

ผลของค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลม

Effects of Coefficient of Restitution of a Spherical Pellets

ภาณุพัฒน์ ชัยวร^{1*}, กรวรรณ จินาเดช¹, ฉัตรชัย เครืออินทร์¹

Panupat Chaiworn^{1*}, Korawan Jinadech¹, Chatchai Krueain¹

¹สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

¹Physics Faculty of Science and Technology Chiang Mai Rajabhat University.

* E-mail: Panupat_cha@g.cmru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาผลของค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลม เมื่อปล่อยวัสดุเม็ดกลมที่มีความหนาแน่น 0.1 - 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลงบนวัสดุพื้น 2 ชนิด (พื้นไม้ และพื้นเซรามิก) ที่มีความหนาแน่น 0.7 และ 2.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่า 1) เมื่อเพิ่มระดับความสูงในการปล่อยวัสดุเม็ดกลมค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีค่าลดลง โดยที่ระดับความสูงในการปล่อย 14 เซนติเมตร มีค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนน้อยที่สุดทั้งพื้นไม้และพื้นเซรามิก 2) เมื่อปล่อยวัสดุเม็ดที่ทำแห่งความสูงเดียวกัน 10 เซนติเมตร วัสดุเม็ดกลมชนิดเดียวกันมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมมีค่าเท่ากันและมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความหนาแน่นของวัสดุเม็ดต่อวัสดุพื้นเพิ่มมากขึ้น 3) เมื่อปล่อยวัสดุเม็ดกลมกระทบกับวัสดุเม็ดพื้นที่ยิ่งเป็นชั้น ๆ ตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ 4 จำนวนชั้นของวัสดุเม็ดพื้นมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนจะมีค่าลดลง เนื่องจากจำนวนชั้นของวัสดุเม็ดพื้น 4 ชั้น ทำให้การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมกระดอนได้น้อยกว่าจำนวนชั้นของวัสดุเม็ดพื้นที่ยิ่งกัน 1 ชั้น

คำสำคัญ: สัมประสิทธิ์การกระดอน วัสดุเม็ดกลม

Abstract

The objective of this research was to determine the coefficient of restitution of spherical pellets. When the spherical pellets with a density of 0.1 - 0.9 g/cm³ were dropped on two types of flooring materials (wood floor and ceramic floor) with a density of 0.7 and 2.6 g/cm³ respectively, the results showed that; 1) When the height of the spherical pellets dropping was increased, the coefficient of restitution decreased. At the height of 14 cm, the least coefficient of restitution was found for both wood floor and ceramic floor. 2) When the spherical pellets which made from the same material but had different diameter were dropped at the same height of 10 cm, the coefficient of restitution was the same, and it decreased when the density ratio of the spherical pellets to

flooring materials was increased. 3) When dropped the spherical pellets on the granular materials which were overlaid in 4 layers, the more number of layers, the less coefficient of restitution was found. It was because the spherical pellets restituted on the 4th layer less than the 1st layer.

Keywords: Coefficient of restitution, Spherical Pellets

บทนำ

วัสดุเม็ดเป็นวัสดุที่เป็นของแข็งอนุภาคขนาดใหญ่ อนุภาคจะมีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาค แรงยึดหยุ่น แรงเสียดทานและแรงอื่น ๆ ที่สัมผัสกันแล้วทำให้อนุภาคนั้นมีการจัดเรียงตัวใหม่ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 ไมโครเมตร (Rao & Nott, 2008) มีอุณหภูมิคงที่ มีการแยกชั้นที่ไม่ชัดเจน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนั้นมีความซับซ้อนกัน วัสดุเม็ดสามารถแสดงสถานะต่าง ๆ ได้หลากหลายขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงาน (Cambou, Jean & Radjai, 2009) วัสดุเม็ดสามารถพบได้ทั้งในธรรมชาติ และอุตสาหกรรม เช่นทราย เมล็ดข้าว เมล็ดข้าวโพด เม็ดยา เม็ดพลาสติก เป็นต้น ในการศึกษาวัสดุเม็ดกลมนั้นมีมายาวนาน และมีการพัฒนามาจากทฤษฎีทางธรณีฟิสิกส์อย่างต่อเนื่องสามารถใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันและทางด้านอุตสาหกรรม เมื่อนำวัสดุเม็ดกลมมาปล่อยให้เกิดการเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ สองมิติ ทำให้เกิดการชนแบบยืดหยุ่นและไม่ยืดหยุ่น นักฟิสิกส์นิยมนำเสนอการชนแบบยืดหยุ่นในชื่อที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การกระดอน

