

การศึกษาผลกระทบของสิ่งแทรกในไซโลฐานแบนเรียบ

The Study of the Impact of Displacing Insert in Flat-Bottomed Silo

วาเรียม ช่วยจันทร์^{1*} และสุทธิวัฒน์ ทองนาค¹

Wariam Chuayjan^{1*} and Sutthiwat Thongnak¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้พัฒนาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการออกแบบโครงสร้างของไซโลฐานแบนเรียบที่ใช้สำหรับเก็บเมล็ดถั่วเหลือง ในการจำลองการไหลของเมล็ดถั่วเหลืองจะใช้หลักการของกฎอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงเส้นและโมเมนตัมเชิงมุม รวมถึงใช้วิธีดิสครีทอีลิเมนต์ เพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลข สำหรับศึกษาผลกระทบของสิ่งแทรกที่มีรูปร่างเป็นกรวยคว่ำ และตำแหน่งของกรวยคว่ำต่อรูปแบบการไหล เวกเตอร์ความเร็ว และแรงดันที่ผนังไซโล ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า สิ่งแทรกมีอิทธิพลต่อรูปแบบการไหลของเมล็ดถั่วเหลืองในไซโลและสามารถปรับปรุงรูปแบบการไหลจากการไหลแบบท่อระบายไปสู่การไหลแบบทั้งมวล นอกจากนี้การเพิ่มสิ่งแทรกยังสามารถลดแรงดันที่ผนังไซโลได้ และยังพบว่าการวางสิ่งแทรกในตำแหน่งที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการกระจายแรงไปยังอนุภาคที่ใกล้ผนังของไซโลช่วยให้ลดบริเวณที่อนุภาคหยุดเคลื่อนที่ได้ ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบไซโลและสิ่งแทรกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: เมล็ดถั่วเหลือง ไซโล วิธีดิสครีทอีลิเมนต์

Abstract

In this paper, we developed a mathematical model to study silo structure design of flat-bottomed silo for storing soybeans. The model bases on both conservative linear momentum and conservative angular momentum. The Discrete Element Technique is used to obtain the numerical solutions for studying how insert, installed in silo, affects the flow pattern, the velocity profile and the wall pressure in silo. The results indicated that the inverted cone insert influences flow pattern of soybean in silo. The simulation reveals that the appropriately position of the insert in a flat bottom silo can improve the flow pattern from funnel flow to mass flow. Moreover, the wall pressure and dead zone decrease when the insert is installed. The knowledge has led to the effective design of flat-bottomed silo with insert.

Keywords: Soybeans, Silo, Discrete Element Method

¹ อ.ดร., สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ พัทลุง 93210

¹ Lecturer, Dr., Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, 93210

* Corresponding author: E-mail address: wariam_chuayjan@hotmail.com, Tel.: 074-609600 ext. 2578

บทนำ

การเก็บรักษาวัสดุเม็ด (Granular Materials) มีความสำคัญเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมเกษตร อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมเคมี เป็นต้น เนื่องจากวัตถุดิบส่วนใหญ่ของอุตสาหกรรมเหล่านี้มักจะอยู่ในรูปของวัสดุเม็ด เช่น ข้าว ข้าวโพด ถั่วเหลือง ถ่านหิน ซีเมนต์ เป็นต้น โดยทั่วไป วัสดุเม็ดเหล่านี้จะถูกเก็บในไซโล (Silos) ซึ่งเป็นถังขนาดใหญ่ที่ใช้เก็บรักษาหรือขนส่งสินค้าอุตสาหกรรม ไซโลมีหลายชนิด ได้แก่ ไซโลเก็บปูนซีเมนต์ (Cement Storage Silos) ไซโลถุง (Bag Silos) แท็งก์ (Tanks) และถัง (Bin) รูปร่างของไซโลอาจจะเป็นทรงกระบอก สี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีขนาดความจุตั้งแต่ 1 ตัน ถึง 100,000 ตัน ดังนั้น การออกแบบไซโลสำหรับเก็บวัสดุเม็ดเพื่อให้มีโครงสร้างที่เหมาะสม สามารถใช้งานได้ดีและปลอดภัย จำเป็นต้องพิจารณารูปร่างของไซโล และปัจจัยที่กระทำต่อการไหลภายในไซโล ซึ่งจะส่งผลต่อพฤติกรรมการณ์ไหลของวัสดุเม็ด และแรงดันบนผนังไซโล กระบวนการหลักที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบในไซโลประกอบด้วย 2 กระบวนการคือ การบรรจุ (Filling Process) และการปล่อยออก (Discharging Process) ในกระบวนการปล่อยออก เมื่อเปิดช่องทางออก (Outlet) ของไซโล วัสดุเม็ดจะเริ่มไหลออกจากไซโลภายใต้แรงโน้มถ่วง รูปแบบการไหลของวัสดุเม็ดมี 2 รูปแบบ คือ การไหลแบบทั้งมวล (Mass Flow) และการไหลแบบท่อระบาย (Funnel Flow) [1] สำหรับการไหลแบบทั้งมวลพบว่าวัสดุเม็ดทั้งหมดภายในไซโลอยู่ในสภาพเคลื่อนที่ออกจากไซโลอย่างสม่ำเสมอ รูปแบบการไหลประเภทนี้มีความเหมาะสมสำหรับการทำงานของไซโล และกรณีการไหลแบบท่อระบายเป็นการไหลในลักษณะที่เฉพาะวัสดุเม็ดที่อยู่บริเวณส่วนตรงกลางของไซโลเท่านั้นที่เคลื่อนที่ออกจากไซโลได้ ในขณะที่มีวัสดุเม็ดบางส่วนติดเกาะติดผนังไซโลและไม่สามารถไหลออกจากไซโลได้ ทำให้เกิดบริเวณที่วัสดุเม็ดหยุดนิ่ง (Dead Zone) ขึ้นภายในไซโล รูปแบบการไหลขึ้นกับคุณสมบัติของวัสดุเม็ดและรูปร่างไซโล

