

Analisis Pengurangan Diameter dan Kekuatan Rantai Jangkar pada Kapal Tugboat 19 m Berdasarkan *Equipment Number* dengan Tinjauan Laju Korosi

Putri Suci Herwina^{*1}, Benny Haddli Irawan^{1*} dan Sapto Wiratno Satoto^{2*}

^{*} Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: herwinaa2004@gmail.com

Abstrak

Rantai jangkar pada kapal mengalami pengurangan diameter selama masa operasional yang dapat memengaruhi kondisi dan kekuatan mekaniknya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengurangan diameter rantai jangkar, mengevaluasi kesesuaiannya berdasarkan *Equipment Number* (EN) sesuai Peraturan BKI, serta mengevaluasi respons mekanik rantai menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) melalui *SolidWorks Simulation*. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan memanfaatkan data ukuran utama kapal, *mill certificate*, serta hasil pengukuran diameter rantai pada *Annual Survey* tahun 2024 dan *Special Survey* tahun 2026. Analisis meliputi perhitungan *Equipment Number*, pengurangan diameter, estimasi laju korosi berdasarkan perubahan diameter sebagai parameter pendukung, serta simulasi FEM menggunakan model lima mata rantai dengan kondisi diameter aktual pada pembebanan 75 kN dan 112 kN. Hasil penelitian menunjukkan nilai *Equipment Number* sebesar 110,55 dengan diameter nominal rantai 19 mm sesuai *mill certificate*. Persentase pengurangan diameter sebesar 5,14% pada rantai kanan dan 5,84% pada rantai kiri masih berada di bawah batas maksimum 12% sesuai persyaratan BKI. Estimasi laju korosi sebagai parameter pendukung diperoleh sebesar 0,363 mm/tahun pada rantai kanan dan 0,470 mm/tahun pada rantai kiri. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan menyebabkan peningkatan nilai *Von Mises Stress*, *Equivalent Strain*, dan *Resultant Displacement*, serta penurunan nilai *Factor of Safety* (FoS). Nilai *Factor of Safety* minimum kurang dari 1 pada kedua variasi pembebanan menunjukkan adanya titik kritis pada model. Berdasarkan hasil tersebut, rantai jangkar masih memenuhi persyaratan BKI berdasarkan kriteria pengurangan diameter, namun pemeriksaan dan pemantauan kondisi rantai secara berkala tetap diperlukan.

Kata kunci: Rantai jangkar, *Equipment Number*, pengurangan diameter, *Finite Element Method*, *SolidWorks Simulation*.

Abstract

Anchor chains experience diameter reduction during vessel operation, which may affect their condition and mechanical strength. This study aims to analyze the diameter reduction of anchor chains on a 19 m tugboat, evaluate their compliance based on the *Equipment Number* (EN) in accordance with the Indonesian Classification Bureau (BKI) Rules, and analyze the mechanical response of the chain using the *Finite Element Method* (FEM) through *SolidWorks Simulation*. A quantitative method was employed using the vessel's principal dimensions, *mill certificate*, and anchor chain diameter measurements obtained during the 2024 *Annual Survey* and the 2026 *Special Survey*. The analysis included *Equipment Number* calculation, diameter reduction assessment, corrosion rate estimation based on diameter reduction as a supporting parameter, and FEM simulation using a five-link chain model with the measured chain diameter under tensile loads of 75 kN and 112 kN. The results showed an *Equipment Number* of 110.55, corresponding to a nominal chain diameter of 19 mm in accordance with *mill certificate*. The diameter reductions of 5.14% on the starboard chain and 5.84% on the port chain remained below the maximum allowable limit of 12% specified by BKI. The estimated corrosion rates, used as a supporting parameter, were 0.363 mm/year for the starboard chain and 0.470 mm/year for the port chain. The FEM simulation showed that increasing the applied load increased the *Von Mises Stress*, *Equivalent Strain*, and *Resultant Displacement*, while decreasing the *Factor of Safety* (FoS). Minimum *Factor of Safety* values below 1 under both loading conditions indicated critical regions in the model. Therefore, the anchor chain still complies with the BKI requirements based on the allowable diameter reduction criterion; however, periodic inspection and condition monitoring remain necessary.

Keywords: Anchor chain, *Equipment Number*, diameter, *Finite Element Method*, *SolidWorks Simulation*.

1 Pendahuluan

Perkembangan sektor transportasi laut yang semakin pesat meningkatkan kebutuhan terhadap kapal yang andal, aman, dan memenuhi persyaratan kelayakan operasional. Seiring meningkatnya aktivitas pelayaran, kegiatan perawatan dan perbaikan kapal (*ship repair*) di galangan kapal juga semakin penting untuk menjaga keandalan setiap sistem kapal. Proses *ship repair* meliputi inspeksi, perbaikan, dan penggantian komponen agar kapal tetap memenuhi persyaratan badan klasifikasi serta aman dioperasikan. Salah satu sistem yang menjadi perhatian dalam proses tersebut adalah sistem penjangkaran karena berperan penting dalam menjaga keselamatan kapal saat berlabuh [1].

Kapal *tugboat* merupakan salah satu jenis kapal yang memiliki intensitas operasional tinggi karena digunakan sebagai kapal bantu untuk menarik, mendorong, dan melakukan manuver kapal-kapal berukuran besar di pelabuhan maupun perairan sempit. Tingginya frekuensi operasi menyebabkan berbagai komponen kapal mengalami pembebanan berulang, termasuk rantai jangkar yang berfungsi menghubungkan jangkar dengan kapal serta menahan gaya akibat arus, angin, dan gelombang selama proses penjangkaran. Oleh karena itu, kondisi rantai jangkar menjadi salah satu faktor penting dalam menentukan keandalan sistem penjangkaran kapal [2].

Rantai jangkar beroperasi pada lingkungan laut yang memiliki tingkat korosivitas tinggi akibat kandungan garam, oksigen terlarut, kelembapan, serta mikroorganisme. Kondisi tersebut, bersama faktor degradasi lainnya selama masa operasional, dapat menyebabkan pengurangan diameter rantai jangkar. Pengurangan diameter mengakibatkan luas penampang efektif rantai semakin kecil sehingga tegangan yang diterima material meningkat dan memengaruhi respons mekanik rantai saat menerima beban tarik [3]. Oleh karena itu, kondisi diameter rantai jangkar perlu dievaluasi untuk mengetahui kelayakan penggunaannya. Pada penelitian ini, korosi tidak dianalisis maupun diuji secara langsung, melainkan hanya dipandang sebagai salah satu faktor yang diduga berkontribusi terhadap pengurangan diameter berdasarkan kondisi lingkungan operasional [4].

Berdasarkan Peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) Volume II Bab 18, spesifikasi perlengkapan kapal seperti jangkar dan rantai jangkar ditentukan berdasarkan nilai *Equipment Number* (EN) yang dihitung dari dimensi utama kapal. Nilai tersebut digunakan sebagai dasar penentuan jumlah jangkar, berat jangkar, panjang rantai, dan diameter rantai jangkar agar memenuhi persyaratan klasifikasi. Ketentuan tersebut menjadi acuan dalam mengevaluasi kesesuaian spesifikasi rantai jangkar terhadap kondisi aktual yang diperoleh dari hasil pengukuran di lapangan [5].

