

การศึกษาผลของรูปร่างของชิ้นวัสดุต่อการขนถ่ายด้วยอากาศ A Study of Shape Factor Effect of Particles on Pneumatic Conveying

เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์¹, ยุทธนา ทรงเงินดี²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ. พญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 66(2)2186622, โทรสาร 66(2)2522889, E-Mail: fmecvt@kankrow.eng.chula.ac.th

²บริษัทเจเนอรัลมอเตอร์ประเทศไทย

นิคมอุตสาหกรรมอีสเทิร์นซีบอร์ด ต.ปลวกแดง อ.ปลวกแดง ระยอง 21140

โทร 66(38)954999 E-Mail:yutana.songngendee@gm.co.th

Chirdpun Vitooraporn¹, Yutana Song-Ngendee²

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,

Phayathai Rd., Phatumwan, Bangkok 10330 Thailand

²General Motor Thailand Co.Ltd.

Eastern Seaboard Industrial Estate, Pourkdaeng, Rayong 21140 Thailand

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศ โดยศึกษาถึงผลของรูปร่างของชิ้นวัสดุที่มีต่อพฤติกรรมการขนถ่าย ทั้งนี้ ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาการขนถ่ายของวัสดุ 3 ชนิด อันได้แก่ เมล็ดข้าวโพด เมล็ดถั่วเขียว และเม็ดพลาสติก ในลักษณะการไหลที่มีความหนาแน่นเฟสแบบเบาบาง (Dilute Phase) โดยใช้เครื่องทดสอบการขนถ่ายที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อนำถ่าย 35 มิลลิเมตร และความยาวของท่อนำถ่าย 20 เมตร โดยวัสดุที่ถูกขนถ่ายนั้นจะวิ่งวนเวียนอยู่ภายในท่อ จากการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของเทอมไรมันของการขนถ่ายร่วมกับชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อศึกษาผลของรูปร่างของชิ้นส่วนที่มีต่อพฤติกรรมการขนถ่าย จะได้สมการซึ่งแสดงพฤติกรรมการขนถ่ายของชิ้นวัสดุด้วยอากาศ ดังนี้

$$\frac{\Delta P_c D}{\rho_s \bar{v}^2} = 0.184 - 0.000150 \frac{P_o}{\rho_s} - 0.0507 \frac{S\psi}{d_v D} + 590 / Re_s + 0.00225\phi$$

สมการดังกล่าวได้รวมถึงผลของรูปร่างของชิ้นวัสดุในรูปตัวประกอบรูปร่าง, ψ , ทำให้สมการมีศักยภาพในการคำนวณสำหรับชิ้นวัสดุต่างๆ ได้มากขึ้น ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบกับวัสดุที่มีค่าตัวประกอบรูปร่าง 0.77 ซึ่งอยู่ในช่วงของค่าตัวประกอบรูปร่างของชุดข้อมูลที่ใช้สร้างสมการ (0.69-0.91) พบว่าค่าที่ได้จากสมการเบี่ยงเบนไปจากผลการทดลองสูงสุดเพียง 11% นอกจากนี้สมการที่ได้อีกยังพบว่าผลของค่าตัว

ประกอบรูปร่างต่อพฤติกรรมการขนถ่ายจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อที่ใช้ในการขนถ่ายด้วย

Abstract

This research is to study the behavior of particles with different shape factor in pneumatic conveying system. The research was done on 3 different particles, namely, corn seed, green bean seed and plastic palet in the dilute phase flow. The pneumatic conveying testing bench has a 35 mm. in diameter pipe and the pipe's length is 20 metre. The particles being tested were circulated inside the pipeline. The analysis shows that the relation between non-dimensional pneumatic conveying parameters and data received from experiment is as follow;

$$\frac{\Delta P_c D}{\rho_s \bar{v}^2} = 0.184 - 0.000150 \frac{P_o}{\rho_s} - 0.0507 \frac{S\psi}{d_v D} + 590 / Re + 0.00225\phi$$

This equation above includes the effect of particle's shape in term of shape factor, ψ . Therefore the equation is potentially useful for calculating with other types of particles. This equation is then verified with particle that has a shape factor of 0.77 which is in the range of shape factor value used in the experiment (0.69 - 0.91). The results show that the maximum deviation between the calculated values and those received from experiment is only 11%. Moreover, the equation also reveals that

the effect of shape factor on the pneumatic conveying behavior is depend on the diameter of conveying pipeline.

