



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Respon Tegangan Lokal Rantai Jangkar pada Kapal Perintis 1200 GT di Perairan Kepulauan Seribu

Arfan Abdul Ghofur¹⁾, Ahmad Fauzan Zakki¹⁾, Hartono Yudo¹⁾

¹⁾Laboratorium Konstruksi

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

^{*}e-mail : arfan.ag123@gmail.com, ahmadfzakki@gmail.com, hartono.yudo@yahoo.com

Abstrak

Pemilihan rantai jangkar pada kapal bergantung pada nilai equipment number (z) yang telah diatur dan ditentukan oleh klasifikasi. Tetapi pada kenyataannya pada tahun 2017, jangkar kapal tanker permata niaga hilang akibat diterjang gelombang laut. Hal tersebutlah yang menjadikan latar belakang penelitian mengenai kekuatan struktur rantai jangkar, dengan tujuan untuk mengetahui kekuatan dari struktur rantai jangkar akibat pengaruh dari beban lingkungan di perairan Kepulauan Seribu. Metode yang digunakan menggunakan software berbasis metode elemen hingga. Penelitian ini berdasarkan beban lingkungan yang diaplikasikan terhadap rantai jangkar, daerah antar sambungan merupakan daerah kritis dengan tegangan maksimal 235,39 MPa untuk komponen swivle pada sudut interlink rantai 4°. Nilai deformasi terbesar 0,340 terdapat pada komponen swivle di sudut interlink rantai jangkar 5°. Nilai tegangan pada setiap variasi pembebanan masih dibawah nilai yield strength material yang digunakan, yaitu 680 MPa dan nilai safety factor terkecil yaitu 2,89. .

Kata Kunci : Mooring System, Tegangan, Safety Factor

1. PENDAHULUAN

Mooring system merupakan salah satu sistem pendukung pada kapal dengan komponen utamanya yaitu jangkar beserta rantainya. Jangkar sendiri berfungsi untuk menahan gerak laju kapal sehingga mengamankan posisi kapal tetap pada tempatnya pada saat kapal sandar. Sedangkan rantai jangkar merupakan alat penghubung antara kapal dengan jangkar ketika jangkar diturunkan ataupun ditarik. Mengingat pentingnya peranan jangkar beserta rantainya tersebut maka jika terjadi kerusakan akan mengganggu kinerja pengoperasian sebuah kapal.

Berdasarkan data statistik yang dimiliki KNKT pada tahun 2012-2017 terdapat 54 kasus kecelakaan kapal di perairan Indonesia. Sebagian besar dari kasus tersebut terjadi karena kesalahan teknis pada kapal seperti desain kapal yang tidak sesuai standarisasi maupun kesalahan *maintenance* pada sistem perlengkapan kapal. Terdapat beberapa kasus kecelakaan pada system mooring

yang menyebabkan putusnya rantai jangkar seperti pada KT Toma pada april 2013, KT Ise 5 pada juli 2013, dan pada kapal MT Permata Niaga yang kandas pada bulan Mei 2017 silam akibat beban lingkungan perairan yang menyebabkan putus dan hilangnya jangkar sehingga kapal terbawa arus kemudian terdampar [1].

Kerusakan jangkar beserta rantainya salah satunya disebabkan akibat adanya berbagai beban lingkungan yang terjadi di perairan laut, sehingga menyebabkan jangkar dan rantai jangkar mengalami kerusakan dan terjadi deformasi karena menerima beban dinamik setiap kali jangkar diturunkan. Hubungan komponen pada rantai jangkar perlu diperhatikan hal ini karena rantai jangkar terdiri dari beberapa komponen (*shackle, swivel, endlink, dan enlargedlink*) yang membentuk satu kesatuan. Pada penelitian rantai jangkar sebelumnya untuk komponen *shackle* yang diaplikasikan pada offshore dengan variasi sudut 0°

sampai 5° dengan pembebanan 5000 KN yang mana menunjukkan tegangan terbesar terjadi pada sudut 4° dengan tegangan von mises sebesar 665,88 Mpa dan deformasi sebesar 1.2636 mm[2]. Dan pada penelitian sebelumnya dengan sudut dari rantai jangkar sebesar 25,71 derajat untuk mengetahui bending moment dengan penambahan load factor didapatkan tegangan maksimal 3.3449×10^7 Pa [3]. Untuk penelitian pada system tambat caternary dengan sudut rantai 30 - 45 derajat dari dasar laut, dalam analisa ini mempelajari perilaku *mooring cable* yang terpasang pada pelampung dengan mengaplikasikan gaya lingkungan dan gaya gravitasi menggunakan FEA ANSYS 10.0. yang mana dengan hasil analisa untuk mengetahui efektifitas *mooring cable* untuk mereduksi *displacement of buoy*[4]. Pada penelitian struktur single point mooring akibat beban gelombang ekstrim, respon gerakan terbesar terjadi pada gerakan pitch sebesar $299,561 \text{ deg}^2/(\text{rad/s})$ dan surge sebesar $12,984 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$. Analisa penelitian tersebut menunjukkan hasil tegangan maksimal yang terjadi pada kondisi ALS sebesar 355,31 MPa serta untuk kondisi ULS yaitu sebesar 161,54 MPa[5]. Selain itu pada penelitian yang membahas mengenai penurunan kekuatan tarik pada baja AISI 304, sebagai bahan rantai jangkar pada kondisi lingkungan air laut selama empat minggu dengan menggunakan metode eksperimen dengan beberapa sampel menunjukkan baja AISI 304 sebagai bahan rantai jangkar mengalami penurunan kekuatan tarik sekitar 1,68% [6].

Berdasarkan uraian diatas perlu dilakukan penelitian mengenai analisa kekuatan struktur pada rantai jangkar akibat adanya beban lingkungan pada kapal perintis 1200 GT di perairan Kepulauan Seribu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan dari struktur rantai jangkar dan safety factor pada kapal perintis 1200 GT di Perairan Kepulauan Seribu dengan menggunakan metode elemen hingga. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kekuatan struktur rantai jangkar dan *safety factor* pada kapal perintis 1200 GT akibat adanya beban lingkungan di perairan Kepulauan Seribu.

2. METODE

Metode merupakan suatu cara yang sistematis untuk melakukan suatu kegiatan agar tujuan yang diinginkan dapat tercapai. Berikut merupakan metode yang digunakan dalam penelitian ini :

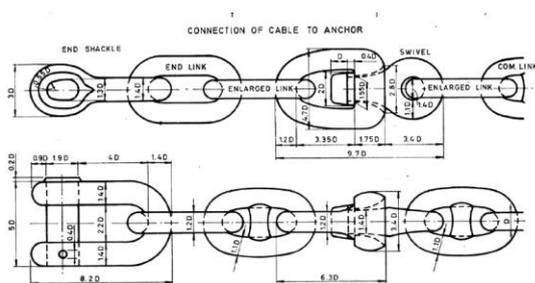
2.1. Objek Penelitian

Mooring system pada kapal memiliki perlengkapan yang kompleks, yang terdiri dari bagian-bagian komponen mekanismenya seperti *Anchor* (jangkar), *Chain* (rantai jangkar), *Rope* (tali), *Chain locker* (kotak rantai) dan *windlass* (mesin penarik jangkar). Jangkar digunakan untuk menghentikan pergerakan kapal ketika bersandar di pelabuhan, supaya kapal tetap pada posisi dan tempat berlabuhnya, meski mendapatkan tekanan dari gelombang laut, arus, angin dan sebagainya. Ditinjau dari fungsi dan kegunaannya, jangkar dan perlengkapannya harus memenuhi persyaratan yaitu :

1. Jangkar yang digunakan pada kapal harus sesuai dan memadai persyaratan mengenai kekuatan, berat dan jumlah panjangnya.
2. Kekuatan, berat dan panjang rantai jangkar harus sesuai pada kebutuhan kapal.
3. Penempatan jangkar dan perlengkapannya harus sesuai sehingga dapat dioperasikan dengan baik.
4. Jangkar dan perlengkapannya dapat menahan hentakan kapal dan tegangan-tegangan yang terjadi ketika dioperasikan.

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 |



Gambar 1. Rantai Jangkar [7]

Data kondisi beban lingkungan di perairan Kepulauan Seribu [8].

Table 1. Data Kondisi Perairan Kepulauan Seribu

| | |
|-----------------------------|-----------|
| Tinggi gelombang signifikan | 1,89 m |
| Kecepatan angin | 17,87 m/s |
| Kecepatan arus | 0,57 m/s |
| Kedalaman Perairan | 70 m |

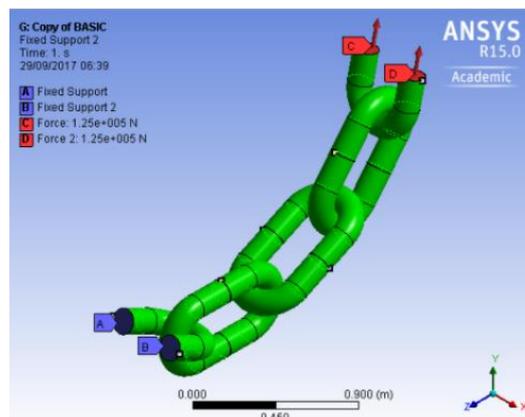
Mooring system pada kapal seperti rantai jangkar, jangkar dan perlengkapan tambat lainnya dipilih dan diatur oleh beberapa klasifikasi menggunakan angka penunjuk atau *equipment number*[9]. Standar klasifikasi pada *mooring sytem* sangat bergantung dengan kondisi perairan pada suatu wilayah. Untuk perairan Indonesia diatur menurut persyaratan dari BKI yakni ; Menurut buku BKI 2014 Volume II pada Section 18 B.1.

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

Dimana Z merupakan *Equipment number*, D adalah *displacement* (ton), h merupakan penjumlahan *free board* dengan tinggi *superstructure* (m), B adalah lebar kapal (m), dan A merupakan luas bidang lateral dari badan dan bangunan (m²).

2.2. Posisi Sudut Rantai Jangkar

Posisi sudut interlink rantai jangkar pada kondisi dilapangan ketika kapal berlabuh tidak benar-benar tegak. Pososi sudut bidang dari rantai dapat menyebabkan penambahan pembebanan pada rantai jangkar. Proposal ini menggambarkan perilaku rantai jangkar dibawah kekuatan lingkungan dan kekuatan yang bekerja akibat berat dari pada rantai jangkar itu sendiri. Yang mana posisi sudut rantai jangkar dapat menyebabkan perbedaan konsentrasi tegangan dan deformasi pada tiap-tiap komponen dari rantai jangkar. Sudut interlink dari rantai jangkar ditunjukkan seperti gambar berikut[3].

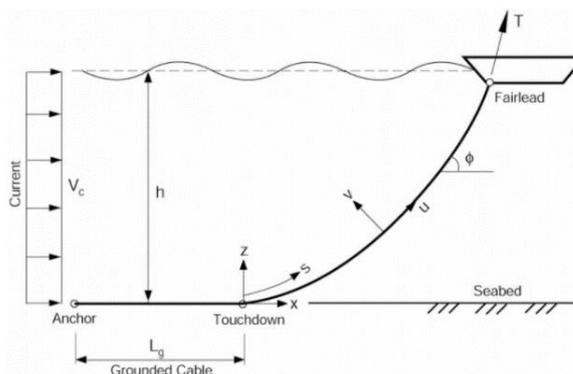


Gambar 2. Sudut Interlink Rantai Jangkar[3]

2.3. Beban Lingkungan

Beban lingkungan menyebabkan terjadinya gerakan kapal pada saat kapal *Anchor let go* ataupun pada saat *offloading*, yang mana hentakan kapal ketika kapal bersandar ini dapat mengakibatkan terjadinya gaya pada rantai jangkar yang pada umumnya motion yang terjadi karena adanya beban gelombang, angin, dan arus.

Frequency Domain Formulation



Gambar 3. Skema Rantai Jangkar[4]

Beban angin merupakan keseluruhan gaya yang diterima pada suatu struktur bangunan kapal karena pengaruh hembusan angin. Gaya angin terjadi karena adanya perbedaan distribusi tekanan dan hambatan kekentalan udara yang mana besarnya dipengaruhi oleh kecepatan angin serta bentuk dan luas area suatu struktur bangunan kapal yang diterpa oleh angin[10]. Sehingga besarnya beban angin dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut.

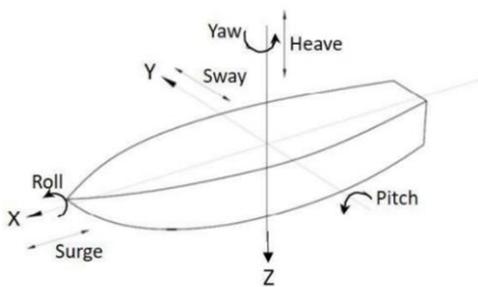
$$F_w = \frac{1}{2} C_{xw} \rho_w V_w^2 A \quad (2)$$

Beban arus dapat disebabkan karena adanya gaya gesek, gaya hambat dan propeller. Akan tetapi gaya geseklah yang sangat berpengaruh terhadap besarnya nilai dari beban arus yang terjadi.

Sehingga rumus perhitungan nilai beban arus dapat dituliskan persamaannya sebagai berikut [11].

$$F_c = \frac{1}{2} C_{XC} \rho_C V_C^2 L_{BP} T \quad (3)$$

Beban gelombang yang digunakan dalam penelitian ini merupakan beban gelombang dari hasil interpolasi surface plot yang dipengaruhi oleh kondisi gelombang perairan sehingga menyebabkan adanya 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*.

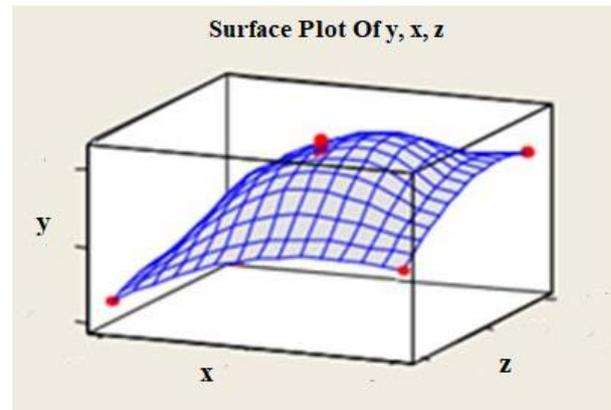


Gambar 4. Macam-macam Gerakan Kapal[8]

Perhitungan besarnya gaya beban lingkungan dibutuhkan untuk menetapkan pembebanan pada struktur model yang telah dibuat menggunakan interpolasi dengan memasukan data signifikan kondisi perairan di Kepulauan Seribu pada grafis data.

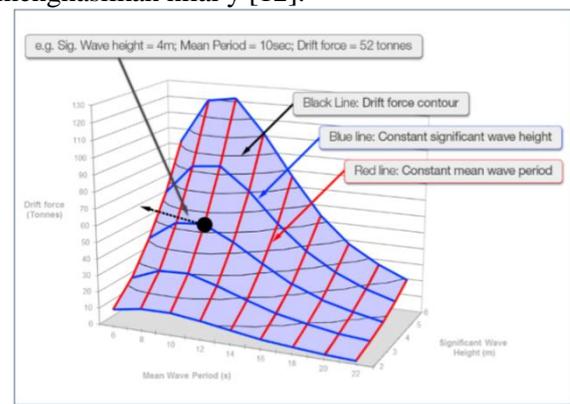
2.4. Metode Surface Plot

Metode surface plot / permukaan respon (RSM) ini merupakan metode yang memiliki peranan yang penting dalam merancang, merumuskan, mengembangkan, dan menganalisis suatu kajian ilmiah untuk menemukan variable respon secara optimal pada sebuah data atau proses dan memahami bagaimana respon perubahan dalam data tertentu dengan menyesuaikan variable desain. Penggunaan metode surface plot juga dapat diaplikasikan sebagai perhitungan untuk mencari nilai besarnya pembebanan yang terjadi pada kapal dengan cara menginterpolasikan data dari kondisi perairan yang telah diketahui ke surface plot. Secara umum permukaan respon dapat divisualisasikan dalam bentuk grafis.[12]



Gambar 5. Surface Plots [12]

Gambar 5 menunjukkan grafis tiga dimensi respon permukaan, nilai pada data x dan z menghasilkan nilai y [12].



Gambar 6. Surface Plots[11]

Gambar 6 merupakan grafis data kondisi perairan yang didapatkan dari OCIMF kapal tanker dengan panjang kapal kurang dari $\leq 100m$ yang digunakan untuk mengetahui besarnya gaya beban pada kapal dari hasil perhitungan data kondisi perairan. Garis merah atau pada sumbu x merupakan periode gelombang (s), garis biru merupakan tinggi gelombang (m), dan garis hitam merupakan gaya beban gelombang (N)

2.5. Gaya Tarik Windlass

Mooring system pada umumnya dioperasikan dengan *windlass*, dan ada beberapa kasus dioperasikan dengan *capstan*. Pemasangan mesin jangkar atau *windlass* pada kapal difungsikan sebagai alat yang digunakan untuk keperluan menurunkan dan mengangkat jangkar dan rantai jangkar melalui lubang tabung jangkar (*hawse pipe*).

Perhitungan gaya tarik *windlass* ini berdasarkan M. Khetagurof dengan bukunya *Practical Ship Building*. Untuk menghitung besarnya nilai gaya tarik *windlass* data yang harus diketahui yaitu : [13]

Ga = Berat setiap jangkar
 Dc = Diameter rantai jangkar
 Pa = Berat rantai jangkar tiap meter
 La = Panjang dari rantai jangkar yang menggantung (La diukur dari jangkar hingga chain loker)
 γ_a = Dendity of material
 γ_w = Dendity of sea water
 Fn = Factor gesekan pada hawse dan stopper

$$Tcl = 2fn \times (Ga + (Pa \times La)) \times \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_a}\right) \quad (4)$$

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

$$Z = 373,44 \text{ m}^3$$

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. Sehingga dipilih rantai jangkar dari katalog yaitu:

Tabel 2. Ukuran Rantai Jangkar

| Komponen | Link Diameter | Lebar Rantai | Panjang Rantai |
|---------------|---------------|--------------|----------------|
| Shakle | 1,4d | 5d | 8,2d |
| End link | 1,2d | 4d | 6,75d |
| Swivel | 1,2d | 4,7d | 9,7d |
| Enlarged Link | 1,1d | 4d | 6,6d |

Berdasarkan ukuran rantai jangkar pada table 2 maka dari data tersebut model rantai jangkar dibuat dengan penambahan beberapa kondisi pembebanan lingkungan sebagai beban dinamis untuk mengetahui kekuatan dari struktur rantai jangkar tersebut.

3.2. Perhitungan Beban

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

3.2.1 Beban Angin

Perhitungan beban angin didasarkan pada data kondisi beban lingkungan di perairan Kepulauan Seribu. Adapun perhitungan beban angin sebagai berikut :

Beban Angin

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

2.6. Safety Factor

Faktor keamanan (SF) adalah rasio yang digunakan sebagai penunjuk tingkat kemampuan struktural suatu bahan terhadap beban aktual, yaitu beban tarik maupun tekan. Beban ultimate (*ultimate load*) merupakan batas tingkat optimal bahan didalam menopang beban yang diberikan hingga akhirnya struktur bahan tersebut hancur[14]. Berdasarkan luas penampang dengan memecah beban ultimate, maka akan diperoleh tegangan ultimate (*ultimate stress*) atau kekuatan ultimate (*ultimate strength*) dari suatu bahan teknik. Untuk karakteristik tegangan pada struktur suatu bahan memiliki tingkat tegangan yang dinamakan tegangan ijin (*alloweble stress*) diatur dan dikelola agar nilainya lebih rendah dari kekuatan ultimate yang didapatkan dari pengujian “statis”. Faktor keamanan dapat dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$FS = \frac{\sigma_{Ultimate}}{\sigma_{Ijin}} \quad (5)$$

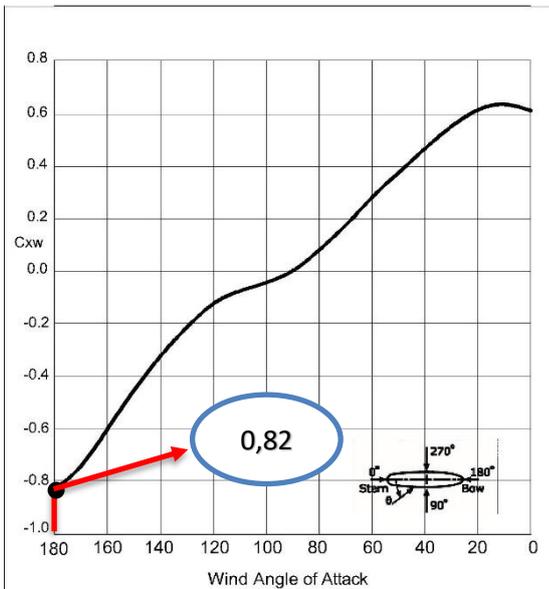
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Proses Pembuatan Model

Perhitungan Equipment Number untuk 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



Gambar 7. Grafik Koefisien Gaya Angin [11]

Nilai C_{xw} didapat dari interpolasi grafik pada gambar 7 dengan arah gaya angin pada posisi 180° , dipilih arah 180° karena pada sudut ini didapatkan nilai terbesar yaitu $-0,82$, karena tanda minus (-) pada koefisien gaya hanya digunakan sebagai penunjuk atau tanda arah gaya dari pusat badan kapal, maka didapatkan nilai C_{xw} sebesar $0,82$, sehingga:

$$\begin{aligned} \rho_w &= 1,28 \text{ Kg/m}^3 \\ V_w &= 23,9 \text{ m/s} \\ A &= 105,6 \text{ m}^2 \\ C_{xw} &= 0,82 \end{aligned}$$

$$F_w = \frac{1}{2} \times 0,82 \times 1,28 \times 23,9^2 \times 105,6$$

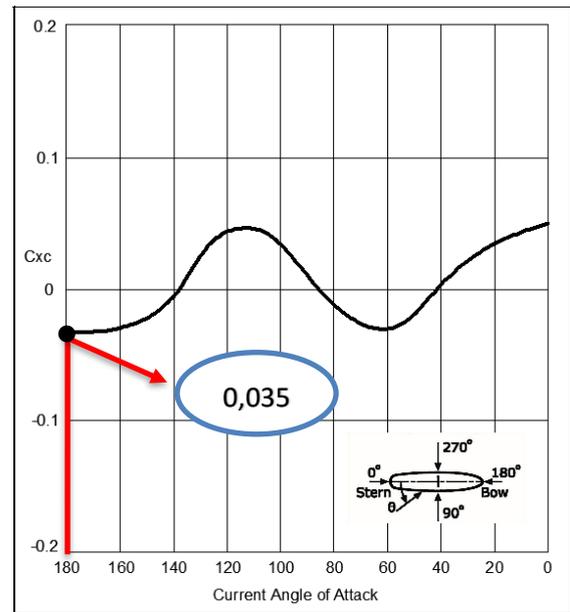
$$F_w = 31700,48 \text{ N}$$

3.2.2 Beban Arus

Perhitungan beban arus didasarkan pada data kondisi beban lingkungan di perairan Kepulauan Seribu. Adapun perhitungan beban arus sebagai berikut :

Beban Arus

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



Gambar 8. Grafik Koefisien Arus[11]

Plot koefisien diambil dari publikasi OCIMF 'Panduan Peralatan Tambat' yang digunakan untuk memperkirakan koefisien gaya arus. Grafik pada gambar 8 dipilih karena sesuai dengan rasio kedalaman air terhadap sarat kapal (kedalaman air/sarat $> 4,4$).

Nilai C_{xc} didapat dari interpolasi grafik pada gambar 7 dengan arah gaya angin pada posisi 180° , diambil arah gaya 180° karena pada sudut heading tersebut tidak terjadi gaya beban lain yang saling berlawanan arah yang dapat meniadakan gaya beban pada rantai jangkar, maka didapatkan nilai C_{xc} sebesar $0,035$ sehingga:

$$\begin{aligned} \rho_c &= 1025 \text{ Kg/m}^3 \\ V_c &= 0,57 \text{ m/s} \\ L_{BP} &= 57,36 \text{ m} \\ T &= 2,7 \text{ m} \\ C_{xc} &= 0,035 \end{aligned}$$

$$F_c = \frac{1}{2} \times 0,035 \times 1025 \times 0,57^2 \times 57,36 \times 2,7$$

$$F_c = 902,58 \text{ N}$$

3.2.3 Beban Gelombang

Beban gelombang yang digunakan dalam penelitian ini merupakan beban gelombang pada saat kapal mengalami *sea keeping*.

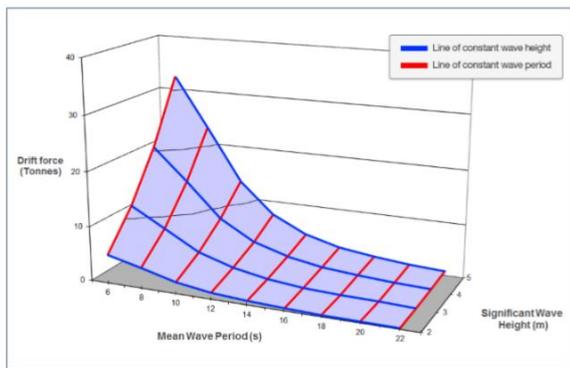


Figure B10: Wave Drift Force (Longitudinal) Head Sea Condition

Gambar 9. Grafik Beban Gelombang[11]

Gambar 9 merupakan grafik kondisi beban gelombang pada arah gaya 180° . Untuk mendapatkan hasil perhitungan menggunakan grafik/plot beban gelombang terlebih dahulu harus mengetahui data tinggi dan periode gelombang di perairan Kepulauan Seribu. Sehingga untuk tinggi gelombang 1.89 dan periode gelombang 9.33 yang telah diketahui, selanjutnya dengan menggunakan interpolasi grafik pada gambar 9 didapatkan hasil beban gelombang sebesar 27343 N.

3.2.4 Gaya Tarik Windlass

Factor yang mempengaruhi simulasi penelitian pada rantai jangkar salah satunya merupakan gaya tarik *windlass*, dimana gaya tarik tersebut berpengaruh ketika rantai jangkar dioperasikan.

$$Tcl = 2 f_n \times (G_a + (P_a \times L_a)) \times \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_a}\right)$$

$f_n = \text{berkisar } (1,28-1,36) \text{ diambil nilai} = 1,3$

$G_a = 1140 \text{ kg}$

$P_a = 19,62 \text{ kg}$

$L_a = 70 \text{ m}$

$\gamma_a = 7750 \text{ Kg/m}^2$

$\gamma_w = 1025 \text{ Kg/m}^2$

$$Tcl = 2 \cdot 1,30 \times (1140 + (19,62 \times 90)) \times \left(1 - \frac{1025}{7750}\right)$$

$$= 5670,55 \text{ N}$$

3.3. Kondisi Pembebanan

Kondisi pembebanan yaitu rekapitulasi yang merupakan hasil perhitungan beban yang telah dilakukan pada point 3.2.

Beban Angin : 31700,48 N

Beban Arus : 902,58 N

Beban Gelombang : 27343 N

Total Beban Lingkungan : 59946,06 N

Gaya Tarik Windlass : 5670,55 N

Berdasarkan kondisi pembebanan tersebut beban yang diberikan pada model merupakan gaya lingkungan dan gaya *windlass* dengan menggunakan prosedur penghitungan yang didapat dari persamaan rumus dan plot yang mana diperlukan untuk memperkirakan gaya akibat angin, gelombang, dan arus, dari tiap-tiap arah sudut datangnya gaya.

Grafik koefisien angin, arus dan gelombang untuk berbagai ukuran dan jenis kapal diambil dari publikasi OCIMF 'Panduan Peralatan Tambat'.

3.4. Analisa Kekuatan

Analisa kekuatan struktur rantai jangkar ini menggunakan software berbasis metode elemen hingga. Tahapan yang harus dilakukan pada analisa ini adalah menentukan *material properties*, tahap *meshing*, menentukan kondisi batas, penentuan gaya, penentuan *solution type*, dan hasil analisis yang berupa tegangan dan deformasi. Material yang digunakan pada rantai jangkar seperti pada table 3.

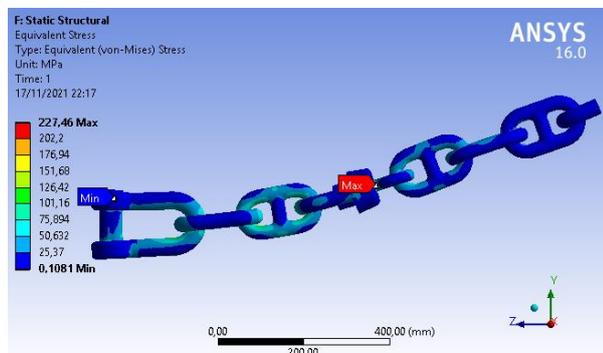
Tabel 3. *Material Properties*

| <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 yang diberikan didasarkan dari perencanaan besarnya pembebanan yang telah diketahui dan memasukkan kedalam perhitungan beban. Bagian model yang menerima gaya adalah bagian tengah model rantai jangkar yang merupakan sambungan antar rantai jangkar. Hal tersebut bertujuan untuk melihat besarnya tegangan *uniaxial* yang terjadi pada rantai jangkar akibat menerima beban lingkungan. Tahapan analisa ini akan dapat mengetahui hasil *running* dari perhitungan software pada tiap-tiap variasi permodelan untuk mendapatkan hasil nilai tegangan terbesar dan area *hotspot stress*.

3.4.1 Hasil Analisa Kekuatan

Hasil analisa dengan menggunakan software pada permodelan struktur rantai jangkar dengan sudut interlink rantai jangkar untuk 0 derajat sampai dengan 5 derajat, didapatkan hasil tegangan makasimal dan deformasi yang dapat dilihat pada table 4 sampai table 9.



Gambar 10. Respon Tegangan Rantai Jangkar Sudut 5° Akibat Beban Lingkungan

a. Hasil analisa sudut interlink rantai jangkar 0°

Table 4. Respon Komponen Rantai Jangkar 0°

| Sudut 0° | | | | |
|----------|---------------|------------------------------|--------------------------|------|
| No | Komponen | Maximum Working Stress (MPa) | Maximum Deformation (mm) | Sf |
| 1 | Shakle | 139,65 | 0,0678 | 4,87 |
| 2 | End Link | 97,80 | 0,1255 | 6,95 |
| 3 | Swivle | 186,23 | 0,2665 | 3,65 |
| 4 | Enlarged Link | 127,53 | 0,1835 | 5,33 |

b. Hasil analisa sudut interlink rantai jangkar 1°

Table 5. Respon Komponen Rantai Jangkar 1°

| Sudut 1° | | | | |
|----------|---------------|------------------------------|--------------------------|------|
| No | Komponen | Maximum Working Stress (MPa) | Maximum Deformation (mm) | Sf |
| 1 | Shakle | 145,77 | 0,0675 | 4,66 |
| 2 | End Link | 98,31 | 0,1252 | 6,92 |
| 3 | Swivle | 185,63 | 0,2736 | 3,66 |
| 4 | Enlarged Link | 125,37 | 0,1830 | 5,42 |

c. Hasil analisa sudut interlink rantai jangkar 2°

Table 6. Respon Komponen Rantai Jangkar 2°

| Sudut 2° | | | | |
|----------|---------------|------------------------------|--------------------------|------|
| No | Komponen | Maximum Working Stress (MPa) | Maximum Deformation (mm) | Sf |
| 1 | Shakle | 132,41 | 0,0685 | 5,14 |
| 2 | End Link | 114,03 | 0,1295 | 5,96 |
| 3 | Swivle | 181,89 | 0,2721 | 3,74 |
| 4 | Enlarged Link | 125,96 | 0,1818 | 5,40 |

d. Hasil analisa sudut interlink rantai jangkar 3°

Table 7. Respon Komponen Rantai Jangkar 3°

| Sudut 3° | | | | |
|----------|---------------|------------------------------|--------------------------|------|
| No | Komponen | Maximum Working Stress (MPa) | Maximum Deformation (mm) | Sf |
| 1 | Shakle | 184,44 | 0,0724 | 3,69 |
| 2 | End Link | 103,76 | 0,1340 | 6,55 |
| 3 | Swivle | 175,11 | 0,2784 | 3,88 |
| 4 | Enlarged Link | 127,94 | 0,1863 | 5,31 |

e. Hasil analisa sudut interlink rantai jangkar 4°

Table 8. Respon Komponen Rantai Jangkar 4°

| Sudut 4° | | | | |
|----------|---------------|------------------------------|--------------------------|------|
| No | Komponen | Maximum Working Stress (MPa) | Maximum Deformation (mm) | Sf |
| 1 | Shakle | 121,75 | 0,0701 | 5,59 |
| 2 | End Link | 95,80 | 0,1443 | 7,10 |
| 3 | Swivle | 235,39 | 0,3119 | 2,89 |
| 4 | Enlarged Link | 172,99 | 0,2308 | 3,92 |

f. Hasil analisa sudut interlink rantai jangkar 5°

Table 9. Respon Komponen Rantai Jangkar 5°

| Sudut 5° | | | | |
|----------|---------------|------------------------------|--------------------------|------|
| No | Komponen | Maximum Working Stress (MPa) | Maximum Deformation (mm) | Sf |
| 1 | Shakle | 149,45 | 0,0866 | 4,55 |
| 2 | End Link | 107,78 | 0,1617 | 6,31 |
| 3 | Swivle | 227,46 | 0,3399 | 2,99 |
| 4 | Enlarged Link | 169,08 | 0,2241 | 4,02 |

Nilai tegangan yang didapat adalah *von mises stress*. Besarnya tegangan ditunjukkan dengan warna. Semakin tinggi nilai tegangan yang terjadi maka warna pada bagian model akan semakin merah, dan jika pada tegangan minimum maka akan semakin berwarna biru. Tegangan terbesar pada masing-masing variasi model terjadi pada daerah sambungan rantai. Pada model rantai jangkar yang dibuat menunjukkan total tegangan maksimal dan deformasi maksimal didapatkan hasil terkecil pada sudut interlink rantai 0° dan terbesar pada sudut interlink rantai 5°. Rekapitulasi hasil analisa pada pembebanan masing-masing sudut interlink rantai jangkar dapat dilihat pada table 10.

Table 10. Rekapitulasi Total Tegangan dan Deformasi Hasil Analisa Kenaikan Sudut Rantai

| No | Sudut Interlink Rantai Jangkar | Total Maximum Working Stress (MPa) | Total Maximum Deformation (mm) |
|----|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | Sudut 0° | 551,21 | 0,6432 |
| 2 | Sudut 1° | 555,08 | 0,6492 |
| 3 | Sudut 2° | 554,29 | 0,6518 |
| 4 | Sudut 3° | 591,25 | 0,6711 |
| 5 | Sudut 4° | 625,93 | 0,7571 |
| 6 | Sudut 5° | 653,77 | 0,8123 |

3.5. Safety Factor

Faktor keamanan (SF) adalah rasio yang digunakan sebagai penunjuk tingkat kemampuan struktural suatu bahan terhadap beban aktual, yaitu beban tarik maupun tekan. Beban ultimate (*ultimate load*) merupakan batas tingkat optimal bahan didalam menopang beban yang diberikan hingga akhirnya struktur bahan tersebut hancur.

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

Tabel 11. *Safety Factor*

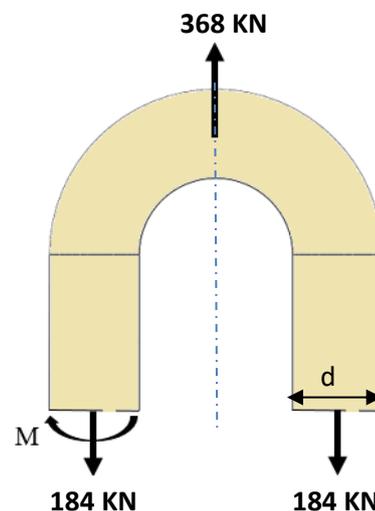
| No | Sudut Rantai Jangkar | Maximum Working Stress (MPa) | σ izin (MPa) | Sf |
|----|----------------------|------------------------------|---------------------|------|
| 1 | Sudut 0° | 186,23 | 680 | 3,65 |
| 2 | Sudut 1° | 185,63 | 680 | 3,66 |
| 3 | Sudut 2° | 181,89 | 680 | 3,74 |

| | | | | |
|---|----------|--------|-----|------|
| 4 | Sudut 3° | 184,44 | 680 | 3,69 |
| 5 | Sudut 4° | 235,39 | 680 | 2,89 |
| 6 | Sudut 5° | 227,46 | 680 | 2,99 |

Hasil perhitungan *safety factor* pada setiap komponen rantai jangkar seperti yang ditunjukkan pada table 11 didapatkan nilai factor keamanan menurut kriteria bahan paling kecil adalah 2,89 untuk komponen *swivle* pada sudut interlink rantai jangkar 4° akibat adanya beban lingkungan.

3.6. Validasi

Model yang telah dianalisa divalidasikan dengan menggunakan perhitungan *hertz contact stress* sebelum diaplikasikan pada kondisi yang sebenarnya agar tidak terjadi kesalahan.[15] Beban yang digunakan untuk validasi model merupakan *working load limit* dari BKI.



Gambar 11. Gaya-gaya Pada Rantai Jangkar

Luas permukaan contact antar rantai

$$a = \sqrt[2]{\frac{4F(1-v^2)/E - (1-v^2)/E_1}{\pi L \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}\right)}}$$

$$= \sqrt{\frac{13,3952}{4,9298}}$$

$$a = \sqrt{2,7172}$$

$$a = 1,648 \text{ mm}^3$$

Maximum working hertz contact stress :

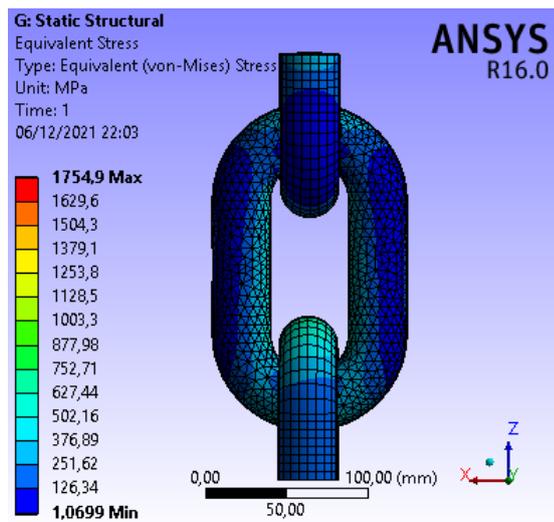
$$\sigma = \frac{2F}{2\pi a^2 L}$$

$$\sigma = \frac{2 \times 368}{2 \times \pi \times 1,648^2 \times 23,55}$$

$$\sigma = 1797,2 \text{ Mpa}$$

Dimana :

- Gaya (F) = 368 KN
- Modulus elastisitas (E) = 200000 MPa
- Panjang benda (L) = 23,55 mm
- Diameter rantai (d) = 30 mm
- Poisson's Ratio (ν) = 0,30
- Luas permukaan contact benda = a



Gambar 12. Validasi Model Rantai Jangkar

Table 12. Hasil Validasi

| Hasil Perhitungan | Hasil Analisa | Koreksi |
|-------------------|---------------|---------|
| 1797,2 MPa | 1754,9 MPa | 2,4 % |

Nilai tegangan maksimal model yang dianalisa menggunakan software sebesar 1754,9 MPa, sedangkan tegangan maksimal dari hasil perhitungan dengan menggunakan rumus perhitungan *hertz contact stress* sebesar 1797,2 MPa. Jadi selisih antara hasil perhitungan manual dengan perhitungan dari software sebesar 2,4 %. Tujuan dari validasi ini adalah untuk menghasilkan model yang representatif terhadap sistem kenyataannya serta meningkatkan kredibilitas model. Perbedaan hasil analisa ini terbatas pada kontak yang terjadi dan ukuran node elemen pada model rantai jangkar. Efek pembebanan yang diberikan mengakibatkan stuktur rantai jangkar mengalami tegangan dan deformasi, yang mana pada kondisi dilapangan pembebanan dinamis jauh lebih kritis dibandingkan beban statis yang diaplikasikan pada model.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa dan simulasi yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan *Von Mises* maksimal atau terbesar terdapat pada daerah antar sambungan rantai yaitu sebesar 235,39 MPa pada komponen *swivle* untuk sudut interlink 4° rantai jangkar. Nilai tegangan tersebut masih dibawah nilai *yield strength* dari material yang digunakan, yaitu sebesar 680 MPa dan nilai deformasi terbesar pada struktur *swivle* akibat adanya beban lingkungan sebesar 0,340 mm pada sudut interlink rantai jangkar 5°. Dan dari hasil rekapitulasi dari total tegangan maksimal dan deformasi maksimal pada sudut interlink rantai jangkar menunjukkan bahwa perbedaan sudut interlink dari rantai jangkar menyebabkan perbedaan besarnya tegangan dan deformasi pada rantai jangkar. Berdasarkan hasil tersebut dapat dikatakan bahwa struktur rantai jangkar yang digunakan untuk menahan beban dari jangkar dan beban lingkungan masih pada kondisi yang aman untuk digunakan dan tidak melebihi tegangan izin menurut kriteria bahan material yaitu sebesar 680 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] H. Satmiko, "Capaian Kinerja Investigasi Keselamatan Transportasi Tahun 2017," *KNKT Kom. Nas. Keselam. Transp.*, 2017.
- [2] G. R. R and M. . Telsang, "Fea Based Analysis of Shackle For Offshore Application," *Int. J. Mech. Ind. Eng.*, no. 2231, pp. 61–64, 2012.
- [3] X. Xue and N. Z. Chen, "Fracture Mechanics Analysis for A Mooring System Subjected to Tension and Out-of-Plane Bending," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 276, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/276/1/012036.
- [4] M. V Vineesh, N. V Sabu, and P. M. Manju, "Finite Element Analysis of Mooring Cable," *Int. J. Eng. Res. Appl. ISSN*, no. January, pp. 13–18, 2014.
- [5] A. W. Pradhana, "Analisa Kekuatan Struktur Global Single Point Mooring Akibat Beban Gelombang Ekstrim," *Diss. Inst. Teknol. Sepuluh Nop.*, 2015.
- [6] 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.
- [7] DNV GL, “Anchor Loss - Technical and Operational Challenges and Recommendations,” *Gard Swedish Club*, no. March, pp. 1–49, 2016.
- [8] J. H. Bin Mustofa, “Analisis Tegangan Lokal Maksimum Struktur Chain Stopper pada Hexagonal Single Buoy Mooring Terhadap FSO saat Sistem Offloading,” *Diss. Inst. Teknol. Sepuluh Nop.*, 2017.
- [9] BKI, “Rules for the Classification and 2016 Edition Biro Klasifikasi Indonesia,” vol. III, 2016.
- [10] NavFaC (Naval Facilities Engineering Command), “Fleet Moorings, Basic Criteria and Planning Guidelines, Design Manual 26.5.,” *Program*, no. June, 1985.
- [11] OCIMF (Oil Companies International Marine Forum), “Estimating The Environmental Loads On Anchoring Systems,” *Oil Co. Int. Mar. Forum*, 2010.
- [12] I. G. A. M. Dewi Ade Kusuma, I Wayan Sumarjaya, “Penerapan Metode Permukaan Respon Dalam Masalah Optimalisasi,” vol. 2, no. 2, pp. 32–36, 2013.
- [13] M. Khetagurov, *Marine Auxiliary Machinery and Systems*. Amerika Serikat: University Press of the Pacific, 2004.
- [14] M. H. Utama, H. Yudo, and M. Iqbal, “Analisa Kelelahan Rantai Jangkar Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga,” vol. 4, no. 3, pp. 638–648, 2016.
- [15] X. Zhu, “Tutorial on Hertz Contact Stress,” *Opti 521*, pp. 1–8, 2012.