

จำลองการเคลื่อนที่ของวัสดุในกระพ้อลำเลียงด้วยวิธี DEM DEM Simulation the Particle Flow in Bucket Elevator

สถาพร วังฉาย

ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Email : sathaphon.w@eng.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

กระพ้อลำเลียงคือเครื่องมือขนถ่ายวัสดุขึ้นในแนวตั้ง โดยทั่วไปจะมีใช้ในโรงสีข้าว อัตราการลำเลียงวัสดุเป็นสิ่งสำคัญที่ถูกนำมาพิจารณา จะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการหมุน ปริมาณการจ่ายวัสดุเข้าและจ่ายออกจากลูกกระพ้อลำเลียง ในการศึกษาที่น่าสนใจเสนอวิธีการหาตัวแปรประกอบการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยอาศัยหลักการของ Discrete Element Method (DEM) คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างวัสดุกับวัสดุและวัสดุกับผนังชิ้นงานถูกกำหนดในการจำลองเพื่อเพื่อคำนวณพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุปริมาณมวล (Bulk Materials) หรือวัสดุชนิดเม็ด (Granular Materials) ในขณะที่จ่ายออกจากกระพ้อลำเลียงด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ความเร็วรอบการทำงานในช่วงระหว่าง 70 – 130 รอบต่อนาที โดยใช้กล้องวิดีโอดิจิทัลบันทึกมุมสายตาของวัสดุ สุดท้ายผลจากการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุออกจากลูกกระพ้อลำเลียงที่ความเร็วต่าง ๆ มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองการเคลื่อนที่ของวัสดุจริง

คำสำคัญ : มุมสายตาของวัสดุ กระพ้อลำเลียง DEM ข้าวเปลือก คุณสมบัติวัสดุ

Abstract

Bucket elevator is the most common elevator used for the vertical transport. Currently, it was used in the rice mill, *the capacity is an important* factor in the choice of the conveyor, two types of the bucket conveyor need to be considered such as the rotational speed and level of the materials inside the bucket and discharge from the bucket. In this study will be presented the variables in the simulation using Discrete Element Method (DEM) to predict the movement of the bulk materials or the granular materials. The physical properties, mechanical properties and interaction properties of particles using in Discrete Element Method for predicting the behavior of materials movement in the bucket elevator. The experiment was operated in range between 70 - 130 rpm. The material discharge behavior

was recorded by the digital video camera to observe the bucket conveyor. After that, the results of particle behavior simulated by DEM has a good agreement with experimental data for ensuring the accuracy.

Keywords : Discharge Angle, Bucket Elevator, DEM, Paddy Rice, Material Properties

1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชอาหารหลักของคนส่วนใหญ่ในทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จะมีพื้นที่สำหรับทำนาข้าวอยู่ประมาณ 30% ของโลก [1] คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของข้าวเปลือกจะมีความสำคัญต่อการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์สำหรับลำเลียงวัสดุจากสถานที่หนึ่งไปยังสถานที่อื่นหรือตำแหน่งต่างๆ ตามที่ผู้ออกแบบต้องการรวมถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ลำเลียงให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุด คุณสมบัติของวัสดุที่ถูกนำไปใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วย ความหนาแน่นรวม (bulk density) ความหนาแน่นเนื้อ (solid density) โมดูลัสของแรงเฉือน (shear modulus) อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) สัมประสิทธิ์การคืนตัว (coefficient of restitution) สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิต (coefficient of static friction) และสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน (coefficient of rolling friction) มีการศึกษามากมายที่กล่าวถึงวิธีการทดสอบ [2] รวมถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

Discrete element modelling (DEM) กลายเป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุชนิดเม็ดหรือวัสดุผง [3] ในที่นี้จะใช้กระท้อลำเลียงเป็นเครื่องมือในการทดสอบและสร้างโมเดลในการจำลองเพื่อการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัสดุตัวอย่างประเภทเม็ด (ข้าวเปลือก) ที่สามารถมองเห็นพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุได้ด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีการนำมาใช้ในขบวนการผลิต การลำเลียงวัสดุ โดยหลักการของ DEM คือการติดตาม (track) แต่ละอนุภาคของวัสดุเม็ดในแต่ละขั้นตอนของการคำนวณในแต่ละช่วงของเวลาที่กำหนด การโคจรของอนุภาค ความเร็ว แรงกระทำ การหมุน และการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบโดยทำการคำนวณการมีปฏิสัมพันธ์ (relation) ระหว่างแต่ละอนุภาคและการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคกับสิ่งแวดล้อม (ผนังและอนุภาคอื่น) นั้นจะประยุกต์ใช้จากกฎข้อที่สองของนิวตันและกฎการเคลื่อนที่ [3] ณ จุดสัมผัสกันของแต่ละอนุภาคตลอดเวลาขณะวัสดุมีการเคลื่อนที่ ดังนั้น DEM จึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการคำนวณความเร็ว แรงกระทำ การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาค หรือแม้กระทั่งการแตกหักเสียหายของวัสดุเป็นชิ้นส่วนย่อยที่มีขนาดเล็กๆ จนกระทั่งกลายเป็นฝุ่นที่เกิดจากการชนกันระหว่างวัสดุเม็ด (หรือวัสดุผง) หรือแม้กระทั่งวัสดุชนกันกับผนังอุปกรณ์ ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวไม่สามารถหาได้ในห้องปฏิบัติการเพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุตลอดเวลาจากการทดสอบ

ในการศึกษานี้ได้นำเสนอวิธีการหาค่าคุณสมบัติวัสดุซึ่งประกอบด้วยคุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุตัวอย่างเพื่อใช้ประกอบการจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเลือกกระพ้อลำเลียงเป็นแบบจำลองเพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการสาดของข้าวเปลือกออกจากลูกกระพ้อลำเลียงที่ระดับความเร็วรอบต่าง ๆ ในช่วงระหว่าง 70 – 130 รอบต่อนาที โดยกำหนดความสูงของช่องทางจ่ายวัสดุเข้าที่ระดับความสูง 270 มม วัดจากฐานของกระพ้อลำเลียงซึ่งอยู่เหนือตำแหน่งศูนย์กลางของพู่เล็ล้อยตาม กระพ้อลำเลียงมีความสูง 2 เมตรและลูกกระพ้อมีปริมาตรความจุ 6.79×10^{-4} ลบ.ม. จำนวน 25 ลูกติดตั้งระยะห่างเท่ากันที่ 0.1905 ม. โครงสร้างของกระพ้อทำจากเหล็ก มุมสาดของวัสดุที่ได้จากการทดสอบจะนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมการสาดของวัสดุออกจากลูกกระพ้อโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (DEM) มาวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาควัสดุ

2. วัสดุและการทดสอบ

การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธี DEM นั้นจะถูกต้องแม่นยำเพียงใดขึ้นอยู่กับความถูกต้องแม่นยำของตัวแปรประกอบการจำลองซึ่งในที่นี้จะนำเสนอขั้นตอนการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประการแรกคือการทดสอบหาค่าคุณสมบัติวัสดุเพื่อนำเข้าโปรแกรมการจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบเพื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบคือ ข้าวเปลือกเป็นแบบแห้งชนิดยาวจากท้องตลาดโดยทั่วไปของประเทศไทย วัสดุทดสอบมีขนาดรูปร่างและค่าความเป็นทรงกลมสามารถทำการวัดได้โดยใช้เวอเนียร์คาลิเปอร์ทำการวัดขนาดความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนา (T) ของวัสดุทดสอบจำนวน 30 เม็ดและทำการหาค่าเฉลี่ยเพื่อคำนวณหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม (effective diameter (D_e)) [4] ได้จากสมการที่ (1) สำหรับขนาดของมวลและปริมาตร (Mass and volume) ของวัสดุตัวอย่างคิดค่าเฉลี่ยจากจำนวน 100 เม็ด มีน้ำหนักอยู่ที่ 2.26 กรัม มีขนาดความยาวอยู่ในช่วงระหว่าง 6.0 – 6.99 มม ปริมาตรวัสดุจำนวน 100 เม็ดถูกแทนที่ในน้ำพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำที่เกิดขึ้นและเฉลี่ยต่อหน่วยวัสดุแต่ละเม็ด [5]

$$D_e = (LWT)^{1/3} \quad (1)$$

ความหนาแน่นเนื้อ ความหนาแน่นรวมและค่าความพรุน (Solid density, bulk density and porosity) ความหนาแน่นเนื้อของวัสดุคืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักวัสดุ (kg) ต่อปริมาตรของวัสดุ (m^3) โดยไม่รวมช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคของวัสดุทดสอบ สามารถพิจารณาได้โดยการนำวัสดุทดสอบที่ทราบน้ำหนักแทนที่ในน้ำที่ทราบปริมาตรเบื้องต้นแล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้ำคือปริมาตรของวัสดุทดสอบจริง สำหรับกรณีความหนาแน่นรวมจะพิจารณาโดยการรวมช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคของวัสดุทดสอบด้วย พิจารณาได้โดยการนำหลอดแก้วที่ทราบน้ำหนักและปริมาตร ในที่นี้ใช้หลอดแก้วขนาด 1000 มิลลิลิตร หลังจากนั้นค่อยๆ เติมวัสดุทดสอบลงหลอดแก้วคงที่ระยะความสูงจากขอบของหลอดแก้วที่ระยะ 50 มม ด้วย

ความเร็วการเติมวัสดุคงที่จนกระทั่งวัสดุทดสอบล้นออกมาภายนอกของหลอดแก้ว หลังจากนั้นใช้ไม้บรรทัดค่อยๆ ปาดอย่างช้าๆ เอาส่วนที่ล้นออกจากขอบของหลอดแก้วโดยที่วัสดุส่วนที่ต้องการเอาออกจะต้องไม่ไปรบกวนวัสดุส่วนที่อยู่ในหลอดแก้ว แล้วนำวัสดุที่ได้ขึ้นไปชั่งน้ำหนักบนที่กค่าและคำนวณได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักวัสดุ (kg) ต่อปริมาตรของวัสดุ (m^3) ที่เกิดขึ้น [6] ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้งแล้วพิจารณาหาค่าเฉลี่ยสำหรับค่าความพรุนสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเนื้อของวัสดุทดสอบ (ρ_s) และความหนาแน่นรวมของวัสดุทดสอบ (ρ_b) [7] พิจารณาได้จากสมการที่ 2

$$P = \frac{1-\rho_b}{\rho_t} \times 100 \quad (2)$$

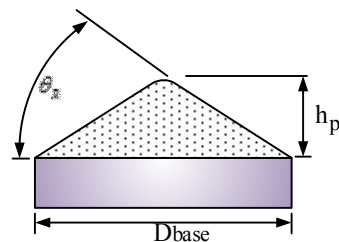
มุมกองวัสดุ (Angle of repose, θ_R) พิจารณาได้โดยการนำวัสดุทดสอบเทลงในฮอปเปอร์ส่วนบนจนเต็มแล้วปล่อยให้วัสดุไหลอย่างธรรมชาติผ่านช่องรูด้านล่างของฮอปเปอร์ไปกองบนแป้นระนาบทรงกลมที่กำหนดไว้ด้านล่าง จนกระทั่งกองวัสดุทดสอบบนแป้นระนาบทรงกลมคงที่ความสูงพิจารณาจากรูป 1(ก) มุมกองวัสดุ (θ_R) ที่ได้นั้นพิจารณาได้จากการวัดความกว้างของฐานทรงกลม (D_{base}) และความสูง (h_p) ของกองวัสดุดังแสดงในรูปที่ 1(ข) และคำนวณได้จากสมการที่ 3

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (Coefficient of Static Friction, μ_s) คือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะวัสดุอยู่นิ่งจนกระทั่งวัสดุนั้นเริ่มเคลื่อนที่ พิจารณาได้โดยการนำวัสดุทดสอบวางบนพื้นผิวระนาบ (แผ่นเหล็กที่ใช้ทำกระป๋องลำเลียง) และปรับมุมการหมุนของแผ่นระนาบเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งวัสดุทดสอบเริ่มมีการหมุนหรือเริ่มมีการเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างทำการจดบันทึกค่ามุม (θ) โดยการอ่านจากสเกลดังแสดงในรูปที่ 2(ก) จากนั้นคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 4

สัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of restitution, e) คืออัตราส่วนรากที่สองของความสูงระหว่างความสูงของวัสดุทดสอบหลังจากตกกระทบพื้นและกระดอนขึ้นในแนวตั้ง (h_r) และความสูงเริ่มต้นของวัสดุก่อนปล่อยตกกระทบพื้น (h_i) ดังแสดงดังรูปที่ 2(ข) และคำนวณได้จากสมการที่ 5

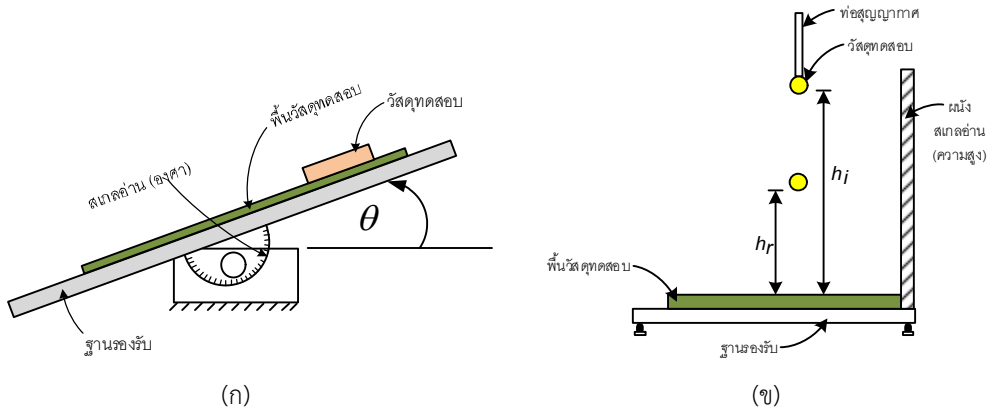


(ก)



(ข)

รูปที่ 1 วิธีการวัดหาค่ามุมกองวัสดุ (ก) เครื่องทดสอบ (ข) ไดอะแกรมมุมกอง



รูปที่ 2 (ก) ไดอะแกรมการทดสอบแรงเสียดทาน (ข) ไดอะแกรมการวัดค่าสัมประสิทธิ์การคืบตัว

$$\theta_R = \tan^{-1} \left[\frac{h_p}{(D_{base}/2)} \right] \quad (3)$$

$$\mu_s = \tan(\theta) \quad (4)$$

$$e = \sqrt{(h_r/h_i)} \quad (5)$$

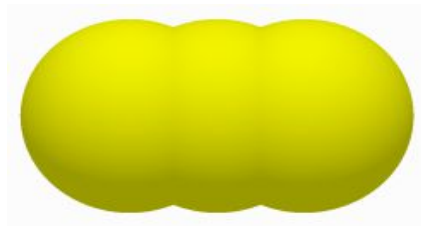
สัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน (Coefficient of rolling friction, μ_r) คือความสัมพันธ์ของการหมุนกลิ้งของวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุทดสอบกับวัสดุทดสอบหรือเกิดขึ้นระหว่างวัสดุทดสอบกับผนังทดสอบ ในที่นี่ได้จากการประมาณค่าจากการจำลองด้วยวิธี DEM และเปรียบเทียบผลที่สอดคล้องกับการทดลองของมูกองวัสดุจากรูปที่ 1 (trial and error) [7]

การจำลองทางคณิตศาสตร์จะประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุทดสอบ คุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างชิ้นงาน คุณสมบัติของการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาควัสดุและคุณสมบัติของการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาควัสดุกับผนังของชิ้นงานทดสอบแสดงผลไว้ในตารางที่ 1

รูปร่างและขนาดของข้าวเปลือกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงจะสม่ำเสมอโดยมีขนาดของวัสดุเฉลี่ยที่ความยาว 8.54 มม ความกว้าง 2.47 มม และความหนา 1.83 มม จากสมการที่ (1) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเทียบเท่า 3.4 มม มีพื้นที่ผิว 32.58 มม² และปริมาตร 21.06 มม³ ค่าความเป็นกลม (sphericity) อยู่ที่ 39.88 และค่าความพรุน (porosity) ของวัสดุทดสอบ 60.37% มีมูกองวัสดุเฉลี่ยอยู่ที่ 35.83° ดังนั้นแบบจำลองของข้าวเปลือกจึงสร้างมาจาก 3 ทรงกลมประกอบรวมกันดังแสดงในรูปที่ 3 โดยกำหนดให้มีปริมาตรและน้ำหนักเทียบเท่ากับวัสดุทดสอบจริงและมีคุณสมบัติตามตารางที่ 1



ข้าวเปลือก



แบบจำลอง

รูปที่ 3 ภาพถ่ายข้าวเปลือกและแบบจำลองของข้าวเปลือกที่ใช้ในการจำลองด้วยวิธี DEM

กระพ้อลำเลียงที่ใช้ในการทดสอบเพื่อพิจารณาพฤติกรรมการสาดของข้าวเปลือกแสดงในรูปที่ 4 มีขนาดความสูง 2 ม. ขนาดตุ๊กกระพ้อ 0.1524×0.1016 ม. มีปริมาตรความจุที่ 6.79×10^{-4} ลบ.ม จำนวน 25 ลูก ติดตั้งที่ระยะห่างกัน 0.1905 เมตร โครงสร้างของกระพ้อทำจากเหล็กแผ่น

ขั้นตอนการทดสอบ

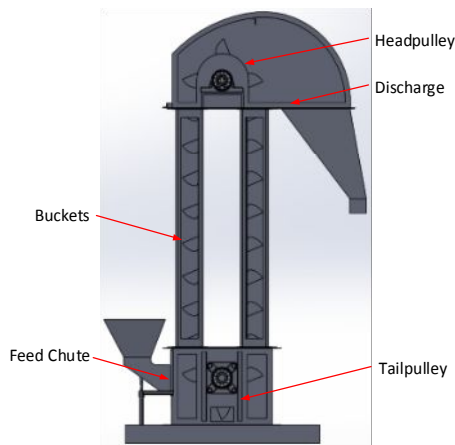
- 1) จ่ายวัสดุเข้าที่ช่องทางจ่าย (Feed Chute) ด้วยอัตราการไหล 4 kg/s
- 2) ความเร็วในการหมุนของล้อขับเคลื่อนด้วย 70, 80, 90, 100, 110, 120 และ 130 รอบต่อนาที
- 3) บันทึกภาพด้วยกล้องวิดีโอที่ตำแหน่งการจ่ายวัสดุออก (Discharge) ของกระพ้อลำเลียง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของข้าวเปลือกและแผ่นเหล็ก

คุณสมบัติวัสดุ	ข้าวเปลือก	เหล็กแผ่น
Particle volume (m^3)	1.4e-7	-
Particle mass (g)	0.026	-
Particle density (kg/m^3), (ρ_s)	1193	1000
Bulk density (kg/m^3), (ρ_b)	471.16	-
Poisson's ratio (ν)	0.45	0.45
Shear modulus (Pa), (G)	1e+7	1e+10
Coefficient of restitution, (e)	0.2	0.5
Coefficient of static friction, (μ_s)	0.3	0.5
Coefficient of rolling friction, (μ_r)	0.001	0.001

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Numerical Model)

DEM จะช่วยอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบไดนามิกส์ (dynamic motion) การหมุนของแต่ละอนุภาควัสดุ แรงกระทำ ความเร็วที่เกิดขึ้นในแต่ละอนุภาคและความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแต่ละอนุภาควัสดุ (interaction) หรือระหว่างอนุภาควัสดุกับผนังชิ้นงาน การชนกันระหว่างอนุภาควัสดุกับอนุภาควัสดุและการชนกันระหว่างอนุภาควัสดุกับผนังชิ้นงาน ได้มีการอธิบายโดย Cundall and Strack [3] การหมุนและการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุจะถูกนำมาพิจารณาที่เวลาต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎข้อที่สองของนิวตัน [8] การสัมผัสกันระหว่างแต่ละอนุภาคของวัสดุและการสัมผัสกันระหว่างวัสดุทดสอบกับพื้นผิวผนังทดสอบในที่นี้ขึ้นอยู่กับ spring-dashpot model และ Hertz-Mindlin no-slip model [9]



รูปที่ 4 แผนภาพของกระพ้อลำเลียง

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (F_{ij}^n + F_{ij}^s) + m_i g \quad (6)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (R_i \times F_{ij}^s - \mu_r R_i |F_{ij}^n| \hat{\omega}_i) \quad (7)$$

เมื่อกำหนดให้ m_i , I_i , v_i และ ω_i คือมวล, แรงเฉื่อย, ความเร็วเชิงเส้นและความเร็วการหมุนของอนุภาค i ตามลำดับ F_{ij}^n และ F_{ij}^s คือแรงสัมผัสตั้งฉากกับผิวสัมผัส (normal contact forces) และแรงสัมผัสแบบเฉือนที่เกิดขึ้นในแนวเส้นสัมผัส (tangential contact forces) กระทำโดยอนุภาค i บนอนุภาค j และ $m_i g$ คือแรงโน้มถ่วงของอนุภาค i สำหรับ k_i คือจำนวนของอนุภาคที่มีการสัมผัสกันและ R_i คือขนาดของ

เวกเตอร์จากจุดศูนย์กลางของอนุภาคถึงผิวที่มีการสัมผัสกันระหว่างอนุภาค μ_r คือสัมประสิทธิ์การก่อกองของอนุภาคและ $\hat{\omega}_i$ คือหน่วยของเวกเตอร์ที่มีค่าเท่ากับ ω_i หารด้วยขนาดขนาดของแรงตึงฉากระหว่าง 2 อนุภาควัสดุ (F_n) และแรงเฉือน (F_t) ระหว่าง 2 อนุภาควัสดุ [10]:

$$F_n = -k_n \Delta x + C_n v_n \quad (8)$$

$$F_t = \min [\mu F_n, k_t \int v_t dt + C_t v_t] \quad (9)$$

เมื่อ k_n และ k_t คือสติฟเนสแนวตั้งฉาก (normal stiffness) และสติฟเนสแนวเฉือน (tangential stiffness) ตามลำดับ, Δx คือระยะแยกกันของอนุภาค (overlap), v_n และ v_t คือความเร็วสัมพัทธ์ตั้งฉาก (relative normal velocity) และความเร็วสัมพัทธ์แนวเฉือน (relative tangential velocity), C_n และ C_t คือสัมประสิทธิ์การหน่วงแนวตั้งฉาก (normal damping coefficient) และสัมประสิทธิ์การหน่วงแนวเฉือน (tangential damping coefficient), C_n จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การคืน (coefficient of restitution, e) กำหนดได้โดยอัตราส่วนของความเร็วสัมพัทธ์หลังการชนต่อการชนของอนุภาคในแนวตั้งฉาก

$$C_n = -2 \ln(e) \frac{\sqrt{m_{ij} k_n}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(e)}} \quad (10)$$

