

# การตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัสดุทางการเกษตรในสกรูลำเลียงโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง

## Investigation of agriculture seed flow in screw conveyors using discrete element method

สถาพร วังฉาย<sup>1</sup>, ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี<sup>2</sup>, พรชัย จงจิตร์ไพศาล<sup>3</sup>

Sathaphon Wangchai<sup>1</sup>, Supachai Tragoonsubtavee<sup>2</sup>, Pornchai Chongchitpaisan<sup>3</sup>

Received: 15 July 2019; Revised: 13 August 2019; Accepted: 10 September 2019

### บทคัดย่อ

สกรูลำเลียงใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการลำเลียงวัสดุในอุตสาหกรรมทางการเกษตร อุตสาหกรรมการผลิตในแนวระดับหรือแนวเอียง ประสิทธิภาพของสกรูลำเลียงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างทั้งการออกแบบ ฟังก์ชันการทำงาน คุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของวัสดุเช่นรูปร่าง ขนาดของวัสดุ อิทธิพลจากแรงเสียดทานระหว่างแต่ละอนุภาคและระหว่างอนุภาคและผนังของอุปกรณ์ ความเร็วในการหมุนของใบสกรู มุมเอียงการทำงานของสกรูลำเลียง การออกแบบใบสกรู ปริมาณการป้อนวัสดุที่เหมาะสม การศึกษาครั้งนี้เป็นการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัสดุภายในสกรูลำเลียงโดยใช้วิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงระหว่าง 300 – 700 รอบต่อนาที มุมเอียงการทำงานที่ 0 – 15 องศาและลักษณะของใบสกรูลำเลียง (อัตราส่วนระยะพิทช์ (P) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (D)) ที่ 0.5P/D, 1.0P/D และ 1.5P/D เมื่อกำหนดอัตราการป้อนวัสดุผ่านใบสกรูลำเลียงที่ 12 kg/s ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าปริมาณวัสดุสะสมกอนหาแนที่ความเร็วต่ำและที่อัตราส่วน P/D ต่ำเช่นเดียวกันและการสะสมของอนุภาคจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วสูงขึ้นหรือปรับอัตราส่วน P/D สูงขึ้นตามลำดับ

**คำสำคัญ:** สกรูลำเลียง วิธีวิเคราะห์อนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง (DEM) อัตราการไหลเชิงมวล วัสดุเม็ด

### Abstract

Screw conveyors are widely used in conveying processes in agriculture and manufacturing industries for transporting granular materials. The performance of a screw conveyor can be affected by many factors, such as shape and size of the granular materials, influence of the friction between each particle and between particle-walls, rotational speed and geometries of screw, inclination of the screw conveyor, screw conveyor design and mass flow rate. In this study we examine the movement of materials within the screw conveyor using the Discrete Element Method (DEM) to simulate granular flow and investigate performance in terms of variations of particle speeds (300 – 700 rpm), incline of a screw conveyor (0 – 15 degree) and the characteristics of the pitch (P) to diameter (D) of screw conveyor 0.5P/D, 1.0P/D and 1.5P/D. The results show that the amount of material is accumulated at low speed and the ratio of P/D is low. The amount of material will decrease as the speed increases or the ratio of P/D is adjusted accordingly.

**Keywords:** Screw conveyor, Discrete Element Method (DEM), Mass flow rate, granular materials

<sup>1</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, <sup>2,3</sup> รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 10800,

<sup>1</sup> Assistant Professor., <sup>2,3</sup> Associate Professor., Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 10800, Thailand

\* Corresponding author: Sathaphon Wangchai, Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok, 10800 Thailand, sathaphon.w@eng.kmutnb.ac.th

## บทนำ

วัสดุปริมาณมวลหรือวัสดุชนิดเม็ดทางการเกษตรที่นำมาใช้ในงานอุตสาหกรรม จำเป็นต้องมีการจัดการลำเลียงที่ถูกต้องเหมาะสมกับสภาพการทำงาน สกรูลำเลียงเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่งที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิตอุตสาหกรรมเกษตร การแปรรูป การบรรจุภัณฑ์ เพื่อลำเลียงวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการ การลำเลียงอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุเช่นการแตกหักของเม็ดวัสดุเป็นส่วนย่อยๆ หรืออัตราการลำเลียงไม่เป็นไปตามที่ต้องการ การศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุประเภทเม็ดเล็กที่สภาวะต่างๆ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับวัสดุหรือเกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับผิวผนัง รวมถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุ จะช่วยให้มีความเข้าใจมากขึ้นในการออกแบบเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด มีอัตราการลำเลียงที่สม่ำเสมอ ลดการติดขัด (ไม่เคลื่อนที่) ของอนุภาควัสดุและยังเป็นประโยชน์สามารถประเมินค่าของพลังงานที่นำมาใช้ ลดความเสียหายของวัสดุ (การแตกหักของวัสดุ) และการสึกหรอของอุปกรณ์ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ Discrete element modelling (DEM) วิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุผ่านโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุชนิดเม็ดหรือวัสดุชนิดผงด้วยอุปกรณ์ลำเลียงที่สามารถมองเห็นภาพการเคลื่อนที่ของวัสดุภายในขบวนการผลิตหรือการลำเลียงวัสดุ โดยหลักการของ DEM คือการติดตาม (track) ทุกๆ การเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคของเม็ดวัสดุเพื่อประเมินตำแหน่ง ค่ามวลแรงกระทำ ความเร็ว การสัมผัส แรงกระทำ การชน การโคจรของแต่ละอนุภาคภายในระบบที่ตำแหน่งต่างๆ ในแต่ละขั้นตอนการคำนวณในแต่ละช่วงของเวลา มีการคำนวณการมีปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างแต่ละอนุภาควัสดุและระหว่างอนุภาควัสดุกับสิ่งแวดล้อม (ผนังและอนุภาคอื่น) ในกรณีวัสดุมีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถลหรือแบบหมุนกลิ้งโดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตันและกฎการเคลื่อนที่ ณ จุดสัมผัสกันของแต่ละอนุภาคตลอดการคำนวณ ดังนั้น DEM จึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการคำนวณหาค่าต่างๆ วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัสดุที่ไม่สามารถหาได้ในห้องปฏิบัติการโดยการทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่ที่มีลักษณะเหมือนกับการทดลอง ดังนั้นจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุ คุณสมบัติต่างๆ จะมีความสำคัญต่อการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์ เพื่อให้มีความเหมาะสมที่สุดต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ลำเลียงประกอบด้วย bulk density, solid density, shear modulus, Poisson's ratio, coefficient of restitution,

