หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความเป็นมาของไซโลที่ใช้สำหรับบรรจุพืชผลหรือเมล็ดธัญญาหาร

คำจำกัดความของไซโล

โครงสร้างที่นำมาใช้ในการเก็บรักษาพืชผลหรือวัสดุมวลเม็ด (**Granular Materials**) ต่าง ๆ นั้น **Gray & Manning**(1) ได้จำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ บังเกอร์ (**Bunkers**) และไซโล (**Silos**) ข้อแตกต่างระหว่างโครงสร้างทั้งสองประเภทนี้อยู่ที่ความลาดเอียงของระนาบหนึ่งซึ่งเรียกว่า **Plane of Rupture** อันเป็นระนาบที่กำหนดลักษณะการเกิดแรงดันเนื่องมาจากวัสดุมีต่อโครงสร้าง ถ้า **Plane of Rupture** ตัดกับผิวบนสุดของวัสดุที่บรรจุอยู่เต็ม โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างประเภท บังเกอร์ (รูปที่ 1 ก.) และในทางตรงกันข้าม ถ้า **Plane of Rupture** นี้ตัดกับผนังด้านตรงข้ามก่อนจะถึงระดับผิวบนสุดของวัสดุที่บรรจุ โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างประเภทไซโล (**Silos**) (รูปที่ 1 ข.) ในการคำนวณออกแบบการจำแนกประเภทของโครงสร้างทั้งสองเพื่อจะใช้ทฤษฎีในการคำนวณแรงดันที่ผนังหรือที่พื้นได้ถูกต้องนั้น **Sargis S. Safarian**(2) ได้แนะนำให้พิจารณาเงื่อนไขทางเรขาคณิตประการใดประการหนึ่งใน 2 ประการ คือ

- เงื่อนไขของ **Dishinger** : $H > 1.5\sqrt{A}$
- เงื่อนไขตามข้อกำหนดของ **Soviet Code**(2) :

  $H > 1.5\ D$ สำหรับไซโลที่มีรูปหน้าตัดวงกลม

  $H > 1.5\ a$ สำหรับไซโลที่มีรูปหน้าตัดสี่เหลี่ยม

โดยที่ H คือความสูง A คือพื้นที่หน้าตัด D และ a คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าตัดรูปวงกลม และมิติที่ยาวที่สุดของหน้าตัดที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ตามลำดับ ถ้าโครงสร้างใดที่มีลักษณะเป็นไปตามเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งที่กล่าวมาข้างต้นให้จัดเป็นโครงสร้างประเภทไซโล แต่ถ้านอกเหนือจากนี้จัดเป็นโครงสร้างประเภทบังเกอร์

การวิเคราะห์หาขนาดและลักษณะของแรงดันที่เกิดกับผนังและพื้นของบังเกอร์ เนื่องจากวัสดุที่บรรจุอยู่นั้น โดยปกติจะใช้ Rankine's Method ซึ่งเป็นวิธีที่นำทฤษฎีการวิเคราะห์แรงดันที่เกิดจากของเหลว (Hydrostatic Pressure) มีต่อผนังหรือกำแพงมาดัดแปลงโดยสมมุติว่าวัสดุที่บรรจุนั้นเป็นของเหลวที่มีขนาดความหนาแน่นเท่ากับน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุนั้น ส่วนในกรณีของไซโลเพราะเหตุที่ Plane of Rupture ตัดกับผนังด้านตรงข้ามก่อนจะถึงระดับผิวบนของวัสดุที่บรรจุ ทำให้ลักษณะและขนาดของแรงดันที่เกิดกับผนังและพื้นไซโลแตกต่างออกไปจากในบังเกอร์ จึงไม่อาจนำเอา Rankine's Method มาใช้ได้แนวทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของแรงดันที่เกิดในไซโล กล่าวโดยย่อคือน้ำหนักของวัสดุที่บรรจุส่วนใหญ่จะถูกรับไว้ด้วยความฝืดระหว่างผนังกับมวลวัสดุ น้ำหนักวัสดุส่วนที่เหลือซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักส่วนที่ถูกรับไว้ด้วยความฝืดดังกล่าว จะตกลงบนพื้นไซโลซึ่งจะเป็นน้ำหนักวัสดุส่วนที่อยู่เหนือพื้นของไซโลขึ้นไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของแรงดันในไซโล จึงไม่สามารถเปรียบเทียบได้กับการวิเคราะห์แรงดันของของเหลว เนื่องด้วยการวิเคราะห์ตามนัยของของเหลวนั้นมิได้คำนึงถึงความฝืดระหว่างผนังกับมวลวัสดุ

<u>คุณลักษณะที่ต้องการในการคำนวณออกแบบไซโล</u>

คุณลักษณะสำคัญของไซโลสำหรับเก็บรักษาพืชผลหรือเมล็ดธัญญาหาร ที่จะต้องคำนึงในการคำนวณออกแบบมี 3 ประการ ดังนี้คือ

1. <u>มีประสิทธิภาพในการเก็บรักษาพืชผล</u>

ไซโลจะต้องมีประสิทธิภาพในการป้องกันความร้อน ความชื้น ไม่ให้สูงเกินไปจนอาจเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายกับพืชผลที่บรรจุ ในบางประเทศที่มีการเลี้ยงสัตว์จำนวนมาก ๆ มีอุตสาหกรรมการผลิตเนื้อหรือผลิตผลอื่น ๆ จากสัตว์ มักใช้ไซโลในการเก็บรักษาอาหารสัตว์ ซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ หญ้าหมัก (Silage) การคำนวณออกแบบไซโลเพื่อใช้ในการนี้ค่อนข้างยุ่งยากมาก เพราะจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติในการระบายอากาศ หรือแก๊สที่เกิด

ในมวลของหญ้าหมัก สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ภายในช่วงที่เหมาะสม และต้องมีลักษณะที่ไม่อำนวยให้ Oxygen แทรกเข้าไปในมวลของหญ้าหมักได้ดีในขณะบรรจุหรือเก็บรักษา สำหรับข้าวเปลือก ถึงแม้ว่าจะเป็นวัสดุที่ค่อนข้างคงตัวทางด้านเคมี (Chemically Stable Materials) ความร้อน ความชื้น ก็มีผลทำให้เกิดความเสียหายได้เช่นเดียวกัน เพราะถ้าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม เมล็ดข้าวเปลือกซึ่งพ้นระยะพักตัวแล้วจะสามารถงอกได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนั้นความชื้นยังมีผลอย่างมากต่อแรงดันที่เกิดในไซโลอีกด้วย เพราะเป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่น และสัมประสิทธิ์ความฝืดระหว่างผนังของไซโลกับมวลข้าวเปลือก

