

ผลของแรงเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบของการพา ในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ด

The Effects of Container Wall Friction on the Vertical Vibrating Convection Pattern for Granular Materials

ภาณุพัฒน์ ชัยวร¹ สุภารัตน์ หาญขว้าง¹ วิไลพร ลักษมีวาณิชย์¹ และเพ็ญศรี ประมุขกุล^{1*}
Panupat Chaiworn¹ Suparat Hankwang¹ Vilaiporn Luksameevanish¹
and Pensri Pramukkul^{1*}

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแรงเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบการพาในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ด โดยใช้อนุภาคทรงกระบอก 2 ขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 460 อนุภาค และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 115 อนุภาค นำมาจัดเรียงแบบสุ่มในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากวัสดุต่างชนิดที่มีแรงเสียดทานผนังแตกต่างกัน ได้แก่ อะคริลิก กระดาษฟอยล์ ฝ้ายกำมะหยี่ และกระดาษทรายเบอร์ 400 จากนั้นสั่นด้วยแอมพลิจูดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความถี่ 12.21 เฮิรตซ์ และความเร่งไร้มิติเท่ากับ 3 ผลการทดลองพบว่าวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านบนของกลุ่มจะเคลื่อนที่มาทางด้านข้างของภาชนะ แล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะและเคลื่อนไปด้านบนอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” วัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา สำหรับภาชนะที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะเท่ากับ 0.790 และ 0.825 วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ได้เร็วและพลังงานจลน์มีค่ามาก ส่วนภาชนะที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าเท่ากับ 0.376 และ 0.432 วัสดุเม็ดที่อยู่บนกลุ่มวัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ลงด้านข้างแต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณศูนย์กลางกลุ่มวัสดุเม็ดได้ เนื่องจากพลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดมีค่าน้อย

คำสำคัญ: วัสดุเม็ด การพา สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน การสั่นในแนวตั้ง

¹ ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

* Corresponding author e-mail: pensri_pra@cmru.ac.th

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2023.v42i2.256647>

Received: 20 October 2022, Revised: 11 March 2023, Accepted: 30 March 2023

Abstract

The research aimed to study the effects of container wall friction on the vertical vibrating convection pattern for granular materials. The both cylindrical particles of sizes used were diameter 6 millimeters (mm), length 6 centimeters (cm), at 460 particles and diameter 12 mm, length 6 cm, at 115 particles, respectively, which were randomly and layered placed inside rectangular containers with different wall friction such as acrylic, foil, velvet, and No. 400 sandpaper. The granular materials were vertically vibrated with the amplitude of 5 mm, the frequency of 12.21 Hertz (Hz) and dimensionless acceleration of 3. The results revealed that the granular materials were on granular media. After that the granular materials slowly moved to the side, center and top of the containers again. The movement in one cycle is called “convection”. The materials on the left moved sideways in anticlockwise direction and those on the right moved sideways in the clockwise direction. In case of friction coefficient between granular materials and wall being 0.790 and 0.825, the granular materials could move fast causing kinetic energy. When the friction coefficient between granular materials and wall is 0.376 and 0.432, the materials would move to the side and were unable to move to the center. Their movement was static, or they hardly moved due to low friction coefficient between granular materials and wall, making the materials moved slowly and yielding low kinetic energy.

Keywords: Granular material, Convection, Coefficient of friction, Vertical vibration

บทนำ

วัสดุเม็ด (granular material) คือ กลุ่มของอนุภาคของแข็งที่มีช่องว่างระหว่างอนุภาคสามารถแทรกด้วยของไหล เช่น น้ำหรืออากาศ วัสดุเหล่านี้มีรูปร่างต่าง ๆ เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก และรูปร่างอื่น ๆ ที่อยู่รวมกันจำนวนหนึ่ง วัสดุเม็ดถือว่าเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีการศึกษาพฤติกรรมตามสถานการณ์เงื่อนไขทางปัจจัยทั้งภายในและภายนอกต่าง ๆ เนื่องจากวัตถุพิเศษส่วนใหญ่ที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอยู่ในรูปของวัสดุเม็ด เช่น หิน ทราย เม็ดพลาสติก และผลผลิตทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ซึ่งกระบวนการผลิตวัตถุพิเศษต่าง ๆ จะถูกนำไปผ่านกระบวนการสั่นเพื่อให้ผสมกันหรือเพื่อแยกตัวออกจากกัน สำหรับวัสดุประเภทนี้เมื่อถูกนำมาสั่นหรือเขย่าแล้วจะเกิดปรากฏการณ์หลาย ๆ อย่างภายในระบบ เช่น การก่อตัว (arching) การกอง (heaping) การแยก (segregation) คลื่นผิว (surface waves) การพา (convection) เป็นต้น นอกจากนี้การวัดความเร็วปลายในการตกของโลหะทรงกลมที่มีรัศมีแตกต่างกันซึ่งความเร็วปลายของโลหะทรงกลมมีค่าเพิ่มขึ้นตามรัศมีของโลหะทรงกลมที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อนำความเร็วปลายไปคำนวณหาความเร็วปลายถือเสมือนแล้วนำความเร็วปลายถือเสมือนไปหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายถือเสมือนกับรัศมีกำลังสอง

แสดงให้เห็นว่าวิธีการวัดความเร็วปลายของการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมในกลีเซอรินเป็นแนวทางในการศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวทั่วไปได้ (อภินิหารรัตน์ และคณะ, 2022)

