



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Studi Perencanaan Konstruksi Dan Analisa Kekuatan Kapal Patroli 165 DWT Pada Perairan Indonesia

Harya Kumuda Koostanto¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Samuel¹⁾

¹⁾Laboratorium Struktur dan Konstruksi

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail :haryakumuda@students.undip.ac.id, ahmadfzakki@yahoo.com, samuel@ft.undip.ac.id

Abstrak

Kapal patroli adalah kapal untuk menjaga keamanan dan aset negara di wilayah pesisir pantai dan laut. Mengingat pentingnya kepastian keamanan dan keselamatan dalam pengoperasional kapal maka analisis pada kekuatan kapal perlu dilakukan. Kapal yang dipakai pada penelitian ini adalah kapal patrol 165 DWT. Kapal tersebut memiliki sistem konstruksi melintang dan akan dimodifikasi sistem konstruksinya menjadi sistem konstruksi campuran. Sehingga perlu adanya analisis sebelum dan sesudah modifikasi dari segi kekuatan. Pada akhirnya dapat diketahui tegangan maksimum dan momen lentur batas yang terjadi. Software berbasis finite element analysis digunakan untuk mengetahui tegangan maksimum dan momen lentur batas yang terjadi. Pada hasil yang telah didapatkan, besaran tegangan maksimum pada sistem konstruksi melintang sebesar 36,093 MPa pada kondisi air tenang, 82,842 MPa pada kondisi sagging dan 124,874 MPa pada kondisi hogging. Serta $-6,303 \times 10^{10}$ N.mm pada kondisi ultimate sagging dan $9,951 \times 10^{10}$ N.mm pada kondisi ultimate hogging. Sementara pada sistem konstruksi campuran tegangan maksimum yang terjadi sebesar 31,829 MPa pada kondisi air tenang, 73,056 MPa pada kondisi sagging dan 110,179 MPa pada kondisi hogging. Serta $-8,063 \times 10^{10}$ N.mm pada kondisi ultimate sagging dan $10,923 \times 10^{10}$ N.mm pada kondisi ultimate hogging. Dari hasil analisis secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa sistem konstruksi campuran lebih kuat dibanding sistem konstruksi melintang. Namun, keduanya tetap dalam persyaratan yang diatur oleh BKI. Sehingga kedua sistem konstruksi tersebut dapat direkomendasikan.

Kata Kunci : Patroli, Tegangan Maksimum, Kekuatan Batas, Metode Elemen Hingga

1 PENDAHULUAN

Kapal patroli adalah kapal untuk menjaga keamanan dan aset negara di wilayah pesisir pantai dan laut. Mengingat pentingnya kepastian keamanan dan keselamatan dalam pengoperasional kapal maka analisis pada kekuatan kapal perlu dilakukan.

Kapal yang dipakai pada penelitian ini adalah kapal patrol 165 DWT. Kapal ini menggunakan *framing system* / sistem konstruksi melintang. Karena konstruksi dari kapal patrol ditekankan pada kekuatan, maka perhatian penulis tertuju pada sistem konstruksi dari kapal tersebut.

Framing system atau sistem konstruksi adalah bagian dari konstruksi profil dari sebuah kapal dan merupakan salah satu faktor utama yang

harus dipertimbangkan dalam membangun suatu bangunan kapal.

Sistem konstruksi terdiri dari 2 jenis utama yaitu: melintang, memanjang. Dari kedua sistem tersebut maka dikenal juga sistem kombinasi atau campuran. Suatu kapal dapat dibuat seluruhnya dengan sistem melintang atau beberapa bagian diubah dengan sistem memanjang, atau seluruhnya dibuat dengan sistem memanjang. Tidak ada aturan baku yang mengatur sebuah kapal harus memakai sistem konstruksi seperti apa. [1]

Adapun penelitian mengenai perbandingan antara 3 sistem konstruksi yang dilakukan pada sebuah kapal *floating fuel station*. Didapatkan hasil bahwa tegangan maksimum terbesar didapat oleh sistem konstruksi melintang diikuti oleh

sistem konstruksi campuran lalu sistem konstruksi memanjang [2].

Penelitian lain melakukan perbandingan analisis biaya sistem konstruksi melintang dan memanjang pada kapal ponton dan didapatkan hasil bahwa konstruksi memanjang memiliki berat lebih dibanding berat melintang hingga 5,51% [3].

[4] Melakukan penelitian terhadap respon struktur pada kapal *livestock carrier* menggunakan metode elemen hingga. Analisis dilakukan pada kondisi air tenang, sagging dan hogging pada perairan Indonesia.

Sudah cukup banyak penelitian terkait *ultimate strength*. [5] Melakukan penelitian terhadap perbandingan antara penggunaan metode elemen hingga dan metode eksperimen dimana kedua eksperimen tersebut menunjukkan hasil yang seirama. Sehingga metode elemen hingga dapat membantu memperhitungkan kegagalan kapal secara lebih cepat.

Pada Penelitian [6], percobaan terhadap *ultimate strength* dilakukan terhadap kapal VLCC dengan metode elemen hingga dengan model 1 jarak frame pada *midship section*. Penelitian serupa dengan kapal Ro-Ro dilakukan juga oleh [7]. Penelitian lain [8], melakukan percobaan pada perubahan bentuk sistem konstruksi untuk meningkatkan nilai *ultimate bending moment* pada kapal.

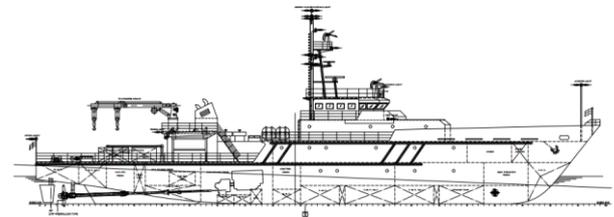
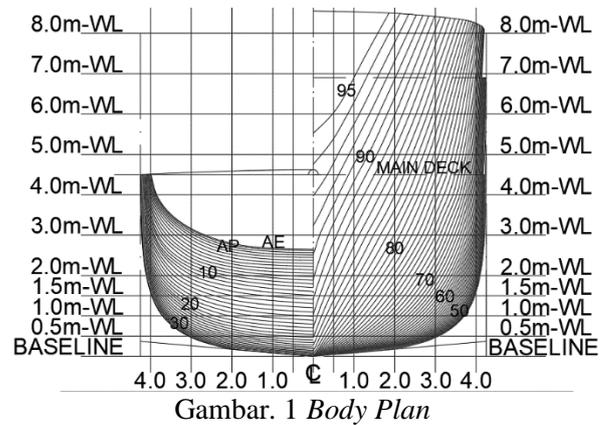
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sistem konstruksi yang lebih direkomendasikan dengan menganalisis tegangan maksimum pada kondisi air tenang, sagging dan hogging. Serta mencari besar momen lentur batas pada kondisi sagging dan hogging. Selain itu, mencari berat konstruksi pada masing masing sistem konstruksi.

2 METODE

2.1 Objek Penelitian

Objek dari penelitian ini adalah kapal patroli 165 DWT dengan ukuran utama:

Data	
<i>Material</i>	<i>Steel</i>
Loa	61.0 m
Lpp	55.0 m
B	8.5 m
T	3.0 m
H	4.5 m
Cb	0.53
Vs	18 knot
<i>Frame Spacing</i>	0.6 m



Gambar. 2 General Arrangement

Tabel 2. Pendefinisian Material

Data	
<i>Modulus of Elasticity</i>	206000 MPa
<i>Poisson Ratio</i>	0.3
Density	$7,85 \times 10^{-9}$ ton/mm ³
Yield Stress	235 MPa
Ultimate Stress	400 MPa

Pada penelitian ini, penulis akan membuat variasi sistem konstruksi pada model kapal patroli 165 DWT. Adapun variasi sistem konstruksi yang di analisis adalah:

1. Melintang
2. Campuran

Dengan analisis tegangan maksimum pada saat kondisi:

1. Air Tenang
2. Sagging
3. Hogging

Disertai dengan analisis kekuatan batas pada saat kondisi sagging dan hogging

2.2 Penentuan Ukuran Profil

Ukuran profil yang digunakan pada model kapal patrol 165 DWT telah tersedia. Namun, untuk variasi sistem konstruksi campuran, perlu diperhitungkan kembali ukuran profil yang akan digunakan untuk menggantikan sebagian profil yang akan diubah dari keadaan melintang menjadi memanjang. Profil profil tersebut adalah *deck beam*, *inner bottom transverse* dan *bottom transverse*. Ketiga jenis profil tersebut dalam keadaan melintang, sementara untuk sistem konstruksi jenis campuran akan diubah menjadi

deck longitudinal, inner bottom longitudinal dan *bottom longitudinal* yang mana keadaan profil tersebut adalah memanjang.

Pada perancangan konstruksi, menggunakan acuan dari aturan BKI dan penentuan modulus profil menggunakan annex BKI. [9]

2.3 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* sudah menjadi metode yang umum digunakan pada bidang keteknikan. Metode ini adalah sebuah metode analitis untuk memprediksi respons dari suatu sistem keteknikan dengan membagi sebuah bentuk kontinyu menjadi beberapa bagian dengan jumlah hingga (*finite*). Bagian bagian ini disebut dengan elemen yang tiap elemen dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian persamaan matematis akan menjadi representasi dari benda tersebut.

2.4 Analisis Respons Struktur

Setelah struktur konstruksi kapal telah selesai dirancang, dilakukan analisis terhadap respons struktur tersebut dengan pembebanan statis saat kapal muatan penuh pada keadaan kondisi air tenang, sagging dan hogging. Untuk ketinggian gelombang pada saat sagging dan hogging digunakan rumus:

$$H_w = \frac{L_{pp}}{20} [m] \quad (1)$$

Berdasarkan buku kekuatan struktur kapal [10]. Yang jika dihitung dengan L_{pp} sepanjang 55 m, tinggi gelombang adalah 2,75 m.

2.5 Analisis Kekuatan Batas

Akibat paling umum terjadi karena kegagalan struktur lambung adalah lambung terbelah menjadi dua bagian dan ini terjadi karena adanya *vertical bending moment* yang ekstrem. [11]

Pencegahan kegagalan struktur lambung adalah tugas utama dalam menentukan sebuah desain kapal. Sehingga, perhitungan kekuatan batas dari suatu kapal adalah suatu hal yang fundamental.

Untuk melakukan analisa kekuatan batas permodelan struktur dilakukan dengan menggambarkan model penampang kapal dengan pembujur yang mendukung kekuatan membujur kapal. Lalu sumbu netral penampang diletakan dikedua ujung model. Sumbu netral ini sebagai pengontrol gaya putar untuk menggambarkan

perilaku struktur kapal pada kondisi hogging dan sagging [12]

Pada penelitian yang membandingkan antara model kapal utuh dengan model kapal pada *pararrel middle body* dengan beban *pure bending*, perbedaan hasil analisis menghasilkan angka yang tidak terlalu besar perbedaannya, hanya sebesar 0,95% pada keadaan *ultimate sagging* dan 2,48% pada keadaan *ultimate hogging* [13]. Sehingga model lambung dapat disederhanakan menjadi satu jarak gading model dalam perhitungan *ultimate bending strength* [5].

2.6 Boundary Condition

Sebelum melakukan analisis pada *FEA*, peletakkan *boundary condition* diletakkan pada sumbu *neutral axis* pada penampang ujung depan dan ujung belakang yang dihubungkan dengan *Rigid Body* keseluruhan penampang kapal pada titik tersebut.

Tabel 3. *Boundary Condition* Analisis Respon Struktur

Lokasi	δx	δy	δz	θx	θy	θz
Titik Independen ujung belakang	-	Fix	Fix	-	-	-
Titik Independen ujung depan	Fix	Fix	Fix	Fix	-	-

Tabel 4. *Boundary Condition* Analisis *Ultimate Bending Moment*

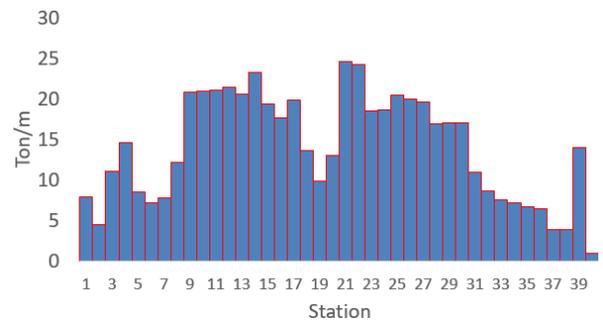
Lokasi	δx	δy	δz	θx	θy	θz
Titik Independen ujung belakang	Fix	Fix	Fix	Fix	Fix	Fix
Titik Independen ujung depan	-	-	-	-	Fix	-

Model yang akan dilakukan analisis tegangan responsnya, menggunakan *boundary condition* menurut aturan dari DNV-GL [14], sesuai pada tabel 3. Sementara menurut buku "Perhitungan Kekuatan Kapal dengan Metode Elemen Hingga" [12], Untuk mendapatkan nilai momen lentur batas, dibutuhkan model dengan 1 jarak frame dengan *boundary condition* sesuai pada tabel 4.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

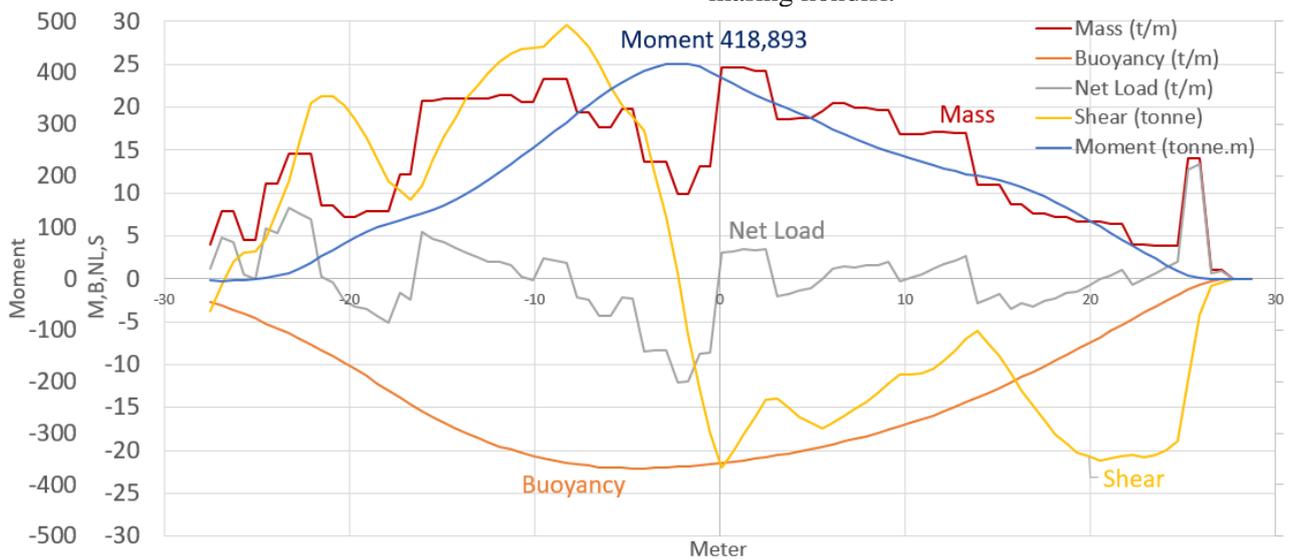
3.1 Pembebanan

Distribusi pembebanan pada kapal akan dilakukan analisis agar mendapatkan nilai momen yang terjadi pada kapal.

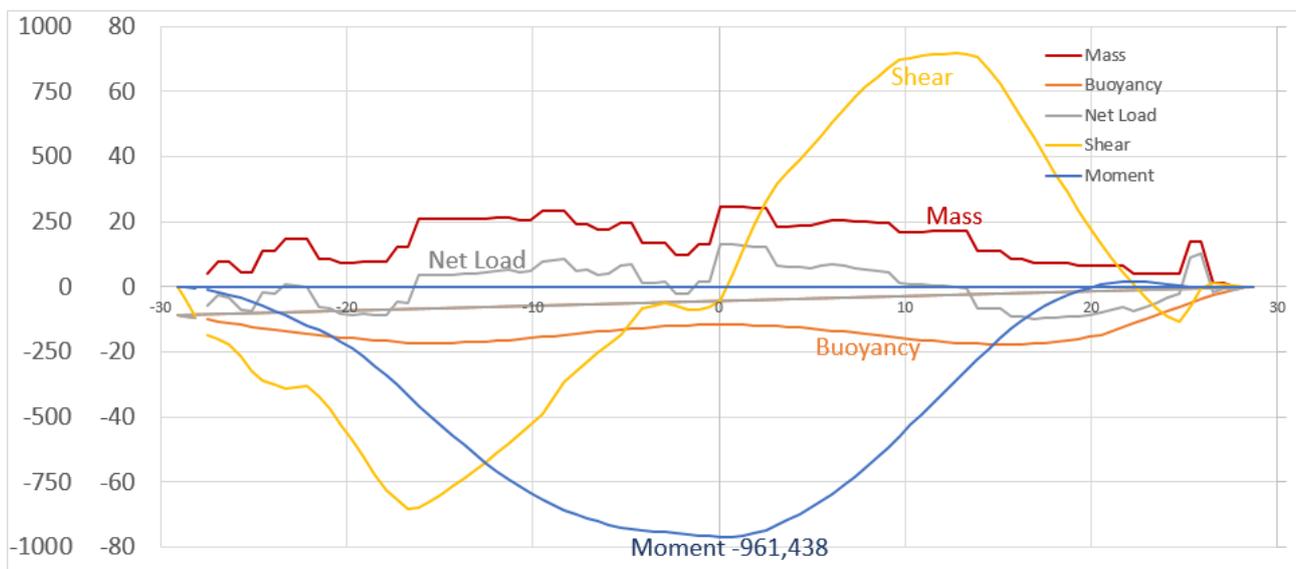


Gambar.3 Distribusi Pembebanan LWT + DWT

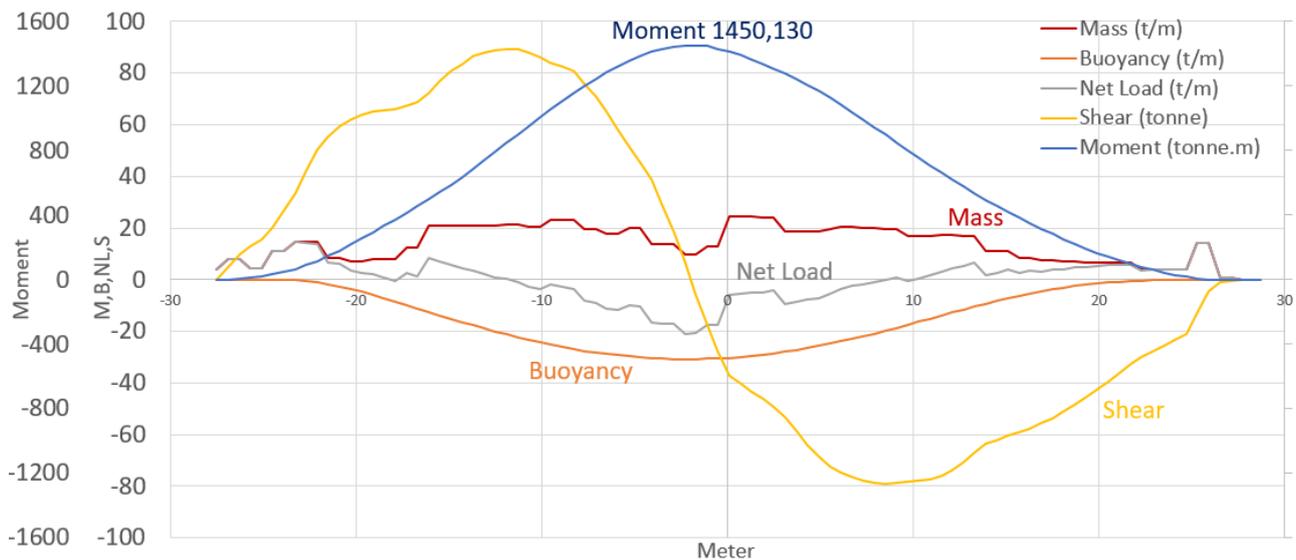
Distribusi pembebanan pada gambar 3 dianalisis dengan *Maxsurf Stability* agar mendapatkan nilai momen pada saat masing masing kondisi.



Gambar 4. Momen Maksimal Kondisi Air Tenang



Gambar 5. Momen Maksimal Kondisi Sagging



Gambar 6. Momen Maksimal Kondisi Hogging

Gambar 4 menunjukkan momen maksimal yang terjadi pada kondisi air tenang sebesar 418.893 tonne.m atau $4,1 \times 10^9$ N.mm. Untuk momen maksimal yang terjadi pada saat kondisi *sagging* pada gambar 5 menunjukkan nilai sebesar 961.438 tonne.m atau $9,4 \times 10^9$ N.mm. Sementara, gambar 6 menunjukkan momen maksimal yang terjadi pada saat kondisi *hogging* sebesar 1450.13 tonne.m atau $14,2 \times 10^9$ N.mm.

3.2 Perancangan Profil

Pada perancangan konstruksi untuk sistem konstruksi campuran, digunakan acuan berdasarkan aturan dari Biro Klasifikasi Indonesia *part 1. Seagoing Ship Vol II, Rules for Hull* [9]. Sebelum mencari ukuran profil untuk menggantikan profil profil yang akan diubah dari melintang menjadi memanjang, modulus profil dicari terlebih dahulu. Setelah mendapatkan modulus profil, lalu pemilihan ukuran profil mengacu pada *annex* yang telah tersedia. Profil yang akan diubah adalah *deck beam, inner bottom transverse* dan *bottom transverse*.

a. Design Load

$$P_0 = 2,1 \times (Cb + 0,7) \times C_0 \times C_L \times f \quad (2)$$

$$P_D = P_0 \frac{20 \cdot T}{(10 + Z - T)H} \cdot Cd \quad (3)$$

$$P_B = 10 \cdot T + P_0 \cdot C_f \quad (4)$$

$$P_i = 3,5(1 + a_v) \quad (5)$$

$$\sigma_{perm} = \left(0,8 + \frac{L_{pp}}{450}\right) \cdot \frac{230}{k} \quad (6)$$

b. Modulus Profil Deck Longitudinal

$$W_{ld} = \frac{83,3}{\sigma_{perm}} \cdot a \cdot l^2 \cdot P_d \quad (7)$$

Maka nilai W_{ld} adalah $12,21 \text{ cm}^3$. Mengacu pada *Annex*, profil yang direncanakan ialah: L 75x50x7 mm

c. Modulus Profil Inner Bottom Longitudinal

$$W_{li} = \frac{83,3}{\sigma_{perm}} \cdot a \cdot l^2 \cdot P_i \quad (8)$$

Maka nilai W_{li} adalah $4,26 \text{ cm}^3$. Mengacu pada *Annex*, profil yang direncanakan ialah: L 75x50x7 mm

d. Modulus Profil Bottom Longitudinal

$$W_{lb} = \frac{83,3}{\sigma_{perm}} \cdot a \cdot l^2 \cdot P_B \quad (9)$$

Maka nilai W_{lb} adalah $37,95 \text{ cm}^3$. Mengacu pada *Annex*, profil yang direncanakan ialah: L 100x75x7 mm

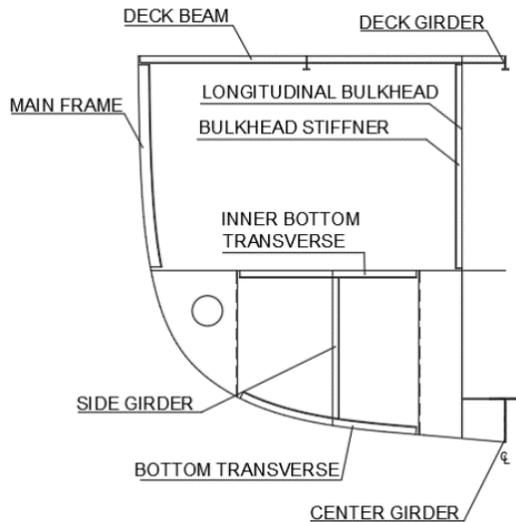
Tabel 5. Ukuran Profil

Part	Dimension (mm)
Web Frame	T 250 x 100 x 8
Deck Girder	T 150 x 75 x 8
Strong Beam	T 200 x 80 x 8
Center Girder	T 500x10 + 200x12
Main Frame	L 130 x 130 x 9
Deck Beam (Melintang)	L 75 x 75 x 7
Inner Bottom Transverse (Melintang)	L 75 x 75 x 7
Bottom Transverse (Melintang)	L 90 x 90 x 9
Deck Longitudinal (Campuran)	L 75 x 50 x 7
Inner Bottom Longitudinal (Campuran)	L 75 x 50 x 7
Bottom Longitudinal (Campuran)	L 100 x 75 x 7

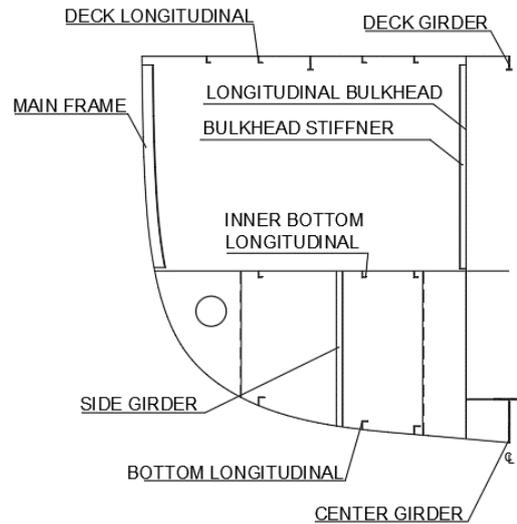
Tabel 6. Tebal Pelat

Part	Thickness (mm)
Keel plate	12
Bottom shell	10
Side shell	8
Inner bottom plate	8
Main deck plate	8
Longitudinal bulkhead	8
Transverse bulkhead	8
Floor	8
Side girder	8

Ukuran profil dan tebal pelat yang digunakan pada sistem konstruksi dapat dilihat pada tabel 5 dan tabel 6.



Gambar 7. *Midship Section* (Sistem Konstruksi Melintang)

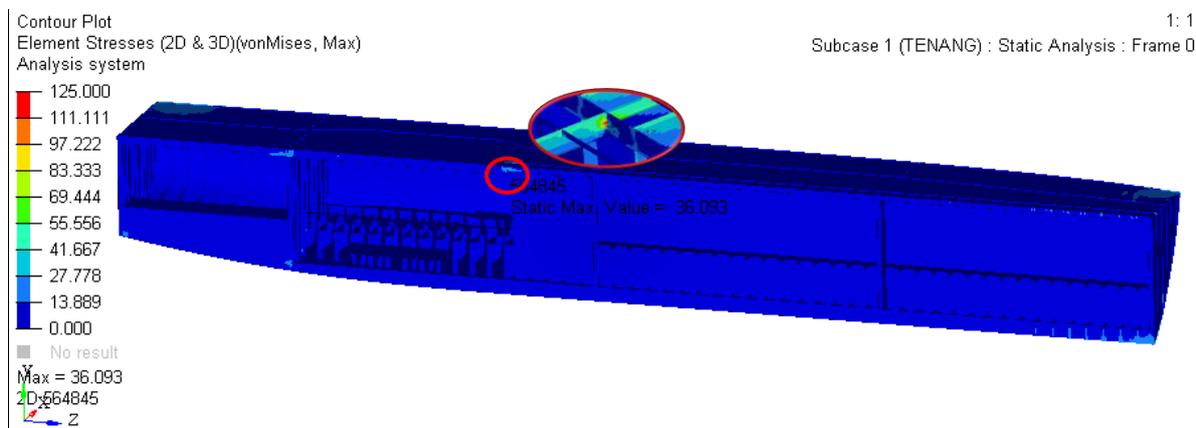


Gambar 8. *Midship Section* (Sistem Konstruksi Campuran)

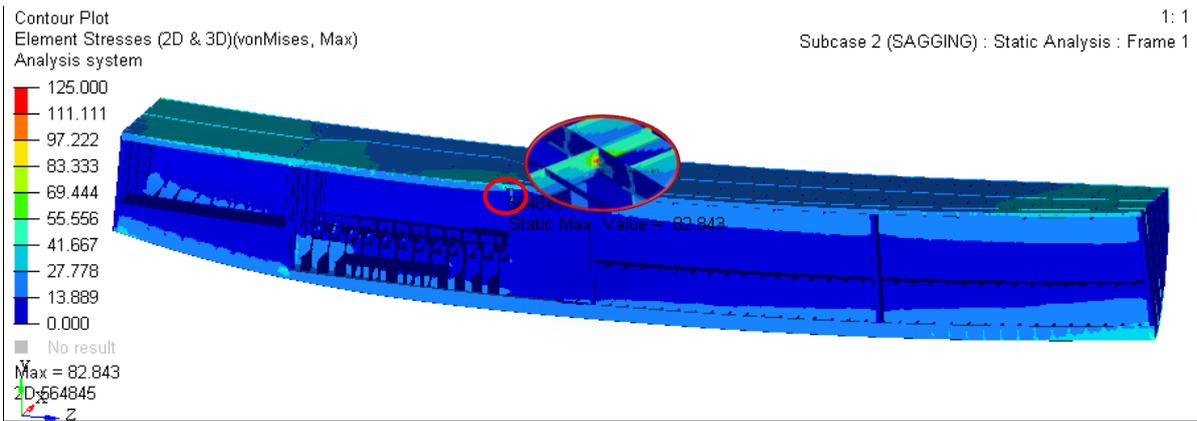
Midship section pada sistem konstruksi melintang dapat dilihat pada gambar 7. Sementara pada gambar 8 diperlihatkan *midship section* pada sistem konstruksi campuran.

3.3 Hasil Analisis Sistem Konstruksi Melintang

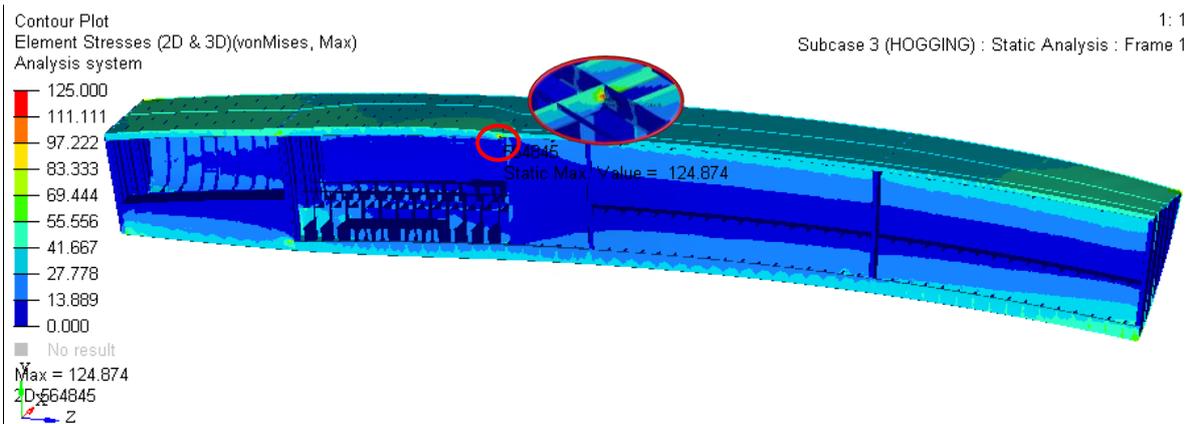
Analisis dilakukan menggunakan *software* berbasis *finite element analysis* untuk mendapatkan nilai tegangan maksimum dan nilai momen lentur batas yang terjadi pada sistem konstruksi melintang.



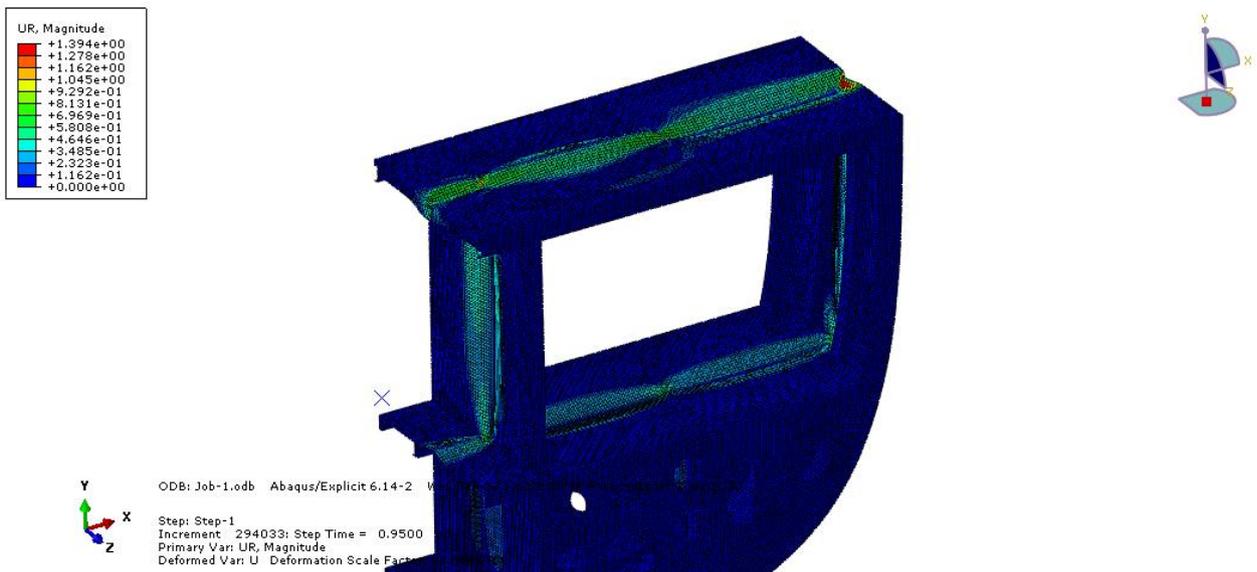
Gambar 9 *Stress* pada Sistem Konstruksi Melintang Kondisi Air Tenang



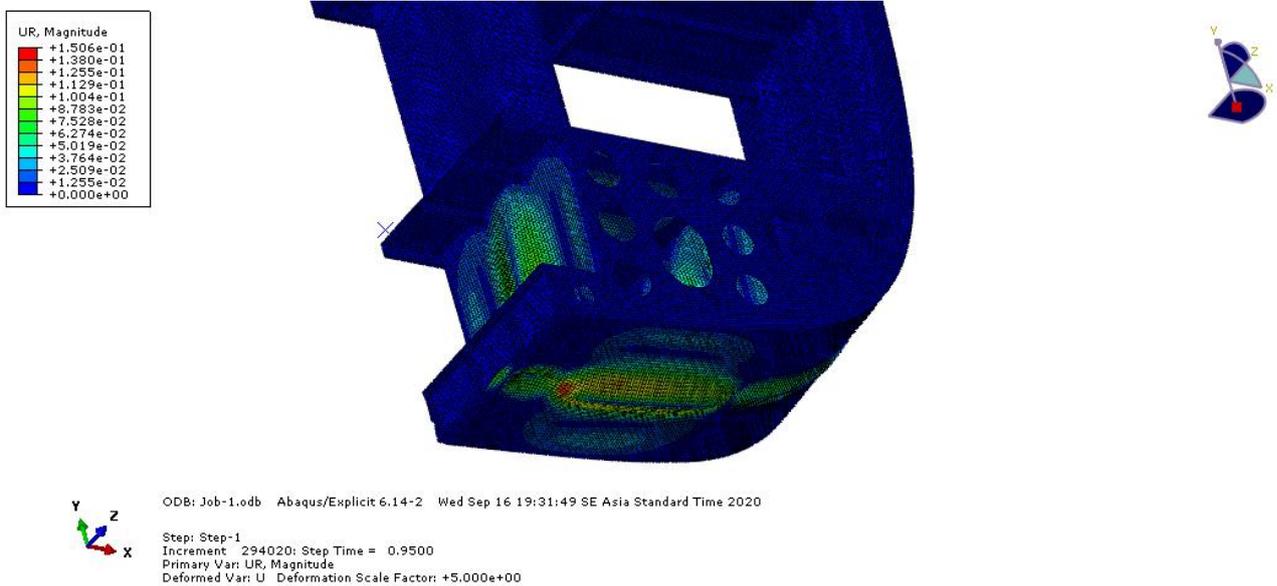
Gambar 10. Stress pada Sistem Konstruksi Melintang Kondisi *Sagging*



Gambar 11. Stress pada Sistem Konstruksi Melintang Kondisi *Hogging*

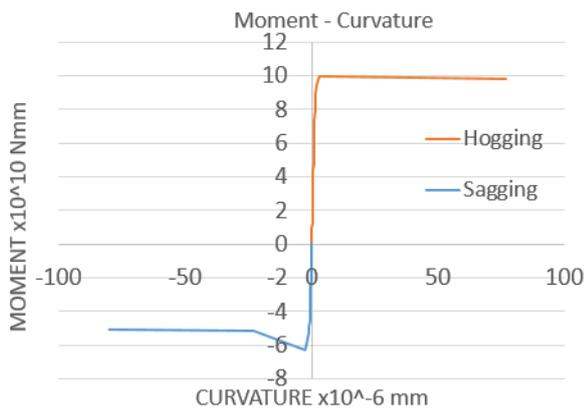


Gambar 12. *Ultimate Sagging Moment*



Gambar 13. *Ultimate Hogging Moment*

Pada gambar 9 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *element 564845* sebesar 36,093 MPa. Pada gambar 10 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *element 564845* sebesar 82,843 MPa. Pada gambar 11 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *element 564845* sebesar 124,874 MPa. Pada gambar 12 dijelaskan momen lentur batas vertikal *sagging* adalah $-6,303 \times 10^{10}$ Nmm Sementara, pada gambar 13 dijelaskan momen lentur batas vertikal *hogging* adalah $9,951 \times 10^{10}$ Nmm



Gambar 14. Kurva Hubungan *Moment-Curvature*

Pada kurva gambar 14 menjelaskan besar momen lentur batas vertikal *hogging* adalah $9,951 \times 10^{10}$ Nmm dan besar momen lentur batas vertikal *sagging* adalah $-6,303 \times 10^{10}$ Nmm. Sehingga struktur mengalami kegagalan (*collapse*) pada saat tersebut.

Tabel 7. Rangkuman Hasil Analisis Respons Struktur Sistem Konstruksi Melintang

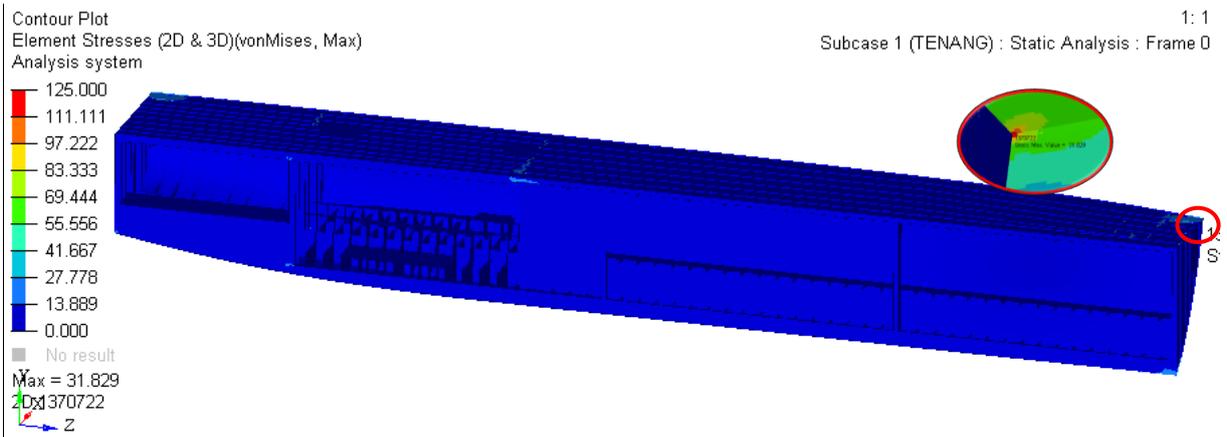
Kondisi	Stress (MPa)
Air tenang	36,093
Sagging	82,843
Hogging	124,874

Tabel 8. Rangkuman Hasil Analisis Kekuatan Batas Sistem Konstruksi Melintang

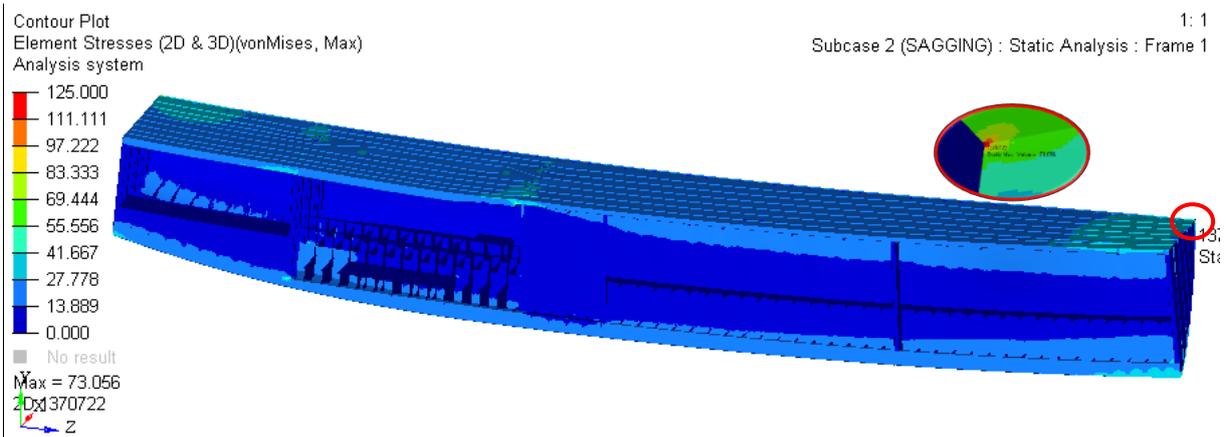
Kondisi	Momen Lentur Batas (Nmm)
Sagging	$-6,303 \times 10^{10}$
Hogging	$9,951 \times 10^{10}$

3.4 Hasil Analisis Sistem Konstruksi Campuran

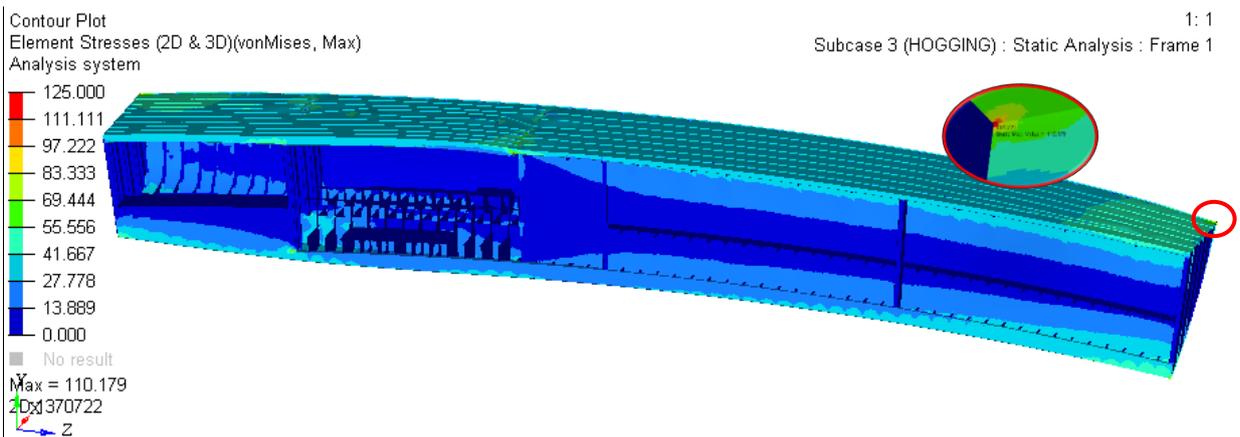
Setelah analisis pada sistem konstruksi melintang, selanjutnya sistem konstruksi campuran juga dilakukan analisis dengan *finite element analysis*.



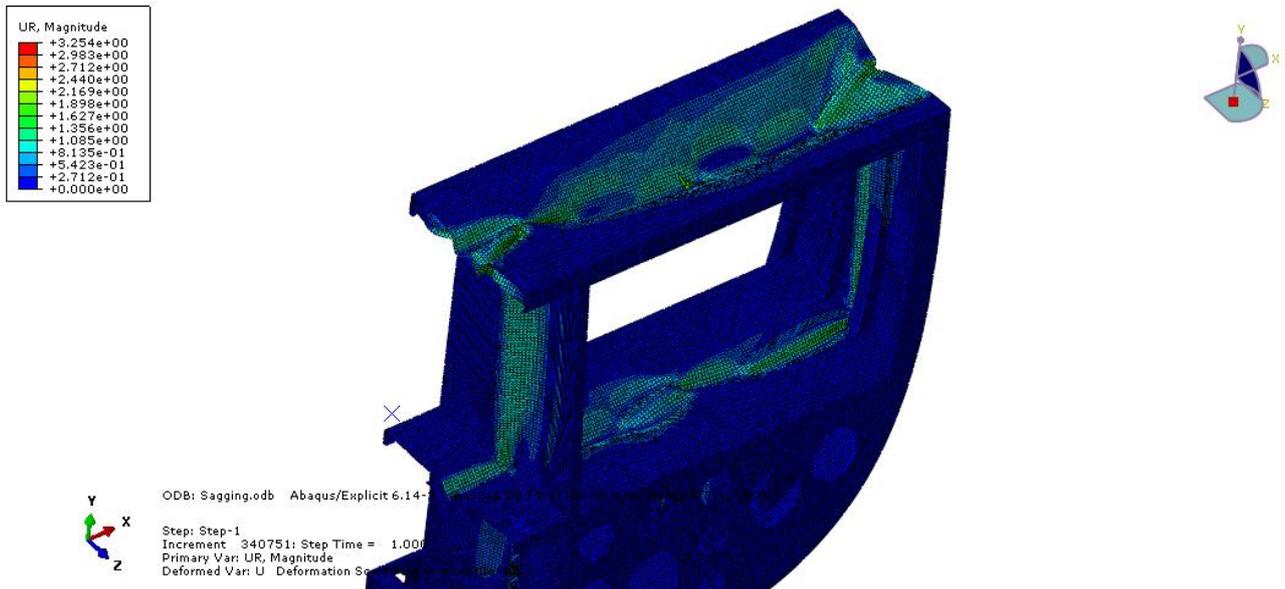
Gambar 15. *Stress* pada Sistem Konstruksi Melintang Kondisi Air Tenang



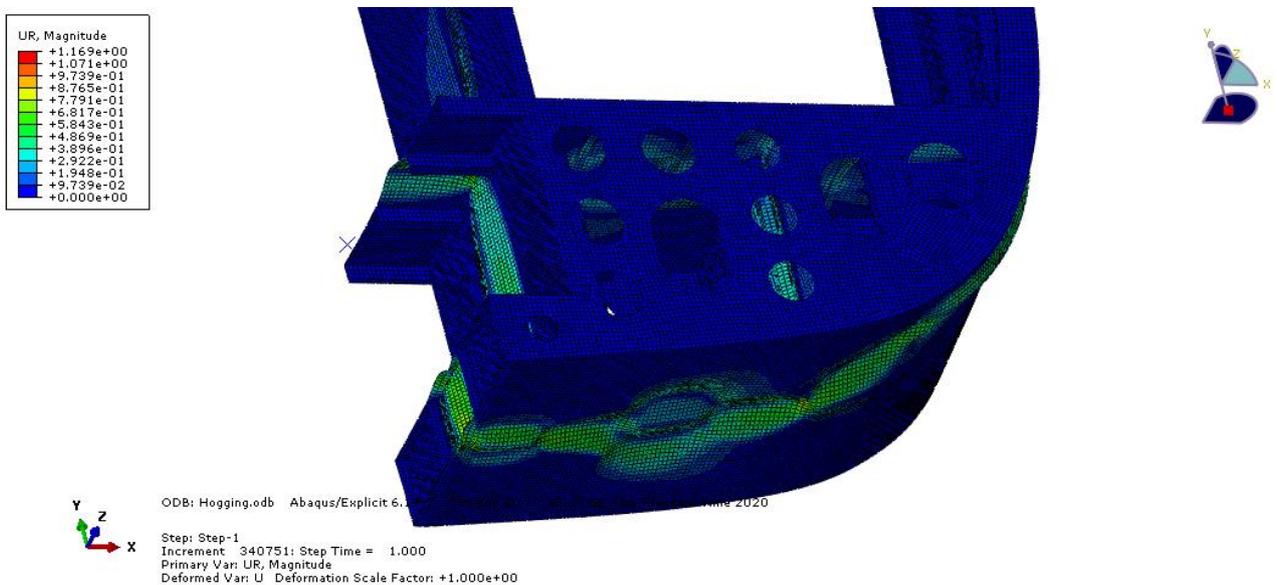
Gambar 16. *Stress* pada Sistem Konstruksi Melintang Kondisi *Sagging*



Gambar 17. *Stress* pada Sistem Konstruksi Melintang Kondisi *Hogging*

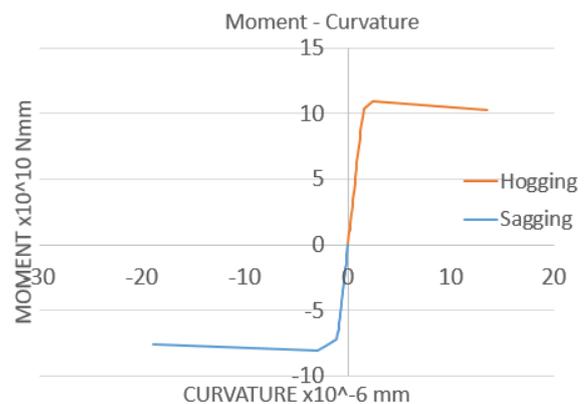


Gambar 18. *Ultimate Sagging Moment*



Gambar 19. *Ultimate Hogging Moment*

Pada gambar 15 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *element 1370722* sebesar 31,829 MPa. Pada gambar 16 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *element 1370722* sebesar 73,056 MPa. Pada gambar 17 dijelaskan *stress* maksimal terjadi pada *element 1370722* sebesar 110,179 MPa. Pada gambar 18 dijelaskan momen lentur batas vertikal *sagging* adalah $-8,063 \times 10^{10}$ Nmm Sementara pada gambar 19 dijelaskan momen lentur batas vertikal *hogging* adalah $10,923 \times 10^{10}$ Nmm



Gambar 20. Kurva Hubungan *Moment-Curvature*

Pada kurva gambar 20 menjelaskan besar momen lentur batas vertikal *hogging* adalah

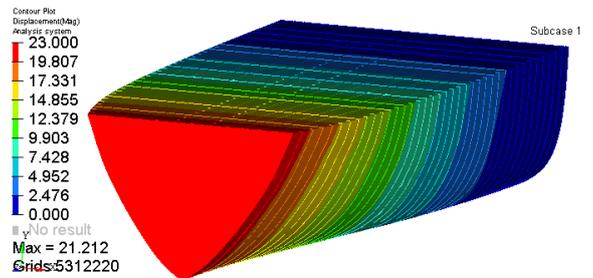
10,923x10¹⁰ Nmm dan besar momen lentur batas vertikal *sagging* adalah -8,063x10¹⁰ Nmm. sehingga struktur mengalami kegagalan (*collapse*) pada saat tersebut.

Tabel 9. Rangkuman Hasil Analisis Respon Struktur Sistem Konstruksi Campuran

Kondisi	Stress (MPa)
Air tenang	31,829
<i>Sagging</i>	73,056
<i>Hogging</i>	110,179

Tabel 10. Rangkuman Hasil Analisis Kekuatan Batas Sistem Konstruksi Campuran

Kondisi	Momen Lentur Batas (Nmm)
<i>Sagging</i>	-8,063x10 ¹⁰
<i>Hogging</i>	10,923x10 ¹⁰



Gambar 22. Validasi Defleksi Sistem Konstruksi Campuran

Tabel 11. Validasi Model

	Hasil Analitik (mm)	Hasil Numerik (mm)	Error
Melintang	22,28	21,86	1,89%
Campuran	21,21	20,57	3,10 %

3.5 Perhitungan validasi model

Model yang telah dibuat akan dibandingkan dengan perhitungan numerik. Menggunakan perhitungan defleksi dimana model dianggap sebagai balok sederhana dengan rumus:

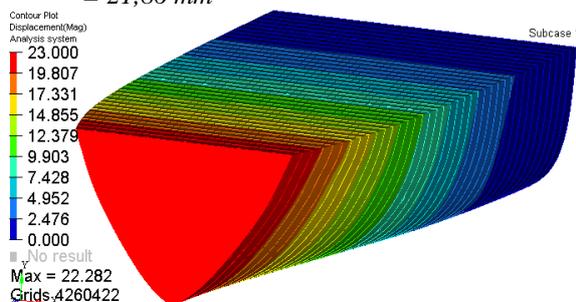
$$Defleksi = \frac{F \times L^3}{3 \times E \times I} \quad (10)$$

F yaitu Force (N) sebesar 100000 N, L adalah panjang model (mm) sebesar 22800 mm, E adalah modulus elastisitas (Mpa) sebesar 206000 Mpa, dan I adalah inersia (mm⁴) dengan sistem konstruksi melintang sebesar 8,77x10¹¹ mm⁴ dan sistem konstruksi campuran sebesar 9,32x10¹¹ mm⁴. Hasil perhitungan sebagai berikut.

Sistem Konstruksi Melintang

$$= \frac{100000 \times 22800^3}{3 \times 206000 \times (1.15465 \times 8,77 \times 10^{11})}$$

$$= 21,86 \text{ mm}$$



Gambar 21. Validasi Defleksi Sistem Konstruksi Melintang

Sistem Konstruksi Campuran

$$= \frac{100000 \times 22800^3}{3 \times 206000 \times (1.15465 \times 9,32 \times 10^{11})}$$

$$= 20,57 \text{ mm}$$

Berdasarkan hasil perbandingan antara perhitungan numerik dengan analisis menggunakan *software fem* tersebut, didapatkan persentase *error* untuk sistem konstruksi melintang sebesar 1,89% sementara untuk konstruksi campuran sebesar 3,10%. Kedua persentase *error* pada kedua jenis sistem konstruksi tersebut tidak sampai pada 5%, sehingga dapat dikatakan bahwa geometri yang digunakan sudah valid.

3.6 Perhitungan Tegangan Izin

Tegangan izin bertujuan untuk memprediksi agar besarnya tegangan (*stress*) yang terjadi pada struktur tidak melebihi tegangan yang menyebabkan mengalami deformasi permanen. Menurut aturan dari Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) [4]. Perhitungan tegangan izin dirumuskan pada persamaan:

$$\sigma_p = 18,5 \times \frac{\sqrt{Lpp}}{k} \quad (11)$$

Dimana K adalah factor bahan sebesar 1 dan Lpp sebesar 55m. Sehingga nilai σ_p adalah 137,2 N/mm².

Tabel 12. Tegangan Izin Sistem Konstruksi Melintang

Kondisi	Tegangan (MPa)	Tegangan izin (MPa)	Keterangan
Air Tenang	31,829	137,2	Memenuhi
Sagging	73,056	137,2	Memenuhi
Hogging	110,179	137,2	Memenuhi

Tabel 13. Tegangan Izin Sistem Konstruksi Campuran

Kondisi	Tegangan (MPa)	Tegangan izin (MPa)	Keterangan
Air Tenang	31,829	137,2	Memenuhi
Sagging	73,056	137,2	Memenuhi
Hogging	110,179	137,2	Memenuhi

Tabel 12 Menunjukkan bahwa nilai tegangan untuk sistem konstruksi melintang pada tiap kondisi memenuhi tegangan izin berdasarkan kriteria BKI. Pada tabel 13, nilai tegangan untuk sistem konstruksi campuran pada tiap kondisi juga memenuhi tegangan izin berdasarkan kriteria BKI. Untuk menghitung *safety factor*, besaran *yield stress* akan dibagi dengan tegangan terbesar pada masing masing sistem konstruksi. Dengan *safety factor* sebesar 1,88 pada sistem konstruksi melintang dan 2,13 pada sistem konstruksi. Dengan selisih tersebut, *safety factor* meningkat sebesar 13,33%

3.7 Perhitungan Minimum Section Modulus

Nilai Minimum *midship section modulus* berdasarkan *Rules BKI 2019 Vol. II Section 5 C.2.1*, digunakan dalam perhitungan kekuatan memanjang

$$W_{min} = k \cdot c_0 \cdot L^2 \cdot B(C_b + 0.7)10^{-6} \quad (12)$$

Dimana k adalah factor bahan, c_0 adalah koefisien gelombang, L adalah L_{pp} B adalah lebar kapal C_b adalah koefisien block. Sehingga didapat nilai W_{min} sebesar 0.199 m^3 . Hasil perhitungan modulus pada kapal patroli disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 14. Section Modulus Sistem Konstruksi Melintang

Bagian	Section Modulus (m^3)	Section Modulus Minimum (m^3)	Keterangan
W_{top}	0.376	0,199	Memenuhi
W_{bottom}	0.404	0,199	Memenuhi

Tabel 15. Section Modulus Sistem Konstruksi Campuran

Bagian	Section Modulus (m^3)	Section Modulus Minimum (m^3)	Keterangan
W_{top}	0.399	0,199	Memenuhi
W_{bottom}	0.429	0,199	Memenuhi

Pada tabel 14 dijelaskan bahwa *section modulus minimum* yang disyaratkan oleh BKI telah terpenuhi pada sistem konstruksi melintang. Pada tabel 15 dijelaskan bahwa *section modulus minimum* yang disyaratkan oleh BKI juga telah terpenuhi pada sistem konstruksi campuran.

3.8 Perhitungan Kekuatan Batas

Perhitungan nilai maksimum momen lentur vertical berdasarkan aturan dari BKI [9] adalah sebagai berikut:

$$\left| M_{sw} + \frac{\gamma_{wv} \cdot M_{wv}}{c_s} \right| \leq \left| \frac{M_u}{\gamma_R} \right| \quad (13)$$

Dimana:

- M_{sw} = Momen saat kondisi air tenang
- M_{wv} = Momen saat kondisi sagging-hogging
- M_u = Moment *ultimate bending* kapal [kNm]
- γ_{wv} = *Safety factor* kekuatan (1,2 Sagging/Hogging)

Berdasarkan gambar 4 nilai M_{sw} adalah $4,1 \times 10^9 \text{ N.mm}$. sementara berdasarkan gambar 5 nilai M_{wv} kondisi sagging adalah $9,4 \times 10^9 \text{ N.mm}$. Adapun berdasarkan gambar 6 nilai M_{wv} kondisi hogging adalah $14,2 \times 10^9 \text{ N.mm}$. Maka berdasarkan rumus perhitungan tersebut hasil analisis kekuatan batas nilai M_u ketika kondisi sagging harus lebih besar dari $1,84 \times 10^{10} \text{ Nmm}$ dan saat kondisi hogging harus lebih besar dari $2,59 \times 10^{10} \text{ Nmm}$.

Tabel 16. *Ultimate Bending Moment* Sistem Konstruksi Melintang

Kondisi	Hasil	Nilai	Keterangan
	Analisis (Nmm)	Minimum (Nmm)	
Sagging	$6,303 \times 10^{10}$	$1,84 \times 10^{10}$	Memenuhi
Hogging	$9,951 \times 10^{10}$	$2,59 \times 10^{10}$	Memenuhi

Tabel 17. *Ultimate Bending Moment* Sistem Konstruksi Campuran

Kondisi	Hasil	Nilai	Keterangan
	Analisis (Nmm)	Minimum (Nmm)	
Sagging	$8,062 \times 10^{10}$	$1,84 \times 10^{10}$	Memenuhi
Hogging	$10,922 \times 10^{10}$	$2,59 \times 10^{10}$	Memenuhi

Pada tabel 16 dijelaskan bahwa *ultimate bending moment* yang disyaratkan oleh BKI telah terpenuhi pada sistem konstruksi melintang. Begitu juga pada sistem konstruksi campuran yang dijelaskan pada tabel 17.

3.9 Perhitungan Massa Konstruksi

Pada tabel 18, dilakukan perhitungan masa pada masing-masing sistem konstruksi *hull* yang dimodelkan.

Tabel 18. Perhitungan Massa Konstruksi

Sistem Konstruksi	Massa Total Konstruksi (Ton)
Melintang	182.724
Campuran	182.965

Pada tabel 18 dijelaskan bahwa sistem konstruksi campuran memiliki massa lebih berat 0,241 ton dibanding sistem konstruksi melintang. Dengan perbedaan hanya sebesar 0,13% bisa dikatakan biaya yang akan dikeluarkan tidak terlalu signifikan perbedaannya.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan analisis perhitungan kekuatan pada perancangan sistem konstruksi kapal patroli 165 DWT dengan variasi sistem konstruksi yang telah dilakukan keduanya memenuhi kriteria tegangan ijin dari BKI.

Untuk membandingkan tegangan yang didapat pada kedua jenis sistem konstruksi, *stress* yang terjadi pada sistem konstruksi campuran lebih kecil dibanding dengan sistem konstruksi melintang dengan selisih 13,40% pada air tenang, 13,39% pada kondisi *sagging*, dan 13,33% pada kondisi *hogging*.

Pada analisis kekuatan batas, sistem konstruksi melintang mengalami kegagalan lebih cepat 21,82% pada kondisi *sagging* dibanding

sistem konstruksi campuran. Disamping itu, pada kondisi *hogging* juga lebih cepat mengalami kegagalan sebesar 8,89% dibanding sistem konstruksi campuran.

Pada perhitungan massa sistem konstruksi *hullform* yang dimodelkan, masa sistem konstruksi campuran memiliki massa 0,13% lebih berat dibanding sistem konstruksi melintang

Dari hasil analisis secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa sistem konstruksi campuran lebih kuat dibanding sistem konstruksi melintang, namun keduanya tetap dalam persyaratan yang diatur oleh BKI. Sehingga kedua sistem konstruksi tersebut dapat direkomendasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. K. Djaya and M. Sofi'i, *Teknik Konstruksi Kapal Baja jilid 1*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008.
- [2] R. R. Hakim, H. Yudo, and A. F. Zakki, "Studi Perencanaan Konstruksi Dan Analisa Kekuatan Kapal Floating Fuel Station," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, 2019.
- [3] E. Utomo, "Perbandingan Desain Dermaga Terapung Pada Sistem Konstruksi Melintang dan Memanjang 'Studi Kasus Dermaga Pelabuhan Tideng Pale Kabupaten Tana Tidung,'" *J. Tek. Sipil*, vol. 2, 2018.
- [4] A. F. Zakki, A. Windyandari, and I. Arpi, "INVESTIGATION OF STRUCTURAL RESPONSE OF THE CATAMARAN LIVESTOCK CARRIER IN INDONESIA WATERWAYS ENVIRONMENT," *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 138, pp. 1–12, 2020.
- [5] C. Wang, J. Wu, and D. Wang, "Experimental and numerical investigations on the ultimate longitudinal strength of an ultra large container ship," *Ocean Eng.*, vol. 192, 2019.
- [6] T. Rizkiani, M. I. Ramadhan, and M. Z. M. Alie, "Progressive Collapse Behaviour of VLCC under Longitudinal Bending," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 619, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/619/1/012008.
- [7] M. Z. M. Alie and S. I. Latumahina, "Progressive collapse analysis of the local elements and ultimate strength of a Ro-Ro Ship," *Int. J. Technol.*, vol. 10, no. 5, pp. 1065–1074, 2019, doi: 10.14716/ijtech.v10i5.1768.
- [8] M. Z. M. Alie, Juswan, T. Rachman, and C. Paotonan, "Ultimate Strength

- Investigation of Ro-Ro Ship,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 619, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/619/1/012010.
- [9] Biro Klasifikasi Indonesia, *Part 1 Seagoing Ship Vol II Rules for Hull*. 2019.
- [10] D. M. Rosyid and D. Setyawan, *Kekuatan Struktur Kapal*. Jakarta, 2000.
- [11] O. Hughes, J. K. Paik, and T. Schellin, *Ship Structural Analysis and Design*. Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- [12] M. Z. M. Alie and M. I. Ramadhan, *Perhitungan Kekuatan Kapal dengan Metode Elemen Hingga*. Deepublish, 2019.
- [13] Q. Wang and D. Wang, “Ultimate strength envelope of a 10,000TEU large container ship subjected to combined loads: From compartment model to global hull girder,” *Ocean Eng.*, 2020.
- [14] Det Norske Veritas, *DNV GL class guidelines: Finite Element Analysis*. 2015.