

ANALISA KEKUATAN KONSTRUKSI *TRANSVERSE BULKHEAD* RUANG MUAT NO.I PADA 18500 DWT DRY CARGO VESSEL BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA

Imam Pujo Mulyatno, Iqbal Amanda

Abstrak

Kapal jenis *BulkCarrier* menjadi fokus dalam SOLAS Chapter XII. Regulasi SOLAS menyangkut struktur ruang muat No.I yang menerangkan *Transverse Bulkhead* pada dua ruang muat terdepan dan konstruksi *double bottom* pada ruang muat terdepan harus mempunyai kekuatan untuk menahan beban yang diakibatkan jika ruang muat No.I terasuki air (*Flooding*).

Penelitian dilakukan dengan metode elemen hingga dengan alat bantu program komputer berbasis metode elemen hingga. Konstruksi *Transverse Bulkhead* yang akan diteliti adalah konstruksi *Transverse Bulkhead* ruang muat no.1 pada 18500 DWT DCV yang saat ini sedang dibangun oleh salah satu galangan di Kota Semarang. Penelitian ini diawali dengan melakukan analisa MEH untuk mendapatkan nilai tegangan maksimum beserta letak terjadinya, lalu dilakukan Perhitungan Faktor Keamanan sehingga dapat ditentukan keamanan konstruksi tersebut.

Hasil penelitian telah menunjukkan tegangan maksimum terjadi pada bagian tengah Konstruksi *Transverse Bulkhead* dengan nilai 295.99 Mpa dan Faktor keamanan 0.695 yang memiliki arti bahwa konstruksi *Bulkhead* (khususnya pada bagian *corrugated*) tidak mampu menahan tegangan yang terjadi akibat pembebanan Kondisi *Flooding* pada ruang muat.

Kata kunci: SOLAS Chapter XII, *Transverse Bulkhead*, *Flooding*, Metode Elemen Hingga

I. Pendahuluan

Kapal jenis *BulkCarrier* menjadi fokus dalam SOLAS Chapter XII. Regulasi SOLAS menyangkut struktur ruang muat No.I yang menerangkan *Transverse Bulkhead* pada dua ruang muat terdepan dan konstruksi *double bottom* pada ruang muat terdepan harus mempunyai kekuatan untuk menahan beban yang diakibatkan jika ruang muat No.1 terasuki air.

Menurut data yang dikeluarkan oleh IMO (*International Maritime Organization*) antara tahun 1978 – Agustus 2000 jumlah kapal *bulkcarrier* yang mengalami kegagalan struktur sebanyak 1126 buah kapal dan sebanyak 1890 korban jiwa meninggal atau hilang. Sebagian besar kasus yang terjadi adalah kegagalan struktur pada ruang muat baik itu kegagalan struktur pada konstruksi *Transverse Bulkhead*, *Double bottom* maupun *Hatch cover* yang membuat ruang muat terasuki air dan merambat ke ruang muat yg lain sehingga kapal tenggelam secara cepat.

Data menyebutkan 90% lebih dari 1126 kasus terjadi diakibatkan *flooding due to structural failure*, yaitu keadaan dimana air memasuki ruangan di kapal sehingga mengakibatkan terjadinya kegagalan struktur di sekitar ruangan yang terasuki air. Ruangan –

ruangan yang dimaksud adalah ruang muat (*cargo hold*). Suatu studi yang dilakukan *International Association of Classification Societies (IACS)* menemukan bahwa setelah ruang muat terdepan suatu kapal mengalami *flooding*, *Bulkhead* yang membatasi ruang muat tersebut dengan ruang muat lainnya dapat mengalami kegagalan struktur yang disebabkan tekanan dari muatan dan air yang masuk ke ruang muat tersebut, sehingga ruang muat di sebelahnya juga mengalami *flooding* atau disebut dengan keadaan *Progressive flooding* yang dapat membawa kapal ke keadaan tenggelam.

