

## การศึกษาประสิทธิภาพของกระพ้อลำเลียงชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยวิธี DEM Performance of a bucket conveyor centrifugal escape Center using DEM

สถาพร วังฉาย<sup>1\*</sup> และ ศุภชัย ตระกูลทรัพย์<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 Email : sathaphonw@kmutnb.ac.th

### บทคัดย่อ

กระพ้อลำเลียงคือเครื่องมือขนถ่ายวัสดุขึ้นในแนวตั้ง โดยทั่วไปจะมีใช้ในโรงสีข้าว อัตราการลำเลียงวัสดุเป็นสิ่งสำคัญที่ถูกนำมาพิจารณา ประกอบด้วยความเร็วรอบในการหมุน และปริมาณการจ่ายวัสดุเข้าสู่กระพ้อ วัสดุกองที่กั้นอ่างเพิ่มการเสียดสีกันระหว่างวัสดุกับลูกกระพ้อจะทำให้วัสดุเกิดการแตกหักเสียหาย งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของอัตราการลำเลียงวัสดุ พฤติกรรมการสาดข้าวเปลือกด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ระยะการป้อนวัสดุและขีดความสามารถในการเติมเต็มวัสดุ ด้วยการทดลองที่ความเร็วรอบในช่วงระหว่าง 70 – 130 รอบต่อนาที โดยใช้กล้องวิดีโอติดจอยบนที่กุ่มสาดของวัสดุ อีกทั้งได้นำเสนอขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของวัสดุโดยใช้วิธี Discrete Element Method เพื่อทำนายพฤติกรรมของวัสดุ สุดท้ายผลการจำลองได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง

**คำหลัก:** มุมสาด ; กระพ้อลำเลียง ; อัตราการลำเลียง ; Discrete Element Method

### 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. The heap materials at the bottom lead to more of an increasing in the friction between the materials and bucket effect to the material damage. This study was to examine the correlation of variables influencing the performance of the bucket capacity, material discharge behavior, feeding distance and the level of the materials in the bucket. The experiment was operated in range between 70 - 130 RPM. The material discharge was recorded by the digital video camera to observe the bucket conveyor. In addition, this study illustrated the particle model by using Discrete Element Method for predicting the behavior of materials movement in the bucket elevator. After that, the results were validated in the stimulating with experimental data for ensuring the accuracy.

**Keywords:** discharge angle; bucket elevator; conveyor capacity; Discrete Element Method

## 1. บทนำ

ข้าวเป็นพืชอาหารหลักของคนส่วนใหญ่ในทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จะมีพื้นที่สำหรับทำนาข้าวอยู่ประมาณ 30% ของโลก [1]. คุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของข้าวเปลือกจะมีความสำคัญต่อการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์ รวมถึงการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้มีความเหมาะสมที่สุดต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ลำเลียง คุณสมบัติของวัสดุที่ถูกนำไปใช้ในการจำลองทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วย bulk density, solid density, shear modulus, Poisson's ratio, coefficient of restitution, coefficient of static friction และ coefficient of rolling friction มีการศึกษามากมายกล่าวถึงวิธีการทดสอบ [2] รวมถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุตัวอย่าง

Discrete element modelling (DEM) กลายเป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดเล็กหรือวัสดุผง ในที่นี่จะใช้เป็นเครื่องมือในการจำลองหรือการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัสดุประเภทเม็ดเล็กด้วยอุปกรณ์ลำเลียง (กระพ้อ) ที่สามารถมองเห็นภาพการเคลื่อนที่ของวัสดุได้ มีการนำมาใช้ในขบวนการผลิต การลำเลียงวัสดุ โดยหลักการของ DEM คือการติดตาม (track) แต่ละอนุภาคของวัสดุเม็ดเล็กในแต่ละขั้นตอนของการคำนวณในแต่ละช่วงของเวลาที่กำหนด การโคจร การหมุนและการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในระบบ โดยคำนวณการมีปฏิสัมพันธ์ (relation) ระหว่างแต่ละอนุภาคและระหว่างอนุภาคกับสิ่งแวดล้อม (ผนังและอนุภาคอื่น) ในการคำนวณนั้นจะประยุกต์ใช้จากกฎข้อที่สองของนิวตันและกฎการเคลื่อนที่ ณ จุดสัมผัสกันของแต่ละอนุภาคตลอดการเคลื่อนที่ ดังนั้น DEM จึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการคำนวณการเคลื่อนที่ แรงกระทำหรือการแตกหักเสียหายของวัสดุเป็นชิ้นส่วนย่อยมีขนาดเล็กๆ จนกระทั่งกลายเป็นฝุ่นที่เกิดจากการชนกันระหว่างวัสดุเม็ดเล็ก (หรือวัสดุผง) หรือแม้กระทั่งชนกับผนังอุปกรณ์ ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวไม่สามารถหาได้ใน

