

Analisis Kekuatan Konstruksi *Towing Hook* Pada *TugBoat* 28 M Menggunakan Metode FEM

Bayu Setya Pranajaya^{1*}, Yusuf Nurhuda, S.S.T., M.T.¹
* and Ita Wijayanti, S.T.P., M.Sc.^{2*}

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

¹E-mail: bayusetyapranaja261002@gmail.com

Abstrak

Towing hook merupakan komponen penting pada kapal *tugboat* yang berfungsi sebagai penghubung gaya tarik saat operasi penundaan, sehingga harus memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan beban kerja sesuai persyaratan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan konstruksi *towing hook* pada *Tugboat* 28 m menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) sebelum dan sesudah dilakukan modifikasi berupa penambahan *bracket* dan *stiffener*, serta mengevaluasi batas pembebanan pada kondisi ekstrem berdasarkan BKI *Permissible Stress Criteria* dengan tegangan izin sebesar 195,05 MPa dan BKI *Material Strength Criteria* dengan kekuatan material sebesar 396,04 MPa. Analisis dilakukan menggunakan SolidWorks Simulation dengan material ASTM A36 pada variasi pembebanan 4 ton, 7 ton, 12 ton, dan 15 ton. Hasil simulasi menunjukkan bahwa modifikasi konstruksi mampu menurunkan tegangan *Von Mises* dari 40,483 MPa menjadi 35,027 MPa (4 ton), 71,329 MPa menjadi 61,017 MPa (7 ton), 122,274 MPa menjadi 104,443 MPa (12 ton), dan 151,817 MPa menjadi 130,554 MPa (15 ton). Nilai *safety factor* juga meningkat dari 6,18 menjadi 7,13, 3,50 menjadi 4,09, 2,04 menjadi 2,39, dan 1,65 menjadi 1,91. Pada kondisi pembebanan ekstrem, konstruksi masih memenuhi BKI *Permissible Stress Criteria* hingga beban 18,5 ton dengan tegangan maksimum 195,01 MPa dan *safety factor* 1,29. Sementara itu, berdasarkan BKI *Material Strength Criteria* sebesar 396,04 MPa, konstruksi masih berada di bawah batas kekuatan material hingga pembebanan 37 ton dengan tegangan maksimum 390,02 MPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa modifikasi konstruksi *towing hook* efektif meningkatkan kekuatan struktur, memperbaiki distribusi tegangan, dan meningkatkan tingkat keamanan sehingga memenuhi persyaratan kekuatan berdasarkan ketentuan BKI.

Kata kunci: *Towing hook*, *Tugboat*, FEM, Tegangan, *Safety factor*

Abstract

Towing hook is an important component on a *tugboat* that functions as a connecting force during towing operations, so it must have sufficient strength to withstand the work load according to the requirements of the Indonesian Classification Bureau (BKI). This study aims to analyze the strength of the *towing hook* construction on a 28 m *Tugboat* using the *Finite Element Method* (FEM) before and after modifications in the form of adding brackets and stiffeners, and evaluate the loading limits under extreme conditions based on the BKI *Permissible Stress Criteria* with a allowable stress of 195.05 MPa and BKI *Material Strength Criteria* with a material strength of 396.04 MPa. The analysis was carried out using SolidWorks Simulation with ASTM A36 material at loading variations of 4 tons, 7 tons, 12 tons, and 15 tons. The simulation results show that the construction modification is able to reduce the *Von Mises* stress from 40.483 MPa to 35.027 MPa (4 tons), 71.329 MPa to 61.017 MPa (7 tons), 122.274 MPa to 104.443 MPa (12 tons), and 151.817 MPa to 130.554 MPa (15 tons). The *safety factor* value also increased from 6.18 to 7.13, 3.50 to 4.09, 2.04 to 2.39, and 1.65 to 1.91. Under extreme loading conditions, the construction still meets the BKI *Permissible Stress Criteria* up to a load of 18.5 tons with a maximum stress of 195.01 MPa and a *safety factor* of 1.29. Meanwhile, based on the BKI *Material Strength Criteria* of 396.04 MPa, the construction is still below the material strength limit up to a load of 37 tons with a maximum stress of 390.02 MPa. The results of the study indicate that the modification of the *towing hook* construction effectively increases structural strength, improves stress distribution, and increases the level of safety so that it meets the strength requirements based on BKI provisions.

Keywords: *Towing hook*, *Tugboat*, FEM, Stress, *Safety factor*

1 Pendahuluan

Peran transportasi laut dalam mendukung distribusi barang dan jasa menjadikan sektor maritim sebagai bagian penting dalam sistem logistik global. Dalam kegiatan pelayaran, khususnya di wilayah pelabuhan dan perairan terbatas, diperlukan kapal pendukung yang mampu membantu manuver kapal utama secara aman dan efisien. Salah satu kapal pendukung yang memiliki fungsi tersebut adalah kapal *tugboat*, yang digunakan untuk membantu proses manuver, penarikan (*towing*), serta pendorongan (*pushing*) kapal berukuran besar [1].