2. <u>มีความแข็งแรงทนทานและอายุการใช้งานสูง</u>

การใช้ไซโลเพื่อเก็บรักษาข้าวเปลือก พืชผล หรือวัสดุมวลเม็ดต่าง ๆ นั้น เป็นการลงทุนค่อนข้างสูง ฉะนั้นนอกจากจะต้องแข็งแรงทนทานสามารถรับน้ำหนักของวัสดุที่บรรจุยังต้องมั่นคงพอสำหรับน้ำหนักบรรทุกอื่น ๆ ที่เกิดในขณะใช้งานด้วย เช่น แรงลม แรงกระแทกที่เกิดในขณะบรรจุ หรือขนถ่ายวัสดุออก เป็นต้น และต้องไม่เกิดความเสียหายถึงขนาดพังทลายลงในกรณีที่ใช้งานไม่ถูกต้องตามจุดประสงค์ซึ่งได้คำนวณออกแบบไว้ หรือโดยภัยธรรมชาติใด ๆ สำหรับอายุการใช้งานตามปกติของไซโล ควรอยู่ในช่วง 20 – 30 ปี โดยมีการซ่อมแซมเพียงเล็กน้อย

3. <u>มีลักษณะการบรรจุหรือถ่ายวัสดุที่บรรจุออกอย่างเหมาะสม</u>

วิธีบรรจุและถ่ายวัสดุที่บรรจุออกมีความสำคัญต่อค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ (Operating Cost) มาก ทั้งนี้จะต้องเป็นวิธีที่ประหยัดเวลาและแรงงาน ไซโลชนิดที่ถ่ายวัสดุออกทางด้านล่าง (Bottom Unloading) มีความสะดวกในการถ่ายวัสดุออกซึ่งเป็นข้อดีเพียงประการเดียวเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับความยุ่งยากในการคำนวณออกแบบ การก่อสร้างและความสิ้นเปลืองในการบำรุงรักษา เพราะต้องคำนึงถึงความแข็งแรงของไซโล โดยเฉพาะบริเวณ Hopper หรือทางออกของวัสดุซึ่งจะต้องรับแรงกระแทกอย่างต่อเนื่อง หรือ Dynamic Force อย่างมหาศาล ที่เกิดในระหว่างถ่ายวัสดุออก เป็นเหตุให้อายุการใช้งานของไซโลต่ำ

ส่วนไซโลชนิดที่ถ่ายวัสดุออกทางด้านบน (Top Unloading) มีข้อเสียเปรียบอยู่ที่ต้องใช้เครื่องมือช่วยในการถ่ายวัสดุออก แต่ง่ายในการคำนวณออกแบบและการก่อสร้าง ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ทั้งยังมีอายุการใช้งานยืนยาวกว่า ฉะนั้นในการคำนวณออกแบบจึงควรพิจารณาเลือกวิธีหรือลักษณะของการบรรจุและถ่ายวัสดุออกให้เหมาะสม โดยคำนึงถึงผลที่จะเกิดขึ้นในระยะยาวด้วย

น้ำหนักบรรทุกของไซโลและแรงดันภายในไซโล

1. น้ำหนักบรรทุกของไซโล

น้ำหนักบรรทุกซึ่งจะต้องนำมาพิจารณาในการคำนวณออกแบบไซโลโดยทั่วไปจะประกอบด้วย

- น้ำหนักบรรทุกคงที่ (Dead Load) : ได้แก่ น้ำหนักของโครงสร้างเองรวมถึงน้ำหนักของเครื่องมือเครื่องใช้หรือส่วนประกอบที่ติดตั้งอยู่กับตัวโครงสร้าง
- น้ำหนักบรรทุกจร (Live Load) : ได้แก่ น้ำหนักของวัสดุที่บรรจุรวมทั้งแรงกระแทกหรือแรงดันส่วนเพิ่ม (Impact or Overpressure) ที่เกิดในขณะใช้งาน ซึ่งมีผลทำให้แรงดันในไซโลเพิ่มขึ้นอย่างมาก นอกจากนั้นเป็นแรงเนื่องจากธรรมชาติ เช่นแรงลม หรือการสั่นสะเทือนจากสาเหตุต่าง ๆ
- แรงที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ (Thermal Stress) ระหว่างวัสดุที่บรรจุกับอากาศภายนอก

2. แรงดันภายในไซโลเนื่องจากวัสดุที่บรรจุ

แรงดันทั้งทางด้านข้างซึ่งกระทำกับผนังและในแนวดิ่งซึ่งกระทำกับพื้นของไซโลเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุที่บรรจุอยู่นั้น เป็นน้ำหนักบรรทุกจรของไซโลที่สำคัญที่สุดซึ่งจำเป็นต้องทราบก่อนการคำนวณออกแบบไซโล ลักษณะการกระจายตัวและขนาดของแรงดันนี้แปรเปลี่ยนไปตามกลสมบัติ หรือคุณสมบัติทางฟิสิคส์ของวัสดุที่บรรจุซึ่งเป็นองค์ประกอบในการพิจารณาออกแบบ (Design Parameter)ไซโล โดยทั่วไปองค์ประกอบเหล่านี้ได้แก่

ความหนาแน่น ความฝืดภายในระหว่างมวลเม็ดของวัสดุ และความฝืดระหว่างผนังของไซโลกับมวลวัสดุที่บรรจุอยู่นั้น องค์ประกอบดังกล่าวจะขึ้นกับลักษณะและสภาพของเม็ดวัสดุ ลักษณะการบรรจุหรือภาวะต่างๆของวัสดุในระหว่างบรรจุอยู่ในไซโลดังต่อไปนี้

2.1 <u>ลักษณะและสภาพของเม็ดวัสดุ</u>

- ความชื้น : วัสดุที่แห้งจะมีความฝืดระหว่างเม็ดวัสดุ ต่ำกว่าวัสดุที่มีความชื้นสูงกว่า นอกจากนั้นความชื้นยังเป็นสาเหตุที่ทำให้ความหนาแน่นของวัสดุเปลี่ยนแปลงอีกด้วย

- อัตราส่วนคละของขนาดเม็ดวัสดุ : ในวัสดุที่มีขนาดเม็ดต่าง ๆ กัน อัตราส่วนคละมีผลต่อลักษณะการแทรกตัวบรรจุในช่องว่างระหว่างเม็ดของมวลวัสดุ จึงมีผลต่อความหนาแน่นและความฝืดหรือการเกาะตัวกันระหว่างเม็ดวัสดุ ถ้าอัตราส่วนคละดีจะทำให้ความหนาแน่นและความฝืดระหว่างเม็ดวัสดุสูงขึ้น

- ลักษณะของเม็ดวัสดุ : วัสดุที่มีลักษณะของเม็ดเป็นเหลี่ยมหรือมุมมากจะมีความฝืดหรือการเกาะตัวกันของเม็ดในมวลวัสดุดีกว่าวัสดุที่มีลักษณะเม็ดกลมเกลี้ยงกว่า

2.2 <u>ลักษณะการบรรจุและภาวะการณ์ในระหว่างบรรจุวัสดุลงในไซโล</u>

- ระยะเวลาที่บรรจุทิ้งไว้ : วัสดุมวลเม็ดที่มีลักษณะค่อนข้างหยาบ และค่อนข้างคงตัวในทางเคมี (Chemically Stable Materials) มักไม่มีปัญหาเมื่อบรรจุทิ้งไว้ในไซโลนาน ๆ ทั้งนี้ความชื้นของมวลวัสดุนั้นจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ส่วนวัสดุที่มีมวลเม็ดละเอียดเมื่อบรรจุทิ้งไว้นาน ๆ น้ำหนักตัวที่ทับถมอยู่ทำให้การจัดเรียงตัวของเม็ดและการแทรกตัวเข้าแทนที่โพรงอากาศหรือช่องว่างระหว่างเม็ดได้ดีกว่า ทำให้ความหนาแน่นและความฝืดระหว่างเม็ดวัสดุสูงขึ้นตลอดเวลา ในกรณีที่เป็นวัสดุที่ไม่คงตัวทางเคมี เมื่ออยู่ในสภาพเช่นเดียวกันนี้ หรือเมื่อมีความชื้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอาจทำให้วัสดุจัดตัวจับกันเป็นก้อนแข็งได้

- อุณหภูมิของวัสดุ : วัสดุที่มีจุดหลอมตัวต่ำ อาจจะเกิดการอ่อนตัวได้เมื่อบรรจุในไซโล และการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของอุณหภูมิยังมีผลทำให้ปริมาณความชื้น และคุณสมบัติทางฟิสิคส์บางประการของวัสดุเปลี่ยนแปลง หรืออาจทำให้เกิดผลทางเคมีระหว่างเม็ดวัสดุได้ ซึ่งสาเหตุเหล่านี้เป็นผลกระทบกระเทือนโดยตรงต่อความฝืดระหว่างเม็ดของวัสดุ

– อัตราการบรรจุ : อัตราการบรรจุวัสดุลงในไซโลมีผลต่อความหนาแน่นและความฝืดระหว่างเม็ดของวัสดุมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวัสดุมวลเม็ดละเอียด ซึ่งอากาศภายนอกมีโอกาสแทรกตัวเข้าไปในมวลวัสดุได้มากในขณะบรรจุ เมื่อการบรรจุเป็นไปอย่างช้า ๆ น้ำหนักจะค่อย ๆ ทับถมมากขึ้นทีละน้อย ทำให้ความหนาแน่นและความฝืดระหว่างเม็ดวัสดุด้วยกันสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ถ้าอัตราการบรรจุสูง วัสดุที่บรรจุแล้วจะมีสภาพหลวมตัวกว่า เนื่องจากอากาศที่แทรกตัวอยู่ในมวลวัสดุเล็ดลอดออกไปได้ไม่มาก และการจัดเรียงตัวของเม็ดวัสดุไม่แน่นหนา ผิวสัมผัสระหว่างเม็ดวัสดุด้วยกันมีน้อย จึงทำให้ความฝืดระหว่างเม็ดวัสดุต่ำ

– จำนวนอากาศที่แทรกอยู่ในมวลวัสดุในขณะบรรจุ : เครื่องมือประเภทที่ใช้อากาศช่วยเป่าหรือดูดวัสดุ (Pneumatically) เพื่อบรรจุในไซโลนั้น ทำให้จำนวนอากาศแทรกเข้าไปในมวลวัสดุได้มากกว่าการใช้เครื่องมือกล (Mechanically) เช่น สายพานลำเลียง เป็นต้น การที่อากาศแทรกตัวเข้าไปมาก จะมีผลต่อความหนาแน่นและความฝืดระหว่างเม็ดวัสดุ ดังได้กล่าวมาแล้ว

– การแทรกตัวของอากาศในขณะถ่ายวัสดุออก : การแทรกตัวของอากาศเข้าไปในมวลของวัสดุซึ่งบรรจุอยู่ในไซโลในขณะถ่ายวัสดุออกนั้น จะทำให้วัสดุหลวมตัวได้มาก ความหนาแน่นและความฝืดระหว่างเม็ดวัสดุจะลดต่ำลง

การวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของแรงดันในไซโลโดยสูตรสำเร็จ

1. วิธีของแจนเสน (Janssen's Method) (รูปที่ 2)

1.1 แรงดันในแนวดิ่ง

แจนเสน[2] ให้สูตรสำหรับคำนวณแรงดันในแนวดิ่งต่อหน่วยพื้นที่ (q_Y) เนื่องจากวัสดุมวลเม็ดซึ่งบรรจุในไซโลที่ระยะ Y วัดจากผิวบนสุดของวัสดุไว้ดังนี้คือ

$$q_Y = \frac{\gamma R}{\mu' k}\left[1 - \exp.^{\mu' kY/R}\right] \qquad (2\text{-}1)$$

ในที่นี้ R คือรัศมีไฮดรอลิค (Hydraulic Radius)

สำหรับไซโลที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม $R = \frac{D}{4}$ และสำหรับไซโลที่มีหน้าตัดเป็นรูปหลายเหลี่ยมด้านเท่าซึ่งมีด้านมากกว่า 4 ด้าน $R = \frac{D_c}{4}$ โดยที่ D_c ในที่นี้เป็นรัศมีของวงกลมซึ่งมีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ภายในของรูปหลายเหลี่ยมที่เป็นรูปหน้าตัดของไซโลนั้น ๆ ไซโลที่มีรูปหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส $R = \frac{a}{4}$ โดย a เป็นความยาวของด้าน

ในการคำนวณแรงดันส่วนที่ใกล้กับด้านสั้นในไซโลที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าให้ใช้ $R = \frac{a}{4}$ และแรงดันส่วนที่ใกล้กับด้านยาวให้ใช้ $R = \frac{a'}{4}$ ความยาว a' ในกรณีนี้คำนวณได้จาก

$$a' = \frac{2\ ab}{a + b} \qquad (2\text{-}2)$$

โดยที่ a = ความยาวด้านสั้น และ b = ความยาวด้านยาวของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

1.2 <u>แรงดันด้านข้างกระทำกับผนังไซโล</u>

แรงดันด้านข้างต่อหน่วยพื้นที่ (P_Y) อันเนื่องมาจากวัสดุกระทำกับผนังของไซโล ที่ความลึก Y คำนวณได้จาก

$$P_Y = q_Y k \qquad (2\text{-}3)$$

ในสมการ (2-3) ข้างต้น ค่า k เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่บรรจุมีค่าตามสมการดังนี้

$$k = \frac{1 - \sin\rho}{1 + \sin\rho} \qquad (2\text{-}4)$$

ρ เป็นมุมแห่งความฝืดภายในระหว่างเม็ดวัสดุ (Angle of Internal Friction) ซึ่งเทียบค่าได้โดยประมาณกับมุมลาดชันปกติ (Angle of Repose) ของวัสดุนั้น ๆ

1.3 <u>แรงเสียดทานที่ผิวผนังไซโล</u>

หน่วยแรงในแนวดิ่งเนื่องจากความเสียดทาน (V , Frictional Force) ระหว่างผนังกับมวลของวัสดุที่บรรจุต่อหน่วยความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัดของไซโล คือ

$$V_Y = (\gamma Y - 0.8\, q_Y)\, R \qquad (2\text{-}5)$$

2. <u>วิธีของเร็มเบิร์ท</u> (Reimbert's Method) (รูปที่ 2)

2.1 <u>แรงดันในแนวดิ่ง</u>

แรงดันในแนวดิ่งต่อหน่วยพื้นที่ เนื่องจากวัสดุมวลเม็ดที่บรรจุในไซโล ที่ระยะ Y วัดจากผิวบนสุดของวัสดุในวิธีของเร็มเบิร์ท[(2)] คือ

$$q_Y = \gamma\left[Y\left(\frac{Y}{C} + 1\right)^{-1} + h_{s/3}\right] \qquad (2\text{-}6)$$

ค่าคงที่ C ในสมการ (2-6) นี้ เป็น Characteristic Abscissa ของไซโลขึ้นกับรูปหน้าตัดของไซโล สัมประสิทธิ์ความฝืดระหว่างผนังของไซโลกับมวลวัสดุที่บรรจุ และอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านข้างต่อแรงดันในแนวดิ่ง (k) ที่เกิดจากวัสดุกระทำกับไซโลที่ใช้บรรจุนั้น ค่าคงที่ C จะคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

ไซโลที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลม :

$$C = \frac{D}{4\mu' k} - h_{\frac{s}{3}} \qquad (2\text{-}7)$$

ไซโลที่มีหน้าตัดเป็นรูปหลายเหลี่ยมด้านเท่า และมีด้านมากกว่า 4 ด้าน :

$$C = \frac{L}{\pi}\,\frac{1}{4\mu' k} - h_{\frac{s}{3}} \qquad (2\text{-}8)$$

โดย L = ความยาวของด้านใดด้านหนึ่งของรูปหลายเหลี่ยมนั้น

ไซโลที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า :

สำหรับคำนวณแรงดันที่มีผลต่อผนังด้านสั้น a

$$C = \frac{a}{\pi 4\mu' k} - h_{\frac{s}{3}} \qquad (2\text{-}9)$$

และสำหรับคำนวณแรงดันที่มีผลต่อผนังด้านยาว b

$$C = \frac{a'}{\pi 4\mu' k} - h_{\frac{s}{3}} \qquad (2\text{-}10)$$

ค่า a' ในสมการ (2-10) มีค่าตามสมการ (2-2) ในวิธีของแจนเสน

2.2 <u>แรงกันด้านข้างกระทำกับผนังไซโล</u>

แรงกันด้านข้างต่อหน่วยพื้นที่ เนื่องจากวัสดุกระทำกับผนังของไซโล ที่ความลึก Y คำนวณได้โดยสมการ

$$p_Y = p_{max} \left[1 - (\frac{Y}{C} + 1)^{-2} \right] \qquad (2\text{-}11)$$

p_{max} เป็นแรงกันด้านข้างสูงสุดที่จะเกิดกับผนังไซโล = $\frac{\gamma R}{\mu'}$ (2-12)

ค่า R = Hydraulic Radius ของไซโลรูปหน้าตัดต่าง ๆ คำนวณเช่นเดียวกับในวิธีของแจนเสน

2.3 <u>แรงเสียดทานที่ผิวผนังไซโล</u>

แรงเสียดทานเนื่องจากมวลวัสดุกับผิวของไซโลต่อหน่วยความยาวของเส้นรอบรูปหน้าตัด ที่ความลึก Y คือ

$$V_Y = (\gamma Y - q_Y) R \qquad (2\text{-}13)$$

ในวิธีของแจนเสนค่าของแรงกันในแนวดิ่งต่อหน่วยพื้นที่ (q_Y) ที่กระทำกับพื้นของไซโลที่คำนวณได้ตามปกติจะสูงกว่าที่คำนวณโดยวิธีของเร็มเบิร์ท เพราะฉะนั้น แรงเสียดทานที่เกิดจากความฝืดระหว่างผนังกับมวลวัสดุที่บรรจุจึงต่ำกว่า ในสมการที่ (2-5) ซึ่งเป็นสมการสำหรับคำนวณหน่วยแรงเสียดทานที่ผนังตามวิธีของแจนเสน ค่าของ q_Y จะคูณด้วยตัวประกอบ 0.8 ซึ่งจะทำให้หน่วยแรงเสียดทานที่คำนวณได้ตามสมการนี้มีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จากสมการ (2-13) ซึ่งเป็นการคำนวณตามวิธีของเร็มเบิร์ท

3. <u>วิธีของแอรี่</u> (Airy's Method) (รูปที่ 3)

3.1 <u>แรงกันด้านข้างกระทำกับผนังไซโล</u>

W. Airy[1] ได้วิเคราะห์แรงกันของมวลวัสดุที่กระทำกับผนังของโครงสร้างที่ใช้บรรจุโดยใช้ทฤษฎีการถ่ายแรงแบบลิ่ม (Sliding Wedge Theory) ซึ่งพิจารณาลักษณะ

ของแรงต่างๆซึ่งพึงกระทำกับมวลวัสดุรูปลิ่มที่มี Plane of Rupture ทำมุมกับระนาบในแนวระดับเป็นมุม θ ดังแสดงในรูปที่ 3 เพราะฉะนั้นแรงดันด้านข้างที่มีต่อผนังของโครงสร้างตามลักษณะการวิเคราะห์นี้ จึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี คือ

<u>กรณีที่ 1</u> **Plane of Rupture ตัดกับผิวบนสุดของวัสดุที่บรรจุก่อนพบกับผนังด้านตรงข้ามของโครงสร้าง ดังนั้นการวิเคราะห์ในกรณีนี้ จึงอยู่ในลักษณะของบังเกอร์ หรือ Shallow Bin น้ำหนักของมวลวัสดุรูปลิ่มจะเป็น**

$$W = \frac{\gamma H^2}{2 \tan \theta} \qquad (2\text{–}14)$$

และผลจากการวิเคราะห์จะได้ค่าความลาดเอียงของ Plane of Rupture ที่ทำให้เกิดแรงดันด้านข้างที่ผนังของโครงสร้างมากที่สุด พร้อมทั้งค่าแรงดันด้านข้างที่มากที่สุดดังกล่าวนี้ ดังนี้

$$\tan \theta = \mu \sqrt{\mu \cdot \frac{1+\mu^2}{\mu+\mu'}} \qquad (2\text{–}15)$$

$$P_{max} = \frac{\gamma H^2}{2 \tan \theta} \cdot \frac{\tan\theta - \mu}{1 - \mu \mu' + (\mu + \mu') \tan \theta} \qquad (2\text{–}16)$$

<u>กรณีที่ 2</u> **Plane of Rupture พบกับผนังด้านตรงข้ามของโครงสร้างก่อนจะพ้นผิวของมวลวัสดุ การวิเคราะห์เป็นไปในลักษณะของไซโล น้ำหนักของมวลวัสดุรูปลิ่ม จะเป็น**

$$W = \frac{\gamma b}{2} (2H - b \tan \theta) \qquad (2\text{–}17)$$

ค่าของความลาดเอียง และแรงดันด้านข้างที่มากที่สุดซึ่งเกิดกับผนังไซโล จะคำนวณได้ตามสมการ

$$\tan \theta = \sqrt{\frac{2h}{b} \cdot \frac{1+\mu^2}{\mu+\mu'} + \frac{1+\mu^2}{\mu+\mu'} \cdot \frac{1-\mu\mu'}{\mu+\mu'}} - \frac{1-\mu\mu'}{\mu+\mu'} \qquad (2\text{–}18)$$

$$p_{max.} = \frac{\gamma b}{2}\,(2H - b\tan\theta)\cdot\frac{\tan\theta - \mu}{1-\mu\mu' + (\mu+\mu')\tan\theta} \qquad (2\text{-}19)$$

ค่าแรงดันด้านข้าง p_{max} ที่กระทำกับผนังตามสมการ (2–16) และ (2–19) เป็นค่าแรงดันต่อหน่วยความยาวของเส้นรอบรูปหน้าตัดของโครงสร้าง และสมการทั้งหมดตั้งแต่ (2–14) ถึง (2–19) ข้างต้นนี้ ใช้ได้กับบังเกอร์หรือไซโลที่มีรูปหน้าตัดทุกชนิด

3.2 แรงเสียดทานที่ผิวผนังไซโล

แรงเสียดทานต่อหน่วยความยาวเส้นรอบรูปหน้าตัด ซึ่งเกิดเนื่องจากความฝืดระหว่างผนังกับวัสดุในวิธีของแอรี่ ก็คือ

$$V = \mu' p_{max} \qquad (2\text{-}20)$$

3.3 แรงดันในแนวดิ่ง

หน่วยแรงดันในแนวดิ่งต่อหน่วยพื้นที่ ที่กระทำกับพื้นไซโลหรือโครงสร้างที่ใช้บรรจุวัสดุมวลเม็ด คือ

$$q_{max} = \gamma H - \frac{V}{R} \qquad (2\text{-}21)$$

4. วิธีของ ACI (ACI Method)

สถาบันคอนกรีตอเมริกัน[8] ได้สร้างสูตรสำเร็จซึ่งเป็นที่รู้จักกันทั่วไปว่า ACI-714 Formula สำหรับคำนวณหน่วยแรงดันด้านข้างที่เกิดกับผนังไซโลเนื่องจากน้ำหนักวัสดุที่บรรจุที่ความลึก Y วัดจากผิววัสดุไว้ดังนี้

$$p_Y = 3.3\,Y^{1.44} \quad \text{ปอนด์ต่อตารางฟุต หรือ}$$

$$p_Y = 87.75\,Y^{1.44} \quad \text{กิโลกรัมต่อตารางเมตร} \qquad (2\text{-}22)$$

จะสังเกตุเห็นว่า แรงดันที่กระทำกับผนังของไซโลในสมการนี้ ไม่ขึ้นกับคุณสมบัติทางฟิสิคส์ของวัสดุที่บรรจุ หรือลักษณะผิวผนังและขนาดของไซโลเลย เหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะเป็น

สมการของเส้นกราฟที่กำหนดขึ้นแสดงลักษณะและขนาดของแรงดันที่กระทำกับผนังไซโลเนื่องจากวัสดุที่บรรจุโดยครอบคลุมผลที่ได้จากการทดลองตรวจสอบลักษณะและขนาดของแรงดันดังกล่าวในไซโลประเภทและขนาดต่าง ๆ เมื่อบรรจุวัสดุมวลเม็ดที่มีคุณสมบัติทางฟิสิคส์ต่าง ๆ กัน ทั้งนี้ประเภทและขนาดของไซโลรวมทั้งชนิดของวัสดุที่กำหนดให้บรรจุในไซโลสำหรับการทดลองนั้น เป็นที่นิยมใช้และมีการคำนวณออกแบบกันอยู่ทั่วไป

<u>ผลที่เกิดกับแรงดันในไซโลเนื่องจากการเคลื่อนตัวของวัสดุมวลเม็ดที่บรรจุ</u>

ในช่วงระยะเวลา 30 ปีที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาค้นคว้าทั้งทางทฤษฎีและการทดลองถึงพฤติกรรมของวัสดุมวลเม็ดที่บรรจุในไซโลกันอย่างจริงจัง เนื่องจากได้สังเกตุพบว่า ความเสียหายของไซโลที่ใช้กันอยู่ส่วนใหญ่ในขณะนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันที่เกิดในขณะใช้งานมากกว่าจากแรงดันของวัสดุที่บรรจุในสภาพไม่เคลื่อนตัว ซึ่งเป็นหน่วยแรงที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ ในระยะแรก ๆ ของการศึกษาค้นคว้าดังกล่าว ตามที่ปรากฏรายละเอียดในรายงานของ **Ketchum**[6] เนื่องจากใช้เครื่องมือและวิธีการทดลองไม่เหมาะสม ทำให้การสรุปผลผิดพลาดไปมาก แต่อย่างไรก็ตามในระยะต่อมา โดยอาศัยเครื่องมือและวิธีการที่ดีขึ้นจึงสามารถศึกษาลักษณะหรือปรากฏการณ์ที่วัสดุมวลเม็ดในไซโลเคลื่อนตัว และค้นพบผลจริง ๆ ที่เกิดกับผนังและพื้นของไซโล ผลของการศึกษาค้นคว้านี้ทำให้ตระหนักถึงข้อบกพร่องในการใช้ทฤษฎีของแจนเสนหรือทฤษฎีอื่น ๆ ที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ เพราะจากการศึกษาตรวจสอบโดยการทดลองแสดงให้เห็นชัดเจนว่า แรงดันทั้งทางด้านข้างและในแนวดิ่งเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุมวลเม็ดที่อยู่ในสภาพไม่เคลื่อนไหวตัวตามที่คำนวณได้โดยทฤษฎีของแจนเสน เร็มเบิรท์ หรือแอรี่ย์ก็ตามจะนำไปใช้เป็นหน่วยแรงสำหรับคำนวณออกแบบโดยทันทีไม่ได้ แต่จะต้องเพิ่มขึ้นเพื่อชดเชยให้กับแรงดันส่วนเพิ่ม (**Overpressure**) และแรงกระแทก (**Impact**) ซึ่งเนื่องจากการเคลื่อนตัวของวัสดุมวลเม็ดที่บรรจุ นอกจากนั้นยังมีสาเหตุอื่น ๆ ที่จะต้องพิจารณาด้วย เช่น ลักษณะการจับตัวเป็นกองสูงของวัสดุ และการพังทลายของกองวัสดุนี้ในไซโล (**Arching and Collapse of Arching**) ลักษณะการถ่ายวัสดุออกจากไซโลแบบเยื้องศูนย์ (**Eccentric Discharge**) และการแทรกตัวของอากาศเข้าไปในไซโลในขณะที่ถ่ายวัสดุที่บรรจุออก เป็นต้น

ในการเพิ่มหน่วยแรงหรือแรงดันซึ่งเกิดกับผนังและพื้นของไซโลเนื่องจากวัสดุมวลเม็ดที่บรรจุอยู่ เพื่อชดเชยให้กับแรงที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสาเหตุข้างต้น เพื่อใช้เป็นหน่วยแรงสำหรับการคำนวณออกแบบที่ถูกต้องนั้น ทำได้โดยคูณหน่วยแรงหรือแรงดันที่คำนวณได้ตามวิธีของแจนเสน เร็มเบิร์ท และแอรี่ ด้วย Correction Factor ที่เหมาะสม ซึ่ง ACI Committee 313 และ Sargis S. Safarian ได้แนะนำไว้ในรายละเอียดวิธีหาแรงดันและหน่วยแรงสำหรับใช้คำนวณออกแบบไซโล ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไปตามลำดับ

<u>แรงดันและหน่วยแรงเนื่องจากวัสดุมวลเม็ดสำหรับใช้คำนวณออกแบบ ตามวิธีของ ACI Committee 313</u>

ACI Committee 313[5] ได้แนะนำให้ใช้ผลการวิเคราะห์แรงดันในไซโลตามวิธีของแจนเสน หรือแอรี่ ซึ่งเป็นแรงดันเนื่องจากวัสดุมวลเม็ดที่อยู่ในสภาพไม่เคลื่อนตัว คูณด้วย Overpressure Correction Factor Cd หรือ Impact Correction Factor Ci เพื่อชดเชยให้กับแรงดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนตัวหรือการกระแทกตัวของวัสดุที่บรรจุในไซโล ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

- หน่วยแรงดันด้านข้างที่กระทำกับผนังไซโลสำหรับใช้คำนวณออกแบบ

$$(p_Y)_{des.} = C_d \quad p_Y \tag{2-23}$$

หรือ

$$(p_Y)_{des.} = C_i \quad p_Y \tag{2-24}$$

- หน่วยแรงดันในแนวดิ่งที่กระทำกับพื้นไซโลสำหรับใช้คำนวณออกแบบ

$$(q_Y)_{des.} = C_d \quad q_Y \tag{2-25}$$

หรือ

$$(q_Y)_{des.} = C_i \quad qY \tag{2-26}$$

หน่วยแรงดันที่ใช้ในการคำนวณออกแบบนั้นให้เลือกใช้ค่าหนึ่งค่าใดที่มากกว่า ระหว่างสมการ (2-23) กับสมการ (2-24) สำหรับหน่วยแรงดันด้านข้างและระหว่างสมการ (2-25) กับสมการ (2-26) สำหรับหน่วยแรงดันในแนวดิ่ง

ในตารางที่ 1 และ 2 เป็นตารางแสดงค่า **Overpressure Correction Factor, Cd.** และ **Impact Correction Factor, Ci.** ซึ่ง **ACI Committee 313** ได้แนะนำไว้ ในตารางที่ 1 จะเห็นว่า **Overpressure Factor, Cd** ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างความสูงต่อขนาดความกว้างหรือเส้นผ่านศูนย์กลาง (H/D) ของไซโล และเปลี่ยนแปลงไปตามความลึกวัดจากผิววัสดุที่บรรจุ โดยจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความลึกมากขึ้น และจะสังเกตเห็นว่าค่า Cd ซึ่งใช้กับหน่วยแรงดันที่คำนวณโดยวิธีของแจนเสน สูงกว่าที่ใช้กับหน่วยแรงดันที่คำนวณโดยวิธีของเร็มเบิร์ทท้งนี้ก็เนื่องจากวิธีของแจนเสนจะให้ค่าของหน่วยแรงดันต่ำกว่าวิธีของเร็มเบิร์ทนั่นเอง สำหรับในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นตารางแสดงค่าของ **Impact Correction Factor Ci** นั้น **ACI Committee 313** ได้กำหนดค่าของ Ci ดังกล่าวนี้ตามปริมาตรของวัสดุที่บรรจุในแต่ละครั้ง โดยได้ให้ค่าที่จะใช้กับไซโลชนิดที่มีพื้นเป็นเหล็กและคอนกรีตแตกต่างกัน

<u>แรงดันและหน่วยแรงเนื่องจากวัสดุมวลเม็ดสำหรับคำนวณออกแบบไซโลที่ใช้บรรจุ ตามวิธีของ **Sargis S. Safarian**</u>

การวิเคราะห์แรงดันและหน่วยแรงเนื่องจากวัสดุมวลเม็ด สำหรับใช้ในการคำนวณออกแบบไซโลที่ใช้บรรจุตามวิธีของ **Sargis S. Safarian**[2] นั้น เช่นเดียวกับวิธีของ **ACI Committee 313**[5] ซึ่งได้กล่าวมาแล้ว คือให้ใช้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ตามวิธีของแจนเสนหรือเร็มเบิร์ท คูณด้วย **Overpressure Correction Factor, Cd.** เพื่อชดเชยให้กับแรงดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนตัวของมวลวัสดุที่บรรจุตามสมการที่ (2-23) และสมการที่ (2-25) ในตารางที่ 3 เป็นค่า **Correction Factor, Cd.** ที่ **Sargis S. Safarian** ได้แนะนำไว้ ซึ่งค่า Cd. สำหรับใช้กับวิธีของแจนเสนนั้น ได้ปรับปรุงจาก **Soviet Silo Code CH-65** ส่วนที่ใช้กับวิธีของเร็มเบิร์ทได้คำนวณขึ้นใหม่ โดยใช้ค่า Cd. สำหรับวิธีของแจนเสนเป็นหลัก จะเห็นว่าค่า Cd. ที่ **Sargis S. Safarian** แนะนำไว้ตามตารางที่ 3 นี้ละเอียดกว่าของ **ACI Committee 313**[5] เนื่องจากได้ให้ค่าสำหรับไซโลคอนกรีตและไซโลที่ทำด้วยเหล็กชนิดต่าง ๆ ทั้งที่เป็นไซโลเดี่ยวหรือที่รวมเป็นหมู่ และมีรูปหน้าตัดต่าง ๆ นอกจากนั้นยังแยกออกไปตามชนิดของวัสดุที่บรรจุอีกด้วย

ในรูปที่ 4 เป็นกราฟแสดงหน่วยแรงดันด้านข้างสำหรับใช้ในการคำนวณออกแบบไซโล ซึ่ง **Sargis S. Safarian**[2] ได้แนะนำไว้นอกเหนือจากการใช้ค่า **Correction**

Factor, Cd. ในตารางที่ 3 เส้นกราฟนี้เป็นผลที่ได้จากการทดสอบวัดค่าแรงดันด้านข้างที่เกิดกับผนังไซโลในขณะถ่ายวัสดุที่บรรจุออก ซึ่งพบว่าแรงดันส่วนเพิ่มเนื่องจากการเคลื่อนตัวของวัสดุ (Overpressure) จำนวนมากเกิดขึ้นบริเวณตั้งแต่พื้นไซโลขึ้นไปเป็นระยะประมาณ $\frac{2}{3}$ ของความสูงทั้งหมด ในขณะที่เกิดขึ้นเป็นส่วนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วที่ความสูงนอกเหนือจากนี้ขึ้นไป จากปรากฏการณ์นี้เอง Sargis S. Safarian จึงได้เสนอเส้นกราฟนี้ขึ้นเพื่อสะดวกในการวิเคราะห์แรงดันสำหรับใช้ในการคำนวณออกแบบได้แบ่งเส้นกราฟนี้ออกเป็น 3 ส่วน ตามลักษณะของแรงดันที่เกิดกับผนังไซโลที่ตรวจสอบได้ คือ

<u>ส่วนที่ 1</u> เป็นส่วนบนสุดวัดจากระดับปากของไซโลหรือผิวของวัสดุที่บรรจุลงมาเป็นความลึก $H_1 = D \tan\phi$ เป็นส่วนที่เกิดแรงดันส่วนเพิ่ม (Overpressure) จำนวนน้อยมากจากผลของลักษณะการกองตัวของวัสดุ (Arching) ในบางแห่งการคำนวณแรงดันด้านข้างที่เกิดในส่วนนี้จะใช้ทฤษฎีของแรงคืน (Rankine's Theory) และเพิ่มหน่วยแรงดันที่คำนวณได้โดยพิจารณารูปร่างของไซโล สำหรับ Correction Factor Cd. ในบริเวณนี้สำหรับไซโลคอนกรีตทุกชนิดจะเท่ากับ 1.35 เมื่อใช้กับแรงดันที่คำนวณโดยวิธีของแจนเสน และเท่ากับ 1.00 เมื่อใช้กับที่คำนวณโดยวิธีของเร็มเบิร์ท

<u>ส่วนที่ 2</u> เป็นส่วนตั้งแต่พื้นไซโลขึ้นไปเป็นระยะ $\frac{2}{3}$ ของความสูงทั้งหมด ซึ่งผนังของไซโลจะต้องรับแรงดันมากที่สุดทั้งแรงดันเนื่องจากน้ำหนักตามปกติของไซโล และแรงดันส่วนเพิ่ม (Overpressure) ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของวัสดุ Correction Factor Cd. ในส่วนนี้ขึ้นกับประเภทของโครงสร้างตามที่แสดงในตารางที่ 3

<u>ส่วนที่ 3</u> เส้นกราฟในส่วนที่ 3 นี้ ประเมินให้มีลักษณะเป็นเส้นตรง เป็นส่วนที่เชื่อมต่อค่าหน่วยแรงดันสูงสุดในส่วนที่ 1 กับหน่วยแรงดันต่ำสุดในส่วนที่ 2 ถ้า H_1 เท่ากับ H/3 เส้นกราฟในส่วนนี้จะเป็นเส้นตรงในแนวระดับ

ถ้าไซโลเป็นชนิดถ่ายวัสดุออกทางด้านล่าง และลักษณะการถ่ายวัสดุเป็นแบบเยื้องศูนย์ (Eccentric Discharge) จะทำให้หน่วยแรงดันด้านข้างที่เกิดในไซโลเพิ่มขึ้นด้วย เพราะฉะนั้นจะต้องเพิ่มค่าหน่วยแรงดันสำหรับใช้ในการคำนวณออกแบบเนื่องจากสาเหตุนี้ด้วย

ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังกล่าวข้างต้น Sargis S. Safarian ได้แสดงวิธีคำนวณหน่วยแรงดันด้านข้างที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากลักษณะการถ่ายวัสดุออกแบบเยื้องศูนย์ไว้เช่นเดียวกัน ซึ่งได้แยกกล่าวรายละเอียดไว้โดยเฉพาะในหัวข้อต่อไป

<u>ผลของการถ่ายวัสดุในลักษณะเยื้องศูนย์ (Eccentric Discharge) ที่มีต่อหน่วยแรงดันในไซโล</u>

ในการทดลองตรวจสอบแรงดันที่เกิดในไซโลขณะที่ทำการถ่ายวัสดุที่บรรจุออกนั้น พบว่า ไซโลที่ถ่ายวัสดุออกทางด้านล่าง (Bottom Unloading) และช่องเปิดสำหรับถ่ายวัสดุออกเป็นแบบเยื้องศูนย์ (Eccentric Opening) มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันด้านข้างเนื่องจากน้ำหนักของวัสดุมวลเม็ดที่บรรจุ แตกต่างจากที่เกิดในไซโลที่มีช่องเปิดสำหรับถ่ายวัสดุแบบตรงศูนย์ (Concentric Opening) ในการทดลองของ Peiper แสดงให้เห็นว่าการถ่ายวัสดุออกโดยผ่านช่องเปิดแบบเยื้องศูนย์นั้น ทำให้เกิดแรงดันด้านข้างสูงสุดในด้านที่อยู่ใกล้กับช่องเปิด และในด้านตรงข้ามจะมีการเพิ่มของแรงดันน้อยกว่า ซึ่งผลการทดลองนี้ขัดกับทฤษฎีที่ยอมรับกันอยู่ทั่วไปว่า แรงดันที่กระทำกับผนังไซโลด้านที่อยู่ห่างจากช่องเปิดจะเพิ่มขึ้น ส่วนแรงดันที่กระทำกับผนังด้านที่อยู่ใกล้กับช่องเปิดจะลดลง

โดยเหตุที่ผลการทดลองของ Peiper[(2)] ตรงข้ามกับทฤษฎีที่ยึดถือกันมาแต่ดั้งเดิมโดยสิ้นเชิง และยังไม่มีการวิจัยค้นคว้าในเรื่องนี้ที่ให้ผลอย่างชัดเจนจนถือเป็นข้อยุติ และยึดถือเป็นหลักในการพิจารณาคำนวณออกแบบได้ Sargis S. Safarian[(2)] จึงได้แนะนำโดยให้ถือว่าแรงดันด้านข้างที่เกิดกับผนังไซโลจะเพิ่มขึ้นทั้งในด้านใกล้กว่า และในด้านตรงกันข้ามซึ่งห่างจากช่องเปิดแบบเยื้องศูนย์มากกว่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งสำหรับไซโลที่มีหน้าตัดรูปวงกลมก็คือ แรงดันด้านข้างส่วนที่เพิ่มขึ้นอันเป็นผลจากการถ่ายวัสดุผ่านช่องเปิดแบบเยื้องศูนย์ จะเป็นค่าคงที่ไปตามเส้นรอบวงของไซโล

การพิจารณาผลเนื่องจากการถ่ายวัสดุผ่านช่องเปิดแบบเยื้องศูนย์ในการคำนวณออกแบบ จะคำนวณหาค่าแรงดันส่วนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากสาเหตุนี้ แล้วนำไปบวก (ในทางพีชคณิต)

รวมเข้ากับหน่วยแรงดันด้านข้างที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ $p_{des.}$ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2-23)

ขนาดของหน่วยแรงดันส่วนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการถ่ายวัสดุผ่านช่องเปิดแบบเยื้องศูนย์ $(p_e)_Y$ นั้น ถือว่าเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอตามความลึกวัดจากระดับปากของไซโล หรือผิวของวัสดุที่บรรจุจนมีค่าสูงสุด $(p_e)_H$ ที่ขอบบนของกรวย(Hopper) และจากนั้นจะลดลงในลักษณะของเส้นตรงจนมีค่า $(p_e)_o = 0$ ที่ขอบล่างของกรวย

ค่าของ $(p_e)_Y$ และ $(p_e)_H$ แสดงได้ในรูปของสมการ ดังนี้

$$(p_e)_Y = \frac{Y}{H}(p_e)_H \qquad (2\text{–}27)$$

$$(p_e)_H = (p_i)_H - p_H \qquad (2\text{–}28)$$

และ

$$(p_e)_{Y\ des.} = C_d\,(p_e)_Y \qquad (2\text{–}29)$$

โดยที่

$(p_e)_H$ = หน่วยแรงดันด้านข้างส่วนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากลักษณะการถ่ายวัสดุที่บรรจุออกแบบเยื้องศูนย์ ที่ระยะ H หรือระยะจากระดับปากของไซโล หรือผิวของวัสดุจนถึงระดับขอบด้านบนของกรวย (Hopper)

$(p_i)_H$ = หน่วยแรงดันด้านข้างที่กระทำกับผนังไซโลจินตภาพ (Imaginary Silo) (รูปที่ 5) ที่ความลึก H ซึ่งคำนวณได้โดยวิธีของแจนเสน [สมการ (2-3)] หรือวิธีของเร็มเบิร์ท [สมการ (2-11)]

ในรูปที่ 5 ก.และ 5 ข. เป็นไซโลจินตภาพที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมและวงกลมตามลำดับ ซึ่งใช้หาค่า $(P_i)_H$ เพื่อใช้ในการคำนวณหน่วยแรงดันที่มีสาเหตุมาจากลักษณะการถ่ายวัสดุแบบเยื้องศูนย์ $(P_e)_H$ ในสมการที่ (2-28) ไซโลจินตภาพที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมกระทำ

ได้โดยขยายขนาดความยาวของด้าน a (หรือ b) ออกไปอีกเป็นระยะ 2 เท่าของระยะเยื้องศูนย์ e_a (หรือ e_b) ดังแสดงในรูป 5 ก. และในกรณีที่ช่องเปิดสำหรับถ่ายวัสดุมีลักษณะเยื้องศูนย์กับด้านทั้งสองด้าน การคำนวณค่า $(p_i)_H$ ที่กระทำกับด้าน a ให้ขยายด้าน a ออกไปเป็นระยะ 2 e_a และสำหรับค่า $(p_i)_H$ ที่กระทำกับด้าน b ก็ให้ขยายด้าน b ออกไปเป็นระยะ 2 e_b เช่นเดียวกัน ส่วนไซโลจินตภาพของไซโลที่มีรูปหน้าตัดเป็นวงกลมกระทำได้โดยใช้จุดศูนย์กลางของช่องเปิดสำหรับถ่ายวัสดุเป็นจุดศูนย์กลางของไซโลจินตภาพ ซึ่งจะมีรัศมีเท่ากับรัศมีของไซโลจริงบวกด้วยระยะเยื้องศูนย์ ดังแสดงในรูป 5 ข. หลังจากนั้นจะสามารถคำนวณค่า $\left[(p_e)_Y\right]_{des.}$ ได้โดยสมการ (2-29) เพราะฉะนั้นหน่วยแรงดันด้านข้างที่จะใช้ในการคำนวณออกแบบไซโลชนิดถ่ายวัสดุออกทางด้านล่าง และมีช่องสำหรับถ่ายวัสดุออกเป็นแบบเยื้องศูนย์ จึงเขียนได้ดังนี้คือ

$$(p_Y)_{des.} = Cd\left[p_Y \pm \frac{Y}{H}(p_e)_H\right] \qquad (2\text{-}30)$$