

การศึกษาผลของรูปร่างของหินวัตถุต่อการขนถ่ายวัตถุด้วยอากาศ



นายยุทธนา ทรงเงินดี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974 - 331 - 145 - 9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๕ 7 ส.ค. 2544

I 18520546

**A STUDY OF SHAPE FACTOR EFFECT OF PARTICLES ON PNEUMATIC
CONVEYING**



Mr. Yutana Song-Ngendee

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering**

Graduate School

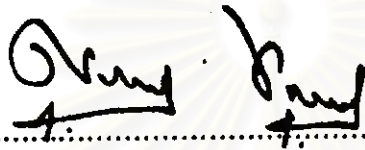
Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974 - 331 - 145 - 9

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลของรูปร่างของชิ้นวัสดุต่อการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศ
โดย นายบุษนา ทรงเงินดี
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์

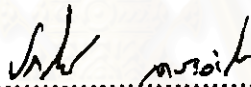
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

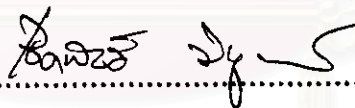
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



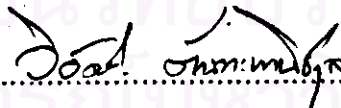
..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เศรษฐอำไพ)



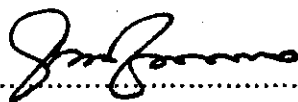
..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์)



..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินทร์พานิชกุล)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ศุภรนา ทรงเงินดี : การศึกษาผลของรูปร่างของชิ้นวัสดุต่อการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศ (A STUDY OF SHAPE FACTOR EFFECT OF PARTICLES ON PNEUMATIC CONVEYING) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. เจริญพันธ์ วิบูลารักษ์ ; 202 หน้า. ISBN 974-331-145-9.

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขนถ่ายวัสดุในระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศเพื่อศึกษาผลของรูปร่างของชิ้นวัสดุที่มีต่อพฤติกรรมการขนถ่าย โดยได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการขนถ่ายของวัสดุ 3 ชนิดอันได้แก่ เมล็ดข้าวโพด เมล็ดถั่วเขียว และเม็ดพลาสติก ในลักษณะการไหลที่มีความหนาแน่นเฟสแบบเบาบาง (Dilute Phase) โดยใช้เครื่องทดสอบการขนถ่ายที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนถ่าย 35 มิลลิเมตร และความยาวของท่อขนถ่าย 20 เมตร โดยวัสดุที่ถูกขนถ่ายนั้นจะวิ่งวนเวียนอยู่ภายในท่อ

ข้อมูลที่ได้อูกนำมาสร้างกราฟแสดงลักษณะเฉพาะของการขนถ่ายและกราฟแสดงความเร็วของอากาศต่ำที่สุดที่จำเป็นสำหรับการขนถ่ายของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบสำหรับวัสดุชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัสดุที่นำมาทดสอบ

ในการวิจัยพบว่าค่าความดันตกในรูปแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized Pressure Drop) ที่เกิดขึ้นในแนวการขนถ่ายและค่าความหนาแน่นเฟสของการขนถ่ายมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะแตกต่างกันในวัสดุแต่ละชนิดเนื่องมาจากรูปร่าง ความหนาแน่นและคุณสมบัติอื่นๆของชิ้นวัสดุ

จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของทอมโรว์มิตซ์ของการขนถ่ายร่วมกับชุดข้อมูลที่ได้อจากการทดลองเพื่อศึกษาผลของรูปร่างของชิ้นวัสดุที่มีต่อพฤติกรรมการขนถ่าย จะได้สมการซึ่งแสดงพฤติกรรมการขนถ่ายของชิ้นวัสดุด้วยอากาศดังนี้

$$\frac{\Delta P_p D}{\rho_p v^2} = 0.184 - 0.000150 \frac{\rho_p}{\rho_a} - 0.0507 \frac{SV}{d_p D} + 590 / Re_c + 0.00225 \phi$$

