



## Evaluasi Kondisi Kebulatan Struktur Dinding Silo Penyimpan Biji Gandum Berkapasitas 4650 Ton

Sukamta<sup>1</sup> Susilo Adi Widyanto<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro

\*<sup>1</sup>susiloadiw@gmail.com

Received: 5 Maret 2021 Revised: 23 Desember 2021 Accepted: 26 Desember 2021

### Abstract

*This paper discusses the evaluation of asymmetrical inflating pattern phenomenon on the silo wall due to loading. The wall structure used corrugated wall modules with bolted connections. The storage capacity of the observed silo is 4,650 tons of wheat grains with a diameter of 19 m and a height of 20.875 m. Numerical analysis was performed using the finite element method. The condition of the bolt connection is directly measured using a torque wrench. Measurement and analysis is carried out when the silo is full or empty. The measurement results show that the bolt tightening torque in the full capacity loading of grain is about 2 times than that of when empty. This indicates that the silo walls are subjected shear stress of bolts on the overlap area between wall modules. The asymmetrical inflating pattern of the silo wall during loading is caused by the variation of the bolt tightness torque at the connection between the wall modules. The calculation results show that the minimum bolt tightness torque to produce friction stress (in the overlap area between wall modules) which is equal to the grain pressure stress is 47.36 Nm.*

**Keywords:** Silo, overlap area between wall modules, asymmetrical inflating pattern, bolt tightening torque

### Abstrak

*Paper ini membahas penyebab fenomena ketidak-simetrisan pola penggelembungan akibat pembebanan pada dinding silo yang menggunakan modul dinding corrugated dengan sambungan baut. Kapasitas penyimpanan silo yang diobservasi adalah 4650 ton biji gandum berdiameter 19 m dengan tinggi 20,875 m. Analisis numerik dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga. Kondisi sambungan baut diukur secara langsung dengan menggunakan kunci torsi. Pengukuran dan analisis dilakukan pada saat silo terisi penuh maupun kosong. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada saat diisi biji gandum secara penuh, besar torsi pengencangan baut pengikat antar modul dinding sekitar 2x torsi pengencangan baut pada saat kosong. Hal ini menunjukkan bahwa dinding silo dikenai tegangan geser oleh baut. Adapun ketidak-simetrisan pola penggelembungan dinding pada saat pembebanan disebabkan karena bervariasinya torsi kekencangan baut pada sambungan antara modul dinding. Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa torsi kekencangan baut minimum untuk menghasilkan tegangan gesek (pada bidang overlap sambungan antar modul dinding) yang sama dengan tegangan desak grain adalah sebesar 47,36 Nm.*

**Kata kunci:** Silo, bidang overlap antar modul dinding, pola penggelembungan tidak simetris, torsi pengencangan baut

### Pendahuluan

Dalam pengoperasiannya dinding silo dibebani gaya tekan dalam arah radial dari butiran material yang tersimpan. Distribusi tekanan dalam arah horisontal memenuhi fungsi hiperbolik, sedangkan dalam arah vertikalnya, koefisien tekanan besarnya bervariasi terhadap kedalaman dan tergantung pada

kekakuan relatif dari jenis serbuk dan dinding silo (Goodey *et al*, 2006). Silo berpenampang lingkaran pada umumnya didesain berdasarkan pada beban yang dominan berupa gaya-gaya membran (Brown, 1998; Rotter, 1987). Prediksi tekanan dinding didasarkan pada keseimbangan gaya pada irisan horisontal yang diakibatkan oleh *granular solid* yang disimpan (Janssen, 1895) dan asumsi harga

konstanta untuk rasio tekanan lateralnya  $K_m$  (rasio tekanan rata-rata pada dinding yang menyebabkan tegangan vertikal dalam *granular solid* di berbagai level) (Rotter, 2001; ACI, 1991; DIN 1055, 1987).

Pada awalnya desain silo didasarkan pada asumsi bahwa *bulk solid* bersifat seperti *liquid*. Namun sesungguhnya *granular* material dapat menahan gaya geser statik. Sifat kohensif suatu material dapat membentuk pola aliran steady tertentu (Gökalp & Bundy, 2010). Antonowics *et al*, 2014, menyatakan desain silo berdinding plat baja untuk penyimpanan palet, ada parameter tambahan yang penting untuk ditambahkan dalam desain silo.

