

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการขนถ่ายเม็ดพลาสติกด้วยลมแบบเบาบางในท่อ แนวนอน

Friction Factor of Plastic Particles in Horizontal Pipe of Dilute Phase Pneumatic Conveying

รุ่งตะวัน วิวัฒนาศิริกุล^{1*} และ ปรีมพัฒน์ สุจ่างค์โตกุล²

^{1*} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 123 หมู่ 16 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 123 หมู่ 16 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

* ติดต่อ: E-mail: w_rungtawan@hotmail.com โทรศัพท์: (043) 202 845 โทรสาร: (043) 202 849

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้เป็นเป็นการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวม (f_{tot}) ของการขนถ่ายวัสดุด้วยลมแบบเบาบางในท่อจั่ววางตัวในแนวระดับ โดยใช้เม็ดพลาสติกชนิดโพลีโพรพิลีน (Polypropylene) สามลักษณะที่มีสมบัติต่างกัน ได้แก่ ลักษณะเป็นทรงกลม ทรงกระบอก รูปทรงกลมแบบไม่สม่ำเสมอ และอัตราส่วนของความเป็นทรงกลมเฉลี่ย มีค่าระหว่าง 73% ถึง 85 % ภายใต้ความดันของระบบต่ำกว่า 1 bar โดยมีท่อทดสอบ (Test section) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 79 mm ความยาว เท่ากับ 8.57 m ความเร็วลมที่ใช้ทดสอบ ระหว่าง 16 ถึง 35 m/s นอกจากนี้ยังได้ศึกษา อิทธิพลของความเร็วของลม อัตราเร็วเชิงมวลการขนถ่ายเม็ดพลาสติก ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการขนถ่าย ผลการทดลองพบว่า แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของเม็ดพลาสติกทั้ง สามลักษณะเป็นไปตามแนวโน้มเดียวกัน การศึกษาครั้งนี้ยังได้เสนอ สหสัมพันธ์อย่างง่ายของการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของเม็ดพลาสติกเพื่อใช้ในการทำนายค่าความดันสูญเสีย (Pressure drop) ของการขนถ่าย

คำหลัก: สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน แนวนอน ความดันลด การขนถ่ายวัสดุด้วยลม

Abstract

The total friction factor (f_{tot}) of plastic particles in horizontal dilute - phase flow of pneumatic conveying was experimentally conducted. The plastic particles were used with different physical properties; such as density, particle shape (spherical, cylindrical, and nodular) and sphericity ranges from 73% to 85 %. The test section was made of steel pipe with 79 mm inner diameter and 8.57-m long. The superficial velocity of air was varied from 16 to 35 m/s. The system pressure of operation was less than 1 bar gage. In addition, the effect of air velocity and solids mass flow rate on the total friction factor were investigated. The results showed that the total friction factor for three types of particles still have the same

trend. Finally, this study also proposed simple correlations of total friction factor of pneumatic conveying system for each type of tested plastic particle.

Keyword: Total friction factor, Horizontal, Pressure drop, Pneumatic conveying

1. บทนำ

เม็ดพลาสติกเป็นวัตถุดิบในการผลิตอุปกรณ์และผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ระบบอุตสาหกรรมในประเทศไทยสามารถผลิตในปริมาณที่มากทำให้มีความต้องการลำเลียงไปสู่ที่เก็บเพื่อรอการจำหน่ายหรือเพื่อนำไปแปรรูปต่อไป และเนื่องจากปัจจัยหลายประการทำให้ความต้องการระบบขนถ่ายวัสดุที่มีประสิทธิภาพ

เนื่องจากกระบวนการในการผลิตได้มีการเคลื่อนย้ายเม็ดพลาสติกเพื่อนำไปแปรรูปผลิตภัณฑ์หรือนำไปเก็บไว้เพื่อรอจำหน่ายต่อไปจำเป็นต้องอาศัยระบบขนถ่ายที่สะดวก ปลอดภัยและภายในโรงงาน ดังนั้นจึงได้นำระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมเพื่อขนถ่ายเม็ดพลาสติกภายในโรงงานอย่างแพร่หลาย ทั้งนี้ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมยังต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสำหรับการขนถ่ายวัสดุแต่ละชนิดเพื่อให้ได้ระบบขนถ่ายที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดคือ ไม่ทำให้เกิดฝุ่นละอองและกลิ่นในขณะขนถ่าย ทำให้สามารถเก็บเม็ดพลาสติก และขนถ่ายในทิศทางที่แน่นอน สะดวก และรวดเร็วในการขนถ่าย โดยไม่ต้องใช้แรงงานคนเป็นจำนวนมาก

ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังมีความต้องการที่จะพัฒนาทางด้านการออกแบบเพื่อให้ การสร้าง และการใช้งานระบบให้ได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดย เงื่อนไขที่ต้องการออกแบบประกอบด้วย 3 เงื่อนไข เงื่อนไขแรกได้แก่ ความต้องการขนถ่ายวัสดุให้ได้ปริมาณตามที่ต้องการ เงื่อนไขข้อที่สอง ได้แก่ ต้องออกแบบให้ต้องใช้พลังงานภายในระบบให้คุ้มค่า และเงื่อนไขสุดท้ายคือ ไม่ทำให้วัสดุที่ต้องการขนถ่ายเสียหาย ดังนั้นจึง มีหลายปัจจัยที่ทำให้ ระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมมีขีดจำกัดสำหรับการออกแบบ จากทั้งสามเงื่อนไข

ดังกล่าว การออกแบบระบบขนถ่ายวัสดุด้วยลมเพื่อให้สามารถขนถ่ายวัสดุได้ปริมาณมากและ ใช้พลังงานน้อยที่สุดโดยไม่ทำให้วัสดุเสียหาย นั้นจึงต้องคำนึงถึงความดันที่ใช้ขนถ่ายวัสดุให้เหมาะกับวัสดุแต่ละชนิด จากการศึกษาที่ผ่านมา ความดันที่ใช้ขนถ่ายในท่อตรงนอนขณะที่มีการไหลแบบคงตัวเป็นฟังก์ชันของความดันของอากาศ และความดันของวัสดุ [2, 5-6] ตัวแปรที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการขนถ่ายวัสดุด้วยลมทำให้มีผลต่อความดันสูญเสียขณะขนถ่าย คือ สมบัติทางฟิสิกส์ของวัสดุ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง รูปทรง ความหนาแน่น สมบัติของท่อขนถ่าย ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ คุณภาพของท่อ ความยาวท่อ สมบัติของแก๊ส ได้แก่ ความหนาแน่น ความเร็ว ความหนืด เรโนลด์ นัมเบอร์ และสมบัติอื่น ได้แก่ อัตราการป้อนของวัสดุ อิมแพคเฟกเตอร์ การเกิดไฟฟ้าสถิต [1-3] การศึกษาลักษณะพิเศษในการขนถ่ายวัสดุด้วยลมของเม็ดพลาสติกที่ต่างชนิดกันของ โพลีสไตรีน ที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 3.9 mm ความหนาแน่น 1045 kg/m³ ซึ่งมีผิวแข็ง มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน น้อยกว่า โพลีเอทิลีน ที่มีรูปทรงเป็นทรงรี เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย เท่ากับ 4.6 mm ความหนาแน่น 900 kg/m³ ผิวอ่อนนุ่มกว่า และสามารถยุบตัวได้ พบว่า โพลีเอทิลีน มีแนวโน้มของความดันสูญเสียมากกว่าโพลีสไตรีน [4]

ความดันสูญเสียรวมของการขนถ่ายวัสดุด้วยลมในท่อตรงแนวนอน ขณะที่มีการไหลแบบคงตัว เกิดจากความดันสูญเสียที่เป็น ฟังก์ชันของ ทั้งลม (Air pressure drop) และความดันสูญเสียของวัสดุ (Solids pressure drop) หาได้จากสมการ (1)

$$\Delta P_t = \Delta P_a + \Delta P_s \quad (1)$$

เมื่อ ΔP_t คือ ความดันสูญเสียรวม ΔP_a คือความดันสูญเสียที่เกิดเนื่องจากลมโดยแทนความดันสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากอากาศซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของลมไหลผ่านท่อ หาได้จากสมการต่างๆ ไป คือ