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas berbagai aspek yang berkaitan dengan rantai jangkar. Wibowo dan Sugiantoro [2] membahas gaya-gaya yang bekerja pada rantai jangkar selama proses penjangkaran, sedangkan Saputra et al. [6] dan Sitorus et al. [7] menganalisis respons mekanik rantai melalui pendekatan analisis struktur dan metode elemen hingga. Di sisi lain, Cahyaningtyas et al. [3], Noor dan Rulianto [8], serta Latief [1] meneliti aspek korosi, pemeliharaan, dan pengaruh lingkungan laut terhadap kondisi rantai jangkar.

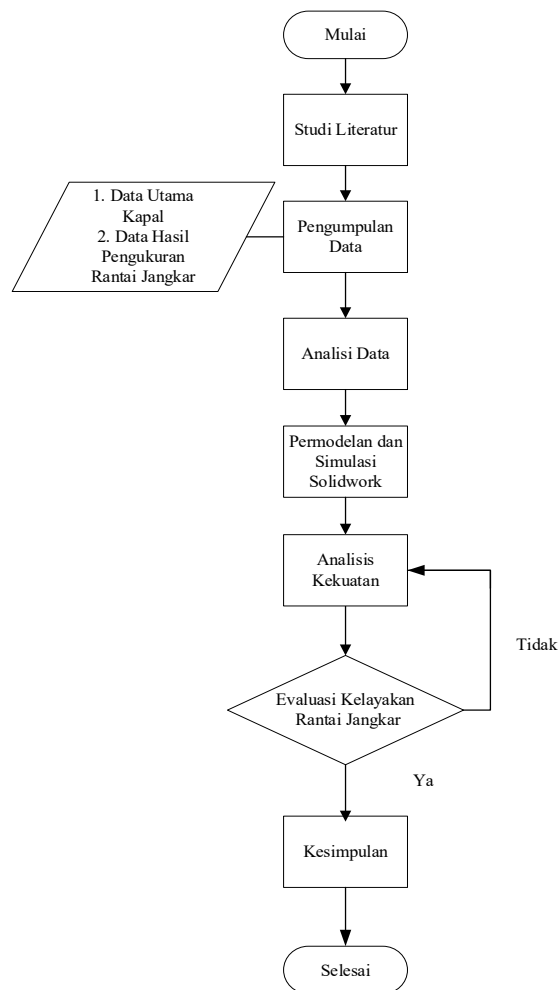
Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut masih membahas aspek gaya kerja, korosi, distribusi tegangan, maupun pemeliharaan rantai jangkar secara terpisah. Hingga penelitian ini dilakukan, belum ditemukan penelitian yang mengintegrasikan hasil pengukuran diameter rantai jangkar aktual pada periode inspeksi, evaluasi kesesuaiannya berdasarkan *Equipment Number* (EN) sesuai Peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) [9]. Serta analisis respons mekanik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) melalui *SolidWorks Simulation* pada kapal tugboat 19 m. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi geometris dan respons mekanik rantai jangkar sebagai dasar evaluasi kelayakan penggunaannya [10].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengurangan diameter rantai jangkar pada kapal *tugboat* 19 m berdasarkan hasil pengukuran aktual serta mengevaluasi kesesuaiannya terhadap persyaratan *Equipment Number* (EN) sesuai Peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). Selanjutnya dilakukan analisis kekuatan rantai jangkar menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) melalui *SolidWorks Simulation* dengan model yang merepresentasikan kondisi diameter aktual rantai jangkar untuk mengevaluasi respons mekanik berdasarkan parameter *Von Mises Stress*, *Equivalent Strain*, *Resultant Displacement*, dan *Factor of Safety* (FOS) pada variasi pembebanan 75 kN dan 112 kN. Penelitian dibatasi pada analisis rantai jangkar kapal *tugboat* 19 m dengan material yang mengacu pada *mill certificate*. Analisis dilakukan menggunakan pembebanan statik sehingga tidak mempertimbangkan pengaruh beban dinamis akibat gelombang maupun arus laut [11]. Selain itu, simulasi hanya mempertimbangkan pembebanan tarik statis sebesar 75 kN dan 112 kN yang diberikan pada ujung rantai jangkar. Pengaruh berat sendiri (*self weight*) rantai, sehingga secara teoritis mata rantai bagian atas menanggung beban

kumulatif dari mata rantai di bawahnya, tidak dimodelkan dalam penelitian ini. Korosi tidak dianalisis maupun diuji secara langsung, tetapi digunakan sebagai faktor pendukung yang diduga berkontribusi terhadap pengurangan diameter rantai jangkar berdasarkan hasil pengukuran aktual [12].

2 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan memanfaatkan data hasil pengukuran kalibrasi rantai jangkar pada kapal *tugboat* 19 m yang menjalani proses *repair* di galangan kapal. Data penelitian terdiri atas spesifikasi awal rantai jangkar berdasarkan *mill certificate* tahun 2023 sebagai kondisi awal (*baseline*), hasil pengukuran diameter rantai jangkar pada *Annual Survey* tahun 2024 dan *Special Survey* tahun 2026, serta data teknis kapal. Data tersebut digunakan untuk menghitung *Equipment Number* (EN), menganalisis pengurangan diameter rantai jangkar, menghitung laju penurunan diameter sebagai parameter pendukung, serta menyusun model tiga dimensi (3D) berdasarkan hasil pengukuran aktual untuk dianalisis menggunakan *SolidWorks Simulation* dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method*).



Gambar 1. Alur Penelitian

2.1 Studi Literatur dan Studi Lapangan

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh landasan teori, sedangkan studi lapangan dilakukan pada kapal *tugboat* 19 m untuk memperoleh data ukuran utama kapal, *mill certificate*, dan hasil pengukuran diameter rantai jangkar. Data tersebut digunakan untuk menghitung *Equipment Number* (EN), menganalisis pengurangan diameter, dan melakukan analisis kekuatan menggunakan

SolidWorks Simulation.

2.2 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari kapal *tugboat* 19 m yang menjalani proses *repair* di galangan kapal dengan fokus pada sistem penjangkaran, khususnya rantai jangkar. Data tersebut meliputi data utama kapal, spesifikasi rantai jangkar berdasarkan *mill certificate*, serta hasil pengukuran kalibrasi diameter rantai jangkar. Berdasarkan data yang diperoleh, kapal memiliki ukuran utama berupa *Length Overall* (LOA) 19,00 m, *Beam (Moulded)* 5,60 m, *Depth (Moulded)* 2,60 m, *Draught* 1,90 m, dan *Displacement* 110 ton. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan data tinggi efektif bangunan atas (*h*) sebesar 3,00 m dan luas penampang bangunan atas (*A*) sebesar 540 m² yang diperoleh dari dokumen teknis kapal. Seluruh data tersebut digunakan sebagai dasar dalam perhitungan *Equipment Number* (EN) sesuai Peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI).

Tabel 1. Ukuran Utama Kapal

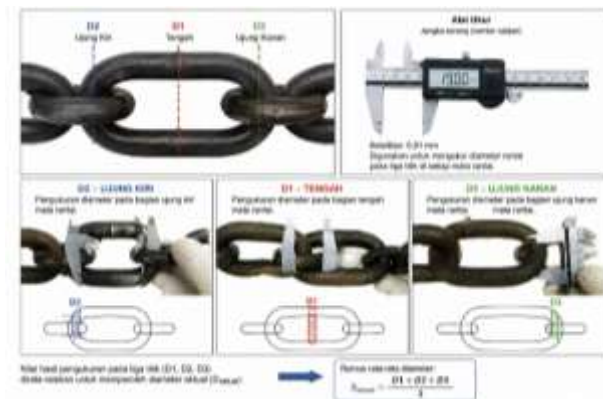
Parameter	Nilai
<i>Length Overall</i> (LOA)	19,00 m
<i>Beam (Moulded)</i>	5,60
<i>Depth (Moulded)</i>	2,60
<i>Draught</i>	1,90
<i>Displacement</i>	110 ton
Tinggi efektif bangunan atas (<i>h</i>)	3,00 m
Luas penampang bangunan atas (<i>A</i>)	540 m ²

Data penelitian terdiri atas spesifikasi awal rantai jangkar berdasarkan *mill certificate* tahun 2023 sebagai kondisi awal (*baseline*) serta hasil Pengukuran diameter rantai jangkar dilakukan pada saat Annual Survey tahun 2024 dan Special Survey tahun 2026 terhadap rantai sisi kanan dan sisi kiri. Spesifikasi awal rantai jangkar yang diperoleh dari *mill certificate* meliputi material, grade, diameter nominal, dimensi rantai, panjang total rantai, *proof load*, dan *breaking load* sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Rantai Jangkar

Parameter	Nilai
Material	CM490
Grade	U2
Diameter Nominal	19 mm
Lebar (<i>Width</i>)	68,4 mm
Panjang (<i>Length</i>)	114 mm
Panjang Total Rantai (<i>Total Length of Chain</i>)	330 m
Beban Uji (<i>Proof Load</i>)	150 kN
Beban Putus (<i>Breaking Load</i>)	211 kN

Data diameter rantai jangkar diperoleh dari *mill certificate* tahun 2023 sebagai kondisi awal (*baseline*), dokumen hasil kalibrasi *Annual Survey* tahun 2024, serta hasil pengukuran langsung pada *Special Survey* tahun 2026. Pada pengukuran *Special Survey* tahun 2026, diameter setiap mata rantai diukur pada tiga titik, yaitu bagian tengah (D1), ujung kiri (D2), dan ujung kanan (D3). Nilai hasil pengukuran kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh diameter aktual yang digunakan sebagai dasar dalam analisis pengurangan diameter, estimasi laju penurunan diameter, serta analisis respons mekanik menggunakan *SolidWorks Simulation*.



Gambar 2. Pengukuran aktual

2.3 Perhitungan *Equipment Number* (EN)

Equipment Number (EN) merupakan parameter yang digunakan oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) untuk menentukan spesifikasi perlengkapan penjangkaran kapal, seperti jumlah dan berat jangkar, panjang rantai jangkar, serta diameter rantai jangkar yang harus digunakan sesuai dengan ukuran utama kapal. Dalam Peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) Volume II, *Equipment Number* dilambangkan dengan simbol *Z* dan dihitung berdasarkan dimensi utama kapal serta parameter bangunan atas. Nilai *Z* yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam menentukan spesifikasi perlengkapan kapal dan mengevaluasi kesesuaian diameter nominal rantai jangkar yang digunakan pada kapal *tugboat* 19 m.

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

Keterangan:

Z= *Equipment Number*

D= *Displacement* kapal (ton)

h= Tinggi efektif bangunan atas (m)

B= Lebar kapal (*Beam*) (m)

A= Luas penampang bangunan atas (m²)

2.4 Pengurangan Diameter Rantai Jangkar

Analisis pengurangan diameter rantai jangkar dilakukan untuk mengetahui besarnya penurunan diameter yang terjadi selama masa operasional kapal berdasarkan hasil pengukuran aktual pada setiap periode inspeksi. Nilai pengurangan diameter dihitung dengan membandingkan diameter aktual hasil pengukuran pada setiap periode inspeksi terhadap diameter nominal rantai jangkar yang mengacu pada *mill certificate*.

$$\text{Pengurangan Diameter \%} = \frac{D_n - D_a}{D_n} \times 100 \% \quad (2)$$

Keterangan:

D_n= Diameter nominal rantai jangkar berdasarkan *mill certificate* (mm)

D_a= Diameter aktual hasil pengukuran pada periode inspeksi (mm)

Hasil perhitungan pengurangan diameter digunakan untuk mengevaluasi kondisi rantai jangkar pada setiap periode inspeksi. Nilai tersebut selanjutnya dibandingkan dengan persyaratan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) untuk menilai kesesuaian diameter rantai jangkar terhadap standar yang berlaku.

2.5 Estimasi Laju Korosi Berdasarkan Perubahan Diameter

Estimasi laju penurunan diameter dilakukan sebagai analisis pendukung untuk menggambarkan kecenderungan penurunan diameter rantai jangkar selama periode pengamatan. Estimasi tersebut dihitung berdasarkan perubahan diameter yang diperoleh dari data *mill certificate* tahun 2023 sebagai kondisi awal (*baseline*), dokumen hasil kalibrasi *Annual Survey* tahun 2024, dan hasil pengukuran *Special Survey* tahun 2026. Oleh karena itu, Nilai estimasi laju penurunan diameter digunakan sebagai parameter pendukung untuk menginterpretasikan kecenderungan perubahan diameter rantai jangkar selama periode pengamatan serta melengkapi evaluasi kondisi rantai berdasarkan hasil pengukuran aktual.

Laju korosi dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$CR = \frac{t_{previous} - t_{actual}}{\Delta t} \quad (3)$$

Keterangan:

CR = Laju korosi (mm/tahun)

$t_{previous}$ = Diameter rata-rata hasil pengukuran sebelumnya (mm)

t_{actual} = Diameter rata-rata hasil pengukuran saat ini (mm)

Δt = Selang waktu pengamatan (tahun)

Hasil perhitungan digunakan sebagai parameter pendukung untuk menggambarkan kecenderungan penurunan diameter rantai jangkar selama masa operasional. Nilai tersebut digunakan sebagai parameter pendukung untuk menggambarkan kecenderungan penurunan diameter rantai jangkar selama masa operasional.

2.6 Pemodelan 3D Rantai Jangkar

Pemodelan tiga dimensi (3D) rantai jangkar dilakukan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks Simulation* dengan mengacu pada spesifikasi rantai jangkar berdasarkan *mill certificate* serta hasil pengukuran diameter aktual rantai jangkar. Model dibuat dalam bentuk lima mata rantai yang saling terhubung untuk menggambarkan konfigurasi rantai jangkar pada kapal *tugboat* 19 m. Dimensi setiap mata rantai disesuaikan dengan hasil pengukuran aktual sehingga model dapat menggambarkan kondisi rantai jangkar pada saat dilakukan inspeksi.



Gambar 3. Pemodelan 3D

Gambar 3 menunjukkan model tiga dimensi rantai jangkar yang digunakan sebagai geometri simulasi.

Pemodelan lima mata rantai dipilih karena mampu merepresentasikan distribusi tegangan pada daerah kontak antar mata rantai saat menerima pembebanan tarik, sehingga hasil simulasi dapat menggambarkan respon mekanik rantai jangkar secara lebih representatif.