สัมประสิทธิ์การกระดอนสำหรับการชนในหนึ่งมิติ เป็นอัตราส่วนของอัตราเร็วหลังชนกับอัตราเร็วก่อนชน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีเงื่อนไขระหว่าง 0 ถึง 1 ($0 < E < 1$) โดยที่ $E=0$ หมายถึง การชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ $E=1$ หมายถึง การชนกันเป็นแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์มีความยืดหยุ่นที่ดีที่สุด (Aryaei, Hashemnia & Jafarpur, 2010) ในทางทฤษฎีพลังงานไม่สูญหาย แต่จะเปลี่ยนรูปซึ่งในค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนนี้พลังงานจะเปลี่ยนในรูปของความยืดหยุ่นที่เกิดจากการชนกันค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนจะมีค่าไม่เป็นศูนย์หรือหนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างเช่นรูปทรง ความเร็วในการกระดอน สมบัติของวัสดุ ความสูงการกระดอน เป็นต้น จากผลงานวิจัยทางฟิสิกส์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีความสำคัญในการศึกษาระบบหลายวัตถุ และด้านอุตสาหกรรมอีกด้วย

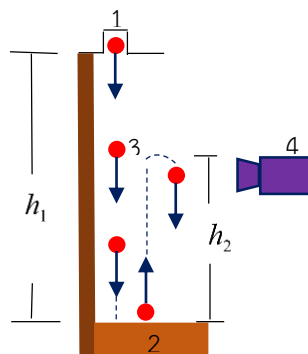
จากที่กล่าวมาข้างต้นในการวิจัยนี้จึงทำการทดลองเพื่อศึกษาหาผลของค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลม จากการปล่อยวัสดุเม็ดกลมที่ระดับความสูงต่างกัน ขนาดของวัสดุเม็ดกลมแตกต่างกัน และการเรียงชั้นของวัสดุพื้น เพื่อหาความสัมพันธ์และปัจจัยที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระดอน ผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

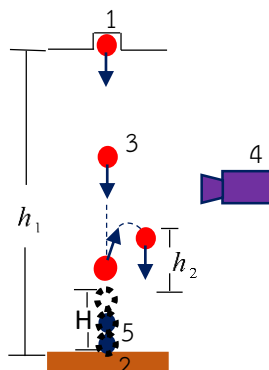
เพื่อหาผลของค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลม

วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดของวัสดุเม็ดกลม วัสดุเม็ดพื้น ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระดอน โดยนำเสนอผลการทดลองในรูปแบบของอัตราส่วนระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การกระดอน (COR) กับอัตราความหนาแน่น และค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมกับอัตราส่วนความหนาแน่นโดยพลังงานของการกระดอน งานวิจัยนี้ได้นำวัสดุเม็ดกลมมีผิวเรียบได้แก่ วัสดุเม็ดกลมพลาสติก วัสดุเม็ดกลมไม้ วัสดุเม็ดกลมเซรามิก วัสดุเม็ดกลมดิน วัสดุเม็ดกลมแก้ว เป็นต้น ในการวิจัยนี้ใช้ขนาดของวัสดุเม็ดกลมที่แตกต่างกันเพื่อทดสอบหาผลของค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลม โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดกลม (D) มีขนาด 0.8 mm, 10.0 mm และ 12.0 mm ตามลำดับ จำนวน 8 ชนิดที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันในช่วงความหนาแน่น 0.1 - 0.9 g/cm³ วัสดุพื้นที่ใช้คือ พื้นไม้ และพื้นเซรามิก ที่มีค่าความหนาแน่น 0.7 และ 2.6 g/cm³ และวัสดุเม็ดพื้นที่ใช้คือ วัสดุเม็ดกลมจากเม็ดพลาสติกเรียงชั้นเป็นชั้น ๆ และจัดอุปกรณ์ดังภาพที่ 1 และภาพที่ 2



ภาพที่ 1 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดทรงกลม (1) ที่ปล่อยวัสดุเม็ดทรงกลม
(2) วัสดุพื้นใช้ทดสอบ (3) วัสดุเม็ดกลม (4) กล้องวิดีโอ Nikon



ภาพที่ 2 การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดทรงกลมโดยการเรียงชั้นของวัสดุเม็ด
(1) ที่ปล่อยวัสดุเม็ดทรงกลม (2) วัสดุพื้นใช้ทดสอบ (3) วัสดุเม็ดกลม (4) กล้องวิดีโอ Nikon
(5) วัสดุเม็ดพื้นที่เรียงเป็นชั้น