ปัจจุบันมีวัตถุดิบอยู่มากมายที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตโดยการสั่นหรือการหมุนภายใต้การทำงานของเครื่องจักรเพื่อคัดแยกวัตถุดิบที่มีขนาด น้ำหนัก สี และคุณภาพที่แตกต่างกันไป เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและเพื่อเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบ พฤติกรรมการพาจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเม็ดถูกสั่นหรือเขย่าทำให้เม็ดวัสดุที่อยู่ด้านล่างบริเวณตรงกลางของระบบเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ผิวอิสระด้านบน แล้วจึงเคลื่อนที่ไปด้านข้าง ต่อจากนั้นจึงเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของระบบ ในที่สุดจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตรงกลางของระบบอีกครั้งเป็นการครบรอบการพา 1 รอบ (สกนธ์, 2552) รูปแบบการพาคัลายกับชนิดของการหมุนวนของของไหล ซึ่งเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่น่าสนใจ แม้จะมีการศึกษาถึงปรากฏการณ์การพาโดยนักวิจัยหลาย ๆ ท่านก็ตาม และยังมีสันนิษฐานว่าแรงเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุกับผนังภาชนะจะลากอนุภาคใกล้ผนังด้านข้างลง (Chaiworn *et al.*, 2014) แต่การศึกษายังไม่มีผู้ใดตอบได้ว่าแรงเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุกับผนังที่มีค่ามากหรือน้อย มีผลต่อการเกิดการพาอย่างไร นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่กล่าวถึงแรงต่าง ๆ เช่น ผลกระทบของปริมาณความชื้นที่มีต่อความลึกของวัสดุเม็ดผสมติว่าการมีความชื้นไม่มีผลต่อระยะแรงเฉื่อย (Zhang *et al.*, 2023) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของแรงเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบของการพาในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ดรูปทรงกระบอก โดยใช้ผนังภาชนะต่างชนิดกัน ได้แก่ อะคริลิก ผ้ากำมะหยี่ และกระดาษทราย โดยคณะผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองใช้ระบบการสั่นแนวตั้งที่มีความเร่งไร้หน่วยในการสั่น (the dimensionless vibration acceleration) ซึ่งเป็นปริมาณที่รวมความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลในการสั่น คือ ความถี่ในการสั่น (f) และแอมพลิจูดในการสั่น (A) ต่อค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก (g) โดยมีสมการความสัมพันธ์ คือ $\Gamma = A(2\pi f)^2 / g$ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านอุตสาหกรรม การอธิบายธรรมชาติที่ซับซ้อน และเป็นแนวทางในการสร้างชุดการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย วัสดุเม็ด ผนังชนิดต่าง ๆ กล้องอะคริลิก เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง และเครื่องสั่นแนวตั้ง การทดลองเริ่มจากการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังชนิดต่าง ๆ โดยตัดวัสดุเม็ด ได้แก่ ไม้ฮิโนกิทรงกระบอก 2 ขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 460 อนุภาค และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 115 อนุภาค และตัดวัสดุผนัง ได้แก่ อะคริลิก (acrylic) ผ้ากำมะหยี่ (velvet) กระดาษฟอยล์ (foil) พลาสติก (polyethylene: PE) ไม้ฮิโนกิ (Hinoki) กระดาษทรายเบอร์ 400 (sandpaper: SP n.400) และกระดาษทรายเบอร์ 600 (SP n.600) ขนาดของภาชนะรูปสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 15 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร ความหนา 6 เซนติเมตร นำวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ ที่ตัดตามขนาดที่ต้องการติดบนฐานของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง หมุนรอกที่อยู่ด้านข้างของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียงจนกระทั่งลูกเหล็กเคลื่อนที่ตกลงจากฐานของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง (ภาพที่ 1) บันทึกภาพ คำนวณหาค่ามุมและ

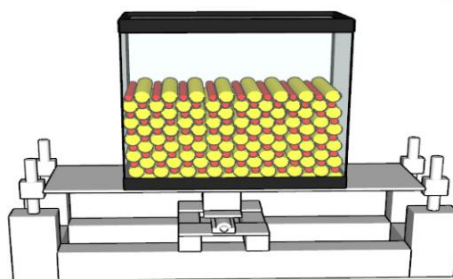
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากนั้นเลือกชนิดของผนังที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังอยู่ในช่วงที่ต่างกัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง โดยนำชนิดของผนังที่เลือกมาติดบริเวณด้านข้างของกล่องอะคริลิกทั้ง 2 ข้าง บรรจุวัสดุเม็ดลงในกล่องอะคริลิกแบบสุ่ม จากนั้นสั่นด้วยแอมพลิจูดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความถี่ 12.21 เฮิร์ต ความเร่งไร้มิติ (Γ) เท่ากับ 3 และเวลาการสั่นสูงสุด 600 วินาที (ภาพที่ 2) โดยทำการทดลอง 2 ลักษณะ ได้แก่ เริ่มต้นการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่มและแบบชั้น และบันทึกการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดโดยการถ่ายวีดิโอ แล้วนำมาวิเคราะห์หาลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ด และพลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดในแนวดิ่ง โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วีดิโอแทรคเกอร์ ในการทดลองนี้มุ่งเน้นไปที่วัสดุเม็ดรูปทรงกระบอกและโดนามิกจะถูกควบคุมโดยการสั่นในแนวดิ่ง และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคในชั้นต้น คณะผู้วิจัยศึกษาการเคลื่อนที่วัสดุเม็ดตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน และแรงต้าน (F) ที่กระทำกับวัสดุเม็ดสามารถแบ่งออกเป็นองค์ประกอบต่อไปนี้ (Zhang *et al.*, 2023)

$$m_g \frac{dv}{dt} = F = m_g g - \alpha v^2 - \beta v - \gamma$$

โดยที่ m_g คือ มวลของโปรเจกไทล์ (projectile) g คือ ความเร่งโน้มถ่วง v คือ ความเร็วชั่วขณะของวัสดุเม็ด α คือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความเค้นเฉื่อย β คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาค γ คือ พารามิเตอร์ของวัสดุเม็ด-ผนัง



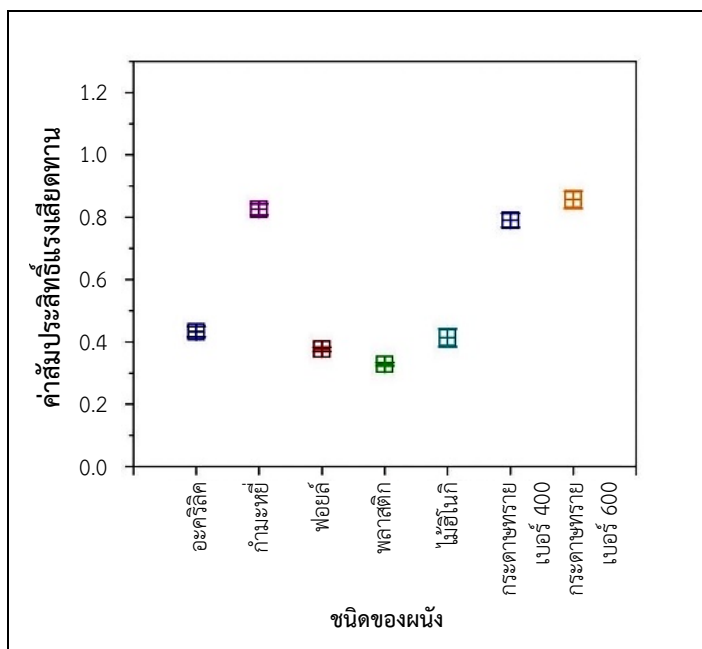
ภาพที่ 1 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง



ภาพที่ 2 การติดตั้งวัสดุเม็ดภายใต้ระบบการสั่นในแนวดิ่งด้วยค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความถี่ 12.21 เฮิร์ต และความเร่งไร้มิติเท่ากับ 3

ผลการวิจัย

เมื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวชนิดต่าง ๆ พบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวอะคริลิกมีค่า 0.432 อนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวกำมะหยี่มีค่า 0.825 อนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวกระดาษฟอยล์มีค่า 0.376 อนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวพลาสติกมีค่า 0.328 อนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวไม้ไผ่มีค่า 0.413 อนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวกระดาษทรายเบอร์ 400 มีค่า 0.790 และอนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวกระดาษทรายเบอร์ 600 มีค่า 0.856 ทั้งนี้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวอะคริลิก พื้นผิวกระดาษฟอยล์ พื้นผิวพลาสติก และพื้นผิวไม้ไผ่มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวกำมะหยี่ พื้นผิวกระดาษทรายเบอร์ 400 และพื้นผิวกระดาษทรายเบอร์ 600 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 3



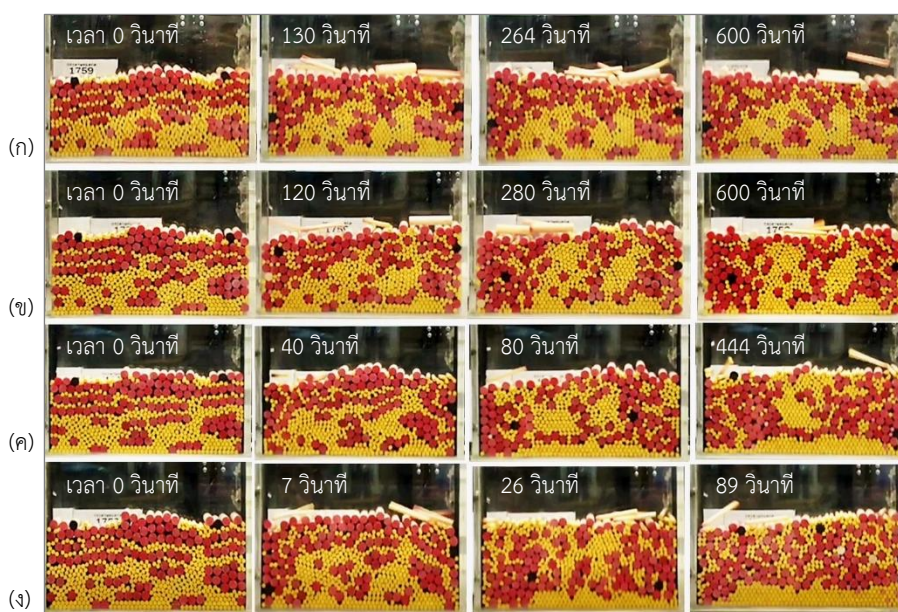
ภาพที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวชนิดต่าง ๆ

เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับวัสดุพื้นผิวชนิดต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าใกล้เคียงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวไม้ไผ่ และกลุ่มที่มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอนุภาคไม้ไผ่กับพื้นผิวไม้ไผ่ ดังนั้นจึงเลือกวัสดุพื้นผิว 3 ชนิด ได้แก่ พื้นผิวกระดาษฟอยล์ ($\mu = 0.376$) พื้นผิวอะคริลิก ($\mu = 0.432$) และพื้นผิวกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu = 0.790$) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพาของอนุภาคไม้ไผ่ภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง โดยวิเคราะห์อนุภาคขนาดใหญ่ 2 อนุภาค (อนุภาคสีดำ) ทั้ง 4 ประเด็นดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในภาชนะที่มีแรงเสียดทานพื้นผิว

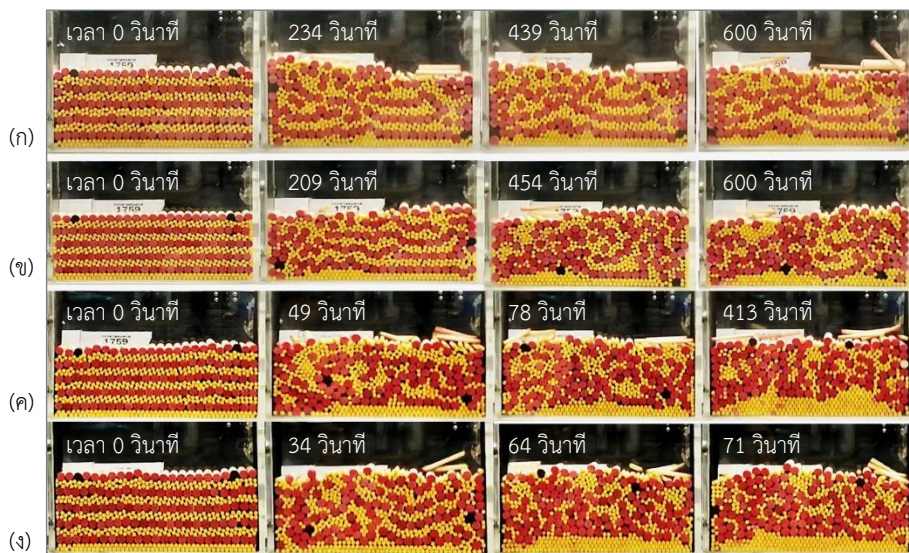
วัสดุเม็ดเคลื่อนที่จากด้านบนของกลุ่มมาบริเวณด้านข้างของภาชนะผ่านพื้นผิวกระดาษฟอยล์และพื้นผิวอะคริลิก จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที วัสดุเม็ดไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณตรงกลางของภาชนะได้ โดยการเคลื่อนที่ที่จะอยู่ที่เดิมหรือแทบจะไม่เคลื่อนที่ โดยจะทำการทดลอง

แบ่งเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ เริ่มต้นการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่มและแบบชั้น ดังภาพที่ 4 (ก และ ข) เริ่มต้นโดยการทดลองลักษณะการจัดเรียงวัสดุแบบสุ่ม ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากัมมะหยี่และผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 วัสดุเม็ดจะค่อย ๆ เคลื่อนที่จากด้านบนมาทางด้านข้างของภาชนะ แล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะและเคลื่อนที่สู่ด้านบนของภาชนะอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” (สกนธ์, 2552) โดยวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะตามทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะตามทิศตามเข็มนาฬิกา (Wibowo *et al.*, 2016) ซึ่งวัสดุเม็ดที่ไม่สามารถเกิดการพาได้ เป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าน้อย ดังภาพที่ 4 (ค และ ง) แสดงให้เห็นว่าแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีผลต่อความสามารถในการพา (Klongboonjit and Campbell, 2008)



ภาพที่ 4 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่ใช้วัสดุผนังชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ ($\mu = 0.376$) (ก) ผนังอะคริลิก ($\mu = 0.432$) (ข) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu = 0.790$) (ค) และผนังกัมมะหยี่ ($\mu = 0.825$) (ง) เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม

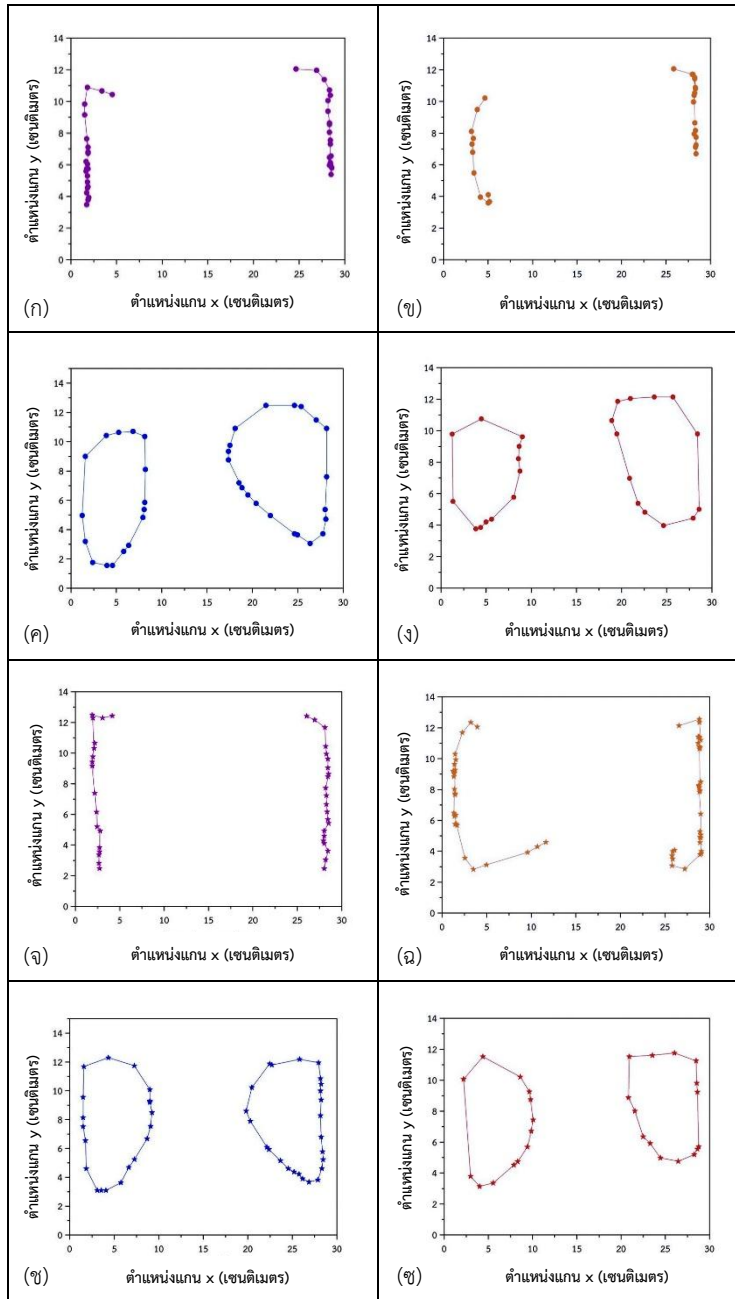
ในทำนองเดียวกันเริ่มต้นโดยการทดลองลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น ดังภาพที่ 5 (ก และ ข) พบว่าวัสดุเม็ดเริ่มต้นจะอยู่ด้านบน จากนั้นวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะเคลื่อนที่มายังด้านข้างของภาชนะด้วยทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะจะเคลื่อนที่มายังด้านข้างของภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ลงมาด้านล่าง จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที วัสดุเม็ดยังเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งเดิม สำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดจากวัสดุผนังอะคริลิก จะเกิดการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับผนังกระดาษฟอยล์ ดังภาพที่ 5 (ค และ ง) แต่วัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างของภาชนะมายังบริเวณตรงกลางของภาชนะแล้วเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งเดิม จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที ทำให้ไม่เกิดการพา



ภาพที่ 5 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่ใช้วัสดุผนังชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ผนังกระดาษพอยล์ ($\mu = 0.376$) (ก) ผนังอะคริลิก ($\mu = 0.432$) (ข) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu = 0.790$) (ค) และผนังกำมะหยี่ ($\mu = 0.825$) (ง) เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบขั้น

2. รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด

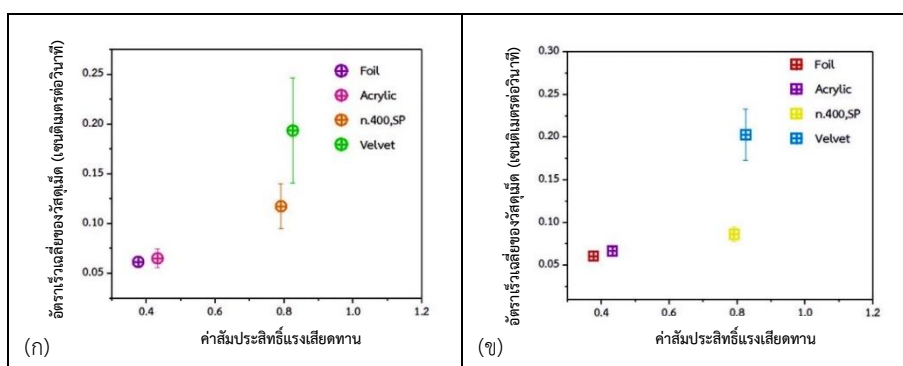
จากการทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในภาชนะที่มีแรงเสียดทานด้านข้างที่ต่างกันภายใต้การสั่นที่มีความเร่งไร้มิติและความถี่เดียวกันโดยการถ่ายวิดีโอ และนำไปวิเคราะห์วิดีโอโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอแทรคเกอร์ โดยติดตามวัสดุที่อยู่บริเวณข้างผนังทั้ง 2 ด้าน วัสดุมีการเคลื่อนที่ที่เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดจากผนังกระดาษพอยล์และผนังอะคริลิก พบว่าแรงเสียดทานไม่มีแรงพอที่จะทำให้เกิดการพาครบเป็นวงซึ่งจะมีรูปแบบการพาที่เหมือนหยุดนิ่ง (Zhang *et al.*, 2023) ดังภาพที่ 6 (ก และ ข) ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่และกระดาษทรายเบอร์ 400 จะเกิดการพาครบ 1 รอบ วัสดุเม็ดจะเกิดการพาเป็นแนว 2 วง บริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของภาชนะ และในทำนองเดียวกันกับกรณีเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบขั้นแสดงในภาพที่ 6 (จ และ ฉ) ส่วนภาพที่ 6 (ค และ ง) เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะจะลากวัสดุเม็ดที่ใกล้ผนังด้านข้างลงมาบริเวณด้านข้างภาชนะ ถ้าแรงเสียดทานมีค่ามากพอจะช่วยให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางระบบได้ แต่ถ้าแรงเสียดทานมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอวัสดุเม็ดก็ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางของระบบได้ และในทำนองเดียวกันกับกรณีเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบขั้นดังภาพที่ 6 (ข และ ข) ซึ่งแสดงในเห็นว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดทั้ง 2 กรณี ทำให้เกิดการพามีลักษณะเป็นวงรี 2 วง ขนาดไม่เท่าในกรณีจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่มและมีลักษณะคล้ายกันในกรณีมีการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบขั้น



ภาพที่ 6 รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ ($\mu = 0.376$) (ก) ผนังอะคริลิก ($\mu = 0.432$) (ข) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu = 0.790$) (ค) และผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu = 0.825$) (ง) เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ ($\mu = 0.376$) (จ) ผนังอะคริลิก ($\mu = 0.432$) (ฉ) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu = 0.790$) (ช) และผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu = 0.825$) (ซ)

3. อัตราเร็วเฉลี่ย

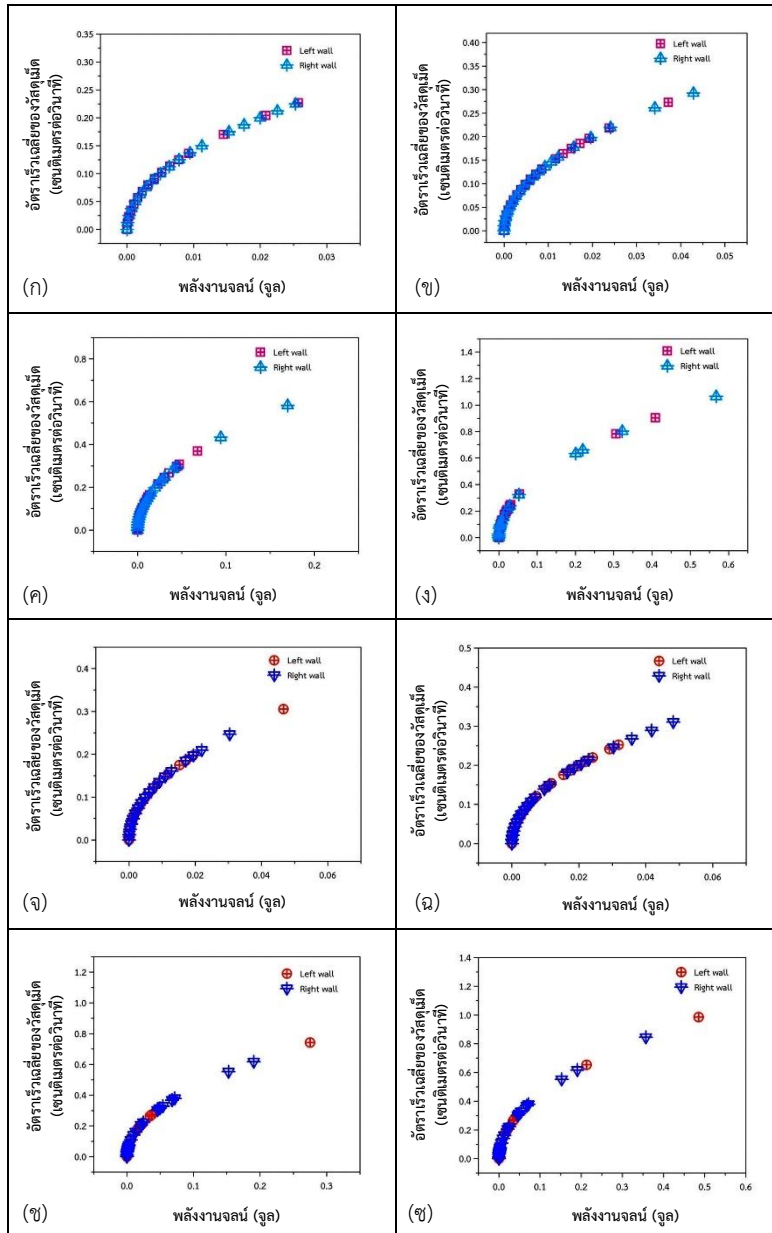
อัตราเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเป็นอัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์ 2 อนุภาค คือ วัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายและวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกับผนังกระดาษพอยล์มีค่าเท่ากับ 0.379 ซึ่งมีความน้อยเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกับผนังอะคริลิก ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ที่มีค่า 0.432 0.790 และ 0.825 ตามลำดับ จึงทำให้อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดมีความน้อยที่สุด ด้วยซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.061 เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนอัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 0.203 เซนติเมตรต่อวินาที (ภาพที่ 7) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นปัจจัยที่ทำให้อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดเปลี่ยนไปทั้ง 2 กรณี คือกรณีเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่มและเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น



ภาพที่ 7 อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกับผนังชนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม (ก) และเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น (ข)

