลี่ยนภาวะไปเป็นฟลูอิไดเซชันที่ความเร็วสูง จะต้องใช้ความเร็วสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.14 ขอบเขตของ Fast Fluidization ที่เปลี่ยนแปลงกับอัตราไหลป้อนกลับของของแข็ง (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

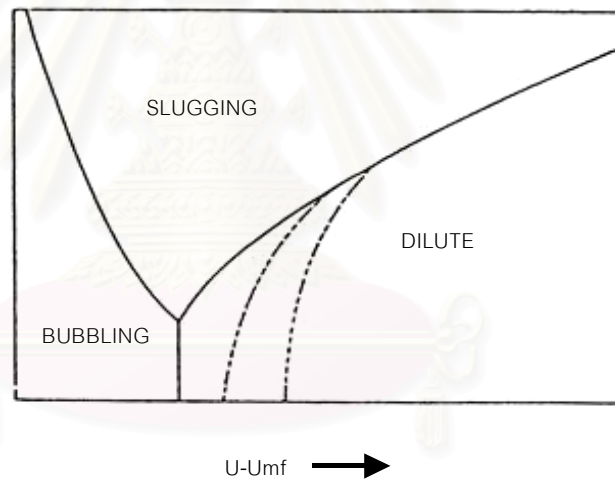
ความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วต่ำสุดซึ่งไม่สามารถเกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูงได้ โดยไม่มีการหมุนเวียนเม็ดของแข็ง เราเรียกว่า ความเร็วส่งผ่าน (Transport Velocity) สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.15 เมื่อเบดมีความเร็วเหนือความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) อนุภาคจะแยกกันอย่างอิสระ เม็ดของแข็งทั้งหมดจะถูกพัดพาออกจากคอลัมน์โดยใช้เวลาจำกัด ถ้าลดความเร็วลงเรื่อยๆ แต่ยังมีค่าเกินความเร็วสุดท้ายอยู่ เวลาที่ใช้จะเพิ่มขึ้น ในกรณีที่เม็ดของแข็งถูกพัดพาออกจากคอลัมน์ทั้งหมด ถ้าลดความเร็วลงจนถึงค่าที่ต่ำกว่าความเร็ววิกฤติ (จุด F) เวลาที่ใช้จะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด เรียกความเร็วนี้ว่าความเร็วส่งผ่าน



รูปที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงเวลาที่เม็ดของแข็งหลุดออกจากคอลัมน์ (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งค่าหนึ่ง ถ้าเราวัดความดันลดของหน้าตัดที่อยู่สูงกว่า และหน้าตัดที่อยู่ต่ำกว่าตามแนวแกนของคอลัมน์ในช่วงที่เป็นการส่งผ่านอนุภาคด้วยลม ซึ่งความเร็วของแก๊สมีค่าสูง เราจะพบว่าค่าความดันของ 2 จุดนี้มีค่าใกล้เคียงกัน ถ้าความเร็วของแก๊สลดลงโดยที่อัตราการป้อนกลับของของแข็งมีค่าคงที่ ค่าความดันลดของ 2 จุดนี้จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ถ้าความเร็วของแก๊สลดลงอีกจนทำให้เบดเปลี่ยนภาวะจากการส่งผ่านอนุภาคด้วยลมไปเป็นฟลูอิโดเซชันที่ความเร็วสูง โดยเบดมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอตามแนวแกนคอลัมน์ ดังนั้นจึงไม่มีสัมพัทธ์ใดที่จะทำนายค่าความเร็วนี้ได้ มีเพียงข้อมูลจากการทดลองเท่านั้นที่ใช้เป็นแนวทางอธิบายการเปลี่ยนภาวะจากการส่งผ่านอนุภาคด้วยลมมาเป็นฟลูอิโดเซชันที่ความเร็วสูง

จากรูปที่ 2.14 และ 2.16 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนภาวะเบดไปเป็นฟลูอิโดเซชันที่ความเร็วสูงไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับความเร็วของแก๊ส ขนาดของอนุภาค และความหนาแน่นของอนุภาคเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับขนาดของหอตดลอง ความหนาแน่นและความหนืดของแก๊ส แต่ถ้าหากเป็นระบบหมุนเวียนยังขึ้นอยู่กับอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งในระบบด้วย



รูปที่ 2.16 ผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อการเปลี่ยนภาวะขอบเขตของฟลูอิโดเซชัน (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

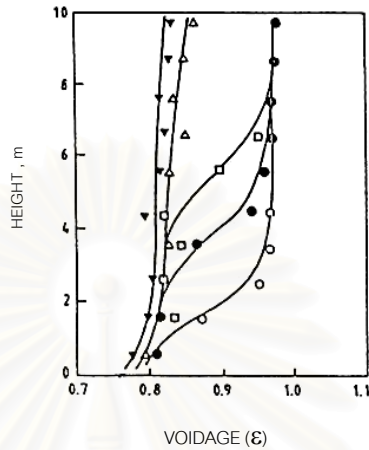
2.2.3 โครงสร้างของเบดที่ความเร็วสูง (Structure of Fast Beds)

ในระบบฟลูอิโดเบดแบบหมุนเวียนนั้น การกระจายตัวของเม็ดของแข็งจะไม่สม่ำเสมอทั้งในแนวแกนและแนวรัศมี

2.2.3.1 โพรไฟล์ของสัดส่วนช่องว่างในแนวแกน (Axial Voidage Profile)

การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยในพื้นที่หน้าตัดหนึ่งๆ จะมีค่าลดลงเมื่อความสูงของเบดมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 สรุปได้ว่าที่ด้านล่างของคอลัมน์ เบดจะหนาแน่นกว่า

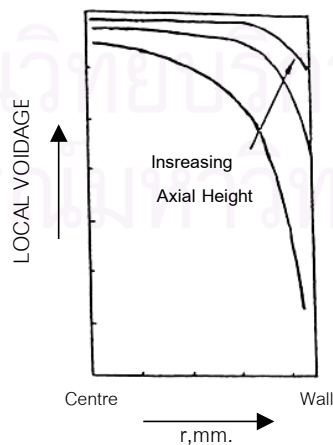
ด้านบน ความหนาแน่นของเบตจะลดลงอย่างต่อเนื่อง จากด้านล่างขึ้นไปด้านบนของคอลัมน์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาความหนาแน่นของเม็ดของแข็งตลอดความสูงของคอลัมน์ สามารถแบ่งเบตออกได้เป็น 2 ส่วน คือ เบตหนาแน่น (Dense Bed) บริเวณด้านล่าง และ เบตเจือจาง (Dilute Bed) บริเวณด้านบนของคอลัมน์



รูปที่ 2.17 โพรไฟล์การกระจายตัวของสัดส่วนช่องว่างตามแนวแกน (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

2.2.3.2 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 2.18



รูปที่ 2.18 สัดส่วนช่องว่างตามแนวรัศมีของระบบ Fast Bed (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

Basu (1991) เสนอว่าการกระจายตัวในแนวรัศมีหรือสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมีจะขึ้นอยู่กับระยะในแนวรัศมี (r) จากแกนกลาง และสัดส่วนช่องว่างเฉลี่ยตลอดพื้นที่หน้าตัด (ε_{av}) ที่พิจารณาเท่านั้น และสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัดส่วนช่องว่างในแนวรัศมีได้ดังนี้ (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_{av} [3.6(r/R)^{6.47} + 0.191] \quad (2.18)$$

2.2.4 ฟลูอิดเบดและวงจรความดัน (Pressure Loop)

ฟลูอิดเบดส่วนใหญ่มักจะมีส่วนที่ทำหน้าที่ป้อนของแข็งกลับเข้ามาใหม่ สำหรับระบบที่เกิดแบบฟองอากาศ, แบบสลักกิ่ง และเบดแบบปั่นป่วน ซึ่งมีเม็ดของแข็งที่เคลื่อนที่หลุดออกไปจากระบบมีน้อย โดยทั่วไปแล้วจะมีไซโคลนซึ่งมีขาจุ่มอยู่ในเบด เพื่อป้อนกลับของแข็งจะเห็นว่าอนุภาคของแข็งที่อยู่ในหอจะลอยตัวขึ้นเนื่องจากถูกเป่าด้วยแก๊สที่มาจากส่วนล่างของหอ ของแข็งบางส่วนที่อยู่ในไซโคลนจะถูกดันขึ้น อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากจะหลุดลอยไปจากไซโคลน เมื่อทำการวัดความดันที่จุดต่างๆ แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับความสูงของหอในลักษณะวงจรความดัน พบว่าผลต่างระหว่างระดับความสูงของอนุภาคของแข็งในไซโคลนและในเบด เป็นความสูงที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นเพื่อสมดุลความดันในไซโคลน เนื่องจากความดันรวมรอบวงจรต้องมีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ

สำหรับฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน (ฟลูอิดเบดความเร็วสูง) จะต้องออกแบบให้ท่อป้อนกลับมีขนาดใหญ่กว่าหรือใกล้เคียงกับท่อไรเซอร์ เพื่อให้สามารถป้อนของแข็งกลับมาได้ทันเวลา ระบบประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ ด้านไรเซอร์ ซึ่งเกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูง ส่วนบนของท่อป้อนกลับซึ่งเกิดการหมุนวนของอนุภาคแล้วตกกลับลงมาเนื่องจากถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เหมือนไซโคลน และส่วนล่างของท่อป้อนกลับซึ่งเกิด ฟลูอิดเซชันแบบฟองอากาศ โดยที่แก๊สจะถูกเป่าเข้าที่ส่วนล่างของท่อไรเซอร์และท่อป้อนกลับเพื่อให้เกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูงและฟลูอิดเซชันแบบฟองอากาศตามลำดับ เมื่อทำการวัดความดันที่จุดต่างๆแล้วนำมาเขียนกราฟเทียบกับความสูงในลักษณะของวงจรความดันพบว่า ส่วนบนของท่อป้อนกลับที่อยู่เหนือระดับของเบด ความดันจะคงที่ตลอดเนื่องจากมีการตกของอนุภาคอิสระ ส่วนด้านเบดที่เกิดฟองอากาศที่อยู่ในภาวะเฟสหนาแน่นซึ่งมีความหนาแน่นบัลค์สูง จะเกิดความดันลดคร่อมเบดสูงกว่าทางด้านไรเซอร์ ซึ่งเกิดฟลูอิดเซชันที่ความเร็วสูงและมีความหนาแน่นบัลค์ต่ำมีสัดส่วนช่องว่างมาก อนุภาคจะกระจายตัวตลอดความสูงของหอ

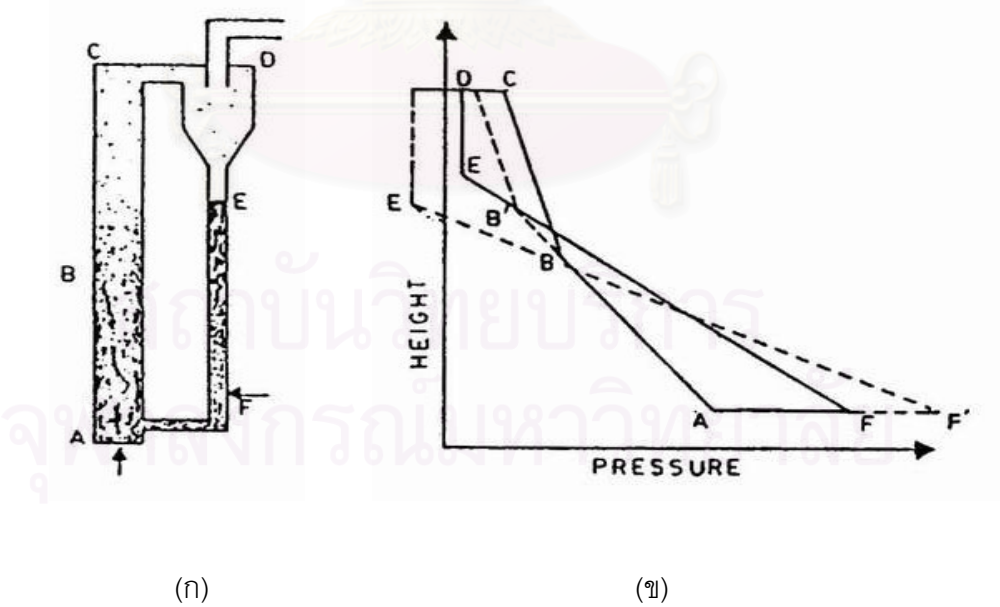
ดังกล่าวมาแล้วว่าระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนทางด้านท่อไรเซอร์ซึ่งอยู่ในภาวะฟลูอิดไดซ์เบดที่ความเร็วสูง ซึ่งมีการกระจายตัวของเม็ดของแข็งในแนวแกน (Axial Distribution) จะ

เกิดการแบ่งเป็น 2 เฟส คือ แบบหนาแน่น (Dense Phase) ที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์และแบบเจือจาง (Dilute Phase) ที่บริเวณด้านบนของท่อไรเซอร์

พิจารณาวงจรความดันในรูปทั้งสอง (รูปที่ 2.19 ก และ ข) จะเห็นว่าช่วงที่เปลี่ยนจาก Dense ไปเป็น Dilute นั้น เส้นกราฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความชัน ซึ่งในช่วง Dilute นั้น จะมีความดันลดต่ำกว่าในช่วง Dense เพราะว่ามี การกระจายตัวของเม็ดของแข็งต่ำกว่า และ ความชันของกราฟในช่วงนี้จะมีค่าสูงกว่าในช่วง Dense Phase ซึ่งแสดงว่าในช่วง Dilute นั้น การกระจายตัวตามแนวรัศมีจะเกิดขึ้นน้อยกว่าในช่วง Dense Phase แต่การกระจายตัวก็ลดลงอย่าง สม่่าเสมอตลอดความสูงในอัตราส่วนที่น้อยมาก

ช่วงเปลี่ยนจาก Dense ไปเป็น Dilute นั้น เป็นฟังก์ชันกับอัตราการไหลป้อนกลับของของ แข็งและปริมาณเม็ดของแข็งในระบบ พิจารณาระบบซึ่งมีปริมาณเม็ดของแข็งคงที่แต่เปลี่ยนอัตรา การหมุนเวียนของเม็ดของแข็ง ดังรูปที่ 2.19(ข) เส้นประในรูปแสดงถึงการหมุนเวียนของแข็งที่ลด ลง จะเห็นว่าความสูง ณ จุดที่เปลี่ยนจาก Dense ไปเป็น Dilute Phase จะมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาสมดุลความดัน (Pressure Balance) รอบวงจร หรือ ระบบฟลูอิดไดซ์เบด แบบหมุนเวียนตามรูปที่ 2.19(ก) ที่ส่วนล่างของท่อไรเซอร์เบดจะหนาแน่นกว่าด้านบนทำให้ความ ดันลดต่อความสูงที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์มีค่าสูงกว่าด้านบน โดยที่เม็ดของแข็งในระบบ ฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนจะกระจายอยู่ในท่อไรเซอร์และท่อป้อนกลับ โดยที่ความดันลดในทั้ง สองท่อจะสมดุลกันอยู่ นั่นคือผลรวมของความดันลดทั้งระบบจะมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2.19 วงจรความดันของระบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน (Basu, P., and Fraser, S.A. 1991)

2.3 ชีวมวล (National Energy Policy Office, NEPO, 2000)

2.3.1 ภาพรวมของพลังงานชีวมวล ประมาณ 12 % ของพลังงานของโลกมาจากพลังงานชีวมวล เช่น ชยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มูลสัตว์และพืชให้พลังงานบางชนิด ในประเทศอุตสาหกรรม เชื้อเพลิงเหล่านี้ได้ถูกนำมาผลิตไฟฟ้าและไอน้ำใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ (เช่น โรงงานกระดาษ และ โรงงานน้ำตาล เป็นต้น) ตรงกันข้ามกับประเทศกำลังพัฒนาส่วนใหญ่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มและอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งยังไม่มีประสิทธิภาพ และสร้างมลภาวะต่อสภาพแวดล้อม แต่การเพิ่มขึ้นของรายได้และอุตสาหกรรมจะเป็นตัวผลักดันให้มีการใช้เทคโนโลยีชีวมวลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสะอาดขึ้นถ้ามองในด้านเศรษฐศาสตร์ เชื้อเพลิงชีวมวลเสียเปรียบเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่ถ้านำเรื่องการทำลายสภาวะแวดล้อมมาร่วมด้วย เชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อได้เปรียบ กล่าวคือ เชื้อเพลิงชีวมวลมีความหนาแน่นน้อยกว่า ให้พลังงานน้อยกว่า มีน้ำหนักเบากว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลและยากในการจัดการกว่า แต่เชื้อเพลิงชีวมวลมีข้อดีด้านสิ่งแวดล้อมคือมีขึ้นใหม่ทุกปี ไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก (การเผาไหม้ของชีวมวลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่เกินกว่าที่พืชได้ดูดซับไว้ระหว่างการเจริญเติบโต) มีกำมะถันน้อยกว่า(จึงทำให้เกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์น้อยกว่า) และอุณหภูมิเผาไหม้ต่ำกว่า(ช่วยลดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ได้มากกว่า) อย่างไรก็ตามประโยชน์เหล่านี้จะเกิดขึ้นได้ต่อเมื่อชีวมวลถูกใช้ไปอย่างมีประสิทธิภาพและไม่สร้างมลภาวะต่อสภาพแวดล้อมเท่านั้น ด้วยเหตุผลนี้ควรนำเทคโนโลยีใหม่ๆทันสมัยมาทดแทนของเดิม

ในประเทศไทยมีการใช้ประโยชน์จากชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานในอุตสาหกรรมโดยเฉพาะในชนบท และภาคการเกษตร เช่น โรงงานน้ำตาล โรงสีข้าว โรงสกัดน้ำมันปาล์ม และอุตสาหกรรมไม้ยางพารา แปรรูป ถึงแม้พลังงานชีวมวลมีอัตราเพิ่มขึ้น 8 % ต่อปี แต่ยังถือว่าน้อยกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของการใช้พลังงานโดยรวม ส่วนแบ่งการใช้พลังงานชีวมวลที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมตั้งแต่ พ.ศ. 2528 ถึง พ.ศ. 2540 ได้ลดลงอย่างต่อเนื่องจาก 46% เป็น 25% สิ่งที่น่าสนใจคือ เมื่อเกิดวิกฤตเศรษฐกิจปี พ.ศ. 2540 การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมทั้งหมดมีสัดส่วนลดลงแต่ส่วนแบ่งพลังงานชีวมวลกลับเพิ่มขึ้นเป็น 28 %

	แกลบ	กากปาล์ม	กากอ้อย	เศษไม้
ปริมาณผลผลิต, ล้านตัน/ปี	20	2.2	50	5.8
ปริมาณชีวมวลเหลือใช้, ล้านตัน/ปี *	2.3-3.7	0.41-0.74	2.25-3.5	1.8
ค่าความร้อนสูงสุด, กิโลจูลส์/กก.	14,100	10,800	10,000	10,000
อัตราการกินเชื้อเพลิง, ตัน/เมกกะวัตต์-ปี**	9,800	14,050	14,100	15,500
ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้, เมกกะวัตต์	234-375	33-53	160-248	118

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพของชีวมวลในการนำมาผลิตไฟฟ้า (NEPO, 2000)

หมายเหตุ:

* หลักเกณฑ์ในการประเมินปริมาณชีวมวลแต่ละชนิดมีดังนี้

แกลบ - ประเมินจากโรงสีข้าวที่มีขนาดกำลังผลิต 100 ตันข้าวเปลือก/วันขึ้นไป

กากปาล์ม - ประเมินจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบที่ได้มาตรฐาน จำนวน 17 โรง ประกอบด้วย
กะลาไฟเบอร์และทะลายเปล่า

กากอ้อย - ประเมินจากโรงงานผลิตน้ำตาลทราย จำนวน 46 โรง

เศษไม้ - ประเมินจากเศษไม้และขี้เลื่อยของโรงเลื่อยไม้ต่างๆ ไป และโรงงานแปรรูปไม้ยางพาราและ
จากจำนวนปลายไม้ของสวนยางพารา

** ประเมินจากกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ 85%

2.3.2 ข้อพิจารณาเกี่ยวกับเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลทุกชนิดสามารถนำมาเผาโดยใช้เทคโนโลยีการเผาไหม้ต่างๆได้ ถ้าคุณสมบัติของชีวมวลได้มีการวิเคราะห์และพิจารณาอย่างถูกต้องเพื่อใช้ในการออกแบบเชื้อเพลิงชีวมวลเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหิน มีความหนาแน่นน้อยกว่า ให้พลังงานความร้อนต่ำกว่า และมีความยุ่งยากในการขนส่ง นอกจากนี้ขี้เถ้ายังมีส่วนประกอบของอัลคาไลน์ ซึ่งก่อให้เกิดตะกรัน การจับตัวเป็นก้อนและการทำให้ท่อในหม้อน้ำชำรุดเสียหาย ถ้าเป็นขี้เถ้าแกลบมีลักษณะคล้ายทรายละเอียดทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ปัญหาเกี่ยวกับสารอัลคาไลน์แตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของชีวมวล การแก้ไขที่ดีที่สุดต้องอาศัยประสบการณ์ เช่นโอกาสที่ขี้เถ้าจับตัวเป็นก้อน แม้ว่าสามารถตรวจสอบได้โดยการนำชีวมวลมาวิเคราะห์คุณสมบัติก่อนก็ตาม การลดอุณหภูมิเผาไหม้ลงช่วยได้เช่นกัน

2.3.3 ทางเลือกการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีเป็นความร้อน

มีเทคโนโลยีหลายระบบที่ใช้เผาไหม้ชีวมวลได้ดีดังนี้

- Mass Burn Stoker Boiler
- Stoker Boiler (Stationary Sloping Grate, Traveling Grate, and Vibrating Grate)
- Fluidized Bed Boiler (Bubbling and Circulating)
- Gasification with Combustion in a Close-Coupled Boiler
- Pulverized Fuel Suspension Fired Boiler

แต่ละเทคโนโลยีที่กล่าวมานี้สามารถใช้ได้กับชีวมวลทุกชนิด แต่จะมีข้อดี ข้อเสีย แตกต่างกันไป Stoker Boiler เป็นที่นิยมมากที่สุด แต่ไม่ใช่ดีที่สุด ยกตัวอย่างเช่น แกลบจะเผาไหม้ได้ดีใน Fluidized Bed และ Gasifier เพราะ อุณหภูมิเผาไหม้ต่ำช่วยลดการจับตัวเป็นก้อนของชีง์เตาเผาแบบ Stoker และ Suspension Firing สามารถใช้ได้แต่ ต้องระวังให้การจับตัวเป็นก้อนของชีง์เตามีน้อยสุด โดยทั่วไป Fluidized Bed เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดเพราะสามารถใช้ กับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูง และมีหลายขนาด Suspension Firing ไม่เหมาะกับชีวมวลเป็นส่วนใหญ่เพราะต้องนำมาย่อยก่อน Gasification อาจเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ แต่ติดปัญหาในด้านการยอมรับทางเทคนิคและการค้า

2.3.4 การเผาไหม้ของชีวมวล

ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมาเป็นแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็จะได้พลังงานออกมา พลังงานจากชีวมวลเป็นพลังงานที่ได้จากพืชและสัตว์ รวมทั้งผลผลิตจากการเกษตรและป่าไม้ เช่น ไม้พืน แกลบ กากอ้อย วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอื่นๆ รวมถึงการนำมูลสัตว์ ของเสียจากโรงงานแปรรูปทางเกษตร และขยะ มาเผาไหม้โดยตรงและนำความร้อนที่ได้ไปใช้ เช่น กากมันสำปะหลังได้มาจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง ส่วนที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิตเอทิลแอลกอฮอล์ แกลบจากโรงสีข้าวและเศษไม้ได้มาจากโรงเลื่อยไม้ยางพารา สวนยางพารา และโรงงานผลิตไม้อัด เป็นต้น ข้อดีของการเผาไหม้ชีวมวลคือ มีปริมาณกำมะถันต่ำ ราคาถูกกว่าพลังงานเชิงพาณิชย์อื่นต่อหน่วยความร้อนที่เท่ากัน มีแหล่งผลิตอยู่ในประเทศ ที่สำคัญที่สุดคือพลังงานจากชีวมวลจะไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก และแทบจะไม่ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศหรืออากาศเป็นพิษเลยในกรณีมีการปลูกทดแทน ในขณะเดียวกันปัญหาที่พบในการใช้พลังงานจากชีวมวลเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทถ่านหินมีหลายประการ ปัญหาที่สำคัญที่สุดคือชีวมวลมีปริมาณที่ไม่แน่นอน เนื่องจากชีวมวลแต่ละชนิดปลูกเพียงตามฤดูกาลเท่านั้น และผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ ถึงแม้ชีวมวลมีอยู่มากแต่อยู่อย่างกระจัดกระจายทำให้รวบรวมได้ยาก เช่น กะลามะพร้าว เศษไม้ ซังข้าวโพด ยอดอ้อยที่อยู่ตามท้องไร่ท้องนา และแกลบตามโรงสีเล็กๆ จึงทำให้ปริมาณชีวมวลไม่เพียงพอที่จะนำไปผลิตไฟฟ้า ที่ให้ผลทดแทนใน

การลงทุนดีพอ และเมื่อต้องหาชีวมวลประเภทอื่นหรือจากแหล่งอื่นมาเสริม ก็จะมีปัญหามากขึ้น ตารางที่ 1.2 แสดงสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล

ชนิด	ผลผลิต	Crop/residue ratio	Energy content(MJ/kg)
อ้อย	ชานอ้อย	0.25	9.25
ข้าวเปลือก	แกลบ	0.23	14.27
	ฟางข้าว	0.447	10.24
มันสำปะหลัง	ลำต้นมัน	0.08	18.42
	สำปะหลัง		
ปาล์มน้ำมัน	ทะลายปาล์ม	0.428	17.86
	เส้นใยปาล์ม	0.147	17.62
	กะลาปาล์ม	0.049	18.46
มะพร้าว	กาบมะพร้าว	0.362	16.23
	กะลามะพร้าว	0.16	17.93

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล (NEPO, 1999)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Martin R. และคณะ (1992) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคบริเวณผนังของเครื่องฟลูอิโดซ์เบดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.305 เมตร โดยอนุภาคที่ใช้คืออลูมินาที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 74.9 ไมโครเมตร ความเร็วอากาศที่ใช้อยู่ในช่วง 3 - 5 เมตรต่อวินาที และอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งในช่วง 2 - 80 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าอนุภาคบริเวณผนังเคลื่อนที่ลงไปข้างล่างของโรเตอร์ซึ่งสวนทางกับการไหลของอากาศหลัก กลุ่มอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงจะมีการสัมผัสกับผนังลดต่ำลงที่ความเร็วช่วง 0.3 - 0.4 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลในทิศทางลงของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ประมาณ 1.0 เมตรต่อวินาที ซึ่งอยู่ห่างจากผนังประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร

Heping Y. and Mridul G. (1994) ได้ทำการศึกษาการกระจายตัวของแก๊สในโรเตอร์ของเครื่องฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.20 เมตร สูง 5.5 เมตร อนุภาคที่ใช้คือเม็ดแก้วขนาด 116 และ 247 ไมโครเมตร และความหนาแน่น 2305 และ 2245 กิโลกรัมต่อลูก

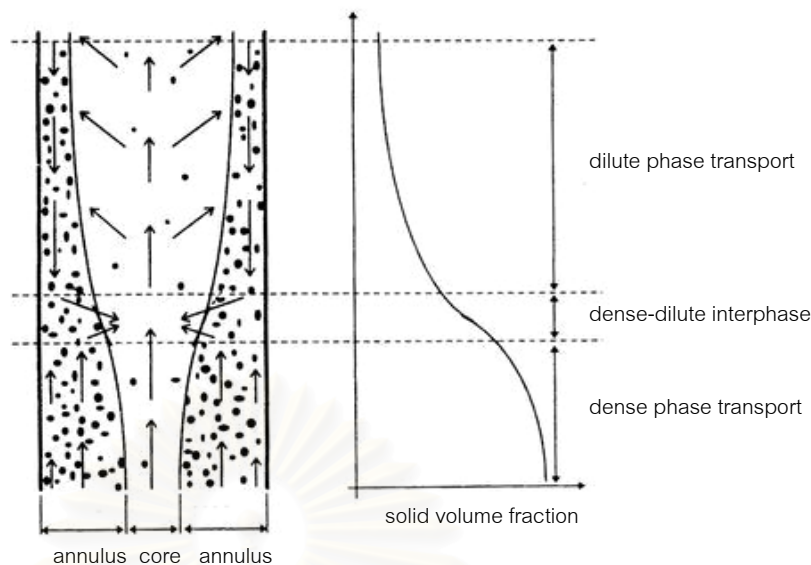
บาศก์เมตร ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือความเร็วของอากาศ อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง ความเร็วของแข็งและขนาดของแข็งโดยพบว่าความเร็วของอากาศมีอิทธิพลต่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง

Marzocchella A. and Arena U. (1996) ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยมีการใช้เครื่องมือป้อนอากาศครั้งที่ 2 ที่แตกต่างกันโดยโรเซอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.120 เมตร สูง 5.75 เมตร ใช้อนุภาค Ballotini ขนาด 89 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 2540 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่า Gs ที่ใช้เป็น 35 และ 55 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที และให้ความเร็วของอากาศคงที่ที่ 3 และ 6 เมตรต่อวินาที โดยผลในส่วนของสัดส่วนช่องว่างได้ว่าที่ความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที ที่ค่า Gs สูงสัดส่วนช่องว่างจะมีค่าน้อยกว่าที่ค่าGs ต่ำ

Weinell C.E. และคณะ (1997) ศึกษาการเคลื่อนที่ของทรายในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีหน้าตัดขนาด 0.14 x 0.18 ตารางเมตร สูง 3.0 เมตร โดยทรายที่ใช้มีขนาด 180-240 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 2.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความเร็วอากาศในช่วง 0-3.6 เมตรต่อวินาที และอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งในช่วง 5-25 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยใช้เทคนิค Radioactive Tracer ในการหาความเร็วอนุภาค พบว่าเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วของอนุภาคจะลดลง

Cheng Y. และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาผลของทางเข้าและทางออกของโรเซอร์และสัดส่วนช่องว่างในโรเซอร์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.186 เมตร สูง 8 เมตร โดยอนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือ FCC ขนาด 54 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 1398 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และได้ทำการวัดสัดส่วนของช่องว่างโดยเทคนิค Optical Density Probe พบว่าสัดส่วนของอนุภาคจะลดลงตามความสูง

Rhodes M.J. และคณะ (1998) ศึกษาารูปแบบการไหลในโรเซอร์ของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.09 เมตร สูง 7.2 เมตร อนุภาคที่ใช้คือ ทราย ขนาด 100 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 2650 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับปริมาณของของแข็งจะมีลักษณะเป็น S-Shape โดยจะแบ่งเป็น ส่วนหนาแน่น , ส่วนเปลี่ยนสถานะ และ ส่วนเบาบาง และเมื่อพิจารณาในแนวรัศมีจะแบ่งเป็น Core Region และ Annulus Region ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะการเคลื่อนที่ใน Fast Fluidized Bed

Fei W. และคณะ (1998) ศึกษาแนวโน้มของความเร็ว และปริมาณของอนุภาคในโรเซออร์ ที่มีความหนาแน่นสูง โดยโรเซออร์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 186 มิลลิเมตร สูง 8 เมตร อนุภาคที่ใช้คือ FCC ขนาด 54 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1398 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยใช้เทคนิค LDV ในการหาความเร็วของอนุภาค พบว่าสามารถแบ่ง ความเร็ว และปริมาณของอนุภาคในแนวรัศมีเป็น Core Region ($r/R < 0.4$) ความเร็วของอนุภาคจะมีค่าสูง ปริมาณของอนุภาคน้อย และจะมีการเปลี่ยนแปลงตามแนวรัศมีเล็กน้อย Steep Velocity Region ($0.4 < r/R < 0.85$) การเปลี่ยนแปลงในแนวรัศมีของความเร็ว และปริมาณของอนุภาคค่อนข้างมาก และ Annulus Region ($r/R > 0.85$) ความเร็วของอนุภาคจะค่อยๆลดลง และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อภาวะเปลี่ยนแปลง แต่ปริมาณของแข็งจะสูงที่สุด และเปลี่ยนแปลง เล็กน้อยตามแนวรัศมี

Mastellone M.L. and Arena U. (1999) ทำการทดลองเกี่ยวกับผลของขนาดและความหนาแน่นของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในโรเซออร์โดยโรเซออร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.120 เมตร สูง 5.75 เมตร อนุภาคที่ใช้คือ ซิลิกา, FCC, Ballotini1 และ Ballotini2 ขนาด 310, 70, 67 และ 89 ไมโครเมตร และความหนาแน่น 2600 1770 2540 และ 2540 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อความหนาแน่นของอนุภาคมากขึ้น ปริมาณอนุภาคที่ส่วนล่างของโรเซออร์จะสูง การกระจายตัวแนวแกนจะไม่แตกต่างกันมากตลอดความยาวของโรเซออร์และเมื่ออนุภาคใหญ่ขึ้นจะไม่มี การเคลื่อนที่ตัวของอนุภาคที่ผนัง แนวโน้มจะราบเรียบ

Zevenhoven R. และคณะ (1999) ศึกษาเกี่ยวกับความเร็วและความหนาแน่นของอนุภาคบริเวณผนังในเครื่องฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่มีขนาดหน้าตัด 0.25 x 1.00 เมตร สูง 7.00 เมตร โดยใช้เทคนิคการบันทึกภาพวิดีโอที่มีอัตราการบันทึกภาพ 50 เฟรมต่อวินาที ความไวหน้ากล้อง 150 ไมโครวินาที และอนุภาคที่ใช้ คือ คออร์ทซ ขนาด 310 ไมโครเมตร มีความหนา

แน่น 1700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าที่ตำแหน่งความสูง 2.25 เมตร อนุภาคมีความเร็วเฉลี่ยมากกว่าที่ตำแหน่งความสูง 2.75 เมตร

Rasul M.G. และคณะ (1999) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของขานอ้อยของประเทศออสเตรเลีย ได้ว่าขานอ้อยมีลักษณะส่วนใหญ่จะเป็นเส้นใยและเป็นฝุ่นผงและศึกษาขนาดของอนุภาคและ Drag Coefficient ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับความเร็วสุดท้ายของอนุภาคได้ว่าความเร็วสุดท้ายของอนุภาคมีค่าอย่างไม่เป็นระเบียบไม่มีแนวโน้มชัดเจนแต่พอสรุปได้ว่าค่า U_t จะขึ้นกับ Equivalent Cylinder Diameter (d_{eq}) โดยที่ค่า d_{eq} หาจากสูตร

$$d_{eq} = \left(\frac{a^2 + b^2}{2} \right)^{1/2}$$

โดยที่ a และ b คือด้านความกว้างและยาวของขานอ้อย

Namkung W. และคณะ (1999) ศึกษาสัดส่วนความดันในแนวแกนในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยเครื่องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร และสูง 5.3 เมตร อนุภาคที่ใช้คือ FCC และ ทรายซิลิกา ขนาด 65 และ 125 ไมโครเมตร และความหนาแน่น 1720 และ 3055 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ได้ว่า ความเร็วขนส่งของ FCC มีค่าต่ำกว่าของทรายซิลิกา และสัดส่วนของแข็งบริเวณด้านบนไรเซอร์ขึ้นกับค่าความเร็วของอากาศมากและสัดส่วนของแข็งบริเวณด้านล่างไรเซอร์ที่ความเร็วของอากาศคงที่จะสูงขึ้นเมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของแข็งเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มความเร็วของอากาศจะทำให้สัดส่วนของแข็งด้านล่างไรเซอร์ลดต่ำลง

Smolders K. and Baeyens J. (2000) ทำการวิจัยในเรื่องการเคลื่อนตัวของอนุภาคและเวลาที่อนุภาคอยู่ในไรเซอร์ของเครื่องฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 6.5 เมตร โดยใช้ทรายขนาด 90 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 2200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าเวลาที่อนุภาคอยู่ในคอลัมน์มีความสัมพันธ์กับความเร็วของแก๊สและอัตราการไหลย้อนกลับ คือ เมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊ส จะทำให้อนุภาคมีความเร็วเพิ่มขึ้น ดังนั้นเวลาที่อนุภาคอยู่ในคอลัมน์ก็จะน้อยลง อัตราการไหลป้อนกลับจะมากขึ้น

Namkung W. and Kim S.D. (2000) ได้ทำการวิจัยเรื่องการผสมกันของแก๊สในแนวรัศมีในเครื่องฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 เมตร สูง 5.3 เมตร อนุภาคที่ใช้คือ ซิลิกาที่มีขนาด 125 ไมโครเมตร โดยศึกษาผลของความเร็วอากาศ อัตราการไหลป้อนกลับของแข็ง และอัตราส่วนของอากาศครั้งที่ 2 พบว่าเมื่ออัตราการไหลป้อนกลับและอัตราส่วนของอากาศครั้งที่ 2 มากขึ้น สัมประสิทธิ์ของการผสมกันในแนวรัศมีจะมากขึ้น แต่จะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศ และมิงานวิจัยก่อนหน้านี้นี้พบว่าเมื่อขนาดของคอลัมน์ใหญ่ขึ้น สัมประสิทธิ์ของการผสมกันในแนวรัศมีก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