coefficient of static friction และ coefficient of rolling friction มีการศึกษามากมายที่กล่าวถึงวิธีการทดสอบ<sup>1</sup> รวมถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุตัวอย่าง

บทความนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุภายในสกรูลำเลียงที่มีความยาว 2.5 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.152 เมตร (6 นิ้ว) เมื่อกำหนดระยะพิสัย (P) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของใบสกรู 3 ขนาด (0.5P/D, 1.0P/D และ 1.5P/D) ปรับเปลี่ยนความเร็วในช่วงระหว่าง 300 ถึง 700 รอบต่อนาที ทำงานที่มุมเอียงเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 15 องศา กำหนดอัตราการป้อนวัสดุคงที่ 12 kg/s พร้อมด้วยนำเสนอวิธีการทำนายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ (DEM) มาช่วยวิเคราะห์พฤติกรรมของอนุภาคแบบไม่ต่อเนื่อง ผลจากการใช้วิธีการ DEM จะช่วยให้ผู้ออกแบบทราบถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการออกแบบเครื่องอุปกรณ์ สามารถกำหนดรูปแบบการลำเลียงที่เหมาะสมกับวัสดุ ลดการสร้างชิ้นงานต้นแบบ เพื่อให้อุตสาหกรรมนำวิธีการที่ได้จากการศึกษานี้ไปพัฒนาอุปกรณ์ลำเลียงชนิดอื่นต่อไป

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

วิธีองค์ประกอบที่ไม่ต่อเนื่องเป็นเครื่องมือวิเคราะห์เชิงตัวเลขใช้ในการจำลอง วิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุโดยการติดตามการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคภายในอุปกรณ์หรือระบบที่ต้องการ DEM จะช่วยอธิบายพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุแบบไดนามิกส์ (dynamic motion) การหมุน แรงกระทำ ความเร็ว การสัมผัสกันที่เกิดขึ้นของแต่ละอนุภาควัสดุและความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละอนุภาควัสดุ (interaction) ที่เกิดจากการชนกันระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและระหว่างอนุภาคกับผิวผนังชิ้นงาน (สกรูลำเลียง) มีการอธิบายโดย Cundall and Strack<sup>2</sup> การหมุนและการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุจะพิจารณาที่เวลาต่างๆ อธิบายได้ด้วยกฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law of motion)<sup>3</sup> ดังนี้

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

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (R_i \times F_{ij}^s - \mu_r R_i |F_{ij}^n| \hat{\omega}_i) \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้, และ คือมวล, แรงเฉื่อย, ความเร็วเชิงเส้นและความเร็วการหมุนของอนุภาค ตามลำดับ และ คือแรงสัมผัสตั้งฉาก (normal contact forces) และแรงสัมผัสแบบเฉือน (tangential contact forces) กระทำโดยอนุภาค บน

อนุภาค และ คือแรงโน้มถ่วงของอนุภาค สำหรับ คือจำนวนของอนุภาคที่มีการสัมผัสกันและ คือขนาดของเวกเตอร์จากจุดศูนย์กลางของอนุภาคถึงผิวที่มีการสัมผัสกันระหว่างอนุภาค โดยที่ คือสัมประสิทธิ์การกลิ้งของอนุภาค (rolling friction) และ คือหน่วยของเวกเตอร์ที่มีค่าเท่ากับ หารด้วยขนาด

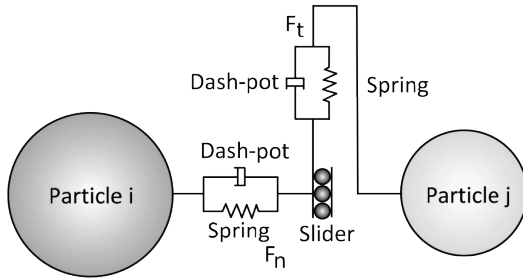


Figure 1 Spring-dashpot contact model.

การศึกษาใช้โมเดลการสัมผัสกันระหว่างแต่ละอนุภาควัสดุ (Figure 1) และการสัมผัสกันระหว่างอนุภาควัสดุกับพื้นผิวผนังของเครื่องทดสอบพิจารณาแบบ spring-dashpot model และ Hertz-Mindlin no-slip model<sup>4</sup> ที่สามารถใช้ประเมินคาดการณ์ถึงประสิทธิภาพของการออกแบบอุปกรณ์ลำเลียง พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียง พิจารณาขนาดของแรงกระทำตั้งฉากกับผิวสัมผัสระหว่างแต่ละอนุภาคของวัสดุและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 อนุภาควัสดุ ดังนี้

$$F_n = -k_n \Delta x + C_n v_n \tag{3}$$

$$F_t = \min [\mu F_n, k_t \int v_t dt + C_t v_t] \tag{4}$$

เมื่อกำหนดให้  $k_n$  และ  $k_t$  คือสติฟเนสแนวตั้งฉากและสติฟเนสแนวเฉือนตามลำดับ  $\Delta x$  คือระยะการทับซ้อนกันของสองอนุภาค สำหรับ  $v_n$  และ  $v_t$  คือความเร็วในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสและความเร็วในแนวขนานกับแนวสัมผัสตามลำดับ ในส่วนของ  $C_n$  และ  $C_t$  คือสัมประสิทธิ์การหน่วงในแนวตั้งฉาก (normal damping coefficient) และสัมประสิทธิ์การหน่วงในแนวเฉือน (tangential damping coefficient) ตามลำดับ สำหรับค่า จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของการคืนตัว (coefficient of restitution,  $e$ ) ของอนุภาควัสดุ สามารถกำหนด

ได้จากอัตราส่วนระหว่างความเร็วหลังจากการชนกันของอนุภาคต่อความเร็วที่เกิดขึ้นก่อนการชนกันของอนุภาคในแนวตั้งฉากกับระนาบที่พิจารณา สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$C_n = -2 \ln(e) \frac{\sqrt{m_i m_j k_n}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(e)}} \tag{5}$$

$$m_{ij} = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \tag{6}$$

เมื่อ  $m_{ij}$  คือมวลที่เปลี่ยนแปลงลดลงของอนุภาค

### การจำลองด้วยวิธี DEM (DEM SIMULATIONS)

รูปทรงทางเรขาคณิต (3 มิติ) สำหรับสกรูลำเลียงถูกสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรม CAD และนำเข้าสู่โปรแกรม EDEM Simulation กำหนดช่องทางป้อนวัสดุเข้าที่ด้านหนึ่งของสกรูลำเลียงและเชื่อมต่อกับฮอปเปอร์สามารถจ่ายวัสดุได้ที่ 12 กิโลกรัมต่อวินาที ขนาดของใบสกรูแสดงใน Table 1 ใบสกรูมีความยาว 2.5 เมตร และกำหนดช่องทางจ่ายวัสดุออกอีกด้านหนึ่งของสกรูลำเลียง สำหรับอนุภาควัสดุในการจำลองจะสร้างเป็นทรงรีมีลักษณะคล้ายวัสดุจริง ซึ่งมาจากหลายทรงกลมประกอบร่วมกัน (Figure 2) การตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียงที่เงื่อนไขขอบเขตต่างกัน โดยกำหนดให้ใบสกรูให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 0.152 เมตร (6 นิ้ว) และมีระยะพิตช์ (P) 3 ขนาดประกอบด้วย 0.5P/D, 1.0P/D และ 1.5P/D ดังแสดงใน Figure 3 และกำหนดการทำงานที่ทำมุมเอียง 4 ระดับประกอบด้วย แนวนอน 0 องศา และแนวเอียง 5, 10 และ 15 องศา และกำหนดการลำเลียงวัสดุที่ความเร็วรอบ 5 ระดับประกอบด้วย 300, 400, 500, 600 และ 700 รอบต่อนาที (สำหรับแบบจำลองในการศึกษาที่ความเร็วต่ำกว่า 300 รอบต่อนาทีและมุมเอียงสูงกว่า 15 องศา ส่งผลให้วัสดุเกิดการกองสะสมมากเกินจนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้) เพื่อทำการตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุ อัตราการไหลที่เกิดขึ้น ความเร็วการเคลื่อนที่ แรงกระทำที่เกิดขึ้นกับวัสดุ จากการกำหนดระยะห่างระหว่างใบสกรู (P/D) ระดับความเอียงการลำเลียง และความเร็วในการหมุนของใบสกรูจะมีผลต่ออัตราการลำเลียงที่เกิดขึ้นอย่างไร

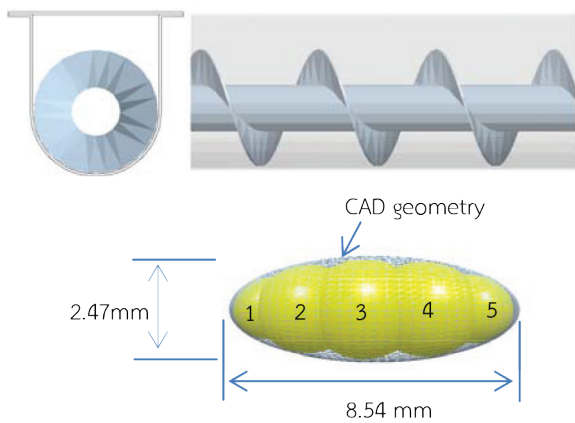


Figure 2 Geometry of screw and shape of particle.

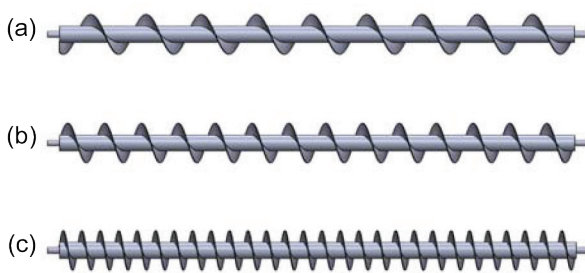


Figure 3 Ratio of pitch (P) and diameter (D) of screw (a) 1.5, (b) 1.0 and (c) 0.5.

การจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีองค์ประกอบที่ไม่ต่อเนื่อง (DEM) ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป EDEM simulations version 2018 ประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ HP Z240 I7 มีหน่วยความจำ 16GB เวลาคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ 60s ใช้เวลาในการประมวลผลทั้งหมด 10 – 24 ชั่วโมงซึ่งขึ้นอยู่กับแต่ละเงื่อนไขของการจำลอง ผลเฉลยจะมีความถูกต้องแม่นยำเพียงใดขึ้นอยู่กับความถูกต้องแม่นยำของตัวแปรประกอบการจำลองที่ได้จากการทดสอบและคุณสมบัติวัสดุเพื่อกำหนดให้กับโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

Table 1 Dimension of screw conveyor

เส้นผ่านศูนย์กลางนอก (D) (mm)	152.4
เส้นผ่านศูนย์กลางนอกของเพลลา (d) (mm)	60
ระยะพิทช์ (P) (mm)	152.4
ระยะห่างระหว่างใบสกรูและราง (c) (mm)	1.25

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือคุณสมบัติของข้าวเปลือกแห้งชนิดยาว โดยมีขนาดรูปร่างและค่าความเป็นทรงกลมที่ทำการวัดโดยใช้เวอเนียร์คาลิเปอร์โดยมีความยาว (L=8.54 มิลลิเมตร) ความกว้าง (W=2.47 มิลลิเมตร) และความหนา

(T=1.83 มิลลิเมตร) จากวัสดุทดสอบจำนวน 30 เม็ดและคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าทรงกลม (effective diameter ( $D_e$ =3.38 มิลลิเมตร)) โดยวัสดุมีมวลและปริมาตร (Mass and volume) อยู่ที่ 2.26 กรัม จากการคิดค่าเฉลี่ย 100 เม็ดและนำวัสดุจำนวน 100 เม็ดแทนที่ในน้ำพิจารณาการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำที่เกิดขึ้นและคิดค่าเฉลี่ยต่อหน่วยวัสดุแต่ละเม็ดอยู่ที่ 0.14 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในส่วนของความหนาแน่นจริง (Solid density) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุที่ไม่รวมช่องว่างระหว่างอนุภาควัสดุ โดยการนำวัสดุที่ทราบน้ำหนักแทนที่ในน้ำที่ทราบปริมาตรแล้วพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของปริมาตร สำหรับกรณีความหนาแน่นรวม (Bulk density) คืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุที่พิจารณาช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุรวมด้วยหาได้จาก การนำวัสดุเทลงในหลอดแก้วที่มีขนาด 1,000 มิลลิเมตรให้ล้นออกมาจากขอบปากแก้วและใช้ไม้บรรทัดค่อยๆ ปาดเอาส่วนเกินออกจากขอบปากแก้วโดยไม่ให้อนุภาคส่วนบนที่ทำการปาดออกไปกดอัดอนุภาคส่วนล่างและนำวัสดุในหลอดแก้วนั้นไปชั่งหาน้ำหนักบันทึกค่าและคำนวณได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรที่เกิดขึ้นทำการทดลองจำนวน 5 ครั้งแล้วพิจารณาจากค่าเฉลี่ยได้ 471.16 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

มุมกองวัสดุ (Angle of repose) พิจารณาโดยการนำวัสดุเทในหลอดแก้วทรงกระบอกจนเต็ม (ขนาดทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตรและสูง 250 มิลลิเมตร) แล้วเคลื่อนที่หลอดแก้วขึ้นในแนวตั้งด้วยความเร็วคงที่ โดยให้วัสดุเคลื่อนที่ตามธรรมชาติและกองบนพื้นระนาบที่กำหนด (ทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 180 มิลลิเมตร) มุมกองของวัสดุได้จากการวัดความกว้างของฐานกองวัสดุและความสูงของกองวัสดุ<sup>6,7</sup> สำหรับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต (Coefficient of Static Friction,  $\mu_s$ ) คือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุ 2 ชิ้นสัมผัสกันพิจารณาโดยการนำวัสดุวางบนระนาบของพื้นผิวทดสอบและทำการปรับมุมโดยการหมุนของแผ่นระนาบเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งวัสดุเริ่มมีการหมุนหรือเริ่มมีการเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างทำการจดบันทึกค่ามุมนั้น<sup>6,7</sup> จากนั้นคำนวณโดยใช้สมการ  $\mu_s = \tan(\theta)$  เมื่อกำหนดให้  $\theta$  คือค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตและ คือกมุมที่ทำให้วัสดุเริ่มเคลื่อนที่หรือมีการไหลเกิดขึ้น สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การคืนตัว (Coefficient of restitution (e)) คืออัตราส่วนรากที่สองของความสูงระหว่างความสูงของวัสดุหลังจากตกกระทบพื้นแล้วกระดอนขึ้นในแนวตั้ง ( $h_r$ ) และความสูงเริ่มต้นของวัสดุก่อนตกกระทบพื้น ( $h_i$ )<sup>6</sup> พิจารณาได้จากสมการ  $e = \sqrt{h_r/h_i}$  (ในที่นี้ไม่นำมุมที่เกิดขึ้นจากการกระดอนของวัสดุที่มีค่า

มากกว่า 10 องศากับแนวตั้งมาพิจารณา) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกลิ้ง (Coefficient of rolling friction,  $\mu_r$ ) คือความสัมพันธ์การกลิ้งของวัสดุที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับวัสดุหรือระหว่างวัสดุกับพื้นผิวผนัง ในที่นี้ได้จากการประมาณค่าจากการจำลองด้วย DEM และเปรียบเทียบผลลักษณะการก้องของวัสดุที่สอดคล้องกับผลการทดลอง (trial and error)<sup>6</sup> พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงใน Table 2