Hal inilah yang mendasari penulis melakukan analisa kekuatan terhadap konstruksi *transverse bulkhead* ruang muat no 1 pada 18.500 DWT DCV. 18500 DWT DCV adalah sebuah nama proyek pembangunan kapal curah yang sedang dilaksanakan oleh galangan kapal PT. Jasa Marina Indah, Semarang. Kapal curah tersebut merupakan pesanan SIDER NAVEGACO,LDA yang di desain oleh PT. PAL Indonesia, Surabaya. Kapal tersebut mempunyai 4 buah ruang muat, dimana pada ruang muat No. I dibatasi sekat melintang (*Transverse Bulkhead*) dan sekat Tubrukan (*Collison Bulkhead*). Konstruksi *Transverse Bulkhead*

pada ruang muat No.1 berjenis *Corrugated Bulkhead*.

II. Permasalahan

Ruang muat no. 1 *18500 DWT DCV* memiliki *Transverse Bulkhead* berjenis *corrugated bulkhead*, permasalahan yang timbul apakah dengan desain konstruksi *Transverse Bulkhead* yang sudah ada pada ruang muat tersebut dapat menahan tegangan yang timbul akibat *flooding* yang diasumsikan terjadi pada ruang muat no.1 sebagaimana yang telah diharuskan oleh Regulasi *SOLAS Chapter XXI*.

Analisa yang dilakukan adalah untuk mengetahui besarnya tegangan maksimum yang terjadi terhadap konstruksi *Bulkhead* akibat *flooding* yang terjadi pada ruang muat dan mencari nilai faktor keamanannya sesuai standar BKI (Biro Klasifikasi Indonesia). Proses pembuatan model geometri serta analisisnya menggunakan alat bantu program komputer berbasis metode elemen hingga.

III. Konsep Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah suatu metode numerik yang cocok di gunakan dengan komputer digital, dengan metode ini suatu elastik kontinum dibagi – bagi (*discretized*) menjadi beberapa substruktur (elemen) yang kemudian dengan menggunakan matriks, defleksi dari tiap titik (*node*) akan dihubungkan dengan pembebanan, properti material, properti geometrik dan lain – lain.

Metode elemen hingga telah digunakan secara luas untuk menyelesaikan berbagai persoalan mekanika dengan geometri yang kompleks. Beberapa hal yang membuat metode ini favorit adalah karena secara komputasi sangat efisien, memberikan solusi yang cukup akurat terhadap permasalahan yang kompleks dan untuk beberapa permasalahan metode ini mungkin adalah satu – satunya cara, tetapi karena analisa elemen hingga merupakan alat untuk simulasi maka desain yang sebenarnya diidealisasikan dengan kualitas model desain yang tergantung pada skill dan kemampuan analisisnya. Model diharuskan sebisa mungkin mendekati aslinya agar hasil analisa juga mendekati hasil yang real. Semakin banyak

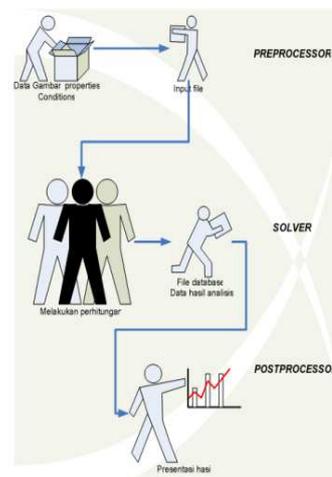
pengalaman didalam mendesain model, maka rasa percaya diri analis dalam menghadapi problem elemen hingga akan bertambah sehingga model yang dihasilkan berkualitas dan mendekati *real*.

Secara garis besar tahap – tahap perhitungan untuk mencari tegangan maksimum pada kondisi pembebanan *flooding* pada ruang muat no.1 menggunakan metode elemen hingga adalah sebagai berikut :

- Menghitung matriks kekakuan elemen (*element stiffness matrix*), $\{k\}_e$, kemudian digeneralisasikan menjadi matrik kekakuan global $\{K\} = \sum\{k\}_e$.
- Menghitung matriks gaya simpul (nodal force matrix) $\{P\}_e$, kemudian digeneralisasikan menjadi matrik gaya global $\{P\} = \sum\{P\}_e$.
- Menghitung Perpindahan nodal (nodal displacement) dengan memasukan kondisi batas (boundary condition), $\{\delta\} = [K]^{-1}\{P\}$.
- Menghitung tegangan pada setiap elemen, $\{\sigma\}_e = [E] \{\delta\}_e$.

Namun kadang kala matrik – matrik tersebut berordo 12 x 12 sehingga perlu alat bantu yang sudah bisa mengintegrasikan tahap – tahap metode elemen hingga sehingga lebih mudah digunakan. Dalam penelitian ini digunakan program komputer MSC.PATRAN sebagai *Preprocessor* dan *Postprocessor* sedangkan MSC.NASTRAN sebagai *processing/solver*.

Konsep *Preprocessor*, *processing/solver*, dan *Postprocessor* dapat dilihat pada gambar 1.1.



Gambar 1.1 Alur tahapan

Tahap *Preprocessor* adalah tahap dimana dilakukan input – input gaya, tumpuan, properti material pada model *transverse bulkhead* yang sebelumnya telah dibuat dengan software MSC.PATRAN. Dari tahap ini dihasilkan file .BDF dimana merupakan file berisi *raw data* untuk selanjutnya dibaca oleh *solver*.

Tahap *Processing* adalah tahap dimana *raw data* (.BDF) dianalisa sedemikian rupa sehingga mengasilkan nilai berupa *output* nilai tegangan *von misses*. Pada tahap ini dihasilkan file .XDB dimana file tersebut berisi hasil akhir berupa nilai tegangan arah X,Y dan Z.

Tahap penyajian *Postprocessing* penting dilakukan untuk mempermudah pembacaan hasil tegangan maksimum dan letak terjadinya tegangan maksimum tersebut. Pada tahap ini didapat gambar kontur tegangan maksimum dan letak terjadinya lengkap beserta indeks warna untuk menunjukkan nilai tegangan yang terjadi.

IV. Pembahasan Masalah

4.1 Perhitungan Beban

Pada saat ruang muat no.1 dalam kondisi *flooding*, diasumsikan beban dalam (beban muatan) dan beban luar (hidrostatis) dalam keadaan maksimum dan ditambah beban air laut yang masuk ke dalam ruang muat. Menurut D.Servis pembebanan yg timbul akibat ruang muat yang mengalami *flooding* dapat ditentukan dengan rumus pendekatan sebagai berikut :

$$P_{cf} = \rho g h_f + [\rho_c - \rho(1 - \text{perm})] g h_1 \tan^2 \gamma \quad (4-1)$$

$$d_1 = \frac{M_c}{B \rho_c l_c} + \frac{V_{LS}}{B l_c} + h_{DB} \quad (4-2)$$

$$h_1 = 0,5 \cdot (d_1 - h_{db}) \quad (4-3)$$

dimana :

P_{cf} = Beban pada ruang muat dalam kondisi *flooding*.

M_c = *Mass of cargo in hold No. 1,*

ρ_c = *Ore cargo density*

l_c = *Length of hold No.1*

B = *Ship's breadth amidship*

V_{LS} = *Volume of bottom stool above the inner bottom,*

h_{DB} = *Height of the double bottom,*

ρ = *Water density,*

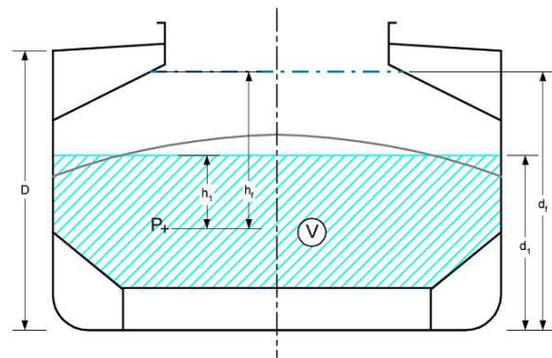
g = $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

perm = *permeability ore,*

φ = *Angle of repose of the cargo,*

γ = $45^\circ - (\varphi/2)$

$\tan^2 \gamma$ = $0,271$



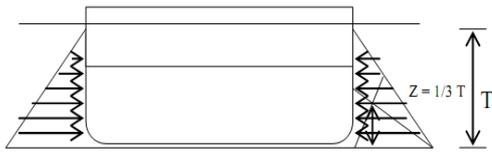
Gambar 4.1. Konsep pembebanan pada saat keadaan *flooding* ruang muat.

Tabel 4.1 Perhitungan Beban

Besaran	Nilai
M_c	1189,39 ton
ρ_c	3 t/m ³
l_c	21,7 m
B	22,5 m
V_{LS}	12,26 m ³
h_{DB}	1,5 m
ρ	1,024 t/m ³
g	9,81 m/s ²
perm	0,3 t/m ³
φ	35°
γ	27,5 °
$\tan^2 \gamma$	0,271
d_1	9,648 m
h_1	4,074 m
P_{cf}	107,604 kN/m²

Besar beban hidrostatis yang terjadi pada kondisi pembebanan keadaan *flooding* ruang muat no.1 dapat dicari dengan rumus pendekatan BKI vol II. Beban – beban tersebut adalah :

- Beban Sisi Kapal dibawah garis sarat air.



Gambar 4.2 Gambar pembebanan pada sisi kapal dibawah sarat

$$P_s = 10(T - Z) + P_o \times 4C_f \cdot \left(1 + \frac{Z}{T}\right) \quad (\text{kN/m}^2) \quad (4-4)$$

$$P_o = 2,1 \cdot (C_b + 0,7) \cdot C_o \cdot C_L \cdot f \cdot C_{rw} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (4-5)$$

(BKI 2006 Vol. Sec. 4. B. 2. 1)

dimana,

T = Tinggi sarat kapal [m]

Z = Jarak vertikal pusat beban konstruksi diatas garis dasar $\left[\frac{T}{3}\right]$ [m]

C_b = Koefisien Blok

$$C_o = 10,75 - \left[\frac{300 - 140,3}{100}\right]^{1,5} = 6,68$$

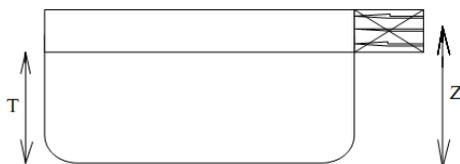
C_L = 1,0 Untuk L ≥ 90 m

f = Faktor peluang [1,0]

* C_{f3} untuk daerah $0,7 \leq \frac{x}{L} \leq 1,0$ (haluan kapal) adalah :

$$C_{f3} = 1,0 + \frac{20}{C_b} \left(\frac{x}{L} - 0,7\right)^2$$

- Beban Sisi Kapal diatas garis sarat air.



Gambar 4.3 Gambar pembebanan pada sisi kapal diatas sarat

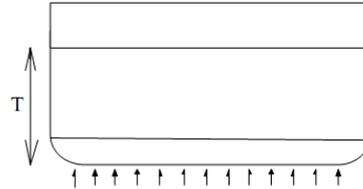
$$P_s = P_o \times C_f \frac{20}{(10 + Z - T)} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (4-6)$$

(BKI 2006 Vol. Sec. 4. B. 2. 1)

dimana,

$$Z = T + \frac{1}{2} (H - T)$$

- Beban Alas Kapal.