เมื่อนำสมการดังกล่าวไปใช้ทำนายค่าความดันตกของวัสดุที่มีค่าตัวประกอบรูปร่าง 0.77 ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าตัวประกอบรูปร่างของชุดข้อมูลที่ใช้สร้างสมการ (0.69 - 0.91) พบว่าค่าที่ได้จากสมการเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ได้จากการทดลองสูงสุดเพียง 11% แต่เมื่อนำไปใช้กับวัสดุที่มีค่าตัวประกอบรูปร่าง 0.46 พบว่าค่าที่ได้เบี่ยงเบนไปจากการทดลองสูงสุดถึง 49% ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบรูปร่างหรือรูปร่างของชิ้นวัสดุนั้นมีผลต่อพฤติกรรมการขนถ่าย โดยวัสดุที่มีรูปร่างแตกต่างกันจะส่งผลให้มีพฤติกรรมการขนถ่ายหรือค่าความดันตกที่เกิดในการขนถ่ายที่แตกต่างกัน นอกจากนี้จากตัวสมการยังบ่งชี้ให้เห็นว่าผลของค่าตัวประกอบรูปร่างต่อพฤติกรรมการขนถ่ายจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อที่ใช้ในการขนถ่ายด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2541

ลายมือชื่อนิสิต J. Saw-umh.
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C816321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: PNEUMATIC / CONVEYING / PARTICLE / SHAPE

YUTANA SONG-NGENDEE : A STUDY OF SHAPE FACTOR EFFECT OF PARTICLES ON PNEUMATIC CONVEYING. THESIS ADVISOR : CHIRDPUN VITOORAPORN, Ph.D. 202 pp. ISBN 974-331-145-9.

In this research, the conveying behavior of corn, green bean and plastic in dilute phase conveying is studied by using the pneumatic transport system in order to determine the effect of particles shape. The system has a 35 mm. in diameter of transport pipe with 20 m. in length. The test is performed in a closed loop configuration.

The test data is presented as the conveying characteristic curve for each material. This curve, together with the minimum conveying air velocity presented, can be used as a tool for designing the conveying system of the tested material as well as for the system conveying similar materials.

The study also shows that the relationship between the normalized pressure drop and the conveying phase density is linear where the slope is different depend on the shape and other properties of conveyed material.

Using dimensionless analysis together with the test data, the effect of particle's shape on conveying characteristic can be identified as shown in the equation below:

$$\frac{\Delta P_1 D}{\rho_a v^2} = 0.184 - 0.000150 \frac{\rho_p}{\rho_a} - 0.0507 \frac{S\psi}{d_p D} + 590 / Re_c + 0.00225\phi$$

This equation is then used to predict the conveying behavior of the particle with the shape factor 0.77 (within the range of test data, 0.69-0.91). The predicted values are very close to the result obtained from the experiment. The maximum difference between predicted value and experimental result is only 11%. On the other hand, when this equation is applied to the particle with the shape factor 0.46, the predicted values are very different from experimental result. The maximum difference found is about 49%. According to this non-conformity, it is shown that the shape of the particle, represented by shape factor, truly affects the conveying behavior. The difference in particle's shapes can cause the difference in conveying characteristic, i.e. conveying line pressure drop. Moreover, the equation also shows that the effect of shape factor on the conveying behavior is affected by the diameter of conveying pipeline.

ภาควิชา..... วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา..... วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา..... 2541

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



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร. เชิดพันธ์ วิฑูรารักษ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้ รวมไปถึงได้สละเวลาส่วนตัวและยังต้องใช้ความอดทนเป็นอย่างมากกับผู้วิจัยเพื่อผลักดันให้การศึกษาครั้งนี้ประสบความสำเร็จลงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณท่านไว้ ณ. ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย ชรินพานิชกุล ที่กรุณาให้คำแนะนำการทำการศึกษารวมไปถึงได้ให้ความกรุณาให้ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องทดสอบของศูนย์เทคโนโลยีอนุภาคไทยในการทำการศึกษารั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ปราโมทย์ เคชะอำไพ ที่ได้ให้ความกรุณาและให้คำปรึกษากับทางผู้วิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณแม่ที่ให้ความสำคัญกับการศึกษาและสนับสนุนด้านการเงินกับผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด และขอขอบคุณพี่สาว น้องชาย คุณระพีพร มหาแสน และคุณวิศรา พุทธภavana ที่ให้กำลังใจกับผู้วิจัยเป็นอย่างดีเสมอมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

ประ โยชน์และคุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบเป็นกตัญญูตานุชาแด่ มารดา ครูบาอาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บุษนา ทรงเงินดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ญ
รายการสัญลักษณ์.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	10
ขอบเขตของการวิจัย.....	11
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	11
ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	12
2 ทฤษฎี.....	13
รูปแบบการไหลในระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศ.....	14
ชนิดของระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศ.....	16
การเคลื่อนที่ของชิ้นวัสดุในการไหล (Particles Dynamic).....	20
ค่าความดันตกของการไหลผ่านชั้นของชิ้นวัสดุ.....	29
3 การดำเนินการทดลอง.....	31
บทนำ.....	31
วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	32
ชุดทดสอบ.....	33
อุปกรณ์จ่ายวัสดุแบบ โรตารี.....	36