รูปร่างและขนาดของเม็ดข้าวเปลือกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะมีลักษณะที่สม่ำเสมอและนำมาใช้กำหนดเป็นแบบจำลองข้าวเปลือกที่มีรูปทรงกลมจำนวน 5 ทรงกลมวางซ้อนเชื่อมต่อกัน (Figure 2) เพื่อให้ให้ออกมารูปทรงเหมือนกับเม็ดวัสดุจริง และกำหนดให้มีปริมาตรและน้ำหนักเท่ากับวัสดุจริงและมีค่ามุมก้องวัสดุเป็น 35.83°

**Table 2** Materials Properties

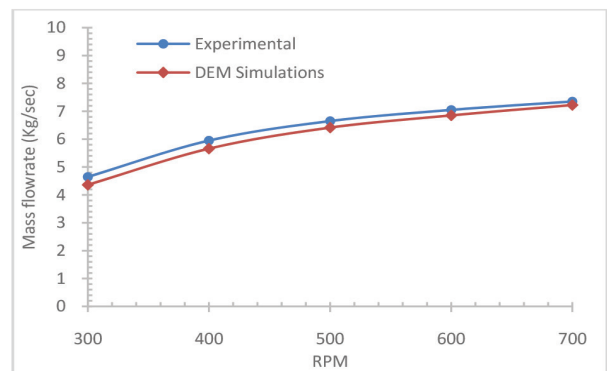
Object properties	paddy	steel
Particle density (kg/m <sup>3</sup> ), ( $\rho_s$ )	1193	8000
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.45	0.29
Shear modulus (Pa), ( $G$ )	1e+7	7.75e+10
coefficient of restitution, ( $e$ )	0.2	0.5
coefficient of static friction, ( $\mu_s$ )	0.3	0.5
coefficient of rolling friction, ( $\mu_r$ )	0.1	0.1
time step (sec)	1e-5	

เพื่อยืนยันความถูกต้องสำหรับรูปร่างของแบบจำลองอนุภาคโดยทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยที่ขนาดและรูปร่างรวมถึงพารามิเตอร์ที่ใช้กำหนดในการจำลองแสดงใน Table 2 จะต้องมีความถูกต้องที่เหมือนกันกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ วิธีการทั้งหมดอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา<sup>7</sup> กระบวนการนี้จะทำซ้ำจนกว่าผลจะสอดคล้องกัน ซึ่งวิธีการทั้งหมดนี้จะมีความสอดคล้องกับนักวิจัยหลายคน<sup>6,7,8,9</sup>

**เปรียบเทียบผลการทดลอง (validation)**

การจำลองพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุในสกรูลำเลียงด้วยวิธี DEM นั้นได้ดำเนินการตรวจสอบความแม่นยำของพารามิเตอร์ รูปร่างและขนาดของอนุภาคที่ใช้ในแบบจำลองก่อน เพื่อยืนยันความถูกต้องของการสร้างจำลอง DEM และสามารถนำไปคำนวณปัญหาต่างๆ ที่มีความซับซ้อนได้ เวลาที่ใช้อาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตของการคำนวณแต่ละครั้ง จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ (DEM) โดยการนำผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

ที่มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่เหมือนกัน แสดงผลในรูปแบบของอัตราการลำเลียงวัสดุที่ได้ (กิโลกรัมต่อวินาที) ดังแสดงใน Figure 4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของผลลัพธ์และยอมรับได้ทั้งหมด 5 ระดับความเร็วประกอบด้วย 300, 400, 500, 600 และ 700 รอบต่อนาที จาก Figure 4 ยังแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วการหมุนเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการลำเลียงที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ และความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุจะสูงตามเมื่อพิจารณาจากตำแหน่งป้อนวัสดุเข้าจนกระทั่งจ่ายวัสดุออก สำหรับการศึกษานี้ที่ความเร็วต่ำกว่า 300 รอบต่อนาทีวัสดุจะกองหนาแน่นมากที่ตำแหน่งป้อนวัสดุเข้าและเคลื่อนที่เต็มหน้าตัดของใบสกรูอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึงช่องจ่ายวัสดุออกที่สำคัญคือต้องใช้กำลังงานในการขับเคลื่อนวัสดุให้ไหลไปข้างหน้าสูงขึ้น สำหรับกรณีความเร็วสูงกว่า 700 รอบต่อนาทีส่งผลให้อัตราการจ่ายวัสดุออกจะเริ่มลดลงเนื่องจากอัตราการป้อนวัสดุเข้าสกรูลำเลียงมีอัตราคงที่และปริมาณของวัสดุที่ป้อนเข้าใบสกรูนั้นไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับความเร็วที่กำหนด



**Figure 4** Comparison of DEM and Experimental Results

**ผลการทดลอง**

การศึกษาพฤติกรรมต่างๆ และการเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาคซึ่งยากมากสำหรับการตรวจสอบที่ได้จากการทดสอบ ดังนั้นจึงทำการจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียงเพื่อตรวจสอบอัตราการลำเลียงของวัสดุ แรงกระทำ ความเร็วของอนุภาคจากการลำเลียงวัสดุด้วยสกรูลำเลียงผ่านวิธีการทางคอมพิวเตอร์

ปริมาณการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียงที่อัตราส่วนระยะพิท (P) ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ระดับต่างๆ ดังแสดงใน Figure 5 ที่ความเร็วการทำงาน 500 รอบต่อนาที (ความเร็วอื่นๆ ไม่ได้แสดงในที่นี้) อัตราส่วน P/D และความเร็วการทำงานจะส่งผลต่อปริมาณวัสดุที่ได้จากการลำเลียง พบว่าอัตราส่วน P/D สูงจะส่งผลให้