Ulrike L. and Joachim W. (2002) ได้ทำการศึกษาถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตรงช่วงทางออกของแก๊สในเครื่องฟลูอิดเบดที่โรเตอร์มีขนาดหน้าตัด 0.3×1 ตารางเมตร และสูง 8.5 เมตร โดยทดลองให้มีทางออกเป็น 2 แบบคือแบบ L – Shape และ T – Shape อนุภาคที่ใช้ในการทดลองคือ ควอร์ทซ์ ขนาด 140 ไมโครเมตร และใช้กำลังความเร็วสูงในการบันทึกพฤติกรรมของวัสดุในช่วงทางออกโดยผลที่ได้คือความเข้มข้นของของแข็งที่ปรากฏบริเวณทางออกทั้ง 2 แบบไม่เพิ่มขึ้นและเปรียบเทียบความดันลดและเวลาที่อยู่ในเครื่องได้ว่าไม่มีประโยชน์อันใดที่จะนำทางออกแบบ T – Shape นี้มาแทนแบบ L – Shape

ปาจริย์ ต.(2003) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคและอัตราการไหลของอากาศที่มีต่อความดันและความเร็วของอนุภาคที่ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของโรเตอร์ในเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05 เมตร สูง 2 เมตร ใช้เทคนิคการบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD ร่วมกับการใช้โปรแกรม Image Pro Plus ในการหาความเร็วของอนุภาค ใช้ถ่านหินขนาด 300-1180 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 1380 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าที่อัตราการไหลอากาศคงที่ ความเร็วของถ่านหินและความดันในระบบมีค่าลดลงตามความสูงของโรเตอร์ บริเวณด้านล่างของโรเตอร์จะมีสัดส่วนของอนุภาคมากกว่าด้านบน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ สัดส่วนของอนุภาคจะมีค่าลดลงและความเร็วของอนุภาคจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วของอนุภาคจะมีค่าลดลงที่อัตราการไหลเดียวกัน

Xu G. and Gao S. (2003) ศึกษาตัวแปรสำคัญที่มีต่ออุทกพลศาสตร์ในโรเตอร์ของเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.09 เมตร สูง 10 เมตร โดยอนุภาคที่ใช้ได้แก่ FCC#1 FCC#2 และทรายซิลิกา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็น 54.0, 54.7 และ 166.0 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่น 929.5, 1463.0 และ 2222.0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ ซึ่งได้ว่า ตัวแปรที่สำคัญที่มีต่อพฤติกรรมของอนุภาคภายในโรเตอร์ได้แก่ความเร็วของอากาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง

Ibsen C.H. และคณะ (2003) ศึกษาเกี่ยวกับการวัดความเร็วของแข็งด้วยกล้องความเร็วสูงในโรเตอร์ของเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนได้ว่าบริเวณผนังโรเตอร์จะมีของแข็งอยู่มากซึ่งตรงจุดนี้จึงทำให้คุณภาพในการวัดความเร็วของแข็งลดต่ำไปอีกทั้งยังทำให้ช่วงของความเร็วของแข็งกว้างขึ้นด้วยซึ่งในงานวิจัยได้ปรับปรุงให้มีคุณภาพในการวัดดีขึ้นและนำผลที่ได้ไปตรวจสอบโดยการหาค่าความเร็วของแข็งโดยใช้เลเซอร์

Li Z.Q. และคณะ (2004) ศึกษาอัตราการไหลของของแข็งและก๊าซที่ความหนาแน่นสูงในเครื่องฟลูอิดเบดแบบหมุนเวียนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.140 เมตร สูง 8.3 เมตร โดยใช้ FCC ขนาด 69 ไมโครเมตร และมีความหนาแน่น 1300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งเท่ากับ 400 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ด้านบนของโรเตอร์มี

ของแข็งอยู่ถึง 20 %และด้านล่างมีอยู่มากกว่า 40 % และที่ความเร็วของอากาศค่าเดียวกันนี้เมื่อค่าอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งลดลงจะทำให้สัดส่วนของของแข็งลดลงและสัดส่วนของแข็งลดลงตามความสูงของโรเตอร์

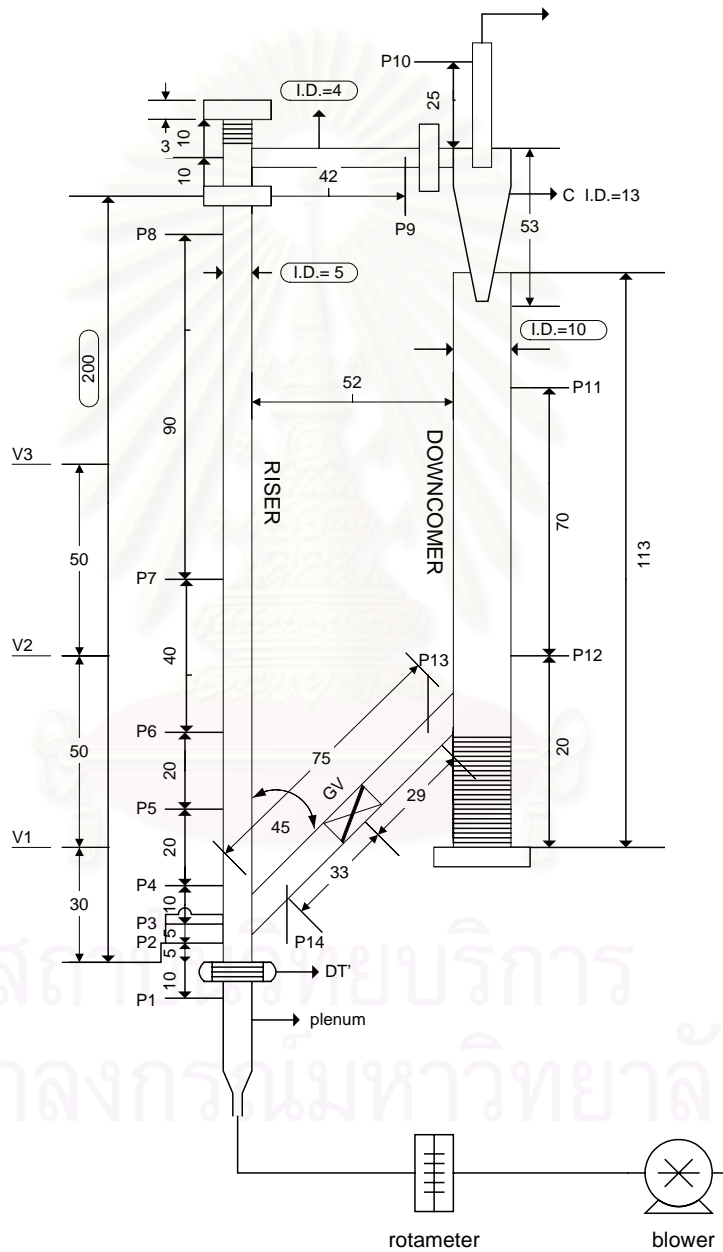


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน (Circulating Fluidized Bed : CFB) ส่วนประกอบที่สำคัญแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบจำลองเครื่องฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียน

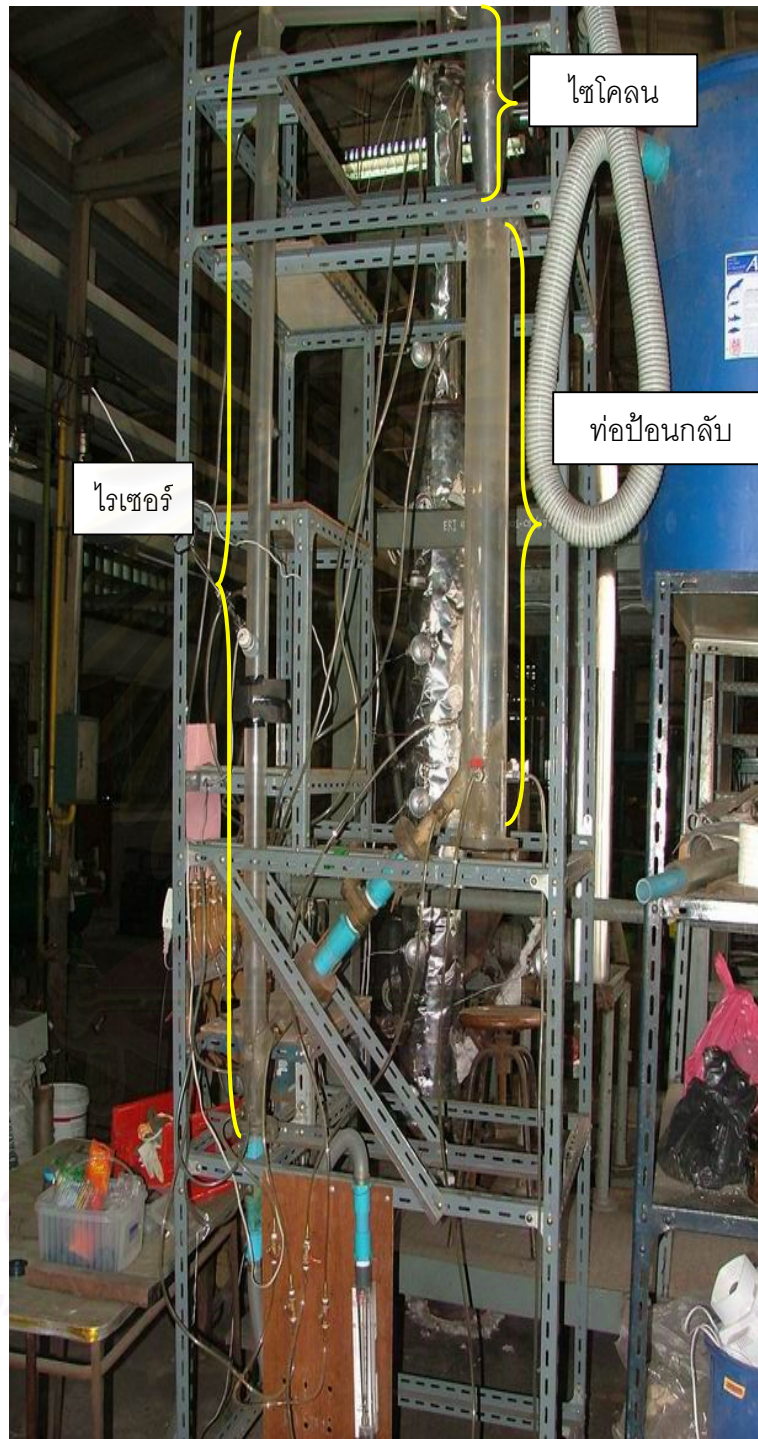
เครื่องฟลูอิดเบแบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงจากเครื่องฟลูอิดเบเดิม(ปาจรีย์, 2003)โดยเจาะรูเพิ่มอีก 8 ตำแหน่ง เพื่อวัดความดันลดคร่อมตัวกระจายอากาศ 2 ตำแหน่ง ความดันลดคร่อมไซโคลน 2 ตำแหน่ง ความดันลดคร่อมท่อส่งผ่านบริเวณด้านบนและด้านล่างจากวาล์ว 2 ตำแหน่ง และบริเวณท่อป้อนกลับ 2 ตำแหน่ง เพื่อหาความดันลดในท่อป้อนกลับ นอกจากนี้ยังได้เปลี่ยนรูปแบบทางออกของโรเซอร์จากแบบ T – Shape เป็นแบบ L – Shape เพื่อลดการสะสมของแข็งบริเวณด้านบนโรเซอร์ ในตอนล่างของท่อป้อนกลับมีการนำโฟมที่ตัดให้มีขนาดเท่ากับท่อป้อนกลับมาใส่ให้มีความสูง 20 เซนติเมตร เพื่อลดการสะสมของแข็งที่อยู่บริเวณส่วนล่างของท่อป้อนกลับ ซึ่งจะช่วยให้อัตราการไหลป้อนกลับเกิดขึ้นได้เร็วมากขึ้น

ส่วนประกอบของเครื่องฟลูอิดเบแบบหมุนเวียนที่สร้างขึ้นมีดังต่อไปนี้

3.1.1 ท่อโรเซอร์(Riser) จากรูปที่ 3.1 ท่อโรเซอร์ทำจากท่อพลาสติกใส(Plexiglass) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 2 เมตร บริเวณด้านล่างของโรเซอร์จะมีแผ่นกระจายอากาศ (Air Distributor) เป็นแบบแผ่นตะแกรงแผ่นเดี่ยว(Single Perforated Plate) ที่มีความละเอียด 60 mesh (250 ไมโครเมตร) บริเวณผนังท่อด้านโรเซอร์มีการเจาะรูขนาด 1/4 นิ้ว เพื่อติด Pressure Tap ที่ตำแหน่ง P_1 - P_8 ในรูปที่ 3.1 สำหรับวัดค่าความดันตามความสูงของโรเซอร์ โดยแต่ละตำแหน่งห่างจากตัวกระจายอากาศเป็นระยะ -10 5 10 20 40 60 100 และ 190 เซนติเมตร ตามลำดับ

ในการบันทึกภาพของแข็งภายในท่อโรเซอร์นั้น บริเวณผนังท่อด้านโรเซอร์จะถูกเจาะรูเพื่อให้ท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ซึ่งปลายท่อมีแผ่นพลาสติกปิดอยู่ ยื่นเข้าไปบริเวณกลางท่อสำหรับการบันทึกภาพภายในโรเซอร์ ที่ตำแหน่ง V_1 V_2 และ V_3 ดังในรูปที่ 3.1 โดยแต่ละตำแหน่งห่างจากตัวกระจายอากาศเป็นระยะ 30 80 และ 130 เซนติเมตร ตามลำดับ และรูปเครื่องฟลูอิดเบแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลองจริงจะแสดงในรูปที่ 3.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 เครื่องฟลูอิด์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 **ไซโคลน (Cyclone)** เป็นอุปกรณ์สำหรับแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กจากแก๊สเพื่อป้องกันการฟุ้งกระจาย ไซโคลนทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกไซโคลน (D_c) = 12 ซม.

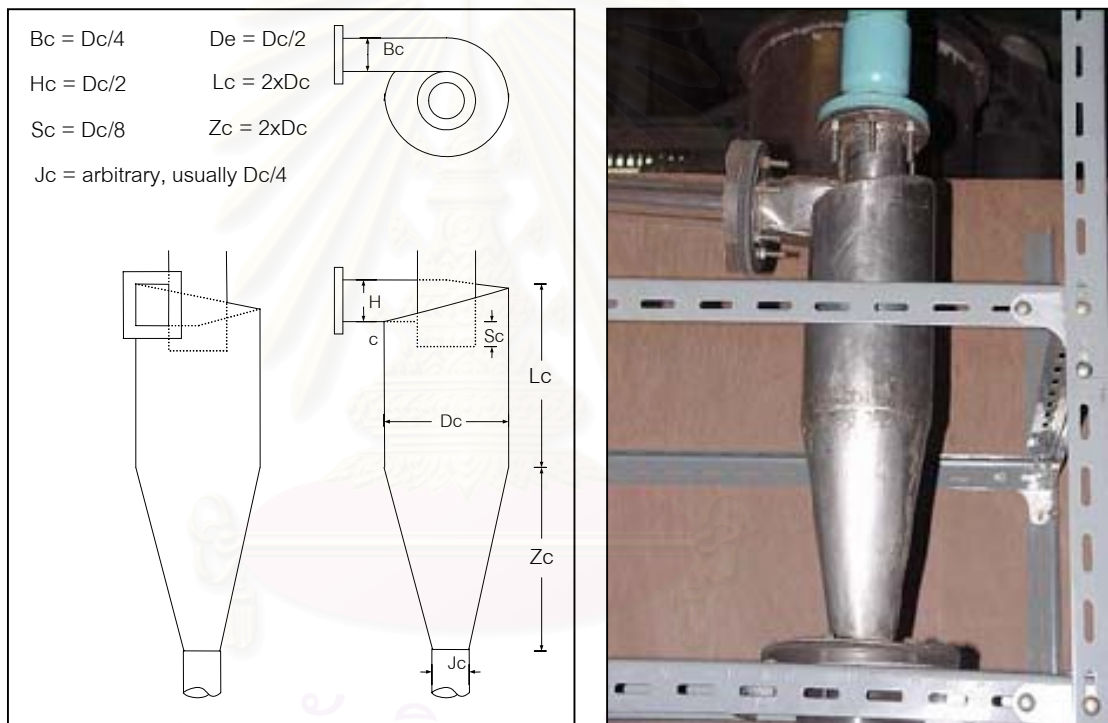
ทางเข้าของแก๊สและอนุภาค ($B_c \times H_c$) = 3x6 ซม.

เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของแก๊ส (D_e) = 12 ซม.

ความสูงของกระบอกไซโคลน (L_c) = 24 ซม.

ความสูงของกรวยไซโคลน (Z_c) = 24 ซม.

เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของอนุภาค (J_c) = 3 ซม.



รูปที่ 3.3 ไซโคลน (Cyclone)

3.1.3 **ท่อป้อนกลับ (Downcomer)** เป็นส่วนที่นำอนุภาคที่ถูกดักจับโดยไซโคลนป้อนกลับสู่โรเตอร์อีกครั้ง ทำจากท่อพลาสติกใส (Plexiglass) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 เซนติเมตร ความหนา 5 มิลลิเมตร สูง 1.2 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4

3.1.4 **แวลวาล์ว (L-valve)** เป็นส่วนที่ป้อนกลับอนุภาคจากท่อป้อนกลับสู่ท่อโรเตอร์ทำจากท่อพลาสติกใส (Plexiglass) เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 4 เซนติเมตร ความหนา 3 มิลลิเมตร ยาว 75 เซนติเมตร โดยทำมุม 45 องศา กับแนวระดับ และมีเกทวาล์ว (Gate Valve) เป็นตัวควบคุมอัตราการไหลป้อนกลับของแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ท่อป้อนกลับ (Downcomer)



รูปที่ 3.5 แอลวาล์ว (L-Valve)

3.1.5 อุปกรณ์ป้อนอากาศ (Air Blower) อุปกรณ์ที่ใช้ในการป้อนอากาศในการทดลองนี้คือเครื่องเป่าอากาศที่มีขนาด 15 แรงม้า อากาศจะถูกส่งตามท่อผ่านการควบคุมโดยเกทวาล์ว (Gate Valve) ขนาด 2 นิ้ว ดังแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องเป่าอากาศ (Blower)

3.1.6 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศที่ใช้คือ Rotameter ที่ทำมาจากอะคริลิกใส ภายในบรรจุลูกกลอยที่ทำมาจากสแตนเลส ช่วงอัตราการไหลของอากาศที่วัดได้ 70-700 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูป 3.7 และ เครื่องวัดความเร็วของอากาศ Thermo – Anemometer ที่วัดได้อยู่ในช่วง 0 – 25 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูป 3.8



รูปที่ 3.7 โรตاميเตอร์



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความเร็วอากาศ

3.1.7 อุปกรณ์วัดความดัน อุปกรณ์วัดความดันที่ใช้ในการทดลองนี้คือ Pressure Transmitter ของบริษัท Yokogawa รุ่น EJA120 Style: S2 มีช่วงการวัด 0-100 มิลลิเมตรน้ำ ความคลาดเคลื่อน 0.2% ดังแสดงในรูป 3.9



รูปที่ 3.9 Pressure Transmitter

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกภาพ

3.2.1 กล้องบันทึกภาพ CCD camera ของบริษัท Sony รุ่น SSC-DC58AP พร้อมเลนส์ สามารถปรับความเร็ว Shutter ได้ตั้งแต่ 1/25 ถึง 1/10000 วินาที ดังแสดงในรูป 3.10 เพื่อบันทึกภาพจากการทดลอง แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมต่อไป



รูปที่ 3.10 กล้อง CCD และเลนส์

3.2.2 โปรแกรม Image Pro Plus V.4.5.1 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการเก็บภาพที่บันทึกได้จากกล้อง CCD และนำภาพที่ได้มาหาความยาวของเส้นของแข็งที่เคลื่อนที่ในแต่ละภาพที่บันทึกได้โดยประกอบอยู่กับเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้สำหรับรับภาพและทำการประมวลผลที่ได้จากการทดลองโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ Image Pro Plus V.4.5.1 ดังแสดงในรูป 3.11



รูปที่ 3.11 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม Image Pro Plus

โปรแกรม Image-Pro Plus เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ซึ่งมีความสามารถในการบันทึกภาพตามระยะเวลาที่กำหนด สามารถปรับความเข้มและความสว่างของภาพได้ อีกทั้งจะเรียงลำดับภาพที่บันทึกได้และเขียนแฟ้มข้อมูลเป็นแบบ TIFF และ BMP ในการหาเส้นความยาวของของแข็งที่เคลื่อนที่โปรแกรมจะแสดงข้อมูลการวิเคราะห์ระยะทางที่ลากได้ออกมาเป็นหน่วยตามที่ได้ทำค่าเทียบและค่าเทียบยังสามารถเก็บบันทึกและสร้างใหม่เพื่อนำมาใช้ได้ส่วนข้อมูลวิเคราะห์ที่ออกมาได้นี้ก็สามารถส่งข้อมูลออกไปยังโปรแกรม Excel ได้

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 เครื่องหั่นย่อยซากพืช ใช้มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า ความเร็ว 1420 รอบต่อนาที ใช้บดย่อยซากพืชที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 3.12

3.3.2 เครื่องบดละเอียด เป็นแบบ Hammermill ของบริษัท Retsch GmbH รุ่น WRB 80 มอเตอร์ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ 1 เฟส ใช้บดแกลบและชานอ้อยให้อยู่ในช่วงขนาดต่างๆ ที่ศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.12 เครื่องหั่นย่อยซากพืช



รูปที่ 3.13 เครื่องบดละเอียด

3.3.3 เครื่องร่อนและตะแกรกร่อนแยกขนาด ใช้แยกทราย ขี้เลื่อย ชานอ้อยและแกลบที่บดออกเป็นช่วงๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.14

3.3.4 เครื่องอบแห้ง เป็นแบบถาด ใช้ในการอบแห้งชานอ้อย เพื่อเอาน้ำออกก่อนที่จะนำมาทำการบดหยาบต่อไป ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 เครื่องร่อนและตะแกรกร่อนแยกขนาด



รูปที่ 3.15 เครื่องอบแห้ง

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

3.4.1 ทดลองหาความดันตลอดทั้งระบบของของผสมทั้ง 3 คู่ที่ใช้ในงานวิจัยได้แก่ ทราวยกับซีลี้อย, ทราวยกับแกลบและทราวยกับชานอ้อย

3.4.2 หาความเร็วของสารป้อนผสม ณ ความสูงต่างๆทางฝั่งโรเตอร์

3.4.1 การทดลองในส่วนที่ 1

3.4.1.1 การเตรียมทราวยและซีวมวลเพื่อใช้ในการทดลอง

1. นำทราวยมาร้อนเพื่อแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อนแยกขนาดและเครื่องแยก
2. นำซีวมวลมาบดย่อยแล้วนำไปร่อนแยกตามขนาดที่ต้องการด้วยเครื่องแยก

3.4.1.2 วิเคราะห์สมบัติต่างๆของทราวยและซีวมวล

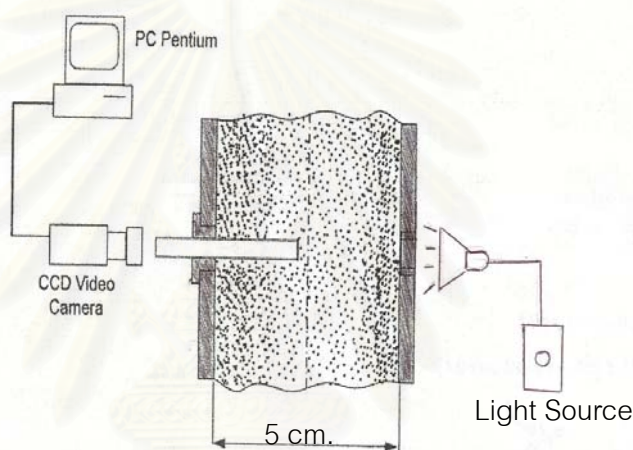
1. ความหนาแน่นบัลค์ของทราวยและซีวมวล (bulk density)
2. ความหนาแน่นของทราวยและซีวมวล (solid density)

3.4.1.3 การทดลองในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน

1. ชั่งทราวยและซีวมวลแต่ละชนิดให้มีปริมาตรอย่างละ 2000 มิลลิลิตร และผสมกันโดยซีวมวลที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ซีลี้อย ชานอ้อย และแกลบ
2. บรรจุทราวยและซีวมวลที่เตรียมไว้ในเครื่องปฏิกรณ์ ทางด้านบนของไซโคลนเพื่อเตรียมที่จะทำการทดลอง ซึ่งความสูงของทราวยและซีวมวลในท่อป้อนกลับประมาณ 40 เซนติเมตร
3. เปิดเครื่องเป่าอากาศ ให้อากาศไหลเข้าทางด้านล่างของโรเตอร์ผ่านตัวกระจายอากาศ(Distributor) เปิดเกทวาล์ว (Gate Valve) ให้สารป้อนผสมระหว่างทราวยและซีวมวลเริ่มไหลเข้าสู่โรเตอร์โดยควบคุมอัตราการป้อนกลับของสารป้อนผสมให้มีค่าคงที่
4. ปรับอัตราการไหลของอากาศโดยใช้วาล์วให้ได้ตามที่ต้องการโดยอ่านค่าอัตราการไหลของอากาศที่โรตารีมิเตอร์
5. รอให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล (Steady State) ประมาณ 10 นาที
6. บันทึกค่าความดันที่อ่านได้จาก Pressure Transmitter ณ ตำแหน่งต่างๆตลอดทั้งระบบ
7. หลังจากวัดความดันเรียบร้อยแล้วก็ทำการวัดหาค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง(Gs)

8. ทำการทดลองตามข้อ 1 – 7 เพิ่มโดยเพิ่มอัตราการไหลของอากาศและปรับวาล์ว ป้อนกลับของแข็งตำแหน่งเดิม
9. ทำการทดลองตามข้อ 1 – 8 เพิ่มโดยเปลี่ยนอัตราการไหลเริ่มต้นใหม่และปรับค่า Gs ให้เหมาะสม
10. ทำการทดลองตามข้อ 1 – 9 ให้ได้ค่า Gs ต่างๆประมาณ 5 ค่า
11. เปลี่ยน Bed Material และทำการทดลองเพิ่มตามข้อ 1 – 10

3.4.2 การทดลองในส่วนที่ 2 การบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus V.4.5.1 จะต้องต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกภาพดังรูปที่ 3.16

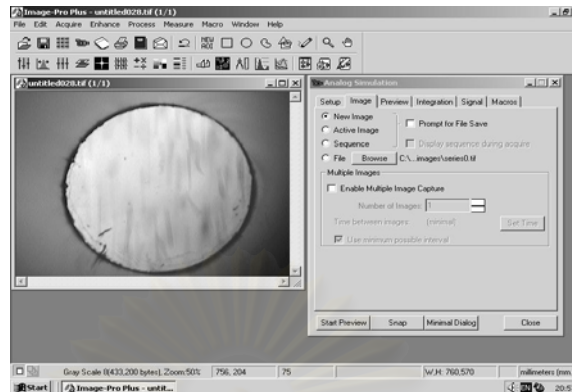


รูปที่ 3.16 การต่ออุปกรณ์ในการบันทึกภาพ

3.4.2.1 การบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD

1. ประกอบกล้องและเลนส์เข้าด้วยกัน
2. ต่อสายของกล้องเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่เปิดโปรแกรม Image Pro Plus เพื่อรับภาพที่มาจากกล้อง CCD
3. นำกล้องไปวางบริเวณหน้าท่อพลาสติกที่ยื่นเข้าไปในไรเซอร์ เพื่อที่จะทำการบันทึกภาพ
4. เปิดไฟที่อยู่ด้านตรงข้ามท่อพลาสติก ระยะห่างจากหลอดไฟถึงท่อไรเซอร์ประมาณ 2 เซนติเมตร เพื่อให้มีแสงเพียงพอในการบันทึกภาพ
5. เมื่อเปิดเครื่องเป่าอากาศ และปรับอัตราการไหลตามที่ต้องการ จากนั้นทำการปรับความเร็วชัตเตอร์ (Shutter Speed) และแสงสว่างจนกว่าจะได้ภาพที่ชัดเจน

6. ทำการบันทึกภาพด้วย โปรแกรม Image Pro Plus จะได้ภาพดังแสดงในรูป 3.17



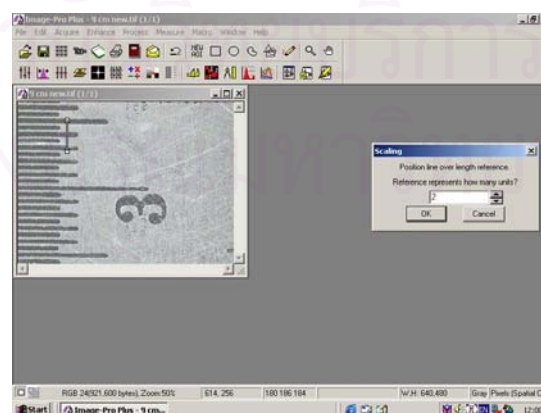
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างภาพที่บันทึกได้ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus

3.4.2.2 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus

ก่อนจะวิเคราะห์ภาพที่บันทึกจากการทดลอง จะต้องมีการปรับเทียบ (Calibrate) หน่วยความยาวของภาพที่ถ่ายได้กับค่ามาตรฐาน โดยในที่นี้จะทำการบันทึกภาพหน่วยวัดความยาวจากเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์ โดยปรับระยะภาพ (Focus) ที่ 8 เซนติเมตร จะให้ภาพชัดเจนที่สุด ซึ่งระยะนี้จะเป็นระยะภาพที่ใช้ในทุกการทดลอง

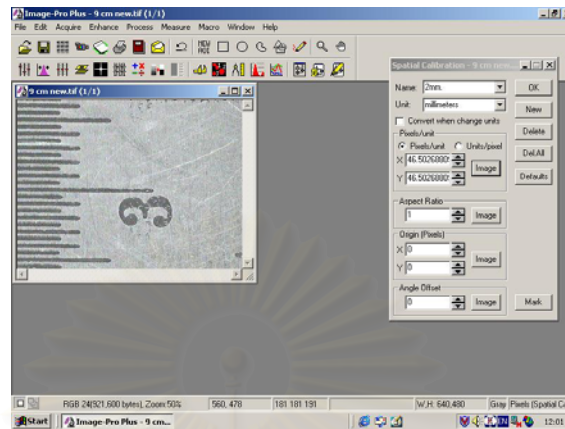
การปรับเทียบความยาวมาตรฐาน (Calibration) มีรายละเอียดดังนี้

1. บันทึกภาพเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์
2. ลากเส้นความยาวจากภาพ พร้อมทั้งกำหนดความยาวของเส้นที่ลาก ดังแสดงในรูป 3.18



รูปที่ 3.18 ภาพเครื่องมือวัดเวอร์เนียร์และการลากเส้นความยาว

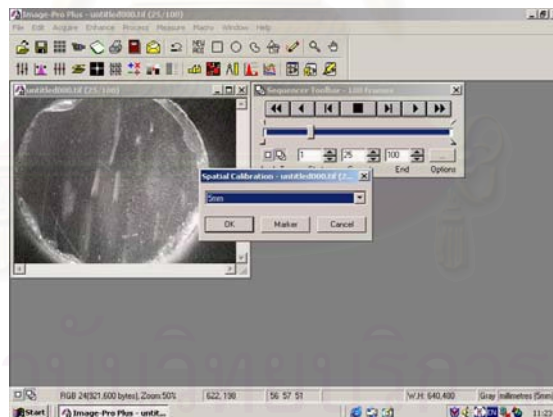
- กำหนดชื่อไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้ แล้วทำการบันทึกไฟล์ไว้ ดังแสดงในรูป 3.19



รูปที่ 3.19 การกำหนดไฟล์และหน่วยที่ได้ทำการปรับเทียบไว้

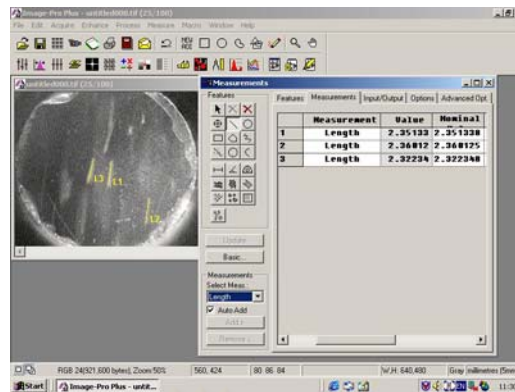
การวิเคราะห์ภาพที่บันทึกจากการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

- เปิดไฟล์ภาพที่ทำการบันทึกไว้ พร้อมทั้งเลือกไฟล์ที่ทำการ Calibrate ไว้ จากนั้นเลือกฟังก์ชันการลากเส้นความยาว ดังแสดงในรูป 3.19



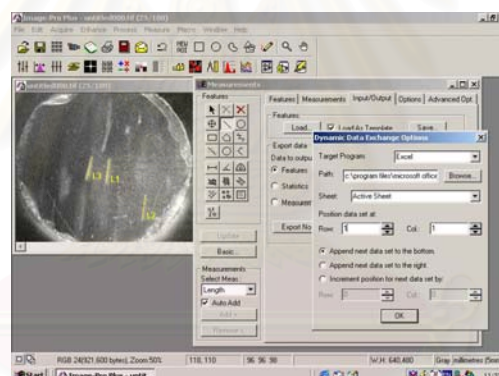
รูปที่ 3.20 การเปิดไฟล์ภาพพร้อมทั้งเลือกไฟล์ Calibrate และการเลือกฟังก์ชันความยาว

- ภาพที่บันทึกไว้มีลักษณะเป็นเส้นของอนุภาค ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง แล้วลากเส้นความยาวของอนุภาคที่เคลื่อนที่ จากนั้นโปรแกรมจะแสดงความยาวของแต่ละเส้น ดังแสดงในรูป 3.21



รูปที่ 3.21 การลากเส้นการเคลื่อนที่ของอนุภาค

3. ทำการส่งข้อมูลความยาวที่ได้ไปยังโปรแกรม Excel ดังแสดงในรูป 3.22 และ รูป 3.23 แสดงข้อมูลที่ได้รับมาจากโปรแกรม Image Pro Plus V.4.5.1 ข้อมูลที่ได้จะถูกทำการบันทึกเก็บไว้ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาความเร็วของของแข็งต่อไป



รูปที่ 3.22 การส่งข้อมูลไปยัง Excel

	Features	Measurement Value	Nominal V	Min. Tol.	Max. Tol.	Pass/Fail
1	L1	Length	2.227737	2.227737	-0.001	0.001 Pass
2	L2	Length	2.687874	2.687874	-0.001	0.001 Pass
3	L3	Length	2.063558	2.063558	-0.001	0.001 Pass
4	L4	Length	2.48965	2.48965	-0.001	0.001 Pass
5	L5	Length	2.318182	2.318182	-0.001	0.001 Pass
6	L6	Length	2.186075	2.186075	-0.001	0.001 Pass
7	L7	Length	2.354001	2.354001	-0.001	0.001 Pass
8	L8	Length	2.229127	2.229127	-0.001	0.001 Pass
9	L9	Length	2.45833	2.45833	-0.001	0.001 Pass
10	L10	Length	2.227737	2.227737	-0.001	0.001 Pass
11	L11	Length	2.547077	2.547077	-0.001	0.001 Pass
12	L12	Length	2.080909	2.080909	-0.001	0.001 Pass
13		average	2.321696			