ห้องปฏิบัติการเพื่อตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุจากการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของข้าวเปลือกออกจากลูกกระพ้อลำเลียงที่ระดับความเร็วรอบในช่วงระหว่าง 70 – 130 รอบต่อนาที และมีการกำหนดระดับความสูงของช่องทางจ่ายวัสดุเข้าที่ระดับความสูง 170 มม และ 270 มม วัดจากฐานของกระพ้อลำเลียงเพื่อ พิจารณาปริมาณการเติมเต็มของวัสดุภายในลูกกระพ้อซึ่งมีอิทธิพลต่ออัตราขนถ่ายและมุมสาดของวัสดุและยังได้ทำการทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่และการเคลื่อนที่ของวัสดุโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (DEM) มาวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคแบบต่อเนื่องสุดท้ายจะนำผลมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง

## 2. วัสดุและการทดสอบ

ข้าวเปลือกที่นำมาพิจารณาเป็นแบบแห้งชนิดยาวจากท้องตลาดโดยทั่วไปของประเทศไทย ขนาดรูปร่างและค่าความเป็นทรงกลมทำการวัดโดยใช้เวอเนียร์คาลิเปอร์วัดขนาดความยาว (L) ความกว้าง (W) และความหนา (T) ของวัสดุและคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม (Effective diameter ( $D_e$ )) [3] จากสมการที่ (1)

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

มวลและปริมาตร (Mass and Volume) ของวัสดุคิดค่าเฉลี่ยจาก 100 เมล็ดมีน้ำหนักอยู่ที่ 2.26 กรัม ปริมาตรของวัสดุพิจารณาจากจำนวน 100 เมล็ดแทนที่ในน้ำและบันทึกการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำที่เกิดขึ้นและเฉลี่ยต่อหน่วยวัสดุแต่ละเมล็ด [4]

ความหนาแน่นจริง (Solid density) ของวัสดุที่ไม่รวมช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุคืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุ โดยการนำวัสดุที่ทราบน้ำหนักแทนที่ในน้ำที่ทราบปริมาตรแล้วพิจารณาการ

เปลี่ยนแปลงของปริมาตรน้ำ สำหรับกรณีความหนาแน่นรวม (bulk density) พิจารณาช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุด้วยโดยการนำวัสดุเทลงในหลอดแก้วที่มีขนาด 500 มิลลิลิตรจนล้นออกภายนอกภาชนะและใช้ไม้บรรทัดค่อยๆ ปาดเอาส่วนเกินออกจากหลอดแก้วและนำวัสดุนั้นไปชั่งน้ำหนักบนตีกค่าและคำนวณได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรที่เกิดขึ้น [5] โดยทำการทดลองจำนวน 5 ครั้งแล้วพิจารณาจากค่าเฉลี่ย สำหรับค่าความพรุน (porosity) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของวัสดุจริง ( $\rho_s$ ) และความหนาแน่นรวมของวัสดุ ( $\rho_b$ ) [6] พิจารณาได้จากสมการที่ 2

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

มุมกองวัสดุ (Angle of repose) พิจารณาโดยการนำวัสดุเทในหลอดแก้วทรงกระบอกจนเต็มแล้วเคลื่อนที่หลอดแก้วขึ้นในแนวตั้งอย่างรวดเร็ว โดยให้วัสดุเคลื่อนที่ตามธรรมชาติและกองบนพื้นระนาบที่กำหนด มุมกองวัสดุได้จากการวัดความกว้างของฐานกองวัสดุและความสูงของกองวัสดุและคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$\text{มุมกองวัสดุ} = \frac{\tan^{-1}(\text{ความกว้างฐาน})}{\text{ความสูงกองวัสดุ}} \quad (3)$$

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (Coefficient of Static Friction,  $\mu_s$ ) คือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในขณะที่วัสดุอยู่นิ่งจนกระทั่งวัสดุเริ่มเคลื่อนที่ โดยพิจารณาจากการนำวัสดุวางบนพื้นผิวระนาบ (แผ่นเหล็กที่ใช้ทำกระป๋องลำเลียง) และปรับมุมการหมุนของแผ่นระนาบเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งวัสดุเริ่มมีการหมุนหรือเริ่มมีการเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างทำการจดบันทึกค่ามุมที่อ่านได้จากสเกลและคำนวณโดยใช้สมการที่ 4

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

เมื่อ  $\mu_s$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตและ  $\alpha$  คือมุมที่ทำให้วัสดุเริ่มต้นเกิดการเคลื่อนที่

Coefficient of restitution ( $e$ ) คืออัตราส่วนรากที่สองของความสูงระหว่างความสูงของวัสดุหลังจากตกกระทบพื้นและกระดอนขึ้นในแนวตั้ง ( $h_r$ ) และความสูงเริ่มต้นของวัสดุก่อนตกกระทบพื้น ( $h_i$ ) พิจารณาได้จากสมการที่ 5

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

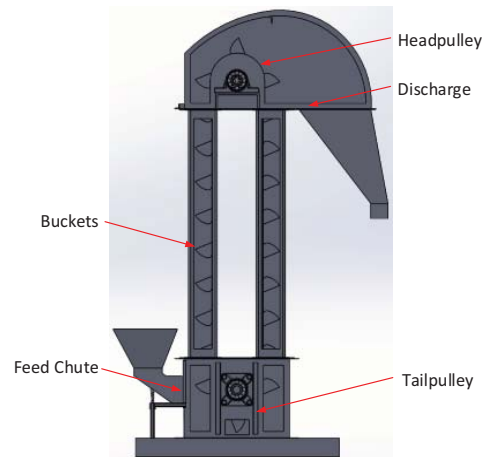
Coefficient of rolling friction ( $\mu_r$ ) คือความสัมพันธ์การกลิ้งของวัสดุเกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับวัสดุหรือระหว่างวัสดุกับผนัง ในที่นี้ได้จากการประมาณค่าจากการจำลองด้วย DEM และเปรียบเทียบผลที่สอดคล้องกับการทดลอง (trial and error)

การจำลองทางคณิตศาสตร์จะประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุทดสอบที่นำมาศึกษา คุณสมบัติของโครงสร้างชิ้นงาน คุณสมบัติของการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุทดสอบและระหว่างวัสดุทดสอบกับผนังชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 1

รูปร่างและขนาดของข้าวเปลือกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะมีลักษณะที่สม่ำเสมอและขนาดของวัสดุเฉลี่ยมีความยาว 8.54 มม ความกว้าง 2.47 มม และความหนา 1.83 มม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเทียบเท่า 3.4 มม พื้นที่ผิว 32.58 mm<sup>2</sup> และปริมาตร 21.06 mm<sup>3</sup> ความเป็นกลม (sphericity) อยู่ที่ 39.88 และความพรุน (porosity) 60.37% ในขณะที่มุมกองวัสดุเป็น 35.83° ดังนั้นแบบจำลองของข้าวเปลือกสร้างมาจาก 3 ทรงกลมรวมกันดังแสดงในรูปที่ 1 โดยกำหนดให้มีปริมาตรและน้ำหนักเทียบเท่ากับวัสดุจริงและมีคุณสมบัติตามที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของข้าวเปลือกและแผ่นเหล็ก

คุณสมบัติวัสดุ	ข้าวเปลือก	เหล็กแผ่น
Particle volume (m <sup>3</sup> )	1.4e-7	-
Particle mass (g)	0.026	-
Particle density (kg/m <sup>3</sup> ), ( $\rho_s$ )	1193	1000
bulk density (kg/m <sup>3</sup> ), ( $\rho_b$ )	471.16	-
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.45	0.45
Shear modulus (Pa), ( $G$ )	1e7	1e10
coefficient of restitution, ( $e$ )	0.2	0.5
coefficient of static friction, ( $\mu_s$ )	0.3	0.5
coefficient of rolling friction, ( $\mu_r$ )	0.001	0.001



รูปที่ 2 ไดอะแกรมของกระพ้อลำเลียง



รูปที่ 1 ข้าวเปลือกและแบบจำลองของข้าวเปลือกที่ใช้ในวิธี DEM

กระพ้อลำเลียงที่ใช้ในการทดสอบเพื่อพิจารณาพฤติกรรมการสาดของข้าวเปลือกแสดงในรูปที่ 2 มีขนาดความสูง 2 เมตร ขนาดลูกกระพ้อ 0.1524 x 0.1016 เมตร มีปริมาตรความจุที่ 6.79 x 10<sup>-4</sup> ลบ.ม จำนวน 25 ลูกติดตั้งที่ระยะห่างกัน 0.1905 เมตร โครงสร้างของกระพ้อทำจากเหล็กแผ่น

ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) ความสูงช่องจ่ายวัสดุเข้ามี 2 ระดับคือระดับสูงสุด 270 มม และระดับต่ำสุด 170 มม
- 2) ความเร็วในการหมุนของล้อขับเคลื่อนประกอบด้วย 70, 80, 90, 100, 110, 120 และ 130 รอบต่อนาที

### 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Numerical Model)

DEM จะช่วยอธิบายการเคลื่อนที่แบบไดนามิก (dynamic motion) การหมุนของอนุภาควัสดุ แรงกระทำที่เกิดขึ้นในแต่ละอนุภาคและความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละอนุภาคของวัสดุ (interaction) การชนกันระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและระหว่างอนุภาคกับผนังชิ้นงาน ได้มีการอธิบายโดย Cundall and Strack [7] การหมุนและการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุจะถูกนำมาพิจารณาที่เวลาต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law of motion) [8] การสัมผัสกันของแต่ละอนุภาควัสดุที่ใช้ในงานนี้คือ Hertz-Mindlin no-slip [9]

