

การติดขัดของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นแนวตั้งในฮอปเปอร์ 2 มิติ

Jamming of Granular Material under Vertical Vibration in 2-Dimensional Hopper

ตะวันฉาย ตุงคะนาคร¹ เสรี ปานซาง² และ ภาณุพัฒน์ ชัยวร^{1*}

Tawanchay Tungkanakorn¹, Seri Pansang² and Panupat Chaiworn^{1*}

¹ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

²ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

¹Department of Physics and General Sciences, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

²Department of Computing, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University

Received : 10 April 2017

Accepted : 10 January 2018

Published online : 12 January 2018

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการติดขัดของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นแนวตั้งในฮอปเปอร์รูปปลี 2 มิติ วัสดุเม็ดที่ใช้ในการทดลองคือกลุ่มของอนุภาคทรงกระบอก ทำมาจากไม้เนื้อแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร ผิวมีลักษณะเรียบและแห้ง และมีจำนวน 350 อนุภาค วัสดุเม็ดจะถูกนำมาจัดเรียงแบบสุ่มลงในฮอปเปอร์ที่มีขนาดมุมฮอปเปอร์เท่ากับ 10 – 50 องศา และขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์เป็น 2 - 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด จากนั้นวัสดุเม็ดจะถูกปล่อยให้ไหลออกจากฮอปเปอร์แบบตกอย่างอิสระ และภายใต้การสั่นในแนวตั้งโดยใช้ค่าความเร่งไร้มิติ 5 ค่าในช่วง 0.011g – 0.301g ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงได้ตามค่าความถี่ในการสั่น โดยแอมพลิจูดในการสั่นคงที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่าเมื่อค่าความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งและขนาดมุมฮอปเปอร์ยังมีค่ามาก อัตราส่วนการติดขัดและเวลาที่วัสดุเม็ดใช้ในการไหลออกหมดจะน้อยลงและทำให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้น ส่วนการจัดเรียงตัวของอนุภาคเมื่อวัสดุเม็ดเกิดการขัดตัวกันนั้น สังเกตได้ว่าเมื่อขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์กว้างและมุมฮอปเปอร์น้อยจะยิ่งทำให้จำนวนอนุภาคที่เรียงตัวขัดกันเพิ่มขึ้นและแนวการโค้งตัวมาก อย่างไรก็ตามไม่พบความสัมพันธ์ระหว่างมุมฮอปเปอร์และค่าความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งกับเวลาที่วัสดุเม็ดเกิดการอุดตัน

คำสำคัญ : วัสดุเม็ด การติดขัด ฮอปเปอร์ การสั่นแนวตั้ง

*Corresponding author. E-mail : Panupat_Cha@outlook.com

Abstract

This study aims to experimentally investigate the jamming of granular material under vertical vibration in 2-Dimensional wedge-shape hopper. Granular material used in the experiment was the group of cylindrical particles made from hardwood 1 cm in diameter and 6 cm in length with smooth and dry surface and there were 350 particles. Granular material was randomly placed inside the hopper at 10 – 50 degrees of hopper angle and 2 – 6 times of the hopper opening size larger than the granular material's diameter. Then, the granular material was launched to freely flow and global vertically vibrate with 5 values of dimensionless vibration acceleration ranged from 0.011g – 0.301g which changed according to the frequency of vibration and the amplitude of the vibration was constant at 5 mm. The result has illustrated that the more dimensionless vertical vibration acceleration and hopper angle, the less jamming ratio and hopper emptying time and this led to the mass flow rate increase. In addition, the arrangement pattern of particles when granular material's arching occurred was observed that the more hopper opening size and the less hopper angle, the more the number of arching particles and also the more in curve. Nevertheless, it cannot be found the correlation of hopper angle size and dimensionless vertical vibration acceleration value with clogging time of granular material.

Keywords: granular materials, jamming, hopper, vertical vibration

บทนำ

วัสดุเม็ด (Granular material) คือกลุ่มของอนุภาคของแข็งจำนวนมากที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคสามารถแทรกด้วยของไหล เช่น น้ำหรืออากาศ (Cambou *et al.*, 2009) รูปร่างของวัสดุเม็ดมีลักษณะเป็นเม็ดกลมรี หลายเหลี่ยมมุม หรือมีอัตราส่วนด้านกว้างต่อด้านยาวที่ต่างกันก็ได้ และเกณฑ์ในการจำแนกขนาดของวัสดุเม็ดคือมีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอน และสามารถหาตัวแทนได้ คือไม่ว่าสุ่มบริเวณใดมา จะเป็นเนื้อวัสดุเดียวกัน และยังไม่เป็นโครงสร้างซึ่งประกอบไปด้วยหลายวัสดุ (Rao & Nott, 2008; Herminghaus, 2013) วัสดุเม็ดมีความน่าสนใจอย่างยิ่งเนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษ สามารถแสดงพฤติกรรมในสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะ (Andreotti *et al.*, 2013) เช่น การแยกตัว (Segregation) การหมุนวน (Convection) การติดขัด (Jamming) การขัดตัวกัน (Arching) และการกองตัว (Heaping) เป็นต้น เราสามารถพบวัสดุเม็ดได้ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น ข้าว ทนบก หิน และธัญพืชต่าง ๆ และวัสดุเม็ดยังถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมยา อาหารและการเกษตร เหมืองแร่ ก่อสร้าง และการผลิตพลังงาน ซึ่งในกระบวนการทางอุตสาหกรรมไม่ว่าจะเป็นการผลิต การขนส่ง การจัดเก็บ และการปล่อย คุณสมบัติของวัสดุเม็ดล้วนมีผลทั้งสิ้น (Shirsath *et al.*, 2015) ทั้งนี้มีการนำฮอปเปอร์มาใช้ในการจัดเก็บและปล่อยวัสดุเม็ด ซึ่งการไหลออกของวัสดุเม็ดจากฮอปเปอร์ เป็นหัวข้อสำคัญมากสำหรับภาคอุตสาหกรรม มีตัวแปรมากมายที่ควบคุมอัตราการไหล เช่น ความกว้างของช่องปล่อยวัสดุ มุมเอียงของผนังฮอปเปอร์ และขนาดของวัสดุเม็ด เป็นต้น โดยในการใช้งานฮอปเปอร์พบปัญหาที่สำคัญมากอย่างหนึ่งคือการติดขัด (Cheng, 2012) และที่ผ่านมามีผู้พยายามแก้ไขปัญหานี้ โดยส่วนใหญ่จะศึกษาเกี่ยวกับแรงดัน ความเร็วแต่ละบริเวณ และอัตราการไหลออกจากฮอปเปอร์โดยไม่มีกรณีศึกษาที่พบว่าการสั่นสามารถ