รูปที่ 3.23 ข้อมูลที่ปรากฏในไฟล์ Excel

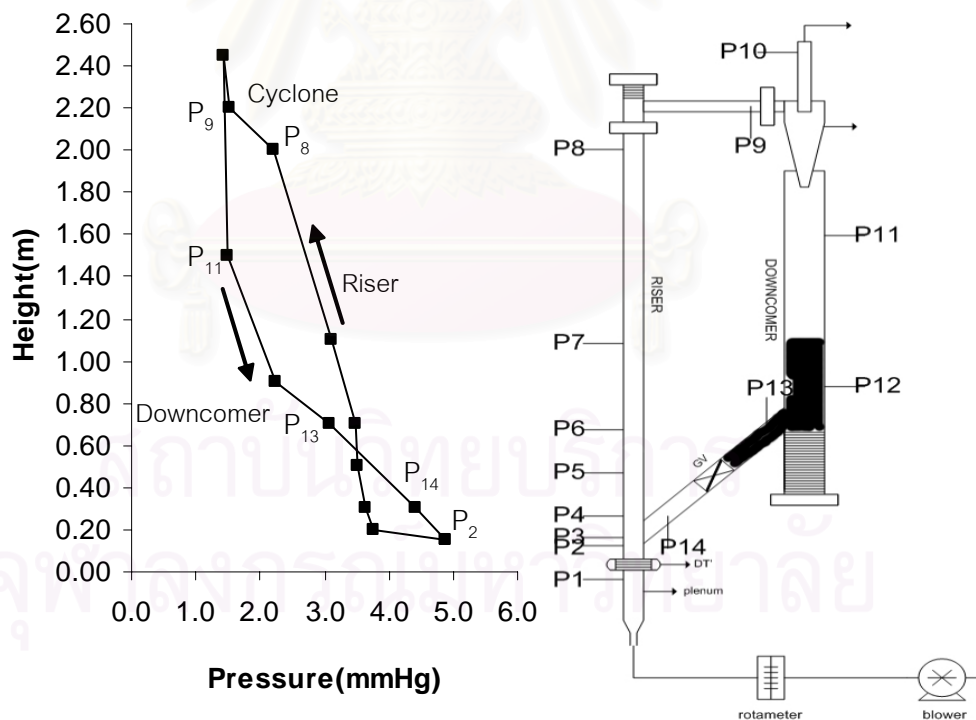
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของของแข็งในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียน โดยศึกษาถึงผลของความเร็วกาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งที่มีต่อความดัน สัดส่วนของแข็งและความเร็วของแข็งตามความสูงของไรเซอร์ ซึ่งผลของความดันที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาหาสัดส่วนของแข็งได้ ส่วนความเร็วของแข็งสามารถคำนวณจากการบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD และนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Image Pro Plus V.4.5.1 ซึ่งได้กล่าวในบทที่ 3

4.1 ผลของความเร็วกาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งที่มีต่อความดันและสัดส่วนของแข็ง

4.1.1 ทราบกับซีล้อย



รูปที่ 4.1 วงจรความดันของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเมื่อสารป้อนผสมเป็นทรายกับซีล้อยที่ความเร็วกาศ 4.2 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง

5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที

ในขณะที่ทำการทดลอง ความดันที่จุดต่าง ๆ ในระบบจะถูกบันทึกไว้ รูปที่ 4.1 แสดงวงจรความดันรวม ซึ่งพบว่าในด้านไรเซอร์ความดันจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น ความดันต่ำสุดของระบบอยู่ที่ทางออกของไซโคลน ในด้านท่อป้อนกลับพบว่าความดันเพิ่มขึ้นตามปริมาณระดับความสูงของของแข็ง และความดันจะมีค่าสูงที่สุดที่ตำแหน่ง 2 ซึ่งเป็นจุดที่ของแข็งไหลเข้าไปในด้านไรเซอร์อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจาก บริเวณนี้ได้รับความดันจากสองทางคือความดันที่เกิดจากของแข็งเคลื่อนที่และความดันที่เกิดจากอากาศหรือ Primary Air ที่เข้ามาฟลูอิดไดซ์ของแข็งจากตัวกระจายอากาศ

เมื่อพิจารณาสมดุลความดัน (Pressure Balance) รอบวงจร หรือ ระบบฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนตามรูปที่ 4.1 ที่ส่วนล่างของท่อไรเซอร์เบดจะหนาแน่นกว่าด้านบนทำให้ความดันลดต่อความสูงที่บริเวณด้านล่างของท่อไรเซอร์มีค่าสูงกว่าด้านบน โดยที่เม็ดของแข็งในระบบฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนจะกระจายอยู่ในท่อไรเซอร์และท่อป้อนกลับ โดยที่ความดันลดในทั้งสองท่อจะสมดุลกันอยู่ นั่นคือผลรวมของความดันลดทั้งระบบจะมีค่าเป็นศูนย์ Basu P. (1991)

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

สมการที่ 1 คือสมดุลความดันรวมของทั้งระบบฟลูอิดไดซ์แบบหมุนเวียนที่ใช้ในงานวิจัย

โดยที่ $P_2 - P_8$ คือ ความดันลดในด้านไรเซอร์

$P_8 - P_9$ คือ ความดันลดคร่อมจุดระหว่างทางออกไรเซอร์กับทางเข้าไซโคลน

$P_9 - P_{11}$ คือ ความดันลดคร่อมไซโคลน

$P_{11} - P_{13}$ คือ ความดันลดในท่อป้อนกลับ

$P_{13} - P_{14}$ คือ ความดันลดคร่อมวาล์วส่งผ่าน

เมื่อแทนค่าความดันของแต่ละจุดลงในสมการที่ 1 พบว่าความดันรวมของทั้งระบบมีค่าเท่ากับศูนย์

จากข้อมูลความดัน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในไรเซอร์ข้างต้น สามารถนำมาคำนวณหาสัดส่วนของแข็งซึ่งได้จากสมการของ Li Z.Q. et al. (2004);

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta P}{\Delta H g \rho_p} \quad \dots\dots\dots (2)$$

เมื่อ ε_s - สัดส่วนของแข็ง

ΔP - ความดันลดคร่อมจุด

ΔH - ผลต่างระหว่างจุด 2 จุด

ρ_p - ความหนาแน่นของของแข็ง

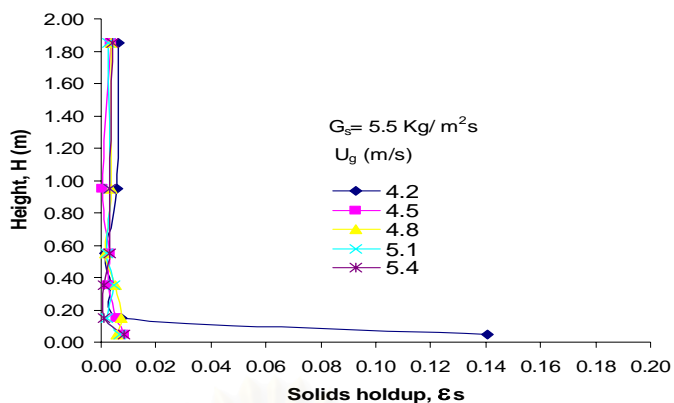
g - ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

สมการนี้สอดคล้องกับสมการการหาสัดส่วนช่องว่างของ Kunii, D., and Levenspiel, O. (1991) ดังนี้

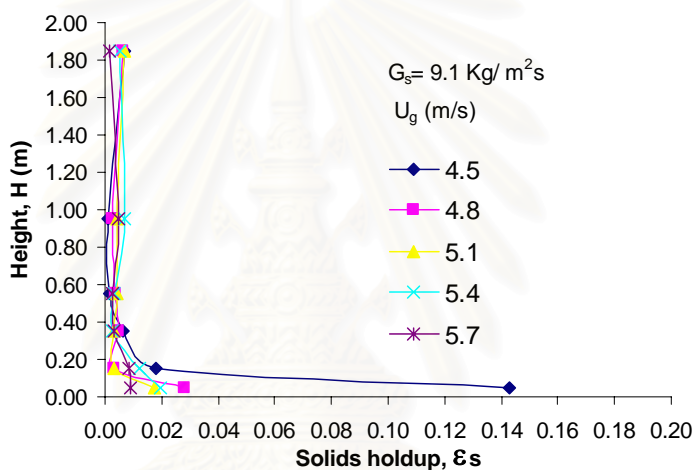
$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta P g_c}{\Delta L g (\rho_p - \rho_g)} \dots\dots\dots (3)$$

เช่น ค่าของ $(\Delta P/\Delta H)_{23}$ หมายถึง ความดันที่จุด P_2 ลบด้วยความดันที่จุด P_3 แล้วนำไปหารด้วยระยะห่างระหว่าง H_3 และ H_2 เป็นต้น ซึ่งค่าของสัดส่วนของแข็งที่คำนวณได้จากสมการที่ 2 สามารถนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัดส่วนของแข็งและความสูงของโรเตอร์ได้ดังรูปที่ 4.2 เมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งคงที่เท่ากับ 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าสัดส่วนของแข็งทางด้านโรเตอร์มีค่าลดลงตามความสูง ที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ 4.2 เมตรต่อวินาที ค่าสัดส่วนของแข็งลดลงจาก 0.14 เป็น 0.007 คิดเป็น 95% ในช่วงความสูงที่เพิ่มขึ้นเพียง 10 เซนติเมตร และเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ 5.4 เมตรต่อวินาที การลดลงของสัดส่วนของแข็งน้อยลงจาก 0.0086 เป็น 0.0010 คิดเป็น 88.7% ซึ่งสอดคล้องกับสิ่งที่สังเกตเห็นระหว่างการทดลอง ว่าบริเวณด้านล่างของโรเตอร์มีของแข็งกระจายตัวอยู่อย่างหนาแน่น และลดน้อยลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น และยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Arena U. et al.(1996) ด้วย

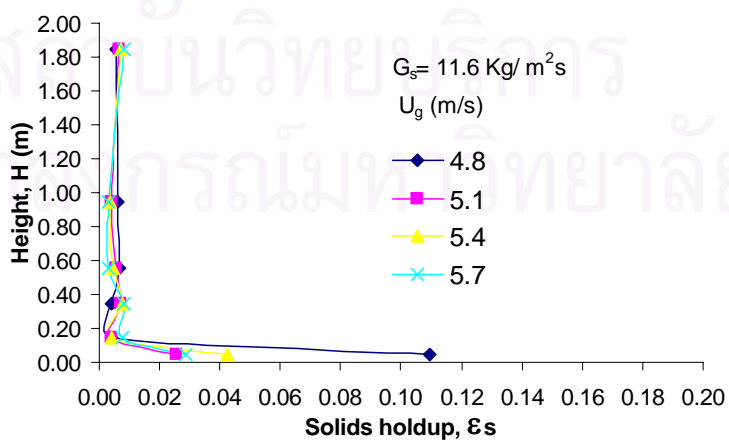
เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งจาก 5.5 เป็น 9.1, 11.6, 14.9 และ 18.7 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูง มีแนวโน้มเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 - 4.6 ตามลำดับ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูง ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งต่ำ ๆ คือ 5.5, 9.1 และ 11.6 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาทีในรูปที่ 4.2 - 4.4 นั้น พบว่ามีของแข็งในบริเวณเบตหนาแน่น (10 เซนติเมตรเหนือตัวกระจายอากาศ) อยู่ระหว่าง 0.8 - 14.3% ส่วนบริเวณเบตเบาบาง (40 เซนติเมตรเหนือตัวกระจายอากาศ) มีของแข็งอยู่ประมาณ 0.1 - 0.8% เมื่ออัตราการไหลป้อนกลับเพิ่มสูงขึ้นเป็น 14.9 และ 18.7 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาทีในรูปที่ 4.5 และ 4.6 นั้น บริเวณเบตหนาแน่นจะสูงขึ้นประมาณ 40 เซนติเมตรเหนือตัวกระจายอากาศ และพบว่ามีของแข็งเพิ่มขึ้นในบริเวณนี้ในช่วง 0.5 - 12.23% ส่วนบริเวณเบตเบาบางคือเหนือ 40 เซนติเมตรขึ้นไป จะเห็นว่าปริมาณของแข็งอยู่ในช่วง 0.4 - 1.4% สิ่งที่สังเกตเห็นได้เป็นพิเศษจากรูปที่ 4.5 คือที่ความเร็วของอากาศ 4.7 และ 4.9 เมตรต่อวินาที การเคลื่อนที่ของของแข็งตลอดความสูงของโรเตอร์เป็นแบบ Pneumatic Transport นั่นคือมีปริมาณของแข็งค่อนข้างคงที่ที่ 1.8% ตลอดความสูง



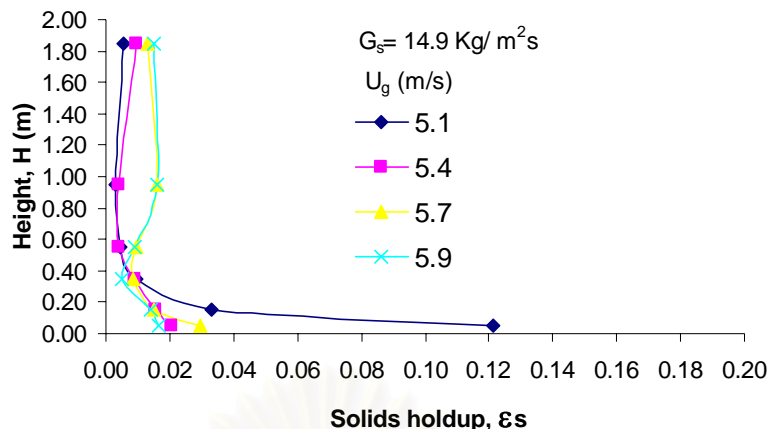
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที



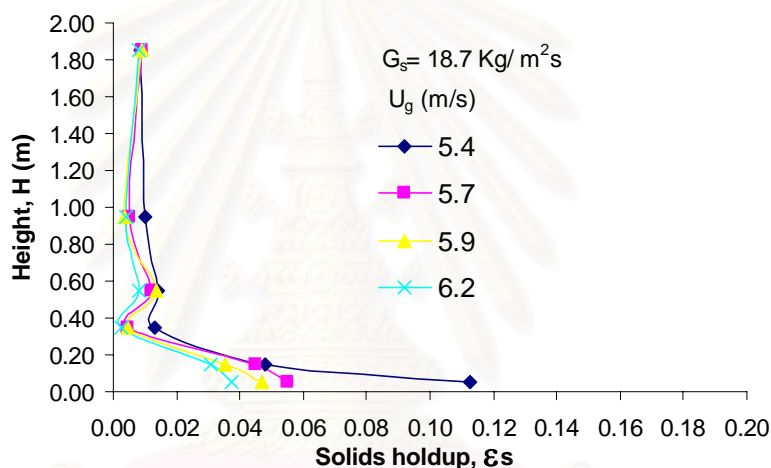
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 9.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 11.6 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

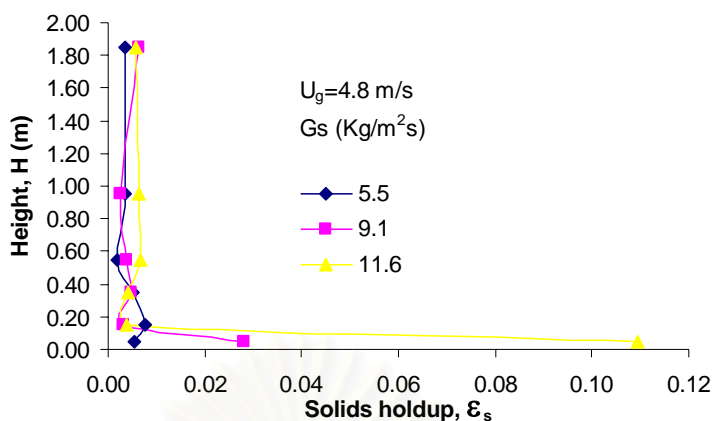


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยู่ที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 14.9 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

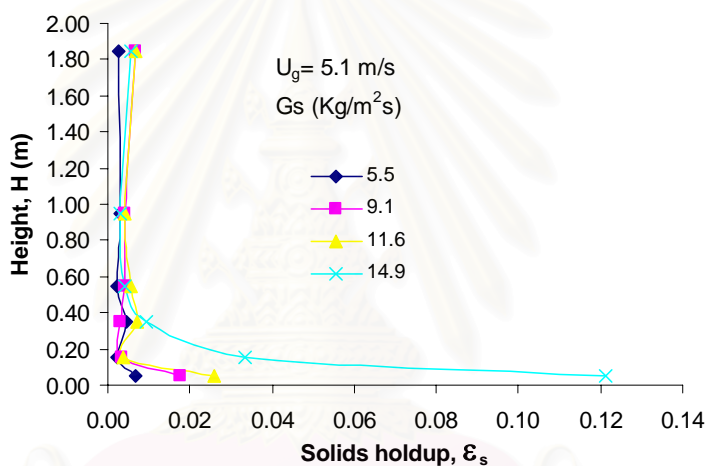


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยู่ที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 18.7 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

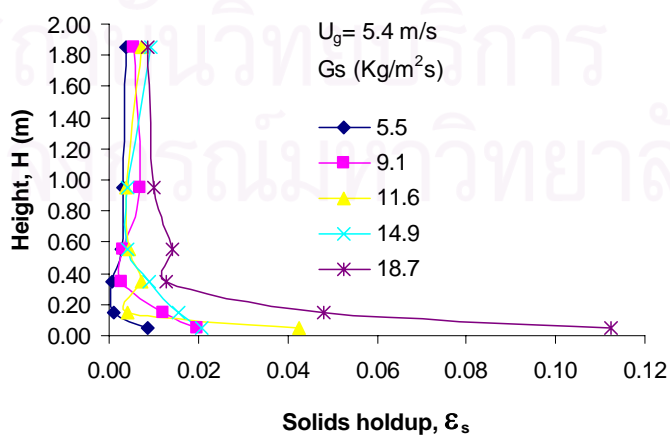
เมื่อกำหนดให้ความเร็วของอากาศคงที่โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลป้อนกลับของแข็ง จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงรูปที่ 4.7-4.9 ซึ่งของแข็งที่ใช้เป็นสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยู่ โดยพิจารณารูปที่ 4.7 ที่ความเร็วของอากาศคงที่ที่ 4.8 เมตรต่อวินาที และอัตราการไหลย้อนกลับของของแข็งเปลี่ยนแปลงเป็น 5.5, 9.1 และ 11.6 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ พบว่าที่อัตราการป้อนของของแข็งมากที่สุดคือ 11.6 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที สัดส่วนของแข็งบริเวณด้านล่างของโรเตอร์จะมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณของแข็งที่ไหลกลับเข้ามายังโรเตอร์มีปริมาณมากขึ้นแต่ปริมาณอากาศที่ใช้ในการทำให้เกิดฟลูอิดไอส์มีค่าเท่าเดิมจึงทำให้ให้บริเวณด้านล่างของโรเตอร์มีของแข็งกระจายตัวกันอยู่มาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Namkung W. et al.(1999) และ Li Z.Q. et al.(2004) และ Cheng Y. et al. (1998)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ 4.8 เมตรต่อวินาที

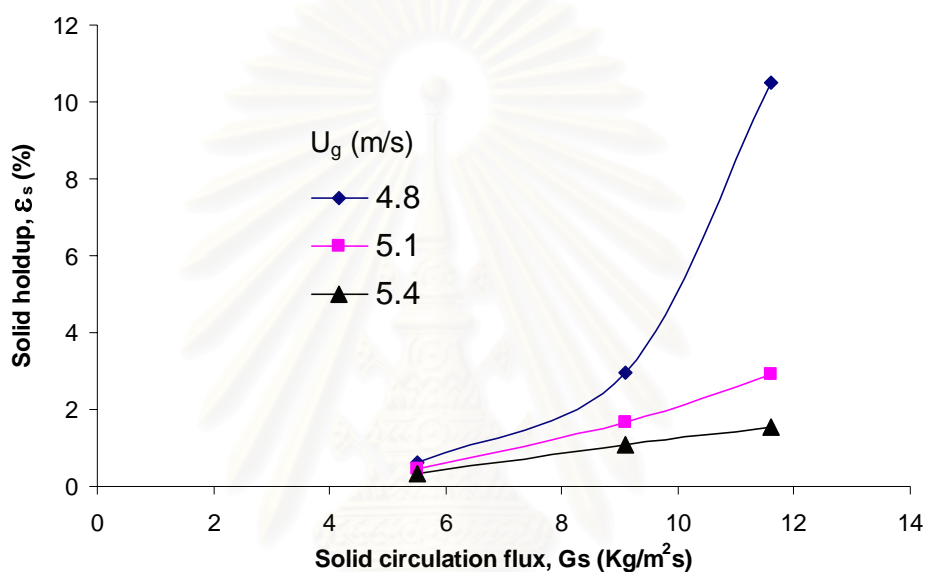


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ 5.1 เมตรต่อวินาที

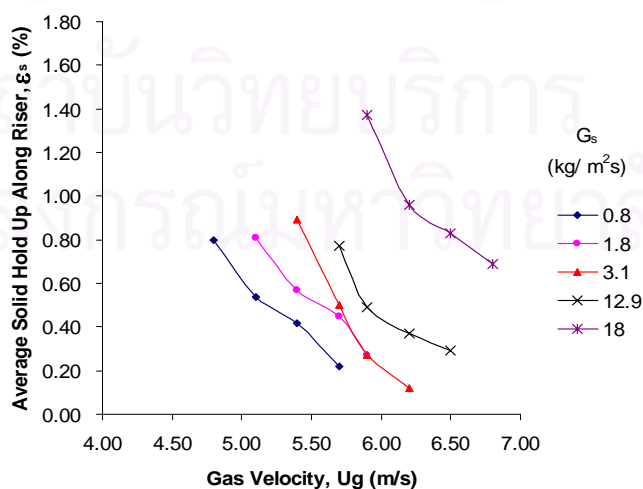


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ 5.4 เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.10 เป็นการสรุปความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งที่มีต่อสัดส่วนของแข็งภายในไรเซอร์ ในช่วงเบตหนาแน่นคือที่ 10 เซนติเมตรเหนือตัวกระจายอากาศ พบว่า ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งคงที่ เมื่อความเร็วอากาศเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนของแข็งลดต่ำลง ซึ่งไม่ชัดเจนที่อัตราการไหลป้อนกลับมีค่าต่ำเนื่องจากปริมาณของแข็งมีน้อย แต่จะเห็นได้อย่างชัดเจนที่อัตราการไหลป้อนกลับสูง ๆ และที่ความเร็วของอากาศคงที่ เมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งเพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วนของแข็งเพิ่มสูงขึ้นและจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนที่ความเร็วของอากาศต่ำๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Li Z.Q. et al.(2004)



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งกับสัดส่วนของแข็ง ณ ตำแหน่งที่เบตหนาแน่นสำหรับสภาวะป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เถ้า



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านไรเซอร์ที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งต่างกัน

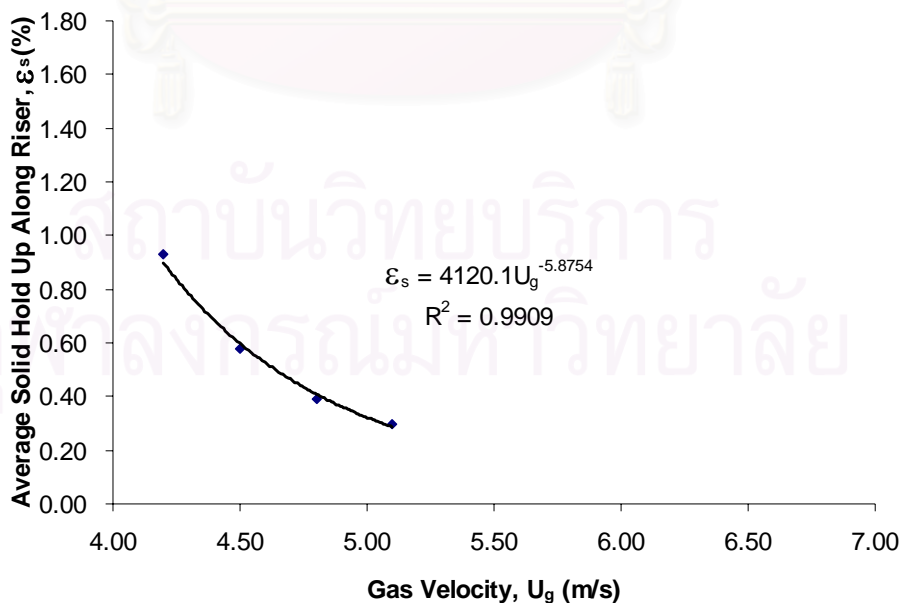
จากกราฟรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์ ($\epsilon_s = \Delta P_{2-8} / \Delta H_{2-8}$) จะเห็นว่าความเร็วอากาศที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตามความสูงของไรเซอร์มีค่าลดลง แต่เมื่ออัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งเพิ่มขึ้น สัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตามความสูงของไรเซอร์มีค่าสูงขึ้น

เมื่อนำข้อมูลความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งต่ำสุดคือที่ 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาทีมาเขียนกราฟดังรูปที่ 4.12 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์ ดังสมการที่ 4

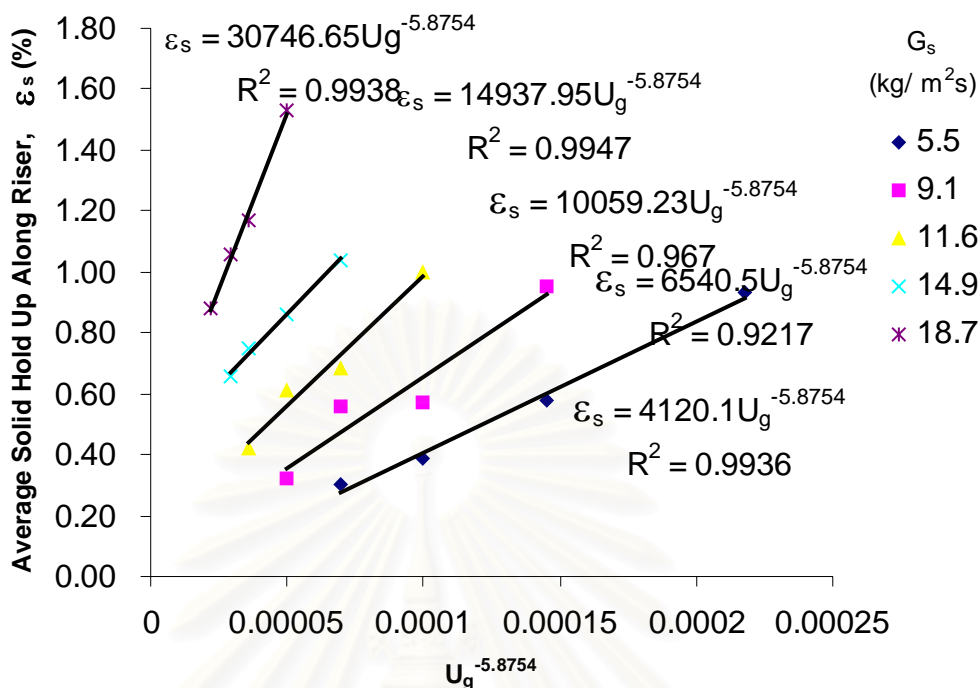
$$\epsilon_s = 4120.1U_g^{-5.8754} \dots\dots\dots (4)$$

สมการนี้สอดคล้องกับผลการทดลองนั่นคือ เลขยกกำลังของความเร็วอากาศมีค่าเป็นลบ เมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น ทำให้เทอมทางด้านขวามีค่าลดลง นั่นคือสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์มีค่าลดลง

เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศและสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งค่าอื่น ๆ (9.1 11.6 14.9 และ 18.7 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที) ต้องทำให้เลขยกกำลังของความเร็วอากาศในสมการที่ 4 มีค่าคงที่ แล้วหาค่าสัมประสิทธิ์หน้าความเร็วอากาศ (ความชัน) ที่เหมาะสมกับอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งแต่ละค่า ที่ทำให้สัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์มีค่าใกล้เคียงกับค่าสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์ที่ได้จากการทดลอง แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านไรเซอร์ที่ อัตราการไหลป้อนกลับของแข็ง 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที

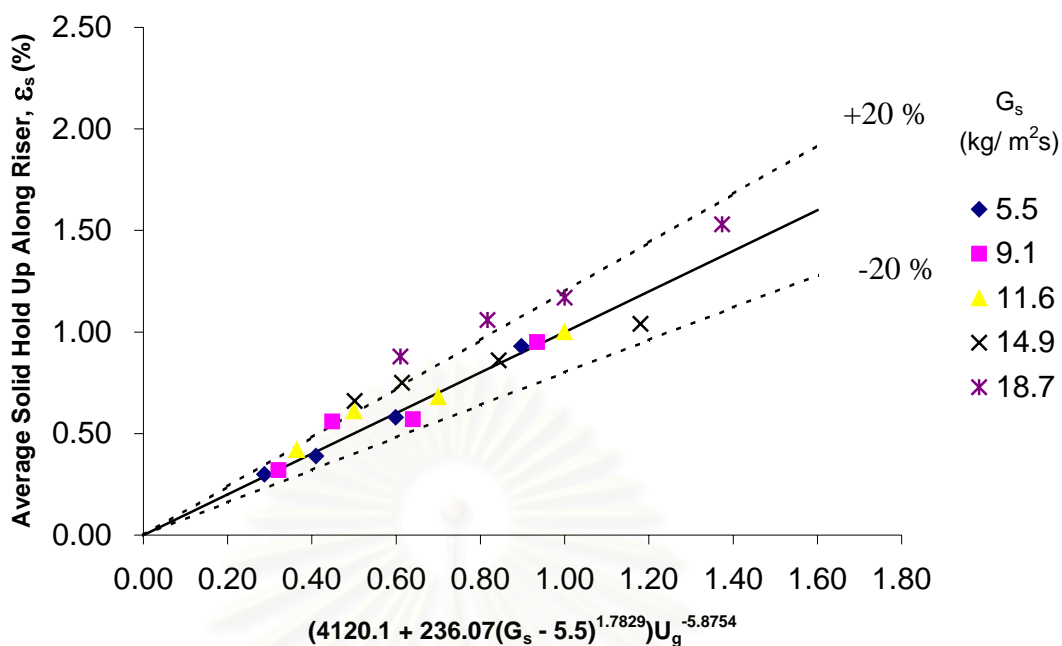


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านโรเซอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง

จะเห็นว่าความชันของเส้นกราฟแต่ละเส้นจากอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งในช่วง 5.5 – 18.7 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที อยู่ระหว่าง 4120.10 – 30746.65 ตามลำดับ จากนั้นนำความชันทั้งหมดจากรูปที่ 4.13 มาหาความสัมพันธ์กับอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง สมการที่ 5 แสดงผลของความเร็วจากและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งที่มีต่อสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านโรเซอร์ดังนี้

$$\epsilon_{s, \text{ ทาย+ชี้เฉลี่ย}} = \{4,120.1 + 236.07(G_s - 5.5)^{1.7829}\} U_g^{-5.8754} \dots\dots (5)$$

ซึ่งเมื่อนำค่า G_s และ U_g ที่ใช้ในการทดลองมาแทนค่าในสมการนี้เพื่อคำนวณหาสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านโรเซอร์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 เป็นการเปรียบเทียบค่าของสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (5) จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง ± 20%



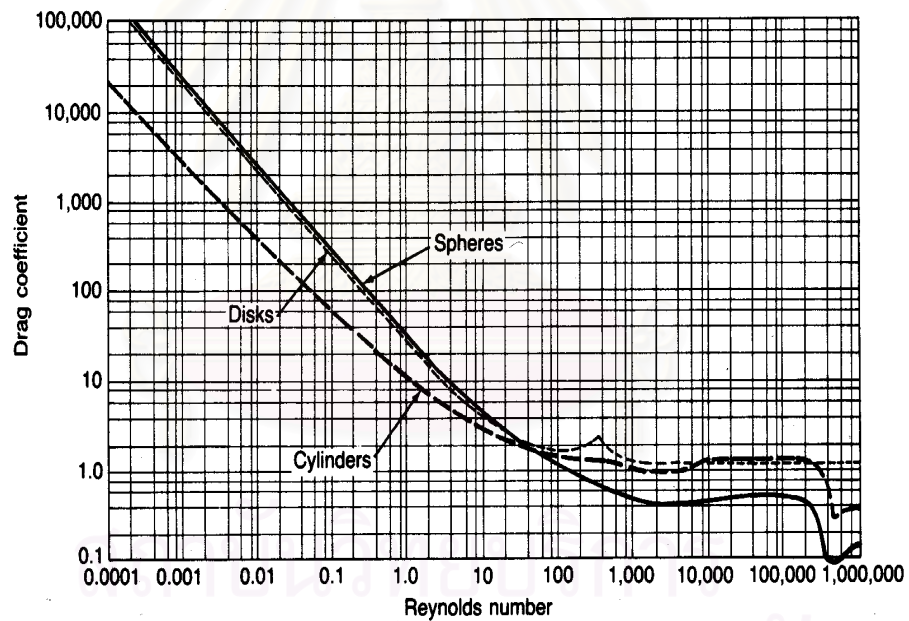
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าของสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและจากการสมการความสัมพันธ์

4.1.2 ทRAYกับเกลบ

ในการทดลองใช้สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบในอัตราส่วนที่เท่ากันโดยปริมาตร ความหนาแน่นของเกลบมีค่าใกล้เคียงกับของซีลื้อย ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ดังนั้นภาวะในการทดลองจึงควรใกล้เคียงกัน ความเร็วอากาศที่ใช้สำหรับทรายกับเกลบระหว่าง 4.8 – 6.2 เมตรต่อวินาที และอัตราการไหลป้อนกลับของแข็งระหว่าง 0.8-18 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที เมื่อเปรียบเทียบความเร็วต่ำสุดที่ทำให้ช่วงล่างของโรเตอร์ (10 เซนติเมตรเหนือตัวกระจายอากาศ) เป็นเบดหนาแน่นระหว่างซีลื้อยกับเกลบ พบว่าความเร็วต่ำสุดที่สามารถทำให้ซีลื้อยอยู่ในเบดหนาแน่นได้คือ 4.2 เมตรต่อวินาที ซึ่งความเร็วนี้สามารถทำให้อัตราการป้อนกลับของแข็งเป็น 5.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที แต่ในการทดลองของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบ ความเร็วของอากาศต่ำสุดที่สามารถทำให้ของแข็งไหลย้อนกลับมาทางด้านโรเตอร์เกิดฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนได้เท่ากับ 4.8 เมตรต่อวินาที ซึ่งอัตราการไหลป้อนกลับของทรายและเกลบที่สามารถวัดได้ที่ความเร็วนี้เพียง 0.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที เหตุที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากรูปทรงของซีลื้อยทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน ซีลื้อยมีรูปทรงค่อนข้างเป็นทรงกลม ในขณะที่เกลบมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล หรือ Drag Force ที่กระทำต่อซีลื้อยทั้งสองจึงไม่เท่ากัน ดังสมการที่ 6 โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล จากรูปที่ 4.1

ของแข็ง	ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
ทราย	2312.92
ซีลี้อย	1583.43
เกลบ	1484.59
ชานอ้อย	630.95
ทรายผสมซีลี้อย	2262.78
ทรายผสมเกลบ	2118.81
ทรายผสมชานอ้อย	2106.43

ตาราง ที่ 4.1 ความหนาแน่นของสารป้อนแต่ละชนิด

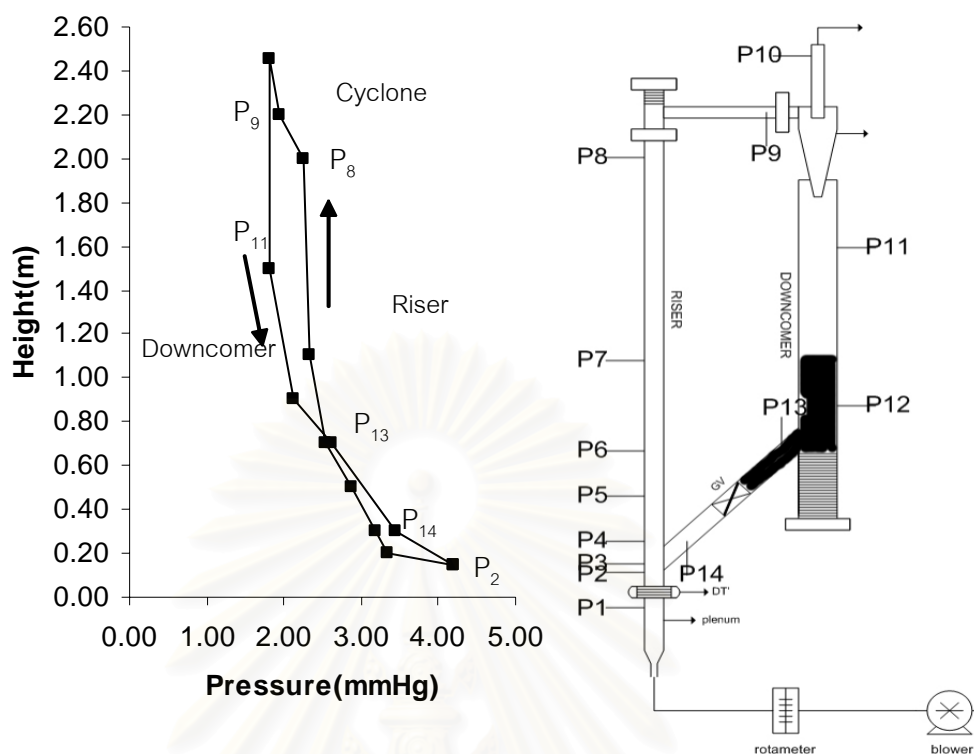


รูปที่ 4.15 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล ของแข็งรูปทรงกลม, แผ่น และ ทรงกระบอก