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

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

เมื่อ  $m_i$ ,  $I_i$ ,  $v_i$  และ  $\omega_i$  คือมวล, แรงเฉื่อย, ความเร็วเชิงเส้นและความเร็วการหมุนของอนุภาค  $i$  ตามลำดับ  $F_{ij}^n$  และ  $F_{ij}^s$  คือแรงสัมผัสตั้งฉากกับผิวสัมผัส (normal contact forces) และแรงสัมผัสแบบเฉือนเกิดขึ้นในแนวเส้นสัมผัส (tangential contact forces) กระทำโดยอนุภาค  $i$  บนอนุภาค  $j$  และ  $m_i g$  คือแรงโน้มถ่วงของอนุภาค  $i$  สำหรับ  $k_i$  คือจำนวนของอนุภาคที่มีการสัมผัส

กันและ  $R_i$  คือขนาดของเวกเตอร์จากจุดศูนย์กลางของอนุภาคถึงผิวที่มีการสัมผัสกันระหว่างอนุภาค  $\mu_r$  คือสัมประสิทธิ์การกลิ้งของอนุภาค (rolling friction) และ  $\omega_i$  คือหน่วยของเวกเตอร์ที่มีค่าเท่ากับ  $\omega_i$  หารด้วยขนาด

#### 4. ผลการวิเคราะห์

##### 4.1 เปรียบเทียบผลระหว่างการทดสอบและการจำลอง

รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบพฤติกรรม การสาดของวัสดุออกจากกระพ้อลำเลียงระหว่างการทดสอบและผลที่ได้จากการจำลองเมื่อกำหนดให้วัสดุจ่ายเข้า (feed chute) สู่อุโมงค์ที่อัตราการไหล 4 kg/s ความสูงของช่องทางจ่ายวัสดุเข้ากำหนดที่ระดับสูงสุด (270 มม) จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของผลลัพธ์ที่นำมาเสนอจาก 3 ระดับความเร็ว 70, 100 และ 130 รอบต่อนาที พิจารณาที่องศาเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของวัสดุออกจากลูกกระพ้อ พฤติกรรม การสาดของวัสดุด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของลูกกระพ้อ

การพิจารณาถึงแรงกระทำและพฤติกรรมต่างๆ ของแต่ละอนุภาค ซึ่งยากมากสำหรับการศึกษาที่ได้จากการทดสอบการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาควัสดุ ดังนั้นจึงทำการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรม การสาดของวัสดุด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง การเคลื่อนที่แรงกระทำที่เกิดขึ้น จากการลำเลียงข้าวเปลือกภายในลูกกระพ้อด้วยวิธีทางคอมพิวเตอร์ตลอดกระบวนการลำเลียงวัสดุภายในกระพ้อลำเลียงที่ ระยะการจ่ายวัสดุเข้าระบบทั้งสองระดับความสูงและขีดความสามารถในการเติมเต็มวัสดุภายในลูกกระพ้อที่ความเร็วรอบของล้อขับเคลื่อนเปลี่ยนแปลงในช่วงระหว่าง 70 – 130 รอบต่อนาที เพื่อนำไปสู่การหาอัตราการลำเลียงวัสดุ

ความเร็ว การทดสอบ การจำลอง

รอบ

70

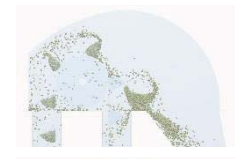
rpm

100

rpm

130

rpm



รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการสาดของวัสดุระหว่างการทดสอบและการจำลองทางคณิตศาสตร์

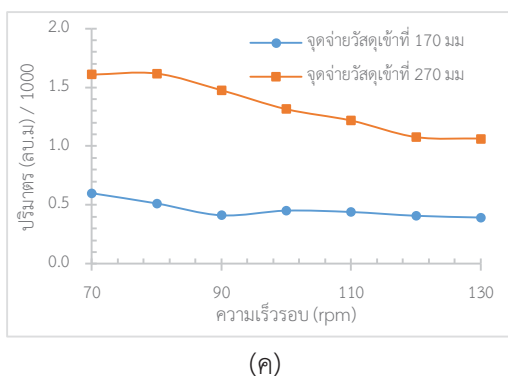
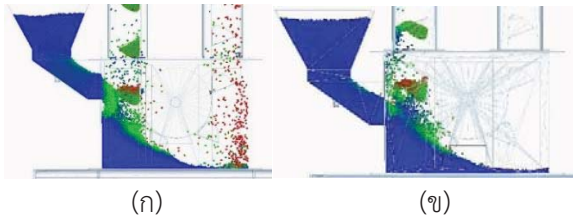
##### 4.2 ปริมาณการเติมเต็มของวัสดุ (Filling the buckets)