ได้ปริมาณมวลของวัสดุน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสกรูลำเลียงที่มีอัตราส่วน P/D ต่ำ เนื่องจากในแต่ละช่วงพิตจะมีช่องว่างเกิดจากอัตราการป้อนวัสดุเข้าสู่สกรูไม่ทันเมื่อเทียบกับความเร็วที่กำหนด (500 รอบต่อนาที) และในทางกลับกันกรณีอัตราส่วน P/D ต่ำๆ ปริมาณมวลของวัสดุจะหนาแน่นและเคลื่อนที่เต็มหน้าตัดตลอดความยาวสกรูลำเลียงกรณีเพิ่มความเร็วให้สูงขึ้น ปริมาณของวัสดุในแต่ละช่วงพิตของใบสกรูจะลดต่ำลงตามลำดับเช่นกันและในทางกลับกันหากลดความเร็วต่ำลงจะทำให้ปริมาณมวลของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นเป็นผลมาจากอัตราวัสดุที่ป้อนเข้าสู่สกรูลำเลียงเต็มหน้าตัดและเคลื่อนที่ออกอย่างช้าๆ ทำให้ในแต่ละช่วงพิตของใบสกรูเต็มไปด้วยวัสดุ (ดู Figure 9 ประกอบ) กรณีอัตราส่วน P/D = 1.5 นั้นพบว่าปริมาณมวลของวัสดุที่กองอยู่ในแต่ละช่วงพิตมีปริมาณน้อยกว่า P/D = 1 อยู่ประมาณ 50% และมีการเคลื่อนที่ออกจากใบสกรูเร็วกว่าเพียงเล็กน้อย สำหรับกรณี P/D = 0.5 ระยะเวลาในการจ่ายวัสดุออกจากสกรูลำเลียงจะนานกว่าถึงสองเท่าและมีปริมาณมวลวัสดุกองอยู่ระหว่างช่วงพิตของใบสกรูสูงถึง 2 เท่าเช่นกันเมื่อพิจารณาเทียบกับอัตราส่วน P/D = 1.0

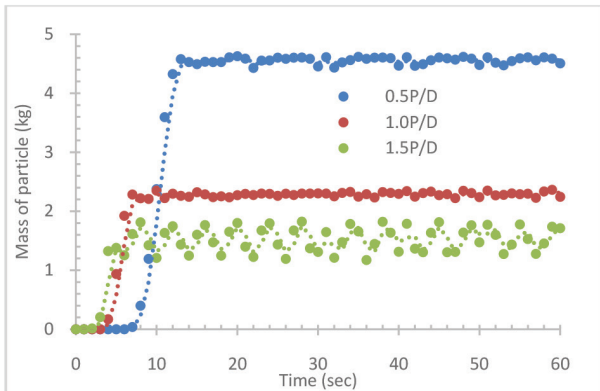


Figure 5 Mass of particle in a horizontal level with the ratio 0.5P/D, 1.0P/D and 1.5P/D.

Figure 6 แสดงปริมาณมวลของวัสดุที่ได้จากการลำเลียงด้วยสกรูลำเลียงที่ความเร็วในการทำงานใบสกรูหมุนที่ 500 รอบต่อนาทีและอัตราส่วน P/D = 1.0 และทำมุมในช่วงที่กำหนดระหว่าง 0 – 15 องศา กับแนวระนาบ พบว่าการลำเลียงวัสดุแต่ละระดับของมุมเอียงจะมีผลกระทบต่อปริมาณมวลของวัสดุที่ได้จากการลำเลียงแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย สำหรับอัตราป้อนวัสดุที่ระดับดังกล่าว (12 กิโลกรัมต่อวินาที) กรณีเพิ่มความเร็วสูงขึ้นจะส่งผลให้ได้ปริมาณของวัสดุเพิ่มขึ้นตามและจะลดลงเมื่อทำงานที่ความเร็วลดต่ำลงตามลำดับ ใน

ทางกลับกันกรณีปรับระยะพิตต่ำลง (P/D = 0.5) จะทำให้ได้ปริมาณมวลของวัสดุเพิ่มขึ้นและจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อปรับระยะพิตไปที่อัตราส่วน P/D = 1.5

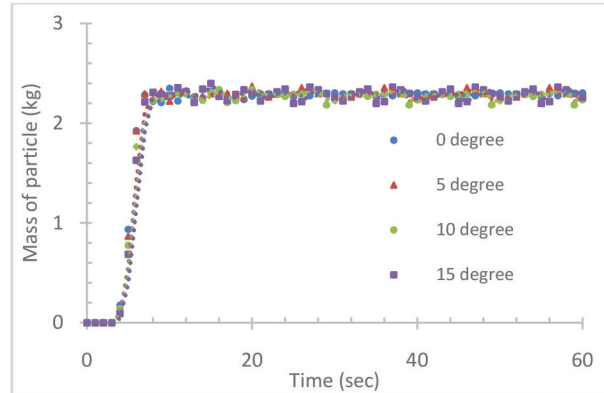
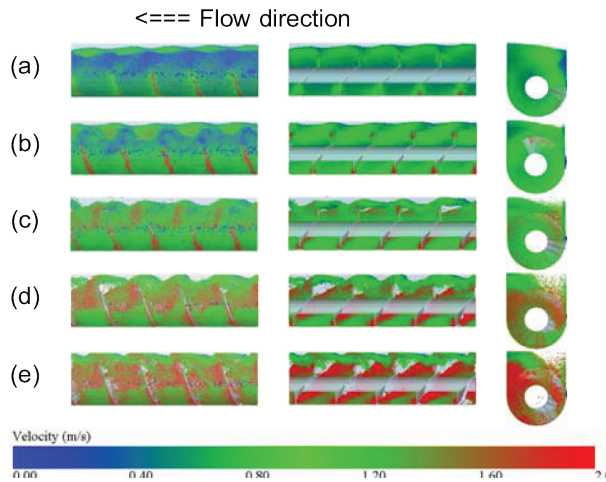