Cooper & Alley (1994)

$$F_{drag} = \frac{1}{2} V_r^2 A_c C_D \dots\dots\dots (6)$$

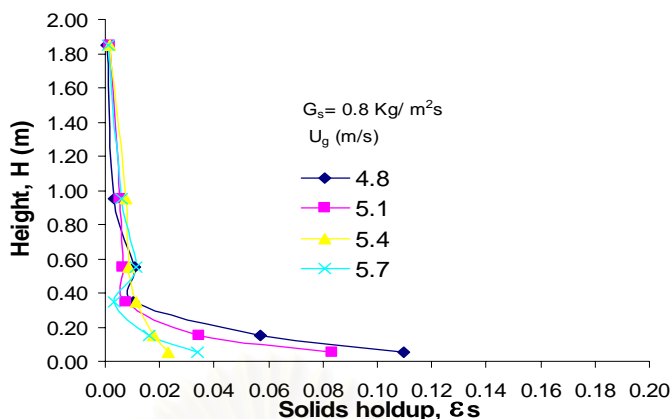
- เมื่อ F_{drag} คือ แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล
- V_r คือ ความเร็วของไหล
- A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแข็ง
- C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเนื่องจากการไหล



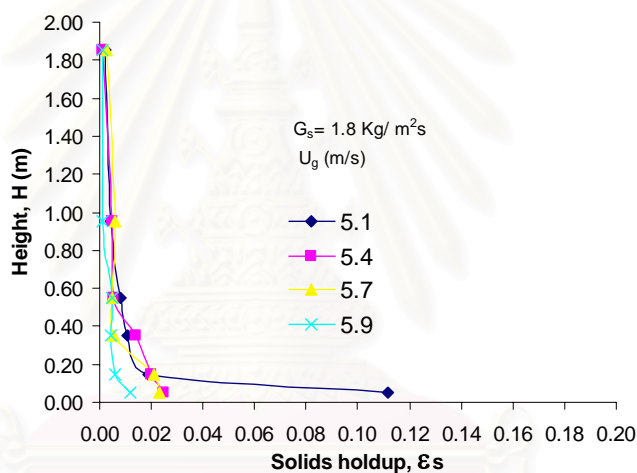
รูปที่ 4.16 วงจรความดันของเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนเมื่อสารป้อนผสมเป็นทรายกับเกลบ ที่ความเร็วอากาศ 4.8 เมตรต่อวินาที อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 0.8 กิโลกรัมต่อตาราง เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.16 แสดงวงจรความดันรวมของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบ ซึ่งพบว่าในด้านไรเซอร์ความดันจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับของทรายกับซีลี้อยู่แต่จะเห็นว่าผลต่างความดันของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบน้อยกว่าของผสมทรายกับซีลี้อยู่ ซึ่งขัดแย้งกับกรณีที่อธิบายโดย Drag Coefficient ที่เป็นเช่นนี้เพราะอัตราการไหลป้อนกลับของทรายกับซีลี้อยู่ในรูป 4.1 ($G_s = 5.5$ กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที) สูงกว่าของระบบทรายกับเกลบในรูปที่ 4.16 ($G_s = 0.8$ กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที) ประมาณ $5.5/0.8 \sim 7$ เท่า จึงทำให้ค่าความดันของระบบของทรายกับซีลี้อยู่มีค่าสูงกว่าความดันของระบบของทรายกับเกลบ

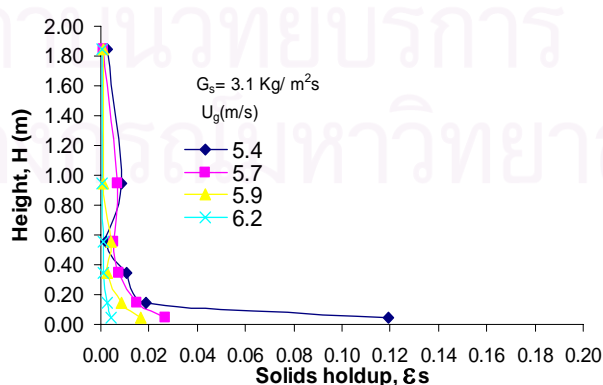
จากรูปที่ 4.17 พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันกับผลการทดลองของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยู่ นั่นคือสัดส่วนของแข็งมีค่าลดลงตามความสูงของเซอร์ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งเป็น 1.8, 3.1, 12.9 และ 18.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งและความสูงมีแนวโน้มเดียวกัน ดังแสดงในรูป 4.18 - 4.21 ตามลำดับ



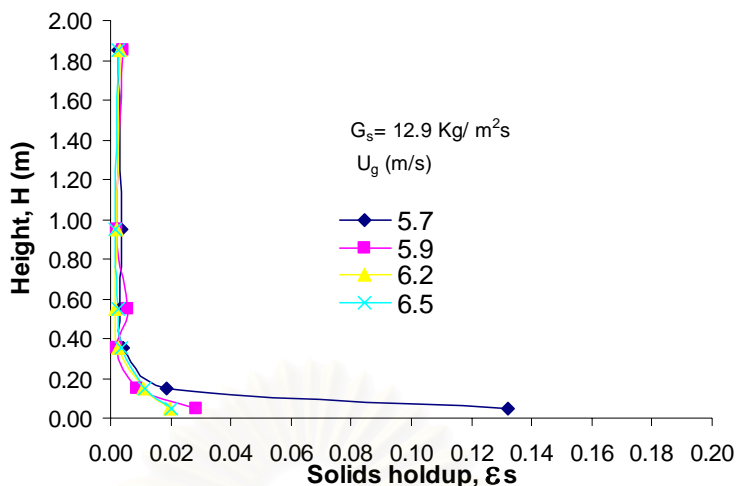
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 0.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที



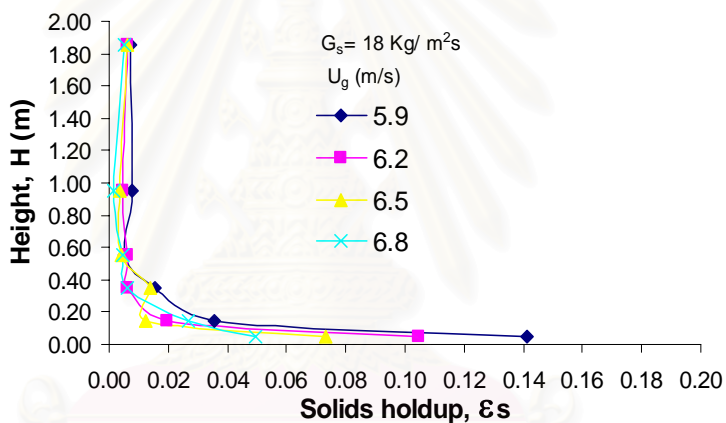
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 1.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 3.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

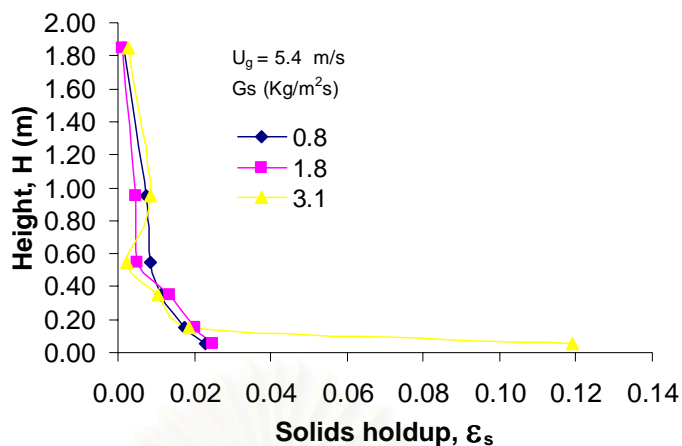


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับแคลไซต์ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 12.9 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

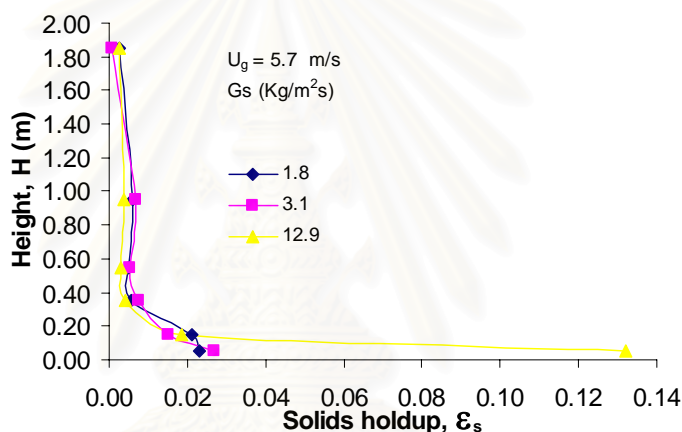


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับแคลไซต์ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง 18 กิโลกรัมต่อตารางเมตรวินาที

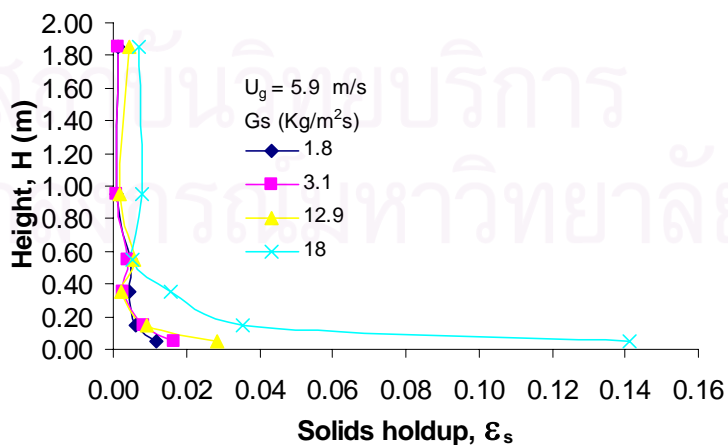
เมื่อกำหนดให้ความเร็วของอากาศคงที่ที่ 5.4, 5.7 และ 5.9 เมตรต่อวินาที โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.22 - 4.24 พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันกับสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยู่ ดังอธิบายในรูปที่ 4.7-4.9



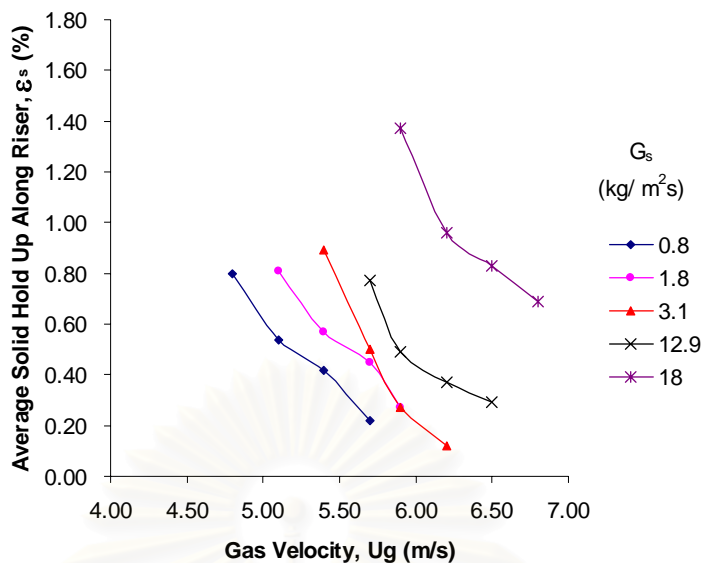
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ 5.4 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ 5.7 เมตรต่อวินาที

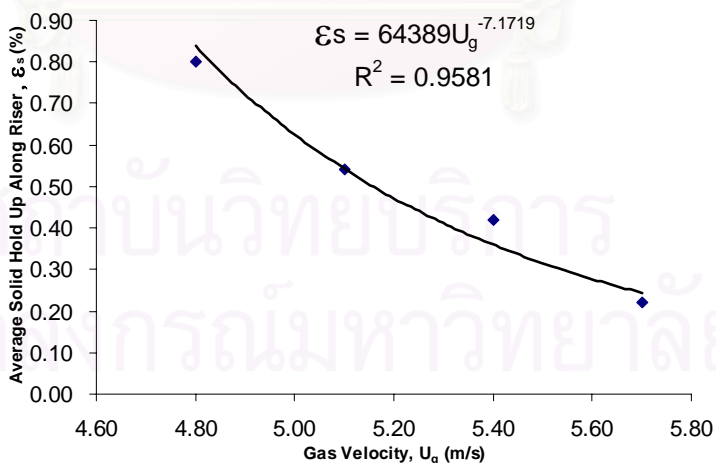


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของโรเตอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับเกลบที่ความเร็วของอากาศเท่ากับ 5.9 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านไรเซอร์ที่ค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งต่างกัน

จากกราฟรูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์ที่อัตราการไหลป้อนกลับต่าง ๆ กัน พบว่าความเร็วอากาศที่เพิ่มขึ้นทำให้สัดส่วนของแข็งเฉลี่ยลดลง แต่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งที่เพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนของแข็งเฉลี่ยสูงขึ้น



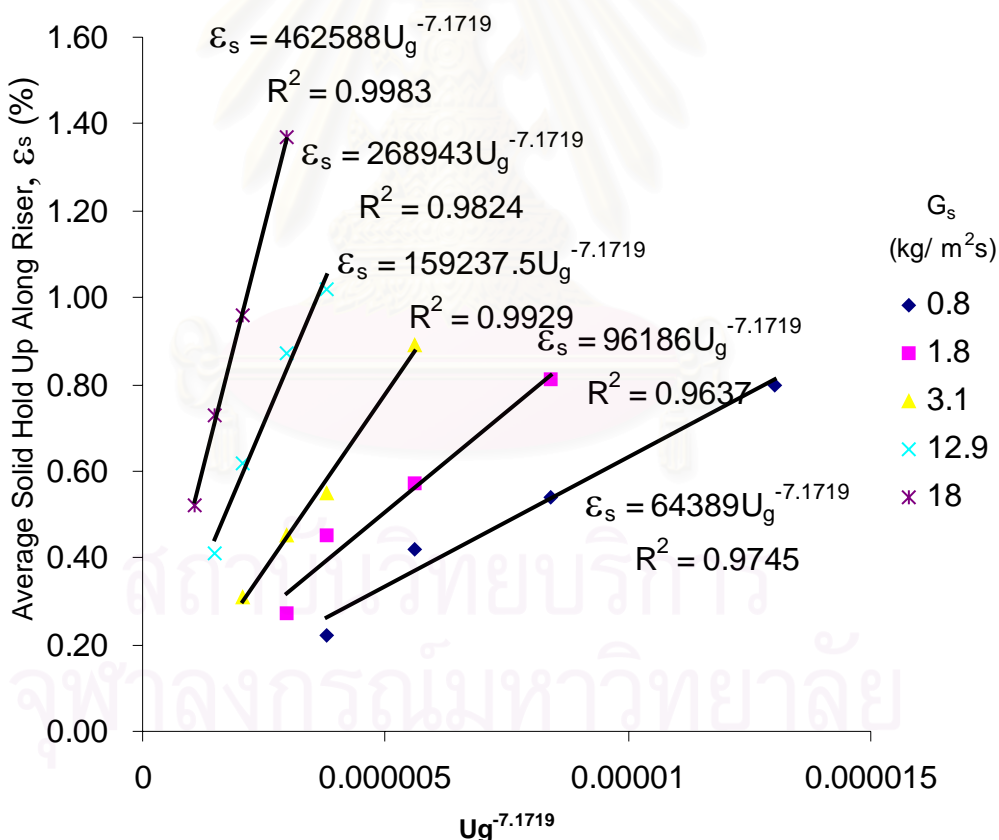
รูปที่ 4.26 ผลของความเร็วอากาศที่มีต่อสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านไรเซอร์ที่อัตราการไหลป้อนกลับของแข็ง 0.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที

จากกราฟรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งน้อยที่สุดเท่ากับ 0.8 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์ ดังสมการที่ 7

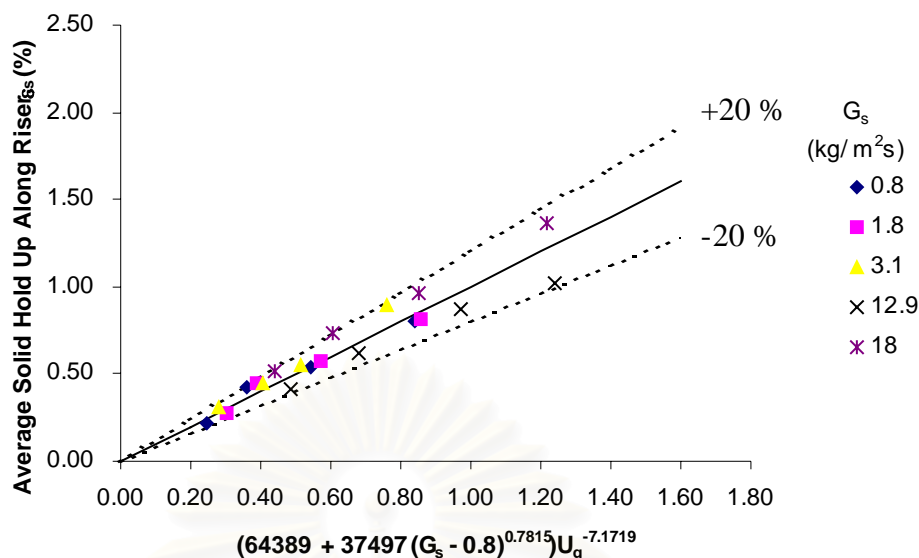
$$\epsilon_s = 64389U_g^{-7.1719} \dots\dots\dots (7)$$

เมื่อนำสมการนี้ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศและสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์ที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งค่าต่างๆ ในรูปที่ 4.27 จะเห็นว่าความชันของสมการอยู่ระหว่าง 64389 – 462588 ที่อัตราการไหลป้อนกลับในช่วง 0.8 – 18 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที จากนั้นนำความชันมาสร้างสมการเพื่อหาผลของความเร็วอากาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งที่มีต่อสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านไรเซอร์ ได้ดังสมการที่ 8

$$\epsilon_{s, \text{ทราย+แกลบ}} = \{64,389+37,497 (G_s - 0.8)^{0.7815}\} U_g^{-7.1719} \dots\dots (8)$$



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของความเร็วอากาศกับสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยด้านไรเซอร์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง



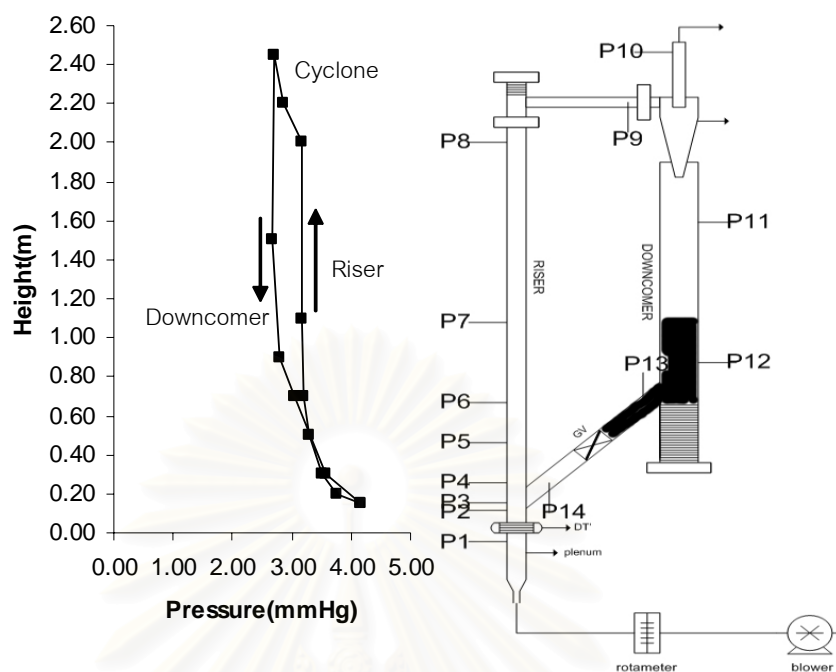
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับผลที่ได้จากสมการความสัมพันธ์

รูปที่ 4.28 เป็นการเปรียบเทียบค่าของสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (8) พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 20\%$

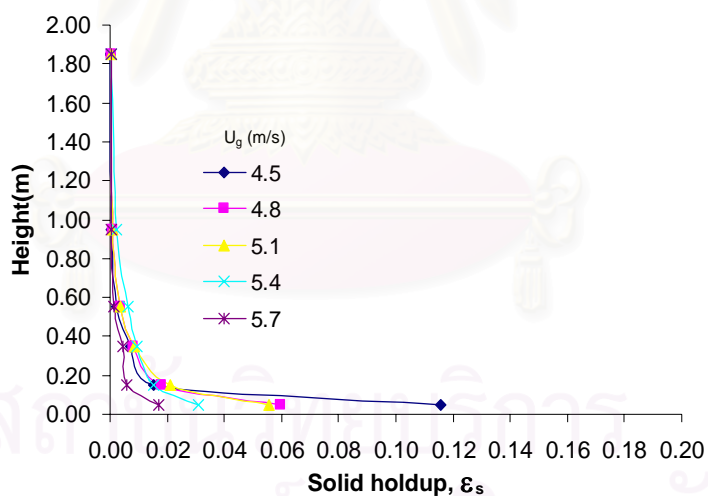
4.1.3 ทRAYกับชานอ้อย

ชานอ้อยที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นเส้นใยรูปทรงกระบอก เกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เมื่อผสมกับทรายในปริมาณที่เท่ากัน พบว่าการไหลป้อนกลับสู่ด้านไรเซอร์ทำได้ยาก เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศให้มากขึ้นและเพิ่มพื้นที่ในการไหลให้มากขึ้นโดยการเปิดเกตวาล์ว สารป้อนผสมทรายและชานอ้อยสามารถไหลเข้าสู่ด้านไรเซอร์ได้เพียงระยะเวลาสั้น ๆ และหยุดลงในที่สุด ระหว่างการทดลองได้สังเกตเห็นว่าชานอ้อยจะซ้อนกันเป็นชั้นวางแห ทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากแรงเสียดทานของผนังท่อกับชานอ้อย เหตุผลอีกประการหนึ่งอาจเนื่องมาจากความหนาแน่นของชานอ้อยมีน้อยมาก เมื่อความเร็วของอากาศในส่วนของไรเซอร์เพิ่มมากขึ้น อากาศส่วนหนึ่งจะไหลเข้าไปส่วนทางกับการไหลของสารป้อนผสม ทำให้สารป้อนผสมไม่สามารถเอาชนะแรงต้านอากาศได้ จึงไม่เกิดการหมุนเวียนในระบบ

ดังนั้นในการทดลองส่วนนี้จึงทำการทดลองเฉพาะด้านไรเซอร์ โดยศึกษาผลของความเร็วอากาศที่มีต่อความดันและสัดส่วนของแข็งเท่านั้นโดยจะวัดความดันของทั้งระบบด้วยเพื่อนำไปเขียนวงจรความดัน ความเร็วของอากาศที่ใช้อยู่ในช่วง 4.2-5.4 เมตรต่อวินาที รูปที่ 4.29 แสดงวงจรความดันรวมของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับชานอ้อย ซึ่งพบว่าในด้านไรเซอร์ความดันจะลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับของทรายกับซีลี้อยและทรายกับแคลบ



รูปที่ 4.29 วงจรความดันของเครื่องฟลูอิดไรซ์เบดเมื่อสารป้อนผสมเป็นทรายกับขาน้อยที่ความเร็วอากาศ 4.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์: สารป้อนผสมระหว่างทรายกับขาน้อย

รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของแข็งกับความสูงของไรเซอร์ ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขาน้อยในฟลูอิดไรซ์เบดที่ความเร็วต่าง ๆ กัน พบว่า สัดส่วนของแข็งมีค่าลดลงตามความสูง เช่นเดียวกับสารป้อนผสมทั้งสองชนิดข้างต้น

4.2 ผลของความเร็ของอากาศที่มีต่อความเร็ของสารป้อนผสม

จากข้อมูลการทดลองที่ใช้โปรแกรม Image Pro Plus V.4.5.1 วัดระยะทางการเคลื่อนที่ของของแข็งจากภาพที่บันทึกได้จากกล้อง CCD และนำมาใช้ในการคำนวณหาความเร็ของทรายและสารป้อนผสมระหว่างทรายกับชีวมวลที่ตำแหน่งต่างๆตามความสูงของโรเตอร์

โดยทั่วไปแล้วความเร็ของของแข็งจะเป็นฟังก์ชันขึ้นกับค่าความหนาแน่นของของแข็งและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของของแข็งเองด้วยแต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ทรายที่มีขนาด 337.5 ไมโครเมตร ความหนาแน่น 2312.92 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเพียงค่าเดียวจึงไม่นำผลของตัวแปรทั้ง 2 มาอธิบาย

ผลของความเร็อากาศที่มีต่อความเร็ของทรายเพียงอย่างเดียวแสดงในรูปที่ 4.31 โดยความเร็อากาศเป็น 4.2, 4.9 และ 5.7 เมตรต่อวินาที ตามลำดับพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็ของอากาศจะทำให้ทรายมีความเร็มากขึ้น ความเร็ของทรายจะค่อยๆลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zevenhoven R. et al. (1999)

การคำนวณหาความเร็ของแข็งในแนวแกน ใช้สมการของ Zhu J.X. et al. (2001)

$$U_s = \frac{G_s}{\rho_s \varepsilon_s} \dots\dots\dots (9)$$

โดยที่ U_s คือ ความเร็ของแข็ง

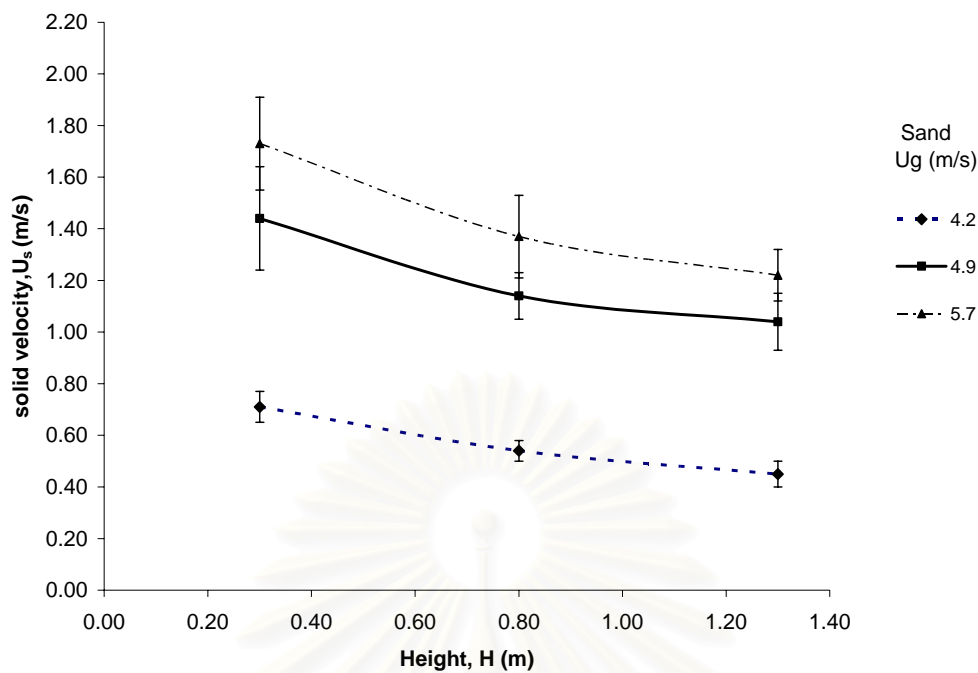
G_s คือ อัตราการไหลป้อนกลับของแข็ง

ρ_s คือ ความหนาแน่นของแข็ง

ε_s คือ สัดส่วนช่องว่างของแข็ง

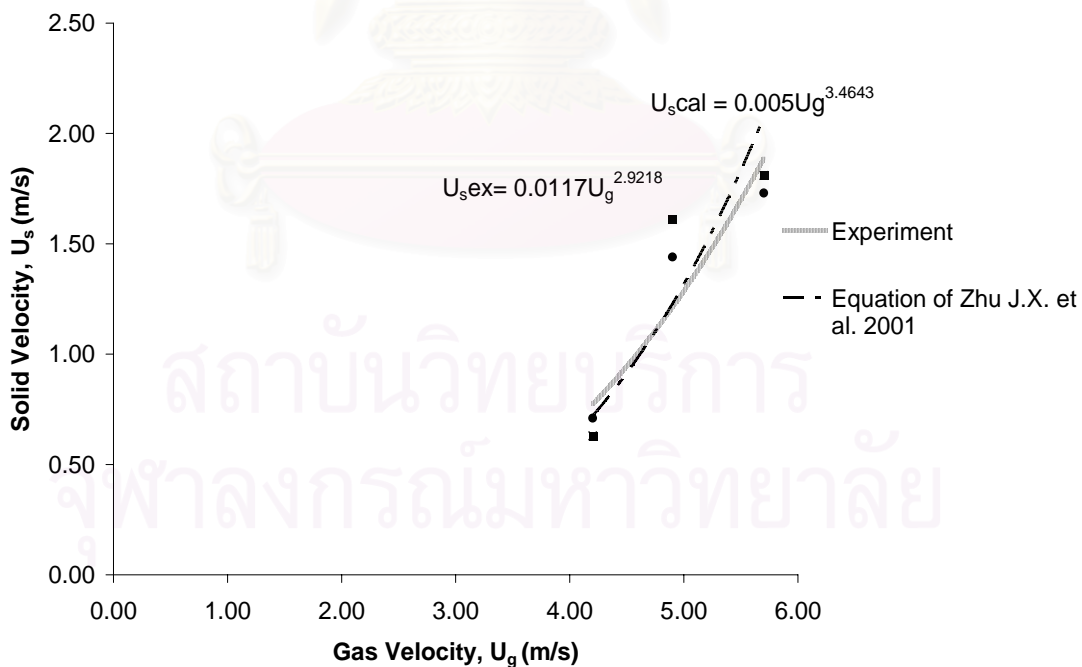
ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในสมการ คือ อัตราการไหลป้อนกลับของแข็ง ความหนาแน่นของแข็ง และสัดส่วนช่องว่างของแข็ง สามารถหาได้จากรูปที่ 4.31 ตารางที่ 4.1 และภาคผนวก ข ตาราง ข1 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ของความสูงของโรเตอร์กับความเร็วของแข็งที่ความเร็วอากาศต่างกัน:

ทราย



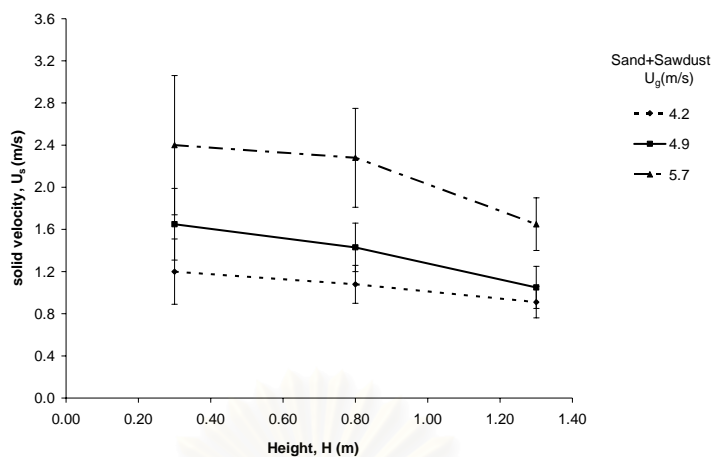
รูปที่ 4.32 ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของความสูงของโรเตอร์กับความเร็วของแข็งจากการทดลองกับการคำนวณจากสมการของ Zhu J.X. et al. (2001): ทราย

ลองกับการคำนวณจากสมการของ Zhu J.X. et al. (2001): ทราย

จากรูปที่ 4.32 เปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยของแข็งจากการทดลองกับที่คำนวณได้จากสมการที่ 9 ที่ความสูง 30 เซนติเมตรเหนือตัวกระจายอากาศ จากการทดลองโดยเปลี่ยนความเร็วอากาศ 4.2, 4.9 และ 5.7 เมตรต่อวินาที ได้ความเร็วเฉลี่ยของทรายเท่ากับ 0.71, 1.44 และ 1.73 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ และค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการของ Zhu J.X. et al. (2001) เท่ากับ 0.63, 1.61 และ 1.81 เมตรต่อวินาที จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณใกล้เคียงกัน (ค่าความคลาดเคลื่อน 12, 10 และ 4 % ตามลำดับ) ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าค่าความเร็วของแข็งที่ได้จากการทดลองโดยคำนวณจากการหาความยาวของเส้นการเคลื่อนที่ของของแข็งในภาพที่บันทึกได้จากกล้อง CCD ร่วมกับโปรแกรม Image Pro Plus สามารถเชื่อถือได้

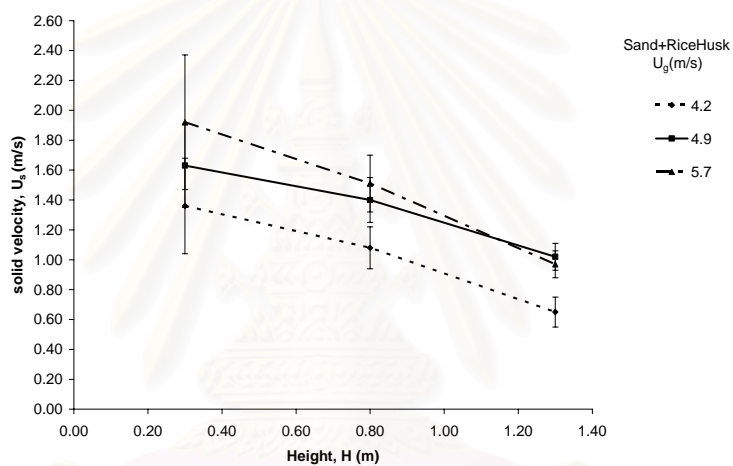
เมื่อเปลี่ยนของแข็งเป็นสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์แต่ละชนิดดังรูป 4.33 - 4.35 ก็มีแนวโน้มเดียวกันคือที่ตำแหน่งความสูงเดียวกันเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มสูงขึ้นความเร็วของแข็งก็จะเพิ่มสูงขึ้นด้วย ที่ความเร็วของอากาศค่าเดียวกันสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์จะมีค่าความเร็วของแข็งเฉลี่ยสูงสุด ซึ่งจากผลงานวิจัยของ Mastellone M.L. และ Arena U. (1999) ของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงกว่าจะมีความเร็วต่ำกว่าดังนั้นของผสมที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าจึงควรที่จะมีความเร็วของแข็งที่สูงกว่าแต่ผลการทดลองเป็นสารป้อนผสมที่มีความหนาแน่นสูงที่สุดกลับมีค่าความเร็วของแข็งสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากรูปร่างของแข็งของซีเมนต์แต่ละชนิดแตกต่างกันคือของซีเมนต์จะค่อนข้างเป็นทรงกลม แกลบจะเป็นแผ่นบางๆ และชานอ้อยจะเป็นแบบเส้นใยเนื่องจากรูปทรงของอนุภาคมีผลต่อความเร็วของของแข็งโดยพิจารณาได้จาก Drag Coefficient ของรูปทรงของอนุภาคแต่ละชนิดจากรูปที่ 4.15 และจากสมการที่ 6 ได้ว่าสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์มีรูปทรงเป็นแบบทรงกลมถูกแรงเสียดทานเนื่องจากการไหล (Drag Force) น้อยที่สุดจึงมีค่าความเร็วของแข็งสูงสุดและสารป้อนผสมระหว่างทรายกับชานอ้อยซึ่งชานอ้อยมีรูปทรงเป็นแบบทรงกระบอกจึงถูกแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลสูงที่สุดส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับชานอ้อยต่ำที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



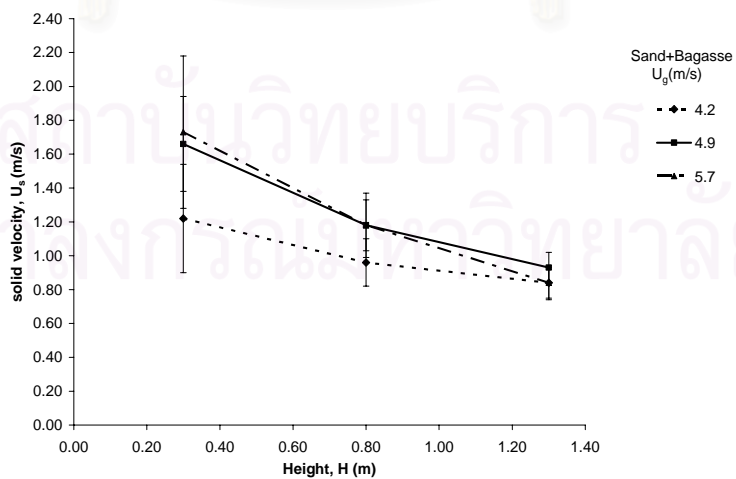
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ของความสูงของโรเตอร์กับความเร็วของแข็งที่ความเร็วอากาศต่างกัน:

ทรายผสมขี้เลื่อย



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของความสูงของโรเตอร์กับความเร็วของแข็งที่ความเร็วอากาศต่างกัน:

ทรายผสมแกลบ

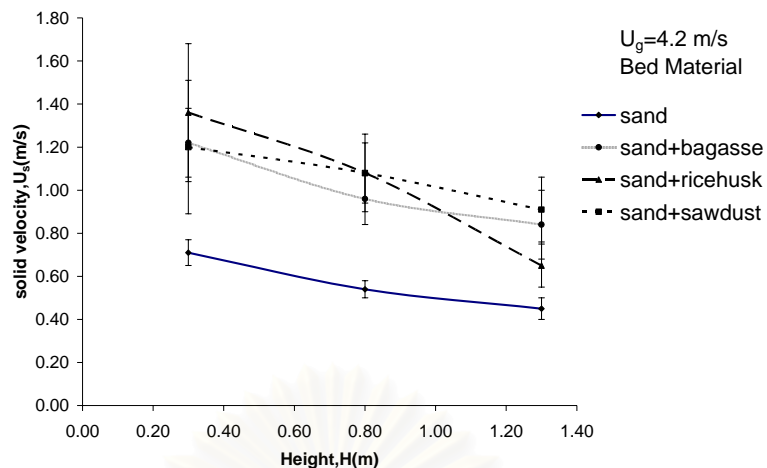


รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ของความสูงของโรเตอร์กับความเร็วของแข็งที่ความเร็วอากาศต่างกัน:

ทรายผสมขาน้อย

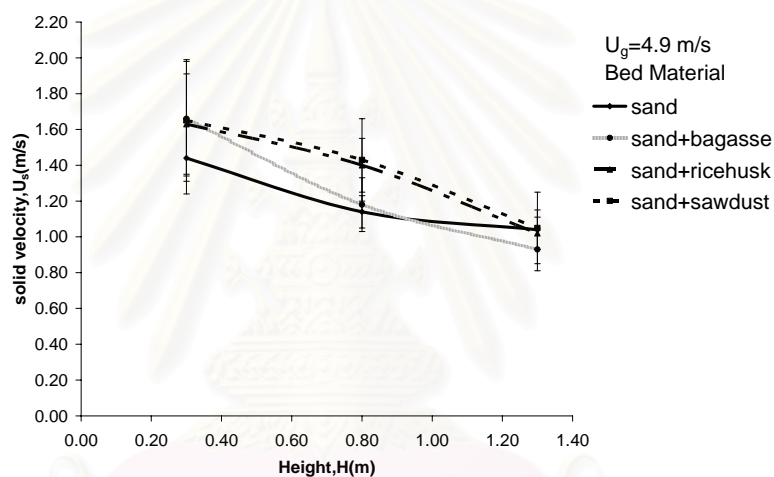
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแข็งที่คำนวณได้กับความสูง ณ ตำแหน่งต่างๆของไรเซออร์ของสารป้อนผสมแต่ละชนิดดังแสดงในรูป 4.36 เมื่ออัตราเร็วของอากาศคงที่เท่ากับ 4.2 เมตรต่อวินาที พบว่าความเร็วของทรายและสารป้อนผสมลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากอากาศที่เป็นตัวกลางทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของแข็ง เกิดการสูญเสียความเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ผ่านชั้นของแข็ง ทำให้ความเร็วของอากาศค่อยๆลดลง ส่งผลให้ของแข็งเคลื่อนที่ช้าลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับชีวมวลทุกชนิดมีค่าสูงกว่าความเร็วของแข็งเมื่อในระบบมีทรายเพียงอย่างเดียว เนื่องจากสารป้อนผสมมีความหนาแน่นน้อยกว่าดังแสดงในตารางที่ 4.1 จึงทำให้ความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมมีค่ามากกว่าความเร็วเฉลี่ยของแข็งเมื่อระบบประกอบด้วยทรายเพียงอย่างเดียว ดังนั้นบริเวณด้านบนของไรเซออร์ของแข็งจึงเคลื่อนที่ช้ากว่าด้านล่าง และของแข็งที่มีความหนาแน่นต่ำกว่ามีความเร็วของแข็งสูงกว่าของแข็งที่มีความหนาแน่นมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Zevenhoven R.(1999) จากผลการทดลองที่ได้พบว่า เมื่อของแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น ความเร็วของของแข็งจะลดลง และเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น ความเร็วของของแข็งจะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน และสอดคล้องกับการศึกษาผลของขนาดของแข็งและความหนาแน่นของแข็งของ Mastellone M.L. และ Arena U.(1999) พบว่าของแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่าและมีความหนาแน่นสูงกว่าจะเคลื่อนที่ที่อยู่บริเวณด้านล่างของไรเซออร์เป็นส่วนใหญ่และจะมีความเร็วของแข็งน้อยกว่าของแข็งขนาดเล็กและความหนาแน่นต่ำ

รูป 4.37 และ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับความเร็วของแข็ง เช่นเดียวกับรูป 4.36 ที่ความเร็วของอากาศมากขึ้นผลการทดลองในรูปที่ 4.37 ความแตกต่างระหว่างความเร็วของสารป้อนมีค่ามากขึ้น และในรูปที่ 4.38 สารป้อนผสมระหว่างทรายกับชีวมวลมีความเร็วเฉลี่ยสูงสุดพบว่ามีความเร็วเฉลี่ยของทรายและชีวมวลจะยังคงมีความเร็วที่สูงกว่าความเร็วของทรายตลอดช่วงความสูงของไรเซออร์ แต่เนื่องจากในการหาความเร็วเฉลี่ยนั้นผลที่ได้นั้นเป็นการเฉลี่ยความยาวของเส้นที่ของแข็งเคลื่อนที่ของทั้งทรายและชีวมวลเองจึงทำให้ความเร็วเฉลี่ยของแข็งอาจจะใกล้เคียงกันได้ที่ความเร็วอากาศสูงขึ้น



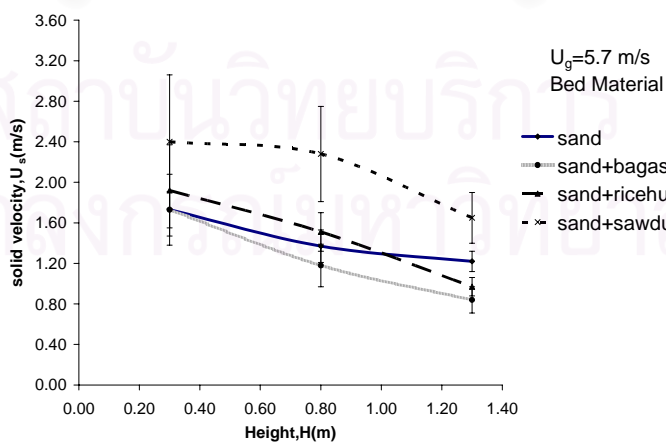
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ของความสูงของโรเตอร์กับความเร็วของแข็งที่มีสารป้อนต่างชนิดกันที่

ความเร็วอากาศ 4.2 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ของความสูงของโรเตอร์กับความเร็วของแข็งที่มีสารป้อนต่างชนิดกันที่

ความเร็วอากาศ 4.9 เมตรต่อวินาที

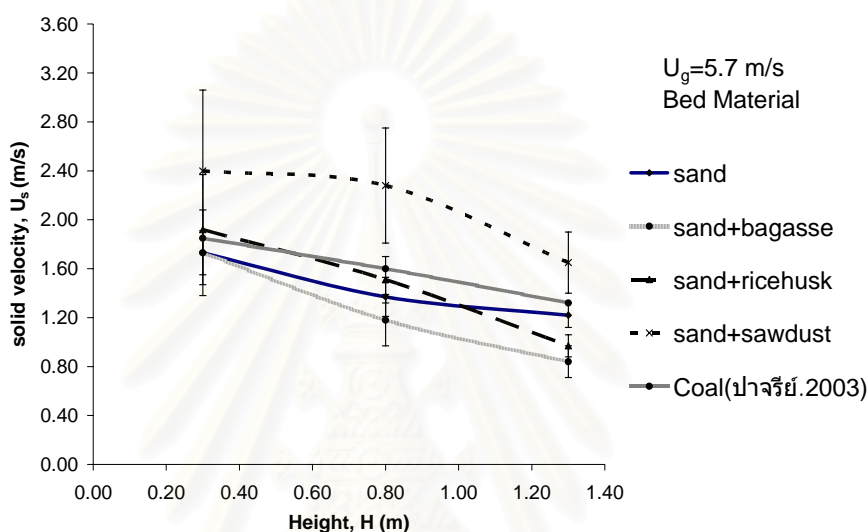


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ของความสูงของโรเตอร์กับความเร็วของแข็งที่มีสารป้อนต่างชนิดกันที่

ความเร็วอากาศ 5.7 เมตรต่อวินาที

4.3 เปรียบเทียบผลของสารป้อนในด้านไรเซอร์

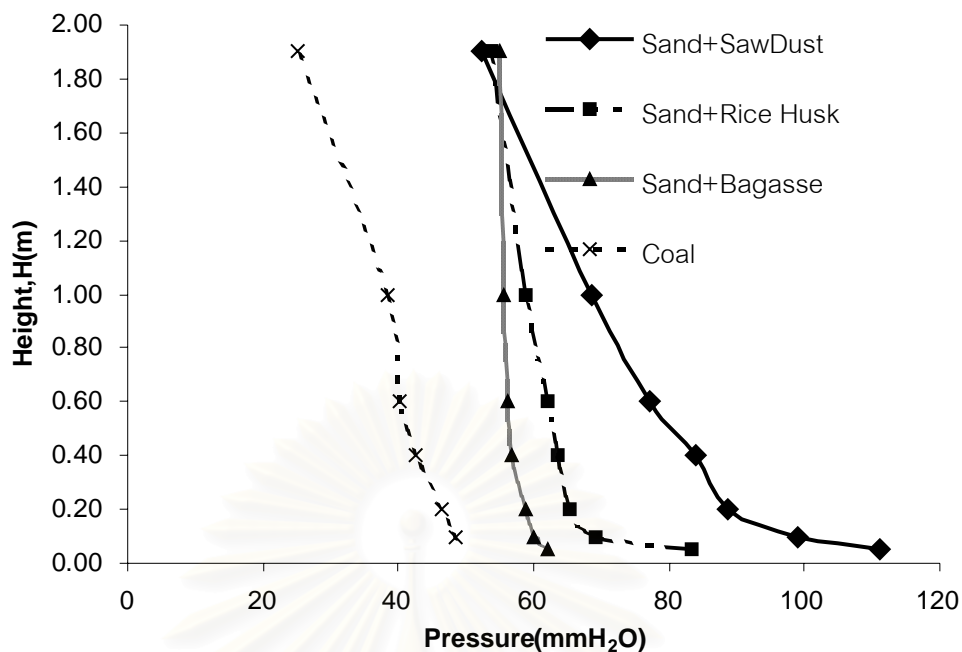
ในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนที่ใช้ในการเผาไหม้ชีวมวล โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย ถ่านหินซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิง ทราายทำหน้าที่เป็นตัวกลางให้ความร้อน และชีวมวล ซึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิง ร่วมกับถ่านหิน ปาจารย์(2003) ได้ทำการทดลองหาความเร็วเฉลี่ยของถ่านหินในเครื่องฟลูอิดไดซ์เบดแบบหมุนเวียนโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องความเร็วสูงเมื่อนำข้อมูลความเร็วของของแข็งทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันจะให้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ของความเร็วของไรเซอร์กับความสูงของเตียงที่มีสารป้อนต่างชนิดกันที่ความเร็วอากาศคงที่ 5.7 เมตรต่อวินาที

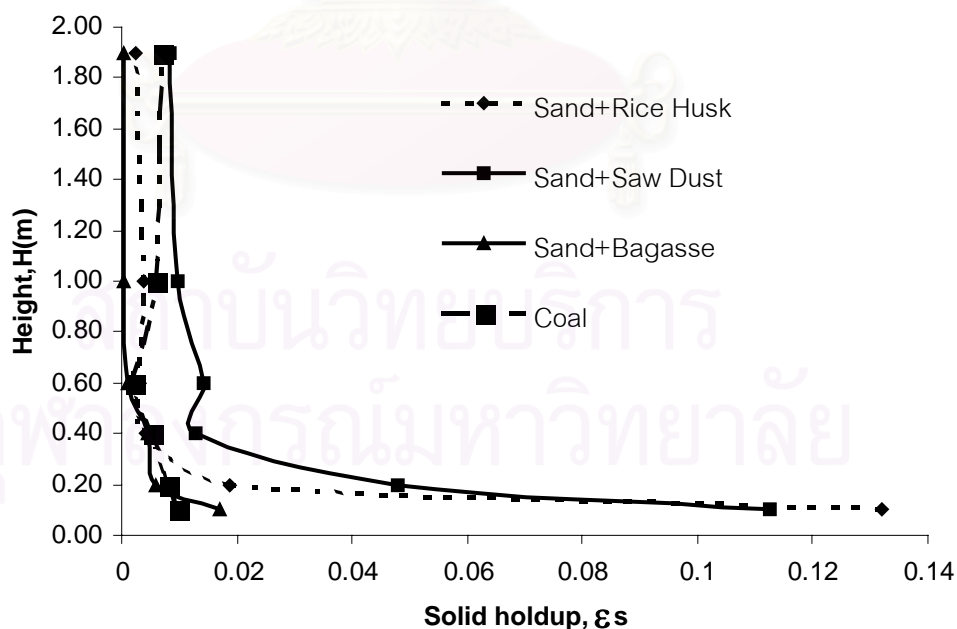
รูปที่ 4.39 แสดงความเร็วของสารป้อนชนิดต่าง ๆ คือ ถ่านหิน ทราาย และสารป้อนผสมระหว่างทราายและชีวมวลที่ความเร็วอากาศคงที่ที่ 5.7 เมตรต่อวินาทีในไรเซอร์ พบว่าความเร็วเฉลี่ยของถ่านหินสูงกว่าทราายเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยกว่า และพบว่าความเร็วเฉลี่ยของถ่านหินก็สูงกว่าของสารป้อนผสมระหว่างทราายกับแกลบและทราายกับชานอ้อย แต่ความเร็วเฉลี่ยน้อยกว่าสารป้อนผสมระหว่างทราายกับขี้เลื่อย ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากขนาดของถ่านหินที่อยู่ในช่วง 250 – 1180 ไมโครเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเป็น 400 ไมโครเมตร ที่สูงกว่าของชีวมวลทำให้ช่วงความเร็วของถ่านหินกว้างกว่าความเร็วเฉลี่ยของถ่านหินจึงน้อยกว่าความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมระหว่างทราายกับขี้เลื่อยได้

ในด้านความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความสูงทางด้านไรเซอร์ของสารป้อนชนิดต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.40 ได้ว่าความดันในส่วนของถ่านหินแต่ละตำแหน่งน้อยกว่าของสารป้อนชนิดอื่นเนื่องจากว่าปริมาตรถ่านหินในไรเซอร์มีน้อยกว่าทั้งความเร็วอากาศที่ใช้ก็สูงถึง 5.7 เมตรต่อวินาที จึงส่งผลให้ด้านไรเซอร์เป็นเบดแบบเบาบางตลอดทั้งไรเซอร์



รูปที่ 4.40 ผลของความดันสำหรับสารป้อนชนิดต่างๆที่ความเร็วอากาศคงที่ 5.7 เมตรต่อวินาที

เมื่อนำข้อมูลความดันมาคำนวณหาสัดส่วนของแข็งในด้านโรเตอร์ ดังสมการที่ 2 จะได้รูปที่ 4.41 ซึ่งพบว่าสัดส่วนของแข็งของถ่านหินบริเวณด้านล่างโรเตอร์มีการกระจายตัวอยู่น้อยกว่าสารป้อนชนิดอื่น



รูปที่ 4.41 สัดส่วนของแข็งสำหรับสารป้อนชนิดต่างๆที่ความเร็วอากาศคงที่ 5.7 เมตรต่อวินาที

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ ใช้สารป้อนผสมระหว่างทรายและซีเมนต์ 3 ชนิดคือซีเมนต์ ละเอียด แกลบ และชานอ้อย โดยตัวแปรที่ศึกษาคือความเร็วอากาศ และอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็ง แล้วบันทึกภาพการเคลื่อนที่ของสารป้อนโดยใช้กล้อง CCD และเปรียบเทียบผลของสารป้อนอื่นในงานวิจัยที่ผ่านมา กับสารป้อนผสมที่ใช้ในการทดลองนี้ด้วยด้วย ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อความเร็วอากาศและอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งคงที่ สัดส่วนของแข็งภายในโรเตอร์ลดลงตามความสูง และเมื่อเพิ่มความเร็วอากาศโดยที่อัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งคงที่ ทำให้สัดส่วนของแข็งลดลงเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากปริมาณของแข็งเท่าเดิมแต่ปริมาณอากาศมีมากขึ้น
2. เมื่อเพิ่มอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งโดยที่ความเร็วอากาศคงที่ สัดส่วนของแข็งภายในโรเตอร์เพิ่มขึ้นโดยพบว่าความสูงของเบดหนาแน่นทางด้านล่างของโรเตอร์สูงขึ้น
3. สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์สามารถเกิดการหมุนเวียน(Circulated) ในโรเตอร์และท่อป้อนกลับได้ดีกว่าสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบจึงทำให้อัตราการไหลป้อนกลับสูงกว่า จากกราฟของวงจรรวมความดันจึงพบว่าผลต่างความดันระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์สูงกว่าผลต่างความดันระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบ
4. เนื่องจากชานอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยรูปทรงกระบอกและมีความหนาแน่นต่ำทำให้เกิดการฟลูอิไดซ์ได้ยาก เมื่อผสมกับทรายทำให้ฟลูอิไดซ์ได้ดีขึ้นแต่ไม่สามารถเกิดการหมุนเวียนได้เนื่องจากชานอ้อยจัดเรียงตัวเหมือนร่างแหซ้อนกันแน่นทำให้ยากต่อการเคลื่อนที่
5. สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งต่อสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านโรเตอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ คือ $\bar{\varepsilon}_{\text{ทราย+ซีเมนต์}} = \{4,120.1+236.07(G_s - 5.5)^{1.7829}\} U_g^{-5.8754}$
6. สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งต่อสัดส่วนของแข็งเฉลี่ยตลอดด้านโรเตอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบ คือ $\bar{\varepsilon}_{\text{ทราย+แกลบ}} = \{64,389+37,497 (G_s - 0.8)^{0.7815}\} U_g^{-7.1719}$

7. จากการบันทึกภาพด้วยกล้อง CCD พบว่าเมื่อความเร็วอากาศคงที่ ความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมทุกชนิดลดลงตามความสูงของโรเตอร์ เมื่อเพิ่มความเร็วอากาศทำให้ความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมเพิ่มขึ้น
8. เมื่อความเร็วอากาศคงที่และตำแหน่งความสูงเดียวกัน สารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลีออยมีความเร็วเฉลี่ยสูงกว่าความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนที่เป็นทรายเพียงอย่างเดียว เนื่องจากสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลีออยมีความหนาแน่นของแข็งเฉลี่ยน้อยกว่าของทรายเพียงอย่างเดียว
9. เมื่อความเร็วอากาศคงที่และตำแหน่งความสูงเดียวกันสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลีออยมีความเร็วมากกว่าสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบและทรายกับชานอ้อย เนื่องจากซีลีออยมีรูปร่างเป็นทรงกลม จึงมีแรงต้านอากาศน้อยกว่าแกลบและชานอ้อยที่เป็นแผ่นและทรงกระบอก ตามลำดับ
10. เมื่อเปรียบเทียบความเร็วเฉลี่ยของทรายและถ่านหินที่มีรูปทรงคล้ายคลึงกันคือเป็นทรงกลมเมื่อความเร็วอากาศคงที่พบว่าความเร็วเฉลี่ยของถ่านหินสูงกว่าของทราย เนื่องจากถ่านหินที่ใช้ในการทดลองมีความหนาแน่นน้อยกว่า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. อัตราการไหลป้อนกลับในงานวิจัยนี้มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ เนื่องจากในท่อป้อนกลับเป็นเบตนิ่งสารป้อนผสมอัดตัวกันค่อนข้างแน่นจึงทำให้ไหลย้อนกลับได้ยาก เพื่อเพิ่มอัตราการไหลให้มากขึ้นและลดแรงต้านจากอากาศในโรเตอร์ (Primary Air) ที่ย้อนเข้ามาควรทำให้ท่อป้อนกลับอยู่ในภาวะฟลูอิดไดซ์
2. สารป้อนผสมระหว่างทรายกับชานอ้อยไม่สามารถหมุนเวียนได้จึงควรทดลองเปลี่ยนอัตราส่วนของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับชานอ้อยเป็นอัตราส่วนอื่นเช่น อัตราส่วนระหว่างทรายต่อชานอ้อยเป็น 70 : 30 ซึ่งอาจเกิดการหมุนเวียนได้ดีกว่าที่อัตราส่วน 50 : 50
3. ในการใช้โปรแกรม Image-Pro Plus เพื่อวัดค่าต่างๆควรทำการปรับเทียบ (Calibration) ทุกครั้งก่อนทำการวัดและควรใช้ค่านั้นทุกการทดลอง
4. การถ่ายภาพโดยใช้กล้อง CCD จะไม่สามารถแยกสีของสารป้อนผสมได้ ดังนั้นถ้าต้องการวัดความเร็วของสารป้อนแต่ละชนิด ควรให้สารป้อนแต่ละชนิดมีรูปทรงเดียวกันและมีขนาดต่างกันประมาณ 2 เท่า เพื่อสามารถดูความหนาของเส้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่บันทึกได้จากกล้อง CCD

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ปราชญ์ ตั้งผดุงรัตน์, อุทกพลศาสตร์ของอนุภาคถ่านหินในเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบหมุนเวียน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546

สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดเซชัน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528

ภาษาอังกฤษ

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.

Basu, P.; and Cheng, L. An analysis of loop seal operations in a circulating fluidized bed. Institution of Chemical Engineers Trans IchemE 78(2000)

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

Cheng, Y., Wei, F., and Yang, G. Inlet and Outlet effects on flow patterns in gas-solid risers. Powder technology 98 (1998): 151-156.

Claus, R. Measuring and calculating solid carry over in a CFB cold flow model for different materials. Powder technology 107(2000): 207 – 211.

Ferschneider, G., and Mege, P. Dilute-solid flow in a riser. Chemical Engineering Journal 87(2002): 41 – 48.

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

Guangwen, X. and Shiqiu, G. Necessary parameters for specifying the hydrodynamics of circulating fluidized bed risers. Powder Technology 137 (2003): 63 – 76.

Heping, Y. and Mridul, G. Gas velocity distribution in a circular circulating fluidized bed riser. Powder Technology 78(1994): 221-229.

Ibsen, C.H., Onofri, F., Solberg, T., Hjertager, B.H., and Tadrist, L. Improved particle image velocimetry measurements in gas-particle flows with a dense wall layer. Measurement Science and Technology 14(2003): 9 – 12.

Kunii, D., and Levenspiel, O. Fluidization Engineering. New York: John Wiley and Sons Inc, 1969.

- Kunii, D., and Levenspiel, O. Circulating fluidized-bed reactors. Chemical Engineering Science 52 (1997): 2471-2482.
- Li, Z.Q., Wu, C.N., Wei, F., and Jin, Y. Experimental study of high-density gas-solids flow in a new coupled circulating fluidized bed. Powder Technology 139(2004): 214 – 220.
- Martin, R., Hideaki, M., and Toshimasa H. Particle motion at the wall of a circulating fluidized bed. Powder Technology 70(1992): 207-214.
- Marzocchella, A., and Arena, U. Hydrodynamics of a circulating fluidized bed operated with different secondary air injection devices. Power Technology 87(1996): 185-191.
- 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.
- Namkung, W., and Kim, S.D. Radial Gas Mixing in Circulating Fluidized Bed. Powder technology 113 (2000): 23 - 29.
- Namkung, W., Kim, S.W., and Kim, S.D. Flow regimes and axial pressure profiles in a circulating fluidized bed. Chemical Engineering Journal 72(1999): 245 – 252.
- National Energy Policy Office (NEPO), Biomass Energy in Asia: A Study on Selected Technologies and Policy Options [Online].1999.Available from: <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS55-06-biomass.html>[2004,June 21]
- National Energy Policy Office(NEPO), Thailand Biomass-Based Power Generation and Cogeneration Within Small Rural Industries [Online].2000.Available from: <http://www.eppo.go.th/encon/Strategy/encon-BV-FinalReport.pdf>[2004,June 21]
- Rasul, M.G., Rudolph, V., and Carsky, M. Physical Properties of bagasse. Fuel 78(1999): 905 – 910.
- Rhodes, M.J. Introduction to Particle technology. John Wiley & Sons, 1998
- Rhodes, M.J., Sollaart, M., and Wang, X. S. Flow structure in a fast fluid bed. Powder Technology 99 (1998): 194 -200.
- Rasul, M.G., and Rudolph, V. Fluidized bed combustion of Australian bagasse. Fuel 79(2000): 123 – 130.

- Shadle, L.J., Monazam, E.R., and Mei, J.S. Circulating fluidized bed operating regimes. 7th Int'l CFB Conference, Niagara Falls, New York. 255 – 262.
- Smolders, K., and Baeyens, J. Overall Solids Movement and Solids Residence Time Distribution in a CFB-riser. Chemical Engineering Science 55(2000): 4104 – 4116.
- Ulrike, L., and Joachim, W. Flow phenomena in the exit zone of a circulating fluidized bed. Chemical Engineering and Processing. 41(2002): 771-783.
- 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.
- Weinell, C. E., Dam-Johansen, K., and Johnsson, J. E. Single-particle behavior in circulating fluidized beds. Powder Technology 92 (1997): 241-252.
- Zevehoven, 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)
- Zhang, H., Huang, W. X., and Zhu, J. X. Gas-solids flow behavior: CFB riser vs. downer. AIChE Journal 47 (2001): 2000-2011.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลการการหาความหนาแน่นบัลด์ และความหนาแน่นของแข็ง(ทราย, ซีลี้อย, แกลบ และ ชานอ้อย)

วิธีการทดลอง

1. เตรียมบีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร 2 ใบ ชั่งและบันทึกน้ำหนักบีกเกอร์
2. ใส่ทรายลงในบีกเกอร์ดังกล่าวให้ได้ระดับ 200 มิลลิลิตร ชั่งและบันทึกน้ำหนัก
3. นำบีกเกอร์ที่บรรจุทรายแล้วมาแทนที่อากาศด้วยน้ำ โดยการเติมน้ำลงไปจนกระทั่งทรายได้ระดับ 200 มิลลิลิตรพอดี และไม่มีฟองอากาศอยู่ภายใน ชั่งและบันทึกน้ำหนัก
4. ทำซ้ำข้อ 1 – 3 โดยเปลี่ยนจากทรายเป็นชีวมวลแต่ละชนิด

ข้อมูลที่ได้จากวิธีการทดลองข้างต้น มีดังนี้

ครั้งที่	น้ำหนัก(กรัม)		
	บีกเกอร์	บีกเกอร์ + ทราย	บีกเกอร์ + ทราย + น้ำ
1	103.06	383.13	462.1
2	113.32	393.67	472.4
ครั้งที่	น้ำหนัก(กรัม)		
	บีกเกอร์	บีกเกอร์ + ซีลี้อย	บีกเกอร์ + ซีลี้อย + น้ำ
1	103.06	166.72	330.21
2	113.32	182.89	335.26
ครั้งที่	น้ำหนัก(กรัม)		
	บีกเกอร์	บีกเกอร์ + แกลบ	บีกเกอร์ + แกลบ + น้ำ
1	103.06	177.86	328.27
2	113.32	188.85	337.18
ครั้งที่	น้ำหนัก(กรัม)		
	บีกเกอร์	บีกเกอร์ + ชานอ้อย	บีกเกอร์+ชานอ้อย + น้ำ
1	103.06	119.13	295.47
2	113.32	127.58	303.17

ครั้งที่	น้ำหนัก(กรัม)		
	ปีกเกอร์	ปีกเกอร์ + ทราย+ซี เลื่อย	ปีกเกอร์ + ทราย+ซี เลื่อย + น้ำ
1	105.24	329.85	430.67
2	116.61	340.12	441.26
ครั้งที่	น้ำหนัก(กรัม)		
	ปีกเกอร์	ปีกเกอร์ + ทราย+ เกลบ	ปีกเกอร์ + ทราย+ เกลบ + น้ำ
1	105.24	320.54	418.97
2	116.61	330.75	429.64
ครั้งที่	น้ำหนัก(กรัม)		
	ปีกเกอร์	ปีกเกอร์ + ทราย+ ชานอ้อย	ปีกเกอร์ + ทราย+ชาน อ้อย + น้ำ
1	105.24	266.02	389.54
2	116.61	270.60	395.05

ตาราง ก.1 ข้อมูลการวิเคราะห์ความหนาแน่นบัลด์ และความหนาแน่นของแข็ง

2. การหาอัตราการใช้กลับของของแข็งเข้าสู่ไรเซอร์

- 2.1 หลังจากการทำการทดลองแต่ละอัตราการใช้กลับของอากาศเสร็จเรียบร้อยแล้ว
- 2.2 เปิดรูที่เจาะทางด้านล่างของท่อป้อนกลับ
- 2.3 ปลดปล่อยของแข็งไหลออกมาใส่ปีกเกอร์พร้อมจับเวลาประมาณ 10 วินาที
- 2.4 นำของแข็งที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก
- 2.5 ทำการวัดแบบเดิมซ้ำ อีกครั้ง

ทราย + ไข่เลื่อย

อัตราการใช้ ไพล	ปีเตอร์	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กรัม)	กิโลกรัมต่อ ตารางเมตร ต่อวินาที	เฉลี่ย
300	1	10.33	51.18	5.45	5.56
	2	10.24	62.46	6.71	
	3	10.21	45.60	4.92	
	4	10.29	48.05	5.14	
320	1	10.04	75.02	8.23	9.08
	2	10.18	85.93	9.29	
	3	10.04	88.84	9.74	
	4	10.09	83.24	9.08	
340	1	10.23	108.27	11.65	11.56
	2	10.06	113.17	12.38	
	3	10.08	107.60	11.75	
	4	10.01	95.20	10.47	
360	1	10.27	142.79	15.30	14.94
	2	10.38	138.49	14.69	
	3	10.00	131.85	14.51	
	4	10.11	140.33	15.28	
380	1	10.35	187.55	19.95	18.76
	2	10.34	179.26	19.08	
	3	10.05	167.47	18.35	
	4	10.10	161.97	17.65	

ตาราง ก.2 อัตราการป้อนกลับของสารป้อนผสมเข้าสู่โรเตอร์ผ่านแอลวาล์วที่อัตราการใช้ไพลค่าต่างๆ
ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับไข่เลื่อย

ทราย + แกลบ

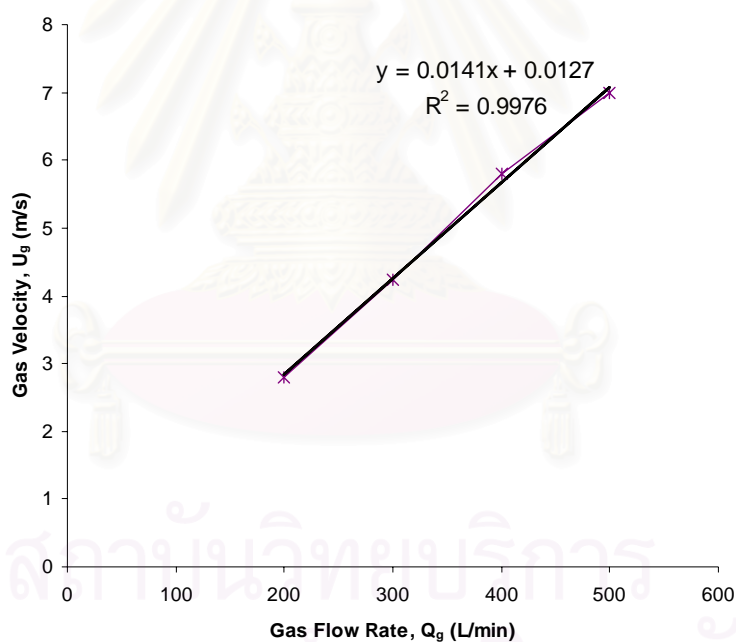
อัตราการใช้ ไหล	ปีเตอร์	เวลา (วินาที)	น้ำหนัก (กรัม)	กิโลกรัมต่อตาราง เมตรต่อ วินาที	เฉลี่ย
340	1	10.34	6.97	0.74	0.79
	2	10.43	8.42	0.89	
	3	10.40	6.15	0.65	
	4	10.36	8.40	0.89	
360	1	10.45	19.78	1.81	1.83
	2	10.26	18.80	1.74	
	3	10.33	20.22	1.95	
	4	10.22	21.89	1.83	
380	1	10.15	30.87	3.07	3.15
	2	10.20	31.81	3.15	
	3	10.31	33.78	3.40	
	4	10.19	32.44	2.97	
400	1	10.05	122.00	13.08	12.9
	2	10.38	125.68	13.05	
	3	10.26	113.24	11.94	
	4	10.26	131.25	13.56	
420	1	10.22	172.28	18.28	18.0
	2	10.07	167.72	18.05	
	3	9.98	164.95	17.98	
	4	10.05	166.58	17.71	

ตาราง ก.3 อัตราการป้อนกลับของของผสมเข้าสู่โรเตอร์ผ่านแอสวาล์วที่อัตราการใช้ไหลค่าต่างๆของ
สารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบ

3. ข้อมูลการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดโรตารีจาก ลิตรต่อนาทีเป็นเมตรต่อวินาที สำหรับใช้ในการทดลองตอนที่ 2 ได้ดังตารางข้างล่างนี้

อัตราการไหลของอากาศ (ลิตรต่อนาที)	ตำแหน่ง	ตำแหน่ง	ตำแหน่ง	ตำแหน่ง	เฉลี่ย
	1	2	3	4	
	(เมตร ต่อ วินาที)				
200	2.83	2.77	2.80	2.81	2.80
300	4.08	4.18	4.31	4.38	4.24
400	5.64	5.80	5.81	5.91	5.79
500	6.96	6.90	7.10	7.01	6.99

ตาราง ก.4 ข้อมูลการทำการเปรียบเทียบของโรตารี



รูปที่ ก1. กราฟผลการทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์วัดอัตราการไหลชนิดโรตารีโดยใช้ Thermo - Anemometer เป็นอุปกรณ์ในการเปรียบเทียบ

4. ข้อมูลจากการทดลอง

4.1 ข้อมูลความดัน

4.2 ข้อมูลของความยาวเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อน

4.1 ข้อมูลการทดลอง

สารป้อน : ทวาย และซีลี้อยขนาด 250 - 425 ไมโครเมตร

ตาราง ก.5 ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยที่อัตราไหลอากาศ 300 และ 320 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min) 300					อัตราการไหล(L/min) 320				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.33	84.61	17.8362	1	33.43	10.04	108.45	26.8996
2	33.41	10.24	95.87	21.9586	2	33.41	10.18	119.34	30.3878
3	33.43	10.21	79.03	16.0784	3	33.43	10.04	122.27	31.8550
4	33.48	10.29	81.53	16.8105	4	33.48	10.09	116.72	29.6991
อัตราการไหล(L/min) 340					อัตราการไหล(L/min) 360				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.14	84.61	18.1704	1	33.43	10.09	111.86	27.9830
2	33.41	9.98	82.18	17.5924	2	33.41	10.14	120.11	30.7811
3	33.43	10.19	85.52	18.4027	3	33.43	10.16	121.25	31.1173
4	33.48	10.11	85.2	18.4166	4	33.48	10.11	114.86	28.9780
อัตราการไหล(L/min) 380					อัตราการไหล(L/min) 400				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.14	84.61	18.1704	1	33.43	10.13	113.69	28.5228
2	33.41	10.09	82.98	17.6860	2	33.41	10.08	113.46	28.5893
3	33.43	10.19	86.42	18.7207	3	33.43	10.15	123.58	31.9744
4	33.48	10.21	83.57	17.6615	4	33.48	10.06	116.72	29.7877

ตาราง ก.6 ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่อัตราไหลอากาศ 300, 340 และ 380 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)		300			340			380			
เวลา	30 min				เวลา	30 min				เวลา	30 min
ตำแหน่ง	ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)				
	min	max	average	min	max	average	min	max	average		
1	74.06	80.02	77.04	50.01	55.42	52.72	60.98	64.39	62.69		
2	63.90	69.16	66.53	49.38	52.52	50.95	54.00	58.98	56.49		
3	49.00	53.35	51.18	49.01	51.68	50.35	52.95	58.16	55.56		
4	47.52	51.60	49.56	47.32	50.09	48.71	52.77	57.92	55.35		
5	46.53	49.36	47.95	45.68	47.32	46.50	52.56	57.42	54.99		
6	45.76	48.83	47.30	44.28	47.16	45.72	52.36	55.11	53.74		
7	40.40	44.12	42.26	41.20	44.03	42.62	48.95	53.06	51.01		
8	28.68	30.98	29.83	35.16	36.06	35.61	42.08	46.25	44.17		
9	20.30	20.94	20.62	25.33	25.92	25.63	31.04	32.05	31.55		
10	19.26	19.73	19.50	23.82	24.21	24.02	29.53	29.92	29.73		
11	19.96	20.46	20.21	24.40	25.26	24.83	30.40	31.19	30.80		
12	29.30	31.31	30.31	29.92	33.01	31.47	35.00	38.50	36.75		
13	41.00	43.06	42.03	34.99	39.02	37.01	43.52	45.95	44.74		
14	57.92	62.38	60.15	44.52	46.06	45.29	51.01	58.16	54.59		

