

Analisis Tegangan Akibat Beban Gelombang pada Struktur Kapal Perang Tipe *Corvette*

Pratama Yuli Arianto, Aries Sulisetyono, Teguh Putranto

Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: sulisea@na.its.ac.id, theories@na.its.ac.id

Abstrak—Peningkatan sektor pertahanan nasional merupakan suatu hal yang penting dalam mempertahankan kedaulatan suatu negara. Salah satu diantaranya adalah dengan membuat Alat Utama Sistem Pertahanan Negara (ALUTSISTA) berupa kapal perang yang memiliki kecepatan tinggi, *maneuver* dan kekuatan struktur yang bagus. Ketika terjadi interaksi antara struktur kapal dengan beban gelombang maka akan muncul suatu tegangan. Jika tegangan yang dihasilkan melebihi batas tegangan yang diijinkan maka akan membahayakan dan merusak struktur kapal. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji desain lambung dan kekuatan struktur kapal untuk daerah operasional di perairan terbuka Indonesia yang memiliki tinggi rata-rata gelombang 3-5 m dan menurut standar *Germanischer Lloyd (GL)* dengan tinggi rata-rata gelombang 6 m. Pembahasan dititikberatkan pada analisis gerakan kapal untuk mengetahui kekuatan struktur kapal akibat adanya beban gelombang. Analisis dilakukan dengan melakukan pemodelan numerik dengan metode panel. Skenario divariasikan berdasarkan sudut hadap 90° , 135° , 180° dan tinggi gelombang signifikan 3, 4, 5 dan 6 m. Dari hasil simulasi didapatkan besar gaya lintang maksimal pada gerakan *heaving* dan momen lengkung maksimal pada gerakan *pitching* yang terjadi pada *midship section* ketika tinggi gelombang 6 m dan sudut hadap 180° . Tegangan terbesar kapal terjadi ketika kondisi *sagging* dan *hogging* maksimal yang terletak pada *midship section frame 88* sebesar $231,89 \text{ N/mm}^2$ dan memenuhi persyaratan tegangan izin berdasarkan *GL rules*.

Kata kunci—beban gelombang, struktur kapal, sudut hadap, tegangan, tinggi gelombang

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara maritim, dimana memiliki wilayah laut yang luas serta didukung dengan banyaknya pulau-pulau di dalamnya. Dengan jumlah pulau sekitar $\pm 17,5$ ribu pulau dan luas wilayah laut Indonesia mencapai $\pm 5,8$ juta km^2 . Dengan didukung kondisi geografisnya sudah seharusnya Indonesia mampu menjadi negara yang berdaulat. Berdaulat terhadap keamanan wilayah dan kekayaan sumberdaya lautnya dengan meningkatkan aspek-aspek yang mendukung terciptanya negara berdaulat adil dan makmur yang salah satunya yaitu aspek pertahanan militer.

Pertahanan militer merupakan suatu kekuatan utama pertahanan negara yang dibangun dan dipersiapkan untuk menjaga kedaulatan negara serta menghadapi ancaman militer. Peningkatan sektor pertahanan militer nasional merupakan suatu hal yang penting dalam mempertahankan keutuhan suatu negara. Karena kita tahu akhir-akhir ini telah terjadi banyak

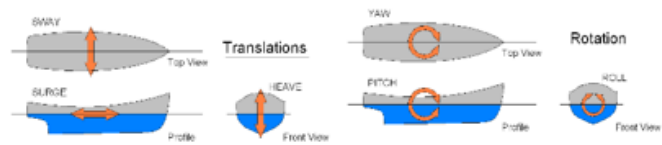
pelanggaran-pelanggaran di wilayah laut Indonesia oleh negara lain, seperti kasus pencurian ikan secara ilegal (*illegal fishing*), penyelundupan barang, penyelundupan narkoba, penyelundupan manusia (*human trafficking*), terorisme dan bajak laut. Dimana hal ini dapat terjadi karena lemahnya pengamanan laut di Indonesia. Dalam bidang maritim salah satu cara meningkatkan pertahanan nasional adalah dengan meningkatkan sektor Alat Utama Sistem Pertahanan Negara (ALUTSISTA) berupa kapal perang yang mumpuni baik dari segi kecepatan, *maneuver*, stabilitas, dan didukung persenjataan yang memadai.

Dalam mendesain suatu kapal perang yang mumpuni, dalam hal teknis juga harus mempertimbangkan kekuatan konstruksi dari kapal tersebut. Baik kekuatan secara memanjang, maupun melintang, dan juga kekuatan puntir dari kapal tersebut. Selain itu juga mempertimbangkan faktor alam yang berupa gelombang air laut yang dikenal dengan beban gelombang. Beban gelombang adalah beban yang ditimbulkan karena interaksi antara permukaan badan kapal dengan gelombang air laut. Dimana mengakibatkan kapal melakukan gerakan-gerakan mulai dari *surgings*, *heaving*, *swaying*, *rolling*, *pitching*, dan *yawing*, sehingga dapat mempengaruhi struktur kapal. Ketika struktur kapal mendapatkan beban gelombang secara berulang-ulang atau yang disebut dengan beban siklik (*cyclic load*), maka akan mempengaruhi tegangan pada struktur kapal tersebut. Jika tegangan yang dihasilkan melebihi batas tegangan yang diijinkan maka akan membahayakan dan akan merusak struktur kapal tersebut.

Kapal perang *corvette* merupakan jenis kapal perang yang lebih kecil dari fregat dan lebih besar dari kapal patroli. Kapal perang *corvette* ini masuk dalam jenis kapal perang kombatan atau kapal penyerang. Dimana memiliki kekuatan struktur kapal yang lebih besar apabila dibandingkan dengan kapal komersil pada umumnya [1].

Dalam hal menganalisis struktur kapal tidak terlepas dari adanya tegangan yang terjadi akibat beban gelombang dengan ketinggian yang berbeda-beda. Digunakannya kapal yang masih dalam tahap desain untuk mengantisipasi terjadinya kerusakan pada struktur kapal. *Germanischer Lloyd (GL Class)* memiliki standar gelombang dengan tinggi 6 m dan menurut Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) tinggi gelombang ekstrim rata-rata di Indonesia adalah 3-5 m [2].

Perumusan masalah yang dibahas pada penelitian ini adalah (i) bagaimana menentukan *bending moment* dan *shear force* yang terjadi pada kapal perang tipe *corvette*, (ii) berapa besar tegangan pada struktur kapal akibat beban gelombang dengan tinggi gelombang 6 m (standar *GL rules*), (iii) berapa besar tegangan pada struktur kapal akibat beban gelombang dengan tinggi gelombang 3-5 m (kondisi perairan Indonesia), (iv) bagaimana analisis besar tegangan yang dihasilkan dengan tegangan yang diizinkan oleh klasifikasi.



Gambar. 1. Visualisasi gerakan kapal

Setiap gerakan memiliki sebuah persamaan umum yang didalamnya terdapat beberapa komponen,

$$a\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F_0 \cos \omega_e t \tag{1}$$

Persamaan diatas menggambarkan gerakan *heaving* dan disebut sebagai *forced heaving motion*. Untuk gerakan translasi lainnya, persamaan tersebut dapat diterapkan dengan mengubah sumbu axis gerakan terhadap sumbu x dan y, dimana a adalah *virtual mass* (massa kapal ditambah dengan *added mass*), b adalah koefisien *damping* (gaya melawan arah gerakan), c adalah koefisien *restoring force* (gaya pengembali ke titik setimbang) dan F_0 adalah *existing force / encountering force* atau gaya luar yang bekerja pada kapal. Jika kapal berada pada kondisi air tenang (*calm water*) maka F_0 adalah nol [3].

C. Response Amplitude Operators (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) atau sering disebut sebagai *transfer function* adalah fungsi *response* yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur *offshore*. RAO disebut sebagai *Transfer Function* karena RAO merupakan alat untuk mentransfer beban luar (gelombang) dalam bentuk *response* pada suatu struktur. Persamaan RAO dapat dicari dengan rumus sebagai berikut [3]:

$$RAO = X_p(\omega) / \eta(\omega) \tag{2}$$

dimana,
 $X_p(\omega)$ = amplitudo struktur
 $\eta(\omega)$ = amplitudo gelombang

D. Spektrum Gelombang (Spektrum ITTC/ISSC – 1975)

Pada acara *International Towing Tank Conference* (ITTC) ke-14 pada tahun 1975 di kota Ottawa, Canada, Mirokhin dan Kholodilin telah mengajukan suatu formula baru untuk spektra gelombang, dengan mempertimbangkan perkembangan data mutakhir pada saat itu. Para peserta yang terdiri dari pakar hidrodinamika dari berbagai laboratorium hidrodinamika sedunia yang tergabung dalam ITTC kemudian menyetujui formulasi tersebut untuk dijadikan standar utama dalam berbagai pengujian perilaku gerakan kapal di gelombang acak, dengan bentuk sebagai berikut [4]:

$$S_\zeta(\omega) = \frac{0.0081 \cdot g^2}{\omega^5} \times \exp\left(\frac{-3.11}{H_s^2 \cdot \omega^4}\right) \tag{3}$$

dimana,
 $S_\zeta(\omega)$ = Spektrum Gelombang
 g = gravitasi

II. DASAR TEORI

A. Teori Gelombang

Dalam studi olah gerak kapal (*seakeeping*) perlu dipelajari terlebih dahulu mengenai gelombang. Gelombang didefinisikan sebagai perubahan bentuk akibat gerakan permukaan air. Setiap gelombang yang dimaksudkan pada penelitian ini adalah gelombang air laut. Sebelum mempelajari lebih jauh mengenai gelombang, lebih dahulu diperkenalkan hal-hal yang berhubungan dengan gelombang sebagai berikut:

- 1) Puncak gelombang (*crest*) adalah titik dimana permukaan air berada pada elevasi tertinggi.
- 2) Jumlah halaman artikel adalah 3-6. Lembah gelombang (*trough*) adalah titik dimana permukaan air berada pada elevasi terendah.
- 3) Garis datum adalah garis datar permukaan air (diambil secara statistik) pada waktu air tenang.
- 4) Elevasi gelombang (ζ) adalah jarak suatu titik pada permukaan gelombang dengan garis datum pada suatu waktu tertentu.
- 5) Amplitudo gelombang (ζ_w) adalah garis vertikal antara titik tertinggi atau titik terendah dengan garis datum.
- 6) Panjang gelombang (λ) adalah jarak dari puncak (lembah) gelombang dengan puncak (lembah) gelombang berikutnya.
- 7) Kecepatan gelombang (v) adalah jarak yang ditempuh suatu titik per satuan waktu.
- 8) Frekuensi gelombang (ω) adalah banyaknya puncak (lembah) gelombang yang dilalui oleh suatu titik per satuan waktu [3].

B. Gerak pada Kapal

Pada dasarnya kapal mengalami 2 jenis gerakan yaitu gerakan translasi dan rotasi. Karena kapal merupakan benda 3 dimensi dimana setiap jenis gerakan bergerak terhadap 3 sumbu yaitu sumbu x, y dan z.

Gerakan translasi yang dialami kapal antara lain gerakan vertikal naik turun searah sumbu z (*heave*), gerakan ke kiri dan ke kanan searah sumbu y (*sway*) dan gerakan ke arah depan dan belakang searah sumbu x (*surge*). Gerakan rotasi yang dialami kapal antara lain rotasi terhadap sumbu x (*roll*), rotasi terhadap sumbu y (*pitch*), dan rotasi terhadap sumbu z (*yaw*). Jadi, berdasarkan uraian tersebut kapal mengalami 6 macam gerakan saat mendapat gaya dari gelombang saat berada di air laut maupun air tawar.

ω = frekuensi
 H_s = tinggi gelombang signifikan

E. Beban Gelombang

Beban Gelombang (*Wave load*) merupakan suatu beban dari suatu gelombang, baik air laut, angin, maupun yang lainnya. Dimana penerapannya paling umum diterapkan pada suatu benda atau struktur. Hal ini paling sering digunakan dalam analisis pipa, kapal, atau struktur bangunan yang terkena angin, air, maupun gangguan seismik.

Pada saat kapal beroperasi pada kondisi normal di laut, maka akan mengalami beban gelombang yang mempengaruhi kekuatan memanjang kapal, kondisi inilah sering kita sebut dengan *hogging* dan *sagging*. Untuk itu diperlukan perhitungan *bending moment* kapal yang dipengaruhi oleh [3] *Vertical Bending moment*, akibat defleksi sumbu-Y, *Horizontal bending moment*, akibat defleksi sumbu-Z, dan *Tranverse bending moment*, akibat defleksi sumbu-X.

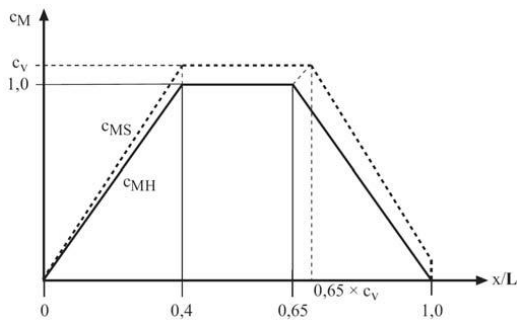
1) *Vertical Wave Bending Moment*

Vertical bending moment merupakan penyebab beban akibat gelombang yang paling dominan terhadap struktur terapan. Berdasarkan *GL Rules*, perhitungan beban gelombang vertikal dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$M_{WV} = L^2 \cdot B \cdot C_0 \cdot C_1 \cdot C_L \cdot C_M [kNm] \quad (4)$$

dimana,

L : panjang kapal, m
 B : lebar kapal, m
 C_0 : koefisien gelombang
 C_1 : kondisi *hogging* atau *sagging*
 C_{1H} : 0,19 C_b kondisi *hogging*
 C_{1S} : -0,11 ($C_b + 0,7$) kondisi *sagging*
 C_b : *block coefficient*
 C_L : koefisien panjang
 C_M : faktor distribusi



Gambar. 2. Distribution factor for c_M and influence factor c_v

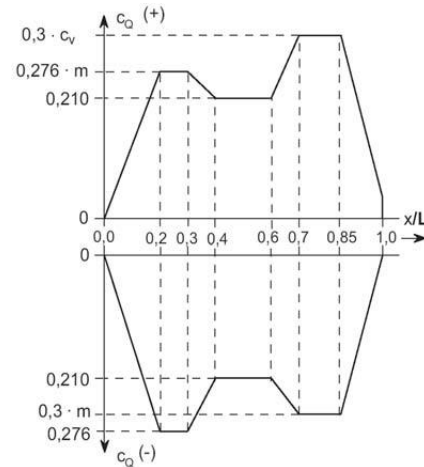
2) *Vertical Wave Shear Force*

Sebagaimana dengan *vertical bending moment*, *vertical shear force* juga merupakan penyebab utama tegangan geser pada struktur kapal. Berdasarkan *GL Rules*, 2005, perhitungan beban dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q_{WV} = L \cdot B \cdot C_0 \cdot C_Q \cdot (C_b + 0.7) [kN] \quad (5)$$

dimana,

L : panjang kapal, m
 B : lebar kapal, m
 c_0 : koefisien gelombang
 c_L : koefisien panjang
 C_b : *block coefficient*
 C_Q : faktor distribusi



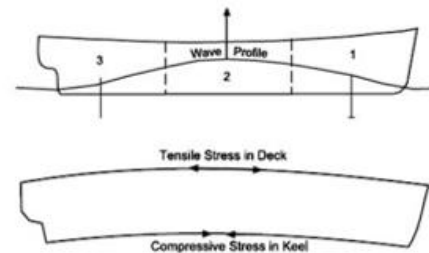
Gambar. 3. Faktor distribusi C_Q [4]

F. Kondisi Sagging dan Hogging

Efek deformasi *ship shaped structure* akibat beban gelombang yang ditinjau dengan mengibaratkan sebuah kapal bergerak pada gelombang regular dimana panjang gelombangnya sama dengan panjang kapal. Hal ini menyebabkan *vertical bending moment*. Jika *hull* diibaratkan sebagai beam, maka kondisi yang terjadi adalah:

1) *Kondisi Hogging*

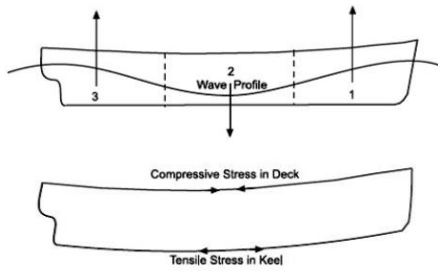
Deformasi pada kapal berbentuk cembung. Pada kondisi ini, meskipun berat total seimbang dengan buoyancy, terdapat kelebihan buoyancy pada *midship* dan kelebihan berat pada *bow* dan *stern*. Situasi ini menyebabkan kecenderungan ujung kapal bergerak ke arah bawah dan pada bagian *midship* bergerak ke atas [5].



Gambar. 4. Kondisi *hogging*

2) *Kondisi Sagging*

Deformasi pada kapal berbentuk cekung. Terdapat kelebihan berat pada *midship* dan kelebihan *buoyancy* pada *bow* dan *stern*. Situasi ini menyebabkan kecenderungan ujung kapal bergerak ke arah atas dan pada bagian *midship* bergerak ke bawah [5].



Gambar. 5. Kondisi *sagging*

Perhitungan Momen pada kondisi *sagging* dan *hogging* didasarkan pada perhitungan momen pada kondisi air tenang dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$MT = M_{sw} + M_{wv} \tag{6}$$

$$M_{wv} = L^2 \cdot B \cdot C_o \cdot C_1 \cdot C_L \cdot C_M \tag{7}$$

dimana,

M_{sw} = Momen bending pada kondisi air tenang

$$C_o = 10.75 - [(300 - L)/100]^{1.5} \text{ untuk } 90 \leq L \leq 300 \text{ m}$$

$$C_L = 1, \text{ untuk } L \geq 90 \text{ m}$$

$$C_{1S} = -0.11 (C_b + 0.7) \text{ untuk kondisi } \textit{sagging}$$

$$C_{1H} = 0.19 C_b \text{ untuk kondisi } \textit{hogging}$$

$$C_M = \textit{Distribution factor}$$

dengan,

1) *Hogging Condition*

$$C_{MH} = 2.5 \cdot x/L$$

$$C_{MH} = 1 \text{ untuk } 0.4 \leq x/L \leq 0.65$$

$$C_{MH} = \text{ untuk } x/L > 0.65$$

2) *Sagging Condition*

$$C_{MS} = cv \cdot 2.5 \cdot x/L$$

$$C_{MS} = cv$$

$$C_{MS} = cv [(x/L - 0.65cv) / 1 - 0.65cv]$$

$$C_{MS} = 3\sqrt{(V_o/1.4\sqrt{L})} \text{ ; } C_v \geq 1.0$$

G. Kondisi *Sagging* dan *Hogging*

Tegangan pada kapal disebabkan oleh beban yang bekerja pada kapal sehingga terjadi *bending moment*. Besar tegangan rata-rata pada suatu bidang dapat didefinisikan sebagai intensitas gaya yang bekerja pada bidang tersebut. Tiap-tiap klasifikasi telah menentukan tegangan yang diijinkan pada kapal.

Menurut buku *Dynamics of Marine Vehicles* tegangan pada kapal ditampilkan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{M_{VZ}}{I_V}\right)^2 + \left(\frac{M_{HY}}{I_H}\right)^2} \tag{8}$$

dimana,

σ = tegangan pada kapal

M_V = momen lengkung searah vertikal

M_H = momen lengkung searah horisontal

I_V = momen inersia searah vertikal

I_H = momen inersia searah horisontal

Beberapa dari peraturan klasifikasi memiliki formula yang sama dalam menentukan tegangan ijin, misalnya *Germanischer's Lloyd*, *Biro Klasifikasi Indonesia*, *Lloyd's*

Register. Adapun formula tegangan ijin yang dipakai adalah sebagai berikut:

$$\sigma_p = C_s \cdot \sigma_{po} \tag{9}$$

dimana,

σ_p = Tegangan memanjang kapal yang diijinkan

C_s = 1.0 untuk $0.3 \leq x/L \leq 0.7$

σ_{po} = $175/k$ untuk $L \geq 90 \text{ m}$

III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini secara keseluruhan dilakukan dengan analisis numerik. Hasil yang ingin didapatkan dari penelitian ini adalah besarnya tegangan yang terjadi akibat pengaruh beban gelombang pada struktur kapal perang tipe *corvette*. Metodologi penelitian dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar. 6. Diagram alir proses pengerjaan

Dalam proses penelitian ini, setelah data kapal telah didapatkan maka dilakukan proses pemodelan numerik dengan metode panel. Model kapal dibagi menjadi ribuan elemen atau panel. Kemudian elemen-elemen tersebut diintegrasikan untuk mendapatkan respon akibat gelombang.

Secara teori, RAO adalah rasio kuadrat antara amplitudo gerakan kapal terhadap amplitudo gelombang. 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*. Berdasarkan data yang didapat, kapal akan beroperasi pada 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 beban gelombang pada kapal.

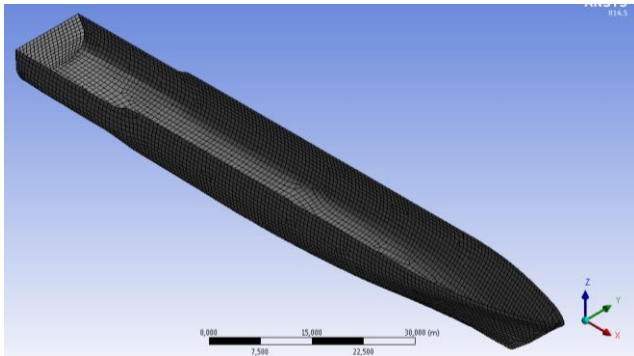
Setelah beban gelombang didapatkan maka dilakukan perhitungan tegangan yang terjadi akibat beban gelombang yang mengenai badan kapal dan selanjutnya dibandingkan dengan tegangan ijin dari *GL Class*.

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Ukuran utama kapal yang dianalisis dapat dilihat pada Tabel 1. Gambar 4 menunjukkan proses pemodelan kapal dengan metode panel dengan jumlah panel sebanyak 5085 panel / elemen.

Tabel 1.
Data ukuran utama kapal

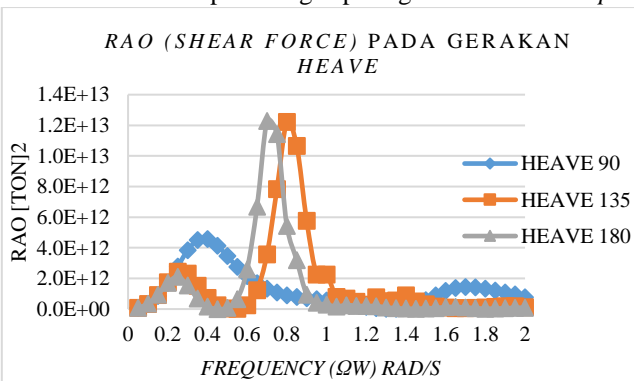
Item	Nilai	Unit
Loa	106,00	m
B	14,00	m
T	3,70	m
H	8,75	m
Vs	30	knot



Gambar 7. Model kapal perang

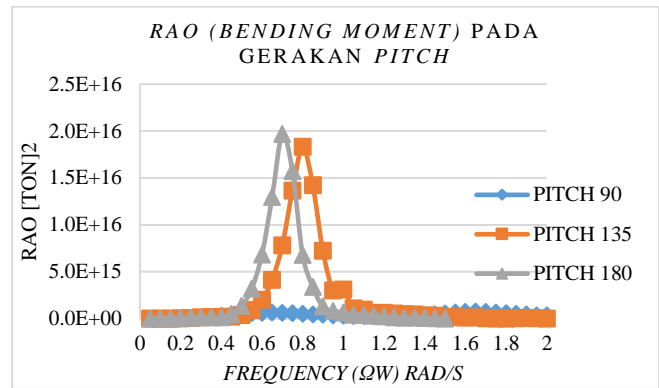
A. Response Amplitude Operator (Shear Force / Bending Moment)

Proses perhitungan *response amplitude operator (shear force / bending moment)* bertujuan untuk mengetahui seperti apa respon kapal ketika mendapatkan gaya lintang maupun momen lengkung pada kapal. Variasi pada perhitungan *response amplitude operator* ini adalah sudut hadap sebesar 90°, 135° dan 180°. Gaya lintang dan momen lengkung yang dititikberatkan pada penelitian ini adalah secara vertikal, oleh karena itu dilakukan perhitungan pada gerakan *heave* dan *pitch*.



Gambar 8. RAO (*shear force*) pada gerakan *heave*

Berdasarkan gambar 8. pada keadaan *heave*, dengan variasi sudut 90°, 135°, dan 180° dapat diketahui bahwa RAO (*Shear Force*) terbesar terjadi ketika kapal menadapat gelombang dengan sudut hadap 180° pada frekuensi 0,7 dengan nilai 1,23E+12 ton².

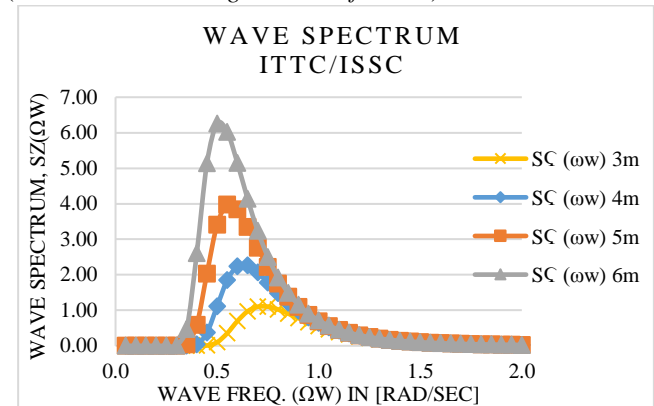


Gambar 9. RAO (*bending Moment*) pada Gerakan *Pitch*

Berdasarkan gambar 9. pada keadaan *pitch*, dengan variasi sudut 90°, 135°, dan 180° dapat diketahui bahwa RAO (*bending moment*) terbesar terjadi ketika kapal menadapat gelombang dengan sudut hadap 180° pada frekuensi 0,7 dengan nilai 1,97E+16 ton².

B. Hasil Spektrum Gelombang

Dalam proses perhitungan, untuk mendapatkan gerakan kapal karena pengaruh gelombang, maka dilakukan perhitungan spektrum gelombang. Dalam pengerjaan penelitian ini menggunakan spektrum gelombang ITTC (*International Towing Tank Conference*).

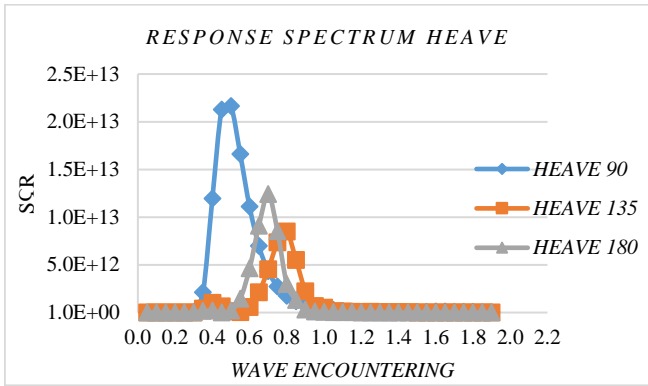


Gambar 10. Spektrum Gelombang ITTC

Berdasarkan dari Gambar 10. dapat diketahui bahwa spektrum gelombang dengan tinggi gelombang signifikan yang berbeda yaitu mulai dari 3, 4, 5 dan 6 m, maka menghasilkan spektrum gelombang yang berbeda-beda pula. Dimana berdasarkan grafik untuk spektrum gelombang terbesar adalah ketika tinggi gelombang signifikan 6 m.

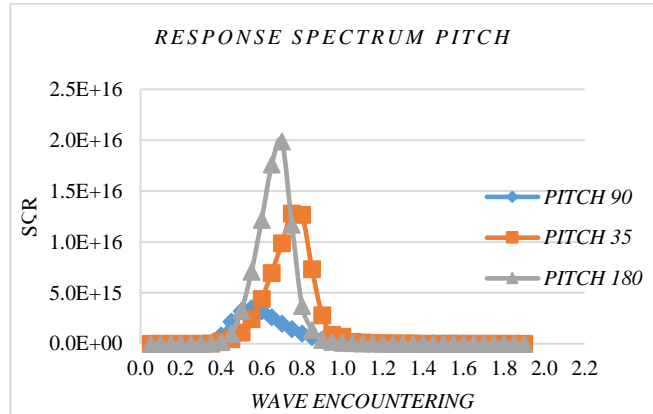
C. Respon Spektrum Shear Force and Bending Moment

Proses perhitungan respon spektrum ini bertujuan untuk mengetahui kondisi ekstrim kapal beroperasi, variasi dilakukan berdasarkan sudut hadap gelombang dan tinggi gelombang. Beban Gelombang terbesar cenderung diakibatkan oleh gerakan *heaving* dan *pitching* sehingga perlu didapatkan respon spektrum untuk setiap gerakan tersebut. *Response spectrume* didapatkan dengan cara mengkalikan *wave spectrum* dengan RAO (*shear force / bending moment*).



Gambar. 11. Response spektrum *heave*

Gambar 11 menunjukkan grafik respon spektrum gerakan *heaving* pada variasi sudut hadap. Respon terbesar terjadi pada sudut hadap 90° dengan tinggi gelombang signifikan sebesar 6 m. Pada sudut hadap 135°, respon gerakan *heaving* kapal paling kecil.

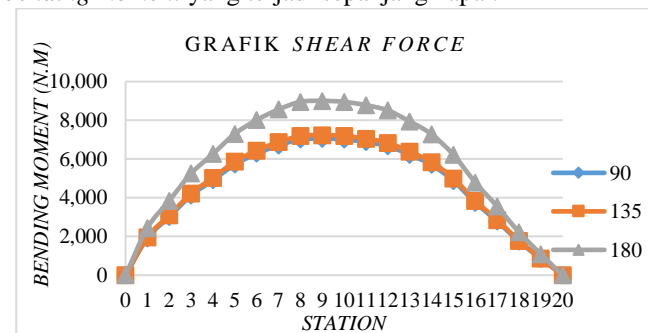


Gambar. 12. Response spektrum *pitch*

Gambar 12. menunjukkan grafik respon spektrum gerakan *pitch* pada variasi sudut hadap. Respon terbesar terjadi pada sudut hadap 180° dengan tinggi gelombang signifikan sebesar 6 m. Pada sudut hadap 90°, respon gerakan *pitch* kapal paling kecil.

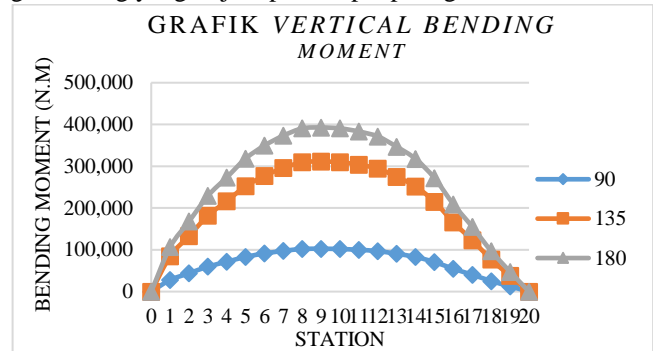
D. Hasil Beban Gelombang

Dengan diketahuinya respon gerakan kapal yang terjadi dengan variasi sudut heading 90°, 135° dan 180° dan variasi tinggi gelombang signifikan 3, 4, 5 dan 6 m maka dapat dihitung besarnya beban gelombang berupa *shear force* dan *bending moment* yang terjadi sepanjang kapal.



Gambar. 13. Distribusi beban gelombang pada gerakan *heave*

Gambar 13. menunjukkan grafik beban gelombang ketika gerakan *heave* pada variasi sudut hadap. Beban gelombang terbesar terjadi pada sudut hadap 180° dengan tinggi gelombang signifikan sebesar 6 m. Pada sudut hadap 90°, beban gelombang yang terjadi pada kapal paling kecil.



Gambar. 14. Distribusi beban gelombang pada gerakan *pitch*

Gambar 14. menunjukkan grafik beban gelombang ketika gerakan *pitch* pada variasi sudut hadap. Beban gelombang terbesar terjadi pada sudut hadap 180° dengan tinggi gelombang signifikan sebesar 6 m. Pada sudut hadap 90°, beban gelombang yang terjadi pada kapal paling kecil.

E. Analisis Kekuatan Memanjang

Tegangan yang terjadi akibat beban gelombang dengan variasi sudut hadap dan tinggi gelombang signifikan adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil tegangan pada kapal perang

Significant Wave Height (m)	Wave Heading (°)	Tegangan (N/mm ²)	
		Topdeck	Bottom
3	90	29,47	25,79
	135	118,52	103,71
	180	121,24	106,08
4	90	40,67	35,58
	135	150,37	131,58
	180	172,37	150,83
5	90	51,08	44,69
	135	170,43	149,12
	180	207,51	181,58
6	90	60,50	52,94
	135	183,84	160,86
	180	231,89	202,90

Dengan tegangan ijin sebesar 243 N/mm², maka tegangan pada kapal telah memenuhi tegangan ijin dari *GL Rules*.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

- 1) Beban gelombang terbesar pada kapal perang tipe *corvette* terjadi pada tinggi gelombang signifikan sebesar 6 m. Dengan besar *shear force* maksimal pada gerakan *heave* dengan sudut hadap 90° sebesar 9001,84 kN dan *bending moment* maksimal pada gerakan *pitch* dengan sudut hadap 180° sebesar 392.816,82 kNm.
- 2) Tegangan global yang terjadi dipengaruhi oleh besarnya tinggi gelombang signifikan dan variasi *wave heading*.

Semakin besarnya tinggi gelombang signifikan maka tegangan global juga semakin besar, selain itu dengan *wave heading* yang semakin besar mulai dari 90^0 , 135^0 , dan 180^0 maka tegangan juga semakin besar. Dimana besar tegangan yang terjadi pada setiap tinggi gelombang signifikan 3, 4, 5 dan 6 m berturut-turut adalah 121,24 N/mm², 172,37N/mm², 207,51N/mm² dan 231,89N/mm².

- 3) Tegangan maksimal pada *frame 88 (midship section)* tersebut terjadi ketika mendapat gelombang dengan tinggi gelombang signifikan 6 m dan *wave heading* 180^0 yang terletak pada bagian *top deck* sebesar 208.08 N/mm². Dengan adanya tegangan ijin menurut *GL-Rules* sebesar 243.4 N/mm², maka dapat disimpulkan bahwa tegangan telah memenuhi persyaratan dari tegangan ijin kapal.

B. Saran

Dalam penelitian ini masih ada kekurangan – kekurangan yang terjadi, oleh karena masih banyaknya pokok bahasan yang akan diteliti dan dikembangkan lagi, selain itu untuk saran pada penelitian selanjutnya, adalah sebagai berikut:

- 1) Dalam proses pengerjaan penelitian ini, gerakan kapal masih menggunakan gerakan kapal yang bersifat individu. Disarankan dalam penelitian selanjutnya menggunakan gerakan kapal yang saling berpasangan atau dikombinasikan antar gerakan tersebut untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.
- 2) Untuk penelitian selanjutnya diharapkan mengkombinasikan secara langsung dalam 1 perangkat lunak mengenai interaksi gelombang dengan struktur kapal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] “Perisai Serangan Rudal Anti Kapal di Korvet Sigma Class TNI AL,” 2015. [Online]. Available: <http://www.indomiliter.com>.
- [2] “Informasi Meteorologi Maritim Gelombang Tinggi di Indonesia,” 17 September 2015. [Online]. Available: <http://www.bmkg.go.id>.
- [3] R. Bhattacharyya, *Dynamic of Marine Vehicle*, U.S. Naval Academy, Annapolis: Maryland, 1978.
- [4] G. Lloyd, *Rules of Classification and Construction Ship Technology*, Jerman: Germanischer Lloyd, 2012.
- [5] Barras, *Ship Stability for Master and Mates*, Oxford: Elseiver, 1999.