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
อุปกรณ์รับวัสดุสำหรับระบบขนถ่าย.....	43
อุปกรณ์จ่ายอากาศ.....	47
ระบบท่อขนถ่าย.....	49
อุปกรณ์วัดค่าปริมาณการไหลแบบ Orifice.....	51
อุปกรณ์วัดค่าปริมาณความดันแตกต่างกัน.....	53
การทดลอง.....	53
4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57
บทนำ.....	57
ความเร็วต่ำสุดของอากาศที่จำเป็นสำหรับการขนถ่าย.....	57
กราฟแสดงลักษณะจำเพาะของการขนถ่ายของวัสดุ.....	60
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกในรูปแบบนอร์มัลไลซ์และค่าความหนาแน่นเฟส.....	66
การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของเทอมไร้มิติของการไหลของของผสม.....	70
5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	89
สรุป.....	91
ข้อเสนอแนะเพื่อการทำการศึกษาคือ.....	91
รายการอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	95
ภาคผนวก ก.....	96
ภาคผนวก ข.....	136
ภาคผนวก ค.....	140
ภาคผนวก ง.....	147
ภาคผนวก จ.....	167
ภาคผนวก ฉ.....	191
ประวัติผู้เขียน.....	202

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงช่วงความคั่นในการปฏิบัติงานของอุปกรณ์จ่ายวัสดุชนิดต่างๆกัน	13
3.1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทดลอง	32
3.2 แสดงผลการเปรียบเทียบอุปกรณ์จ่ายวัสดุแบบ โรตารี สำหรับเม็ดคั่วข้าวโพด	38
3.3 แสดงผลการเปรียบเทียบอุปกรณ์จ่ายวัสดุแบบ โรตารี สำหรับเม็ดคั่วข้าว	40
3.4 แสดงผลการเปรียบเทียบอุปกรณ์จ่ายวัสดุแบบ โรตารี สำหรับเม็ดพลาสติก	42
4.1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทดลองเพื่อทดสอบสมการ 4.21	75



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงลักษณะจำเพาะของการขนถ่ายของวัสดุที่มีการลอยตัวด้วยอากาศดี โดยทำการขนถ่ายที่ความยาวท่อขนถ่าย 100 เมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนถ่าย 75 มิลลิเมตร [3].....	2
1.2 แสดงลักษณะจำเพาะของการขนถ่ายของวัสดุที่มีการลอยตัวด้วยอากาศไม่ดี โดยทำการขนถ่ายที่ความยาวท่อขนถ่าย 100 เมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนถ่าย 75 มิลลิเมตร [3]	3
1.3 แสดงแนวท่อขนถ่ายความยาว 50 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนถ่าย 50 มิลลิเมตร มีช่องออกหุค (ช่องอ 90 องศา 5 หุค และช่องอ 180 องศา 1 หุค) [3]	4
1.4 แสดงลักษณะจำเพาะของการขนถ่ายของผงพีวีซี โดยทำการขนถ่ายที่ความยาวท่อขนถ่าย 50 เมตร และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนถ่าย 50 มิลลิเมตร มีช่องออกหุค (ช่องอ 90 องศา 5 หุค และช่องอ 180 องศา 1 หุค) (รูปแบบของแนวท่อขนถ่ายแสดงได้ดังรูป 1.4) [3]	4
1.5 กราฟแสดงลักษณะจำเพาะของวัสดุที่มีพฤติกรรมการขนถ่ายชนิดที่มีจุดที่ดีที่สุดสำหรับค่าอัตราการไหลเชิงมวลอยู่ที่ค่าหนึ่ง [3]	5
1.6 แสดงชุดทดสอบการศึกษาพฤติกรรมการขนถ่ายของเม็ดข้าวสาลีด้วยอากาศ และค่าความดันตกที่เกิดในชุดทดสอบโดย Dr. J. Gasterstaedt [6].....	7
1.7 แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นเฟสและค่าความดันตกจำเพาะในการทดลองของ Dr. J. Gasterstaedt [6]	8
2.1 แสดงระบบการขนถ่ายวัสดุแบบความดันบวกอย่างง่าย (Simple positive pressure systems)	16
2.2 แสดงระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศแบบความดันบวกแบบซับซ้อน (Complex positive pressure conveying system).....	17
2.3 แสดงระบบการขนถ่ายแบบความดันลบอย่างง่าย (Simple negative pressure system).....	18
2.4 แสดงระบบการขนถ่ายแบบผสมระหว่างความดันบวกและความดันลบ (Combined negative and positive pressure system).....	19