ปรับปรุงให้การไหลของวัสดุเม็ดดีขึ้นได้ ไม่ว่าจะเป็นการสั้นเฉพาะที่หรือทั้งระบบ (Mankoc *et al.*, 2007) แต่การศึกษาโดยใช้การสั้นยังคงมีน้อย ยังไม่มีการให้ข้อมูลที่แน่ชัดและอธิบายได้อย่างครอบคลุม จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาปรากฏการณ์การติดขัดของวัสดุเม็ดในฮอปเปอร์ จากที่กล่าวมาข้างต้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองเพื่อศึกษาการติดขัดของวัสดุเม็ดภายใต้การสั้นแนวตั้งในฮอปเปอร์รูปลิ้ม 2 มิติ โดยใช้ค่าความเร่งโน้มถ่วงหลายค่าและมุมฮอปเปอร์ที่ใช้มีขนาดน้อยกว่ามุมกองของวัสดุเม็ด โดยงานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของสาขาการวิเคราะห์แบบไม่เชิงเส้นของฟิสิกส์ในวัสดุเม็ด (Nonlinear analysis of granular physics) ซึ่งในประเทศไทยมีผู้ที่สนใจและศึกษาในสาขานี้ค่อนข้างน้อย ผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะสนับสนุนและสร้างองค์ความรู้ใหม่แก่สาขานี้ อีกทั้งหวังว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

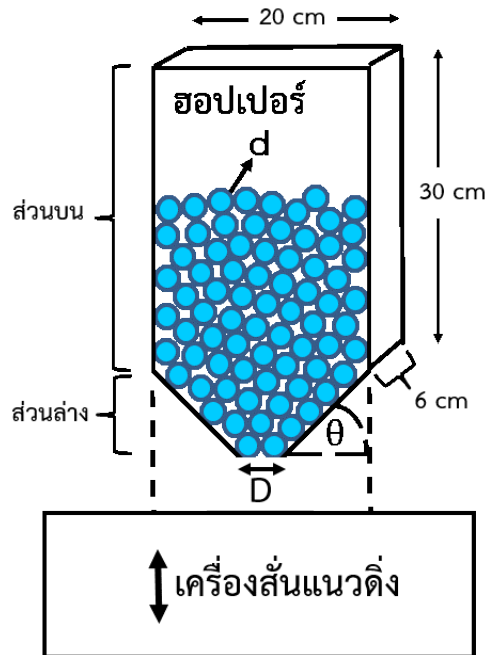
วิธีการวิจัยประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลัก คือ การเตรียมวัสดุทดลอง การออกแบบฮอปเปอร์ การหาค่ามุมกองวัสดุ การทดลอง และการแปลผล โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมวัสดุทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุเม็ดรูปทรงกระบอกทำมาจากไม้เนื้อแข็งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.41 kg/m^3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) 1 เซนติเมตร แต่ละชั้นมีความยาว 6 เซนติเมตร ผิวของวัสดุเม็ดเรียบและแห้ง มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวไม้เท่ากับ 0.25 ± 0.08 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างผิวไม้และอะคริลิกเท่ากับ 0.34 ± 0.01 และมีจำนวน 350 อนุภาค ซึ่งในการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทั้ง 2 แบบ ใช้วิธีการนำวัสดุไม้เคลื่อนที่ที่ลึบบนพื้นเอียงที่ทำมาจากวัสดุไม้และอะคริลิก ทำการทดลองและบันทึกวิดีโอ HD จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานโดยใช้โปรแกรมติดตามวัสดุ

2. การออกแบบฮอปเปอร์

ภาชนะที่ใช้ในการบรรจุวัสดุเม็ดคือฮอปเปอร์รูปลิ้มเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองการติดขัดใน 2 มิติและวัสดุเม็ดเกิดการไหลแบบวัสดุไหลออกทั้งหมดหรือวัสดุที่อยู่ในฮอปเปอร์จะเคลื่อนที่ไปทั้งหมดทุก ๆ ตำแหน่งตลอดพื้นที่หน้าตัด ไม่เกิดบริเวณที่มีวัสดุเม็ดตกค้าง ทั้งนี้ภาชนะรูปฮอปเปอร์ที่ใช้ทำมาจากแผ่นอะคริลิกใสหนา 5 มิลลิเมตร ในส่วนบนเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมจะมีขนาดคงที่ คือ มีความกว้าง 20 เซนติเมตร ความสูง 30 เซนติเมตร และความหนา 6 เซนติเมตรและส่วนล่างใช้การเลื่อนปรับขนาดมุมฮอปเปอร์ (θ) และขนาดช่องปล่อย (D) ตามต้องการ คือ 2, 3, 4, 5 และ 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด แสดงดังภาพที่ 1



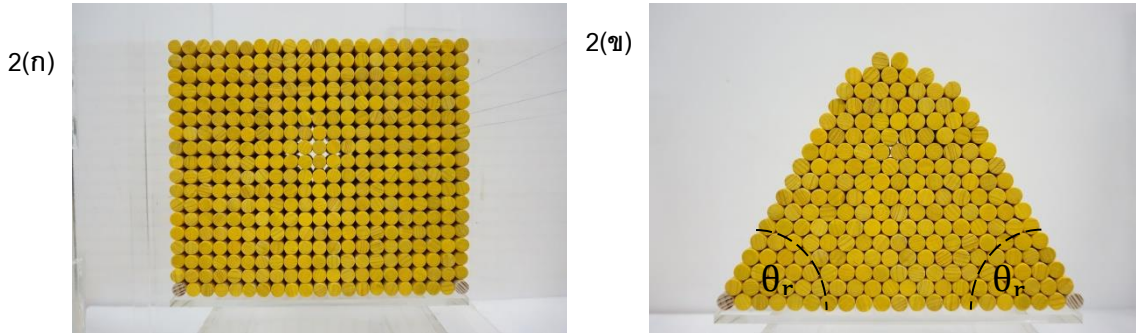
ภาพที่ 1 ระบบการทดลองที่ประกอบด้วยฮอปเปอร์ วัสดุเม็ด และเครื่องสั่นแนวตั้ง โดย d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด D คือ ขนาดช่องเปิดฮอปเปอร์ และ θ คือขนาดมุมฮอปเปอร์

3. การหาค่ามุมกองวัสดุ

มุมกองเป็นตัวหนึ่งซึ่งช่วยชี้วัดความสามารถในการไหลของวัสดุเม็ด ถ้ามุมกองมีขนาดมากความสามารถในการไหลน้อย ซึ่งในทางวิศวกรรมจะออกแบบมุมฮอปเปอร์ให้มากกว่ามุมกองของวัสดุเม็ด นั่นคือในการออกแบบฮอปเปอร์หนึ่งในปัจจุบันที่นำมาพิจารณาประกอบคือขนาดมุมกองของวัสดุเม็ด เนื่องจากในเบื้องต้นแล้วต้องแบบให้มุมฮอปเปอร์กับแนวแกนนอนที่ใช้มีขนาดมากกว่ามุมกองของวัสดุที่บรรจุ เพื่อให้ไม่ทำให้วัสดุเม็ดคั่งค้างอยู่ในฮอปเปอร์ โดยมุมกองวัสดุสามารถใช้บ่งชี้ความสามารถในการไหลของวัสดุเม็ดได้ ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดขนาดมุมฮอปเปอร์ที่ใช้ให้น้อยกว่าค่ามุมกองวัสดุ เพื่อให้เกิดการติดขัดขึ้น ดังนั้นจึงทดลองหาค่ามุมกองวัสดุ โดยมีขั้นตอนคือนำวัสดุเม็ดมาเรียงซ้อนกันบนแผ่นฐานรูปทรงที่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้าง 200, 210 และ 240 มิลลิเมตร เรียงให้เป็นแนวเดียวกันโดยใช้แผ่นอะคริลิกเป็นแนวกันในแนวตั้งทั้งสองข้าง เรียงวัสดุเม็ดแถวแรกแล้วยึดวัสดุเม็ดอนุภาคที่อยู่ด้านซ้ายสุดและขวาสุดให้แน่นเพื่อแทนการกำหนดขนาดฐาน จากนั้นเรียงวัสดุเม็ดเป็นแนวตรงกันให้ได้ความสูง 18 ชั้น แล้วทำการเลื่อนแผ่นอะคริลิกที่กั้นทั้งสองข้างออกเพื่อให้วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ไหลตกอย่างอิสระ แล้วคำนวณหาค่ามุมกองวัสดุ (θ_r) จากสมการ (1)