ปัจจุบันพบปัญหาหลายอย่างที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรม เช่น ปัญหาการอุดตัน (Arching Problem) ที่เกิดขึ้นเหนือช่องทางออกของไซโล ปัญหาเกิดบริเวณหยุดเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดใกล้กับผนังไซโล และการออกแบบที่ไม่เหมาะสมของไซโลมักเป็นสาเหตุทำให้ไซโลพังทลาย ปัญหาต่าง ๆ เหล่านี้ ก่อให้เกิดความเสียหายในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ จึงมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยให้วัสดุเม็ดที่บรรจุในไซโลสามารถเคลื่อนที่ออกจากไซโลได้ง่าย สิ่งแทรก (Insert) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาและออกแบบให้มีการติดตั้งภายในไซโล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการไหล และลดความเค้นของผนังไซโล (Wall Stress) ซึ่งเป็นสาเหตุที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันหรือการเกิดโคมในระหว่างการปล่อยวัสดุออกจากไซโล สิ่งแทรกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ สิ่งแทรกแบบวัสดุเม็ดไหลผ่านไม่ได้ (Displacing Inserts) และสิ่งแทรกแบบวัสดุเม็ดไหลผ่านได้ (Non-Displacing Inserts) [5] ตัวอย่างเช่น กรวยคว่ำ (Inverted Cone) กรวยคู่ (Double Cone) และแผ่นแนวนอน (Horizontal Plate) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้ว สิ่งแทรกจะถูกวางในบริเวณกรวย (Hopper) ของไซโล เพื่อช่วยแก้ปัญหาการไหล การออกแบบสิ่งแทรกที่มีประสิทธิภาพและวางในตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง ทำให้ลดบริเวณที่วัสดุเม็ดไม่เคลื่อนที่ (Stagnant Zone) ในไซโลได้ทั้งหมด ซึ่งจะนำไปสู่การไหลแบบทั้งมวล ดังนั้น การศึกษาพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของวัสดุเม็ด แรงดันที่ผนังไซโล และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการไหลในไซโลระหว่างกระบวนการปล่อยออกจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพราะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการณ์ที่เกิดขึ้นภายในไซโลซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้

โดยที่ผ่านมามีนักวิจัยหลายท่านศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดในไซโลด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ การทดลอง [1-3] และวิธีเชิงตัวเลข [4-9] เนื่องจากวัสดุเม็ดมีจำนวนมากและมีขนาดเล็ก การศึกษาด้วยวิธีการทดลองทำให้เสียเวลาและมีค่าใช้จ่ายสูง ปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคนิคเชิงตัวเลขได้ถูกพัฒนาเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์ของวัสดุเม็ดและแรงดันในไซโล โดยวิธีเชิงตัวเลขประกอบด้วย 2 วิธี คือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) [6-7] และวิธีดิสมิทอลิเมนต์

(Discrete Element Method: DEM) [4-5, 9] โดยทั่วไปแล้ว วิธีดิสครีทเอลิเมนต์เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมาก เพราะสามารถอธิบายปรากฏการณ์การไหลของแต่ละอนุภาคในโซโลได้อย่างชัดเจน

งานวิจัยนี้นำเสนอแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของวัสดุเม็ดและเทคนิคการหาผลเฉลยด้วยวิธีดิสครีทเอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของสิ่งแทรกต่อพฤติกรรมการไหลของวัสดุเม็ด รูปแบบการไหล เวกเตอร์ความเร็ว และแรงดันที่ผนังฐานของโซโล ในงานวิจัยนี้ใช้โซโลฐานแบบเรียบที่มีสิ่งแทรกแบบกรวยคว่ำ และทำการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของวัสดุเม็ดในโซโลที่ไม่มีสิ่งแทรกและมีสิ่งแทรก

วิธีดำเนินการ

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งได้พัฒนามาจากแบบจำลองของ Cundall และ Strack [9] โดยอาศัยกฎการเคลื่อนที่ข้อสองของนิวตัน สมการควบคุมสำหรับอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาค i อยู่ภายใต้หลักการของโมเมนตัมเชิงเส้นและหลักการโมเมนตัมเชิงมุม คือ

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i(t)}{dt^2} = m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_i(t) \quad (1)$$

$$I_i \frac{d^2 \boldsymbol{\theta}_i(t)}{dt^2} = \mathbf{M}_i(t) \quad (2)$$

เมื่อ $\mathbf{r}_i$ และ $\boldsymbol{\theta}_i$ แทนเวกเตอร์ตำแหน่ง (Position Vector) และเวกเตอร์เชิงมุม (Rotation Vector) ที่จุดศูนย์กลางของอนุภาค i ตามลำดับ $\mathbf{g}$ คือแรงโน้มถ่วงโลก m_i และ I_i คือมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาค i ตามลำดับ เวกเตอร์ $\mathbf{F}_i$ และ $\mathbf{M}_i$ คือแรงและทอร์กรวมทั้งหมดที่กระทำกับอนุภาค i ตามลำดับ โดยนิยามดังนี้

$$\mathbf{F}_i(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^{N_p} \mathbf{F}_{i,j} + \sum_{k=1}^{N_w} \mathbf{F}_{i,w_k} \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_i(t) = \sum_{j=1}^{N_p} \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{i,j} + \sum_{k=1}^{N_w} \mathbf{r}_i \times \mathbf{F}_{i,w_k} \quad (4)$$

เมื่อ N_p แทนจำนวนของอนุภาคทั้งหมด และ N_w แทนจำนวนผนังทั้งหมดที่กระทำบนอนุภาค i และ $\mathbf{F}_{i,j}$ แทนแรงที่กระทำกันระหว่างอนุภาค i และ j และ $\mathbf{F}_{i,w_k}$ แทนแรงที่กระทำกันระหว่างอนุภาค i และผนัง w_k นิยามดังนี้

$$\mathbf{F}_{i,j}(t) = F_{ijn}(t) \mathbf{n} + F_{ijs}(t) \mathbf{s} \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{i,w}(t) = F_{iwn}(t) \mathbf{n} + F_{iws}(t) \mathbf{s} \quad (6)$$

เมื่อ $\mathbf{n}$ และ $\mathbf{s}$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศตั้งฉากและทิศสัมผัส ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ $\mathbf{v}_i = \frac{d\mathbf{r}_i(t)}{dt}$ และ

$\boldsymbol{\omega}_i = \frac{d\boldsymbol{\theta}_i(t)}{dt}$ สำหรับ $i = 1, 2, 3, \dots, N_p$ เราจะได้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับหนึ่ง คือ

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{r}_i(t)}{dt} &= \mathbf{v}_i \\ \frac{d\boldsymbol{\theta}_i(t)}{dt} &= \boldsymbol{\omega}_i \\ \frac{d\mathbf{v}_i(t)}{dt} &= \mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}_i(t)}{m_i} \\ \frac{d\boldsymbol{\omega}_i(t)}{dt} &= \frac{\mathbf{M}_i(t)}{I_i}\end{aligned}\tag{7}$$

จากระบบสมการดังกล่าวสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการต่อไปนี้

$$\frac{d\boldsymbol{\psi}(t)}{dt} = \boldsymbol{\phi}(t)\tag{8}$$

$$\frac{d\boldsymbol{\phi}(t)}{dt} = \mathbf{P}(t)\tag{9}$$

เมื่อ $\boldsymbol{\psi}(t) = [\mathbf{r}_1(t) \ \boldsymbol{\theta}_1(t) \ \dots \ \mathbf{r}_{N_p}(t) \ \boldsymbol{\theta}_{N_p}(t)]^T$, $\boldsymbol{\phi}(t) = [\mathbf{v}_1(t) \ \boldsymbol{\omega}_1(t) \ \dots \ \mathbf{v}_{N_p}(t) \ \boldsymbol{\omega}_{N_p}(t)]^T$

และ $\mathbf{P}(t) = \left[\mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}_1(t)}{m_1} \quad \frac{\mathbf{M}_1(t)}{I_1} \quad \dots \quad \mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}_{N_p}(t)}{m_{N_p}} \quad \frac{\mathbf{M}_{N_p}(t)}{I_{N_p}} \right]^T$