ตาราง ก.7 ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่อัตราไหลอากาศ 320, 360 และ 400 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)		320			360			400				
ตำแหน่ง	เวลา	30 min			เวลา	30 min			เวลา	30 min		
ตำแหน่ง	ความดัน(mmH ₂ O)											
	min	max	average	min	max	average	min	max	average			
1	78.12	82.87	80.50	69.54	75.92	72.73	70.12	74.81	72.47			
2	69.29	73.00	71.15	65.21	71.02	68.12	63.41	68.62	66.02			
3	53.75	57.98	55.87	64.28	68.16	66.22	63.18	66.95	65.07			
4	49.62	54.45	52.04	62.59	68.48	65.54	61.35	65.11	63.23			
5	48.41	50.38	49.40	62.02	66.51	64.27	60.46	63.18	61.82			
6	47.91	49.66	48.79	61.41	63.52	62.47	59.31	62.00	60.66			
7	47.11	48.88	48.00	57.85	60.12	58.99	55.12	58.09	56.61			
8	33.52	35.23	34.38	44.32	48.16	46.24	49.92	57.31	53.62			
9	23.51	24.10	23.81	30.12	31.56	30.84	37.14	38.16	37.65			
10	22.21	23.00	22.61	29.38	30.01	29.70	35.42	36.31	35.87			
11	22.99	23.62	23.31	30.16	31.00	30.58	36.49	37.30	36.90			
12	32.56	34.28	33.42	41.52	44.09	42.81	43.59	46.02	44.81			
13	43.01	46.65	44.83	49.59	53.06	51.33	49.88	55.11	52.50			
14	64.56	69.05	66.81	67.41	69.09	68.25	59.02	63.47	61.25			

ตาราง ก.8 ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่อัตราไหลอากาศ 340 และ 360 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min) 340					อัตราการไหล(L/min) 360				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.23	141.70	38.1009	1	33.43	10.27	176.22	50.0530
2	33.41	10.06	146.58	40.4982	2	33.41	10.38	171.90	48.0312
3	33.43	10.08	141.03	38.4286	3	33.43	10.00	165.28	47.4660
4	33.48	10.01	128.68	34.2378	4	33.48	10.11	173.81	49.9691
อัตราการไหล(L/min) 360					อัตราการไหล(L/min) 380				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.19	144.28	39.1619	1	33.43	10.19	172.12	48.9974
2	33.41	10.11	140.35	38.0795	2	33.41	10.24	174.38	49.5598
3	33.43	10.05	133.46	35.8316	3	33.43	10.11	168.53	48.1068
4	33.48	10.13	141.19	38.2780	4	33.48	10.16	171.46	48.8906
อัตราการไหล(L/min) 400					อัตราการไหล(L/min) 420				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.18	143.41	38.8927	1	33.43	10.09	170.14	48.7766
2	33.41	10.04	142.01	38.9402	2	33.41	10.15	173.12	49.5523
3	33.43	10.11	138.36	37.3638	3	33.43	10.11	171.51	49.1680
4	33.48	10.06	135.42	36.4795	4	33.48	10.05	168.38	48.3224

ตาราง ก.9 ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยที่อัตราไหลอากาศ 340, 360 และ 400 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)		340			360			400		
เวลา		30 min			เวลา 30 min			เวลา 30 min		
ตำแหน่ง	ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			
	min	max	average	min	max	average	min	max	average	
1	79.08	82.32	80.70	79.89	85.62	82.76	83.75	90.95	87.35	
2	72.04	76.95	74.50	72.96	79.21	76.09	79.10	85.38	82.24	
3	60.86	64.72	62.79	70.55	76.12	73.34	76.15	82.15	79.15	
4	59.88	64.01	61.95	70.04	74.98	72.51	74.72	80.25	77.49	
5	58.01	62.32	60.17	66.42	72.38	69.40	70.82	77.19	74.01	
6	55.59	59.01	57.30	63.81	70.09	66.95	69.71	75.62	72.67	
7	51.02	52.84	51.93	60.35	66.26	63.31	68.02	72.47	70.25	
8	39.56	42.07	40.82	47.32	52.98	50.15	51.32	58.46	54.89	
9	31.35	32.76	32.06	30.48	31.59	31.04	36.62	37.27	36.95	
10	30.60	31.15	30.88	28.36	29.88	29.12	35.12	35.16	35.14	
11	31.01	32.46	31.74	29.29	30.59	29.94	36.04	36.61	36.33	
12	45.82	48.01	46.92	39.40	45.68	42.54	46.95	51.27	49.11	
13	55.68	60.11	57.90	53.52	57.09	55.31	59.48	65.42	62.45	
14	68.28	73.37	70.83	70.36	76.00	73.18	73.48	77.56	75.52	

ตาราง ก.10 ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่อัตราไหลอากาศ 360, 380 และ 420 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)	360			380			420		
	เวลา 30 min			เวลา 30 min			เวลา 30 min		
ตำแหน่ง	ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)		
	min	max	average	min	max	average	min	max	average
1	96.56	104.72	100.64	99.87	105.31	102.59	100.38	110.27	105.33
2	85.06	92.33	88.70	90.28	94.57	92.43	93.27	99.35	96.31
3	72.59	78.89	75.74	87.91	92.51	90.21	92.36	98.40	95.38
4	66.47	70.77	68.62	84.06	89.72	86.89	90.16	97.01	93.59
5	61.20	67.97	64.59	78.56	87.49	83.03	87.69	93.45	90.57
6	60.21	65.27	62.74	77.83	84.61	81.22	85.30	91.62	88.46
7	56.60	63.47	60.04	75.29	80.34	77.82	81.42	87.69	84.56
8	46.75	51.42	49.09	56.56	62.81	59.69	67.38	74.16	70.77
9	28.33	29.96	29.15	34.30	35.51	34.91	41.57	42.71	42.14
10	27.06	28.33	27.70	32.47	33.39	32.93	39.16	40.21	39.69
11	28.00	29.32	28.66	33.76	34.38	34.07	40.88	41.65	41.27
12	46.31	51.38	48.85	52.38	56.02	54.20	54.80	61.37	58.09
13	63.14	67.82	65.48	69.87	76.11	72.99	73.69	82.00	77.85
14	76.46	81.39	78.93	82.17	88.29	85.23	90.11	97.27	93.69

ตาราง ก.11 ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีลี้อยที่อัตราไหลอากาศ 380 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)		380		
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.35	220.98	65.2348
2	33.41	10.34	212.67	62.4116
3	33.43	10.05	200.90	59.9893
4	33.48	10.10	195.45	57.7319
อัตราการไหล(L/min)		400		
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.15	206.61	61.4234
2	33.41	10.11	205.19	61.1680
3	33.43	10.08	206.46	61.7964
4	33.48	10.01	198.38	59.3047
อัตราการไหล(L/min)		440		
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.07	205.31	61.4467
2	33.41	10.13	207.14	61.7402
3	33.43	10.00	202.89	61.0056
4	33.48	10.02	203.58	61.1138

ตาราง ก.12 ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่อัตราไหลอากาศ 380, 400 และ 440 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)	380			400			440		
	เวลา 30 min			เวลา 30 min			เวลา 30 min		
ตำแหน่ง	ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)		
	min	max	average	min	max	average	min	max	average
1	114.37	120.59	117.48	118.00	125.00	121.50	120.00	125.00	122.50
2	99.86	108.16	104.01	106.41	114.52	110.47	108.53	115.29	111.91
3	87.52	96.46	91.99	104.81	112.40	108.61	106.35	112.47	109.41
4	82.26	91.16	86.71	95.64	102.42	99.03	95.36	107.19	101.28
5	81.55	86.82	84.19	94.81	99.54	97.18	95.12	105.26	100.19
6	73.76	81.39	77.58	88.57	95.26	91.92	93.22	100.16	96.69
7	65.02	72.19	68.61	83.47	91.57	87.52	90.49	96.27	93.38
8	50.11	54.32	52.22	67.88	71.32	69.60	74.42	81.62	78.02
9	37.59	39.22	38.41	41.40	42.37	41.89	48.02	48.53	48.28
10	35.47	36.39	35.93	39.16	40.11	39.64	45.37	46.62	46.00
11	36.31	37.28	36.80	40.23	41.47	40.85	46.74	47.86	47.30
12	58.12	64.17	61.15	62.57	71.08	66.83	67.30	76.11	71.71
13	73.92	82.67	78.30	77.76	88.31	83.04	81.02	89.77	85.40
14	90.11	96.95	93.53	91.87	99.06	95.47	95.47	102.38	98.93

ตาราง ก.13 ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ340 และ 360 ลิตรต่อนาที

สารป้อน : ทราย และแกลบขนาด250 - 425 ไมโครเมตร

อัตราการไหล(L/min) 340					อัตราการไหล(L/min) 360				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.34	40.40	2.4267	1	33.43	10.45	53.21	5.9254
2	33.41	10.43	41.83	2.9062	2	33.41	10.26	52.21	5.6912
3	33.43	10.40	39.58	2.1288	3	33.43	10.33	53.65	6.1475
4	33.48	10.36	41.88	2.9189	4	33.48	10.22	55.37	6.8020
อัตราการไหล(L/min) 360					อัตราการไหล(L/min) 380				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.28	41.05	2.6685	1	33.43	10.38	53.22	5.9688
2	33.41	10.16	40.59	2.5441	2	33.41	10.32	53.28	6.0314
3	33.43	10.15	40.78	2.6069	3	33.43	10.35	53.24	5.9930
4	33.48	10.06	40.52	2.5193	4	33.48	10.36	55.54	6.7691
อัตราการไหล(L/min) 400					อัตราการไหล(L/min) 420				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.21	40.89	2.6304	1	33.43	10.36	53.53	6.0880
2	33.41	10.32	41.11	2.6860	2	33.41	10.21	53.21	6.0717
3	33.43	10.35	41.16	2.6887	3	33.43	10.16	52.28	5.7650
4	33.48	10.26	41.06	2.6596	4	33.48	10.33	55.21	6.6738

ตาราง ก.14 ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ 340, 360 และ 400 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)	340			360			400		
	เวลา 30 min			เวลา 30 min			เวลา 30 min		
ตำแหน่ง	ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)		
	min	max	average	min	max	average	min	max	average
1	65.15	70.27	67.71	73.06	75.11	74.09	71.27	73.36	72.32
2	54.21	60.02	57.12	62.09	68.70	65.40	64.03	65.72	64.88
3	44.29	46.72	45.51	55.95	57.12	56.54	60.11	62.42	61.27
4	42.36	44.38	43.37	48.27	50.11	49.19	56.72	59.00	57.86
5	38.71	39.16	38.94	45.12	47.00	46.06	55.95	56.92	56.44
6	33.67	35.12	34.40	42.11	44.37	43.24	51.11	51.98	51.55
7	31.23	32.49	31.86	37.84	39.16	38.50	46.06	46.90	46.48
8	30.01	31.45	30.73	35.14	36.12	35.63	43.82	44.86	44.34
9	25.95	26.56	26.26	32.14	32.97	32.56	37.16	37.88	37.52
10	24.12	25.01	24.57	29.16	29.87	29.52	34.15	35.06	34.61
11	24.26	25.39	24.83	29.46	30.59	30.03	34.51	35.43	34.97
12	28.12	30.01	29.07	31.95	32.01	31.98	40.12	41.16	40.64
13	35.11	36.18	35.65	39.11	40.58	39.85	48.91	50.16	49.54
14	45.95	48.11	47.03	56.12	60.47	58.30	56.12	60.11	58.12

ตาราง ก.15 ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ 360, 380 และ 420 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)		360			380			420		
เวลา		30 min			30 min			30 min		
ตำแหน่ง	ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			
	min	max	average	min	max	average	min	max	average	
1	83.31	90.53	86.92	74.65	77.60	76.13	68.95	70.49	69.72	
2	74.38	80.42	77.40	68.00	70.10	69.05	64.82	67.16	65.99	
3	64.91	66.24	65.58	67.13	68.72	67.93	64.09	65.36	64.73	
4	60.46	62.76	61.61	63.15	64.16	63.66	62.41	64.44	63.43	
5	56.03	57.84	56.94	57.46	58.18	57.82	60.95	62.11	61.53	
6	52.78	54.32	53.55	54.56	56.71	55.64	58.72	60.16	59.44	
7	49.31	50.55	49.93	51.16	52.00	51.58	58.00	59.26	58.63	
8	45.00	45.82	45.41	48.83	49.20	49.02	56.21	56.72	56.47	
9	37.67	38.24	37.96	41.98	42.40	42.19	47.83	48.52	48.18	
10	35.81	36.57	36.19	39.50	40.41	39.96	45.11	45.81	45.46	
11	36.18	37.10	36.64	39.82	40.51	40.17	45.39	46.26	45.83	
12	43.28	45.60	44.44	45.61	46.66	46.14	49.12	50.16	49.64	
13	53.16	56.38	54.77	52.55	53.68	53.12	53.49	55.12	54.31	
14	70.16	72.11	71.14	64.07	65.59	64.83	62.32	64.84	63.58	

ตาราง ก.16 ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ 380 และ 400 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min) 380					อัตราการไหล(L/min) 400				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.15	64.30	10.0339	1	33.43	10.05	155.43	42.7773
2	33.41	10.2	65.22	10.3165	2	33.41	10.38	159.09	42.6936
3	33.43	10.31	67.21	10.8943	3	33.43	10.26	146.67	38.8281
4	33.48	10.19	65.92	10.5492	4	33.48	10.26	164.73	45.1474
อัตราการไหล(L/min) 400					อัตราการไหล(L/min) 420				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.09	64.36	10.1150	1	33.43	10.02	155.23	42.8335
2	33.41	10.04	64.00	10.0434	2	33.41	10.11	156.32	42.8475
3	33.43	10.11	64.22	10.0451	3	33.43	10.09	155.87	42.7647
4	33.48	10.04	66.56	10.9363	4	33.48	10.13	153.28	41.6577
อัตราการไหล(L/min) 440					อัตราการไหล(L/min) 460				
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)	Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.00	64.56	10.2780	1	33.43	10.03	154.98	42.7011
2	33.41	10.04	64.78	10.3231	2	33.41	10.17	156.26	42.5735
3	33.43	10.13	65.01	10.3060	3	33.43	10.16	155.89	42.4772
4	33.48	10.06	66.66	10.9503	4	33.48	10.06	156.79	43.2036

ตาราง ก.17 ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ 380, 400 และ 440 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)		380			400			440		
เวลา		30 min			30 min			30 min		
ตำแหน่ง	ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			
	min	max	average	min	max	average	min	max	average	
1	85.16	87.29	86.23	71.06	72.09	71.58	59.87	61.07	60.47	
2	75.42	78.19	76.81	64.98	66.36	65.67	57.19	58.00	57.60	
3	63.05	65.28	64.17	61.59	64.07	62.83	56.95	57.34	57.15	
4	59.14	61.28	60.21	58.82	60.47	59.65	56.30	56.78	56.54	
5	55.29	56.14	55.72	56.00	56.79	56.40	55.96	56.21	56.09	
6	53.49	56.06	54.78	53.48	54.77	54.13	55.20	55.94	55.57	
7	47.17	48.19	47.68	47.59	49.06	48.33	54.58	55.29	54.94	
8	42.32	43.14	42.73	46.11	47.02	46.57	53.76	54.21	53.99	
9	36.42	37.00	36.71	39.26	40.18	39.72	45.02	45.60	45.31	
10	33.92	34.56	34.24	36.48	37.11	36.80	41.90	42.17	42.04	
11	33.86	34.04	33.95	36.00	36.76	36.38	41.95	42.22	42.09	
12	41.11	43.16	42.14	42.48	44.26	43.37	44.19	45.26	44.73	
13	51.26	54.13	52.70	51.00	53.76	52.38	49.23	51.01	50.12	
14	61.28	64.36	62.82	59.16	61.02	60.09	50.81	57.40	54.11	

ตาราง ก.18 ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ 400, 420 และ 460 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)		400			420			460		
เวลา		30 min			30 min			30 min		
ตำแหน่ง	ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			
	min	max	average	min	max	average	min	max	average	
1	88.72	95.19	91.96	85.73	90.16	87.95	87.77	92.16	89.97	
2	80.05	86.39	83.22	80.78	84.01	82.40	83.42	86.17	84.80	
3	67.91	70.52	69.22	78.48	80.26	79.37	81.26	84.07	82.67	
4	64.10	66.42	65.26	76.07	78.86	77.47	78.95	81.57	80.26	
5	62.38	64.56	63.47	74.98	78.12	76.55	77.91	79.56	78.74	
6	61.59	62.68	62.14	72.04	76.19	74.12	76.47	78.62	77.55	
7	57.44	60.26	58.85	70.63	74.43	72.53	75.59	76.56	76.08	
8	52.83	54.82	53.83	63.12	65.69	64.41	70.55	72.18	71.37	
9	41.47	42.06	41.77	44.92	45.77	45.35	53.01	54.29	53.65	
10	39.59	40.62	40.11	42.81	43.59	43.20	50.28	51.06	50.67	
11	41.28	42.09	41.69	44.15	44.85	44.50	52.84	53.45	53.15	
12	50.11	53.28	51.70	52.62	55.81	54.22	60.12	61.11	60.62	
13	59.87	61.95	60.91	61.91	67.10	64.51	69.11	71.02	70.07	
14	77.08	80.27	78.68	78.48	80.82	79.65	79.56	82.04	80.80	

ตาราง ก.19 ข้อมูลอัตราการไหลป้อนกลับของของแข็งของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ 420 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)		420		
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.22	205.71	59.7769
2	33.41	10.07	201.13	59.0371
3	33.43	9.98	198.38	58.5703
4	33.48	10.05	200.06	58.7463
อัตราการไหล(L/min)		440		
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.19	202.21	58.7164
2	33.41	10.05	202.52	59.6525
3	33.43	10.11	200.27	58.4902
4	33.48	10.06	200.25	58.7559
อัตราการไหล(L/min)		480		
Beaker	Weight(g)	Time(sec)	Total Weight(g)	Q(Kg/hr)
1	33.43	10.01	200.26	59.0709
2	33.41	10.05	201.54	59.3015
3	33.43	10.08	200.05	58.5857
4	33.48	10.05	202.49	59.6167

ตาราง ก.20 ข้อมูลความดันทั้งระบบของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่อัตราไหลอากาศ 420, 440 และ 480 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหล(L/min)	420			440			480		
	เวลา	30 min		เวลา	30 min		เวลา	30 min	
ตำแหน่ง	ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)			ความดัน(mmH ₂ O)		
	min	max	average	min	max	average	min	max	average
1	150.00	155.00	152.50	125.00	130.00	127.50	120.00	130.00	125.00
2	130.00	140.00	135.00	110.00	125.00	117.50	112.59	117.84	115.22
3	115.00	125.00	120.00	101.95	110.87	106.41	108.45	111.47	109.96
4	110.00	115.00	112.50	99.12	105.28	102.20	102.38	106.14	104.26
5	102.58	109.16	105.87	94.87	104.11	99.49	99.87	103.51	101.69
6	100.87	106.32	103.60	93.71	99.81	96.76	97.95	101.38	99.67
7	94.12	100.04	97.08	91.05	94.82	92.94	96.42	100.06	98.24
8	79.27	88.14	83.71	79.16	82.84	81.00	87.46	90.19	88.83
9	52.46	53.15	52.81	52.49	53.56	53.03	61.02	62.04	61.53
10	44.82	45.46	45.14	50.00	50.65	50.33	58.40	59.17	58.79
11	46.87	47.12	47.00	51.46	52.14	51.80	60.49	61.30	60.90
12	67.08	71.05	69.07	68.49	72.32	70.41	75.16	77.81	76.49
13	80.82	89.76	85.29	90.16	85.18	87.67	89.72	93.46	91.59
14	120.00	130.00	125.00	98.72	104.09	101.41	103.11	106.07	104.59

4.2 ข้อมูลของความยาวเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของผสม

ทรายขนาด 337.5 ไมโครเมตร

ตาราง ก.22 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทราย อัตราการไหลอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	5.62654	L15	6.26796	L1	5.4744	L15	6.0374	L29	6.30876
L2	5.16835	L16	6.50674	L2	6.4539	L16	5.6116	L30	6.38149
L3	5.55162	L17	5.47763	L3	6.2323	L17	6.2682	L31	5.58011
L4	5.01437	L18	6.25658	L4	6.3899	L18	5.1393	L32	5.59032
L5	6.38986	L19	6.29858	L5	6.114	L19	6.1922		
L6	5.79532	L20	6.23147	L6	5.6436	L20	5.4375		
L7	6.40072	L21	6.38735	L7	5.5849	L21	5.9518		
L8	6.44815	L22	5.58107	L8	5.783	L22	5.9707		
L9	6.00905	L23	5.53072	L9	5.7161	L23	6.0363		
L10	6.59486	L24	6.92306	L10	5.189	L24	5.5976		
L11	5.86105	L25	7.06168	L11	5.953	L25	5.9086		
L12	5.90949	L26	5.10452	L12	6.6479	L26	5.1921		
L13	6.57321	L27	5.22117	L13	5.8513	L27	5.8787		
L14	5.43223	L28	6.06806	L14	5.2545	L28	6.0598		

ตาราง ก.23 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทราย อัตราการไหลของอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	3.550714	L21	4.719292	L41	4.917493	L61	4.112017	L81	4.063198	L8	4.288899	L28	4.443157
L2	4.18077	L22	4.40166	L42	4.185456	L62	4.115915	L82	5.075466	L9	4.536808	L29	4.703408
L3	4.091601	L23	4.485066	L43	3.954305	L63	4.266407	L83	4.799406	L10	4.412979	L30	4.537201
L4	4.437138	L24	4.477113	L44	4.302172	L64	5.074062	L84	4.998708	L11	4.598053	L31	4.682146
L5	3.880165	L25	4.538379	L45	3.605984	L65	4.199056	L85	4.83049	L12	4.465956	L32	4.646238
L6	4.636257	L26	4.618545	L46	4.443157	L66	4.178639	L86	4.221063	L13	4.690131	L33	4.271832
L7	4.040331	L27	4.132763	L47	4.516735	L67	4.176933	L87	4.372418	L14	5.428293	L34	4.50528
L8	4.144387	L28	4.95611	L48	4.778571	L68	4.298443	L88	5.109056	L15	4.265154	L35	4.738507
L9	4.119377	L29	4.500532	L49	4.811641	L69	4.304656	L89	4.950355	L16	4.957907	L36	4.711357
L10	3.985274	L30	4.894977	L50	4.182475	L70	4.441553	L90	4.655432	L17	4.610436	L37	4.987289
L11	5.014722	L31	4.391934	L51	3.822335	L71	4.115915	L91	4.807196	L18	5.25857	L38	4.101605
L12	4.01556	L32	4.538379	L52	4.445162	L72	4.193961	L92	4.358132	L19	4.673767	L39	4.179065
L13	4.193961	L33	4.602701	L53	4.621245	L73	4	L93	4.565778	L20	4.421047	L40	4.119377
L14	4.108116	L34	3.945734	L54	4.648922	L74	4.059688	L1	4.870894	L21	4.702272	L41	4.156836
L15	4.085937	L35	4.502511	L55	4.778944	L75	4.538379	L2	4.771108	L22	4.554447	L42	4.608504
L16	3.995989	L36	4.91278	L56	4.752399	L76	4.669953	L3	4.519495	L23	4.074146	L43	4.924372
L17	4.020881	L37	4.271415	L57	4.775588	L77	3.880165	L4	4.865038	L24	5.230372	L44	4.419032
L18	3.604007	L38	5.057531	L58	4.602701	L78	5.412515	L5	4.662316	L25	5.074062	L45	4.674911
L19	4.734369	L39	4.662316	L59	5.06844	L79	4.715893	L6	4.896433	L26	4.769988	L46	4.421047
L20	4.625869	L40	5.141386	L60	4.280166	L80	4.300101	L7	4.725329	L27	5.014722	L47	4.805713

ตาราง ก.24 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทราย อัตราการไหลของอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	4.04254	L21	4.09639	L9	3.89529	L29	3.47514
L2	3.84325	L22	4.09987	L10	3.96421	L30	3.04444
L3	4.43714	L23	4.14439	L11	4.12197	L31	3.16439
L4	4.00445	L24	4.12629	L12	3.64579	L32	3.34771
L5	3.99599	L25	4.22191	L13	4.32983	L33	3.2587
L6	3.85852	L26	4.03989	L14	3.5225	L34	2.73882
L7	4.26515	L27	4.43232	L15	4.24212	L35	2.51853
L8	3.4623	L28	3.98349	L16	3.26198	L36	3.55071
L9	4.15727	L29	4.03194	L17	3.17956	L37	3.57621
L10	4.35772	L30	3.34504	L18	3.882	L38	3.39789
L11	4.46795	L31	3.36893	L19	3.62962	L39	3.55071
L12	3.52402	L32	3.64188	L20	3.69192	L40	3.22407
L13	3.19298	L1	4.60425	L21	3.7131	L41	3.34344
L14	3.67257	L2	4.47751	L22	3.55473	L42	3.522
L15	3.88017	L3	4.512	L23	3.87097	L43	2.92748
L16	3.40313	L4	3.73844	L24	3.88751	L44	3.39894
L17	3.83211	L5	3.50577	L25	4.01334	L45	3.4047
L18	3.90762	L6	3.76078	L26	3.38633	L46	3.21467
L19	3.87097	L7	3.87649	L27	3.58617	L47	3.44476
L20	4.08594	L8	3.51136	L28	3.70541		

ตาราง ก.25 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทราย อัตราการไหลของอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	7.224063	L21	5.897416	L41	6.75502	L61	4.01556	L81	5.134104	L101	5.874713	L11	4.995142
L2	6.664736	L22	5.40362	L42	5.432559	L62	5.014722	L82	6.421012	L102	6.626128	L12	5.272444
L3	5.086687	L23	5.626853	L43	7.085604	L63	6.805474	L83	3.283216	L103	5.487382	L13	3.822335
L4	6.151176	L24	5.372536	L44	4.357724	L64	8.076693	L84	5.068089	L104	5.577556	L14	4.952874
L5	6.089167	L25	5.7904	L45	2.983548	L65	4.954672	L85	5.791631	L105	4.838598	L15	5.587769
L6	5.970678	L26	5.552904	L46	4.040331	L66	5.135839	L86	6.064832	L106	5.750879	L16	5.791323
L7	6.556657	L27	6.493581	L47	6.00905	L67	4.706816	L87	5.491926	L107	7.285951	L17	5.334261
L8	6.771879	L28	6.552852	L48	3.82047	L68	4.894977	L88	5.196538	L108	4.575913	L18	7.25851
L9	6.112239	L29	4.702272	L49	5.572123	L69	4.729474	L89	4.19948	L109	6.149728	L19	6.218587
L10	6.664736	L30	5.467539	L50	5.50003	L70	5.116026	L90	5.801467	L110	5.221166	L20	4.665754
L11	5.360916	L31	6.281872	L51	6.033906	L71	5.221849	L91	6.593511	L1	6.389858	L21	4.812752
L12	5.800238	L32	5.605597	L52	6.84281	L72	5.161792	L92	6.029475	L2	6.089167	L22	6.086825
L13	6.762401	L33	6.14625	L53	6.632847	L73	5.448279	L93	5.937462	L3	6.086825	L23	5.664723
L14	6.399332	L34	6.783446	L54	6.752118	L74	5.953046	L94	5.353266	L4	4.906974	L24	5.912502
L15	4.361402	L35	6.236897	L55	5.537481	L75	5.741887	L95	5.284595	L5	4.931242	L25	5.253146
L16	7.283016	L36	6.031838	L56	6.333564	L76	5.198938	L96	5.518142	L6	4.602701	L26	5.68231
L17	6.036563	L37	5.939862	L57	6.931032	L77	5.901342	L97	4.954672	L7	5.334261	L27	6.281872
L18	7.163381	L38	6.998568	L58	4.406919	L78	5.929053	L98	4.487051	L8	5.124377	L28	5.505535
L19	6.566704	L39	6.409903	L59	6.881498	L79	5.749639	L99	4.990503	L9	5.549373	L29	5.388762
L20	5.412515	L40	6.923058	L60	4.417418	L80	6.361633	L100	4.596891	L10	6.005491	L30	5.974258

ตาราง ก.25 ต่อ

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L51	5.606233	L71	6.167087	L91	6.19361	L111	5.280548
L52	6.387627	L72	6.55258	L92	6.270516	L112	5.150735
L53	6.249454	L73	5.318204	L93	5.910091	L113	6.071585
L54	4.593013	L74	5.313176	L94	6.730709	L114	5.64361
L55	4.82052	L75	6.599183	L95	4.635104	L115	5.850399
L56	4.730605	L76	6.107573	L96	5.590319	L116	6.043642
L57	4.554447	L77	5.590319	L97	5.959029	L117	6.447043
L58	6.171997	L78	5.801467	L98	5.986473		
L59	6.130867	L79	6.138128	L99	6.416571		
L60	4.584082	L80	6.263409	L100	6.761347		
L61	5.174548	L81	6.753701	L101	5.850399		
L62	6.451463	L82	6.486718	L102	6.039809		
L63	6.222311	L83	7.041462	L103	5.776845		
L64	6.460571	L84	5.014367	L104	5.51265		
L65	6.87217	L85	6.041283	L105	7.283016		
L66	6.593511	L86	5.741887	L106	5.51265		
L67	5.910995	L87	5.654649	L107	6.019715		
L68	5.672267	L88	4.129744	L108	5.790708		
L69	5.077221	L89	7.371769	L109	6.674086		
L70	5.00334	L90	6.030361	L110	4.897161		

ตาราง ก.26 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทราย อัตราการไหลของอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	5.017564	L21	4.475123	L41	5.286955	L61	4.955032	L7	4.483476	L27	4.669953	L47	4.543087
L2	4.882221	L22	4.487051	L42	4.853305	L62	4.835282	L8	4.301758	L28	4.417822	L48	4.480694
L3	4.775588	L23	4.18077	L43	4.719292	L63	4.577859	L9	4.419032	L29	4.556011	L49	4.238334
L4	5.328914	L24	4.419032	L44	4.180344	L64	4.694687	L10	4.596503	L30	4.532486	L50	4.789372
L5	4.643169	L25	4.536808	L45	4.977634	L65	4.608504	L11	4.059688	L31	4.651987	L51	4.835282
L6	4.299687	L26	5.334261	L46	4.240015	L66	4.841175	L12	4.908063	L32	4.898252	L52	4.38747
L7	5.917322	L27	4.65658	L47	3.772601	L67	4.258883	L13	4.010676	L33	4.477511	L53	4.775588
L8	4.390717	L28	5.215362	L48	4.536808	L68	4.301758	L14	4.602701	L34	4.870163	L54	4.419838
L9	4.485066	L29	4.841175	L49	4.12586	L69	4.448768	L15	4.496571	L35	4.161977	L55	4.357315
L10	4.967601	L30	4.298029	L50	4.543087	L70	3.880165	L16	4.502511	L36	4.421047	L56	4.431915
L11	4.657728	L31	4.417418	L51	4.888056	L71	4.185456	L17	4.77708	L37	4.357724	L57	3.968697
L12	4.775961	L32	4.502511	L52	4.536808	L72	5.091239	L18	4.778944	L38	4.0531	L58	4.299687
L13	4.085937	L33	3.283216	L53	4.502907	L73	4.357724	L19	5.193794	L39	4.461166	L59	4.740011
L14	3.956107	L34	5.405598	L54	4.238334	L74	4.477511	L20	4.725329	L40	4.575913	L60	4.431915
L15	4.265154	L35	4.844486	L55	4.719292	L1	4.179065	L21	4.477113	L41	4.265154	L61	4.648922
L16	5.135145	L36	4.185456	L56	4.437138	L2	4.304656	L22	4.419032	L42	5.006188	L62	4.417418
L17	3.395792	L37	4.27225	L57	4.65658	L3	4.65964	L23	4.312927	L43	4.417418	L63	4.671861
L18	3.768348	L38	4.598053	L58	5.027142	L4	4.844486	L24	4.648922	L44	4.721934	L64	4.91278
L19	4.059249	L39	5.020049	L59	4.656198	L5	3.47668	L25	4.40166	L45	4.483476	L65	4.835282
L20	4.694687	L40	4.298443	L60	4.042536	L6	3.941668	L26	4.596503	L46	4.662316	L66	4.775588

ตาราง ก.27 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทราย อัตราการไหลของอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	3.141787	L21	4.121971	L41	4.483476	L9	4.312927	L29	4.318294
L2	3.524019	L22	4.606184	L42	4.085937	L10	3.91081	L30	4.298443
L3	3.866825	L23	4.118944	L43	4.417822	L11	4.32489	L31	3.231251
L4	5.315859	L24	3.503736	L44	3.765037	L12	3.641875	L32	3.807857
L5	4.242116	L25	4.238334	L45	4.280166	L13	4.253441	L33	4.202873
L6	4.536808	L26	5.251111	L46	3.790975	L14	4.083756	L34	3.984826
L7	4.245055	L27	3.03271	L47	4.417418	L15	4.358132	L35	4.178639
L8	3.765037	L28	3.421405	L48	3.665283	L16	4.053979	L36	3.822335
L9	4.063198	L29	3.925815	L49	4.265154	L17	4.674911	L37	3.572226
L10	4.799406	L30	4.487051	L50	3.70108	L18	4.238334		
L11	4.298443	L31	4.12586	L51	4.357315	L19	4.121971		
L12	4.546616	L32	4.841175	L52	3.711176	L20	4.102908		
L13	4.59999	L33	4.390717	L1	4.431915	L21	4.417418		
L14	4.584082	L34	3.790975	L2	4.879666	L22	4.615458		
L15	5.043066	L35	4.229918	L3	3.70108	L23	3.9026		
L16	4.122836	L36	3.586165	L4	4.615458	L24	4		
L17	3.817671	L37	4.491417	L5	4.178639	L25	4.477511		
L18	3.880624	L38	4.656198	L6	3.93986	L26	3.924		
L19	4.775588	L39	4.180344	L7	4.536808	L27	4.596891		
L20	4.229918	L40	4.417822	L8	3.940312	L28	3.641385		

ตาราง ก.28 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทราย อัตราการไหลของอากาศ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	7.462811	L21	6.686089	L41	7.820252	L61	7.103937	L6	6.749742	L26	6.865167	L46	7.225296
L2	7.106696	L22	7.799035	L42	6.511118	L62	6.535972	L7	6.93951	L27	6.210846	L47	7.302561
L3	7.799035	L23	6.90218	L43	6.831344	L63	6.619402	L8	7.858436	L28	7.343436	L48	7.000604
L4	6.984552	L24	7.389874	L44	7.700635	L64	7.053092	L9	6.256578	L29	7.342708	L49	7.842776
L5	6.869058	L25	7.657013	L45	6.771879	L65	8.297798	L10	6.996786	L30	7.007473	L50	6.881498
L6	5.672267	L26	6.626397	L46	6.766879	L66	8.245671	L11	6.518775	L31	7.243029	L51	7.193414
L7	6.579715	L27	7.762396	L47	7.311583	L67	6.666875	L12	6.364713	L32	6.448149	L52	5.372536
L8	7.074532	L28	8.06963	L48	6.332157	L68	8.227067	L13	6.762401	L33	7.64467	L53	5.716074
L9	7.669103	L29	6.46939	L49	5.363242	L69	8.314958	L14	7.163381	L34	7.609629	L54	6.63929
L10	7.048038	L30	6.865167	L50	5.741887	L70	7.346347	L15	7.570897	L35	8.48003	L55	6.63929
L11	6.583776	L31	6.088874	L51	7.702717	L71	5.733503	L16	6.814631	L36	7.050312	L56	5.369219
L12	6.779243	L32	6.107573	L52	7.125474	L72	7.193414	L17	6.576194	L37	6.840206	L57	6.242894
L13	8.311315	L33	6.579715	L53	7.530073	L73	6.507012	L18	6.712419	L38	6.61213	L58	6.63929
L14	8.179065	L34	7.037159	L54	6.865945	L74	6.281872	L19	6.029475	L39	6.807568	L59	7.641873
L15	7.264644	L35	7.585005	L55	7.294749	L75	7.403123	L20	6.341436	L40	8.042648	L60	6.766879
L16	7.823669	L36	5.857704	L56	6.394318	L1	5.165933	L21	6.286125	L41	7.864555	L61	7.302561
L17	7.344649	L37	4.841175	L57	6.671416	L2	6.270516	L22	6.599183	L42	6.712685	L62	6.950285
L18	8.150041	L38	6.871393	L58	5.399332	L3	8.122009	L23	7.169597	L43	7.369594	L63	6.158992
L19	7.041462	L39	6.390695	L59	6.807568	L4	8.655752	L24	7.597913	L44	6.361633	L64	6.464706
L20	7.996659	L40	7.402161	L60	7.944798	L5	7.592752	L25	7.272243	L45	6.149728	L65	5.654649