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.5 แสดงระบบการขนถ่ายแบบดึงจ่ายความดันสูง (High pressure blow tank system).....	20
2.6 แสดงรูปภาพของค่าสัมประสิทธิ์แรงดันที่รูปร่างต่างๆกัน [9]	22
2.7 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงดันที่ระดับความเข้มข้นของการไหลปั่นป่วนต่างๆ กัน จากการทดสอบของผู้ทดสอบแตกต่างกัน โดย 1. $I_r = 0.4$ [12], 2. $I_r = 0.1$ [12], 3. $I_r = 0.1$ [13], 4. $I_r = 0.4$ [13]	24
2.8 แสดงปริมาตรที่มีชิ้นวัสดุอยู่.....	25
2.9 แสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงดันของชิ้นวัสดุที่ค่าช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุ ต่างๆ กัน.....	27
3.1 แสดงชุดทดสอบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศของ TSUSAKA INDUSTRY Co., Ltd.....	33
3.2 แสดงส่วนประกอบของชุดทดสอบ.....	34
3.3 แสดงชุดทดสอบและแนวท่อขนถ่ายยาว 20 เมตร.....	35
3.4 อุปกรณ์จ่ายวัสดุแบบโรตารี.....	36
3.5 แสดงโครงสร้างของชุดอุปกรณ์จ่ายวัสดุแบบโรตารี.....	37
3.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุปกรณ์จ่ายวัสดุแบบโรตารีสำหรับเม็ดคั่วข้าวโพด โดยจากกราฟจะ เห็นได้ว่าค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ (ton/hr) = 0.0295 x ความถี่ที่ชุดอินเวอร์เตอร์ (Hz) + 0.0669.....	39
3.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุปกรณ์จ่ายวัสดุแบบโรตารีสำหรับเม็ดคั่วถั่วเขียว โดยจากกราฟจะเห็น ได้ว่าค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ (ton/hr) = 0.0331 x ความถี่ที่ชุดอินเวอร์เตอร์ (Hz) + 0.0557.....	41
3.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุปกรณ์จ่ายวัสดุแบบโรตารีสำหรับเม็ดพลาสติก โดยจากกราฟจะเห็น ได้ว่าค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ (ton/hr) = 0.0345 x ความถี่ที่ชุดอินเวอร์เตอร์ (Hz) + 0.133.....	43
3.9 แสดงชุดอุปกรณ์รับวัสดุ.....	44
3.10 แสดงภาพตัดของชุดอุปกรณ์รับวัสดุ.....	45

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 แสดงชุดเครื่องอัดอากาศชนิด Roots Type Blower.....	47
3.12 แสดงกราฟการทำงานของชุดพัดลมอัดอากาศ (ชนิด BS50) ที่ความเร็วรอบ 1150 rpm โดยที่ค่าความถี่ที่แรงควบคุมมีค่า 50 Hz.....	48
3.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความยาวท่อขาเข้า (Entrance length) ที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold number) ต่าง ๆ กัน [4]	49
3.14 แสดงชุดทดสอบและแนวท่อขนถ่าย.....	50
3.15 แสดงอุปกรณ์การวัดค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ.....	51
3.16 แสดงภาพ โครงสร้างของชุดวัดค่าอัตราการไหลแบบออริฟิซ (Orifice).....	52
3.17 แสดงตำแหน่งสำหรับการอ่านค่าอัตราการไหลบนสเกลของชุดวัดค่าอัตราการไหลแบบออริฟิซ (Orifice).....	52
3.18 แสดงการเปิดวาล์วเมื่อทำการวัดค่าความดันแตกต่างกัน.....	53
3.19 แสดงการอุดตันที่เกิดขึ้นในชุดทดสอบ.....	55
3.20 แสดงการอุดตันที่เกิดขึ้นในชุดทดสอบ.....	55
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วต่ำสุดที่ต้องการของอากาศกับค่าความหนาแน่นเฟสของวัสดุในการขนถ่ายวัสดุทั้ง 3 ชนิดในชุดทดลองที่มีความยาวของท่อขนถ่ายขนาด 20 m ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ 35 mm.....	58
4.2 แสดงค่าความเร็วต่ำที่สุดที่มีความจำเป็นในการขนถ่ายสำหรับวัสดุที่มีค่าการลอยตัวด้วยอากาศดี (A) และวัสดุที่มีค่าการลอยตัวด้วยอากาศไม่ดี (B) [3]	59
4.3 แสดงกราฟลักษณะจำเพาะของการขนถ่ายของถั่วเขียว โดยชุดทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนาด 35 มิลลิเมตร ความยาวของท่อขนถ่าย 20 เมตร.....	63
4.4 แสดงกราฟลักษณะจำเพาะของการขนถ่ายของพลาสติก โดยชุดทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนาด 35 มิลลิเมตร ความยาวของท่อขนถ่าย 20 เมตร.....	64
4.5 แสดงกราฟลักษณะจำเพาะของการขนถ่ายของข้าวโพด โดยชุดทดลองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนาด 35 มิลลิเมตร ความยาวของท่อขนถ่าย 20 เมตร.....	65