Tugboat biasanya digunakan untuk menarik atau mendorong kapal di perairan pelabuhan, laut lepas, atau melalui sungai. Walaupun *tugboat* memiliki ukuran dan disain yang kecil tetapi *tugboat* memiliki mesin yang sangat kuat yang dirancang diperuntukkan untuk menarik beban besar sesuai dengan kemampuan pendorong yang ditetapkan oleh Syahbandar, Perencanaan kapal pada dasarnya adalah merencanakan kapal dengan tingkat tegangan yang diizinkan dan dapat diterima oleh kapal [2].

Dalam mendukung aktivitas tersebut, *tugboat* dilengkapi dengan sistem *towing gear* yang berfungsi untuk mentransmisikan gaya tarik dari kapal ke beban. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi, salah satunya adalah *towing hook*, dalam pelayarannya mengharuskan kondisi kapal dalam keadaan aman, baik dalam hal konstruksi maupun instalasi lainnya, sebab dalam perencanaan sebuah konstruksi kapal, pada dasarnya adalah merencanakan konstruksi yang mempunyai tingkat tegangan pada batas yang diizinkan dan bisa diterima oleh konstruksi tersebut [2]. Karena fungsinya yang sangat krusial, *towing hook* harus mampu menahan beban tarik yang besar serta bekerja dalam berbagai arah gaya akibat pengaruh kondisi operasional di laut [2].

Akibat dari kondisi pembebanan tersebut, *towing hook* memiliki potensi mengalami kegagalan struktur apabila tidak dirancang dengan baik. Kegagalan yang dapat terjadi meliputi deformasi akibat beban berlebih, retak akibat konsentrasi tegangan, hingga patah getas. Selain itu, pembebanan berulang selama operasi juga dapat menyebabkan penurunan kekuatan struktur secara bertahap. Kegagalan pada komponen ini sangat berbahaya karena dapat mengakibatkan terputusnya hubungan antara *tugboat* dan beban tarik, yang berpotensi menimbulkan kecelakaan serius dalam operasi pelayaran [3] [4].

Salah satu problem dalam konstruksi kapal yakni bagaimana mendesain konstruksi yang kuat, kokoh, dan tidak memerlukan material yang banyak (ringan). Sehingga engineer kapal merencanakan kekuatan berdasarkan resiko deformasi yang berlebih pada konstruksi (*yield point*), konstruksi akan ditinjau dari aspek *safety factor* [5].

Permasalahan ini menjadi dasar dilakukannya penelitian untuk menganalisis apakah konstruksi *towing hook* pada *tugboat* 28m mampu menahan beban tarik sesuai kondisi aman. Oleh karena itu, analisis dilakukan menggunakan FEM untuk mengetahui distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi pada *towing hook*.

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ASTM A36, yang merupakan baja karbon rendah yang umum digunakan dalam konstruksi struktur, termasuk pada komponen kapal. Material ini memiliki sifat mekanik yang baik, seperti kekuatan luluh sekitar 250 MPa, serta kemudahan dalam proses fabrikasi seperti pengelasan dan pembentukan. Spesifikasi material ini mengacu pada standar yang ditetapkan oleh ASTM International yaitu ASTM A36/A36M – *Standard Specification for Carbon Structural Steel* [6].

Rumusan masalah pada penelitian ini yaitu saat *tugboat* menarik suatu beban yang melebihi kapasitas batas tarik *overload towing* pada konstruksi akan terjadi deformasi sehingga dapat menyebabkan patah getas (*brittle fracture*) oleh karena itu akan melakukan modifikasi terhadap konstruksi.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan bagian kapal mana yang mengalami tegangan tertinggi karena beban tarik yang bekerja selama proses *towing*. untuk mengetahui seberapa besar pengaruh terhadap konstruksi *main deck*. Dengan pendekatan ini, diharapkan simulasi numerik dapat memberikan hasil yang akurat dan konsisten sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada pengujian fisik.

