

ความดันสูญเสียจากวัสดุในท่อตรงของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม Pressure loss due to Materials in Straight Pipes of Pneumatic Conveying System

ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี* และพรชัย จงจิตรไพศาล*

บทคัดย่อ

โดยทั่วไปแล้วค่าความดันสูญเสียในท่อมี่มีความสำคัญในการออกแบบระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม ความดันสูญเสียในระบบประกอบด้วยความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลของอากาศ และความดันสูญเสียเนื่องจากการไหลของวัสดุ ตัวแปรที่สำคัญที่ต้องทราบค่าสำหรับการหาความดันสูญเสียจากการไหลของวัสดุก็คือ ตัวคูณประกอบความเสียดทานระหว่างวัสดุกับท่อขนถ่าย ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ ความเร็วของอากาศที่ไหลในท่อ ความหนาแน่นอากาศ ความหนาแน่นของวัสดุ ขนาดของวัสดุ รูปร่างของวัสดุ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนถ่าย ความยาวของท่อ คุณภาพผิวท่อด้านใน และอัตราการขนถ่ายวัสดุ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อหาตัวคูณประกอบความเสียดทานของวัสดุกับท่อขนถ่ายวัสดุ โดยใช้วัสดุที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร 3 ชนิดได้แก่ ข้าวเปลือก เมล็ดถั่วเขียว และเมล็ดข้าวโพด แล้วนำค่าที่ได้จากการทดลองไปแทนในสมการความดันสูญเสียวัสดุที่ได้จากการใช้วิธีวิเคราะห์มิติ (dimension analysis) ซึ่งจะช่วยให้สมการความดันสูญเสียสามารถทำนายสภาวะการไหลแบบเบาบาง (dilute phase) และการไหลแบบหนาแน่น (dense phase) ได้อย่างแม่นยำ

Abstract

In general, pipe pressure loss is of great importance for a design of pneumatic conveying system. The pressure loss of such a system is composed of two parts: fluid pressure loss and solid pressure loss. To determine the solid pressure loss, the solid friction factor which depends on solid and fluid velocities, solid and fluid densities, solid shape, solid size, pipe diameter, conveying distance, pipe

surface roughness and conveying rates must be known. The experiments were conducted in order to obtain 3 different solid friction factors for paddy, mung bean, and corn kernel. The experimental data were then applied in a solid pressure loss equation derived by using dimensional analysis method. It was found that the solid pressure loss equations can be used to predict the pressure loss both in dilute phase and dense phase conveying with good accuracy.

1. บทนำ

การหาค่าความดันสูญเสียวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ ข้าวเปลือก เมล็ดถั่วเขียว เมล็ดข้าวโพด ด้วยการสร้างสมการเพื่อใช้ในการคาดการณ์ความดันสูญเสียภายในท่อตรง ครอบคลุมทั้งสภาวะการไหลแบบเบาบาง (dilute phase) และการไหลแบบหนาแน่น (dense phase) ตลอดจนหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่สูญเสียภายในท่อตรงกับอัตราการขนถ่ายวัสดุ

สมการคาดการณ์ความดันสูญเสียวัสดุที่มีความแม่นยำ ส่งผลให้การเลือกใช้ขนาดพลังงานในระบบขนถ่ายวัสดุอย่างเหมาะสม และได้ข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไปสู่การออกแบบระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยลม

ในการออกแบบระบบขนถ่ายวัสดุ จำต้องทราบข้อมูลพื้นฐาน เช่น คุณสมบัติวัสดุ อัตราการขนถ่ายที่ต้องการ และการกำหนดความเร็วในการขนถ่ายวัสดุ ข้อมูลทั้งหมดมีผลต่อการเลือกขนาดของกำลังหรือพลังงานที่จะนำมาใช้ในการขนถ่ายวัสดุ

ปัจจุบันการหาค่าความดันสูญเสียวัสดุจากสมการที่มีอยู่ ใช้ได้กับวัสดุบางประเภทเท่านั้น และในวัสดุที่เป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรยังไม่มีผลการวิจัย ด้วยเหตุที่คุณสมบัติวัสดุแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้ค่า

* ภาควิชาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ความดันสูญเสียวัสดุที่เกิด ขึ้นอยู่กับตัวแปรขนาดของ วัสดุ ความหนาแน่นของวัสดุ รูปร่างของวัสดุ เส้นผ่าน ศูนย์กลางของท่อ ความยาวของท่อ คุณภาพผิวท่อ ดานใน อัตราการขนถ่าย และสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ระหว่างผิวท่อกับวัสดุ

ด้วยเหตุดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องทำการ ทดสอบเพื่อเก็บข้อมูล และสร้างสมการหาขนาดความ สูญเสียความดันที่จะใช้กับผลิตผลทางการเกษตร อาศัย วิธีการวิเคราะห์มิติ (dimensional analysis) จะทำให้ได้ ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องดังนี้

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_s = \Delta p_f + m^* \lambda_s \frac{\rho_f V_f^2}{2D} \Delta L \quad (1)$$

เมื่อ $\lambda_s = x_1 m^{*x_2} Fr^{x_3} \rho_f^{x_4}$

2. การคาดการณ์ค่าความสูญเสีย

การคาดการณ์ค่าความสูญเสียรวมในการไหลของ วัสดุและอากาศในระบบขนถ่ายด้วยลมเป็นปัจจัยที่ทำให้ เกิดการหาค่าความดันสูญเสียในการไหลของวัสดุ และอากาศในแต่ละส่วนของท่อตรง ในการหาค่าความ สูญเสีย (ΔP) จะมีข้อจำกัด

สมการความดันสูญเสียมีค่าเท่ากับผลบวกของ สองฟังก์ชันคือฟังก์ชันที่เกี่ยวกับค่าสูญเสียของอากาศ และฟังก์ชันที่เกี่ยวกับค่าสูญเสียของวัสดุ ตามสมการที่ (1)

$$\Delta P_s = m^* \lambda_s \left(\frac{\rho_f V_f^2}{2D} \right) \times \Delta L \quad (2)$$

และค่า λ_s หาได้จากสมการที่ผ่านการวิเคราะห์มิติดังนี้

$$\lambda_s = 2k \times \left[\frac{\pi}{4} \right]^i \times \left[\frac{\Delta L}{D} \right]^{c-1} m^{*i-1} V^{-f} \rho_f^{-f} \times \left[\frac{\mu}{D} \right]^f \times \left[\frac{\varepsilon}{d} \right]^h \quad (3)$$

$$\lambda_s = \phi(m^* \times V_p \times \rho_f^{-f} \times D_s \times \Delta L)$$

$$\lambda_s = x_1 m^{*x_2} \times Fr^{x_3} \times \rho_f^{x_4} \quad (4)$$

ค่าคงที่ x_1, x_2, x_3 และ x_4 สามารถหาค่าได้จาก การทดลอง โดยนำค่าตัวแปรแทนในสมการที่ (4) ในแต่ละ สภาวะ เนื่องจากค่าคงที่ x_1, x_2, x_3 และ x_4 ถือว่ายังไม่

ทราบค่า 4 ตัวแปรหากต้องการแก้สมการจะต้องทดสอบ ให้ได้ข้อมูล 4 ชุด หรือ 4 สมการ

จากสมการที่ (1)

$$\Delta P = (\lambda_s \frac{\rho_f V_f^2}{2D}) \times \Delta L - \lambda_f \frac{\rho_f V_f^2}{2D} \times L \quad (5)$$

$$\lambda_s = \frac{\Delta L (\rho_f V_f^2)}{m^*} \quad (6)$$

สมการที่ใช้ในการประมาณค่า

$$\lambda_s = x_1 m^{*x_2} \times Fr^{x_3} \times \rho_f^{x_4} \quad (7)$$

นำค่าตัวแปรต่างๆ มาคำนวณในโปรแกรม math cad แล้วนำค่าที่ได้ไปใส่ใน สมการที่ (6) และสมการที่ (7) หลังจากนั้นแก้ปัญหสมการของตัวแปรทั้ง 4 ตัวแปร

$$\begin{aligned} \lambda_{s1} &= x_1 m_1^{*x_2} \times Fr_1^{x_3} \times \rho_{f1}^{x_4} \\ \lambda_{s2} &= x_1 m_2^{*x_2} \times Fr_2^{x_3} \times \rho_{f2}^{x_4} \\ \lambda_{s3} &= x_1 m_3^{*x_2} \times Fr_3^{x_3} \times \rho_{f3}^{x_4} \\ \lambda_{s4} &= x_1 m_4^{*x_2} \times Fr_4^{x_3} \times \rho_{f4}^{x_4} \end{aligned} \quad (8)$$