1. บทนำ

การออกแบบระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศในปัจจุบันสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

- การออกแบบโดยใช้ข้อมูลจากการทดลอง
- การออกแบบโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์

สำหรับการออกแบบโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์นั้น ในปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมเท่าใดนักอันเนื่องมาจากความซับซ้อนของพฤติกรรมไหลของของผสมทำให้ยากที่จะหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำมาทำนายพฤติกรรมการไหลดังกล่าว ดังนั้นการออกแบบระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศโดยใช้ผลจากการทดลองจึงมีความนิยมมากกว่า เนื่องจากมีความสะดวกและสามารถใช้กับวัสดุที่ต้องการได้ทันที อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้อาจจากการทดสอบกับวัสดุชนิดหนึ่งๆนั้น ยังไม่สามารถนำมาใช้กับวัสดุชนิดอื่นๆ เนื่องจากพฤติกรรมที่อาจจะแตกต่างกันอันเนื่องมาจากความแตกต่างของคุณสมบัติของวัสดุเองรวมไปถึงความแตกต่างของระบบการขนถ่ายที่จะถูกนำไปใช้งาน ดังนั้นถ้าสามารถทำการสร้างสมการที่สามารถนำไปใช้ในการขนถ่ายของวัสดุโดยทั่วไปแล้วก็จะสามารถทำให้การออกแบบนั้นเป็นไปได้โดยสะดวกมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของการขนถ่ายที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากผลของรูปร่างของชิ้นวัสดุซึ่งสามารถแทนได้ด้วยค่าตัวประกอบรูปร่างของชิ้นวัสดุ การศึกษาดังกล่าวจะช่วยทำให้ทราบถึงอิทธิพลของรูปร่างที่มีผลต่อการขนถ่ายรวมทั้งสามารถสร้างสมการการขนถ่ายที่ครอบคลุมถึงวัสดุที่มีรูปร่างต่างๆ กัน ซึ่งจะช่วยให้การออกแบบระบบขนถ่ายกระทำได้อย่างสะดวกขึ้น

2. การทดลอง

2.1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศ

การหาสมการที่จะนำมาใช้ในการทำนายพฤติกรรมการไหลร่วมกันระหว่างอากาศและชิ้นวัสดุที่เป็นของแข็ง ตลอดจนศึกษาอิทธิพลของรูปร่างของชิ้นวัสดุต่อพฤติกรรมการขนถ่ายสามารถกระทำได้จาก การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของเทอมไร้มิติของการไหลของของผสม โดยที่ค่าความดันตกของระบบต่อหน่วยความยาวของท่อขนถ่ายในการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศจะเป็นฟังก์ชันของตัวพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$\Delta P_L = f(\rho_a, \rho_p, d_v, D, \bar{v}, \dot{G}, \mu) \quad [1]$$

โดย ΔP_L = ความดันตกของระบบในการขนถ่ายชิ้นวัสดุต่อหน่วยความยาวของท่อ, N/m³

ρ_a = ความหนาแน่นของอากาศ, kg/m³

ρ_p = ความหนาแน่นของชิ้นวัสดุ, kg/m³

d_v = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นวัสดุเมื่อเทียบกับทรงกลม, m

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนถ่าย, m

$\bar{v}$ = ความเร็วเฉลี่ยของอากาศ, m/s

$\dot{G}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ, ton/hr

μ = ความหนืดไดนามิกของอากาศ (Dynamic viscosity), Ns/m²

ทั้งนี้โดยมีสมมติฐานของการไหลดังนี้

1. การไหลที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการไหลคงตัว (Steady Flow)
2. การไหลที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (Uniform Flow)
3. การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของอากาศเนื่องจากคุณสมบัติการอัดตัวของอากาศนั้นสามารถละเลยได้
4. ขนาดของชิ้นวัสดุโดยรวมเฉลี่ยใกล้เคียงกัน

จากทฤษฎี Pi ของ Buckingham จะสามารถหาความสัมพันธ์ของเทอมต่างๆ ในรูปของเทอมไร้มิติได้ดังนี้

$$\frac{\Delta P_L D}{\rho_a \bar{v}^2} = f\left(\frac{\rho_p}{\rho_a}, \frac{d_v}{D}, \frac{\mu}{\rho_a \bar{v} D}, \frac{\dot{G}}{\rho_a \bar{v} D^2}\right)$$

$$\text{เนื่องจากเทอม } \frac{\dot{G}}{\rho_a \bar{v} D^2} = \frac{4\pi \dot{G}}{4\pi \rho_a \bar{v} D^2} \text{ คือค่าความหนาแน่น}$$

เฟส. ϕ . โดย ความหนาแน่นเฟส = $\frac{\text{อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ}}{\text{อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ}}$

และเทอม $\frac{\mu}{\rho_a \bar{v} D}$ สามารถแทนได้ด้วยค่าส่วนกลับของตัวเลขเรย์โนลด์

ของอากาศ ($1/Re_a$) ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{\Delta P_L D}{\rho_a \bar{v}^2} = f\left(\frac{\rho_p}{\rho_a}, \frac{d_v}{D}, \frac{1}{Re_a}, \phi\right) \quad [2]$$

สำหรับเทอม $\frac{d_v}{D}$ นั้นสามารถแทนได้ด้วยเทอม $\frac{S\psi}{d_v D}$ เมื่อ ψ

คือ ค่าตัวประกอบรูปร่างของชิ้นวัสดุ (Shape Factor) = $\frac{\pi d_v^2}{S}$ โดย

S คือ พื้นที่ผิวของชิ้นวัสดุ

ดังนั้นความสัมพันธ์ในรูปเทอมไร้มิติสำหรับการขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\Delta P_L D}{\rho_a \bar{v}^2} = f\left(\frac{\rho_p}{\rho_a}, \frac{S\psi}{d_v D}, \frac{1}{Re_a}, \phi\right) \quad [3]$$

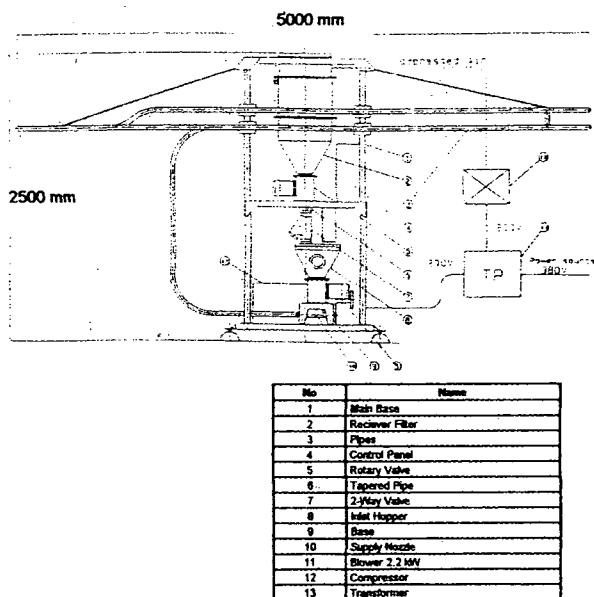
2.2 การทดลองเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างสมการ

เพื่อทำการสร้างสมการขึ้นจากความสัมพันธ์ข้างต้นนี้ จึงต้องมีการทดลองเก็บข้อมูล ซึ่งในที่นี้ได้เลือกวัสดุ 3 ชนิดมาทำการทดลองดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1
คุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทดสอบเก็บข้อมูล

วัสดุ	ความหนาแน่น kg/m ³	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เทียบเท่า m	ค่าตัวประกอบรูปร่าง (ψ, Shape Factor)
เมล็ดข้าวโพด	1183.84	0.00771	0.91
เมล็ดถั่วเขียว	1313.40	0.00457	0.85
เม็ดพลาสติก	1350	0.00288	0.69

การเลือกวัสดุทั้ง 3 ชนิดดังกล่าวมาทำการทดสอบนั้นเนื่องมาจากวัสดุทั้ง 3 ชนิดที่นำมาทดสอบมีลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันค่อนข้างชัดเจน โดยที่เมล็ดข้าวโพดนั้นจะมีรูปร่างคล้ายสามเหลี่ยมที่มีความหนา เมล็ดถั่วเขียวมีรูปร่างคล้ายทรงรี ส่วนเม็ดพลาสติกมีรูปร่างเป็นทรงกลมแบน ทำให้ได้ค่าตัวประกอบรูปร่างที่แตกต่างกัน อันเป็นปัจจัยที่นำมาพิจารณาถึงอิทธิพลของค่าตัวประกอบรูปร่างต่อพฤติกรรมการชนถ่าย นอกจากนี้วัสดุทั้ง 3 ชนิดยังเป็นวัสดุที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ สำหรับการทดลองนี้ได้จัดทำขึ้นโดยใช้ชุดทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อชนถ่าย 35 มิลลิเมตรและความยาวของแนวชนถ่าย 20 เมตรดังที่แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงชุดทดสอบและแนวท่อชนถ่ายยาว 20 เมตร

ในการทดลอง เม็ดพลาสติก เมล็ดข้าวโพด และเมล็ดถั่วเขียวจะถูกชนถ่ายผ่านไปยังระบบท่อโดยใช้แรงดันที่เกิดจากพัดลม จากนั้นวัสดุจะถูกแยกออกจากอากาศที่ถักแยกซึ่งติดตั้งไว้ที่ด้านบนของตัวพัดลม โดยที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุจะถูกควบคุมโดยโรตารีวาล์ว ในการทดลองแต่ละครั้ง จะทำการจ่ายวัสดุที่อัตราการไหลเชิงมวลคงที่ จากนั้นจึงทำการปรับค่าอัตราการไหลของอากาศให้มีค่าลดลงเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นเฟส โดยทำการทดลองที่ช่วงของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศอยู่ระหว่าง $2.9 \times 10^4 - 6.0 \times 10^4$ ค่าความ

ดันลดในระบบจะถูกบันทึกไว้เพื่อนำมาใช้สร้างสมการตามความสัมพันธ์ในสมการ (3) โดยอาศัยการวิเคราะห์แบบดัดดอยหลายตัวแปร

3. ผลการทดลอง

โดยการวิเคราะห์แบบดัดดอยหลายตัวแปรแบบเชิงเส้นของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ตามความสัมพันธ์ในสมการ (3) จะได้สมการที่แสดงพฤติกรรมการชนถ่ายของชิ้นวัสดุดังนี้

$$\frac{\Delta P_D}{\rho_o v^2} = 0.184 - 0.000150 \frac{\rho_o}{\rho_o} - 0.0507 \frac{S\psi}{d_v D} + 590 / Re_o + 0.00225\phi \quad [4]$$

สมการดังกล่าวนี้ให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจสูงถึง 96.1 % ดังนั้น จะเห็นได้ว่าการใช้สมการแบบเชิงเส้นนั้นมีความเหมาะสมเนื่องจากให้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจที่สูงมาก

สมการ (4) สามารถนำไปใช้เพื่อคำนวณหาความดันลดที่เกิดขึ้นในระบบท่อเมื่อทราบคุณสมบัติของวัสดุไม่ว่าจะเป็นขนาดของวัสดุ ความหนาแน่น และค่าตัวประกอบรูปร่าง รวมไปถึงค่าอัตราการไหลของทั้งอากาศและวัสดุที่ต้องการในการชนถ่าย

4. การตรวจสอบสมการ

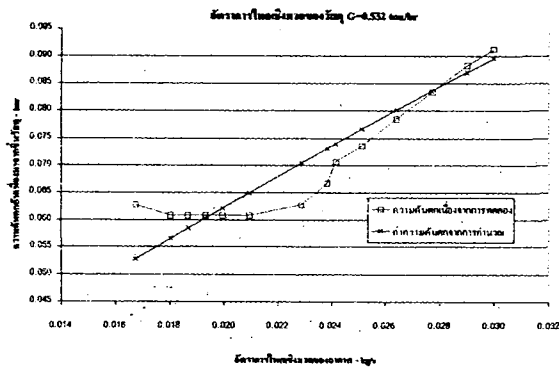
การตรวจสอบความแม่นยำของสมการ (4) กระทำโดยทำการทดลองการชนถ่ายเมล็ดถั่วเขียวผ่าซีกและเมล็ดข้าวเปลือกเพื่อเก็บข้อมูลจากการทดลองมาตรวจสอบกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยสมการดังกล่าว โดยวัสดุทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2
แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาทดลองเพื่อทดสอบสมการ 4

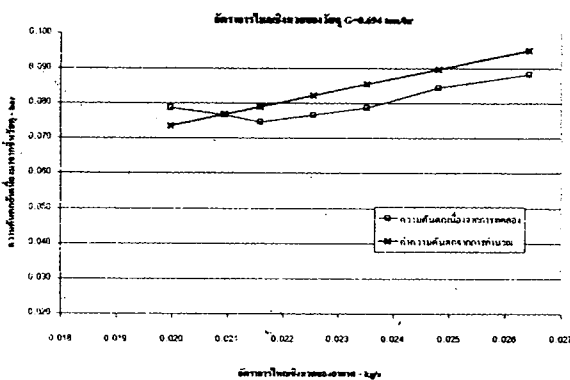
วัสดุ	ความหนาแน่น kg/m ³	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เทียบเท่า m	ค่าตัวประกอบรูปร่าง (ψ, Shape Factor)
เมล็ดถั่วเขียวผ่าซีก	1313.40	0.00363	0.77
เมล็ดข้าวเปลือก	1183.80	0.00342	0.46