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกในรูปแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized Pressure Drop) และค่าความหนาแน่นเฟสของ ถั่วเขียว ข้าวโพด และเม็ดพลาสติก ในชุดทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 35 mm ความยาวท่อขนถ่าย 20 m โดยได้นำสมการการขนถ่ายของ Warren Spring Laboratory และสมการที่ได้จากการทดลองกับผงพลาสติกในชุดทดลองเดียวกันนี้ของ รัชชัย ชรินพานิชกุล และวิวัฒน์ ดัชนีพะพานิชกุล มาเปรียบเทียบไว้ด้วย.....	69
4.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเม็ดถั่วเขียวผ่าซีกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 4.21 โดยในกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกอันเนื่องมาจากจีนัวตุดและค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.532 คัดต่อชั่วโมง.....	77
4.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเม็ดถั่วเขียวผ่าซีกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 4.21 โดยในกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกอันเนื่องมาจากจีนัวตุดและค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.694 คัดต่อชั่วโมง.....	78
4.9 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเม็ดถั่วเขียวผ่าซีกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 4.21 โดยในกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกอันเนื่องมาจากจีนัวตุดและค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.893 คัดต่อชั่วโมง.....	79
4.10 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเม็ดถั่วเขียวผ่าซีกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 4.21 โดยในกราฟเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกอันเนื่องมาจากจีนัวตุดและค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 1.077 คัดต่อชั่วโมง.....	80

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการชนถ่ายของเม็ดค
ข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 4.21 โดยในกราฟเป็นการแสดงความ
สัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกอันเนื่องมาจากชั้นวัสดุและค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ
ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.905 คัดต่อชั่วโมง..... 87



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์

A	ค่าพื้นที่หน้าตัดของท่อขนถ่าย
A'	ค่าของพื้นที่ตามแนวตั้งฉากกับแนวการไหล
c	ค่าความเร็วของจีนวัสดุ
C _D	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน
D	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อ
d	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของจีนวัสดุ
d _v	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเทียบเท่า (Equivalent diameter) ของจีนวัสดุ
F _D	ค่าแรงต้านที่เกิดบนจีนวัสดุ
g	ความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 m/s ²
G	ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ
m _a	ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ
ΔP	ค่าความดันตกที่เกิดขึ้นในระบบขนถ่าย
ΔP ₀	ค่าความดันตกที่เกิดขึ้นในระบบขนถ่ายที่ปราศจากจีนวัสดุ
ΔP _L	ค่าความดันตกของระบบในการขนถ่ายจีนวัสดุต่อหน่วยความยาวของท่อ
r	รัศมีของท่อขนถ่าย
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์
S	ค่าพื้นที่ผิวของจีนวัสดุ
v̄	ค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศในท่อขนถ่าย
v̂	ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ
v _e	ค่าความเร็วที่แท้จริงของอากาศที่ไหลผ่านช่องว่างระหว่างจีนวัสดุ
w	ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างจีนวัสดุและอากาศในการไหลจะมีค่า

อักษรกรีก

α	ค่าความดันตกในรูปแบบนอร์มัลไลซ์ (Normalized Pressure Drop)
δ	ค่าน้ำหนักจำเพาะของวัสดุ (Specific Weight)

v	ค่าความหนืด ไคเนแมติก
ϕ	ค่าความหนาแน่นเฟสในการไหล
ψ	ค่าตัวประกอบรูปร่าง (Shape factor)
μ	ค่าความหนืด ไดนามิก
ρ	ค่าความหนาแน่น

ตัวห้อยท้าย

a	อากาศ
p	ชั้นวัสดุ
w	น้ำ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย