



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Kekuatan Struktur *End Shackle* Rantai Jangkar Akibat Adanya Beban Lingkungan pada Kapal Perintis 1200 GT

Prasetya Tomi Irianto¹⁾, Hartono Yudo¹⁾, Wilma Amiruddin¹⁾

¹⁾Laboratorium Konstruksi

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail : prasetyatomi7@gmail.com, hartono.yudo@yahoo.com, wisilmiw@yahoo.com

Abstrak

Jangkar merupakan salah satu komponen perlengkapan kapal yang memegang peranan yang sangat penting dalam sistem transportasi laut. Adanya penambat kapal ini, kapal tidak akan berpindah tempat karena hembusan angin, arus ataupun gelombang saat jangkar diturunkan, tetapi pada kenyataannya pada tahun 2017, jangkar kapal tanker permata niaga hilang akibat diterjang gelombang laut. Hal tersebut menjadikan latar belakang penelitian mengenai kekuatan struktur rantai jangkar khususnya pada bagian *end shackle*, dengan tujuan untuk mengetahui kekuatan dari struktur *end shackle* akibat adanya beban lingkungan pada perairan lepas pantai barat Natuna. Metode yang digunakan menggunakan software berbasis metode elemen hingga. Dalam penelitian ini pembebanan pada struktur *end shackle* merupakan beban dinamis yang berupa beban maksimal, beban minimal dan beban rata-rata. Berdasarkan beban tersebut daerah kritis terjadi pada daerah antar sambungan dengan tegangan maksimal 242,71 MPa, tegangan rata-rata 165,75 MPa, dan tegangan minimal 88,796 MPa. Nilai deformasi terbesar 0,103 mm yang terjadi pada kondisi pembebanan maksimal. Tegangan yang terjadi pada masing-masing variasi pembebanan masih dibawah nilai yield strength pada material yang digunakan yaitu 680 MPa dengan nilai safety factor terkecil 2,80 dan tidak melebihi tegangan izin yang telah ditetapkan BKI yaitu 400 MPa.

Kata Kunci : *End Shackle*, Beban Lingkungan, Teori Elastisitas, Safety Factor

1. PENDAHULUAN

Jangkar merupakan salah satu komponen perlengkapan kapal yang memegang peranan yang sangat penting dalam system transportasi laut. Jangkar kapal digunakan agar kapal tidak berpindah tempat karena hembusan angin, arus ataupun gelombang. Jangkar didesain sedemikian rupa dan dihubungkan dengan rantai yang terbuat dari besi cor sehingga dapat menahan gerakan kapal tersebut.

Berdasarkan data statistik dari Komite Nasional Keselamatan Transportasi (KNKT) terdapat sebanyak 107 kasus kecelakaan kapal yang terjadi pada perairan Indonesia yang terjadi pada tahun 2012-2017 [1]. Sebagian besar dari kasus tersebut terjadi karena kesalahan teknis pada kapal seperti desain kapal yang tidak sesuai standarisasi maupun *maintenance* dari perlengkapan-perengkapan sistem kapal yang

tidak dijadwalkan dan diabaikan selama kapal tersebut masih beroperasi. Salah satu sistem perlengkapan kapal yang kurang mendapat perhatian adalah sistem *mooring* yang salah satunya komponennya yaitu jangkar beserta rantainya, seperti pada kasus kapal MT Permata Niaga yang kandas pada bulan Mei 2017 akibat jangkarnya hilang diterjang gelombang laut.

Kerusakan jangkar beserta rantainya salah satunya disebabkan akibat beban lingkungan dari laut pada saat jangkar tersebut diturunkan maupun ketika dinaikan, sehingga lama kelamaan akan menyebabkan deformasi pada struktur jangkar beserta rantainya. Hubungan antara jangkar dan rantainya perlu diperhatikan khususnya pada bagian *end shackle*, hal ini karena *end shackle* merupakan penghubung antara jangkar dan rantainya. Pada penelitian sebelumnya mengenai analisa kelalahan rantai jangkar menggunakan metode elemen hingga menunjukan bahwa nilai

tegangan terbesar terjadi pada daerah sambungan rantai dan nilai *fatigue* terpanjang sebanyak $1,0 \times 10^{20}$ cycle [2]. Berdasarkan penelitian *shackle* sebelumnya yang diaplikasikan pada *offshore* dengan variasi sudut 0° sampai 5° pada beban 5000 KN menunjukkan tegangan terbesar terjadi pada sudut 4° dengan tegangan *von mises* sebesar 665,88 Mpa dan deformasi sebesar 1.2636 mm [3]. Perbandingan antara *studless link* dan *studded link* juga pernah diteliti pada penelitian sebelumnya dengan variasi sudut pada rantai 0° sampai 5° dimana pada variasi tersebut menunjukkan peningkatan tegangan *studless link* lebih kecil dari *studded link*, peningkatan pada *studded link* lebih besar 3% sampai 5% [4]. Selain itu pada penelitian sebelumnya yang membahas mengenai penurunan kekuatan tarik pada baja AISI 304 sebagai bahan rantai jangkar pada lingkungan air laut dengan menggunakan metode eksperimen dengan beberapa sampel menunjukkan baja AISI 304 sebagai bahan rantai jangkar mengalami penurunan kekuatan tarik setikar 1,68% selama empat minggu [5]. Untuk mengetahui tingkat efektifitas dan efisiensi bahan pada rantai jangkar salah satunya menggunakan lapisan *crome* dan *cat bituminous*, seperti yang dilakukan pada penelitian sebelumnya yang membandingkan tingkat efektifitas dan efisiensi pada bahan rantai jangkar yang menunjukkan pelapisan menggunakan *crome* hasil laju korosi paling rendah sebesar 0,00032 mmpy, sedangkan pada pelapisan menggunakan *cat bituminous* laju korosi paling rendah yaitu 0.001314 mmpy [6].

Berdasarkan uraian tersebut, penulis ingin melakukan penelitian mengenai analisa kekuatan struktur pada *end shackle* rantai jangkar akibat adanya beban lingkungan pada kapal perintis 1200 GT. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui kekuatan struktur *end shackle* dan *safety factor* pada kapal perintis 1200 GT dengan menggunakan metode elemen hingga. Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini ialah dapat memberikan informasi mengenai kekuatan struktur *end shackle* dan *safety factor* pada kapal perintis 1200 GT akibat adanya beban lingkungan.

2. METODE

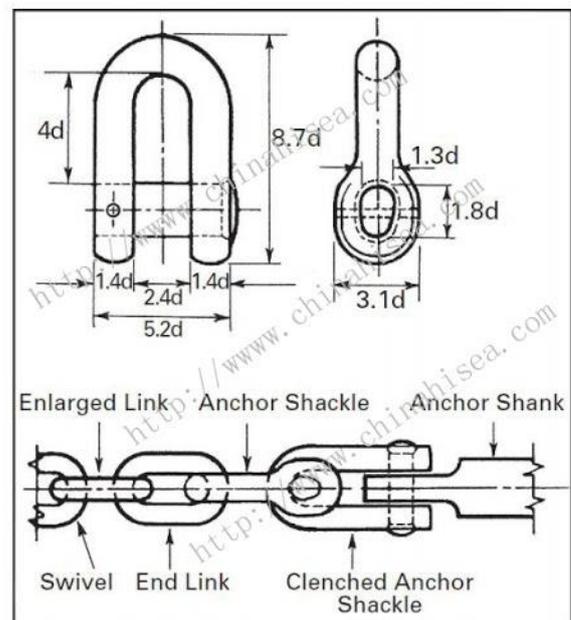
2.1. Objek Penelitian

Jangkar dan perlengkapannya adalah sesuatu bagian yang komplek, yang terdiri dari bagian-bagian mekanismenya seperti *Chain* (rantai jangkar), *Rope* (tali), *Chain locker* (kotak rantai) dan *windlass* (mesin penarik jangkar). Kegunaan jangkar ialah untuk membatasi gerak kapal pada waktu labuh di pelabuhan, agar kapal tetap pada

kedudukannya, meskipun mendapat tekanan dari arus laut, angin, gelombang dan sebagainya. Ditinjau dari kegunaannya, jangkar dan perlengkapannya harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Jangkar diatas kapal harus memenuhi persyaratan mengenai berat, jumlah dan kekuatannya.
2. Panjang, berat dan kekuatan rantai jangkar harus cukup.
3. Jangkar harus diikat dengan baik dan ditempatkan sedemikian rupa sehingga dapat di lepaskan dari sisi luar bak rantainya.
4. Harus ada jaminan, agar pada waktu mengeluarkan rantai, dapat menahan tegangan-tegangan dan sentakan-sentakan yang timbul.

Hubungan antara jangkar beserta rantainya perlu diperhatikan, hal tersebut dimaksudkan agar hubungan antara jangkar beserta rantainya dapat menahan tegangan dan gaya-gaya yang ditimbulkan baik dari beban internal maupun dari beban lingkungan. Penelitian akan menganalisa mengenai hubungan anatara jangkar beserta rantainya, khususnya pada bagian struktur *end shackle*.



Gambar 1. *End Shackle*

Data ukuran kapal Perintis 1200 GT

<i>Length Over All</i>	: 62,80	m
<i>Length Between Perpendicular</i>	: 57,36	m
<i>Breath</i>	: 12,00	m
<i>Depth</i>	: 4,00	m
<i>Draught</i>	: 2,70	m
Panjang Rantai Jangkar	: 550	m

Diameter Rantai	: 30	mm
Berat Jangkar	: 1140	Kg
Berat Total Rantai	: 7227,34	Kg
Kecepatan Kapal	: 12,00	Knot
Daya Mesin	: 2 x 1100	HP
Type Jangkar	: Stockles	Anchor

Data kondisi beban lingkungan di perairan lepas pantai barat Natuna [2]

Tinggi gelombang signifikan	: 1 m - 2,9 m
Kecepatan angin	: 13,3 m/s – 19,6 m/s
Kecepatan arus	: 0,4 m/s – 0,7 m/s
Kedalaman Perairan	: 90 m

Pemilihan perlengkapan kapal seperti jangkar, rantai jangkar dan alat alat tambat lainnya tergantung dari angka penunjuk (*equipment number*) yang diatur oleh beberapa klasifikasi [7].

Menurut BKI 2014 Volume II Section 18 B.1

$$Z = D^{\frac{2}{3}} + 2hB + \frac{A}{10} \quad (1)$$

Dimana Z merupakan modulus (m^3), D adalah *displacement* (ton), B adalah lebar kapal (m), h merupakan penjumlahan *free board* dengan tinggi *superstructure* (m) dan A merupakan luas bidang lateral dari badan dan bangunan (m^2).

2.2. Beban Lingkungan

Beban lingkungan mempengaruhi gerakan kapal saat beroperasi (*Anchor let go* maupun *offloading*), sehingga dari karakteristik gerakan kapal tersebut dapat menimbulkan gaya yang terjadi pada rantai kapal. Secara umum beban lingkungan yang mempengaruhi gerakan atau *motion* dari kapal yang selanjutnya menyebabkan adanya gaya pada rantai kapal. Secara umum beban lingkungan yang mempengaruhi gerakan atau *motion* dari kapal yang selanjutnya menyebabkan adanya gaya pada rantai kapal adalah beban gelombang, angin, dan arus.