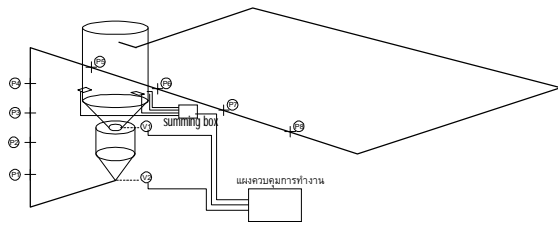
เมื่อ $\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \lambda_{s3}, \lambda_{s4} =$ แฟกเตอร์ความเสียหาย วัสดุในสภาวะต่างๆ

3. การติดตั้งท่อในระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม

ในการสร้างชุดทดลองจะเริ่มจากการติดตั้งท่อ ขนาด 2 นิ้ว ภายในพื้นที่ประมาณ 8 x 8 เมตร เป็นวงจรร ังแสดงในรูปที่ 1 โดยมีส่วนประกอบหลักคือ ไซโลเก็บ วัสดุที่ติดตั้งชุดชั่งน้ำหนักเพื่อหาอัตราการขนถ่ายวัสดุ



รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์ และเส้นทางเดินท่อ



รูปที่ 2 การติดตั้งชุดชั่งน้ำหนัก



รูปที่ 3 ชุดจ่ายวัสดุเข้าถึงความดัน



รูปที่ 4 ชุดจ่ายวัสดุเข้าระบบ



รูปที่ 5 ชุดปรับปริมาณผ่านการปรับตั้งค่าแล้ว

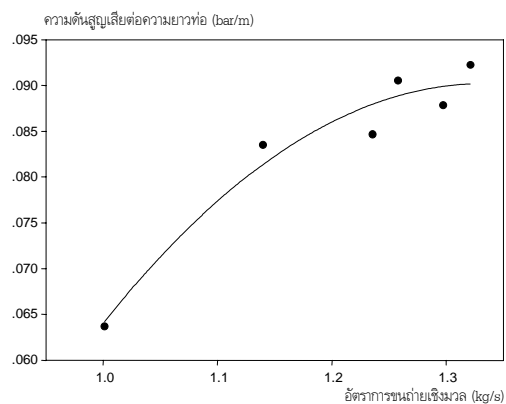
ถึงความดันที่มีหน้าที่ในการจ่ายวัสดุ วาล์วจ่ายวัสดุที่ติดตั้งได้ถึงความดันทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของวัสดุ ท่อตรงและท่อโค้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว หัววัดความดันจำนวน 8 หัว ติดตั้งกับท่อแนวตั้ง 4 หัวและติดตั้งกับท่อในแนวนอนอีก 4 หัว เพื่อใช้วัดความดันที่ตำแหน่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 ส่วนประกอบที่มีความสำคัญอีกคือวาล์วหมุนจ่ายทำหน้าที่ป้อนวัสดุลงไปถึงความดันเพื่อให้การขนถ่ายวัสดุเกิดความต่อเนื่องดังในรูปที่ 4 และจุดปรับปริมาณเพื่อควบคุมปริมาณที่จะจ่ายให้กับวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 5

4. ผลการทดลอง

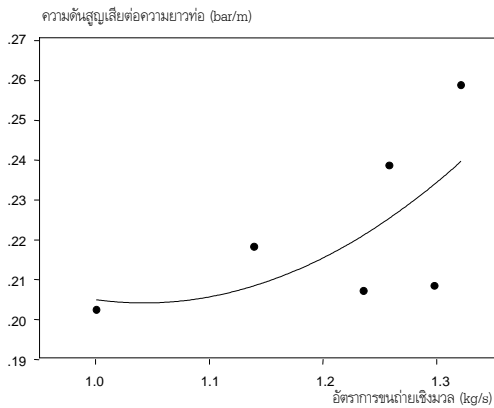
การทดลองจะเริ่มจากการปล่อยลมเข้าไปในระบบ เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีวัสดุตกค้างในระบบจากข้อสมมุติฐาน