ตาราง ก.29 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทราย อัตราการไหลของอากาศ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	5.074062	L21	6.048063	L41	6.099399	L61	5.583622	L81	5.221849	L101	5.42041	L16	5.291671
L2	5.696402	L22	5.868644	L42	5.221849	L62	5.233097	L82	5.5078	L102	5.196538	L17	5.805458
L3	6.055129	L23	5.827513	L43	4.938824	L63	5.339269	L83	5.479258	L103	6.167954	L18	4.953233
L4	6.041283	L24	6.078917	L44	5.51265	L64	6.012311	L84	6.096185	L104	6.298584	L19	5.399332
L5	5.285607	L25	5.761712	L45	5.893789	L65	5.270754	L85	5.478933	L105	6.615363	L20	4.904069
L6	6.314123	L26	5.656854	L46	5.412515	L66	4.965807	L86	6.236897	L1	5.163173	L21	5.093688
L7	5.034934	L27	5.324901	L47	5.221166	L67	5.324901	L87	5.81006	L2	5.864999	L22	5.057179
L8	6.210846	L28	5.920633	L48	5.649605	L68	6.287259	L88	5.556753	L3	5.086687	L23	4.972262
L9	6.213428	L29	5.093688	L49	5.733503	L69	6.717991	L89	5.623368	L4	5.852835	L24	5.428293
L10	5.574361	L30	5.526208	L50	6.183533	L70	6.520962	L90	5.242621	L5	5.692022	L25	5.294027
L11	6.509202	L31	5.26974	L51	5.524273	L71	5.93416	L91	5.478933	L6	5.768203	L26	4.250088
L12	5.654649	L32	5.775303	L52	5.024661	L72	5.814658	L92	5.515558	L7	5.314182	L27	5.079677
L13	6.053069	L33	5.696402	L53	6.064832	L73	6.045411	L93	5.93416	L8	5.850399	L28	3.406793
L14	6.375063	L34	5.656854	L54	5.448279	L74	6.124179	L94	5.597645	L9	5.479258	L29	3.431805
L15	5.924544	L35	5.642979	L55	6.216581	L75	5.518142	L95	5.301763	L10	3.968697	L30	3.983485
L16	6.361633	L36	5.091239	L56	6.05248	L76	5.201336	L96	5.526208	L11	2.880856	L31	4.102908
L17	6.019715	L37	4.879666	L57	6.269096	L77	5.900436	L97	5.67101	L12	4.12586	L32	4.983715
L18	5.6316	L38	5.10033	L58	5.969484	L78	4.838598	L98	5.68231	L13	3.581691	L33	4.721934
L19	5.678859	L39	4.983715	L59	6.685823	L79	5.194824	L99	5.445008	L14	4.789372	L34	5.64361
L20	5.234799	L40	5.057179	L60	5.98022	L80	5.077221	L100	5.393719	L15	5.880472	L35	5.124377

ตาราง ก.30 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของทราย อัตราการไหลของอากาศ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	5.193794	L21	5.399332	L41	4.918218	L17	5.168346	L37	5.006188	L57	4.599999	L77	4.615458
L2	4.715893	L22	5.027142	L42	4.778944	L18	4.904069	L38	4.449969	L58	4.799406	L78	4.775588
L3	4.161977	L23	4.357315	L43	4.477113	L19	4.957907	L39	4.674911	L59	4.792347	L79	4.27225
L4	4.95611	L24	4.967601	L44	4.536808	L20	4.835651	L40	4.536808	L60	5.096486	L80	4.811641
L5	4.427491	L25	5.074062	L1	4.841175	L21	5.079677	L41	4.643169	L61	5.313176	L81	5.011523
L6	5.369219	L26	4.502511	L2	4.918218	L22	5.006188	L42	5.313176	L62	4.969036	L82	4.540341
L7	4.954672	L27	4.789372	L3	5.133757	L23	5.045892	L43	5.37784	L63	4.538379	L83	5.059644
L8	4.65964	L28	5.015788	L4	4.977634	L24	5.315859	L44	4.924372	L64	4.063198	L84	4.957907
L9	5.590319	L29	5.057531	L5	4.402874	L25	5.134104	L45	5.850095	L65	5.26974	L85	4.584082
L10	4.478705	L30	5.074062	L6	5.134104	L26	5.014367	L46	5.134104	L66	4.95611	L86	5.328914
L11	4.298029	L31	4.835282	L7	5.082833	L27	4.995142	L47	4.65964	L67	4.331888	L87	5.227646
L12	5.014722	L32	5.133757	L8	3.283216	L28	4.729474	L48	5.086687	L68	4.596503	L88	4.784906
L13	5.619248	L33	4.898252	L9	5.253146	L29	5.027142	L49	5.198938	L69	4.516735	L89	5.179366
L14	4.799406	L34	5.133757	L10	5.049775	L30	4.84853	L50	5.074413	L70	4.775961	L90	4.870163
L15	5.133757	L35	4.761389	L11	6.029475	L31	5.128201	L51	4.437138	L71	4.45757	L91	4.769988
L16	4.423867	L36	5.312841	L12	4.491417	L32	4.485066	L52	4.359359	L72	4.59999		
L17	4.895341	L37	4.775588	L13	4.423867	L33	5.731016	L53	5.372868	L73	5.133757		
L18	5.014722	L38	5.420081	L14	5.031748	L34	5.35027	L54	5.494845	L74	4.841175		
L19	5.079677	L39	5.102425	L15	4.918218	L35	3.191302	L55	4.741515	L75	3.87097		
L20	4.836756	L40	5.057179	L16	5.142426	L36	5.027142	L56	5.353266	L76	3.943928		

ทรายและซีเมนต์ขนาด 337.5 ไมโครเมตร

ตาราง ก.31 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารบ่อนผสมทรายซีเมนต์ อัตราการไหลของอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	1.53494	L20	2.155072	L39	2.577369	L58	2.283122	L11	1.731942	L30	1.963153	L49	2.76341
L2	2.395737	L21	3.253787	L40	2.824699	L59	3.340539	L12	1.538614	L31	2.332052		
L3	2.454708	L22	2.724317	L41	2.460834	L60	3.313389	L13	1.727591	L32	2.028216		
L4	2.577369	L23	2.885991	L42	2.872265	L61	2.202575	L14	1.492674	L33	2.108284		
L5	2.828028	L24	2.716016	L43	1.980332	L62	1.538614	L15	2.03285	L34	3.007956		
L6	3.435518	L25	2.583203	L44	3.620084	L63	2.351338	L16	1.666604	L35	1.355234		
L7	2.147199	L26	3.190124	L45	1.636983	L64	2.086752	L17	3.864958	L36	2.024502		
L8	1.736283	L27	2.405144	L46	2.024502	L65	1.971762	L18	1.458238	L37	1.966984		
L9	2.889249	L28	2.824699	L47	1.921493	L66	3.072943	L19	1.722136	L38	1.704562		
L10	3.251473	L29	2.370468	L48	3.252051	L1	2.208547	L20	1.384086	L39	2.025431		
L11	2.637987	L30	2.8227	L49	3.444271	L2	2.576639	L21	1.599774	L40	1.412349		
L12	1.517679	L31	2.822033	L50	2.089456	L3	2.057693	L22	2.822033	L41	2.522014		
L13	2.457007	L32	2.516038	L51	3.865445	L4	1.674489	L23	2.637987	L42	2.392593		
L14	1.533713	L33	3.422347	L52	3.562972	L5	2.945369	L24	1.917571	L43	2.51529		
L15	1.599774	L34	2.577369	L53	3.874198	L6	1.458238	L25	3.129377	L44	1.856744		
L16	1.371795	L35	2.766812	L54	2.793885	L7	2.276519	L26	2.147199	L45	2.178521		
L17	2.491234	L36	1.595062	L55	2.395737	L8	2.663544	L27	1.865843	L46	2.430827		
L18	3.253787	L37	1.841478	L56	3.138384	L9	2.457007	L28	2.239012	L47	2.803971		
L19	2.635132	L38	2.76341	L57	3.253787	L10	2.189722	L29	2.351338	L48	3.129377		

ตาราง ก.32 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขี้เถ้า อัตราการไหลของอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	2.08585	L21	2.577369	L41	1.964112	L61	1.412349	L81	1.517679	L101	2.270725	L18	2.640839
L2	2.222139	L22	2.283122	L42	2.208547	L62	2.453942	L82	1.917571	L102	2.024502	L19	1.355234
L3	2.516038	L23	2.576639	L43	1.264733	L63	1.816787	L83	1.841478	L103	2.392593	L20	1.779108
L4	2.100236	L24	2.370468	L44	1.744932	L64	2.269896	L84	2.430827	L1	1.902794	L21	1.613828
L5	1.472365	L25	2.640839	L45	1.684573	L65	2.108284	L85	2.209399	L2	2.331244	L22	1.876904
L6	1.964112	L26	2.699336	L46	1.788602	L66	2.334471	L86	1.660949	L3	2.147199	L23	2.249911
L7	2.208547	L27	2.857156	L47	1.964112	L67	1.926383	L87	1.964112	L4	2.216203	L24	2.516038
L8	2.575178	L28	2.395737	L48	1.722136	L68	2.588298	L88	2.516038	L5	2.024502	L25	2.03285
L9	2.283122	L29	2.209399	L49	2.822033	L69	2.108284	L89	2.527232	L6	2.382346	L26	2.761366
L10	2.028216	L30	2.147199	L50	2.410615	L70	2.025431	L90	2.161176	L7	1.674489	L27	3.128775
L11	2.216203	L31	1.727591	L51	2.168998	L71	1.849636	L91	1.841478	L8	2.338498	L28	2.147199
L12	2.189722	L32	2.270725	L52	2.161176	L72	1.964112	L92	2.579558	L9	2.229747	L29	1.978431
L13	1.905759	L33	2.460834	L53	1.684573	L73	2.702123	L93	2.6387	L10	2.299548	L30	2.047608
L14	3.06804	L34	2.209399	L54	2.08585	L74	1.905759	L94	2.702123	L11	2.134012	L31	2.527232
L15	1.978431	L35	2.211953	L55	2.08585	L75	2.360125	L95	2.761366	L12	2.269896	L32	2.086752
L16	2.393379	L36	1.963153	L56	1.624289	L76	2.086752	L96	1.660949	L13	2.098443	L33	1.963153
L17	2.089456	L37	2.444722	L57	1.684573	L77	2.393379	L97	2.453942	L14	1.865843	L34	2.147199
L18	2.211953	L38	1.756755	L58	1.881911	L78	2.150702	L98	1.902794	L15	3.13118	L35	2.168998
L19	2.453942	L39	1.718854	L59	2.03285	L79	2.640839	L99	2.822033	L16	1.795952	L36	2.405144
L20	2.328013	L40	1.53494	L60	1.503978	L80	1.795952	L100	2.576639	L17	2.76341	L37	2.129599

ตาราง ก.33 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายละเอียด อัตราการไหลของอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	2.399661	L21	1.65186	L41	1.841478	L61	1.711173	L81	1.795952
L2	1.595062	L22	1.412349	L42	1.538614	L62	2.08585	L82	1.986973
L3	1.674489	L23	1.443973	L43	2.522014	L63	2.270725	L83	2.393379
L4	1.610326	L24	1.840456	L44	1.412349	L64	1.596241		
L5	2.332052	L25	1.595062	L45	1.416341	L65	1.656411		
L6	2.025431	L26	1.674489	L46	1.718854	L66	1.378637		
L7	1.964112	L27	1.577266	L47	1.889893	L67	1.613828		
L8	1.656411	L28	1.722136	L48	2.192298	L68	1.684573		
L9	1.849636	L29	1.696817	L49	2.395737	L69	1.474919		
L10	1.910689	L30	2.239012	L50	2.093954	L70	1.674489		
L11	1.696817	L31	2.332052	L51	2.270725	L71	1.910689		
L12	1.294149	L32	1.780165	L52	1.656411	L72	1.636983		
L13	1.65186	L33	2.03285	L53	1.65186	L73	2.134012		
L14	2.239012	L34	1.728679	L54	1.902794	L74	1.656411		
L15	1.696817	L35	1.596241	L55	1.599774	L75	1.411016		
L16	1.783334	L36	1.971762	L56	1.905759	L76	1.657546		
L17	1.780165	L37	1.805357	L57	2.03932	L77	1.595062		
L18	1.805357	L38	2.147199	L58	2.086752	L78	1.966984		
L19	1.816787	L39	2.761366	L59	2.023572	L79	1.971762		
L20	1.351061	L40	1.473642	L60	1.786496	L80	1.845561		

ตาราง ก.34 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายซีเมนต์ อัตราการไหลของอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	2.733282	L21	3.321897	L41	2.583203	L9	2.576639	L29	2.854521	L49	2.147199
L2	3.379185	L22	3.619564	L42	4.60768	L10	3.610715	L30	3.930618	L50	2.760684
L3	2.950476	L23	3.627873	L43	3.619564	L11	3.703847	L31	3.869337	L51	3.685511
L4	2.392593	L24	3.591903	L44	4.417521	L12	2.392593	L32	4.543521	L52	4.359633
L5	3.167035	L25	3.265909	L45	2.961298	L13	3.067427	L33	4.29615	L53	3.440444
L6	3.008581	L26	4.29834	L46	3.348978	L14	2.602798	L34	4.356178	L54	3.128775
L7	2.024502	L27	3.501707	L47	3.374727	L15	3.106442	L35	2.975878	L55	2.583203
L8	1.926383	L28	4.573245	L48	2.577369	L16	3.154532	L36	3.21129	L56	3.195429
L9	3.933968	L29	2.503291	L49	2.688858	L17	2.883381	L37	3.140782		
L10	4.055041	L30	4.566244	L50	3.435518	L18	2.222139	L38	3.190124		
L11	4.359633	L31	3.006078	L51	2.947923	L19	3.620084	L39	3.888743		
L12	3.251473	L32	3.312821	L52	2.797924	L20	3.571412	L40	3.437708		
L13	3.379185	L33	3.497405	L1	2.760684	L21	3.680912	L41	3.505466		
L14	2.460834	L34	3.185401	L2	2.8227	L22	4.20808	L42	2.61218		
L15	3.190124	L35	4.359633	L3	2.824699	L23	4.171701	L43	4.356178		
L16	3.253787	L36	3.571412	L4	2.047608	L24	2.360125	L44	4.049004		
L17	3.006078	L37	4.200471	L5	2.562725	L25	2.588298	L45	4.056433		
L18	4.60114	L38	3.949722	L6	2.893805	L26	2.683254	L46	4.29615		
L19	3.204837	L39	3.782773	L7	2.453942	L27	2.08585	L47	4.173505		
L20	2.579558	L40	3.62424	L8	2.336083	L28	2.430827	L48	2.334471		

ตาราง ก.35 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขี้เถ้า อัตราการไหลของอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	2.168998	L21	3.401388	L41	2.533925	L61	1.630071	L81	3.742261	L101	2.915185
L2	2.331244	L22	2.975878	L42	2.815357	L62	2.885991	L82	3.321897	L102	3.632538
L3	2.481395	L23	3.129377	L43	3.516187	L63	3.321897	L83	2.216203	L103	2.947285
L4	2.150702	L24	2.771569	L44	2.594833	L64	2.348135	L84	3.158109	L104	3.705878
L5	3.028531	L25	3.045879	L45	2.828028	L65	3.192483	L85	3.394188	L105	3.713487
L6	3.237553	L26	2.771569	L46	2.453942	L66	2.430827	L86	1.718854	L106	2.782412
L7	3.722092	L27	2.03932	L47	3.526874	L67	2.502539	L87	2.430827	L107	3.326992
L8	2.6387	L28	2.249911	L48	3.192483	L68	2.899652	L88	2.622964	L108	3.237553
L9	2.724317	L29	2.822033	L49	2.529465	L69	2.620811	L89	3.128174	L109	3.129377
L10	2.622964	L30	2.150702	L50	2.967646	L70	2.649376	L90	2.050363	L110	3.638232
L11	2.426953	L31	3.321897	L51	3.470397	L71	2.708383	L91	2.395737	L111	2.6387
L12	2.599904	L32	3.260142	L52	2.889249	L72	2.947923	L92	3.150353	L112	2.864392
L13	2.705603	L33	3.489864	L53	2.405144	L73	3.562972	L93	2.51529	L113	2.710467
L14	2.463891	L34	3.298019	L54	4.055041	L74	3.008581	L94	2.777673	L114	2.6444
L15	2.771569	L35	3.06988	L55	2.8227	L75	3.072943	L95	2.967646	L115	3.956862
L16	2.292171	L36	2.03932	L56	3.218899	L76	2.947285	L96	2.405144	L116	2.405144
L17	2.777673	L37	3.394188	L57	3.348978	L77	2.463891	L97	2.392593		
L18	2.637987	L38	3.06804	L58	2.94473	L78	3.082726	L98	2.588298		
L19	2.733282	L39	2.393379	L59	3.036598	L79	2.906782	L99	2.733282		
L20	3.470397	L40	2.6444	L60	2.655761	L80	3.06804	L100	2.622964		

ตาราง ก.36 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขี้เถ้า อัตราการไหลของอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	1.856744	L21	2.086752	L41	2.277345	L61	2.168998	L81	1.980332	L101	2.148075	L121	2.777673
L2	1.901805	L22	1.687921	L42	2.03932	L62	1.986973	L82	1.493935	L102	1.577266	L122	2.757274
L3	2.368085	L23	1.963153	L43	2.602798	L63	2.663544	L83	1.795952	L103	2.290528	L123	2.276519
L4	2.262422	L24	2.047608	L44	2.08585	L64	2.351338	L84	2.640839	L104	1.65186	L124	1.722136
L5	1.865843	L25	1.289779	L45	2.042086	L65	2.622964	L85	2.057693	L105	2.017985	L125	1.964112
L6	1.904771	L26	2.716708	L46	2.178521	L66	2.577369	L86	3.158109	L106	1.937099	L126	1.964112
L7	2.457007	L27	2.147199	L47	2.283122	L67	2.161176	L87	2.03285	L107	1.493935	L127	1.595062
L8	2.239012	L28	1.656411	L48	2.338498	L68	2.27321	L88	1.865843	L108	2.382346	L128	1.599774
L9	1.904771	L29	1.779108	L49	1.845561	L69	1.876904	L89	2.290528	L109	2.03932	L129	1.940011
L10	2.481395	L30	2.733282	L50	2.057693	L70	1.917571	L90	2.635132	L110	1.902794	L130	2.899652
L11	2.412176	L31	2.211953	L51	2.533925	L71	1.921493	L91	1.426931	L111	1.986973	L131	2.239012
L12	2.351338	L32	2.047608	L52	2.473039	L72	2.093954	L92	2.351338	L112	2.283122	L132	2.27321
L13	1.666604	L33	1.937099	L53	2.716708	L73	1.856744	L93	1.845561	L113	2.222139	L133	1.605645
L14	1.362159	L34	2.270725	L54	2.51529	L74	3.540188	L94	1.960275	L114	1.997364	L134	2.700033
L15	1.937099	L35	2.089456	L55	1.824023	L75	2.803971	L95	1.876904	L115	2.168998	L135	1.592701
L16	2.822033	L36	1.917571	L56	2.348135	L76	3.167035	L96	2.150702	L116	1.666604	L136	1.786496
L17	2.069547	L37	1.904771	L57	1.362159	L77	1.708973	L97	2.209399	L117	1.624289	L137	2.370468
L18	2.269896	L38	1.416341	L58	2.885991	L78	2.382346	L98	2.216203	L118	1.503978	L138	1.756755
L19	2.262422	L39	1.889893	L59	1.901805	L79	2.093954	L99	2.089456	L119	1.610326	L139	1.862815
L20	1.865843	L40	2.524252	L60	2.283122	L80	2.338498	L100	2.276519	L120	2.395737	L140	1.786496

ตาราง ก.37 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขี้เถ้า อัตราการไหลของอากาศ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	3.444271	L21	5.644399	L41	4.049004	L61	6.019977	L13	5.828434	L33	5.036562	L53	3.128775
L2	4.54145	L22	5.032076	L42	6.262361	L62	4.54145	L14	7.245623	L34	4.505256	L54	4.785579
L3	4.366534	L23	2.533925	L43	7.516886	L63	6.932656	L15	3.754811	L35	3.440444	L55	5.105216
L4	4.846923	L24	3.731686	L44	7.766105	L64	3.484467	L16	6.34861	L36	5.705744	L56	3.742764
L5	4.641859	L25	5.06079	L45	7.300734	L65	7.059348	L17	7.9838	L37	5.337323		
L6	4.315816	L26	6.470744	L46	6.013409	L66	5.054464	L18	6.321579	L38	5.279183		
L7	3.251473	L27	3.864958	L47	5.197275	L67	3.571412	L19	3.877111	L39	5.153642		
L8	2.94473	L28	4.010712	L48	4.060606	L68	3.195429	L20	2.516038	L40	6.211066		
L9	2.297091	L29	5.048877	L49	4.676996	L1	4.418799	L21	4.846535	L41	5.644066		
L10	3.558215	L30	7.427228	L50	5.105216	L2	5.909874	L22	3.928223	L42	4.294836		
L11	4.573245	L31	4.356178	L51	4.462026	L3	3.129377	L23	5.121776	L43	3.143776		
L12	4.749265	L32	6.260257	L52	2.766812	L4	4.480124	L24	5.033946	L44	6.537866		
L13	3.510295	L33	5.463121	L53	3.610715	L5	3.288305	L25	6.084649	L45	2.883381		
L14	3.089433	L34	6.074745	L54	6.517109	L6	3.62424	L26	5.829403	L46	6.01247		
L15	3.558744	L35	2.760684	L55	3.326992	L7	4.154524	L27	6.932385	L47	3.999435		
L16	4.650365	L36	4.664103	L56	2.640839	L8	7.365913	L28	6.748339	L48	5.649398		
L17	2.663544	L37	3.06804	L57	3.865445	L9	5.39902	L29	4.482223	L49	5.350001		
L18	3.693671	L38	5.275974	L58	4.548902	L10	6.510176	L30	7.181973	L50	5.10116		
L19	4.832536	L39	3.865445	L59	4.11081	L11	6.319197	L31	3.379185	L51	4.972639		
L20	5.075642	L40	5.153277	L60	3.26072	L12	5.030954	L32	4.485161	L52	5.093407		

ตาราง ก.38 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขี้เถ้า อัตราการไหลของอากาศ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	2.08585	L21	5.831016	L41	6.932656	L61	3.782773
L2	2.8227	L22	4.60114	L42	5.89457	L62	4.417521
L3	3.380856	L23	4.66612	L43	4.049468	L63	3.497405
L4	3.627873	L24	5.88946	L44	5.768068	L64	5.338733
L5	3.435518	L25	5.337675	L45	5.771981	L65	2.700033
L6	3.571412	L26	4.173505	L46	4.969232	L66	4.294836
L7	3.865445	L27	5.227601	L47	3.681424	L67	4.11081
L8	6.566873	L28	4.911333	L48	5.039923	L68	4.972639
L9	4.418799	L29	4.420927	L49	4.662489	L69	4.11447
L10	4.785579	L30	4.29615	L50	5.526819	L70	5.159117
L11	3.437708	L31	4.305339	L51	4.788724	L71	5.562455
L12	4.662489	L32	4.175758	L52	3.926306		
L13	4.178912	L33	4.417521	L53	5.097838		
L14	4.908267	L34	5.030954	L54	4.254777		
L15	4.233049	L35	4.355746	L55	5.093407		
L16	3.06988	L36	5.22364	L56	6.20106		
L17	5.005078	L37	4.791474	L57	5.905096		
L18	4.437921	L38	3.80806	L58	4.672568		
L19	4.662893	L39	4.301403	L59	4.785579		
L20	3.110074	L40	5.400066	L60	2.733282		

ตาราง ก.39 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขี้เถ้า อัตราการไหลของอากาศ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	3.154532	L21	3.481766	L41	3.453547	L61	3.298019	L81	2.516038	L101	3.470397
L2	2.915185	L22	3.497405	L42	3.64495	L62	2.161176	L82	3.006704	L102	3.516187
L3	2.915185	L23	3.462254	L43	2.768172	L63	2.663544	L83	3.681935	L103	3.444271
L4	2.755226	L24	3.440991	L44	3.591903	L64	3.237553	L84	3.402494	L104	3.689083
L5	3.008581	L25	3.26072	L45	3.463884	L65	3.340539	L85	3.256677	L105	4.055041
L6	2.875539	L26	3.143776	L46	2.399661	L66	2.51529	L86	3.882447	L106	3.06804
L7	2.733282	L27	2.672713	L47	3.746784	L67	2.360125	L87	2.420742	L107	2.803971
L8	3.782773	L28	4.641859	L48	3.006078	L68	2.292171	L88	3.444271	L108	3.380856
L9	3.983878	L29	3.621643	L49	2.854521	L69	2.351338	L89	2.739472	L109	3.26072
L10	3.930618	L30	4.115385	L50	3.685511	L70	2.975878	L90	3.169411	L110	3.453547
L11	3.577204	L31	2.768172	L51	2.996046	L71	3.888743	L91	3.358517		
L12	3.298019	L32	4.261406	L52	3.437708	L72	3.591903	L92	3.06804		
L13	4.165381	L33	2.906782	L53	3.689083	L73	3.188354	L93	4.459494		
L14	3.742261	L34	3.713487	L54	3.825808	L74	2.484426	L94	3.804104		
L15	3.811517	L35	3.394188	L55	2.27321	L75	3.028531	L95	3.621643		
L16	3.744272	L36	3.959239	L56	2.442412	L76	2.947285	L96	3.615923		
L17	3.571412	L37	3.252051	L57	3.011707	L77	3.082726	L97	3.895994		
L18	3.505466	L38	3.158109	L58	3.21129	L78	3.077227	L98	4.14727		
L19	3.308842	L39	3.106442	L59	3.419046	L79	2.785116	L99	3.369146		
L20	3.227656	L40	3.510295	L60	3.320764	L80	3.467142	L100	3.24452		

ทรายและแกลบขนาด 337.5 ไมโครเมตร

ตาราง ก.40 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายแกลบ อัตราการไหลของอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 และ 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	3.693671	L21	2.832682	L4	1.902794	L24	1.856744	L44	2.705603	L1	4.482223
L2	2.093954	L22	2.299548	L5	1.844542	L25	2.884034	L45	3.501707	L2	4.54145
L3	2.208547	L23	2.832682	L6	1.666604	L26	3.320197	L46	3.621643	L3	4.056433
L4	2.089456	L24	3.774306	L7	3.742764	L27	2.884034	L47	2.6387	L4	4.173505
L5	3.077227	L25	3.638232	L8	3.440991	L28	2.841967	L48	2.883381	L5	4.437921
L6	3.803609	L26	1.788602	L9	3.706386	L29	2.828028	L49	3.007956	L6	4.480124
L7	2.649376	L27	2.322348	L10	3.12396	L30	2.516038			L7	3.926786
L8	2.705603	L28	2.466181	L11	1.917571	L31	2.161176			L8	3.388084
L9	1.865843	L29	2.395737	L12	2.112742	L32	1.986973			L9	3.742261
L10	2.334471	L30	3.746784	L13	3.436066	L33	1.956432			L10	4.254777
L11	1.902794	L31	2.249911	L14	3.746784	L34	3.298019			L11	5.06785
L12	2.6387	L32	2.588298	L15	3.379185	L35	1.865843			L12	4.20808
L13	2.761366	L33	2.588298	L16	2.393379	L36	2.893805			L13	5.766763
L14	3.516187	L34	2.083142	L17	2.395737	L37	1.998306			L14	4.383309
L15	3.634092	L35	2.360125	L18	2.270725	L38	2.031924			L15	4.848087
L16	3.379185	L36	3.558215	L19	2.885991	L39	2.277345			L16	4.546419
L17	2.640839	L37	3.030394	L20	2.699336	L40	2.405144			L17	4.366534
L18	3.638232	L1	3.435518	L21	3.835142	L41	2.771569			L18	4.112183
L19	3.562972	L2	2.700033	L22	1.355234	L42	2.453942			L19	3.87274
L20	3.558215	L3	3.008581	L23	1.472365	L43	2.270725			L20	4.908267

ตาราง ก.41 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายแกลบ อัตราการไหลของอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	2.94473	L21	2.51529	L2	2.655761	L22	2.577369	L42	2.147199	L62	2.663544
L2	2.6387	L22	2.699336	L3	2.777673	L23	2.454708	L43	2.08585	L63	2.551686
L3	3.06988	L23	2.76341	L4	2.502539	L24	2.393379	L44	2.209399		
L4	2.640839	L24	2.8227	L5	2.100236	L25	2.845937	L45	2.290528		
L5	2.6444	L25	2.024502	L6	2.344124	L26	2.502539	L46	2.249911		
L6	3.37417	L26	2.760684	L7	2.491234	L27	2.529465	L47	2.395737		
L7	2.893805	L27	2.017985	L8	2.134012	L28	2.405144	L48	2.148075		
L8	3.792213	L28	3.140782	L9	1.964112	L29	2.6387	L49	2.577369		
L9	2.841967	L29	2.331244	L10	1.844542	L30	2.542081	L50	2.824699		
L10	3.562972	L30	3.550273	L11	2.322348	L31	2.344124	L51	2.089456		
L11	3.256677	L31	2.824699	L12	2.11808	L32	2.442412	L52	2.777673		
L12	3.251473	L32	2.6444	L13	1.902794	L33	2.393379	L53	2.6444		
L13	2.6387	L33	2.94473	L14	2.108284	L34	2.516038	L54	1.949687		
L14	3.077227	L34	2.832682	L15	2.290528	L35	2.716708	L55	3.036598		
L15	3.313389	L35	3.794198	L16	2.178521	L36	2.594833	L56	2.822033		
L16	3.072943	L36	2.885991	L17	2.577369	L37	2.420742	L57	2.338498		
L17	2.211953	L37	2.466181	L18	2.8227	L38	2.466181	L58	2.209399		
L18	3.510295	L38	2.883381	L19	1.964112	L39	2.54504	L59	2.8227		
L19	2.338498	L39	2.8227	L20	2.399661	L40	2.233121	L60	2.03285		
L20	2.815357	L1	2.481395	L21	2.828028	L41	1.971762	L61	2.230591		

ตาราง ก.42 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายแกลบ อัตราการไหลของอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	3.393633	L21	1.889893	L41	3.313389	L16	2.336083	L36	3.218899	L56	3.31793
L2	3.315092	L22	3.436066	L42	3.436066	L17	2.945369	L37	3.056364	L57	3.440991
L3	2.270725	L23	3.045879	L43	3.770815	L18	3.134184	L38	2.522014		
L4	2.024502	L24	3.210118	L44	3.76032	L19	3.774306	L39	3.273966		
L5	1.717759	L25	3.671186	L45	3.080894	L20	4.03457	L40	3.571412		
L6	3.006704	L26	4.233049	L1	2.473039	L21	3.681935	L41	2.793885		
L7	2.086752	L27	3.746784	L2	2.6444	L22	3.455181	L42	3.31793		
L8	3.007956	L28	3.689083	L3	2.883381	L23	3.393633	L43	3.994727		
L9	3.273966	L29	3.237553	L4	3.388084	L24	3.869337	L44	3.440444		
L10	2.430827	L30	2.473039	L5	4.307524	L25	2.249911	L45	3.016078		
L11	3.162278	L31	2.442412	L6	4.006487	L26	3.006704	L46	3.577204		
L12	3.21129	L32	3.440991	L7	3.561387	L27	3.627873	L47	3.8263		
L13	4.126801	L33	3.256677	L8	2.620811	L28	3.713487	L48	3.37417		
L14	3.594522	L34	2.991646	L9	2.455475	L29	3.143776	L49	4.193746		
L15	3.388084	L35	3.988127	L10	2.782412	L30	3.610715	L50	3.949722		
L16	3.866905	L36	3.252051	L11	2.551686	L31	3.396405	L51	2.996046		
L17	3.348978	L37	2.828028	L12	3.134184	L32	3.26072	L52	3.188354		
L18	2.640839	L38	3.320764	L13	3.265909	L33	3.621643	L53	4.249023		
L19	4.173505	L39	3.610715	L14	3.06804	L34	3.8263	L54	2.945369		
L20	2.916476	L40	4.233049	L15	3.21129	L35	2.129599	L55	3.671186		

ตาราง ก.43 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายแกลบ อัตราการไหลของอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	2.089456	L21	2.716708	L41	2.086752	L61	2.771569	L81	2.6387	L101	3.06804	L19	2.793885
L2	2.828028	L22	2.588298	L42	2.766812	L62	2.649376	L82	2.622964	L102	2.460834	L20	2.579558
L3	2.761366	L23	2.522014	L43	3.190714	L63	2.716708	L83	3.104018	L1	3.06804	L21	2.885991
L4	2.649376	L24	2.338498	L44	3.035358	L64	2.883381	L84	3.077227	L2	3.251473	L22	2.594833
L5	3.008581	L25	2.100236	L45	3.056364	L65	2.845937	L85	3.252051	L3	3.072943	L23	2.716708
L6	2.768172	L26	2.960663	L46	2.382346	L66	3.288305	L86	3.006704	L4	2.724317	L24	3.006704
L7	3.190714	L27	3.011707	L47	2.351338	L67	2.838655	L87	3.26072	L5	2.360125	L25	2.761366
L8	2.838655	L28	3.150353	L48	2.466181	L68	2.854521	L88	2.864392	L6	2.761366	L26	3.265909
L9	2.594833	L29	3.028531	L49	2.76341	L69	2.899652	L89	2.893805	L7	2.640839	L27	3.51351
L10	3.100378	L30	2.6387	L50	2.620811	L70	2.454708	L90	2.967646	L8	2.589025	L28	3.326992
L11	3.072943	L31	2.518281	L51	2.360125	L71	2.577369	L91	3.077227	L9	3.050818	L29	3.501707
L12	2.705603	L32	3.409677	L52	2.793885	L72	2.395737	L92	2.663544	L10	2.522014	L30	3.134184
L13	2.150702	L33	2.542081	L53	2.883381	L73	2.502539	L93	2.551686	L11	2.705603	L31	2.442412
L14	2.822033	L34	2.360125	L54	2.724317	L74	2.533925	L94	2.502539	L12	2.620811	L32	2.824699
L15	2.967646	L35	2.640839	L55	2.51529	L75	2.370468	L95	2.583203	L13	2.473039	L33	2.967646
L16	2.766812	L36	2.663544	L56	2.69515	L76	2.875539	L96	2.147199	L14	2.542081	L34	3.143776
L17	2.576639	L37	3.227656	L57	2.947923	L77	2.469993	L97	2.393379	L15	3.228822	L35	2.854521
L18	2.527232	L38	2.824699	L58	2.782412	L78	2.854521	L98	2.705603	L16	2.832682	L36	2.803971
L19	2.588298	L39	2.965109	L59	2.216203	L79	3.13118	L99	2.454708	L17	2.777673	L37	3.26072
L20	2.640839	L40	3.080894	L60	2.950476	L80	2.854521	L100	2.460834	L18	2.710467	L38	2.6444

ตาราง ก.44 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายแกลบ อัตราการไหลของอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	1.978431	L21	2.024502	L41	2.089456	L19	1.868866	L39	2.11808	L59	2.096649
L2	1.844542	L22	2.269896	L42	2.150702	L20	1.901805	L40	1.980332	L60	1.804315
L3	1.849636	L23	2.161176	L1	2.444722	L21	1.901805	L41	2.134012	L61	1.925406
L4	2.047608	L24	1.865843	L2	2.283122	L22	2.086752	L42	2.024502	L62	2.024502
L5	2.089456	L25	2.086752	L3	1.963153	L23	2.168131	L43	2.047608	L63	1.735199
L6	1.840456	L26	2.27321	L4	2.047608	L24	1.997364	L44	2.03932	L64	1.845561
L7	1.925406	L27	2.332052	L5	2.211953	L25	1.980332	L45	2.168998	L65	2.057693
L8	1.844542	L28	2.229747	L6	2.192298	L26	2.083142	L46	2.083142	L66	1.856744
L9	2.147199	L29	2.028216	L7	2.142812	L27	1.727591	L47	2.233121	L67	2.024502
L10	1.964112	L30	1.841478	L8	2.269896	L28	1.722136	L48	1.841478	L68	1.657546
L11	2.161176	L31	2.216203	L9	2.028216	L29	2.093954	L49	2.03932	L69	2.025431
L12	1.902794	L32	2.270725	L10	1.971762	L30	2.083142	L50	2.168998	L70	2.024502
L13	1.986973	L33	2.392593	L11	1.998306	L31	1.816787	L51	2.03932	L71	1.902794
L14	2.03932	L34	2.334471	L12	2.269896	L32	1.788602	L52	2.03932	L72	2.147199
L15	1.960275	L35	2.262422	L13	1.986973	L33	1.727591	L53	1.964112	L73	2.108284
L16	2.086752	L36	2.351338	L14	2.118968	L34	1.902794	L54	2.174198	L74	2.03285
L17	1.840456	L37	2.679745	L15	2.208547	L35	2.057693	L55	1.795952	L75	1.904771
L18	2.277345	L38	1.964112	L16	1.925406	L36	2.098443	L56	2.096649		
L19	2.269896	L39	1.849636	L17	1.960275	L37	2.03932	L57	1.595062		
L20	2.028216	L40	1.718854	L18	1.920513	L38	1.856744	L58	1.816787		