จากการทดสอบสมการพบว่าค่าที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการนั้นให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากสำหรับการทดลองการชนถ่ายของเมล็ดถั่วเขียวผ่าซีก (รูปที่ 2 - 6) โดยจะมีความแตกต่างสูงสุด 11% ในการทดลองที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ $\dot{G} = 1.432 \text{ ton/hr}$ ดังที่แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งในกราฟดังกล่าวเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันลดอันเนื่องมาจากชิ้นวัสดุและค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุต่าง ๆ แต่เมื่อทำการทดลองกับเมล็ดข้าวเปลือก (รูปที่ 8-12) ค่าที่ได้จากการทำนายโดยอาศัยสมการ (4) กลับให้ค่าที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดลองจริงมากโดยให้ค่าความแตกต่างสูงสุดถึง 49% ในการทดลองการชนถ่ายที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.438 ton/hr ดังที่แสดงในรูปที่

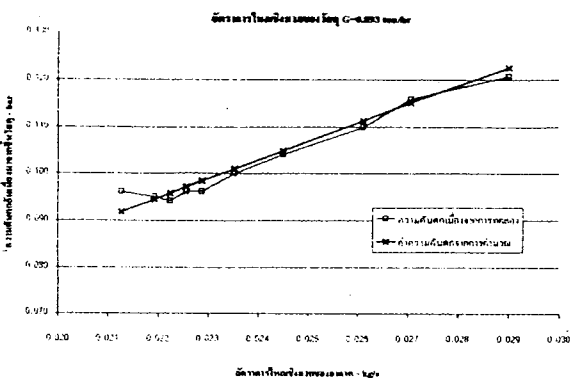
8 ความคลาดเคลื่อนจากสมการในการทดลองการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกนั้นอาจจะเกิดเนื่องมาจากคุณสมบัติของเมล็ดข้าวเปลือกอันได้แก่ค่าตัวประกอบรูปร่างซึ่งค่อนข้างจะแตกต่างไปมากจากชุดข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ



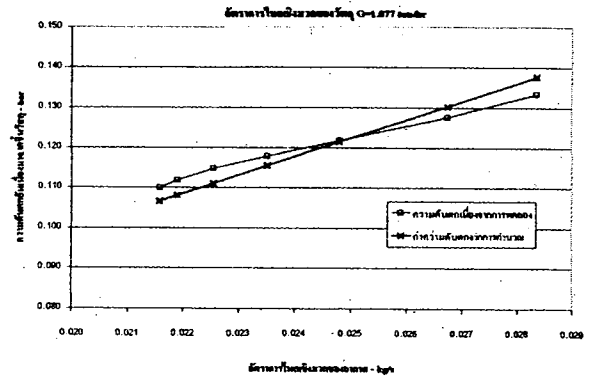
รูปที่ 2 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (4) ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.532 ตันต่อชั่วโมง



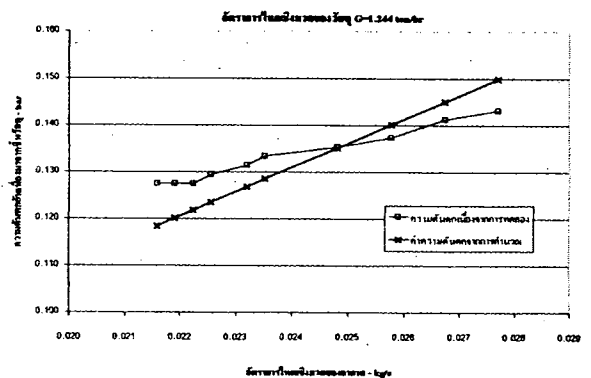
รูปที่ 3 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (4) ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.694 ตันต่อชั่วโมง



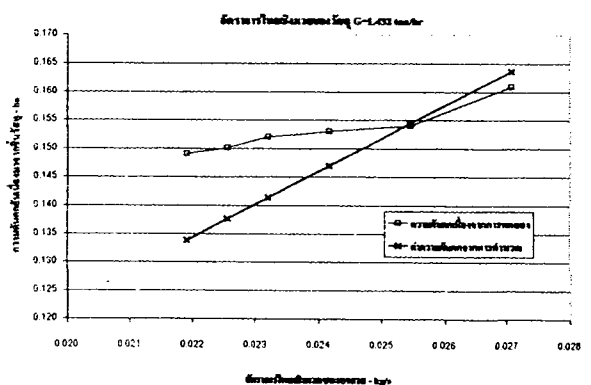
รูปที่ 4 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (4) ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.893 ตันต่อชั่วโมง