ตารางที่ 1 สรุปค่าตัวแปรที่เกิดในสถานการณ์ที่แตกต่างกันที่เก็บค่าจากการทดลอง

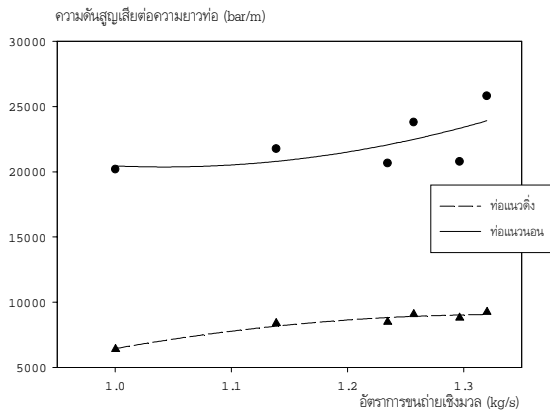
ขนถ่ายเมล็ดข้าวเปลือก ด้วยท่อในแนวตั้ง							
	P_{system} (bar)	Q (m ³ /s)	ΔP (bar)	ΔL (m)	δP_v (Pa/m)	m_s (kg/s)	T(C)
1	0.60	0.0861	0.033	0.4	8378.75	1.139	33.13
2	0.68	0.0917	0.036	0.4	9080.75	1.257	33.29
3	0.71	0.0986	0.034	0.4	8493	1.234	33.39
4	0.80	0.1056	0.035	0.4	8812	1.296	33.24
5	0.90	0.1125	0.037	0.4	9252.5	1.320	32.54
ขนถ่ายเมล็ดข้าวเปลือก ด้วยท่อในแนวนอน							
	P_{system} (bar)	Q (m ³ /s)	ΔP (bar)	ΔL (m)	δP_v (Pa/m)	m_s (kg/s)	T(C)
1	0.60	0.0861	0.719	3.3	21776.9	1.139	33.13
2	0.68	0.0917	0.785	3.3	23803.7	1.257	33.29
3	0.71	0.0986	0.341	1.6	20668.9	1.234	33.39
4	0.80	0.1056	0.343	1.6	20792	1.296	33.24
5	0.90	0.1125	0.852	3.3	25819.6	1.320	32.54



รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันสูญเสียกับความดันสูญเสียบนอัตรการขนถ่ายเชิงมวล ของท่อในแนวตั้งของการขนถ่ายข้าวเปลือก



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความดันสูญเสีย อัตราการขนถ่ายเชิงมวลของท่อในแนวนอนของการขนถ่ายข้าวเปลือก



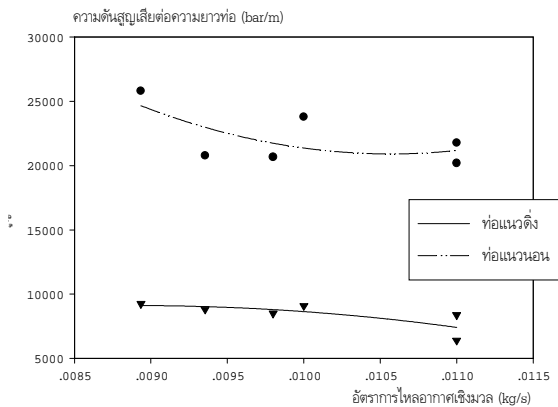
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของอัตราการขนถ่ายเชิงมวลวัสดุ และความดันสูญเสียต่อความยาวท่อ

เพื่อจะศึกษาความดันที่สูญเสีย จึงต้องพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ความดันในระบบ ปริมาณลมในระบบ อัตราการขนถ่ายวัสดุ และอุณหภูมิขณะทดลอง แล้วนำค่าที่วัดได้บันทึกลงในตารางที่ 1 ข้อมูลดังกล่าวนำไปสู่การหาค่าความดันสูญเสียต่อความยาวเทียบกับอัตราการขนถ่ายวัสดุ ถ้าเป็นท่อในแนวดิ่งจะแสดงในรูปที่ 6 แต่ถ้าเป็นท่อแนวนอนจะแสดงในรูปที่ 7 แล้วนำมาเปรียบเทียบในรูปที่ 8

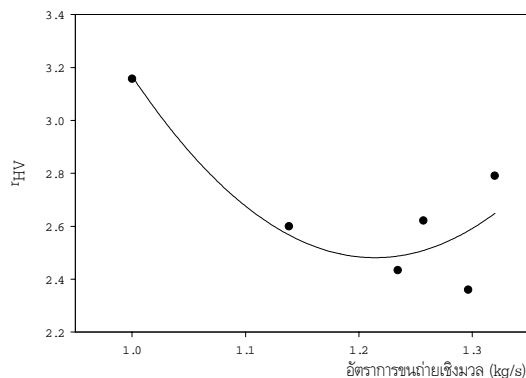
ค่าที่ได้จากการทดลอง สามารถคำนวณดังแสดงในตารางที่ 2 เพื่อศึกษาความดันที่สูญเสียต่อความยาวท่อกับอัตราการไหลอากาศเชิงมวลดังแสดงในรูปที่ 9 หากค่าอัตราส่วนความดันสูญเสียท่อแนวนอนต่อท่อแนวตั้งกับอัตราการขนถ่ายเชิงมวลดังแสดงในรูปที่ 10 และกราฟแสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนความดันสูญเสียท่อแนวนอนต่อท่อแนวตั้ง กับอัตราส่วนมวลวัสดุต่อมวลอากาศดังแสดงในรูปที่ 11

ตารางที่ 2 สรุปข้อมูลที่ได้จากการคำนวณค่าเพื่อนำไปใช้ การขนถ่ายเมล็ดข้าวเปลือก

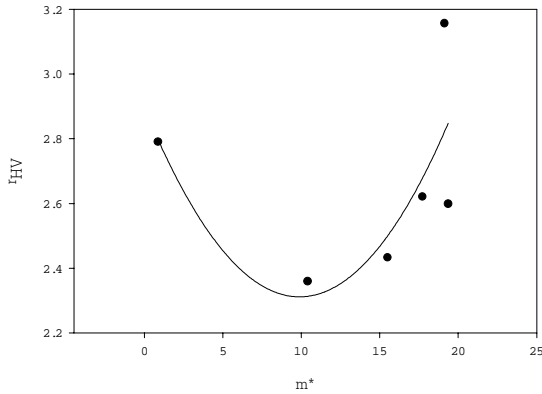
ขนถ่ายเมล็ดข้าวเปลือก ด้วยท่อในแนวดิ่ง						
	m'	m_t	λ	λ_c	ρ_f	Re
1	19.364	0.059	0.011	0.035	0.683	7.966×10^5
2	17.72	0.071	0.01	0.032	0.774	9.61×10^5
3	15.506	0.08	0.0098	0.028	0.807	7.079×10^6
4	10.406	0.096	0.00935	0.034	0.91	1.302×10^6
5	0.861	0.115	0.00893	0.029	1.026	1.564×10^6
ขนถ่ายเมล็ดข้าวเปลือก ด้วยท่อในแนวนอน						
	m'	m_t	λ	λ_c	ρ_f	Re
1	19.364	0.059	0.011	0.092	0.683	7.966×10^5
2	17.72	0.071	0.01	0.086	0.774	9.61×10^5
3	15.506	0.08	0.0098	0.07	0.807	1.079×10^6
4	10.406	0.096	0.00935	0.063	0.91	1.302×10^6
5	0.861	0.115	0.00893	0.072	1.026	



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของอัตราการขนถ่ายเชิงมวลอากาศและความดันสูญเสียต่อความยาวท่อ



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ของอัตราการขนถ่ายเชิงมวลและอัตราส่วนความดันสูญเสียท่อแนวนอนต่อท่อแนวตั้ง



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนมวลวัสดุต่อมวลอากาศและอัตราส่วนความดันสูญเสียต่อแนวนอนต่อท่อแนวดิ่ง

ตารางที่ 3 ค่า X_1 , X_2 , X_3 และ X_4 ที่ได้จากการแก้สมการ (สำหรับท่อในแนวดิ่ง)