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{2(H_c - H_p)}{D_p} \quad (1)$$

เมื่อ h_c คือ ความสูงของยอดวัสดุจากพื้น h_p คือ ความสูงของแท่นรอง $h_c - h_p$ คือ ความสูงของกองวัสดุ และ d_p คือ เส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมของกองวัสดุ ตัวอย่างการหามุมของแสดงได้ดังภาพที่ 2 จากการทดลองได้ค่ามุมกองวัสดุเท่ากับ 55.41 ± 0.76 องศา ดังนั้นจึงกำหนดขนาดมุมฮอปเปอร์ที่ทดลองเป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 องศา กับแนวแกนนอน



ภาพที่ 2 ภาพตัวอย่างการหามุมกองของวัสดุเม็ดด้วยวิธีกำหนดขนาดฐาน 2(ก) เตรียมการทดลองโดยนำวัสดุเม็ดมาเรียงซ้อนเป็นชั้นๆ 2(ข) ลักษณะการเรียงตัวของวัสดุเม็ดหลังจากเคลื่อนที่ไหลตกอย่างอิสระโดย θ_r คือ มุมกองของวัสดุเม็ด

4. การทดลอง

ในการทดลองจะเริ่มจากการปรับขนาดมุมฮอปเปอร์และขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ แล้วจัดเรียงอนุภาควัสดุเม็ดทั้งหมดลงในฮอปเปอร์ให้อยู่ในสภาวะเริ่มต้นก่อนการทดลอง แล้วทำการปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลตกอย่างอิสระพร้อมบันทึกภาพวิดีโอ จากนั้นเตรียมการทดลองเช่นเดิมแต่เปลี่ยนเป็นนำไปวางบนเครื่องสั่นแนวตั้งและสั่นระบบด้วยค่าความเร่งไร้มิติ (Γ) ในช่วง $0.011 g \leq \Gamma \leq 0.301 g$ จำนวน 5 ค่า เวลาที่ใช้ในการสั่นวัสดุเม็ดคือ 600 วินาที ทำการทดลองจนครบทุกขนาดมุมฮอปเปอร์และขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์พร้อมทดลองซ้ำกรณีละ 3 ครั้ง โดยเครื่องสั่นแนวตั้งนี้อาศัยหลักการทำงานคือเป็นการสั่นเชิงกลที่ใช้ลูกเบี้ยวเป็นตัวบังคับให้ระบบมีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงซึ่งเป็นการสั่นอย่างง่าย มีรูปแบบตามคลื่นรูปไซน์ที่มีรูปของสมการฟังก์ชันไซน์ดังสมการที่ 2 โดยที่ค่าแอมพลิจูดคงที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

$$y(t) = A \sin(2\pi ft) = A \sin(\omega t) \tag{2}$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดในการสั่น (เมตร) f คือความถี่ในการสั่น (รอบต่อวินาที) ω คือความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที) และ t คือเวลาที่ใช้ในการสั่น ทั้งนี้ค่าความเร่งไร้มิติเป็นปริมาณที่มีตัวแปรสำคัญคือความถี่ในการสั่นและแอมพลิจูดในการสั่น (Hunt et al., 1999) มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3

$$\Gamma = \frac{A(2\pi f)^2}{g} = \frac{A\omega^2}{g} \tag{3}$$

เมื่อ g คือ ความเร่งโน้มถ่วงของโลก กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที²

ในงานวิจัยที่ผ่านมาที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสั่นแนวตั้งได้ใช้ค่าความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งเป็นตัวบ่งบอกปริมาณการสั่น ซึ่งเมื่อคำนวณจากสูตรสมการที่ (3) ความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งจะไม่มีหน่วย อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยต้องการสื่อถึงคุณสมบัติของความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งให้เข้าใจง่าย โดยเปรียบเทียบเป็นจำนวนเท่าของความเร่งโน้มถ่วงของโลกจึงจะนำค่าความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งที่คำนวณได้มาหารด้วยค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลกที่เป็นตัวเลขและคูณด้วยค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลกซึ่งเป็นสัญลักษณ์ g เพื่อให้ความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งมีค่าเท่าเดิม ยกตัวอย่างเช่น เมื่อ $\Gamma = 0.110 = \frac{0.110g}{g} = \frac{0.110g}{9.81} = 0.011g$ สำหรับกรณีที่ไม่มีการสั่นแนวตั้ง ความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งจะมีค่าเท่ากับ 0.000 หรือในที่นี้เท่ากับ 0.000g เนื่องจากไม่มีการสั่นหรือให้อยู่ภายใต้สภาวะแรงโน้มถ่วงของโลก

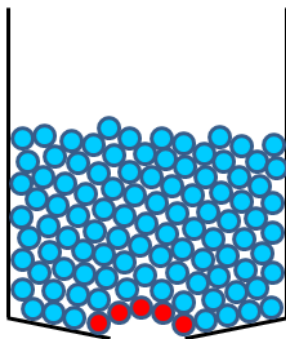
5. การแปลผล

เมื่อปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลออกจากฮอปเปอร์ วัสดุเม็ดอาจเกิดการไหลออกหมด หรือเกิดการอุดตันขึ้น และเมื่อทำการสั่นแนวตั้งแก่ระบบ อนุภาคจะเกิดการสั่นขึ้นลงร่วมด้วย จะนับการเคลื่อนที่ขึ้นและลงเป็น 1 รอบ จะแปรผลในรูปของอัตราส่วนการติดขัด (Jamming Ratio) ซึ่งคำนวณจากจำนวนรอบการสั่นที่เกิดการติดขัดต่อจำนวนรอบการสั่นทั้งหมดจนวัสดุเม็ดไหลออกหมด ดังนั้นอัตราส่วนการติดขัดจึงมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่ง 0 หมายถึง วัสดุเม็ดไม่เกิดการติดขัดทุกรอบการสั่น และ 1 หมายถึง วัสดุเม็ดเกิดการติดขัดทุกรอบการสั่น ในกรณีที่ปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลตกอย่างอิสระกำหนดให้หากวัสดุเม็ดสามารถไหลออกได้โดยไม่เกิดการอุดตัน ค่าอัตราส่วนการติดขัดจะเท่ากับ 0 และหากไหลแล้วเกิดการอุดตัน อัตราส่วนการติดขัดจะมีค่าคือ 1 นอกจากนี้บันทึกเวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดของวัสดุเม็ด (Hopper emptying time) เวลาที่เกิดการอุดตัน (Clogging Time) อัตราการไหลเชิงมวล (Mass flow rate) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของมวลต่อเวลาที่ใช้ในการไหลออกหมด สำหรับกรณีที่วัสดุเม็ดเกิดการอุดตัน เวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดจะใช้เวลาที่สังเกตสูงสุดแทนนั่นคือ 600 วินาที และลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคเมื่อเกิดการขัดตัวกัน (Arching) จากนั้นนำผลที่ได้มาเขียนในรูปของกราฟความสัมพันธ์และวิเคราะห์เปรียบเทียบกันต่อไป

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

เมื่อทำการปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลออกจากฮอปเปอร์ทุกกรณีจนกระทั่งเกิดการไหลออกหมดหรือในกรณีที่มีการอุดตัน (Clogging) เกิดขึ้นเป็นเวลานานสูงสุด 600 วินาที ด้วยการปล่อยให้ตกอย่างอิสระและความเร่งไร้มิติทั้งหมด 5 ค่า ขนาดมุมฮอปเปอร์และขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์อย่างละ 5 ค่า ผลการศึกษาการขัดตัวกันของวัสดุเม็ด อัตราส่วนการติดขัด เวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดของวัสดุเม็ด อัตราการไหลเชิงมวล และเวลาที่เกิดการอุดตันมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การขัดตัวกันของวัสดุเม็ด



ภาพที่ 3 การขัดตัวกันของวัสดุเม็ด โดยอนุภาควัสดุเม็ดจัดเรียงตัวเป็นรูปโค้งคว่ำ

4(ก) $\theta=10^\circ$, $D/d=2$



4(ข) $\theta=10^\circ$, $D/d=3$



4(ค) $\theta=50^\circ$, $D/d=2$



4(ง) $\theta=50^\circ$, $D/d=3$

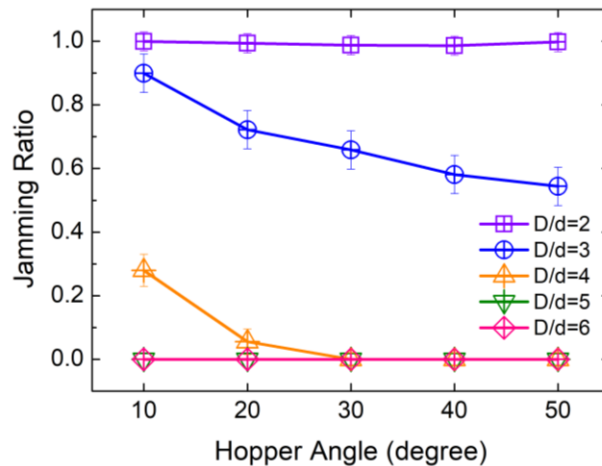


ภาพที่ 4 ลักษณะการขัดตัวกันของวัสดุเม็ด ภายใต้การสั่นแนวตั้งด้วยความเร่งไร้มิติเท่ากับ 0.011g ที่เงื่อนไขขนาดมุมฮอปเปอร์(θ) เป็น 10° และ 50° และขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์เทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด (D/d) เป็น 2 และ 3

จากการสังเกตการไหลออกจากฮอปเปอร์ของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นแนวตั้ง พบว่าเมื่ออนุภาคมีการจัดเรียงตัวแบบชั้ดตัวกันเป็นรูปโค้งจะทำให้เกิดการติดขัดขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ (Nowak *et al.*, 1998) ที่ได้อธิบายว่าการชั้ดตัวกันนี้เป็นกลไกทำให้ระบบอยู่ในสมดุลและอยู่หนึ่งได้โดยไม่ไหลออกจากฮอปเปอร์ โดยเป็นการตอบสนองจากการส่งต่อของแรงเค้นแล้วมีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนเชิงปริมาตร (O'Hern *et al.*, 2013) เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์พบว่าจำนวนอนุภาคที่เรียงชั้ดตัวกันเพิ่มขึ้นตามขนาดของช่องปล่อยฮอปเปอร์สอดคล้องกับการศึกษาของ (To *et al.*, 2001) อีกทั้งยังค้นพบว่าขนาดมุมฮอปเปอร์มีผลต่อลักษณะการชั้ดตัวกันอย่างชัดเจน ยิ่งขนาดของมุมฮอปเปอร์มากจำนวนอนุภาคที่ชั้ดตัวกันจะน้อยกว่า ทำให้เกิดการเรียงตัวโค้งตรงช่องปล่อยฮอปเปอร์น้อยตาม แสดงดังภาพที่ 3 อีกทั้งลักษณะการชั้ดตัวกันที่เกิดขึ้นไม่พบความสัมพันธ์กับเวลาและปริมาณวัสดุเม็ดที่คั่งค้าง ส่วนมากเกิดแบบไม่สมมาตร ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและมีความผันแปรสูง แสดงดังภาพที่ 4 สำหรับการสั่นแนวตั้งเป็นการให้พลังงานกระตุ้นแก่ระบบจึงทำให้การชั้ดตัวกันของวัสดุเม็ดลดลงและเกิดการติดขัดลดลงตาม ซึ่งกลไกของการสั่นแนวตั้งที่ช่วยลดการติดขัดนั้น ผลการทดลองนี้จึงสอดคล้องผลของ (Mankoc *et al.*, 2007) ได้กล่าวไว้คือประกอบไปด้วย 2 กลไก ได้แก่ การสั่นลดความน่าจะเป็นของการเกิดการรวมตัวกันของวัสดุเม็ดหรือชั้ดตัวกันแล้วไปอุดตันการไหล และการสั่นจะสลายการชั้ดตัวกันของวัสดุเม็ดที่เกิดขึ้นแล้ว

2. อัตราส่วนการติดขัด

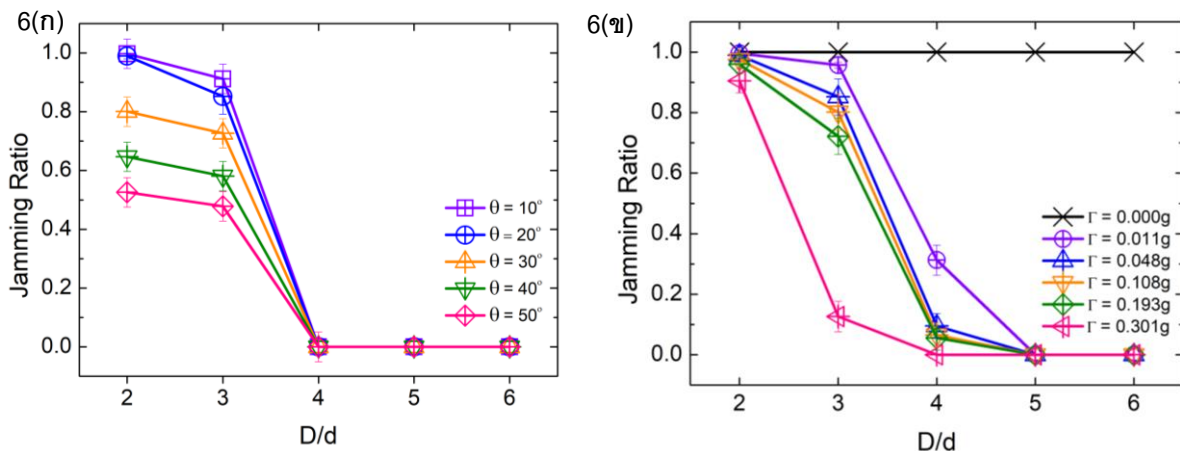
ในการศึกษาการติดขัดที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะแปลผลในรูปของความน่าจะเป็นของการติดขัด (Jamming probability, $J(d)$) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดการติดขัดต่อจำนวนเหตุการณ์ที่ทำการทดลองทั้งหมด (To *et al.*, 2001) แต่เนื่องจากการหาค่านี้จำเป็นต้องทำการทดลองซ้ำหลายครั้ง จึงต้องใช้เวลามาก ดังนั้นจึงทำการแปลผลในรูปของอัตราส่วนการติดขัดที่สามารถบอกถึงคุณภาพในการเกิดการติดขัดในการปล่อยให้วัสดุไหลออกแต่ละครั้ง ในที่นี้ได้พิจารณาถึงตัวแปรที่อาจมีผลต่ออัตราส่วนการติดขัดอันได้แก่ อัตราส่วนขนาดช่องปล่อยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด ขนาดมุมฮอปเปอร์ และค่าความเร่งโน้มถ่วงในการสั่นแนวตั้ง ผลการศึกษาพบว่าตัวแปรทั้งสามตัวมีผลต่ออัตราส่วนการติดขัดมีดังนี้



ภาพที่ 5 อัตราส่วนการติดขัดของวัสดุเม็ดและขนาดมุมฮอปเปอร์ภายใต้การสั่นด้วยความเร่งโน้มถ่วงเท่ากับ 0.193g

จากภาพที่ 5 พบว่าภายใต้การสั่นระบบในแนวตั้งด้วยความเร่งโน้มถ่วงเท่ากับ 0.193g เมื่อช่องปล่อยฮอปเปอร์มีค่า 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด อัตราส่วนการติดขัดมีค่าประมาณ 1 ซึ่งหมายถึงมีการติดขัดเกือบทุกรอบที่มีการ

เส้นทุกขนาดมูมฮอปเปอร์ เมื่อเพิ่มขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์เป็น 3 เท่า อัตราส่วนการติดขัดจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อขนาดมูมฮอปเปอร์เพิ่มขึ้น ต่อมาเมื่อขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์เป็น 4 เท่า อัตราส่วนการติดขัดจะลงเป็น 0 ซึ่งหมายถึง ไม่มีการติดขัดเลยในการสั่นแต่ละรอบเมื่อมูมฮอปเปอร์มีค่าน้อย 30 องศา และที่ช่องปลอยฮอปเปอร์ 5 และ 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด อัตราส่วนการติดขัดมีค่าเท่ากับ 0 ทุกขนาดมูมฮอปเปอร์ แสดงให้เห็นว่ายิ่งขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์เพิ่มขึ้น อัตราส่วนการติดขัดจะยิ่งลดลง โดยที่ ณ ขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์เดียวกัน หากมูมฮอปเปอร์มีขนาดยิ่งมากจะทำให้มีแนวโน้มอัตราส่วนการติดขัดน้อยกว่า และยังพบว่าเมื่อขนาดช่องปลอยกว้างแต่ขนาดมูมฮอปเปอร์น้อย จะมีอัตราส่วนการติดขัดน้อยกว่าเมื่อขนาดช่องปลอยแคบแต่ขนาดมูมฮอปเปอร์มาก จึงอาจกล่าวได้ว่าขนาดช่องปลอยที่มากมีอิทธิพลทำให้ลดอัตราส่วนการติดขัดมากกว่าขนาดมูมของฮอปเปอร์ที่มากขึ้น

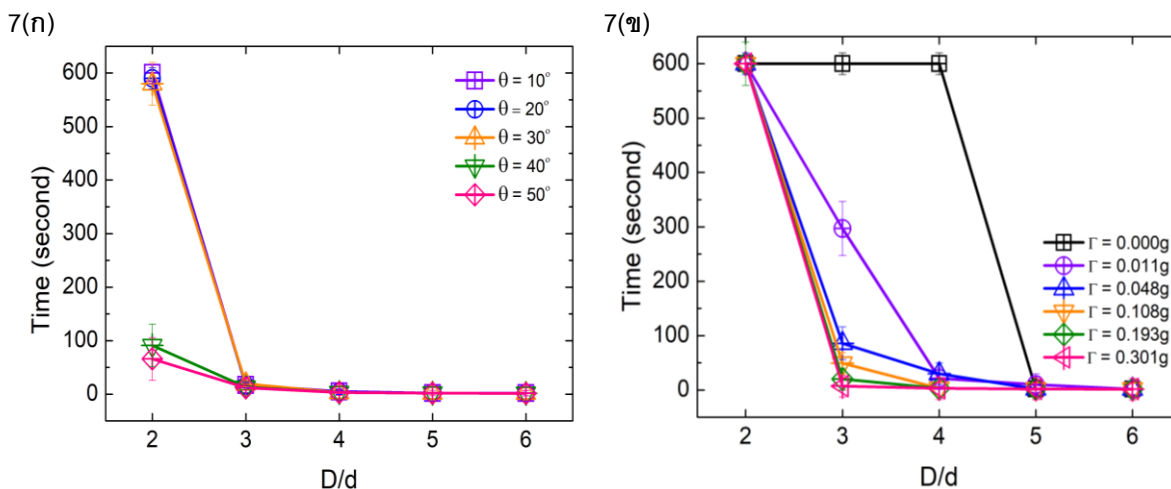


ภาพที่ 6 อัตราส่วนการติดขัดของวัสดุเม็ดและอัตราส่วนขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด 6(n) ภายใต้การสั่นระบบในแนวตั้งด้วยความเร่งไร้มิติเท่ากับ 0.048g 6(x) ที่ขนาดมูมฮอปเปอร์เท่ากับ 20 องศา

จากภาพที่ 6(n) พบว่าภายใต้การสั่นระบบในแนวตั้งด้วยความเร่งไร้มิติเท่ากับ 0.048g ที่ขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์น้อยกว่า 5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด มูมฮอปเปอร์มีขนาดเพิ่มขึ้นอัตราส่วนการติดขัดจะค่อย ๆ ลดลง และเมื่อขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์ 5 เท่าเป็นต้นไป อัตราส่วนการติดขัดจะเป็น 0 ทุกขนาดมูมฮอปเปอร์ ส่วนภาพที่ 6(x) พบว่าที่ขนาดมูมฮอปเปอร์เท่ากับ 20 องศา เมื่อปลอยให้วัสดุไหลตกอย่างอิสระอัตราส่วนการติดขัดจะมีค่าเท่ากับ 1 ทุกขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์ แต่เมื่อทำการสั่นระบบแนวตั้งด้วยความเร่งไร้มิติค่าต่าง ๆ การใช้ความเร่งไร้มิติที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ อัตราส่วนการติดขัดค่อย ๆ ลดลง และเมื่อเพิ่มขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์เป็น 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดเป็นต้นไป ร่วมกับการสั่นแล้ว จะไม่เกิดการติดขัดขึ้นเลยในการสั่นแต่ละครั้ง อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์แคบแต่ความเร่งไร้มิติมีค่าน้อยจะมีอัตราส่วนการติดขัดมากกว่ากรณีที่ขนาดช่องปลอยมีขนาดกว้างแต่ความเร่งไร้มิติมีค่ามาก นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า รูปแบบกราฟระหว่างอัตราส่วนการติดขัดของวัสดุเม็ดและอัตราส่วนขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุที่มีลักษณะเป็นแบบกราฟโค้งเสมือนเอ็กซ์โพเนนเชียลมีแค่บางเงื่อนไขเท่านั้น เส้นกราฟจะเป็นลักษณะกราฟที่มีค่าคงที่ในบางช่วงเหมือนกับกราฟความน่าจะเป็นของการติดขัดและอัตราส่วนขนาดช่องปลอยฮอปเปอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดในหลาย ๆ การศึกษาที่ผ่านมา

ดังนั้นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราส่วนการติดขัดมากที่สุดคือ ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาด มุมฮอปเปอร์และความเร่งโน้มถ่วงไร้มิติในการสั่นแนวตั้งช่วยให้อัตราส่วนการติดขัดลดลงได้ โดยที่ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์วิกฤติ ที่ทำให้ไม่เกิดการติดขัดขึ้นเมื่อใช้การสั่นมากระตุ้นคือ 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุเม็ด

3. เวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดของวัสดุเม็ด



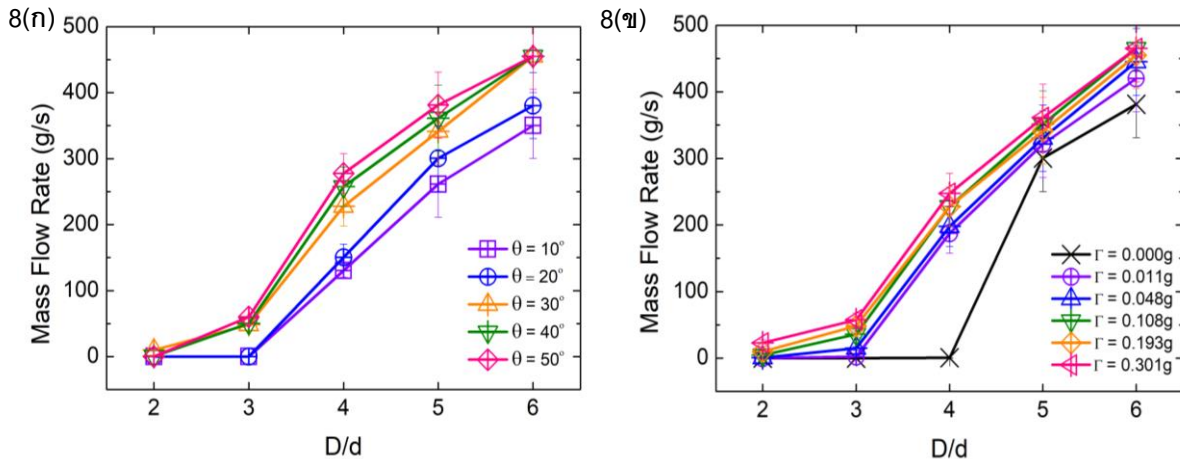
ภาพที่ 7 เวลาในการไหลออกหมดของวัสดุเม็ดและอัตราส่วนขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด

7(ก) ภายใต้การสั่นระบบในแนวตั้งด้วยความเร่งโน้มถ่วงไร้มิติเท่ากับ 0.108g 7(ข) ที่ขนาดมุมฮอปเปอร์เท่ากับ 30 องศา

จากภาพที่ 7(ก) พบว่าภายใต้การสั่นระบบในแนวตั้ง ยิ่งขนาดมุมฮอปเปอร์เพิ่มขึ้น เวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดของ วัสดุเม็ดจะยิ่งน้อยลง โดยที่ ณ อัตราส่วนขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดยกกว่า 4 เท่า เมื่อมุมฮอปเปอร์มีขนาด 10 และ 20 องศา จะใช้เวลาในการไหลออกหมดมากกว่ามุมอื่น ๆ อย่างมาก แต่เมื่อขนาดช่องปล่อย ฮอปเปอร์มีค่า 4 เท่าเป็นต้นไปแล้วมุมฮอปเปอร์ไม่มีผลต่อเวลาในการไหลออกหมด และใช้เวลาที่น้อยลงจนสามารถไหลลงโดย ไม่มีการติดขัดอย่างชัดเจน ส่วนภาพที่ 7(ข) พบว่าเมื่อปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลออกอย่างอิสระหากอัตราส่วนช่องปล่อยฮอปเปอร์ ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดยกกว่า 3-4 เท่า จะใช้เวลานานกว่า 600 วินาที ซึ่งยังเกิดการติดขัดของวัสดุภายใน ภาชนะฮอปเปอร์ เมื่อขณะอยู่ภายใต้การสั่นระบบในแนวตั้งที่มีผลต่อเวลาที่ใช้จะค่อย ๆ ลดลงแบบเชิงเส้น จนในที่สุด เวลานั้นน้อยลงอย่างรวดเร็ว และส่วนอัตราส่วนช่องปล่อยฮอปเปอร์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดยกกว่า 5-6 เท่า พบว่าไม่ เกิดการติดขัด ในกรณีนี้ที่ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์แคบมากประมาณ 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุเม็ด ต้องใช้ ความเร่งโน้มถ่วงไร้มิติที่มีค่าน้อย 0.108g จึงจะทำให้เวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดลดลง ส่วนในช่องปล่อยขนาดอื่น ๆ การสั่น โดยใช้ความเร่งโน้มถ่วงไร้มิติจะทำให้เวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดลดลงอย่างรวดเร็ว ยิ่งขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์มาก ใช้ความเร่ง โน้มถ่วงไร้มิติค่าน้อย หรือมากก็ใช้เวลาในการไหลออกหมดไม่ต่างกัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการเพิ่มขนาดมุมฮอปเปอร์และค่าความเร่งโรตารีการสั่นแนวตั้งสามารถช่วยให้เวลาที่ใช้ในการไหลออกหมดลดลงได้ โดยเมื่อช่องปล่อยฮอปเปอร์มีขนาดแคบจะมีค่าขนาดมุมฮอปเปอร์และค่าความเร่งโรตารีการสั่นมากจะทำให้เวลาในการไหลออกหมดของวัสดุมีค่าลดลงได้

4. อัตราการไหลเชิงมวล



ภาพที่ 8 อัตราการไหลเชิงมวลและอัตราส่วนขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด

8(ก) ภายใต้การสั่นระบบในแนวตั้งด้วยความเร่งโรตารีเท่ากับ 0.193g 8(ข) ที่ขนาดมุมฮอปเปอร์เท่ากับ 30 องศา

อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นตามขนาดมุมฮอปเปอร์แบบเชิงเส้น โดยจะมีการเพิ่มอย่างรวดเร็วที่ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์เป็น 3-6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุเม็ดในทุกขนาดมุมฮอปเปอร์ และคาดว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อช่องปล่อยฮอปเปอร์จะเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 8(ก) และการปล่อยให้ไหลออกจากฮอปเปอร์แบบตลกอิสระซึ่งอัตราการไหลเชิงมวลมีค่าเป็นศูนย์ โดยเมื่อช่องปล่อยฮอปเปอร์อยู่ในช่วง 2-4 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวัสดุเม็ด ยิ่งความเร่งโรตารีมาก อัตราการไหลเชิงมวลจะมากตาม ส่วนเมื่อช่องปล่อยฮอปเปอร์มากกว่า 4 เท่าเป็นต้นไป ความเร่งโรตารีค่าต่าง ๆ ให้ผลอัตราการไหลเชิงมวลไม่ต่างกัน โดยสุดท้ายแล้วเมื่อช่องปล่อยฮอปเปอร์มากกว่า 6 เท่าเป็นต้นไป น่าจะมีแนวโน้มอัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นสังเกตจากเส้นกราฟน่าจะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นในลักษณะแบบเชิงเส้น ทั้งในกรณีการไหลออกแบบตลกอิสระและการสั่นแนวตั้งด้วยความเร่งโรตารี แต่การสั่นแนวตั้งด้วยความเร่งโรตารีจะมีค่ามากกว่าการการไหลออกแบบตลกอิสระเล็กน้อย แสดงดังภาพที่ 8 (ข)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการสั่นแนวตั้งด้วยความเร่งโรตารีและการเพิ่มขนาดมุมฮอปเปอร์ทำให้เพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลได้ แต่การปล่อยให้ตกอย่างอิสระมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์มีค่าเป็น 6 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดเป็นต้นไป เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ (Cheng, 2012) พบว่าแตกต่างกันโดยการทดลองปล่อยวัสดุเม็ดที่มีขนาดเล็กกว่าให้ไหลออกจากฮอปเปอร์แบบตลกอิสระโดยเปลี่ยนขนาดมุมฮอปเปอร์ พบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลและช่องปล่อยฮอปเปอร์เมื่อมีขนาดมุมฮอปเปอร์ต่าง ๆ เป็นปฏิภาคตรงต่อกันโดยมีขีดเริ่มต้นของช่องปล่อยอยู่ที่ 1 เท่าของวัสดุเมื่อทดลองกับมุมฮอปเปอร์ที่มีขนาดเพิ่มขึ้น ทั้งสองมีผลทำให้อัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกัน ใช้เวลาในการไหลน้อยลง แต่ในการศึกษานี้มีขีดเริ่มต้นของช่องปล่อยอยู่ที่ 2 เท่าของวัสดุซึ่งทำให้เกิดการอุดตันคงที่และค่อย ๆ ลดลงตามช่องปล่อยที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้อัตราการไหลเชิงผลเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันใช้เวลาน้อยลง พบว่ามีความสัมพันธ์แบบ

เชิงเส้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะวัสดุที่ใช้ในการศึกษาต่างชนิดกัน ทั้งนี้วัสดุเม็ดที่ใช้มีความหนาแน่นมากกว่าและมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่ามาก

5. เวลาที่เกิดการอุดตัน

การอุดตันเป็นผลมาจากการเกิดการติดขัดในบริเวณต่าง ๆ มากเกินไป (Thomas & Dyrian, 2013) อย่างไรก็ตามในการศึกษาที่ผ่านมาไม่มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดมุมฮอปเปอร์รวมทั้งค่าความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งกับเวลาที่วัสดุเม็ดเกิดการอุดตัน ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองในหัวข้อนี้ พบว่าการอุดตันจะเกิดทุกครั้งเฉพาะในกรณีที่ขนาดช่องปล่อยเท่ากับ 2 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด ที่ภายใต้การสั่นแนวตั้งด้วยความเร่งไร้มิติ 0.193g เมื่อมุมฮอปเปอร์และช่องปล่อยเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การอุดตันลดลง ดังนั้นในที่นี้จะพิจารณาการอุดตันในกรณีที่กล่าวมาข้างต้นเท่านั้น โดยผลการทดลองพบว่าเมื่อปล่อยให้วัสดุเม็ดตกอย่างอิสระหรือไม่มีการสั่น เวลาที่วัสดุเม็ดเกิดการอุดตันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์กลางคือเมื่อปล่อยให้วัสดุไหลออกจากฮอปเปอร์ เกิดการอุดตันแทบทันทีทุกขนาดมุมฮอปเปอร์ แต่เมื่อทำการสั่นระบบในแนวตั้งด้วยความเร่งไร้มิติน้อย ๆ คือ 0.011g และ 0.048g พบว่าเวลาที่วัสดุเม็ดเกิดการอุดตันภายในฮอปเปอร์มีค่ามากขึ้นทุกขนาดมุมฮอปเปอร์สอดคล้องกับการศึกษาของ (Janda *et al.*, 2009) คือการใช้การสั่นแนวตั้งทำให้เวลาที่เกิดการอุดตันเกิดช้าลงกว่าการปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลออกจากฮอปเปอร์แบบตกอิสระ เมื่อพิจารณาผลของมุมฮอปเปอร์และค่าความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งพบว่าไม่พบแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ชัดเจนกับเวลาที่วัสดุเม็ดเกิดการอุดตัน ผู้วิจัยคาดว่าน่าจะเป็นเพราะค่าความเร่งไร้มิติในการสั่นแนวตั้งที่ใช้มีความแตกต่างกันน้อย และเนื่องจากขนาดของช่องปล่อยฮอปเปอร์แคบมาก มุมของฮอปเปอร์จึงไม่มีผลต่อเวลาที่เกิดการอุดตัน นอกจากนี้เมื่อขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์เป็น 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ด และขนาดมุมฮอปเปอร์เพิ่มขึ้น พบว่าอัตราส่วนการติดขัดจะค่อย ๆ ลดลง ตามอัตราเร่งไร้มิติที่เพิ่มขึ้น ขณะที่ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์เป็น 4 เท่า ที่มุมฮอปเปอร์มีขนาดน้อยกว่า 30 องศา พบว่าอัตราส่วนการติดขัดจะค่อย ๆ ลดลง เข้าใกล้ 0 ซึ่งหมายถึงการติดขัดจะลดลงในการสั่นแต่ละรอบ จึงมีผลต่อการอุดตันลดลง และเมื่อช่องปล่อยฮอปเปอร์ 5 และ 6 เท่า ที่มุมฮอปเปอร์มีขนาดมากกว่า 30 องศา พบว่าอัตราส่วนการติดขัดมีค่าเท่ากับ 0 แสดงให้เห็นว่ายิ่งขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์เพิ่มขึ้นอัตราส่วนการติดขัดจะยิ่งลดลง นั่นก็คือ การอุดตันจะลดลง

จากผลการทดลองทั้งหมด จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดมุมฮอปเปอร์ มีผลทำให้อัตราส่วนการติดขัดและเวลาที่วัสดุเม็ดใช้การไหลออกหมดลดลง รวมทั้งอัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้น ทั้งนี้กลไกการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในฮอปเปอร์ประกอบด้วย การกลิ้งและการไหล ผู้วิจัยจึงคาดว่า การเพิ่มขนาดมุมฮอปเปอร์ช่วยให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลิ้งและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไถระหว่างผิวอนุภาควัสดุเม็ดด้วยกันและระหว่างวัสดุเม็ดและผนังฮอปเปอร์มีค่าน้อย ค่าแรงเสียดทานจึงน้อยตามแรงในระบบที่ทำให้วัสดุเม็ดเกิดการเคลื่อนที่จึงมาก วัสดุเม็ดสามารถไหลออกได้ดี ความเร่งในการเคลื่อนที่มาก ความเร็วในการเคลื่อนที่ออกจากฮอปเปอร์จึงมากตาม ทำให้มุมกองของวัสดุเม็ดน้อย สอดคล้องกับการศึกษาของ (Zhou *et al.*, 2002) ที่ได้อธิบายว่าหากสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลิ้ง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานไถระหว่างอนุภาควัสดุเม็ด และระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังฮอปเปอร์มีค่าน้อย จะส่งผลทำให้เกิดมุมกองของวัสดุเม็ดน้อยตามเนื่องจากการเกิดกองของวัสดุเม็ดไม่