ปริมาณการเติมเต็มของวัสดุภายในลูกกระพ้อในระหว่างการเคลื่อนที่ของกระพ้อลำเลียง จะมาจาก 2 ช่องทางการบรรจุคือ มาจากช่องทางจ่ายวัสดุเข้าและการตกวัสดุจากก้นอ่าง รูปที่ 4(ก) แสดงการจ่ายวัสดุเข้าลูกกระพ้อลำเลียงด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ความเร็วรอบ 90 rpm ที่ตำแหน่งระดับช่องทางจ่ายวัสดุเข้าสูงสุด (270 มม) แสดงให้เห็นว่าปริมาณของวัสดุที่บรรจุภายในลูกกระพ้อมาจากการตกวัสดุที่ก้นอ่างและเติมเต็มอีกครั้งหนึ่งในสภาวะรับมาจากช่องทางจ่ายวัสดุเข้า ดังนั้นจำนวนวัสดุจะเต็มและคงที่ตลอดการทำงาน สำหรับกรณีที่ช่องทางจ่ายวัสดุเข้าต่ำสุด (170 มม) วัสดุที่บรรจุภายในลูกกระพ้อจะมาจากการตกวัสดุที่ก้นอ่างเพียงช่องทางเดียว เนื่องมาจากช่องทางจ่ายวัสดุเข้ามีระดับต่ำกว่าจุดศูนย์กลางของล้อขับเคลื่อนทำให้ตำแหน่งการไหลของวัสดุเข้าไม่ตรงกับมุมการเคลื่อนที่ของลูกกระพ้อเพื่อรองรับการไหลของวัสดุเข้าสู่ลูกกระพ้อดังแสดงในรูปที่ 4(ข)

ปริมาณวัสดุภายในลูกกระพ้อพิจารณาได้จากลูกกระพ้อเริ่มตกวัสดุจากก้นอ่างและรวมตัวกับวัสดุที่ช่องทางจ่ายวัสดุเข้าระบบ วัสดุส่วนที่ล้นลูกกระพ้อจะ

ไหลออกจากขอบของลูกกระพ้อและตกลงสู่ด้านล่างจนกระทั่งเสมอขอบในแนวระนาบหรือพลังงานที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุด (minimum energy) จากการเคลื่อนที่ของวัสดุส่วนที่ล้นลูกกระพ้อส่วนที่เหลือภายในลูกกระพ้อจะถูกนำมาพิจารณาคิดค่าเฉลี่ยต่อ 1 ลูกกระพ้อ

ผลการเปรียบเทียบปริมาณวัสดุภายในลูกกระพ้อที่ 2 ระดับความสูง (170 มม และ 270 มม) ของช่องทางจ่ายวัสดุเข้าและความเร็วเปลี่ยนแปลงจาก 70 ถึง 130 รอบต่อนาทีแสดงในรูป 4(ค) จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้นปริมาณวัสดุบรรจุในลูกกระพ้อจะลดลง เนื่องมาจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของลูกกระพ้อสูงกว่าปริมาณการไหลเข้าของวัสดุ หากเปรียบเทียบกับระดับความสูงของช่องจ่ายวัสดุเข้าพบว่าที่ระดับต่ำ (170 มม) ปริมาณวัสดุที่ไหลเข้าลูกกระพ้อต่ำลง 2 – 3 เท่าโดยปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับช่องจ่ายวัสดุเข้าที่ระดับสูง (270 มม) เนื่องมาจากระยะห่างของลูกกระพ้อกับช่องจ่ายวัสดุเข้า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัสดุไม่สามารถนำส่งวัสดุเข้าสู่ลูกกระพ้อได้สำเร็จ



รูปที่ 4 (ก) และ (ข) แสดงรูปแบบการเติมเต็มวัสดุที่ระดับ 170 มม และ 270 มม ตามลำดับ และ (ค) แสดงปริมาณของวัสดุภายในลูกกระพ้อ

#### 4.3 องค์การสาดวัสดุออกจากกระพ้อ (centrifugal discharge)

การสาดของวัสดุออกจากกระพ้อด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ที่ความเร็วในการหมุนเพิ่มขึ้นจาก 70 ถึง 130 รอบต่อนาที อัตราการไหลเข้าของวัสดุ 4 kg/s และกำหนดระยะสูงสุดของช่องจ่ายวัสดุเข้า (270 มม) ดังแสดงในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นพฤติกรรมสาดของวัสดุจากการจำลองเพื่อยืนยันกับผลที่ได้จากการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ อธิบายพฤติกรรมได้ดังนี้

– วัสดุจะเริ่มจ่ายออกจากส่วนที่อยู่ติดกับผนังด้านในสุดที่ผิวอิสระของลูกกระพ้อออกด้านนอกด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและเคลื่อนที่ตามด้วยวัสดุส่วนที่อยู่ใกล้บริเวณผิวบนสุด