$$\Delta P_a = \frac{f_a \rho_a V_a^2 \Delta L}{2D} \quad (2)$$

เมื่อ ρ_a คือ ความหนาแน่นของลม V_a คือความเร็วของลม ΔL คือ ระยะทางระหว่างจุดที่วัดความดัน f_a คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับการไหลของลมในท่อเพียงอย่างเดียว และ ΔP_s คือความดันสูญเสียที่เกิดจากการไหลของวัสดุ และคำนวณได้จากสมการที่ (4) หรือ สมการ (1) – (2) ได้

$$\Delta P_s = \Delta P_t - \Delta P_a \quad (3)$$

หรือคำนวณได้จากสมการที่ P.W. Wypych และ R.Pan [7] ใช้หาค่าความดันสูญเสียของวัสดุสำหรับการขนถ่ายวัสดุด้วยลม ดังนี้

$$\Delta P_s = \frac{f_s \rho_s V_s^2 \Delta L}{2D} \quad (4)$$

เมื่อคำนึงถึงอิทธิพลของอัตราส่วนการไหลของเม็ดวัสดุต่ออัตราการไหลของลม (Mass fraction, μ) Szikszay [1] และ Weber [8] ได้ใช้สมการ (5) ในการคำนวณหารค่า ΔP_t ดังนี้

$$\Delta P_t = (f_a + \mu f_s) \frac{\rho_a V_a^2 \Delta L}{2D} \quad (5)$$

จากสมการ (5) เขียนให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวม ได้

$$\Delta P_t = (f_{tot}) \frac{\rho_a V_a^2 \Delta L}{2D} \quad (6)$$

ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมคำนวณหาได้จากสมการ (7) ดังนี้

$$f_{tot} = (\Delta P_t) \frac{2D}{\rho_a V_a^2 \Delta L} \quad (7)$$

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและทดสอบเพื่อหาค่า สัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของการขนถ่ายเม็ด พลาสติกด้วยลมในท่อตรงแนวระดับ ที่มีผลจาก รูปทรงของเม็ดพลาสติก อัตราส่วนของความเป็นทรงกลม ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นของกองวัสดุ ความเร็วของลมที่ใช้ขนถ่าย และอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ นอกจากนี้ ยังได้หาความสัมพันธ์อย่างง่ายของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวม ของการขนถ่ายอีกด้วย

2. วิธีการทดลอง

การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของการขนถ่ายเม็ดพลาสติกในท่อแนวนอน ใช้เครื่องขนถ่ายวัสดุด้วยลมความดันต่ำ (ต่ำกว่า 1 bar) ระบบขนถ่าย ประกอบด้วย พัดลมเป่าอากาศชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ความดันต่ำ ถึงเก็บวัสดุ ไซโคลนโรตารี วาล์ว (Rotary valve) ท่อในแนวนอนแบ่งเป็นสองส่วนคือ ท่อตรงในแนวนอนส่วนล่าง และท่อตรงในแนวส่วนบน โดยมีระยะห่างระหว่างท่อแนวระดับเท่ากับ 2.75 m ความยาวรวมของระบบทั้งหมดเท่ากับ 25 m

เม็ดพลาสติกที่ใช้ทดลองหาค่าสมบัติทางฟิสิกส์โดย สุ่มเลือกเม็ดพลาสติก 10 กลุ่ม จาก 100 กอง และจากนั้นนำมาหาค่าความหนาแน่นจริงและความหนาแน่นปรากฏ โดยใช้วิธีการแทนที่ของเหลว และหาเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย จากการสุ่มเลือกเม็ดพลาสติกจำนวน 100 เม็ดจากแต่ละกลุ่ม [9-10] ได้เม็ดพลาสติกโพลีโพรพิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นรูปทรงกลม มีค่าอัตราส่วน