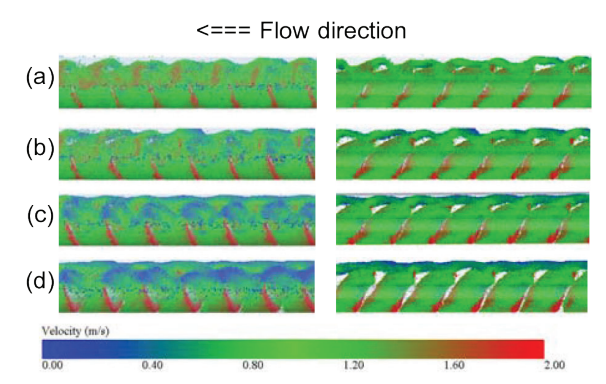
Figure 6 Mass of particle in the horizontal level (P/D = 1.0) with 0, 5, 10 and 15 degree

Figure 7 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียงในช่วงความเร็วการหมุนของใบสกรูระหว่าง 300 – 700 รอบต่อนาที จะเห็นได้จากการจำลอง DEM พบว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุตลอดความยาวของสกรูลำเลียง ปริมาณมวลของวัสดุในแต่ละช่วงพิตจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วการหมุนของใบสกรูสูงขึ้น พิจารณาที่ความเร็วต่ำ (300 รอบต่อนาที) ปริมาณวัสดุจะหนาแน่นและเต็มหน้าตัดตลอดความยาวของใบสกรู (Figure 7a) และความหนาแน่นของวัสดุจะลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้นเป็น 500 รอบต่อนาที วัสดุส่วนหนึ่งจะเคลื่อนที่ด้วยแรงเหวี่ยงลอยสู่ช่องว่างเหนือใบสกรูลำเลียงและเคลื่อนที่ไปอยู่ในช่องว่างด้านหลังของใบสกรูนั้นและความเร็วในการเคลื่อนที่ที่สูงสุดของวัสดุจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งติดกับใบสกรูลำเลียง (Figure 7c) และเมื่อเพิ่มความเร็วในการทำงานสูงขึ้นจนกระทั่งความเร็วสูงสุด (700 รอบต่อนาที) ความหนาแน่นของวัสดุจะเบาบางและเกิดช่องว่างสูงบริเวณด้านบนของใบสกรูและด้านหลังใบสกรูลำเลียง สำหรับความเร็วของอนุภาควัสดุในแนวแกนจะมีการเคลื่อนที่ต่ำบริเวณส่วนบนของใบสกรูลำเลียง และในทำนองเดียวกันความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณที่วัสดุสัมผัสกับใบสกรูลำเลียง (Figure 7e) ความเร็วของวัสดุในแนวแกนการเคลื่อนที่ของใบสกรูลำเลียงจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อการหมุนของใบสกรูเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ



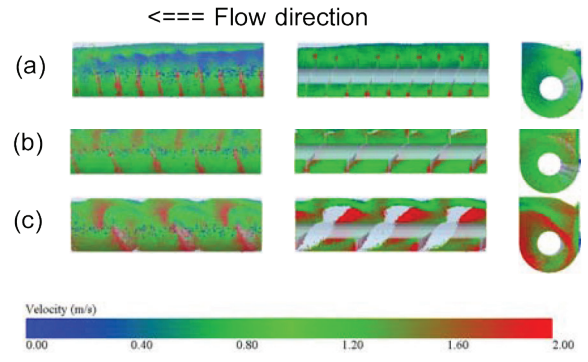
**Figure 7** Particle dispersion for various rotation speeds View from left to right: side view, section long view, cross-sectional view. (a) 300, (b) 400, (c) 500, (d) 600 and (e) 700 rpm

Figure 8 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุภายในสกรูลำเลียงที่หมุนด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที และอัตราส่วน P/D = 1.0 (กรณีอื่นไม่ได้แสดงผลในที่นี้) สำหรับการลำเลียงวัสดุในแนวเอียงทำมุมจาก 0 องศา (แนวระนาบ) ถึง 15 องศา กับแนวระนาบ จะเห็นการกระจายตัวของอนุภาควัสดุพบว่าปริมาณอนุภาควัสดุจะลดลงเมื่อมุมเอียงการทำงานเพิ่มสูงขึ้นจากตำแหน่งแนวนอนเป็นตำแหน่งแนวตั้งอย่างเห็นได้ชัดจากการจำลอง DEM มีลักษณะเดียวกับกรณีเพิ่มความเร็วจาก 300 ไปเป็น 700 รอบต่อนาที จะทำให้เกิดช่องว่างเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ และยังพบว่าความเร็วการหมุนเฉลี่ยของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนและความเร็วการหมุนที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลจากกอนวัสดุผ่านใบ สกรู



**Figure 8** Particle dispersion for various rotation speeds View from left to right: side view, section long view, cross-sectional view. (a) 0, (b) 5, (c) 10, and (d) 15 degree.

