

Analisis Kekuatan Memanjang Kapal Menggunakan Metode Elemen Hingga: Studi Kasus Kapal General Cargo

² Grup Riset, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Keputih Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

Email : izzatusholikha@student.ppns.ac.id¹, mhabibie22@student.ppns.ac.id²,
sintaoktaferiska27@student.ppns.ac.id³, ahmadrifki@student.ppns.ac.id⁴, iputusindhuasmara@ppns.ac.id⁵, dan
alwisina@ppns.ac.id⁶

Abstrak

Seiring dengan perkembangan zaman, perkembangan jenis dan kegunaan kapal laut juga semakin beragam. Salah satunya adalah kapal kargo yang pertama kali dibangun pada tahun 1852¹. Tercatat dalam data bahwa jumlah kapal kargo aktif di Indonesia sebanyak 2.651 unit. Perihal itu juga diiringi oleh jumlah kecelakaan pada kapal kargo yang salah satunya disebabkan oleh kegagalan struktur memanjang kapal yang tidak mampu menahan beban pada saat kapal beroperasi. Data kapal yang dibutuhkan meliputi ukuran utama kapal, konstruksi, berat kapal. Tujuannya untuk mengetahui kekuatan memanjang kapal berdasarkan besar muatan dalam kondisi sagging dan hogging. Pemodelan kapal dan analisis memanjang kapal dilakukan pada *midship* menggunakan *fusion 360*. Hasil analisa didapatkan tegangan dan momen kapal pada keadaan sagging, hogging, dan *even keel*.

Kata kunci: data kapal, *hogging*, kapal kargo, metode elemen hingga, *sagging*

Abstract

Along with the times, the development of the types and uses of ships is also increasingly diverse. One of them is a cargo ship that was first built in 1852¹. It is recorded in the data that the number of active cargo ships in Indonesia is 2,651 units. This is also accompanied by the number of accidents on cargo ships, one of which is caused by the failure of the longitudinal structure of the ship which is unable to withstand the load when the ship is operating. The required ship data includes the main size of the ship, construction, ship weight. The goal is to determine the longitudinal strength of the ship based on the size of the cargo in sagging and hogging conditions. Ship modeling and longitudinal analysis were carried out at *midship* using *fusion 360*. The results of the analysis obtained the stress and moment of the ship in the sagging, hogging, and *even keel* state.

Keywords: ship data, *hogging*, cargo ship, finite element method, *sagging*

Izzatu Sholikha¹, Muhammad Amru Annas Habibie², Sinta Oktaferiska³, Ahmad Rifki Rosiano⁴, I Putu Sindhu Asmara⁵, Alwi Sina Khaqiqi⁶

¹ Progam Studi Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal, Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Keputih Sukolilo, Surabaya 60111

1. Pendahuluan

Kapal kargo adalah kapal khusus yang dioperasikan untuk mengangkut barang. Berdasarkan data yang diterbitkan oleh Kementerian Perhubungan Indonesia, tercatat jumlah kapal kargo aktif yang berlayar di Indonesia pada tahun 2014 sebanyak 2.651 unit². Hal ini menunjukkan bahwa kapal kargo memegang peranan penting dalam sistem logistik nusantara.

Namun seiring dengan banyaknya jumlah kapal kargo, telah banyak terjadi kasus kecelakaan pada kapal tersebut. Salah satu faktor penyebab kecelakaan tersebut adalah kegagalan struktur pada geladak yang tidak mampu menahan beban yang ada selama kapal beroperasi. Dengan demikian, maka kekuatan struktur geladak merupakan salah satu

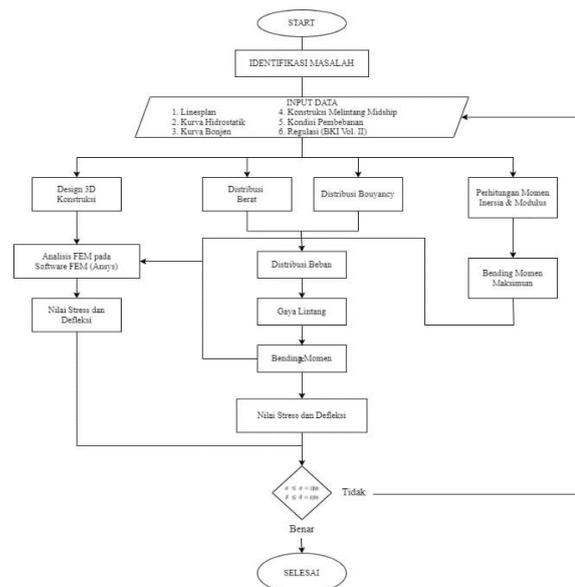
aspek teknis yang mempengaruhi tingkat keselamatan kapal di saat beroperasi baik di kondisi laut tenang maupun di perairan ganas.

Perhitungan kekuatan suatu struktur terutama bergantung pada beban-beban yang bekerja pada struktur tersebut. Struktur kapal mengalami berbagai macam tegangan, termasuk tegangan internal yang disebabkan oleh beban pada kapal, dan tegangan eksternal seperti yang disebabkan oleh gelombang laut, angin serta posisi kapal akibat gelombang laut. Sesuai rules **BKI Vol.II Section 5 C.1.1** tegangan yang diijinkan untuk tegangan yaitu $\sigma_p = C_s \cdot \sigma_{p_0}$. Dimana, σ_p merupakan tegangan ijin longitudinal bending stress dan C_s bernilai 1.

Ada berbagai cara untuk mengklasifikasikan beban yang harus ditanggung oleh elemen struktur kapal. Beberapa beban yang paling penting adalah beban dinamis, dalam arti kerja beban berubah seiring waktu. Namun, karena beban gelombang ini memiliki frekuensi yang lebih rendah dibandingkan dengan frekuensi asli komponen, maka beban tersebut biasanya dapat dianggap sebagai beban statis. Kriteria yang menjamin kekuatan struktur kapal adalah bahwa beban yang ditanggungnya ketika beroperasi dalam kondisi berbahaya harus lebih kecil dari beban yang ditanggung oleh bahan penyusun komponen struktur. Berdasarkan *rules* terkait faktor keamanan untuk kekuatan menurut **BKI Vol. II Section 5**, bahwa batas lentur vertikal (1,1 untuk kondisi sagging dan 1,21 untuk kondisi hogging) harus lebih kecil atau sama dengan momen batas dibagi momen lentur-batas total vertikal. Rules tersebutlah yang akan digunakan sebagai acuan dalam perhitungan kekuatan memanjang kapal.

2. Metode Penelitian

2.1. Diagram Alir



Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar 2.2.1 Diagram Alir Penelitian

2.2. Tahap Pengerjaan

Untuk mendapatkan hasil perhitungan kekuatan struktur memanjang kapal cargo maka dibutuhkan beberapa tahapan perhitungan yaitu perhitungan secara manual menggunakan excel, dan desain yang dilakukan dengan bantuan engineering software. Namun sebelum dilakukan perhitungan, dibutuhkan sumber referensi yang bisa didapatkan dengan menggunakan studi literatur. Studi literatur dilakukan melalui pencarian referensi yang serupa dengan topik penelitian yang sedang ditulis. Referensi tersebut berasal dari berbagai jurnal, skripsi, dan buku textbook. Setelah proses pengumpulan referensi dan informasi selesai, maka dilanjutkan dengan perhitungan sesuai dengan diagram alir diatas. Langkah pertama yang dilakukan yaitu mendesign konstruksi kapal cargo sesuai dengan principal dimension kapal.

a. Data Kapal

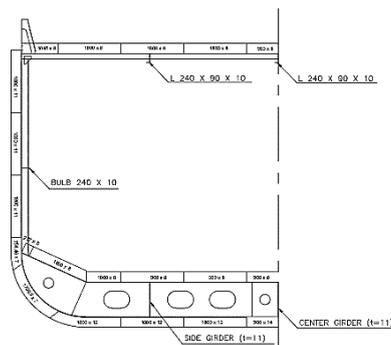
Data kapal yang digunakan pada penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh dari pihak perancang kapal. Adapun data penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 2.2.1 Data Ukuran Utama Kapal

No.	Spesifikasi	Satuan	Nilai
1	LPP	m	84,00
2	LOA	m	89,7
3	B	m	14,7
4	H	m	7,6
5	T	m	5,0
6	Cb	m	0,7
7	Vs	knots	12,0

Sumber: Marine Traffic, 2024

Data kapal tersebut akan digunakan sebagai data utama pemodelan kapal meliputi konstruksi kapal, pembenanan kapal, momen inersia kapal, dan perhitungan gelombang.



Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar 2.2.2 Konstruksi Melintang Midhsip

Gambar konstruksi melintang kapal diatas digunakan untuk menghitung momen inersia berikut dengan pemodelan 3D kapal pada Fusion 360.

b. Perhitungan Momen Inersia

Setelah didapatkan data utama kapal serta design konstruksi kapal, maka perhitungan momen inersia bisa dilakukan. Momen Inersia disebut juga momen luas kuadrat ke dua atau momen kelembamam adalah jumlah perkalian setiap bagian luas suatu penampang ΔA dikalikan dengan kuadrat jaraknya atau lengan terhadap sumbu X atau Y. Dalam menghitung inersia dari modulus penampang yang ada pada kapal, rumus yang digunakan adalah

$$I = \frac{1}{12} . I . t^3 \tag{1}$$

Momen inersia terhadap sumbu netral (NA) merupakan momen inersia terhadap sumbu asumsi yang sejajar dengan sumbu netral dikurangi momen luas dari setiap penampang terhadap sumbu asumsi. Didefinikan dengan persamaan:

$$I_{NA} = I_n - A . dg^2 \tag{2}$$

dimana:

- I_n = Momen inersia terhadap sumbu asumsi yang sejajar dengan NA
 $= S (i_o + a . dn^2)$
- A = Luas total elemen struktur memanjang
 $= S . a$
- A = Luas dari setiap penampang struktur memanjang
- dn = Jarak dari sumbu netral ke sumbu asumsi
 $= S (a . dn) / S . a = S (a . dn) / A$

Umumnya posisi sumbu asumsi terletak pada Base Line (BL), sehingga :

$$Y_{\text{bottom}} = dg \text{ dan } Y_{\text{top}} = H - dg \quad (3)$$

dimana:

H = tinggi geladak kapal

Section modulus bottom (W_{bottom}) = $I_{NA} / Y_{\text{bottom}}$

Section modulus top (W_{top}) = I_{NA} / Y_{top}

Jika penampang kapal tidak simetris terhadap bidang tengah bujur kapal, maka seluruh data ukuran dari bagian penampang kapal yang akan dihitung momen inersianya harus di inputkan semua pada tabel perhitungan.

Untuk perhitungan momen inersia sumbu horizontal (sagging) menggunakan rumus :

$$Z_{NA} = \frac{\sum z_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (4)$$

$$I_H = \sum I_{oy} + \sum z_i^2 \cdot A_i - Z_{NA}^2 \cdot \sum A_i \quad (5)$$

Untuk perhitungan momen inersia sumbu vertikal (hogging) menggunakan rumus :

$$Y_{NA} = \frac{\sum y_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (6)$$

$$I_V = \sum I_{oz} + \sum y_i^2 \cdot A_i - Y_{NA}^2 \cdot \sum A_i \quad (7)$$

c. Perhitungan Berat Kapal Kosong

Karena kapal yang akan dihitung menyangkut secara keseluruhan distribusi pembebanan pada kapal itu sendiri, maka perlu diketahui berat kapalnya. Adapun perhitungan berat kapal dapat dilakukan dengan cara :

1. Perhitungan berat kapal kosong, yang dapat dihitung melalui pertolongan Bonjean Curve kapal tersebut.
2. Untuk berat bagian bangunan dihitung dengan pengukuran langsung pada bagian bangunan tersebut melalui gambar rencana umum dan gambar konstruksi, sedangkan perlengkapan kapal yang akan dimasukkan dalam pendistribusian kapal diambil yang mempunyai bobot atau berat yang dianggap besar.

Selain menghitung nilai berat kapal. Perhitungan nilai LCG juga harus dilakukan karena nantinya diperlukan dalam perhitungan distribusi beban dan distribusi bouyancy kapal. Nilai LCG bisa didapatkan dengan menggunakan rumus :

$$LCG = S_1 / S_2 \quad (8)$$

dimana:

S_1 = total berat kapal kosong

$$= W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n$$

$$W = 0,1292 \times V \longrightarrow \text{Volume : p x l x t}$$

S_2 = total dari (berat bagian kapal / LCG)

$$= (W_1 + LCG_1) + (W_2 + LCG_2) + \dots + (W_n + LCG_n)$$

d. Distribusi Beban Kapal

Saat perhitungan momen, beban yang dihitung hanyalah beban pada daerah Ap hingga Fp. Maka beban di luar area tersebut tidak dihitung. Namun pada kenyataannya, beban kapal tidak hanya pada daerah itu saja. Sehingga, dalam perhitungan ini beban-beban di ujung kapal, di luar area After Peak – Fore Peak dipindahkan pada beberapa area station yang lain. Perhitungan distribusi beban kapal ini tidak hanya dilakukan pada kondisi kapal muatan kosong saja, namun dihitung juga kondisi muatan rata rata (75%) dan kondisi muatan penuh. Rumus yang digunakan dalam pergantian beban yaitu :

$$W_2 = - \frac{1}{h} \left(\frac{h}{2} + x \right) W \quad (9)$$

$$W_1 = W - W_2 \quad (10)$$

dimana:

h = Jarak station

- W = Berat beban
- X = Jarak titik W terhadap St_0
- W_1 = berat beban pengganti St_{0-1}
- W_2 = berat beban pengganti St_{1-2}

e. Distribusi Bouyancy Kapal

Setelah memiliki nilai distribusi berat kapal selanjutnya menghitung distribusi bouyancy kapal atau menghitung kurva distribusi gaya apung. Bisa didapat dengan perhitungan :

$$\text{Distribusi gaya apung} = \text{Distribusi volume bagian bawah air} \quad (11)$$

Di perairan, kapal mendapat beban statik dan dinamik yang menyebabkan kapal melentur pada bidang *longitudinal* dan *vertical*. Dimana beban karena gelombang laut diambil nilai tersebar untuk dimasukkan dalam perhitungan kekuatan memanjang kapal. Jadi kapal dianggap dalam kondisi beban tertentu, dalam meneliti momen lentur yang terjadi pada kapal, umumnya dipakai tiga keadaan standart kondisi gelombang kondisi gelombang *still water* (air tenang), kondisi gelombang *sagging*, kondisi gelombang *hogging*

f. Selisih Berat dan Buoyancy

Perhitungan gaya geser dan momen lentur dilakukan dengan menghitung penyebaran beban (load) sepanjang kapal. Beban (load) yang bekerja tersebut diperoleh dari selisih antara beban tersebar berat kapal dan muatannya dengan beban tersebar gaya tekan ke atas (buoyancy). Sehingga menghitung selisahnya perlu dilakukan dalam analisis kekuatan memanjang kapal. Karena sebaran berat kapal dan gaya tekan ke atas umumnya tidak sama sepanjang kapal, maka distribusi beban tersebut bervariasi dan berubah arah pada sepanjang kapal. Perhitungan dapat dilakukan dengan cara simpson menggunakan integrasi numerik untuk menghitung gaya lintang dan momen vertikal memanjang kapal.

g. Gaya Lintang (Shear Force)

Setelah diperoleh besarnya nilai intensitas pembebanan, maka gaya geser/ Shear Force merupakan jumlah aljabar pembebanan yang bekerja sepanjang penampang kapal. Untuk mendapatkan nilai shear force maka dilakukan integrasi kurva beban. Dengan mengintegrasikan area dibawah kurva gaya geser pada setiap titik sepanjang kapal dari ujung kapal hingga titik itu. Untuk menemukan gaya geser dilakukan pada tempat yang berbeda, biasanya pada station sepanjang kapal.

Untuk mendapatkan momen lengkung M caranya sama seperti kekuatan geser yaitu dengan mengintegrasikan kumulatif penambahan dari daerah masing-masing trapezium dan didistribusikan. Integrasi ditunjukkan dengan menggunakan persamaan :

$$P' = \frac{dS'}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} \quad (12)$$

h. Tegangan

Tegangan yang terjadi pada kapal tidak boleh melebihi tegangan yang diijinkan dan semua pelat kapal, pelat bilah serta pelat hadap tidak mengalami buckling. Cara menghitung tegangan normal akibat momen lengkung yaitu:

$$\sigma = \frac{BM}{I} = \frac{BM \times y}{I} \quad (13)$$

$$\sigma \max = \frac{W}{Z} \quad (14)$$

- Dimana : BM = Bending momen, momen lengkung y
- y = Jarak terhadap sumbu netral I
- I = Momen inersia terhadap sumbu netral
- Z = Modulus penampang

i. Bending Momen

Distribusi beban (load) yang tidak merata akan menghasilkan momen lentur memanjang (longitudinal Bending Moment). Bending momen merupakan integral dari shear force. Puncak bending momen berada pada krosingan shear force terhadap sumbu x.

j. Defleksi

Defleksi merupakan lengkungan atau lendutan yang terjadi pada sebuah benda akibat dari bekerjanya gaya transversal (vektor gaya tegak lurus dengan sumbu balok). Besarnya defleksi bisa dipengaruhi oleh beban / material serta bentuk atau dimensi penampang dari benda tersebut. Agar mendapatkan nilai defleksi maka bisa digunakan persamaan yaitu :

$$y' = \frac{1}{EI} \int_0^x \int_0^x M(x) \cdot \eta(x) \cdot dx dx + \frac{1}{EI} \int_0^L \int_0^x M(x) \cdot \eta(x) \cdot dx dx \dots (16)$$

Dengan ketentuan :

1. Harus kurang dari LPP/1000, atau
2. Harus kurang dari LPP/750

k. Analisis FEM

Analisis menggunakan Finite Element Method dengan bantuan *software* Ansys. Untuk memecahkan masalah, FEM membagi sistem besar menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dan lebih sederhana yang disebut elemen hingga. Analisis ini digunakan untuk menghitung

- a. *Static Stress Maximum* : perhitungan teganga statis maksimum dari kapal.
- b. *Safety Factor* : suatu nilai yang menunjukkan perbandingan antara tegangan yang mengakibatkan kegagalan konstruksi kapal dengan besarnya tegangan rill yang terjadi pada konstruksi kapal tersebut.
- c. *Durability* : perhitungan ketahanan material yang digunakan dalam struktur konstruksi kapal.
- d. *Deformation plat* : perubahan bentuk akibat adanya tegangan dalam logam yaitu tegangan memanjang dan tegangan melintang

3. Pembahasan dan Hasil

3.1. Analisis Momen Inersia

Perhitungan momen inersia pada kapal KM-Marino yaitu antara lain menghitung dan menentukan ketinggian sumbu netral dari penampang kapal terhadap baseline dan center line.

Tabel 3.1 Hasil Perhitungan

KM-Marino			
Netral Axis	Terhadap Baseline	ZNA = 2,930	m
Momen Inersia	Terhadap Netral Axis	INA = 3,222176473	m ⁴
Modulus Penampang Hogging	Y deck = 4670 mm	W = 689.962.543,93	mm ³
Modulus Penampang Sagging	Y bottom = 2930 mm	W = 1.099.746.890,25	mm ³

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Modulus minimum pada midship di hitung berdasarkan refrensi dari BKI 2009 volume II section 5.C.2

$$W_{min} = k.C0. L^2.b.(Cb + 0.7).10^{-6}$$

Dimana :

- K = 1
- C0 = 7.7
- L = 87.81 m
- Cb = 0.7
- B = 14.7 m

Maka :

$$W_{min} = 1.222 \text{ m}^3$$

Dari perhitungan di dapatkan nilai :

$$W_{\text{bottom}} = 1.099 \text{ m}^3$$

$$W_{\text{deck}} = 0.689 \text{ m}^3$$

Maka modulus minimum dinyatakan **TIDAK MEMENUHI**

Momen inersia kapal minimum pada midship di hitung berdasarkan referensi dari BKI 2009 volume II 5.C.3

$$I_y = 3 \times 10^{-2} \times W \times L/k$$

$$W = 1.099 \text{ m}^3, L = 91.32 \text{ m}, K = 1$$

Maka :

$$I_y = 3.0108 \text{ m}^4$$

Dari perhitungan didapatkan nilai :

$$I_{na} = 3.222 \text{ m}^4$$

Maka momen inersia dinyatakan **MEMENUHI**

3.2. Analisis LWT dan DWT

Tabel 3.2.1 Rekapitulasi Berat Kapal Kosong (LWT)

No	Bagian	Berat (I)	LCG (II)	I x II	KG (III)	I x III	Panjang Kompart	Ket.	Berat per meter	Bentuk distribusi
1	Berat deck dibawah	855.29	-0.89	-763.35	4	3421.16105	84.98		10.06460652	
2	Poop	58.91	-32.00	-1885.04	11.2	659.7634176	15.00	Sepanjang Kompartmen	3.9271632	Persegi Panjang
3	Boat Deck	42.398	-29.898	-1267.61	13.6	576.6080931	10.80	Sepanjang Kompartmen	3.9271632	Persegi Panjang
4	Bridge Deck	32.972	-28.698	946.243721	16	527.5593956	8.40	Sepanjang Kompartmen	3.9271632	Persegi Panjang
5	Navigation deck	15.181	-27.1980	-412.89	18.4	279.3279733	5.40	Sepanjang Kompartmen	2.81335584	Persegi Panjang
6	Top Deck	6.330	-27.79	-175.91211	19.6	124.0689925	5.40	Sepanjang Kompartmen	1.1722316	Persegi Panjang
7	Forecastle	6.09	39.48	240.27	8.80	53.56218067	7.88	Sepanjang Kompartmen	1.54580608	Segitiga
8	Forepeak tank	8.71	39.11	340.81	3.80	33.11028464	4.84883	Sepanjang Kompartmen	3.593952685	homogen
9	Afterpeak tank	3.86	-40.66	-157.12	2.51	9.698720842	10.20	Sepanjang Kompartmen	0.757653374	homogen
10	Equipment at fore	30.87	39.06	1205.78	8.40	259.308	1.68	Sepanjang 0.02L	18.375	Persegi Panjang
11	Equipment at after	39.06	-42.00	-1640.52	8.40	328.104	1.68	Sepanjang 0.02L	23.25	Persegi Panjang
12	Propeller dan poros	21.52	-40.38	-868.94	1.995	42.93049118	3.24	Sepanjang Is	6.64168	Persegi Panjang
13	Machinery space	73.86	-30.30	-2237.94	2.5	184.6487432	11.40	Sepanjang le	6.478903269	Persegi Panjang
		S1 = 1195.05		S2 = -8568.69		6499.851342				

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Dimana : Berat kapal kosong (ΣI) = 1195,05 ton

LCG = -7,17 m (dibelakang midship)

KG = 5,438973282 m (dari baseline, dan diukur hingga top deck)

Tabel 3.2.1 Rekapitulasi DWT

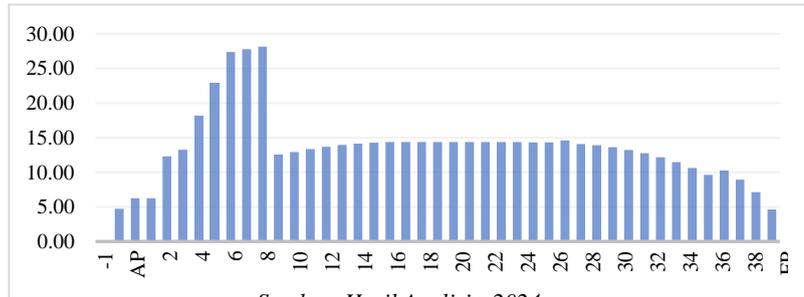
Nama tanki	Volume (m ³)	Berat (ton)	KG	W x KG	LCG (m)	W x LCG
LOT	6.99	6.44	0.52	3.38	-24.01	-81.09
MDOT	8.51	7.83	0.57	4.50	-23.40	-105.26
HFOT	31.48	28.96	0.52	15.09	-16.81	-253.70
FWT	78.45	72.17	1.32	95.61	-38.25	-3657.08
Ballast Tank I	29.11	29.11	0.54	15.66	-10.35	-162.11
Ballast Tank II	89.90	89.90	0.52	47.11	0.41	19.13
Ballast Tank III	39.56	39.56	0.52	20.67	18.00	372.07
Cargo Hold I	1907.17	1582.95	3.32	5257.13	-14.68	-77160.50
Cargo Hold II	1908.04	1583.67	3.32	5252.98	5.09	26719.74
Cargo Hold III	1361.63	1130.16	3.55	4016.34	23.52	94458.81
TOTAL		4570.76		14728.46		40150.02
			KG TOTAL	3,2	LCG TOTAL	8,78

Sumber: Hasil Analisis, 2024

3.3. Analisis Distribusi Berat Kapal

3.3.1 Kondisi Muatan Kosong

Dimana :
 Sarat kosong = 1,10 m
 W = 1199,60 ton
 W total = 1195,05 ton
 Koreksi = 0,3804 %
 Keterangan = Memenuhi

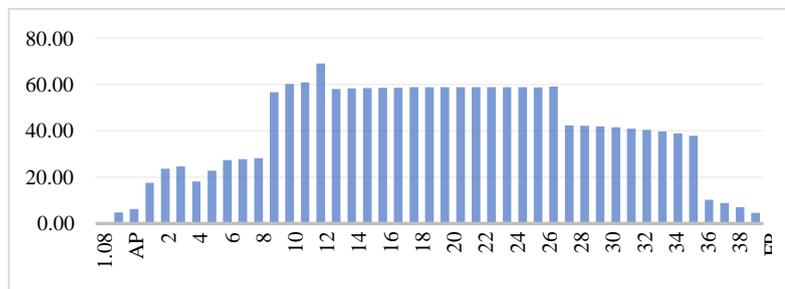


Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar 3.3.1 Distribusi Beban Kapal Muatan Kosong

3.3.2 Kondisi Muatan Rata-Rata

Dimana :
 Sarat rata-rata = 4,15 m
 W = 3625,71 ton
 W total = 3625,59 ton
 Koreksi = 0,00 %
 Keterangan = Memenuhi

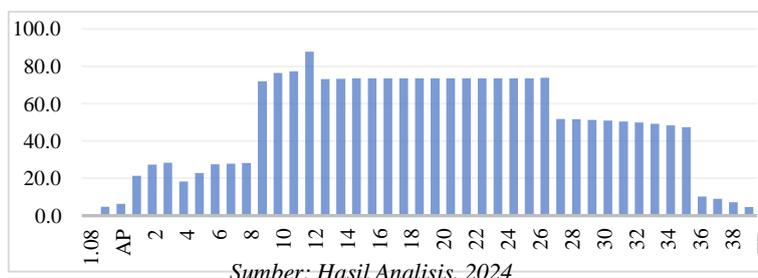


Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar 3.3.2 Distribusi Beban Kapal Muatan Rata-Rata

3.3.3 Kondisi Muatan Penuh

Dimana :
 Sarat penuh = 5 m
 W = 4429,71 ton
 W total = 4429,85 ton
 Koreksi = 0,00 %
 Keterangan = Memenuhi



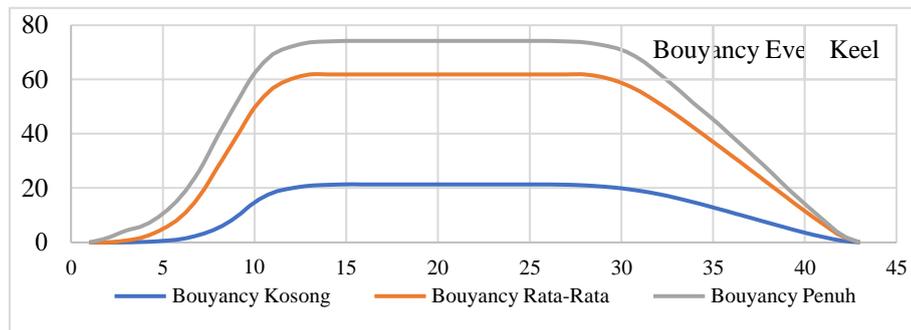
Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar 3.2.3 Distribusi Beban Kapal Muatan Penuh

3.4. Analisis Distribusi Bouyancy Kapal

3.4.1 Kondisi Even Keel

Grafik dibawah merupakan grafik yang menunjukkan sebaran gaya bouyancy yang terjadi pada kapal cargo KM-Marino. Didapatkan dari kurva bonjen lalu dihasilkan nilai displacement. Dalam kondisi muatan kosong didapat nilai displacement sebesar 1206,96 ton dengan koreksi sebesar 0,61%. Dalam kondisi muatan rata-rata didapat nilai displacement sebesar 3627,11 ton dengan koreksi sebesar 0,0%. Dan dalam kondisi muatan penuh didapat nilai displacement sebesar 4449,93 ton dengan koreksi sebesar 0,46%. Ketiga kondisi muatan tersebut sudah memenuhi koreksi bahwa besarnya gaya berat harus sama dengan besarnya nilai displacement.

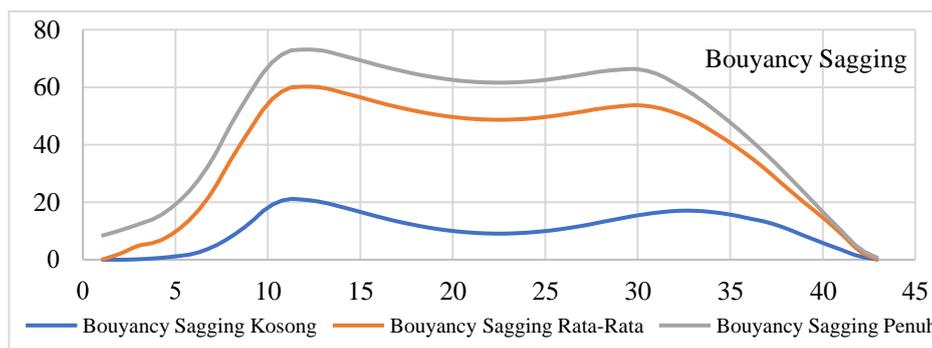


Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar 3.4.1 Distribusi Bouyancy Kondisi Even Keel

3.4.2 Kondisi Sagging

Dalam kondisi muatan kosong didapat nilai displacement sebesar 959,90 ton dengan koreksi sebesar -19,98%. Dalam kondisi muatan rata-rata didapat nilai displacement sebesar 3429,02 ton dengan koreksi sebesar -5,42%. Dan dalam kondisi muatan penuh didapat nilai displacement sebesar 4332,8152 ton dengan koreksi sebesar -2,19%. Ketiga kondisi muatan tersebut tidak memenuhi koreksi dikarenakan nilai displacement yang dihasilkan tidak sama atau jauh dari nilai perhitungan gaya berat.

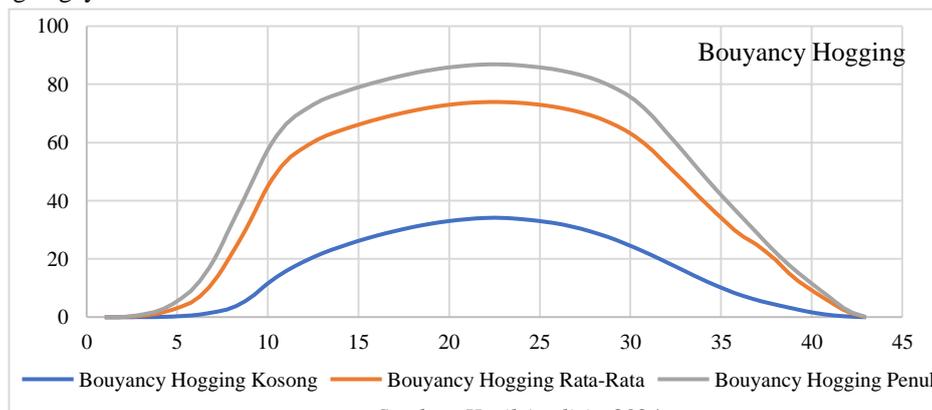


Sumber: Hasil Analisis, 2024

Gambar 3.4.2 Distribusi Bouyancy Kondisi Sagging

3.4.3 Kondisi Hogging

Dalam kondisi muatan kosong didapat nilai displacement sebesar 959,90 ton dengan koreksi sebesar -19,98%. Dalam kondisi muatan rata-rata didapat nilai displacement sebesar 3429,02 ton dengan koreksi sebesar -5,42%. Dan dalam kondisi muatan penuh didapat nilai displacement sebesar 4332,8152 ton dengan koreksi sebesar -2,19%. Ketiga kondisi muatan tersebut tidak memenuhi koreksi dikarenakan nilai displacement yang dihasilkan tidak sama atau jauh dari nilai perhitungan gaya berat.

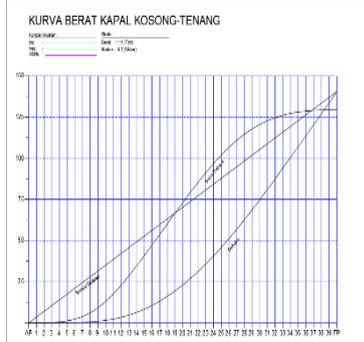


Sumber: Hasil Analisis, 2024

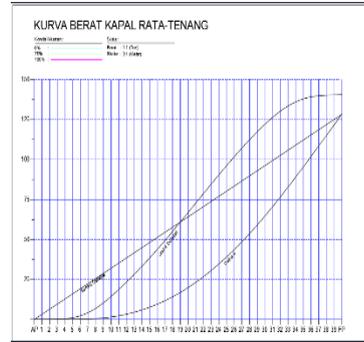
Gambar 3.4.3 Distribusi Bouyancy Kondisi Sagging

4. Analisis Defleksi

a. Kondisi Gelombang Even Keel



Gambar a. Muatan Kosong

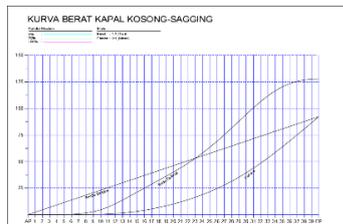


Gambar b. Muatan Rata-Rata

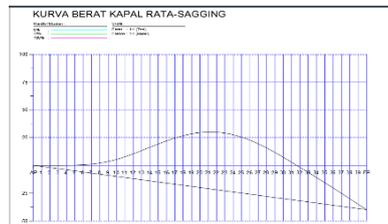


Gambar c. Muatan Penuh

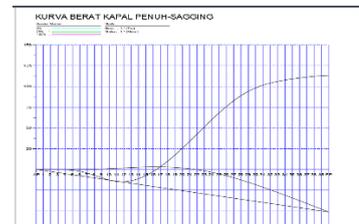
b. Kondisi Muatan Sagging



Gambar a. Muatan Kosong

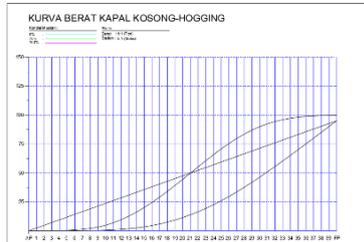


Gambar b. Muatan Rata-Rata

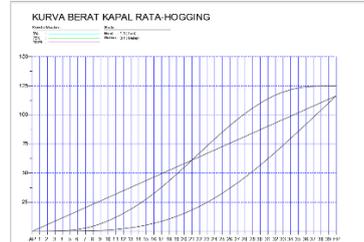


Gambar c. Muatan Penuh

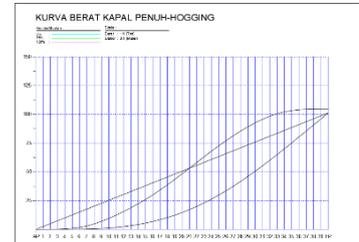
c. Kondisi Muatan Hogging



Gambar a. Muatan Kosong



Gambar b. Muatan Rata-Rata



Gambar c. Muatan Penuh

4.1. Analisis Finite Element Method

4.1.1 Setup Material

Material yang digunakan yaitu ASTM A131 Grade AH32

4.1.2 Import Geometry

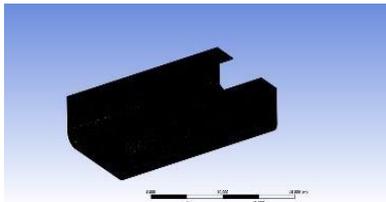


Sumber: Hasil Analisis, 2024
 Gambar 4.1.2 3D Isometry

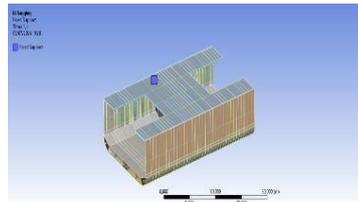
4.1.3 Analisis Kondisi Sagging

4.1.3.1 Setup Analisis

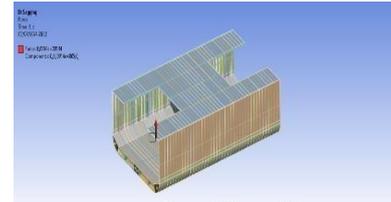
Dalam proses ini yang dilakukan yaitu Setup Mess dengan element size yang digunakan sebesar 0,2 m. Kemudian Setup Fix-support dengan jumlah faces sebanyak 62. Serta Setup Force pada ketiga kondisi yang diletakan diujung depan dan belakang. Nilai force tersebut pada muatan kosong yaitu 284.362,39 N . Pada muatan rata-rata sebesar 411.889,78 N dan pada muatan penuh nilai force 1 sebesar 809.138,21 N.



Sumber: Hasil Analisis, 2024
 Gambar a. Setup Mesh

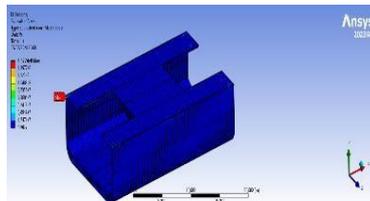


Sumber: Hasil Analisis, 2024
 Gambar b. Setup Fix-Support

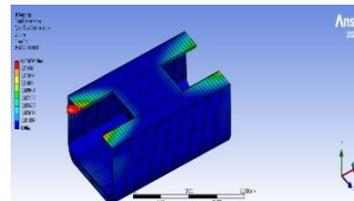


Sumber: Hasil Analisis, 2024
 Gambar c. Setup Force

4.1.3.2 Hasil Von Misses Stress dan Deformasi



Gambar a. Von Misses Stress

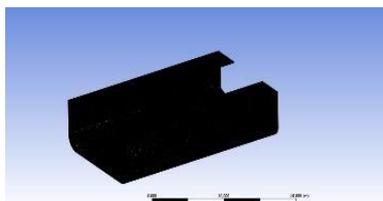


Gambar b. Deformasi

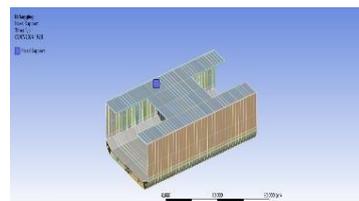
4.1.4 Analisis Kondisi Hogging

4.1.4.1 Setup Analisis

Dalam proses ini yang dilakukan yaitu Setup Mess dengan element size yang digunakan sebesar 0,2 m. Kemudian Setup Fix-support dengan jumlah faces sebanyak 62. Serta Setup Force pada ketiga kondisi yang diletakan diujung depan dan belakang. Nilai force tersebut pada muatan kosong yaitu 1.835.278,94 N . Pada muatan rata-rata sebesar 411.889,78 N dan pada muatan penuh nilai force 1 sebesar 1.665.783,68 N.



Sumber: Hasil Analisis, 2024
 Gambar a. Setup Mesh



Sumber: Hasil Analisis, 2024
 Gambar b. Setup Fix-Support



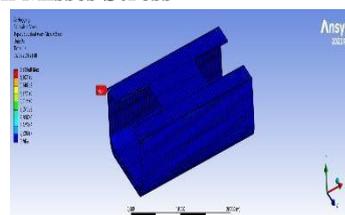
Sumber: Hasil Analisis, 2024
 Gambar c. Setup Force

Gambar a. Muatan Kosong

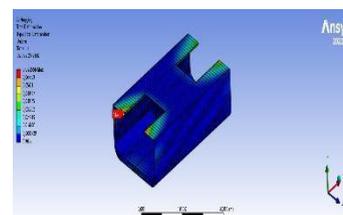
Gambar b. Muatan Rata-Rata

Gambar c. Muatan Penuh

4.1.4.2 Hasil Von Misses Stress



Gambar a. Von Misses Stress



Gambar b. Deformasi

4.2 Nilai Tegangan dan Deformasi

Menurut standar BKI Vol.II Chapter 5.C11 tegangan maksimum pada kapal ini yaitu

$$\sigma_p = C_s \cdot \sigma_{p0} = 18,5 \sqrt{\frac{L}{K}} = 18,5 \sqrt{\frac{84}{0,78}} = 217,4 \text{ Mpa}$$

Tabel 4.2.1 Nilai Tegangan

Hasil Perhitungan Manual			Hasil Analisis FEM	
Kondisi Muatan	Sagging	BKI	Sagging	BKI
Muatan Kosong	8.174 Mpa	☑	108.56 MPa	☑
Muatan Rata-Rata	9.447823032 MPa	☑	157.24 MPa	☑
Muatan Penuh	18.55980643 MPa	☑	307.42 MPa	☒
Kondisi Muatan	Hogging		Hogging	
Muatan Kosong	42.09716116 MPa	☑	685.75 MPa	☒
Muatan Rata-Rata	42.15064705 MPa	☑	686.6 MPa	☒
Muatan Penuh	38.20932215 MPa	☑	623 MPa	☒

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Menurut BKI deformasi atau defleksi yang di izinkan pada KM-Marino ini harus kurang dari :

LPP/1000 = 84m/1000 = 0.084m atau 84mm dan LPP/750 = 84m/750 = 0.112m atau 112 mm

Tabel 4.2.2 Nilai Deformasi

Hasil Perhitungan Manual			Hasil Analisis FEM	
Kondisi Muatan	Sagging	BKI	Sagging	BKI
Muatan Kosong	29.371 mm	☑	11.24 mm	☑
Muatan Rata-Rata	0.398982 mm	☑	16.276 mm	☑
Muatan Penuh	0.512112 mm	☑	31.923 mm	☑
Kondisi Muatan	Hogging		Hogging	
Muatan Kosong	32.520139 mm	☑	72.656 mm	☑
Muatan Rata-Rata	38.954054 mm	☑	72.748 mm	☑
Muatan Penuh	32.361792 mm	☑	65.948 mm	☑

Sumber: Hasil Analisis, 2024

5. Kesimpulan

1. Momen Inersia pada kapal KM-Marino dinyatakan memenuhi minimal BKI 2009 volume II section 5.C.3 yaitu sebesar 3.222 m⁴ dengan syarat minimal 3.0108 mm⁴
2. Untuk minimal nilai tegangan yang di izinkan sebesar 217.4 Mpa, sehingga kondisi yang tidak memenuhi standart BKI setelah dianalisis FEM yaitu pada Kondisi Sagging Muatan Penuh dan pada kondisi Hogging
3. Untuk maksimal nilai deformasi yang diizinkan menurut BKI yaitu sebesar 84 mm atau 112 mm, setelah dilakukan analisis FEM semua kondisi memenuhi standar BKI.

6. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyadari bahwa tanpa adanya dukungan dari berbagai pihak, penyusunan jurnal ini tidak akan pernah terwujud. Maka pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan banyak terima kasih kepada berbagai pihak, terutama bapak Dr. Eng. I Putu Sindhu Asmara, S.T., M.T dan bapak Alwi Shina Khaqiqi selaku dosen pengampu mata kuliah Metode Elemen Hingga dan Kekuatan Kapal. Serta penulis menyampaikan banyak terimakasih kepada teman teman program studi Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal, Jurusan Teknik Bangunan Kapal.

7. Daftar Pustaka

Dr. Eng. I Putu Sindhu Asmara, S.T., M.T. (2018). Kekuatan Kapal, Faktor Keselamatan dan Resiko Kegagalan Konstruksi.