

**ผลของแรงเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบของการพา  
ในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ด**

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

ภาณุพัฒน์ ชัยวร<sup>1</sup> สุภารัตน์ หาญขว้าง<sup>1</sup> วิไลพร ลักษมีวนิชย์<sup>1</sup> และเพ็ญศรี ประมุขกุล<sup>1\*</sup>  
 Panupat Chaiworn<sup>1</sup> Suparat Hankwang<sup>1</sup> Vilaiporn Luksameevanish<sup>1</sup>  
 and Pensri Pramukkul<sup>1\*</sup>

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแรงเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบการพาใน การสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ด โดยใช้อุปกรณ์ที่ประกอบไปด้วยตู้สั่นขนาด 2 หน้าต่าง ได้แก่ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 460 อนุภาค และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 115 อนุภาค นำมาจัดเรียงแบบสุ่มในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จากวัสดุต่างชนิดที่มีแรงเสียดทานผนังแตกต่างกัน ได้แก่ อะคริลิก กระดาษฟอยล์ ผ้ากำมะหยี่ และ กระดาษทรายเบอร์ 400 จากนั้นสั่นด้วยแอมพลิจูดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความถี่ 12.21 เฮิร์ต และ ความเร่งรีบมิติเท่ากับ 3 ผลการทดลองพบว่าวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านบนของกลุ่มจะเคลื่อนที่มาทางด้านข้าง ของภาชนะ แล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะและเคลื่อนไปด้านบนอีกรั้ง เป็นการเคลื่อนที่รอบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” วัสดุเม็ดที่อยู่ด้านข้างจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศทางเข้ามานำพิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศตามเข้ามานำพิกา สำหรับภาชนะที่มีค่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะเท่ากับ 0.790 และ 0.825 วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ ได้เร็วและพลังงานจนมีค่ามาก ส่วนภาชนะที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนัง ภาชนะมีค่าเท่ากับ 0.376 และ 0.432 วัสดุเม็ดที่อยู่บนกลุ่mvัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ลงด้านข้างแต่ ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณศูนย์กลางกลุ่mvัสดุเม็ดได้ เนื่องจากพลังงานจนของวัสดุเม็ดมีค่าน้อย

**คำสำคัญ:** วัสดุเม็ด การพา สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน การสั่นในแนวตั้ง

<sup>1</sup> ภาควิชาพิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

\* Corresponding author e-mail: pensri\_pra@cmru.ac.th

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 กลุ่มของอนุภาคของแข็งที่มีช่องว่างระหว่างอนุภาคสามารถแทรกด้วยของเหลว เช่น น้ำหรืออากาศ วัสดุเหล่านี้มีรูปร่างต่าง ๆ เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก และรูปร่างอื่น ๆ ที่อยู่รวมกันจำนวนหนึ่ง วัสดุเม็ดถือว่าเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่มีการศึกษาพุทธิกรรมตามสถานการณ์เนื่องในทางปัจจัยทั้งภายในและภายนอกต่าง ๆ เนื่องจากวัตถุดีบส่วนใหญ่ที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอยู่ในรูปของวัสดุเม็ด เช่น ทราย เม็ดพลาสติก และผลิติตทางการเกษตรและอุตสาหกรรม ซึ่งกระบวนการผลิตวัตถุดีบต่าง ๆ จะถูกนำไปผ่านกระบวนการสั่นเพื่อให้ผสมกันหรือเพื่อแยกตัวออกจากกัน สำหรับวัสดุประเภทนี้เมื่อถูกนำมารีบเร่ง เช่น แรงกระแทก และการแยกคลื่นผิว (surface waves) การพา (convection) เป็นต้น นอกจากนี้การวัดความเร็วปลายในกระบวนการตัดของโลหะทรงกลมที่มีรัศมีแตกต่างกันซึ่งความเร็วปลายของโลหะทรงกลมมีค่าเพิ่มขึ้นตามรัศมีของโลหะทรงกลมที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อนำความเร็วปลายไปคำนวณหาค่าความเร็วปลายถือสมมุติแล้วนำความเร็วปลายถือสมมุติไปหารความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายถือสมมุติกับรัศมีกำลังสอง

แสดงให้เห็นว่าวิธีการวัดความเร็วปลายของการเคลื่อนที่ของโลหะทรงกลมในกลีเซอรีนเป็นแนวทางในการศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุในของเหลวทั่วไปได้ (อภินทร์รัตน์ และคณะ, 2022)

ปัจจุบันมีวัดคุณิตอยู่มากมายที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตโดยการสั่นหรือการหมุนภายใต้การทำทำงานของเครื่องจักรเพื่อคัดแยกวัตถุดิบที่มีขนาด น้ำหนัก สี และคุณภาพที่แตกต่างกันไป เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและเพื่อเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบ พฤติกรรมการพาจะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเม็ดถูกสั่นหรือเขย่าทำให้เม็ดวัสดุที่อยู่ด้านล่างบริเวณตรงกลางของระบบเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่อิสระด้านบน แล้วจึงเคลื่อนที่ไปด้านข้าง ต่อจากนั้นจึงเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของระบบ ในที่สุดจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตรงกลางของระบบอีกรอบเป็นการครับรอบการพา 1 รอบ (สกนธ., 2552) รูปแบบการพากล้ายกับชนิดของการหมุนวนของของเหลว ซึ่งเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่น่าสนใจ แม้จะมีการศึกษาถึงปรากฏการณ์การพาโดยนักวิจัยหลาย ๆ ท่านก็ตาม และยังมีสันนิษฐานว่าแรงเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุกับผนังภาชนะจะก่ออนุภาคไกล์ผนังด้านข้างลง (Chaiworn et al., 2014) แต่การศึกษายังไม่มีผู้ใดตอบได้ว่าแรงเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุกับผนังที่มีค่ามากหรือน้อย มีผลต่อการเกิดการพาอย่างไร นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่กล่าวถึงแรงต่าง ๆ เช่น ผลกระทบของปริมาณความชื้นที่มีต่อความลึกของวัสดุเม็ดสมมติว่าการมีความชื้นไม่มีผลต่อระยะแรงเสียดอย (Zhang et al., 2023) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของแรงเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบของการพาในการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ดรูปทรงกระบอก โดยใช้ผนังภาชนะต่างชนิดกัน ได้แก่ อะคริลิก ผ้ากำมะหยี่ และกระดาษทราย โดยคณะผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองใช้ระบบการสั่นแนวตั้งที่มีความเร่งรีห่วง่วยในการสั่น (the dimensionless vibration acceleration) ซึ่งเป็นปริมาณที่รวมความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลในการสั่น คือ ความถี่ในการสั่น ( $f$ ) และแอมพลิจูดในการสั่น ( $A$ ) ต่อค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก ( $g$ ) โดยมีสมการความสัมพันธ์ คือ  $\Gamma = A(2\pi f)^2 / g$  ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านอุตสาหกรรม การอิնบາຍธรมชาติที่ซับซ้อน และเป็นแนวทางในการสร้างชุดการเรียนการสอนวิชาพิสิกส์ต่อไปในอนาคต

### วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย วัสดุเม็ด ผนังชนิดต่าง ๆ กล่องอะคริลิก เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง และเครื่องสั่นแนวตั้ง การทดลองเริ่มจากการหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังชนิดต่าง ๆ โดยตัววัสดุเม็ด ได้แก่ ไม้ชิโนกิทรงกระบอก 2 ขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 460 อนุภาค และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 115 อนุภาค และตัววัสดุผนัง ได้แก่ อะคริลิก (acrylic) ผ้ากำมะหยี่ (velvet) กระดาษฟอยล์ (foil) พลาสติก (polyethylene: PE) ไม้ชิโนกิ (Hinoki) กระดาษทรายเบอร์ 400 (sandpaper: SP n.400) และกระดาษทรายเบอร์ 600 (SP n.600) ขนาดของภาชนะรูปสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 15 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร ความหนา 6 เซนติเมตร นำวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ ที่ตัดตามขนาดที่ต้องการติดบนฐานของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง หมุนรอกที่อยู่ด้านข้างของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง จนกระทั่งลูกเหล็กเคลื่อนที่ตกลงจากฐานของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง (ภาพที่ 1) บันทึกภาพ คำนวณหาค่ามุมและ

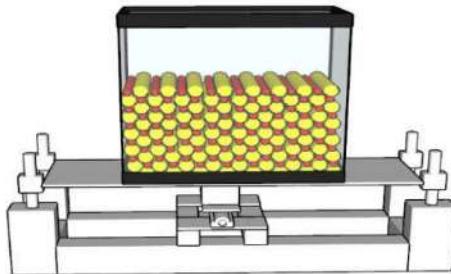
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากนั้นเลือกชนิดของผนังที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ด กับผนังอยู่ในช่วงที่ต่างกัน เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพานของกลุ่mvัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวตั้ง โดยนำชนิดของผนังที่เลือกมาติดบริเวณด้านข้างของกล่องอะคริลิกทั้ง 2 ข้าง บรรจุวัสดุเม็ดลงในกล่องอะคริลิกแบบสูญ จากนั้นสั่นด้วยแอมพลิจูดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความถี่ 12.21 เฮิร์ต ความเร่งไร้มิติ ( $\Gamma$ ) เท่ากับ 3 และเวลาการสั่นสูงสุด 600 วินาที (ภาพที่ 2) โดยทำการทดลอง 2 ลักษณะ ได้แก่ เริ่มต้นการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่มและแบบขั้น และบันทึกการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดโดยการถ่ายวิดีโอแล้วนำมาวิเคราะห์หลักณะการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ด และพลังงานจนของวัสดุเม็ดในแนวตั้ง โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอแทรคเกอร์ในการทดลองนี้มุ่งเน้นไปที่วัสดุเม็ดรูปทรงกระบอกและ岱นาไมกกะถูกควบคุมโดยการสั่นในแนวตั้ง และแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคในขั้นต้น คงจะผู้วิจัยศึกษาการเคลื่อนที่วัสดุเม็ดตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน และแรงด้าน ( $F$ ) ที่กระทำกับวัสดุเม็ดสามารถแบ่งออกเป็นองค์ประกอบต่อไปนี้ (Zhang et al., 2023)

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

โดยที่  $m_c$  คือ มวลของโพรเจกไทร์ (projectile)  $g$  คือ ความเร่งโน้มถ่วง  $v$  คือ ความเร็วช่วงขณะของวัสดุเม็ด  $\alpha$  คือ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับความเค้นเฉียบ  $\beta$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาค  $\gamma$  คือ พารามิเตอร์ของวัสดุเม็ด-ผนัง



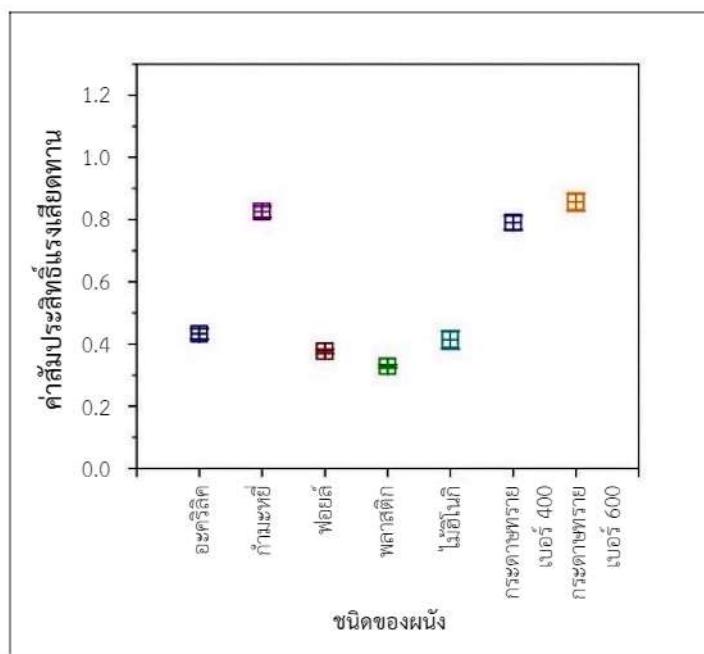
ภาพที่ 1 การทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง



ภาพที่ 2 การติดตั้งวัสดุเม็ดภายใต้ระบบการสั่นในแนวตั้งด้วยค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความถี่ 12.21 เฮิร์ต และความเร่งไร้มิติเท่ากับ 3

### ผลการวิจัย

เมื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อิโนกิทรงกระบอกกับผนังชนิดต่าง ๆ พบร่วมสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อิโนกิกับผนังอะคริลิกมีค่า 0.432 อนุภาคไม้อิโนกิกับผนังผ้ากำมะหยี่มีค่า 0.825 อนุภาคไม้อิโนกิกับกระดาษฟอยล์มีค่า 0.376 อนุภาคไม้อิโนกิกับพลาสติกมีค่า 0.328 อนุภาคไม้อิโนกิกับไม้อิโนกิมีค่า 0.413 อนุภาคไม้อิโนกิกับกระดาษทรายเบอร์ 400 มีค่า 0.790 และอนุภาคไม้อิโนกิกับกระดาษทรายเบอร์ 600 มีค่า 0.856 ทั้งนี้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อิโนกิกับผนังชนิดต่าง ๆ ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อิโนกิกับผนังผ้ากำมะหยี่ ผนังกระดาษฟอยล์ 400 และกระดาษทรายเบอร์ 600 มีค่าใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อิโนกิและผนังชนิดต่าง ๆ

เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าใกล้เคียงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อิโนกิกับผนังไม้อิโนกิ และ กลุ่มที่มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอนุภาคไม้อิโนกิกับไม้อิโนกิ ดังนั้นจึงเลือกวัสดุผนัง 3 ชนิด ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ ( $\mu = 0.376$ ) ผนังอะคริลิก ( $\mu = 0.432$ ) และผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ( $\mu = 0.790$ ) เพื่อศึกษาพฤติกรรมการพานของกลุ่mvัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวตั้ง โดยวิเคราะห์อนุภาคขนาดใหญ่ 2 อนุภาค (อนุภาคสีดำ) ทั้ง 4 ประดิษฐ์ตั้งนี้

#### 1. การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในภาชนะที่มีแรงเสียดทานผนัง

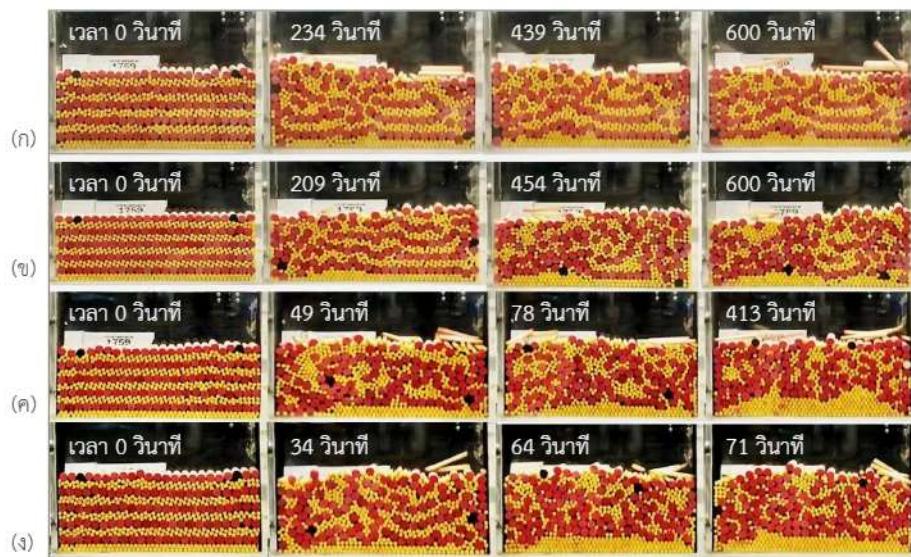
วัสดุเม็ดเคลื่อนที่จากด้านบนของกลุ่มมาบริเวณด้านข้างของภาชนะผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิก จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที วัสดุเม็ดไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณตรงกลางของภาชนะได้ โดยการเคลื่อนที่จะอยู่ที่เดิมหรือແທบจะไม่เคลื่อนที่ โดยจะทำการทดลอง

แบ่งเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ เริ่มต้นการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุมและแบบชั้น ดังภาพที่ 4 (ก และ ข) เริ่มต้นโดยการทดลองลักษณะการจัดเรียงวัสดุแบบสุม ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านพังผ้ากำมะหยี่ และพังกระดาษทรายเบอร์ 400 วัสดุเม็ดจะค่อย ๆ เคลื่อนที่จากด้านบนมาทางด้านข้างของภาชนะ แล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะและเคลื่อนที่สู่ด้านบนของภาชนะอีกรั้ง เป็นการเคลื่อนที่รอบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” (สกนธ., 2552) โดยวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะตามทิศทางเข็มนาฬิกา (Wibowo *et al.*, 2016) ซึ่งวัสดุเม็ดที่ไม่สามารถเกิดการพาได้ เป็นผลมาจากการแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีผลต่อความสามารถในการพา (Klongboonjitt and Campbell, 2008)



