

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการลำเลียงวัสดุด้วยสายพานโดยใช้วิธี DEM Performance Analysis of Bulk Material Handling by Belt Conveyor using DEM

สถาพร วังฉาย

ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางชื่อ กรุงเทพฯ 10800 Email : sathaphon.w@eng.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

สายพานลำเลียงเป็นเครื่องมือที่ใช้ลำเลียงวัสดุปริมาณมวลหรือวัสดุเป็นก้อน จากสถานที่หนึ่งไปยังอีกสถานที่หนึ่งใน แนวระนาบหรือแนวเอียง พบมากในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ การแปรรูป เกษตรกรรมและอื่นๆ การทำงานที่เหมาะสมกับ ขีดความสามารถของเครื่องจักรจะเพิ่มประสิทธิภาพในการลำเลียงวัสดุและประหยัดพลังงาน ในการศึกษานี้จะทำการ ตรวจสอบและแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบประกอบด้วย ปริมาณการป้อนวัสดุเข้าสู่สายพาน ลำเลียง มุมแอ่งของลูกกลิ้ง ความเร็วสายพาน มุมเอียงสายพานและพฤติกรรมการจ่ายวัสดุออกจากสายพานลำเลียง โดย เลือกข้าวเปลือกเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ อีกทั้งได้นำเสนอขั้นตอนการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับ วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัสดุปริมาณมวลโดยใช้วิธี Discrete Element Method เพื่อทำนายรูปแบบการเคลื่อนที่ของ วัสดุ ความเร็ว การสัมผัสกันระหว่างแต่ละอนุภาควัสดุและระหว่างอนุภาควัสดุกับสิ่งแวดล้อมขณะลำเลียงบนสายพาน แรงกระทำที่เกิดขึ้นระหว่างแต่ละอนุภาคของวัสดุ แรงต้านทานการเคลื่อนที่ของวัสดุบนสายพานเลียง อัตราการลำเลียง และพฤติกรรมการจ่ายวัสดุออกจากสายพานลำเลียง ผลที่ได้จากการจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง **คำหลัก:** สายพานลำเลียง; มุมแอ่ง; มุมเอียง; อัตราการลำเลียง; Discrete Element Method

Abstract

The belt conveyor is used to transport of bulk or granular materials from ones to another location, in a horizontal or inclined manner, found in mining and mineral processing, agriculture and other industries. The proper functioning of the capacity to increase the efficiency of materials handling and energy saving. This study was to examine the correlation of variables influencing the performance of the bulk material feeders, idler roller, belt velocity, incline conveyor belt, material properties and behavior of material discharge from conveyor belt. In addition, this study illustrated the particle model by using Discrete Element Method (DEM) for predicting the bulk materials moving on the belt conveyor, velocity, contact force between each particle and between particle-rubber belt, mass flow rate and the behavior of materials movement while unloading from belt conveyor and materials resistance during the operation of along the length of the horizontal and inclined belt conveyor. *Keywords*: Belt conveyor, idler roller, incline conveyor belt, Discrete Element Method

อัตโนมัติอย่างต่อเนื่อง การลำเลียงวัสดุที่ดีนั้นจะขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของวัสดุทั้งทางกายภาพ เชิงกลและการมี ปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุกับวัสดุและระหว่างวัสดุกับ สภาพแวดล้อม เพื่อต้องการลดความเสียหาย (แตกหัก) เป็นส่วนย่อยๆ ของวัสดุเม็ด ในการศึกษาเพื่อทำความ เข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัสดุประเภท เม็ดเล็กที่สภาวะต่างๆ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุ กับวัสดุหรือเกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับผนัง ขนาดและรูปร่าง ของวัสดุ จะเป็นตัวช่วยในการเลือกใช้เครื่องมือหรือ ออกแบบอุปกรณ์ที่เหมาะสมและยังเป็นประโยชน์ในการ ประเมินผลกระทบด้านพลังงานที่ใช้ ความเสียหายของ วัสดุและอุปกรณ์ ประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ

Discrete element modelling (DEM) กลายเป็น ้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่ถูกนำมาใช้สำหรับการจำลอง พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดหรือวัสดุผง ด้วย ้อุปกรณ์ลำเลียงที่สามารถมองเห็นภาพการเคลื่อนที่ของ วัสดุในขบวนการผลิตหรือการลำเลียงวัสดุ โดยหลักการ ของ DEM คือการติดตาม (track) ทุกๆ การเคลื่อนที่ของ แต่ละอนุภาคของวัสดุเม็ดเพื่อประเมินตำแหน่ง คำนวณ แรงกระทำ ความเร็ว การสัมผัส แรงกระแทก การชนกัน การโคจรของอนุภาค การหมุนและรูปแบบการเคลื่อนที่ ของแต่ละอนุภาคภายในระบบที่ตำแหน่งต่างๆ ในแต่ละ ขั้นตอนการคำนวณในแต่ละช่วงของเวลา โดยการคำนวน การมีปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างแต่ละอนุภาค ้วัสดุและระหว่างอนุภาควัสดุกับสิ่งแวดล้อม (ผนังและ อนุภาคอื่น) ในกรณีวัสดุมีการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถลหรือ แบบหมุนกลิ้งพิจารณาใช้กฎข้อที่สองของนิวตันและกฎ การเคลื่อนที่ พิจารณา ณ.จุดสัมผัสกันของแต่ละอนุภาค ตลอดการคำนวณ ดังนั้น DEM จึงมีความเหมาะสมและ จำเป็นอย่างมากสำหรับการคำนวณวิเคราะห์การเคลื่อนที่ ของวัสดุที่ไม่สามารถหาได้ในห้องปฏิบัติการโดยการ ทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนที่มีลักษณะเหมือนกับการ ทดลอง ดังนั้นจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลของวัสดุ คุณสมบัติต่างๆ จะมีความสำคัญต่อ การออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์ เพื่อให้มีความเหมาะสม