Material yang digunakan dalam simulasi adalah CM490 sesuai spesifikasi pada *mill certificate*. Karena material CM490 tidak tersedia pada material library SolidWorks *Simulation*, maka sifat mekanik material diinput secara manual berdasarkan data pada *mill certificate* dan disimpan sebagai custom material. Data sifat mekanik material yang digunakan dalam simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Sifat Mekanik Material CM490

Parameter	Nilai	Satuan
Modulus Elastisitas (<i>Elastic Modulus</i>)	$2,05 \times 10^{11}$	N/m ²
Rasio Poisson (<i>Poisson's Ratio</i>)	0,29	N/A
Massa Jenis (<i>Mass Density</i>)	7.858	kg/m ³
Kekuatan Luluh (<i>Yield Strength</i>)	$3,25 \times 10^8$	N/m ²
Kekuatan Tarik (<i>Tensile Strength</i>)	$4,90 \times 10^8$	N/m ²

Sumber: Data mill certificate yang diinput secara manual ke dalam material library SolidWorks Simulation. Data sifat mekanik yang diinput meliputi modulus elastisitas, rasio Poisson, massa jenis, kekuatan luluh, dan kekuatan tarik sesuai data pada *mill certificate*. Parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam analisis statik menggunakan *SolidWorks Simulation* untuk memperoleh distribusi *Von Mises Stress*, *Equivalent Strain*, *Resultant Displacement*, dan *Factor of Safety* pada model rantai jangkar.

2.7 Pengaturan Simulasi

Analisis respons mekanik rantai jangkar dilakukan menggunakan SolidWorks Simulation dengan jenis analisis Static Study. Model tiga dimensi yang telah dibuat diberikan kondisi batas (*boundary condition*) berupa Fixed Geometry pada salah satu ujung rantai, sedangkan ujung lainnya diberikan pembebanan berupa gaya tarik (*Force*). Besar pembebanan mengacu pada nilai *Proof Load* berdasarkan *mill certificate* yang divariasikan menjadi 50% (75 kN) dan 75% (112 kN) sebagai parameter simulasi.

Interaksi antar komponen pada model diatur menggunakan *Global Contact Bonded* sehingga seluruh permukaan kontak antar mata rantai dianggap saling terikat selama proses simulasi. Proses *meshing* dilakukan menggunakan metode *Blended Curvature-based Mesh* untuk menghasilkan elemen yang mampu mengikuti bentuk geometri rantai secara lebih akurat. Selanjutnya, proses perhitungan dilakukan menggunakan *Automatic Solver* yang tersedia pada *SolidWorks Simulation*. Hasil simulasi dianalisis berdasarkan parameter Von Mises Stress, Equivalent Strain, Resultant Displacement, dan Factor of Safety (FoS) untuk mengevaluasi respons mekanik rantai jangkar terhadap variasi pembebanan yang diberikan.

3 Analisis Data dan Pembahasan

3.1 Perhitungan *Equipment Number* (EN)

Perhitungan *Equipment Number* (EN) dilakukan untuk menentukan spesifikasi perlengkapan penjangkaran kapal sesuai dengan Peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). Nilai *Equipment Number* yang dilambangkan dengan simbol *Z* dihitung menggunakan Persamaan (1) berdasarkan data utama kapal yang meliputi *displacement*, tinggi efektif bangunan atas (*h*), lebar kapal (*B*), dan luas penampang bangunan atas (*A*).

Berdasarkan data ukuran utama kapal, nilai *Equipment Number* (EN) dihitung menggunakan Persamaan (1). Hasil perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$Z = D^{\frac{2}{3}} + 2hB + \frac{A}{10}$$

$$= 110^{\frac{2}{3}} + 2(3,00)(5,60) + \frac{540}{10}$$

$$= 22,95 + 33,60 + 54$$

$$Z = 110,55$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai *Equipment Number* (Z) sebesar 110,55.

Tabel 4. Jangkar, Kabel Rantai dan Tali-temali

No urut Registrasi	Angka Peringkat 2	Jangkar Tanpa Tongkat		Kabel rantai bersekat:						Rekomendasi tali					
		Jangkar haluan		Jangkar haluan			Kawat arus atau rantai untuk jangkar ahul			Tali Tarik			Tali tambat		
		Massa setiap jangkar	Panjang total	Diameter			Panjang	Beban putus [®]	Panjang	Densitas Bahan Putus Minimum Kapal [®]	Jumlah	Panjang [®]	Densitas Bahan Putus Minimum Kapal [®]	Jumlah	Panjang [®]
				d ₁	d ₂	d ₃									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
101	up to 50	2	120	40	165	12,5	12,5	12,5	80	64,7	180	98	1	80	35
102	50 – 70	2	180	60	220	14	12,5	12,5	80	64,7	180	98	1	80	37
103	70 – 90	2	240	80	220	16	14	14	85	73,5	180	98	1	100	40
104	90 – 110	2	300	100	247,5	17,5	16	16	85	80	180	98	1	110	42
105	110 – 130	2	360	120	247,5	19	17,5	17,5	90	89,2	180	98	1	110	48
106	130 – 150	2	420	140	275	20,5	17,5	17,5	90	98,1	180	98	1	120	51
107	150 – 175	2	480	165	275	22	19	19	90	107,9	180	98	1	120	59
108	175 – 205	2	570	190	302,5	24	20,5	20,5	90	117,7	180	112	1	120	64

Sumber : BKI Vol. II 2022 section 18- Equipment

Berdasarkan Tabel 4, nilai *Equipment Number* (EN) sebesar 110,55 berada pada rentang 110–130 sesuai ketentuan Biro Klasifikasi Indonesia (BKl). Berdasarkan ketentuan tersebut, kapal memerlukan dua buah jangkar haluan dengan massa masing-masing 360 kg, panjang total rantai jangkar 247,5 m, dan diameter nominal rantai jangkar 19 mm. Diameter nominal tersebut sesuai dengan spesifikasi pada *mill certificate* dan digunakan sebagai acuan dalam evaluasi pengurangan diameter berdasarkan hasil pengukuran aktual.

3.2 Analisis Pengurangan Diameter Rantai Jangkar

Pengukuran diameter rantai jangkar dilakukan pada saat *Annual Survey* tahun 2024 dan *Special Survey* tahun 2026. Pengukuran dilakukan terhadap lima shackle rantai jangkar pada sisi kanan dan sisi kiri kapal. Pada setiap *shackle* dilakukan pengukuran pada tiga titik, yaitu bagian awal, bagian tengah, dan bagian akhir *shackle*. Setiap titik pengukuran diukur pada tiga posisi, yaitu bagian tengah (D1), sisi kiri (D2), dan sisi kanan (D3). Nilai hasil pengukuran kemudian dirata-ratakan ($\sum D/3$) sehingga diperoleh diameter rata-rata pada setiap titik pengukuran sesuai dengan prosedur *Chain Calibration Report*.

Hasil pengukuran diameter rantai jangkar pada *Annual Survey* tahun 2024 dan *Special Survey* tahun 2026 disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengukuran diameter rantai jangkar

Segel	TAHUN 2024 (Annual Survey)		TAHUN 2026 (Special Survey)	
	Rantai Kanan (mm)	Rantai Kiri (mm)	Rantai Kanan (mm)	Rantai Kiri (mm)
1	18,80	18,77	18,03	17,83
	18,87	18,77	17,9	17,77

	18,85	18,90	18,00	17,90
2	18,73	18,80	18,13	17,97
	18,77	18,90	18,03	18,00
	18,63	18,98	18,03	18,03
3	18,84	18,77	18,2	18,10
	18,77	18,70	18,07	18,10
	18,68	18,87	18,07	18,47
4	18,75	18,87	17,8	17,83
	18,67	18,93	17,9	17,70
	18,8	18,75	17,97	17,47
5	18,83	18,68	18,13	18,03
	18,63	18,97	17,97	17,50
	18,57	18,76	18,13	17,63
Rata-rata	18,75	18,83	18,024	17,89

Berdasarkan Tabel 5, rata-rata diameter rantai kanan pada *Annual Survey* tahun 2024 sebesar 18,75 mm, kemudian menurun menjadi 18,024 mm pada *Special Survey* tahun 2026. Sementara itu, rata-rata diameter rantai kiri mengalami penurunan dari 18,83 mm menjadi 17,89 mm. Hasil tersebut menunjukkan adanya penurunan diameter rantai jangkar selama periode pengamatan. Selanjutnya dilakukan perhitungan persentase pengurangan diameter terhadap diameter nominal sebesar 19 mm menggunakan Persamaan (2).

Rantai Kanan Tahun 2024

$$\begin{aligned}\text{Pengurangan Diameter (\%)} &= \frac{19 - 18,75}{19} \times 100\% \\ &= \frac{0,25}{19} \times 100\% = 1,32\%\end{aligned}$$

Rantai Kiri Tahun 2024

$$\begin{aligned}\text{Pengurangan Diameter (\%)} &= \frac{19 - 18,83}{19} \times 100\% \\ &= \frac{0,17}{19} \times 100\% = 0,89\%\end{aligned}$$

Rantai Kanan Tahun 2026

$$\begin{aligned}\text{Pengurangan Diameter (\%)} &= \frac{19 - 18,024}{19} \times 100\% \\ &= \frac{0,976}{19} \times 100\% = 5,14\%\end{aligned}$$

Rantai Kiri Tahun 2026

$$\begin{aligned}\text{Pengurangan Diameter (\%)} &= \frac{19 - 17,89}{19} \times 100\% \\ &= \frac{1,11}{19} \times 100\% = 5,84\%\end{aligned}$$

Tabel 6. Hasil Perhitungan Pengurangan Diameter Rantai Jangkar

Tahun	Diameter Rantai Kanan (mm)	Pengurangan Diameter (%)	Diameter Rantai Kiri (mm)	Pengurangan Diameter (%)
Mill Certificate (2023)	19,00	0,00	19,00	0,00
Annual Survey (2024)	18,75	1,32	18,83	0,89
Special Survey (2026)	18,02	5,14	17,89	5,84

Berdasarkan Tabel 6, persentase pengurangan diameter rantai jangkar pada sisi kanan maupun sisi kiri mengalami peningkatan selama periode pengamatan. Rantai kanan mengalami peningkatan pengurangan diameter dari 1,32% pada *Annual Survey* tahun 2024 menjadi 5,14% pada *Special Survey* tahun 2026. Sementara itu, rantai kiri meningkat dari 0,89% menjadi 5,84%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa diameter rantai jangkar terus mengalami penurunan selama masa operasional kapal. Nilai pengurangan diameter ini selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis laju penurunan diameter sebagai parameter pendukung serta analisis prediksi pengurangan diameter pada periode operasional berikutnya.

3.3 Analisis Estimasi Laju Penurunan Diameter

Estimasi laju korosi berdasarkan perubahan diameter dihitung menggunakan Persamaan (3) berdasarkan selisih diameter rata-rata rantai jangkar antara Annual Survey tahun 2024 dan Special Survey tahun 2026 dengan selang waktu pengamatan selama dua tahun. Rantai Kanan

$$CR = \frac{18,75 - 18,024}{2} = \frac{0,726}{2} = 0,363 \text{ mm/tahun}$$

Rantai Kiri

$$CR = \frac{18,83 - 17,89}{2} = \frac{0,940}{2} = 0,470 \text{ mm/tahun}$$

Hasil perhitungan laju korosi disajikan pada Tabel 7

Tabel 7. Laju Penurunan Diameter (mm/tahun)

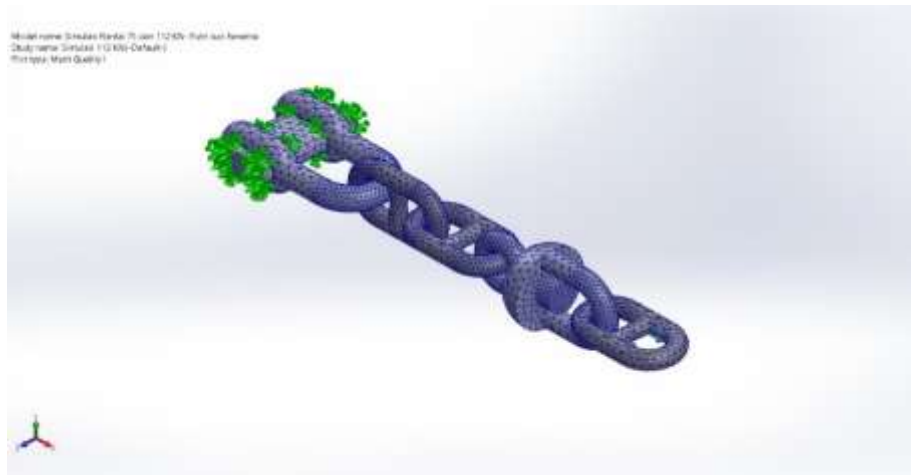
Sisi Rantai	Diameter Tahun 2024 (mm)	Diameter Tahun 2026 (mm)	Selisih Diameter (mm)	Laju Korosi (mm/tahun)
Rantai Kanan	18,75	18,02	0,726	0,363
Rantai Kiri	18,83	17,89	0,940	0,470

Berdasarkan Tabel 7, estimasi laju korosi berdasarkan perubahan diameter pada rantai kanan sebesar 0,363 mm/tahun, sedangkan pada rantai kiri sebesar 0,470 mm/tahun. Nilai tersebut menunjukkan bahwa penurunan diameter pada rantai kiri lebih besar dibandingkan rantai kanan selama periode pengamatan.

3.4 Analisis Kekuatan Rantai Jangkar di *Solidworks Simulation*

Analisis kekuatan rantai jangkar dilakukan menggunakan *SolidWorks Simulation* dengan metode *Finite Element Method* (FEM) untuk mengetahui respons mekanik rantai jangkar terhadap pembebanan tarik. Model simulasi menggunakan lima mata rantai yang dibuat berdasarkan spesifikasi rantai jangkar pada *mill certificate* dengan diameter yang disesuaikan terhadap hasil pengukuran aktual. Material yang digunakan adalah CM490 yang diinput sebagai *custom material* sesuai sifat mekanik pada *mill certificate*. Simulasi dilakukan menggunakan *Static Study* dengan kondisi batas berupa *Fixed Geometry* pada salah satu ujung rantai dan pembebanan tarik (*Force*) sebesar 75 kN dan 112 kN pada ujung lainnya. Interaksi antar mata rantai menggunakan *Global Interaction* tipe *Bonded*. Sebelum simulasi dijalankan, model dibagi menjadi elemen-elemen kecil menggunakan *Solid Mesh* dengan metode *Blended Curvature-Based Mesh* agar distribusi tegangan dapat dihitung menggunakan metode elemen hingga. Selanjutnya, proses

perhitungan dilakukan menggunakan *Automatic Solver*.



Gambar 4. Proses meshing (Solid Mesh)

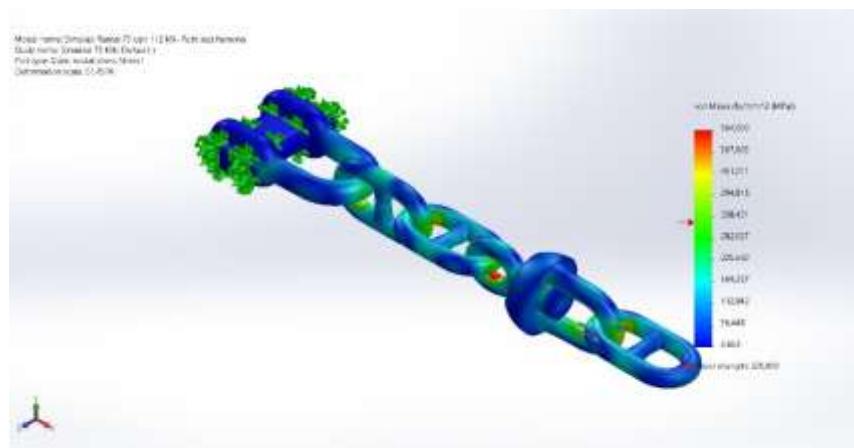
Gambar 4 menunjukkan hasil proses meshing pada model rantai jangkar. Proses ini menghasilkan elemen-elemen yang mengikuti geometri model sehingga dapat digunakan sebagai dasar perhitungan distribusi tegangan, regangan, perpindahan, dan *Factor of Safety* pada proses simulasi.

3.4.1 Hasil Simulasi Pembebanan 75 kN

Pembebanan sebesar 75 kN dipilih untuk merepresentasikan 50% dari *proof load* berdasarkan *mill certificate*. Pembebanan ini digunakan untuk mengevaluasi respons mekanik rantai jangkar pada kondisi pembebanan menengah sebelum mencapai batas beban uji.

- *Von Mises Stress*

Pada Gambar 4. ditampilkan hasil simulasi *Von Mises Stress* pada rantai jangkar dengan pembebanan sebesar 75 kN.



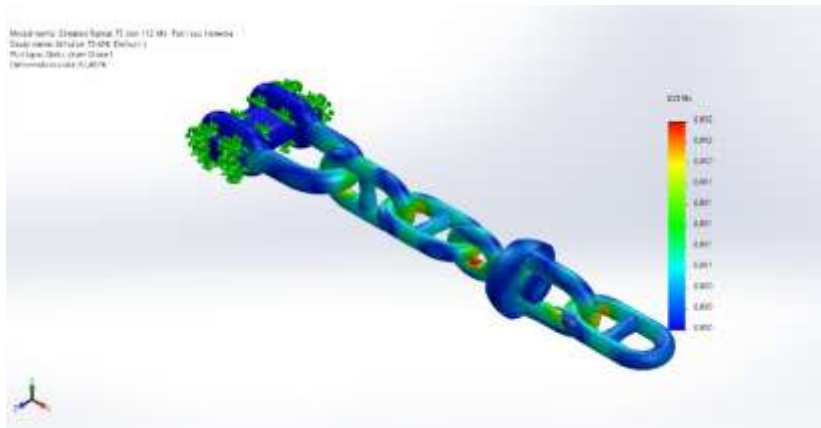
Gambar 5. *Von Mises Stress* 75 kN

Berdasarkan hasil simulasi, nilai *Von Mises Stress* maksimum sebesar 564,958 MPa, sedangkan nilai minimum sebesar 0,053 MPa. Tegangan maksimum terjadi pada daerah kontak antar mata rantai akibat konsentrasi tegangan yang dihasilkan oleh pembebanan tarik. Nilai tersebut melebihi *yield strength* material CM490 sebesar 325 MPa, sehingga daerah tersebut menjadi lokasi paling kritis pada model simulasi.

- *Analisis Equivalent Strain*

Pada Gambar 5 ditampilkan hasil simulasi *Equivalent Strain* pada rantai jangkar dengan pembebanan

sebesar 75 kN.

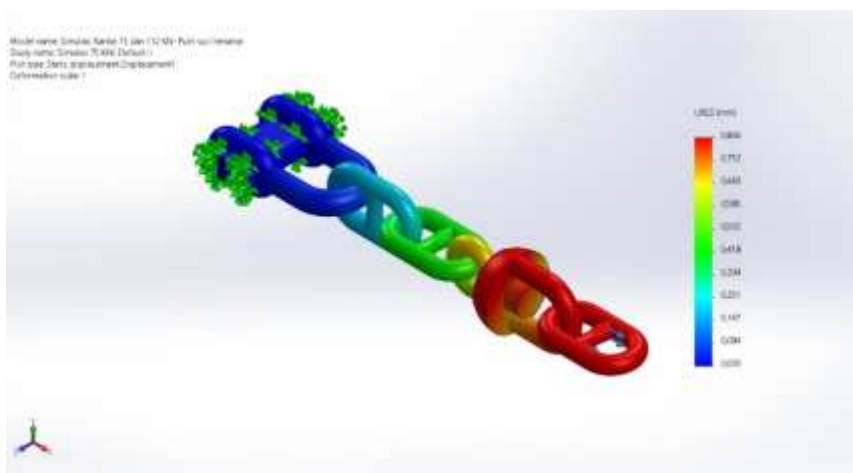


Gambar 6. *Equivalent Strain 75 kN*

Berdasarkan hasil simulasi *Static Strain* pada pembebanan 75 kN, diperoleh nilai regangan maksimum sekitar 0,002 dan nilai minimum sebesar 0,000. Regangan terbesar terjadi pada daerah kontak antar mata rantai yang ditunjukkan dengan warna merah. Hal ini menunjukkan bahwa bagian tersebut mengalami perubahan bentuk paling besar karena menerima beban tarik yang lebih besar dibandingkan bagian lainnya. Sementara itu, bagian yang berwarna biru mengalami perubahan bentuk paling kecil karena menerima beban yang lebih rendah. Meskipun demikian, nilai regangan yang terjadi masih relatif kecil, sehingga perubahan bentuk pada rantai juga masih kecil.

- *Analisis Resultant Displacement*

Pada Gambar 6 ditampilkan hasil simulasi *Resultant Displacement* pada rantai jangkar dengan pembebanan sebesar 75 kN.



Gambar 7. *Resultant Displacement 75 kN*

Berdasarkan hasil simulasi *Static Displacement* pada pembebanan sebesar 75 kN, diperoleh perpindahan maksimum sebesar 0,836 mm dan minimum sebesar 0,000 mm. Bagian yang ditarik mengalami perpindahan paling besar, sedangkan bagian yang ditahan tidak mengalami perpindahan. Hal ini menunjukkan bahwa saat rantai diberi gaya tarik, bagian yang menerima gaya akan bergeser, sedangkan bagian yang ditahan tetap berada pada posisinya.

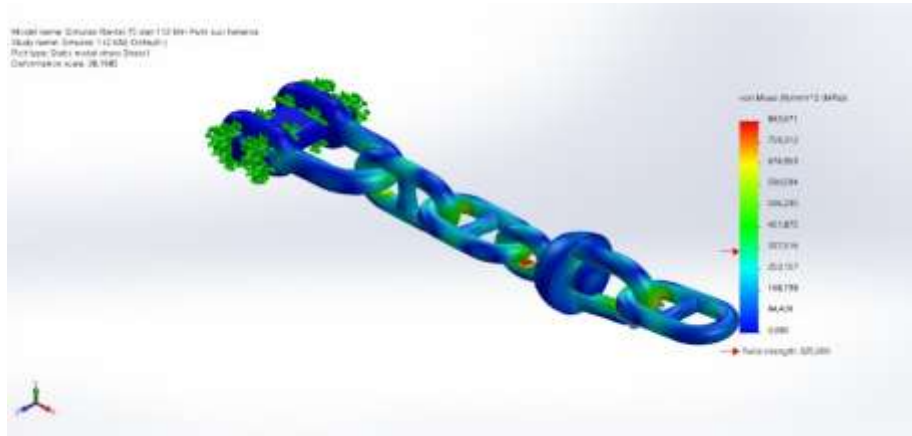
3.4.2 Hasil Simulasi Pembebanan 112 kN

Simulasi dilakukan dengan memberikan pembebanan tarik sebesar 112 kN atau 75% dari *proof load*

pada salah satu ujung rantai, sedangkan ujung lainnya diberikan kondisi *Fixed Geometry*. Hasil simulasi dianalisis berdasarkan distribusi *Von Mises Stress*, *Resultant Displacement*, *Equivalent Strain*, dan *Factor of Safety* (FOS).

- *Von Mises Stress*

Hasil analisis *Von Mises Stress* pada pembebanan sebesar 112 kN ditunjukkan pada Gambar 8.

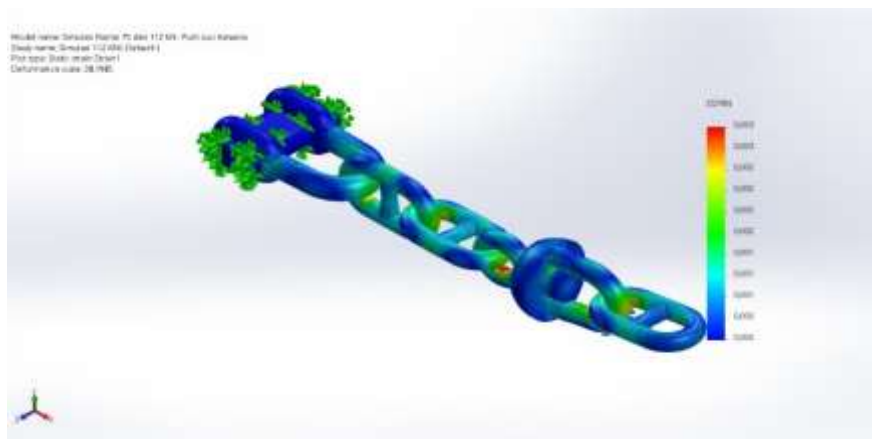


Gambar 8. *Von Mises Stress* 112 kN

Berdasarkan hasil simulasi *Von Mises Stress* pada pembebanan sebesar 112 kN, diperoleh nilai tegangan maksimum sebesar 843,671 MPa dan nilai minimum sebesar 0,080 MPa. Tegangan terbesar terjadi pada daerah kontak antar mata rantai yang ditunjukkan dengan warna merah, sedangkan tegangan terkecil berada pada bagian yang berwarna biru. Hal ini menunjukkan bahwa daerah kontak antar mata rantai menerima beban paling besar sehingga menghasilkan tegangan tertinggi. Karena nilai tegangan maksimum melebihi *yield strength* material sebesar 325 MPa, maka material diperkirakan mulai mengalami deformasi permanen.

- *Analisis Equivalent Strain*

Hasil analisis *Equivalent Strain* pada pembebanan sebesar 112 kN ditunjukkan pada Gambar 9.

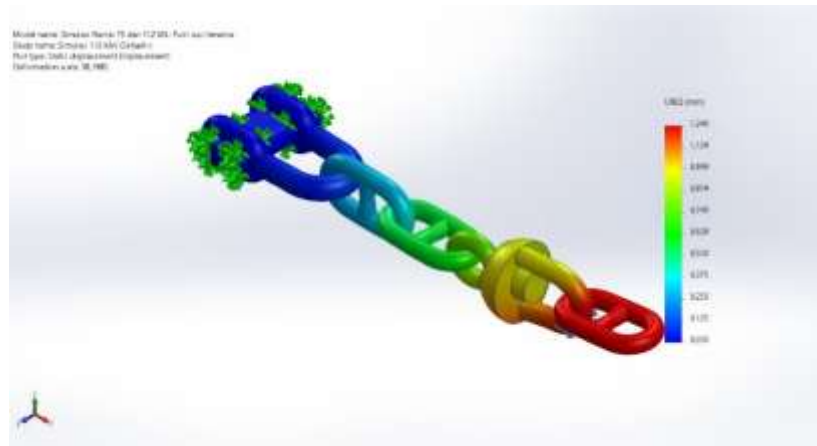


Gambar 9. *Equivalent Strain* 112 kN

Berdasarkan hasil simulasi *Static Strain* pada pembebanan sebesar 112 kN, diperoleh nilai regangan maksimum sekitar 0,003 dan nilai minimum sebesar 0,000. Regangan terbesar terjadi pada daerah kontak antar mata rantai karena bagian tersebut menerima beban paling besar. Sementara itu, bagian yang menerima beban lebih kecil memiliki nilai regangan yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diterima, semakin besar pula perubahan bentuk yang terjadi pada rantai.

- *Analisis Resultant Displacement*

Hasil analisis *Resultant Displacement* pada pembebanan sebesar 112 kN ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. *Resultant Displacement* 112 kN

Berdasarkan hasil simulasi *Static Displacement* pada pembebanan sebesar 112 kN, diperoleh nilai perpindahan maksimum sebesar 1,249 mm dan nilai minimum sebesar 0,000 mm. Perpindahan terbesar terjadi pada ujung rantai yang diberi gaya tarik, sedangkan perpindahan terkecil terjadi pada bagian yang diberi *Fixed Geometry* karena bagian tersebut ditahan sehingga tidak dapat bergerak. Hal ini menunjukkan bahwa saat beban diberikan, bagian yang menerima gaya akan mengalami perpindahan lebih besar dibandingkan bagian yang ditahan.

Hasil simulasi menunjukkan nilai Factor of Safety (FoS) minimum sebesar 0,385 pada daerah kontak antar mata rantai. Nilai ini lebih rendah dibandingkan pembebanan 75 Kn yang memiliki FoS minimum sebesar 0,575. Penurunan nilai FoS menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan menyebabkan margin keamanan struktur semakin berkurang. Nilai FoS yang lebih kecil dari 1 mengindikasikan bahwa tegangan hasil simulasi telah melampaui yield strength material berdasarkan kondisi pembebanan dan asumsi pemodelan yang digunakan, sehingga daerah kontak antar mata rantai menjadi lokasi paling kritis.

Tabel 8. Perbandingan Hasil Simulasi Pembebanan 75 kN dan 112 kN

Parameter	75 kN	112 kN
<i>Von Mises Stress</i> Maksimum (MPa)	564,958	843,671
<i>Equivalent Strain</i> Maksimum	0,002	0,003
<i>Resultant Displacement</i> Maksimum (mm)	0,836	1,249
<i>Factor of Safety</i> Minimum	0,575	0,385

Berdasarkan Tabel 8, peningkatan pembebanan dari 75 kN menjadi 112 kN menyebabkan nilai *Von Mises Stress* meningkat dari 564,958 MPa menjadi 843,671 MPa. Selain itu, nilai *Equivalent Strain* meningkat dari 0,002 menjadi 0,003, sedangkan *Resultant Displacement* bertambah dari 0,836 mm menjadi 1,249 mm. Sebaliknya, nilai *Factor of Safety* menurun dari 0,575 menjadi 0,385.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan tarik memberikan pengaruh langsung terhadap respons mekanik rantai jangkar. Semakin besar beban yang diberikan, semakin besar tegangan, regangan, dan perpindahan yang terjadi, sementara tingkat keamanan struktur semakin menurun. Daerah kontak antar mata rantai tetap menjadi lokasi paling kritis pada kedua variasi pembebanan karena mengalami konsentrasi tegangan paling tinggi.

3.5 Evaluasi Kelayakan Rantai Jangkar

Evaluasi kelayakan rantai jangkar dilakukan berdasarkan hasil pengukuran diameter aktual dan analisis respons mekanik menggunakan metode FEM. Hasil pengukuran menunjukkan persentase pengurangan diameter sebesar 5,14% pada rantai kanan dan 5,84% pada rantai kiri, yang masih berada di

bawah batas maksimum 12% sesuai persyaratan BKI. Namun, hasil simulasi FEM menunjukkan nilai *Factor of Safety* kurang dari 1 pada kedua variasi pembebanan, yang mengindikasikan adanya daerah kritis pada kontak antar mata rantai berdasarkan kondisi dan asumsi pemodelan. Oleh karena itu, evaluasi kondisi rantai jangkar sebaiknya mempertimbangkan hasil inspeksi dimensi dan analisis respons mekanik sebagai dasar dalam mendukung keputusan inspeksi serta pemeliharaan rantai jangkar.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh nilai *Equipment Number* (EN) sebesar 110,55 yang menunjukkan bahwa kapal *tugboat* 19 m memerlukan rantai jangkar dengan diameter nominal 19 mm sesuai Peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). Hasil pengukuran aktual menunjukkan persentase pengurangan diameter sebesar 5,14% pada rantai kanan dan 5,84% pada rantai kiri. Nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimum pengurangan diameter sebesar 12% sesuai persyaratan BKI, sehingga berdasarkan kriteria pengurangan diameter, rantai jangkar masih dinyatakan layak digunakan. Estimasi laju penurunan diameter sebesar 0,363 mm/tahun pada rantai kanan dan 0,470 mm/tahun pada rantai kiri menunjukkan adanya kecenderungan penurunan diameter selama masa operasional. Kondisi diameter aktual selanjutnya digunakan dalam pemodelan FEM untuk mengetahui respons mekanik rantai terhadap pembebanan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan dari 75 kN menjadi 112 kN meningkatkan nilai *Von Mises Stress*, *Equivalent Strain*, dan *Resultant Displacement*, sedangkan nilai *Factor of Safety* menurun. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan beban tarik menyebabkan respons mekanik rantai menjadi semakin kritis. Nilai FoS minimum kurang dari 1 pada kedua variasi pembebanan menunjukkan adanya titik kritis pada model berdasarkan kondisi dan asumsi pemodelan yang digunakan. Dengan demikian, evaluasi kondisi rantai jangkar tidak cukup hanya berdasarkan pengukuran diameter, tetapi perlu didukung oleh analisis respons mekanik menggunakan metode FEM. Kombinasi kedua pendekatan tersebut memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kondisi rantai jangkar sebagai dasar dalam pelaksanaan inspeksi dan pemeliharaan secara berkala.

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar penelitian selanjutnya mempertimbangkan pengaruh pembebanan dinamis akibat gelombang, arus, dan berat sendiri (*self weight*) rantai jangkar dalam analisis *Finite Element Method* (FEM). Selain itu, penggunaan data inspeksi dalam periode yang lebih panjang serta pengujian korosi secara langsung dapat dilakukan untuk memperoleh evaluasi kondisi rantai jangkar yang lebih komprehensif.

5 Daftar Pustaka

- [1] W. A. S. A. Latief M, "Pentingnya Pemeliharaan Rantai Jangkar Di Mt. Griya Flores," vol. 3, no. 1, pp. 31–45, 2022.
- [2] R. Wibowo and W. Sugiantoro, "Perhitungan Gaya-Gaya yang Bekerja pada Rantai Jangkar KM. Naga Sejahtera III," *Mar. Sci. Technol. ...*, vol. 2, no. 2, pp. 57–62, 2022.
- [3] D. P. Cahyaningtyas, N. Syahroni, R. W. Prastianto, E. B. Djatmiko, M. Murdjito, and H. M. N. Shidqi, "Fatigue Life Analysis of FSO Anchor Chain with Corrosion Effect," *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 8, no. 2, pp. 310–323, 2023, doi: 10.12962/j25481479.v8i2.16942.
- [4] MARDAWIAH, "Analisis Kekuatan Rantai Jangkar setelah mengalami Korosi," *Skripsi*, pp. 1–23, 2022.
- [5] Biro Klasifikasi Indonesia., "Rules For Hull. Vol. II. Jakarta," vol. II, 2022, [Online]. Available: www.bki.co.id

- [6] L. I. Saputra, U. Budiarto, and S. Jokosisworo, "Analisa Kekuatan Struktur End Shackle Rantai Jangkar Akibat Adanya Beban Lingkungan pada Kapal Perintis 1200 GT," *Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 2, pp. 421–430, 2017.
- [7] C. Jeremy, V. Sitorus, L. Wardah, A. Mursid, and N. Arifuddin, "Maximum Stress Analysis on Ship Anchor Chains with Various Force Angles," vol. 18, no. 02, pp. 29–37, 2025.
- [8] F. Maulana Noor and R. Rulianto, "Maintenance Analysis of Anchor Chain Against Corrosion Rate By Painting Method," *Int. J. Mar. Eng. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 13–22, 2024, doi: 10.30649/ijmea.v1i1.366.
- [9] Z. S. Alfafa, J. Teknik, B. Kapal, P. Perkapalan, and N. Surabaya, "ANALISIS PENGURANGAN DIAMETER RANTAI JANGKAR," 2022.
- [10] X. Zhang, N. Noël-hermes, G. Ferrari, and M. Hoogeland, "Localized Corrosion of Mooring Chain Steel in Seawater," pp. 53–74, 2022.
- [11] J. J. De Damborenea, "Flash butt welding corrosion of mooring chains," vol. 57, no. 6, pp. 509–519, 2022, doi: 10.1080/1478422X.2022.2093691.
- [12] A. N. Muhajir, A. Androva, A. Mukhtar, M. Malik, and A. Burhanuddin, "Studi Pengaruh Jumlah , Ukuran , Bentuk Mesh Terhadap Hasil Simulasi Rangka Sepeda Motor Listrik Menggunakan Metode Finite Element Analysis (Fea) JURNAL MEDIA INFORMATIKA [JUMIN]," vol. 6, no. 6, pp. 2720–2731, 2025.