ภาพที่ 4 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่ใช้วัสดุผนังชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ ( $\mu = 0.376$ ) (ก) ผนังอะคริลิค ( $\mu = 0.432$ ) (ข) ผนังกระดาษ ทรายเบอร์ 400 ( $\mu = 0.790$ ) (ค) และผนัง กำมะหยี่ ( $\mu = 0.825$ ) (ง) เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุม

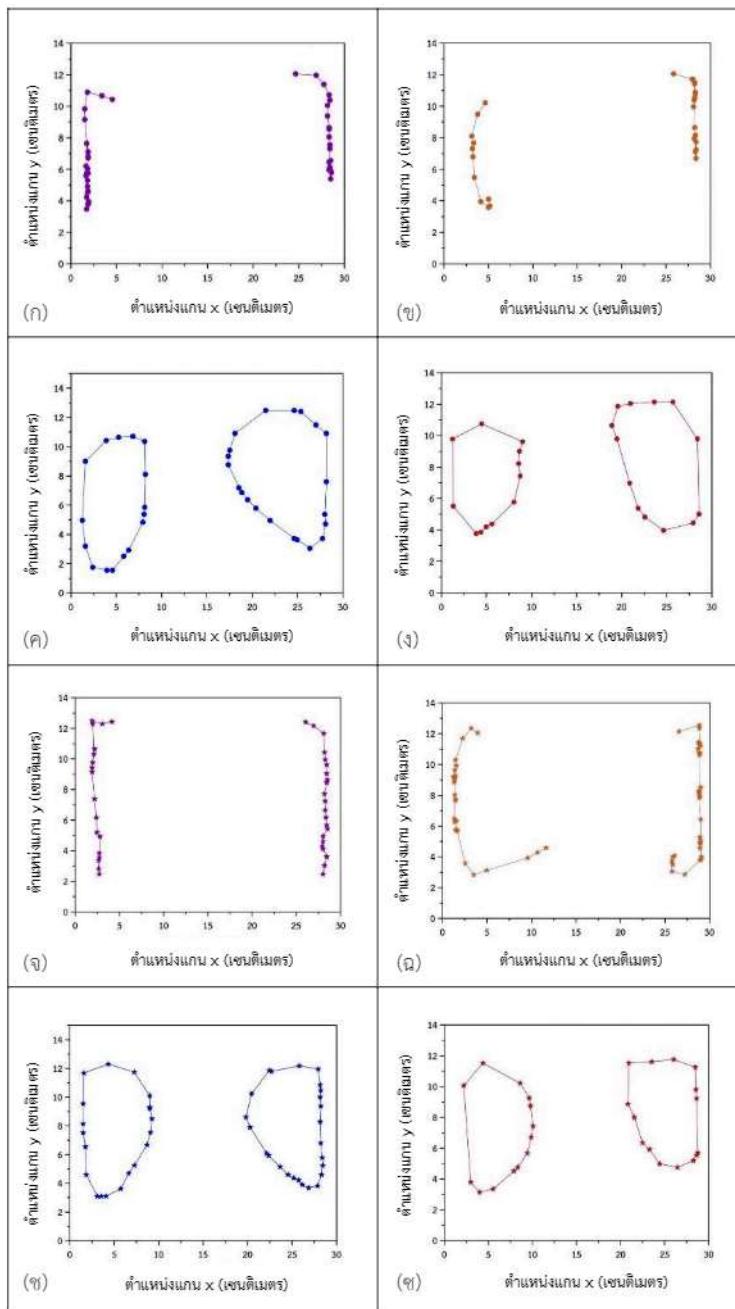
ในท่านองเดียวกันเริ่มต้นโดยการทดลองลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น ดังภาพที่ 5 (ก และ ข) พบว่าวัสดุเม็ดเริ่มต้นจะอยู่ด้านบน จากนั้นวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะเคลื่อนที่มายังด้านข้าง ของภาชนะด้วยทิศทางเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะจะเคลื่อนที่มา\_yang\_d้านข้าง ของภาชนะด้วยทิศทางเข็มนาฬิกา วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ลงมาด้านล่าง จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที วัสดุเม็ดยังเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม สำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดจากวัสดุผนังอะคริลิค จะเกิดการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับผนังกระดาษฟอยล์ ดังภาพที่ 5 (ค และ ง) แต่วัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะ จะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างของภาชนะมายังบริเวณตรงกลางของภาชนะแล้วเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที ทำให้ไม่เกิดการพา



ภาพที่ 5 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่ใช้วัสดุพนังชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ ( $\mu = 0.376$ ) (ก)  
ผนังอะคริลิก ( $\mu = 0.432$ ) (ข) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ( $\mu = 0.790$ ) (ค) และผนัง  
กำมะหยี่ ( $\mu = 0.825$ ) (ง) เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบขั้น

