

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเรื่อง ปรากฏการณ์ของไหลเชิงกลของวัสดุเม็ด ผู้วิจัยได้ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

2.1 เอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 วัสดุเม็ด (Granular matter)

วัสดุเม็ด หมายถึง วัสดุที่ประกอบไปด้วยวัสดุเม็ดเล็ก ๆ อยู่รวมกันเป็นจำนวนมาก และจะมีช่องว่างระหว่างวัสดุเม็ดเล็ก ๆ เหล่านี้ถูกแทรกด้วยของไหล (เช่น น้ำ หรือ อากาศ) วัสดุเม็ดยังถือว่าเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่น่าทำการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการรวมตัวแยกตัว เนื่องจากวัตถุมีขนาดใหญ่ที่ถูกใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ในทางอุตสาหกรรมอยู่ ในรูปของวัสดุเม็ด ๆ เช่น ทราย เม็ดพลาสติก อาหารอัดเม็ด ในกระบวนการผลิตนั้นวัตถุดิบต่าง ๆ ก็ อาจจะถูกนำไปผ่านกระบวนการสั่นเพื่อให้ผสมกัน หรือ เพื่อให้แยกตัวออกจากกัน สำหรับวัสดุประเภทนี้เมื่อถูกนำมาสั่นหรือเขย่าแล้วจะเกิดปรากฏการณ์หลายๆ อย่างที่ น่าสนใจและทำการศึกษาขึ้นภายในระบบ (สกนธ์ คล่องบุญจิต, 2553)

2.1.2 การพา (Convection)

การพา หมายถึง กระแสการหมุนพาของวัสดุเม็ดที่มีการเคลื่อนที่วนเป็นรอบ ๆ หรือมีเส้นทางเดินซ้ำ ๆ กันโดยการพาเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์ที่น่าสนใจที่สุด จะปรากฏในการไหลวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นสะเทือนในแนวตั้งอนุภาคเม็ดในภาชนะจะเริ่มต้นเป็นรูปแบบไหลวน เริ่มต้นจากด้านบนของภาชนะแล้วลงตามผนังทางด้านล่างและจากนั้นก็กลับไปสู่ด้านบนในขณะเดียวกันจะเกิดการแผ่คลื่น 14-20 แบบ ผ่านภาชนะที่สั่นสะเทือนและที่บทบาทสำคัญในการส่งถ่ายพลังงานไปยังภาชนะ ซึ่งพลังงานบางส่วนนี้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบการพาของวัสดุเม็ด (Sakon, Charles, & Compbell, 2008)

2.1.3 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน คือ อัตราส่วนของแรงกระทำกับน้ำหนักของวัตถุ ดังนั้นถ้าพื้นที่สัมผัสของแรงเสียดทานเท่ากับ 1 หมายความว่า ต้องออกแรงขนาด 10 นิวตัน ผลักน้ำหนักที่มีขนาด 10 กิโลกรัม แต่นั่นลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานให้เหลือเท่ากับ 0.1 จะออกแรงเพียง 1 นิวตัน ก็ทำให้น้ำหนักขนาด 10 กิโลกรัมเคลื่อนที่ได้ ซึ่งสรุปได้ว่า แรงเสียดทานแปรตรงกับน้ำหนักถ้า น้ำหนักมากขึ้นจะต้องออกแรงเพิ่มขึ้น เพื่อชนะแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้น แรงเสียดทานมี 2 ชนิด คือแรง

เสียดทานจลน์และแรงเสียดทานสถิต ฉะนั้นสัมประสิทธิ์จึงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ จะคิดเมื่อวัตถุกำลังเคลื่อนที่ 2) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตจะคิดเมื่อวัตถุกำลังจะเริ่มเคลื่อนที่ โดยทั่วไป สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตจะมากกว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์เสมอ (ยุพา วรยศ, 2547)

2.1.4 ทฤษฎีความต่อเนื่อง

ในของไหลนั้นประกอบไปด้วยโมเลกุลที่เคลื่อนที่ชนกันไปชนกันมาและชนกับโมเลกุลอื่นและของแข็ง แต่ทว่าข้อสมมติความต่อเนื่องพิจารณาของไหลว่ามีความต่อเนื่อง ดังนั้นคุณสมบัติของของไหลเช่น ความหนาแน่น ความดัน อุณหภูมิ และความเร็วจะถูกพิจารณาเป็นจุดที่เล็กมาก ๆ เรียกว่า อีลาเมนต์อ้างอิงตามปริมาตร (Reference Element of Volume, REV) ซึ่งแบ่งตามระยะห่างเชิงเรขาคณิตของโมเลกุลของของไหลที่อยู่ใกล้เคียงกัน คุณสมบัติเหล่านี้ถูกสมมติให้มีลักษณะที่ต่อเนื่องอย่างมากจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งและถูกหาค่าเฉลี่ยใน REV ข้อเท็จจริงที่ว่าของไหลนั้นประกอบไปด้วยลักษณะที่ไม่ต่อเนื่องนั้นถูกละไว้ ทฤษฎีความต่อเนื่องนี้โดยพื้นฐานแล้วคือการประมาณค่า เช่นเดียวกับการที่ดาวเคราะห์ถูกพิจารณาให้เป็นจุดเล็กๆ เมื่อนำมาพิจารณาโดยกลศาสตร์ท้องฟ้า ดังนั้นคำตอบจึงเป็นค่า ประมาณ ด้วยเหตุนี้เอง ทฤษฎีความต่อเนื่องมีอาจจะนำไปสู่การหาคำตอบแม่นยำตรงได้ อย่างไรก็ตาม ภายใต้สถานการณ์ที่ถูกต้อง ทฤษฎีความต่อเนื่องอาจจะนำไปสู่คำตอบที่มีความแม่นยำสูงได้

2.1.5 การทดลองทางวิทยาศาสตร์ของกาลิเลโอ

กาลิเลโอ ได้ทำการทดลองโดยเขากลิ้งลูกบอลลงตามพื้นเอียงชื่อเสียงทางวิทยาศาสตร์ของกาลิเลโอ (Galileo) มาจากความรู้เกี่ยวกับ “วัตถุเคลื่อนที่” (Moving object) เช่น ลูกกระสุนปืนใหญ่ที่ยิงออกไปแล้วเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์ (Projectile) วัตถุที่ตกลงจากที่สูง (Falling object) รวมทั้ง การแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา (Pendulum)

ถัดจากการทดลองที่หอเอนปิซา กาลิเลโอยังคงพัฒนาแนวคิดของเขาเกี่ยวกับ “วัตถุเคลื่อนที่” ต่อไปอีก คราวนี้เขาใช้ แผ่นไม้กระดานขนาดยาว 12 คิวบิตและกว้างครึ่งคิวบิต (ประมาณว่ายาว 20 ฟุต กว้าง 10 นิ้ว) นำมาเขาระรองเรียบ และตรง 1 ร่องตรงกลางกระดานตามแนวยาว แล้ววางพาดเอียง ๆ กับพื้น จากนั้นก็ทดลองกลิ้งลูกบอลของเหล็กลงมา ตามแนวร่องกระดานที่เขาะรองเอาไว้ พร้อมกับจับเวลาที่ลูกบอลกลิ้งจากจุดต่าง ๆ บนกระดาน (เริ่มต้นตั้งแต่จุด B) ลงมาตามพื้นเอียงไปจนถึงจุดเป้าหมาย (A) ดังรูปที่ 2.6 แล้วจับเวลาดูว่าแต่ละระยะทางใช้เวลาเท่าใด

สำหรับวิธีจับเวลา กาลิเลโอใช้น้ำฝีกาน้ำทำจากถังน้ำใบใหญ่มีท่อเล็ก ๆ ปล่อยน้ำออกจากถังไปเก็บไว้ในแก้วน้ำ ซึ่งเขา จะนำไปชั่งน้ำหนักของน้ำที่ไหลออกมา โดยเปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำที่ชั่งได้ (แทนเวลา) กับระยะทางที่ลูกบอล- ทองเหลืองไหลลงมาตามพื้นเอียงได้ระยะทางเท่าใด

กล่าวคือ ระยะทางที่ไกลกว่าย่อมใช้เวลาานกว่า และน้ำที่ไหล ออกมาจากถังน้ำก็ย่อมจะมากกว่า และชั่งน้ำหนักได้มากกว่า

สำหรับการทดลองอย่างนี้ อาริสโตเติลคงทำนายว่า ลูกบอลล่อมต้องกลิ้งลงมาด้วยความเร็วคงที่ กล่าวคือ ถ้าเวลาที่ลูกบอลใช้กลิ้งลงมาเพิ่มขึ้น 1 เท่าตัว (โดยการวางพื้นกระดานให้เอียงมากขึ้น) ระยะทางที่กลิ้งลงมาก็จะไกลขึ้น 1 เท่าตัวเช่นกัน

แต่ทว่าการทดลองของกาลิเลโอกลับพิสูจน์ได้ว่า เมื่อเวลาที่ลูกบอลใช้กลิ้งลงมาตามพื้นเอียงเพิ่มขึ้น 1 เท่าตัว ระยะทางที่กลิ้งลงมาก็จะไกลขึ้นถึง 4 เท่าตัว อันเนื่องมาจาก “ความเร่ง” (Acceleration) จากแรงของ “ความโน้มถ่วง” (Gravity) ของโลกตามสมการ $x = gt^2$ เมื่อ x คือ ระยะทาง t คือ เวลา และ g คือ ความเร่งจากแรงของความโน้มถ่วงของโลกในแนวดิ่ง เพียงแต่ว่า ความเร่งบนพื้นเอียงต้องมีมุมที่เอียงสมมติว่าเท่ากับมาเกี่ยวข้องด้วย โดย หากสมมติให้ความเร่งตามแนวพื้นเอียงเท่ากับ a ก็จะได้ว่า $a = g \sin \theta$ (สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข, 2551)



รูปที่ 2.1 แสดงลูกบอลกลิ้งจากจุดต่าง ๆ บนกระดานลงมาตามพื้นเอียง

(ที่มา: สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข, 2551)



รูปที่ 2.2 แสดงนาฬิกาน้ำของกรีก (ที่มา: สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข, 2551)

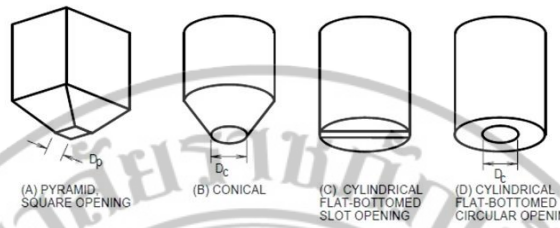
2.1.6 ชนิดของฮอปเปอร์

จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา ได้มีผู้นิยามความหมายของฮอปเปอร์ไว้ดังนี้

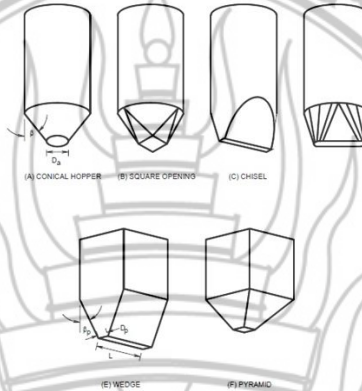
- 1) ฮอปเปอร์ หมายถึง ลักษณะของท่อที่มีขนาดใหญ่ซึ่งมีความกว้างส่วนปลายของด้านหนึ่งมากกว่าปลายอีกด้านหนึ่ง วัสดุจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปในปริมาณลดลงจากมากไปหาน้อย ตัวอย่างเช่น เมล็ดถั่ว แล้ววัสดุจะออกจากท่อไปยังบริเวณอื่น (Cambridge dictionary, n.d.)
- 2) ฮอปเปอร์ หมายถึง ภาชนะทรงกรวย (funnel-shaped) ที่ใช้เพื่อบรรจุวัสดุที่ต้องการปล่อยลงไปในเครื่องกล หรือปล่อยตกลงไป เช่น ปูน หรือทราย (Merriam-webster, n.d.)
- 3) ฮอปเปอร์ หมายถึง ถังทรงกรวยหรือปากกรวยที่ใช้บรรจุวัสดุให้ไหลไปในจุดที่ต้องการ (Dictionary, n.d.)

จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงสรุปได้ว่าฮอปเปอร์ คือ ภาชนะรูปทรงกรวยที่ใช้เก็บบรรจุวัสดุที่ต้องการ แล้วปล่อยให้ไหลผ่านไปในช่องทางออก เพื่อให้วัสดุไหลลงจุดที่ต้องการ ส่วนรูปแบบของฮอปเปอร์มีหลากหลายรูปแบบ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ ชนิด Mass flow hopper และ Core flow hopper (Chase, G.G., n.d.) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

2.3ก)



2.3ข)

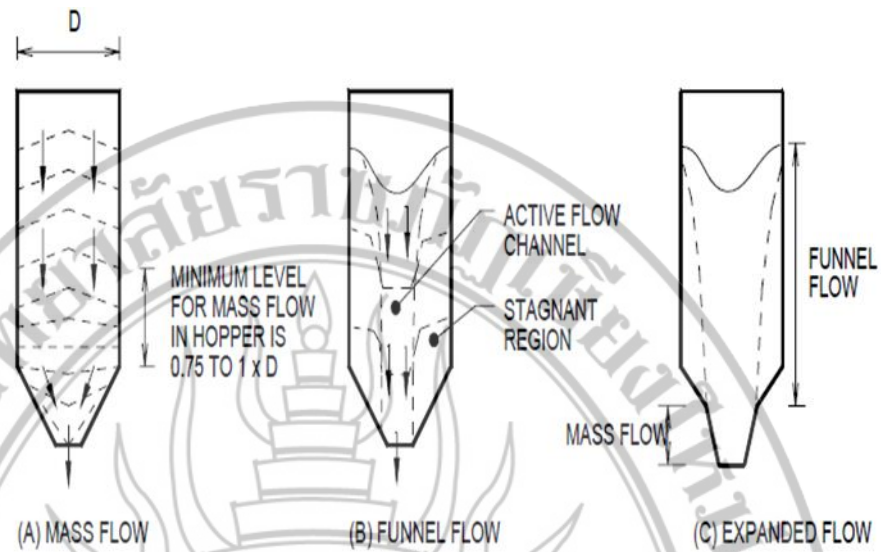


รูปที่ 2.3 ฮอปเปอร์รูปแบบต่างๆ 2.3ก) ฮอปเปอร์ชนิด Core flow hopper

2.3ข) ฮอปเปอร์ชนิด Mass flow hopper (ที่มา: Chase, G.G, n.d.)

2.1.7 การไหลในฮอปเปอร์ (Hopper flow)

เมื่อก้าวถึงรูปแบบการไหลของวัสดุเม็ดในฮอปเปอร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ใหญ่ๆ ได้แก่แบบ mass flow และแบบ funnel flow ในกรณีที่เกิดขึ้นอาจเกิดการไหลทั้งสองแบบ ร่วมกันเรียกว่า expanded flow ซึ่งความแตกต่างระหว่างการไหลของทั้งสองแบบนี้คือในแบบ mass flow วัสดุที่อยู่ในฮอปเปอร์จะเคลื่อนที่ไปทั้งหมด แต่ก็ไม่จำเป็นว่าจะต้องมีความเร็วของแต่ละอนุภาคเท่ากัน ส่วนแบบ funnel flow จะมีเพียงส่วนด้านแกนกลางของวัสดุเท่านั้นที่จะทำให้วัสดุ เคลื่อนที่ลงสู่รูปล่อยฮอปเปอร์ ในขณะที่วัสดุเม็ดบริเวณด้านข้างจะอยู่นิ่งและการทำให้การไหลคงที่มี ประสิทธิภาพในการเก็บวัสดุ จึงควรจะต้องออกแบบฮอปเปอร์ให้มีลักษณะเป็นแบบ Mass flow hopper ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การไหลแบบ mass flow, funnel flow และ expanded flow ในฮอปเปอร์
(ที่มา: Chase, G. G. (n.d.)

2.1.8 DEM simulation Model

Zhou, Xu, Yu, and Zulli (2002) ได้เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาหา มุมกองโดยมีผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกลิ้งและแรงแบบเลื่อนไถลของผนังฮอปเปอร์กับ อนุภาค ซึ่งทำปฏิกิริยากันโดยอธิบายจากสมการ (2.10) และ (2.11) ซึ่งสมการดังกล่าว ถ้าค่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบเลื่อนไถลและแบบกลิ้งมีค่ามาก ขนาดของมุมกองก็จะมากตามและ ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุซึ่งรองรับงานกับวิจัยในครั้งนี้

$$m_i \frac{dV_i}{dt} = m_i g + \sum_{j=1}^{k_i} (F_{cn,ij} + F_{dn,ij} + F_{ct,ij} + F_{dt,ij}) \quad (2.10)$$

และ

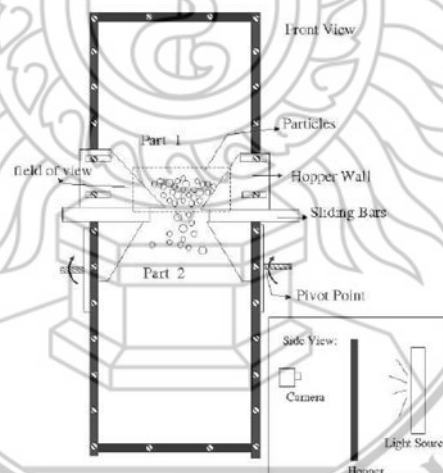
$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (T_{ij} + M_{ij}) \quad (2.11)$$

เมื่อ m_i คือ มวลของวัสดุ
 V_i คือ อัตราเร็วของวัสดุ

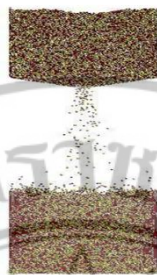
ij	คือ แรงระหว่างอนุภาค
$F_{cn,ij}$	คือ normal forces of contact
$F_{dn,ij}$	คือ normal forces of damping
$F_{ct,ij}$	คือ tangential forces of contact
I_i	คือ tangential forces of damping
T_{ij}	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของวัสดุเม็ด
M_{ij}	คือ แรงหมุน
M_{ij}	คือ แรงเสียดทานกลิ้ง
g	คือ ความเร่งโน้มถ่วง

2.1.9 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลในภาชนะฮอปเปอร์เสมือน 2 มิติ (Simulation model of hopper discharge in pseudo-2D)

Cheng Jiaming (2012) ได้เสนอแบบจำลองการไหลในภาชนะเสมือน 2 มิติโดยการนำไปสั้น เพื่อทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ว่าเกิดรูปแบบการไหลในภาชนะดังกล่าวอย่างไร โดยมีการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงร่างภาชนะเสมือน 2 มิติ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง
(ที่มา: Cheng Jiaming, 2012)



รูปที่ 2.6 การจำลองไหลในภาชนะเสมือน 2 มิติที่มุมฮอปเปอร์ 15 องศา
ช่องเปิดที่ 4.5 เซนติเมตร (ที่มา: Cheng Jiaming, 2012)

จากรูปที่ 2.5 พบว่าเมื่อปล่อยให้วัสดุไหลลงจะพบการจำลองของการไหลในภาชนะเสมือน การปล่อยวัสดุเม็ดออกจากฮอปเปอร์ 2 มิติที่ได้จากการสุ่มแบบ 30 เฟรมต่อวินาทีได้ดังรูปที่ 2.6 ด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity) มีแนวโน้มที่ระบบจะเกิดการติดขัดขึ้น การไหลของวัสดุเม็ดอาจเกิดการหยุดแบบทันทีทันใดเนื่องจากเกิดการขัดตัวกันของวัสดุเม็ด (arching or vault) เมื่อขนาดรูปล่อยฮอปเปอร์ไม่ได้มีขนาดมากกว่าขนาดของวัสดุเม็ดมาก ๆ อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากการหลีกเลี่ยงการลดขนาดรูปล่อยฮอปเปอร์เพื่อเพิ่มอัตราการไหล (flow rate) และลดความน่าจะเป็นของการติดขัด (jamming probability) สามารถใช้วิธีการเพื่อปรับปรุงการไหลของวัสดุเม็ดได้ด้วยการสั่น (vibration) ไม่ว่าจะเป็นการสั่นเฉพาะที่ (local) หรือทั้งระบบ (global) อย่างไรก็ตามที่สุดแล้วระบบอาจเกิดการอุดตันขึ้น (Clogging) ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดการขัดตัวกันของวัสดุเม็ดเช่นกัน สำหรับความน่าจะเป็นของการติดขัด (Jamming probability, $J(d)$) สามารถคำนวณได้จากสมการ ดังนี้

$$J(d) = \frac{N_a}{N_t} \quad (2.12)$$

เมื่อ	$J(d)$	คือ	ความน่าจะเป็นของการติดขัด (Jamming probability)
	N_a	คือ	จำนวนครั้งที่เกิดการติดขัด (Number of jamming events)
	N_t	คือ	จำนวนครั้งที่ทำการทดลองในแต่ละเงื่อนไข (Number of trial for each conditions)

ซึ่งหากไม่ให้อัตราการไหลระบบเกิดการติดขัดต้องใช้รูปล่อยที่กว้างมากกว่าขนาดของวัสดุเม็ด และพบว่ามีความสัมพันธ์ของสมการดังต่อไปนี้

$$P_x(t) = \exp(-t/T) \quad (2.13)$$

$$P_x(V) = \exp(-v/vt) \quad (2.14)$$

$$P_2(V_2) = (P_1(V_1))^{V_2/V_1} \quad (2.15)$$

$$T = T_g/P_j \quad (2.16)$$

โดยที่	v	คือ	ความเร็วของ Beverloo
	V	คือ	อัตราเร็วการไหล
	t	คือ	เวลา
	T	คือ	เวลาลักษณะแตกต่างกันไปตามวัสดุอนุภาคและช่องเปิดของถัง
	V ₁	คือ	อัตราการไหลครั้งที่ 1
	V ₂	คือ	อัตราการไหลครั้งที่ 2
	P _j	คือ	ความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้น
	T _g	คือ	เวลาที่ตกตามแรงโน้มถ่วง

จากสมการดังกล่าวพบว่าแบบจำลองนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ช่องปล่อยน้อยก็จะใช้เวลามากและเมื่อใช้ช่องปล่อยมากก็จะใช้เวลาน้อย

2.1.10 มุมกอง (Angle of repose)

Bhavan M. (1973) ได้กล่าวว่าเมื่อปล่อยให้วัสดุเม็ดได้ไหลลงไปยังอ่างอยู่มุมที่วัดได้จากด้านข้างของกองวัสดุเทียบกับแนวแกนนอนเรียกว่า “มุมกอง” กำหนดให้สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ θ_r

2.1.11 ชนิดมุมกองและปัจจัยที่มีผลต่อการกอง

ปัจจัยที่ทำให้เกิดมุมกองอันได้แก่ มุมเสียดทานภายใน (Internal friction angle) การกระจายขนาดของอนุภาค รูปร่าง น้ำหนัก ระดับความชื้น การแบ่งชั้น การแยกชั้น นอกจากนี้วิธีการและขั้นตอนการเทยังมีผลด้วย ได้แก่ ระดับความสูงของการเท และอยู่ในขณะหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ ดังนั้นมุมกองจึงมี 2 ชนิด (Stewart, 1968) ได้แก่

- 1) มุมกองขณะหยุดนิ่ง (Static angle of repose)
- 2) มุมกองขณะเคลื่อนที่ (Dynamic angle of surcharge)

ซึ่งมีความสำคัญมากกว่ามุมกองขณะอยู่นิ่งทั้งนี้มุมกองเป็นสมบัติที่สำคัญมากที่เป็นลักษณะพฤติกรรมเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดจึงสามารถสรุปได้ว่าวัสดุที่มีมุมกองไม่เกิน 30° มีความสามารถในการไหลดีเรียงตัวอย่างช้าๆ นอกจากนี้ยังพบว่ามุมกองสัมพันธ์กับสมบัติของวัสดุ เช่น แรงเสียดทาน

แบบลื่นไถล (Sliding friction) และแรงเสียดทานแบบกลิ้ง (Rolling friction) อีกทั้งยังผูกพันกับขนาดอนุภาค (Ghazavi, Hosseini, & Mollanouri, 2008)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สกนธ์ คล่องบุญจิต, (2553) ศึกษาปรากฏการณ์การเคลื่อนที่วนในระบบ 2 มิติ ของวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นแนวตั้งโดยจำลองเหตุการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้เทคนิค Soft-particle computer simulation ผลจากการจำลองเหตุการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่าให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยและทดลองของนักวิจัยท่านอื่นๆ นั่นคือ จะมีปรากฏการณ์การเคลื่อนที่วนของเม็ดวัสดุเมล็ดเล็กเกิดขึ้นในระบบเมื่อระบบมีการสั่นด้วยค่าความเร่งของการสั่นมากกว่าค่าคงที่แรงโน้มถ่วงของโลก และเมื่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวของผนังกล่องกับเม็ดวัสดุมีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผิวของเม็ดวัสดุ นอกจากนี้ยังสามารถบอกได้ว่าการเกิดการเคลื่อนที่วนจะเกิดมากขึ้นเมื่อความเร่งของการสั่น สะเทือนมีค่ามากขึ้น แต่ก็จะมีค่าสูงสุดที่ค่าค่าหนึ่ง หลังจากนั้นการเคลื่อนที่วนก็จะเกิดน้อยลง ถ้าต้องการให้เกิดการเคลื่อนที่วนมากขึ้นก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มแรงเสียดทานที่ผิวของผนังกับเม็ดวัสดุให้มากขึ้น

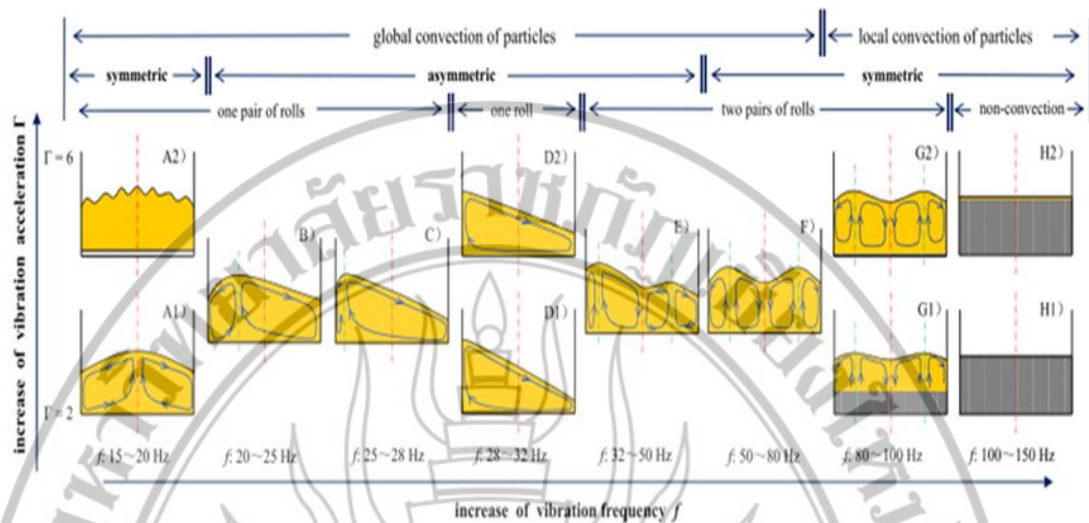
Shu-San Hsiau, et al., (2002) ศึกษาเกี่ยวกับการพาและการแยกของวัสดุเม็ดภายใต้ระบบสั่นแนวตั้งในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมพบว่าการพาของวัตถุในภาชนะจะเป็นแบบสมมาตร ทิศทางการเคลื่อนที่ของวัตถุจะเคลื่อนที่จากบริเวณตรงกลางของก้นภาชนะขึ้นไปสู่ด้านบน แล้ววนลงมาโดยชิดด้านข้างภาชนะ แล้ววนขึ้นไปด้านบนอีก ซึ่งถือว่าเป็นการพาแบบปกติ เมื่อเพิ่มมุมของผนังภาชนะการพาแบบปกติจะยิ่งลดลง และจะเกิดการพาแบบย้อนกลับ (Reverse convection) คือวนจากบริเวณตรงกลางด้านบนมาด้านล่าง แล้ววนไปด้านข้างจากล่างขึ้นบนโดยชิดผนังด้านข้างของภาชนะ เมื่อมุมของผนังภาชนะเพิ่มขึ้นมากกว่ามุมเปลี่ยน (Transition angle) นอกจากนี้ยังพบว่าความขรุขระของผนังและค่าแอมพลิจูดที่ใช้ในการสั่นยังมีผลต่อการพาอีกด้วย โดยในการแยกวัสดุเม็ดขนาดใหญ่กว่านั้น จะถูกเหนี่ยวนำโดยการพาของวัสดุเม็ดซึ่งแสดงให้เห็นในการพาแบบปกติ ส่วนการพาแบบย้อนกลับจะเป็นผลจากการที่วัสดุเม็ดใหญ่เคลื่อนที่ไปยังก้นภาชนะ ทั้งนี้ความเร็วในการแยกจะแปรผันตรงกับอัตราเร็วเฉลี่ยของการพา

Chun-Chung Liao, et al., (2010) ได้ทำการศึกษาผลของปัจจัยด้านปริมาณและความเข้มข้นของของเหลว ซึ่งได้แก่น้ำมันซิลิโคนที่เติมลงไปในระบบของวัสดุเม็ดของชนิดที่มีต่อปรากฏการณ์การแยกภายใต้ระบบการสั่นแนวตั้ง โดยใช้น้ำมันซิลิโคนที่มีความเข้มข้นต่างกัน 5 ความเข้มข้น และปริมาณต่างกัน 6 ชนิด ผลการศึกษาพบว่าจะเกิดปรากฏการณ์บราซิลนัทเอฟเฟกต์โดยที่วัสดุเม็ดบุกรุกจะเคลื่อนที่ได้สูงน้อยลง เมื่อความเข้มข้นและปริมาณของของเหลวเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามพบว่าแรงจากของเหลว (Liquid bridge force) ไม่มีต่อผลต่อผลลัพธ์ของการแยกหากเติมของเหลวที่มีความเข้มข้นน้อยมาก แม้ว่าจะเพิ่มปริมาณของเหลวก็ตาม

Shirsath, Padding, Clercx, and Kuipers, (2015) ทำการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคทรงกลมไหลลงรางสามมิติที่มีความโน้มเอียงที่มุมคงที่จะถูกจำลองโดยทั่วไปวิธีการที่องค์ประกอบที่ไม่ต่อเนื่อง (Digital Elevation Model) DEM ปัจจุบันเป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการศึกษาเชิงตัวเลขของเช่น ฟลวดไดเซชัน ก๊าซ ของแข็งเราได้แก้ไข DEM สำหรับการจำลองการหมุนของกระแสมัด ในมุมมองของส่วนขยายในอนาคตที่มุ่งยกตัวอย่างเช่นการศึกษาการแยก (หมุน) กระแสมัด และพอลิดีสเพอร์ส หรือผสมสองชนิดของอนุภาคเม็ดที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันตามขั้นตอนการตรวจสอบหลายจะต้อง ในขั้นตอนแรกที่เราเปรียบเทียบการจำลอง DEM กับการทดสอบของอนุภาคทรงกลมแก้วโมโนดิสเพอร์ส ไหลผ่านหมุนรางกึ่งทรงกระบอกมีความโน้มเอียงที่มุมคงที่และอัตราการไหลอย่างต่อเนื่อง เทคนิคการวัดที่แตกต่างกันเช่น อนุภาคอนุภาครูปภาพและติดตามถูกนำมาใช้ในการวัดความเร็วเฉลี่ยพื้นผิวของอนุภาคและความสูงของวัสดุเม็ดในราง เราสังเกตว่ารูปแบบการแลกเปลี่ยนการไหลขึ้นอย่างมากกับอัตราการหมุนของราง และความเร็วอนุภาคได้รับอิทธิพลจากแรงเหวี่ยงและโบลิตาร์กองกำลังที่มีอัตราการหมุนเพิ่มขึ้นอนุภาคกำลังจะย้ายไปด้านข้างมากขึ้น เราจะพบว่ารายละเอียดของรูปแบบอนุภาคให้มีความสำคัญเพียง แต่สำหรับการไหลของอนุภาคที่อยู่ใกล้กับทางเข้าของรางในขณะที่หลังจากที่ระยะทางที่ค่อนข้างสั้นไหลอนุภาคขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น อัตรามวลมุมเอียงและอัตราการหมุน แบบจำลองพยากรณ์ DEM เราเห็นกันได้ดีกับการทดลองวัดความสูงและความเร็วของวัสดุเม็ดพื้นผิว มีนักการศึกษาหลายท่านได้ศึกษาเกี่ยวกับไหลของวัสดุเม็ด

Fuweng Zhang, et al., (2014) ทำการศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบของการพาภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง โดยใช้ความถี่เท่ากับ 15 – 150 Hz วัสดุเม็ดแสดงรูปแบบการพาที่หลากหลาย เช่น สมมาตร ไม่สมมาตร หนึ่ง สอง และหลายวงของการพา (Convection roll) ความถี่ของการสั่นมีนัยสำคัญต่อจำนวนวงของการพา และทิศทางการไหลหรือการพา ดังรูปที่ 2.12 เมื่อใช้ความถี่ในช่วง 28 – 32 Hz การพาของวัสดุเม็ดจะเป็นเพียงหนึ่งวง และผิวหน้าของวัสดุเม็ดจะเกิดการเอียง วัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ขึ้นไปตามผนังภาชนะด้านซ้ายสุดสูงสุด จากนั้นจะเคลื่อนที่ลงไปตามผิวหน้าของวัตถุที่เอียงลงไปยังผนังภาชนะด้านขวา จากนั้นเคลื่อนที่ลงชิดผนังด้านขวาไปสู่ก้นภาชนะ แล้ววนไปทางซ้ายในแนวราบได้เป็นการเคลื่อนที่แบบวง วงจนครบรอบสูงสุดเดิม ทั้งนี้พบว่าที่ค่าความถี่ของการสั่นเท่ากับ 28 Hz ความชันของผิวหน้าวัสดุเม็ดมีค่ามากที่สุด



รูปที่ 2.7 แสดงการพาที่สังเกตได้เมื่อใช้ระบบการสั่นแนวดิ่งที่มีค่าความถี่ของการสั่นในช่วง 15 ถึง 150 Hz โดยเส้นลูกศรแสดงทิศทางการพาของวัสดุเม็ด (ที่มา: Fuweng Zhang et al., 2014)

Shirsath et al., (2015) ได้ศึกษาการไหลของวัสดุเม็ดทรงกลมชนิดเดียวบนรางรูปครึ่งวงรีทรงแปดเหลี่ยมโดยใช้ทั้งวิธีการทดลองและการสร้างแบบจำลองจากคอมพิวเตอร์ (Discrete Element Method: DEM) ซึ่งในการทดลองมีการแบ่งการทดลองเป็น 3 ตอน คือ 1. ศึกษาการไหลในแนวตรงและการเบี่ยงเบนโดยการหมุน ผลการทดลองปรากฏว่า ทั้งสองการทดลองไม่ได้มีความแตกต่างจากการจำลอง แต่จะเห็นได้ชัดตามแนวการไหลว่าความเร็วจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ และการไหลแนวตรงกับการเบี่ยงเบนไม่ได้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ 2. ศึกษาความเร็วการไหลของวัสดุเม็ดตามทิศความกว้างของราง ผลการทดลองปรากฏว่า ผลที่ได้จากการทดลองและการจำลองมีความใกล้เคียงกัน ยิ่งปล่อยเม็ดลงมาจากที่สูงความเร็วจะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ความกว้างการไหลก็จะแคบลง และศึกษาความเร็วผิววัสดุเม็ดของแนวการเบี่ยงเบนตามแนวความกว้าง ผลการทดลองปรากฏว่า การทดลองและการจำลองมีความใกล้เคียงกัน ยิ่งความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้น ความเร็วการเบี่ยงเบนเพิ่มขึ้น 3. ศึกษาตำแหน่งของวัสดุเม็ดตามความยาวราง ผลการทดลองปรากฏว่า การทดลองและการจำลองมีความใกล้เคียงกัน ยิ่งความเร็วการหมุนมาก วัสดุจะเข้าสู่แนวกลางได้น้อยลง สามารถสรุปผลได้ว่าการทดลองทั้ง 3 ตอนสอดคล้องกับการจำลองอย่างมาก

Zheng and Hill, (1996) ได้ศึกษาเทคนิคการจำลองการไหลของโมเลกุลซึ่งถูกนำไปใช้กับแบบจำลองการไหลบนรางของวัสดุเม็ด ซึ่งความเร็วการไหลนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ความลาด

เอียงในมุมต่างๆของราง และความขรุขระของพื้นผิวราง โดยทั่วไปแล้วความเร็วของวัสดุบนรางจะไม่เป็นเส้นตรง และมีความเร็วปลายมาก แต่ผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับพื้นเอียงให้ทำมุมขนาดเล็กจะทำให้การไหลช้าลงจนเกิดเป็นเส้นตรงได้ และทำให้วัสดุเม็ดมีความหนาแน่นต่ำ บริเวณใกล้กับพื้นผิวฐานของรางซึ่งค่าความหนาแน่นจากบริเวณนี้เองสามารถหาได้จากความเร่งบนพื้นผิวที่มีความขรุขระสรุปได้ว่าพื้นผิวที่มีความขรุขระนี้สามารถสร้างแรงเสียดทานและป้องกันการเบี่ยงเบนของการไหลได้

Santomaso and Canu, (2001) ทำการทดลองตรวจสอบพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดโดยให้วัสดุเม็ดไหลบนรางเอียงที่มีพื้นผิวขรุขระและมีแรงเสียดทานภายใน ซึ่งในการทดลองนี้ผู้วิจัยไม่ได้ใช้อุณหภูมิคงที่ (ทรงกลม, แท่ง, แผ่น) แต่ใช้ผงกรดเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิติก (EDTA) ในการทดลอง ผลการทดลองพบว่า ช่วงที่มีความหนาแน่นของวัสดุเม็ดต่ำคือช่วงความเร็วปลายที่อยู่ใกล้ฐานของราง ประกอบไปด้วยอนุภาคที่ไม่ใช่ทรงกลมที่มีการกระจายตัวบนพื้นผิวที่ขรุขระ และชั้นความหนาที่สังเกตได้จากการคงที่และการไหลไปบนรางนั้นพบที่มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากมุมที่ต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาจากระดับที่ไม่ใช่มิติจะเห็นว่าวัสดุเม็ดนั้นไหลเป็นเส้นโค้งเดียว

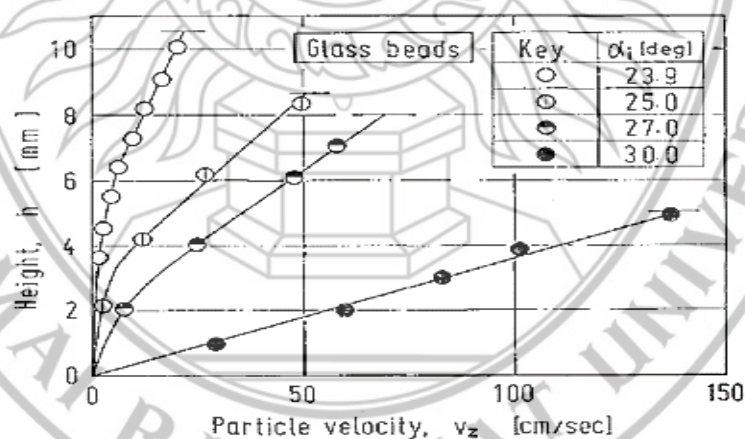
Zhou and Sun, (2013) ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดบนรางเอียงโดยใช้การสร้างแบบจำลองจากคอมพิวเตอร์ (Discrete Element Method: DEM) ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาคือความสูงในการไหล โดยคำนวณค่าจากนิยามของ Savage ที่เปลี่ยนแปลงวิธีการไหลภายในของวัสดุเม็ดช่วงระยะที่เกิดการไหลตามรางเอียง และความผันผวนของอนุภาคของแข็งในการไหล ซึ่งมีการตรวจสอบโดยใช้อนุภาคของวัสดุเม็ดโดยพิสูจน์แล้วว่าได้รับมาผลมาจากค่าของ Savage

Ishida and Shirai, (1979) ได้ทำการศึกษาความเร็วของวัสดุเม็ดชนิดเดียวไหลลงช่องเปิดที่มีความลาดเอียงซึ่งพื้นด้านล่างช่องเปิดมีกระดาดทรายหยาบและกำหนดมุมช่องเปิดที่มีความลาดเอียงต่างระดับกัน วัสดุเม็ดที่ไหลมีกระจายความเร็วเป็นปกติไหลเป็นรูปแบบเชิงเส้น ในความเร็วแต่ละระดับจะมีการไล่ระดับสีของความเร็วในแต่ละบริเวณความหนาของชั้นอนุภาคและเพิ่มขึ้นตามความลาดชันของราง จากการสังเกตการกระจายความเร็วของอนุภาคเหล่านั้นพบว่า เมื่อระยะความสูงรางเอียงเพิ่ม ขึ้นความเร็วก็จะเพิ่มขึ้นตาม การเปลี่ยนแปลงความเร็วไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นเม็ดแก้วชั้นล่างจะมีการกระจายความเร็วที่น้อยกว่าเม็ดแก้วที่ผิวอิสระด้านบน อิทธิพลนี้รางด้านข้างส่งผลต่อการกระจายความเร็วของวัสดุเม็ด ความเร็วของวัสดุเม็ดแก้วที่อยู่ตรงกลางรางเอียงมีความเร็วมากกว่า เม็ดแก้วบริเวณใกล้ผนัง

Nishimura, Kosugi, and Nakagawa, (1993) ได้ทำการทดลองปล่อยอนุภาคทรงกลมลงรางลาดเอียงภายในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของกระแสนุภาคทรงกลม รางมีความยาว 5.4 m กว้าง 0.08 m มุมเอียงของรางถูกกำหนดให้แตกต่างกันตั้งแต่ 30° ถึง 40° และกำหนดอุณหภูมิที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0-30° การเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมถูกบันทึกด้วยระบบวิดีโอ

ความเร็วสูง ความเร็วและความหนาแน่นของทรงกลมได้รับอิทธิพลภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ โดยได้เลือกพื้นผิวรางในการตรวจสอบวิธีการไหลอนุภาคที่มีผลกระทบกับพื้นผิวราง ประการแรกจะจำลองเงื่อนไขขอบเขตแบบขรุขระ ประการที่สอง คือ การจำลองขอบเขตแบบราบเรียบ พวกเขาพบว่าปริมาณมีความสำคัญเกี่ยวกับการไหลในทุกเงื่อนไข การไหลมีความเร็วเพิ่มขึ้นตามความโน้มเอียงของรางและอุณหภูมิ อนุภาคทรงกลมที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่มีความเร็วที่ผันผวน เงื่อนไขขอบเขตมีอิทธิพลสำคัญต่อพฤติกรรมของการไหล การไหลภายใต้ขอบเขตแบบขรุขระวัสดุเม็ดไหลไม่เป็นระเบียบส่วนแบบราบเรียบวัสดุเม็ดไหลเป็นระเบียบ

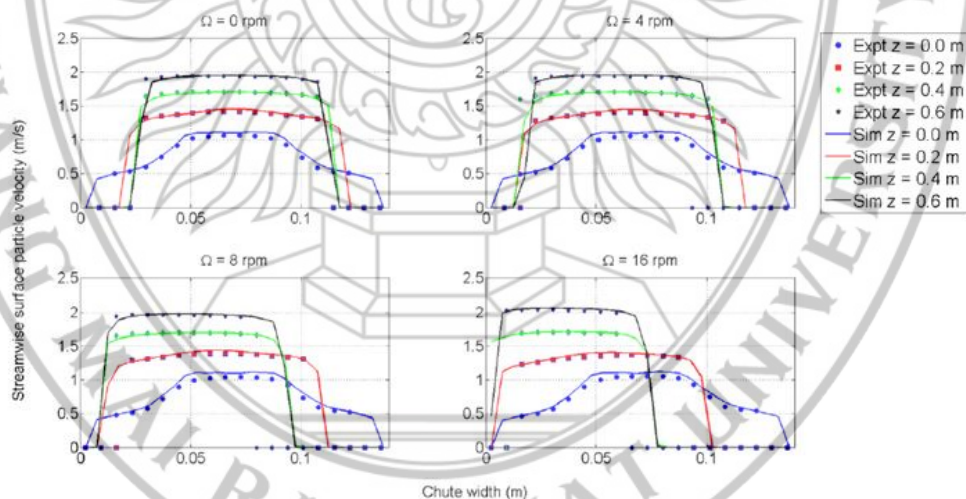
Ishida and Shirai (1979) ทำการศึกษาความเร็วในแต่ละชั้นของวัสดุเม็ดโดยใส่เม็ดแก้วขนาด 0.5 มม. ลงในภาชนะฮอปเปอร์แล้วปล่อยเม็ดแก้วลงรางที่เอียงทำมุม 23° กับพื้น พื้นด้านล่างของรางเอียงมีกระดาดทรายเบอร์ 40 ติดอยู่ด้านล่าง ผังด้านล่างข้างเป็นแก้ว วัสดุเรียงตัวเป็นชั้นไม่หนามาก จากนั้นทำการทดลองซ้ำ แต่เปลี่ยนมุมจาก 23° เป็น 25° , 28° , 30° ตามลำดับ และเปลี่ยนจากปล่อยวัสดุเรียงตัวชั้นบางๆให้เป็นการเรียงตัวแบบหนาๆแล้ววัดรายละเอียดและการกระจายความเร็วและนำไปเปรียบเทียบกับของเหลวเพื่อทำความเข้าใจอย่างง่าย พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้น เม็ดแก้วชั้นล่างจะมีการกระจายความเร็วน้อยกว่าเม็ดแก้วที่ผิวอิสระด้านบน เมื่อระยะความสูงรางเอียงเพิ่มขึ้น ความเร็วก็จะเพิ่มขึ้นตาม เมื่อเปลี่ยนแปลงตามระยะความสูงความเร็วเพิ่มขึ้นตามขนาดของมุมเอียงของรางเอียง การเปลี่ยนแปลงความเร็วไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้น เม็ดแก้วชั้นล่างจะมีการกระจายความเร็วน้อยกว่าเม็ดแก้วที่ผิวอิสระด้านบน



รูปที่ 2.8 แสดงความเร็ววัสดุเม็ดและความสูงของชั้นอนุภาคบนรางเอียง

(ที่มา: Ishida and Shirai, 1979)

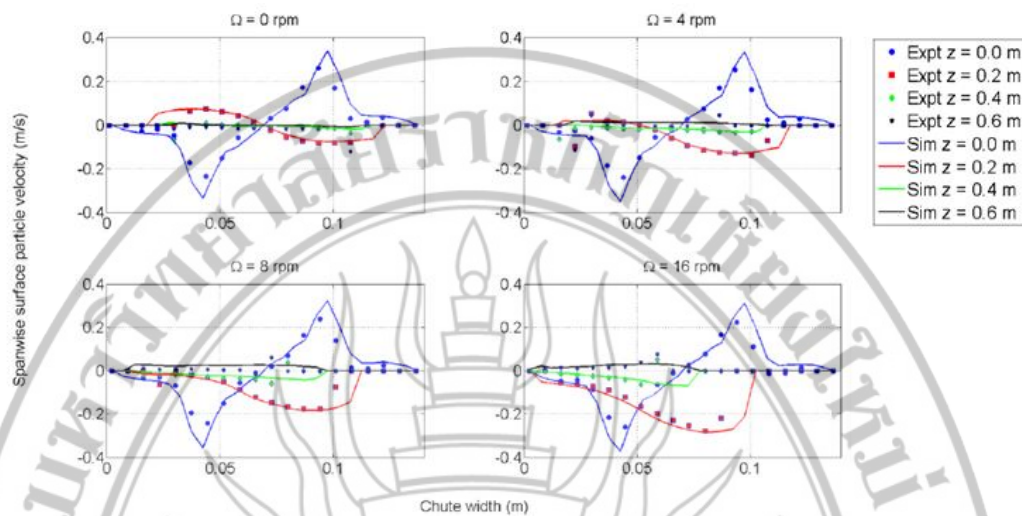
Shirsath et al. (2015) ได้ศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคทรงกลมไหลลงราง 3 มิติที่มีความเอียง สามารถกำหนดมุมได้โดยโมเดล Discrete Element Method (DEM) DEM เป็นเครื่องมือมาตรฐานสำหรับการศึกษาเชิงตัวเลข DEM ใช้สำหรับการจำลองการหมุนวัสดุเม็ดที่ไหลลงรางลาดเอียง พวกเขาเปรียบเทียบการจำลอง DEM กับการทดสอบโดยหมุนรางกึ่งทรงกระบอกให้มีอัตราเร็วคงที่แล้วจึงปล่อยอนุภาคทรงกลมแก้วไหลผ่านการหมุนรางกึ่งทรงกระบอกมีความเอียงที่มุมคงที่คือมุม 25 องศาและอัตราการไหลอย่างต่อเนื่อง ใช้เทคนิคการวัด Peak Inverse Voltage (PIV) ใช้วัดหาตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคของไหลโดยการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพ และ Planning target volume (PTV) ใช้วัดความเร็วเฉลี่ยพื้นผิวของอนุภาค จากสังเกตความเร็วการไหลของผิววัสดุเม็ดตามทิศความกว้างรางแนวการไหลว่าความเร็วจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ และการไหลแนวตรงกับการเบี่ยงเบนไม่ได้เกิดความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญดังรูปที่ 2.4 และพบว่ารูปแบบการไหลขึ้นอยู่กับมุมของราง อนุภาคได้รับแรงเหวี่ยงที่มีอัตราการหมุนเพิ่มขึ้นอนุภาคจะเคลื่อนไปทางด้านข้างมากขึ้น ยิ่งอัตราการหมุนเร็วขึ้นอนุภาคจะเคลื่อนที่เอนไปด้านข้างมากยิ่งขึ้นดังรูปที่ 2.5 จากการศึกษาตำแหน่งของวัสดุเม็ดตามความยาวราง ผลการทดลองปรากฏว่า การทดลองและการจำลองมีความใกล้เคียงกัน ยิ่งความเร็วการหมุนมาก วัสดุจะเข้าสู่แนวกลางได้น้อยลง การเปรียบเทียบการไหลของวัสดุเม็ดบนรางด้วยวิธีการทดลองและการจำลอง เพื่อหาความเร็วในการไหลบริเวณแนวตรงแนวเอน และตำแหน่งของวัสดุซึ่งผลทั้งหมดสอดคล้องกัน



รูปที่ 2.9 แสดงความเร็วของอนุภาคไหลตามความกว้างของรางเอียงที่มุม 25 องศา

อัตราการหมุนที่ 0, 4, 8 และ 16 รอบต่อวินาที

(ที่มา: Shirsatho, Paddinga, Clercxb and Kuipersa, 2015)



รูปที่ 2.10 แสดงความเร็ววัสดุเม็ดของแนวเฉตามความกว้างของราง
ที่อัตราการหมุนที่ 0, 4, 8 และ 16 รอบต่อวินาที
(ที่มา: Shirsatho, Paddinga, Clercxb & Kuipersa, 2015)

Nishimura, Kosugi, and Nakagawa (1993) ได้ทำการทดลองปล่อยอนุภาคทรงกลมลงรางลาดเอียงภายในห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของกระแสอนุภาคทรงกลม รางมีความยาว 5.4 เมตร กว้าง 0.08 เมตร มุมเอียงของรางถูกกำหนดให้แตกต่างกันตั้งแต่ 30 องศา ถึง 40 องศา และกำหนดอุณหภูมิที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0 ถึง 30 องศา บันทึกการเคลื่อนที่ของอนุภาคทรงกลมด้วยระบบวิดีโอความเร็วสูง ความเร็วและความหนาแน่นของทรงกลมได้รับอิทธิพลภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ โดยได้เลือกพื้นผิวรางในการตรวจสอบวิธีการไหลอนุภาคที่มีผลกระทบกับพื้นผิวราง ประการแรกเป็นการจำลองภายใต้เงื่อนไขขอบเขตแบบขรุขระ ประการที่สองเป็นการจำลองภายใต้เงื่อนไขขอบเขตแบบราบเรียบ พวกเขาพบว่าปริมาณมีความสำคัญเกี่ยวกับการไหลในทุกเงื่อนไข การไหลมีความเร็วและอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามความโน้มเอียงของราง อนุภาคทรงกลมที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่มีความเร็วที่ผันผวน เงื่อนไขขอบเขตมีอิทธิพลสำคัญต่อพฤติกรรมของการไหลของวัสดุเม็ด การไหลภายใต้ขอบเขตแบบขรุขระวัสดุเม็ดไหลไม่เป็นระเบียบส่วนแบบราบเรียบวัสดุเม็ดไหลเป็นระเบียบกว่าการไหลภายใต้ขอบเขตแบบขรุขระ

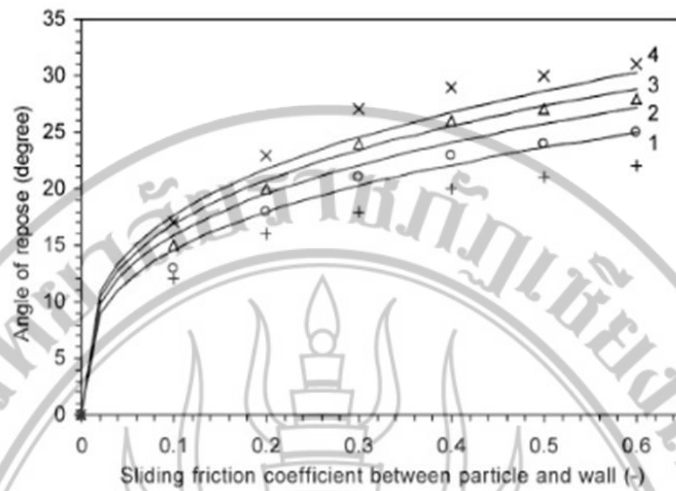
Zheng and Hill (1996) ได้ศึกษาเทคนิคการจำลองการไหลของโมเลกุลซึ่งถูกนำไปใช้กับแบบจำลองการไหลบนรางของวัสดุเม็ด ซึ่งความเร็วการไหลนั้นขึ้นอยู่กับความหนาแน่น ความลาดเอียงในมุมต่างๆของราง และความขรุขระของพื้นผิวราง โดยทั่วไปแล้วความเร็วของวัสดุบนรางจะไม่

เป็นเส้นตรง และมีความเร็วปลายมาก แต่ผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับพื้นเอียงให้ทำมุมขนาดเล็กจะทำให้การไหลช้าลงจนเกิดเป็นเส้นตรงได้ และทำให้วัสดุเม็ดมีความหนาแน่นต่ำ บริเวณใกล้กับพื้นผิวฐานของรางซึ่งค่าความหนาแน่นจากบริเวณนี้เองสามารถหาได้จากความเร่งบนพื้นผิวที่มีความขรุขระสรุปได้ว่าพื้นผิวที่มีความขรุขระนี้สามารถสร้างแรงเสียดทานและป้องกันการเบี่ยงเบนของการไหลได้

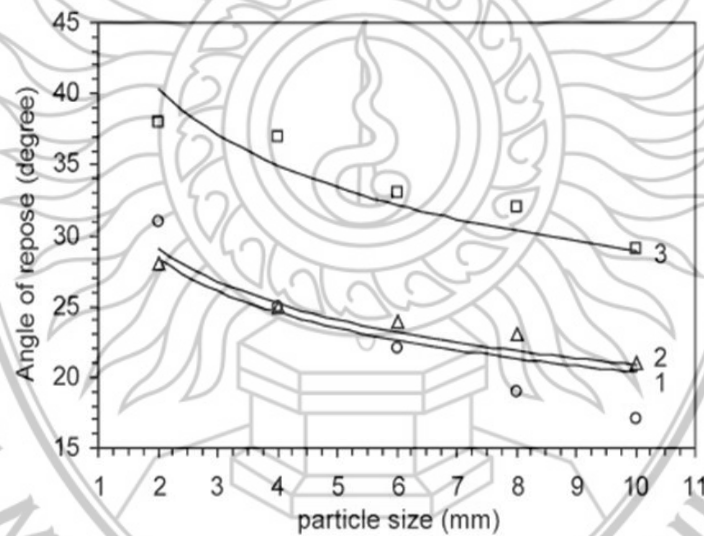
Zhou and Sun (2013) ทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ดบนรางเอียง โดยการใช้การสร้างแบบจำลองจากคอมพิวเตอร์ (Discrete Element Method: DEM), (three-dimensional: 3D) ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาคือความสูงในการไหล โดยคำนวณค่าจากนิยามของ Savage ที่เปลี่ยนแปลงวิธีการไหลภายในของวัสดุเม็ดช่วงระยะที่เกิดการไหลตามรางเอียง และความผันผวนของอนุภาคของแข็งในการไหล ซึ่งมีการตรวจสอบโดยใช้อุณหภูมิของวัสดุเม็ดโดยพิสูจน์แล้วว่าได้รับมาผลมาจากค่า Savage

Santomaso and Canu (2001) ได้ทำการทดลองตรวจสอบพฤติกรรมความหนาแน่นของวัสดุเม็ดโดยให้วัสดุเม็ดไหลบนรางเอียงที่มีพื้นผิวขรุขระและมีแรงเสียดทานภายใน ซึ่งในการทดลองนี้ไม่ได้ใช้อุณหภูมิคงที่ (ทรงกลม, แท่ง, แผ่น) แต่ใช้ผงกรดเอทิลีนไดอามีนเตตระอะซิติก (EDTA) ในการทดลอง ผลการทดลองพบว่า ช่วงที่มีความหนาแน่นของวัสดุเม็ดต่ำคือช่วงความเร็วปลายที่อยู่ใกล้ฐานของราง ประกอบไปด้วยอนุภาคที่ไม่ใช่ทรงกลมที่มีการกระจายตัวบนพื้นผิวที่ขรุขระ และชั้นความหนาที่สังเกตได้จากการคงที่และการไหลไปบนรางนั้นพบที่มีความแตกต่างกันเนื่องมาจากมุมที่ต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาจากระดับที่ไม่ใช่มิติจะเห็นว่าวัสดุเม็ดยิ่งไหลเป็นเส้นโค้ง มีนักการศึกษาหลายท่านได้ศึกษาเกี่ยวกับการไหลและการกองตัวของทราย ดังนี้

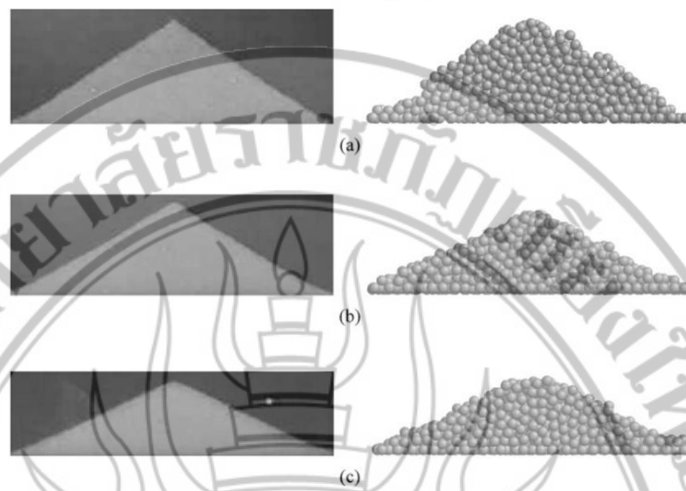
Zhoe, Xu, Yu, & Zulli (2002) พวกเขาได้นำเสนอผลการทดลองและการจำลองการศึกษา มุมกองของวัสดุเม็ดที่มีผิวหยาบขนาดเดียว เนื่องจากว่ามุมกองถือสมบัติเฉพาะซึ่งสำคัญที่สุดของวัสดุเม็ด โดยในการจำลองได้ใช้วิธีการ modified discrete element method วัสดุเม็ดที่ใช้คือ เม็ดแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5, 5, 1, 2, 5 และ 10 mm จำนวน 2,000 อนุภาค ในการทดลองนี้จะได้ศึกษาความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นๆ เช่น ลักษณะเฉพาะของเม็ดวัสดุ, สมบัติของวัสดุ, และรูปร่างของวัสดุ โดยนำวัสดุเม็ดใส่ลงในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมที่มีความกว้างและสูง 400 มิลลิเมตรเฉพาะส่วนครึ่งบนที่ถูกปิดกั้นอยู่ จากนั้นทำการเปิดให้วัสดุเม็ดไหลลงมาเหลือฐานรองครึ่งบนเฉพาะบริเวณกึ่งกลางกว้างรวม 300 มิลลิเมตรซึ่งจะทำบนการสั่น จากผลการศึกษาของเขาแสดงให้เห็นว่าภายใต้เงื่อนไขของการจำลองมุมกองจะได้รับอิทธิพลจากแรงเสียดทานแบบสั่นไถลและแบบกิ้งเป็นหลัก หากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบสั่นไถลและแบบกิ้งมีค่ามากซึ่งพบว่า ทำให้อาณาเขตของมุมกองมีค่ามากและไม่ได้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ แต่ถ้าหากเราเพิ่มขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุเม็ดหรือความหนาของภาชนะบรรจุ ก็จะทำให้ขนาดมุมกองลดลงซึ่งสามารถเห็นได้ดังรูปที่ 2.11, 2.12 และรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกองกับแรงเสียดทานกลิ้งและแรงเสียดทานลื่นไถล
(ที่มา: Zhoe, Xu, Yu&Zulli, 2002)



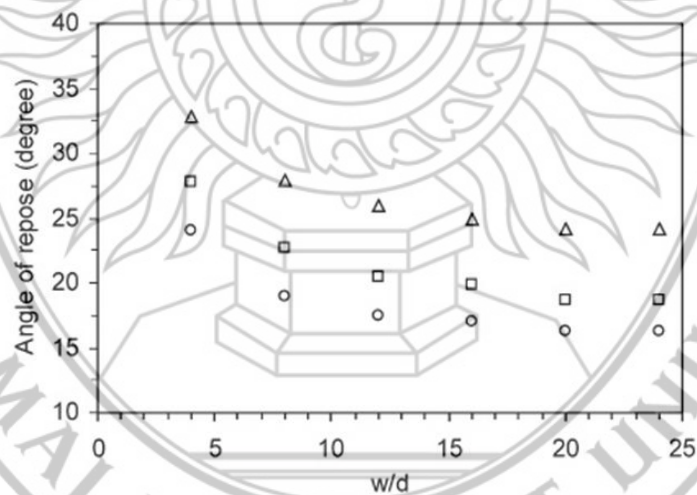
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของวัสดุเม็ดกับมุมกองตัว
(ที่มา: Zhoe, Xu, Yu, & Zulli, 2002)



รูปที่ 2.13 แสดงการกองของวัสดุที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน

(a) 4 มิลลิเมตร (b) 12 มิลลิเมตร (c) 20 มิลลิเมตร

(ที่มา: Zhoie, Xu, Yu, & Zulli, 2002)

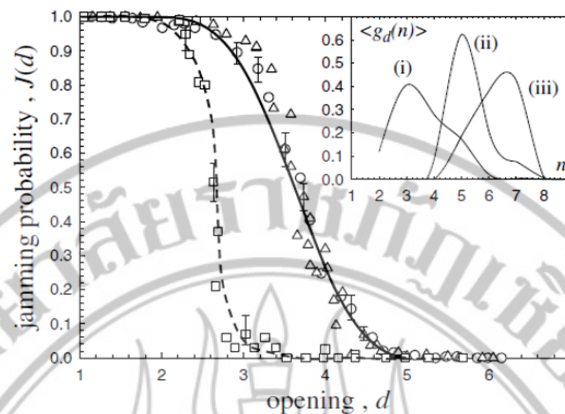


รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกองตัวกับขนาดของช่องปล่อยโดยมีขนาดช่องปล่อยต่างกัน

คือ 5, 10, 15, 20, 25 เซนติเมตร ตามลำดับ (ที่มา: Ottino & Khakhar, 2001)

จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 พบว่า เมื่อมีแรงเสียดทานเลื่อนไถลมากมุกองก็จะมีค่ามากขึ้น เมื่อเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางพบว่าเมื่อวัสดุมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมากขึ้นก็จะทำให้ มุกองตัวมีมุนน้อยลง และจากรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่า (a) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร (b) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร (c) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร พบว่าวัสดุ เม็ดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยจะให้มุกองตัวมากที่สุด นอกจากนี้รูปที่ 2.19 ยังพบว่า เมื่อใช้รูปเปิดที่ น้อยจะทำให้มุกองตัวมีมากขึ้นและเมื่อใช้รูปเปิดที่มากจะทำให้มุกองตัวมีน้อยลง ซึ่งนอกจากนี้ (Ottino & Khakhar, 2001) ได้ศึกษาเรื่องการผสม การกองตัวและการแยก ของวัสดุเม็ดเพื่อให้ทราบ คุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ ของวัสดุเม็ด เขาจึงได้ทำการทดลองโดยผสมวัสดุเม็ดที่มีความแตกต่างกันใน ด้านขนาดและความหนาแน่นมา 2 ชนิดด้วยกันในภาชนะเสมือน 2 มิติ พบว่าในการผสมกันของวัสดุ เม็ดทั้ง 2 ชนิดเมื่อปล่อยลงมาจะแยกตัวออกเป็นชั้น ๆ เรียกว่า การกองตัว ซึ่งเกิดจากการที่วัสดุเม็ดมี ความแตกต่างกันทั้งในเรื่องขนาดและความหนาแน่นและเมื่อหมุนคอนเทนเนอร์ ก็ยังมีรูปแบบการ กองตัวที่เป็นชั้นเหมือนเช่นเคย ดังนั้นเราจึงทราบว่าการกองตัวเป็นชั้นของวัสดุเม็ดเกิดจากการทำงาน ร่วมกันทั้ง 2 ระบบแรก ความหนาแน่นทำให้ทราบว่าวัสดุเม็ดที่มีความหนาแน่นมากจะตกลงถึงพื้น ก่อนและแทรกตัวด้วยวัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าและระบบที่สองคือด้านขนาดก็มีความสัมพันธ์ กันเพราะความหนาแน่นคือตัวบ่งบอกของปริมาตรและขนาดของวัสดุเม็ดอีกทั้งยังพบว่า การหมุน ภาชนะทำให้วัสดุเม็ดมีการแผ่กระจายออกจากจุดศูนย์กลางไปยังผนังด้านข้างอีกด้วย

To, Lai, and Pak (2001) ได้ทำการทดลองเรื่องการติดขัดของวัสดุเม็ดหนึ่งเพียงชนิดเดียวที่ ไหลผ่าน ฮอปเปอร์ที่มีลักษณะเป็นรูปตัว Y วัสดุเม็ดที่ใช้คือเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีลักษณะเป็นแผ่นดิสก์ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5 มิลลิเมตรและหนา 3 มิลลิเมตร จำนวน 200 อนุภาค จากผลการ ทดลองเขาพบว่าความน่าจะเป็นในการเกิดการติดขัดเมื่อมุมของผนังด้านข้างของฮอปเปอร์เท่ากับ 34° และ 60° เท่ากัน มีการเกิดการติดขัดมากกว่าเมื่อมุมของผนังด้านข้างเท่ากับ 75° โดยทั้งสามมุมเมื่อ ขนาดความกว้างของรูปเปิด (a) เพิ่มขึ้น ความน่าจะเป็นของการติดขัดจะลดลงเรื่อยๆ และเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อถึงความกว้างค่าๆการติดขัดที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าวัสดุเม็ดจะมีการชิดกันแล้วขัดตัวกันเป็นรูป พาราโบลาคว่ำ โดยวัดระยะจากผิวของวัสดุเม็ดที่เรียงตัวกันเกิดการขัดตัวกันเรียงจากด้านหนึ่งไปยัง อีกด้านนั้น พบว่าจะมีมากกว่าขนาดของรูปเปิดฮอปเปอร์ และเมื่อผนังด้านข้างของฮอปเปอร์มีขนาด 75° วัสดุเม็ดจะไหลลงก่อนจะเกิดการติดขัด ซึ่งกล่าวได้ว่าการติดขัดจะเกิดขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อมุมของ ผนังด้านข้างของฮอปเปอร์น้อยกว่า 75° อีกทั้งยังศึกษาความน่าจะเป็นในการการติดขัดของวัสดุเม็ด ชนิดผิวเรียบและผิวขรุขระเมื่อความกว้างของรูปเปิดฮอปเปอร์ต่างกัน พบว่าวัตถุที่มีผิวขรุขระจะมี อัตราการติดขัดที่มากกว่า แสดงให้เห็นว่าเมื่อแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ความน่าจะเป็นของการติดขัดจะ เพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 2.15 แสดงการติดขัดของวัสดุเม็ดและช่องปล่อยที่แตกต่างกัน ตามลำดับ
(ที่มา: To, Lai, & Pak, 2001)

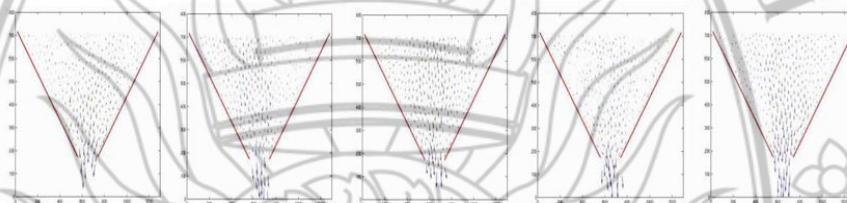
จากรูปพบว่า การติดขัดจะเกิดขึ้นดีเมื่อมีช่องเปิดที่น้อยและมีมุมฮอปเปอร์น้อยกว่า 75° นอกจากนี้ (Wassgren, Hunt, & Brennen, 2001) ได้ทำการทดลองปล่อยวัสดุเม็ดในภาชนะทรงกรวยโดยมีการสั่นในแนวตั้ง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองปล่อยวัสดุเม็ดลงไปในภาชนะทรงกรวยแล้วทำการสั่นขึ้นลงในแนวตั้งด้วยเครื่องสั่นซึ่งจะใช้ความถี่ตั้งแต่ 20-60 Hz พบว่ากลไกที่ทำให้เกิดการกองตัวกันที่ผิวอิสระด้านบนมาจากการทำงานร่วมกันของ กลไกที่ 1 คือ คลื่นความดันที่เกิดจากการส่งถ่ายพลังงานเข้าสู่เม็ดวัสดุด้านล่างขณะที่ภาชนะทรงกรวยเคลื่อนที่ขึ้น และ กลไกที่ 2 คือ แรงเสียดทานที่ผนังด้านข้างโดยคลื่นความดันจะผลักดันให้เม็ดวัสดุเคลื่อนที่ขึ้นเมื่อหน้าคลื่นผ่านไปถึง ในขณะที่แรงเสียดทานที่ผนังด้านข้างจะคอยฉุดเม็ดวัสดุบริเวณใกล้กับผนังด้านข้างไว้ จนในที่สุดเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ขึ้นไปถึงผิวอิสระเม็ดวัสดุบริเวณกลางภาชนะทรงกรวย จะเคลื่อนที่ขึ้นได้มากกว่าบริเวณด้านข้างทำให้ผิวอิสระด้านบนเกิดการลาดเอียงจากกลางภาชนะทรงกรวยลงไปด้วย ทำให้เกิดเป็นรูปร่างของการกองตัวกันขึ้นมาจะเกิดขึ้นก่อนการหมุนวนเสมอ โดยที่การกองตัวกันจะเกิดในช่วงที่ระบบเม็ดวัสดุกำลังได้รับการถ่ายเทพลังงานจากส่วนล่างของระบบ (ขณะค่าความเค้นกดสูง) หลังจากนั้นที่ผิวอิสระด้านบนก็จะเกิดการกองตัวกันขึ้นจนถึงขณะที่เกิดการหมุนวน หลังจากนั้นการกองตัวและการหมุนวนก็จะหายไป เป็นการหมด 1 รอบของการเกิดการกองตัวกันและการหมุนวน ต่อจากนั้นรอบการเกิดถัดไปก็จะเกิดขึ้นที่ประมาณ 3 คาบเวลาการสั่นของภาชนะบรรจุ แล้วเกิดต่อเนื่องกันไปเรื่อย ๆ การศึกษานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบภาชนะที่ใช้ใส่วัสดุเม็ดเล็กในงานอุตสาหกรรมได้เพื่อให้ภาชนะมีความแข็งแรงพอที่จะทนแรงกดจากวัสดุเม็ดเล็กในกระบวนการผลิตต่าง ๆ ที่ต้องมีการสั่นหรือเขย่าได้ และ Christakis et al., (2006) ได้ศึกษาว่ารูปแบบของการไหลการเติมลงในคอนเทนเนอร์ โดยใช้พลาสติกชนิดหนืด เพื่อดูว่าปัจจัยอะไรที่มีผลต่อการไหล ซึ่ง

แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ตอน โดยการทดลองตอนที่ 1 ศึกษาผลการทดลองเปรียบเทียบกับทฤษฎี ซึ่งจะทดสอบตึกชนิดหนึ่งลดลงเพียงรูเปิดเพียงรูเดียวด้วย Axial jet ลงภาชนะเสมือน 2 มิติ ทำให้ทราบว่าแบบจำลองการไหลกับผลการทดลองมีความใกล้เคียงกัน โดยเมื่อเวลาผ่านไปจะเห็นได้ว่าเวกเตอร์ความเร็วค่อยๆ ลดลงจากช่วงเวลาแรก ช่วงเวลาที่ใช้คือ 5, 10, 18, 25, 70 และ 300 s และการทดลองตอนที่ 2 ศึกษาของแรงเสียดทานภายใน ซึ่งจะศึกษา 30, 45 และ 60 องศา จึงทราบว่าเมื่อใช้มุมที่แตกต่างกันจะทำให้แรงเสียดทานอากาศภายในที่มากกระทำต่อของเหลวชนิดหนึ่งมีมุมกองที่แตกต่างกันไป เมื่อแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นมุมกองก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกันและสุดท้ายการทดลองตอนที่ 3 ศึกษา การแยกกันของพลาสติกชนิดหนึ่งทั้งชนิดหยาดและละเอียด โดยนำไปผสมกันแล้วเทลงไปในภาชนะ โดยแบ่งรูเปิดเป็นสองรูแล้วเทของเหลวชนิดหยาดและชนิดละเอียดลงไปคนละรูเปิด พบว่าพลาสติกที่มีความละเอียดจะแยกตัวและเกิดเป็นมุมกองที่สูงกว่าทรายชนิดหยาด เมื่อเวลาผ่านไปมุมกองก็จะค่อยๆ ลดลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการกองตัวของการไหล มีหลายปัจจัย นั่นก็คือ มุมกองภายใน แรงเสียดทานภายใน ของเหลวชนิดหยาดและชนิดละเอียด รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการทดลองอีกด้วย

Chukwu and Akande (2007) พวกเขาได้พัฒนาเครื่องมือเพื่อใช้ในการวัดมุมกองของวัสดุเม็ดที่ถูกนำมาใช้ในทางอุตสาหกรรม ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดขนาดของวัสดุเม็ดทั้งก่อนและหลังได้รับความชื้น ผลการใช้เครื่องมือพบว่าในวัสดุต่างชนิดกันจะมีความสูงของกองวัสดุต่างกัน ดังนั้นมุมกองจึงเป็นอัตราส่วนของความสูงของกองวัสดุต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของฐาน ทั้งนี้วัสดุที่ผิวหยาดทำให้มีความสูงของกองน้อย ดังนั้นขนาดมุมกองจึงน้อยตาม ในทางตรงกันข้ามถ้า วัสดุที่มีเรียบวัสดุจะเรียงตัวได้ดี มีความสูงของกองและขนาดมุมกองมาก

สกนธ์ คล่องบุญจิต, (2553) ศึกษาปรากฏการณ์การเกิดการกองตัวกันในระบบ 2 มิติ ของวัสดุเม็ด ภายใต้การสั่นแนวตั้งโดยจำลองเหตุการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบวัสดุเม็ดนิ่ม พบว่าผลจากการจำลองเหตุการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์พบว่ากลไกที่ทำให้เกิดการกองตัวกันที่ผิวอิสระด้านบนมาจากการทำงานร่วมกันของ กลไกที่ 1 คือ คลื่นความดันที่เกิดจากการส่งถ่ายพลังงานเข้าสู่เม็ดวัสดุด้านล่างขณะที่กล่องเคลื่อนที่ขึ้น และ กลไกที่ 2 คือ แรงเสียดทานที่ผนังด้านข้างโดยคลื่นความดันจะผลักดันให้เม็ดวัสดุเคลื่อนที่ขึ้นเมื่อน้ำคลื่นผ่านไปถึง ในขณะที่แรงเสียดทานที่ผนังด้านข้างจะคอยหยุดเม็ดวัสดุบริเวณใกล้กับผนังด้านข้างไว้ จนในที่สุดเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ขึ้นไปถึงผิวอิสระเม็ดวัสดุบริเวณกลางกล่องจะเคลื่อนที่ขึ้นได้มากกว่าบริเวณด้านข้างทำให้ผิวอิสระด้านบนเกิดการลาดเอียงจากกลางกล่องลงไปด้วย ทำให้เกิดเป็นรูปร่างของการกองตัวกันขึ้นมา

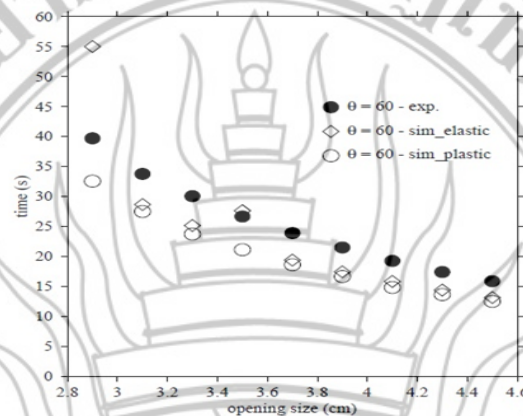
Cheng Jiaming (2012) พวกเขาได้นำเสนอผลการทดลองเรื่องมุมของช่องปล่อย ฮอปเปอร์ที่มีผลต่อความเร็วในการไหลของวัสดุเม็ด ซึ่งวัสดุเม็ดที่ใช้คือเม็ดที่มีความยืดหยุ่น ที่มีขนาดเท่ากัน โดยในการทดลองนี้จะทำการไหลในฮอปเปอร์ที่มีลักษณะเป็นรูปตัว ดั้งรูปที่ 2.3 โดยจะกำหนดให้ขนาดแตกต่างกันทั้ง 5 มุม ได้แก่มุม 0, 15, 30, 45 และ 60 และมีขนาดช่องปล่อย ฮอปเปอร์ตั้งแต่ 2-5 เซนติเมตรซึ่งในการทดลองนี้จะเป็นการจำลองการไหลด้วยคอมพิวเตอร์และมีการพลิกกลับไปมา ซึ่งจะบันทึกภาพโดยคอมพิวเตอร์แล้วทำเป็นแบบจำลองดังรูปที่ 2.4 จากการทดลองเขาพบว่ายิ่งช่องปล่อยกว้างขึ้นก็ทำให้อัตราเร็วการไหลดีขึ้นและที่มุมฮอปเปอร์ 60 องศาให้ความเร็วในการไหลมากที่สุดจากนั้นเมื่อนำภาพที่ได้จากแบบจำลองมาศึกษาพบว่ามวลมีผลต่อความเร็วและเวลา อีกทั้งยังทำให้เกิดการติดขัด ซึ่งตรงกับทฤษฎีของ Beverloo ดังนี้



รูปที่ 2.16 แสดงความเร็วในการไหลของอนุภาคจากบนลงล่าง
(ที่มา: Jiaming Cheng, 2012)

ดังรูปที่ 2.18 พบว่าที่มุมฮอปเปอร์ 60 องศาเมื่อใช้ช่องปล่อยน้อยก็ใช้เวลาามาก และเมื่อใช้ช่องปล่อยใหญ่จะใช้เวลา น้อยเพราะว่าถ้าช่องปล่อยมีขนาดใหญ่ก็ทำให้มีการติดขัดน้อยลง การไหลก็จะดีขึ้น แต่ถ้าช่องปล่อยมีขนาดเล็กการติดขัดมากขึ้นการไหลก็จะไม่ดี (Cheng Jiaming, 2012) และนอกจากนี้ Wang & Y.Ooi, (2015) ได้ศึกษาว่าแบบจำลองการไหลที่ไม่ต่อเนื่องในลักษณะทรงกรวยโดยการปล่อยวัสดุเม็ดแบบอิสระ มีวิธีการทดลอง 2 แบบคือแบบจำลองการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง Discrete modeling and finite Element Method (DEM) และแบบจำลองแบบต่อเนื่อง Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE formulation) สำหรับแบบจำลองการไหลแบบต่อเนื่องทำให้เราสามารถมองเห็นการไหลบนคอนเทนเนอร์อย่างชัดเจนและแบบจำลองแบบไม่ต่อเนื่องจะไปรบกวนการไหลของแบบต่อเนื่อง เราต้องการศึกษาเรื่องความดันของไหล รูปแบบของการไหลและอัตราการไหล โดยใช้แบบจำลองทั้งสองเพื่อเปรียบเทียบผลที่ดีกว่า

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองการไหลแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) ให้ผลน้อยกว่าแบบจำลองแบบต่อเนื่อง (ALE formulation) เมื่อมีการไหลจากความดันของผนังด้านข้างจะมีความดันคงที่ ส่วนแบบ Discrete modeling and finite Element Method (DEM) มีผลดีต่ออัตราการไหลของวัสดุเม็ดที่มีความดันไม่คงที่



รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์เวลากับช่องปล่อยที่แตกต่างกัน
(ที่มา: Jiaming Cheng, 2012)

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดสรุปได้ว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดมูกอง ได้แก่ มุมของผนังฮอปเปอร์ ขนาดของรูเปิดฮอปเปอร์ ซึ่งรวมทั้งอัตราส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุเม็ดต่อขนาดรูปล่อยของฮอปเปอร์ ความเร็วในการไหลในภาชนะฮอปเปอร์ การสั่น ซึ่งล้วนมีความสัมพันธ์กันดังที่จะได้ศึกษาต่อไป

ดังนั้น การศึกษางานวิจัยนี้ได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อสามารถนำมาตรวจสอบผลการของวิจัยเพื่อสนับสนุนและเปรียบเทียบข้อมูลต่าง ๆ (Heinrich M. Jaeger et al., 1996) ได้ศึกษาหาวัสดุเม็ดที่อยู่รอบตัวเราและแพร่หลายในโลก ซึ่งมันมีคุณสมบัติที่แตกต่างจากวัสดุอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ ของแข็ง,ของเหลว และก๊าซ เป็นต้น ในการศึกษาี้เขาเลือกบางส่วนของคุณสมบัติพิเศษของวัสดุเม็ดและอธิบายถึงการพัฒนาางานวิจัยที่มีและล่าสุด (James B. Knight et al., 1996) ได้ศึกษาวัสดุเม็ดในภาชนะทรงกระบอกที่มีการควบคุมความชื้น และมีการสั่นในแนวตั้งอย่างต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่อง ความรุนแรงของการสั่นมีเพียงพอที่จะทำให้วัสดุเม็ดไหลขึ้นในบริเวณใจกลางของภาชนะบรรจุและตกลงอยู่ในกระแสน้ำไหลตามผนัง พบว่า การทดลองการเคลื่อนไหวยาวนี้ในถังสามมิติเพื่อความหลากหลายของวัสดุบรรจุและพารามิเตอร์การสั่นสะท้อนโดยใช้เทคนิคการรอยของอนุภาคและโดยการรวมการจับวัตถุโดยใช้แม่เหล็ก วิธีการเหล่านี้เรามีความโดดเด่นทั้งในเชิงลึก ซึ่ง

ต้องอาศัยรัศมีและความเร็วของการไหลในแนวตั้ง พบว่าความเร็วของการไหลขึ้นไปตามแกนกระบอก สิ้นสุดที่พื้นผิวด้านบนวัสดุจำนวนมากจะเป็นอิสระ ทำให้การไหลของวัสดุเม็ดลดลงและการเปลี่ยนแปลงทิศทางเป็นผนังภาชนะที่ภายในได้รับการถ่ายทอดทำให้มีรัศมีประมาณหนึ่ง โดยเป็น ฟังก์ชัน โคไซน์ ผลการวิจัยเหล่านี้เขานำเสนอรูปแบบที่เรียบง่ายของการพาความร้อนเม็ดสอดคล้อง กัน (N. Brutally et al., 2003) ได้ศึกษาการแยกกันของเม็ดตะกั่วและเม็ดกระจกเม็ดทรงกลมขนาด เท่ากัน วัสดุเม็ดทั้งสองแยกออกจากกันเป็นบริเวณที่เต็มไปด้วยเม็ดแก้วและบริเวณที่เต็มไปด้วยเม็ด ตะกั่ว ภายใต้การสั่นในแนวตั้ง [Brutally, วิทยาศาสตร์ 295, 1877 (2002)] การศึกษานี้พบว่า ผลกระทบการแยกวัสดุเม็ดทั้งสองคือ เม็ดตะกั่วและเม็ดแก้ว ที่มีอัตราส่วนขนาดของเม็ดแก้ว และ ปัจจัยต่างๆมีให้หลากหลาย พวกเขาจึงสังเกตแยกเป็นบริเวณที่เป็นเม็ดตะกั่วและเม็ดแก้วเกือบจะ แยกออกจากกันเป็นขอบเขตที่ชัดเจน และทั้งรูปแบบบริเวณชั้นด้านบนที่เต็มไปด้วยเม็ดแก้วถูกคั่นกลาง ระหว่างชั้นที่เต็มไปด้วยเม็ดตะกั่ว ทำให้การหมุนวนในแต่ละชั้น แต่ไม่ได้ทำให้เกิดการผสมของทั้งสองวัสดุ นั้นการแยกเป็นสองบริเวณนั้นจะยังคงมีอยู่ ในที่ที่มีความหลากหลายของการสั่น ทำให้รูปแบบของ พฤติกรรมของวัสดุที่มีอัตราส่วนขนาดเม็ดแก้วและเม็ดตะกั่วที่แตกต่างกันส่งผลทำให้กลไกการแยกที่ แตกต่างกัน ในขณะที่การทดลองใช้ที่มีการแยกอากาศออกจากกระบอก วัสดุทั้งสองยังจะถูกผลักดันให้ เคลื่อนที่เนื่องจากการสั่นสะเทือน (Martin, et al., 2003) ได้ศึกษาผลกระทบจาก Brazil nut effect ซึ่งการเพิ่มขึ้นของวัสดุเม็ดที่มีขนาดใหญ่แทรกอยู่ในวัสดุเม็ดเล็กกว่าในระบบสั่นสะเทือนในแนวตั้ง ของวัสดุที่มีขนาดเล็ก พบว่าวัสดุทั้งสองวัสดุเม็ดใหญ่ที่มีอยู่ในวัสดุเม็ดเล็ก และการสั่นสะเทือนจะทำให้ เกิดการหมุนวนของวัสดุเม็ดเล็กได้ การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดใหญ่ก็พบว่าได้รับอิทธิพลจากความชื้น ของอากาศภายในช่องว่างระหว่างวัสดุเม็ดเล็กเนื่องจากเกิดประจุไฟฟ้า จึงมีการศึกษาปริมาณของ ความชื้นสัมพัทธ์สูงและประจุไฟฟ้าสูงที่มีผลกระทบทำให้การชะลอตัวในการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด ใหญ่ เพราะการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่จะลดอัตราการเคลื่อนที่ของ วัสดุเม็ดใหญ่เร็วขึ้น โดยมีความชื้นสัมพัทธ์ในระบบประมาณ 55% และเนื่องจากนี้ พบว่าการลดลง และการเพิ่มขึ้นของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวัสดุเม็ดใหญ่ ที่ความหนาแน่นของวัสดุเม็ดยิ่งแตกต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขการควบคุมความชื้นและทำให้ใช้เวลาในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นหรือเร็วขึ้น เมื่อความ หนาแน่นของวัสดุเม็ดใหญ่มีประมาณครึ่งหนึ่งของความหนาแน่นของวัสดุเม็ดเล็ก ซึ่งแนวโน้มที่ น่าสนใจนี้เป็นรูปแบบโดยความกีดกันการเคลื่อนไหวยของวัสดุเม็ดเล็กคล้ายกับสถานะก๊าซ ที่ถูก สั่นสะเทือนในแนวตั้ง ทำให้สังเกตเห็นว่ารูปแบบเบื้องต้นจะแสดงให้เห็นว่ากระแสก๊าซที่เกี่ยวข้องกับการ เปลี่ยนค่าระดับความดันที่มีอย่างจำกัด การเคลื่อนไหวยของวัสดุเม็ดเล็กจะเคลื่อนมากขึ้นกว่าวัสดุเม็ด ใหญ่ และมีความเคลื่อนที่ที่ต่างต่างนี้ ซึ่งเปรียบเสมือนรูปแบบที่มีแรงหนุนลอยน้ำที่วัสดุเม็ดใหญ่ที่เป็น ผลมาจากแรงกดดันทางลาดของวัสดุเม็ดเล็ก (Massimo, Antonio, & Mario, 2005) ได้ศึกษาความ ไม่มีเสถียรภาพในกลศาสตร์ของไหลที่มีความรับผิดชอบสำหรับความหลากหลายของปรากฏการณ์ที่

สำคัญและพบบ่อย เช่น คลื่นบนผิวน้ำทะเลหรือ กระแสวนในการไหล ในวัสดุเม็ดความเสถียรภาพ พลังเพิ่งเริ่มต้นที่จะค้นพบ ว่า การแสดงให้เห็นโดยการจำลองกลไกของโมเลกุลอยู่แบบความไม่แน่นอน เทียบกับวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวนอนซึ่งนำไปสู่การก่อตัวของรูปแบบเป็นลายที่ขึ้นส่วน โดยการแยก ได้ตรวจสอบคุณสมบัติของความไม่แน่นอน เช่น คล้ายกับ Kelvin-Helmholtz และแสดงให้เห็นว่ามีการเชื่อมต่อไปสู่การพัฒนารูปแบบในการไหลวนของวัสดุเม็ดและการแยก (Fei Fang Chung et al., 2008) ได้ศึกษาพฤติกรรมของวัสดุบุกรุกในวัสดุพื้นที่เป็นวัสดุเม็ดเล็ก ๆ เหมือนกันที่มีอยู่ในจานรูปทรงกลมแบนซึ่งอยู่ภายใต้การสั่นสะเทือนเป็นวงกลม พวกเขาพบว่า วัสดุบุกรุกจะเคลื่อนคล้ายเป็นเกลียวแบบวงปิดรอบ ๆ จาน โดยการเคลื่อนที่เป็นผลมาจากทั้งการย้ายที่และการหมุนของวัสดุเม็ดในจาน วัสดุบุกรุกย้ายเป็นเกลียววงกลมมีรัศมีในขณะที่หมุนด้วยความเร็ววงที่ด้วยความเคาะไปยังศูนย์กลางของมวลของทั้งกลุ่มของวัสดุเม็ด ความเร็วการหมุนเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดและผนังภาชนะบรรจุและกำหนดโดยคลื่นสั่นสะเทือนและจำนวนของวัสดุเม็ด ทิศทางการย้ายถิ่นจะขึ้นอยู่กับขนาดสัดส่วนและอัตรามวลของวัสดุบุกรุกที่วัสดุเม็ดพื้น ความเร็วการย้ายถิ่นเป็นค่าคงที่สำหรับการย้ายที่ออกไป แต่จะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อวัสดุบุกรุกย้ายไปยังศูนย์กลางของมวลของระบบทั้งหมด (Vicente Garzó, 2008) ได้ศึกษาเกณฑ์การแยกออกจากกันตามสมการยึดหยุ่นการเคลื่อนไหว เพื่อแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างผลกระทบ Brazil nut effect (BNE) และผลย้อนกลับของ Brazil nut effect (BNE) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันของระบบ ในทางตรงกันข้ามกับความพยายามหาทางทฤษฎีก่อนหน้านี้วิธีการที่ไม่ได้ จำกัด อยู่กับกรณีเกลี่ยยึดหยุ่นที่คำนึงถึงอิทธิพลของการไล่ระดับสีทั้งความร้อนและแรงโน้มถ่วงและมีผลต่อการใช้ค่าความหนาแน่นปานกลาง เขาแสดงโดยรูปแบบของแผนภาพขั้นตอนสำหรับการเปลี่ยนแปลง BNE-RBNE ขึ้นอยู่กับค่าความไวของแรงโน้มถ่วงที่เกี่ยวข้องกับการไล่ระดับความร้อนเพื่อที่จะเป็นไปได้ที่จะสลับไปมาระหว่างทั้งสองแบบ สำหรับค่าที่กำหนดของมวลและขนาดอัตราส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของการชดเชยแทนที่ และส่วนปริมาณของแข็ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิทธิพลของการกระจาย collisional ที่แยกจากกันเป็นสิ่งที่สำคัญมากขึ้นเมื่อการไล่ระดับความร้อนที่ทำให้แยกได้ดีกว่าค่าแรงโน้มถ่วงขีดจำกัด ตรงข้ามการวิเคราะห์ในปัจจุบันที่มีก่อนหน้านี้ในกรณีที่ ค่าแรงโน้มถ่วงขีดจำกัดที่มีผลลดลง และมีความสอดคล้องกับผลการวิจัยของผลการทดลองบางอย่างที่ผ่านมา (Yoël & Olivier, 2008) ได้ศึกษาเพื่อตรวจสอบวัสดุเม็ดที่มีกระแสหมุนวนหนาแน่นมีพลังยึดเหนี่ยว การไหลหนาแน่นมีความโดดเด่นยิ่งขึ้น จากนั้นได้เน้นที่การวิเคราะห์หิมตัวอย่างยิ่งเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและอัตราการเฉือน พบว่า ผลมาจากการทดลองและแบบจำลองในการกำหนดค่าที่แตกต่างกันสนับสนุนคำอธิบายในแง่ของกฎ ที่เป็นส่วนประกอบเสียดทานและความหนืดเชิงพลาสติก จากนั้นศึกษาข้อจำกัด ของการไหลวนเชิงประจักษ์นี้ในแง่ของวิธีการทางทฤษฎี ซึ่งในปัจจุบันเราวิธีการเชิงลึกโดยเฉลี่ยในเวลาสั้นๆ ที่พัฒนาขึ้นสำหรับผิวอิสระของกระแสหมุนวนของวัสดุเม็ด (J.J. Wylie & Sun,

2008) ได้ศึกษาและพิจารณาระบบที่ประกอบด้วย วัสดุเม็ดสองประเภทที่แตกต่างกัน เช่น รัศมีแตกต่างกัน แต่มีความหนาแน่นเท่ากับ ทั้งแรงโน้มถ่วงของวัสดุและแรงลากเป็นเส้นตรงจากของเหลว พวกเขาจะเริ่มต้นกับแรงสั่นสะเทือนที่มีขอบเขต, ที่มีความถี่สูง และเพิ่มพลังงานที่เพียงพอว่าอนุภาคที่อยู่ใกล้บริเวณกลายเป็นกองสูง สำหรับอัตราการให้พลังงานในระดับปานกลาง แสดงให้เห็นว่าวัสดุเดี่ยวขนาดใหญ่ที่มีเป็นจำนวนมากเข้ามาแทนวัสดุขนาดเล็กจะย้ายไปอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความสูงคงที่และยังคงอยู่หนึ่งประมาณหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุขนาดใหญ่จะไม่เข้ามาเป็นฐานการสั่นสะเทือน หากมีจำนวนมากของวัสดุขนาดใหญ่แล้วพฤติกรรมเช่นนี้นำไปสู่การแยกความแตกต่างมากในการที่วัสดุขนาดใหญ่จะถูกคั่นกลางระหว่างสองชั้นของวัสดุขนาดเล็ก ทำให้เห็นว่าสิ่งนี้เกิดเป็นผลกระทบโดยตรงของวัสดุที่ไม่สมดุล และพัฒนารูปแบบปรากฏการณ์ง่าย ๆ ที่จะช่วยให้การคาดคะเนความสูงที่ที่ชั้นคั่นกลางเกิดขึ้นได้ (Sakon Klongboonjit et al., 2008) ได้ศึกษาการเคลื่อนไหวยาวของวัสดุเม็ดพื้น ในระบบการสั่นในแนวตั้งแบบไม่ต่อเนื่อง แต่เกิดขึ้นเฉพาะในช่วงสั้น ๆ ส่วนหนึ่งของวงจรที่ซ้ำ ๆ กว่า 3 รอบระยะเวลาของการสั่นสะเทือน การไหลวนมีการไหลประสานเป็นชุดของคลื่นที่เผยแพร่ผ่านวัสดุพื้น คลื่นการบีบอัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ด้านล่างภาชนะมีการผลักดันให้วัสดุเม็ดพื้นด้านล่างขึ้นและการขยายตัวของสองคลื่น: คลื่นการขยายตัวแบบที่ 1 ที่เป็นภาพสะท้อนของคลื่นการบีบอัด และการขยายตัวของคลื่นชนิดที่ 2 ที่รูปแบบเป็นภาชนะด้านล่างเคลื่อนห่างจากด้านล่างของวัสดุพื้น การไหลวนเพียงแต่เป็นที่สังเกตหลังจากคลื่นแบบที่ 1 การขยายตัวได้ผ่านการไหลวนผ่านโซนคลายความเครียดในวัสดุพื้นและจนเป็นอิสระที่จะย้ายไป อย่างไรก็ตามการเคลื่อนไหวยาวถูกกักขังอยู่ในบริเวณในรูปแบบทั้ง 2 คลื่นและการไหลวนค่อย ๆ หายไปเป็นชนิดที่ 2 ต่อไป