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานบ่งบอกค่าความยืดหยุ่นในการกระดอนบนวัสดุพื้น จากศึกษาการวัดความเร็วและการตั้งบนสนามเทนนิส การเล่นเทนนิสบนพื้นผิวที่หลากหลายความเร็วในการกระดอนจะมาก ปานกลาง หรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างลูกเทนนิสกับสนามในการตีกลับแนวตั้งของลูกเทนนิสเป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทาน จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนโดยใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูงเป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับความเร็ว ซึ่งง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งทำให้ได้ค่าของความเร็วมีความแม่นยำ (Cross, 2003) และปัจจัยที่นำมาพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนในการวิจัยคือ ความเร็วในการกระดอน ความสูงในการปล่อยวัตถุเมตกลม ขนาดของวัตถุเมตกลม และการเรียงชั้นของวัตถุเมตพื้น โดยการปล่อยวัตถุเมตกลมตกลงมาอย่างอิสระในแนวตั้ง ทำการตรวจจับด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง หาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัตถุเมตกลมจากความสูงที่ปล่อย (h_1) กับความสูงของการกระดอน (h_2) และค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัตถุเมตกลมจากความเร็วก่อนกระแทก (V_1) กับความเร็วหลังกระดอน (V_2) โดยใช้โปรแกรม Tracker version 4.9 ที่กำหนดจำนวนเฟรมในการวิเคราะห์ผล 8/0.040 เฟรม/วินาที ทำการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนจากสมการ (5)

ค่าสัมประสิทธิ์การหดเชยในหนึ่งมิติถูกกำหนดให้เป็นอัตราส่วนของอัตราเร็วก่อนชน V_1 และหลังชน V_2 สำหรับการกระแทกกระหว่างลูกกลมกับพื้นผิว โดยพิจารณาความสูง h_1 และ h_2 ตามเงื่อนไขของค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนที่กำหนด ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{V_2}{V_1} \quad (1)$$

V_1 และ V_2 คือ อัตราเร็วขาเข้าและขาออกตามลำดับ ดังนั้น หากลูกบอลตกลงไปในแนวตั้งด้วยอัตราเร็ว V_1 ที่ส่งผลกระทบต่อนพื้นผิวระนาบที่ตั้งอยู่ในการกำหนดค่าผลกระทบปกติกลับคืนมาด้วยอัตราเร็วของ V_2 การใช้หลักการด้านพลังงานอัตราเร็วขาเข้าและการตอบสนองสัมพันธ์กับระดับความสูงที่ลดลงและสามารถหาได้ ดังต่อไปนี้

$$v_1 = (2gh_1)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$v_2 = (2gh_2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของพลังงานศักย์ ΔE จะได้รับเป็น

$$\Delta E = mg(h_2 - h_1) \quad (4)$$

การใช้สมการ (2), (3) และ (4) COR อาจสัมพันธ์กับความสูงได้ ดังนี้

$$\varepsilon = \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (5)$$

เมื่อ ε คือ ความสัมพันธ์การกระดอนของวัสดุเมื่อ V_1 และ V_2 คือ อัตราเร็วขาเข้าและขาออกตามลำดับ h_1 และ h_2 คือ ความสูงที่ปล่อยวัตถุเมื่อตกลงมา

เมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v หรืออาจกล่าวได้ว่า งานที่กระทำต่อวัตถุทำให้วัตถุมีพลังงานจลน์ $\frac{1}{2} mv^2$ เมื่อกำหนดสัญลักษณ์ให้ E_k แทนพลังงานจลน์ของวัตถุจะได้ว่า

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 \quad (6)$$

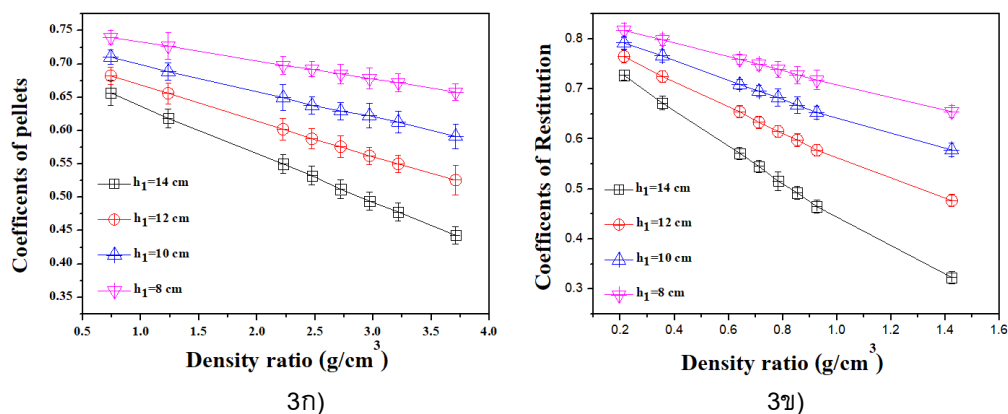
หน่วยของพลังงานจลน์ คือ กิโลกรัม เมตร²ต่อวินาที² ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$) ซึ่งเท่ากับนิวตันเมตร (N.m) หรือจูล (J)