4. พลังงานจลน์ในแนวตั้ง

จากการนำวิดีโอที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม พบว่าวัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ช้าเมื่อผ่านผนังกระดาษพอยล์และผนังอะคริลิกจึงทำให้พลังงานจลน์มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับพลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่มและแบบชั้น เนื่องจากวัสดุเม็ดเคลื่อนที่เร็วและใช้เวลาน้อย ดังนั้นจึงทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่ใช้ผนังกระดาษพอยล์และผนังอะคริลิก วัสดุเม็ดไม่สามารถเคลื่อนที่ไปบริเวณกลางภาชนะได้ (ภาพที่ 8) ซึ่งสนับสนุนงานวิจัยของ Fortini and Huang (2015) ที่มีการตรวจสอบการเริ่มต้นของการพาที่ผนังในวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนในแนวตั้งโดยใช้การทดลองและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์แบบสองมิติ พบว่าการพาที่เกิดขึ้นภายในบริเวณผิวบนจะกระดอนของพื้นที่ตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความถี่ แอมพลิจูด และความเร่งไร้มิติ เป็นต้น ซึ่งวัสดุเม็ดจะมีพฤติกรรมเหมือนลูกบอลกระดอนระหว่างการทดลองและการจำลองสำหรับการเร่งความสั่นสะเทือนสูงสุดที่มีการพาจะเริ่มมีจำนวนเป็นวง ทำให้อัตราเร็วของการหมุนพาภายในภาชนะส่งผลต่อพลังงานที่เกิดขึ้นของวัสดุเม็ดเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 8 พลังงานจลน์กับอัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังชนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม ได้แก่ ผนังกระดาษพอยล์ ($\mu = 0.376$) (ก) ผนังอะคริลิก ($\mu = 0.432$) (ข) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu = 0.790$) (ค) และผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu = 0.825$) (ง) และเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น ได้แก่ ผนังกระดาษพอยล์ ($\mu = 0.376$) (จ) ผนังอะคริลิก ($\mu = 0.432$) (ฉ) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu = 0.790$) (ช) และผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu = 0.825$) (ซ)

การอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องผลของการเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบของการพาในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ด ภายใต้การศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะชนิดต่าง ๆ และรูปแบบการจัดเรียงวัสดุเม็ด โดยในที่นี้ใช้วัสดุเม็ด 2 ขนาดเพื่อเสริมให้เกิดการพา แล้วพิจารณาหัวข้อดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด

จากการทดลองพบว่าวัสดุเม็ดจะอยู่ด้านบนของกลุ่มวัสดุเม็ด หลังจากนั้นวัสดุเม็ดจะค่อย ๆ เคลื่อนที่มาทางด้านข้างของภาชนะ แล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะ และเคลื่อนที่สู่ด้านบนของภาชนะอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” โดยวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา (Wibowo *et al.*, 2016) ซึ่งวัสดุเม็ดที่ไม่สามารถเกิดการพาได้เป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าน้อย ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีผลต่อความสามารถในการพา (Klongboonjit and Campbell, 2008)

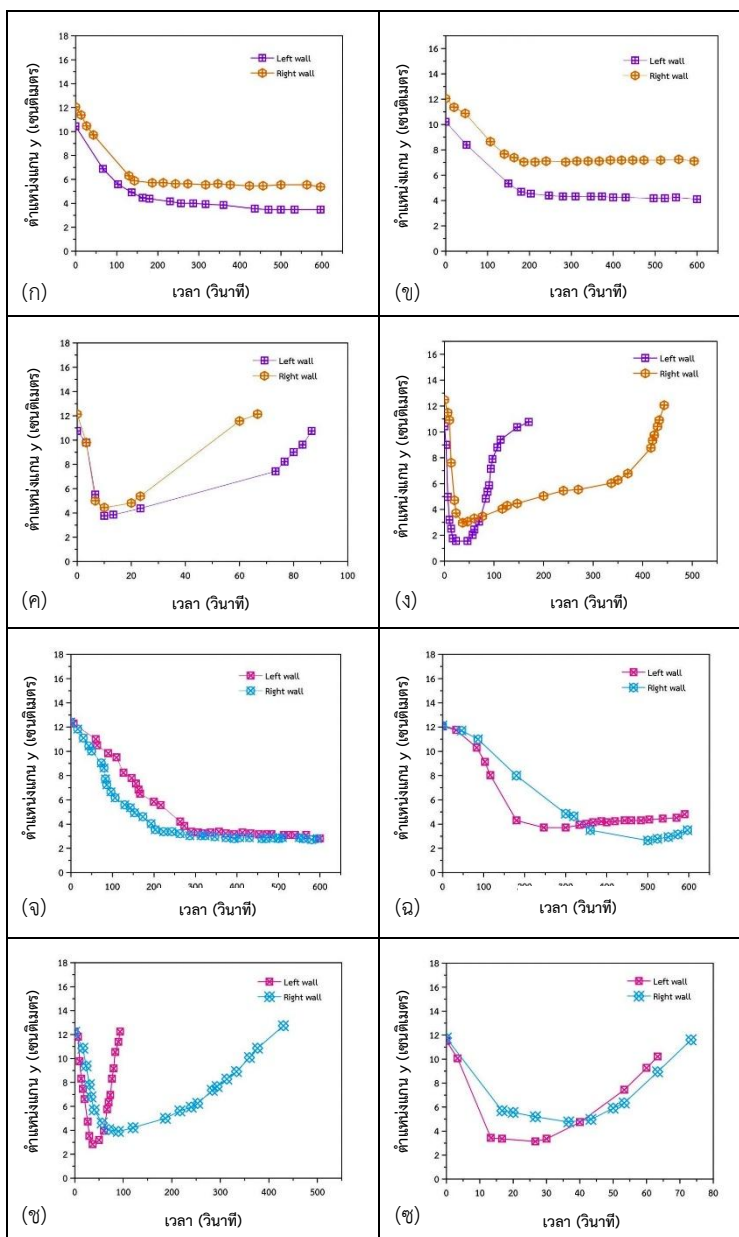
2. รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด

จากการทดลองพบว่าเมื่อวัสดุเม็ดเกิดการพา 1 วง วัสดุเม็ดจะเกิดม้วนการพา 2 วง บริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของภาชนะ เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะจะลากวัสดุเม็ดที่ใกล้ผนังด้านข้างลงมาบริเวณด้านข้างภาชนะ (Chaiworn *et al.*, 2014) ถ้าแรงเสียดทานมีค่ามากพอก็จะช่วยให้วัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางระบบได้ แต่ถ้าแรงเสียดทานมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอวัสดุเม็ดก็ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางของระบบได้ นอกจากนี้แล้วลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งแกน x และตำแหน่งแกน y มีลักษณะเป็นวงรี 2 วง ขนาดไม่เท่าในกรณีจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบส้อม ดังภาพที่ 4 และ 6 และมีลักษณะคล้ายกันในกรณีมีการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบชั้น ดังภาพที่ 5 และ 6 ทั้งนี้มีลักษณะครึ่งวงรี กรณีไม่สามารถเกิดการพา ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะและการจัดเรียงวัสดุเม็ดมีผลต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด ซึ่งสนับสนุนการศึกษารูปแบบการพาของวัสดุเม็ดและการแยกตัวแบบแคบบนการสั่นสะเทือนของวัสดุเม็ดพื้นการกระจายตัวเริ่มต้นของวัสดุเม็ดภายในภาชนะจะแตกต่างกัน 2 ส่วนระหว่างผนังของภาชนะ การพาและการแยกของวัสดุเม็ดเปลี่ยนไปในขั้นสุดท้ายทำให้เกิดการพาเป็น 2 วง แบบไม่สมมาตรเช่นเดียวกัน (Liu *et al.*, 2017) นอกจากนี้รูปแบบการพาพบว่าแรงขับเคลื่อนที่อยู่เบื้องล่างคือสนามการไหลของแรงเฉือนที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดขึ้นจากผลรวมของการต้านของความเสียดทานของผนังและการดึงแรงโน้มถ่วงลง การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการพาด้วยแอมพลิจูด และอัตราเร่งไร้มิติ ทำให้อัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความแข็งแรงของการพาและการม้วนการพาภายในการสั่นเช่นกัน (Xue *et al.*, 2013)

3. เวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการพา

จากการทดลองพบว่าวัสดุเม็ดจะเกิดการพาได้เร็วหรือช้าเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ (Chaiworn *et al.*, 2014) ถ้าแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่ามากจะทำให้เกิดการพาได้เร็ว แต่ถ้าแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอต่อการเคลื่อนที่เข้าสู่ตรงกลางภาชนะ อีกทั้งวัสดุเม็ดที่จัดเรียงเป็นแบบชั้นสามารถเกิดการพาได้เร็วกว่าวัสดุเม็ดที่จัดเรียงแบบส้อม ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ และ

การจัดเรียงวัสดุเม็ดมีผลเวลาในการเกิดการพา นอกจากนี้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับ ตำแหน่งแกน y ของผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิกกราฟจะลดลงในช่วงแรกแล้วเป็นเส้นตรง จนกระทั่งถึงเวลาที่กำหนด ส่วนกราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งแกน y ของผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ กราฟจะลดลงในช่วงแรกจากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงตำแหน่งแกน y เท่ากับเริ่มต้น ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เวลาที่ใช้ในการเกิดการพากับตำแหน่งแกน y เมื่อวัสดุเม็ดเคลื่อนที่ผ่านผนังชนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ ($\mu = 0.376$) (ก) ผนังอะคริลิก

($\mu = 0.432$) (ข) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu = 0.790$) (ค) และผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu = 0.825$) (ง) และเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ ($\mu = 0.376$) (จ) ผนังอะคริลิก ($\mu = 0.432$) (ฉ) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu = 0.79$) (ช) และผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu = 0.825$) (ซ)

4. อัตราเร็วเฉลี่ย

จากการศึกษาพบว่าอัตราเร็วเฉลี่ยเป็นปฏิภาคตรงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ ดังนั้นวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมากก็จะสามารถเกิดการพาได้เร็วด้วยเช่นกัน ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วน้อยอาจจะเกิดการพาได้ช้าหรือไม่สามารถเกิดการพาได้ และความเร่งโน้มถ่วงส่งผลทำให้เกิดการพาและการแยกเช่นกัน ดังภาพที่ 6 ซึ่งสามารถดูได้จากระยะห่างระหว่างตำแหน่งบนเส้นกราฟเมื่อเทียบกับเวลาระหว่างตำแหน่งที่เท่ากัน เมื่อระยะตำแหน่งน้อยแสดงอัตราเร็วที่ช้ากว่าระยะตำแหน่งที่มากจะมีอัตราเร็วที่เร็วกว่า ซึ่งสอดคล้องกับศึกษาเกี่ยวกับการแยกของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนโดยวิธีแบบไม่ต่อเนื่อง อัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคนาดใหญ่ และระดับการแยกตัวโดยรวมมีความสัมพันธ์กับความกว้างของอัตราเร็วการสั่นสะเทือนและความถี่รบกวน (Qiao *et al.*, 2021) นอกจากนี้มีการสร้างแบบจำลองการแยกส่วนแบบปิดแยกของอัตราเร็วและความหนาแน่นของวัสดุเม็ด วัดอัตราเร็วของวัสดุเม็ดและความหนาแน่นของเม็ด ซึ่งรูปแบบนี้แสดงลักษณะการแบ่งแยกในระดับต่าง ๆ ผลกระทบจากอัตราเร็วของวัสดุเม็ดและความหนาแน่นของวัสดุเม็ดในชั้นการไหลเป็นหลัก ซึ่งผลการวัดอัตราเร็วและความหนาแน่นวัสดุเม็ดจากการทดลองสำหรับวัสดุเม็ดที่มีรูปร่างทรงกลมในภาชนะหมุนกึ่งสองมิติ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของวัสดุเม็ดตามทิศทางความลึกของชั้นการไหล (Xiu *et al.*, 2023)

5. พลังงานจลน์ในแนวตั้ง

จากการศึกษาพบว่าพลังงานจลน์เป็นปฏิภาคตรงกับอัตราเร็ว โดยปัจจัยที่มีผลต่อพลังงาน ได้แก่ อัตราเร็ว แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ และการจัดเรียงวัสดุเม็ด นอกจากนี้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์กับอัตราเร็วในแนวตั้ง มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในแนวตั้งเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 8 เช่นเดียวกับการทดลองพลังงานที่กระจายไปและสถานการณ์เคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดเล็กในภาชนะปิดแบบกึ่ง 2 มิติภายใต้การสั่นด้วยความถี่ที่ในแนวตั้งจะถูกตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบการจำลององค์ประกอบแบบไม่ต่อเนื่องกับการทดสอบการทดลองแบบจำลอง DEM (discrete element method) พฤติกรรมพลวัตของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นที่มีแอมพลิจูดและความถี่ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อพลังงานของวัสดุเม็ดในระบบเช่นกัน (Zhang *et al.*, 2022) นอกจากนั้นขนาดของวัสดุเม็ดทั้งระบบส่งผลต่อระบบพลังงานทั้งหมดเช่นเดียวกับการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนขนาดของวัสดุเม็ดต่อการผสมกับวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนแนวตั้ง (Menbari and Hashemnia, 2020)