Figure 9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุในแนวระนาบตลอดความยาวของสกรูลำเลียงทำงานที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาที โดยกำหนดอัตราส่วนระยะพิต (P) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ที่ 0.5, 1.0 และ 1.5 (กรณีอื่นไม่ได้แสดงผลในที่นี้) การกระจายตัวของอนุภาควัสดุมองเห็นชัดเจนจากการจำลอง DEM เมื่ออัตราส่วน (P/D) เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 ปริมาณวัสดุในแต่ละช่วงพิตจะลดลงและเคลื่อนที่ติดกับใบเกลียวสกรูและความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ในทางกลับกันกรณีลดอัตราส่วน P/D ลงเป็น 0.5 ปริมาณมวลของวัสดุจะหนาแน่นและเต็มหน้าตัดใบสกรูลำเลียงและความเร็วการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะลดลงตลอดความยาวของ สกรูลำเลียงเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับอัตราส่วน P/D ที่ 1.0 การกระจายตัวของอนุภาคมีความสม่ำเสมอตลอดการทำงานตั้งแต่จุดเริ่มต้นป้อนวัสดุเข้าจนกระทั่งจ่ายวัสดุออกจากสกรูลำเลียง มุมกอนไดนามิกส์สำหรับการเคลื่อนที่ของวัสดุปริมาณมวลจะลดลงเมื่ออัตราส่วน P/D เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ



**Figure 9** Particle dispersion for various rotation speeds View from left to right: side view, section long view, cross-sectional view. (a) 0.5, (b) 1.0 and (c) 1.5.

**อภิปรายและสรุปผล**

การจำลองด้วยวิธี DEM เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแต่ละอนุภาควัสดุเริ่มต้นตั้งแต่ป้อนวัสดุเข้าสู่สกรูลำเลียงจนกระทั่งอนุภาควัสดุเคลื่อนที่ออกจากสกรูลำเลียงที่ช่องจ่ายวัสดุออก การเปรียบเทียบผลจะเป็นรูปแบบปริมาณการลำเลียงของวัสดุ และรูปภาพแสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัสดุภายในสกรูลำเลียง ที่ความเร็ว หมุนเอียง ระยะพิตต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน ความถูกต้องแม่นยำของการจำลองด้วยวิธี DEM นั้นจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของตัวแปรที่นำมาสร้างแบบจำลองรวมถึงขนาดและ

### รูปร่างของวัสดุจำลอง

ปริมาณของวัสดุเคลื่อนที่เข้าสู่สกรูลำเลียงด้วยอัตรา 12 กิโลกรัมต่อวินาที ปริมาณวัสดุจะมีการกองหนาแน่นมากที่ความเร็วต่ำ มีลักษณะเช่นเดียวกันกับการกำหนดระยะ P/D ต่างๆ และปริมาณของอนุภาคจะค่อยๆ กระจายลดลงตามความยาวของใบสกรูลำเลียงและเมื่อเพิ่มความเร็วสูงขึ้นปริมาณการกองของอนุภาควัสดุจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดช่องว่างหลังใบสกรูลำเลียงและมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการกำหนดระยะ P/D สูงๆ การเพิ่มระยะพิตของใบสกรูจะเพิ่มปริมาณอนุภาควัสดุในแต่ละช่วงพิตมากขึ้นสำหรับกรณีความเร็วต่ำ พิจารณาภาพจาก DEM simulation จะสังเกตเห็นว่าอนุภาควัสดุด้านบนจะมันลงด้านล่าง อนุภาควัสดุมีการกระโดดข้ามใบสกรูลำเลียงหรือเคลื่อนที่บนอนุภาคอื่นๆ การจำลอง DEM แสดงให้เห็นพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของอนุภาคตลอดเวลา

ในที่สุดก็สามารถสรุปได้ว่าการคำนวณทางคณิตศาสตร์สำหรับพฤติกรรมและการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดด้วยวิธี DEM สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์การทำงานหรือตรวจสอบการออกแบบเครื่องมือลำเลียงก่อนจะลงมือสร้างจริง

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ได้ให้การสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ (วท.) ประจำปี 2560

### เอกสารอ้างอิง

1. González-Montellano C, Llana DF, Fuentes JM, Ayuga F. Determination of the mechanical properties of corn grains and olive fruits required in DEM simulations. in 2011 Louisville, Kentucky, 2011 Aug 7-10, American Society of Agricultural and Biological Engineers; 2011. P. 1
2. Cundall PA, Strack OD. A discrete numerical model for granular assemblies. geotechnique. 1979 Mar 1;29(1):47-65.
3. Yang RY, Yu AB, McElroy L, Bao J. Numerical simulation of particle dynamics in different flow regimes in a rotating drum. Powder Technology. 2008 Dec 20;188(2):170-7.
4. Cundall PA. Computer simulations of dense sphere assemblies. In Studies in Applied Mechanics. 1988 Jan 1; 1988(20):113-123

5. Cleary PW, Morrisson R, Morrell S. Comparison of DEM and experiment for a scale model SAG mill. International Journal of Mineral Processing. 2003 Jan 1;68(1-4):129-165.
6. Wangchai S, Hastie DB, and Wypych PW. The Simulation of Particle Flow Mechanisms in Dustiness Testers. in 11th International Conference on Bulk Materials Storage Handling and Transportation; 2013 July 2-4; University of Newcastle, Australia; 2013.
7. สถาพร ว่างฉาย, และศุภชัย ตระกูลทรัพย์วิทย์, การศึกษาประสิทธิภาพของกระพ้อลำเลียงชนิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางด้วยวิธี DEM; ในการประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 31; 4-7 กรกฎาคม 2560; นครนายก, ประเทศไทย; 2560
8. Karababa E. Physical properties of popcorn kernels. Journal of Food Engineering. 2006 Jan 1;72(1):100-107.
9. Boac JM, Casada ME, Maghirang RG, Harner III JP. Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. Transactions of the ASABE. 2010;53(4):1201-1216.