– วัสดุเริ่มเคลื่อนที่ออกจากลูกกระพ้อที่มุมประมาณ 50°

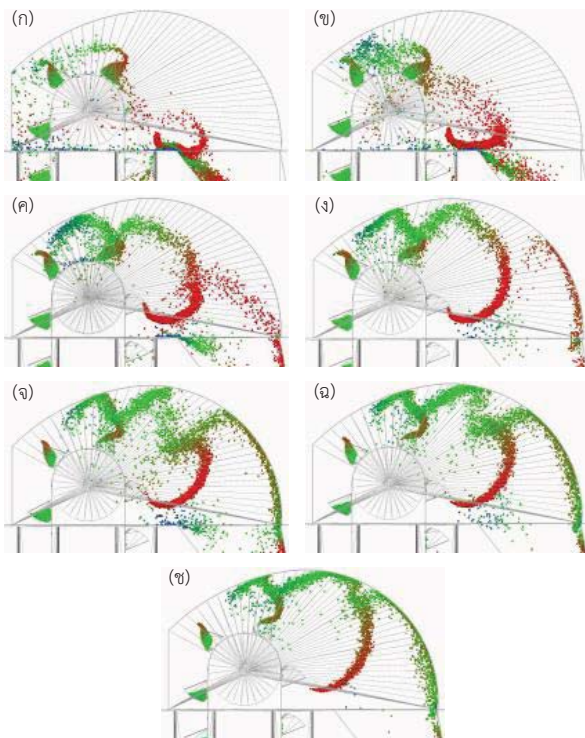
– วัสดุส่วนที่อยู่ล่างสุดจะเริ่มเคลื่อนที่ออกจากผิวลูกกระพ้อที่มุมจ่าย 90° ถึง 120° สำหรับกระพ้อลำเลียงที่หมุนด้วยความเร็วสูงกว่า 90 รอบต่อนาทีที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วของกระพ้อเพิ่มสูงขึ้นทำให้มุมจ่ายวัสดุลดต่ำลงสำหรับที่ความเร็วต่ำกว่า 80 รอบต่อนาทีวัสดุจะจ่ายออกที่มุมมากกว่า 140°

– การจ่ายวัสดุออกจากลูกกระพ้อจะมี 2 พฤติกรรมการไหลประกอบด้วยตกลงสู่ด้านล่างของกระพ้อด้วยน้ำหนักของวัสดุเพื่อรวมตัวกับวัสดุส่วนที่อยู่ก้นอ่างและการจ่ายวัสดุออกจากส่วนหัวของกระพ้อลำเลียงด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางผลที่ได้คืออัตราการขนถ่ายวัสดุ

– ในช่วงระหว่างการปล่อยวัสดุออกจากลูกกระพ้อจะมีแรงเฉื่อยเกิดขึ้นกับวัสดุเพื่อนำส่งวัสดุให้ไปข้างหน้าจนกระทั่งไปชนกับผิวผนังส่วนบนของกระพ้อและตกสู่ด้านล่างในที่สุด

ลักษณะสีของอนุภาคในรูปที่ 5 แสดงถึงความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคสูงสุด (แสดงสีแดงหรือสีเข้ม) และต่ำสุด (แสดงสีเหลืองหรือสีอ่อน) จากรูป 5(ก) แสดงความเร็วสูงสุดของอนุภาคสีแดงมากกว่า 2 เมตรต่อวินาที, รูปที่ 5(ข) > 2.5 เมตรต่อวินาที, รูปที่ 5(ค) > 2.75 เมตรต่อวินาที, รูปที่ 5(ง) > 3.0 เมตรต่อวินาที, รูป

ที่ 5(จ) > 3.5 เมตรต่อวินาที, รูปที่ 5(ฉ) > 4.0 เมตรต่อวินาทีและรูปที่ 5(ช) > 4.5 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ บ่งบอกได้ว่าเมื่อความเร็วในการหมุนของกระพ้อลำเลียงเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับนั้นหมายความว่าแรงกระทำที่เกิดจากแรงเหวี่ยงของวัสดุกระทบกับผนังเพิ่มสูงขึ้นด้วย



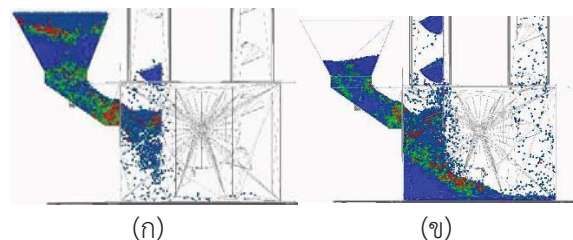
รูปที่ 5 แสดงพฤติกรรมการจ่ายวัสดุที่ความเร็วรอบ (ก) 70 รอบต่อนาที (ข) 80 รอบต่อนาที (ค) 90 รอบต่อนาที (ง) 100 รอบต่อนาที (จ) 110 รอบต่อนาที (ฉ) 120 รอบต่อนาที (ช) 130 รอบต่อนาที

#### 4.4 แรงกระทำ (impact force)

แรงกระทำของวัสดุที่เกิดขึ้นในระหว่างการเติมวัสดุลงสู่กระพ้อและการจ่ายวัสดุออกจากลูกกระพ้อ ซึ่งแรงกระทำดังกล่าวจะส่งผลต่อความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับวัสดุทดสอบ (เช่นการแตกหัก) หรือแม้กระทั่งการสึกหรอที่จะเกิดขึ้นกับผนังของอุปกรณ์ลำเลียง ในที่นี้จะพิจารณาแรงกระทำที่เกิดขึ้นในขั้นตอนเริ่มต้นของการบรรจุวัสดุเข้าสู่ลูกกระพ้อ ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุมีขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่