ค่า X_1	ค่า X_2	ค่า X_3	ค่า X_4
2.970	8.998	0.247	6.049

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าคุณค่า X_1 , X_2 , X_3 และ X_4 ที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันมากจึงถือได้ว่าการหาค่าดังกล่าวสามารถที่จะเลือกใช้สภาวะใดก็ได้ แต่อย่างไรก็ตามอาจจะมีผลผิดพลาดบ้าง ดังจะได้แสดงความสัมพันธ์ต่อไป สมการที่เลือกใช้งานจะประกอบไปด้วยสภาวะที่ 2, 3, 4 และ 5 จึงทำให้ได้สมการที่ (8) สำหรับท่อในแนวดิ่ง โดยค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงมวล (m_s) เท่ากับ 1.1386 ถึง 1.320 โดยประมาณ

$$\lambda_s = 2.970(m^*)^{8.998} F_{fm}^{(0.247)} \rho_{fm}^{6.049} \quad (9)$$

ตารางที่ 4 ค่า X_1 , X_2 , X_3 และ X_4 ที่ได้จากการแก้สมการ (สำหรับท่อในแนวนอน)

ค่า X_1	ค่า X_2	ค่า X_3	ค่า X_4
2.971	8.998	0.247	6.081

จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าคุณค่า X_1 , X_2 , X_3 และ X_4 ที่ได้จะทำให้ได้ค่า λ_s ที่ใกล้เคียงกันมากดังเขียนสมการที่ (10) สำหรับท่อในแนวนอน โดยค่าอัตราการขนถ่ายวัสดุเชิงมวล (m_s) เท่ากับ 1.0002 ถึง 1.2965 โดยประมาณ

$$\lambda_s = 2.971(m^*)^{8.998} F_{fm}^{(0.247)} \rho_{fm}^{6.081} \quad (10)$$

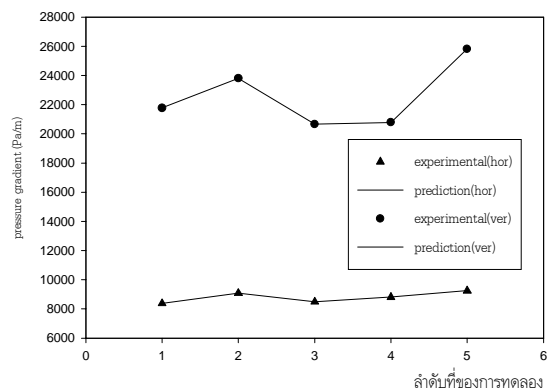
5. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยกับวัสดุทางการเกษตร ได้แก่ ข้าวเปลือก เมล็ดถั่วเขียว เมล็ดข้าวโพด ด้วยการสร้างสมการเพื่อใช้ในการคาดการณ์ความดันสูญเสียภายในท่อตรง

การศึกษาค่าความดันสูญเสียวัสดุที่เกิดขึ้นในสภาวะการไหลแบบเบาบาง (dilute phase) และการไหลแบบหนาแน่น (dense phase) เพื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่สูญเสียภายในท่อตรงกับอัตราการขนถ่ายวัสดุพบว่าค่าความเสียหายไม่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะการไหล

การสร้างสมการคาดการณ์ความดันสูญเสียวัสดุทำให้สามารถหาค่าความดันสูญเสียภายในท่อตรงได้อย่างแม่นยำ

งานวิจัยเริ่มจากการหาคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อใช้ในการกำหนดความสัมพันธ์ของสมการความดันสูญเสียในท่อตรงของระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลม



รูปที่ 12 กราฟเปรียบเทียบความดันสูญเสียระหว่างท่อในแนวนอนกับท่อในแนวดิ่ง ในการขนถ่ายข้าวเปลือก ขนาดท่อ 2 นิ้ว

ตารางที่ 5 คุณสมบัติของวัสดุทดสอบ

คุณสมบัติของวัสดุ	ประเภทวัสดุที่ใช้ในการทดลอง		
	ข้าวเปลือก	ข้าวโพด	ถั่วเขียว
Moisture content (% w.b.)	12.64	11.07	10.27
Particle equivalent diameter (mm)	1.433	3.195	2.067
Sphericity	0.436	0.885	0.554
Single kernel weight (gm)	0.021	0.29	0.054
Single kernel volume (cc)	0.00153	0.017	0.0046
Single kernel surface (m ²)	3.535	19.3	8.343
Bulk density (kg/m ³)	521.76	892.5	710.45
Solid density (kg/m ³)	1425.7	1622.38	1583.6
Terminal velocity (m/s)	5.1	11.16	7.27