โดยประยุกต์ใช้วิธีผลต่างกลาง (Central Differencing Scheme) กับสมการ (9) และพิจารณาบนช่วงเวลา

$$\Delta t = \left[t_{n-\frac{1}{2}}, t_{n+\frac{1}{2}} \right] \text{ จะได้ว่า } \frac{\phi^{n+\frac{1}{2}} - \phi^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \mathbf{P}^n$$

$$\text{ดังนั้น } \phi^{n+\frac{1}{2}} = \phi^{n-\frac{1}{2}} + \Delta t \mathbf{P}^n\tag{10}$$

โดยที่ $\phi^{n+\frac{1}{2}} = \phi\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right)$ และ $\phi^{n-\frac{1}{2}} = \phi\left(t - \frac{\Delta t}{2}\right)$ สำหรับบนช่วง $\Delta t = [t_n, t_{n+1}]$ เราใช้วิธีผลต่างกลางอีกครั้ง

$$\text{กับสมการ (8) ที่เวลา } t_{n+\frac{1}{2}} \text{ จะได้ว่า } \frac{\boldsymbol{\psi}^{n+1} - \boldsymbol{\psi}^n}{\Delta t} = \phi^{n+\frac{1}{2}}$$

$$\text{ดังนั้น จะได้ } \boldsymbol{\psi}^{n+1} = \boldsymbol{\psi}^n + \Delta t \phi^{n+\frac{1}{2}}\tag{11}$$

โดยการแทนสมการ (10) ลงในสมการ (11) จะได้ค่าของ $\mathbf{r}_i$ และ $\boldsymbol{\theta}_i$ ที่เวลา $t = n+1$ ดังนี้ 5

$$\boldsymbol{\psi}^{n+1} = \boldsymbol{\psi}^n + \Delta t \phi^{n-\frac{1}{2}} + (\Delta t)^2 \mathbf{P}^n \quad (12)$$

ดังนั้น เราสามารถคำนวณค่าเวกเตอร์ความเร็ว $\mathbf{v}_i$ และความเร็วเชิงมุม $\boldsymbol{\omega}_i$ ที่เวลา $t = n+1$ ได้จากสมการ

$$\frac{d}{dt}(\boldsymbol{\psi}^{n+1}) = \phi^{n+1} \quad (13)$$

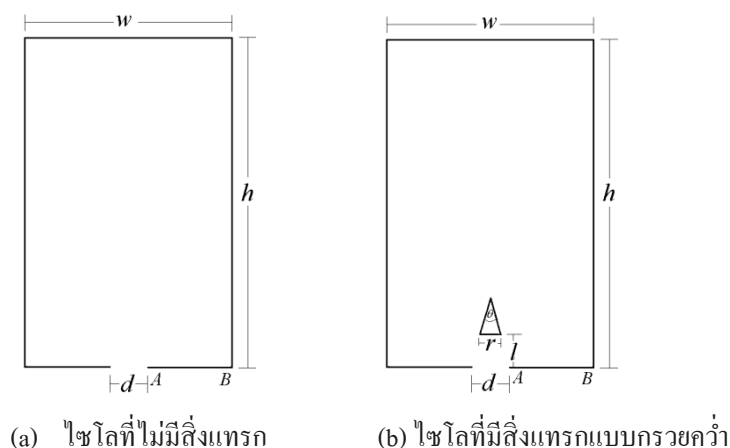
สำหรับแรงทั้งหมดที่กระทำบนผนังโซโลที่เวลา t สามารถคำนวณจากสูตร

$$\mathbf{F}_w(t) = -\frac{1}{L} \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{i,w}(t) \quad (14)$$

เมื่อ L คือความยาวของผนังโซโล และ N คือจำนวนของอนุภาคที่กระทำบนผนังที่เวลา t

ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เราจำลองแบบเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคแบบ 2 มิติ โดยออกแบบโครงสร้างโซโลเป็นรูปทรงกระบอกฐานเบนเรียบซึ่งทำจากแผ่นโลหะ มีความสูง (h) 100 เซนติเมตร กว้าง (w) 40 เซนติเมตรและขนาดช่องทางออก (d) มี 2 ขนาด คือ 8 และ 4 เซนติเมตร สิ่งแทรกมีรูปร่างเป็นกรวยคว่ำซึ่งมีขนาดมุมยอด (θ) ต่างกัน 2 ขนาด คือ 30 องศา และ 90 องศา และฐานกรวย (r) กว้าง 4 เซนติเมตร โดยสิ่งแทรกจะถูกวางที่ระดับความสูงจากฐานโซโลเป็นระยะ (l) ต่างกัน คือ 3 4 6 และ 8 เซนติเมตร เพื่อศึกษาค่าแรงดันที่กระทำบนฐานของโซโล ค่าแรงดันจะถูกบันทึกที่บริเวณ A ถึง B ดังภาพที่ 1 เราพิจารณาอนุภาคที่มีรูปร่างกลม โดยสมมติให้วัสดุเม็ดเป็นเม็ดถั่วเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างกัน สองขนาดคือ 0.6 และ 0.75 เซนติเมตร มีจำนวนเท่ากัน รวมทั้งสิ้น 4,000 เม็ด มีความหนาแน่น (ρ) $1,033 \text{ kg/m}^3$ ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ช่วงเวลาการคำนวณ (Δt) เท่ากับ 5.271×10^{-6} วินาที และ คุณสมบัติของอนุภาคแสดงในตารางที่ 1



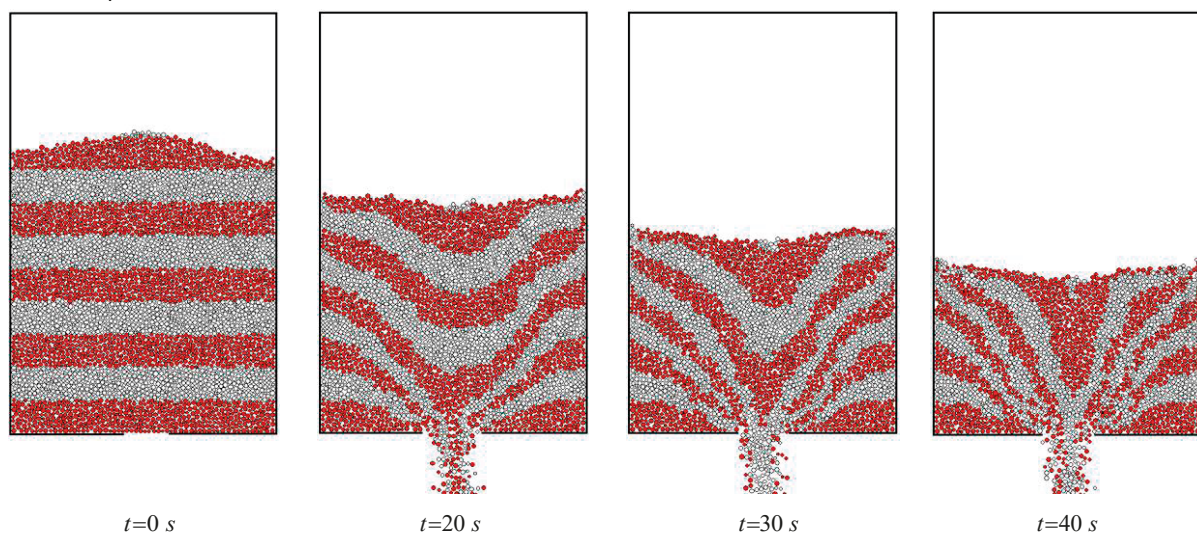
ภาพที่ 1 โครงสร้างโซโลฐานเบนเรียบ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของอนุภาค

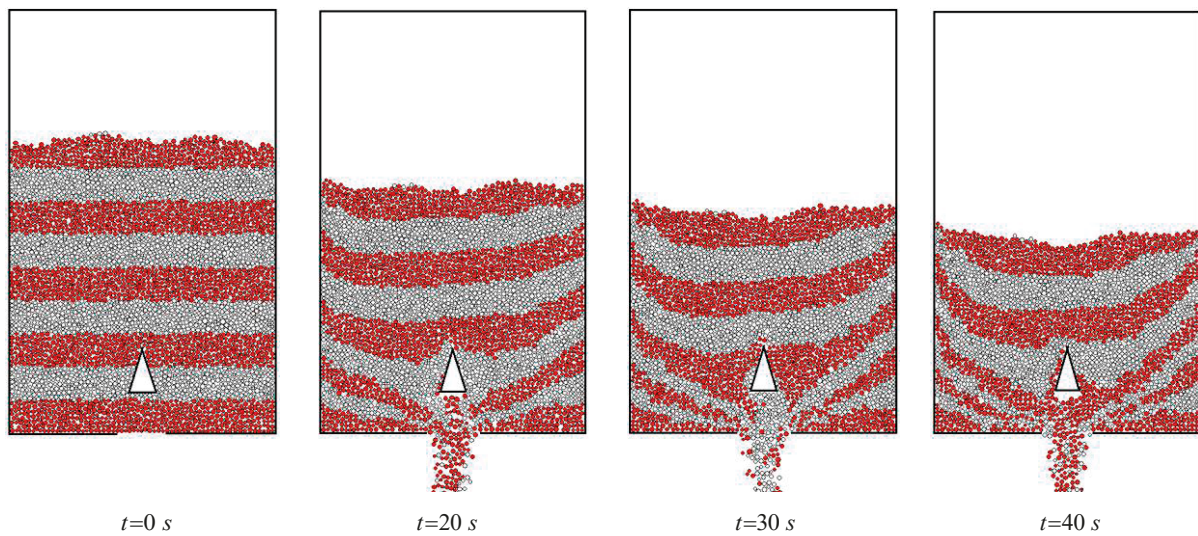
คุณสมบัติ	อนุภาค – อนุภาค	อนุภาค – ผนัง
Frictional coefficient, μ	0.33	0.35
Normal contact stiffness, k_n	$2.8322 \times 10^4 \text{ N/m}$	$5.6645 \times 10^4 \text{ N/m}$
Normal damping constant, η_n	$1.3048 \times 10^2 \text{ N/m}$	$1.3962 \times 10^2 \text{ N/m}$
Tangential contact stiffness, k_s	$2.5740 \times 10^4 \text{ N/m}$	$4.5314 \times 10^4 \text{ N/m}$

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม DEV-C++ เวอร์ชัน 4.9.9.2 สำหรับประมวลผลเฉลยเชิงตัวเลขของการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไซโล และใช้โปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 7.8.0.347(R2009a) ในการวาดกราฟ การศึกษาการไหลของอนุภาคระหว่างกระบวนการปล่อยออก เมื่อเปิดช่องทางออกของไซโล เมล็ดถั่วเหลืองจะไหลออกจากไซโลภายใต้แรงดึงดูดของโลก ในงานวิจัยนี้เราทำการศึกษารูปแบบการไหลของอนุภาคในไซโล ดังนั้นจึงกำหนดให้อนุภาคในไซโลที่มีความสูงต่างกันมีสีแตกต่างกัน โดยใช้สีต่างกัน 2 สี คือ สีแดงและสีเทา การศึกษาผลกระทบของสิ่งแทรกต่อรูปแบบการไหล โดยพิจารณาไซโลมีช่องทางออกกว้าง 8 เซนติเมตร และสิ่งแทรกมีมุมยอดขนาด 30° ซึ่งวางสูงจากช่องทางออก (I) 6 เซนติเมตร ที่เวลาต่างๆ รูปแบบการไหลของวัสดุเม็ดในไซโลที่ไม่มีสิ่งแทรก และไซโลที่มีสิ่งแทรกแสดงในภาพที่ 2 และภาพที่ 3 ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า การไหลแบบที่อธิบายเกิดขึ้นในไซโลที่ไม่มีสิ่งแทรก และบริเวณมุมของไซโลจะมีอนุภาคบางส่วนไม่เคลื่อนที่ออกจากไซโล จึงทำให้เกิดบริเวณอนุภาคหยุดไหล สำหรับรูปแบบการไหลของวัสดุเม็ดไซโลที่มีสิ่งแทรก พบว่า การเพิ่มสิ่งแทรกทำให้เกิดการกระจายแรงดันไปยังอนุภาคที่อยู่ใกล้ผนังไซโลมากขึ้น จึงทำให้ลดบริเวณที่เมล็ดถั่วเหลืองไม่เคลื่อนที่ในไซโลได้ ซึ่งจะนำไปสู่การไหลแบบทั้งหมด

นอกจากนี้ เรายังศึกษาผลกระทบของตำแหน่งสิ่งแทรกต่อรูปแบบการไหล โดยพิจารณาไซโลมีช่องทางออกกว้าง 4 เซนติเมตร และสิ่งแทรกมีมุมยอดขนาด 90° ซึ่งถูกวางในตำแหน่งที่สูงเหนือช่องทางออก (I) แตกต่างกัน 3 ตำแหน่ง คือ 3 4 และ 8 เซนติเมตร ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า การวางสิ่งแทรกในตำแหน่งที่ใกล้ช่องทางออก คือ ระยะสูง 3 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความกว้างช่องทางออกของไซโล ทำให้เกิดการอุดตันของอนุภาคในไซโลที่เวลา 65 วินาที และปิดกั้นการไหลของอนุภาคในไซโล ดังแสดงในภาพที่ 4(a) หรือการวางสิ่งแทรกในตำแหน่งที่สูงเป็นสองเท่าของความกว้างช่องทางออกของไซโลคือตำแหน่งสูง 8 เซนติเมตร ทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของอนุภาคในไซโลที่วินาทีที่ 5 ดังแสดงในภาพที่ 4(c) แต่การวางสิ่งแทรกในตำแหน่งที่ความสูงเท่ากับ ความกว้างช่องทางออกของไซโลคือตำแหน่งสูง 4 เซนติเมตร จะไม่เกิดการอุดตันของอนุภาคในไซโล ดังแสดงในภาพที่ 4(b)

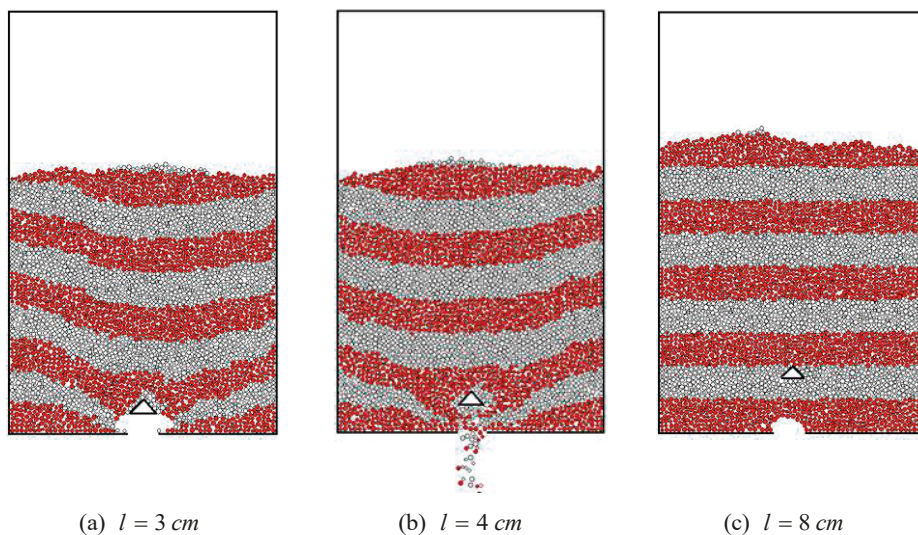


ภาพที่ 2 รูปแบบการไหลของวัสดุเม็ดในไซโลที่ไม่มีสิ่งแทรก ($d = 8\text{cm}$)



ภาพที่ 3 รูปแบบการไหลของวัสดุเม็ดในไซโลที่มีสิ่งแทรก ($d = 8\text{ cm}$)

เวกเตอร์ความเร็วของวัสดุเม็ดในไซโลแสดงในภาพที่ 5 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า ไซโลที่ไม่มีสิ่งแทรกจะมีบริเวณที่มีเวกเตอร์ความเร็วต่ำซึ่งอยู่ใกล้บริเวณมุมของไซโลมากกว่าไซโลที่มีสิ่งแทรก ดังนั้น การเพิ่มสิ่งแทรกในไซโลสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการไหลออกของวัสดุเม็ดจากไซโล ทำให้เมล็ดถั่วเหลืองเคลื่อนที่ออกจากไซโลได้ง่ายและสามารถลดบริเวณการหยุดนิ่งของเมล็ดถั่วเหลืองได้เป็นอย่างดี การคำนวณค่าแรงดันของวัสดุเม็ดที่กระทำบนผนังไซโลในบริเวณ A ถึง B แสดงในภาพที่ 6 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า ไซโลที่ไม่มีสิ่งแทรกจะมีค่าแรงดันสูงกว่าไซโลที่มีสิ่งแทรก ดังนั้น การเพิ่มสิ่งแทรกในไซโลสามารถลดแรงดันที่ผนังของไซโลได้