ของลูกกระพ้อส่งผลให้มีขนาดของแรงกระทำเพิ่มสูงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่จ่ายวัสดุออกจากลูกกระพ้อและกระทบกับผนังส่วนหัวของกระพ้อลำเลียง

รูปที่ 6 แสดงแรงกระทำที่เกิดขึ้นในขณะที่จ่ายวัสดุเข้าสู่ลูกกระพ้อพิจารณาได้จากรูปที่ 6(ก) แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของวัสดุลงสู่ลูกกระพ้อเกิดการกระทำกันระหว่างวัสดุกับพลูเล่ซั้บและตัวลูกกระพ้อมีขนาดของแรงสูงสุดในขณะเริ่มต้นบรรจุหลังจากนั้นจะคงที่อยู่ที่ 50% โดยประมาณของแรงสูงสุดในส่วนของรูปที่ 6(ข) แสดงให้เห็นถึงขนาดของแรงกระทำที่เกิดจากการตักวัสดุของลูกกระพ้อจากกันอ่าง ซึ่งขนาดของแรงกระทำต่ำกว่าแรงกระทำสูงสุดตอนเริ่มต้นถึง 5 เท่าโดยประมาณเมื่อพิจารณาที่ระดับความเร็วรอบเพิ่มสูงขึ้นจะมีลักษณะที่สัมพันธ์กันกับขนาดของแรงกระทำที่เพิ่มสูงขึ้น ลักษณะสีของแรงกระทำต่ออนุภาควัสดุแสดงค่าสูงกว่า > 0.01 นิวตัน (แสดงสีแดง) และต่ำสุดเข้าใกล้ศูนย์ (แสดงสีน้ำเงิน)



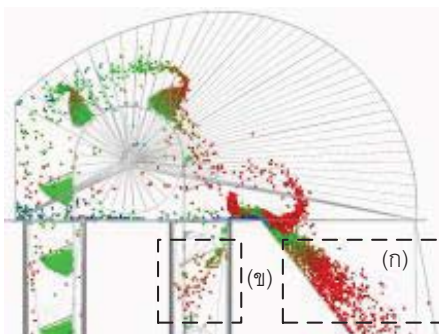
รูปที่ 6 (ก) การกระจายของแรงกระทำ (impact force) ในขณะที่จ่ายวัสดุเข้าระบบ (ข) ขนาดของแรงกระทำในขณะที่ตักวัสดุจากกันอ่าง

แรงกระทำที่เกิดขึ้นในขณะที่จ่ายวัสดุออกจากลูกกระพ้อไม่ได้นำมาแสดงเนื่องจากเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับตอนเริ่มต้นบรรจุวัสดุเข้าสู่ลูกกระพ้อมีขนาดน้อยกว่ามาก และจะไม่เกิดการกระทบกันระหว่างวัสดุกับผนังส่วนหัวของกระพ้อลำเลียงที่ความเร็วต่ำกว่า 90 รอบต่อนาที (จากรูปที่ 5)

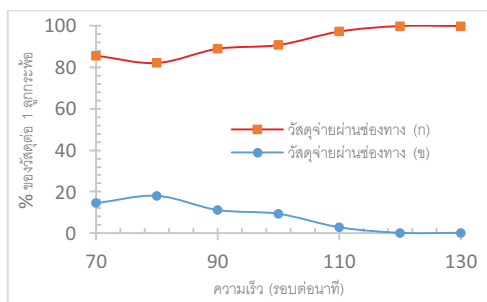
## 4.5 ประสิทธิภาพการออกแบบ (Optimal Designs)

วัสดุที่จ่ายออกจากลูกกระพ้อจะประกอบด้วย 2 ช่องทางการไหลประกอบด้วย (ก) คือวัสดุจะถูกจ่ายออกไปจากระบบที่ส่วนหัวของกระพ้อลำเลียงคืออัตราขนที่ได้จากอุปกรณ์ลำเลียงและ (ข) คือส่วนของวัสดุที่ตกลงสู่ด้านล่างภายในตัวกระพ้อลำเลียงเพื่อไปรวมกับวัสดุในส่วนของก้านอ่างพิจารณาได้จากรูปที่ 7(ก)

อัตราขนถ่ายวัสดุจะคำนวณจากวัสดุที่ส่งออกจากกระพ้อลำเลียงคิดต่อชั่วโมงการทำงาน เพื่อบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของอัตราขนถ่ายวัสดุตั้งนั้นรูปที่ 7(ข) แสดงถึงเปอร์เซ็นต์การจ่ายวัสดุออกจากกระพ้อและส่วนที่ตกลงสู่ด้านล่างของกระพ้อลำเลียงที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงในช่วงระหว่าง 70 – 130 รอบต่อนาที แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้นวัสดุจะจ่ายออกจากกระพ้อเพิ่มมากขึ้นตาม