## 2. รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด

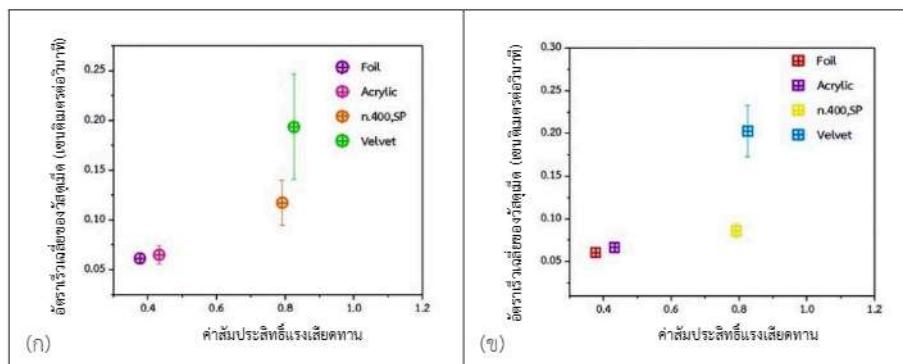
จากการทดลองสังเกตการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในภาชนะที่มีแรงเสียดทานด้านข้างที่ต่างกันภายใต้การสั่นที่มีความเร่งรีบมิติและความถี่เดียวกันโดยการถ่ายวิดีโอ และนำไปวิเคราะห์วิดีโอด้วยโปรแกรมวิเคราะห์วิดีโอแทรคเกอร์ โดยติดตามวัสดุที่อยู่บริเวณข้างผนังทั้ง 2 ด้าน วัสดุ มีการเคลื่อนที่เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดจากผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิก พบว่าแรงเสียดทานไม่มีแรงพอที่จะทำให้เกิดการพากอบเป็นวงซึ่งจะมีรูปแบบการพาที่เสมือนหยุดนิ่ง (Zhang et al., 2023) ดังภาพที่ 6 (ก และ ข) ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่และกระดาษทรายเบอร์ 400 จะเกิดการพากอบ 1 รอบ วัสดุเม็ดจะเกิดการพากอบเป็นแนว 2 วง บริเวณด้านข้างและด้านขวาของภาชนะ และในทำนองเดียวกันกับกรณีเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบขั้นแสดงในภาพที่ 6 (จ และ ฉ) ส่วนภาพที่ 6 (ค และ ง) เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะจะลากวัสดุเม็ดที่ใกล้ผนังด้านข้างลงมาบริเวณด้านข้างภาชนะ ถ้าแรงเสียดทานมีค่ามากพอ ก็จะช่วยให้วัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางระบบได้ แต่ถ้าแรงเสียดทานมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอ วัสดุเม็ดก็ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางของระบบได้ และในทำนองเดียวกันกับกรณีเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบขั้นดังภาพที่ 6 (ช และ ช) ซึ่งแสดงในเห็นว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดทั้ง 2 กรณี ทำให้เกิดการพากอบมีลักษณะเป็นวงรี 2 วง ขนาดไม่เท่าในกรณีจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่มและมีลักษณะคล้ายกันในกรณีมีการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบขั้น



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

### 3. อัตราเร็วเฉลี่ย

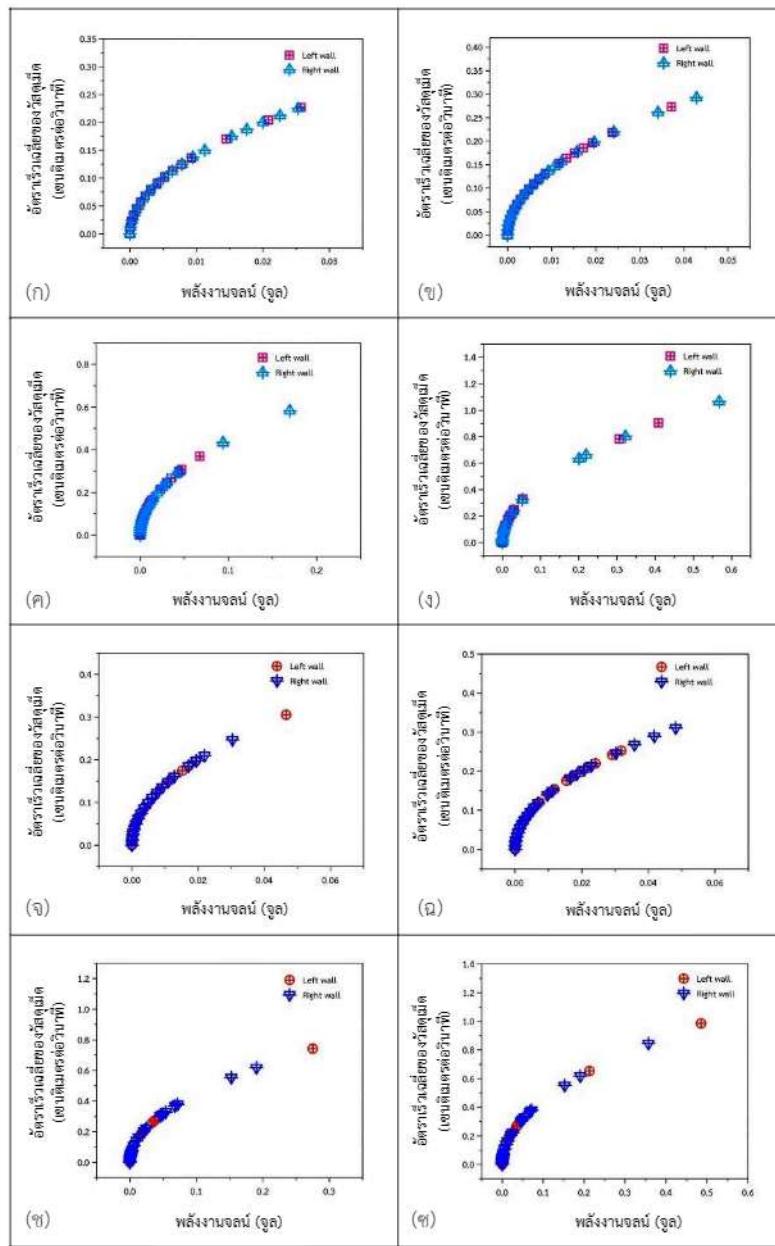
อัตราเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้นเป็นอัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์ 2 อนุภาค คือ วัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายและวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อินิกับผนังกระดาษฟอยล์มีค่าเท่ากับ 0.379 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อินิกับผนังอะคริลิก ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ที่มีค่า 0.432 0.790 และ 0.825 ตามลำดับ จึงทำให้อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดมีค่าน้อยที่สุด ด้วยซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.061 เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนอัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 0.203 เซนติเมตรต่อวินาที (ภาพที่ 7) พบร่วมค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเป็นปัจจัยที่ทำให้อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดเปลี่ยนไปทั้ง 2 กรณี คือกรณีเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม และเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น



ภาพที่ 7 อัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อินิกับผนังชนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม (a) และเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบชั้น (b)

### 4. พลังงานจลน์ในแนวตั้ง

จากการนำวิดีโอด้วยโปรแกรม พบร่วมวัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ข้ามมือผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิกซึ่งทำให้พลังงานจลน์มีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับพลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่มและแบบชั้น เนื่องจากวัสดุเม็ดเคลื่อนที่เร็วและใช้เวลาน้อย ดังนั้น จึงทำให้รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่ใช้ผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิก วัสดุเม็ดไม่สามารถเคลื่อนที่ไปบริเวณกลางภาชนะได้ (ภาพที่ 8) ซึ่งสนับสนุนงานวิจัยของ Fortini and Huang (2015) ที่มีการตรวจสอบการเริ่มต้นของการพาที่ผ่านในวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนในแนวตั้งโดยใช้การทดลองและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์แบบสองมิติ พบร่วมการพาที่เกิดจากผนังเกิดขึ้นภายในบริเวณผิวนะจะระดอนของพื้นที่ตามพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ความถี่ แอมเพลจูต และความเร่งรีมิติ เป็นต้น ซึ่งวัสดุเม็ดจะมีพฤติกรรมเหมือนลูกบลอกกระดอนระหว่างการทดลองและการจำลองสำหรับการเร่งความสั่นสะเทือนสูงสุดที่มีการพาจะเริ่มม้วนวนเป็นวง ทำให้อัตราเร็วของการม้วนพาภายในภาชนะส่งผลต่อพลังงานที่เกิดขึ้นของวัสดุเม็ดเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 8 พลังงานจลน์กับอัตราเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังชีวนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ ( $\mu = 0.376$ ) (ก) ผนังอะคริลิค ( $\mu = 0.432$ ) (ข) ผนังกระดาษรายเบอร์ 400 ( $\mu = 0.790$ ) (ค) และผนังผ้ากำมะหยี่ ( $\mu = 0.825$ ) (ง) และเมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบขั้น ได้แก่ ผนังกระดาษฟอยล์ ( $\mu = 0.376$ ) (ก) ผนังอะคริลิค ( $\mu = 0.432$ ) (ช) ผนังกระดาษรายเบอร์ 400 ( $\mu = 0.790$ ) (ช) และผนังผ้ากำมะหยี่ ( $\mu = 0.825$ ) (ช)

## การอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่องผลของการเสียดทานของผนังภาชนะต่อรูปแบบของการพานิการสั่นแนวตั้งสำหรับวัสดุเม็ด ภายใต้การศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะชนิดต่าง ๆ และรูปแบบการจัดเรียงวัสดุเม็ด โดยในที่นี้ใช้วัสดุเม็ด 2 ขนาดเพื่อเสริมให้เกิดการพานิการสั่นแนวตั้ง พิจารณาห้ามข้อตังค์นี้

## 1. การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด

จากการทดลองพบว่าสตดเม็ดจะอยู่ด้านบนของกลุ่มวัสดุเม็ด หลังจากนั้นวัสดุเม็ดจะค่อย ๆ เคลื่อนที่มาทางด้านข้างของภาชนะ แล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะ และเคลื่อนที่สู่ด้านบนของภาชนะอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่รอบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” โดยวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านข้างของภาชนะจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศทางเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา (Wibowo et al., 2016) ซึ่งวัสดุเม็ดที่ไม่สามารถเกิดการพาได้เป็นผลมาจากการเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าน้อย ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีผลต่อความสามารถในการพา (Klongboonjit and Campbell, 2008)

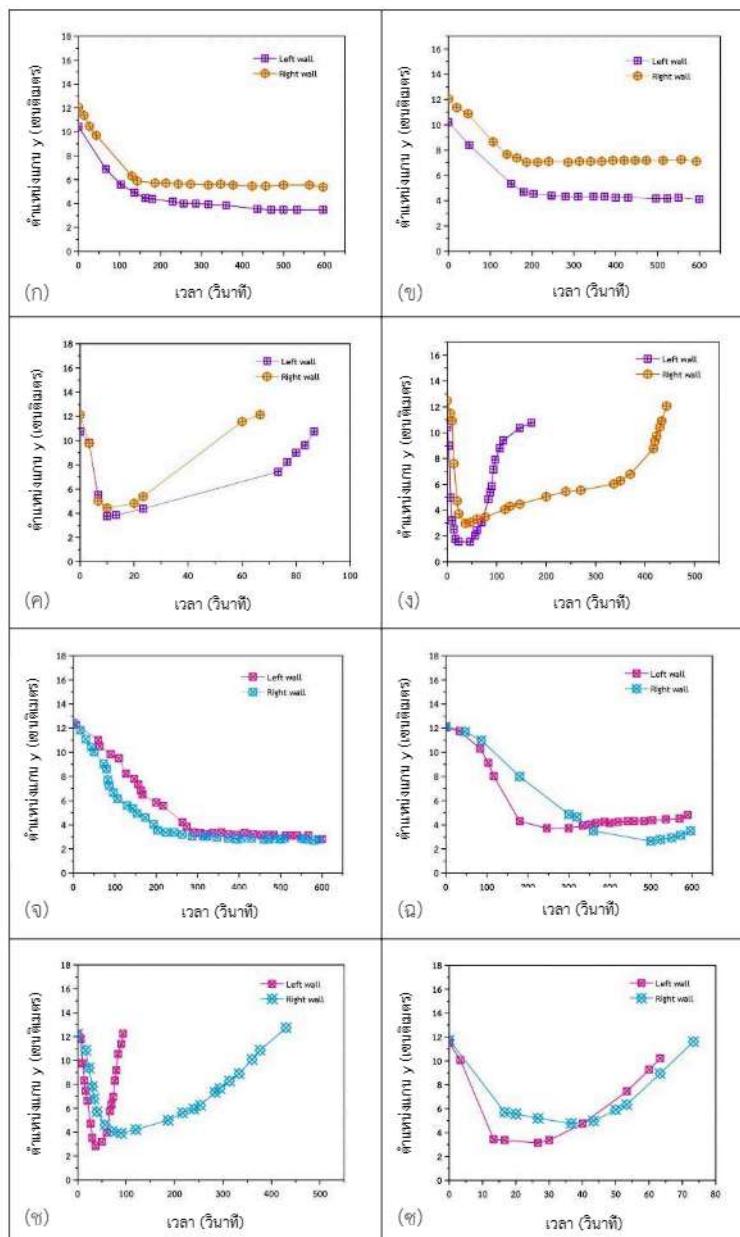
## 2. รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด

จากการทดลองพบว่า เมื่อวัสดุเม็ดเกิดการพا 1 วง วัสดุเม็ดจะเกิดม้วนการพา 2 วง บริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของภาชนะ เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะจะลากวัสดุเม็ดที่ใกล้ผนังด้านซ้ายลงมาบริเวณด้านซ้ายภาชนะ (Chaiworm *et al.*, 2014) ถ้าแรงเสียดทานมีค่ามากพอ ก็จะช่วยให้วัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางระบบได้ แต่ถ้าแรงเสียดทานมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอวัสดุเม็ดก็ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางของระบบได้ นอกจากนี้แล้วลักษณะการพความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งแกน x และตำแหน่งแกน y มีลักษณะเป็นวงรี 2 วง ขนาดไม่เท่าในกรณีจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 4 และ 6 และมีลักษณะคล้ายกันในกรณีมีการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบขั้นต้องภาพที่ 5 และ 6 ทั้งนี้มีลักษณะคล้ายๆ กัน กรณีไม่สามารถเกิดการพา ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะและการจัดเรียงวัสดุเม็ดมีผลต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด ซึ่งสนับสนุนการศึกษารูปแบบการพาของวัสดุเม็ดและการแยกตัวแบบควบคุมการสั่นสะเทือนของวัสดุเม็ดที่นี่ การกระจายตัวเริ่มต้นของวัสดุเม็ดภายในภาชนะจะแตกต่างกัน 2 ส่วนระหว่างผนังของภาชนะ การพา และการแยกของวัสดุเม็ดเปลี่ยนไปในขั้นสุดท้ายทำให้เกิดการพาเป็น 2 วง แบบไม่สมมาตรเรซั่นเดียวกัน (Liu *et al.*, 2017) นอกจากนี้รูปแบบการพาพบว่าแรงขับเคลื่อนที่อยู่เบื้องล่างคือสนาการไฟลของแรงเรซั่นที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดขึ้นจากผลกระทบของการต้านของความเสียดทานของผนังและการดึงแรงโน้มถ่วงลง การเปลี่ยนแปลงของรูปแบบการพาด้วยแม่พลาстиค และอัตราเร่งไวร์มิต ทำให้อัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นเมื่อผลต่อความแข็งแรงของการพาและการม้วนการพาที่การสั่นซึ่งกัน (Xue *et al.*, 2013)

### 3. เวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการพาก

จากการทดลองพบว่าวัสดุเม็ดจะเกิดการพاได้เร็วหรือช้าเป็นผลมาจากการรีดท่านะหัวงวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ (Chaiworn et al., 2014) ถ้าแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่ามากจะทำให้เกิดการพาได้เร็ว แต่ถ้าแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอต่อการเคลื่อนที่เข้าสู่ตระกลางภาชนะ อีกทั้งวัสดุเม็ดที่จัดเรียงเป็นแบบชั้นสามารถเกิดการพาได้เร็วกว่าวัสดุเม็ดที่จัดเรียงแบบสุม ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ และ

การจัดเรียงสุดเม็ดมีผลเวลาในการเกิดการพานอกจากนี้ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลา กับตำแหน่งแกน y ของผนังกระดาษพอยล์และผนังอะคริลิกราฟจะลดลงในช่วงแรกแล้วเป็นเส้นตรง จนกระทั่งถึงเวลาที่กำหนด ส่วนกราฟระหว่างเวลาและตำแหน่งแกน y ของผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ กราฟจะลดลงในช่วงแรกจากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงตำแหน่งแกน y เท่ากับเริ่มต้น ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เวลาที่ใช้ในการเกิดการพานอกกับตำแหน่งแกน y เมื่อวัสดุเม็ดเคลื่อนที่ผ่านผนังชนิดต่าง ๆ เมื่อเริ่มต้นลักษณะการจัดเรียงแบบสุ่ม ได้แก่ ผนังกระดาษพอยล์ ( $\mu = 0.376$ ) (ก) ผนังอะคริลิค

( $\mu = 0.432$ ) (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 ( $\mu = 0.825$ ) (ช)

#### 4. อัตราเร็วเฉลี่ย

จากการศึกษาพบว่าอัตราเร็วเฉลี่ยเป็นปฏิภาคตรงกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ ดังนี้วัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมากก็จะสามารถเกิดการพาได้ช้าหรือไม่สามารถเกิดการพาได้ และความเร่งรีบมิติก็ส่งผลทำให้เกิดการพาและการแยกชั้น ดังภาพที่ 6 ซึ่งสามารถดูได้จากรายห่างระหว่างตำแหน่งบนเส้นกราฟเมื่อเทียบกับเวลาห่างระหว่างตำแหน่งที่เท่ากัน เมื่อระยะตำแหน่งน้อยแสดงอัตราเร็วที่มากกว่าระยะตำแหน่งที่มากจะมีอัตราเร็วที่เร็วกว่า ซึ่งสอดคล้องกับศึกษาเกี่ยวกับการแยกของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนโดยวิธีแบบไม่ต่อเนื่อง อัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคขนาดใหญ่ และระดับการแยกตัวโดยรวมมีความสัมพันธ์กับความกว้างของอัตราเร็วการสั่นสะเทือนและความถี่รีบมิติ (Qiao et al., 2021) นอกจากนี้มีการสร้างแบบจำลองการแยกส่วนแบบบิดแยกของอัตราเร็วและความหนาแน่นของวัสดุเม็ด วัดอัตราเร็วของวัสดุเม็ดและความหนาแน่นของเม็ด ซึ่งรูปแบบนี้แสดงลักษณะการแบ่งแยกในระดับต่าง ๆ ผลกระทบจากอัตราเร็วของวัสดุเม็ดและความหนาแน่นของวัสดุเม็ดในขั้นการไฟล์เป็นหลัก ซึ่งผลการวัดอัตราเร็วและความหนาแน่นวัสดุเม็ดจากการทดลองสำหรับวัสดุเม็ดที่มีรูปร่างทรงกลมในภาชนะหมุนกึ่งสองมิติ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของวัสดุเม็ดตามทิศทางความลึกของขั้นการไฟล์ (Xiu et al., 2023)