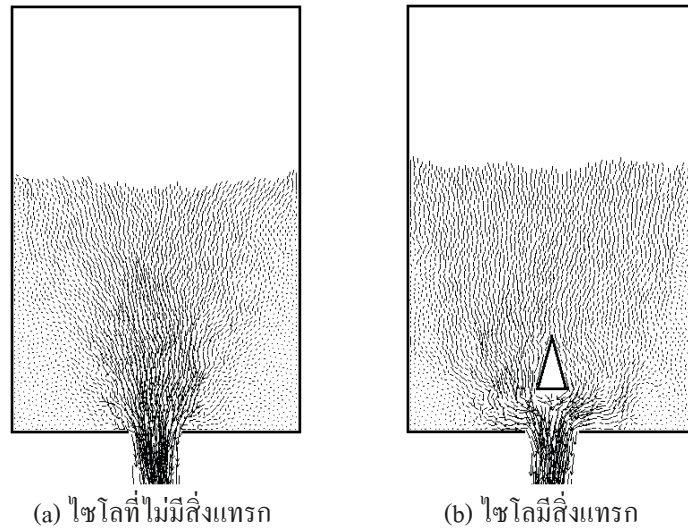


(a) $l = 3\text{ cm}$

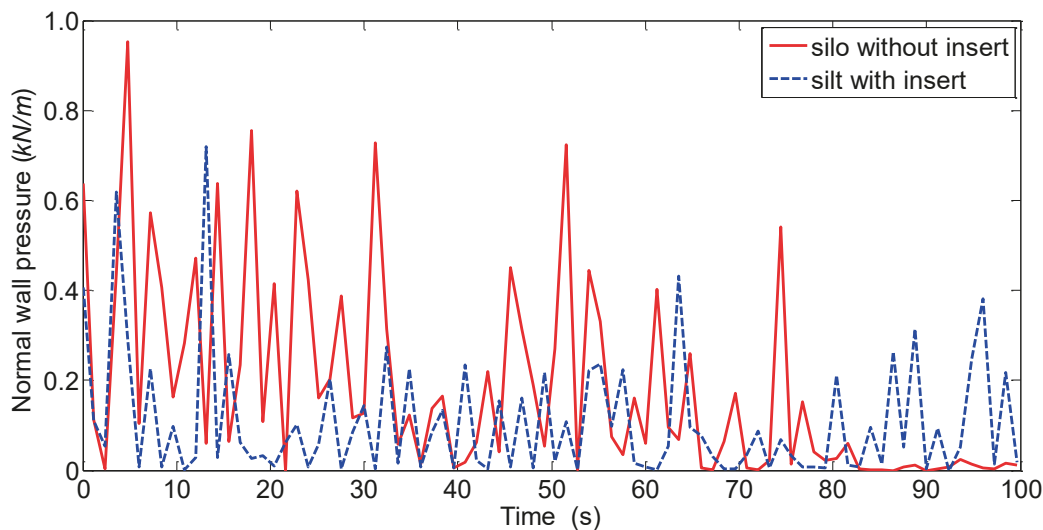
(b) $l = 4\text{ cm}$

(c) $l = 8\text{ cm}$

ภาพที่ 4 การอุดตันของอนุภาคในไซโลที่มีสิ่งแทรก ($d = 4\text{ cm}$, $\theta = 90^\circ$) ที่ระดับความสูง (l) ต่าง ๆ



ภาพที่ 5 เวกเตอร์ความเร็วของวัสดุเม็ดในไซโล ($d = 8 \text{ cm}$, $l = 6 \text{ cm}$, $\theta = 30^\circ$) ที่เวลา 20 วินาที



ภาพที่ 6 ค่าแรงดันบนผนังของไซโล ($d = 8 \text{ cm}$, $l = 6 \text{ cm}$, $\theta = 30^\circ$) ในช่วงเวลา 100 วินาที

การอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และการจำลองเชิงตัวเลข โดยใช้วิธีดิสครีทอีลิเมนต์ การออกแบบไซโลที่ไม่มีสิ่งแทรกและมีสิ่งแทรกสำหรับเก็บเมล็ดถั่วเหลือง สามารถสรุปได้ว่า สิ่งแทรกมีอิทธิพลต่อรูปแบบการไหลของวัสดุเม็ดในไซโลและสามารถปรับปรุงรูปแบบการไหลจากการไหลแบบท่อระบายไปสู่การไหลแบบทั้งมวล สำหรับการศึกษผลกระทบของตำแหน่งของสิ่งแทรกในไซโล เราพบว่า การวางสิ่งแทรกในตำแหน่งที่เหมาะสมทำให้เกิดการกระจายแรงไปยังอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงของไซโล ทำให้ลดบริเวณที่อนุภาคหยุดเคลื่อนที่ได้ ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบไซโลและสิ่งแทรกให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยโครงการวิจัยเงินรายได้ มหาวิทยาลัยทักษิณ กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัย ประเพณีทุนยุทธศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

เอกสารอ้างอิง

- [1] H $\ddot{a}$ rtl, J., Ooi, J. Y., Rotter, J. M. and Wojcik, M. (2008). "The influence of a cone-in-cone insert on flow pattern and wall pressure in a full-scal silo", **Chemical engineering research and design**. 86, 370-378.
- [2] Enstad, G.G., Eiksaa, O.E. and Mosby, J. (1995). "Experimental investigations on the use of inserts in order to obtain mass flow in silos", **Rosemont Convention Center**. Chicago.
- [3] Yang, S.C. and Hsiau, S.S. (2001). "The simulation and experimental study of granular materials discharged from a silo with the placement of inserts", **Powder Technology**. 120, 244-255.
- [4] Chuayjan, W., Pothiphan, S., Wiwatanapataphee, B. and Wu, Y. H. (2010). "Numerical simulation of granular flow during filling and discharging of a silo", **International Journal of Pure and Applied Mathematics**. 63(2), 347-364.
- [5] Matuszek, D. and Tukiendorf, M. (2008). "Application of roof shaped and double cone inserts in mixing of granular elements in the flow process", **International Agro physics**. 22, 147-150.
- [6] Wojcik, M. and Tejchman, J. (2008). "Application of an Uncoupled ALE-formulation to Confined Granular Flow in Silos", **The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)**. 1-6 October, Goa, India.
- [7] Volpato, S., Artoni, R. and Santomaso, A. C. (2014). "Numerical study on the behavior of funnel flow silos with and without inserts through a continuum hydrodynamic approach", **Chemical Engineering Research and Design**. 92(2), 256-263.
- [8] Chou, C. S., Lee, A. F. and Yeh, C. K. (2009). "Placement of a non-isosceles-triangle insert in an asymmetrical two-dimensional bin-hopper", **Advanced Powder Technology**. 20, 80-88.
- [9] Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. (1979). "Discrete numerical model for granular assemblies", **Geotechnique**. (29), 47-65.