ตารางที่ 6 ตารางสรุปค่าตัวคูณประกอบ

ชนิดวัสดุ	อัตราขนถ่าย (kg s)	ท่อในแนวตั้ง				ท่อในแนวนอน			
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
ขาวเปลือก	1.320	2.970	8.998	0.247	6.049	2.971	8.998	0.247	6.081
ขาวโพด	1.665	2.977	8.998	0.248	6.001	2.863	1	1.466	6.009
ถั่วเขียว	1.8	2.863	0.999	1.475	5.971	2.863	0.999	1.466	6.009

6. ข้อเสนอแนะ

การหาสมการคาดการณ์ค่าความดันสูญเสียวัสดุที่เกิดจากผลิตผลทางการเกษตรเพื่อนำใช้ในการออกแบบระบบการขนถ่ายวัสดุด้วยลม โดยการออกแบบที่ดีจะทำให้การใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ

การออกแบบระบบจำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับแรงเสียดทาน โดยตัวแปรที่มีผลต่อค่าดังกล่าวมีมากมายจนทำให้การประมาณค่าจากสมการเกิดความผิดพลาดมาก สมการที่ได้จากการทดลองจริงทำให้ได้สมการที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด โดยสมการจะแบ่งแยกจากชนิดของวัสดุและลักษณะของท่อที่อยู่ในแนวตั้ง และอยู่ในแนวนอน สมการที่ (9) และสมการที่ (10) จะเป็นสมการที่ใช้หาค่าความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นโดยค่าตัวแปรประกอบจะพิจารณาจากตารางที่ 6

ผลงานวิจัยที่ควรกระทำต่อเนื่องคือการหาค่าความดันสูญเสียที่เกิดบนส่วนของท่อโค้ง เพราะเป็นจุดที่ระบบสูญเสียความดันมาก และหากการวิจัยสามารถที่จะหาวิธีลดการสูญเสียลงได้ จะเป็นการใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ครั้งที่ 2/2543 พร้อมทั้งได้รับความเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่จากภาควิชาเทคโนโลยีขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จึงทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำวิจัยจึงถือโอกาสนี้ขอบคุณมาด้วย

8. คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

- D เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
d ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของวัสดุ (m)
Fr ฟรัวร์นัมเบอร์
 ΔL ความยาวแตกต่างในส่วนของท่อตรง (m)

- m^* อัตราการไหลของมวลวัสดุต่อมวลอากาศ
 m_f อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)
 m_s อัตราไหลเชิงมวลของวัสดุ (kg/s)
 Δp ความดันสูญเสีย (N/m²)
 δp ความดันในท่อตรง (N/m²)
Q อัตราการไหลของของไหล (m³/s)
R รัศมีความโค้งของข้องอ (m)
Re ค่าเรโนลด์นัมเบอร์
T อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
V ความเร็วในแนวแกนบนพื้นที่หน้าตัดของท่อตรง (m/s)
z แฟกเตอร์รูปร่างของวัสดุ
 μ ความหนืดจลน์ (N.s/m²)
 λ แฟกเตอร์ความเสียดทานในท่อตรง
 λ_{fs} แฟกเตอร์ความเสียดทานของอากาศในท่อตรง
 ρ_{fs} ความหนาแน่นเฉลี่ยของของไหลที่พื้นที่หน้าตัดของท่อตรง (kg/m³)
 Φ ตัวแปรของฟังก์ชัน
 ϵ ความขรุขระของผิวท่อ (m)
 v สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผนังท่อกับวัสดุ
 r_{HV} อัตราส่วนความดันสูญเสียท่อแนวนอนต่อท่อแนวตั้ง

เอกสารอ้างอิง

1. Wypych, P.W. and Pan, R. *Pressure Drop to Solids-Air Flow in Horizontal and Vertical Pipes*. Powder Handling & Processing.
2. Marcus, R.D, et al. *Pneumatic Conveying of Solids*. 2nd. New York : Chapman and Hall, 1997.
3. Wypych, P.W. and Pan, R. *Determination of Air-Only Pressure Drop in Pneumatic Conveying Systems*. Powder Handling & Processing. 3. 1991.