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาการติดขัดของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นแนวตั้งในฮอปเปอร์รูปลิ้ม 2 มิติ โดยวัสดุเม็ดที่ใช้คืออนุภาคทรงกระบอกผิวเรียบ แข็งและแห้ง จำนวน 350 อนุภาค วัสดุเม็ดจะถูกปล่อยให้ไหลออกจากฮอปเปอร์แบบ

ตกอิสระและสั้นในแนวตั้งแบบทั้งระบบด้วยความเร่งโน้มถ่วงในการสั้นแนวดิ่ง ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ และขนาดมุมฮอปเปอร์หลายค่า โดยมุมฮอปเปอร์ที่ใช้จะมีค่าน้อยกว่ามุมของของวัสดุเม็ด ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนการติดขัด และเวลาที่วัสดุเม็ดใช้ในการไหลออกหมดจะลดลง ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุมฮอปเปอร์ ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ และความเร่งโน้มถ่วงในการสั้นแนวดิ่งเพิ่มขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อการติดขัดมากที่สุด คือ ขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์ รองลงมา คือ ความเร่งโน้มถ่วงในการสั้นแนวดิ่ง และมุมฮอปเปอร์ส่งผลน้อยที่สุด ทั้งนี้กลไกที่ทำให้การสั้นช่วยในการไหลของวัสดุเม็ด คือ ลดโอกาสของการรวมตัวกันของวัสดุเม็ดแล้วไปอุดตันการไหล และสลายอนุภาคที่เรียงชิดตัว การเพิ่มขนาดมุมฮอปเปอร์นั้นช่วยให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลิ้งและไถลลดลง ค่าแรงเสียดทานลดลง แรงที่ทำให้วัสดุเม็ดเกิดการเคลื่อนที่กลิ้งและไถลจึงมาก วัสดุเม็ดสามารถไหลออกจากฮอปเปอร์ได้ดีขึ้นและมีการติดขัดลดลง อีกทั้งยังไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมฮอปเปอร์และเวลาที่วัสดุเม็ดเกิดการอุดตัน นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า การติดขัดเป็นผลมาจากอนุภาควัสดุเม็ดเรียงชิดตัวกันบริเวณช่องปล่อยฮอปเปอร์ โดยลักษณะการขัดตัวกันไม่สัมพันธ์กับเวลาและปริมาณวัสดุเม็ดที่คงค้าง ส่วนมากเกิดแบบไม่สมมาตร ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน และมีความแปรผันสูง ยิ่งขนาดช่องปล่อยฮอปเปอร์กว้างหรือมุมฮอปเปอร์น้อย จะทำให้จำนวนอนุภาคที่เรียงตัวชิดกันมาก และแนวการโค้งตัวมาก

จากการศึกษาในหัวข้อดังกล่าวมา สิ่งที่น่าสนใจศึกษาคือความน่าจะเป็นในการติดขัด เช่นในการศึกษาของ To *et al.*, (2001), Ashour *et al.*, (2017) และ Mankoc *et al.*, (2007) ที่พบว่าเมื่อปล่อยให้วัสดุเม็ดไหลออกแบบตกอิสระและการใช้การสั้นแนวดิ่งและมีสัมพันธ์กับขนาดช่องปล่อยซึ่งลดลงแบบเชิงเส้น โดยการสั้นแนวดิ่งทำให้ความน่าจะเป็นในการติดขัดลดลงได้ แต่ยังไม่ได้มีการศึกษาผลของมุมฮอปเปอร์เมื่อทำการสั้นร่วมด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจะทำการศึกษาในประเด็นนี้ต่อไปซึ่งต้องอาศัยการทดลองซ้ำหลายครั้งในแต่ละกรณี ซึ่งผลการศึกษาจะนำมาวิเคราะห์เพิ่มเติมในหัวข้อทั้ง 5 ที่ได้กล่าวไปแล้วนี้ด้วยเพื่อให้ผลการศึกษาถูกต้องและแม่นยำมากที่สุดต่อไป นอกจากนี้การกำหนดค่ามุมฮอปเปอร์ที่ใช้สามารถทำให้อยู่ในรูปของมุมโน้มถ่วง โดยหาจากอัตราส่วนของมุมฮอปเปอร์ที่ทำกับแนวแกนนอนต่อมุมของของวัสดุเม็ด หากใช้ค่ามุมโน้มถ่วงจะทำให้สามารถแปรผล อธิบายได้ครอบคลุมมากขึ้นคือแม้จะเปลี่ยนชนิดของวัสดุเม็ดก็สามารถใช้เทียบกันได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการ Nonlinear Physics ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลองในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Ashour, A., Wegner, S., Trittel, T., Börzsönyi, T., & Stannarius, R. (2017). Outflow and clogging of shape-anisotropic grains in hoppers with small apertures. *Soft matter*, 13(2), 402-414.
- Andreotti, B., Forterre, Y., & Pouliquen, O. (2013). *Granular Media Between Fluid and Solid*. New York: Cambridge University Press.
- Cambou, B., Jean, M., & Radjai, F. (2009). *Micromechanics of Granular Materials*. Great Britain: John Wiley & Sons.

- Cheng, J. (2012). Modelling of hopper discharge. (Unpublished master's thesis). University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA.
- Herminghaus, S. (2013). *Wet granular matter: a truly complex fluid* (Vol. 6). World Scientific.
- Hunt, M. L., Weathers, R. C., Brennen, C. E., Lee, A. T., & Wassgren, C. R. (1999). Effects of horizontal vibration on hopper flows of granular materials. *Physics of fluids*, 11(1), 68-75.
- Janda, A., Maza, D., Garcimartín, A., Kolb, E., Lanuza, J., & Clément, E. (2009). Unjamming a granular hopper by vibration. *EPL (Europhysics Letters)*, 87(2), 24002.
- Mankoc, C., Janda, A., Ar'evalo, R., Pastor, J. M., Zuriguel, I., Garcimartín, A., & Maza D. (2007). The flow rate of granular materials through an orifice. *Granular Matter*, 9(6), 407-414.
- Nowak, E. R., Knight, J. B., Naim, E. B., Jaeger, H. M., & Nagel, S. R. (1998). Density fluctuations in vibrated granular materials. *Physical Review E*, 57(2), 1971.
- O'Hern, C. S., Silbert, L. E., Liu, A. J., & Nagel, S. R. (2003). Jamming at zero temperature and zero applied stress: the epitome of disorder. *Physical Review E*, 68(1), 011306.
- Rao, K. K., Nott, P. R., & Sundaresan, S. (2008). *An introduction to granular flow* (Vol. 10). New York: Cambridge University Press.
- Shirsath, S. S., Padding, J. T., Clercx, H. J. H., & Kuipers, J. A. M. (2015). Dynamics of Granular Flows Down Rotating Semi-cylindrical Chutes. *Procedia Engineering*, 102, 731-740.
- Thomas, C. C., & Durian, D. J. (2013). Geometry dependence of the clogging transition in tilted hoppers. *Physical Review E*, 87(5), 052201.
- To, K., Lai, P. Y., & Pak, H. K. (2001). Jamming of Granular Flow in a Two-Dimensional Hopper. *Physical Review Letters*, 86(1), 71-74.
- Zhou, Y. C., Xu, B. H., Yu, A. B., & Zulli, P. (2002). An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres. *Powder Technology*, 125(1), 45-54.