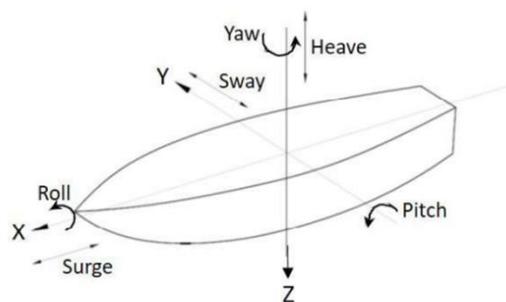
Gaya angin yang bekerja pada sebuah struktur bangunan lepas pantai merupakan penjumlahan gaya-gaya yang diterima oleh masing-masing komponen struktur. Gaya angin tersebut timbul akibat adanya hambatan kekentalan udara dan adanya perbedaan distribusi tekanan di sisi komponen yang menghadap ke arah angin dan sisi-sisi komponen lainnya. Besarnya gaya angin tergantung pada kecepatan hembusan angin dan ukuran serta bentuk dari struktur [8]. Sehingga besarnya beban angin dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut [9]

$$F_w = \frac{1}{2} C_{xw} \rho_w V_w^2 A \quad (2)$$

Beban arus pada umumnya disebabkan oleh adanya gaya hambat, gaya gesek dan propeller. Namun gaya yang paling mempengaruhi besarnya nilai beban arus adalah gaya gesek. Sehingga besarnya beban arus dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut [9].

$$F_c = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c V_c^2 L_{BP} T \quad (3)$$

Beban gelombang yang digunakan dalam penelitian ini merupakan beban gelombang yang mempengaruhi gerakan kapal. Gerakan kapal tersebut terbagi menjadi enam derajat kebebasan (*six-degree of freedom*) searah dengan sumbu x, y, dan z serta terbagi menjadi gerakan rotasi dan translasi. Gerakan rotasi adalah gerakan putaran, yang terdiri dari *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Sementara itu gerakan translasi adalah gerakan lurus sesuai dengan sumbunya, yang terdiri dari *surge*, *sway*, dan *heave*.



Gambar 2. Macam-macam Gerakan Kapal

2.3. Spektrum Gelombang

Spektrum gelombang dapat menggunakan beberapa teori spektrum gelombang yang telah ada, antara lain model spektrum Jonswap, Pierson Moskowitz, Bretshneider, ISSC ataupun ITTC. Model matematik spektrum secara umum didasarkan pada satu atau lebih parameter, misalnya tinggi gelombang signifikan, periode gelombang, faktor permukaan, dan lain-lain [10]. Spektrum gelombang yang digunakan dalam penelitian ini adalah ITTC dengan parameter yaitu tinggi gelombang signifikan (H_s) dengan persamaan sebagai berikut :

$$S_{ITTC}(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(\frac{-B}{\omega^4}\right) \quad (4)$$

Spektrum gelombang yang dihasilkan sangat bergantung pada nilai frekuensi gelombang. Akibat adanya pengaruh kecepatan kapal dan sudut datang gelombang, maka frekuensi gelombang inside (ω_w) akan berubah menjadi frekuensi gelombang

papasan (ω_e), gelombang tersebut yang digunakan untuk menghitung gelombang papasan. Dengan persamaan :

$$\omega_e = \omega_w \left(1 - \frac{\omega_w V}{g} \cos \mu\right) \quad (5)$$

Dimana ω_e adalah frekuensi gelombang papasan (rad/s), ω_w adalah frekuensi gelombang (rad/s) V adalah kecepatan kapal (m/s), dan g merupakan percepatan gravitasi (m/s^2)

2.4. Respon Amplitude Operator

Response Amplitude Operator (RAO) atau disebut juga dengan *Transfer Function* merupakan fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur.

Response Amplitude Operator (RAO) memuat informasi tentang karakteristik gerakan bangunan laut yang disajikan dalam bentuk grafik, dimana sumbu absisnya merupakan parameter frekuensi, sedangkan sumbu ordinatnya merupakan rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu. Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan menggunakan persamaan [10]:

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} \quad (6)$$

Dimana $\zeta_{k0}(\omega)$ adalah amplitudo struktur (m) dan $\zeta_0(\omega)$ adalah amplitudo gelombang (m).

Persamaan RAO untuk gerakan translasi sama dengan persamaan yang diatas. Sedangkan untuk respons gerakan RAO untuk gerakan rotasi (*roll, pitch, yaw*) merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) dengan kemiringan gelombang, yakni yang merupakan perkalian antara gelombang dengan amplitudo gelombang insiden.

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)} = \frac{\zeta_{k0}}{(\omega^2/g)\zeta_0} \quad (7)$$

2.5. Root Mean Square

Root Mean Square merupakan luasan kurva di bawah kurva spectrum respon yang dinyatakan dalam m_0 , dengan menggunakan persamaan :

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_{\zeta_r}(\omega) d\omega \quad (8)$$

Jika nilai RMS dari masing-masing amplitude gerakan (ζ) dinyatakan dalam $\sqrt{m_0}$ maka dinyatakan dalam persamaan :

$$(\zeta)_{av} = 1.253 \sqrt{m_0} \quad (9)$$

Kemudian untuk mendapatkan amplitude signifikan atau disebut dengan rata-rata dari 1/3 amplitude tertinggi dinyatakan dengan persamaan:

$$(\zeta)_s = 2 \sqrt{m_0} \quad (10)$$

Sedangkan luasan spectrum respon untuk kecepatan dan percepatan dinyatakan dalam m_2 dan m_4 dengan persamaan sebagai berikut:

$$m_2 = \int_0^{\infty} \omega^2 S_{\zeta_r}(\omega) d\omega \quad (11)$$

$$m_4 = \int_0^{\infty} \omega^4 S_{\zeta_r}(\omega) d\omega \quad (12)$$

2.6. Teori Elastisitas

Teori elastisitas merupakan cabang dari fisika matematis yang mengkaji hubungan gaya, perpindahan, tegangan, regangan, dan beda elastis. Bila suatu pejal dibebani gaya dari luar, benda tersebut akan berubah bentuk / berdeformasi, sehingga timbul tegangan dan regangan dalam (Szilard 1989). Perubahan bentuk ini tergantung pada konfigurasi geometris benda tersebut dan mekanis bahannya. Teori Elastisitas menganggap bahan bersifat homogen dan Isotropik, dengan demikian sifat mekanis bahan sama dalam segala arah.

Secara umumnya tegangan adalah gaya dalam yang bekerja pada luasan yang kecil tak hingga pada sebuah potongan dan terdiri dari bermacam-macam besaran dan arah. Ditambahkan oleh Popov (1987), gaya – gaya dalam ini merupakan vektor dalam alam dan bertahan dalam keseimbangan terhadap gaya-gaya luar terpakai. Pada umumnya, intensitas gaya yang bekerja pada luas yang kecil tak berhingga suatu potongan berubah-ubah dari satu titik ke titik yang lain, umumnya intensitas ini berarah miring pada bidang potongan. Intensitas gaya yang tegak lurus atau normal terhadap irisan disebut tegangan normal (*normal stress*) pada suatu titik [11].

$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (13)$$

Dimana ΔF merupakan gaya yang bekerja pada struktur, dan ΔA merupakan luas penampang. Menurut Popov (1984), perpanjangan per satuan luas disebut regangan (*strain*), yang merupakan besaran yang tidak berdimensi, tetapi lebih baik memberinya dimensi meter per meter atau m/m. Kadang-kadang regangan diberikan dalam bentuk persen. Besaran regangan ϵ sangat kecil, kecuali untuk beberapa bahan seperti karet. Bila regangan tersebut diketahui, maka deformasi total dari pembebanan aksial adalah ϵL . Hubungan ini berlaku untuk setiap panjang ukur sampai beberapa deformasi lokal mengambil bagian pada skala yang cukup besar. Secara matematis dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{\Delta}{L} \quad (14)$$

Dimana Δ adalah panjang total (m) dan L merupakan panjang awal (m)

2.7. Safety Factor

Faktor keamanan adalah faktor yang menunjukkan tingkat kemampuan suatu bahan teknik dari beban luar, yaitu beban tekan maupun tarik. Gaya yang diperlukan agar terjadi tingkat optimal bahan di dalam menahan beban dari luar sampai akhirnya menjadi pecah disebut dengan beban ultimate (*ultimate load*) [2]. Dengan membagi beban ultimate ini dengan luas penampang, kita akan memperoleh kekuatan ultimate (*ultimate strength*) atau tegangan ultimate (*ultimate stress*) dari suatu bahan. Untuk desain bagian-bagian struktur, tingkat tegangan disebut tegangan ijin (*allowable stress*) dibuat benar-benar lebih rendah daripada kekuatan ultimate yang diperoleh dari pengujian "statis". Faktor keamanan dapat dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$FS = \frac{\sigma_{Ultimate}}{\sigma_{Ijin}} \quad (15)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Proses Pembuatan Model

Perhitungan Equipment Number pada rantai jangkar berdasarkan BKI 2014 Volume II *Section 18 B.1*.

Dimana :

D = 1317 Ton (diambil dari Maxsuft)

B = 12 m

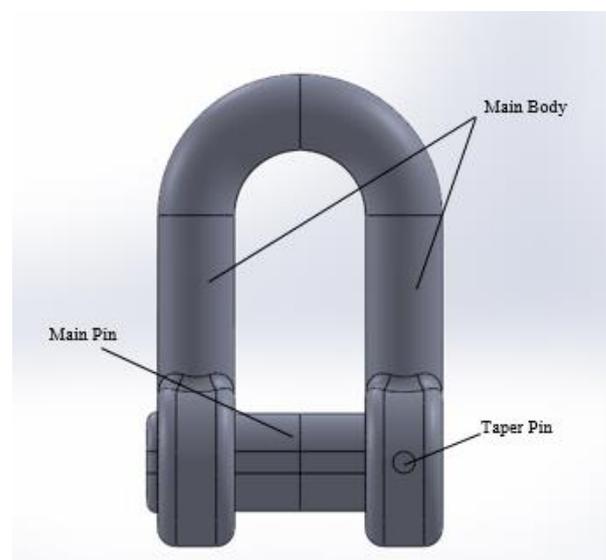
$h = 9,03$ m (diambil dari RU)

$A = 365,70$ m²

$$Z = 1317^{\frac{2}{3}} + (2 \times 9,03 \times 12) + \frac{365,70}{10}$$

$Z = 373,44$ m³

Berdasarkan peraturan BKI Volume II *section 18* pada tabel 18.2, maka didapatkan ukuran *chain* dengan diameter 30 mm dan panjang total minimal 385 m. Dari data tersebut maka model struktur *end shackle* dibuat dengan variasi beban lingkungan maksimal, minimal dan rata-rata sebagai beban dinamis untuk mengetahui kekuatan dari struktur *end shackle* rantai jangkar tersebut.



Gambar 3. Model *End Shackle* 3D

3.2. Perhitungan Beban

Perhitungan besarnya gaya eksternal (gaya angin, arus dan gelombang) dan gaya internal diperlukan untuk menentukan pembebanan pada struktur model yang telah dibuat.

3.2.1 Beban Angin

Perhitungan beban angin didasarkan pada kondisi perairan lepas pantai barat Natuna yang terdiri dari beban angin maksimal, rata-rata, dan minimal. Adapun perhitungan beban angin sebagai berikut :

Beban Angin Maksimal

$$F_w = \frac{1}{2} C_{xw} \rho_w V_w^2 A$$

$$\begin{aligned}\rho_w &= 1,29 \text{ Kg/m}^3 \\ V_w &= 19,6 \text{ m/s} \\ A &= 108,36 \text{ m}^2 \\ C_{xw} &= 1\end{aligned}$$

$$F_w = 26849,79 \text{ N}$$

Beban Angin Minimal

$$F_w = \frac{1}{2} C_{xw} \rho_w V_w^2 A$$

$$\begin{aligned}\rho_w &= 1,29 \text{ Kg/m}^3 \\ V_w &= 13,3 \text{ m/s} \\ A &= 108,36 \text{ m}^2 \\ C_{xw} &= 1\end{aligned}$$

$$F_w = 12363,23 \text{ N}$$

Beban Angin Rata-rata

$$F_w = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$$

$$\begin{aligned}F_{w \text{ maks}} &= 26849,79 \text{ N} \\ F_{w \text{ min}} &= 12363,23 \text{ N}\end{aligned}$$

$$F_w = 19606,51 \text{ N}$$

3.2.2 Beban Arus

Perhitungan beban arus terdiri dari beban arus maksimal, beban rata-rata dan beban minimal. Beban arus ini didasarkan pada kondisi didasarkan pada kondisi perairan lepas pantai barat Natuna.

Beban Arus Maksimal

$$F_c = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c V_c^2 L_{BP} T$$

$$\begin{aligned}\rho_c &= 1025 \text{ Kg/m}^3 \\ V_c &= 0,7 \text{ m/s} \\ L_{BP} &= 57,36 \text{ m} \\ T &= 2,7 \text{ m} \\ C_{xc} &= 0,1\end{aligned}$$

$$F_c = 3889,223 \text{ N}$$

Beban Arus Minimal

$$F_c = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c V_c^2 L_{BP} T$$

$$\begin{aligned}\rho_c &= 1025 \text{ Kg/m}^3 \\ V_c &= 0,4 \text{ m/s} \\ L_{BP} &= 57,36 \text{ m} \\ T &= 2,7 \text{ m} \\ C_{xc} &= 0,1\end{aligned}$$

$$F_c = 1269,95 \text{ N}$$

Beban Arus Rata-rata

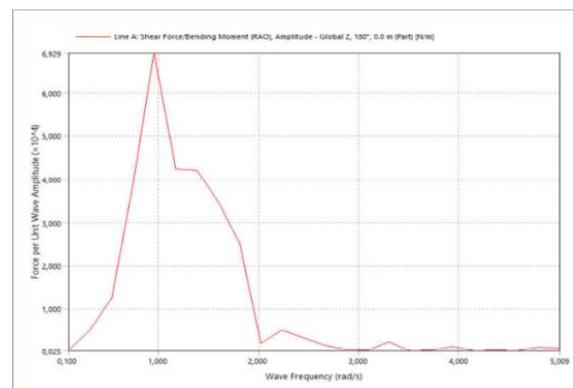
$$F_w = \frac{F_{max} + F_{min}}{2}$$

$$\begin{aligned}F_{c \text{ maks}} &= 3889,223 \text{ N} \\ F_{c \text{ min}} &= 1269,95 \text{ N}\end{aligned}$$

$$F_c = 2579,587 \text{ N}$$

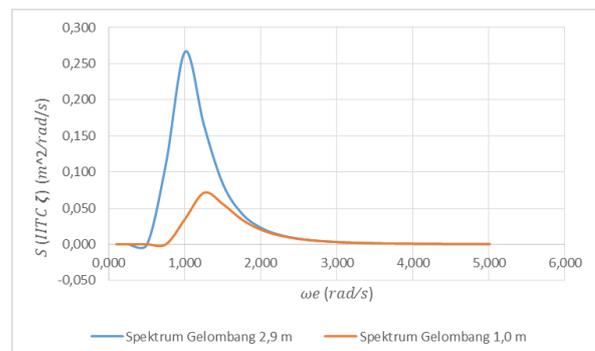
3.2.3 Beban Gelombang

Beban gelombang yang digunakan dalam penelitian ini merupakan beban gelombang yang mempengaruhi gerakan kapal. Beban gelombang yang digunakan pada saat kapal mengalami gerakan *heaving* dengan sudut heading 180° yang didapat dari hasil RAO pada software *Ansys* tertinggi gelombang. Hasil result RAO dapat dilihat pada gambar 4 seperti gambar dibawah ini.



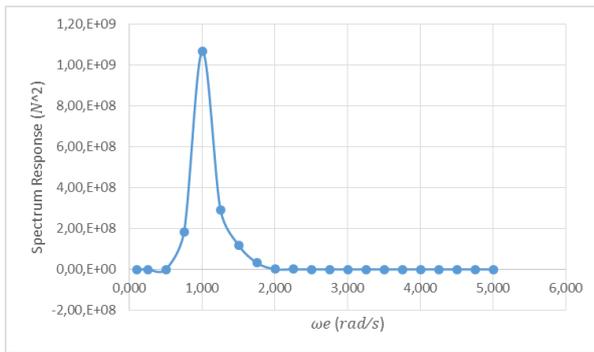
Gambar 4. Result berbentuk RAO

Spectrum gelombang yang digunakan pada penelitian ini adalah spektrum gelombang ITTC dengan 2 parameter, sesuai tinggi gelombang signifikan (H_s) yang telah ditentukan seperti gambar 5.

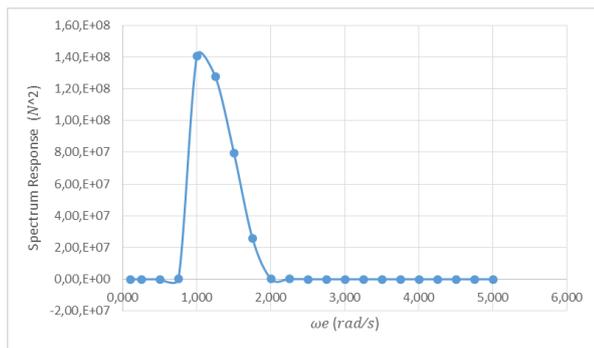


Gambar 5. Grafik Spektrum Gelombang

Struktur apung yang bergerak dilaut pada kondisi sebenarnya akan mengalami gaya eksitasi gelombang yang bersifat acak (rondom), sesuai dengan sifat alami dari gelombang laut. Menurut St. Denis dan Pierson mengungkapkan bahwa gerakan struktur terapung diatas gelombang acak dapat dihitung dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum gerakan kapal [12]. Spectrum respon gaya yang terjadi dapat dilihat pada gambar 6 dan gambar 7 .



Gambar 6. Spektrum Respon Gaya 2,9 m



Gambar 7. Spektrum Respon Gaya 1,0 m

Berdasarkan grafik spectrum respon gaya pada gambar 6 dan gambar 7, didapatkan hasil *amplitude significant* sebesar :

$$\begin{aligned}
 (\zeta)_s \text{ Maks} &= 2 \sqrt{m_0} \\
 &= 2 \sqrt{366312275,12} \\
 &= 38278,57234 \text{ N} \\
 (\zeta)_s \text{ Min} &= 2 \sqrt{m_0} \\
 &= 2 \sqrt{87987863,575} \\
 &= 18760,36925 \text{ N} \\
 (\zeta)_s \text{ Rata-rata} &= \frac{(\zeta)_s \text{ Maks} + (\zeta)_s \text{ Min}}{2} \\
 &= \frac{38278,57234 + 18760,36925}{2} \\
 &= 28519,47 \text{ N}
 \end{aligned}$$

3.2.4 Beban Internal

Beban internal terdiri dari beban jangkar dan beban *end shackle* yang merupakan perkalian massa dan gravitasi.

Beban Jangkar

$$\begin{aligned}
 F &= \text{Massa Jangkar} \times \text{Gravitasi} \\
 m &= 1140 \text{ Kg} \\
 g &= 9,81 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F &= 1140 \times 9,81 \\
 &= 11172 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Beban *End Shackle*

$$\begin{aligned}
 F &= \text{Massa End Shackle} \times \text{Gravitasi} \\
 m &= 9,41 \text{ Kg} \\
 g &= 9,81 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F &= 9,41 \times 9,81 \\
 &= 92,218 \text{ N}
 \end{aligned}$$

3.3. Kondisi Pembebanan

Kondisi pembebanan merupakan rekapitulasi dari hasil perhitungan beban yang telah diperhitungkan pada point 3.2

Beban Angin

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Maksimal} &: 26849,79 \text{ N} \\
 \text{Beban Rata-rata} &: 19606,51 \text{ N} \\
 \text{Beban Minimum} &: 12363,23 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Beban Arus

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Maksimal} &: 3889,223 \text{ N} \\
 \text{Beban Rata-rata} &: 2579,587 \text{ N} \\
 \text{Beban Minimum} &: 1269,95 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Beban Gelombang

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Maksimal} &: 38278,57234 \text{ N} \\
 \text{Beban Rata-rata} &: 28519,47000 \text{ N} \\
 \text{Beban Minimum} &: 18760,36925 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Beban Internal

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Jangkar} &: 11172 \text{ N} \\
 \text{Beban End Shackle} &: 92,218 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan kondisi pembebanan tersebut beban yang di berikan pada model merupakan selisih antara gaya lingkungan dan gaya internal.

3.4. Analisa Kekuatan

Analisa kekuatan struktur *end shackle* ini menggunakan software berbasis metode elemen hingga. Tahapan analisa ini yaitu penentuan *material properties*, tahap *meshing*, penentuan kondisi batas, penentuan gaya, penentuan *solution type*, dan hasil analisis berupa tegangan dan deformasi. Material yang digunakan pada end shackle seperti pada table 1.

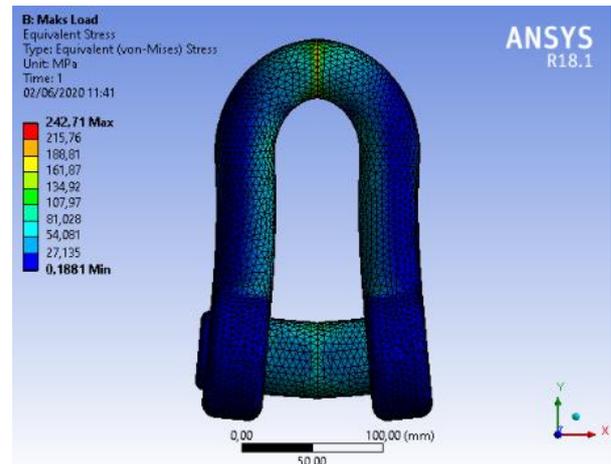
Tabel 1. *Material Properties*

<i>Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Elastic Modulus</i>	200000 MPa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,30
<i>Density</i>	7800 Kg/m ³
<i>Shear Modulus</i>	76900 MPa
<i>Yield Strength</i>	680 MPa
<i>Tensile Strength</i>	730 MPa

Gaya diberikan berdasarkan pada perencanaan besarnya pembebanan dan dimasukkan sesuai dengan perhitungan beban. Gaya yang diberikan pada model merupakan selisih dari beban eksternal dan beban internal. Bagian model yang menerima gaya adalah bagian tengah model *end shackle* yang merupakan sambungan antar rantai jangkar. Hal tersebut bertujuan untuk melihat besarnya tegangan *uniaxial* yang terjadi pada *end shackle* akibat menerima beban lingkungan. Dalam tahap ini akan dapat diketahui hasil dari *running* perhitungan software sesuai dengan masing-masing variasi permodelan. Nantinya didapatkan hasil tegangan tertinggi dan lokasi *hotspot stress*.

a. Hasil analisa beban maksimal

Hasil analisa pada struktur *end shackle* dengan beban maksimal 57753,36 N, didapatkan tegangan maksimal sebesar 242,71 MPa dan deformasi sebesar 0,103 mm. Hasil respon kekuatan end shackle pada beban maksimal dapat dilihat pada gambar 8 dan pada table 2.



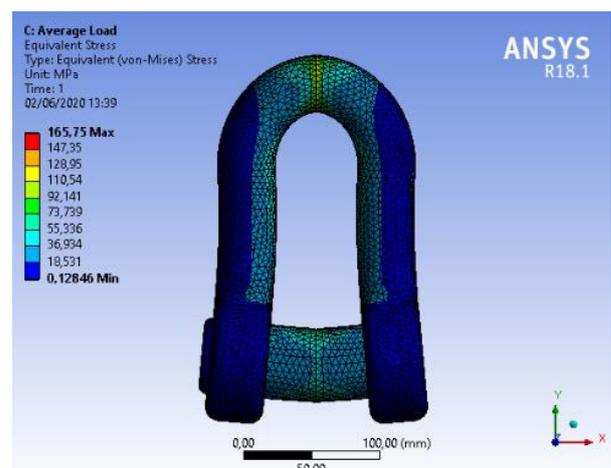
Gambar 8. Respon *End Shackle* Akibat Beban Maksimal

Table 2. Respon Komponen *End Shackle* Pembebanan Maksimal

No	Komponen <i>End Shackle</i>	<i>Maximum Working Stress (MPa)</i>	<i>Maximum Deformation (mm)</i>
1	Taper Pin	19,193	0,039
2	Main Pin	138,39	0,053
3	Main Body	242,71	0,103

b. Hasil analisa beban rata-rata

Hasil analisa pada struktur *end shackle* dengan beban rata-rata 39441,348 N, didapatkan tegangan maksimal sebesar 165,75 MPa dan deformasi sebesar 0,070 mm. Hasil respon kekuatan end shackle pada beban rata-rata dapat dilihat pada gambar 9 dan pada table 3.



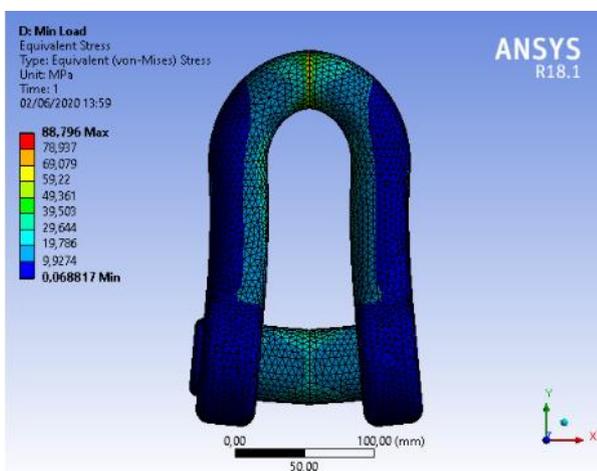
Gambar 9. Respon *End Shackle* Akibat Beban Rata-rata

Table 3. Respon Komponen *End Shackle* Pembebanan Rata-rata

No	Komponen <i>End Shackle</i>	Maximum Working Stress (MPa)	Maximum Deformation (mm)
1	Taper Pin	13,108	0,0265
2	Main Pin	94,512	0,036
3	Main Body	165,75	0,070

c. Hasil analisa beban minimal

Hasil analisa pada struktur *end shackle* dengan beban minimal 21129,332 N, didapatkan tegangan maksimal sebesar 88,796 MPa dan deformasi sebesar 0,0377 mm. Hasil respon kekuatan end shackle pada beban minimal dapat dilihat pada gambar 10 dan pada table 4.



Gambar 10. Respon *End Shackle* Akibat Beban Minimal

Table 4. Respon Komponen *End Shackle* Pembebanan Minimal

No	Komponen <i>End Shackle</i>	Maximum Working Stress (MPa)	Maximum Deformation (mm)
1	Taper Pin	7,0219	0,0142
2	Main Pin	50,632	0,0195
3	Main Body	88,796	0,0377

Nilai tegangan yang didapat adalah *von mises stress*. Besarnya tegangan ditunjukkan oleh warna. Semakin tinggi nilai tegangan maka warna pada bagian model akan semakin merah, semakin kecil maka akan semakin berwarna biru. Tegangan terbesar pada masing-masing variasi model terjadi pada daerah sambungan rantai. Rekapitulasi hasil analisa pada masing-masing pembebanan dapat dilihat pada table 5.

Table 5. Rekapitulasi Hasil Analisa

No	Kondisi Pembebanan	Maximum Working Stress (MPa)	Maximum Deformation (mm)
1	Beban Minimal	88,796	0,0377
2	Beban Rata-rata	165,75	0,070
3	Beban Maksimal	242,71	0,103

3.5. Safety Factor

Faktor keamanan adalah faktor yang menunjukkan tingkat kemampuan suatu bahan teknik terhadap beban luar, yaitu beban tekan maupun tarik. Gaya yang diperlukan agar terjadi tingkat optimal bahan dalam menahan beban dari luar sampai akhirnya menjadi pecah disebut dengan beban ultimate (*ultimate load*).

Tegangan izin pada material yang digunakan perlu ditentukan terlebih dahulu sebelum memperhitungkan nilai *safety factor*. Pada permodelan *end shackle* pada penelitian ini menggunakan material *Structure Steel DNV 203* dengan nilai *yield strength* sebesar 680 MPa. Perhitungan nilai *safety factor* pada model *shackle* ini didasarkan pada kriteria bahan.

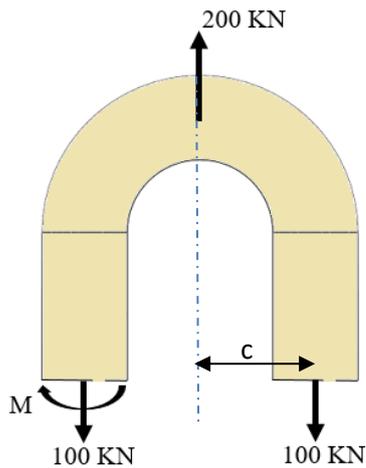
Tabel 6. Safety Factor

No	Kondisi Pembebanan	σ maks (MPa)	σ izin (MPa)	Ket.
1	Beban Maksimal	242,71	680	Ok
2	Beban Rata-rata	165,75	680	Ok
3	Beban Minimal	88,796	680	Ok

Hasil perhitungan *safety factor* pada setiap variasi pembebanan seperti yang ditunjukkan pada table 6 didapatkan nilai factor keamanan menurut kriteria bahan paling kecil adalah 2,80 pada kondisi pembebanan maksimal akibat adanya beban lingkungan.

3.6. Validasi

Model yang telah dianalisa harus divalidasi dengan perhitungan mekanika teknik sebelum diaplikasikan pada kondisi yang sebenarnya agar tidak terjadi kesalahan. Beban yang digunakan untuk validasi model merupakan *working load limit* dari perusahaan Chain & Rigging Attachment, Amerika Serikat.



Gambar 11. Gaya-gaya pada Rantai Jangkar

Tegangan Normal

$$A = \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$= 1384,74 \text{ mm}^2$$

$$P = 100 \text{ KN}$$

$$\sigma_0 = \frac{P}{A} = 72,22 \text{ MPa}$$

Bending Moment

$$I = \frac{1}{4} \pi r^4$$

$$= 152667,585 \text{ mm}^4$$

$$P = 100 \text{ KN}$$

$$c = 57 \text{ mm}$$

$$M = P c = 5700000 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_m = \frac{M r}{I} = 784,06 \text{ MPa}$$

Tegangan total

$$\sigma_{total} = \sigma_0 + \sigma_m$$

$$= 856,27 \text{ MPa}$$

Defleksi

$$v = \frac{P L^3}{48 E I}$$

Dimana :

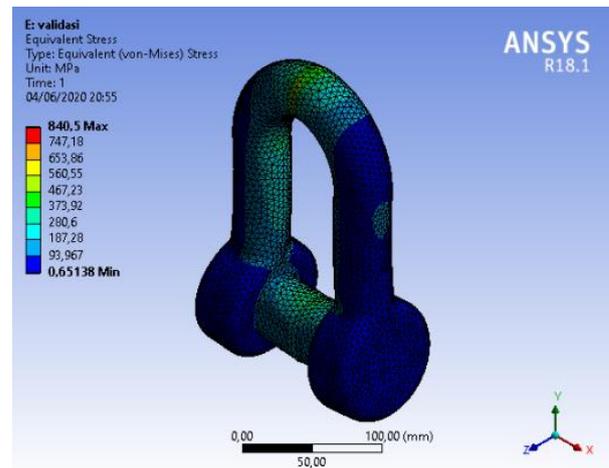
$$\text{Gaya (P)} = 200 \text{ KN}$$

$$\text{Modulus elastisitas (E)} = 200000 \text{ MPa}$$

$$\text{Panjang benda (L)} = 114 \text{ mm}$$

$$\text{Momen inersia (I)} = 152667,585 \text{ mm}^4$$

$$v = \frac{P L^3}{48 E I} = 0,202 \text{ mm}$$



Gambar 12. Validasi Model Shackle

Table 7. Hasil Validasi

Hasil Perhitungan	Hasil Analisa	Koreksi
856,27 MPa	840,50 MPa	1,88 %

Nilai tegangan maksimal model yang dianalisa menggunakan software sebesar 840,50 MPa dan nilai dekleksinya sebesar 0,357 mm, sedangkan tegangan maksimal dari hasil perhitungan menggunakan persamaan mekanika teknik sebesar 856,27 MPa dan nilai defleksinya sebesar 0,202 mm . Jadi selisih antara hasil software dengan perhitungan manual sebesar 1,88%.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa dan simulasi yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan *Von Mises* terbesar terdapat pada daerah antar sambungan yaitu sebesar 242,71 MPa pada kondisi pembebanan maksimal. Nilai tegangan tersebut masih di bawah nilai *yield strength* dari material yang digunakan, yaitu sebesar 680 MPa dan nilai deformasi terbesar pada struktur *end shackle* akibat adanya beban lingkungan sebesar 0,103 mm. Berdasarkan hal

tersebut dapat dikatakan bahwa struktur *end shackle* yang digunakan untuk menahan beban dari jangkar dan beban lingkungan ini berada pada kondisi yang aman untuk digunakan dan tidak melebihi tegangan izin yang ditetapkan Biro Klasifikasi Indonesia yaitu sebesar 400 MPa. Namun pada kondisi sebenarnya faktor-faktor seperti korosi dan pengurangan diameter rantai dapat mempengaruhi nilai kekuatan dari rantai tersebut sehingga perlu adanya kajian lebih lanjut mengenai factor korosi dan fatigue yang terjadi pada rantai akibat kondisi lingkungan perairan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. U. B. Komite and I. Kecelakaan, "Subkom Pelayaran," 2017.
- [2] M. H. Utama *et al.*, "Analisa Kelelahan Rantai Jangkar Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 4, no. 3, pp. 638–648, 2016.
- [3] R. R. GAJI and M. T. TELSANG, "Fea Based Analysis of Shackle for Offshore Application," *Int. J. Mech. Ind. Eng.*, no. 2231, pp. 61–64, 2012.
- [4] S. S. Kulkarni and N. K. Chhapkhane, "Comparision Of Studless And Studed Chain Using Finie Element Analysis," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 2, no. 8, pp. 1619–1622, 2013.
- [5] I. Hamidah, R. Wati, and R. A. Hamdani, "Analysis of AISI 304 Tensile Strength as an Anchor Chain of Mooring System," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 367, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/367/1/012058.
- [6] M. FANDI ZAMRUDDIN and A. MAHENDRA SAKTI, "Analisis Perbandingan Pelapisan Menggunakan Chrome Dengan Pelapisan Menggunakan Bituminous Paint Pada Rantai Jangkar Kapal Motor Madani Nusantara," *J. Pendidik. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 03, 2018.
- [7] BKI, "Rules for the Classification and 2016 Edition Biro Klasifikasi Indonesia," vol. III, 2016.
- [8] B. Criteria and P. Guidelines, "Basic Criteria and Planning Guidelines," *Program*, no. June, 1985.
- [9] OCIMF, "Estimating The Environmental Loads On Anchoring Systems," *Oil Co. Int. Mar. Forum*, 2010.
- [10] F. T. Kelautan, "Analisa Kekuatan Struktur Global Single Point Mooring Akibat Beban Point Mooring Structure Due To," 2015.
- [11] E. . Popov, *Mekanika Teknik (Mechanics of Material)*, Kedua. Jakarta: PT. Gelora Aksara Pratama, 1989.
- [12] E. S. Rizki, E. S. Hadi, F. Teknik, U. Diponegoro, H. Devices, and I. Pendahuluan, "Desain Konverter Gelombang Bentuk Segienam Sebagai Sumber Pembangkit Listrik Di Perairan Laut Jawa," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 4, no. 2, pp. 491–500, 2016.