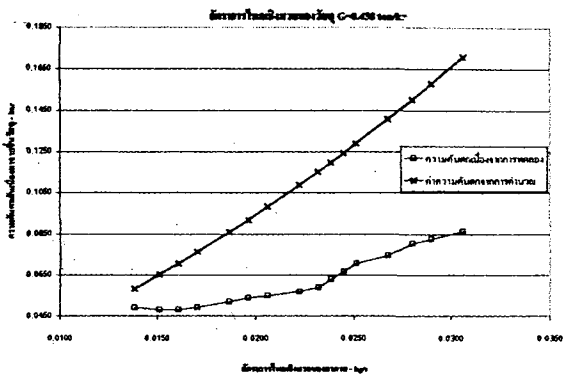
รูปที่ 5 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (4) ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.1077 ตันต่อชั่วโมง



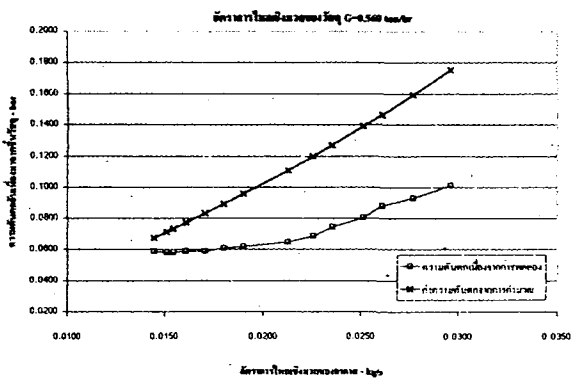
รูปที่ 6 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (4) ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 1.244 ตันต่อชั่วโมง



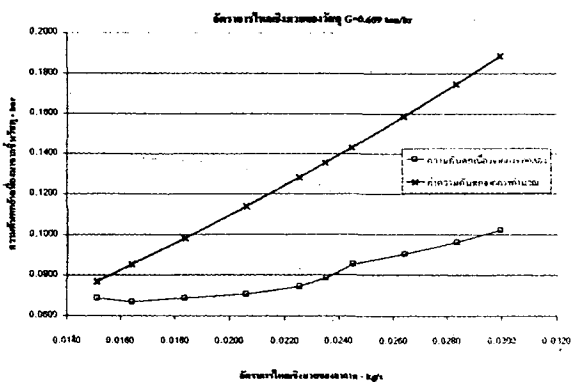
รูปที่ 7 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ (4) ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 1.432 ตันต่อชั่วโมง



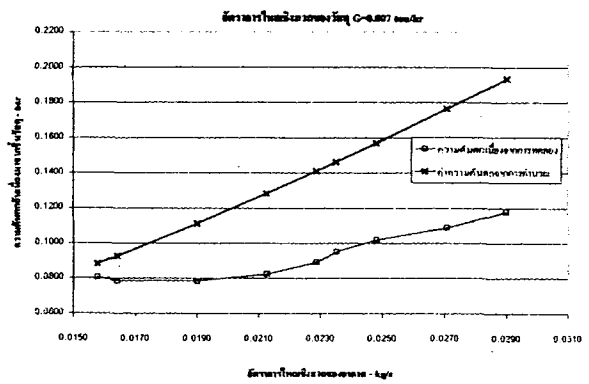
รูปที่ 8 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 4 ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.438 ตันต่อชั่วโมง



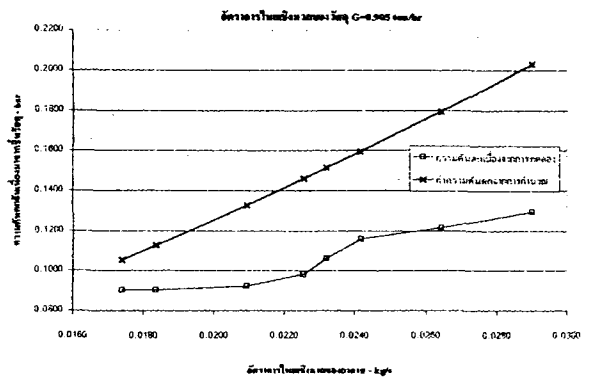
รูปที่ 9 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 4 ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.560 ตันต่อชั่วโมง



รูปที่ 10 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 4 ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.609 ตันต่อชั่วโมง



รูปที่ 11 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 4 ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.807 ตันต่อชั่วโมง



รูปที่ 12 แสดงกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการทดลองจริงของการขนถ่ายของเมล็ดข้าวเปลือกและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการ 4 ที่ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ 0.905 ตันต่อชั่วโมง