$$m_{ij} = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \quad (11)$$

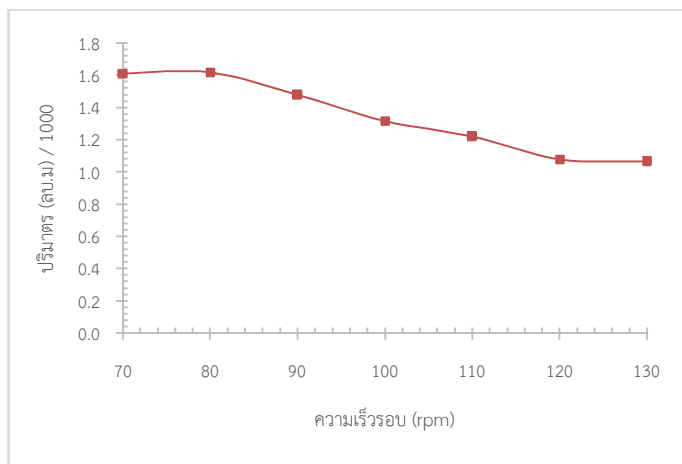
เมื่อ m_{ij} คือมวลของอนุภาค i และอนุภาค j

4. ผลการวิเคราะห์

4.1 เปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบ

การเปรียบเทียบพฤติกรรมการสาดของวัสดุออกจากส่วนหัวของกระพ้อลำเลียงระหว่างการทดสอบ และผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ปริมาณวัสดุภายในลูกกระพ้อมาจากการตกวัสดุจากกันอย่างและรวมตัวเข้ากับวัสดุที่ช่องทางจ่ายวัสดุเข้าระบบ วัสดุส่วนที่ล้นลูกกระพ้อจะไหลออกจากขอบของลูกกระพ้อตกลงสู่ด้านล่างจนกระทั่งวัสดุภายในลูกกระพ้อเสมอขอบในแนวระนาบและคิดค่าเฉลี่ยต่อ 1 ลูกกระพ้อ พิจารณาที่ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงในช่วงระหว่าง 70 ถึง 130 รอบต่อนาทีดังแสดงในรูป 5 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้นปริมาณของวัสดุบรรจุภายในลูกกระพ้อจะลดลง เนื่องมาจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกกระพ้อสูงกว่าปริมาณการไหลเข้าของวัสดุ

จากรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของผลลัพธ์ที่นำมาเสนอเพียง 3 ระดับความเร็ว คือ 70, 100 และ 130 รอบต่อนาที โดยพิจารณาที่องศาเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของวัสดุออกจากลูกกระพ้อ การเคลื่อนที่ของวัสดุออกจากลูกกระพ้อด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง การพิจารณาถึงพฤติกรรมต่างๆ ของแต่ละอนุภาค ซึ่งยากมากสำหรับการศึกษที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาควัสดุ ดังนั้นจึงทำการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการสาดของวัสดุด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง การเคลื่อนที่ของอนุภาค ความเร็วที่เกิดขึ้นของแต่ละอนุภาควัสดุ การลำเลียงข้าวเปลือกภายในลูกกระพ้อตลอดกระบวนการนำไปสู่การหาอัตราการลำเลียงวัสดุ



รูปที่ 5 แสดงปริมาตรของวัสดุภายในลูกกระพ้อ

4.2 อองศาการสาดวัสดุออกจากกระพ้อ (centrifugal discharge)

การสาดของวัสดุออกจากกระพ้อด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ด้วยความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้นจาก 70 รอบต่อนาที ถึง 130 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นพฤติกรรมการสาดของวัสดุจากการจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายพฤติกรรมได้ดังนี้

- วัสดุที่ตำแหน่งผิวอิสระจะเริ่มจ่ายออกจากลูกกระพ้อเป็นกลุ่มแรกด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และเคลื่อนที่ตามด้วยวัสดุส่วนที่อยู่ถัดจากบริเวณผิวบนสุด
- ทุกความเร็วรอบของการหมุน วัสดุเริ่มเคลื่อนที่ออกจากลูกกระพ้อที่มุมประมาณ 50°
- วัสดุส่วนที่อยู่ด้านล่างสุดจะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากผิวของลูกกระพ้อที่มุมจ่าย 90° ถึง 120° สำหรับกระพ้อลำเลียงที่หมุนด้วยความเร็วสูงกว่า 90 รอบต่อนาที และกรณีความเร็วต่ำกว่า 80 รอบต่อนาทีวัสดุจะจ่ายออกที่มุมมากกว่า 140° ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วการหมุนของกระพ้อเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้มุมจ่ายวัสดุลดต่ำลง

- การเคลื่อนที่ของวัสดุออกจากลูกกระพ้อจะมี 2 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ประกอบด้วยวัสดุตกลงสู่ด้านล่างของกระพ้อด้วยน้ำหนักของวัสดุเพื่อรวมตัวกับวัสดุส่วนที่อยู่กันอย่างและการเคลื่อนที่ของวัสดุออกจากส่วนหัวของกระพ้อลำเลียงด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และวัสดุเคลื่อนที่ไปตามช่องทางจ่ายวัสดุออก ผลที่ได้คืออัตราการขนถ่ายวัสดุ

