

Analisis Kekuatan Memanjang Kapal Kontainer Untuk Memaksimalkan Kapasitas Ruang Muat Guna Mewujudkan Indonesia Net-Zero Emission

Naufal Ammar^{1*}, Ismi Hidayati Hasan², Dongky Nazar Firmansyah³, Hanif Yuan

Ardiansyah⁴, I Putu Sindhu Asmara⁵, dan Alwi Sina Khaqiqi⁶

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

^{2,3}Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS, Keputih Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia

Email: naufalammar@student.ppns.ac.id¹, ismihasan@student.ppns.ac.id², dongkynazar@student.ppns.ac.id³, hanifyuan@student.ppns.ac.id⁴, iputusindhuasmara@ppns.ac.id⁵, dan alwisina@ppns.ac.id⁶

Abstrak

Saat ini jumlah kapal kontainer dalam proses pengiriman barang semakin meningkat sehingga menyebabkan meningkatnya jumlah emisi gas buang. Diperlukan kapal kontainer yang memiliki kapasitas lebih banyak agar dapat mengendalikan jumlah pertumbuhan kapal kontainer. Sehingga dalam proses pembuatan kapal yang harus memperhatikan kekuatan struktur pada kapal. Penelitian ini bertujuan menganalisis kekuatan memanjang kapal kontainer pada kondisi gelombang *sagging* dan *hogging*. Selain itu juga dilakukan analisis dengan skenario kondisi kapal bermuatan kosong dan penuh. Dalam analisis kekuatan memanjang pada kapal kontainer menggunakan metode elemen hingga untuk memperoleh tegangan dan defleksi maksimal pada kapal. Didapatkan nilai tegangan maksimal saat kondisi gelombang *sagging* sebesar 1.682 Mpa (muatan kosong) dan 456 Mpa (muatan penuh). Untuk nilai tegangan maksimal saat kondisi gelombang *hogging* sebesar 3.701 Mpa (muatan kosong) dan 4.694 Mpa (muatan penuh). Kemudian nilai defleksi maksimal saat kondisi gelombang *sagging* sebesar 10,06 mm (muatan kosong) dan 3,2 mm (muatan penuh). Untuk nilai defleksi maksimal saat kondisi gelombang *hogging* sebesar 25,94 mm (muatan kosong) dan 32,90 (muatan penuh). Dari hasil analisis kekuatan memanjang kapal diatas dan dilakukan koreksi dengan rule BKI yang berlaku, dapat disimpulkan kapal kontainer yang dilakukan analisis sesuai dengan persyaratan rule BKI. Sehingga dalam proses pemanfaatan ruang muat dapat dilakukan secara optimal dan dapat mengurangi emisi gas buang.

Kata kunci: elemen hingga, *hogging*, kekuatan memanjang, ruang muat, *sagging*

Abstract

Currently, the number of container ships in the process of shipping goods is increasing, causing an increase in exhaust gas emissions. Container ships with more capacity are needed to control the growth in the number of container ships. So in the shipbuilding process one must pay attention to the structural strength of the ship. This research aims to analyze the longitudinal strength of container ships in *sagging* and *hogging* wave conditions. Apart from that, an analysis was also carried out using scenarios of empty and full ship conditions. In the analysis of longitudinal strength on container ships using the finite element method to obtain maximum stress and deflection on the ship. The maximum stress value obtained during *sagging* wave conditions is 1,682 Mpa (empty load) and 456 Mpa (full load). The maximum stress value during *hogging* wave conditions is 3,701 Mpa (empty load) and 4,694 Mpa (full load). Then the maximum deflection value during *sagging* wave conditions is 10.06 mm (empty load) and 3.2 mm (full load). The maximum deflection value during *hogging* wave conditions is 25.94 mm (empty load) and 32.90 (full load). From the results of the analysis of the longitudinal strength of the ship above and corrections made to the applicable BKI rules, it can be concluded that the container ship that was analyzed complies with the requirements of the BKI rules. So that the process of utilizing the loading space can be carried out optimally and can reduce exhaust gas emissions.

Keywords: finite elements, *hogging*, longitudinal strength, loading space, *sagging*

^{1*} Penulis korespondensi

1. Pendahuluan

Kapal kontainer merupakan kapal yang sampai saat ini masih sangat berpengaruh dalam dunia maritim. Hal ini dikarenakan beberapa akomodasi perdagangan dunia dilakukan pada sektor maritim dan didominasi oleh muatan kontainer. Kontainer lebih sering digunakan daripada muatan kargo dikarenakan tingkat keselamatan muatan yang lebih baik. Kapal tersebut juga menjadi salah satu jenis kapal yang umum di Indonesia, apalagi terkait dengan kebijakan pemerintah dalam melaksanakan program “Tol Laut”. Hal ini menunjukkan bahwa kapal kontainer memegang peranan penting dalam sistem logistik nusantara (Wulandari et al., 2022a). Akan tetapi, masih banyak ditemukan berbagai kapal kontainer yang mengalami masalah misalnya kecelakaan kapal kontainer itu sendiri. Berdasarkan data yang telah diterbitkan oleh United Nations Conference on Trade And Development (UNCTAD), tercatat jumlah kapal kontainer aktif yang berlayar di seluruh dunia pada tahun 2016 sebanyak 6.086 kapal (Wulandari et al., 2022b). Selain itu, Menurut data European Maritime Safety Agency, terdapat 1.101 kasus kecelakaan kapal kontainer di seluruh dunia pada rentang tahun 2011 hingga 2015. Hal ini disebabkan oleh kegagalan struktur yang ada pada kapal-kapal tersebut.

Pada kasus yang lain, karena kontribusi dari kapal kontainer sudah cukup mendominasi, mayoritas perdagangan dunia menggunakan kapal jenis ini dikarenakan efisiensinya. Efisiensi dalam hal ini mencakup kapasitas muatan, dan biaya yang dikeluarkan. Namun, jika kedepannya akan tetap di biarkan seperti ini, pencemaran udara akibat gas buang dari kapal juga akan terus meningkat. Peningkatan jumlah kunjungan kapal ke Pelabuhan akan meningkatkan pula tingkat emisi gas buang oleh mesin kapal. Emisi gas buang dari mesin kapal telah diketahui dapat menyebabkan masalah kesehatan dan lingkungan. Nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), dan sulfur oksida (SO_x) adalah beberapa macam zat polutan yang terdapat pada emisi gas buang dari kapal yang sangat berpengaruh terhadap kualitas air kolam pelabuhan. Dampaknya akan mengganggu bagi kesehatan manusia karena substansi pencemar yang terdapat di udara dapat masuk ke dalam tubuh melalui sistem pernafasan. (Kadar Emisi Gas Buang di Pelabuhan Belawan et al., n.d.). Salah satu faktor yang menyebabkan masalah ini adalah muatan yang di angkut kapal terlalu banyak, sehingga mesin bekerja lebih keras dan membuang gas hasil pembakaran yang banyak. Oleh karena itu, untuk menanggulangi masalah ini, perlu dilakukan perhitungan ulang terkait dengan konstruksi dan kekuatan kapal, agar tidak terjadi masalah yang sudah dijelaskan.

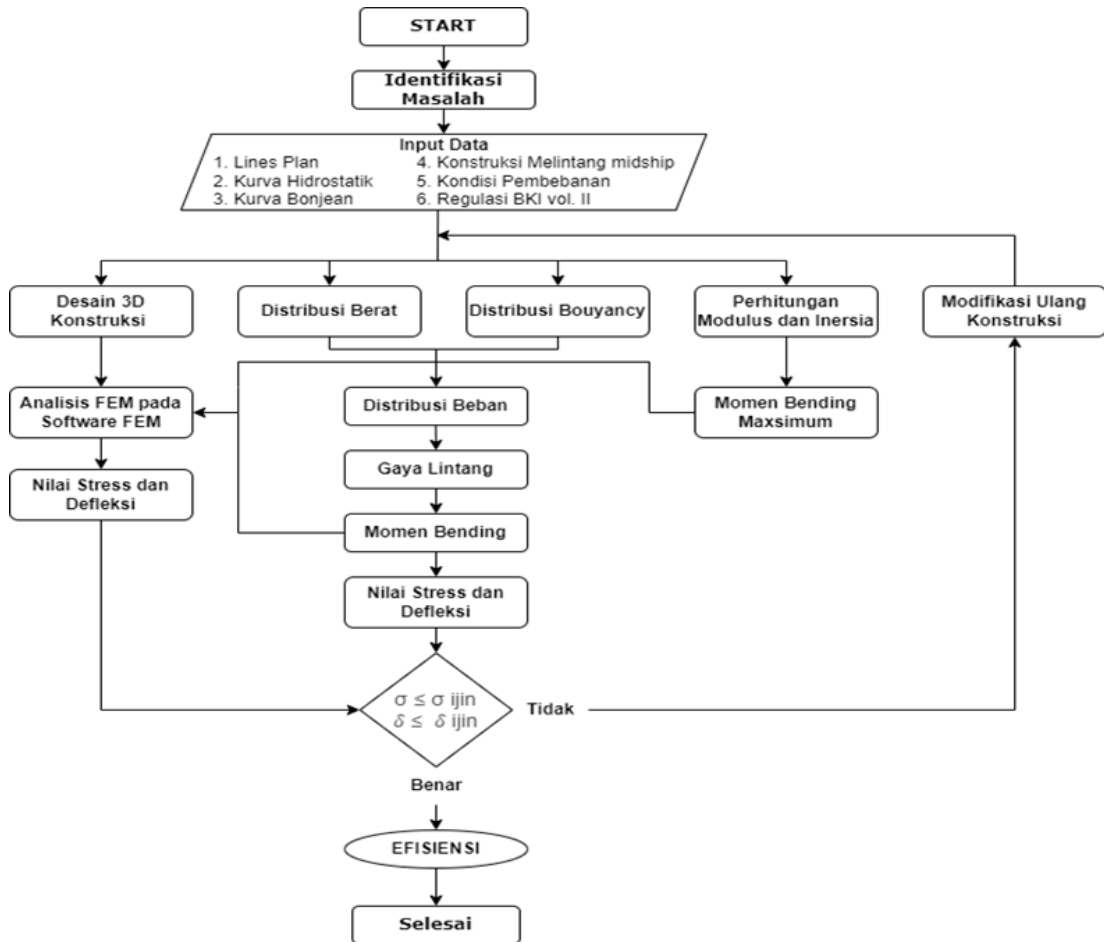
Kekuatan kapal juga merupakan suatu aspek yang harus diperhatikan dalam pembuatan sebuah kapal. Tingkat ketahanan kapal dalam melakukan pelayaran, serta kemampuan kapal dalam melewati berbagai macam gelombang yang di lewati selama pelayaran, merupakan tujuan dari perhitungan kekuatan kapal. Kondisi kekuatan kapal yang baik harus di analisis dengan akurat saat kapal melakukan pembebanan ataupun saat kapal sesudah dilakukan pembebanan. Beban yang ada pada kapal juga merupakan bagian terpenting dalam analisis perhitungan kekuatan kapal. Beban yang ada pada kapal harus dapat di tahan oleh konstruksi kapal itu sendiri.

Selain itu, kondisi kekuatan kapal juga sangat dipengaruhi oleh jenis konstruksi kapal yang digunakan. Setiap komponen konstruksi memiliki modulus penampang yang berbeda dan jenis profil yang berbeda. Hal ini dilakukan supaya memberikan berat kapal yang tidak terlalu besar, dengan kekuatan kapal yang maksimal, serta dapat menahan beban dari kapal itu sendiri.

Dalam penelitian ini, akan menghitung perbandingan kekuatan kapal kontainer dengan kapasitas 118 TEU. yang nantinya akan dilakukan perhitungan pendekatan perhitungan pada kondisi gelombang yaitu pada saat kondisi *sagging* dan *hogging* serta air tenang, dan berat muatan saat kapal muatan kosong, penuh dan rata-rata. Untuk dapat menghitung, peneliti harus mengetahui jenis konstruksi, dan komponen apa saja yang ada dalam konstruksi kapal ini. Hasil analisis ini nantinya akan berupa tegangan dan defleksi maksimal. Setelah mendapatkan hasilnya peneliti akan membandingkan dengan perhitungan metode elemen hingga yang dilakukan. Dari keduanya, penulis akan membandingkan hasil perhitungan dari dua metode tersebut, serta mengetahui efisiensi jika dilakukan modifikasi konstruksi sebelum dan sesudah analisis. Dengan demikian, peneliti dapat mengetahui tingkat kekuatan kapal dalam membawa muatan dan akan berpengaruh dalam proses pembakaran mesin kapal yang beroperasi. Sehingga, gas yang di keluarkan oleh kapal akan lebih sedikit. Dan dapat membantu mengurangi emisi gas buang demi terwujudnya Indonesia net-zero emission.