5. การวิเคราะห์สมการ

จากผลของการตรวจสอบสมการ (4) ดังที่กล่าวมาจะได้ว่าสมการดังกล่าวจะสามารถให้ผลที่น่าเชื่อถือในช่วงของค่าตัวประกอบรูปร่างช่วงหนึ่งที่มีค่า 0.69 – 0.91 โดยจะเห็นได้จากการทดสอบสมการโดยการทดลองกับเมล็ดข้าวเปลือกซึ่งมีค่าตัวประกอบรูปร่าง 0.77 ผลที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายโดยสมการ (4) ส่วนในการทดลองกับเมล็ดข้าวเปลือกซึ่งมีค่าตัวประกอบรูปร่าง 0.46 ผลที่แตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายโดยสมการ (4) นั้นน่าจะเป็นผลที่เกิดจากความแตกต่างของค่าตัวประกอบรูปร่างของเมล็ดข้าวเปลือกซึ่งไม่ได้อยู่ในช่วงที่สมการสามารถให้ผลที่แม่นยำได้

นอกจากนี้จากสมการจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่จะส่งผลต่อพฤติกรรมของการขนถ่ายซึ่งในที่นี้แทนด้วยค่าความดันลวดได้แก่

- ค่าสัดส่วนระหว่างค่าความหนาแน่นของชั้นวัสดุและค่าความหนาแน่นของอากาศ

เมื่อค่าสัดส่วนระหว่างค่าความหนาแน่นของชั้นวัสดุและค่าความหนาแน่นของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เทอมด้านซ้ายมือของสมการมีค่าลดลงเนื่องจากเทอมของค่าสัดส่วนระหว่างค่าความหนาแน่นของชั้น

วัสดุและค่าความหนาแน่นของอากาศนั้นมีเครื่องหมายลบ ซึ่งถ้าพิจารณาว่าค่าความหนาแน่นของอากาศมีค่าค่อนข้างคงที่ จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าความหนาแน่นของชิ้นวัสดุมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความดันตกที่ติดอยู่ในเทอมด้านซ้ายมือของสมการมีค่าลดลงไปด้วย

▪ ค่าตัวประกอบรูปร่าง

จากเทอมที่สามด้านขวามือของสมการ 4 ($SP/d_v D$) พบว่าการเพิ่มขึ้นของเทอมดังกล่าวนี้เป็นผลให้ค่าความดันตกที่อยู่ในเทอมด้านซ้ายมือของสมการมีค่าลดลง เมื่อพิจารณาเทอมดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าสัดส่วนระหว่าง S และ d_v มีค่าน้อยหรือกล่าวได้ว่า

$$\frac{SP}{d_v D} = f(\psi, D) \quad [5]$$

จากสมการ (5) จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบรูปร่าง (ψ) จะมีค่าสูงสุดคือ 1 ดังนั้นค่าขนาดของท่อจึงน่าจะมีอิทธิพลต่อเทอมดังกล่าวมากกว่า อย่างไรก็ตามการที่เทอมดังกล่าวแสดงถึงความเกี่ยวพันกันระหว่างค่าตัวประกอบรูปร่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทำให้ผลของตัวแปรทั้งสองน่าจะมีผลกระทบซึ่งกันและกัน กล่าวคือจากการทดลองกับเม็ดสีขาวเปลือก เราสังเกตพบความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการใช้สมการ (4) ซึ่งจากการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวพบว่าค่าตัวประกอบรูปร่างของเม็ดสีขาวเปลือกนั้นอยู่ที่ 0.46 ในขณะที่ค่าตัวประกอบรูปร่างของวัสดุที่นำมาทดลองจะอยู่ที่ช่วงระหว่าง 0.69 – 0.91 ดังนั้นความคลาดเคลื่อนที่ได้นี้จะเป็นผลที่มาจากข้อจำกัดของอิทธิพลของตัวประกอบรูปร่างเนื่องจากการได้ทำการทดลองที่ขนาดของท่อขนถ่ายเดียวกัน และเมื่อนำมาพิจารณาพร้อมกับเทอม $SP/d_v D$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ จึงน่าจะเป็นไปได้ว่าค่าตัวประกอบรูปร่างซึ่งเดิมเข้าใจว่าจะมีผลกระทบโดยตรงกับค่าความดันตกนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนถ่ายด้วยกล่าวคือ หากเราสามารถเลือกใช้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนถ่ายให้เหมาะสมกับค่าตัวประกอบรูปร่างค่าหนึ่งน่าจะส่งผลให้ค่าความดันตกในระบบนั้นมีค่าลดลงได้ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือหากเราทราบผลกระทบระหว่างตัวประกอบรูปร่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออย่างชัดเจน จะสามารถสร้างสมการที่ทำนายค่าความดันตกได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น