ทำการทดลองทั้งหมด 3 ตอนคือ ตอนที่ 1 เป็นการศึกษาความสูงการปล่อยวัตถุเมื่อตกลงมาเมื่อสัมผัสการกระดอนของวัสดุเมื่อตกลงมา โดยทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนจากการเพิ่มระดับความสูงของจุดปล่อย ตอนที่ 2 เป็นการศึกษาชนิดวัสดุเมื่อตกลงมาเมื่อสัมผัสการกระดอน โดยทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเมื่อตกลงมาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน และตอนที่ 3 เป็นการศึกษาวัสดุเมื่อสัมผัสการกระดอนของวัสดุเมื่อตกลงมา โดยทำการทดลองเรียงลำดับชั้นของวัสดุพื้นทำการปล่อยวัตถุเมื่อตกลงมาหาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอน ในแต่ละตอนทำการตรวจจับโดยใช้กล้องวิดีโอความเร็วสูง ทำการทดลองในแต่ละตอนทั้งหมด 5 ซ้ำ และทำการวิเคราะห์ผล

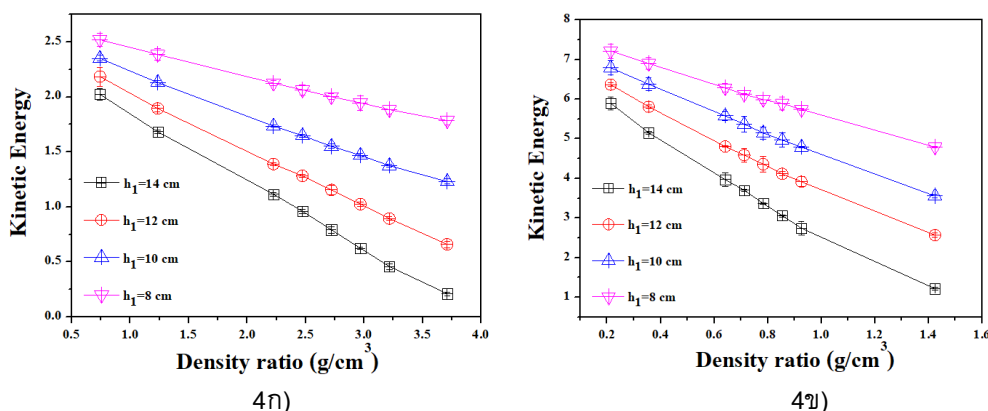
เมื่อปล่อยให้วัสดุเมื่อตกลงมาขนาดความหนาแน่น 0.1 - 0.9 g/cm^3 ตกลงมายังอิสระกระแทกวัสดุพื้นไม้ และพื้นเซรามิก จะทำการแปลผลหาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอน (ε) โดยพิจารณาว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่ง 0 หมายถึง การชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นสมบูรณ์ 1 หมายถึง การชนกันเป็นแบบยืดหยุ่นสมบูรณ์มีความยืดหยุ่นที่ดีที่สุด จากนั้นนำผลที่ได้มาเขียนในรูปของกราฟความสัมพันธ์ในโปรแกรม Origin 8.6 และวิเคราะห์เปรียบเทียบกันต่อไป

ผลการวิจัย

เมื่อทำการปล่อยวัตถุเมื่อตกลงมาในระดับความสูง 14 cm, 12 cm, 10 cm และ 8 cm ตามลำดับ ลงบนวัสดุพื้นที่แตกต่างกันคือ พื้นไม้ และพื้นเซรามิก วัสดุเมื่อตกลงมาที่ใช้มีความหนาแน่น 0.1 - 0.9 g/cm^3 ตรวจจับด้วยกล้องวิดีโอความเร็วสูง บันทึกวิดีโอ และวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม Tracker version 4.9 ผลการศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเมื่อตกลงมาพิจารณาจากอัตราส่วนความหนาแน่นของวัสดุเมื่อตกลงมากับวัสดุพื้นโดยตำแหน่งความสูง และความเร็วในการกระดอนของวัสดุเมื่อตกลงมา



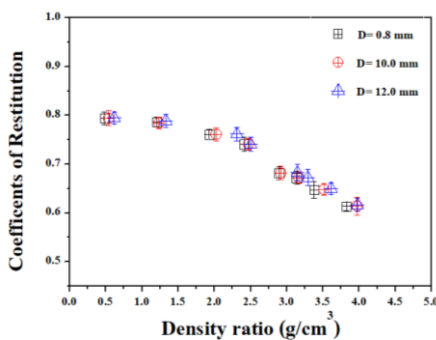
ภาพที่ 3 สัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมกับอัตราส่วนความหนาแน่นของวัสดุพื้นต่อวัสดุเม็ดกลม โดยค่าความสูงของการกระดอนจากพื้นต่างกัน 3ก) พื้นไม้ และ 3ข) พื้นเซรามิก



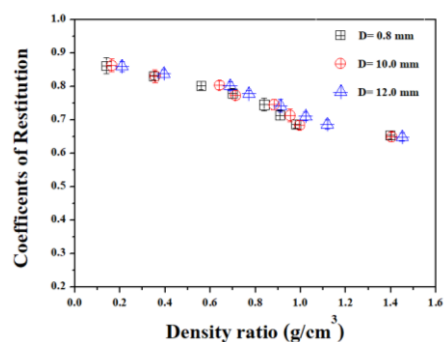
ภาพที่ 4 พลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดกลมของการกระดอนจากพื้นที่ต่างกัน 4ก) พื้นไม้ และ 4ข) พื้นเซรามิก

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมโดยค่าความสูงก่อนกระทบและหลังการกระดอนบนวัสดุพื้นต่างชนิดกันจากภาพที่ 4 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น และความสูงจากจุดปล่อยวัสดุเม็ดเพิ่มมากขึ้นจาก 8 cm ถึง 14 cm ค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมมีค่าลดลง โดยที่พื้นไม้มีค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนน้อยกว่าพื้นเซรามิก สามารถอธิบายได้ว่าพื้นไม้มีความยืดหยุ่นทำให้วัสดุเม็ดกระดอนขึ้นน้อยกว่าพื้นเซรามิก เนื่องจากพื้นเซรามิกมีความแข็งและพื้นมีความยืดหยุ่นน้อย ซึ่งมีความคล้ายกับการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของ Haron & Ismail (2012) ที่พบว่าเมื่อปล่อยลูกกอล์ฟลงบนพื้นที่แข็งและนุ่ม ปล่อยตกลงมาอย่างอิสระที่ความสูงเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของลูกกอล์ฟจะมีค่าที่แตกต่างกันโดยที่ความสูงมากค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีค่าน้อยและเมื่อความสูงน้อยค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีค่ามาก และค่าสัมประสิทธิ์ในการกระดอนเกี่ยวข้องกับการสูญเสียพลังงานระหว่างการกระดอน ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาพลังงานจลน์หลังการกระดอนภาพที่ 3 โดยวิเคราะห์ค่าพลังงานจลน์หลังการกระดอนของวัสดุเม็ดกับวัสดุพื้น พบว่าเมื่อ

อัตราส่วนความหนาแน่นของวัสดุเม็ดต่อวัสดุพื้นเพิ่มมากขึ้นค่าพลังงานจลน์ในการกระดอนมีค่าลดลง เมื่อระดับความสูงเพิ่มมากขึ้นคือ 8 cm ,10 cm ,12 cm และ 14 cm ค่าพลังงานจลน์ของการกระดอนมีค่าลดลง ที่พื้นไม้มีค่าพลังงานจลน์น้อยกว่าพื้นเซรามิก บริเวณวัสดุพื้นไม้เป็นวัสดุที่พื้นผิวนุ่ม ยึดหยุ่นมากจึงทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานระหว่างวัสดุเม็ดกับพื้นผิวมากทำให้พลังงานจลน์ในการกระดอนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับพื้นเซรามิกที่เป็นพื้นแข็ง ยึดหยุ่นน้อยทำให้วัสดุเม็ดกระดอนขึ้นสูงเกิดการสูญเสียพลังงานระหว่างวัสดุเม็ดกับวัสดุพื้นน้อยส่งผลให้ค่าพลังงานจลน์ในการกระดอนนั้นมีค่ามาก ค่าพลังงานจลน์มีค่าแปรผันโดยตรงกับอัตราเร็วหลังการกระดอนของวัสดุเม็ดคือเมื่ออัตราเร็วหลังการกระดอนมากค่าพลังงานจลน์จะมาก และเมื่ออัตราเร็วหลังการกระดอนน้อยพลังงานจลน์ก็จะมีค่าน้อย และค่าอัตราเร็วยังส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดอีกด้วย เมื่ออัตราเร็วหลังการกระดอนมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนจะลดลงซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการสำรวจแบบจำลองในการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนโดยใช้ความเร็วในการกระแทกที่เริ่มต้นกับความเร็วสุดท้าย Gilardi & Sharf (2002) ที่พบว่าเมื่อค่าความเร็วเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนจะมีค่าลดลง

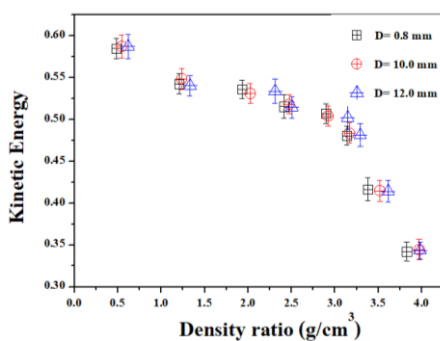


5ก)

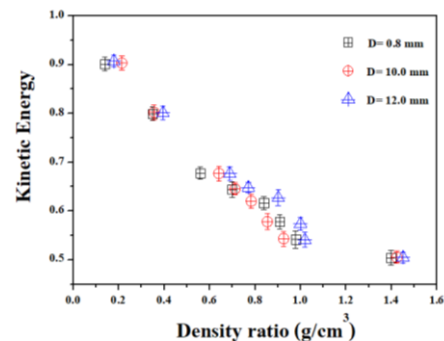


5ข)

ภาพที่ 5 สัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันกับอัตราส่วนความหนาแน่นของวัสดุพื้นต่อวัสดุเม็ดกลมโดยความสูงของการกระดอนจากพื้นที่ต่างกัน โดย 5ก) พื้นไม้ และ 5ข) พื้นเซรามิก



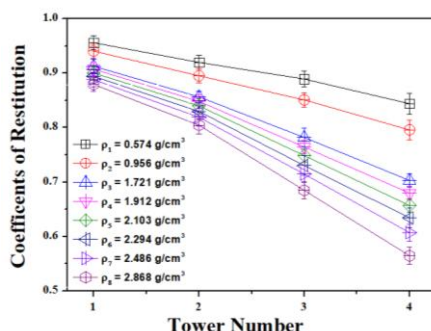
6ก)



6ข)

ภาพที่ 6 พลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดกลมที่มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันของการกระดอนจากพื้นที่ต่างกัน 6ก) พื้นไม้ และ 6ข) พื้นเซรามิก

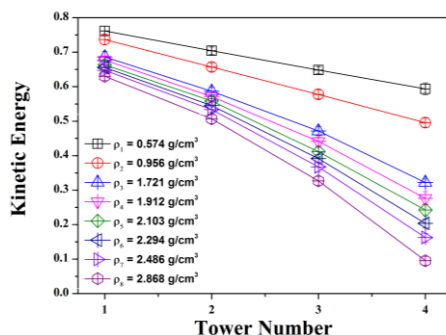
เมื่อพิจารณาภาพที่ 5 พบว่าเมื่ออัตราส่วนความหนาแน่นของวัสดุเม็ดกลมเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีค่าใกล้เคียงกันโดยพิจารณาจากแนวนอน ดังนั้นเมื่อเพิ่มขนาดของวัสดุเม็ดกลมจาก 0.8 mm ถึง 12 mm ขนาดของวัสดุเม็ดกลมไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนและค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนยังคงลดลงเมื่ออัตราส่วนความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยพื้นไม้จะมีความยืดหยุ่นได้ดีกว่าพื้นเซรามิก ต่อมา จากภาพที่ 6 พิจารณาค่าพลังงานจลน์ในการกระดอนของวัสดุเม็ดกลมจากค่าอัตราเร็วหลังการกระดอน พบว่าที่อัตราส่วนความหนาแน่นของวัสดุเม็ดกลมต่อวัสดุพื้นไม้มากขึ้นค่าพลังงานจลน์ในการกระดอนลดลงเนื่องจากที่อัตราส่วนความหนาแน่นน้อยวัสดุเม็ดกลมมีการสูญเสียพลังงานน้อย กระดอนสูง พลังงานจลน์จึงมาก เมื่ออัตราส่วนความหนาแน่นเพิ่มขึ้นวัสดุเม็ดกลมมีการกระดอนน้อย สูญเสียพลังงานให้กับวัสดุพื้นไม้ พลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจึงมีค่าลดลง ค่าพลังงานจลน์ที่เกิดขึ้นจากการกระดอนของวัสดุเม็ดกลมที่พื้นไม้มีค่าน้อยกว่าพื้นเซรามิกเพราะพื้นไม้ยืดหยุ่นดีกว่าพื้นเซรามิก ดังนั้นจากภาพที่ 5 และ 6 พบว่าไม่ว่าขนาดของวัสดุเม็ดจะมีขนาดเท่ากันหรือต่างกันไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลม



ภาพที่ 7 สัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมกับจำนวนชั้นของวัสดุเม็ดพื้นพลาสติกบนพื้นไม้ และบนพื้นเซรามิก

จากกราฟพบว่าเมื่อเรียงชั้นจากชั้นที่ 1 ถึงชั้นที่ 4 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีค่าลดลงตามชั้นของวัสดุเม็ดพื้นไม้ที่เรียงกัน ที่ความหนาแน่นของวัสดุเม็ดกลมน้อย ($\rho_1 = 0.574 \text{ g/cm}^3$) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมากที่สุด และที่ความหนาแน่นของวัสดุเม็ดกลมมาก ($\rho_2 = 2.868 \text{ g/cm}^3$) มีค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนน้อย และเมื่อพิจารณาความยืดหยุ่นจากค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดพื้นพบว่าชั้นที่ 1 ยืดหยุ่นน้อย วัสดุเม็ดกลมกระทบกับวัสดุเม็ดพื้นกระดอนได้สูง ค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนจึงมีค่ามากกว่าชั้นที่ 4 ยืดหยุ่นมาก วัสดุเม็ดกลมกระทบกับวัสดุเม็ดพื้นกระดอนน้อยจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนน้อยต่อมาเมื่อพิจารณาค่าพลังงานจลน์ในการกระดอนของวัสดุเม็ดกลมบนวัสดุเม็ดพื้นดังภาพที่ 8

พิจารณาจากกราฟพบว่าค่าพลังงานจลน์มีค่าลดลงโดยที่ความหนาแน่นของวัสดุเม็ด ($\rho_1 = 0.574 \text{ g/cm}^3$) มีค่าพลังงานจลน์มากที่สุด และความหนาแน่นของวัสดุเม็ด ($\rho_2 = 2.868 \text{ g/cm}^3$) มีค่าพลังงานจลน์น้อยที่สุด และเมื่อวัสดุเม็ดพื้นมีการเรียงชั้นสูงขึ้นค่าพลังงานจลน์ก็มีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อวัสดุเม็ดเรียงชั้นที่สูงขึ้น มีความยืดหยุ่นมากทำให้วัสดุเม็ดกลมตกกระทบแล้วกระดอนน้อย การสูญเสียพลังงานระหว่างการกระดอนมีค่าสูญเสียมากกว่า เพราะพลังงานถูกดูดซับในแต่ละชั้น จึงทำให้พลังงานการกระดอนมากกว่าชั้นที่มีความยืดหยุ่นน้อยวัสดุเม็ดกลมตกกระทบแล้วกระดอนมาก จะทำให้สูญเสียพลังงานระหว่างการกระดอนน้อย



ภาพที่ 8 พลังงานจลน์ของวัสดุเมื่อดกลมกับจำนวนชั้นของวัสดุเม็ดพื้นพลาสติกบนพื้นไม้ และบนพื้นเซรามิก

ดังนั้นผลจากการวิจัยการศึกษาความสัมพันธ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมโดยการเพิ่มความสูง การเปลี่ยนขนาดของวัสดุเม็ดกลม และการเรียงชั้นของวัสดุพื้น พบว่าที่ความสูงมากขึ้น อัตราเร็วมากขึ้น สมบัติการกระดอนจะน้อย ที่ความสูงน้อย อัตราเร็วน้อย สมบัติการกระดอนจะมาก และจากค่า สมบัติการกระดอนบนพื้นไม้มีค่าน้อยแสดงว่าพื้นไม้มีความยืดหยุ่นมาก จึงสูญเสียพลังงานในการ กระดอนมาก บนพื้นเซรามิกมีค่าสมบัติการกระดอนมากแสดงว่ามีความยืดหยุ่นน้อย จึงทำให้สูญเสีย พลังงานในการกระดอนน้อย เมื่อเพิ่มขนาดของวัสดุเม็ดกลมค่าสมบัติการกระดอนไม่เกิดการ เปลี่ยนแปลง

อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าสมบัติการกระดอนของวัสดุเม็ด กลม โดยวัสดุเม็ดกลมที่ใช้มีลักษณะเป็นทรงกลม มีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ปลอยตกลงมาอย่าง อิสระกระทบกับวัสดุพื้นไม้ และพื้นเซรามิก โดยเพิ่มความสูงในการปลอย เพิ่มขนาดของวัสดุเม็ดกลม และ ปลอยตกกับวัสดุพื้น ทำการวิจัยโดยศึกษาหาความสัมพันธ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมโดยปลอยจาก ระดับความสูงที่ลดลง ผลการวิจัยพบว่าเมื่อค่าความสูงเพิ่มขึ้น ความเร็วเพิ่ม ส่งผลทำให้ค่าสมบัติ การกระดอนมีค่าลดลงด้วย และในทางกลับกันเมื่อระดับความสูงน้อย ความเร็วน้อย ค่าสมบัติการ กระดอนมีค่ามากขึ้นที่มีความคล้ายกับการศึกษาความสัมพันธ์การกระดอนของ (Haron & Ismail, 2012) ที่พบว่าเมื่อปลอยลูกกอล์ฟลงบนพื้นที่แข็งและนุ่ม ปลอยตกลงมาอย่างอิสระที่ความสูงลดลง ค่าสมบัติการ กระดอนของลูกกอล์ฟจะมีค่าที่แตกต่างกันความความแข็งของลูกกอล์ฟและพื้นที่ตกกระทบ และ คล้ายคลึงกับงานวิจัยการสำรวจแบบจำลองในการศึกษาความสัมพันธ์การกระดอนโดยใช้ความเร็วในการ กระแตกความเร็วเริ่มต้นกับความเร็วสุดท้าย Gilardi & Sharf (2002) ที่พบว่าเมื่อค่าความเร็วเพิ่มมากขึ้น ค่าสมบัติการกระดอนจะมีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อดูค่าแนวโน้มของกราฟแล้วพบว่าที่ระดับความสูง 8 cm มีค่าสมบัติการกระดอนใกล้เคียงกับ 1 แสดงว่ามีความยืดหยุ่นได้ดี และเมื่อเทียบค่าสมบัติการ กระดอนระหว่างพื้นไม้ และพื้นเซรามิกทำให้เห็นว่าพื้นไม้มีความยืดหยุ่นดีกว่า สำหรับค่าพลังงานจลน์ใน การกระดอนคำนวณจากอัตราเร็วหลังการกระดอนพบว่าพลังงานจลน์มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนความ หนาแน่นของวัสดุเม็ดกลมต่อวัสดุพื้นมีค่าที่เพิ่มขึ้น เปรียบเทียบค่าพลังงานจลน์ระหว่างพื้นไม้กับพื้นเซรามิก ที่พื้นไม้มีค่าพลังงานจลน์น้อยกว่าพื้นเซรามิกเนื่องจากพื้นไม้มีความยืดหยุ่นมาก วัสดุเม็ดกลมกระดอนขึ้น น้อย สูญเสียพลังงานระหว่างวัสดุเม็ดกลมกับวัสดุพื้นมากส่งผลให้ค่าพลังงานจลน์ในการกระดอนน้อย

เมื่อศึกษานาฬิกาวัดมุมมีผลต่อสัมประสิทธิ์การกระดอน ผลการวิจัยพบว่า เมื่อขนาดของวัสดุเม็ดกลมมีความแตกต่างกันวัสดุเม็ดกลมชนิดเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีค่าแตกต่างกันน้อยมากหรือไม่แตกต่างกันเลย และเมื่ออัตราส่วนความหนาแน่นเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนจะมีค่าลดลงโดยวัสดุพื้นไม้จะมีความยืดหยุ่นได้ดีกว่าพื้นเซรามิก ดังนั้นพบว่าไม่ว่าขนาดของวัสดุเม็ดกลมจะมีขนาดเท่ากันหรือต่างกันไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลม และเมื่อพิจารณาการเรียงชั้นของวัสดุเม็ดพื้น พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีค่าลดลงตามอัตราส่วนความหนาแน่น เมื่อเพิ่มชั้นของวัสดุเม็ดพื้น และอัตราส่วนความหนาแน่นเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อวัสดุเม็ดพื้นเรียงชั้นที่สูงขึ้นความเร็วก่อนกระดอนมากกว่าหลังกระดอนส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนมีค่าลดลง และค่าพลังงานจลน์ในการกระดอนจากอัตราเร็วหลังการกระดอนที่ชั้นที่ 1 จะมีความยืดหยุ่นน้อยสูญเสียพลังงานน้อยทำให้มีค่าพลังงานจลน์มากกว่าชั้นที่ 4 ที่มีการสูญเสียพลังงานจากการดูดซับของวัสดุเม็ดพื้นมาก

สุดท้ายนี้เพื่อเป็นแนวทางแก่ผู้ที่สนใจศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมต่อไป ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะคือ ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดกลมที่ตกกระทบพื้นวัสดุควรจะใช้วัสดุพื้นที่แตกต่างกันเช่น พื้นเหล็ก พื้นพลาสติก พื้นแก้ว เป็นต้น ทำการศึกษาผลของค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนจากมุมในการกระดอน และทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การกระดอนของวัสดุเม็ดในแนวนอน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ Nonlinear Physics ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนในอุปกรณ์การดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Aryaei, A., Hashemnia, K. & Jafarpur, K. (2010). Experimental and numerical study of ball size effect on restitution coefficient in low velocity impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 37(10), 1037-1044.
- Cross R. (2003). Measurements of the Horizontal and Vertical Speeds of Tennis Courts. *Sports Engineering*, 6, 95 – 111.
- Cambou, B., Jean, M. & Radjai, F. (2009). *Micromechanics of granular materials*. New York: John Wiley & Sons.
- Gilardi, G. & Sharf, I. (2002). Literature survey of contact dynamics modelling. *Mechanism and Machine theory*, 37 (10), 1213-39.
- Haron, A. & Ismail, K.A. (2012). Coefficient of restitution of sports balls: A normal drop test. *1st International Conference on Mechanical Engineering Research 2011. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 36 (pp.1-8). Malaysia: IOP Publishing Ltd.
- Rao, K.K., Nott, P.R. & Sundaresan, S. (2008). *An introduction to granular flow* (Vol. 10). New York: Cambridge University Press.