Gambar 4.4 Gambar pembebanan pada alas kapal

$$P_B = 10 \cdot T + P_o \cdot C_F \quad [\text{kN/m}^2] \quad (4-7)$$

(BKI 2006 Vol. II Sec. 4 B. 3)

dimana,

T = Tinggi sarat kapal [m]

P_o = Beban luar dasar dinamis [kN/m²]

Tabel 4.2 Perhitungan Beban Hidrostatik

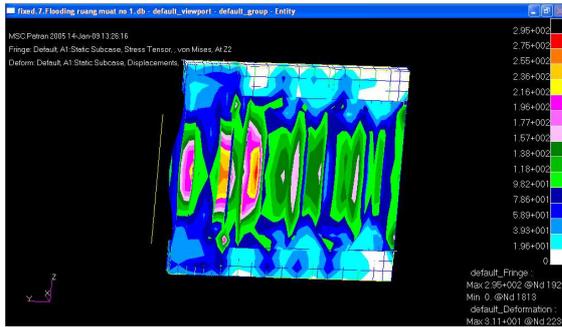
Beban	Nilai
P _o	25,80 kN/m ²
P _{sa}	21,22 kN/m ²
P _{sb}	106,34 kN/m ²
P _B	127,21 kN/m ²

4.2 Perhitungan Tegangan Maksimum

Berdasarkan analisa elemen hingga yang telah dilakukan dengan bantuan program komputer didapat hasil tegangan maksimum untuk kondisi pembebanan *flooding* pada ruang muat no.1 sebagai berikut :

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan

Pembebanan	Node	Tegangan maksimum (Mpa)
<i>Flooding</i> RM No.1	1929	295,99



Gambar 4.5 Gambar kontur tegangan maksimum

Gambar 4.5 menunjukkan kontur tegangan maksimum pada keadaan pembebanan *flooding* ruang muat no.1 dimana warna merah menunjukkan nilai tegangan terbesar yang terjadi dan warna putih menunjukkan nilai tegangan minimum yang terjadi.

4.3 Perhitungan Faktor Keamanan

Faktor keselamatan dapat dicari dengan dua pembandingan, pembandingan pertama adalah dengan mengetahui nilai material properties dari pelat yang digunakan, maka nilai faktor keselamatan konstruksi *bulkhead* menurut kriteria bahan dari tiap – tiap kondisi pembebanan. Pembandingan kedua adalah dengan mencari tegangan ijin menurut rules klasifikasi yang dipakai, dalam hal ini dipakai *rules* BKI.

$$F_s = \frac{\sigma_{ijin}}{\sigma_{aktual}} \quad (4-8)$$

dimana,

- F_s = Faktor Keamanan
- σ_{ijin} = Tegangan Ijin / Tegangan *Ultimate*
- σ_{aktual} = Tegangan yang terjadi pada objek.

Adapun pelat yang digunakan merupakan pelat baja kekuatan normal dengan standar BKI tipe KI- A 36 yang mempunyai nilai *properties* sebagai berikut :

- Tegangan Luluh (*Yield*) = 235 Mpa
- Tegangan *Ultimate* = 400 Mpa
- Modulus Elastisitas = 200 Gpa
- *Shear Modulus* = 79.3 Gpa
- *Poisson Ratio* = 0.3

Sumber dari BKI VOL.V *section* 4

Tegangan ijin pada konstruksi *transverse bulkhead* dapat dicari dengan rumus :

$$Q_n = Q_p = \frac{A_s \cdot R_{eH}}{c \cdot 1200} \quad (4-9)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_N^2 + 3 \cdot \tau^2} \leq R_{eH} \quad (4-10)$$

BKI vol II *Section* 11

dimana,

- Q_n = Tegangan Normal (N/mm²)
- Q_p = Tegangan Geser (N/mm²)
- A_s = Luas Parsial yang efektif (mm²)
- R_{eH} = Tegangan Luluh bahan (N/mm²)
= 235 (N/mm²)
- c = 1.0 untuk sekat ruang muat
- σ_v = Tegangan ijin menurut BKI (N/mm²)

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Tegangan Geser

	A_i (mm ²)	R_{eH}	$R_{eH} \cdot A_i$
Upper stool	16350000	235	1847235.577
Corrugated	136703700	235	15444889.18
Upper Chocks	23364000	235	2639682.692
Lower Chocks	23364000	235	2639682.692
Lower stool	16350000	235	1847235.577
Total A (mm ²)	216131700	Total Gaya Geser (ReH . Ai) (kN)	24418725.72
		Tegangan Geser (N/mm ²)	112.9807692

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Tegangan Normal

	A_i (mm ²)	R_{eH}	$R_{eH} \cdot A_i$
Upper stool	16350000	235	1847235.577
Corrugated	136703700	235	15444889.18
Upper Chocks	23364000	235	2639682.692
Lower Chocks	23364000	235	2639682.692
Lower stool	16350000	235	1847235.577
Total A (mm ²)	216131700	Total Tegangan Normal (ReH . Ai) (kN)	24418725.72
		Tegangan Normal (σ_v)(N/mm ²)	112.9807692

Berdasarkan dari hasil perhitungan sebelumnya didapat nilai tegangan ijin menurut BKI sebesar 205.82 N/mm². Sehingga nilai factor keamanan konstruksi *bulkhead* pada kondisi *flooding* dapat dicari yaitu sebesar :

- 1.35 menurut kriteria bahan.

- 0.67 menurut kriteria BKI.

4.4 Rekalkulasi Dengan Penambahan Tebal Pelat

Besarnya Faktor keamanan yang dihitung menurut kriteria BKI ternyata mempunyai nilai dibawah 1, hal ini berarti konstruksi *bulkhead* tersebut tidak mampu bertahan jika ruang muat mengalami keadaan *flooding*. Sebagai salah satu jalan keluarnya diperlukan rekalkulasi nilai tegangan maksimum yang terjadi pada konstruksi *bulkhead* dengan penambahan tebal pelat pada bagian *corrugated*, dari 12 mm menjadi lebih tebal mengingat tegangan maksimum terjadi pada bagian tersebut.

Setelah dilakukan rekalkulasi dengan 3 jenis tebal pelat yang berbeda yaitu dengan tebal pelat 14 mm dan 16 mm dengan material baja kekuatan tinggi dengan $R_{eh} = 355 \text{ N/mm}^2$, didapat nilai Faktor Keamanan sebagai berikut :

Tabel 4.6 Nilai FS setelah dilakukan Rekalkulasi

Tebal Pelat	Tegangan Maksimum	FS	
		Material	BKI
14 mm	255 Mpa	1.92	1.34
16 mm	224 Mpa	2.19	1.52

4.5 Validasi

Validasi dari hasil perhitungan merupakan suatu hal yang penting karena hal ini akan menunjukkan keakuratan perhitungan dari suatu pemodelan. Cara yang ditempuh untuk melakukan validasi adalah dengan melakukan perbandingan hasil perhitungan antara perhitungan *software* dengan perhitungan manual (sesuai dengan rumus). Dalam analisa menggunakan *software* didapat hasil defleksi maksimum dimana nilai defleksi tersebut yang digunakan untuk melakukan validasi hasil perhitungan. Perhitungan manual yang akan dilakukan dengan menghitung salah satu element (tiap satu elemen) saat di kenai beban yang di pergunakan sebagai input.

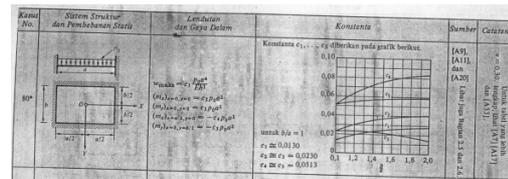
Validasi dilakukan pada tiap elemen yang mengalami nilai defleksi

maksimum, dengan mencari nilai defleksi dengan rumus :

$$W_{\text{maks}} = c_1 \frac{p_0 L^4}{E h^3} \quad (4-11)$$

dimana,

- L = Panjang elemen (mm)
- b = Lebar elemen (mm)
- h = Tebal elemen (mm)
- c = Konstanta
- E = $200 \text{ Gpa} = 2 \times 10^5 \text{ Mpa}$