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพบบนกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวตั้งที่ความถี่และความเร่งโน้มถ่วงเดียวกัน โดยการวิเคราะห์วัสดุเม็ด 2 อนุภาค (อนุภาคสีดำ) พบว่าวัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่จากด้านบนของกลุ่มวัสดุเม็ดมายังด้านล่างภาชนะที่ติดด้วยผนังกระดาษทราย

เบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ จากนั้นเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณกลางภาชนะแล้วเคลื่อนที่สู่ด้านบนอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” โดยเกิดม้วนการพา 2 วง บริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของภาชนะ การเกิดการพาของวัสดุเม็ดจากผนังกระต่ายทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ เนื่องจากแรงเสียดทานมีค่ามากทำให้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่มากส่งผลทำให้พลังงานจลน์มีค่ามากด้วย เมื่อเทียบกับพลังงานจลน์ของผนังกระต่ายทรายและผนังอะคริลิก แต่วัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่จากด้านบนมาด้านข้างของภาชนะผ่านผนังกระต่ายทรายและผนังอะคริลิก จากนั้นเคลื่อนที่อยู่บริเวณเดิมหรือแทบจะไม่เคลื่อนที่ ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณกลางภาชนะ จึงไม่เกิดการพา ดังนั้นพฤติกรรม การพาของกลุ่มวัสดุเม็ดที่สั่นในแนวดิ่งภายใต้ความถี่และความเร่งรัมีติเดียวกัน มีปัจจัยหลักมาจากแรงเสียดทานผนัง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ได้แก่ พลังงานจลน์ และอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ที่มีต่อพฤติกรรมพาของกลุ่มวัสดุเม็ด

ข้อเสนอแนะ

การออกแบบภาชนะควรออกแบบให้มีความกว้างมากกว่าความยาวของวัสดุเม็ด เนื่องจากขณะสั่นวัสดุอาจจะติดภาชนะได้ ควรเพิ่มความกว้างของภาชนะ เพื่อศึกษาอัตราการพาที่อาจจะเกิดมากกว่าหรือน้อยกว่า 2 วง ควรเพิ่มชนิดวัสดุผนังเพื่อสามารถเปรียบเทียบได้ดีกว่า อาจศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมพาของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง โดยให้ผนังด้านหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ และศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมพาของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวนอนโดยใช้ความเร่งรัมีติหลายค่า เพื่อเปรียบเทียบผล และผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ทางด้านอุตสาหกรรมและการสร้างชุดกิจกรรมในการสนับสนุนการเรียนรู้วิชาฟิสิกส์และสาขาประยุกต์ทางฟิสิกส์และวิศวกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนในด้านสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือเพื่อใช้ในการทดลองในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- สกนธ์ คล่องบุญจิต. (2552). การศึกษาอิทธิพลของปรากฏการณ์การหมุนวนกับการผสมกันของระบบวัสดุเม็ดกลมในภาชนะบรรจุเชิง 2 มิติด้วยเทคนิคการจำลองเหตุการณ์แบบวัสดุเม็ดนี้ม. *วิศวกรรมลาดกระบัง*, 26(4), 31-36.
- อภิสิทธิ์รัตน์ ชันแก้ว มนูญชัย ไชยเพชร วิทยา หลังหลี่ และพิชญา ทิพย์ศรี. (2022). การวัดความเร็วปลายในการตกของโลหะทรงกลมรัศมีแตกต่างกันในกลีเซอรินโดยใช้ตัวตรวจจับเวลาที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 41(2), 1-15.
- Chaiworn, P., Chung, F.F. and Liaw, S.S. (2014). Pseudo 2-dimensional trajectory of a particle in vibrating granular bed. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 4(1), 27-30, doi: <https://doi.org/10.7763/IJAPM.2014.V4.249>.

- Fortini, A. and Huang, K. (2015). Role of defects in the onset of wall-induced granular convection. *Physical Review E*, 91(3), doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.91.032206>.
- Klongboonjit, S. and Campbell, C.S. (2008). Convection in deep vertically shaken particle beds. I, *General Features*. *Physics of Fluids*, 20(10), doi: <https://doi.org/10.1063/1.2996134>.
- Liu, C., Wu, P., Wang, L., Tong, L. and Yin, S. (2017). Patterns of granular convection and separation in narrow vibration bed. *EPJ Web of Conferences*, 140(1), doi: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714003031>.
- Menbari, A. and Hashemnia, K. (2020). Studying the particle size ratio effect on granular mixing in a vertically vibrated bed of two particle types. *Particuology*, 53(1), 100-111, doi: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2020.01.007>.
- Qiao, J., Duan, C., Dong, K., Wang, W., Jiang, H., Zhu, H. and Zhao, Y. (2021). DEM study of segregation degree and velocity of binary granular mixtures subject to vibration. *Powder Technology*, 382(1), 107-117, doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.12.064>.
- Wibowo, H.A.C., Ain, T.N., Nugraha, Y.P., Aji, D.P.P., Khotimah, S.N. and Viridi, S. (2016). Experimental study of granular convection in (real) two-dimension Brazil-nut effect. *Journal of Physics: Conference Series*, 739(1), doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/739/1/012053>.
- Xiu, W., Lib, R., Chen, Q., Sun, Q. Zivkovic, V. and Yang, H. (2023). Prediction of segregation characterization based on granular velocity and concentration in rotating drum. *Particuology*, 73(1), 17-25, doi: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.03.008>.
- Xue, K., Zheng, Y., Fan, B., Li, F. and Bai, C. (2013). The origin of granular convection in vertically vibrated particle beds: The differential shear flow field. *The European Physical Journal E*, 36(8), 1-11, doi: <https://doi.org/10.1140/epje/i2013-13008-1>.
- Zhang, K., Zhong, H., Chen, T., Kou, F., Chen, Y. and Bai, C. (2022). Dissipation behaviors of granular balls in a shaken closed container. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 172(1), doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.108986>.
- Zhang, X., Zhang, D., Wang, Y., Ji, S. and Zhao, H. (2023). Dynamic characteristics of sphere impact into wet granular materials considering suction. *Granular Matter*, 25(1), doi: <https://doi.org/10.1007/s10035-022-01304-9>.