Mereka menganalisis pengaruh beban tak terduga yang terjadi pada profil lengkung silo dan pengaruh fenomena gangguan aliran material curah pada struktur silo. Dari hasil studinya diperoleh bahwa kedua hal tersebut perlu dipertimbangkan dengan baik dalam aspek desain silo bahkan perlu diintegrasikan dengan perlengkapan teknologi baru untuk proses monitoring sehingga dapat mengantisipasi potensi kegagalannya.

Bila dilihat dari pola kegagalan yang terjadi, sebagian besar kerusakan silo disebabkan oleh tekanan pada dinding yang tidak terprediksi yang terjadi ketika grain bergerak. Beberapa bentuk kegagalan lainnya berupa kegagalan sistem pondasi, tekanan berlebih saat pengeluaran grain, gaya gesek, tekana pada dasar silo dan jalur luaran silo yang tidak normal. Ketidak-homogenan material grain dalam silo menyebabkan sulitnya menentukan tekanan yang bekerja pada dinding silo (Molenda *et al*. 2009).

Gesekan dinding merupakan faktor penting dalam penentuan tekanan pada dinding silo (Airy, 1897). telah melakukan investigasi untuk menentukan koefisien gesekan antara *grain* dan material dinding. Sedangkan Jamieson, 1904 telah melakukan serangkaian uji tekanan *grain* untuk model silo berpenampang lingkaran, bujur sangkar dan kotak berbahah kayu maupun baja. Sedangkan Reimberts, 1976 telah melakukan pengujian silo dengan memvariasikan ukuran sehingga diperoleh formulasi tekanan lateral dan vertikal yang bekerja pada dinding dan lantai silo. Tang *et al*, 2015, melakukan analisis struktur silo dengan Finite Element Method terhadap dua jenis struktur silo yaitu *cylindrical wall bearing* dan *profile steel bearing*.

Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa pada kondisi pembebanan yang sama, silo baja dengan bantalan profil-baja dan bantalan dinding silinder memiliki nilai yang sama pada tegangan Von Mises, tetapi silo baja dengan bantalan profil baja

memiliki perpindahan radial yang lebih kecil dan kemampuan ketahanan tekuk yang lebih baik. Sementara itu, volume baja total berkurang 8,0% dibandingkan dengan silo baja dengan bantalan dinding silinder. Oleh karena itu, struktur silo dengan bantalan baja profil tidak hanya memiliki volume baja yang lebih sedikit tetapi juga memiliki stabilitas yang baik

Pada saat silo diisi dengan *grain*, dinding silo mengalami penggelembungan, dimana secara ideal pola penggelembungan tersebut terjadi secara simetris terhadap sumbunya. Namun akibat kondisi tertentu penggelembungan dinding silo dapat terjadi secara tidak simetris. Pada konstruksi silo dengan dinding modular (dimana dinding tersusun dari modul-modul dinding dengan sambungan baut), kondisi ketidaksimetrisan pola penggelembungan dapat menyebabkan robeknya dinding akibat tegangan geser yang terjadi.

Paper ini secara khusus membahas mengenai fenomena penggelembungan dinding silo yang tidak simetris terhadap sumbunya, mencari penyebab dan menentukan metode penanganan yang harus dilakukan. Obyek pengukuran berupa konstruksi silo yang berfungsi untuk menampung biji gandum (*grain*) dengan kapasitas penyimpanan sebesar 4650 ton dengan diameter 19 m dan tinggi dinding sebesar 20,875 m.

## Metode

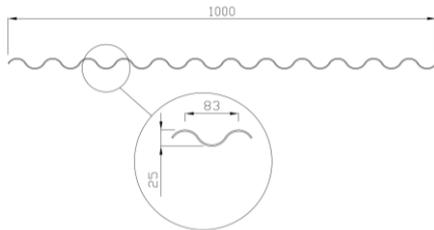
Fenomena ketidaksimetrisan yang terjadi pada pola penggelembungan dinding silo pada saat dibebani diduga sebagai akibat ketidak-seragaman torsi pengencangan baut pengikat antar modul dinding. Hipotesis tersebut dipastikan dengan pengukuran torsi pengencangan baut aktual baik pada baut-baut pengikat antar modul dinding maupun pada baut-baut pengikat modul dengan pengaku. Pengukuran torsi pengencangan baut merupakan besar torsi yang menyebabkan baut dalam kondisi slip, yang dilakukan pada silo dalam kondisi terisi penuh maupun kosong.

Dari hasil pengukuran torsi tersebut, korelasi pola penggelembungan dinding silo terhadap kondisi kekencangan baut dapat ditentukan. Berdasarkan investigasi awal yang telah dilakukan, pola penggelembungan dinding silo yang tidak simetris disebabkan oleh terjadinya slip pada bidang overlap sambungan antar modul dinding yang kondisinya tidak seragam dari berbagai lokasi sambungan. Hal ini terkait erat dengan torsi pengencangan baut pada sistem sambungan tersebut. Penentuan besarnya torsi pengencangan baut minimum pada sambungan antar modul dinding agar tidak terjadi slip dapat dilakukan

setelah distribusi tegangan yang terjadi pada dinding silo diketahui. *Finite Elemen Method* (FEM) digunakan untuk menentukan distribusi tegangan yang terjadi pada dinding. Torsi pengencangan baut ditentukan berdasarkan besarnya tegangan gesek yang dihasilkan pada bidang *overlap* antar modul dinding karena gaya normal yang dihasilkan oleh torsi pengencangan baut sambungan antar modul dinding. Struktur silo yang diobservasi terdiri atas struktur dinding dan struktur pengaku.

### Struktur dinding

Struktur dinding terbuat dari *galvanized sheet plate* bergelombang (*corrugated*) dengan ketebalan 2.5 mm dari bahan St-40. Dimensi modul dinding panel silo yang digunakan adalah panjang 3000 mm dan lebar 1100 mm. Profil dinding yang digunakan pada konstruksi silo seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Sambungan antar modul dinding menggunakan baut M12 yang dipasang berjajar secara paralel, sehingga setiap sambungan menggunakan 38 baut dengan luasan overlap 1000 x 95 mm. Formasi baut pengikat antar modul dinding dan pengaku seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.



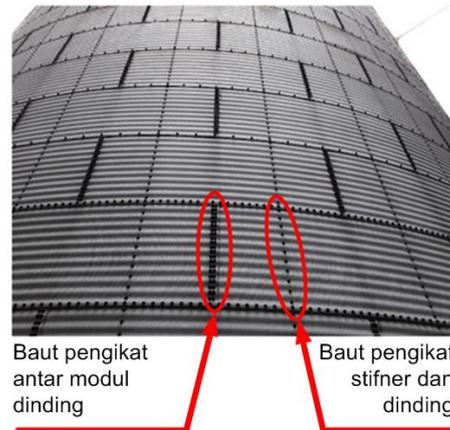
Gambar 1. Profil dinding yang digunakan dalam struktur silo (*corrugated wall*).

### Struktur Pengaku

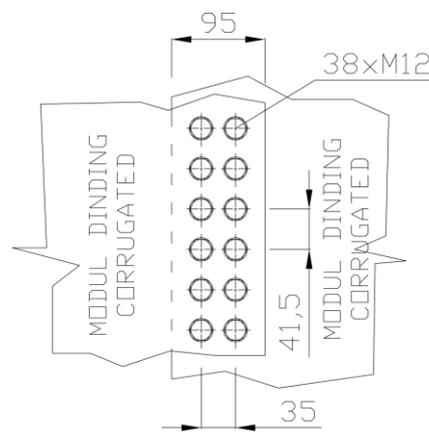
Struktur pengaku (material pengaku adalah St-40) berfungsi untuk mendistribusikan gaya desak *grain* material dalam arah vertikal yang menghubungkan modul-modul dinding silo dalam arah vertikal. Sambungan antara struktur pengaku dan dinding silo menggunakan baut M10 yang disusun berjajar dengan jarak antar baut 100 mm. Dinding silo bagian dalam diperkuat dengan struktur pengaku sebanyak 40 buah. Geometri pengaku yang digunakan terdiri dari dua jenis, yaitu pengaku dengan sirip yang ditanam dalam sistem pondasi silo (Gambar 3) dan terpasang pada bagian paling bawah hingga ketinggian 3 m (Gambar 4a) dan pengaku tanpa sirip (Gambar 4b) yang terpasang di atas pengaku bersirip (di atas ketinggian 3 m).

Sambungan antar pengaku sebagai fungsi ketinggian menggunakan sambungan plat yang diikat dengan 6 formasi baut. Formasi baut pengikat

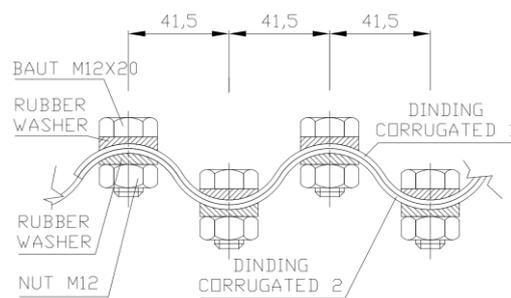
pengaku dengan modul dinding ditunjukkan dalam Gambar 5.



(a)



(b)



(c)

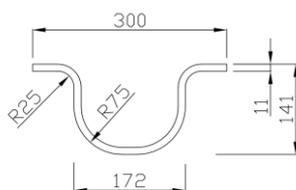
Gambar 2. (a). Formasi sambungan baut sebagai pengikat pengaku dan antar modul dinding, (b). Formasi baut pengikat pada sambungan antar modul dinding, (c). Pandangan samping formasi baut pengikat antar modul dinding.

Prosedur evaluasi kebulatan struktur dinding silo yang meliputi pengukuran ketidakbulatan profil dinding, menentukan penyebabnya dan tahapan

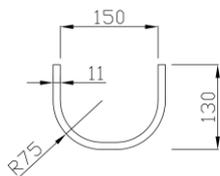
perhitungan torsi pengencangan baut antar modul dinding mengikuti diagram alir dalam Gambar 6.



Gambar 3. Pemasangan pengaku bersip pada pondasi silo.

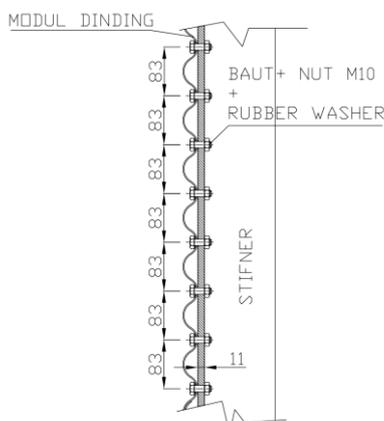


(a)



(b)

Gambar 4. a. Dimensi struktur stifner bersip (sampai dengan ketinggian 3 m), b. Dimensi struktur pengaku tanpa sirip (ketinggian di atas 3 m).



Gambar 5. Formasi baut pengikat modul dinding dan stifner



Gambar 5. Diagram alir evaluasi kebulatan struktur dinding silo dan penentuan torsi pengencangan baut antar modul dinding.

## Hasil dan Pembahasan

Hasil pengukuran torsi pengencangan baut pada sambungan antar modul dinding dan antara dinding dan pengaku pada kondisi silo kosong maupun terisi penuh diuraikan dalam Tabel 1 dan 2. Dari tabel-tabel tersebut ditunjukkan bahwa torsi pengencangan baut pengikat pengaku relatif lebih rendah dibandingkan torsi baut pengikat antar modul dinding. Hal tersebut sesuai dengan aspek desainnya dimana baut pengikat antar dinding dibuat lebih besar (M12) dibandingkan baut pengikat stifner (M10).

Pada kondisi silo terisi penuh (sekitar 4650 ton) torsi pengencangan baut baik meningkat sekitar dua kali nya dibandingkan pada saat silo kosong. Pada sambungan antar modul dinding, torsi pengencangan baut meningkat dari rata-rata 20,3 menjadi 48,9 Nm, sedangkan pada pengaku dari 12,8 menjadi 24,2 Nm. Kondisi ini menunjukkan bahwa bahwa baut pada sambungan antar modul dinding maupun pada sambungan antara pengaku dan dinding mengalami tegangan geser yang ditimbulkan oleh gerak relatif akibat pengisian silo. Perubahan torsi pengencangan baut akibat pembebanan silo sesungguhnya merupakan kondisi yang tidak dikehendaki, dikarenakan tegangan geser yang terjadi pada baut dapat menyebabkan gagalnya baut ataupun sobeknya struktur dinding. Kegiatan pengukuran torsi pengencangan baut ditunjukkan dalam Gambar 7.



Gambar 6. Pengukuran torsi pengencangan baut pengikat dinding dan stiffner.

Tabel 1. Torsi pengencangan baut pada dinding silo dalam keadaan kosong

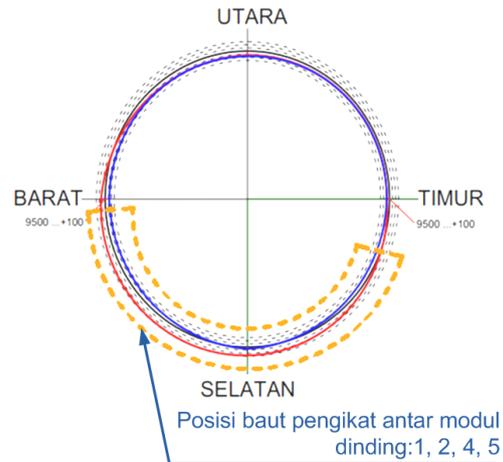
Silo Koson			
Baut pengikat stiffner		Baut pengikat sel dinding	
posisi	torsi(Nm)	Posisi	Torsi (Nm)
1	15	1	25
2	9	2	23
3	13	3	13
4	12	4	15
5	16	5	17
6	12	6	14
		7	17
		8	18
<b>Rata-rata</b>	<b>12,8</b>	<b>rata-rata</b>	<b>20,3</b>

Tabel 2. Torsi pengencangan baut pada dinding silo dalam keadaan terisi penuh (4650 ton)

Silo terisi penuh (4650 ton)			
Baut pengikat stiffner		Baut pengikat sel dinding	
posisi	torsi(Nm)	Posisi	Torsi (Nm)
1	18	1	46
2	25	2	35
3	45	3	75
4	12	4	45
5	15	5	38
6	22	6	48
		7	62
		8	59
<b>Rata-rata</b>	<b>12,8</b>	<b>rata-rata</b>	<b>20,3</b>

Bila dikaitkan dengan pola pengelembungan dinding silo yang terjadi akibat pembebanan (pengisian silo dengan grain sebesar 4650 ton), korelasi antara torsi pengencangan baut antar modul dinding dan pola pengelembungan dinding silo ditunjukkan dalam Gambar 8. Dari hasil pengukuran yang telah dilakukan, dinding silo

mengalami pola pengelembungan yang tidak simetris terhadap sumbu pada saat silo diisi dengan kapasitas penuh (4650 ton).



Keterangan:  
Biru : kontur dinding ketika silo kosong  
Merah : kontur dinding ketika silo penuh

Gambar 7. Kondisi kebulatan dinding Silo pada ketinggian 18 meter saat kosong (garis biru) dan saat silo diisi grain sebanyak 4625 ton (garis merah).

Besar torsi pengencangan baut dapat terjadi secara konstan baik pada saat silo kosong maupun silo terisi bila besar torsi pengencangan baut yang dipakai untuk menghasilkan tegangan gesek (tegangan gesek yang terjadi pada bidang overlap antar modul dinding) besarnya minimal sama dengan tegangan dinding yang terjadi akibat tekanan desak grain material. Pada kondisi normal, besarnya tegangan desak yang terjadi pada dinding silo dihitung berdasarkan besar tekanan dinding yang terjadi dalam arah radial. Besarnya tegangan desak pada dinding proporsional terhadap tekanan kolom fluida (tekanan akibat ketinggian) dengan memberikan konstanta kompensasi kemampuan alir grain seperti ditunjukkan dalam Persamaan 1. Pada fluida cair nilai konstanta tersebut sebesar 1 yang artinya kemampuan alirnya sama untuk segala arah.

$$P = k \cdot \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

dimana P adalah tekanan desak dinding, k adalah konstanta kompensasi masa alir grain pada arah radial, diambil sebesar 0,9,  $\rho$  adalah masa jenis grain, untuk biji gandum sebesar  $775 \text{ kg/m}^3$  dan h adalah tinggi kolom (jarak antara permukaan grain material dan ketinggian yang ditinjau).

Untuk menentukan torsi pengencangan baut sehingga menghasilkan tegangan gesek yang sama dengan tegangan desak dinding, maka h diambil sebesar 20,857 m yang mana nilai ini sama dengan tinggi dinding silo. Nilai tersebut menunjukkan bahwa dinding yang dirujuk berposisi paling bawah yaitu pada ketinggian 0,5 m dari permukaan lantai.

Dengan Persamaan 1, tekanan (P) yang terjadi adalah sebesar 145,78 kN/m<sup>2</sup>.

Analisis FEM dilakukan untuk menentukan besarnya tegangan desak dinding yang terjadi pada lokasi tersebut. Asumsi yang digunakan sebagai dasar analisis FEM diuraikan sebagai berikut: Konstruksi silo dalam kondisi tegak (dalam arah vertikal) sehingga struktur dinding hanya mengalami tegangan desak grain material.

Pemodelan struktur setinggi 1 m yang diambil pada bagian dasar silo, sehingga model struktur mengalami beban masa struktur di atasnya yang dikenakan pada seluruh luasan penampang stiffner, yang besarnya: (*Massa stiffner (40 batang) setinggi 20.857 m + massa dinding + massa struktur tutup silo*)/8. Selanjutnya masa struktur tersebut didefinisikan sebagai beban F. Pemodelan struktur dilakukan pada 1/8 lingkaran dinding silo seperti ditunjukkan dalam Gambar 9.

Model pembebanan struktur didefinisikan sebagai berikut: pada ujung model dinding dikenakan tumpuan jepit yang mewakili kondisi yang simetris, beban struktur di atasnya dikenakan pada permukaan ujung stiffner, sedangkan permukaan stiffner bagian bawah dikenakan tumpuan jepit. Seluruh permukaan dinding bagian dalam dikenakan tekanan desak grain material sebesar 145,78 kN/m<sup>2</sup>. Model pembebanan tersebut ditunjukkan dalam Gambar 10.

Konvergensi hasil analisis Finite Elemen Method ditingkatkan dengan menambah jumlah elemen dalam pemodelan (meshing). Hasil analisis tegangan maksimum pada struktur dinding yang terjadi tidak lebih dari 2.5%. Analisis FEM menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada pengaku yang terkena beban desak biji gandum maupun gaya berat massa struktur silo di atasnya, yaitu sekitar 13,5 kg/mm<sup>2</sup>. Tegangan maksimum yang terjadi pada bidang overlap antar modul dinding (lokasi terletak di antara dua pengaku) adalah sekitar 3 kg/mm<sup>2</sup> (Gambar 11). Selanjutnya besar tegangan ini akan digunakan

untuk menghitung gaya tarik antar modul dinding yang terjadi akibat tekanan desak oleh grain material.

Bila tegangan yang terjadi pada bidang overlap antar modul dinding diasumsikan sebagai akibat dari tegangan gesek yang dihasilkan oleh torsi pengencangan baut, maka torsi pengencangan baut minimum untuk menghasilkan gaya normal yang sesuai dapat dihitung dengan prosedur sebagai berikut:

Luas penampang melintang dinding = 1250 mm x 5 mm = 7500 mm<sup>2</sup>

Gaya tarik dinding akibat tegangan desak = 7500 mm<sup>2</sup> x 3 kg/mm<sup>2</sup> = 22500 kg

Jumlah baut efektif yang digunakan pada sambungan tiap modul dinding (terdiri dari 2 bidang overlap) = 38 buah

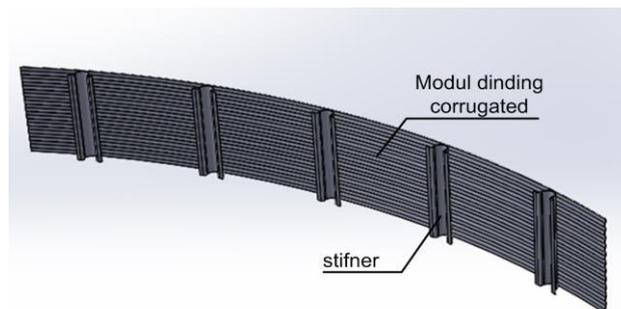
Gaya gesek yang harus ditahan oleh tiap baut = 22500/38 = 592,1 kg

Luas bidang efektif tekanan baut (diameter rata-rata kepala baut = 16 mm) = 68,36 mm<sup>2</sup>, dengan r<sub>dalam</sub> = 6,5 mm dan r<sub>luar</sub> = 8 mm

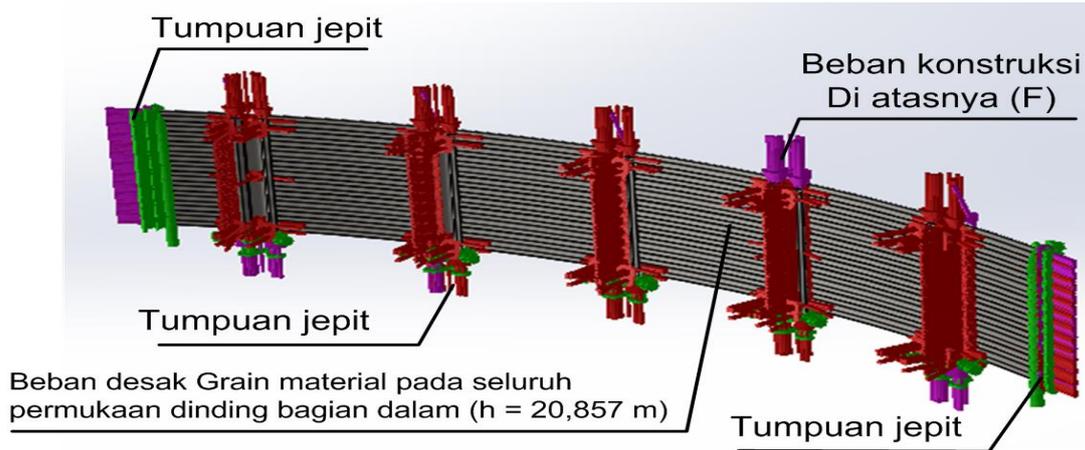
Besar torsi pengencangan baut dihitung dengan Torsi = gaya gesek x r, yaitu 592,1 x 8 = 4736 kgmm (47,36 Nm).

Dari hasil perhitungan di atas terlihat bahwa untuk menghasilkan tegangan gesek pada bidang overlap antar modul dinding yang nilainya sama dengan tegangan yang terjadi pada dinding pada saat silo terisi penuh, baut pengikat antar modul dinding perlu diberikan torsi pengencangan sebesar 47,36 Nm, dimana torsi tersebut diberikan pada saat silo kosong.

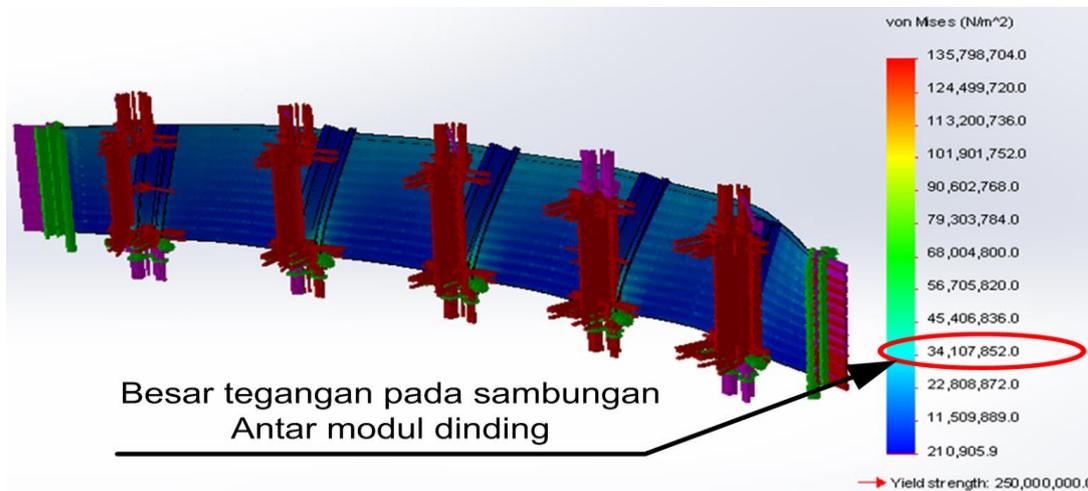
Dibandingkan dengan data hasil pengukuran torsi pengencangan baut pengikat antar modul dinding (Tabel 1), torsi pengencangan baut aktual pada kondisi silo kosong jauh lebih kecil (rata-rata sebesar 20,3 Nm) dibandingkan dengan harga torsi pengencangan baut minimum hasil perhitungan (47,36 Nm). Sedangkan pada kondisi penuh besar torsi pengencangan baut (rata-rata sebesar 48,9 Nm) relatif sama dengan hasil perhitungan.



**Gambar 8. Analisis FEM dilakukan pada 1/8 lingkaran dinding silo untuk mengestimasi tegangan maksimum pada dinding silo**



Gambar 9. Model pembebanan pada analisis FEM



Gambar 10. Distribusi tegangan pada dinding silo bagian paling bawah, dimana ketebalan dinding adalah 5 mm.

Kondisi ini menunjukkan bahwa kekuatan sambungan antar modul dinding aktual dihasilkan oleh tahanan baut pengikat antar modul dinding untuk menerima tegangan geser yang terjadi akibat tegangan desak grain. Pada kondisi tersebut, besar pembebanan baut dapat dihitung dengan membagi gaya geser yang harus ditahan oleh tiap baut (hasil perhitungan di atas adalah 592,1 kg) dengan luasan penampang efektif baut M12 (yaitu sekitar 78,58 mm<sup>2</sup>), yang besarnya sekitar 7,53 kg/mm<sup>2</sup>. Selanjutnya nilai tersebut dibandingkan dengan tegangan geser ijin material baut yaitu St-40.

Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa tegangan geser yang dialami oleh baut sambungan antar modul dinding akibat pengisian silo secara penuh (4650 ton) adalah sekitar 31,4% dari kekuatan geser materialnya. Pada kondisi ini modul dinding mengalami konsentrasi tegangan yang terjadi di sekitar lubang baut yang berpotensi menyebabkan terjadinya sobekan pada dinding tersebut. Oleh karena itu proses pengencangan kembali baut

pengikat antar modul dinding perlu dilakukan sehingga gaya tarik dinding yang terjadi akibat tekanan desak grain material didistribusikan secara merata pada seluruh bidang overlap antar modul dinding.

### Kesimpulan

Kondisi pola penggelembungan dinding silo akibat pembebanan (dalam kondisi terisi penuh) sudah diinvestigasi, dimana penggelembungan dinding silo menunjukkan pola yang tidak simetris terhadap sumbu. Dari hasil pengukuran yang dilakukan diperoleh bahwa fenomena ketidaksimetrisan pola penggelembungan tersebut disebabkan oleh distribusi torsi pengencangan baut antar modul dinding yang tidak seragam. Perbesaran penggelembungan terjadi pada torsi pengencangan baut yang rendah sehingga terjadi gerak relatif pada permukaan overlap antar modul dinding. Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa torsi pengencangan

baut (antar modul dinding) minimal adalah sebesar 47,35 Nm, dimana pada kondisi ini gaya normal yang terjadi telah mampu menghasilkan tegangan gesek antar bidang overlap yang besarnya sama dengan tegangan desak yang dihasilkan oleh grain.

Dengan dipresentasikannya metode perhitungan torsi pengencangan minimal pada baut antar modul dinding silo, potensi kegagalan akibat robeknya dinding silo atau bahkan robohnya struktur akibat pembebanan yang tidak seragam dapat dihindari.

Di samping itu hasil evaluasi ini memberikan informasi bahwa seiring dengan waktu pengoperasian torsi pengencangan baut antar modul dinding pada silo dapat berubah akibat berubahnya karakteristik material washer (biasanya terbuat dari bahan karet) karena siklus thermal yang dialami.

Material *washer* berubah dari sifat elastis menjadi plastis dan terjadi penyusutan ketebalan yang menyebabkan menurunnya gaya normal baut pada permukaan overlap antar modul dinding. Fenomena ini dapat digunakan sebagai masukan untuk melakukan perbaikan prosedur pelaksanaan preventive maintenance, bahwa pengecekan torsi pengencangan perlu dilakukan secara berkala.

## Daftar Pustaka

- ACI 313-91. (1991). *Standard practice for design and construction of concrete silos and stacking tubes for storing granular materials*. Detroit: American Concrete Institute.
- Airy, W. (1897). The Pressures of Grain. *Minutes of Proceedings, Institution of Civil Engineers, London*, 31, 347-358.
- Antonowicz, R., Bywalski, C., & Kaminski, M. (2014). Analysis of loads and structural capacity of steel silo with corrugated wall for pelleted material. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(3), 372-379.
- Brown, C. J., & Nielsen, J. (1998). *Silos: fundamentals of theory, behaviour and design*. CRC Press.
- DIN 1055. (1987). *Design loads for buildings: Loads in silo bins*. DIN 1055 part 6. Berlin: Deutsches Institut fur Normung.
- Gaylord Jr, E. H., & Gaylord, C. N. (1984). Design of steel bins for storage of bulk solids. *Prentice-Hall Inc, P. O. Box 500, Englewood Cliffs, N. J. 07632, U. S. A, 1984*.
- Gokalp, Z., & Bundy, D. S. (2010). Analysis of Lateral Design Pressures, Vertikal Friction Forces and Bending Stress on Horizontal Corrugated Steel Silo Wall Panels. *GOU, Zirrat Fakultas Dergisi*, 27(2), 71-79.
- Goodey, R. J., Brown, C. J., & Rotter, J. M. (2006). Predicted patterns of filling pressures in thin-walled square silos. *Engineering Structures*, 28(1), 109-119.
- Janssen, H. A. (1895). Versuche uber getreidedruck in silozellen. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 39(35), 1045-1049.
- Molenda, M., Montross, M., Thompson, S.A., & Horabik, J. (2009). Asymmetry of Model Bin Wall Loads and Lateral Pressure Induced from Two- and Three Dimensional Obstructions Attached to the Wall. *Transactions of the ASABE*, 52(1), 225-233.
- Reimbert, M., & Reimbert, A. (1976). *Silos- Theory and Practice*. Trans.Clausthal Zellerfeld, West Germany: Tech Publications.
- Rotter, J. M. (2001). *Guide for the economic design of circular metal silos*. London: Spon Press.
- Rotter, J. M. (1987). Membrane theory of shells for bins and silos. *Transactions of Institution of Engineers, Australia, Mechanical Engineering*, 12(3), 135-59.
- Tang, Z., Zhous, D., Peng, C., & Wu, W. (2015). Struktural analysis of steel silos with cylindrical-wall beraing and profil-steel bearing. *The Civil Engineering Journal*, 2(12).