



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

Amalia Ika Wulandari^{1,a}, Suardi¹, dan Dimas Putra Wahid Ruspariansyah¹

¹Program Studi Teknik Perkapalan, Institut Teknologi Kalimantan, Jl. Soekarno-Hatta Km. 15, Balikpapan, Indonesia

e-mail: ^aamaliaikaw@lecturer.itk.ac.id

Diterima : 11 April 2022; Direvisi: 02 September 2022; Disetujui: 06 September 2022

Abstrak

Berdasarkan data yang diterbitkan oleh *United Nations Conference on Trade And Development*, tercatat jumlah kapal kontainer aktif yang berlayar di seluruh dunia pada tahun 2016 sebanyak 6.086 kapal. Menurut data *European Maritime Safety Agency*, terdapat 1.101 kasus kecelakaan kapal kontainer di seluruh dunia pada rentang tahun 2011 hingga 2015. Salah satu faktor penyebab kecelakaan tersebut adalah kegagalan struktur pada geladak yang tidak mampu menahan beban yang ada selama kapal beroperasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan memanjang pada geladak Kapal Kontainer 409 TEU berbahan baja KI-A36 dengan metode *non-linear finite element method*. Beban yang diberikan pada penelitian ini adalah beban dinamis berupa gelombang *hogging* dan *sagging* serta jenis pelat pada kapal yang digunakan yaitu AH-36. Hasil penelitian diperoleh tegangan maksimum paling tinggi adalah 288,954 N/mm² dengan *safety factor* 1,229 yaitu pada kondisi ketebalan pelat 75% saat *sagging*, dan tegangan maksimum terkecil adalah 225,216 N/mm² dengan *safety factor* 1,576 yaitu pada kondisi ketebalan pelat 100% saat *hogging*. Momen lentur vertikal yang diperoleh adalah 4,46 x 10¹¹ N.mm pada kondisi *hogging* dan -4,66 x 10¹¹ N.mm pada kondisi *sagging*. Kemudian pada kondisi *hogging*, momen *ultimate* terbesar adalah 1,196 x 10¹² N.mm dengan *safety factor* 2,68 pada ketebalan pelat 100% dan momen *ultimate* terkecil adalah 8,687 x 10¹¹ N.mm dengan *safety factor* 1,95 pada ketebalan pelat 75%. Pada kondisi *sagging*, momen *ultimate* terbesar adalah -9,882 x 10¹¹ N.mm dengan *safety factor* 2,12 pada ketebalan pelat 100% dan momen *ultimate* terkecil adalah -6,271 x 10¹¹ N.mm dengan *safety factor* 1,34 pada ketebalan pelat 75%.

Kata kunci: *hogging*; kontainer; momen; tegangan; *sagging*

Abstract

Based on data published by the *United Nations Conference on Trade and Development*, there were 6.086 active container ships sailing around the world in 2016. According to data *European Maritime Safety Agency*, there were 1.101 cases of container ship accidents worldwide between 2011 and 2015. One of the factors that caused the accident was the failure of the structure on the deck that was unable to withstand the existing loads while the ship was operating. This study aims to analyze the longitudinal strength of the Container Ship Deck 409 TEU made of KI-A36 steel with the *non-linear finite element method*. Load given to this research is the dynamic load in the form of waves *hogging* and *sagging* with material AH-36. The results obtained that the highest maximum stress is 288,954 N/mm² with a *safety factor* of 1,229 at the condition of the plate thickness of 75% when *sagging*, and the smallest maximum stress is 225,216 N/mm² with a *safety factor* of 1,576 at 100% plate thickness conditions when *hogging*. The vertical bending moment obtained is 4,46x10¹¹ N.mm at condition *hogging* and -4,66x10¹¹ N.mm at condition *sagging*. Then in the *hogging* conditions, the largest *ultimate* moment is

$1,196 \times 10^{12}$ N.mm with a safety factor of 2,68 at 100% plate thickness and the smallest ultimate moment is $8,687 \times 10^{11}$ N.mm with a safety factor of 1,95 at 75% plate thickness. In sagging conditions, the largest ultimate moment is $-9,882 \times 10^{11}$ N.mm with a safety factor of 2,12 at 100% plate thickness and the smallest ultimate moment is $-6,271 \times 10^{11}$ N.mm with a safety factor of 1,34 at 75% plate thickness.

Keywords: hogging; container; moment; stress; sagging

PENDAHULUAN

Kapal kontainer adalah kapal khusus yang dioperasikan untuk mengangkut kontainer sesuai dengan persyaratan *International Organization for Standardization* (ISO) (Haryanto, 2020). Berdasarkan data yang 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 (United Nations Conference on Trade and Development, 2016). 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.

Namun seiring dengan banyaknya jumlah kapal kontainer, telah banyak terjadi kasus kecelakaan pada kapal tersebut. Menurut data *European Maritime Safety Agency*, terdapat 1.101 kasus kecelakaan kapal kontainer di seluruh dunia pada rentang tahun 2011 hingga 2015 (European Maritime Safety Agency, 2017). 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 bergelombang. Struktur geladak memiliki batas kekuatan, sehingga ketika struktur tersebut terus menerus mendapat beban baik berupa beban eksternal dari gelombang dan beban internal dari tumpukan kontainer serta struktur geladak itu sendiri maka akan mencapai kekuatan batas (*ultimate strength*) pada struktur tersebut (Mubarak, dkk., 2018). Oleh karena itu, tegangan (*stress*) dan momen lentur (*bending*

moment) yang dialami oleh struktur di saat beroperasi pada kondisi kritis dapat menjadi acuan untuk mengetahui kekuatan struktur kapal, tegangan dan momen tersebut haruslah lebih kecil daripada tegangan yang diijinkan dan momen batasnya (Mairuhu, 2011). Program yang digunakan oleh penulis untuk melakukan analisis adalah program didasarkan pada metode elemen hingga.

Mulyatno & Pratama (2011) menganalisis kekuatan konstruksi *car deck* dengan menggunakan *software* MSC Patran Nastran dan diperoleh tegangan maksimum tertinggi terjadi pada saat *sagging*. Kemudian Mulyatno, dkk., (2012) menganalisis kekuatan konstruksi *container deck* dengan MSC Patran Nastran dan diperoleh tegangan maksimum tertinggi terjadi pada konstruksi *container deck* saat kondisi *sagging*. Mukhsin, dkk. (2016) menganalisis kekuatan konstruksi *car deck* akibat penambahan *deck* pada ruang muat, dari penelitian tersebut diperoleh tegangan maksimum tertinggi pada kondisi *sagging*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan maksimum, momen lentur vertikal, dan faktor keamanan pada geladak kapal kontainer. Dengan hasil perhitungan tersebut diharapkan para desainer dapat lebih mengoptimalkan desain dan kekuatan pada geladak kapal kontainer.

METODE

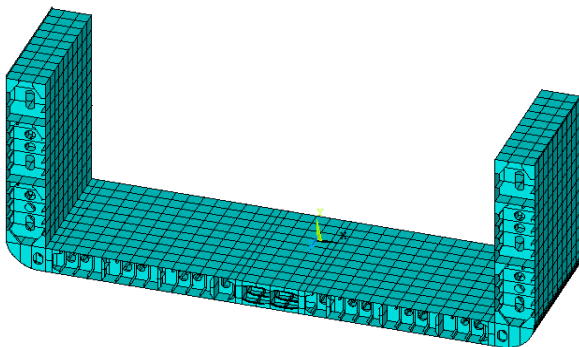
Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan data yaitu Kapal Kontainer 409 TEU yang diperoleh dari galangan kapal. Kemudian untuk menghitung kekuatan digunakan *software* berbasis elemen hingga. Pada saat menganalisis kekuatan dilakukan beberapa tahapan.

Tahapan pertama, dilakukan pengumpulan referensi teori yang relevan dengan penelitian ini. Dalam mempelajari dan memahami sistematika perhitungan yang dilakukan untuk mempermudah

proses penelitian maka studi literatur diperoleh dari buku yang berkaitan dengan penggunaan *software* berbasis elemen hingga, *rules* BKI, tugas akhir yang telah berhasil, dan jurnal-jurnal ilmiah. Data-data yang dikumpulkan berupa ukuran utama kapal, gambar konstruksi penampang melintang kapal, dan data spesifikasi material kapal yang digunakan. Dimensi utama kapal dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi utama kapal

Data Kapal	Ukuran	Satuan
<i>LOA</i>	98,9	m
<i>LWL</i>	94,5	m
<i>LPP</i>	92,0	m
<i>B</i>	23,5	m
<i>H</i>	10,0	m
<i>T</i>	6,5	m
<i>DWT</i>	8842,4	t
<i>Payload</i>	409,0	TEU



Gambar 1. Pemodelan *midship*

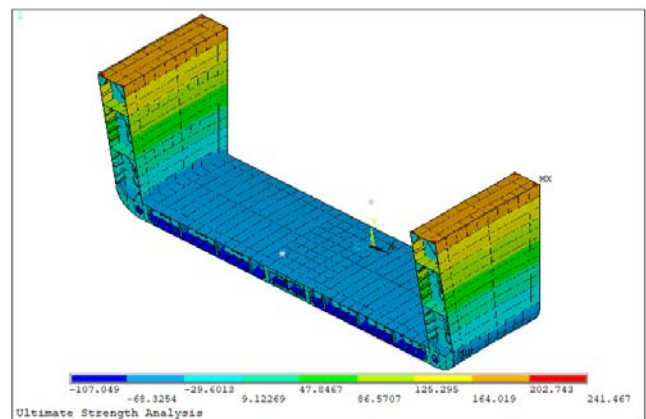
Tahapan kedua, dilakukan pemodelan konstruksi *midship* kapal seperti pada Gambar 1. Pemodelan dilakukan pada konstruksi *midship* dengan pertimbangan bahwa area paling rawan ketika kondisi perairan bergelombang terletak pada area *midship*. Kemudian ketebalan pelat kapal divariasikan untuk mengetahui kekuatan pada variasi ketebalan pelat. Hasil dari *Non Linear Finite Element Analysis* (NLFEA) yaitu nilai tegangan maksimum dan momen lentur vertikal kapal.

Tahapan ketiga yaitu dilakukan proses *meshing* pada model struktur. Pada *software* berbasis elemen hingga model *midship* akan dibagi menjadi beberapa elemen yang memiliki jarak teratur antar elemen tersebut. Jarak tersebut pada proses ini disebut *meshing size*. Pengaruh *meshing size* dalam analisis kekuatan adalah semakin kecil *meshing size* 300 yang digunakan maka hasil analisis yang diperoleh akan semakin akurat, akan tetapi waktu yang dibutuhkan untuk *running* pada *software* akan semakin lama.

Tahapan keempat yaitu model *midship* pada *software* diberikan kondisi batas yaitu meliputi pembebanan dan tumpuan pada konstruksi. Pembebanan yang diberikan pada variasi ketebalan pelat 100%, 80%, dan 75% bernilai sama $1,3 \times 10^{12}$ N.mm. Dan setelah itu dilakukan proses *running* dengan metode NLFEA. Metode NLFEA memberikan pendekatan yang lebih realistis untuk simulasi. Pada kondisi lain yang lebih sederhana, metode FEA dapat digunakan, akan tetapi dalam kasus struktur kapal dan kondisi gelombang yang sangat kompleks, metode NLFEA memberikan data yang lebih akurat. Tegangan maksimum dan momen batas lentur vertikal akan menjadi *output* dari metode ini.

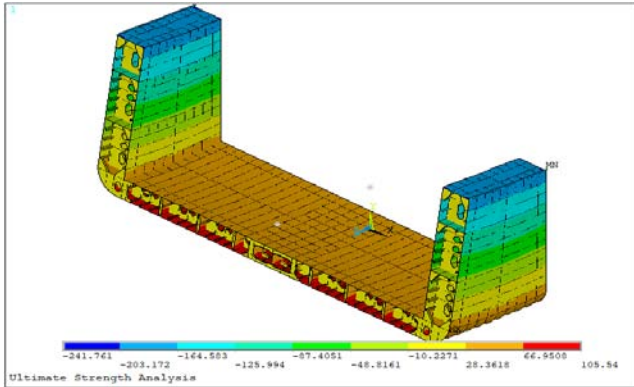
HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan *running* pada *software* berbasis elemen hingga maka diperoleh kontur deformasi dan tegangan maksimum berupa tegangan *von mises* serta momen batas yang dilihat dari grafik momen-kurvatur.



Gambar 2. Deformasi saat *hogging*

Hasil *running software* saat *hogging* dapat dilihat pada Gambar 2. Saat *hogging*, tarikan terjadi pada penampang bagian geladak dan tekanan terjadi di bagian *bottom*. Sedangkan hasil *running software* saat *sagging* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Deformasi saat *sagging*

Saat *sagging*, tekanan terjadi pada penampang geladak dan tarikan terjadi di bagian *bottom*. Kemudian dihitung *safety factor* dengan membandingkan tegangan ijin BKI (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019a) dengan tegangan maksimum hasil simulasi *software* dengan tegangan ijin dapat dicari menggunakan Persamaan 1.

$$\sigma_p = C_s \times \sigma_{p0} \quad (1)$$

$$C_s = 0,5 + \frac{5}{3} \cdot \frac{x}{L} \quad ; \quad 0 \leq x/L < 0,30$$

$$= 1,0 \quad ; \quad 0,30 \leq x/L \leq 0,70$$

$$= \frac{5}{3} [1,3 - \frac{x}{L}] \quad ; \quad 0,70 < x/L \leq 1,0$$

$$\sigma_{p0} = 18,5 \frac{\sqrt{L}}{k} \quad ; \quad L \leq 90m$$

$$= \frac{175}{k} \quad ; \quad L \geq 90m$$

$$\sigma_p = 1 \times 243.056$$

$$\sigma_p = 243.056 \text{ N/mm}^2$$

$$FS = \frac{\sigma_p}{\sigma} \quad (2)$$

Σp = tegangan memanjang kapal yang diijinkan (N/mm^2); σ_p = tegangan memanjang kapal yang diijinkan; dan σ = tegangan maksimum yang bekerja pada struktur.

Dari perhitungan tegangan ijin di atas dan nilai tegangan maksimum hasil simulasi *software* maka diperoleh data yang dapat dilihat pada Tabel 2.

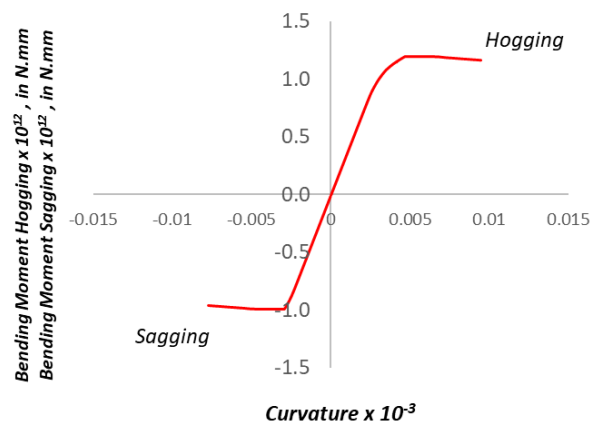
Berdasarkan data Tabel 2. diketahui hanya pada variasi tebal pelat 100% nilai *safety factor* lebih

dari 1. Namun pada *software*, nilai *safety factor* dihitung berdasarkan tegangan luluh material KI-A36 yang digunakan yaitu 355 N/mm^2 . Jika ditinjau dari tegangan luluh material diperoleh nilai *safety factor* untuk setiap variasi tebal pelat lebih besar dari 1. Berdasarkan hal tersebut, maka konstruksi masih dikategorikan dalam kondisi aman.

Tabel 2. *Safety factor* berdasarkan tegangan ijin BKI

Tebal Pelat	Teg. Maksimum		Teg. Ijin	Safety Factor		Ket.
	Hogging	Sagging		Hogging	Sagging	
100%	225,22	225,51	243,1	1,079	1,078	Yes
80%	274,92	275,16	243,1	0,884	0,883	No
75%	288,32	288,95	243,1	0,843	0,841	No

Dari pengolahan data diperoleh grafik momen-kurvatur yang menggambarkan hubungan antara nilai kekuatan batas lentur vertikal dengan kelengkungan, pada sumbu x melambangkan kurvatur dan sumbu y melambangkan momen lentur, seperti Gambar 4.



Gambar 4. Grafik momen-kurvatur Kapal Kontainer 409 TEU

Dari Gambar 4 dapat diketahui saat kondisi *hogging* pada nilai momen lentur vertikal 0 sampai $9.663 \times 10^{11} \text{ N.mm}$ kapal masih dalam keadaan linear, selanjutnya kapal sudah tidak berada pada keadaan linear. Saat nilai momen lentur vertikal adalah $1,196 \times 10^{12} \text{ N.mm}$, kapal telah mencapai momen *ultimate*. Kemudian saat kondisi *sagging* pada nilai

momen lentur vertikal 0 sampai $-8,800 \times 10^{11}$ N.mm kapal masih berada pada keadaan linear dan selanjutnya kapal sudah tidak berada pada keadaan linear. Kapal telah mencapai momen *ultimate* saat nilai momen lentur vertikal adalah $-9,883 \times 10^{11}$ N.mm.

Berdasarkan aturan BKI Vol. II *Section 5* (Biro Klasifikasi Indonesia, 2019b), diketahui nilai *safety factor* untuk kekuatan batas lentur vertikal adalah 1,2 baik kondisi *hogging* maupun *sagging*. Perbandingan antara momen batas dengan momen total lentur vertikal haruslah lebih besar atau sama dengan nilai *safety factor* kekuatan batas BKI atau:

$$\gamma_R \leq \frac{Mu}{MT} \quad (3)$$

Untuk mengetahui nilai momen total dapat menggunakan Persamaan 4.

$$MT = M_{sw} + M_{wv} \quad (4)$$

MT = momen total lentur vertikal; MSW = momen lentur vertikal pada kondisi air tenang; dan MWV = momen lentur vertikal pada kondisi bergelombang.

Berdasarkan perhitungan di atas, diperoleh momen total yaitu $4,46 \times 10^{11}$ N.mm pada saat *hogging* dan $4,66 \times 10^{11}$ N.mm pada saat *sagging*. Sehingga hasil perhitungan *safety factor* untuk kekuatan batas pada setiap variasi ketebalan pelat dapat seperti Tabel 3.

Tabel 3. *Safety factor* kekuatan batas

Tebal Pelat	Momen <i>Ultimate</i>		<i>Safety Factor</i>		Ket.
	<i>Hogging</i>	<i>Sagging</i>	<i>Hogging</i>	<i>Sagging</i>	
100%	$1,196 \times 10^{12}$	$-9,883 \times 10^{11}$	2,68	2,12	Yes
80%	$9,579 \times 10^{11}$	$-9,274 \times 10^{11}$	2,15	1,99	Yes
75%	$8,687 \times 10^{11}$	$-6,271 \times 10^{11}$	1,95	1,34	Yes

Berdasarkan data Tabel 3. diketahui bahwa nilai *safety factor* kekuatan batas lebih besar dari 1,2 untuk setiap variasi ketebalan pelat. Sehingga momen

lentur vertikal yang bekerja pada konstruksi masih dikategorikan dalam kondisi aman.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dengan metode NLFEA dapat disimpulkan bahwa pemodelan Kapal Kontainer 409 TEU pada variasi tebal pelat 100%, 80%, dan 75% akan menghasilkan nilai momen batas dan tegangan yang beragam.

Tegangan maksimum yang didapatkan dari hasil simulasi *software* untuk ketebalan pelat 100% adalah sebesar $225,216 \text{ N/mm}^2$ saat *hogging* dan $225,513 \text{ N/mm}^2$ pada kondisi *sagging*, tegangan maksimum untuk ketebalan pelat 80% adalah sebesar $274,919 \text{ N/mm}^2$ saat *hogging* dan $275,165 \text{ N/mm}^2$ ketika *sagging*, dan tegangan maksimum untuk ketebalan pelat 75% adalah sebesar $288,322 \text{ N/mm}^2$ pada kondisi *hogging* dan $288,954 \text{ N/mm}^2$ pada kondisi *sagging*.

Nilai momen batas lentur vertikal untuk kondisi ketebalan pelat 100% adalah $1,196 \times 10^{12}$ N.mm pada saat *hogging* dan $-9,882 \times 10^{11}$ N.mm pada saat *sagging*, nilai momen batas lentur vertikal untuk kondisi ketebalan pelat 80% adalah $9,579 \times 10^{11}$ N.mm pada saat *hogging* dan $-9,274 \times 10^{11}$ N.mm pada saat *sagging*, nilai momen batas lentur vertikal untuk kondisi ketebalan pelat 75% adalah $8,687 \times 10^{11}$ N.mm pada saat *hogging* dan $-6,271 \times 10^{11}$ N.mm pada saat *sagging*.

Bila ditinjau dari tegangan yang diijinkan oleh BKI yaitu sebesar $243,056 \text{ N/mm}^2$, maka nilai *safety factor* tegangan untuk kondisi ketebalan pelat 100% adalah sebesar 1,079 pada saat *hogging* dan 1,078 pada saat *sagging*, nilai *safety factor* tegangan untuk kondisi ketebalan pelat 80% adalah sebesar 0,884 pada saat *hogging* dan 0,883 pada saat *sagging*, dan nilai *safety factor* tegangan untuk kondisi ketebalan pelat 75% adalah sebesar 0,843 pada saat *hogging* dan 0,841 pada saat *sagging*. Namun pada *software*, nilai *safety factor* dihitung berdasarkan tegangan luluh material. Jika ditinjau dari tegangan luluh material diperoleh nilai *safety factor* untuk setiap variasi tebal pelat lebih besar dari 1. Kemudian nilai *safety factor* momen batas lentur vertikal untuk kondisi ketebalan pelat

100% adalah sebesar 2,680 pada saat *hogging* dan 2,119 pada saat *sagging*, nilai *safety factor* momen batas lentur vertikal untuk kondisi ketebalan pelat 80% adalah sebesar 2,146 pada saat *hogging* dan 1,989 pada saat *sagging*, nilai *safety factor* momen batas lentur vertikal untuk kondisi ketebalan pelat 75% adalah sebesar 1,946 pada saat *hogging* dan 1,345 pada saat *sagging*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih teruntuk seluruh pihak yang telah membantu dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Biro Klasifikasi Indonesia. (2019a). *Volume V Rules for Material Part 1*. Jakarta: PT. Biro Klasifikasi Indonesia.
- Biro Klasifikasi Indonesia. (2019b). *Volume II Rules for Hull Part 1*. Jakarta: PT. Biro Klasifikasi Indonesia.
- European Maritime Safety Agency. (2017). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2017*. Diakses pada 16 Maret 2022. <https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/download/4989/3156/23.html>.
- Haryanto, Y. D. (2020). *Pengaruh Patahnya Wing Ponton terhadap Daya Muat Kapal Kontainer di MV. Pulau Hoki*. Semarang: Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang.
- Mairuhu, T. (2011). Kekuatan Struktur Kontruksi Kapal Akibat Penambahan Panjang. *Teknologi*, Vol. 8(1): 835-843.
- Mubarak, A. A., Sitepu, G. dan Alie, M. Z. M. (2018). Kekuatan Batas Lambung Kapal dalam Menahan Momen Lentur Vertikal. *Jurnal Penelitian Enjiniring*, Vol. 22(1): 56-61.
- Mukhsin, A., Mulyatno, I. P. dan Jokosisworo, S. (2016). Analisa Kekuatan Konstruksi Car Deck Akibat Penambahan Deck Ruang Muat Kapal Motor Zaisan Star 411 DWT dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. 4(2): 341-351.
- Mulyatno, I. P., Adietya, B. A. dan Maulana, R. A. (2012). Strength Analysis of Container Deck Construction MV. Sinar Demak Effect of Charges Container Using Finite Element Method. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, Vol. 9(1): 24-29.
- Mulyatno, I. P. dan Pratama, A. (2011). Analisa Kekuatan Konstruksi Car Deck pada Kapal KM. Dharma Ferry 3 dengan Metode Elemen Hingga. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, Vol. 8(2): 53-61.
- United Nations Conference on Trade and Development, 2016. *Review of Maritime Transport 2016*. Diakses pada 16 Maret 2022. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:y2hyaAAJBzCJ:https://unctad.org/webflyer/review-maritime-transport-2016&cd=2&hl=id&ct=clnk&gl=id>.