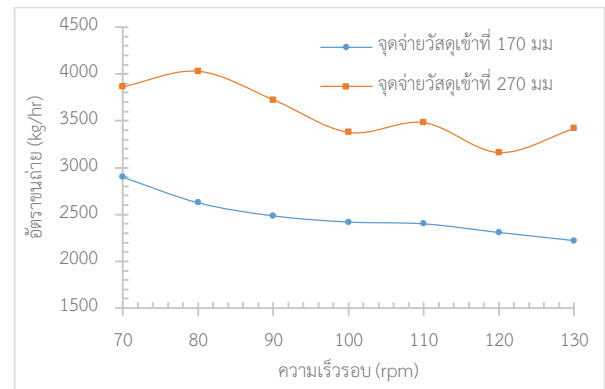
(ก)



(ข)

รูปที่ 7 (ก) ไดอะแกรมช่องจ่ายวัสดุออกจากลูกกระพ้อ (ข) ปริมาณของวัสดุที่จ่ายออกจากลูกกระพ้อที่ความเร็วเปลี่ยนแปลงจาก 70 – 130 รอบต่อนาที

รูปที่ 8 แสดงให้เห็นถึงอัตราขนถ่ายวัสดุต่อหน่วยเวลาสำหรับจุดจ่ายวัสดุเข้าสูงสุด (270 มม) และที่จุดจ่ายวัสดุเข้าต่ำสุด (170 มม) แสดงให้เห็นว่าที่จุดจ่ายวัสดุสูงสุดมีอัตราขนถ่ายวัสดุสูงกว่าจุดจ่ายวัสดุเข้าต่ำสุดประมาณ 200 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาที่ความเร็วเพิ่มสูงขึ้นจะเห็นได้ว่าปริมาณการขนถ่ายที่ได้จะลดลงเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของวัสดุที่จุดจ่ายวัสดุเข้าสู่ลูกกระพ้อไม่ทันต่อความเร็วการเคลื่อนที่ของลูกกระพ้อ ดังนั้นวัสดุที่บรรจุภายในลูกกระพ้อจะมากจากการตกของลูกกระพ้อที่ก้านอ่าง



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขนถ่ายกับความเร็วที่เปลี่ยนแปลงเมื่อกำหนดจุดจ่ายวัสดุเข้าสู่ลูกกระพ้อที่ระยะ 170 มม และ 270 มม

## 5. อภิปรายและสรุปผล

การจำลองด้วยวิธี DEM เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของแต่ละอนุภาควัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่กระพ้อลำเลียงจนกระทั่งจ่ายออกจากลูกกระพ้อ การเปรียบเทียบจะเป็นรูปแบบของปริมาณที่แสดงให้เห็นจากรูปภาพและพฤติกรรมการสาดของวัสดุ โดยทำนายการไหลของวัสดุที่ความเร็วรอบการหมุนที่แตกต่างกัน ความถูกต้องแม่นยำของการจำลองด้วยวิธี DEM นั้นจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของตัวแปรที่นำมาสร้างแบบจำลองรวมถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุจำลอง

ปริมาณของวัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่ลูกกระพ้อที่จุดจ่ายวัสดุเข้าสูงสุด (270 มม) มีปริมาณมากกว่าที่ระดับจุดจ่าย



วัสดุเข้าต่ำสุด (170 มม) มีปริมาณแตกต่างกันสูงถึง 200 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากปริมาณวัสดุภายในลูกกระพ้อที่จุดจ่าย 170 มม จะมาจากการตกที่ก้นอ่างเพียงอย่างเดียว ในขณะที่จุดจ่าย 270 มม จะมาจากสองส่วนคือการตกจากก้นอ่างและช่องทางจ่ายวัสดุเข้าร่วมกัน เมื่อพิจารณาที่ความเร็วเพิ่มขึ้นสูงสุด ปริมาณวัสดุภายในลูกกระพ้อจะลดลง เนื่องจากปริมาณการไหลของวัสดุเข้าสู่ลูกกระพ้อไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับความเร็วที่เพิ่มขึ้น

ในที่สุดก็สรุปได้ว่าการคำนวณทางคณิตศาสตร์สำหรับพฤติกรรมการไหลของวัสดุเมล็ดด้วยวิธี DEM สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การจ่ายวัสดุด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจากกระพ้อลำเลียงหรือการเคลื่อนที่ของวัสดุภายใต้อุปกรณ์อื่นๆ

#### 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยนี้

#### 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. 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.
4. 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.

5. 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.
6. Mohsenin, N.N., *Physical properties of plant and animal materials*. 2nd ed. ed. 1986, New York, N.Y.: : Gordon and Breach Science.
7. Cundall, P.A. and O.D.L. Strack, *A discrete numerical model for granular assemblies*. GEOTECHNIQUE, 1979. 29(1): p. 47-65.
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.