

ANALISA NUMERIK GERAKAN DAN KEKUATAN KAPAL AKIBAT BEBAN *SLAMMING* PADA KAPAL PERANG TIPE *CORVETTE*

Teguh Putranto¹, Aries Sulisetyono²

^{1,2}Jurusan Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Email : theories@na.its.ac.id¹

Abstrak

Pengawasan sumber daya laut terhadap tindakan pencurian menjadi salah satu tolok ukur bahwa negara dapat mempertahankan kedaulatan wilayah maritimnya. Kebutuhan kapal perang tentunya dapat mendukung kinerja TNI untuk menjalankan operasi militernya. Kendala teknis utama pada kapal perang adalah perilaku *seakeeping* yang relatif kurang stabil. Disisi lain perilaku *slamming* yang sering terjadi pada kapal berkecepatan tinggi berakibat pada kegagalan struktur pada bagian haluan kapal sehingga membahayakan keselamatan. Penelitian ini dimaksudkan untuk mengkaji desain lambung kapal perang untuk daerah operasional tertentu dimana perairan terbuka di Indonesia memiliki tinggi rata-rata gelombang sekitar 2-5 m. Pembahasan dititikberatkan pada analisa gerakan kapal (*seakeeping*) untuk mengetahui tingkat keamanan dan kenyamanan kapal dan kekuatan lambung untuk mengetahui ketahanan struktur dimana diakibat oleh hidroelastisitas *slamming*. Analisa dapat dibuktikan dengan metode numerik / komputasi dengan metode elemen hingga dan metode panel. Skenario divariasikan berdasarkan kecepatan kapal, sudut hadap, dan *sea state*. Dari hasil simulasi didapatkan beban *slamming* terjadi paling besar adalah 306,893 kPa pada gading ke 147 ketika kapal beroperasi pada *sea state* 7, sudut hadap 180 derajat, dan kecepatan kapal 30 knot. Tegangan yang terjadi pada konstruksi kapal masih memenuhi persyaratan tegangan izin peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI).

Kata Kunci : *Slamming*, *Seakeeping*, Tegangan, Kapal Perang.

1. PENDAHULUAN

Pengawasan sumber daya laut terhadap tindakan pencurian menjadi salah satu tolok ukur bahwa negara dapat mempertahankan kedaulatan maritimnya. Kegiatan operasi militer yang dilakukan oleh TNI perlu didukung dengan peralatan dan persenjataan yang canggih. Kebutuhan kapal perang tentunya dapat mendukung kinerja TNI untuk menjalankan operasi militernya. Kondisi perairan dengan ketinggian gelombang tertentu dapat menyebabkan kapal mengalami *slamming*. Kegagalan struktur pada bagian haluan kapal akibat beban *slamming* dapat mengakibatkan kerusakan konstruksi pada bagian haluan kapal.

Cabang ilmu hidrodinamika yang membahas tentang interaksi antara gelombang laut dengan struktur elastis adalah hidroelastisitas. Di era modern saat ini, efek hidroelastisitas menjadi perhatian khususnya untuk kapal dengan lambung banyak (*multi-hull*), kapal kontainer, kapal tanker, kapal muat curah, dan kapal cepat [1]. Keunikan desain lambung dan konstruksi ringan menimbulkan

fleksibilitas struktur kapal ketika beroperasi di perairan bergelombang. Pertimbangan desain lambung menjadi penting saat melibatkan analisa hidroelastisitas karena reaksi akan lebih besar pada struktur elastis daripada struktur kaku [2]. Oleh karena itu, efek hidroelastisitas menjadi fenomena yang sangat diperhatikan pada kapal cepat.

Dengan kemajuan teknologi di bidang perkapalan, inovasi desain dan konstruksi kapal berkecepatan tinggi menarik untuk dikaji karakteristik hidroelastisitasnya. Penentuan desain lambung dapat mengurangi lokal *slamming* dan deformasi lambung pada kapal [3]. Kapal bersarat rendah tentunya mengurangi besar hambatan total dimana selanjutnya berhubungan dengan besarnya mesin kapal dan konsumsi bahan bakar [4]. Fenomena menarik lainnya adalah permasalahan gerakan kapal di perairan bergelombang (*seakeeping*) yang perlu diperbaiki dan dievaluasi kualitas *seakeeping* terutama pada *sea state* 1-3 [5].

Perumusan masalah pada penelitian ini adalah (i) bagaimana cara menghitung intensitas *slamming* kapal, (ii) bagaimana cara

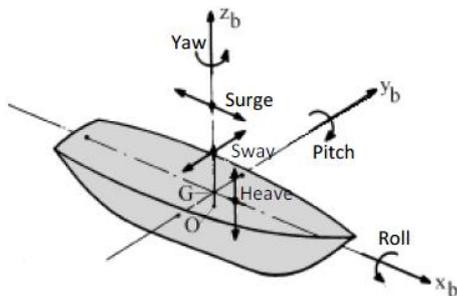
menghitung besar beban *slamming* di bagian haluan kapal, (iii) bagaimana cara mengetahui kekuatan struktur haluan kapal akibat beban *slamming*.

Tujuan penelitian ini adalah (i) untuk mengetahui intensitas *slamming* kapal, (ii) untuk mengetahui besar beban *slamming* di bagian haluan kapal, (iii) untuk mengetahui kekuatan struktur haluan kapal akibat beban *slamming*.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Gerakan Kapal

Ketika kapal beroperasi di perairan bergelombang, gerakan kapal dipengaruhi oleh gelombang yang mengenai badan kapal. Gerakan kapal tentunya juga dipengaruhi oleh pergerakan muatan, angin, arus, baik di perairan dangkal maupun dalam. Lambung kapal diasumsikan sebagai *rigid body* [6]. Gambar 1 menunjukkan gerakan kapal.



Gambar 1. Six degrees of freedom gerakan kapal

Gerakan kapal, 3 (tiga) gerakan translasi dan 3 (tiga) gerakan rotasi, yaitu *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, and *yaw* dimana biasa disebut *six degrees of freedom*.

2.2. Response Amplitude Operator (RAO)

Kurva RAO merupakan rasio kuadrat antara gerakan kapal dan amplitudo gelombang. Besarnya RAO ditentukan oleh desain lambung kapal dan perilakunya hanya pada gelombang regular. Perhitungan RAO diasumsikan kapal bergerak pada koefisien hidrodinamika yang linier. Formula gerakan kapal dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$[m + a(\omega)]\ddot{x} + b(\omega)\dot{x} + cx = F(\omega) \quad (1)$$

Persamaan tersebut terdiri dari koefisien *added mass*, *dampiiing*, dan *restoring*. Pada kondisi gelombang regular, gaya – gaya yang mengenai badan kapal terdiri dari: (i) Gaya *Froude Krylov*, beban gelombang yang mengenai badan kapal yang tercelup, (ii) Gaya Difraksi, beban yang dipengaruhi oleh gelombang ketika kapal beroperasi. Formula RAO dapat dilihat pada Persamaan 2.

$$RAO(\omega) = \frac{x}{\zeta_a} = \frac{F_0}{C - [m + a(\omega)]\omega^2 + ib(\omega)\omega} \quad (2)$$

2.3. Spektrum Gelombang

Pada gelombang irregular, tinggi dan frekuensi gelombang berbeda-beda. Metode statistik dilakukan untuk mendapatkan spektrum energi atau spektrum gelombang untuk gelombang irregular. Kombinasi dari beberapa gelombang regular menghasilkan gelombang irregular [6]. Salah satu metode untuk menghitung spektrum gelombang diperkenalkan oleh *International Towing Tank Conference (ITTC)* dimana formulanya dapat dilihat pada Persamaan 3.

$$S(\omega_w) = \frac{A}{\omega_w^5} e^{-B/\omega_w^4} \quad (3)$$

Dimana, $A = 8.10 \times 10^3 g^2$, $B = 3.11 \times 10^4 / H_{1/3}^2$ *significant wave height* mempengaruhi besarnya spektrum gelombang.

2.4. Probabilitas Slamming

Efek gerakan vertikal kapal yang dipengaruhi oleh gerakan kapal menjadi perhatian ketika menentukan fenomena *slamming* yang terjadi pada kapal. *Slamming* didefinisikan sebagai beban hantakan antara fluida dan badan kapal akibat pergerakan kapal yang utama di bagian haluan kapal. Intensitas *slamming* akan mempengaruhi kekuatan konstruksi kapal karena dapat menentukan umur kelelahannya. Formula untuk menghitung probabilitas kejadian *slamming* dapat dilihat pada Persamaan 4.

$$Pr ob\{slam\} = e^{(T^2 / 2m_{0s} + v_0^2 / 2m_{2s})} \quad (4)$$

dimana,
 T = sarat kapal.

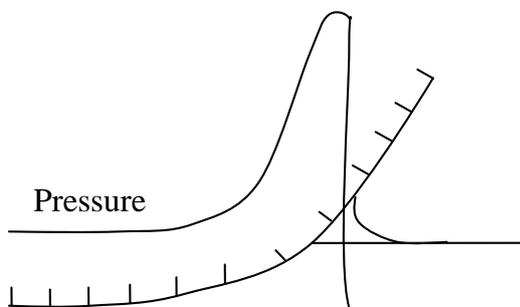
m_{0s} = spektrum energi untuk *displacement* vertikal kapal.

m_{2s} = spektrum energi untuk kecepatan vertikal kapal.

Persamaan tersebut terdiri dari spektrum dari energi yang didapatkan dari perkalian RAO dan spektrum gelombang pada gerakan *heaving* dan *pitching*.

2.5. Beban Slamming

Gaya *slamming* utamanya bergantung pada kecepatan bagian haluan kapal ketika menghantam permukaan laut. Dari data eksperimen didapatkan hubungan antara tekanan akibat *slamming* dan jarak vertikalnya dimana dapat dilihat pada Gambar 2 [6].



Gambar 2. Distribusi tekanan akibat *slamming*

Distribusi tekanan akibat *slamming* dipengaruhi oleh bentuk lambung kapal, kecepatan dan percepatan gerakan vertikal haluan kapal. Formula untuk menghitung tekanan tersebut dapat dilihat pada Persamaan 5.

$$P = P_0 \left[\frac{2}{\beta \sqrt{1 - (Y_s/2b)}} + \frac{2}{\delta} \sqrt{\left(1 - \frac{Y_s}{2b}\right)^2 - \frac{(Y_s/2b)^2}{1 - (Y_s/2b)^2}} \right] \quad (5)$$

Dimana,

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \text{ dan } \delta = \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 / 2b \left(\frac{d^2z}{dt^2} \right)^2$$

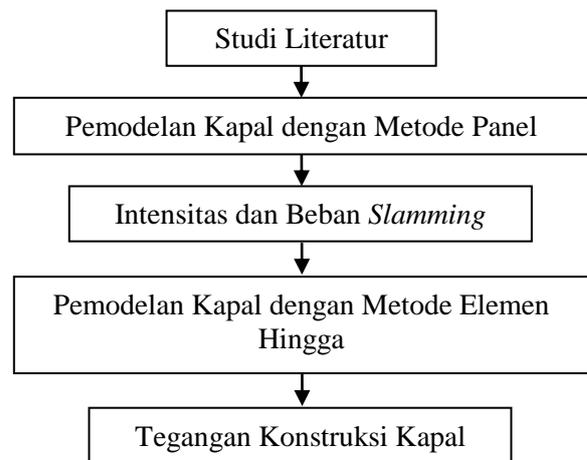
dengan,

β = sudut kemiringan suatu titik di penampang melintang.

Y_s = jarak suatu titik ke *centerline* pada penampang melintang.

3. METODOLOGI

Penelitian ini secara keseluruhan dilakukan dengan analisa numerik. Hasil yang ingin didapatkan dari penelitian ini adalah intensitas *slamming*, besarnya beban *slamming*, dan pengaruh beban *slamming* terhadap konstruksi haluan kapal. Metodologi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3. Setelah desain lambung didapatkan, perhitungan *seakeeping* di gelombang irregular dapat dilakukan. Model kapal dibagi menjadi ribuan elemen atau panel. Kemudian elemen-elemen tersebut diintegrasikan untuk mendapatkan respon dikarenakan gelombang [7].



Gambar 3. Diagram alir proses pengerjaan

Secara teori, RAO adalah rasio kuadrat antara amplitudo gerakan kapal terhadap amplitudo gelombang [8]. Karena kapal tidak pernah bergerak di gelombang regular, maka data gelombang irregular dibutuhkan. ITTC memberikan formula untuk perhitungan spektrum gelombang berdasarkan pada *significant wave height*. Kapal diasumsikan akan beroperasi pada *sea state* 5-7 dimana ketinggian gelombang antara 3-6 m.

Perkalian antara RAO dan spektrum gelombang pada menghasilkan respon spektrum gerakan kapal pada kondisi gelombang irregular. Respon spektrum ini digunakan untuk menghitung *relative bow motion*. Intensitas dan beban *slamming* yang terjadi pada badan kapal dapat ditentukan dari hasil respon spektrum *relative bow motion* [9].

Metode elemen hingga digunakan untuk menghitung tegangan yang terjadi akibat beban *slamming* yang mengenai haluan kapal. Model kapal diberi kondisi batas jepit pada ujung model yang bersekut. Beban dimasukkan

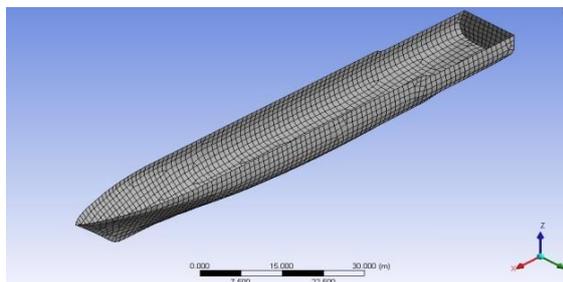
sebagai tekanan yang diaplikasikan pada luasan yang mengalami *slamming*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Ukuran utama kapal yang dianalisa dapat dilihat pada Tabel 1. Gambar 4 menunjukkan model kapal mulai alas sampai dengan geladak.

Tabel 1. Ukuran utama kapal

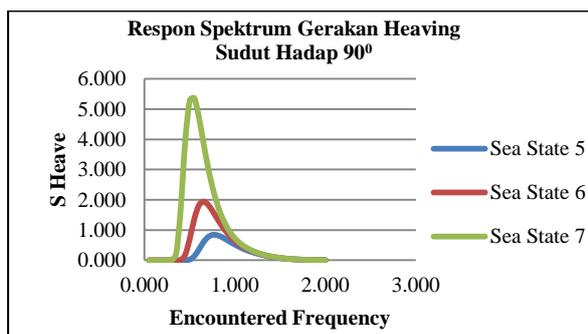
Item	Nilai	Unit
Loa	106.00	m
B	14.00	m
T	3.70	m
H	8.75	m



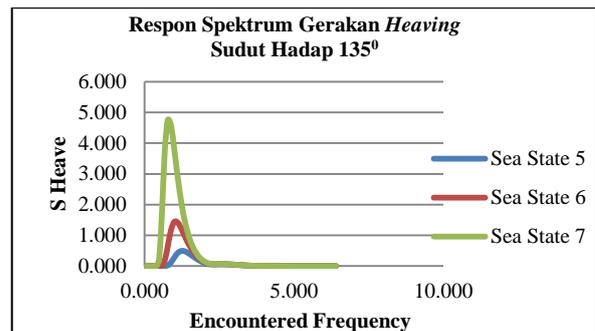
Gambar 4. Model kapal perang

4.1. Respon Spektrum Gerakan Kapal

Untuk mengetahui kondisi ekstrim kapal beroperasi, variasi dilakukan berdasarkan sudut hadap gelombang dan *sea state*. Fenomena *slamming* cenderung diakibatkan oleh gerakan *heaving* dan *pitching* sehingga perlu didapatkan respon spektrum untuk setiap gerakan ini.

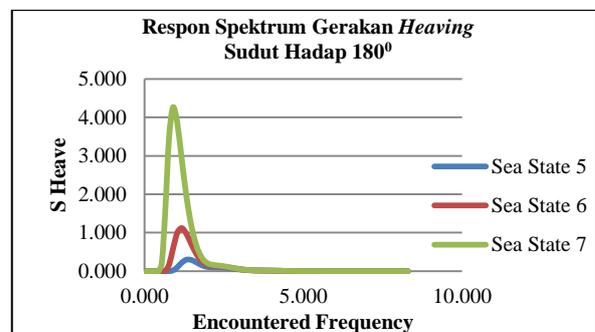


Gambar 5. Respon spektrum gerakan *heaving* pada sudut hadap 90°



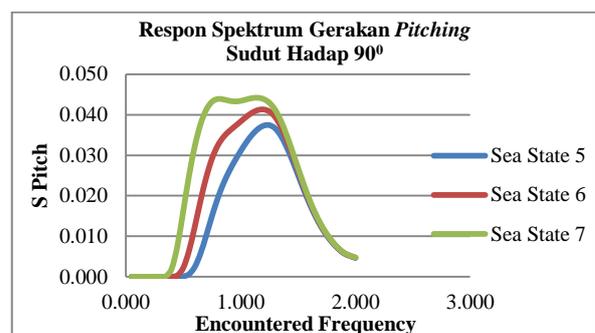
Gambar 6. Respon spektrum gerakan *heaving* pada sudut hadap 135°

Gambar 5-7 menunjukkan grafik respon spektrum gerakan *heaving* pada variasi sudut hadap dan *sea state*. Respon terbesar terjadi pada sudut hadap 90° dengan *sea state* 7. Pada sudut hadap 180° , respon gerakan *heaving* kapal paling kecil.

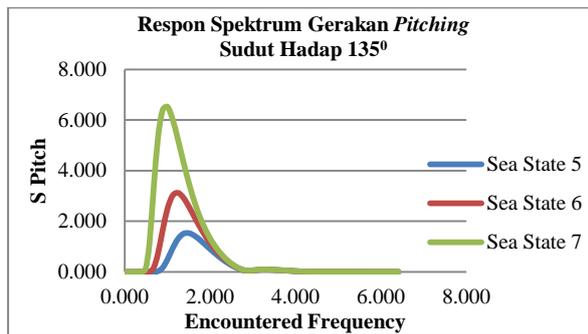


Gambar 7. Respon spektrum gerakan *heaving* pada sudut hadap 180°

Gambar 8-10 menunjukkan grafik respon gerakan *pitching* pada variasi sudut hadap dan *sea state*. Respon terbesar terjadi pada sudut hadap 180° dengan *sea state* 7. Respon *pitching* terkecil terjadi pada sudut hadap 90° dengan *sea state* 5. Pola grafik respon spektrum gerakan menunjukkan nilai besar ketika *encountered frequency* antara 0,3-1,0 rad/s dimana nilai tersebut dapat dikonversikan dalam panjang gelombang

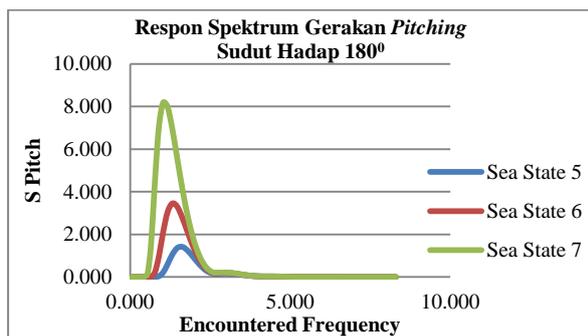


Gambar 8. Respon spektrum gerakan *pitching* pada sudut hadap 90^0



Gambar 9. Respon spektrum gerakan *pitching* pada sudut hadap 135^0

Sea state 5 menunjukkan *significant wave height* sebesar 2,6 m sedangkan *sea state 7* sebesar 5,6 m dimana kondisi gelombang tersebut diambil paling buruk ketika kapal beroperasi. Karena kapal tidak selalu beroperasi pada kondisi tenang, maka analisa gerakan kapal untuk kondisi buruk perlu dilakukan.



Gambar 10. Respon spektrum gerakan *pitching* pada sudut hadap 180^0

4.2. Intensitas Slamming

Respon spektrum digunakan untuk menghitung energi dalam perhitungan probabilitas *slamming*. Dengan menggunakan metode spektral, *spectral density relative bow motion* pada gelombang irregular dapat didapatkan dari *spectral density* gerakan *heaving* dan *pitching* pada gelombang irregular.

Tabel 2-4 menunjukkan nilai intensitas *slamming* pada variasi sudut hadap dan *sea state*. Kecepatan kapal diambil sebesar 30 knot.

Tabel 2. Probabilitas dan intensitas *slamming* pada sudut hadap 180^0

Sudut Hadap 180^0				
<i>Sea State</i>	m_0	m_{2s}	P	N

<i>Sea State 5</i>	9,20	150,21	0,49	1144
<i>Sea State 6</i>	12,24	154,85	0,58	1200
<i>Sea State 7</i>	13,55	158,43	0,62	1214

Tabel 3. Probabilitas dan intensitas *slamming* pada sudut hadap 135^0

Sudut Hadap 135^0				
<i>Sea State</i>	m_0	m_{2s}	P	N
<i>Sea State 5</i>	16,73	191,66	0,679	1295
<i>Sea State 6</i>	19,20	194,30	0,714	1300
<i>Sea State 7</i>	20,25	196,25	0,726	1316

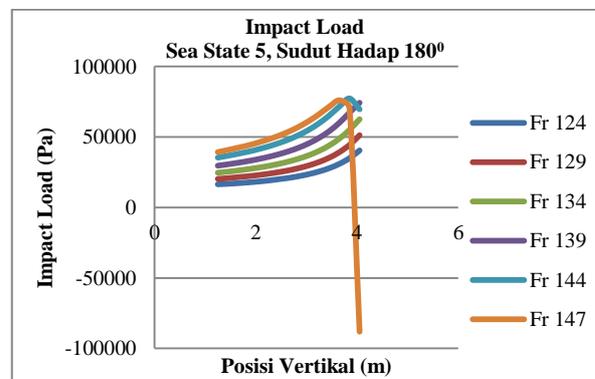
Intensitas *slamming* terbesar terjadi saat kapal beroperasi pada *sea state 7* dengan sudut hadap 180^0 yaitu sebanyak 1214 kali per jam. *Slamming* ini terjadi ketika alas kapal di atas permukaan pada kondisi gerakan *heaving* dan *pitching*.

Tabel 3. Probabilitas dan intensitas *slamming* pada sudut hadap 90^0

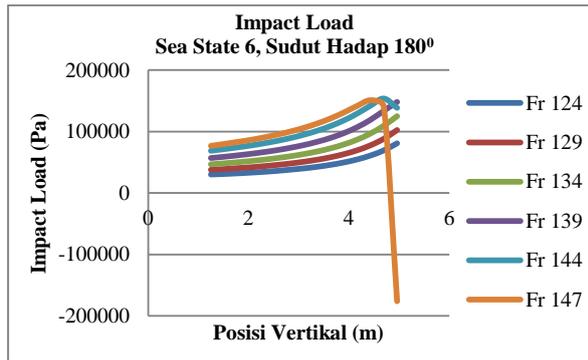
Sudut Hadap 90^0				
<i>Sea State</i>	m_0	m_{2s}	P	N
<i>Sea State 7</i>	2,444	8,384	0,071	75
<i>Sea State 6</i>	3,575	8,759	0,163	146
<i>Sea State 5</i>	4,004	8,967	0,198	170

4.3. Beban Slamming

Hentakan antara fluida air dan badan kapal menghasilkan tekanan sesaat dimana besarnya bergantung pada kecepatan dan percepatan vertikal hentakan. Hentakan ini kemudian disebut dengan *impact load*. Nilai ini dicari pada setiap gading di bagian haluan kapal. Gambar 11-13 menunjukkan grafik distribusi *impact load* dengan variasi *sea state*. Kecepatan kapal diambil beroperasi pada kecepatan maksimum yaitu 30 knot.

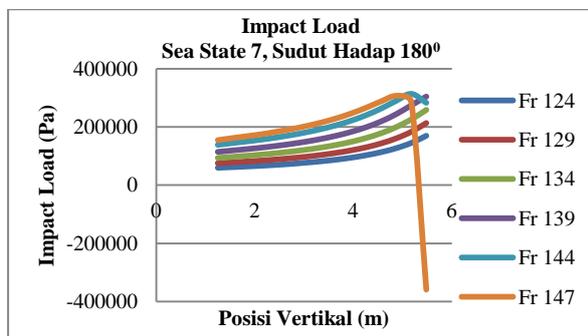


Gambar 11. Distribusi *impact load* pada *sea state 5* dan sudut hadap 180^0



Gambar 12. Distribusi *impact load* pada *sea state* 6 dan sudut hadap 180^0

Impact load terbesar terjadi pada *sea state* 7 dengan nilai 306,893 kPa. Pola grafik yang menurun tajam (khususnya pada *frame* 147) menunjukkan bahwa *impact load* yang bekerja pada posisi vertikal tersebut sama dengan 0 yang artinya posisi vertikal berada di atas permukaan laut. Pada *sea state* 7, grafik mulai menurun tajam pada posisi vertikal 5,48 m dimana dapat diartikan bahwa linggi haluan yang tercelup maksimum. Sedangkan pada *sea state* 5, grafik mulai menurun tajam pada posisi vertikal 4,05 m.



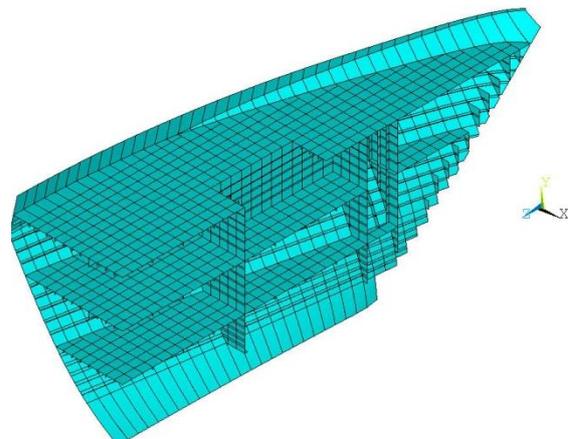
Gambar 13. Distribusi *impact load* pada *sea state* 7 dan sudut hadap 180^0

Semakin besar *sea state*, semakin besar *impact load* yang diterima kapal. Intensitas *slamming* terbesar terjadi pada sudut hadap 180^0 . Jadi, kondisi *slamming* terburuk pada skenario ini terjadi pada sudut hadap 180^0 dan *sea state* 7.

4.4. Tegangan Struktur Kapal

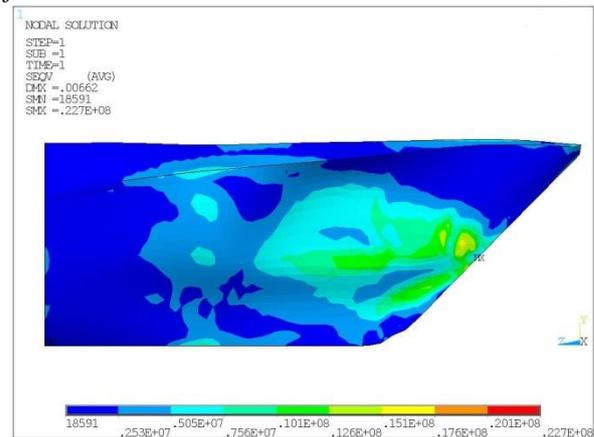
Impact load yang mengenai badan kapal akan menimbulkan tegangan pada pelat dan profil kapal. Penentuan kekuatan konstruksi kapal ini dilakukan dengan analisa statis dimana bagian haluan kapal yang dimodelkan

diberi *impact load* maksimum. Beban ini diaplikasikan dalam badan kapal berupa tekanan yang mengenai luasan badan kapal.



Gambar 14. Pemodelan kapal perang berbasis metode elemen hingga

Gambar 14 menunjukkan pemodelan kapal perang berbasis metode elemen hingga mulai *frame* 124-147.



Gambar 15. Distribusi tegangan yang terjadi di haluan kapal akibat *impact load*

Gambar 15 menunjukkan distribusi tegangan yang terjadi pada haluan kapal akibat *impact load*. Tegangan maksimal sebesar 22,7 MPa terjadi pada linggi haluan kapal. Hal ini disebabkan karena kecepatan kapal tinggi. Karena alas di haluan kapal memiliki luas penampang kecil, maka *impact load* yang terjadi pada luasan tersebut kecil sehingga tegangan yang dihasilkan juga relatif kecil. Besarnya tegangan izin menurut peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) sebesar 235 MPa untuk jenis baja *mild steel*. Rasio antara tegangan yang terjadi dengan tegangan izin BKI sebesar 9,6% dimana masih memenuhi klasifikasi BKI.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah :

1. Intensitas *slamming* terjadi paling banyak 1214 kali per jam pada saat sudut hadap 180^0 , *sea state* 7, dan kecepatan kapal 30 knot. Sehingga kapal perang yang beroperasi sebaiknya menghindari posisi operasi dengan sudut hadap 180^0 .
2. Berdasarkan hasil RAO, *vertical motion* gerakan *heaving* paling berpengaruh pada sudut hadap 90^0 dan gerakan *pitching* paling berpengaruh pada sudut hadap 180^0 .
3. Beban *slamming* atau *impact load* paling besar adalah 306,893 kPa pada saat sudut hadap 180^0 , *sea state* 7, dan kecepatan 30 knot.
4. Semakin ke depan haluan kapal, besar *impact load* semakin besar. Hal ini disebabkan karena kecepatan dan percepatan vertikal adalah fungsi dari jarak antara sumbu rotasi (untuk gerakan *pitching*) terhadap titik atau posisi di bagian haluan kapal.
5. Tegangan yang terjadi pada konstruksi kapal akibat *impact load* masih memenuhi persyaratan klasifikasi.

5.2. Saran

Penelitian tentang *impact load* akibat *slamming* dapat dikembangkan dengan berbagai kapal dengan ukuran besar. Selain itu, efek getaran yang terjadi akibat *slamming* menjadi topik yang menarik pada kasus hidroelastisitas.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) ITS yang telah mendukung dana untuk riset ini dalam skema Penelitian Pemula 2015.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hirdaris, S. E., Temarel, P., 2009. *Hydroelasticity of Ships: Recent Advances and Future Trends*, Proceedings Institute Mechanical Engineering Part M: Engineering Maritime Environmental, 223, 305-330.
- [2] Das, S., Cheung, K. F., 2012, *Coupled Boundary Element and Finite Element Model for Fluid-Filled Membrane in*

Gravity Waves, Engineering Analysis with Boundary Elements. 33 (6), 802-814.

- [3] Qin, Z., Batra, R. C., 2009, *Local Slamming Impact of Sandwich Composite Hulls*, International Journal Solid Structure, 46, 2011-2035.
- [4] Utama, I K. A. P., Molland, A. F., 2012, *The Powering of Future Ships taking into Consideration Economic Viability and Environmental Issues*, International Conference on Ship and Offshore Technology (ICSOT), 7-8 November, Ambon, Indonesia.
- [5] Murdijanto, Utama, I K. A. P., Jamaluddin, A., 2011, *An Investigation into the Resistance/Powering and Seakeeping Characteristics of River Catamaran/Trimaran*, MAKARA Seri Teknologi, Vol. 15, No. 1, Universitas Indonesia, Jakarta.
- [6] Bhattacharyya, R. 1972. *Dynamics of Marine Vehicles*. US Naval Academy, Maryland.
- [7] Sulisetyono, A. 2005. *Analytic Solution of the Ordinary Differential Equation of Transient Green's Function for Wave-Body Interaction Problems*, International Conference of Applied Mathematics, Bandung, Indonesia.
- [8] Dessi, D., Ciappi, E., 2010, *Comparative Analysis of Slamming Events and Induced Response for Different Types of Ships*, Proceedings of the 11th International Symposium on Practical Design of Ships and other Floating Structures, Rio de Janeiro, Brazil
- [9] Greco, M., Colicchio, G., Faitinsen, O.M., 2010a, *Bottom Slamming for a Very Large Floating Structure: Uncoupled Global and Slamming Analyses*, Journal Fluids Structure, 25, 406-419.