- ในช่วงระหว่างการปล่อยวัสดุออกจากลูกกระพ้อจะมีแรงเฉื่อยเกิดขึ้นกับวัสดุและนำส่งวัสดุให้ไปข้างหน้า จนกระทั่งชนกับผิวผนังด้านในส่วนบนของกระพ้อและตกสู่ด้านล่างในที่สุด

ลักษณะสีของอนุภาคที่จ่ายออกจากกระพ้อลำเลียงดังแสดงในรูปที่ 7 หมายถึงความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคประกอบด้วยความเร็วสูงสุด (แสดงสีแดงหรือสีเข้ม) และความเร็วต่ำสุด (แสดงสีเหลืองหรือสีอ่อน) จากรูปที่ 7(ก) แสดงความเร็วสูงสุดของอนุภาคสีแดงมากกว่า 2 เมตรต่อวินาที, รูปที่ 7(ข) > 2.5 เมตรต่อวินาที, รูปที่ 7(ค) > 2.75 เมตรต่อวินาที, รูปที่ 7(ง) > 3.0 เมตรต่อวินาที, รูปที่ 7(จ) > 3.5 เมตรต่อวินาที, รูปที่ 7(ฉ) > 4.0 เมตรต่อวินาทีและรูปที่ 7(ช) > 4.5 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ บ่งบอกได้ว่าเมื่อความเร็วในการหมุนของกระพ้อลำเลียงเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับนั้นหมายความว่าแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับวัสดุเพิ่มสูงขึ้นด้วยเนื่องจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของลูกกระพ้อทำให้วัสดุเคลื่อนที่ไปกระทบกับผนังภายในส่วนหัวของกระพ้อลำเลียง

การทดสอบ



การจำลอง

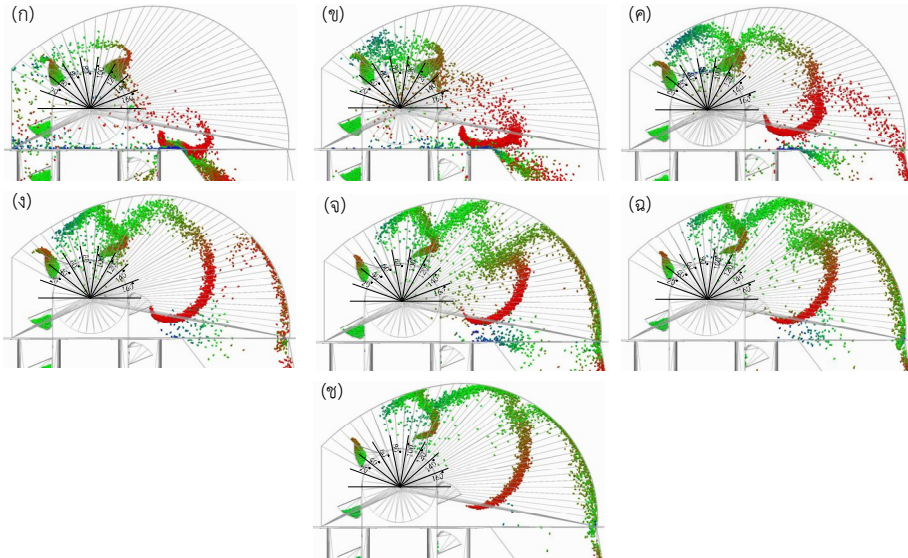


70 rpm

100 rpm

130 rpm

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบการสาดของวัสดุระหว่างการทดสอบและการจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 7 แสดงพฤติกรรมกระจายทิศทางที่ความเร็วรอบ (ก) 70 รอบต่อนาที (ข) 80 รอบต่อนาที (ค) 90 รอบต่อ
 นาที (ง) 100 รอบต่อนาที (จ) 110 รอบต่อนาที (ฉ) 120 รอบต่อนาที (ช) 130 รอบต่อนาที

5. อภิปรายและสรุปผล

การจำลองด้วยวิธี DEM เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาควัสดุเริ่มตั้งแต่เคลื่อนที่เข้าสู่กระพ้อลำเฉียงจนกระทั่งจ่ายออกที่ส่วนหัวของกระพ้อลำเฉียงที่ช่องจ่ายวัสดุออก การเปรียบเทียบผลจะเป็นรูปแบบของปริมาตร สามารถมองเห็นได้จากรูปภาพแสดงพฤติกรรมการสาดของวัสดุออกจากลูกกระพ้อที่ส่วนหัวของกระพ้อลำเฉียงที่ช่องทางจ่ายวัสดุออก โดยทำนายการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ความเร็วรอบการหมุนที่ต่างกัน ความถูกต้องแม่นยำของการจำลองด้วยวิธี DEM นั้นจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของตัวแปรที่นำมาสร้างแบบจำลองรวมถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุจำลอง

ปริมาตรเคลื่อนที่ของวัสดุเมื่อพิจารณาที่ความเร็วเพิ่มสูงขึ้น พฤติกรรมการสาดของวัสดุออกจากลูกกระพ้อผ่านช่องจ่ายวัสดุออก ที่ความเร็วสูงขึ้นวัสดุจะมีความเร็วการเคลื่อนที่สูงขึ้นตามและมีแรงกระทำที่เกิดจากการกระทบกับผนังภายในของตัวกระพ้อลำเฉียงเพิ่มสูงขึ้นตาม สำหรับกรณีความเร็วการเคลื่อนที่ต่ำ วัสดุจะตกลงสู่ด้านล่างด้วยน้ำหนักของวัสดุเองและกระจายเต็มส่วนหัวของเพลาล้อขับของกระพ้อลำเฉียงดังแสดงในรูปที่ 7

ในที่สุดก็สามารถสรุปได้ว่าการคำนวณทางคณิตศาสตร์สำหรับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุเมื่อดำเนินวิธี DEM สามารถนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมกระจายวัสดุออกจากกระพ้อลำเฉียงด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางหรือการเคลื่อนที่ของวัสดุภายใต้อุปกรณ์อื่นๆ เช่นการเคลื่อนที่ของวัสดุภายในถังกลมหมุน [11] มุมกองของวัสดุ [12] การจ่ายวัสดุออกจากไซโล [13] และอื่น ๆ อีกมากมาย

งานต่อไป จะทำการศึกษาแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับวัสดุในขณะเติมเต็มเข้าสู่กระพ้อจากช่องทางจ่าย วัสดุเข้าและแรงกระทำที่ช่องทางจ่ายวัสดุออกไปกระทบกับผิวผนังของกระพ้อลำเลียงเพื่อทำนายการแตกหักเสียหายของวัสดุ รวมทั้งทำการปรับเปลี่ยนควบคุมปริมาณการจ่ายวัสดุเข้าสู่กระพ้อและปรับเปลี่ยนระยะความสูงระดับต่างๆ ของช่องทางป้อนวัสดุเข้าเพื่อหาปริมาณการป้อนและตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อัตราขนถ่าย วัสดุที่สูงสุดและประหยัดพลังงานที่ความเร็วรอบที่เหมาะสม

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ทูสนับสนุนนักวิจัยรุ่นใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้การสนับสนุนในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hays, M.D., et al., Open burning of agricultural biomass: Physical and chemical properties of particle-phase emissions. *Atmospheric Environment*, 2005. 39(36): p. 6747-6764.
- [2] Gonzalez-Montellano, C., et al., Determination of the mechanical properties of corn grains and olive fruits required in DEM simulations. *An ASABE Meeting Presentation* 2011.
- [3] Cundall, P.A. and O.D.L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 1979. 29(1): p. 47-65.
- [4] Adebawale, A.-R.A., et al., Effect of variety and moisture content on some engineering properties of paddy rice. *Journal of Food Science and Technology*, 2011. 48(5): p. 551-559.
- [5] Dutta, S.K., V.K. Nema, and R.K. Bhardwaj, Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1988. 39(4): p. 259-268.
- [6] Omobuwajo, T.O., E.A. Akande, and L.A. Sanni, Selected physical, mechanical and aerodynamic properties of African breadfruit (*Treculia africana*) seeds. *Journal of Food Engineering*, 1999. 40(4): p. 241-244.
- [7] Mohsenin, N.N., Physical properties of plant and animal materials. 2nd ed. ed. 1986, New York, N.Y.: Gordon and Breach Science.
- [8] Yang, R.Y., et al., Numerical Simulation of Particle Dynamics in Different Flow Regimes in a Rotating Drum. *Powder Technology*, 2008. 188(2): p. 170 - 170.
- [9] Cundall, P.A., Computer simulations of dense sphere assemblies. 1988. p. 113-123.

- [10] Paul W. Cleary, Rob Morrisson, and S. Morrell, Comparison of DEM and experiment for a scale model SAG mill. *Int. J. Miner. Process*, 2003. 68: p. 129 - 165.
- [11] Wangchai, S., D.B. Hastie, and P.W. Wypych, The investigation of particle flow mechanisms of bulk materials in dustiness testers. *Particulate Science and Technology*, 2016. 34(2): p. 241-254.
- [12] Markauskas, D. and R. Kačianauskas, Investigation of rice grain flow by multi-sphere particle model with rolling resistance. *Granular Matter*, 2011. 13(2): p. 143-148.
- [13] Coetzee, C.J. and D.N.J. Els, Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling. *Computers and electronics in agriculture*, 2009. 65(2): p. 198-212.