1. บทนำ

วัสดุปริมาณมวล, วัสดุชนิดเม็ดเล็กหรือวัสดุชนิดผง จำนวนมากจะมีใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม จำเป็นต้อง มีการจัดการลำเลียงที่ถูกต้องเหมาะสม เพื่อดำเนินการ เคลื่อนย้ายวัสดุจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งอื่นๆ เช่นอุตสาหกรรมทำเหมืองถ่านหิน ปูนซีเมนต์ ผงแป้ง ต่างๆ เม็ดพลาสติก กระบวนการจัดการเม็ดยา อุตสาหกรรมเกษตรเช่น ข้าวสาร ข้าวโพด ถั่วเหลืองและ อื่นๆ ในที่นี้พิจารณาเลือกใช้ข้าวเปลือกเนื่องจากข้าวเป็น พืชอาหารหลักของคนส่วนใหญ่ในทวีปเอเชียตะวันออก เฉียงใต้ จะมีพื้นที่สำหรับทำนาข้าวอยู่ประมาณ 30% ของโลก [1].

อุตสาหกรรมมักจะประสบปัญหาหรือมีผลกระทบ ต่อการจัดการเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมกับสภาพของ งานที่ดำเนินการภายในโรงงาน การแปรรูป การบรรจุ ภัณฑ์ การเกษตรหรือการลำเลียงในภาคอุตสาหกรรมที่ไม่ มีประสิทธิภาพที่ดีสุด วัสดุอาจจะลำเลียงไม่สม่ำเสมอ หรือสามารถสร้างความเสียหายให้กับวัสดุเช่น การ เสียหาย (แตกหัก) ของวัสดุที่เกิดจากการลำเลียง ได้ อัตราลำเลียงไม่ตรงกับความต้องการ วัสดุเกิดการติดขัด (ไม่เคลื่อนที่) การสึกหรอของอุปกรณ์ลำเลียง รวมถึง ความเหมาะสมต่อการทำงานของอุปกรณ์กับวัสดุแต่ละ ชนิดที่ใช้ในการลำเลียง จึงส่งผลต่อการสูญเสียของ พลังงานในการดำเนินการที่ไม่จำเป็น สูญเสียค่าใช้จ่ายใน การบำรุงรักษา การแก้ไขปัญหาการทำงานของเครื่องจักร ระหว่างดำเนินการลำเลียง อุปกรณ์ลำเลียงที่มีการทำงาน ในที่โล่งจะมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก หากการดำเนินงานที่ไม่เหมาะสมเช่นการแตกตักเสียหาย ของวัสดุจนทำให้เป็นเศษวัสดุอนุภาคเล็กๆ ทำให้เกิดฝุ่น ละอองฟุ้งกระจาย สร้างการสึกหรอให้กับอุปกรณ์ลำเลียง เพิ่มมลพิษให้กับสภาพแวดล้อมและคนงาน

อุปกรณ์ลำเลียงมีใช้กันอย่างแพร่หลายในประเภท อุตสาหกรรม กระบวนการผลิต การลำเลียงผลิตภันฑ์ ชนิดเม็ด วัสดุปริมาณมวลหรือวัสดุผงโดยใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ลำเลียงเข้ามาช่วยเพื่อให้การทำงานเป็นระบบ



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31 4-7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก



ที่สุดต่อประสิทธิ์ภาพการทำงานของอุปกรณ์ลำเลียง ประกอบด้วย bulk density, solid density, shear modulus, Poisson's ratio, coefficient of restitution, coefficient of static friction แ ล ะ coefficient of rolling friction มีการศึกษามากมายที่ กล่าวถึงวิธีการทดสอบ [2] รวมถึงขนาดและรูปร่างของ วัสดุตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ ของวัสดุออกจากสายพานลำเลียงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ความเร็ว มุมแอ่งของลูกกลิ้งรองรับสายพานจาก 20, 30 และ 40 องศาและมุมเอียงของสายพานลำเลียง เปลี่ยนแปลงจาก 0, 8 และ 12 องศา พร้อมด้วยนำเสนอ วิธีการทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนที่โดยใช้โปรแกรมทาง คอมพิวเตอร์ (DEM) มาวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาค แบบต่อเนื่อง ผลจากการใช้วิธีการ DEM ช่วยในการ ทำนายพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของกลุ่มวัสดุชนิดเม็ดเล็ก ภายในอุปกรณ์ลำเลียงที่สภาวะต่างๆ จะช่วยให้ ผู้ออกแบบทราบถึงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น และการ เลือกใช้อุปกรณ์ลำเลียงที่เหมาะสมกับวัสดุ ลดการสร้าง อุปกรณ์ต้นแบบ เพื่อให้อุตสาหกรรมนำวิธีการที่ได้จาก การศึกษาไปพัฒนากับอุปกรณ์ลำเลียงชนิดอื่นต่อไป