ตาราง ก. 45 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารบ่อนผสมทรายแกลบ อัตราการไหลของอากาศ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	4.795007	L21	2.430827	L41	3.435518	L5	2.309347	L25	3.93827	L45	4.584752
L2	3.260142	L22	3.742261	L42	2.760684	L6	4.07864	L26	3.288305	L46	3.627873
L3	3.401388	L23	2.76341	L43	2.93577	L7	3.383081	L27	4.347097	L47	3.072943
L4	3.435518	L24	2.27321	L44	5.337675	L8	3.523137	L28	4.627242	L48	3.437708
L5	4.286503	L25	3.008581	L45	5.416767	L9	4.539792	L29	3.827775	L49	3.80806
L6	3.621643	L26	3.150353	L46	4.543521	L10	3.988127	L30	3.705878	L50	3.671186
L7	3.988127	L27	3.313389	L47	3.279709	L11	3.571412	L31	5.509427	L51	3.926306
L8	4.417521	L28	3.37417	L48	2.854521	L12	4.423906	L32	4.908267	L52	2.873575
L9	3.128775	L29	3.143776	L49	2.588298	L13	4.423906	L33	4.602776	L53	3.913344
L10	3.436066	L30	2.576639	L50	5.555346	L14	3.307136	L34	3.744272	L54	3.429488
L11	5.482033	L31	2.594833	L51	4.355746	L15	5.401808	L35	5.448634		
L12	5.649398	L32	2.620811	L52	3.561387	L16	4.852743	L36	4.359633		
L13	3.337721	L33	2.399661	L53	3.435518	L17	4.550143	L37	4.480124		
L14	3.449185	L34	3.106442	L54	3.200724	L18	5.176595	L38	4.060606		
L15	4.92205	L35	2.262422	L55	3.584036	L19	4.969232	L39	3.436066		
L16	5.153277	L36	2.8227	L56	3.813985	L20	5.677309	L40	4.730207		
L17	3.884869	L37	3.632538	L1	3.995198	L21	4.999812	L41	3.928223		
L18	3.437708	L38	3.190714	L2	2.697243	L22	4.132725	L42	5.216069		
L19	4.407712	L39	3.379185	L3	2.491234	L23	5.114055	L43	5.2952		
L20	2.649376	L40	3.082726	L4	2.885991	L24	2.883381	L44	5.097838		

ตาราง ก.46 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายแกลบ อัตราการไหลของอากาศ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	2.61218	L21	2.604244	L41	3.380856	L61	3.143776	L81	2.583203	L5	3.388084	L25	2.583203
L2	2.430827	L22	2.344124	L42	3.224156	L62	3.089433	L82	3.540188	L6	3.006704	L26	2.832682
L3	2.8227	L23	2.310161	L43	3.016078	L63	2.700033	L83	3.409677	L7	2.832682	L27	3.444271
L4	2.841967	L24	2.576639	L44	3.13118	L64	3.167035	L84	2.889249	L8	4.420927	L28	3.64495
L5	2.640839	L25	2.771569	L45	3.089433	L65	2.6444	L85	3.648046	L9	3.501707	L29	2.985349
L6	2.594833	L26	2.947923	L46	3.021065	L66	2.906782	L86	2.899652	L10	4.371272	L30	3.129377
L7	2.405927	L27	2.473039	L47	2.94473	L67	3.13118	L87	3.036598	L11	3.190124	L31	3.21129
L8	2.290528	L28	2.822033	L48	3.045879	L68	2.705603	L88	2.841967	L12	3.509222	L32	3.693671
L9	2.442412	L29	2.947285	L49	3.202488	L69	2.386293	L89	3.06804	L13	3.742261	L33	3.804104
L10	2.635132	L30	2.463891	L50	2.589025	L70	2.351338	L90	3.016078	L14	3.600799	L34	3.338849
L11	2.768172	L31	3.312821	L51	2.975878	L71	3.106442	L91	3.422347	L15	4.03457	L35	3.436066
L12	2.845937	L32	2.637987	L52	2.947923	L72	3.006704	L92	3.190124	L16	3.827775	L36	3.501169
L13	2.460834	L33	2.828028	L53	2.54504	L73	2.887946	L93	2.884034	L17	3.31793	L37	3.218899
L14	2.351338	L34	2.901598	L54	3.011707	L74	2.857156	L94	3.053284	L18	2.533925	L38	3.562972
L15	2.699336	L35	3.143776	L55	2.722935	L75	3.085167	L95	3.218899	L19	2.577369	L39	2.551686
L16	2.822033	L36	3.06804	L56	2.610018	L76	3.082726	L96	3.154532	L20	2.950476	L40	2.705603
L17	2.699336	L37	3.200724	L57	2.663544	L77	2.864392	L1	2.996674	L21	2.588298	L41	3.195429
L18	2.845937	L38	2.996674	L58	3.379185	L78	3.126369	L2	3.505466	L22	2.755226	L42	3.143776
L19	2.392593	L39	3.379185	L59	3.228822	L79	3.272242	L3	3.440991	L23	3.006704	L43	3.077227
L20	2.269896	L40	3.138384	L60	2.761366	L80	2.961298	L4	3.067427	L24	2.761366	L44	3.252051

ตาราง ก.47 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายแกลบ อัตราการไหลของอากาศ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	2.192298	L21	2.024502	L41	1.564087
L2	2.057693	L22	1.917571	L42	1.727591
L3	2.057693	L23	1.795952	L43	1.701247
L4	2.024502	L24	2.093954	L44	2.142812
L5	2.089456	L25	1.978431	L45	1.820925
L6	2.229747	L26	2.056778	L46	1.876904
L7	2.178521	L27	2.03932	L47	1.844542
L8	2.009574	L28	2.393379	L48	2.024502
L9	2.083142	L29	1.917571	L49	1.910689
L10	2.03285	L30	1.926383	L50	2.028216
L11	1.997364	L31	1.492674	L51	1.804315
L12	2.11808	L32	1.917571	L52	2.028216
L13	2.161176	L33	1.717759	L53	2.086752
L14	2.208547	L34	1.971762	L54	1.711173
L15	2.005825	L35	1.830203	L55	1.812639
L16	1.902794	L36	1.722136	L56	1.966984
L17	2.075903	L37	1.636983	L57	1.844542
L18	2.03932	L38	1.599774	L58	2.150702
L19	1.986973	L39	1.684573		
L20	2.023572	L40	1.805357		

ทรายและขาน้อยขนาด 337.5 ไมโครเมตร

ตาราง ก.48 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขาน้อย อัตราการไหลของอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 และ 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	2.722935	L2	2.53184	L22	2.121258	L1	1.921493	L21	1.971762	L41	2.056778	L61	1.889893
L2	2.774284	L3	2.213462	L23	2.403285	L2	1.533713	L22	1.668861	L42	1.849636	L1	2.276519
L3	2.785116	L4	1.985726	L24	2.230465	L3	1.289779	L23	2.023572	L43	2.129599	L2	2.484426
L4	2.577369	L5	2.340621	L25	2.051627	L4	1.515197	L24	1.666604	L44	2.098443	L3	2.229747
L5	2.481395	L6	2.225468	L26	2.222482	L5	1.780165	L25	2.208547	L45	1.997364	L4	2.351338
L6	3.006704	L7	2.604381	L27	2.340425	L6	1.472365	L26	1.788602	L46	2.192298	L5	2.410615
L7	2.209399	L8	2.115329	L28	2.591624	L7	1.881911	L27	1.824023	L47	1.910689	L6	1.921493
L8	2.100236	L9	2.438726	L29	2.414236	L8	1.668861	L28	1.783334	L48	1.624289	L7	1.862815
L9	2.189722	L10	2.59387	L30	2.353627	L9	2.140176	L29	1.727591	L49	1.845561	L8	1.925406
L10	2.430827	L11	2.447621			L10	1.862815	L30	2.005825	L50	1.937099	L9	2.025431
L11	2.168131	L12	2.29413			L11	2.369674	L31	1.687921	L51	1.795952	L10	1.949687
L12	2.455475	L13	2.370285			L12	1.986973	L32	1.783334	L52	2.108284	L11	1.371795
L13	2.602798	L14	2.021956			L13	1.940011	L33	2.115413	L53	1.986973	L12	1.264733
L14	2.588298	L15	2.414362			L14	2.025431	L34	1.902794	L54	2.089456	L13	2.030998
L15	1.756755	L16	2.304873			L15	1.805357	L35	2.192298	L55	2.098443	L14	1.660949
L16	2.771569	L17	2.262645			L16	1.783334	L36	2.154199	L56	2.209399	L15	1.674489
L17	2.057693	L18	2.451628			L17	2.03932	L37	1.980332	L57	2.283122	L16	1.998306
L18	2.518281	L19	2.316927			L18	1.636983	L38	1.949687	L58	2.023572	L17	2.098443
L19	2.194872	L20	2.32			L19	1.770626	L39	2.056778	L59	2.292171	L18	1.65186
L1	2.124537	L21	2.342156			L20	1.920513	L40	2.199155	L60	2.009574	L19	1.783334

ตาราง ก.49 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขาน้อย อัตราการไหลของอากาศ 300 และ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length
L1	2.11808	L21	1.75426	L14	1.78963	L34	1.596	L1	2.025431	L8	1.458238
L2	1.65186	L22	1.94567	L15	1.82465	L35	1.7523	L2	1.971762	L9	1.674489
L3	1.517679	L23	2.00124	L16	1.45679	L36	1.538792	L3	1.966984	L10	1.684573
L4	1.72465	L24	1.854213	L17	1.94568		1.758339	L4	1.917571	L11	1.613828
L5	1.697825	L25	2.03145	L18	1.56243			L5	2.161176	L12	1.889893
L6	1.88846	L26	1.7	L19	1.84238			L6	1.849636	L13	1.711173
L7	1.7538	L27	1.6842	L20	1.92154			L7	1.727591	L14	1.592701
L8	1.926743	L1	1.411016	L21	2.0011			L8	1.966984	L15	1.844542
L9	1.84235	L2	1.5246	L22	1.95468			L9	2.155072	L16	1.696817
L10	1.6456	L3	1.623456	L23	1.84237			L10	2.11808	L17	1.657546
L11	1.55982	L4	1.72153	L24	1.82435			L11	2.161176	L18	1.717759
L12	1.65798	L5	1.812345	L25	1.75643			L12	2.277345		1.850939
L13	1.76842	L6	1.61249	L26	1.82465			L13	2.270725		
L14	1.64648	L7	1.7325	L27	1.72689			L1	1.786496		
L15	1.576231	L8	1.93256	L28	1.65429			L2	1.997364		
L16	1.62135	L9	1.6234	L29	1.9			L3	1.840456		
L17	1.712548	L10	1.8469	L30	1.87269			L4	1.544717		
L18	1.92547	L11	1.8326	L31	1.65656			L5	1.718854		
L19	1.82431	L12	1.49856	L32	1.72347			L6	1.362159		
L20	1.95462	L13	1.82645	L33	1.824			L7	2.017985		

ตาราง ก.50 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขี้เถ้า อัตราการไหลของอากาศ 350 และ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 30 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	2.947285	L21	3.026666	L41	3.904197	L15	3.864958	L1	2.663544	L21	3.006078	L3	2.61218
L2	3.888743	L22	3.437708	L42	3.869337	L16	3.866905	L2	2.430827	L22	3.082726	L4	2.249911
L3	3.869337	L23	3.571412	L43	4.175758	L17	4.095675	L3	3.006078	L23	3.516187	L5	3.87274
L4	4.053184	L24	3.435518	L44	4.110352	L18	3.988127	L4	4.212103	L24	3.158109	L6	4.18701
L5	3.37417	L25	3.006704	L45	3.779787	L19	4.074023	L5	2.360125	L25	3.501169	L7	4.355746
L6	2.148075	L26	3.308842	L46	4.187908	L20	3.523137	L6	2.481395	L26	3.681424	L8	3.928223
L7	2.760684	L27	3.62424	L1	2.392593	L21	3.620084	L7	2.580288	L27	4.482223	L9	4.240156
L8	3.362997	L28	3.53114	L2	3.497405	L22	2.996046	L8	4.676996	L28	3.947815	L10	3.620084
L9	3.8263	L29	2.602798	L3	2.009574	L23	3.86301	L9	4.095675	L29	4.560058	L11	3.54603
L10	2.516038	L30	2.202575	L4	2.344124	L24	3.510295	L10	4.389744	L30	4.650365	L12	3.558744
L11	2.150702	L31	2.6387	L5	2.270725	L25	3.895994	L11	4.234827	L31	3.313389	L13	2.985349
L12	2.222139	L32	3.600799	L6	3.072943		3.319734	L12	2.875539	L32	2.932563	L14	3.106442
L13	2.047608	L33	3.689083	L7	4.017744			L13	3.129377	L33	3.995198	L15	4.021489
L14	2.910017	L34	2.94473	L8	3.634092			L14	3.006078	L34	3.722092	L16	2.290528
L15	3.463884	L35	2.518281	L9	3.713487			L15	2.655761	L35	4.117671	L17	3.106442
L16	3.779787	L36	2.269896	L10	3.742261			L16	2.331244	L36	3.742764	L18	4.165381
L17	3.435518	L37	3.056364	L11	4.11447			L17	2.6387	L37	3.462254	L19	4.611354
L18	3.496867	L38	2.395737	L12	3.964939			L18	2.529465	L38	3.523137	L20	3.006704
L19	3.181855	L39	3.744272	L13	3.811517			L19	2.290528	L1	3.821379	L21	2.310161
L20	3.158109	L40	3.874198	L14	2.716708			L20	3.312821	L2	2.522014	L22	4.044353

ตาราง ก.51 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขนาดย่อย อัตราการไหลของอากาศ 350 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	2.575178	L21	2.147199	L41	2.331244	L61	2.370468	L81	1.978431	L101	2.209399	L10	2.716708
L2	2.277345	L22	2.283122	L42	2.76341	L62	3.272242	L82	1.841478	L102	2.828028	L11	2.901598
L3	1.824023	L23	2.148075	L43	2.518281	L63	2.51529	L83	2.174198	L103	2.527232	L12	2.929995
L4	1.902794	L24	2.093954	L44	2.527232	L64	2.332052	L84	2.51529	L104	2.454708	L13	3.256677
L5	2.576639	L25	2.216203	L45	2.100236	L65	2.457007	L85	2.420742	L105	2.793885	L14	2.270725
L6	2.594833	L26	2.51529	L46	2.899652	L66	2.580288	L86	2.211953	L106	2.916476	L15	1.963153
L7	2.536152	L27	2.351338	L47	3.006704	L67	2.382346	L87	2.579558	L107	2.392593	L16	1.619648
L8	2.370468	L28	2.129599	L48	2.51529	L68	2.473039	L88	2.277345	L108	2.322348	L17	2.985349
L9	2.161176	L29	2.03932	L49	2.395737	L69	2.393379	L89	2.089456	L109	2.336083	L18	2.69515
L10	1.779108	L30	1.964112	L50	2.533925	L70	2.089456	L90	2.277345	L110	2.03285	L19	1.980332
L11	1.630071	L31	2.222139	L51	2.457007	L71	2.27321	L91	2.883381	L111	1.910689	L20	2.222139
L12	1.783334	L32	2.222139	L52	2.51529	L72	2.208547	L92	2.527232	L1	2.089456	L21	2.577369
L13	2.089456	L33	2.269896	L53	2.655761	L73	2.575178	L93	2.175928	L2	1.986973	L22	2.760684
L14	2.399661	L34	1.917571	L54	2.576639	L74	2.430827	L94	2.392593	L3	2.209399	L23	2.622964
L15	2.025431	L35	2.189722	L55	2.208547	L75	3.028531	L95	2.602798	L4	2.209399	L24	2.457007
L16	2.27321	L36	2.161176	L56	2.522014	L76	2.947285	L96	2.331244	L5	2.03932	L25	2.51529
L17	2.057693	L37	2.057693	L57	2.332052	L77	2.222139	L97	2.338498	L6	2.583203	L26	2.322348
L18	2.283122	L38	2.322348	L58	2.126946	L78	2.393379	L98	2.649376	L7	2.583203	L27	2.620811
L19	1.978431	L39	2.453942	L59	2.334471	L79	1.722136	L99	2.426953	L8	2.412176	L28	2.6444
L20	2.147199	L40	2.69515	L60	2.393379	L80	1.841478	L100	2.724317	L9	1.978431	L29	2.533925

ตาราง ก.52 ความยาวของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของสารป้อนผสมทรายขนาดน้อย อัตราการไหลของอากาศ 400 ลิตรต่อนาที ที่ความสูง 80 และ 130 ซม.

Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length	Features	Length		
L1	1.926383	L21	2.620811	L41	2.575178	L14	2.360923	L34	1.630071	L1	1.289779	L21	1.949687
L2	2.838655	L22	1.816787	L42	2.216203	L15	3.158109	L35	2.824699	L2	1.722136	L22	1.345478
L3	2.147199	L23	2.189722	L43	2.410615	L16	2.51529	L36	2.906782	L3	1.53494	L1	1.477468
L4	3.566667	L24	2.11808	L44	2.118968	L17	2.663544	L37	1.432196	L4	2.216203	L2	1.722136
L5	2.222139	L25	2.733282	L45	2.229747	L18	1.949687	L38	1.538614	L5	1.327172	L3	2.108284
L6	2.276519	L26	2.69515	L46	1.841478	L19	2.192298	2.363714	L6	1.718854	L4	1.289779	
L7	2.924852	L27	2.292171	L47	2.262422	L20	2.838655		L7	1.610326	L5	1.544717	
L8	1.595062	L28	2.310161	L1	3.195429	L21	1.674489		L8	1.966984	L6	1.971762	
L9	3.437708	L29	2.155072	L2	1.910689	L22	1.844542		L9	1.412349	L7	1.849636	
L10	2.27321	L30	2.222139	L3	2.454708	L23	2.485941		L10	1.666604	L8	1.595062	
L11	3.017949	L31	2.405144	L4	2.51529	L24	2.954937		L11	1.483823	L9	1.660949	
L12	3.06988	L32	2.761366	L5	1.718854	L25	1.849636		L12	1.345478	L10	1.717759	
L13	1.844542	L33	2.332052	L6	2.74359	L26	2.679745		L13	1.538614	L11	1.744932	
L14	1.901805	L34	2.395737	L7	2.442412	L27	2.481395		L14	2.283122	L12	1.910689	
L15	2.168998	L35	2.785116	L8	2.161176	L28	2.453942		L15	2.061347	L13	1.474919	
L16	2.331244	L36	2.351338	L9	2.405144	L29	2.168998		L16	1.412349	L14	1.567692	
L17	2.518281	L37	2.577369	L10	2.527232	L30	2.766812		L17	1.349668	L15	1.321488	
L18	2.527232	L38	2.192298	L11	2.089456	L31	2.336083		L18	1.544717	L16	1.841478	
L19	2.115413	L39	2.392593	L12	2.442412	L32	2.178521		L19	1.538614	L17	2.148075	
L20	2.453942	L40	1.675613	L13	2.410615	L33	2.178521		L20	1.901805	L18	1.735199	

5. สมบัติทางกายภาพของวัสดุดิบ

ตารางที่ ก.53 แสดงสมบัติทางกายภาพของสารป้อนแต่ละชนิด

Characteristics	Sand	Saw Dust	Rice Husk	Bagasse	Sand+Saw Dust	Sand+Rice Husk	Sand+Bagasse
Particle size range (μm)	250 - 425	250 - 425	250 - 425	250 - 425	250 - 425	250 - 425	250 - 425
Mean diameter (μm)	337.5	337.5	337.5	337.5	337.5	337.5	337.5
Solid density (kg/m ³)	2312.9	1583.4	1484.5	630.9	2262.78	2118.81	2106.43
Bulk density (kg/m ³)	1401	333.1	375.8	75.8	1120.3	1073.6	800.6
Particle terminal velocity (m/s)	2.435	1.892	1.812	1.024	2.4	2.297	2.288
Minimum fluidization velocity (m/s)	0.0935	0.0647	0.0607	0.0261	0.0916	0.0859	0.0854
Geldart classification group	B	B	B	A/B	B	B	A/B
Archimedes number	2613	1788	1677	712	2556	2393	2379
Particle Shape	Compact grains	Spherical granulates	Irregular plates	Short fiber	-	-	-

ภาคผนวก ข

1. ผลการหาสัดส่วนของแข็ง จากความดัน

นำข้อมูลความดัน(ตาราง ก.4 - ก.20) มาคำนวณหาสัดส่วนของแข็งได้สัดส่วนของแข็ง ณ ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ดังนี้

-ทราย

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s		
			4.2 m/s	4.9 m/s	5.7 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.0700	0.1060	0.1300
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0160	0.0460	0.0760
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0070	0.0040	0.0050
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.008	0.0030	0.0011
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.005	0.0030	0.0022
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.002	0.0020	0.0022

ตาราง ข.1 สัดส่วนของแข็งด้านโรเตอร์ของทรายกับที่Gs 10.18, 14.96 และ 20.95 กิโลกรัม ต่อตารางเมตรต่อวินาที

-ทรายกับขี้เถ้า

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s				
			4.2 m/s	4.5 m/s	4.8 m/s	5.1 m/s	5.4 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1405	0.0085	0.0055	0.0066	0.0086
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0074	0.0059	0.0075	0.0021	0.0010
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0037	0.0026	0.0050	0.0046	0.0008
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0015	0.0030	0.0018	0.0021	0.0029
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0058	0.0007	0.0036	0.0031	0.0031
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0063	0.0038	0.0036	0.0025	0.0039

ตาราง ข.2 สัดส่วนของแข็งด้านโรเตอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เถ้าที่Gs 5.5 กิโลกรัม ต่อตารางเมตรต่อวินาที

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s				
			4.5 m/s	4.8 m/s	5.1 m/s	5.4 m/s	5.7 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1429	0.0281	0.0177	0.0196	0.0089
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0179	0.0032	0.0032	0.0120	0.0086
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0062	0.0048	0.0030	0.0026	0.0033
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0014	0.0040	0.0042	0.0031	0.0027
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0009	0.0024	0.0041	0.0068	0.0047
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0071	0.0065	0.0066	0.0055	0.0016

ตาราง ข.3 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่Gs 9.1 กิโลกรัม
ต่อตารางเมตรต่อวินาที

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s			
			4.8 m/s	5.1 m/s	5.4 m/s	5.7 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1095	0.0257	0.0424	0.0289
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0040	0.0039	0.0040	0.0078
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0042	0.0073	0.0074	0.0081
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0067	0.0057	0.0046	0.0031
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0063	0.0043	0.0036	0.0028
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0058	0.0068	0.0073	0.0080

ตาราง ข.4 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ที่Gs 11.6 กิโลกรัม
ต่อตารางเมตรต่อวินาที

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s			
			5.1 m/s	5.4 m/s	5.7 m/s	5.9 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1211	0.0207	0.0298	0.0168
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0333	0.0155	0.0153	0.0141
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0094	0.0090	0.0085	0.0049
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0043	0.0042	0.0096	0.0091
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0032	0.0040	0.0160	0.0161
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0057	0.0094	0.0128	0.0149

ตาราง ข.5 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เถ้าที่Gs14.9 กิโลกรัม
ต่อตารางเมตรต่อวินาที

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s			
			5.4 m/s	5.7 m/s	5.9 m/s	6.2 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1124	0.0548	0.0471	0.0374
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0481	0.0448	0.0355	0.0364
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0129	0.0043	0.0046	0.0029
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0143	0.0123	0.0138	0.0092
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0099	0.0051	0.0035	0.0035
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0085	0.0093	0.0091	0.0080

ตาราง ข.6 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขี้เถ้าที่Gs18.7 กิโลกรัม
ต่อตารางเมตรต่อวินาที

-ทรายกับแกลบ

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s			
			4.8 m/s	5.1 m/s	5.4 m/s	5.7 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1613	0.0835	0.0607	0.0340
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0195	0.0346	0.0199	0.0160
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0105	0.0074	0.0052	0.0034
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0107	0.0066	0.0143	0.0115
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0030	0.0056	0.0079	0.0060
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0006	0.0015	0.0012	0.0011

ตาราง ข.7 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่Gs 0.8 กิโลกรัม
ต่อตารางเมตรต่อวินาที

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s			
			5.1 m/s	5.4 m/s	5.7 m/s	5.9 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1115	0.0106	0.0230	0.0119
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0187	0.0201	0.0212	0.0061
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0110	0.0137	0.0055	0.0045
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0080	0.0051	0.0049	0.0049
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0043	0.0048	0.0061	0.0010
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0024	0.0013	0.0027	0.0011

ตาราง ข.8 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่Gs 1.8 กิโลกรัม
ต่อตารางเมตรต่อวินาที

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s			
			5.4 m/s	5.7 m/s	5.9 m/s	6.2 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1191	0.0268	0.0101	0.0042
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0186	0.0150	0.0084	0.0029
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0106	0.0077	0.0028	0.0011
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0022	0.0053	0.0041	0.0012
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0084	0.0068	0.0009	0.0007
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0026	0.0009	0.0013	0.0005

ตาราง ข.9 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่Gs 3.1 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s			
			5.7 m/s	5.9 m/s	6.2 m/s	6.5 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1320	0.0285	0.0198	0.0201
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0186	0.0090	0.0109	0.0113
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0042	0.0022	0.0025	0.0036
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0031	0.0057	0.0016	0.0028
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0039	0.0019	0.0019	0.0017
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0026	0.0043	0.0033	0.0025

ตาราง ข.10 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่Gs 12.9 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s			
			5.9 m/s	6.2 m/s	6.5 m/s	6.8 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1414	0.1045	0.0734	0.0495
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0353	0.0198	0.0123	0.0269
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0156	0.0064	0.0141	0.0061
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0054	0.0064	0.0043	0.0048
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0077	0.0045	0.0039	0.0017
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0070	0.0062	0.0062	0.0049

ตาราง ข.11 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบที่
Gs18.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที

-ทรายผสมขาน้อย

position	ΔL (m.)	Cumulative height (m.)	ϵ_s				
			4.5 m/s	4.8 m/s	5.1 m/s	5.4 m/s	5.7 m/s
P ₂ -P ₃	0.05	0.05	0.1158	0.0598	0.0555	0.0308	0.0171
P ₃ -P ₄	0.10	0.15	0.0153	0.0179	0.0211	0.0153	0.0060
P ₄ -P ₅	0.20	0.35	0.0070	0.0079	0.0085	0.0093	0.0045
P ₅ -P ₆	0.20	0.55	0.0021	0.0036	0.0037	0.0064	0.0012
P ₆ -P ₇	0.40	0.95	0.0005	0.0008	0.0009	0.0022	0.0005
P ₇ -P ₈	0.90	1.85	0.0001	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003

ตาราง ข.12 สัดส่วนของแข็งด้านไรเซอร์ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขาน้อย

2. ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้

- ทราย

จากตาราง ก.21-ก.51 นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยของความยาวเส้น

ตำแหน่ง ซม.	ความยาวเฉลี่ย(มม.)		
	อัตราการใช้ของอากาศ(ลิตรต่อนาที)		
	300	350	400
30	5.9187	5.74203	6.935389
80	4.519637	4.554202	5.467892
130	3.73378	4.16912	4.886136

ตาราง ข.13 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับทราย

-ทรายผสมซี่เดี่ยว

ตำแหน่ง ซม.	ความยาวเฉลี่ย(มม.)		
	อัตราการใช้ของอากาศ(ลิตรต่อนาที)		
	300	350	400
30	2.409509	3.290561	4.798103
80	2.147341	2.861741	4.55124
130	1.82735	2.099292	3.299185

ตาราง ข.14 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับสวารป้อนผสมระหว่างทรายกับซี่เดี่ยว

-ทรายผสมแกลบ

ตำแหน่ง ซม.	ความยาวเฉลี่ย(มม.)		
	อัตราการใช้ของอากาศ(ลิตรต่อนาที)		
	300	350	400
30	2.72841	3.253116	3.835863
80	4.31818	2.792718	3.012012
130	2.588774	2.033328	1.94904

ตาราง ข.15 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับสวารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบ

-อนุภาคทรายผสมซันอ้อย

ตำแหน่ง ซม.	ความยาวเฉลี่ย(มม.)		
	อัตราการไหลของอากาศ(ลิตรต่อนาที)		
	300	350	400
30	2.36411	3.31973	3.453199
80	1.920934	2.369334	2.36371
130	1.75834	1.850939	1.675146

ตาราง ข.16 ผลการหาค่าเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้ สำหรับสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซันอ้อย

3. ผลการหาความเร็วของอนุภาค จากความยาวเส้นเฉลี่ยที่ลากได้

นำค่าเฉลี่ยของความยาวเส้น(ตาราง ข.12- ข.15) มาคำนวณหาความเร็วของแข็ง จะได้ความเร็วของแข็ง ณ ตำแหน่งต่างๆของโรเตอร์ดังนี้

-ทราย

ตำแหน่ง ซม.	ความเร็วเฉลี่ย(เมตรต่อวินาที)		
	อัตราการไหลของอากาศ(ลิตรต่อนาที)		
	300	350	400
30	0.710244	1.435508	1.733847
80	0.542356	1.138551	1.366973
130	0.448054	1.04228	1.221534

ตาราง ข.17 ผลความเร็วเฉลี่ยของทราย

-ทรายผสมซีเมนต์

ตำแหน่ง ซม.	ความยาวเฉลี่ย(เมตรต่อวินาที)		
	อัตราการไหลของอากาศ(ลิตรต่อนาที)		
	300	350	400
30	1.204755	1.645281	2.399052
80	1.073671	1.430871	2.27562
130	0.913675	1.049646	1.649593

ตาราง ข.18 ผลความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์

-ทรายผสมแกลบ

ตำแหน่ง ซม.	ความยาวเฉลี่ย(เมตรต่อวินาที)		
	อัตราการไหลของอากาศ(ลิตรต่อนาที)		
	300	350	400
30	1.364205	1.626558	1.917932
80	1.079545	1.396359	1.506006
130	0.647194	1.016664	0.97452

ตาราง ข.19 ผลความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับแกลบ

-ทรายผสมขาน้อย

ตำแหน่ง ซม.	ความยาวเฉลี่ย(เมตรต่อวินาที)		
	อัตราการไหลของอากาศ(ลิตรต่อนาที)		
	300	350	400
30	1.182055	1.659865	1.7266
80	0.960467	1.184667	1.181855
130	0.87917	0.92547	0.837573

ตาราง ข.20 ผลความเร็วเฉลี่ยของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับขาน้อย

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณความหนาแน่นบัลค์ของเบต ความหนาแน่นของทราย

จากข้อมูลการทดลองครั้งที่ 1 แสดงในตารางภาคผนวก ก. 1

$$\begin{aligned}\text{ความหนาแน่นบัลค์}(\rho_b) &= \text{น้ำหนักทราย} / \text{ปริมาตรภาชนะบรรจุ} \\ &= (383.13 - 103.06) / 200 \\ &= 1.4004 \text{ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร} \\ &= 1,400.4 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}\end{aligned}$$

เนื่องจากความหนาแน่นน้ำมากกว่าอากาศมาก(ความหนาแน่นน้ำและอากาศเท่ากับ 1000 และ 1 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ) ดังนั้นน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นจึงให้เป็นน้ำหนักน้ำที่แทนที่อากาศทั้งหมดในเบต

น้ำหนักของน้ำที่แทนที่อากาศเท่ากับ $462.1 - 383.13$ เท่ากับ 78.97 กรัม

$$\begin{aligned}\text{ดังนั้นทราย } 280.07 \text{ กรัม จะมีปริมาตร} &= 200 - 78.97 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร} \\ &= 121.03 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จะได้ความหนาแน่นทราย}(\rho_s) &= (280.07/1000) \text{ กิโลกรัม}/(121.03/10^6) \text{ ลูกบาศก์เมตร} \\ &= 2,314.05 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}\end{aligned}$$

จากข้อมูลการทดลองครั้งที่ 2 ความหนาแน่นทรายมีค่าเท่ากับ 2,311.78 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ดังนั้น ความหนาแน่นเฉลี่ยของทรายมีค่าเท่ากับ 2,312.91 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2. การคำนวณหาอัตราการใช้ของแข็งเข้าสู่ไรเซอร์ผ่านแอลวาล์ว

จากข้อมูลในตาราง ก.2 ที่อัตราการไหลของอากาศ 300 ลิตรต่อนาที ของสารป้อนผสมระหว่างทรายกับซีเมนต์ ครั้งที่ 1

โดยท่อแอลวาล์วมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 0.034 เมตร

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

$$\text{ดังนั้น แอลวาล์วมีพื้นที่หน้าตัด} = \pi(0.034)^2/4$$

$$= 9.08 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}$$

$$\text{จะได้ อัตราการใช้ของแข็งของสารป้อนผสม} = (51.18/1000)/(9.08 \times 10^{-4} \times 10.33)$$

$$= 5.45 \text{ กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที}$$

3. การแปลงค่าอัตราการไหลของอากาศที่ป้อนจากหน่วย ลิตรต่อนาที เป็น ความเร็วอากาศ (U_g)

$$\text{ที่อัตราการไหลของอากาศ} = 400 \text{ ลิตรต่อนาที}$$

$$\text{จากสมการความสัมพันธ์รูปที่ ก1. } y = 0.0141x + 0.0127$$

$$\text{ได้ว่า ความเร็วอากาศ} = 0.0141 \times 400 + 0.0127$$

$$= 5.65 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

4. การคำนวณค่า Terminal Fluidization Velocity, U_t

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

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

Ar = Archimedes Number

$$g = 9.8 \text{ เมตรต่อวินาที}^2$$

$$\rho_s = 2312.91 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (อนุภาคทราย)}$$

$$\rho_g = 1.2 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร}$$

$$d_p = 337.5 \times 10^{-6} \text{ เมตร}$$

$$\mu = 0.00002 \text{ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที}$$

แทนค่าต่างๆ ในสมการจะได้

$$U_t = 2.435 \text{ เมตรต่อวินาที}$$

ตรวจค่า Re_p ว่าตรงตามเงื่อนไขหรือไม่

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

$$= (1.2 * (337.5 * 10^{-6}) * 2.435) / 0.00002$$

$$= 49.32$$

ดังนั้น U_t ที่หาได้เป็นค่าที่ถูกต้องเนื่องจากค่า Re_p เป็นไปตามเงื่อนไข

5. การหาค่าความเร็วของอนุภาค (Particle Velocity)

$$\text{จาก } v = s/t$$

จากตารางภาคผนวก ก.21 ค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นที่ลากได้จากการเคลื่อนที่ของอนุภาค

$$= 5.93117 \text{ มิลลิเมตร โดยใช้เวลา shutter} = 1/120 \text{ วินาที}$$

$$\text{แทนค่า } s = 5.93117$$

$$t = 1/120$$

$$v = 5.93117 \cdot 10^{-3} / (1/120)$$

$$= 0.71$$

ดังนั้นความเร็วเฉลี่ยของแข็งมีค่าเท่ากับ 0.71 เมตรต่อวินาที

6. การหาสัดส่วนของแข็ง(ϵ_s)

$$\text{จาก} \quad \epsilon_s = \frac{\Delta P}{\Delta H g \rho_p}$$

เมื่อ ϵ_s - สัดส่วนของแข็ง

ΔP - ความดันลดคร่อมจุด

ΔH - ผลต่างระหว่างจุด 2 จุด

ρ_p - ความหนาแน่นของภาค

g - แรงที่กระทำเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

จากตาราง ก.5 ที่อัตราการไหลของอากาศ 300 ลิตรต่อวินาที

จะได้ ความดันลดระหว่าง P_2 และ P_3 มีค่าเท่ากับ 15.36 มิลลิเมตรน้ำ (150.49 กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที²) ระยะห่างระหว่าง P_2 และ P_3 มีค่าเท่ากับ 0.05 เมตร

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad \Delta P &= 150.49 \text{ กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที}^2 \\ \rho_p &= 2262.78 \text{ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร} \\ g &= 9.8 \text{ เมตรต่อวินาที}^2 \\ \Delta H &= 0.05 \text{ เมตร} \\ \text{จะได้} \quad \epsilon_s &= 150.49 / (2262.78 \cdot 9.8 \cdot 0.05) \\ &= 0.14 \end{aligned}$$

ดังนั้น สัดส่วนของแข็งในช่วงความสูง P_2 และ P_3 มีค่าเท่ากับ 0.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ว่าที่เรือตรี สมชาย สวยสะอาด เกิดวันที่ 27 มิถุนายน 2522 เกิดที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมี เทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย