

Penentuan Sudut Kemiringan Kritis Struktur Dinding Silo Berkapasitas Penyimpanan 4650 Ton

Susilo Adi Widyanto^{a*}, Sukamta^b, Agus Suprihanto^a, Ojo Kurdi^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

^b Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof Sudarto SH, Tembalang, Semarang, Indonesia

*Email : susiloadiw@gmail.com

Abstract

The silo wall is designed to loaded radial pressure caused by the gravitation force of the granular material inside the silo. However, due to certain conditions, the orientation of silo construction can be un-perpendicular toward the horizontal surface. In this condition, the silo wall experiences a mixed load, these are the radial pressure and gravitation pressure. This paper discusses the determination of the critical slope angle of the silo wall construction which correlated to the stress distribution of the wall. The investigation was carried out with FEM simulation by varying the slope angle. The observed silo is used to stored wheat granular with the capacity of 4650 tones, diameter of 19 m and height of 20,875 m. The FEM simulation results show that on slope angle of 5o, the occurrence of maximum stress is 24.4 kg/mm² (the yield stress is 25 kg/mm²). The maximum stress occurs in the joint area between the wall and the stiffener. considering the maximum stress, the slope angle of 5o is the critical angle for the silo construction.

Key words : silo, critical slope angle, silo wall, stiffener

Abstrak

Konstruksi dinding silo dirancang untuk menerima beban desak dalam arah radial. Namun akibat kondisi tertentu, orientasi konstruksi silo dapat mengalami ketidak-tegak-lurusan terhadap bidang horisontalnya. Pada kondisi seperti ini, dinding silo mengalami beban gabungan yang berupa beban desak dalam arah radial dan beban gravitasi. Paper ini membahas penentuan sudut kemiringan kritis konstruksi dinding silo yang dikaitkan dengan distribusi tegangan yang terjadi. Investigasi dilakukan dengan simulasi FEM untuk konstruksi silo dengan kapasitas penyimpanan sebesar 4650 ton, diameter 19 m dengan ketinggian 20,875 m. Hasil simulasi FEM menunjukkan bahwa pada sudut kemiringan 5°, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 24,4 kg/mm², dimana besar tegangan tersebut hampir mendekati tegangan yield material yaitu 25 kg/mm². Tegangan maksimum terjadi pada daerah sambungan antara dinding dan stifner.

Kata kunci: Silo, kemiringan kritis, konstruksi dinding, stifner

1. Pendahuluan

Silo merupakan struktur yang digunakan untuk menyimpan bulk material dalam bentuk biji-bijian, semen, serbuk, tepung, produk farmasi dll, yang mengalami berbagai jenis pembebanan modulama waktu operasinya [1]. Desain struktur silo dengan material logam diutamakan untuk menahan kegagalan *buckling shell* dalam operasinya dan kekuatannya ditentukan oleh bentuk dan amplitudo dari penyimpangan geometrinya [2]. Sedangkan Teng dkk melakukan analisis ketidaksempurnaan geometri silo yang ber dinding plat baja lasan. Penelitian mereka dilakukan dengan karakterisasi ketidak-sempurnaan geometri yang digunakan sebagai dasar untuk melakukan analisis *buckling shell* pada kondisi yang sesungguhnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola ketidak-sempurnaan geometri silo berkaitan dengan jumlah panel tiap *shell*-nya. Disamping itu ditunjukkan pula bahwa proses fabrikasi struktur merupakan parameter dominan terhadap ketidak-sempurnaan geometri yang terjadi [3].

Dalam bidang pengukuran dimensional silo, Ding dkk mengembangkan suatu metode untuk pengukuran profil permukaan silo. Data profil dan hasil observasi digabungkan dalam bentuk model *least-squares adjustment* [4].

Modulanjutnya ketidaksempurnaan dinding silo dianalisis dengan deret Fourier ganda untuk menentukan model ketidak-sempurnaan geometrinya.

Dalam pengoperasiannya dinding silo dibebani gaya desak dalam arah radial dari material tersimpan. Goodey (2006) menyatakan bahwa distribusi tekanan dalam arah horisontal memenuhi fungsi hiperbolic. Sedangkan dalam arah vertikalnya, besar koefisien tekanan bervariasi terhadap kedalaman dan tergantung pada kekakuan relatif dari jenis serbuk dan dinding silo [5]. Sedangkan tegangan geser yang terjadi pada interface antara dinding dan material granular merupakan penyebab terjadinya arching [6].

Prediksi tekanan dinding didasarkan pada keseimbangan gaya pada irisan horisontal yang diakibatkan oleh material yang disimpan [7] 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) [8-10]. Oleh karena kombinasi beban yang bekerja, dinding silo akan mengalami pola penggelembungan yang dipengaruhi oleh kekakuan konstruksinya.

Secara ideal, penggelembungan dinding silo berpola simeteris terhadap sumbu silo. Namun karena aspek ketidakseragaman kekakuan dinding dan strukturnya, pola penggelembungan dinding yang tidak simetris bisa saja terjadi. Pada kondisi tersebut sebagian dinding akan mengalami beban gabungan yang berupa beban desak dan beban gravitasi akibat massa bulk material di dalam silo yang berada di atas kemiringan dinding silo. Pada kondisi yang lain, kemiringan konstruksi silo bisa terjadi akibat bergesernya sumbu simetri, sehingga moduluruh dindingnya mengalami pola kemiringan yang sama. Hal tersebut bisa terjadi akibat kesalahan instalasi atau akibat terjadinya penurunan struktur pondasi yang bersifat tidak seragam. Paper ini membahas penentuan kondisi kemiringan kristis silo yang berpotensi menyebabkan gagalnya struktur dinding silo. Analisis kekuatan dilakukan dengan simulasi FEM dengan memvariasikan sudut kemiringan dinding dan model dindingnya. Variasi kemiringan dinding secara umum akan menyebabkan bervariasinya gaya gravitasi yang bekerja pada dinding tersebut. Analisis diawali dengan menghitung gaya desak yang dialami oleh struktur silo di lokasi kritisnya. Lokasi kritis ditentukan berdasarkan beban desak maksimum yang terjadi dengan mempertimbangkan kondisi struktur yang dibebani.

2. Metode

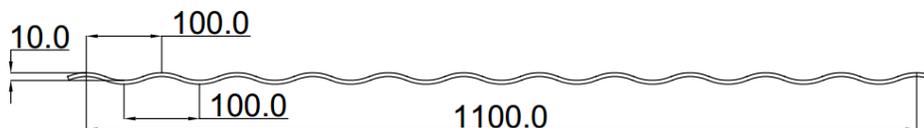
Konstruksi silo digunakan sebagai penyimpanan biji gandum sebelum proses produksi tepung dilakukan. Penjelasan mengenai konstruksi silo tersebut diuraikan sebagai berikut:

2.1. Struktur dan model dinding

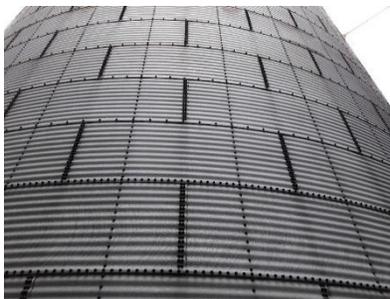
Struktur dinding terbuat dari *galvanized sheet plate* bergelombang (*corrugated*) (Gambar 1) dengan ketebalan 2,5 mm dengan material St-40 (karakteristik mekanis material St-40 diuraikan dalam Tabel 1). Dari hasil pengukuran, panjang dan lebar setiap modul dinding adalah 3000 x 1100 mm. Sambungan antar 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 stifner maupun antar modul dinding ditunjukkan dalam Gambar 2.

Tabel 1. Material stifner dan dinding silo (St-40)

Modulus Elastis	2×10^{11}	N/m ²
Poissons Ratio	0,26	
Modulus Geser	$7,93 \times 10^{10}$	N/m ²
Densitas	7850	Kg/m ³
Kekuatan Tarik	400000000	N/m ²
Kekuatan Yeild	250000000	N/m ²



Gambar 1. Profil dinding yang digunakan dalam Konstruksi silo, tebal dinding adalah 2,5 mm.

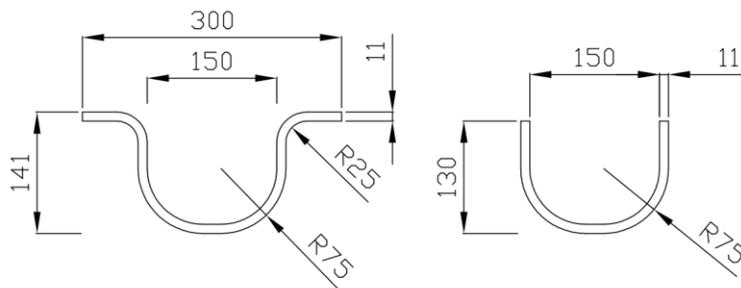


Gambar 2. Formasi sambungan baut sebagai pengikat stifner dengan dinding dan pengikat antar modul dinding.

Simulasi FEM dilakukan untuk 2 model dinding yang meliputi model dengan ketebalan dinding 5 mm (MODEL 1) dan model dengan variasi tebal dinding, yaitu 5 dan 2,5 mm yang disusun secara bertingkat (MODEL 2) untuk mewakili kondisi dinding silo pada ketinggian 5 m dari permukaan pondasinya. Simulasi FEM dilakukan pada 1/8 keliling lingkaran silo.

2.2. Struktur stifner

Struktur stifner berfungsi untuk menahan distribusi gaya desak butiran gandum dalam arah vertical. Struktur stifner menghubungkan modul-modul dinding silo dalam arah vertical. Sambungan antara struktur stifner dan dinding silo menggunakan baut M10 yang disusun berjajar dengan jarak antar baut 100 mm. Struktur stifner diletakkan di dalam dinding silo (berada di dalam silo) sejumlah 40 stifner. Geometri stifner yang digunakan terdiri dari dua jenis, yaitu stifner dengan sirip yang terpasang pada bagian paling bawah hingga ketinggian 3 m dan stifner tanpa sirip yang terpasang di atas stifner bersirip (di atas ketinggian 3 m). Sambungan stifner menggunakan plat penyambung yang diikat dengan sambungan baut. Geometri stifner seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. a. Dimensi struktur stifner bersirip, b. Dimensi struktur stifner tanpa sirip.

3. Hasil Dan Pembahasan

Pada kondisi miring, struktur dinding silo mengalami beban gabungan yang berupa gaya desak dan gaya gravitasi oleh masa partikel sebagai fungsi kemiringan dinding. Perhitungan besar gaya desak dan gaya gravitasi yang bekerja pada dinding silo diuraikan sebagai berikut:

3.1. Tekanan Desak

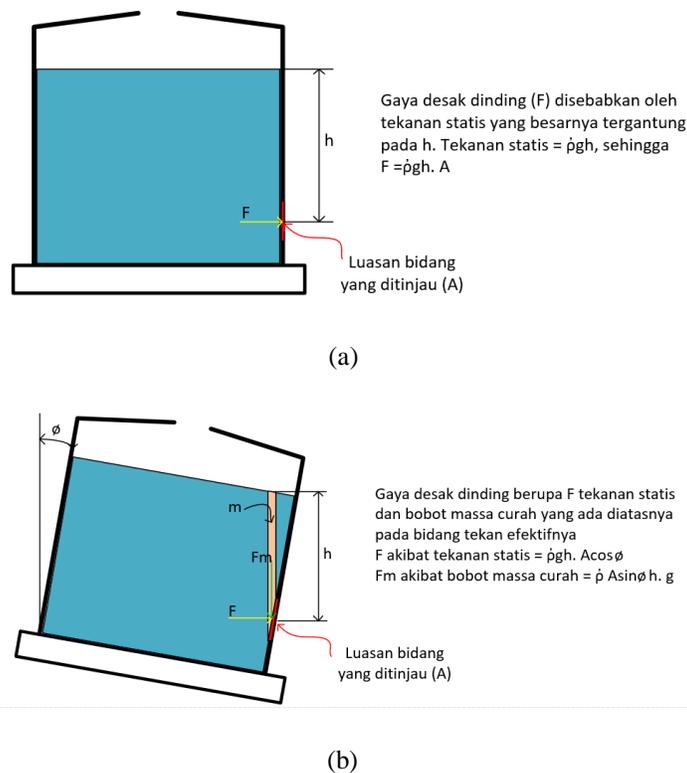
Penentuan besar tekanan desak *bulk material* (biji gandum) pada dinding silo dihitung dengan menggunakan formulasi tekanan statik fluida dengan memberikan faktor koreksi yang besarnya sesuai dengan Persamaan 1 (Gambar 4a).

$$P = 0,9 \cdot \rho_{gandum} \cdot g \cdot h \quad (1)$$

Dimana: massa jenis gandum adalah 775 kg/m^3 .

3.2. Tekanan Gravitasi

Gaya gravitasi ditentukan berdasarkan besarnya massa biji gandum yang ditahan oleh luasan dinding akibat kemiringan struktur dinding seperti ditunjukkan dalam Gambar 4b.



Gambar 4. a. Gaya yang bekerja pada dinding silo dalam kondisi tegak, b. Gaya yang bekerja pada dinding silo pada kondisi miring.

Perhitungan massa yang ditanggung oleh modul dinding yang ditinjau terhadap fungsi kemiringannya (ϕ) dapat didekati dengan Persamaan 3:

$$\text{Massa} = \rho \times \text{volume} \quad (2)$$

$$\text{volume} = \sin \phi \times 2,9 \times (20,875 \cos \phi) \quad (3)$$

Lebar dinding yang ditinjau adalah 1 m, sedangkan panjang dinding adalah 2,9 m (merupakan dimensi satu modul dinding). Dengan Persamaan 2 dan 3 di atas, massa yang ditanggung oleh modul dinding paling bawah sebagai fungsi kemiringan dinyatakan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Tambahan massa biji gandum pada satu modul dinding sebagai fungsi kemiringan silo

KEMIRINGAN ($^{\circ}$)	VOLUME (m^3)	MASSA (kg)
0,96	1,02	787
2	2,12	1639
5	5,02	3890
10	10,02	7765
15	14,94	11580

3.3. Sudut Kemiringan 0,96 $^{\circ}$

Model pembebanan dinding silo diuraikan sebagai berikut:

1. Sisi dinding bagian bawah diterapkan tumpuan jepit yang merepresentasikan sambungan dinding dengan struktur beton pondasi
2. Sisi dinding bagian atas dikenai gaya yang berupa massa konstruksi silo yang dikompensasi dengan massa struktur silo yang dimodelkan. Perhitungan massa yang ditanggung oleh struktur yang dimodelkan adalah:

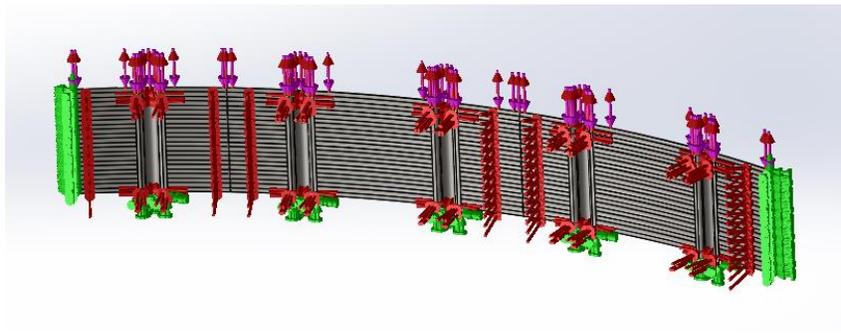
Massa stiffner (40 batang) setinggi 20.875 m + massa dinding + massa tutup silo

3. Pada permukaan dinding sebelah dalam dikenai tekanan desak biji gandum, yang dihitung dengan Persamaan 1 dengan kompensasi nilai kolom karena pengaruh kemiringan
4. Pada dinding sebelah dalam dikenai tekanan gravitasi karena volume mass yang ada di atasnya yang berkerja pada luasan proyeksinya

Pada sudut kemiringan $0,96^\circ$ mengacu pada kondisi beban seperti ditunjukkan dalam Tabel 3, sedangkan model pembebanannya ditunjukkan dalam Gambar 5.

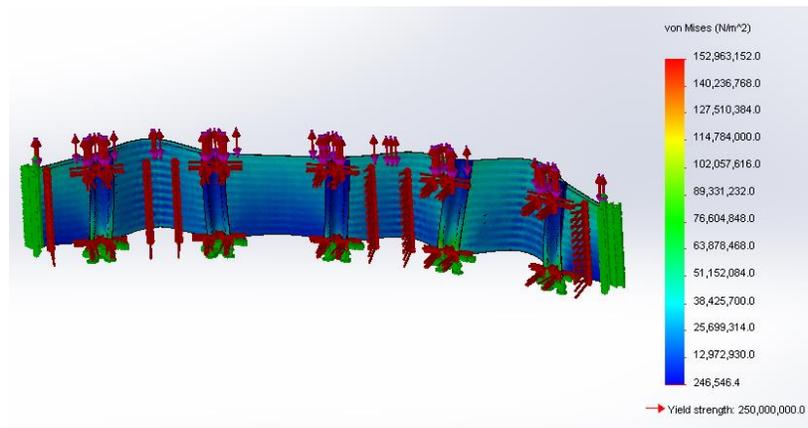
Tabel 3. Gaya yang bekerja pada dinding silo dengan kemiringan $0,96^\circ$

KEMIRINGAN	TEKANAN DESAK AKIBAT KOLOM MASSA	TEKANAN GRAVITASI KARENA MASSA DI ATAS KEMIRINGAN DINDING	BOBOT STRUKTUR DI ATASNYA + MASA DINDING FUNGSI KEMIRINGAN
$0,96^\circ$	35684	1996	87332,3

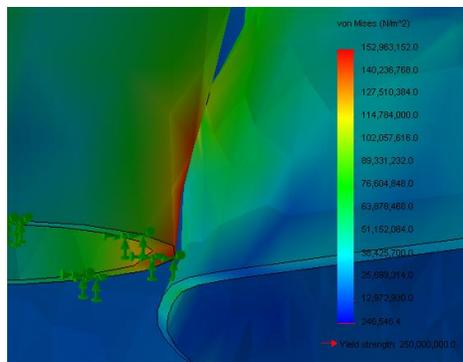


Gambar 5. Model pembebanan pada struktur dinding silo pada kemiringan $0,96^\circ$ dengan simpangan maksimum 350 mm.

Hasil analisis FEM menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi sebesar $17,7 \text{ kg/mm}^2$ yang berlokasi pada sambungan antara strifner dan dinding seperti ditunjukkan dalam Gambar 6, sedangkan deformasi yang terjadi pada dinding ditunjukkan dalam Gambar 7.

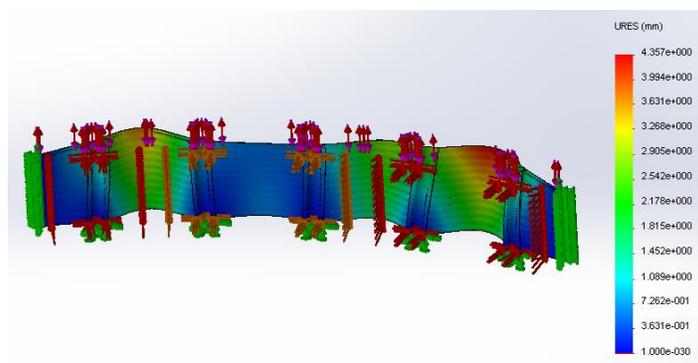


(a)



(b)

Gambar 6. a. Distribusi tegangan yang terjadi pada konstruksi silo pada kemiringan 0,96° dengan simpangan maksimum 350 mm., b. Tegangan maksimum terjadi pada sambungan antara struktur stifner dan dinding.



Gambar 7. Distribusi defleksi yang terjadi pada konstruksi silo pada kemiringan 0,96°.

Hasil simulasi FEM dengan memvariasikan sudut kemiringan dinding silo ditampilkan dalam Tabel 4, yang menunjukkan bahwa kemiringan silo berdampak pada peningkatan beban baik pada struktur stifner maupun dinding bagian bawah yang ditransfer ke sistem baut pengikatnya, akibat massa biji gandum pada luasan proyeksi bidang yang ditinjau sebagai fungsi ketinggiannya. Semakin besar sudut kemiringannya, semakin besar peningkatan distribusi tegangan yang bekerja pada daerah sambungan stifner dan dinding bagian bawah.