2. การทดสอบ

สายพานลำเลียงที่ใช้ในการทดสอบเพื่อพิจารณา ผลกระทบจากการปรับมุมแอ่งของลูกกลิ้งลำเลียง ปรับ มุมเอียงของสายพานและความเร็วต่างๆ ในการลำเลียง วัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 1 โครงสร้างชิ้นงานมีขนาดความสูง 2 เมตร ความกว้างสายพาน 0.33 เมตร และความยาม สายพาน 5.2 เมตร อัตราการป้อนวัสดุเข้าสู่สายพาน ลำเลียงที่ 540 กิโลกรัมต่อชั่วโมง (0.15 kg/s) สายพาน เป็นแบบแผ่นเรียบทำจากวัสดุยาง



รูปที่ 1 ไดอะแกรมของสายพานลำเลียง

ขั้นตอนการทดสอบ

1) ป้อนวัสดุเข้าสู่สายพานลำเลียง 0.15 kg/s

 สายพานลำเลียงสามารถปรับมุมแอ่งลูกกลิ้งได้ ในช่วงระหว่าง 20 ถึง 40 องศา

สายพานลำเลียงสามารถปรับมุมเอียงได้ในช่วง
 ระหว่าง 0 ถึง 12 องศา

4) ปรับความเร็วสายพาน 0.0665 m/s (10 rpm), 0.135 m/s (20 rpm) และ 0.202 m/s (30 rpm) ตามลำดับ

3. แบบจำลองทางคณิศาสตร์ (Numerical Model)

DEM จะช่วยอธิบายการเคลื่อนที่แบบไดนามิกส์ (dynamic motion) การหมุนของอนุภาควัสดุ แรง กระทำที่เกิดขึ้นของแต่ละอนุภาคและความสัมพันธ์ ระหว่างแต่ละอนุภาคของวัสดุ (interaction) การชนกัน ระหว่างอนุภาคกับอนุภาคและระหว่างอนุภาคกับผนัง ขึ้นงาน ได้มีการอธิบายโดย Cundall and Strack [3] การหมุนและการเคลื่อนที่ของอนุภาควัสดุจะถูกนำมา พิจารณาที่เวลาต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฏข้อที่ สองของนิวตัน (Newton's second law of motion) [4] การสัมผัสกันของแต่ละอนุภาควัสดุที่ใช้ในงานนี้คือ Hertz-Mindlin no-slip [5]

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





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

เมื่อ m_i , I_i , v_i และ ω_i คือมวล, แรงเฉื่อย, ความเร็วเซิ่ง เส้นและความเร็วการหมุนของอนุภาค *i* ตามลำดับ F_{ij}^n และ F_{ij}^s คือแรงสัมผัสตั้งฉาก (normal contact forces) และแรงสัมผัสแบบเฉือน (tangential contact forces) กระทำโดยอนุภาค *i* บนอนุภาค *j* และ m_ig คือแรงโน้ม ถ่วงของอนุภาค *i* สำหรับ k_i คือจำนวนของอนุภาคที่มี การสัมผัสกันและ R_i คือขนาดของแว็กเตอร์จากจุด ศูนย์กลางของอนุภาคถึงผิวที่มีการสัมผัสกันระหว่าง อนุภาค μ_r คือสัมประสิทธิ์การกลิ้งของอนุภาค (rolling friction) และ $\widehat{\omega}_i$ คือหน่วยของแวกเตอร์ที่มีค่าเท่ากับ ω_i หารด้วยขนาด

ขนาดแรงตั้งฉากกับผิวสัมผัส (normal force) ระหว่าง แต่ละอนุภาคของวัสดุ [6]:

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

ขนาดของแรงในแนวสัมผัสกำหนดได้จาก:

$$F_t = \min[\mu F_n, k_t \int \nu_t dt + C_t \nu_t]$$
(4)

เมื่อ k_n และ k_t คือ normal stiffness และ tangential stiffness ตามลำดับ Δx คือส่วนที่ซ้อนกัน (overlap) ของอนุภาควัสดุ, v_n และ v_t คือความเร็วในแนวตั้งฉาก กับผิวสัมผัส (normal) และขนานกับแนวสัมผัส (tangential) ตามลำดับ C_n และ C_t คือค่าคงที่ ความหน่วงในแนวตั้งตั้งฉากกับผิวสัมผัส (normal damping coefficient) และค่าคงที่ความหน่วงใน แนวขนานกับผิวสัมผัส (tangential damping coefficient) ตามลำดับ C_n จะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ ของการคืนตัว (coefficient of restitution, e) กำหนด โดยอัตราส่วนระหว่างความเร็วหลังจากการชนต่อ ความเร็วที่เกิดขึ้นก่อนการชนในแนวตั้งฉากกับระนาบ

$$C_n = -2\ln(e)\frac{\sqrt{m_{ij}k_n}}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2(e)}}$$
(5)

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

เมื่อ m_{ij} คือมวลที่เปลี่ยนแปลงของสองอนุภาค i และ j2)

พารามิเตอร์สำหรับการจำลอง (DEM) และสอบ เทียบ

ข้าวเปลือกที่นำมาพิจารณาเป็นแบบแห้งชนิดยาว จากท้องตลาดโดยทั่วไปของประเทศไทย ขนาดรูปร่าง และค่าความเป็นทรงกลมทำการวัดโดยใช้เวอเนียร์คาลิป เปอร์วัดขนาดความยาว (L) ความกว้าง (W) และความ หนา (T) ของวัสดุและคำนวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เทียบเท่าทรงกลม (effective diameter (*D*_e)) [7] จาก สมการที่ (7)

$$D_e = (LWT)^{1/3}$$
(7)

มวลและปริมาตร (Mass and volume) ของวัสดุ คิดค่าเฉลี่ยจาก 100 เม็ดมีน้ำหนักอยู่ที่ 2.26 กรัม มี ขนาดความยาวอยู่ในช่วงระหว่าง 6.0 – 6.99 มม ปริมาตรวัสดุจำนวน 100 เม็ดถูกแทนที่ในน้ำพิจารณา การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำที่เกิดขึ้นและเฉลี่ยต่อ หน่วยวัสดุแต่ละเมล็ด [8]

ความหนาแน่นจริง (Solid density) ความหนาแน่น จริงของวัสดุที่ไม่รวมช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุคืออัตราส่วน ระหว่างน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุ โดยการนำวัสดุ ที่ทราบน้ำหนักแทนที่ในน้ำที่ทราบปริมาตรแล้วพิจารณา การเปลี่ยนแปลงของปริมาตร สำหรับกรณีความหนาแน่น รวม (Bulk density) พิจารณาช่องว่างระหว่างชิ้นวัสดุ ด้วยโดยการนำวัสดุเทลงในหลอดแก้วที่มีขนาด 1,000 มิลลิลิตร ใช้ไม้บรรทัดค่อยๆ ปาดเอาส่วนเกินออกจาก หลอดแก้วและนำวัสดุนั้นไปชั่งน้ำหนักบันทึกค่าและ คำนวณได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักวัสดุต่อปริมาตรที่ เกิดขึ้น [9] ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้งแล้วพิจารณา จากค่าเฉลี่ย สำหรับค่าความพรุน (Porosity) สามารถ คำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ วัสดุจริง (ρ_s) และความหนาแน่นรวมของวัสดุ (ρ_b) [10] พิจารณาได้จากสมการที่ 8



$$P = \frac{1 - \rho_b}{\rho_t} \times 100 \tag{8}$$

มุมกองวัสดุ (Angle of repose) พิจารณาโดยการ นำวัสดุเทในหลอดแก้วทรงกระบอกจนเต็มแล้วเคลื่อนที่ หลอดแก้วขึ้นในแนวดิ่งอย่างรวดเร็ว โดยให้วัสดุเคลื่อนที่ ตามธรรมชาติและกองบนพื้นระนาบที่กำหนด มุมกอง วัสดุได้จากการวัดความกว้างของฐานกองวัสดุและความ สูงของกองวัสดุดังแสดงในรูปที่ 2 และคำนวณได้จาก สมการที่ 9

สัมประสิทธ์แรงเสียดทานสถิต (Coefficient of Static Friction, μ_s) คือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่าง วัตถุ 2 ชิ้นสัมผัสกันในขณะที่วัสดุอยู่นิ่งจนกระทั้งวัสดุ เริ่มต้นการเคลื่อนที่ โดยพิจารณาจากการนำวัสดุวางบน พื้นผิวระนาบ (แผ่นสายพานยาง) และปรับมุมการหมุน ของแผ่นระนาบเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั้งวัสดุเริ่มมีการ หมุนหรือเริ่มมีการเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างทำการจดบันทึก ค่ามุมนี้จากสเกลที่อ่านได้ [11] ดังแสดงดังรูปที่ 2 จากนั้นคำนวณโดยใช้สมการที่ 10



รูปที่ 2 วิแสดงธีการวัดหาค่ามุมกองวัสดุ

มุมกองวัสดุ
$$= rac{tan^{-1}(_{
m PDINn})}{_{
m PDINa} _{
m Nnev5} _{
m Anos}}$$
 (9)



รูปที่ 3 แสดงการวัดค่าสัมประสิทธ์แรงเสียดทานสถิต $\mu_s = an(heta)$ (10)

เมื่อ μ_s คือค่าสัมประสิทธ์ความเสียดทานสถิตและ θ คือ มุมที่ทำให้วัสดุเริ่มต้นเกิดการไหล

Coefficient of restitution (*e*) คืออัตราส่วนรากที่ สองของความสูงระหว่างความสูงของวัสดุหลังจากตก กระทบพื้นกระดอนขึ้นในแนวดิ่ง (*h_r*) และความสูง เริ่มต้นของวัสดุก่อนตกกระทบพื้น (*h_i*) [11] ดังแสดงดัง รูปที่ 4 พิจารณาได้จากสมการที่ 11

Coefficient of rolling friction (μ_r) คือ ความสัมพันธ์การกลิ้งของวัสดุเกิดขึ้นระหว่างวัสดุกับวัสดุ หรือระหว่างวัสดุกับผนัง ในที่นี้ได้จากการประมาณค่า จากการจำลองด้วย DEM และเปรียบเทียบผลมุมกอง วัสดุที่สอดคล้องกับการทดลอง (trial and error) [11]

พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อขบวนการจำลองทาง คณิตศาสตร์จะประกอบด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของ วัสดุตัวอย่างที่นำมาศึกษา คุณสมบัติของโครงสร้าง ชิ้นงานและคุณสมบัติของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างวัสดุ ทดสอบและระหว่างวัสดุทดสอบกับผนังชิ้นงานแสดงใน ตารางที่ 1



รูปที่ 4 แสดงการวัดค่า Coefficient of restitution



> ้โดยที่พารามิเตอร์หลักจะแสดงในตารางที่ 1 และทำการ ประมวลผลโมเดลรูปร่างของอนุภาคทั้งสอง (รูปที่ 5) จะ เปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานกลิ้งในช่วง 0.01 ถึง 0.20 โดยเพิ่มขึ้น 0.05 และเปลี่ยนค่า สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานสถิตในช่วง 0 ถึง 1.0 เพิ่มที ละ 0.2 โดยที่โมเดลรูปร่างของแบบจำลองอนุภาคของแต่ ละรูปร่างไหลผ่านกรวยไปยังภาชนะทรงกระบอก ที่มี ความจุ 1000 มิลลิลิตรและเลือกด้วยตัวเลือกเพื่อแสดง ้น้ำหนักของวัสดุภายในภาชนะบรรจุ ในที่นี้เราจะทราบ ปริมาตรของวัสดุและมวลของวัสดุ ความหนาแน่นรวม คำนวณโดยมวลรวมของวัสดุที่บรรจุภาชนะรูป ทรงกระบอก (กก.) หารด้วยปริมาตรของภาชนะ ทรงกระบอก (ม³) ไม่รวมมวลของกองวัสดุด้านบนและ ด้านนอกของภาชนะทรงกระบอก สุดท้ายผลของความ หนาแน่นรวมจากการจำลองจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับ การผลจากการทดลองและขนาดรูปร่างของแบบจำลอง อนุภาควัสดุ (DEM) จะถูกปรับให้เหมาะสม กระบวนการ ้นี้จะทำซ้ำจนกว่าผลจะสอดคล้องกัน ซึ่งวิธีการนี้จะมี

> เวลาของการจำลองแบบนี้จะถูกกำหนดโดยการ เคลื่อนที่ของอนุภาคด้านบนหยุดนิ่ง (ไม่มีการเคลื่อนที่) หรือค่าพลังงานจลน์ของอนุภาคในระบบที่เข้าใกล้ศูนย์ ความหนาแน่นเฉลี่ยสำหรับการจำลองแสดงในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของรูปทรงของอนุภาคมีผลต่อ ความหนาแน่นรวม โดยแปรผันกับค่าสัมประสิทธิ์แรง เสียดทานกลิ้งระหว่างอนุภาคกับอนุภาคในช่วงระหว่าง 0.01 ถึง 0.2 โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตคงที่ 0.3 เมื่อเทียบกับข้อมูลการทดลอง จะเห็นได้ว่าความ หนาแน่นรวมลดลงเมื่อเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียด ทานกลิ้งระหว่างวัสดุกับวัสดุและแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองอนุภาคทรงกลมและอนุภาคไม่กลมมีความ สอดกล้องกับผลการทดลองที่ μ_r = 0.05 และ μ_r = 0.10 ตามลำดับ

ความสอดคล้องกับนักวิจัยหลายคน [12-18]

$$e = \sqrt{(h_r/h_i)} \tag{11}$$

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของข้าวเปลือกและแผ่นสายพานยาง

คุณสมบัติวัสดุ	ข้าวเปลือก	สายพาน
Particle volume (m³)	1.4e-7	-
Particle mass (g)	0.026	-
Particle density (kg/m³), $(ho_{\scriptscriptstyle {\cal S}})$	1193	1000
bulk density (kg/m³), (ho_b)	471.16	-
Poisson's ratio (u)	0.45	0.45
Shear modulus (Pa), (G)	1e7	1e6
coefficient of restitution, (e)	0.2	0.5
coefficient of static friction, $(\mu_{\scriptscriptstyle S})$	0.3	0.5
coefficient of rolling friction, (μ_r)	0.1	0.1