▪ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศ

จากเทอมของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศจะเห็นว่า เมื่อค่าตัวเลขเรย์โนลด์ของอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้เทอม $590/Re_a$ มีค่าลดลง ส่งผลให้เทอมด้านซ้ายมือของสมการมีค่าลดลง หรือค่าความดันตกมีค่าลดลงนั่นเอง

▪ ค่าความหนาแน่นเฟส

จากสมการ (4) เห็นได้ว่าเมื่อค่าความหนาแน่นเฟสเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เทอม 0.00225ϕ มีค่าเพิ่มขึ้น อันจะส่งผลให้เทอมด้านซ้ายมือของสมการมีค่าเพิ่มขึ้น หรือค่าความดันตกมีค่าสูงขึ้นนั่นเอง ผลดังกล่าวนี้ตรงกับพฤติกรรมของการไหลของของผสม โดยเมื่อค่าความหนาแน่นเฟสสูงขึ้นนั้น จะเป็นผลให้ปริมาณของชิ้นวัสดุที่อยู่ในระบบการขนถ่ายมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้อากาศต้องเอาชนะค่าแรงต้านที่

เกิดมาจากชิ้นวัสดุที่เพิ่มมากขึ้น อันจะเป็นผลให้ค่าความดันตกของอากาศในการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาทำให้ได้สมการซึ่งสามารถนำมาใช้เพื่อการทำนายค่าความดันตกของระบบการขนถ่ายของชิ้นวัสดุด้วยอากาศเมื่อทราบค่าต่างๆ อันได้แก่ ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ ค่าอัตราการไหลเชิงมวลของชิ้นวัสดุและคุณสมบัติของชิ้นวัสดุ โดยสมการดังกล่าวจะมีความแม่นยำเมื่อใช้กับการขนถ่ายของวัสดุที่มีค่าตัวประกอบรูปร่างอยู่ในช่วงที่ทำการทดลองเก็บข้อมูล แต่ถ้าจะนำไปใช้กับวัสดุที่มีคุณสมบัติแตกต่างไปจากวัสดุที่ได้ทำการทดสอบหรือมีค่าตัวประกอบรูปร่างอยู่นอกเหนือจากช่วงดังกล่าวค่อนข้างมากแล้ว จะต้องใช้ความระมัดระวังในการใช้สมการดังกล่าวนี้ นอกจากนี้จากสมการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบรูปร่างมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการณ์การขนถ่าย แต่ผลของค่าตัวประกอบรูปร่างที่มีต่อพฤติกรรมการณ์การขนถ่ายจะมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อที่ใช้ขนถ่ายด้วย ดังนั้นหากทราบผลกระทบร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ทั้งสองที่มีต่อพฤติกรรมการณ์การขนถ่ายได้ชัดเจนยิ่งขึ้น น่าจะทำให้สามารถสร้างสมการที่ใช้ในการทำนายพฤติกรรมการณ์การขนถ่ายได้อย่างถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้นและนำไปสู่การสร้างสมการที่เอนกประสงค์ กล่าวคือสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการณ์การขนถ่ายวัสดุด้วยอากาศสำหรับวัสดุที่หลากหลายได้

7. รายการอ้างอิง

1. รัชชัย ชรินพานิชกุล และ วิวัฒน์ คันทะพานิชกุล. Experimental Study of Pneumatic Conveying of Polyethylene Powder. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (ม.ป.ป.).
2. R.D.Marcus, L.S.Leung, G.E.Klinzing and F.Rizk. Pneumatic Conveying of Solids. Great Britain: Chapman and Hall, 1990.
3. David Mills. Pneumatic Conveying Design Guide. Great Britain: Butterworths, 1990.
4. G.W.Govier and K.Aziz. The Flow of Complex Mixtures in Pipes. New York: Van Nostrand Reinhold, 1972.
5. H.A. Stroess, Jr., P.E. Pneumatic Conveying. Second Edition. United States of America: John Wiley & Sons, 1983.
6. Milton N. Kraus. Pneumatic Conveying of Bulk Materials. New York: The Ronald Press, 1968.
7. ยุทธนา ทรงเงินดี. การศึกษาผลของรูปร่างของชิ้นวัสดุต่อการขนถ่ายด้วยอากาศ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542