Tabel 4. Hasil simulasi FEM pada variasi sudut kemiringan dinding silo

SUDUT KEMIRINGAN (°)	MODEL 1		MODEL 2	
	Tegangan maks dinding (kg/mm ²)	Defleksi maks (mm)	Tegangan maks dinding (kg/mm ²)	Defleksi maks (mm)
0	13,05	3,82	15,2	5,25
0,96	15,3	4,36	18,8	5,73
2,0	17,6	4,51	21,8	5,75
5	19,4	5,58	24,4	8,8
10	30,95	6,39	44,4	16,9
15	78,1	16,25	94,3	30,9

Keterangan : Tegangan maksimum terjadi pada sambungan antara stifner dan dinding

Tegangan maksimum yang terjadi pada MODEL 2 secara umum lebih besar dibandingkan tegangan maksimum yang terjadi pada MODEL 1. Pada sudut kemiringan 5°, tegangan maksimum yang terjadi sekitar 24,4 kg/mm², dimana tegangan maksimum tersebut masih di bawah kekuatan material stifner, dinding maupun bautnya. Namun perlu diingat, bahwa tegangan maksimum yang bekerja sudah mendekati batas elastis materialnya (batas elastis material dinyatakan dengan yield point yaitu 25 kg/mm²). Oleh karena itu sudut kemiringan 5° ini merupakan sudut kemiringan

kritis struktur dinding silo. Dalam operasinya bila kondisi kemiringan dinding silo sudah mencapai 5° , maka silo harus segera dihentikan operasinya dan segera dilakukan proses perbaikan untuk mencari penyebab kemiringan dan dilakukannya langkah korektif untuk mengembalikan ketegakan konstruksi silo.

Bila sudut kemiringan dinding silo dinaikkan hingga mencapai 10° , dipastikan dinding silo telah mengalami kegagalan, dimana tegangan maksimum yang terjadi adalah sekitar $44,4 \text{ kg/mm}^2$. Kondisi tersebut sudah melebihi kekuatan material stiffner, dinding maupun baut pengikatnya. Pola kegagalan yang mungkin terjadi akibat silo dalam kondisi miring adalah jebolnya dinding silo pada bagian bawah arah kemiringan. Hal ini ditunjukkan pada lokasi terjadinya tegangan maksimum yaitu pada sambungan antara struktur stiffner dan dinding pada lokasi tersebut di atas.

4. Kesimpulan

Kondisi kemiringan kritis struktur dinding silo telah diinvestigasi. Dari hasil simulasi FEM disimpulkan bahwa sudut kemiringan kritis adalah sebesar 5° dan potensi gagalnya terjadi pada daerah sambungan dinding berketebalan 5 mm dan 2,5 mm (MODEL 2). Pada kondisi tersebut tegangan maksimum pada dinding sebesar $24,4 \text{ kg/mm}^2$ yang terjadi pada sambungan antara stiffner dan dinding. Bila kemiringan dinding silo lebih besar dari 5° , maka beban dominan dinding berupa tekanan gravitasi dari masa yang berada di atas dinding tersebut.

Daftar Pustaka

- [1] Widinghe S and Sivakugan N, 2012, Vertical Stresses within Granular Materials in Silos, ANZ Conference Proceeding
- [2] Zao Y, Cao Q dan Sun L., 2013, Buckling design of large circular steel silos subject to wind pressure, Thin-Walled Structure 73 (2013) 337-349.
- [3] Teng JG, Lin X, Rotter M, Ding XL, 2004, Analysis of geometric imperfections in full-scale welded steel silos, Engineering Structure 27(2005)938-950
- [4] Ding X, Coleman R and Rotter JM., 1996, Technique for precise Measurement of Large-Scale Silos and Tanks, Journal of Surveying Engineering 22(1996) 14-25
- [5] Goodey RJ, Brown CJ, Rotter JM. Predicted patterns of filling pressures in thin-walled square silos. Engineering Structure 28 (2006) 109-119
- [6] Janssen H, 1948, Earth pressure in silos, 2nd International Conference of ACSMFE, Rotterdam
- [7] Janssen HA. Versuche uber getreidedruck in silozellen. Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure 1895;39(35):1045-9
- [8] Rotter JM. Guide for the economic design of circular metal silos. London: Spon Press; 2001
- [9] ACI 313-91. Standard practice for design and construction of concrete silos and stacking tubes for storing granular materials. Detroit: A, Erica Concrete Institute; 1991.
- [10] DIN 1055. Design loads for buildings: Loads in silo bind, DIN 1055 part 6. Berlin: Deutsches Institut fur Normung; 1987.