รูปร่างและขนาดของข้าวเปลือกที่ใช้ในการศึกษา ครั้งนี้จะมีลักษณะที่สม่ำเสมอและขนาดของวัสดุเฉลี่ยมี ความยาว 8.54 มม กว้าง 2.47 มม และหนา 1.83 มม มี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเทียบเท่า 3.38 มม พื้นที่ผิว 32.58 mm² และความเป็นกลม (sphericity) อยู่ที่ 39.88 และความพรุน (porosity) 60.37% ในขณะที่มุม กองวัสดุเป็น 35.83° ดังนั้นแบบจำลองของข้าวเปลือก สร้างมาจาก 1 ทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มม. และสร้างจาก 2 ทรงกลมประกอบร่วมกันมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มม. และยาว 8 มม. ดังแสดงใน รูปที่ 5 โดยกำหนดให้มีปริมาตรและน้ำหนักเทียบเท่ากับ วัสดุจริงและมีคุณสมบัติตามที่แสดงในตารางที่ 1



เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบโมเดลรูปร่างของ อนุภาคโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองความ หนารวม (bulk density) โดยที่ขนาดและรูปแบบของ การจำลองจะเหมือนกันกับการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ



เพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเร็วการเคลื่อนที่ของสายพานเพิ่ม สูงขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อมุมแอ่งของลูกกลิ้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการลำเลียงเพิ่มขึ้นตาม นั้นหมายความว่า อัตราการลำเลียงจะขึ้นอยู่กับความเร็วการเคลื่อนที่ของ สายพานและมุมแอ่งของลูกกลิ้งรองรับสายพาน ซึ่งผล ดังกล่าวที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้ จากการจำลอง อัตราขนถ่ายวัสดุที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ ปริมาณของวัสดุที่ป้อนเข้าสู่สายพานลำเลียงปริมาณวัสดุ ที่ป้อนเพิ่มสูงขึ้นอัตราขนถ่ายวัสดุเพิ่มขึ้นตามเป็นผลให้ วัสดุกองบนสายพานเพิ่มสูงขึ้นด้วยเป็นผลให้แรงกระทำที่ เกิดขึ้นจากน้ำหนักวัสดุบนสายพานลำเลียงเพิ่มสูงขึ้น

การลำเลียงวัสดุด้วยสายพาน Roberts [19] และ Waters and Mikka [20] พบว่าในการลำเลียงวัสดุที่มี ขนาดแตกต่างกัน อนุภาควัสดุที่มีขนาดใหญ่จะเคลื่อนที่ บริเวณส่วนบนของกองวัสดุบนสายพาน สำหรับวัสดุที่มี ขนาดเล็กจะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างระว่างวัสดุกับวัสดุลงสู่ ด้านล่างของกองวัสดุเข้าใกล้ชิดผิวสัมผัสของสายพาน นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าระยะทางในการลำเลียง ที่มากพอ โปรไฟล์ตัดขวางของวัสดุในการเคลื่อนที่จะคงที่ โดยมีมุม surcharge angle ของการลำเลียงวัสดุจะ ขึ้นอยู่กับมุมกองของวัสดุบนสายพานลำเลียง CEMA [21] ระบุว่ามุมนี้จะมีค่าน้อยกว่ามุมกองวัสดุอยู่ในช่วงระหว่าง 5 - 15 องศา สำหรับวัสดุบางชนิดอาจสูงถึง 20 องศา



รูปที่ 8 เปรียบเทียบผลการคำนวณและการจำลอง

4.2 การโคจรของวัสดุ

พิจารณาการโคจรของวัสดุออกจากสายพานลำเลียง ที่มุมแอ่งของลูกกลิ้งคงที่ 30 องศาและสายพานลำเลียงมี



รูปที่ 6 ผลกระทบของความหนาแน่นรวมกับสัมประสิทธิ์ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับรูปร่างของแบบจำลอง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองแบบ DEM จะ ดำเนินการตรวจสอบความเหมาะสมของ μ_r และ μ_s และอิทธิพลของรูปทรงของอนุภาคจากการทดสอบมุม กองวัสดุในห้องทดลองและใช้ในการจำลองแบบ DEM เพื่อตรวจสอบรูปร่างของแบบจำลองอนุภาคทั้งสอง แบบจำลอง (ทรงกลมและแบบไม่กลม) โดย μ_r มีค่า ระหว่าง 0.05 ถึง 0.1 และ μ_s ระหว่าง 0.2 ถึง 0.4 ผล จากการจำลองด้วย DEM ที่ $\mu_r = 0.1$ และ $\mu_s = 0.3$ สำหรับอนุภาคทรงกลมและ $\mu_r = 0.05$ กับ $\mu_s = 0.3$ สำหรับอนุภาคไม่ทรงกลม จากผลดังกล่าวเป็นค่าที่ เหมาะสมกับผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7 โดยเฉพาะ อย่างยิ่งรูปทรงกลมจะช่วยประหยัดเวลาในการจำลอง เมื่อเทียบกับรูปร่างของอนุภาคแบบไม่กลม



รูปที่ 7 แสดงมุมกองวัสดุจากการทดสอบและการจำลอง

4. ผลการวิเคราะร์

4.1 อัตราขนถ่ายวัสดุ

อัตราการลำเลียงวัสดุที่ได้จากสายพานลำเลียงดัง แสดงในรูปที่ 8 จากรูปแสดงให้เห็นว่าอัตราการลำเลียง



CST - 11

ล้อขับ ก่อนที่สายพานจะมีการเคลื่อนที่ตามแนวโค้งของ ล้อขับ เมื่อพิจารณาการโคจรของวัสดุในแต่ละความเร็ว - ความเร็วสายพานต่ำกว่า 0.202 ม/วินาที (30 rpm) วัสดุเกิดการกองที่จุดป้อนวัสดุเข้ามีปริมาณมากจน ทำให้ต้องใช้กำลังอย่างมากในการลากวัสดุให้เคลื่อนที่ - ความเร็ว 0.2 เมตร/วินาที (30 rpm) วัสดุจะ

เคลื่อนที่ผ่านมุมโอปของสายพานก่อนจะจ่ายออก - ความเร็ว 1 เมตร/วินาที (150 rpm) วัสดุจ่ายออก

จากสายพานก่อนเคลื่อนที่เข้าล้อขับ (pulley)

ความเร็ว 2 เมตร/วินาที (300 rpm) และความเร็ว
3 เมตร/วินาที (450 rpm) มีลักษะเหมือนความเร็ว 1

เมตร/วินาที เพียงแต่ระยะทางการจ่ายออกที่ไกลมากขึ้น - การเคลื่อนที่ของวัสดุบนสายพานที่ทำมุมเอียง วัสดุ จะเกิดการสะสมก่อนมาการเคลื่อนที่ทำให้มีปริมาณกว่า สายพานเคลื่อนที่ในแนวราบและกระจายเป็นอย่างมากที่ ความเร็วสูงๆ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของวัสดุก่อนที่จะ จ่ายออกจากสายพานมีลักษณะแบนราบ

4.3 แรงกระทำขณะเริ่มป้อนวัสดุ

แรงกระทำในแนวตั้งฉากกับสายพานในขณะเริ่มต้น การป้อนวัสดุลงบนสายพานที่ความเร็วการเคลื่อนที่ของ สายพานต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 10 แสดงให้เห็นว่าแรง กระทำที่เกิดจากวัสดุไปกระทบกับสายพานจะมีค่ามาก ขึ้นเมื่อความเร็วการเคลื่อนที่ของสายพานเพิ่มสูงขึ้น ใน การออกแบบแก้ปัญหาจะใช้ลูกกลิ้งลำเลียงจำนวนมาก เพื่อรองรับแรงกระทำดังกล่าว

มุมเอียง 0 องศา (แนวราบ) และ 12 องศาจากแนวราบ ตามลำดับ เมื่อความเร็วการเคลื่อนที่ของสายพาน 0.2, 1.0, 1.35, 2.0 และ 3.0 เมตรต่อวินาที ผลที่ได้ดังแสดง ในรูปที่ 9 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ระยะทางการจ่ายวัสดุออกจากหัวลูกกลิ้งสายพานมีระยะ เพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาที่มุมเอียงเพิ่มขึ้นแสดงให้ เห็นว่ามุมการจ่ายของวัสดุออกจากสายพานจะลดต่ำลง เป็นผลมาจากเกิดการสลิปขึ้นในช่วงระหว่างจุดป้อนวัสดุ เข้าสู่สายพานและจุดจ่ายวัสดุออกจากสายพานลำเลียง ที่ ความเร็วสูงๆ จะใช้เวลาน้อยมากในการที่จะทำให้วัสดุมี การจัดเรียงตัวเมื่อให้เคลื่อนที่แบบสม่ำเสมอบนสายพาน ลำเลียง สำหรับกรณีการลื่นไถลระหว่างวัสดุกับสายพาน มีสาเหตุเกิดจาก รูปร่างของวัสดุลำเลียง ความหนาแน่น วัสดุต่ำ ค่าการคืนตัว (restitution) ของวัสดุที่สูง และ แรงเสียดทานวัสดุต่ำ สำหรับวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงจะ ไม่เกิดปัญหาการสลิปขึ้นระหว่างวัสดุกับการเคลื่อนที่ของ สายพาน



สายพานต่างๆ

ผลจากการโคจรของวัสดุออกจากสายพานโดยทั่วๆ ไป จะทำการตรวจสอบที่ 2 เงื่อนไขประกอบด้วย พิจารณาที่ความเร็วต่ำวัสดุจะเคลื่อนที่รอบๆ หัวล้อขับ (pulley) ตามแนวการหมุนก่อนที่จะจ่ายวัสดุ และ พิจารณาที่ความเร็วสูงวัสดุจะเคลื่อนที่ออกที่ตำแหน่งหัว





รูปที่ 10 แระกระทำ ณ จุดเริ่มต้นป้อนวัสดุเข้า

5. อภิปรายและสรุปผล

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง ความเร็วเพิ่มขึ้นจะทำให้การเคลื่อนที่ของวัสดุบน สายพานลำเลียงมีการเคลื่อนที่และจ่ายออกได้อย่าง รวดเร็วและมีการตกค้างอยู่บนสายพานมีปริมาณต่ำลง การเพิ่มขึ้นของมุมแอ่งลูกกลิ้งก็จะทำให้ได้ปริมาณของ วัสดุต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มมุมเอียงการจ่าย วัสดุออกจากสายพานลำเลียงพบว่าความเร็วในการ เคลื่อนที่ของวัสดุออกจากสายพานลดลงเนื่องจากแรง ต้านกระทำต่อสายพานเพิ่มมากขึ้นและใช้เวลายาวนาน ขึ้นในการการจ่ายวัสดุออกจากสายพาน อัตราขนถ่าย วัสดุคือปริมาณของวัสดุที่ขนถ่ายได้ต่อหน่วยเวลา (ชั่วโมง) นั้นหมายความว่าการปรับเพิ่มความเร็วที่สูงขึ้น ปรับมุมแอ่งลูกกลิ้งและความเอียงของสายพานลำเลียง จะต้องสอดคล้องกับปริมาณการป้อนวัสดุเข้าอุปกรณ์ ลำเลียงที่เหมาะสม

การจำลองด้วยวิธี DEM จะมีการเปรียบเทียบของ ผลลัพท์ที่ได้จากการทดสอบหาพารามิเตอร์ที่สอดคล้อง ก่อนทำการจำลองตรวจสอบพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของ วัสดุบนอุปกรณ์ลำเลียง การเปรียบเทียบจะเป็นรูปแบบ ของปริมาณที่แสดงให้เห็นจากรูปภาพและอัตราขนถ่าย ของวัสดุที่ได้ เพื่อการทำนายการเคลื่อนที่ของวัสดุที่ สภาวะเงื่อนไขต่างกันในระบบ ความถูกต้องแผ่นยำจาก การจำลองด้วยวิธี DEM นั้นจะขึ้นอยู่กับความม่นยำของ ตัวแปรที่นำมาใช้รวมถึงขนาดและรูปร่างของวัสดุจำลอง

ในที่สุดก็สรุปได้ว่าการออกแบบสำหรับการคำนวณ ทางคณิตศาสตร์สำหรับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของ วัสดุม็ดด้วยวิธี DEM สามารถนำมาใช้สำหรับการวิเคาะห์ การเคลื่อนที่ของวัสดุบนอุปกรณ์ลำเลียงได้เป็นอย่างดี

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิ สติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนนักวิจัยใหม่

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] 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.

[5] Cundall, P.A., Computer simulations of dense sphere assemblies. 1988. p. 113-123.

[6] 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.

[7] Adebowale, 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Mohsenin, N.N., *Physical properties of plant and animal materials*. 2nd ed. ed. 1986, New York, N.Y: : Gordon and Breach Science.



[11] Wangchai, S., D.B. Hastie, and P.W. Wypych. The Simulation of Particle Flow Mechanisms in Dustiness Testers. in The 11th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation (ICBMH 2013). 2013. The University of Newcastle, Australia: Institution of Engineers, Australia.

[12] Deshpande, S.D., S. Bal, and T.P. Ojha, *Physical Properties of Soybean.* Journal of Agricultural Engineering Research, 1993. **56**(2): p. 89-98.

[13] Gupta, R.K. and S.K. Das, *Physical properties of sunflower seeds.* Journal of Agricultural Engineering Research, 1997. **66**(1): p. 1-8.

[14] Aydin, C., *Physical properties of almond nut and kernel*.Journal of Food Engineering, 2003. **60**(3): p. 315-320.

[15] Sacilik, K., R. Öztürk, and R. Keskin, *Some Physical Properties of Hemp Seed.* Biosystems Engineering, 2003.
86(2): p. 191-198.

[16] Karababa, E., *Physical properties of popcorn kernels*.Journal of Food Engineering, 2006. **72**(1): p. 100-107.

[17] Boac, J.M., et al., *Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles.*Transactions of the ASABE, 2010. 53(4): p. 1201-1216.

4-7 กรกฎาคม 2560 จังหวัดนครนายก

[18] Hastie, D.B., *Belt conveyer transfers : quantifying and modelling mechanisms of particle flow.* 2010, University of Wollongong.

[19] Roberts, A. and A. Harrison. *Bulk Solid and Conveyor Belt Interactions*. in *1996 National Conference on Bulk Materials Handling: Preprints of Papers*. 1996. Institution of Engineers, Australia.

[20] Waters, A. and R. Mikka. Segregation of fines in lump ore due to vibration on a conveyor belt. in Third International Conference on Bulk Materials, Storage, Handling and Transportation: Preprints of Papers. 1989. Institution of Engineers, Australia.

[21] Reicks, A. and M.T. Myers, *Bulk Material Handling by Conveyor Belt 5.* 2004: SME.