#### 5. พลังงานจลน์ในแนวตั้ง

จากการศึกษาพบว่าพลังงานจลน์เป็นปฏิภาคตรงกับอัตราเร็ว โดยปัจจัยที่มีผลต่อพลังงาน ได้แก่ อัตราเร็ว แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ และการจัดเรียงวัสดุเม็ด นอกจากนี้ลักษณะรากฟ้าความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์กับอัตราเร็วในแนวตั้ง มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเร็วในแนวตั้งเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 8 เช่นเดียวกับการทดลองพลังงานที่กระจายไปและสถานการณ์เคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดเล็กในภาชนะปิดแบบกึ่ง 2 มิติภายใต้การสั่นด้วยความถี่คงที่ในแนวตั้ง จะถูกตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบการจำลององค์ประกอบแบบไม่ต่อเนื่องกับการทดลองการทดสอบแบบจำลอง DEM (discrete element method) พฤติกรรมพลวัตของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นที่มีแอนพลิคูตและความถี่ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อพลังงานของวัสดุเม็ดในระบบชั้นกัน (Zhang et al., 2022) นอกจากนี้ขนาดของวัสดุเม็ดทั้งระบบส่งผลต่อระบบพลังงานทั้งหมดเช่นเดียวกับการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนขนาดของวัสดุเม็ดต่อการสมกับวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนแนวตั้ง (Menbari and Hashemnia, 2020)

#### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพาบนกุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวตั้งที่ความถี่และความเร่งรีบมิติเดียวกัน โดยการวิเคราะห์วัสดุเม็ด 2 อนุภาค (อนุภาคสีดำ) พบว่าวัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่จากด้านบนของกุ่มวัสดุเม็ดมายังด้านข้างภาชนะที่ติดด้วยผนังกระดาษทราย

เบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ จากนั้นเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณกลางภาชนะแล้วเคลื่อนที่สู่ด้านบนอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” โดยเกิดมวนการพา 2 วง บริเวณด้านซ้ายและด้านขวา ของภาชนะ การเกิดการพาของวัสดุเม็ดจากผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ เนื่องจากแรงเสียดทานมีค่ามากทำให้อตราเร็วในการเคลื่อนที่มากส่งผลทำให้พลังงานจลน์มีค่ามากด้วย เมื่อเทียบกับพลังงานจลน์ของผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิก จากนั้นเคลื่อนที่จากด้านบน มาด้านข้างของภาชนะผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิก จากนั้นเคลื่อนที่อยู่บริเวณเดิมหรือ แทบทะไม่เคลื่อนที่ ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณกลางภาชนะ จึงไม่เกิดการพา ดังนั้นพฤติกรรม การพาของกลุ่mvัสดุเม็ดที่สั่นในแนวตั้งภายใต้ความถี่และความเร่งไว้มิติเดียวกัน มีปัจจัยหลักมาจากการเสียดทานผนัง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ได้แก่ พลังงานจลน์ และอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ที่มีต่อ พฤติกรรมการพาของกลุ่mvัสดุเม็ด

### ข้อเสนอแนะ

การออกแบบภาชนะควรออกแบบให้มีความกว้างมากกว่าความยาวของวัสดุเม็ด เนื่องจาก ขณะสั่นวัสดุอาจจะติดภาชนะได้ ควรเพิ่มความกว้างของภาชนะ เพื่อศึกษามวนการพาที่อาจจะเกิดมากกว่าหรือน้อยกว่า 2 วง ควรเพิ่มนิวิดวัสดุผนังเพื่อสามารถเปรียบเทียบได้ว่า อาจศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพาของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวตั้ง โดยให้ผนังด้านหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ และศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพาของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวต้นโดยใช้ความเร่งไว้มิติหลายค่า เพื่อเปรียบเทียบผล และผลงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ ทางด้านอุตสาหกรรมและการสร้างชุดกิจกรรมในการสนับสนุนการเรียนรู้วิชาฟิสิกส์และสาขาประยุกต์ ทางฟิสิกส์และวิศวกรรมต่อไป

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนในด้านสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือเพื่อใช้ในการทดลองในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- สกนธ. คล่องบุญจิต. (2552). การศึกษาอิทธิพลของปรกฏภารณ์การหมุนวนกับการผสมกันของระบบวัสดุเม็ดกลมในภาชนะบรรจุเชิง 2 มิติด้วยเทคนิคการจำลองเหตุการณ์แบบวัสดุเม็ดนิ่ม. *วิศวกรรมศาสตร์*, 26(4), 31-36.
- อภินทร์รัตน์ ขันแก้ว มนัญชัย ไชยเพ็ค วิรยา หลังเหล และพิชญา ทิพย์ศรี. (2022). การวัดความเร็วปลายในการตกของโลหะทรงกลมรัศมีแตกต่างกันในกลีเซอรีนโดยใช้ตัวตรวจจับเวลาที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์. *วารสารวิชาฯ 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>.