

ผลแรงเสียดทานของผนังต่อพฤติกรรมการพาในกลุ่มวัสดุเม็ด
ภายใต้การสั่นในแนวตั้ง

EFFECTS OF WALL FRICTION ON CONVECTION BEHAVIOR
IN GRANULAR MEDIA UNDER VERTICAL VIBRATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการสอนวิทยาศาสตร์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

พ.ศ. 2562

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลแรงเสียดทานของผนังต่อพฤติกรรมการพาในกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้
การสั่นในแนวดิ่ง
ผู้วิจัย สุภารัตน์ หาญขำ
สาขาวิชา การสอนวิทยาศาสตร์
แขนงวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก อาจารย์ ดร.ภาณุพัฒน์ ชัยวร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศรี ประมุขกุล

คณะกรรมการสอบ

..... ประธานกรรมการสอบ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อธิชัย ปรีชาวุฒิพงศ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ภาณุพัฒน์ ชัยวร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศรี ประมุขกุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการสอนวิทยาศาสตร์

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมลฉัตร พลวัน)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลแรงเสียดทานของผนังต่อพฤติกรรมการพาในกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้
การสั่นในแนวดิ่ง
ผู้วิจัย สุภารัตน์ หาญขว้าง
สาขาวิชา การสอนวิทยาศาสตร์
แขนงวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.ภาณุพัฒน์ ชัยวร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศรี ประมุขกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพาบนกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง อนุภาคทรงกระบอกที่เลือกใช้ในการทดลองเป็นไม้เนื้อแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร จำนวน 460 และ 115 อนุภาค ตามลำดับ จะถูกนำมาจัดเรียงแบบสุ่มและแบบชั้นลงในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีแรงเสียดทานผนังที่แตกต่างกัน ได้แก่ อะคริลิก กระดาษฟอยล์ ผ้ากำมะหยี่ และกระดาษทราย เบอร์ 400 จากนั้นสั่นในแนวดิ่งด้วยแอมพลิจูดในการสั่นเท่ากับ 5 มิลลิเมตร ความถี่ 12.21 รอบต่อวินาที และความเร่งไร้มิติเท่ากับ 3 ผลการทดลองพบว่าวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านบนกลุ่มวัสดุเม็ด จะค่อย ๆ เคลื่อนที่มาทางด้านข้างของภาชนะ แล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะและเคลื่อนไปด้านบนของภาชนะอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” โดยวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะ จะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะตามทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาภาชนะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะทิศตามเข็มนาฬิกา ในกรณีที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าเท่ากับ 0.79 และ 0.825 ทำให้วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ได้เร็วและทำให้พลังงานจลน์ค่ามากด้วย ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าเท่ากับ 0.376 และ 0.432 วัสดุเม็ดที่อยู่บนกลุ่มวัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ลงด้านข้างแต่ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณศูนย์กลางกลุ่มวัสดุเม็ดได้ และเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิมหรือแทบจะไม่เคลื่อนที่ เนื่องจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าน้อย วัสดุเม็ดจึงเคลื่อนที่ได้ช้า ทำให้พลังงานจลน์มีค่าน้อย

คำสำคัญ: วัสดุเม็ด, การพา, สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, การสั่นในแนวดิ่ง

The title : Effects of Wall Friction on Convection Behavior in Granular Media
under Vertical Vibration

The author : Suparat Hankwang

Program : Master of Science Program in Science Teaching

Department : Physics

Thesis Advisors : Dr.Panupat Chaiworn Chairman
: Assistant Professor Dr. Pensri Pramukkul Member

ABSTRACT

The research aimed to study the effects of the wall friction on the convection behavior on the granular materials under vertical vibration. The cylindrical particles used in the experiment were made from hard wood with 6 mm and 12 mm in diameter and 6 cm in length. There were 460 and 115 particles respectively, which were randomly and layered placed inside rectangular containers with different wall friction such as acrylic, foil, velvet and No.400 sandpaper. The granular materials were vertically vibrated with the amplitude of 5 mm, the frequency of 12.21 rounds per second and dimensionless acceleration of 3. The results revealed that the granular materials were on granular media. After that the granular materials slowly moved to the side, center and top of the containers again. The movement in one cycle is called “convection”. The materials on the left moved sideways in anticlockwise direction and those on the right moved sideways in the clockwise direction. In case of friction coefficient between granular materials and wall being 0.79 and 0.825, the granular materials could move fast causing kinetic energy. When the friction coefficient between granular materials and wall is 0.376 and 0.432, the materials would move to the side and were unable to move to the center. Their movement was static or they hardly moved due to low friction coefficient between granular materials and wall, making the materials move slowly and yielding low kinetic energy.

Keywords : Granular Material, Convection, Coefficient of Friction, Vertical Vibration

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร.ภาณุพัฒน์ ชัยวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศรี ประมุขกุล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอดจนสำเร็จเรียบร้อย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิชัย ปรีชาวุฒิพงศ์ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือในด้านในทุก ๆ ด้านในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ให้ความอนุเคราะห์ สนับสนุนในด้านสถานที่และอุปกรณ์ที่ใช้ และขอขอบคุณผู้ที่เกี่ยวข้องในด้านอื่น ๆ ที่ไม่ได้ กล่าวนามที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ประโยชน์อันพึงได้จากการศึกษาในครั้งนี้ ขอให้เป็นกตเวทิตาแต่บิดา มารดา ครอบครัว ตลอดจนผู้เขียนหนังสือและบทความต่าง ๆ ที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยจนสามารถทำให้วิจัยนี้สำเร็จได้ ด้วยดี และเป็นตัวอย่างการศึกษาสำหรับผู้สนใจต่อไป

สุภารัตน์ หาญขว้าง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ข
ABSTRACT	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญภาพ	ช
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
นิยามศัพท์เฉพาะ	3
สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิจัย	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
วัสดุเม็ค	5
การพา	8
แรงเสียดทาน	10
พลังงานจลน์	17
การสั่นในแนวดิ่ง	19
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
3 วิธีดำเนินการวิจัย	31
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	31
วิธีดำเนินการวิจัย	32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	37
ตอนที่ 1 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกับ ผนังชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีหามุมเอียง	37
ตอนที่ 2 การศึกษาพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่น ในแนวดิ่ง	39
5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	56
สรุปผลการทดลอง	56
อภิปรายผล	57
ข้อเสนอแนะ	58
บรรณานุกรม	60
ประวัติผู้วิจัย	63
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	65
ภาคผนวก ข รายละเอียดของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	68
ภาคผนวก ค การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่จัดเรียงแบบสุ่มในภาชนะ	76
ภาคผนวก ง การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่จัดเรียงแบบชั้นในภาชนะ	80

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของวัสดุเม็ดที่พบในประจำวันและในอุตสาหกรรม	6
2.2 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยเกณฑ์ขนาด แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ คอลลอยด์ (โคลน) ผง (แป้ง) และวัสดุเม็ด (เน็นทราย)	7
2.3 พฤติกรรมของวัสดุเม็ด คือ เหมือนของแข็ง ของเหลวและก๊าซขึ้นอยู่กับการใช้งาน ..	8
2.4 แรงปฏิกิริยาของพื้นกระทำต่อวัตถุ	10
2.5 พฤติกรรมของวัตถุแข็งที่สัมผัสกับพื้นราบ	12
2.6 แรงปฏิกิริยารวม R ในทิศทางต่าง ๆ	14
2.7 มุมและทิศทางการเกาะยึด	15
2.8 การหาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตด้วยวิธีการมุมเอียง	16
2.9 วัตถุเคลื่อนที่บนพื้นระดับที่มีแรงเสียดทาน	18
2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ (E_k) และอัตราเร็ว (v)	19
2.11 การเคลื่อนที่ของเม็ดวัสดุบนผิวอิสระด้านบน ณ เวลาต่าง ๆ ($t_0 = 16.023$ วินาที)	21
2.12 ผลการทดลองที่เกิดขึ้น โดย (ก) ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกบิดแก้ว (ข) กราฟระหว่าง ความเร็วกับอัตราการไหล ณ ความถี่ 12.5 รอบต่อวินาที และ ความเร่งไร้หน่วย 4 ..	22
2.13 การติดตั้งการทดลองของไนต์ และคณะ	23
2.14 การทดลองของโฮว และ เฌน (ก) การติดตั้งการทดลอง (ข) กราฟความสัมพันธ์ ระหว่างความถี่กับอัตราการไหลของการพา	24
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของผนังกับอัตราการไหลของการพา	25
2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของการพาด้วยความเร็ว	25
2.17 การเกิดการพา โดยเกิดม้วนการพาแบบสมมาตร 2 ม้วน.....	28
2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งไร้มิติและเวลาการไต่ขึ้นของอนุภาคบุกรุก	29
3.1 แผนภาพระบบการทดลอง	34
3.2 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	36
4.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกับผนังชนิดต่าง ๆ	38
4.2 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังกระดากฟอยล์	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังอะคริลิก	41
4.4 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังกระดาษทรายเบอร์ 400	41
4.5 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังผ้ากำมะหยี่	42
4.6 รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ	43
4.7 เวลาที่ใช้ในการเกิดการพากับตำแหน่งในแกน Y เมื่อวัสดุเม็ดเคลื่อนที่ผ่านผนังชนิด ชนิดต่าง ๆ	44
4.8 ความเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์กับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่าง อนุภาคไม้อัดกับผนังชนิดต่าง ๆ	46
4.9 พลังงานจลน์กับความเร็วในแกนตั้งของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ ..	47
4.10 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังกระดาษฟอยล์	48
4.11 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังอะคริลิก	49
4.12 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังกระดาษทรายเบอร์ 400	50
4.13 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังผ้ากำมะหยี่	50
4.14 รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ	51
4.15 ความสูงกับเวลาของวัสดุเม็ดที่เกิดจากวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ	52
4.16 ความเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์กับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่าง อนุภาคไม้อัดกับผนังชนิดต่าง ๆ	53
4.17 พลังงานจลน์กับความเร็วในแกนตั้งของวัสดุเม็ดที่เกิดจากวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ	54

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

วัสดุเม็ด (Granular material) คือวัสดุที่ประกอบไปด้วยวัสดุแข็งเม็ดเล็ก ๆ มากมาย โดยช่องว่างระหว่างวัสดุเม็ดเล็ก ๆ นี้จะถูกแทรกด้วยของไหล (เช่น น้ำ หรือ อากาศ) วัสดุเม็ดนี้ถือเป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่น่าจะมีความสำคัญของการศึกษาพฤติกรรมของมัน เนื่องจากวัสดุชนิดส่วนใหญ่ที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอยู่ในรูปของวัสดุเม็ด เช่น ทราย เม็ดพลาสติก และอาหารเม็ด ซึ่งกระบวนการผลิตนั้นวัสดุต่าง ๆ ก็อาจจะถูกนำไปผ่านกระบวนการอื่นเพื่อให้ผสมกัน หรือเพื่อแยกตัวออกจากกัน สำหรับวัสดุประเภทนี้เมื่อถูกนำมาสั่นหรือเขย่าแล้วจะเกิดปรากฏการณ์หลาย ๆ อย่างที่น่าสนใจและทำการศึกษารวบรวมขึ้นในระบบ เช่น การก่อตัว (Arching) การกอง (Heaping) การแยก (Segregation) คลื่นผิว (Surface waves) การพา (Convection) ฯลฯ (สกนธ์ คล่องบุญจิต, 2553)

ปัจจุบันมีวัสดุอยู่มากมายที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตโดยการสั่นหรือการหมุนภายใต้การทำงานของเครื่องจักรเพื่อคัดแยกวัสดุที่มีขนาด น้ำหนัก สี คุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและเพื่อเพิ่มมูลค่าของวัสดุ พฤติกรรมการพา จะเกิดขึ้นเมื่อวัสดุเม็ดถูกสั่นหรือเขย่าทำให้เม็ดวัสดุที่อยู่ด้านล่างบริเวณตรงกลางของระบบเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ผิวอิสระด้านบน แล้วจึงเคลื่อนที่ไปด้านข้าง ต่อจากนั้นจึงเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของระบบ ในที่สุดจึงเคลื่อนที่เข้าสู่ตรงกลางของระบบอีกครั้งเป็นการครบรอบการพา 1 รอบ (สกนธ์ คล่องบุญจิต, 2553) รูปแบบการพาค้นคว้ากับชนิดของการหมุนวนของของไหล ซึ่งเป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่น่าสนใจ แม้จะมีความรู้ถึงปรากฏการณ์การพาโดยนักวิจัยหลาย ๆ ท่านก็ตาม และยังมีสันนิษฐานว่า แรงเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุกับผนังภาชนะจะลากอนุภาคใกล้ผนังด้านล่างลง (Chaiworn, Chung, & Liaw, 2014) แต่การศึกษายังไม่มีผู้ใดตอบได้ว่า แรงเสียดทานระหว่างเม็ดวัสดุกับผนังที่มีค่ามากหรือน้อย มีผลต่อการเกิดการพาอย่างไร

จากที่กล่าวมาในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาผลแรงเสียดทานของผนังต่อการพาในกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวตั้ง โดยใช้ผนังภาชนะต่างชนิดกัน เช่น อะคริลิก ผ้ากำมะหยี่ และกระดาษทราย เป็นต้น ผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ต่อ

ในอนาคต ทั้งในด้านอุตสาหกรรม การอธิบายธรรมชาติที่ซับซ้อน และเป็นแนวทางในการสร้างชุดการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลแรงเสียดทานของผนังต่อพฤติกรรมการพาในกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. อธิบายผลแรงเสียดทานของผนังต่อพฤติกรรมการพาในกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง
2. สามารถคัดแยกวัตถุดิบที่มีขนาด น้ำหนัก สี คุณภาพที่แตกต่างกันออกไป เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคและเพื่อเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบ
3. สามารถนำไปเป็นแนวทางสร้างชุดการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ เรื่องของไหล
4. สามารถนำความรู้ของพฤติกรรมการพาไปช่วยอธิบายปรากฏการณ์อื่น ๆ ได้ เช่น การกองของวัสดุเม็ด การแยกขนาดหรือความหนาแน่น และการไหลของวัสดุเม็ด เป็นต้น
5. สามารถนำไปอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติและหาวิธีการป้องกัน เช่น พื้นที่ที่มีธารน้ำแข็ง โคลนถล่ม เป็นต้น

ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาผลแรงเสียดทานของผนังต่อพฤติกรรมการพาในกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง
2. วัสดุเม็ดที่ใช้เป็นชนิดแห้ง (Dry granular) และ ผิวเรียบ (Smooth surface) ลักษณะเป็น อนุภาคทรงกระบอก วัสดุทำจากไม้ฮิโนกิ (Hinoki wood) ความหนาแน่น 0.414 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร ใช้สองขนาด คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร และ เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 60 มิลลิเมตร จำนวน 460 และ 115 อนุภาค ตามลำดับ และสัดส่วนโดยปริมาตรคือ 1:1
3. ภาชนะที่ใช้ คือ ก่ออะคริลิกที่มีความยาว 30 เซนติเมตร ความกว้าง 6 เซนติเมตร และความสูง 30 เซนติเมตร สามารถเปิดผนังด้านหลังเพื่อบรรจุวัสดุเม็ด
4. ผนังภาชนะ คือ วัสดุที่นำมาติดด้านข้างของภาชนะ ได้แก่ อะคริลิก ผ้ากำมะหยี่ กระดาษฟอยล์ และกระดาษทรายเบอร์ 400

5. ใช้การสั่นแนวตั้งแบบทั้งระบบ (Global vertical vibration) โดยเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก (Harmonic motion)

6. ความเร่งไร้มิติในการสั่น (Γ) ที่ใช้ เท่ากับ 3 โดยใช้ค่าแอมพลิจูดในการสั่นคงที่ คือ 0.005 เมตร และความถี่คือ 12.21 เฮิรตซ์

7. เวลาที่ใช้สูงสุด เท่ากับ 600 วินาที

นิยามศัพท์เฉพาะ

วัสดุเม็ด (Granular material) หมายถึง กลุ่มของอนุภาคของแข็งที่ช่องว่างระหว่างอนุภาค สามารถแทรกด้วยของไหล เช่น น้ำหรืออากาศ ในที่นี้คือกลุ่มของอนุภาคไม้อินิกที่ช่องว่างอนุภาคแทรกด้วยอากาศ โดยเป็นอนุภาคชนิดแห้งและมีผิวเรียบ ใช้สองขนาด คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ยาว 59 ± 0.5 มิลลิเมตร และ เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 59 ± 0.5 มิลลิเมตร

พฤติกรรมการพา (Convection behavior) หมายถึง พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุเม็ดถูกสั่น วัสดุเม็ดที่อยู่บริเวณด้านบนของกลุ่มวัสดุเม็ดเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างผนัง ต่อจากนั้นเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของระบบ ในที่สุดจึงเคลื่อนที่ขึ้นสู่ตรงกลางของระบบอีกครั้ง เกิดขึ้นลักษณะคล้ายการหมุนวนของของไหล

ม้วนการพา (Convection rolls) หมายถึง ลักษณะการพาของวัสดุเม็ดที่เกิดขึ้น

ภาชนะ (Container) หมายถึง ภาชนะรูปสี่เหลี่ยมที่ทำมาจากอะคริลิกที่มีความยาว 30 เซนติเมตร ความกว้าง 6 เซนติเมตร และความสูง 30 เซนติเมตร

แรงเสียดทานผนัง (Wall friction) หมายถึง แรงที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของเม็ดวัสดุกับผิวสัมผัสของผนังภาชนะ ซึ่งผิวสัมผัสของผนังจะต้านการเคลื่อนที่ของเม็ดวัสดุ

ความเร่งไร้มิติในการสั่น (The dimensionless vibration acceleration) หมายถึง ปริมาณที่รวมความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลในการสั่น คือ ความถี่ในการสั่น (f) และแอมพลิจูดในการสั่น (A) ต่อค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก (g) โดยมีสมการความสัมพันธ์คือ $\Gamma = A(2\pi f)^2/g$ ซึ่งไม่มี หน่วย

ระบบการสั่นในแนวตั้ง หมายถึง การสั่นของวัสดุเม็ดรอบ ๆ จุดสมดุล เป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก ซึ่งจะถูกสั่นด้วยฟังก์ชันไซน์ในแนวตั้ง

สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

g	แทน ความเร่งโน้มถ่วง	หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที ² (m/s^2)
Γ	แทน ความเร่งไร้หน่วยในการสั่น	
f	แทน ความถี่ในการสั่น	หน่วยเป็นรอบต่อวินาที
A	แทน แอมพลิจูดในการสั่น	หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)
μ	แทน สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	
$V_{<av>}$	แทน ความเร็วเฉลี่ยในแนวตั้งของวัตถุเมื่อ	หน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที (cm/s)
V_y	แทน ความเร็วในแนวแกนตั้งของวัตถุเมื่อ	หน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที (cm/s)
E_k	แทน พลังงานจลน์ของวัตถุเมื่อ	หน่วยเป็นกรัม-เซนติเมตร ² ต่อวินาที ² ($g \cdot cm^2/s^2$)
X-position	แทน ตำแหน่งของวัตถุเมื่อในแนวนอนขณะเคลื่อนที่	หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)
Y-position	แทน ตำแหน่งของวัตถุเมื่อในแนวตั้งขณะเคลื่อนที่	หน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)

บทที่ 2

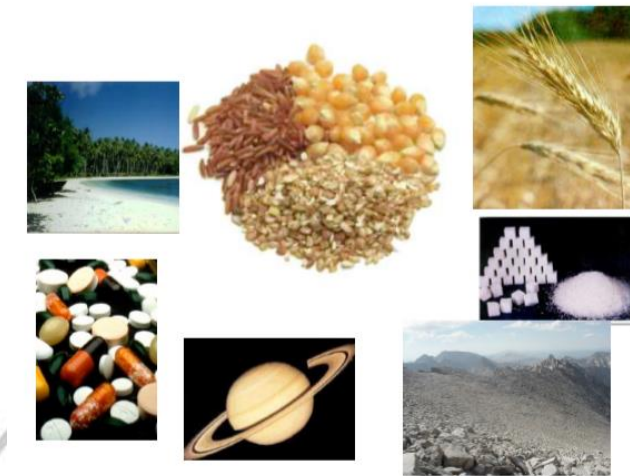
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเรื่องผลแรงเสียดทานของผนังต่อพฤติกรรมการพาในกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษา ค้นคว้าเอกสาร ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุเม็ด (Granular material)
2. การพา (Convection)
3. แรงเสียดทาน (Frictional force)
4. พลังงานจลน์ (Kinetic energy)
5. การสั่นแนวดิ่ง (Vertical vibration)
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วัสดุเม็ด (Granular material)

ทราย กรวด ข้าว น้ำตาล ธัญพืช แม้กระทั่งวงแหวนของดาวเสาร์และแถบดาวเคราะห์ ล้วนแต่เป็นวัสดุเม็ดที่มีอยู่ทุกที่ในชีวิตประจำวัน ทางด้านธรณีฟิสิกส์การอธิบายและการคาดการณ์ถึงอันตรายจากธรรมชาติ เช่น แผ่นดินถล่ม หินถล่ม และการไหลของไฟโรคลาสติก (Pyroclastic flow) นอกจากนี้วัสดุเม็ดมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ความสำคัญต่อสังคมและอารยธรรมของมนุษย์ เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมการเกษตร อุตสาหกรรมเภสัชกรรม และการขนส่ง การจัดการหินและทราย เป็นต้น ดังภาพที่ 2.1 ซึ่งวัสดุเม็ดเป็นวัตถุที่มีมีการแปรรูปมากเป็นอันดับสองรองจากของไหล (Göncü, 2012)

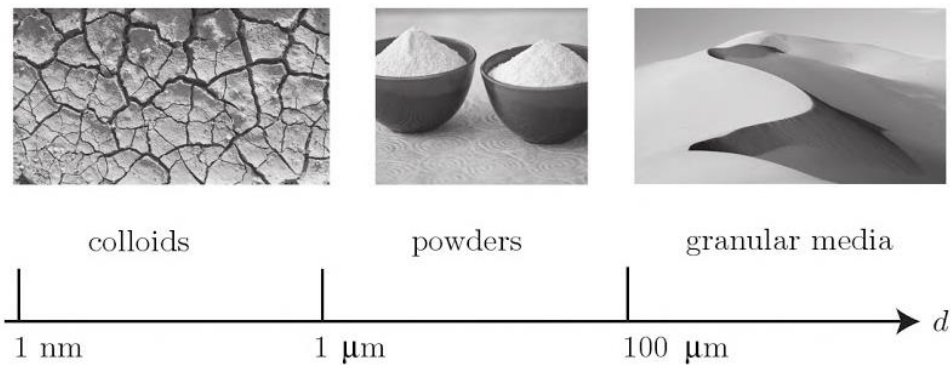


ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างของวัสดุเม็ดที่พบในประจำวันและในอุตสาหกรรม

ที่มา: Forterre and Pouliquen, 2008

นิยามของวัสดุเม็ด

แคมบู,ฌองส์ และแรดจาย์ (Cambou, Jean, & Radjaï, 2009) ได้นิยามว่าวัสดุเม็ดคือ วัตถุที่ประกอบด้วยกลุ่มอนุภาคของแข็งที่รวมตัวกัน และช่องว่างระหว่างวัสดุเม็ดสามารถถูกแทรกด้วยของไหล เช่น น้ำและอากาศ อนุภาคจะมีปฏิสัมพันธ์กันผ่านแรงยึดหยุ่น แรงเสียดทาน แรงยึดเหนี่ยวในอนุภาคชนิดเดียวกัน และแรงพื้นผิวอื่น ๆ นอกจากแรงที่เกิดจากการสัมผัสกันของอนุภาค ยังมีแรงภายนอกที่มากกระทำสามารถทำให้อนุภาคมีการจัดเรียงตัวใหม่ เมื่อพิจารณาขนาดจากภาพที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าวัสดุเม็ด คือ กลุ่มของอนุภาคขนาดกลางที่สามารถเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยทั่วไปมีขนาดใหญ่กว่า 100 ไมโครเมตร (Brown & Richards, 1970; Nedderman, 1992; Guyon & Troadec, 1994; Duran, 1997; Rao & Nott, 2008) ซึ่งข้อจำกัดด้านขนาดของวัสดุเม็ดสัมพันธ์กับข้อจำกัดของปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาค คือ อนุภาคขนาดเล็ก ได้แก่จำพวกแป้ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 1 ถึง 100 ไมโครเมตร โดยปัจจัยอื่น เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ ความชื้นและแรงต้านอากาศเริ่มมีบทบาทสำคัญเช่นกัน ดังนั้นวัสดุเม็ดจึงไม่พิจารณาปัจจัยเหล่านี้เนื่องจากมีอิทธิพลน้อยมาก และในอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ซึ่งได้แก่พวกคอลลอยด์ ที่เมื่อได้รับการกระตุ้นจากความร้อนจะมีผลอย่างมาก (Russel et al., 1989)



ภาพที่ 2.2 การจำแนกประเภทของอนุภาคด้วยเกณฑ์ขนาด แบ่งได้เป็น 3 ชนิด

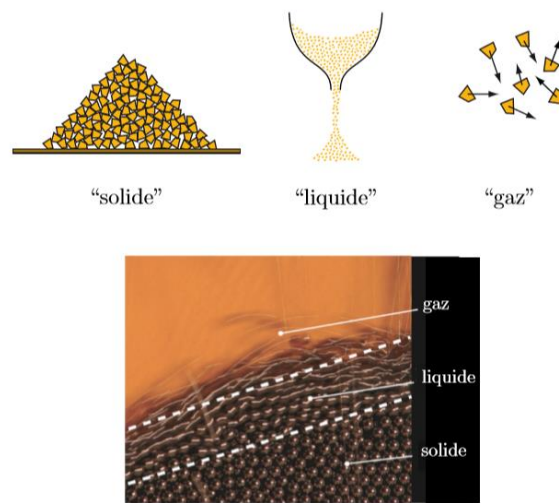
ได้แก่ คอลลอยด์ (โคลน) ผง (แป้ง) และวัสดุเม็ด (เนินทราย)

ที่มา: Andreotti, Forterre, & Pouliquen, 2013

สมบัติสำคัญของวัสดุเม็ด

1. ประกอบไปด้วยกลุ่มของอนุภาคจำนวนมากที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 100 ไมโครเมตร
2. เป็นระบบที่มีอุณหภูมิคงที่ (Athermal system)
3. เป็นระบบการกระจายไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากปฏิสัมพันธ์แรงเสียดทานและความไม่ยืดหยุ่นของอนุภาคระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและอนุภาคกับผนังด้านข้าง วัสดุเม็ดจึงไม่สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีทั่วไปของก๊าซ ของเหลว หรือของแข็ง
4. ไม่มีเกณฑ์การแยกขนาดที่ชัดเจน เนื่องจากก้ำกึ่งระหว่างขนาดระดับจุลภาค เช่น ขนาดเม็ด กับขนาดระดับมหภาค เช่น ขนาดของการไหล
5. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคมีความซับซ้อน กฎการสัมผัสระหว่างสองอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับวัตถุที่ไม่เป็นรูปธรรมและไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear phenomena) เช่น แรงเสียดทานและความไม่ยืดหยุ่นที่เกิดอย่างฉับพลัน (Inelastic shocks) หรือเมื่ออนุภาคอยู่ในช่องไหลที่มีความหนืดจะเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของของไหลอีกด้วย
6. เกิดการกระจายพลังงานได้ง่าย เช่น โยนลูกโบว์ลิ่งลงในหลุมทรายจะไม่เกิดการกระดอนขึ้น แต่พลังงานจลน์เกือบทั้งหมดจะกระจายอยู่ในรูปการชนและแรงเสียดทานระหว่างลูกโบว์ลิ่งกับเม็ดทราย การกระจายเหล่านี้เกิดในระดับจุลภาคซึ่งแตกต่างระบบดั้งเดิมที่ศึกษาในฟิสิกส์สถิติ

7. วัสดุเม็ดมีพฤติกรรมเหมือนของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ โดยขึ้นอยู่กับวิธีการใช้งาน (Forterre & Pouliquen, 2008) ดังภาพที่ 2.3 ตัวอย่างเช่น เม็ดทรายเมื่อเทลงบนพื้นจะกองตัวอยู่นิ่ง สามารถต่อต้านแรงภายนอกเป็นพฤติกรรมของของแข็ง เมื่อปล่อยเม็ดทรายลงเหมือนนาฬิกาทราย จะเกิดการไหลแสดงพฤติกรรมของไหล ถ้าเพิ่มแรงภายนอกมากขึ้นโดยการเขย่าภาชนะ เม็ดทรายจะฟุ้งกระจายไปรอบ ๆ และเกิดการกระดอนเหมือนโมเลกุลของก๊าซซึ่งเป็นพฤติกรรมของก๊าซ



ภาพที่ 2.3 พฤติกรรมของวัสดุเม็ด คือ เหมือนของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

ที่มา: Forterre and Pouliquen, 2008

การศึกษาวัสดุนั้นมีมาอย่างยาวนาน และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งในทาง ธรณีฟิสิกส์ กลศาสตร์ ฟิสิกส์ไม่เชิงเส้น ฟิสิกส์สถิติ และการไหล

การพา (Convection behavior)

การพาในระบบเม็ดที่สั่นสะเทือนได้ดึงดูดความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1831 เมื่อฟาราเดย์ (Faraday) ได้รายงานเกี่ยวกับพฤติกรรมพา เนื่องจากความสำคัญของการไหลของอนุภาคของแข็งที่มีผลต่อกระบวนการทางอุตสาหกรรมและธรณีฟิสิกส์ การพายังแสดงความคลุมเครือในพฤติกรรมของวัสดุเม็ด เนื่องจากการเริ่มสถานะการพา หมายถึง การเปลี่ยนพฤติกรรมของแข็งไปเป็นคล้ายของเหลว (Knight et al, 1996) ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาพฤติกรรมการพา รายละเอียดของนิยาม และการประยุกต์ มีรายละเอียดดังนี้

การพาของวัสดุเม็ด เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุเม็ดถูกเขย่าหรือสั่น จะมีรูปแบบการหมุนวนคล้ายกับชนิดของการหมุนวนของของไหล บางครั้งอาจอธิบายว่าเป็นผลของบราซิลนัท (Brazil nut effect) เมื่ออนุภาคที่ใหญ่ที่สุดวางบนพื้นผิวของวัสดุเม็ดที่วัสดุเม็ดขนาดต่าง ๆ ผสมอยู่

คำอธิบาย

1. ในระบบที่มีวัสดุเม็ดขนาดต่าง ๆ ผสมอยู่ วัสดุเม็ดขนาดใหญ่มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ว่างรอบวัสดุเม็ดขนาดใหญ่มากกว่าขนาดเล็ก เมื่อเขย่าหรือสั่น ระบบมีแนวโน้มที่จะย้ายไปอยู่ในสถานะพลังงานต่ำกว่า หมายความว่า เคลื่อนที่ศูนย์กลางมวลลงโดยการเคลื่อนที่วัสดุเม็ดขนาดเล็กและทำให้วัสดุเม็ดขนาดใหญ่เคลื่อนที่ขึ้นไป

2. ระหว่างช่องว่างระหว่างวัสดุเม็ดจะมีอากาศ เมื่อเขย่าหรือสั่นแต่ละครั้ง วัสดุเม็ดขนาดใหญ่อาจจะลอยตัวหรือจมได้ ดังนั้นวัสดุเม็ดขนาดเล็กสามารถเคลื่อนที่ไปในช่องว่างใต้วัสดุเม็ดขนาดใหญ่จึงทำให้วัสดุเม็ดขนาดใหญ่เคลื่อนที่ขึ้นไปในส่วนผสม

3. เมื่อไม่มีแรงลอยตัวหรือศูนย์กลางของอาร์กิวเมนต์มวล เมื่อวัสดุเม็ดขนาดใหญ่เคลื่อนที่ขึ้น วัสดุเม็ดขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ลงไปในช่องว่างที่อยู่ใต้วัสดุเม็ดขนาดใหญ่จากการกลับมาที่ตำแหน่งเดิม ผลการเคลื่อนที่ซ้ำ ๆ ทำให้วัสดุเม็ดขนาดเล็กเคลื่อนที่อยู่ใต้วัสดุเม็ดขนาดใหญ่ ความหนาแน่นของวัสดุเม็ดขนาดใหญ่มากขึ้น ไม่มีผลต่อกระบวนการนี้

ลักษณะการเกิดการพา

ลักษณะการเกิดการพาโดยทั่วไปประกอบด้วยเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน 4 ขั้นตอน (Xue, Zheng, Fan, Li, and Bai, 2013) คือ

1. เคลื่อนที่จากพื้นผิวลงไปตามกระแสการไหลบริเวณด้านข้างผนัง
2. เคลื่อนที่จากผนังด้านข้างเข้าสู่ศูนย์กลางของระบบ
3. ขยับไปตามช่องว่างขึ้นไปบริเวณตรงกลาง
4. ขึ้นไปตามพื้นผิวไปยังผนังด้านข้างอีกครั้ง

การประยุกต์

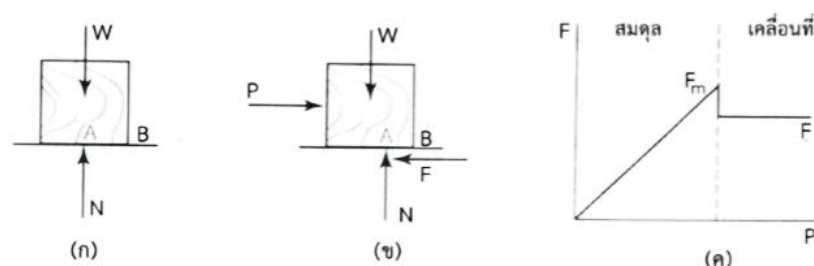
1. การผลิตในอุตสาหกรรม เมื่อวัตถุดิบผสมเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถแยกอนุภาคนิคมต่างกัน หรือขนาดต่างกัน
2. ดาราศาสตร์ ในดาวเคราะห์น้อยที่มีความหนาแน่นต่ำหรืออุกกาบาต เช่น ดาวเคราะห์น้อยอิตอคาว่า 25143
3. ธรณีวิทยา ในบริเวณที่มีธารน้ำแข็ง เช่น นิวกิงแลนด์และพื้นที่ที่แห้งแล้ง

แรงเสียดทาน (Frictional force)

ความหมายของแรงเสียดทาน

แรงเสียดทานเป็นแรงที่เกิดขึ้นตามแนวสัมผัสระหว่างผิวที่สัมผัสกัน แรงเสียดทานจะเกิดขึ้นต่อเมื่อ ผิวสัมผัสหนึ่งพยายามเคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่ไถลต่ออีกผิวสัมผัสหนึ่งและทิศทางของแรงเสียดทานจะตรงข้ามกับทิศทางของแนวโน้มของการเคลื่อนที่นั้น ในเครื่องกลและกระบวนการปฏิบัติงานส่วนใหญ่มักต้องการลดผลการหน่วงเหนี่ยวของแรงเสียดทาน เช่น ระบบดัดลูกปืน ระบบเกียร์ ระบบการไหลของของไหลในท่อ ระบบขับเคลื่อนของเครื่องบินและจรวดผ่านบรรยากาศ ในบางสถานการณ์ต้องการเพิ่มแรงเสียดทาน เช่น ระบบห้ามล้อรถยนต์ ระบบคลัทช์ ระบบสายพานขับเคลื่อน และระบบลิ้ม สำหรับการเคลื่อนที่ของล้อยานพาหนะจะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานทั้งการออกตัววิ่งและการหยุดวิ่ง การเดินตามปกติก็ขึ้นอยู่กับความเสียดทานระหว่างรองเท้ากับพื้น (ครรชิต, วิรัตน์ และถิรวุฒิ, 2557)

ในปี ค.ศ.1781 ซี.เอ.คูลอมบ์ (C.A. Coulomb) ได้ทดลองเกี่ยวกับความเสียดทานกับวัตถุแข็งที่ไม่มีสารหล่อลื่น โดยพิจารณาวัตถุหนัก W วางอยู่บนพื้น ดังภาพที่ 2.4 (ก) จะมีแรงปฏิกิริยาของพื้น $N=W$ กระทำต่อวัตถุ วัตถุที่ไม่เคลื่อนที่และไม่มีแรงเสียดทานเกิดขึ้น แต่ถ้าใส่แรง P ในแนวราบบนวัตถุดังภาพที่ 2.4 (ข) แรง P จะพยายามทำให้วัตถุเคลื่อนที่ไปในแนวราบ ขณะที่แรง P มีขนาดเล็กวัตถุยังไม่เคลื่อนที่จะมีแรงต้านการเคลื่อนที่ในแนวราบ F เรียกว่า แรงเสียดทานสถิต (Static friction force) แรงเสียดทานนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะหรือสภาพของผิวสัมผัส (Nature of contacting surfaces) ว่าขรุขระมากน้อยเพียงใด ขณะที่วัตถุไม่เคลื่อนที่ ซึ่งหมายความว่าระบบแรงอยู่ในสภาวะสมดุล ดังนั้นแรง $F=P$ เมื่อเพิ่มแรง P มากขึ้น แรงเสียดทานจะเพิ่มตาม เมื่อแรง P เพิ่มขึ้นถึงค่าๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นค่าสูงสุด แรงเสียดทานจะมีค่าสูงสุด $F=f_m$ ถ้าแรง P (หรือลื่นไถล) เรียกสภาวะที่ค่าแรงเสียดทานสูงสุดนี้ว่า วัตถุกำลังจะเคลื่อนที่ (Impending motion) หรือเริ่มเคลื่อนที่พอดี



ภาพที่ 2.4 แรงปฏิกิริยาของพื้นกระทำต่อวัตถุ

ที่มา: ครรชิต คำมูล, วิรัตน์ จันทรัง และถิรวุฒิ หงส์พิทักษ์ชน, 2557 , น.5

ถ้าแรง P เพิ่มมากขึ้น แรงเสียดทานจะไม่สามารถต้านการเคลื่อนที่ วัตถุจะเคลื่อนที่ หรือลื่นไถลไป แรงเสียดทานที่พื้นมีต่อวัตถุจะยังมีอยู่ และมีขนาดลดลงเป็นค่า f_k ซึ่งเรียกว่า แรงเสียดทานจลน์ (Kinetic friction) แรงเสียดทานนี้จะมีขนาดคงที่เมื่อวัตถุเคลื่อนที่เร็วขึ้นดังภาพที่ 2.4 (ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานกับแรง P ซึ่งพบว่าความเสียดทานสูงสุดสถิต f_m แปรผันตามขนาดของแรงปฏิกิริยาตั้งฉาก N

$$f_m = \mu_s N \quad (2.1)$$

เมื่อ f_m คือ ความเสียดทานสถิตสูงสุด (นิวตัน)

μ_s คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต

N คือ ขนาดของแรงปฏิกิริยา (นิวตัน)

ในทำนองเดียวกันแรงเสียดทานจลน์จะแปรผันตามขนาดของแรงปฏิกิริยา N ด้วย

$$f_k = \mu_k N \quad (2.2)$$

เมื่อ f_k คือ ความเสียดทานจลน์สูงสุด (นิวตัน)

μ_k คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์

N คือ ขนาดของแรงปฏิกิริยา (นิวตัน)

ค่า μ_s และ μ_k ไม่ขึ้นกับขนาดของพื้นที่ของผิวสัมผัส แต่จะขึ้นอยู่กับลักษณะหรือสภาพ (Nature) ของผิวสัมผัสซึ่งแตกต่างกันตามวัสดุ (โดยทั่วไปค่า μ_k จะน้อยกว่าค่า μ_s ประมาณ 25%)

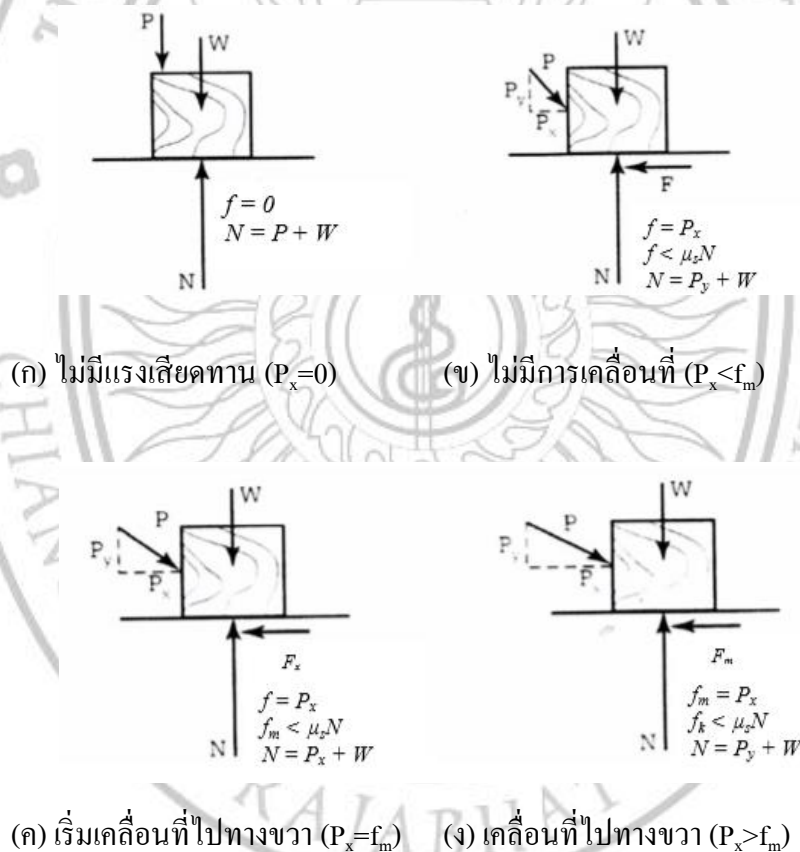
สรุปพฤติกรรมของวัตถุแข็งที่สัมผัสกับพื้นราบ โดยพิจารณาจากภาพที่ 2.5 ดังนี้

1. ไม่มีแรงเสียดทาน (No friction) จากภาพที่ 2.5 (ก) เนื่องจากแรงเสียดทานภายนอก P และ น้ำหนัก W เป็นแรงในแนวตั้ง ไม่มีแรงที่พยายามทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวราบ ($P_x=0$) ดังนั้นจึงไม่มีแรงเสียดทานเกิดขึ้น

2. ไม่มีการเคลื่อนที่ (No motion) แรงภายนอก P ที่แตกในแนวราบพยายามทำให้วัตถุเคลื่อนที่ แต่ขนาดยังไม่มากพอ คือน้อยกว่าแรงเสียดทานสูงสุด ($P_x < f_m$) แต่แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะต้านการเคลื่อนที่ วัตถุอยู่ในสภาวะสมดุล ดังภาพที่ 2.5 (ข) แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉาก $N = P_y + W$

3. เริ่มเคลื่อนที่ (Motion impending) เมื่อแรงภายนอก P มีขนาดเพิ่มขึ้น จนค่าแรงย่อยในแนวราบ P_x มีขนาดเท่ากับแรงเสียดทานสูงสุด f ระหว่างวัตถุกับพื้นพอดี คือ $P_x = f_m = \mu_s N$ วัตถุจะเริ่มเคลื่อนที่พอดี และถือว่าวัตถุยังอยู่ในสภาวะสมดุล แรง $N = P_y + W$ ดังภาพที่ 2.5 (ค)

4. เคลื่อนที่แล้ว (Motion) เมื่อวัตถุเคลื่อนที่แล้ว เนื่องจากแรง P_x เอาชนะแรงเสียดทานสูงสุด f_m ($P_x > f_m$) ดังนั้น วัตถุไม่อยู่ในสภาวะสมดุล แต่แรงเสียดทานจะเป็นแรงเสียดทานจลน์ $f_k = \mu_k N$ ดังภาพที่ 2.5 (ง)



ภาพที่ 2.5 พฤติกรรมของวัตถุแข็งที่สัมผัสกับพื้นราบ

ที่มา: ครรชิต คำมูล, วิรัตน์ จันทรง และถิรวุฒิ หงส์พิทักษ์ชน, 2557, น.7

หมายเหตุ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นทุกกรณีในข้อ 2, 3 และ 4 จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของการเคลื่อนที่ (หรือความพยายามที่จะเคลื่อนที่) เสมอ

มุมของความเสียดทาน (Angle of friction)

ลองพิจารณาวัตถุภายใต้น้ำหนักของมันเองและแรงภายนอก P อีกครั้งหนึ่ง โดยพิจารณาแรง ปฏิกริยารวม R ดังภาพที่ 2.6

1. กรณีแรกแรง R จะมีขนาดเท่ากับ $P+W$ มีทิศทางตั้งฉากกับพื้น ดังภาพที่ 2.6 (ก) ไม่มีแรงเสียดทาน

2. เมื่อแรง P มีทิศทางไม่อยู่ในแนวตั้ง แรงย่อย P_x จะทำให้เกิดแรงเสียดทาน f ทำให้แรงปฏิกริยารวม R มีทิศทางทำมุม ϕ กับแนวตั้งหรือกับแนวแรง N วัตถุยังไม่เคลื่อนที่คืออยู่ในสภาวะสมดุล ดังภาพที่ 2.6 (ข)

3. เมื่อแรง P เพิ่มขึ้นจนวัตถุเริ่มเคลื่อนที่พอดี ($P_x = f_m$) มุม ϕ จะเพิ่มขึ้นเป็น ค่าสูงสุดคือ ϕ_s เรียกว่า มุมของความเสียดทานสถิต (Angle of static friction) ดังภาพที่ 2.6 (ค)

$$\tan \phi_s = \frac{f_m}{N} = \frac{\mu_s N}{N}$$

นั่นคือ

$$\tan \phi_s = \mu_s \quad (2.3)$$

เมื่อ ϕ_s คือ มุมของความเสียดทานสถิต (องศา)

4. เมื่อวัตถุเคลื่อนที่แล้วดังภาพที่ 2.6 (ง) แรงเสียดทานจะลดลงเป็น f_k และมุม ϕ ระหว่าง R และ N จะลดลงเป็น ϕ_k เรียกว่า มุมของความเสียดทานจลน์ (Angle of kinetic friction)

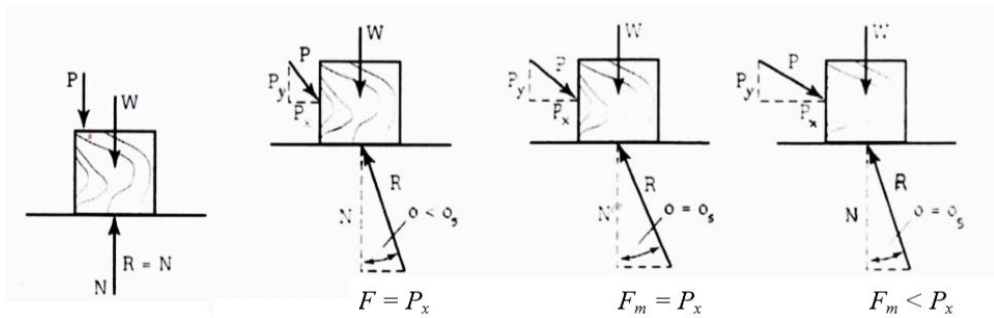
จากภาพ

$$\tan \phi_k = \frac{f_k}{N} = \frac{\mu_k N}{N}$$

นั่นคือ

$$\tan \phi_k = \mu_k \quad (2.4)$$

เมื่อ ϕ_k คือ มุมของความเสียดทานจลน์ (องศา)



(ก) ไม่มีแรงเสียดทาน (ข) ไม่มีการเคลื่อนที่ ($P_x < F_m$) (ค) เริ่มเคลื่อนที่ (ง) เคลื่อนที่แล้ว

ภาพที่ 2.6 แรงปฏิกิริยารวม R ในทิศทางต่าง ๆ

ที่มา: ครรชิต คำมูล, วิรัตน์ จันทรง และฉิรวุฒิ หงส์พิทักษ์ชน, 2557, น.8

มุมของการเกาะยึด (Angle of repose)

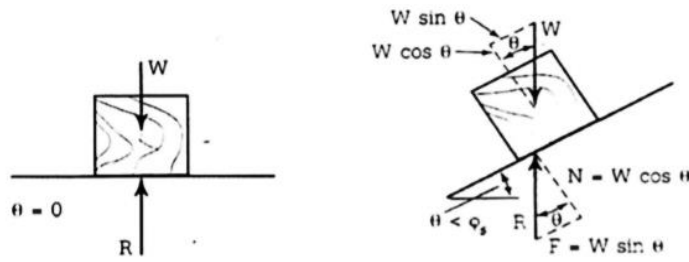
พิจารณาวัตถุวางอยู่บนพื้นราบโดยไม่มีแรงภายนอกอื่นมากระทำ ดังภาพที่ 2.7

1. กรณีแรก เมื่อพื้นอยู่ในแนวราบ คือ $\theta = 0$ แรงปฏิกิริยา R จะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของวัตถุ W ไม่มีแรงเสียดทานเกิดขึ้น ดังภาพที่ 2.7 (ก)

2. เมื่อค่อย ๆ ยกพื้นให้เอียงทำมุม $\theta = \phi$ กับแนวราบ แรงปฏิกิริยารวม R จะเท่ากับ W และอยู่ในแนวตั้ง แรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉากกับพื้น N จะเท่ากับ $W \cos \theta$ ขณะที่มุม ϕ ยังเล็กอยู่ วัตถุยังไม่เคลื่อนที่เพราะมีแรงเสียดทาน f ในแนวระนาบเอียงเท่ากับ $W \sin \theta$ กระทำต้านการเคลื่อนที่ในทิศทางขึ้น ดังภาพที่ 2.7 (ข)

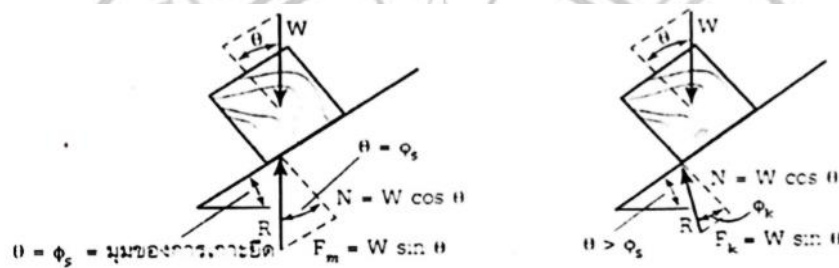
3. ถ้ายกพื้นให้เอียงทำมุม θ ที่มากขึ้น จนถึงค่าๆ หนึ่ง คือ ϕ_s เมื่อวัตถุเริ่มเคลื่อนที่ พอดีแรง N จะเท่ากับ $W \cos \theta = W \cos \phi_s$ แรงเสียดทานที่ต้านการเคลื่อนที่ลงของวัตถุจะมีขนาดสูงสุด คือ $f_s = W \sin \theta = W \sin \phi_s$ และมีทิศทางขึ้น จะเห็นว่ามุม ϕ_s ก็คือมุมของความเสียดทานสถิตของวัตถุกับพื้นเอียง (ระหว่างแรง R และ N) นั่นเอง มุมที่พื้นเอียงทำมุมกับแนวราบคือ $\theta = 0$ นี้เรียกว่า มุมของการเกาะยึด (Angle of repose) ดังภาพที่ 2.7 (ค) แรง R จะเท่ากับ W และอยู่ในแนวตั้ง

4. ถ้าเพิ่มมุม θ ให้มากกว่า ϕ_s วัตถุจะเคลื่อนที่ไหลลงตามพื้นเอียง แรง R จะลดลงและไม่อยู่ในแนวตั้งเนื่องจากแรงเสียดทานจะเป็นแรงเสียดทานจลน์ $f_k < W \sin \theta = W \sin \phi_s$ และมุม ϕ จะมีค่าเท่ากับ ϕ_k (มุมของความเสียดทานจลน์) ดังภาพที่ 2.7 (ง)



(ก) ไม่มีแรงเสียดทาน

(ข) ไม่มีการเคลื่อนที่



(ค) เริ่มเคลื่อนที่แล้ว

(ง) เคลื่อนที่แล้ว

ภาพที่ 2.7 มุมและทิศทางการเกาะยึด

ที่มา: ครรชิต คำมูล, วิรัตน์ จันทรง และอิรวดี หงส์พิทักษ์ชน, 2557, น.10

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Coefficient of friction)

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน คือ แรงที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสัมผัสของวัตถุ 2 ชนิด ที่มีทิศขนานกันและเมื่อมีการสัมผัสที่ผิวจะเกิดการต้านทานการลื่นไถลของวัตถุชนิดนั้น ซึ่งอ้างอิงถึงแรงของแรงต้านทาน มีกฎที่ใช้ในการพิจารณา 3 กฎด้วยกัน ดังนี้

1. ความเสียดทาน มีคุณสมบัติเกิดจากน้ำหนัก หรือแรงในแนวตั้งฉากที่กระทำกับพื้นสัมผัส และมีคุณสมบัติในส่วนของการเกิดสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ)
2. ความเสียดทาน ไม่ขึ้นอยู่กับหรือเป็นอิสระจากพื้นผิวสัมผัส
3. ความเสียดทาน ไม่ขึ้นกับความเร็วในการลื่นไถล

เลโอนาร์โด ดา วินชี (Leonardo da Vinci) ได้ตั้งกฎข้อที่ 1 และ 2 จากนั้นได้มีการทบทวนแนวคิดในปี ค.ศ.1690 โดย กีโยม อะมอนตัน (Guillaume Amontons) ซึ่งทั้ง 3 กฎนี้ได้มีการนำมาใช้โดย ชาร์ล โอกุสแต็ง เดอ คูลอมบ์ (Charles Augustin de Coulomb) และได้มีการยืนยันว่า

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตด้วยวิธีการมุมเอียง

ที่มา: ครรชิต คำมถ, วิรัตน์ จันทรง และฉิรวุฒิ หงส์พิทักษ์ชน, 2557, น.52

แรงที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่ลงจากพื้นเอียง $= W \sin \theta$

ถ้าวัตถุกำลังจะเคลื่อนที่ดังนั้นแรง $F = W \sin \theta$

$F = w_1 \sin \theta$

แรงปฏิกิริยาที่พื้นกระทำต่อวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับผิวสัมผัส N

$N = w_1 \cos \theta$

$\mu_s = \frac{F}{N}$

$= \frac{w \sin \theta}{w \cos \theta}$

$$\mu_s = \tan \theta \quad (2.5)$$

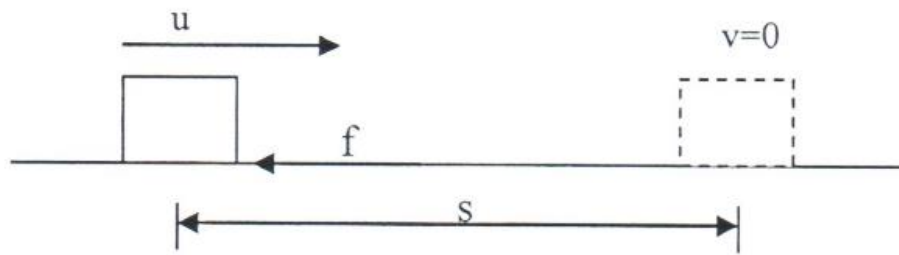
โดย F คือ แรงที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่ลงจากพื้นเอียง หน่วย นิวตัน
 W_i คือ แรงกระทำที่วัตถุกระทำกับพื้น หน่วย นิวตัน
 N คือ ปฏิกิริยาที่พื้นกระทำต่อวัตถุในทิศทางตั้งฉากกับผิวสัมผัส หน่วย นิวตัน
 θ คือ มุมกับแนวนอน หน่วย องศา
 μ_s คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

พลังงานจลน์ (Kinetic energy)

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตและประกอบอาชีพของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัจจุบันมนุษย์มีการพึ่งพาเทคโนโลยีเป็นหลัก ส่งผลให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นมากกว่าในอดีต พลังงาน หมายถึง ความสามารถในการทำงาน โดยการทำงานนี้อาจจะอยู่ในรูปของการเคลื่อนที่หรือการเปลี่ยนรูปของวัตถุ ซึ่งมีหลายรูปแบบ เช่น ความร้อน ไฟฟ้า แสงสว่าง ในชีวิตประจำวันมีการใช้พลังงานในกิจกรรมต่าง ๆ อย่างมากมาย เช่น รถยนต์ต้องใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ ความร้อนที่ใช้ในการหุงต้มอาหาร อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ต้องการไฟฟ้าเพื่อให้สามารถทำงานได้ จะเห็นว่าพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นในชีวิตประจำวันอย่างยิ่ง

พลังงานจลน์ (Kinetic energy) เป็นพลังงานที่มีอยู่ในวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณของพลังงานจลน์ในวัตถุ คือมวลและความเร็วของวัตถุนั้น กล่าวคือ ถ้าวัตถุ ที่มีมวลมาก จะมีพลังงานจลน์มากหรือวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงจะมีพลังงานจลน์มากด้วย พลังงานจลน์เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน เช่น คนกำลังวิ่ง รถกำลังวิ่ง และลูกกรรบี้กำลังเคลื่อนที่ เป็นต้น

ถ้าอยากทราบว่าวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ที่มีพลังงานจลน์มากหรือน้อยเพียงใด อาจจะหาได้โดยให้วัตถุที่กำลังเคลื่อนที่อยู่นั้นไปทำงานอย่างหนึ่ง ปริมาณงานที่ทำได้ทั้งหมดจนกระทั่งวัตถุหยุดนิ่งจะเท่ากับพลังงานจลน์ของวัตถุนั้น จากภาพที่ 2.9 กำหนดให้วัตถุมวล m กำลังเคลื่อนที่บนพื้นระดับด้วยอัตราเร็ว u



ภาพที่ 2.9 วัตถุเคลื่อนที่บนพื้นระดับที่มีแรงเสียดทาน

ที่มา: บัณฑิตา คอนทาวิน, 2555

จากสมการการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง

$$v^2 = u^2 + 2as \quad (2.6)$$

เมื่อพิจารณาวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเริ่มต้น v จนกระทั่งวัตถุหยุดนิ่ง

$$\begin{aligned} 0 &= v^2 + 2as \\ a &= \frac{-v^2}{2s} \end{aligned} \quad (2.7)$$

a มีค่าเป็นลบ แสดงว่า ความเร่งมีทิศตรงข้ามกับความเร็วต้น จากกฎข้อที่สองของนิวตัน

$$\Sigma F = ma \quad (2.8)$$

$$f = m \frac{v^2}{2s}$$

$$f_s = \frac{1}{2}mv^2$$

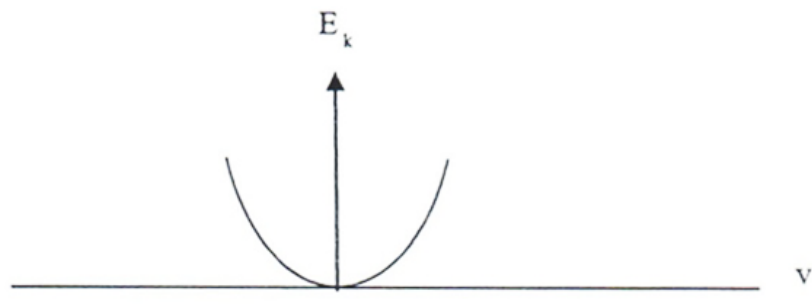
$$W_f = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.9)$$

จากปริมาณงานที่ทำได้ทั้งหมด จะเท่ากับพลังงานจลน์ (E_k)

ดังนั้น
$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ m	แทน มวลของวัตถุ	มีหน่วยเป็นกิโลกรัม
v	แทน อัตราเร็วของวัตถุ	มีหน่วยเป็นเมตร/วินาที
E_k	แทน พลังงานจลน์	มีหน่วยเป็นจูลล์
W_f	แทน งานเนื่องจากความเสียดทาน	มีหน่วยเป็นจูล

จากสมการพลังงานจลน์ สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ (E_k) และ อัตราเร็ว (v) (บัณฑิตา ดอนกาวิน, 2555) ได้กราฟดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ (E_k) และอัตราเร็ว (v)
ที่มา: บัณฑิตา ดอนกาวิน, 2555

การสั่นแนวตั้ง (Vertical vibration)

การสั่นเป็นการให้พลังงานกลแก่ระบบ โดยตัวแปรที่มีผลต่อการสั่นได้แก่ ความถี่ในการสั่น และแอมพลิจูดในการสั่น ความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปรจะรวมอยู่ในรูปของความเร่งไร้มิติ (Dimensionless acceleration, Γ) (Hunt, Weathers, Brennen, Lee & Wassgren, 1999) โดยเขียนเป็น สมการได้ดังนี้

$$\Gamma = \frac{A\omega^2}{g} \quad (2.11)$$

เมื่อ Γ คือ ความเร่งไร้หน่วย

A คือ แอมพลิจูดในการสั่น (m)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s), $\omega = 2\pi f$ โดยที่ f คือ ความถี่ในการสั่น

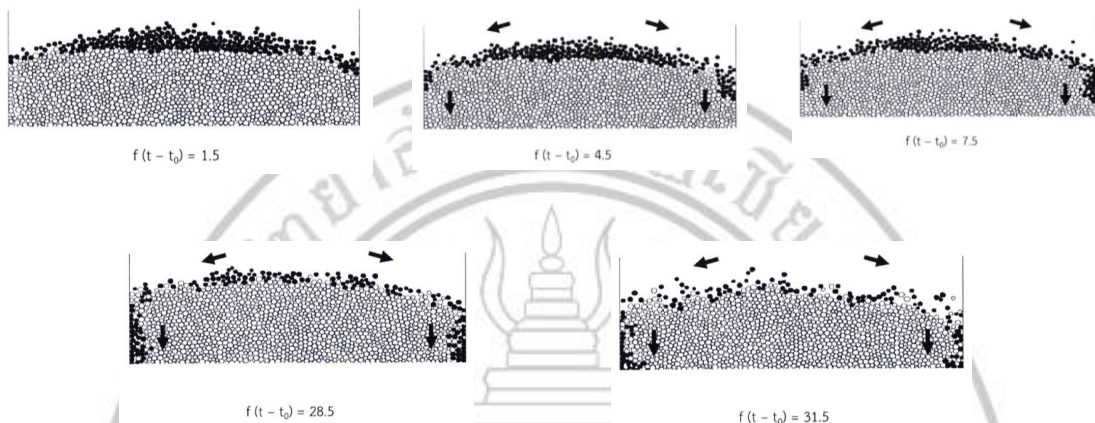
g คือ ความเร่งโน้มถ่วงของโลก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะประกอบไปด้วยพฤติกรรมการพา รูปแบบการพาของวัสดุเมื่อดึงที่มีการสั่นในแนวตั้ง โดยมีทั้งที่ใช้วิธีการทดลองจริงและการจำลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

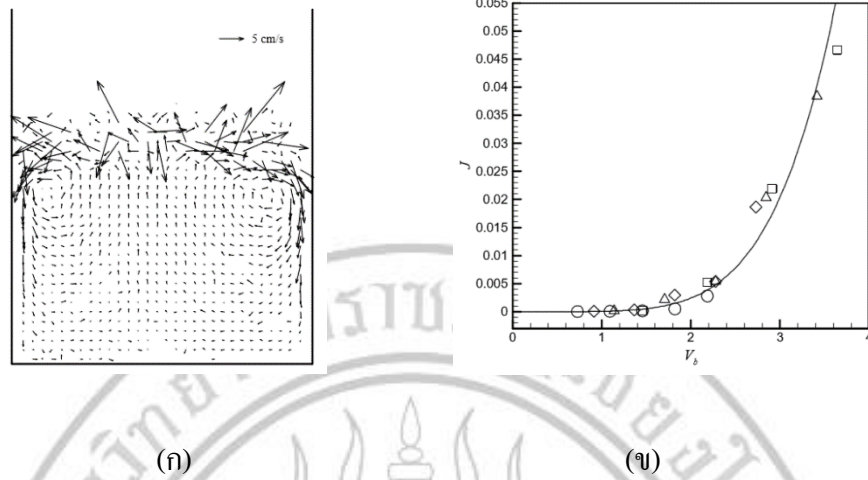
สภณ คล่องบุญจิต (2553) ศึกษาผลของการเกิดการก้องตัวกันต่อการเคลื่อนที่ของเม็ดวัสดุที่ผิวอิสระด้านบนขณะที่เกิดการหมุนวนในระบบ 2 มิติของวัสดุเม็ดกลมภายใต้การสั่นแนวตั้ง โดยแบบจำลองคอมพิวเตอร์เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบวัสดุเมื่อดึง การจำลองจะเริ่มด้วยการบรรจุวัสดุ 1 ชนิดที่มีขนาดและมวลใกล้เคียงกันไว้ในกล่องบรรจุก่อน โดยที่ใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ แล้วจะมีการปล่อยให้เวลาผ่านไปประมาณ 0.4938 วินาที ก่อนเพื่อให้เม็ดวัสดุทุกเม็ดในกล่องเข้าสู่สภาวะหยุดนิ่งก่อนที่จะเริ่มทำการสั่นระบบ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อกกล่องเริ่มเคลื่อนที่ขึ้นทำให้ก้นกล่องเริ่มดันผิวด้านล่างของเม็ดวัสดุซึ่งทำให้เกิดการส่งถ่ายพลังงานเข้าสู่เม็ดวัสดุจากด้านล่าง การก้องตัวกันช่วยให้เม็ดวัสดุที่ผิวอิสระด้านบนเกิดการเคลื่อนที่ไหลลงสู่ด้านข้างภาชนะบรรจุแล้วจึงลงสู่ด้านล่างของระบบ ซึ่งเป็นผลทำให้เม็ดวัสดุเกิดการหมุนวนได้ง่ายขึ้น โดยที่การหมุนวนจะเกิดขึ้นเมื่อเม็ดวัสดุด้านล่างของระบบบริเวณตรงกลางเคลื่อนที่จากด้านล่างขึ้นสู่ผิวอิสระด้านบนแล้วจึงเคลื่อนที่ไปด้านข้าง ต่อจากนั้นเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของระบบ ในที่สุดจึงเคลื่อนที่เข้าสู่ตรงกลางของระบบอีกครั้งเป็นการครบรอบการหมุนวน 1 รอบดังแสดงในภาพที่ 2.11 ดังนั้นการก้อง

ตัวกันเป็นกลไกหนึ่งที่จะช่วยขับเคลื่อนให้เม็ดวัสดุที่ผิวอิสระด้านบนเกิดการเคลื่อนที่ไหลลงสู่ด้านล่างภาชนะบรรจุทำให้เกิดการหมุนวนได้ง่าย



ภาพที่ 2.11 การเคลื่อนที่ของเม็ดวัสดุบนผิวอิสระด้านบน ณ เวลาต่าง ๆ ($t_0 = 16.023$ วินาที)
ที่มา: สกนซ์ คล่องบุญจิต, 2553

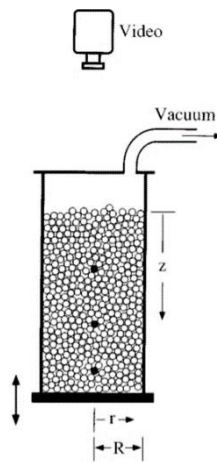
ไท และ เชียว (Tai & Hsiao) ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติการขนส่งของวัสดุเม็ดในชั้นพื้นต้น เช่น อัตราการไหลของมวลการพา การกระจายความเร็ว อุณหภูมิเม็ด และสัมประสิทธิ์การแพร่ในตัวเอง วัสดุเม็ดที่ใช้ในการทดลองนี้คือลูกปัดแก้วทรงกลมและเรียบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 2490 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยที่ภาชนะมีความสูง 25 เซนติเมตร ความยาว 13.4 เซนติเมตรและความกว้าง 0.32 เซนติเมตร ในการทดลองจะติดลูกปัดแก้วที่ผนังด้านข้างและด้านล่างของภาชนะเพื่อกระตุ้นให้เกิดแรงเฉือนที่มากพอสำหรับการหมุนวนของวัสดุเม็ด สั่นด้วยความถี่ 12.5 16.0 20.0 และ 25.0 รอบต่อวินาที ความเร่งไร้มิติ 2 3 4 5 และ 6 จากการศึกษพบว่า ณ ความถี่ 12.5 รอบต่อวินาที ความเร่งไร้มิติ 4 ทำให้เกิดการพาแบบสมมาตร โดยที่วัสดุเม็ดจะขยับขึ้นไปตรงกลางและเลื่อนลงไปตามผนังด้านข้างของภาชนะ ดังภาพที่ 2.12 (ก) โดยที่อัตราการไหล อุณหภูมิเม็ดและสัมประสิทธิ์การแพร่ในตัวเองจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการสั่นเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.12 (ข)



ภาพที่ 2.12 ผลการทดลองที่เกิดขึ้น โดย (ก) ลักษณะการเคลื่อนที่ของลูกปัดแก้ว (ข) กราฟระหว่างความเร็วกับอัตราการไหล ณ ความถี่ 12.5 รอบต่อวินาที และ ความเร็วไร้หน่วย 4

ที่มา: Tai & Hsiau, n.d.

ไนต์ และคณะ (Knight et al, 1996) ใช้อนุภาคติดตามและถ่ายภาพด้วยคลื่นสนามแม่เหล็ก เพื่อศึกษาลักษณะการพาในกระบอกสูบที่สันสะท้อนและติดตามการไหล การทดลองจะใช้กระบอก Lucite รัศมีภายใน 28.5 มิลลิเมตรและสูง 200 มิลลิเมตร วางอยู่บนเครื่องสั่นขึ้นของลูกปัดแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตรถูกอัดเข้าไปที่ผนังภายในเพื่อควบคุมแรงเสียดทาน จากนั้นใส่เม็ดแก้วที่ถูกย้อมสีแล้วลงในบริเวณตรงกลางของกระบอกสูบเป็นอนุภาคติดตาม ดังภาพที่ 2.13

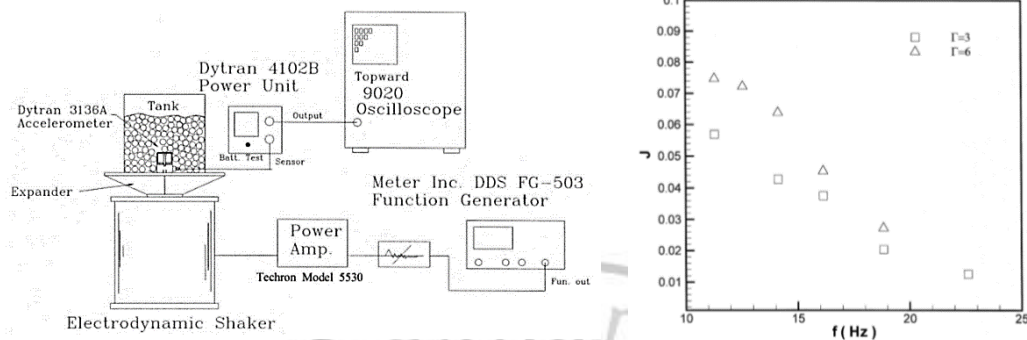


ภาพที่ 2.13 การติดตั้งการทดลองของไนต์ และคณะ

ที่มา: Knight et al, 1996

จากการทดลองพบว่า รูปแบบการพาอนุภาคจะเคลื่อนที่จากชั้นล่างลงไปตามแนวผนังที่กระจายอยู่ที่ตรงกลาง ความลึกขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหลขึ้นไปที่สูงศูนย์กลางของภาชนะ กระบอกสูบ ส่วนความเร็วจะลดลงตามลำดับชั้น ดังนั้นความยาวของการไหลการพาและช่วงเวลาการไหลการพาขึ้นอยู่กับความถี่และความแรงของการสั่นที่ใช้

เจียว และเฉิน (Hsiao & Chen, 2000) ศึกษาเซลล์การพาของวัสดุเม็ดที่สั่นในแนวตั้ง การทดลองจะใช้ลูกบิดแก้วน้ำหนัก 90 กรัม ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร ความหนาแน่น 2490 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นวัสดุเม็ด และใช้ลูกบิดแก้วที่มีสีต่างกันเพื่อทำหน้าที่เป็นอนุภาคติดตาม บรรจุลงในภาชนะสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 13.4 เซนติเมตร สูง 25 เซนติเมตร หนา 0.32 เซนติเมตรซึ่งผนังด้านข้างและด้านล่างเป็นอะลูมิเนียม ส่วนผนังด้านหน้าและด้านหลังเป็นกระจก แล้วถูกสั่นด้วยความถี่ที่ต่างกัน ดังภาพ 2.14 (ก) จากการศึกษพบว่าเกิดเซลล์การพาแบบสมมาตร 2 เซลล์ซึ่งตำแหน่งของเซลล์การพาถูกกำหนดโดยความเร็วทั้งแกนนอนและแกนตั้ง ส่วนความกว้างการไหลของวัสดุเม็ดขึ้นอยู่กับความถี่และแอมพลิจูดของการสั่น เมื่อวัดอัตราการไหลจากการกระจายความเร็วในแนวตั้งในระนาบแนวนอนพบว่าอัตราการไหลของการพาจะลดลงเมื่อความถี่การสั่นเพิ่มขึ้น ขณะที่ความถี่คงที่ ดังภาพที่ 2.14 (ข)

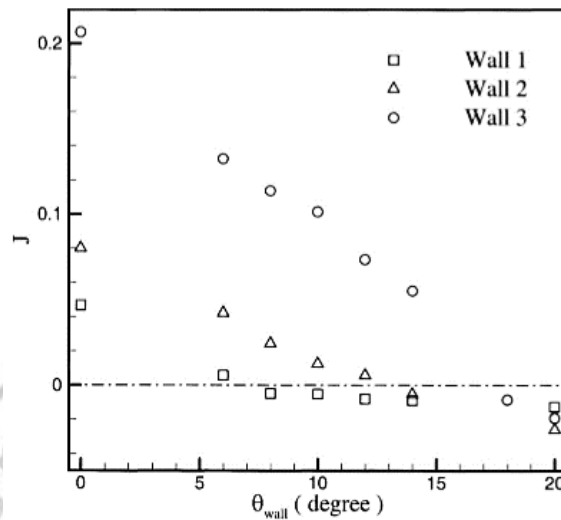


(ก)

(ข)

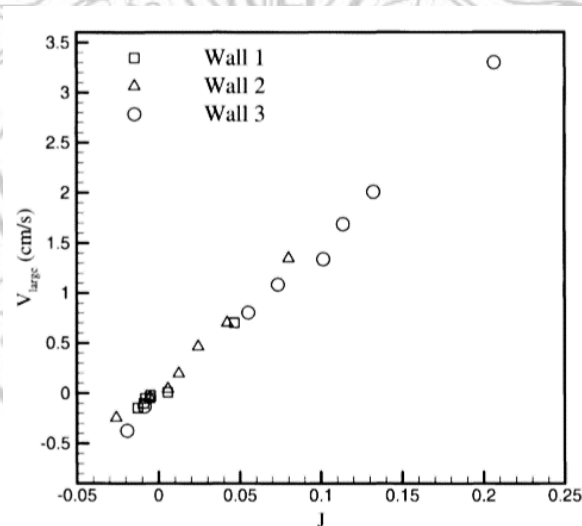
ภาพที่ 2.14 การทดลองของโฮว และ เฉิน (ก) การติดตั้งการทดลอง (ข) กราฟ
ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับอัตราการไหลของการพา
ที่มา: Hsiau & Chen, 2000

เจียว, หวัง และไท (Hsiau, Wang & Tai, 2002) ตรวจสอบเซลล์การพาของเม็ดดิสก์ภายใต้การสั่นในแนวดิ่งโดยการปรับเปลี่ยนรูปร่างภาชนะและเปลี่ยนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผนัง การทดลองจะใช้ดิสก์สปีรอนซ์ ความหนา 3 มิลลิเมตร ความหนาแน่น 8780 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทั้งหมด 450 ดิสก์ ซึ่ง 225 ดิสก์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร และอีก 225 ดิสก์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร ภาชนะที่ใช้มีด้านหน้าและด้านหลังทำมาจากแผ่นกระจก ส่วนด้านข้างและด้านล่างทำมาจากอะคริลิก ซึ่งภาชนะมีความสูง 20 เซนติเมตร กว้าง 8 เซนติเมตร และลึก 0.35 เซนติเมตร การทดลองจะให้ผนังทำมุมทั้งหมด 7 มุม คือ 0 6 8 10 12 14 และ 20 องศา และจะใช้วัสดุที่แตกต่างกันติดที่ผนังด้านข้างของภาชนะบรรจุเพื่อให้เกิดความขรุขระของผนังที่แตกต่างกัน คือ ทรายทรายเบอร์ 100 ผนังที่ติดด้วยดิสก์สปีรอนซ์เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ผนังที่ติดด้วยดิสก์สปีรอนซ์เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 และ 5 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่าเกิดเซลล์การพาแบบสมมาตร 2 เซลล์ ทิศทางของเซลล์การพาจะย้อนกลับเมื่อมุมของผนังสูงค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของการพาจะลดลงถ้าเพิ่มมุมเอียงของผนังด้านข้าง ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของผนังกับอัตราการไหลของการพา
ที่มา: Hsiau, Wang & Tai, 2002

ทั้งนี้เมื่อเพิ่มความเร็วในการสั่นจะทำให้ความสามารถในการพาเพิ่มมากขึ้น เซลล์การพาของดิสก์ขนาดเล็กมีบทบาทต่อการแยกของดิสก์ขนาดใหญ่และความเร็วของการแยกแปรผันตรงกับอัตราการไหลของการพา ดังภาพที่ 2.16



ริสโซ, โซโต, โกดอย และคอร์เดโร (Risso, Soto, Godoy & Cordero, 2005) ศึกษาผลของแรงเสียดทานในความไม่แน่นอนการพาความร้อนของของไหลเมื่อดำเนินการจำลองพลวัตโมเลกุล การจำลองเริ่มต้นโดยตั้งค่าระบบ ประกอบด้วยอนุภาค 1000 ดิสก์ ที่มีหน่วยเป็นมวล เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 ในกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้าความกว้าง 60 และสูง 150 อนุภาคเม็ดสามารถฟลูอิดไดซ์โดยการเคลื่อนที่ของฐานซึ่งขึ้นอยู่กับกระแสแนวตั้งที่มีแอมพลิจูด 0.1 และความถี่ $10/2\pi$ จากการจำลองพบว่า การพาถูกขับเคลื่อนด้วยแรงลอยตัว การเกิดม้วนการพา 0 1 และ 2 ม้วนเกิดจากการสูญเสียพลังงานเฉลี่ยต่อการชน ไม่ได้มาจากการเสียดทานและสัมประสิทธิ์การคืนตัว

คอง, ฮู, วู และโฮววู (Kong, Hu, Wu Q. S & Wu Y. H., 2006) ตรวจสอบเซลล์การพาและการแยกขนาดของวัสดุเม็ดแก้วภายใต้การสั่นภายนอกในชุดภาชนะบรรจุที่มีผนังด้านหนึ่งอยู่ในรูปแบบคอคอด การทดลองได้ดำเนินการให้ภาชนะบรรจุสองมิติที่มีความกว้างของคอคอดที่มีขนาดแตกต่างกันเริ่มจาก 2 เซนติเมตรถึง 10 เซนติเมตร ผนังภาชนะอีกด้านหนึ่งสูง 12.2 เซนติเมตร ด้านบนและด้านล่างกว้าง 10 เซนติเมตร แผ่นด้านหน้าและด้านหลังห่างกัน 1 เซนติเมตร จากนั้นบรรจุอนุภาคแก้วสองชนิดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.2 ถึง 4.0 มิลลิเมตร และ 0.45 ถึง 1.0 มิลลิเมตร แล้วสั่นในแนวตั้งโดยใช้เวลาสั่นตั้งแต่ 10 นาทีเป็นต้นไป เพื่อให้เกิดการก่อกำเนิดการไหลของชั้นเม็ดมีสถานะเสถียร ใช้ความถี่ 25 รอบต่อวินาทีและความเร่งไร้มิติเท่ากับ 3.06 จากการทดลองพบว่า คอคอดของภาชนะมีบทบาทสำคัญต่อรูปแบบของเซลล์การพาและการแยกขนาด มุมเอียงของพื้นผิวอิสระกับแนวนอนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนความยาวคอคอดกับความยาวของฐาน อัตราส่วนความยาวคอคอดกับความยาวของฐานเท่ากับ 0.9 เกิดรูปแบบที่เสถียรสองรูปแบบขึ้นอยู่กับทิศทางการกระจายของเม็ดเริ่มต้น ทิศทางของเซลล์การพาจะตรงข้ามเมื่ออัตราส่วนความยาวคอคอดกับความยาวของฐานสูงกว่าค่าการเปลี่ยนแปลงในสถานะเริ่มต้นที่กำหนดไว้ และรูปแบบของเซลล์การพากำหนดรูปแบบการแยกของชั้นพื้นเม็ด

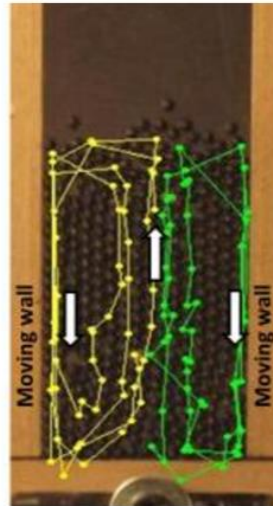
คล่องบุญจิต และแคมป์เบล (Klongboonjit & Campbell, 2008) ได้ใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์แบบอนุภาคนิ่ม (Soft-particle simulation) เพื่อตรวจสอบผลของสมบัติของอนุภาคต่าง ๆ โดยเฉพาะความแข็งของอนุภาคบนการพาในชั้นพื้น 2 มิติที่สั่นในแนวตั้ง จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์พบว่าความแข็งของอนุภาคมีความซับซ้อนในเรื่องของความสามารถในการพา อนุภาคนิ่มจะไม่เกิดการพา ความสามารถในการพาจะเพิ่มขึ้นเมื่อความแข็งของอนุภาคเพิ่มขึ้น แต่การพาสูงสุดเกิดขึ้นที่ความแข็งปานกลางและเมื่อเพิ่มความแข็งของอนุภาค ความสามารถในการพาก็จะลดลง นอกจากความแข็งของอนุภาคแล้ว แรงเสียดทานระหว่างผนังภาชนะกับอนุภาค อนุภาคกับอนุภาค และความเร่งไร้มิตียังมีผลต่อความสามารถในการพาอีกด้วย การพาจะเกิดขึ้นได้เฉพาะอัตราส่วนระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอนุภาคและผนังภาชนะกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่าง

อนุภาคและอนุภาคมากกว่า 1 และมวลการพาจะไม่ปรากฏในชั้นพื้นถ้าความเร่งไร้มิติน้อยกว่า 2.7 ความสามารถในการพาจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร่งไร้มิติเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเท่ากับ 4 แล้วความสามารถในการพาจะลดลง

ซีลสเตร, คอลลิคนอน, โฮฟ, ดีน และไคเปอร์ (Zeilstra, Collignon, Hoef, Deen & Kuipers, 2008) ศึกษาการพาที่ถูกขับเคลื่อนโดยผนังด้านข้างทั้งการทดลองและแบบจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยเทคนิคการวัดความเร็วของอนุภาคจากภาพถ่าย (Particle image velocimetry) สำหรับการทดลองประกอบด้วยภาชนะที่ประกอบขึ้นจากด้านข้างและด้านหน้าเป็นแผ่นกระจก ส่วนด้านข้างเป็นแผ่นอะลูมิเนียม ส่วนด้านล่างเป็นแผ่นโลหะ ซึ่งภาชนะมีความกว้าง 15 เซนติเมตร ความยาว 1.5 เซนติเมตร ความสูง 60 เซนติเมตร จากนั้นติดลูกบิดแก้วสีฟ้าด้านข้างด้วยเรซินอีพ็อกซี 6 คอลัมน์แนวตั้งจึงทำให้ความกว้างของภาชนะเหลือ 14.5 เซนติเมตร บรรจุลูกบิดแก้วสีแดงเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.473 มิลลิเมตรและลูกบิดแก้วสีฟ้าเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.334 มิลลิเมตรจำนวน 20000 อนุภาค (ลูกบิดแก้วสีแดง 75 % และลูกบิดแก้วสีฟ้า 25%) แล้วนำภาชนะติดตั้งบนเครื่องสั่นด้วยแรง 2700 นิวตัน ใช้ความถี่ตั้งแต่ 20 ถึง 50 รอบต่อวินาที แอมพลิจูดช่วง 0.9 ถึง 5.62 มิลลิเมตรและความเร่งไร้มิติ 4 ถึง 25 สำหรับการใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบแยก (Discrete particle model) จะใช้อนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเหมือนกับการทดลอง โดยใช้อนุภาคสีแดง 15000 อนุภาค อนุภาคสีฟ้า 5000 อนุภาค ความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับ 2525 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ถูกสั่นในช่วง 20 ถึง 50 รอบต่อวินาที แอมพลิจูด 0.9 ถึง 5.62 มิลลิเมตร ความเร่งไร้มิติตั้งแต่ 4 ถึง 25 จากการศึกษาพบว่า ทั้งการทดลองและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ การพาจะถูกสร้างขึ้นโดยความขรุขระของพื้นผิวด้านข้างผนังภาชนะ บางครั้งการพาที่เสถียรจะถูกขัดขวางโดยพฤติกรรมการติดขัดหรือการกระเด็นที่เกิดขึ้นและปรากฏการณ์นี้พบว่ามีผลต่อระยะเวลาการไหล

ชัยวร, ชุง และหลิว (Chaiworn, Chung & Liaw, 2014) ศึกษาแบบการพาของวัสดุเม็ดเสมือนสองมิติจากแรงเสียดทานระหว่างและผนังด้านข้างภาชนะ การทดลองจะใช้ภาชนะรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ความหนา 0.3 เซนติเมตร สามารถปรับความกว้างได้ตั้งแต่ 3 ถึง 12 เซนติเมตร ใช้ลูกบิดแก้วที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 ถึง 0.2 เซนติเมตร ความหนาแน่น 2.77 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นถูกสั่นด้วยความถี่ในช่วง 10 ถึง 40 รอบต่อวินาที แอมพลิจูด 0.13 ถึง 0.38 เซนติเมตร ความเร่งไร้มิติที่ใช้คือตั้งแต่ 1.56 ถึง 8.85 โดยการทดลองจะเปลี่ยนแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคกับผนังโดยการติดกระดาษทราย แล้วปล่อยให้ผนังด้านหนึ่งเคลื่อนที่ ส่วนผนังอีกด้านอยู่นิ่ง จากการทดลองพบว่า แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคกับผนังจะลากอนุภาคลงไปตามผนังด้านข้างเพื่อเริ่มต้นการพา หากแรงเสียดทานมีขนาดใหญ่พอจะเกิดปรากฏการณ์พาแบบสมมาตร

สองม้วน และอนุภาคจะได้ขึ้นสู่พื้นผิวตรงกลางภาชนะ ดังภาพที่ 2.17 การใส่กระดาษทรายที่ด้านผนังด้านหนึ่งจะทำให้ขนาดของม้วนการดันข้างเพิ่มขึ้น

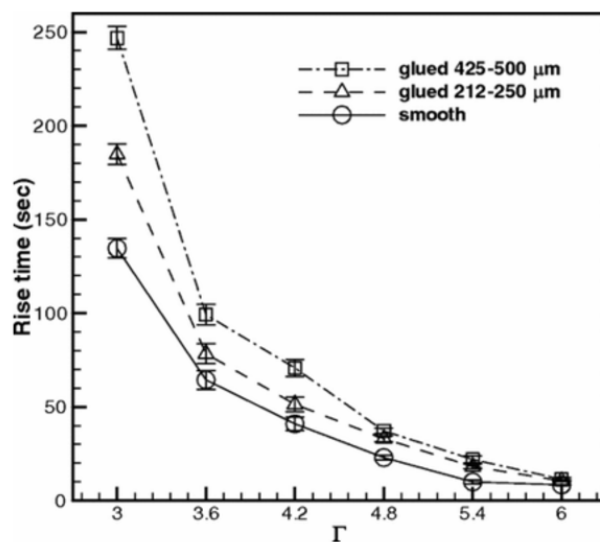


ภาพที่ 2.17 การเกิดการพา โดยเกิดม้วนการพาแบบสมมาตร 2 ม้วน
ที่มา: Chaiworn, Chung & Liaw (2014)

ฟอร์ตินิ และฮวง (Fortini & Hung, 2015) ตรวจสอบบทบาทของข้อบกพร่องที่มีผลต่อการเริ่มต้นการพาที่เกิดจากผนังในวัสดุเม็ดที่สั้นในแนวตั้ง ทั้งการทดลองและแบบจำลองคอมพิวเตอร์สองมิติด้วยแบบจำลองโมเลกุล (Molecular dynamic) การทดลองจะใช้ลูกบิดแก้วสีขาวขุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรเป็นอนุภาคนับร้อยลงในภาชนะสี่เหลี่ยมผืนผ้า กว้าง 40 มิลลิเมตร สูง 200 มิลลิเมตร หนา 2.3 มิลลิเมตร จากนั้นจะสั่นด้วยความเร่งที่สูงเพื่อให้ระบบสร้างสถานะฟลูอิดไดซ์แล้วค่อย ๆ ลดความเร่งลง ในการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์จะเริ่มต้นระบบด้วย 2 แบบ คือ 1. เริ่มต้นระบบด้วยระบบผลึก อนุภาคถูกวางแบบแลตทิซเฮกซะโกนอลที่สมบูรณ์แบบด้านล่างของภาชนะ 2. ระบบจะเริ่มต้นด้วยการวางอนุภาคแบบสุ่มในภาชนะ จากการศึกษาพบว่าทั้งการทดลองและการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ พฤติกรรมการพาจะเกิดขึ้นที่ความเร่งสูงสุด ส่วนระบบเริ่มต้นด้วยผลึกที่สมบูรณ์ (ไม่มีความบกพร่อง) การเคลื่อนที่การพาที่เกิดขึ้นจากผนังจะเกิดขึ้นที่พารามิเตอร์พลังงานไร้มิติมีค่าสูง ระบบที่มีข้อบกพร่องจะเกิดการพาในช่วงความเร่งน้อยกว่าระบบที่ไม่มีข้อบกพร่อง ดังนั้นระบบที่มีข้อบกพร่องทำให้เกิดการพาได้ดีกว่าระบบผลึก

วิโบโว และคนอื่น ๆ (Wibowo et al., 2016) ได้ศึกษาผลบราซิเลียนในระบบสองมิติ การทดลองจะใช้วัสดุที่ทำมาจากอะคริลิกทั้งระบบ ไม่ว่าจะเป็นอนุภาคชั้นพื้น อนุภาคผู้บุกรุก

(Intruder) และภาชนะ อนุภาคชั้นพื้นมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร อนุภาคผู้บุกรุกเป็นอนุภาครูปวงแหวนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 14 มิลลิเมตร อนุภาคชั้นพื้นและอนุภาคผู้บุกรุกจะบรรจุในภาชนะที่มีความยาว 19 เซนติเมตร ความสูง 10 เซนติเมตร ความกว้าง 0.2 เซนติเมตร จากนั้นถูกสั่นโดยใช้สัญญาณไซน์ในช่วงความถี่ 13 ถึง 17 รอบต่อวินาที ความเร่งไรมิตี 2 ถึง 4 จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ความเร่งไรมิติน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.5 เวลาการไต่ขึ้นของอนุภาคผู้บุกรุกจะลดลงเมื่อความเร่งไรมิตีเพิ่มขึ้น ดังภาพ 2.18 แต่ถ้าใช้ความเร่งไรมิตีมากกว่าหรือเท่ากับ 2.5 พบว่าเวลาการไต่ขึ้นของอนุภาคผู้บุกรุกจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร่งไรมิตี เนื่องจากปรากฏการณ์ไดเดนพอสต์ ซึ่งช่วยลดการไหลการพาของผลบราซิลนัท



ภาพที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งไรมิตีและเวลาการไต่ขึ้นของอนุภาคบุกรุก

ที่มา: Wibowo et al., 2016

ลู, วู, หวัง, ทอง และหยิน (Liu, Wu, Wang, Tong & Yin, 2017) ศึกษาการพา รวมทั้งการแยกของอนุภาคเดี่ยวและอนุภาคไบนารีในชั้นพื้นสั่นสะเทือนแบบจำกัด การทดลองประกอบไปด้วยสองขั้นตอน ขั้นตอนหนึ่งจะใช้ออนุภาคเดี่ยว ได้แก่ ลูกปัด 13XMS (โลหะที่ห่อหุ้มด้วยความร้อน) ตอนขั้นที่สองจะใช้ออนุภาคไบนารี ได้แก่ ลูกปัด 13XMS และลูกปัดเหล็กที่มีขนาดเดียวกัน ทั้งสองขั้นตอนอนุภาคจะถูกบรรจุเป็นชั้นพื้นลงในภาชนะรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ความยาว 200 มิลลิเมตร ความกว้าง 5 มิลลิเมตร ความสูง 200 มิลลิเมตร จากนั้นจะถูกสั่นในรูปไซน์ที่มีความถี่ตั้งแต่ 20 ถึง

70 รอบต่อวินาที ความเร่งไร้มิติจาก 0 ถึง 8 การเคลื่อนที่ของอนุภาคถูกบันทึกโดยกล้อง CCD (Charge-coupled device) จากการทดลองพบว่าอนุภาคเดี่ยวจะแสดงรูปแบบการเคลื่อนที่ของเม็ด 5 แบบ คือ การพาทั่วไป (Global convection) การกองสมมาตร (Symmetrical heap) การกองไม่สมมาตร (Unsymmetrical heap) การพาเฉพาะ (Local convection) และสภาวะเสมือนของแข็ง (Pseudo solid state) ซึ่งใช้ความถี่ตั้งแต่ 15 ถึง 70 รอบต่อวินาที ความเร่งไร้มิติมากกว่า 3 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่มีอิทธิพลมาจากความถี่การสั่นและความเร่ง และไม่สามารถก่อสภาพการไหลได้ สำหรับอนุภาคไบนารี ลูกบิดเหล็กจะรวมกลุ่มอยู่ในบริเวณตรงกลางของการพาซึ่งเป็นแกนหลักของม้วนการพา ส่วนลูกบิด 13XMS จะทำให้ชั้นพื้นเกิดการไหล ชั้นพื้นเปลี่ยนสภาวะจากเสมือนของแข็งเป็นการพาทั่วไป การกองสมมาตร การกองไม่สมมาตร หรือการพาเฉพาะ เมื่อเปรียบเทียบอนุภาคเดี่ยวแล้ว อนุภาคไบนารีมีความสามารถในการพาต่ำ



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลแรงเสียดทานของผนังต่อพฤติกรรมการพาในกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ วิธีดำเนินการวิจัย ซึ่งในการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่ 1 ศึกษาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกับผนังชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีหามุมเอียง และตอนที่ 2 ศึกษาพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง รวมทั้งกล่าวถึงการวิเคราะห์ผล สำหรับรายละเอียดในหัวข้อต่าง ๆ มีดังนี้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบไปด้วย วัสดุเม็ด ผนังชนิดต่าง ๆ กล้องอะคริลิก เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง และเครื่องสั่นแนวดิ่ง โดยผนังชนิดต่าง ๆ กล้องอะคริลิกนั้น ผู้วิจัยได้สร้างและเตรียมขึ้นมา นอกจากนี้ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเครื่องกล มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ให้ใช้วัสดุเม็ด เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง และเครื่องสั่นแนวดิ่งรวมทั้งสถานที่ทดลอง ทั้งนี้รายละเอียดของอุปกรณ์ มีดังนี้

1. **วัสดุเม็ด** วัสดุเม็ดทำมาจากไม้เนื้อแข็งที่มีน้ำหนักเบา คือไม้อีโนกิ มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.414 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผิววัสดุเรียบและแห้ง สองขนาดคือทรงกระบอกหน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร แต่ละชิ้นยาวเท่ากับ 59 ± 0.5 มิลลิเมตร จำนวน 460 และ 115 อนุภาค ตามลำดับ

2. **ผนังชนิดต่าง ๆ** ชนิดของผนังจะใช้ติดผนังด้านในของกล้องอะคริลิก สำหรับชนิดผนังที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ อะคริลิก ผ้ากำมะหยี่ กระดาษฟอยล์ และกระดาษทรายเบอร์ 400 โดยใช้ผนังชนิดละ 2 แผ่น แต่ละแผ่นมีความกว้าง 6 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร

3. **กล่องอะคริลิก** กล่องอะคริลิกจะใช้เรียงอนุภาควัสดุเม็ด สำหรับกล่องอะคริลิกประกอบขึ้นจากวัสดุอะคริลิกใสที่มีด้านหน้า กว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ด้านหลัง กว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ด้านข้าง กว้าง 6 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร หนา 10 มิลลิเมตร และด้านล่าง กว้าง 34 เซนติเมตร ยาว 6 เซนติเมตร หนา 5 มิลลิเมตร โดยที่ด้านล่างของกล่องจะกว้าง 30 เซนติเมตร ส่วนบริเวณที่เหลือด้านละ 2 เซนติเมตร จะเจาะรูไว้เพื่อยึดกับเครื่องสั่นแนวดิ่ง

4. **เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง** สำหรับเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง เป็นเครื่องทดสอบเพื่อหามุมที่ทำให้อนุภาคอิโนกิเคลื่อนที่ตกลงจากฐานที่มีผิวนูนชนิดต่าง ๆ ติดอยู่ โดยฐานมีความยาว 15 เซนติเมตร ความกว้าง 15 เซนติเมตร และรอกหมุนอยู่ด้านข้างสำหรับหมุนเชือกให้ฐานยกตัวขึ้น

5. **เครื่องสั่นแนวดิ่ง** เครื่องสั่นแนวดิ่งนี้อาศัยหลักการทำงานคือเป็นการสั่นสะเทือนทางกลที่ใช้ ลูกเบี้ยวเป็นตัวบังคับให้ระบบมีการสั่นในรูปแบบคลื่นไซน์ ดังสมการที่ 3.1

$$y(t) = A \sin(2\pi f t) = A \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

เมื่อ A คือแอมพลิจูดในการสั่น (เมตร) f คือ ความถี่ในการสั่น (รอบต่อวินาที) ω คือความเร็วเชิงมุม (เรเดียนต่อวินาที) และ t คือเวลาที่ใช้ในการสั่น โดยที่ค่าแอมพลิจูดในการสั่นคงที่เท่ากับ 0.005 เมตร และสามารถปรับค่าความถี่ในการสั่นได้ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้ความถี่ในการสั่นเท่ากับ 12.21 รอบต่อวินาที

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ผู้วิจัยจึงได้วางแผนและดำเนินการวิจัยอย่างเป็นขั้นตอน เริ่มจากการทบทวนวรรณกรรม ออกแบบการทดลอง ดำเนินการทดลอง การวิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย ดังนี้

1. ค้นคว้าหาข้อมูลเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการพาของวัสดุเม็ดที่สั่นในแนวดิ่งทั้งการทดลองจริงและการใช้แบบจำลองว่ามีพฤติกรรมอย่างไรและปัจจัยใดที่มีผลต่อการเกิดพฤติกรรมการพา

2. เลือกวัสดุเม็ด และชนิดผนัง

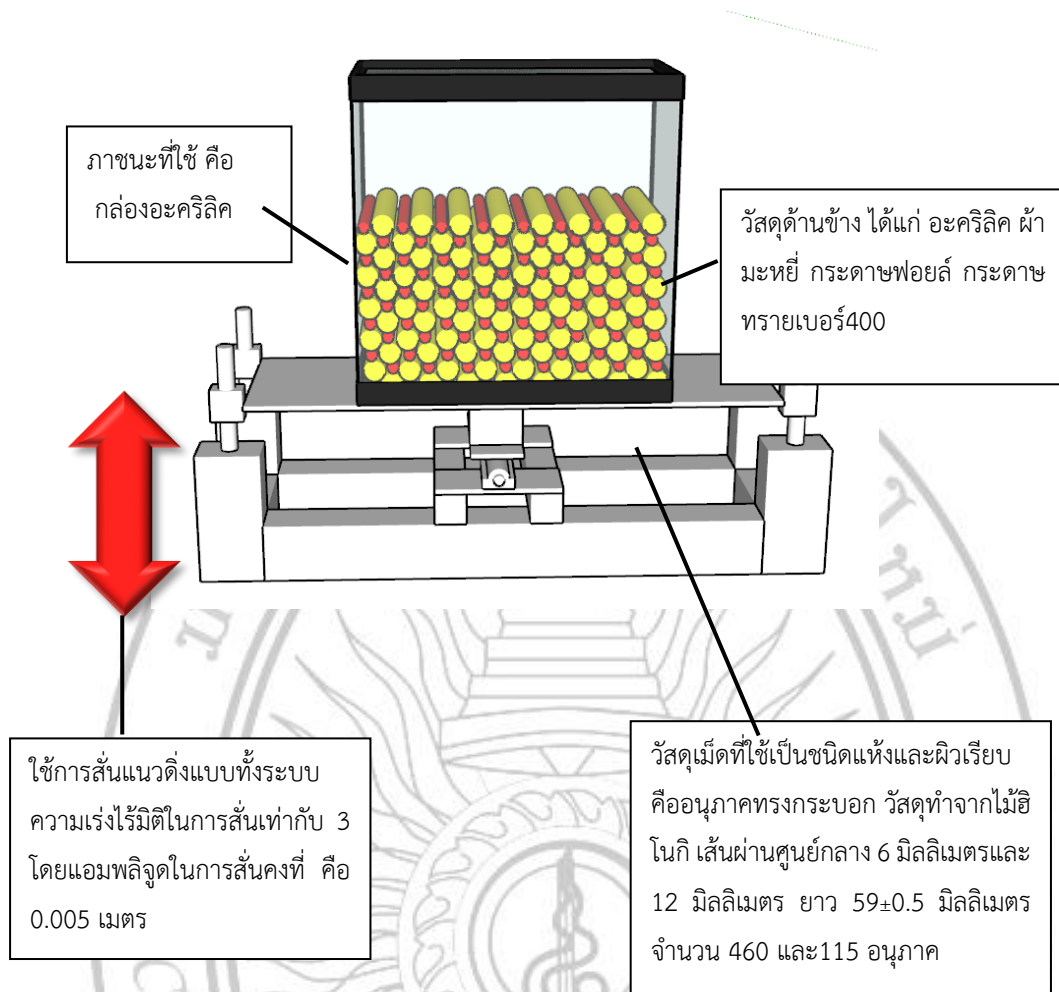
2.1 การเลือกวัสดุเม็ด การเลือกวัสดุเม็ดที่จะนำมาทดลอง ผู้วิจัยได้คำนึงถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตของงาน ทั้งนี้ต้องเป็นวัสดุที่มีผิวเรียบ แห้ง ไร้สิ่งสกปรกตามท้องตลาด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกวัสดุที่เป็นไม้เนื้อแข็ง ทรงกระบอกหน้าตัดขวาง น้ำหนักเบา คือไม้ฮิโนกิ มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.414 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ขนาด คือ 6 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร จำนวน 460 และ 115 อนุภาค ตามลำดับ ตัดวัสดุแต่ละชิ้นให้มีความยาวเท่ากับ 59 ± 0.5 มิลลิเมตร จากนั้นนำไม้ที่ตัดเสร็จแล้วมาขัดผิวด้านหน้าและด้านข้างให้เรียบ แล้วนำมาพ่นสีที่พื้นผิวหน้าตัด

2.2 การเลือกผนัง การเลือกชนิดผนังที่จะนำมาติดตั้งด้านข้างของกล่องอะคริลิก ผู้วิจัยได้คำนึงถึงวัตถุประสงค์และขอบเขตของงาน ต้องเป็นวัสดุที่มีพื้นผิวทั้งเรียบและขรุขระ ไร้สิ่งสกปรกตามท้องตลาด มีความหลากหลายของการใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกวัสดุผนัง ได้แก่ อะคริลิก ผ้ากำมะหยี่ กระดาษ และกระดาษทรายเบอร์ 400 โดยใช้ชนิดละ 2 แผ่น ตัดผนังชนิดต่าง ๆ ให้มีความกว้าง 6 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร

3. เตรียมเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง ติดผนัง และวัสดุเม็ดเข้ากับเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียงให้เป็นระบบการทดลอง วัสดุผนังถูกติดไว้กับฐาน สำหรับวัสดุเม็ดจะถูกติดไว้กับลูกเหล็กจากนั้นนำมาวางทับบนผนังชนิดต่าง ๆ ฐานของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะยกสูงขึ้นด้วยการหมุนรอกที่อยู่ข้าง

4. เตรียมวัสดุเม็ด ผนังชนิดต่าง ๆ กล่องอะคริลิก และเครื่องสั่นที่ใช้ในการทดลอง

5. ติดตั้งเครื่องสั่นในแนวดิ่ง วัสดุเม็ด ผนังชนิดต่าง ๆ และกล่องอะคริลิกเข้าด้วยกันให้เป็นระบบการทดลองแสดงแผนภาพระบบการทดลองได้ดังภาพที่ 3.1 ระบบการทดลองที่ประกอบไปด้วยวัสดุเม็ดซึ่งถูกจัดเรียงแบบสุ่มลงในกล่องอะคริลิกที่ด้านข้างของกล่องอะคริลิกติดด้วยวัสดุผนังทั้ง 2 ข้าง วัสดุเม็ดจะถูกสั่นในแนวดิ่งด้วยเครื่องสั่นแนวดิ่งที่มีแอมพลิจูด 0.005 เมตร โดยใช้ความถี่ 3 ไร่มีติเท่ากับ 3 และเวลาการสั่นสูงสุด 600 วินาที



ภาพที่ 3.1 แผนภาพระบบการทดลอง

6. ทดสอบระบบการทดลองและความสมดุลของระบบ

7. ทำการทดลองพร้อมทำการบันทึกภาพเคลื่อนไหว โดยผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกิกับผนังชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีหามุมเอียง ขั้นตอนการทดลองในตอนนี้มีดังนี้

1) ตัดวัสดุเม็ดคือไม้อีโนกิ ขนาดความกว้าง 6 เซนติเมตร ความยาว 6 เซนติเมตร และตัดผนัง ได้แก่ อะคริลิก ผ้ากำมะหยี่ กระดาษฟอยล์ พลาสติก ไม้อีโนกิ กระดาษทรายเบอร์400 และกระดาษทรายเบอร์600 แต่ละชนิดขนาดความกว้าง 15 เซนติเมตร ความยาว 15 เซนติเมตร

2) นำผนังชนิดต่าง ๆ ที่ตัดตามขนาดที่ต้องการ ติดบนฐานของเครื่องทดสอบ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง

- 3) นำอนุภาคไม้อีโนกที่ตัดตามขนาดที่ต้องการ ติดกับลูกเหล็ก
- 4) นำลูกเหล็กที่ติดด้วยอนุภาคไม้อีโนกวางบนผนัง
- 5) หมุนรอกที่อยู่ด้านข้างของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียงเพื่อให้ฐานยกสูงขึ้น หมุนรอกจนกระทั่งลูกเหล็กเคลื่อนที่ตกลงจากฐานของเครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง

6) บันทึกภาพ ทดลองซ้ำ 5 ครั้ง

7) เปลี่ยนชนิดผนัง และทำซ้ำข้อ 1.2 ถึง 1.6

ตอนที่ 2 การศึกษาพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวตั้ง
ขั้นตอนการทดลองในตอนนี้

- 1) ตัดผนังให้มีความกว้าง 6 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น
- 2) จัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่มและแบบชั้น ทั้ง 2 ขนาด คือเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร และ 12 มิลลิเมตร จำนวน 460 และ 115 อนุภาค ตามลำดับ ลงในกล่องอะคริลิก

3) ติดตั้งกล่องอะคริลิกบนเครื่องสั่นในแนวตั้ง ตั้งค่าความถี่เท่ากับ 12.21 รอบต่อวินาที และความเร่งไร้มิติเท่ากับ 3

4) บันทึกภาพเคลื่อนไหวของอนุภาคขนาดใหญ่ 1 เม็ด ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

5) เปลี่ยนชนิดของผนัง และทำการทดลองซ้ำข้อ 2.1 ถึง 2.4

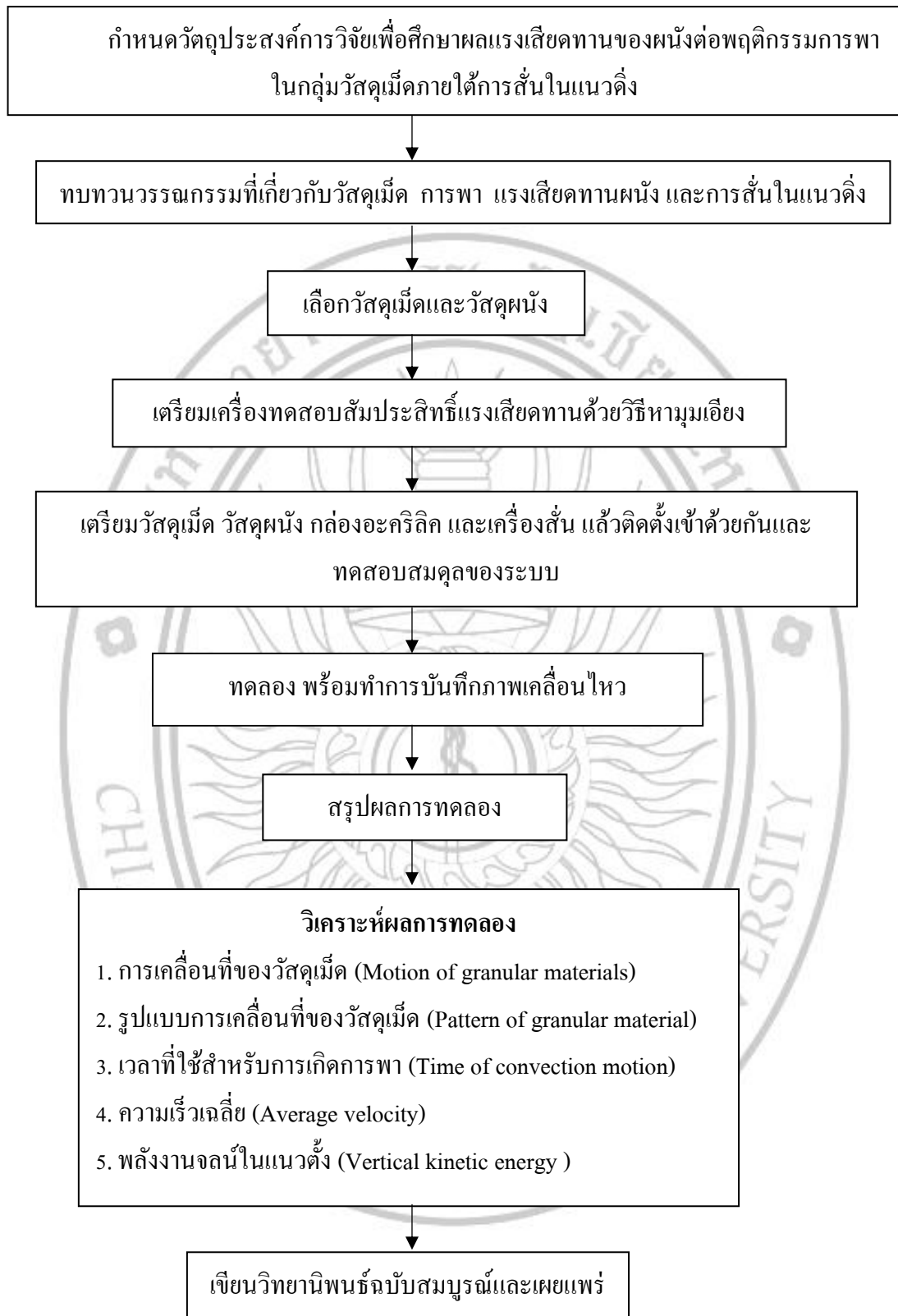
8. บันทึกผลการทดลอง โดยนำภาพจากวิดีโอที่บันทึก มาวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม

Tracker

9. วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยวิเคราะห์อนุภาคขนาดใหญ่ 2 อนุภาค ในหัวข้อต่าง ๆ

ดังนี้

- 9.1 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด (Motion of granular materials)
- 9.2 รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด (Pattern of granular material)
- 9.3 เวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการพา (Time of convection motion)
- 9.4 ความเร็วเฉลี่ย (Average velocity)
- 9.5 พลังงานจลน์ในแนวตั้ง (Vertical kinetic energy)



ภาพที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

บทที่ 4

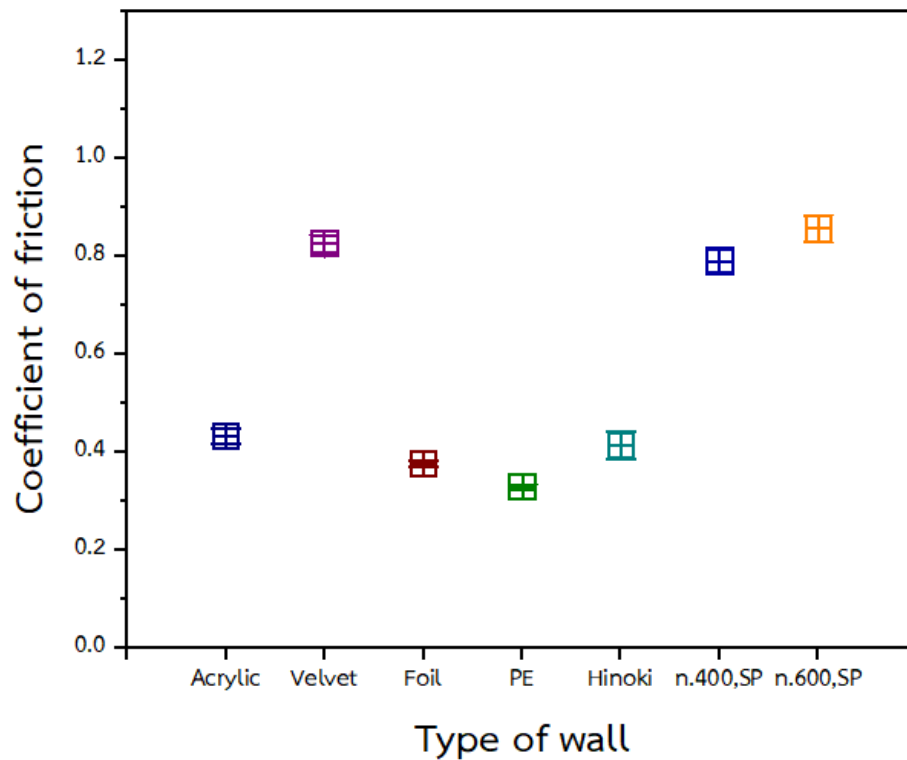
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลแรงเสียดทานของผนังต่อพฤติกรรมการพาในกลุ่มวัสดุเม็ด ภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง วัสดุเม็ดที่ใช้เป็นวัสดุเม็ดชนิดเดียว ทำมาจากไม้เนื้อแข็งและมีน้ำหนักเบา คือไม้ไผ่โนกิ มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.414 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร รูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไม้เท่ากับ 6 มิลลิเมตรและ 12 มิลลิเมตร แต่ละชิ้นมีความยาวเท่ากับ 59 ± 0.5 มิลลิเมตร ผิวแห้งและเรียบ นำมาจัดเรียงลงในกล่องอะคริลิก ทำการสั่นแนวดิ่งทั้งระบบด้วยความเร่งไร้มิติเท่ากับ 3 โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่หนึ่ง การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกิกับผนังชนิดต่าง ๆ โดยชนิดผนัง ได้แก่ อะคริลิก ผ้ากำมะหยี่ กระดาษฟอยล์ พลาสติก ไม้ไผ่โนกิ กระดาษทรายเบอร์ 400 และกระดาษทรายเบอร์ 600 ต่อมาในตอนที่สอง การศึกษาพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดที่เกิดจากแรงเสียดทานของผนัง ภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง ผลการวิจัยได้จำแนกเป็น 5 หัวข้อ ได้แก่ 1) การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด (Motion of granular materials) 2) รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด (Pattern of granular material) 3) เวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการพา (Time of convection motion) 4) ความเร็วเฉลี่ย (Average velocity) 5) พลังงานจลน์ในแนวดิ่ง (Vertical kinetic energy) ซึ่งทดลองโดยใช้วัสดุเม็ดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรและ 12 มิลลิเมตร จำนวน 460 และ 115 อนุภาค ตามลำดับ ทั้งนี้การทดลองจะทำซ้ำ 3 ครั้ง ผลการทดลองจะแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดทั้งหมดต่อไปนี้

ตอนที่ 1 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกิกับผนังชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีหามุมเอียง

ในการศึกษาสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกิกับผนังชนิดต่าง ๆ ด้วยวิธีหามุมเอียง ผู้วิจัยได้ทำการทดลองโดยติดตั้งบนฐานของเครื่องทดลองสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ด้วยวิธีหามุมเอียง วางลูกเหล็กที่ติดด้วยอนุภาคไม้ไผ่โนกับผนัง จากนั้นหมุนรอกด้านข้างของเครื่องทดลองสัมพันธ์แรงเสียดทานด้วยวิธีหามุมเอียง จนกระทั่งลูกเหล็กที่ติดด้วยอนุภาคไม้ไผ่โนเคลื่อนที่ลง ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้แสดงผลได้ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกับผนังชนิดต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.1 เมื่อทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกับผนังชนิดต่าง ๆ พบว่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกับผนังอะคริลิกมีค่า 0.432 อนุภาคไม้ไผ่โนกับผนังผ้ากำมะหยี่มีค่า 0.825 อนุภาคไม้ไผ่โนกับกระดาษฟอยล์มีค่า 0.376 อนุภาคไม้ไผ่โนกับพลาสติก มีค่า 0.328 อนุภาคไม้ไผ่โนกับไม้ไผ่โนมีค่า 0.413 อนุภาคไม้ไผ่โนกับกระดาษทรายเบอร์ 400 มีค่า 0.79 และอนุภาคไม้ไผ่โนกับกระดาษทรายเบอร์ 600 มีค่า 0.856 ทั้งนี้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกับผนังอะคริลิก ผนังกระดาษฟอยล์ ผนังพลาสติก และผนังไม้ไผ่โน มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้ไผ่โนกับผนังผ้ากำมะหยี่ ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และกระดาษทรายเบอร์ 600 มีค่าใกล้เคียงกัน

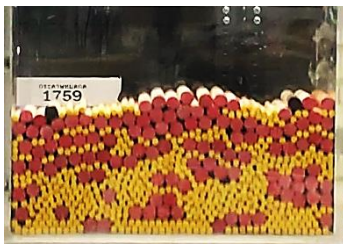
ตอนที่ 2 การศึกษาพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง

ตอนที่ 2.1 การศึกษาการเกิดการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดโดยการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่ม

ในการศึกษาการเกิดการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดจากแรงเสียดทานผนังภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง ทำการทดลองโดยนำวัสดุผงติดด้านข้างของภาชนะทั้งสองด้าน จากนั้นนำวัสดุเม็ดทั้งสองขนาดมาจัดเรียงลงในภาชนะแบบสุ่มแล้วสั่นในแนวดิ่งทั้งระบบโดยใช้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 460 และ 115 อนุภาค เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทดลองในที่นี้จะใช้วัสดุผง ได้แก่ อะคริลิก ผ่ากัมมะหยี่ กระดาษฟอยล์ และกระดาษทรายเบอร์ 400 เนื่องจากเมื่อสังเกตผลการทดลองในตอนหนึ่งพบว่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกับผนังชนิดต่าง ๆ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีค่าใกล้เคียงสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกับผนังไม้อีโน และกลุ่มที่มีค่ามากกว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอนุภาคไม้อีโนกับไม้อีโน ทั้งนี้การทดลองจะวิเคราะห์อนุภาคขนาดใหญ่ 2 อนุภาค (อนุภาคสีดำ) โดยจะใช้ความเร่งไร้มิติเท่ากับ 3 ความถี่เท่ากับ 12.21 รอบต่อวินาที และเวลาการสังเกตสูงสุด 600 วินาที ผลการศึกษาในหัวข้อต่าง ๆ มีดังนี้

การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในภาชนะที่มีแรงเสียดทานผนังต่างกัน (Motion of granular materials)

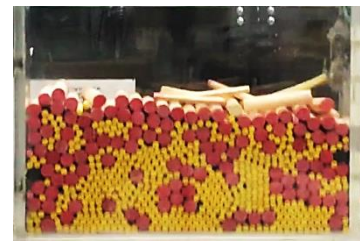
การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์มีความสูงเริ่มต้นด้านซ้ายของภาชนะ 10.40 เซนติเมตร ความสูงเริ่มต้นด้านขวาของภาชนะ 12.14 เซนติเมตร แสดงผลได้ดังภาพที่ 4.2 – 4.5



(ก)



(ข)



(ค)



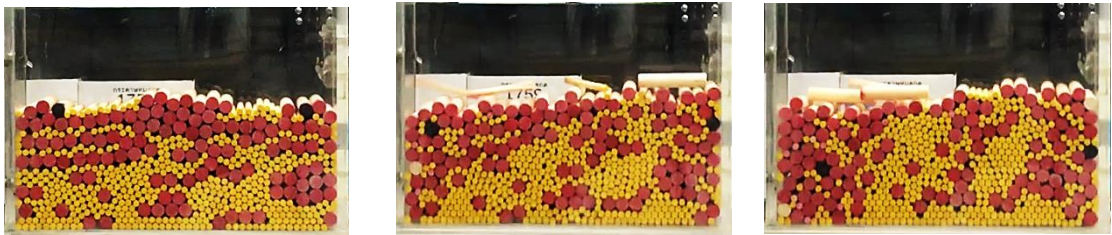
(ง)



(จ)

ภาพที่ 4.2 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังกระดาษฟอยล์ (ก) 1 วินาที (ข) 137 วินาที
(ค) 264 วินาที (ง) 412 วินาที (จ) 600 วินาที

จากภาพที่ 4.2 พบว่าวัสดุเม็ดเริ่มต้นจะอยู่ด้านบน จากนั้นวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของเคลื่อนที่มายังด้านข้างของภาชนะด้วยทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดด้านขวาจะเคลื่อนที่มายังด้านข้างภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ลงมาด้านล่าง จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที วัสดุเม็ดยังเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม สำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดจากวัสดุผนังอะคริลิก จะเกิดการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับผนังกระดาษฟอยล์ แสดงดังภาพที่ 4.3 แต่วัสดุเม็ดด้านซ้ายจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างมายังบริเวณตรงกลางของภาชนะเล็กน้อยแล้วเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที ทำให้ไม่เกิดการพาทั้งการเคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษฟอยล์และอะคริลิก



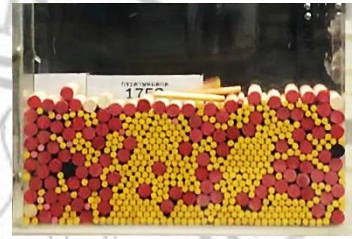
(ก)

(ข)

(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 4.3 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังอะคริลิก (ก) 1 วินาที (ข) 102 วินาที
(ค) 28 วินาที (ง) 483 วินาที (จ) 600 วินาที



(ก)



(ข)



(ค)

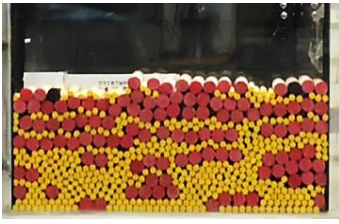


(ง)



(จ)

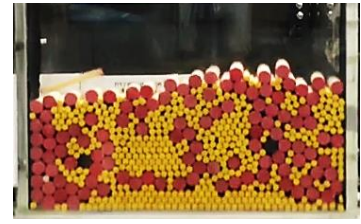
ภาพที่ 4.4 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (ก) 1 วินาที
(ข) 14 วินาที (ค) 80 วินาที (ง) 151 วินาที (จ) 444 วินาที



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



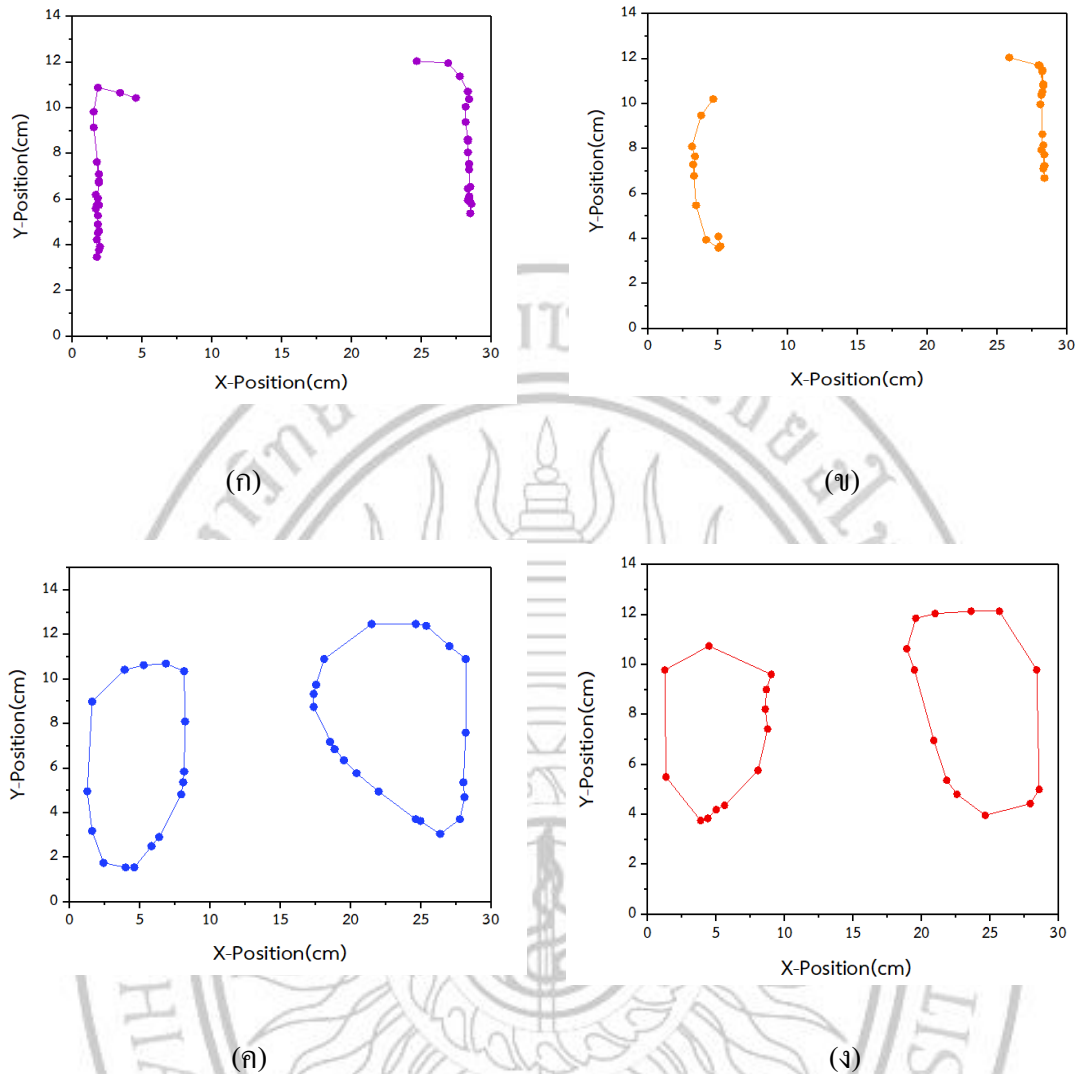
(จ)

ภาพที่ 4.5 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังผ้ากำมะหยี่ (ก) 1 วินาที (ข) 7 วินาที
(ค) 26 วินาที (ง) 59 วินาที (จ) 89 วินาที

จากภาพที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าวัสดุเม็ดเริ่มต้นอยู่บริเวณด้านบน จากนั้นวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายเคลื่อนที่มายังด้านข้างของภาชนะด้วยทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดด้านขวาจะเคลื่อนที่มายังด้านข้างภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา แล้วจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณตรงกลางของภาชนะและเคลื่อนที่ไปบริเวณด้านบนอีกครั้ง ทำให้เกิด “การพา” 1 รอบ

รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด (Pattern of granular material)

ในการศึกษาที่ผ่านมาส่วนใหญ่ได้พิจารณารูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด โดยกำหนดให้แกนนอนเป็นตำแหน่งของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ในแนวแกน X ส่วนแนวตั้งเป็นตำแหน่งของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ในแนวแกน Y แสดงได้ดังภาพที่ 4.6

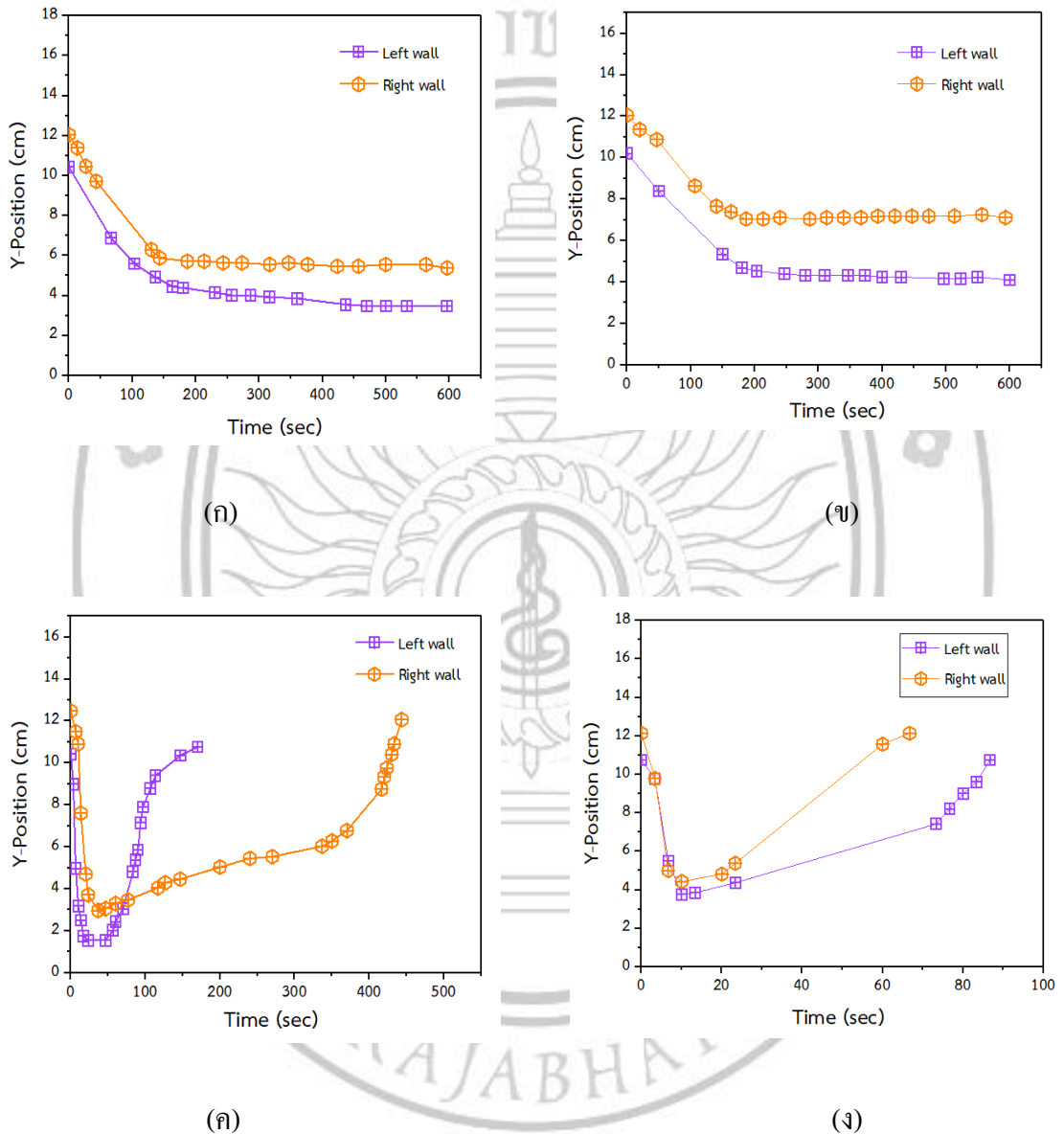


ภาพที่ 4.6 รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ (ก) ผนังกระดาษฟอยล์ ($\mu=0.376$) (ข) ผนังอะคริลิก ($\mu=0.432$) (ค) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu=0.79$) (ง) ผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu=0.825$)

จากภาพที่ 4.6 พบว่าการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในภาชนะที่มีแรงเสียดทานด้านข้างที่ต่างกัน ภายใต้ความเร่งและความถี่เดียวกัน ทำให้เกิดรูปแบบการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดจากผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ จะมีรูปแบบคล้ายวงรี 2 วงซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านผนัง 2 ข้าง ภาพที่ 4.6 (ค) – (ง) แต่ทั้ง 2 วงจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน เนื่องมาจากการจัดเรียงวัสดุเม็ดลงในภาชนะเป็นแบบสุ่ม

เวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการพา (Time of convection motion)

ผู้วิจัยได้ศึกษาเวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการพา โดยกำหนดแกนนอนเป็นระยะเวลาที่เกิดการพา แต่ถ้าไม่เกิดการพาจะกำหนดระยะเวลาที่สังเกตสูงสุด 600 วินาที ส่วนแกนตั้งเป็นความสูงของวัสดุเมื่อเคลื่อนที่ ดังแสดงภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการเกิดการพากับตำแหน่งในแกน Y เมื่อวัสดุเม็ดเคลื่อนที่ผ่านผนัง

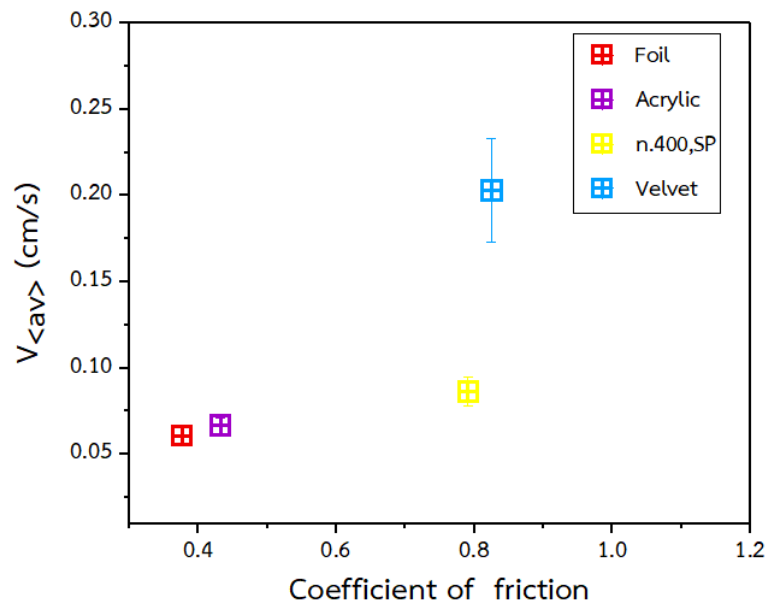
ชนิดต่าง ๆ (ก) ผนังกระดาษฟอยล์ ($\mu=0.376$) (ข) ผนังอะคริลิก ($\mu=0.432$)

(ค) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu=0.79$) (ง) ผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu=0.825$)

จากภาพที่ 4.7 พบว่า วัสดุเม็ดเริ่มต้นที่ความสูง 10.40 เซนติเมตร สำหรับวัสดุเม็ดที่อยู่ผนังด้านซ้าย และ 12.14 เซนติเมตรสำหรับวัสดุเม็ดที่อยู่ผนังด้านขวา วัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ลงทำให้ความสูงของตำแหน่งวัสดุเม็ดลดลงจนกระทั่งเวลา 100 วินาที ความสูงของวัสดุเม็ดจะเริ่มคงที่ ดังภาพที่ 4.7 (ก) เนื่องจากวัสดุเม็ดเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม เช่นเดียวกับวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังอะคริลิก ดังภาพที่ 4.7 (ข) จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที วัสดุเม็ดยังเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ความสูงจะลดลงจนกระทั่งเวลา 50 วินาที วัสดุเม็ดจะมีความสูงเพิ่มขึ้น จนถึงเวลา 170 วินาทีสำหรับวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายและ 443 วินาทีสำหรับวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวา ความสูงจะเท่ากับความสูงเริ่มต้น และวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่ ความสูงของวัสดุเม็ดจะลดลงจากเวลาเริ่มต้นจนกระทั่งเวลา 20 วินาที ความสูงของวัสดุเม็ดจะเพิ่มขึ้น เมื่อเวลา 86 วินาทีความสูงของวัสดุเม็ดด้านซ้ายจะสูงเท่ากับความสูงเริ่มต้น ส่วนวัสดุเม็ดด้านขวาจะใช้เวลา 66 วินาที ความสูงของวัสดุเม็ดจึงเท่ากับความสูงเริ่มต้น ดังนั้นวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่จะใช้เวลาในการเกิดการน้อยกว่าผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิกไม่เกิดการพา

ความเร็วเฉลี่ย (Average velocity)

ผู้วิจัยได้ศึกษาความเร็วเฉลี่ยที่เกิดขึ้น เป็นความเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์ 2 อนุภาค คือ วัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายและวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาของภาชนะ



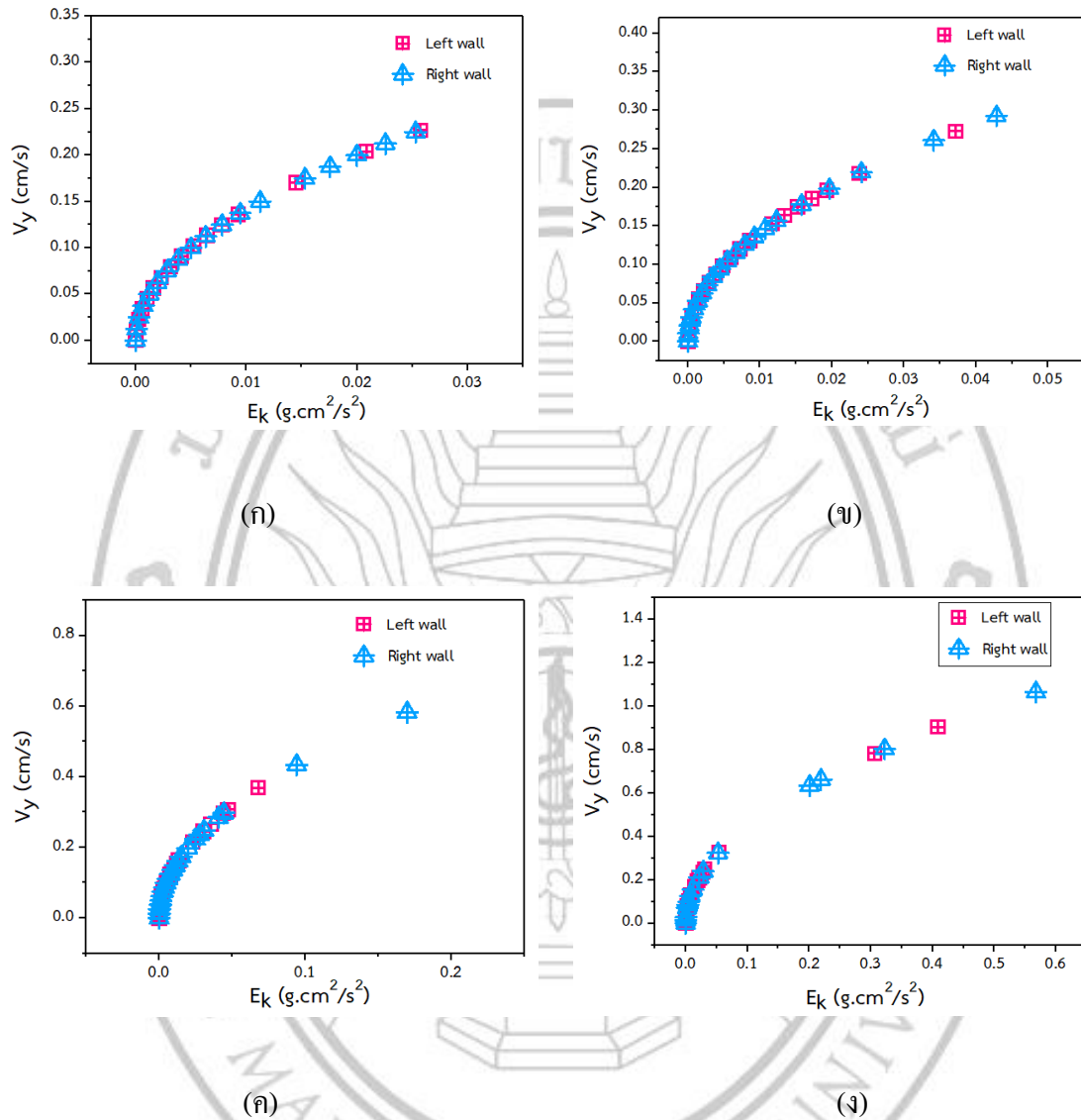
ภาพที่ 4.8 ความเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์กับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกับผนังชนิดต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.8 พบว่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกับผนังกระดาษฟอยล์มีค่าเท่ากับ 0.379 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกับผนังอะคริลิก ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ ที่มีค่า 0.432 0.791 และ 0.825 ตามลำดับ จึงทำให้ความเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดมีค่าน้อยที่สุดคือ ด้วยซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.061 เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนความเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.203 เซนติเมตรต่อวินาที

พลังงานจลน์ในแนวตั้ง (Vertical kinetic energy)

จากการสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดเมื่อผ่านผนังด้านข้างของภาชนะ พบว่าวัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่เร็วกว่าบริเวณอื่น แต่ด้านข้างของภาชนะที่เป็นผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิก วัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่อยู่บริเวณด้านข้างและจะไม่เคลื่อนที่ขึ้นไปยังบริเวณกลางภาชนะ ดังนั้นจึงพิจารณาพลังงานจลน์กับความเร็วในแนวตั้งของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์เท่านั้น พบว่า พลังงานจลน์มีค่ามากเมื่อความเร็วในแนวตั้งมีค่ามาก จากนั้นพลังงานจลน์จะลดลงเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดลดลง จากภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่า วัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ช้าเมื่อผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิกจึงทำให้พลังงานจลน์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ เนื่องจากวัสดุเม็ดเคลื่อนที่เร็วและใช้เวลาน้อย

ดังนั้นจึงทำให้วัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิกไม่สามารถเคลื่อนที่ไปบริเวณกลางภาชนะได้



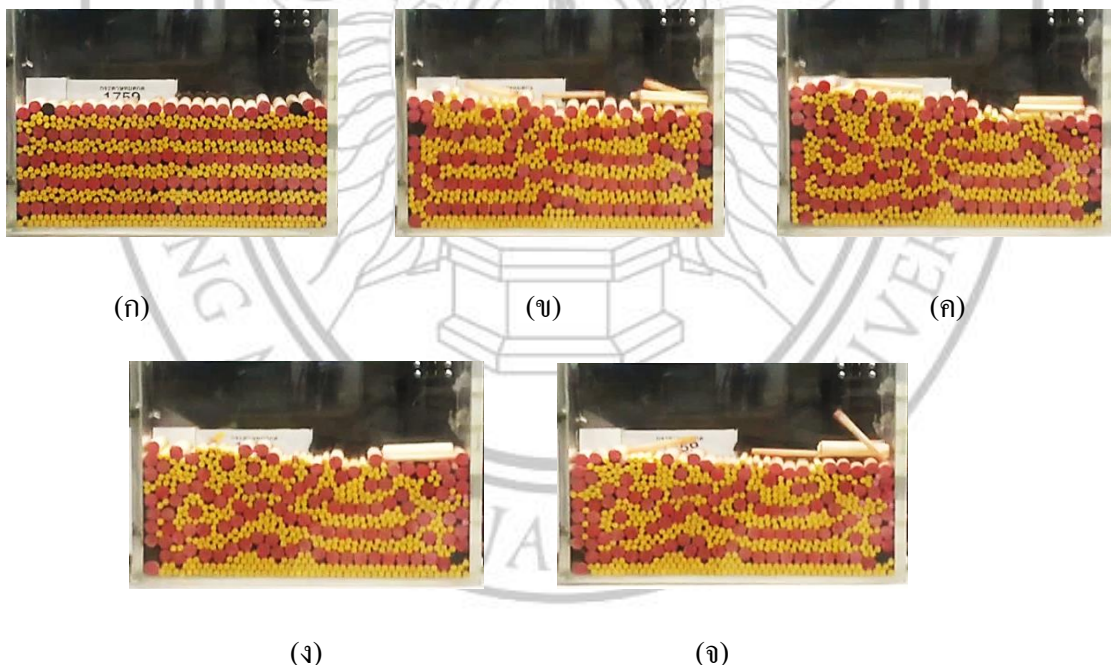
ภาพที่ 4.9 พลังงานจลน์กับความเร็วในแกนตั้งของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ (ก) ผนังกระดาษฟอยล์ ($\mu=0.376$) (ข) ผนังอะคริลิก ($\mu=0.432$) (ค) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu=0.79$) (ง) ผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu=0.825$)

ตอนที่ 2.2 การศึกษาพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดโดยการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบ ชั้น

ในการศึกษาการเกิดการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดจากแรงเสียดทานผนังภายใต้การสั่นในแนวตั้ง ทำการทดลองโดยนำผนังชนิดต่าง ๆ ติดด้านข้างของภาชนะทั้งสองด้าน จากนั้นนำวัสดุเม็ดทั้งสองขนาดมาจัดเรียงลงในภาชนะแบบชั้นแล้วสั่นในแนวตั้งทั้งระบบโดยใช้จำนวนอนุภาคเท่ากับ 460 และ 115 อนุภาค เพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทดลองในที่นี้จะใช้วัสดุผนัง ได้แก่ อะคริลิก ผ้ากำมะหยี่ กระดาษฟอยล์ และกระดาษทรายเบอร์ 400 ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกชนิดวัสดุผนังที่มีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มีค่าแตกต่างกัน การทดลองจะใช้ความเร่งไว้มีค่าเท่ากับ 3 ความถี่เท่ากับ 12.21 รอบต่อวินาที และเวลาการสังเกตสูงสุด 600 วินาที เหมือนเดิม ผลการศึกษาในหัวข้อต่าง ๆ มีดังนี้

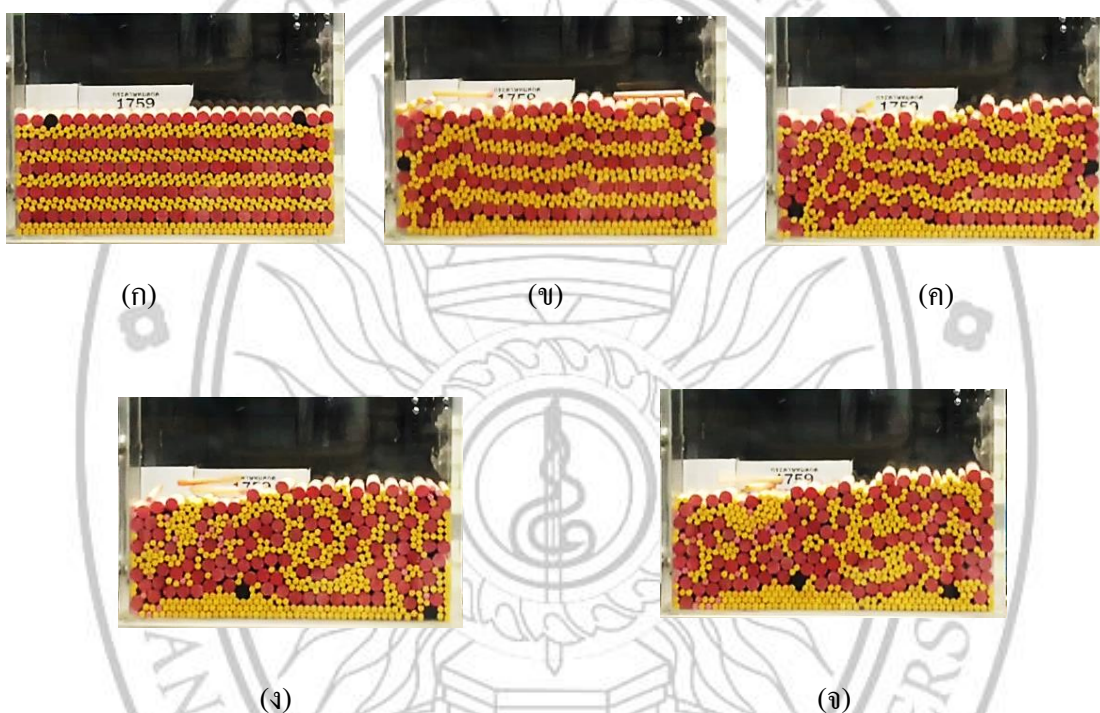
การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในภาชนะที่มีแรงเสียดทานผนังต่างกัน (Motion of granular materials)

การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์จะเริ่มต้นที่ความสูง 12.1 เซนติเมตรทั้งด้านซ้ายและด้านขวา แสดงดังภาพที่ 4.10 – 4.13



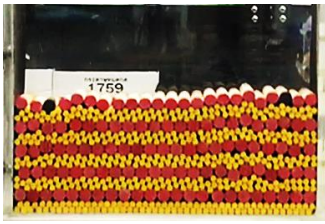
ภาพที่ 4.10 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังกระดาษฟอยล์ (ก) 1 วินาที
(ข) 97 วินาที (ค) 234 วินาที (ง) 439 วินาที (จ) 600 วินาที

จากภาพที่ 4.10 พบว่าวัสดุเม็ดเริ่มต้นจะอยู่ด้านบน จากนั้นวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของเคลื่อนที่มายังด้านข้างของภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดด้านขวาจะเคลื่อนที่มายังด้านข้างภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา วัสดุเม็ดเคลื่อนที่ลงมาด้านล่าง จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที วัสดุเม็ดยังคงเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม สำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดจากวัสดุผนังอะคริลิก จะเกิดการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับผนังกระดาษฟอยล์ แสดงดังภาพที่ 4.11 แต่วัสดุเม็ดด้านซ้ายจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างมายังบริเวณตรงกลางของภาชนะแล้วเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที ทำให้ไม่เกิดการพาทั้งการเคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษฟอยล์และอะคริลิก

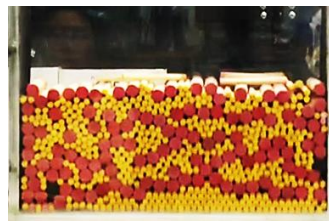


ภาพที่ 4.11 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังอะคริลิก (ก) 1 วินาที (ข) 118 วินาที (ค) 209 วินาที (ง) 454 วินาที (จ) 600 วินาที

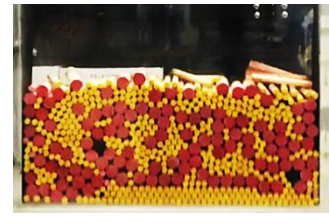
จากภาพที่ 4.12 วัสดุเม็ดอยู่บริเวณด้านบน จากนั้นวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะจะเคลื่อนที่มายังด้านข้างของภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดด้านขวาจะเคลื่อนที่มายังด้านข้างภาชนะด้วยทิศตามเข็มนาฬิกา แล้วจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณตรงกลางของภาชนะและเคลื่อนที่ไปบริเวณด้านบนอีกครั้ง ทำให้เกิด “การพา” 1 รอบ เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่ผ่านผนังผ้ากัมมะหยี่ แสดงดังภาพที่ 4.13



(ก)



(ข)



(ค)

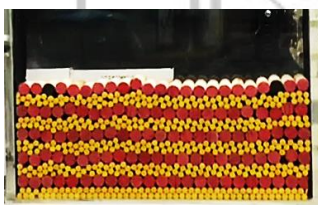


(ง)

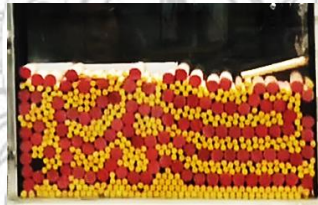


(จ)

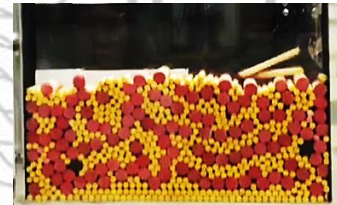
ภาพที่ 4.12 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (ก) 1 วินาที
(ข) 49 วินาที (ค) 78 วินาที (ง) 111 วินาที (จ) 413 วินาที



(ก)



(ข)



(ค)



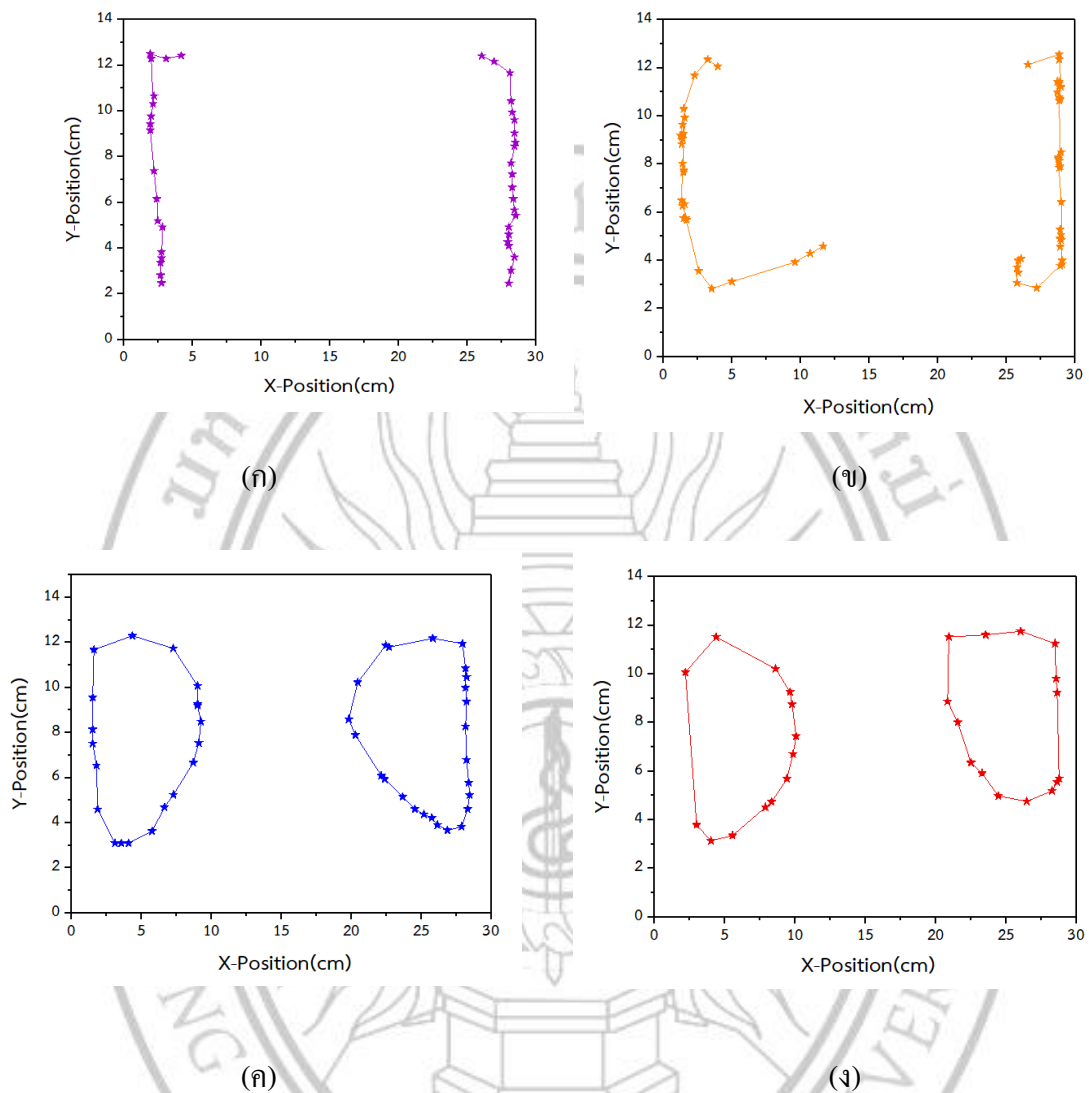
(ง)



(จ)

ภาพที่ 4.13 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านวัสดุผนังผ้ากำมะหยี่ (ก) 1 วินาที (ข) 15 วินาที
(ค) 34 วินาที (ง) 67 วินาที (จ) 71 วินาที

รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด (Pattern of granular material)

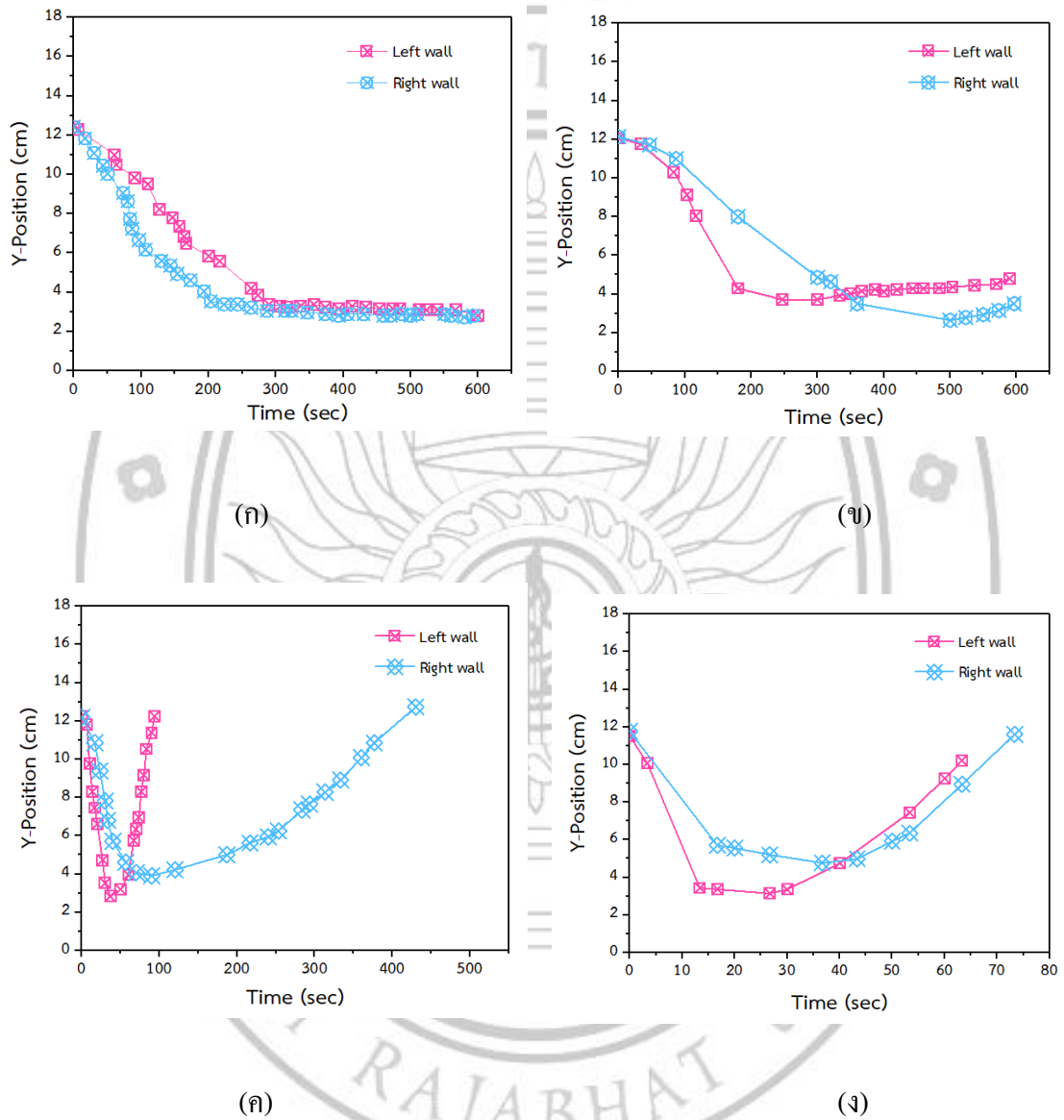


ภาพที่ 4.14 รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ (ก) ผนังกระดาษฟอยล์ ($\mu=0.376$) (ข) ผนังอะคริลิก ($\mu=0.432$) (ค) ผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ($\mu=0.79$) (ง) ผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu=0.825$)

จากภาพที่ 4.14 พบว่าการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในภาชนะที่มีแรงเสียดทานด้านข้างที่ต่างกันภายใต้ความเร่งและความถี่เดียวกัน ทำให้เกิดรูปแบบการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน โดยรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดจากผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ จะมีรูปแบบคล้ายวงรี

2 วง ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ผ่านผนัง 2 ข้าง อีกทั้งยังมีรูปแบบที่คล้ายกันทั้ง 2 วง เนื่องจากมีการจัดเรียงวัสดุเม็ดเหมือนกัน

เวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการพา (Time of convection motion)



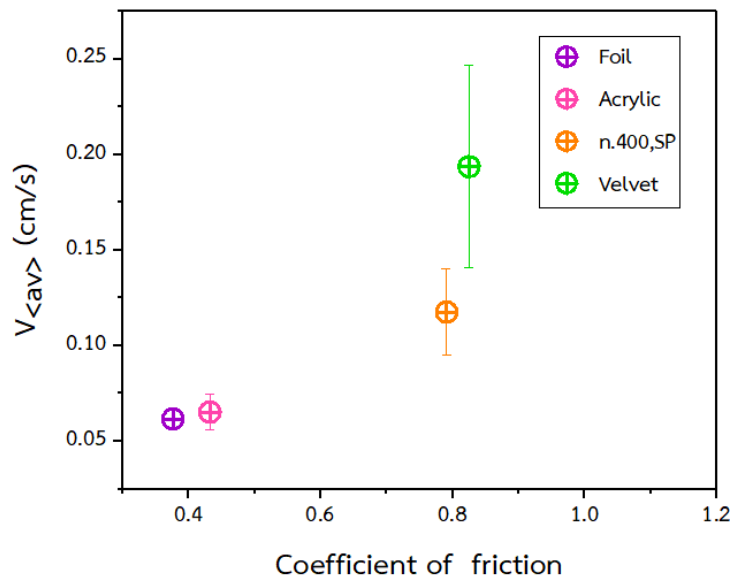
ภาพที่ 4.15 ความสูงกับเวลาของวัสดุเม็ดที่เกิดจากผนังชนิดต่าง ๆ (ก) ผนังกระดาชฟอยล์

($\mu = 0.376$) (ข) ผนังอะคริลิก ($\mu = 0.432$) (ค) ผนังกระดาชทรายเบอร์ 400

($\mu = 0.79$) (ง) ผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu = 0.825$)

จากภาพที่ 4.15 พบว่า วัสดุเม็ดที่วิเคราะห์เริ่มต้นที่ความสูง 12.1 เซนติเมตร วัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ลงทำให้ความสูงของตำแหน่งวัสดุเม็ดลดลงจนกระทั่งเวลา 150 วินาที ความสูงของวัสดุเม็ดจะเริ่มคงที่ ดังภาพที่ 4.15 (ก) เนื่องมาจากวัสดุเม็ดเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม เช่นเดียวกับวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังอะคริลิก ดังภาพที่ 4.15 (ข) จนกระทั่งเวลาผ่านไป 600 วินาที วัสดุเม็ดยังเคลื่อนที่อยู่ตำแหน่งเดิม ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ความสูงจะลดลงจนกระทั่งเวลา 50 วินาที วัสดุเม็ดจะมีความสูงเพิ่มขึ้น จนถึงเวลา 93 วินาทีสำหรับวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายและ 430 วินาทีสำหรับวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวา ความสูงจะเท่ากับความสูงเริ่มต้น และวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่ ความสูงของวัสดุเม็ดจะลดลงจากเวลาเริ่มต้นจนกระทั่งเวลา 30 วินาทีที่ผนังด้านซ้ายและ 53 วินาทีที่ผนังด้านขวา ความสูงของวัสดุเม็ดจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเวลา 63 วินาที ความสูงของวัสดุเม็ดด้านซ้ายจะสูงเท่ากับความสูงเริ่มต้น ส่วนวัสดุเม็ดด้านขวาจะใช้เวลา 73 วินาที ความสูงของวัสดุเม็ดจึงเท่ากับความสูงเริ่มต้น ดังนั้นวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่จะใช้เวลาในการเกิดการน้อยกว่าผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 ส่วนวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิกไม่เกิดการพา

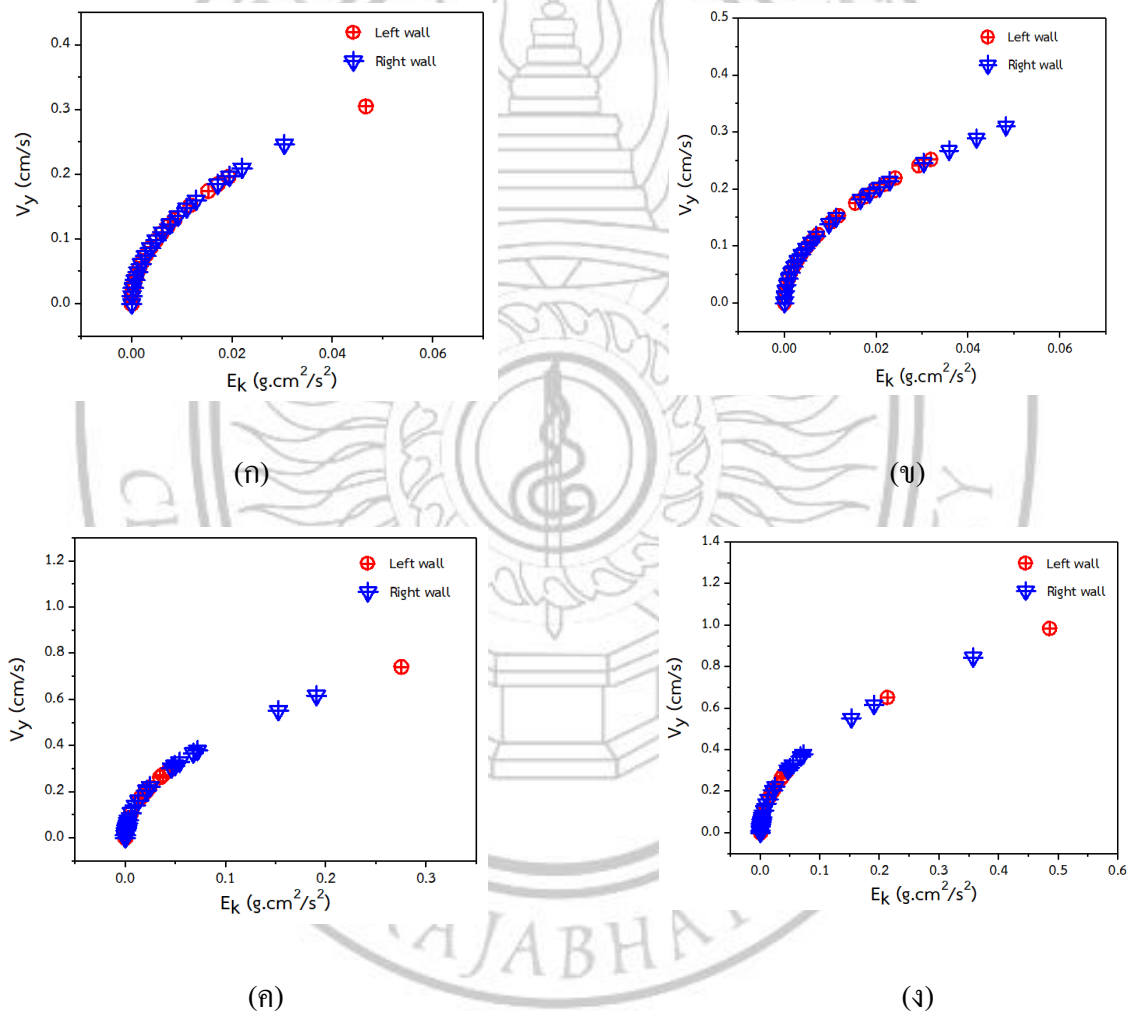
ความเร็วเฉลี่ย (Average velocity)



ภาพที่ 4.16 ความเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่วิเคราะห์กับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกับผนังชนิดต่าง ๆ

จากภาพที่ 4.16 พบว่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังกระดาชพอยล์มีค่าเท่ากับ 0.379 ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังอะคริลิก ผนังกระดาชทรายเบอร์400 และผนังผ้ากำมะหยี่ ที่มีค่า 0.432 0.791 และ 0.825 ตามลำดับ จึงทำให้ความเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดมีค่าน้อยที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.061 เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนความเร็วเฉลี่ยของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังผ้ากำมะหยี่มีค่ามากที่สุด เท่ากับ 0.194 เซนติเมตรต่อวินาที

พลังงานจลน์กับความเร็วในแนวตั้ง (Vertical kinetic energy)



ภาพที่ 4.17 พลังงานจลน์กับความเร็วในแกนตั้งของวัสดุเม็ดที่เกิดจากวัสดุผนังชนิดต่าง ๆ

(ก) ผนังกระดาชพอยล์ ($\mu=0.376$) (ข) ผนังอะคริลิก ($\mu=0.432$) (ค) ผนังกระดาชทรายเบอร์400 ($\mu=0.79$) (ง) ผนังผ้ากำมะหยี่ ($\mu=0.825$)

จากภาพที่ 4.17 พบว่าพลังงานจลน์มีค่ามากเมื่อความเร็วในแนวตั้งมีค่ามาก จากนั้นพลังงานจลน์จะลดลงเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดลดลง วัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่ช้าเมื่อผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิกจึงทำให้พลังงานจลน์มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานจลน์ของวัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ เนื่องจากวัสดุเม็ดเคลื่อนที่เร็วและใช้เวลาน้อย ดังนั้นจึงทำให้วัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่ผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิกไม่สามารถเคลื่อนที่ไปบริเวณกลางภาชนะได้



บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพาบนกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวดิ่ง ที่ความถี่และความเร่งไร้มิติเดียวกัน โดยการวิเคราะห์วัสดุเม็ด 2 อนุภาค (อนุภาคสีดำ) พบว่า วัสดุเม็ดจะเคลื่อนที่จากด้านบนของกลุ่มวัสดุเม็ด มายังด้านข้างภาชนะที่ติดด้วยผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ จากนั้นเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณกลางภาชนะแล้วเคลื่อนที่สู่ด้านบนอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “การพา” โดยเกิดม้วนการพา 2 ม้วน บริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของภาชนะซึ่งม้วนการพาจะมีลักษณะคล้ายกันทั้ง 2 ม้วน ในกรณีที่จัดเรียงวัสดุเม็ดเริ่มต้นแบบชั้น การเกิดการพาของวัสดุเม็ดจากผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ เนื่องจากแรงเสียดทานมีค่ามากทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่มากส่งผลทำให้พลังงานจลน์มีค่ามากด้วยเมื่อเทียบกับพลังงานจลน์ของผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิก อีกทั้งการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบชั้นจะเกิดการพาได้เร็วกว่าการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่ม แต่วัสดุเม็ดที่เคลื่อนที่จากด้านบน มาด้านข้างผ่านผนังกระดาษฟอยล์และผนังอะคริลิก จากนั้นเคลื่อนที่อยู่บริเวณเดิมหรือแทบจะไม่เคลื่อนที่ ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณกลางภาชนะ จึงไม่เกิดการพา ทั้งนี้วัสดุเม็ดที่จัดเรียงแบบชั้นจะเคลื่อนที่ได้มากกว่าวัสดุเม็ดที่จัดเรียงแบบสุ่ม ดังนั้นพฤติกรรมการพาของกลุ่มวัสดุเม็ดที่สั่นในแนวดิ่งภายใต้ความถี่และความเร่งไร้มิติเดียวกัน มีปัจจัยหลักมาจากแรงเสียดทานผนัง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ได้แก่ พลังงานจลน์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ และการจัดเรียงวัสดุเม็ดเริ่มต้น

อภิปรายผล

งานวิจัยเรื่องผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพาบนกลุ่มวัสดุเม็ดภายใต้การสั่นในแนวตั้ง ผู้วิจัยศึกษาอิทธิพลของ 2 ปัจจัย ได้แก่ แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ และรูปแบบการจัดเรียงวัสดุเม็ด โดยในที่นี้ใช้วัสดุเม็ดสองขนาดเพื่อเสริมให้เกิดการพาขึ้น แล้วพิจารณาใน 5 หัวข้อ ดังนี้ 1. การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด (Motion of granular materials) 2. รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด (Pattern of granular material) 3. เวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการพา (Time of convection motion) 4. ความเร็วเฉลี่ย (Average velocity) 5. พลังงานจลน์ในแนวตั้ง (Vertical kinetic energy) โดยสามารถอธิบายผลในประเด็นสำคัญ ดังนี้

การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด (Motion of granular materials)

จากการทดลองพบว่า วัสดุเม็ดจะอยู่ด้านบนบนของกลุ่มวัสดุเม็ด หลังจากนั้นวัสดุเม็ดจะค่อย ๆ เคลื่อนที่มาทางด้านข้างของภาชนะ แล้วเคลื่อนที่มาบริเวณกลางภาชนะและเคลื่อนที่สู่ด้านบนของภาชนะอีกครั้ง เป็นการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ เรียกว่า “ การพา ” (สกันธ์ คล่องบุญจิต, 2553) โดยวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านซ้ายของภาชนะจะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะตามทิศทวนเข็มนาฬิกา ส่วนวัสดุเม็ดที่อยู่ด้านขวาภาชนะเคลื่อนที่ผ่านด้านข้างภาชนะตามทิศตามเข็มนาฬิกา (Wibowo et al, 2016) ซึ่งวัสดุเม็ดที่ไม่สามารถเกิดการพาได้ เป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีค่าน้อย ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะมีผลต่อความสามารถในการพา (Klongboonjit & Campbell, 2008)

รูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด (Pattern of granular material)

จากการทดลองพบว่า เมื่อวัสดุเม็ดเกิดการพา 1 รอบ วัสดุเม็ดจะเกิดม้วนการพา 2 ม้วน บริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของภาชนะ เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะจะลากวัสดุเม็ดที่ใกล้ผนังด้านข้างลงมาบริเวณด้านข้างภาชนะ (Chaiworm, Chung & Liaw, 2014) ถ้าแรงเสียดทานมีค่ามากพอที่จะช่วยให้วัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางระบบได้ แต่ถ้าแรงเสียดทานมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอวัสดุเม็ดก็ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลางของระบบได้

นอกจากนี้แล้วลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง X และตำแหน่ง Y มีลักษณะเป็นวงรี 2 วง ขนาดไม่เท่าในกรณีจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่ม และมีลักษณะคล้ายกันในกรณีมีการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบชั้น ทั้งนี้มีลักษณะครึ่งวงรี กรณีไม่สามารถเกิดการพา ดังนั้น แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ และการจัดเรียงวัสดุเม็ด มีผลต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด

เวลาที่ใช้สำหรับการเกิดการพา (Time of convection motion)

จากการทดลองพบว่า วัสดุเม็ดจะเกิดการพาได้เร็วหรือช้าเป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเม็ดกับผนังภาชนะ (Chaiworm, Chung & Liaw, 2014) ถ้าแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ

เมื่อกับผนังภาชนะมีค่ามาก จะทำให้เกิดการพาได้เร็ว แต่ถ้าแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเมื่อกับผนังภาชนะมีค่าน้อยหรือไม่เพียงพอต่อการเคลื่อนที่เข้าสู่ตรงกลางภาชนะ อีกทั้งวัสดุเมื่อกที่จัดเรียงเป็นชั้นสามารถเกิดการพาได้เร็วกว่าวัสดุเมื่อกที่จัดเรียงแบบสุ่ม ดังนั้นแรงเสียดทานระหว่างวัสดุเมื่อกกับผนังภาชนะ และการจัดเรียงวัสดุเมื่อกมีผลเวลาในการเกิดการพา

นอกจากนี้ลักษณะกราฟความสัมพัทธ์ระหว่างเวลากับตำแหน่ง Y ของผนังกระดาด พอยล์และผนังอะคริลิกกราฟจะลดลงในช่วงแรกแล้วเป็นเส้นตรงจนกระทั่งถึงเวลาที่กำหนด ส่วนกราฟระหว่างเวลาและตำแหน่ง Y ของผนังกระดาดทรายเบอร์ 400 และผนังผ้ากำมะหยี่ กราฟจะลดลงในช่วงแรกจากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงตำแหน่ง Y เท่ากับเริ่มต้น

ความเร็วเฉลี่ย (Average velocity)

จากการศึกษา พบว่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเมื่อกกับผนังภาชนะเป็นปฏิภาคตรงกับความเร็วจึง ดังนั้นวัสดุเมื่อกที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากก็จะสามารถเกิดการพาได้เร็วด้วยเช่นกัน ส่วนวัสดุเมื่อกที่มีความเร็วช้า อาจจะเกิดการพาได้ช้าหรือไม่สามารถเกิดการพาได้

พลังงานจลน์ในแนวตั้ง (Vertical kinetic energy)

จากการศึกษาพบว่า พลังงานจลน์เป็นปฏิภาคตรงกับความเร็วจึง โดยปัจจัยที่มีผลต่อพลังงาน ได้แก่ ความเร็ว แรงเสียดทานระหว่างวัสดุเมื่อกกับผนังภาชนะ และการจัดเรียงวัสดุเมื่อก

นอกจากนี้ลักษณะกราฟความสัมพัทธ์ระหว่างพลังงานจลน์กับความเร็วจึงในแนวตั้ง มีแนวโน้มเป็นเส้นโค้งเพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วในแนวตั้งเพิ่มขึ้น

ข้อเสนอแนะ

เนื่องมาจากในการศึกษาวิจัยนี้ได้เกิดปัญหาในขั้นตอนการทดลอง และมีการค้นพบองค์ความรู้เพิ่มเติมเพื่อเป็นแนวทางแก่ผู้สนใจศึกษาเกี่ยวกับการพาของวัสดุเมื่อก ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. การออกแบบภาชนะ ควรออกแบบภาชนะให้มีความกว้างมากกว่าความยาวของวัสดุเมื่อก เนื่องจากขณะสั้นวัสดุอาจจะติดภาชนะได้
2. ควรเพิ่มความกว้างของภาชนะ เพื่อศึกษาว่าการพาที่อาจจะเกิดมากกว่าหรือน้อยกว่า 2 ม้วน
3. ควรเพิ่มชนิดวัสดุผนัง เพื่อสามารถเปรียบเทียบได้ดีกว่า
4. อาจศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมพาของวัสดุเมื่อกภายใต้การสั่นในแนวตั้ง โดยให้ผนังด้านหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้

5. อาจศึกษาผลแรงเสียดทานผนังของพฤติกรรมการพาของวัสดุเมื่อดำเนินการค้นใน
แนวนอน

6. อาจจะใช้ความเร่งโน้มถ่วงหลายค่า เพื่อเปรียบเทียบผล



บรรณานุกรม

- ครรรชิต คำมูล, วิรัตน์ จันทร์กง, และธิรุฒิ หงส์พิทักษ์ชน. (2557). *การออกแบบและสร้างชุดทดสอบความเสียดทานสถิต*. ลำปาง: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลำปาง.
- บัณฑิตา ดอนกาวัน. (2555). *การพัฒนาความคิดรวบยอดด้วยชุดทดลองเรื่องกฎการอนุรักษ์พลังงานกล*. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- สกันธ์ คล่องบุญจิต. (2553). *การศึกษาอิทธิพลของปรากฏการณ์หมุนวนกับการผสมกันของระบบวัสดุเม็ดกลมในภาชนะบรรจุเชิง 2 มิติ ด้วยเทคนิคการจำลองเหตุการณ์แบบวัสดุเม็ดนี้ม*. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Andreotti, B., Forterre, Y. & Pouliquen, O. (2013). *Granular Media Between Fluid and Solid*. New York: Cambridge University Press.
- Artoni, R., & Richard, P. (2015). Effective wall friction in wall-bounded 3D dense granular flows. *Physical review letters*, 115(15), 158001.
- Brown, R. L. & Richards, J. C. (1970). *Principles of Powder Mechanics*. Oxford: Pergamon Press.
- Cambou, B., Jean, M. & Radjaï, F. (2009). *Micromechanics of Granular Materials*. Great Britain: CPI Antony Rowe, Chippenham and Eastbourne.
- Carr, J. F. & Walker, D. M. (1968). An annular shear cell for granular materials. *Powder Technology*, 1, 369.
- Chaiworn, P., Chung, F. F., & Liaw, S. S. (2014). Pseudo 2-Dimensional Trajectory of a Particle in Vibrating Granular Bed. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, 4(1), 27.
- Forterre, Y., & Pouliquen, O. (2002). Stability analysis of rapid granular chute flows: formation of longitudinal vortices. *Journal of Fluid Mechanics*, 467, 361-387.
- Fortini, A., & Huang, K. (2015). Role of defects in the onset of wall-induced granular convection. *Physical Review E*, 91(3), 032206.
- Göncü, F. (2012). *Mechanics of Granular Materials: Constitutive Behavior and Pattern Transformation*. Netherlands: Ipskamp Drukkers.
- Grey, R. O. & Beddow, J. K. (1969). On the Hausner ratio and its relationship to some properties of metal powders. *Powder Technology*, 2, 323.

- Hejmady, P., Bandyopadhyay, R., Sabhapandit, S., & Dhar, A. (2012). Scaling behavior in the convection-driven Brazil nut effect. *Physical Review E*, 86(5), 050301.
- Hsiau, S. S., & Chen, C. H. (2000). Granular convection cells in a vertical shaker. *Powder Technology*, 111(3), 210-217.
- Hsiau, S. S., Wang, P. C., & Tai, C. H. (2002). Convection cells and segregation in a vibrated granular bed. *AIChE Journal*, 48(7), 1430-1438.
- 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), 6875.
- Jaeger, H. M. & Nagel, S. R. (1992). Physics of the Granular State. *Science*, 255(5051), 1523-1531.
- Jaeger, H. M., Nagel, S. R. & Behringer, R. P. (1996). Granular solids, liquids and gases. *Reviews of Modern Physics*, 68, 1259-1273.
- Klongboonjit, S., & Campbell, C. S. (2008). Convection in deep vertically shaken particle beds. I. General features. *Physics of Fluids*, 20(10), 103301.
- Knight, J. B., Ehrichs, E. E., Kuperman, V. Y., Flint, J. K., Jaeger, H. M., & Nagel, S. R. (1996). Experimental study of granular convection. *Physical Review E*, 54(5), 5726.
- Kong, X. Z., Hu, M. B., Wu, Q. S., & Wu, Y. H. (2006). Effects of bottleneck on granular convection cells and segregation. *Granular Matter*, 8(3-4), 119-124.
- Liu, C., Wu, P., Wang, L., Tong, L., & Yin, S. (2017). Patterns of granular convection and separation in narrow vibration bed. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 140, p. 03031). EDP Sciences.
- Majid, M., & Walzel, P. (2009). Convection and segregation in vertically vibrated granular beds. *Powder Technology*, 192(3), 311-317.
- Rabinowicz, E. (1956). Stick and slip. *Scientific American*, 194(5), 109-119.
- Rao, K. K. & Nott, P. R. (2008). *An Introduction to Granular Flow*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Risso, D., Soto, R., Godoy, S., & Cordero, P. (2005). Friction and convection in a vertically vibrated granular system. *Physical Review E*, 72(1), 011305.

- Russel, W. B., Saville, D. A. & Schowalter, W. R. (1989). *Colloidal Dispersion*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sampson, J. B., Morgan, F., Reed, D. W., & Muskat, M. (1943). Studies in Lubrication: XII. Friction Behavior During the Slip Portion of the Stick-Slip Process. *Journal of Applied Physics*, 14(12), 689-700.
- Tai, C. H., & Hsiau, S. S. (n.d). *Dynamic Behaviors of Convection Rolls in a Vibrating Bed*. n.p.: n.p..
- Traore, P., & Laurentie, J. C. (2009, October). Numerical Simulation of Size Segregation in a Vertically Vibrated Bed. *In 11-th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*.
- Ueda, T., Matsushima, T., & Yamada, Y. (2011). Effect of particle size ratio and volume fraction on shear strength of binary granular mixture. *Granular Matter*, 13(6), 731-742.
- Wibowo, H. A. C., Ain, T. N., Nugraha, Y. P., Aji, D. P. P., Khotimah, S. N., & Viridi, S. (2016, August). Experimental study of granular convection in (real) two-dimension Brazil-nut effect. *Journal of Physics: Conference Series*, 739(1), 012053.
- Xue, K., Zheng, Y., Fan, B., Li, F., & Bai, C. (2013). The origin of granular convection in vertically vibrated particle beds: The differential shear flow field. *The European Physical Journal E*, 36(1), 8.
- Zeilstra, C., Collignon, J. G., van der Hoef, M. A., Deen, N. G., & Kuipers, J. A. M. (2008). Experimental and numerical study of wall-induced granular convection. *Powder technology*, 184(2), 166-176.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวสุภารัตน์ หาญขว้าง
วัน เดือน ปีเกิด	31 ตุลาคม 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	104 หมู่ 7 ตำบลแม่แรง อำเภอบ้านฝาง จังหวัดลำพูน 51120
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2553 – 2557 วิทยาศาสตร์บัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ สาขา วัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2559 – ปัจจุบัน วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการสอน วิทยาศาสตร์ แผนกการสอนฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

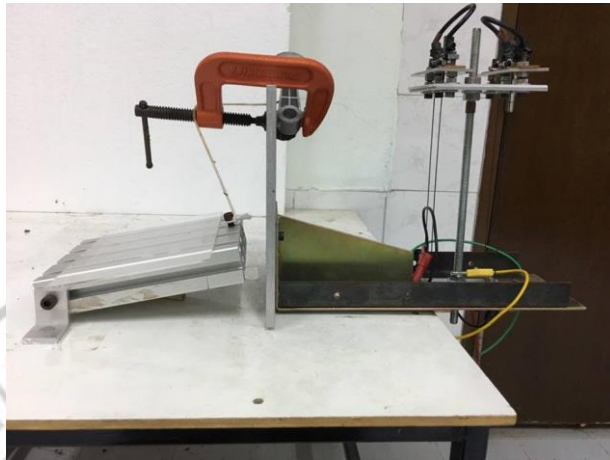
วัสดุเม็ดและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย



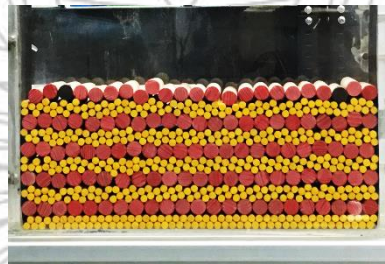
ภาพที่ ก-1 ตัวอย่างวัสดุเม็ดที่ทำจากไม้ไผ่ในรูปทรงกระบอก



ภาพที่ ก-2 ตัวอย่างผนังชนิดต่าง ๆ



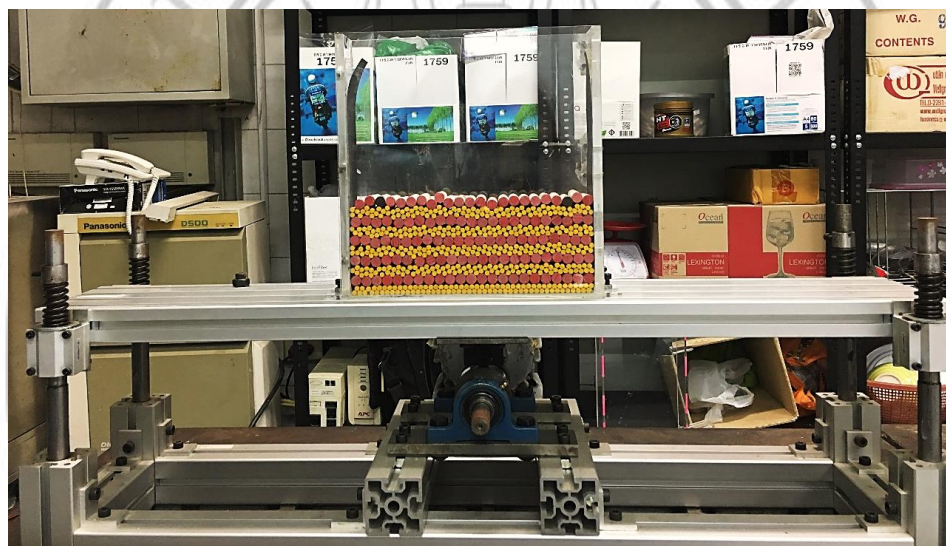
ภาพที่ ก-3 เครื่องทดสอบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแบบวิธีหามุมเอียง



ภาพที่ ก-4 ตัวอย่างการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบชั้น



ภาพที่ ก-5 ตัวอย่างการจัดเรียงวัสดุเม็ดแบบสุ่ม



ภาพที่ ก-6 ระบบการทดลองที่ประกอบวัสดุเม็ด กล้อง และเครื่องสั่นในแนวดิ่ง

ภาคผนวก ข

รายละเอียดของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

ชนิดวัสดุ	ครั้งที่1		ครั้งที่2		ครั้งที่3		ครั้งที่4		ครั้งที่5		เฉลี่ย	
	θ_1	μ_1	θ_2	μ_2	θ_3	μ_3	θ_4	μ_4	θ_5	μ_5	θ_a	μ_a
อะคริลิก	21.259	0.389	26.311	0.494	23.339	0.431	22.942	0.423	22.890	0.422	23.348	0.432
ผ้ากำมะหยี่	40.360	0.850	39.084	0.812	38.691	0.801	39.673	0.829	39.814	0.834	39.524	0.825
พลาสติก	18.583	0.336	17.436	0.314	18.585	0.336	17.497	0.315	18.640	0.337	18.148	0.328
ฟอยล์	20.874	0.381	20.225	0.368	21.346	0.391	19.335	0.351	21.141	0.387	20.584	0.376
ไม้อีโนกิ	25.953	0.487	22.592	0.416	24.998	0.466	18.034	0.326	20.646	0.377	22.445	0.413
กระดาษ												
ทราย600	43.548	0.951	40.743	0.861	38.898	0.807	36.722	0.746	42.828	0.927	40.548	0.856
กระดาษ												
ทราย400	39.170	0.815	40.271	0.847	39.137	0.814	37.103	0.756	35.799	0.721	38.296	0.790

ตาราง ข-1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างอนุภาคไม้อีโนกิและผนังชนิดต่าง ๆ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพ ข-1 มุมเอียงระหว่างวัสดุเม็ด(ไม้อีโนกิ) กับ กระดาษฟอยล์ (ก) ครั้งที่ 1
(ข) ครั้งที่ 2 (ค) ครั้งที่ 3 (ง) ครั้งที่ 4 (จ) ครั้งที่ 5



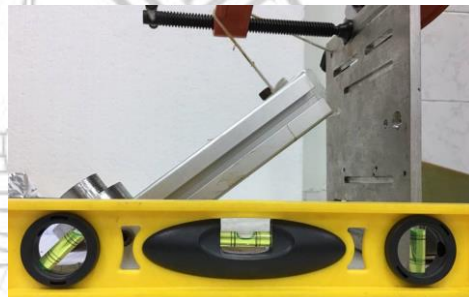
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

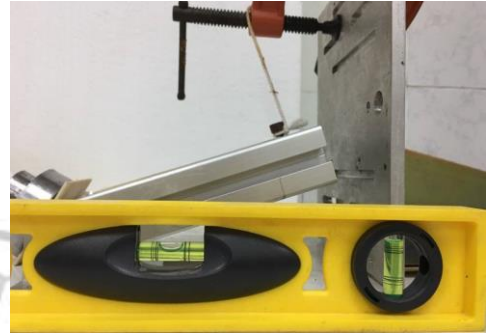


(จ)

ภาพ ข-2 มุมเอียงระหว่างวัสดุเม็ด(ไม้อีโนกิ) กับ ผ้ากำมะหยี่ (ก) ครั้งที่ 1 (ข) ครั้งที่ 2
(ค) ครั้งที่3 (ง) ครั้งที่ 4 (จ) ครั้งที่ 5



(ก)



(ข)



(ค)

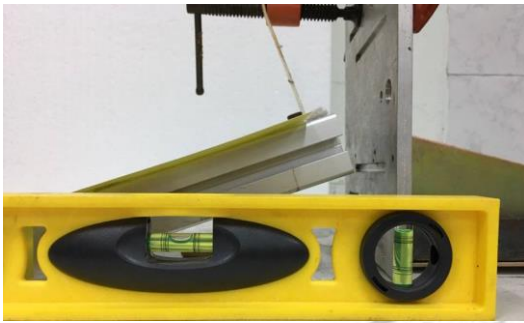


(ง)



(จ)

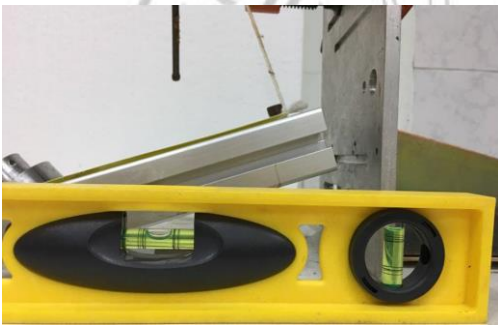
ภาพ ข-3 มุมเอียงระหว่างวัสดุเม็ด(ไม้อีโนกิ) กับ ไม้อีโนกิ (ก) ครั้งที่ 1 (ข) ครั้งที่ 2
(ค) ครั้งที่ 3 (ง) ครั้งที่ 4 (จ) ครั้งที่ 5



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพ ข-4 มุมเอียงระหว่างวัสดุเม็ด(ไม้อีโนกิ) กับ พลาสติก (ก) ครั้งที่ 1 (ข) ครั้งที่ 2
(ค) ครั้งที่ 3 (ง) ครั้งที่ 4 (จ) ครั้งที่ 5



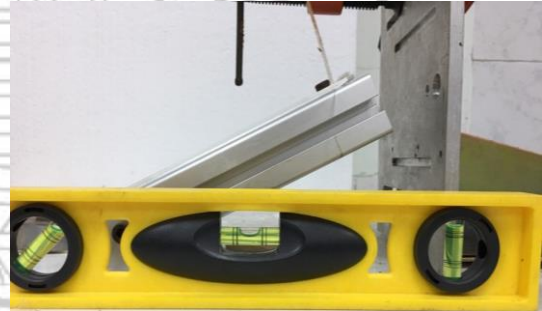
(ก)



(ข)



(ค)

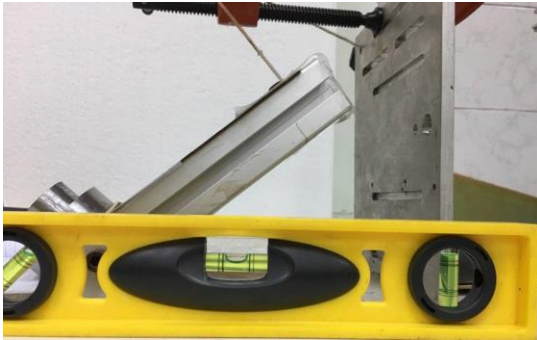


(ง)

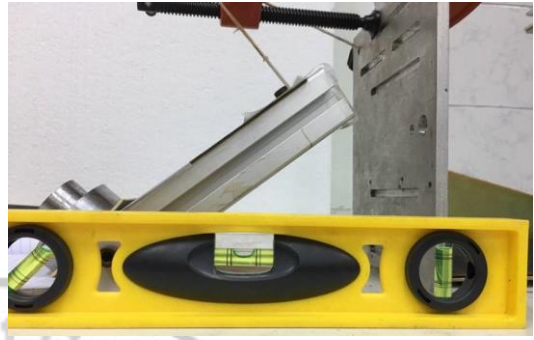


(จ)

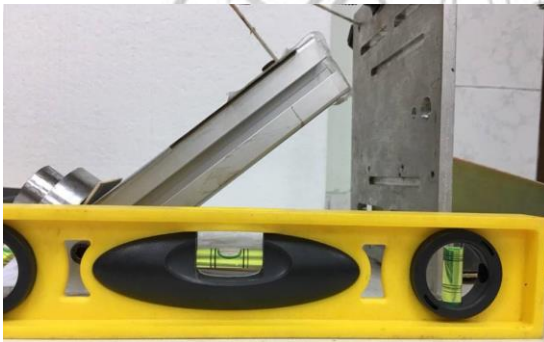
ภาพ ข-5 มุมเอียงระหว่างวัสดุเม็ด(ไม้อีโนกิ) กับ อะคริลิก (ก) ครั้งที่ 1 (ข) ครั้งที่ 2
(ค) ครั้งที่ 3 (ง) ครั้งที่ 4 (จ) ครั้งที่ 5



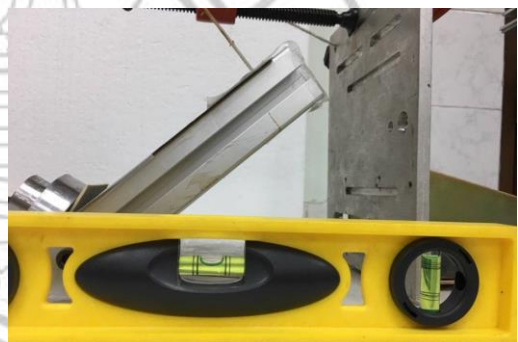
(ก)



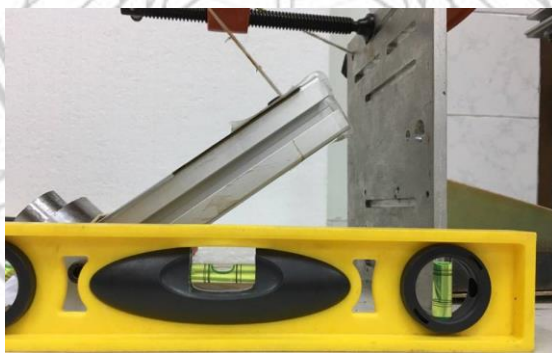
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพ ข-6 มุมเอียงระหว่างวัสดุเม็ด(ไม้อีโนกิ) กับ กระดาษทรายเบอร์400 (ก) ครั้งที่ 1
(ข) ครั้งที่ 2 (ค) ครั้งที่ 3 (ง) ครั้งที่ 4 (จ) ครั้งที่ 5



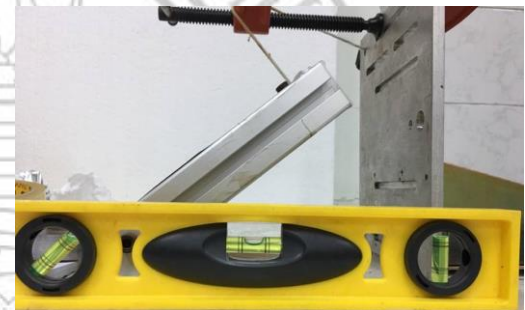
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพ ข-7 มุมเอียงระหว่างวัสดุเม็ด(ไม้อีโนกิ) กับ กระดาษทรายเบอร์600 (ก) ครั้งที่ 1
(ข) ครั้งที่ 2 (ค) ครั้งที่3 (ง) ครั้งที่ 4 (จ) ครั้งที่ 5

ภาคผนวก ค

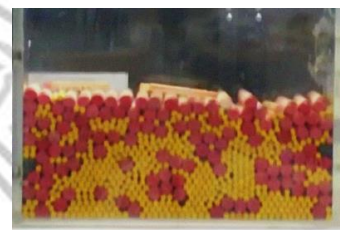
การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่จัดเรียงแบบสุ่มในภาชนะ



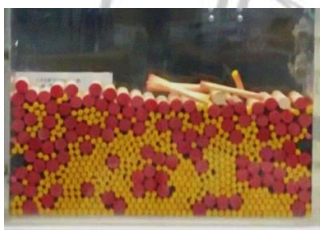
(ก)



(ข)



(ค)



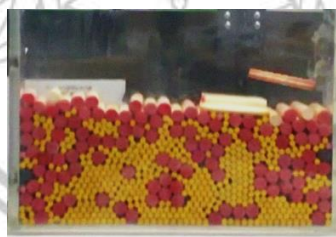
(ง)



(จ)

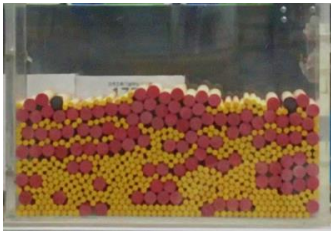


(ฉ)

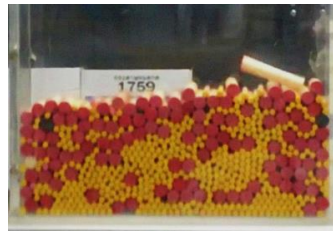


(ซ)

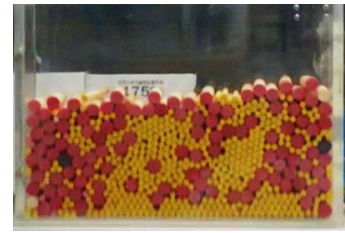
ภาพที่ ค-1 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านผนังกระดาษฟอยล์ (ก) 1 วินาที (ข) 100 วินาที (ค) 200 วินาที (ง) 300 วินาที (จ) 400 วินาที (ฉ) 500 วินาที (ซ) 600 วินาที



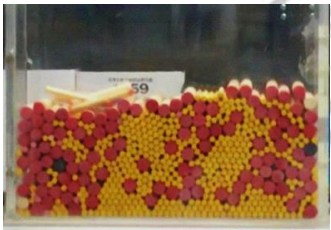
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

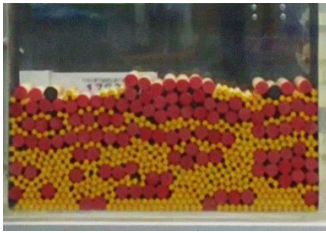


(ฉ)

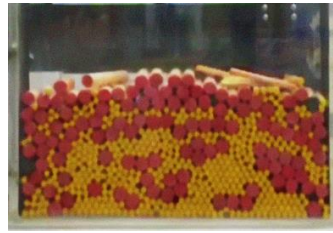


(ช)

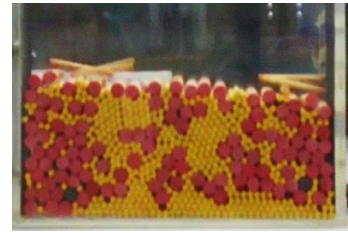
ภาพที่ ค-2 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านผนังอะคริลิก (ก) 1 วินาที (ข) 100 วินาที (ค) 200 วินาที (ง) 300 วินาที (จ) 400 วินาที (ฉ) 500 วินาที (ช) 600 วินาที



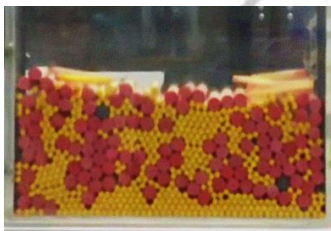
(ก)



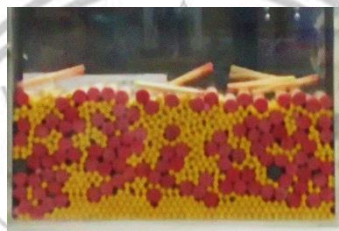
(ข)



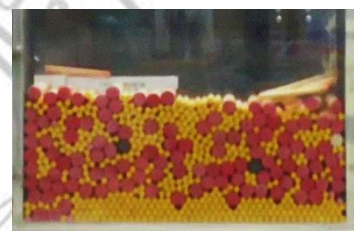
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

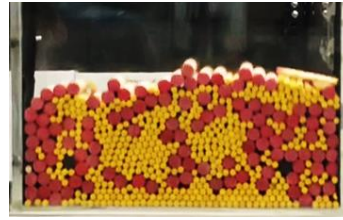


(ช)

ภาพที่ ค-3 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านผนังกระดาษทรายเบอร์400 (ก) 1 วินาที (ข) 10 วินาที (ค) 60 วินาที (ง) 120 วินาที (จ) 200 วินาที (ฉ) 300 วินาที (ช) 442 วินาที



(ก)



(ข)



(ค)

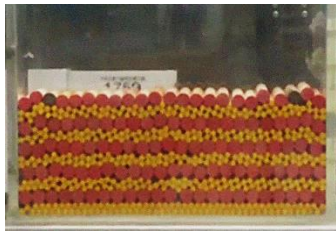


(ง)

ภาพที่ ค-4 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านผนังผ้ากำมะหยี่ (ก) 1 วินาที (ข) 20 วินาที
(ค) 40 วินาที (ง) 60 วินาที

ภาคผนวก ง

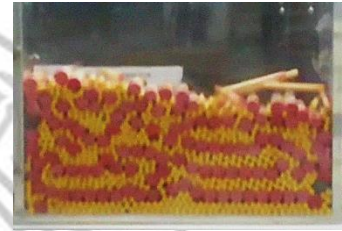
การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดที่จัดเรียงแบบชั้นในภาชนะ



(ก)



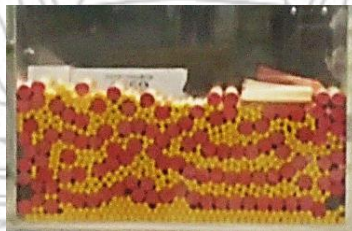
(ข)



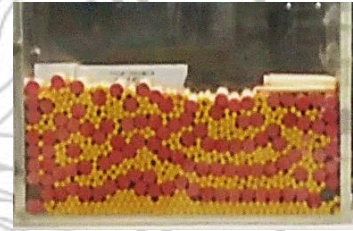
(ค)



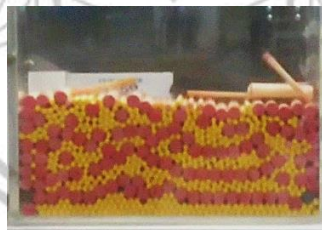
(ง)



(จ)

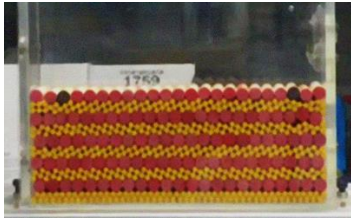


(ฉ)

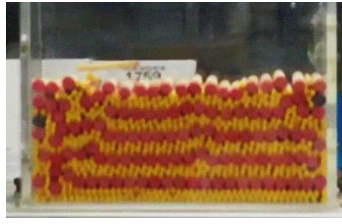


(ช)

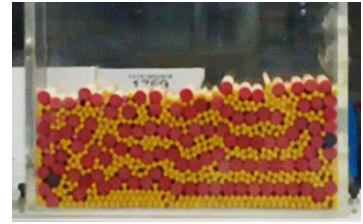
ภาพที่ ง-1 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านผนังกระดาษฟอยล์ (ก) 1 วินาที (ข) 100 วินาที (ค) 200 วินาที (ง) 300 วินาที (จ) 400 วินาที (ฉ) 500 วินาที (ช) 600 วินาที



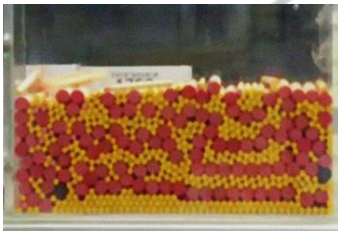
(ก)



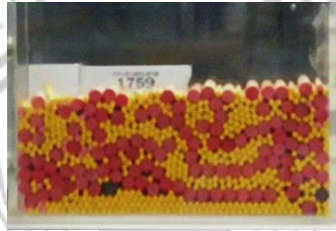
(ข)



(ค)



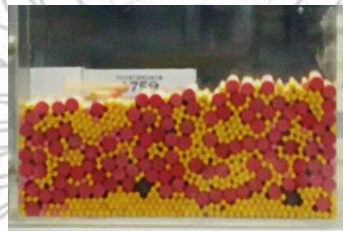
(ง)



(จ)



(ฉ)



(ช)

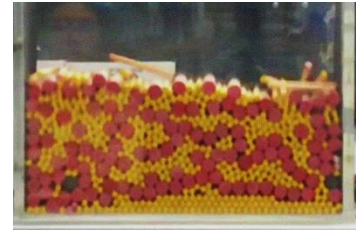
ภาพที่ ง-2 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านผนังอะคริลิก (ก) 1 วินาที (ข) 100 วินาที
(ค) 200 วินาที (ง) 300 วินาที (จ) 400 วินาที (ฉ) 500 วินาที (ช) 600 วินาที



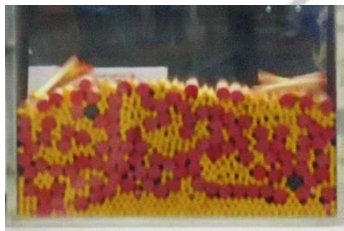
(ก)



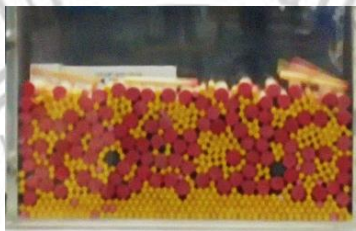
(ข)



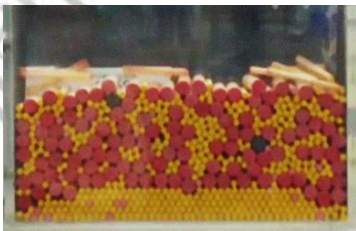
(ค)



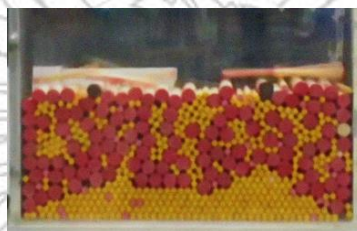
(ง)



(จ)

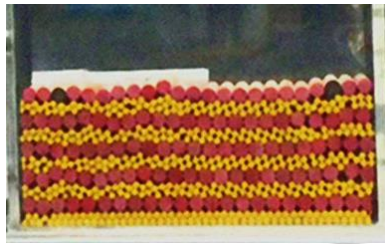


(ฉ)

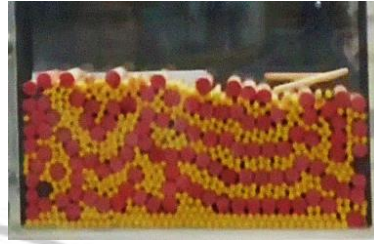


(ซ)

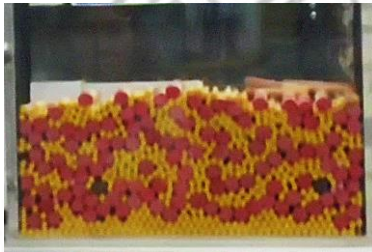
ภาพที่ ง-3 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านผนังกระดาษทรายเบอร์ 400 (ก) 1 วินาที
(ข) 20 วินาที (ค) 60 วินาที (ง) 100 วินาที (จ) 200 วินาที (ฉ) 300 วินาที
(ซ) 417 วินาที



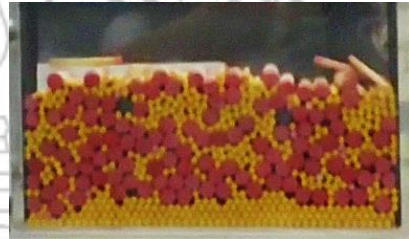
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ ง-4 การเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดผ่านผนังผ้ากำมะหยี่ (ก) 1 วินาที (ข) 20 วินาที
(ค) 40 วินาที (ง) 65 วินาที