ของความเป็นทรงกลมเท่ากับ 84.42 % มีความหนาแน่นจริงเท่ากับ 938.25 kg/m³ ความหนาแน่นของกองวัสดุเท่ากับ 625.82 kg/m³ เม็ดพลาสติกโพลีโพรพิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) มีรูปทรงกลมแบบไม่สม่ำเสมอ มีค่าอัตราส่วนของความเป็นทรงกลมเท่ากับ 77.72 % มีความหนาแน่นจริงเท่ากับ 904.5 kg/m³ ความหนาแน่นของกองวัสดุเท่ากับ 493.72 kg/m³ เม็ดพลาสติกโพลีโพรพิลีนรีไซเคิล (PE Recycle) มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก มีค่าอัตราส่วนของความเป็นทรงกลมเท่ากับ 73.21 % มีความหนาแน่นจริงเท่ากับ 915.66 kg/m³ ความหนาแน่นของกองวัสดุเท่ากับ 575.22 kg/m³

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของการขนถ่ายวัสดุคำนวณทางอ้อมจากการวัดความดันสูญเสียรวม (มาตรฐาน ISO 3966) ของท่อทดสอบแนวนอนที่มีความยาวของท่อเท่ากับ 8.57 m โดยที่เม็ดพลาสติกแต่ละประเภท ถูกป้อนเข้าสู่ระบบโดย โรตารี วาล์ว และไหลไปตามท่อของระบบโดยลมที่เป่ามาจากพัดลมแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal blower) ความเร็วลมถูกวัดโดย Pitot tube (Testo รุ่น T-512) โดยถูกสอบเทียบ (Calibration) ที่มีค่าความแม่นยำ $\pm 0.5\%$

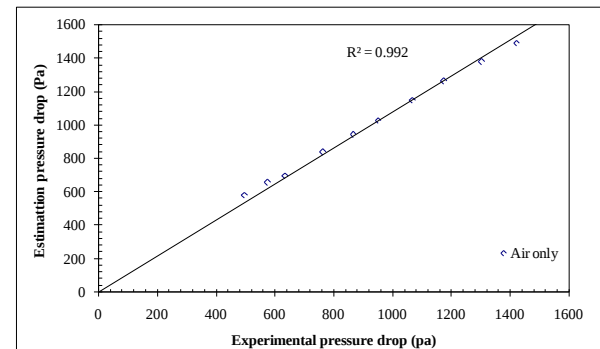
3. ผลการทดลอง

การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของเม็ดพลาสติกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ HDPE LDPE และ PE Recycle ในท่อตรงแนวนอน ได้หาค่าความเชื่อมั่นของข้อมูลโดยการเปรียบเทียบความดันสูญเสียที่ได้จากการทดลองและความดันสูญเสียที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการทั่วไปสำหรับการไหลของอากาศอย่างเดียว ในท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 79 mm ที่ความยาวของท่อเท่ากับการทดลอง การไหลแบบสองสถานะ ความขรุขระของผิวท่อภายในเท่ากับ 0.005 mm ได้ค่า R^2 (Coefficient of determination) เท่ากับ 99.20% แสดงตามรูปที่ 1

จากผลการทดลองในรูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของเม็ดพลาสติก ทั้ง 3 ชนิดมีค่า

เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของเม็ดพลาสติกเพิ่มขึ้นแบบมีสหสัมพันธ์กัน ดังตารางที่ 1

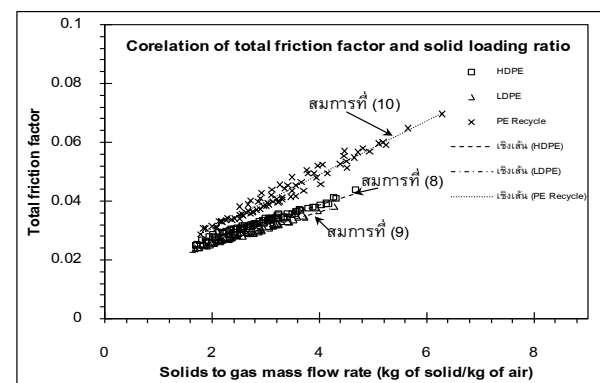
รูปที่ 3 (ก) ถึง 3(ค) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวม ของเม็ดพลาสติก



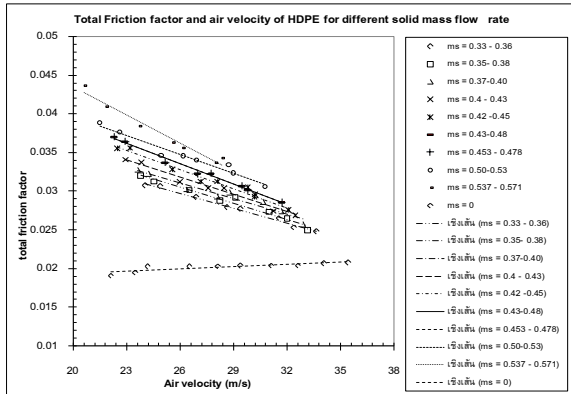
รูปที่ 1 เปรียบเทียบความดันสูญเสียระหว่างผลการทดลอง และผลการคำนวณสำหรับการไหลของอากาศอย่างเดียว

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของเม็ดพลาสติกชนิด HDPE LDPE และ PE Recycle

ชนิด	สหสัมพันธ์	R^2 (%)	สมการที่
HDPE	$f_{tot} = 0.005V_a + 0.015$	94.81	(8)
LDPE	$f_{tot} = 0.009V_a + 0.012$	98.81	(9)
PE Recycle	$f_{tot} = 0.009V_a + 0.012$	97.59	(10)

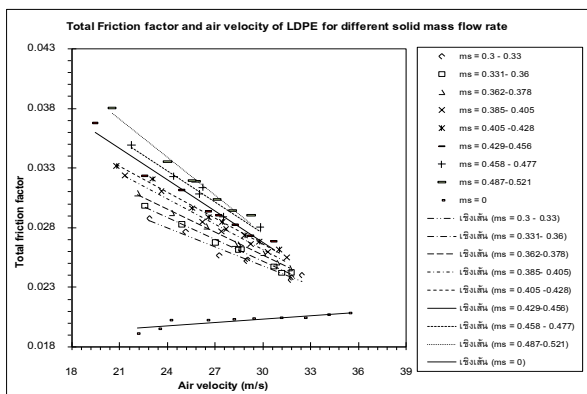


รูปที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ของเม็ดพลาสติกชนิด LDPE HDPE และ PE Recycle



รูปที่ 3 (ก) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเม็ดพลาสติก ชนิด HDPE ที่อัตราการไหลเชิงมวล และ ความเร็วเฉลี่ยของลมเปลี่ยน

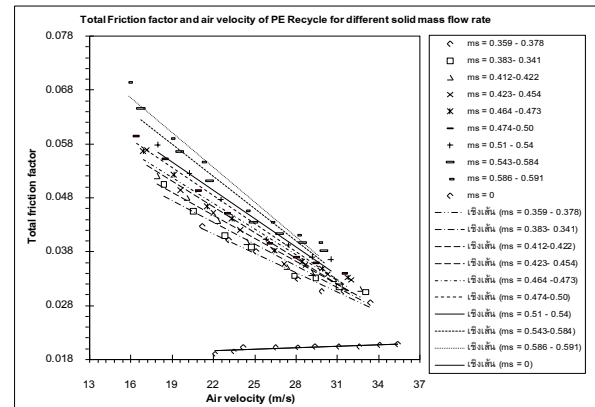
ชนิด HDPE LDPE และ PE Recycle เมื่อความเร็วของลมมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการไหลเชิงมวลของเม็ดพลาสติกต่ำสุด แนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำสุด และเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลเชิงมวลของเม็ดพลาสติกเพิ่มขึ้น แต่สำหรับทุกค่าของอัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุทุกชนิด เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวม มีแนวโน้มลดลงและลดลงเข้าหาจุดเดียวกันสำหรับทุก ๆ อัตราการไหลเชิงมวลของวัสดุ สำหรับอากาศไหลอย่างเดี่ยวเส้นแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของลม



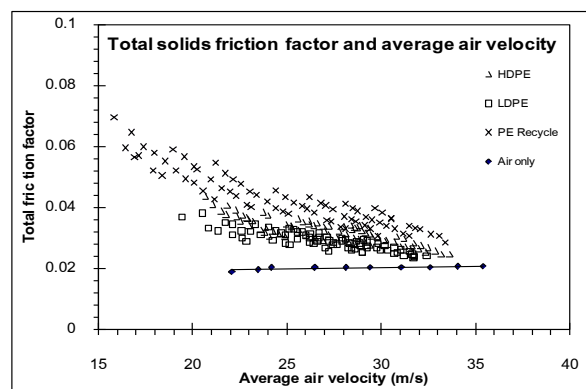
รูปที่ 3 (ข) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเม็ดพลาสติก ชนิด LDPE ที่อัตราการไหลเชิงมวลและความเร็วเปลี่ยน

เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ทั้งเม็ดพลาสติกทั้ง 3 ชนิด มีแนวโน้มของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวม

ลดลงเหมือนกัน เมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของเม็ดพลาสติกชนิด PE Recycle ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก มีแนวโน้มสูงกว่าเม็ดพลาสติกชนิด HDPE ส่วน LDPE มีแนวโน้มต่ำสุด



รูปที่ 3 (ค) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของเม็ดพลาสติก ชนิด PE Recycle ที่อัตราการไหลเชิงมวล ความเร็วเฉลี่ยของลมเปลี่ยน



รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของเม็ดพลาสติกชนิด HDPE LDPE และ PE Recycle

4. สรุป

จากการวัดความดันสูญเสียรวมของการขนถ่ายเม็ดพลาสติกทั้ง 3 ชนิดที่มีลักษณะรูปทรงอัตราส่วนความเป็นทรงกลม ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ ที่แตกต่างกันแล้วนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมพบว่า

1. ที่อัตราเร็วของลมมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราเร็วเชิงมวลของเม็ดพลาสติกคงที่ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมมีแนวโน้มลดลง และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วของลม และ อัตราเร็วเชิงมวลของเม็ดพลาสติกเพิ่มขึ้นเหมือนกัน

2. การศึกษาครั้งนี้พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของการขนถ่ายวัสดุ มีความสัมพันธ์ระดับเชิงเส้น (Linear relation) กับความเร็วของลมในการขนถ่าย โดยได้สรุปเบื้องต้นในรูปแบบ ดังสมการที่ (8) – (10)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อำนวยความสะดวกสถานที่และทุนสนับสนุน และบริษัท บริษัท เอส ซี จี (ไทยแลนด์) จำกัด ที่สนับสนุนเม็ดพลาสติก ทั้งสามชนิด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] G.Szikszy and F.R. (1986). Friction factor for dilute phase pneumatic conveying, Bulk solids handling, Vol. 8 No. 4, pp. 33-37.

[2] E.G.Vogt, and R.R. White (1948). Friction in the flow of suspensions. Granular solids in gases through pipe, Industrial & Engineering Chemistry, 40(9), pp. 1731-1738.

[3] Leonard Farbar (1949). Flow characteristics of solids-gas mixtures in a horizontal and vertical circular conduit, Industrial and Engineering Chemistry, Vol.41, No.6, pp. 1184-1191.

[4] Jae Bum Pahk and George E. Klinzing (2008). Comparison of flow characteristics for dilute phase pneumatic conveying for two different plastic pellets, Journal of The Chinese Institute of Chemical Engineers, 39, pp. 143-150.

[5] N.C. Mehta, J.M. Smith, and E.W. Comings (1957). Pressure drop in air-solid flow systems, Industrial & Engineering Chemistry, 49(6), pp. 986-992.

[6] H. Raheman and V.K. Jindal (1993). "Estimation of pressure drop in pneumatic conveying agricultural grains, Powder handling & processing, Vol.5 No.3, pp.245-252.

[7] P.W. Wypych and R.pan (1991). Determination of Air-only Pressure drop in pneumatic conveying systems, Powder handling & Processing, Vol.3 No.4, pp. 303-309.

[8] M. Weber(1991). Friction of the air and the air/solid mixture in pneumatic conveying, Bulk solids handling, Vol.11 No.1, pp. 15-18.

[9] M.Guner (2007). Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds, Journal of Food Engineering, 80, pp. 904-913.

[10] A. Kilickan, and M. Guner (2006). Pneumatic conveying characteristics of cotton seeds, Biosystems Engineering, 95(4), pp.537-546.