2. Metode Penelitian

Untuk mendapatkan hasil perhitungan kekuatan struktur memanjang kapal kontainer, maka diperlukan diagram alir pengerjaan. Untuk lebih jelasnya terkait diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.1 Diagram Alir Penelitian

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Pada gambar diatas dapat diketahui untuk diagram alir penelitian pada penelitian ini. Dalam melakukan studi literatur dilakukan melalui pencarian referensi yang serupa dengan topik penelitian yang sedang ditulis. Berikut untuk penjelasan lebih detail terkait alur pengerjaan.

a) Data Kapal, Tebal Plat dan Profil

Dalam penelitian ini, data kapal yang di gunakan di dapatkan dari ukuran utama kapal kontainer dengan kapasitas 118 TEU. Dengan ukuran utama sebagai berikut :

Tabel 2-1 Ukuran Utama Kapal Petikemas

No.	Spesifikasi	Satuan	Nilai
1	LWL	m	91,32
2	LPP	m	87,81
3	B	m	15,90
4	H	m	7,54
5	T	m	5,00
6	Cb	m	0,64
7	Vs	knots	14,30

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Dari tabel diatas dapat diketahui untuk data ukuran utama kapal petikemas, sedangkan untuk data ukuran tebal plat dan profil kapal kontainer dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2-2 Ukuran Tebal Plat dan Profil Kapal Kontainer

No.	Nama Bagian	Keterangan	(Q)	Lebar (mm)	Tinggi (mm)	Luas (mm ²)
1		Web	22	16	200	3.200

No.	Nama Bagian	Keterangan	(Q)	Lebar (mm)	Tinggi (mm)	Luas (mm ²)
	Bottom Longitudinal	Face	22	100	16	1.600
2	In.Bottom Long	Web	22	16	200	3.200
		Face	22	100	16	1.600
3	Deck Long	Web	20	15	90	1.350
		Face	20	53	15	788
4	Inner Bottom Plate	Web	7	1.800	8	14.400
		Face	7	1.500	8	12.000
5	Keel Plate	A	1	1.800	10	18.000
6	Bottom Plate	B	2	1.800	10	18.000
			2	1.500	10	15.000
			2	820	10	8.200
			2	1.800	11	19.800
7	Side Plate	D	2	1.800	7	12.600
			2	1.440	8	11.520
			2	1.500	8	12.000
			2	1.800	9	16.200
8	Plat Sheerstrake	E	2	1.800	10	18.000
9	Bilge Plate	C	4	1.800	10	18.000
10	Deck Plate	A	5	1.800	8	14.400
11	Deck Plate	C	2	1.500	8	12.000
12	Center Girder		1	12	1.000	12.000
13	Side Girder		2	9	1.000	9.000
14	Stringer		2	1.500	8	12.000

Sumber: Hasil Analisis, 2024

b) Analisis Momen Inersia

Momen inersia midship kapal adalah luasan potongan melintang badan kapal terhadap sumbu tengahnya. Untuk menghitung momen inersia, biasanya digunakan gambar potongan melintang kapal yang mengalami momen inersia terbesar, yang umumnya berada di midship kapal. Hal ini karena di daerah midship, momen lengkung biasanya paling besar dibandingkan dengan daerah lain di sepanjang kapal. Karena jenis konstruksi pada kapal cukup beragam, digunakan perhitungan menggunakan tabel seperti berikut:

Tabel 2-3 Perhitungan Konstruksi Kapal

No	Bagian	Lebar	Tinggi	Luas (A)	Lengan (z)	z.A	z ² .A	I ₀ =1/12.l.t ³
1								
2								
...								
i		l _i	t _i	A _i	z _i	z _i .A _i	z _i ² .A _i	I ₀ .i
				Σ A _i		Σ z _i .A _i	Σ z _i ² .A _i	Σ I ₀ .i

Sumber: Hasil Analisis, 2024

Setelah melakukan perhitungan pada tabel, untuk mendapatkan jarak netral axis secara vertikal yaitu dengan cara :

$$Z_{na} = \frac{\sum z_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (1)$$

Momen inersia terhadap sumbu horizontal tidak boleh kurang dari :

$$I_H = \sum I_{0y} + \sum z_i^2 \cdot A_i - z_{na}^2 \cdot \sum A_i \quad (2)$$

c) Pengecekan Izin Berdasarkan Klas

Tegangan, modulus dan momen inersia kapal didapatkan, maka tegangan kapal yang didapat harus dibandingkan dengan tegangan ijin yang ditetapkan oleh BKI. Begitu juga dengan modulus dan momen inersia dibandingkan dengan perhitungan dari BKI, jika nilainya sudah melebihi maka kekuatan memanjang kapal dianggap memenuhi.

Longitudinal stress (σ_p) yang diijinkan:

$$\sigma_p = C_s \cdot \sigma_{p0} \quad (3)$$

Dimana: $C_s = 1$; untuk $0.3 \leq x/L \leq 0.7$
 $\sigma_{p0} = \frac{175}{K}$; untuk $L \geq 90$ m

Tegangan kondisi *hogging* dan *sagging* harus lebih kecil dari longitudinal stress yang diijinkan tersebut baik untuk obottom dan σ_{deck} . Modulus minimal yang disyaratkan oleh BKI 2022 Vol. II Section 5.C.2 dirumuskan sebagai berikut:

$$W_{min} = k.C_0.L^2.b.(C_b + 0.7).10^{-6} \quad (4)$$

Dimana :

$$\begin{aligned} K &= 1 \\ L &= L \text{ konstruksi (m)} \\ C_0 &= [10.75 - [300 - L/100]^{1.5}] \times 1 \end{aligned}$$

Modulus penampang terhadap deck dan bottom harus lebih besar dari modulus minimal yang disyaratkan oleh BKI. Momen inersia minimum pada midship yang disyaratkan oleh BKI 2014 Vol. II Section 5.C.3 dirumuskan sebagai berikut.

$$I_y = 3 \times 10^{-2} \times W \times L/k \text{ (m}^4\text{)} \quad (5)$$

d) Analisis Distribusi Berat Kapal

Distribusi berat memanjang mempengaruhi berkurangnya kecepatan operasional kapal di lautan serta dari ketiga sumbu utama juga dapat digunakan untuk menghitung jari-jari girasi kapal yang memiliki efek yang besar pada kinerja seakeeping kapal. Perhitungan distribusi berat mempengaruhi bending momen yang terjadi pada kapal. Berat pada kapal ini diantaranya adalah berat konstruksi kapal itu sendiri, berat muatan, crew, barang bawaan, bahan bakar, dan pelumas. Dapat di definisikan berat keseluruhan kapal yang terjadi pada setiap segmen kapal.

e) Distribusi Beban Kapal

Pada perhitungan kekuatan, selain total berat muatan di kapal, distribusi berat akan sangat berpengaruh. Misalnya, jika mesin kapal terletak di buritan, maka distribusi berat akan menunjukkan bobot yang lebih berat kearah belakang. Distribusi beban tidak lain adalah beban bersih yang diplot pada setiap titik sepanjang kapal. Beban adalah berat dikurangi gaya apung di setiap titik di sepanjang kapal.

$$\text{Beban} = \text{Buoyancy} - \text{Berat} \quad (6)$$

f) Distribusi Bouyancy Kapal

Distribusi gaya buoyancy dihitung berdasar data-data bonjean yang tersedia. Gaya buoyancy dihitung untuk kondisi air tenang dan bergelombang. Distribusi berat kapal dan gaya buoyancy diubah dalam bentuk 11 tangga. yaitu distribusi dianggap tersebar merata sepanjang potongan kapal panjang dari AP sampai FP dibagi dalam 40 section. Bisa didapat dengan perhitungan:

$$\text{Distribusi gaya apung} = \text{Distribusi volume bagian bawah air} \quad (7)$$

g) Analisis Momen Bending

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 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:

$$P' = \frac{dS}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} \quad (8)$$

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:

$$\sigma = \frac{BM}{w} = \frac{BM \times y}{I} \quad (9)$$

$$max = \frac{BM}{z} \quad (10)$$

Dimana :

$$BM = \text{Bending momen, momen lengkung } y$$

- y = Jarak terhadap sumbu netral I
- I = Momen inersia terhadap sumbu netral
- Z = Modulus penampang

Selain menghitung tegangan normal, tegangan lainnya perlu diketahui nilainya. Salah satunya yaitu tegangan geser atau tegangan yang timbul akibat adanya gaya geser pada penampang kapal. Digunakan persamaan:

$$P' = \frac{dS}{dx} = \frac{d^2M}{dx^2} \quad (11)$$

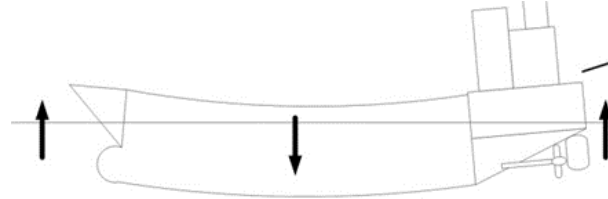
Dimana :

- τ = Tegangan geser
- D = Gaya geser (gaya lintang)
- S = Statis momen
- B = Lebar bidang geser
- I_x = Momen inersia

i) Kondisi Gelombang dan Muatan Kapal

o *Sagging*

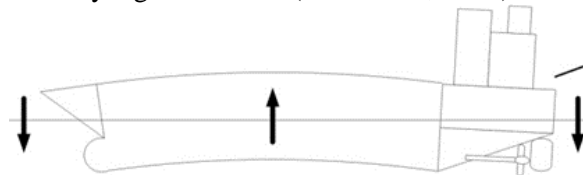
Sagging adalah apabila muatan dipusatkan pada bagian tengah kapal, *Sagging* juga bisa terjadi karena adanya dua puncak gelombang yang berada di bagian depan dan belakang kapal, sehingga gaya keatas kapal lebih besar pada bagian depan dan belakang namun pada bagian tengah kapal mengalami gaya kebawah yang lebih besar (Hasil et al., 2018).



Gambar 2.2 Kondisi *Sagging*
Sumber: Hasil et al, 2018

o *Hogging*

Hogging adalah apabila muatan dipusatkan pada bagian depan dan belakang kapal, *Hogging* juga bisa terjadi karena adanya satu puncak gelombang yang berada di tengah kapal, sehingga gaya keatas kapal lebih besar pada bagian tengah kapal namun pada bagian depan dan belakang kapal mengalami gaya kebawah yang lebih besar (Hasil et al., 2018).



Gambar 2.3 Kondisi *Hogging*
Sumber: Hasil et al, 2018

• **Kondisi Muatan**

Analisis di lakukan dalam berbagai kondisi muatan untuk mendapatkan hasil berupa momen maksimal, Tegangan terhadap keel, tegangan terhadap deck, defleksi maksimal serta frekuensi. Untuk kondisi muatan yang dilakukan yaitu ketika kapal bermuatan kosong dan kapal bermuatan penuh.

j) Analisis Finite Element Method (FEM)

Pemodelan struktur kapal dengan FEM melibatkan beberapa langkah penting:

- o Pembuatan Geometri: Geometri geladak kapal kontainer dibuat dalam bentuk model 3D yang mendetail.
- o Diskritisasi: Model geometri kemudian dibagi menjadi elemen-elemen kecil (elemen hingga) yang memudahkan perhitungan.
- o Penerapan Material: Properti material dari struktur kapal, seperti modulus elastisitas dan kekuatan tarik, diterapkan pada model.
- o Penerapan Beban dan Batasan: Beban dinamis akibat gelombang *sagging* dan *hogging* serta kondisi batasan seperti dukungan dan keterikatan diterapkan pada model.

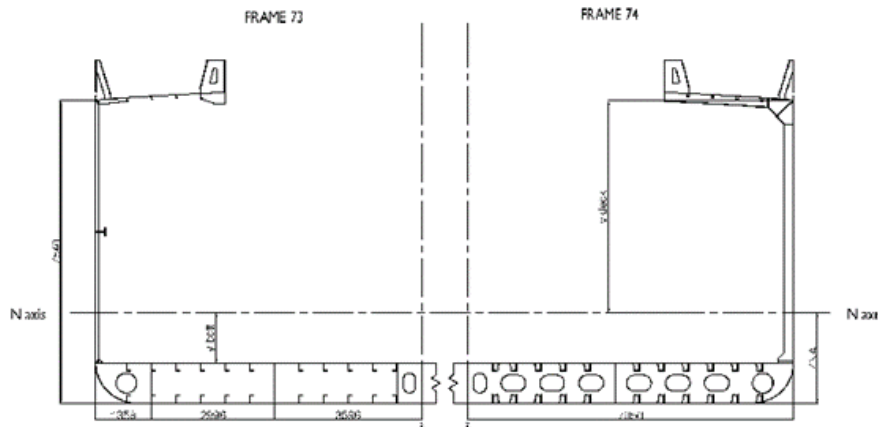
- o Analisis: Analisis dilakukan dengan menggunakan software FEM untuk menghitung distribusi tegangan, deformasi, dan momen lentur pada geladak kapal.

Hasil penelitian yang diperoleh dari pendekatan pemodelan ini mencakup nilai-nilai maksimum tegangan tarik, faktor keamanan, dan momen lentur ultimate untuk berbagai ketebalan pelat dan kondisi pembebanan.

3. Hasil

3.1. Analisis Momen Inersia

Berdasarkan metode yang sudah di jelaskan sebelumnya, bahwa momen inersia di hitung pada daerah midship kapal dikarenakan daerah ini di anggap memiliki momen inersia terbesar. Berikut adalah gambaran penampang melintang konstruksi dari kapal kontainer.



Gambar 3.1 Konstruksi Kapal Kontainer

Sumber: Hasil Analisis, 2024

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

$$W_{min} = k.C_0 . L_2.b.(C_b + 0.7).10^{-6} \quad (12)$$

Dimana :

- K = Tegangan geser
- C₀ = Gaya geser (gaya lintang)
- L = Statis momen
- C_b = Lebar bidang geser
- B = Momen inersia

Maka :

- W_{min} = 1.375 m³
- W_{bottom} = 0.773 m³
- W_{deck} = 1.707 m³

Dari hasil perhitungan diatas maka di dapatkan kesimpulan untuk beban Tidak Memenuhi.

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

$$I_y = 3 \times 10^2 \times W \times L/k \quad (13)$$

Dimana :

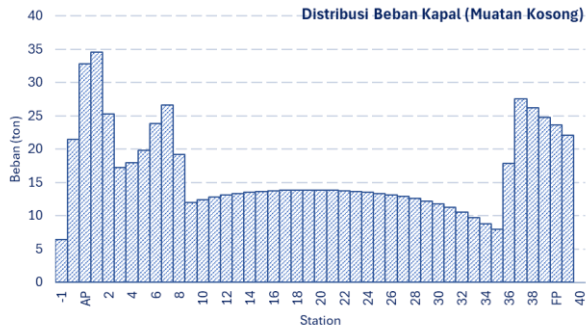
- W = 1.355 m³
- L = 91.32 m
- K = 1

Maka :

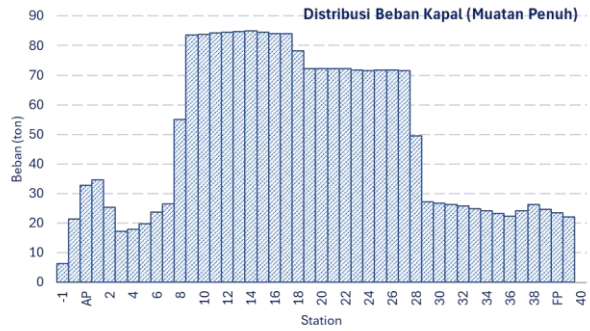
- I_y = 3.9466 m⁴
- I_{na} = 3.8343 m⁴

Dari hasil perhitungan diatas maka di dapatkan kesimpulan untuk beban Memenuhi.

3.2. Analisis Distribusi Berat Kapal

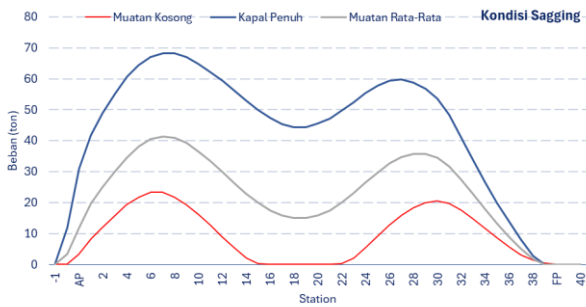


Gambar 3.2 Distribusi Berat Kapal Muatan Kosong
Sumber: Hasil Analisis, 2024

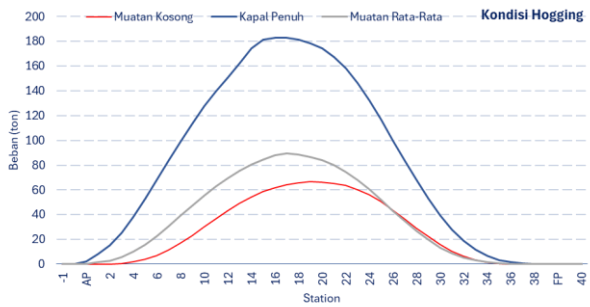


Gambar 3.3 Distribusi Berat Kapal Muatan Penuh
Sumber: Hasil Analisis, 2024

3.3. Analisis Distribusi Bouyancy Kapal

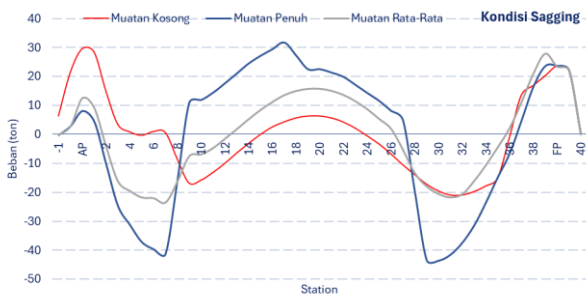


Gambar 3.4 Distribusi Bouyancy Kondisi *Sagging*
Sumber: Hasil Analisis, 2024

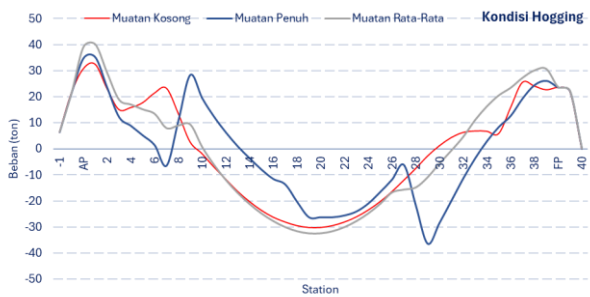


Gambar 3.5 Distribusi Bouyancy Kondisi *Hogging*
Sumber: Hasil Analisis, 2024

3.4. Analisis Distribusi Beban Kapal

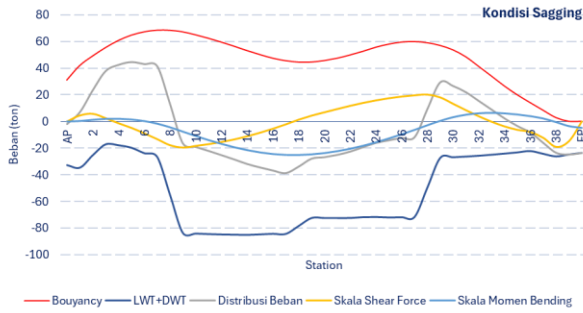


Gambar 3.6 Distribusi Beban Kondisi *Sagging*
Sumber: Hasil Analisis, 2024

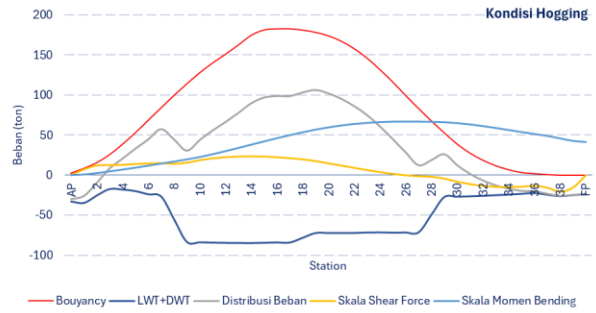


Gambar 3.7 Distribusi Beban Kondisi *Hogging*
Sumber: Hasil Analisis, 2024

3.5. Analisis Gaya Lintang dan Momen Lengkung



Gambar 3.8 Gaya Lintang dan Momen Lengkung Kondisi *Sagging*
Sumber: Hasil Analisis, 2024



Gambar 3.9 Gaya Lintang dan Momen Lengkung Kondisi *Hogging*
Sumber: Hasil Analisis, 2024

3.6. Rekapitulasi Hasil

Tabel 3-1 Rekapitulasi Hasil Analisis

No.	Kondisi		Momen Tekuk maks. Ton.m	Tegangan (Mpa)		Defleksi m	Frekuensi Hz
	Gelombang	Muatan		Terhadap bottom	Terhadap deck		
1	Even Keel	Kosong	10344.95	59.43	131.13	0.02	3.79
2		Penuh	0.00	0.00	0.00	0.34	0.85
3		Rata-rata	4702.30	27.01	59.61	-0.01	4.51
4	<i>Sagging</i>	Kosong	7522.22	43.21	95.35	0.00	8.01
5		Penuh	-6303.21	-36.21	-79.90	-0.06	2.10
6		Rata-rata	-8739.09	-50.20	-110.78	-0.07	1.95
7	<i>Hogging</i>	Kosong	13631.81	78.31	172.80	0.06	2.12
8		Penuh	16699.79	95.93	211.69	0.03	2.73
9		Rata-rata	14314.70	82.23	181.46	0.02	3.54

Sumber: Hasil Analisis, 2024

3.7. Tegangan Izin

Berdasarkan pedoman dari BKI vol. II section 5, C.1, di dapatkan bahwa nilai tegangan izin harus memenuhi atau di bawah dari nilai tegangan izin maksimum, tegangan izin maksimum di dapatkan dari persamaan (3) maka:

BKI 2022 vol. II, sec. 5, C1.

$$\sigma = C_s \cdot \sigma_0 \tag{14}$$

Dimana :

- $C_s = 1$
- $\sigma_0 = 175/k$ untuk $L \geq 90$ m
- $k = 1$
- $\sigma = 1 \times 175/1$
- $= 175 \text{ n/nm}^2$
- $= 175 \text{ Mpa}$

Maka di dapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 3-2 Hasil Analisis Numerik Tegangan Izin

No.	Kondisi		Tegangan (Mpa)		Tegangan Izin (175 Mpa)	
	Gelombang	Muatan	Terhadap bottom	Terhadap deck	Terhadap bottom	Terhadap deck
1	Even Keel	Kosong	59.43	131.13	Memenuhi	Memenuhi
2		Penuh	0.00	0.00	Memenuhi	Memenuhi
3		Rata-rata	27.01	59.61	Memenuhi	Memenuhi
4	<i>Sagging</i>	Kosong	43.21	95.35	Memenuhi	Memenuhi
5		Penuh	-36.21	-79.90	Memenuhi	Memenuhi

No.	Kondisi		Tegangan (Mpa)		Tegangan Izin (175 Mpa)	
	Gelombang	Muatan	Terhadap bottom	Terhadap deck	Terhadap bottom	Terhadap deck
6		Rata-rata	-50.20	-110.78	Memenuhi	Memenuhi
7	<i>Hogging</i>	Kosong	78.31	172.80	Memenuhi	Memenuhi
8		Penuh	95.93	211.69	Memenuhi	Tidak memenuhi
9		Rata-rata	82.23	181.46	Memenuhi	Tidak memenuhi

Sumber: Hasil Analisis, 2024

3.8. Analisis Finite Elemen Method (FEM)

Dalam analisis FEM digunakan model yang di ambil dari kapal pada bagian parrarel middle body (PMB) yang di modelkan terlebih dahulu dalam bentuk 3D, kemudian pada analisis ini menggunakan variabel momen bending pada kondisi tertentu yaitu, kondisi gelombang *sagging* dan *hogging* serta kondisi muatan kosong dan penuh. Berikut merupakan hasil perhitungan konversi yang akan dilakukan dalam melakukan analisis FEM.

Tabel 3-3 Hasil Perhitungan Konversi

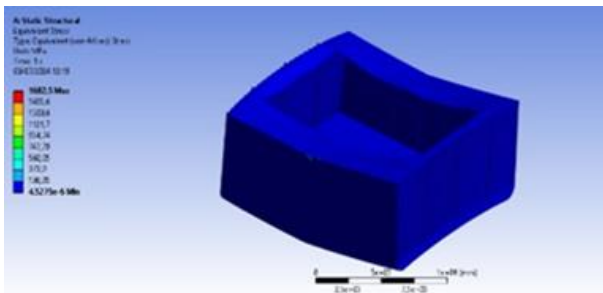
No.	Kondisi		Momen Tekuk Maks.	Konversi
	Gelombang	Muatan	Ton.m	N
1	<i>Sagging</i>	Kosong	7522,22	4553566,590
2		Penuh	6303,21	3815640,392
3	<i>Hogging</i>	Kosong	13631,81	8251999,354
4		Penuh	16699,80	10109203,310

Sumber: Hasil Analisis, 2024

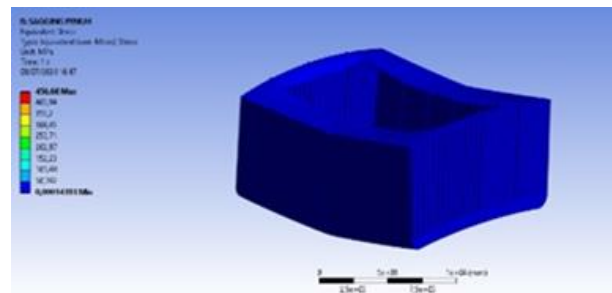
Dari tabel diatas dapat diketahui untuk hasil perhitungan konversi dari kondisi gelombang (*sagging* dan *hogging*) dan kondisi muatan (kosong dan penuh).

a) Hasil Analisis Tegangan

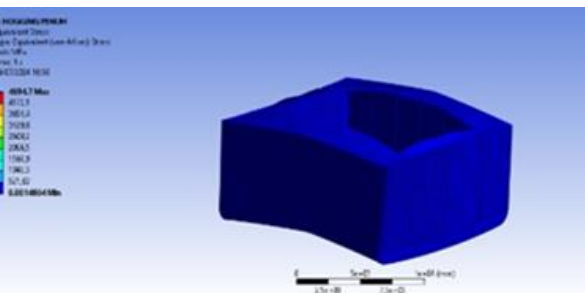
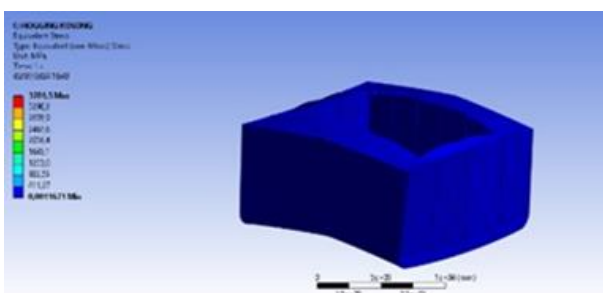
Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai dari tegangan maksimal pada kondisi muatan kosong *sagging* menghasilkan nilai 1682 Mpa, sedangkan *hogging* dengan nilai 3701,5 Mpa. Untuk tegangan maksimal yang terjadi pada kondisi muatan penuh *sagging*, menghasilkan nilai 456 Mpa, sedangkan *hogging* dengan nilai 4694 Mpa. Hasil ini akan di bandingkan dengan tegangan izin pada BKI. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.10 Hasil Analisis FEM Tegangan (*Sagging*-Muatan Kosong)
Sumber: Hasil Analisis, 2024



Gambar 3.11 Hasil Analisis FEM Tegangan (*Sagging*-Muatan Penuh)
Sumber: Hasil Analisis, 2024



Gambar 3.13 Hasil Analisis FEM Tegangan (*Hogging*-Muatan Penuh)

Gambar 3.12 Hasil Analisis FEM Tegangan (*Hogging*-Muatan Kosong)
 Sumber: Hasil Analisis, 2024

Sumber: Hasil Analisis, 2024

b) Pengecekan Tegangan Izin

Hasil analisis tegangan yang sudah di analisis dilakukan pengecekan tegangan izin menggunakan persamaan sebagai berikut :

BKI 2022 vol. II, sec. 5, C1.

$$\sigma_p = C_s \cdot \sigma_0 \tag{15}$$

Dimana :

- Cs = 1
- $\sigma_0 = 18.5 \times \sqrt{L/K}$ untuk $L \geq 90$ m
- k = 1
- $\sigma_p = 1 \times (18.5 \times \sqrt{16.2/1})$
 $= 2354.6 \text{ n/nm}^2$
 $= 2354.6 \text{ Mpa}$

Maka di dapatkan hasil sebagai berikut :

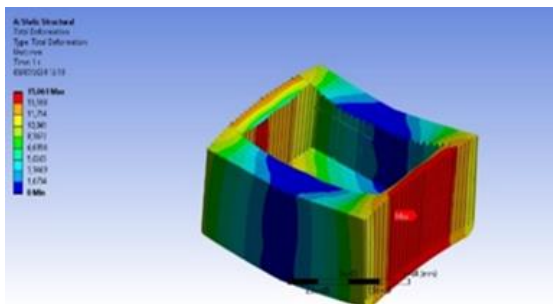
Tabel 3-4 Hasil Pengecekan Tegangan Izin

No	Kondisi		Tegangan maksimal	Tegangan izin
	Gelombang	Muatan	Mpa	2354,6 Mpa
1	<i>Sagging</i>	Kosong	1682	Memenuhi
2		Penuh	456	Memenuhi
3	<i>Hogging</i>	Kosong	3701	Tidak Memenuhi
4		Penuh	4694	Tidak Memenuhi

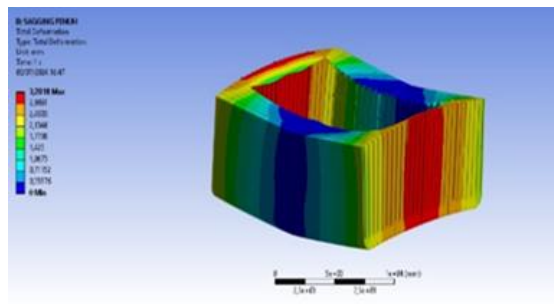
Sumber: Hasil Analisis, 2024

c) Hasil Analisis Defleksi

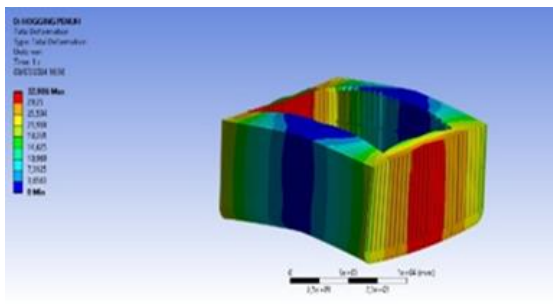
Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai dari defleksi maksimal pada kondisi muatan kosong *sagging* menghasilkan nilai 15.06 mm, sedangkan *hogging* dengan nilai 25.94 mm. Untuk defleksi maksimal yang terjadi pada kondisi muatan penuh *sagging*, menghasilkan nilai 3.2 mm, sedangkan *hogging* dengan nilai 32.9 mm. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



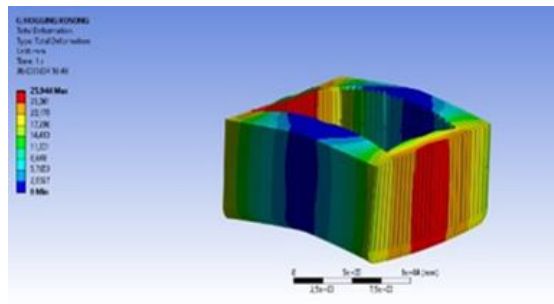
Gambar 3.14 Hasil Analisis FEM Defleksi (*Sagging*-Muatan Kosong)
 Sumber: Hasil Analisis, 2024



Gambar 3.15 Hasil Analisis FEM Defleksi (*Sagging*-Muatan Penuh)
 Sumber: Hasil Analisis, 2024



Gambar 3.16 Hasil Analisis FEM Tegangan (*Hogging*-Muatan Kosong)



Gambar 3.17 Hasil Analisis FEM Tegangan (*Hogging*-Muatan Penuh)

4. Kesimpulan

Dari hasil analisis yang telah dilakukan diatas, maka di dapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil analisis kekuatan kapal kontainer, diperoleh nilai tegangan maksimal sebesar 1682 Mpa pada kondisi gelombang *sagging* dengan muatan kosong dan 456 Mpa dengan muatan penuh. Sedangkan tegangan izin BKI sebesar 2354.6 Mpa. Sehingga, pada kondisi tersebut tegangan maksimal memenuhi persyaratan BKI.
- Hasil analisis kekuatan kapal kontainer, diperoleh nilai tegangan maksimal sebesar 3701 Mpa pada kondisi gelombang *hogging* dengan muatan kosong dan 4694 Mpa dengan muatan penuh. Sedangkan tegangan izin BKI sebesar 2354.6 Mpa. Sehingga, pada kondisi tersebut tegangan maksimal tidak memenuhi persyaratan BKI.
- Hasil analisis kekuatan kapal kontainer, diperoleh nilai defleksi maksimal sebesar 15.06 mm pada kondisi gelombang *sagging* dengan muatan kosong dan 3.20 mm dengan muatan penuh. Sedangkan pada kondisi gelombang *Hogging* diperoleh nilai defleksi maksimal sebesar 25.94 mm pada muatan kosong dan 32.90 mm pada muatan penuh.

5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih kepada Tuhan YME yang selalu memberikan berkah, rahmat dan kesehatan selalu, serta dosen pembimbing 1 dan dosen pembimbing 2 yang sudah memeberikan panduan mengerjakan jurnal, serta para penulis lain yang sudah membantu mengerjakan jurnal ini sampai selesai. Tidak lupa ucapan terimakasih kepada penulis jurnal referensi sehingga jurnal ini dapat terselesaikan.

6. Daftar Pustaka

- Hasil, J., Ilmiah, K., Daim Siregar, F., Zakki, A. F., & Mulyanto, P. (2018). Jurnal Teknik Perkapalan Analisa Perbandingan Desain Konstruksi Kapal Bulk Carrier di Perairan North Atlantic Ocean dan Indonesian Waterways Dengan Menggunakan Regulasi BKI. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 6(1), 232.
<http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Kadar Emisi Gas Buang di Pelabuhan Belawan, P., Kusumaning Utami dan Feronika Sekar Puriningsih, T., Kusumaning Utami, T., Feronika Sekar Puriningsih, dan, Litbang Perhubungan Jl Medan Merdeka Timur No, B., & Pusat, J. (n.d.). *Emission Calculation At Belawan Port*.
- Wulandari, A. I., Putra, D., & Rusparyansyah, W. (2022a). Analisis Kekuatan Memanjang Pada Geladak Kapal Kontainer 409 Teu Dengan Metode Elemen Hingga Longitudinal Strength Analysis on Deck of Container Ship 409 TEU With Finite Element Method. In *Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim* (Vol. 16, Issue 1).
- Wulandari, A. I., Putra, D., & Rusparyansyah, W. (2022b). Analisis Kekuatan Memanjang Pada Geladak Kapal Kontainer 409 Teu Dengan Metode Elemen Hingga Longitudinal Strength Analysis on Deck of Container Ship 409 TEU With Finite Element Method. In *Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim* (Vol. 16, Issue 1).