Gambar 4.6 Grafik nilai konstanta c (Szilard,R, 1989)

Pada hasil analisa tegangan maksimum dengan tebal pelat awal 12 mm, defleksi terbesar terjadi pada node 2256 dengan nilai defleksi sebesar 31.1 mm. Node tersebut terletak pada elemen yang mempunyai panjang 1000 mm, lebar 375 mm dan tebal 12 mm dan dikenai beban 0.107604 N/mm^2

Maka hasil validasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{mak}} &= 0.103 \frac{p_0 L^4}{E h^3} \\ &= 0.103 \frac{0.107604 \cdot 1000^4}{2.10^5 \cdot 12^3} \cdot 311.35 \\ &= 32.07 \text{ mm} \end{aligned}$$

Hasil validasi menyebutkan besar defleksi yang terjadi sebesar 32.07 m, yang berarti hanya berselisih 0.97 mm, dengan persentase keselisihan sebesar 3.02 %, dimana jika nilai persentase keselisihan kurang dari 10% maka hasil perhitungan dianggap Valid.

V. Kesimpulan dan Saran

Besar tegangan maksimum yang terjadi pada pembebanan Kondisi *Flooding* pada ruang muat no.1 sebesar $295.99 \text{ Mpa} (\text{N/mm}^2)$ dengan nilai faktor keamanan konstruksi sebesar 0.67 yang memiliki arti bahwa dengan tebal pelat yang terpasang pada konstruksi *Bulkhead* (khususnya pada bagian *corrugated*) tidak mampu menahan tegangan yang terjadi akibat pembebanan Kondisi *Flooding* pada ruang muat.

Agar konstruksi *Bulkhead* ruang muat no.1 dapat memiliki faktor keamanan lebih dari satu maka dilakukan rekalkulasi analisa dengan penggantian tebal pelat awal dengan pelat 14 mm dan 16 mm berjenis baja kekuatan tinggi ($R_{eh} = 355 \text{ N/mm}^2$).

Sesuai dengan rekalkulasi yang telah dilakukan maka Agar konstruksi *Bulkhead* ruang muat no.1 memiliki faktor keamanan lebih dari satu ($FS = 1.52$) disarankan untuk pengganti tebal pelat dengan pelat 16 mm berjenis baja kekuatan tinggi ($R_{eh} = 355 \text{ N/mm}^2$).

Penulis menyarankan untuk mencapai ketelitian yang lebih tinggi disarankan menggunakan jarak per-elemen yang lebih kecil (*Meshing* yang lebih rapat) yang tentunya disesuaikan dengan kemampuan alat bantu perhitungan yang dipakai.

VI. Daftar Pustaka

- D. Servis et al. 2005. *Marine Structures: Finite Element Modelling and Strength Analysis of Hold No. 1 of Bulk Carriers*. Athens, Greece: Department of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens.
- Eyres, D.J. 2001. *Ship Construction*. Oxford: Butterworth-Heinemann
- IMO. 2001. *SOLAS Consolidated Edition 2001 Chapter XII Additional safety measures for bulk carrier*. London
- IMO. 1999. *IMO and the safety of bulk carriers*. London
- Popov, E.P. 1996. *Mekanika Teknik ed.2*. Jakarta: Erlangga
- PT. Biro Klasifikasi Indonesia Persero, 2006. *Rules for The Classification and Construction of Sea Going Steel Ship Volume II: Rules for Hull edition 2006*. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia.
- R. Dambra, et al. 2000. *Title: The Role Of Finite Element Technique In Ship Structural Design*. CETENA Genova Italy: Italian Ship Research Centre
- Szilard, R., 1989. *Teori dan Analisa Pelat Metode Klasik dan Numerik*. Jakarta: Erlangga
- Tambunan, Sahrudin, Ir. MT. 2005. *Modul Training Patran/Nastran*. Bandung : PT. Dirgantara Indonesia

Tupper, Eric. 1996. *Introduction to Naval Architecture*. Oxford: Elsevier Science