

ผลของสัดส่วนขนาดของอนุภาคต่อการแยกชั้นในวัสดุแบบเม็ด 2 มิติ
ภายใต้การสั่นสะเทือนในแนวดิ่งEffect of Particle Size Ratio on Segregation in 2D Granular Material under
Vertical Vibration

ธวัชิต กันยาเลิศ, อธิรัชย์ ปรีชาวุฒิพงศ์ และปวรุตม์ จงชาญสิทธิโ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50200
*ติดต่อ: thuwachit.k@gmail.com, 086-9191970

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนขนาดของอนุภาคต่อพฤติกรรมการแยกชั้นในระบบ 2 มิติ ของวัสดุเม็ด ที่อยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง อนุภาครงกระบอกที่เลือกใช้ในการทดสอบจะเป็นไม้เนื้อแข็ง น้ำหนักเบาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน 4 ขนาด คือ 3, 4, 6, และ 12 มิลลิเมตร การจัดเตรียมวัสดุทดสอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน 2 ขนาด จะถูกนำมาจัดเรียงลงในกล่องบรรจุ ซึ่งจัดเรียงแบบ สุ่มโดยที่มีพื้นที่เฉลี่ยโดยรวมของอนุภาคใกล้เคียงกันในแต่ละตัวอย่างการทดสอบซึ่งตัวอย่างการทดสอบที่มีค่า สัดส่วนขนาดของอนุภาคเท่ากับ 2, 3, และ 4 จะถูกนำมาทดสอบโดยใช้ค่าความเร่งไร้หน่วยที่แตกต่างกัน จำนวน 6 ค่า ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามค่าความถี่ ในขณะที่แอมพลิจูดสำหรับการสั่นสะเทือนมีค่าคงที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่า อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของกล่อง ส่วนอนุภาคขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ลงสู่ ด้านล่างของกล่องจนทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างอนุภาคทั้ง 2 ขนาด โดยจำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ที่เคลื่อนที่ขึ้นสู่ ด้านบนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นตามค่าความเร่งไร้หน่วยที่เพิ่มขึ้นซึ่งเรียกว่า ดัชนีการแยกชั้น นอกจากนั้นเวลาที่ใช้ในการ แยกชั้นของอนุภาคจะเร็วขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนขนาดอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น

คำหลัก: วัสดุเม็ด, การแยกชั้น, ค่าความเร่งไร้หน่วย, อิทธิพลของสัดส่วนขนาดของอนุภาค, ดัชนีการแยกชั้น

Abstract

The objective of this study is to experimentally investigate the influence of particle size ratio on segregation in 2D granular material under vertical vibration. The particle made from hardwood with four different size of diameter: 3, 4, 6, and 12 mm, is used to prepare granular samples. Two different size of the hardwood are randomly placed inside a box under the same solid fraction. Each sample is subjected to a vertical vibration with a six different dimensionless acceleration changed by the frequency. The amplitude of vibration is fixed at 5 mm. All experimental results show that the large particles tend to move upwards while the small one move downwards. The segregation coefficient therefore increases with dimensionless acceleration (Γ). In addition, the particles are rapidly segregated when the particle size ratio is higher.

Keywords: Granular materials, Segregation, Dimensionless acceleration, Influence of particle size ratio, Segregation coefficient

1. บทนำ

วัสดุเม็ด หรือ Granular material สามารถพบเห็นได้ทั่วไปตามธรรมชาติหรือในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น เมล็ดข้าวสาร, เม็ดพลาสติก, อาหารเม็ด เป็นต้น [1] ซึ่งวัสดุเม็ดเป็นกลุ่มของอนุภาคของแข็งที่พฤติกรรมระดับมหภาคถูกควบคุมด้วยแรงสัมผัส (Contact force) วัสดุดังกล่าวนี้อาจมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและพลังงานที่วัสดุนั้นได้รับโดยจะประพฤติตัวอยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ สำหรับวัสดุเม็ด เมื่ออยู่ภายใต้การกระทำสั่น จะมีพฤติกรรมที่แสดงออกมาหลากหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น การไหลของอนุภาค (Avalanche), การจับตัวกันของอนุภาค (Clustering), การผสมกัน (Mixing), หรือการแยกชั้นกันของอนุภาค (Segregation) [1] ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างมากในงานอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมประเภทยา หรืออุตสาหกรรมประเภทอาหาร ซึ่งมักพบเจอปัญหาเกี่ยวกับการรวมตัวกันหรือแยกตัวกันในระหว่างกระบวนการผลิต ที่ส่งผลเสียต่อผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงได้มีความพยายามอย่างมากในการศึกษาปัจจัยที่ก่อให้เกิดพฤติกรรมดังกล่าวเม็ดเพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้น ถึงแม้ว่าที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมของการแยกชั้นของวัสดุเม็ดด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธีการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical simulation) [4] และวิธีการทดสอบ (Experimental) [2,3] อย่างไรก็ตามการทดสอบที่ผ่านมา ยังไม่มีการให้ข้อมูลที่แน่ชัดเกี่ยวกับพฤติกรรมการแยกชั้นของวัสดุว่าวัสดุเม็ดจะเกิดการแยกชั้นจากปัจจัยใดบ้าง จึงทำให้งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการแยกชั้นของวัสดุเม็ด ซึ่งในวัสดุเม็ดสามารถเกิดการแยกชั้นได้ใน 2 ลักษณะ คือ 1. การแยกชั้นแบบ Brazil Nut Effect (BNF) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคขนาดใหญ่กว่าจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน และ 2. การแยกชั้นแบบ Reverse Brazil Nut Effect (RBN) ที่อนุภาคขนาดเล็กกว่าจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน [6]

ในการศึกษานี้จะทำการทดสอบเพื่อหาปัจจัยของอัตราส่วนของอนุภาคในวัสดุเม็ดที่มีผลต่อพฤติกรรมการแยกชั้นในระบบ 2 มิติ ภายใต้การกระทำสั่นใน

แนวตั้ง โดยใช้ค่าความเร่งไร้หน่วยหลายค่า ซึ่งอนุภาคเป็นวัสดุชนิดเดียวกันแต่มีขนาดแตกต่างกัน

2. การเตรียมและการดำเนินการทดสอบ

อนุภาคทรงกระบอกของวัสดุเม็ดทดสอบจะทำจากไม้เนื้อแข็ง มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.404 kg/m^3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3, 4, 6, และ 12 มิลลิเมตร โดยแต่ละชิ้นมีความยาว 6 เซนติเมตร [5] ซึ่งตัวอย่างของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 1

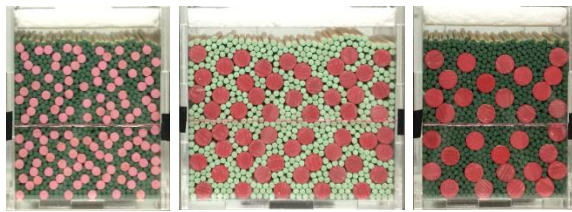


รูปที่ 1 ตัวอย่างวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ในการเติมวัสดุเม็ดทดสอบนั้น จะบรรจุอนุภาคที่ละ 2 ขนาด ลงในกล่องทดสอบ โดยให้มีค่าสัดส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 2, 3, และ 4 ซึ่งจะเป็นการบรรจุอนุภาคขนาด 3 กับ 6 มิลลิเมตร, 4 กับ 12 มิลลิเมตร, และ 3 กับ 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยกล่องบรรจุที่จะนำมาใช้ ทำมาจากอะคริลิกใสมีความหนา 5 มิลลิเมตร จะต้องทำความสะอาดทุกครั้งก่อนจะนำไปสั่น เพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างผนังกล่องบรรจุกับวัสดุที่ทดสอบ [2] ส่วนการจัดเรียงอนุภาคนั้นจะเป็นการจัดเรียงแบบสุ่มโดยให้พื้นที่เฉลี่ยรวมของอนุภาคมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตัวอย่างการทดสอบ รวมถึงเลือกกล่องบรรจุที่มีขนาดเหมาะสมกับจำนวนอนุภาคทั้ง 2 ขนาด โดยให้ความสูงเฉลี่ยใกล้เคียงกันในแต่ละตัวอย่างการทดสอบ ซึ่งจำนวนอนุภาคที่บรรจุ แสดงได้ดังตารางที่ 1 และการจัดเรียงอนุภาคในสภาวะเริ่มต้นของแต่ละกรณี แสดงได้ดังรูปที่ 2

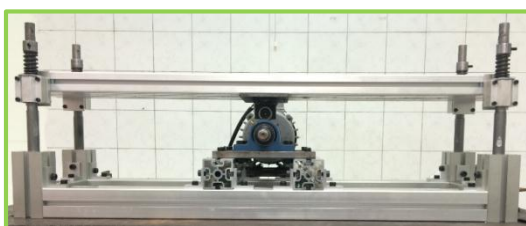
ตารางที่ 1 จำนวนอนุภาคที่ใช้ในการทดลองในแต่ละค่าอัตราส่วนขนาดอนุภาค

อัตราส่วนขนาดอนุภาค	2		3		4	
ขนาดของวัสดุ (mm.)	3	6	4	12	3	12
จำนวนที่ใช้ (ชิ้น)	500	126	500	56	500	32
สี						



รูปที่ 2 การเรียงอนุภาคในสถานะเริ่มต้น โดยที่ (a), (b), และ (c) คือ อัตราส่วนขนาดเท่ากับ 2, 3, และ 4 ตามลำดับ

ในส่วนของการกลไกการสั่นในแนวดิ่ง แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งเป็นการสั่นสะเทือนทางกลที่ใช้ลูกเบี้ยวเป็นตัวบังคับให้ระบบมีการเคลื่อนที่ในรูปแบบของคลื่นรูปไซน์ ดังสมการที่ 2.1 [1] โดยที่ค่าแอมพลิจูดคงที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตร [2]



รูปที่ 3 ระบบกลไกการสั่นสะเทือนในแนวดิ่ง

$$y(t) = A \sin(2\pi ft) = A \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

โดยที่

A คือ แอมพลิจูดในการสั่น (เมตร)

f คือ ความถี่ในการสั่น (Hz.)

t คือ เวลาที่ใช้ในการสั่น (วินาที)

ในการทดสอบจะใช้ตัวแปรในการสั่นคือ ค่าความเร่งไร้หน่วย (Γ) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.2 [2]

$$\Gamma = A(2\pi f)^2 / g \quad (2.2)$$

โดยที่

g คือ ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

งานวิจัยนี้จะใช้ค่าความเร่งไร้หน่วย ทั้งหมด 6 ค่า ตั้งแต่ 1 ถึง 6 โดยการปรับเปลี่ยนความถี่ของการสั่น การบันทึกภาพการทดลองจะใช้กล้องที่มีจำนวนการบันทึก 120 เฟรมต่อวินาที เพื่อดูการเคลื่อนที่ของอนุภาคขณะที่อยู่ภายใต้การสั่น ทำการสั่นอนุภาคเป็นเวลา 5 นาที หรือ 300 วินาที โดยระหว่างการสั่นอนุภาคขนาดใหญ่จะมีพฤติกรรมเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของกล่องบรรจุ ซึ่งสามารถวัดดัชนีการแยกชั้น (Segregation coefficient) ได้จากสมการที่ 2.3 [2]

$$C_s = (N_u - N_l) / (N_u + N_l) \quad (2.3)$$

โดยที่

C_s คือ ดัชนีการแยกชั้น

N_u คือ จำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ที่อยู่ครึ่งบน

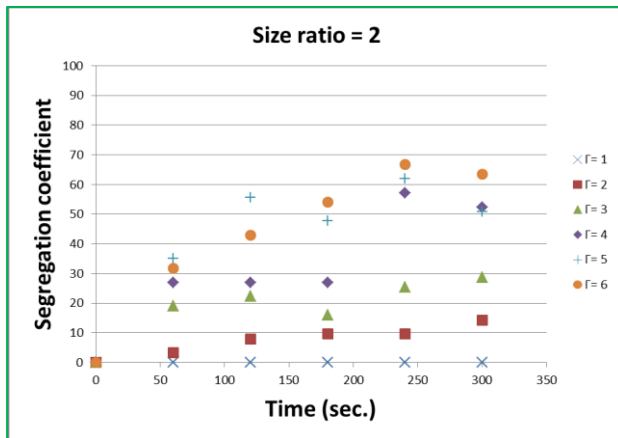
N_l คือ จำนวนอนุภาคขนาดใหญ่ที่อยู่ครึ่งล่าง

การกำหนดพื้นที่ครึ่งบนและครึ่งล่างทำได้โดยแบ่งครึ่งจากความสูงรวมของอนุภาค ดังรูปที่ 2 ซึ่งถ้าค่าดัชนีการแยกชั้นเท่ากับ 1 หรือ 100 เปอร์เซ็นต์ หมายถึงอนุภาคขนาดใหญ่ได้เคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนทั้งหมดหรือเป็นการแยกชั้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนถ้าค่าดัชนีการแยกชั้นเท่ากับ 0 หมายถึงอนุภาคทั้งสองมีการผสมกันอย่างสมบูรณ์หรือไม่มีการแยกชั้นเกิดขึ้น [2] ในการทดสอบและการวิเคราะห์ ทำได้โดยสังเกตพฤติกรรมของวัสดุทั้งสองขนาดว่ามีการเคลื่อนที่อย่างไรที่ค่าความเร่งไร้หน่วยต่าง ๆ รวมถึงเวลาที่ใช้ในการแยกชั้นเป็นอย่างไร โดยจะนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟและวิเคราะห์เปรียบเทียบกันต่อไป

3. ผลการทดสอบ

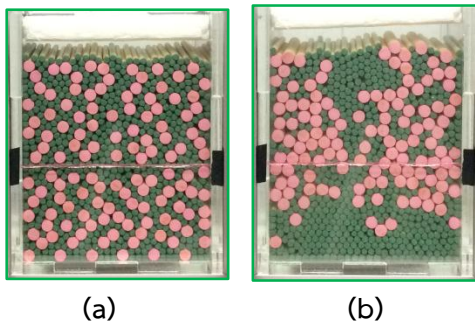
เมื่อทำการสั่นทุกตัวอย่างการทดสอบเป็นเวลา 300 วินาที ด้วยความเร่งไร้หน่วย ทั้งหมด 6 ค่า ผลที่ได้จะแสดงเป็นค่าดัชนีการแยกชั้นที่เวลาต่าง ๆ โดยแสดงไว้ใน รูปที่ 4 ในกรณีสัดส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 2 ที่ $\Gamma = 1$ อนุภาคมีการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยแต่ไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งซึ่งดัชนีการแยกชั้นเท่ากับ 0 แต่อนุภาคจะเริ่มมีการเคลื่อนที่แยกชั้นเมื่อ Γ มีค่าตั้งแต่

2 เป็นต้นไป โดยดัชนีการแยกชั้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่า Γ เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ดัชนีการแยกชั้นของอัตราส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 2 ที่เวลาต่าง ๆ ภายใต้ความเร่งไร้น้ำหนักที่แตกต่างกัน

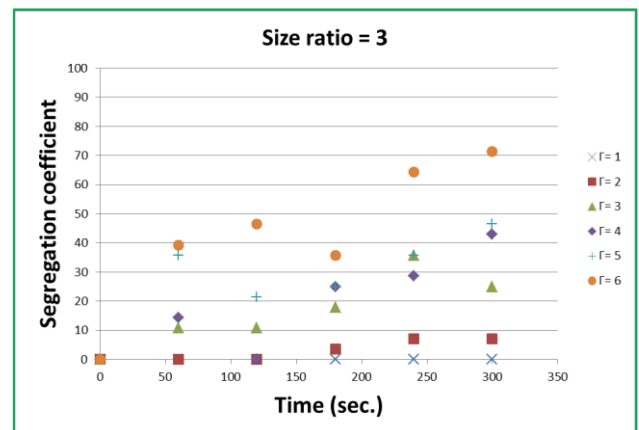
จากรูปที่ 4 ดัชนีการแยกชั้นมีค่าสูงสุดที่ $\Gamma = 6$ เมื่อเวลาผ่านไป 240 วินาที โดยคิดเป็นร้อยละ 66.67 ซึ่งสถานะเริ่มต้นและสิ้นสุดของกรณีนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 5



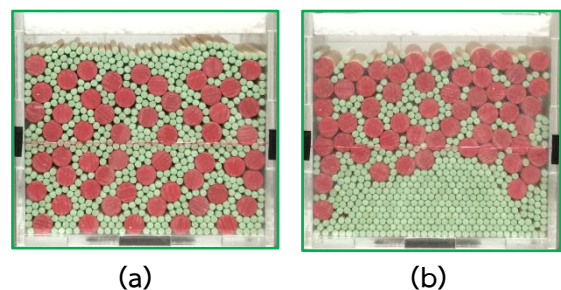
รูปที่ 5 แสดงถึงสถานะเริ่มต้น (a) และสิ้นสุด (b) ของการสั่นที่ค่าความเร่งไร้น้ำหนักเท่ากับ 6 สัดส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 2

ดัชนีการแยกชั้นสำหรับกรณีที่สัดส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 3 ถูกแสดงดังรูปที่ 6 โดยผลที่ได้จะคล้ายกับกรณีที่อัตราส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 2 คือ อนุภาคจะเริ่มเกิดการแยกชั้นเมื่อ Γ มีค่าตั้งแต่ 2 เป็นต้นไป ดัชนีการแยกชั้นมีค่าสูงสุดที่ $\Gamma = 6$ เมื่อเวลาสิ้นสุดที่ 300 วินาที คิดเป็นร้อยละ 71.43 ซึ่งสถานะเริ่มต้นและสิ้นสุดของกรณีนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 7 และในกรณีที่อัตราส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 4 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดของงานวิจัยนี้ พบว่าผลของดัชนีการแยกชั้นของอนุภาคจะ

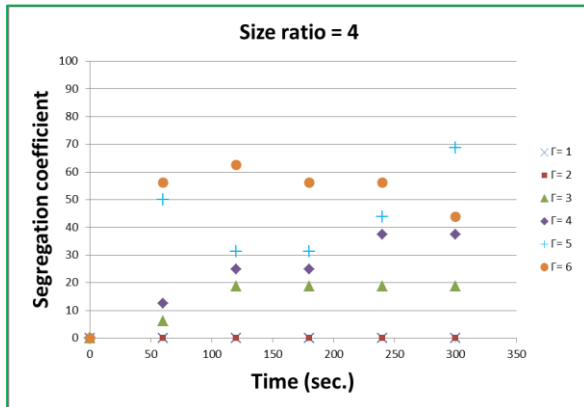
แตกต่างจาก 2 กรณีแรกเพียงเล็กน้อย โดยแสดงไว้ดังรูปที่ 8 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อ Γ มีค่าเท่ากับ 1 และ 2 อนุภาคจะไม่เกิดการแยกชั้น แต่จะเริ่มเกิดการแยกชั้นเมื่อ Γ มีค่าตั้งแต่ 3 เป็นต้นไป ส่วนดัชนีการแยกชั้นมีค่าสูงสุดที่ $\Gamma = 5$ เมื่อเวลาสิ้นสุดที่ 300 วินาที คิดเป็นร้อยละ 68.75 ซึ่งสถานะเริ่มต้นและสิ้นสุดของกรณีนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 9 ส่วนที่ค่า $\Gamma = 6$ ของกรณีนี้ จะมีดัชนีการแยกชั้นสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 62.5 ที่เวลาผ่านไป 120 วินาที และหลังจากนั้นดัชนีการแยกชั้นจะค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่เคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างตามผนังของกล่องบรรจุจนกระทั่งค่าดัชนีการแยกชั้นอยู่ที่ร้อยละ 43.75 เมื่อเวลาสิ้นสุดที่ 300 วินาที ซึ่งสถานะเริ่มต้นและสิ้นสุดของกรณีนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 10



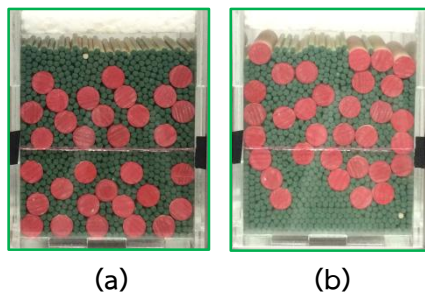
รูปที่ 6 ดัชนีการแยกชั้นของอัตราส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 3 ที่เวลาต่าง ๆ



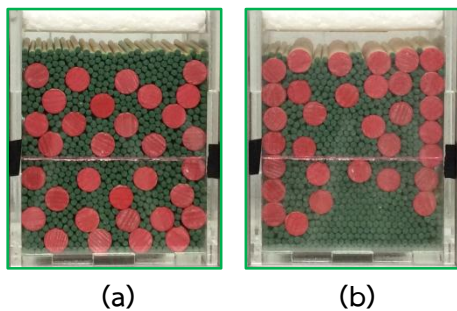
รูปที่ 7 แสดงถึงสถานะเริ่มต้น (a) และสิ้นสุด (b) ของการสั่นที่ค่าความเร่งไร้น้ำหนักเท่ากับ 6 สัดส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 3



รูปที่ 8 ดัชนีการแยกชั้นของอัตราส่วนขนาดอนุภาค เท่ากับ 4 ที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ 9 แสดงถึงสถานะเริ่มต้น (a) และสิ้นสุด (b) ของการสั่นที่ค่าความเร่งไโรหน่วยเท่ากับ 5 สัดส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 4



รูปที่ 10 แสดงถึงสถานะเริ่มต้น (a) และสิ้นสุด (b) ของการสั่นที่ค่าความเร่งไโรหน่วยเท่ากับ 6 สัดส่วนขนาดอนุภาคเท่ากับ 4

4. สรุปผลการทดสอบ

จากการศึกษาพฤติกรรมการแยกชั้นของวัสดุเม็ดที่เป็นผลมาจากอัตราส่วนขนาดของอนุภาค ชนิดเดียวกัน 2 ขนาด ที่อยู่ภายใต้การสั่นในแนวตั้ง ด้วยวิธีการทดสอบ พบว่าอนุภาคที่ขนาดใหญ่กว่าจะมีการเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของกล่อง และจากนั้นจะค่อย ๆ เคลื่อนที่ลงไปตามผนังด้านข้างโดยอนุภาคขนาดใหญ่บางส่วนจะตกลงไปด้านล่างของกล่องบรรจุและมี

บางส่วนที่ยังคงระดับอยู่บริเวณด้านบนของกล่อง ส่วนอนุภาคขนาดเล็กกว่าจะแทรกตัวไปตามช่องว่างระหว่างอนุภาค เคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของกล่องบรรจุ โดยจะยังมีอนุภาคขนาดเล็กบางส่วนที่ผสมอยู่กับอนุภาคขนาดใหญ่ที่ด้านบนของกล่องบรรจุ ในส่วนของค่าการแยกชั้นเมื่อค่า Γ เท่ากับ 1 อนุภาคจะไม่เกิดการแยกชั้นเนื่องจากไม่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เปลี่ยนตำแหน่ง ซึ่งการแยกชั้นระหว่างอนุภาคทั้งสองจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อค่า Γ เท่ากับ 3 เป็นต้นไป และจะมีค่าดัชนีการแยกชั้นที่มากขึ้นเมื่อค่า Γ เพิ่มขึ้น อีกปัจจัยที่มีผลต่อการแยกชั้นของอนุภาคคืออัตราส่วนของขนาดอนุภาค โดยที่ค่าอัตราส่วนของขนาดอนุภาคยิ่งมาก จะยิ่งทำให้อนุภาคทั้งสองขนาดเกิดการแยกชั้นได้เร็วขึ้นแต่ในขณะเดียวกันอนุภาคขนาดใหญ่ก็จะเคลื่อนที่ลงผ่านผนังกล่องบรรจุได้เร็วเช่นกันจะสังเกตได้จากรูปที่ 8 ที่แสดงค่าดัชนีการแยกชั้นสูงสุดที่เวลาเพียง 120 วินาที และหลังจากนั้นค่าดัชนีการแยกชั้นก็มีค่าลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดของกล่องบรรจุมีพื้นที่จำกัดทำให้อนุภาคขนาดใหญ่เคลื่อนที่ขึ้นไปด้านบนได้ไม่หมดและดันตัวกันลงมาด้านล่าง โดยค่าดัชนีการแยกชั้นที่เป็นผลมาจากขนาดของกล่องบรรจุจะได้ทำการศึกษาต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สกนธ์ คล่องบุญจิต. ปรากฏการณ์การกองตัวกันของวัสดุเม็ดกลมเชิง 2 มิติ ภายใต้การสั่นแนวตั้ง. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ปีที่ 25 ฉบับที่ 2, 2551.
- [2] SHU – SAN Hsiau and H.Y. Yu. Segregation phenomena in a shaker. Powder Technology. Vol. 93, 1997: 83 – 88.
- [3] SHU – SAN Hsiau and YING – YU LIN. Segregation and convection of binary disks in a vertical shaker. Advanced powder technology. Vol. 11, no.4, 2000: 439 – 457.

- [4] Xiang – Zhao Kong, Mao – Bin Hu, Qing – Song Wu, and Yong – Hong Wu. Effects to vibration frequency on intruders' position in granular bed. PHYSICAL LETTERS A, Vol. 356, 2006: 267 – 271.
- [5] F. Calvetti, G. Combe, and J. Lanier. Experimental micromechanical analysis of 2D granular material: relation between structure evolution and loading path. MECHANICS OF COHESIVE-FRICTIONAL MATERIALS, Vol.2, 1997: 121 – 163.
- [6] Daniel C. Hong, Paul V. Qiunn, and S. Luding. Cracking the Brazil nut problem. PHYSICAL REVIEW LETTERS, Vol.86, 2001.

AMM0002

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 30
5-8 กรกฎาคม 2559 จังหวัดสงขลา