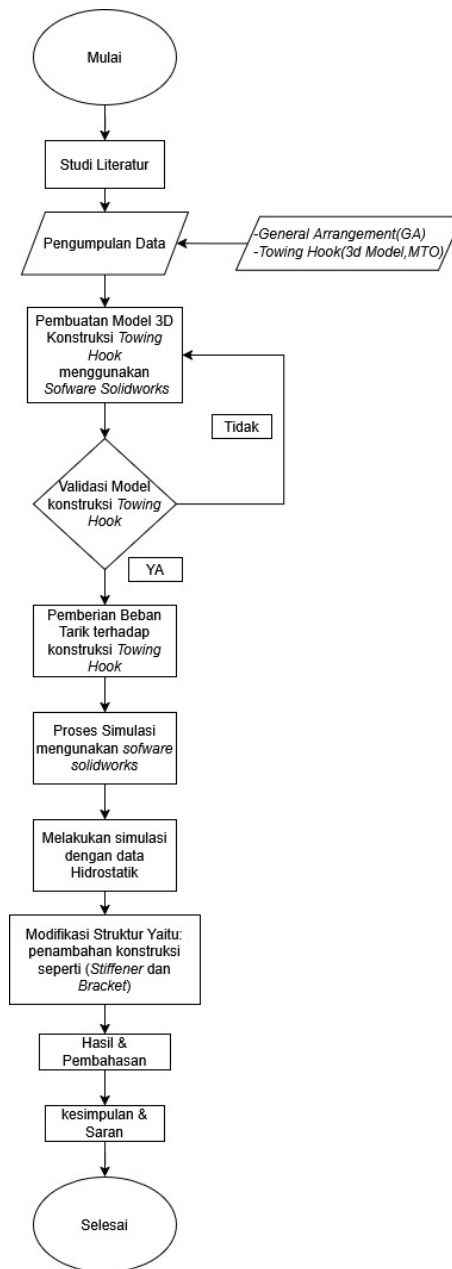
Batasan masalah pada penelitian ini hanya membahas pada analisis kekuatan konstruksi pada *TugBoat* khusus di area *main deck* lokasi *towing hook* terpasang. Beban yang digunakan pada penelitian ini diasumsikan sebagai beban statis dan bekerja secara merata pada area konstruksi *towing hook* sehingga penelitian ini tidak membahas pengaruh beban dinamis seperti gelombang, getaran, kelelahan material (*fatigue*), dan kondisi laut ekstrim saat melakukan operasi serta mengabaikan seluruh aspek pengelasan. Selain itu, material yang digunakan dalam analisis yaitu baja ASTM A36.

Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang umumnya hanya berfokus pada analisis kekuatan konstruksi *towing hook* atau komponen sejenis pada kondisi desain awal, penelitian ini tidak hanya mengevaluasi kekuatan struktur awal, tetapi juga melakukan modifikasi konstruksi melalui penambahan bracket dan stiffener untuk meningkatkan kapasitas beban tarik.

2 Metodologi Penelitian

2.1. Flow Chart Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur tentang simulasi, beban tarik, permodelan, dan modifikasi konstruksi, diikuti pengumpulan data teknis seperti *general arrangement* dan *towing hook*. Berdasarkan data tersebut, akan melakukan pembuatan model 3D menggunakan *solidworks*, lalu dicek kesesuaiannya dengan kondisi lapangan. Setelah sesuai, model diberi pembebanan estimasi beban tarik dan disimulasikan dengan data hidrostatik. Hasil simulasi memberikan nilai beban tarik maksimal, sehingga dilakukan modifikasi seperti penambahan *stiffener* dan *bracket* untuk menguji kemampuan struktur menahan beban lebih besar dari data hidrostatik. Penelitian diakhiri setelah semua tahapan selesai. Gambar *flow chart* dapat dilihat pada gambar 1.

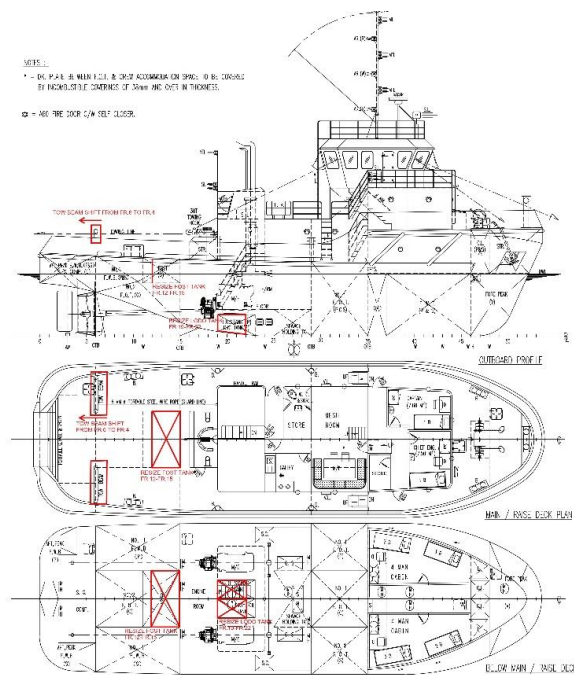


Gambar 1. Flow Chart Penelitian.

2.2. Pengumpulan Data

Tug Boat 28 meter

Data kapal yang digunakan dalam penelitian ini adalah kapal *tugboat* dengan panjang 28 m. Data tersebut dijadikan sebagai acuan utama dalam proses pemodelan serta analisis struktur selama simulasi berlangsung. Adapun dimensi utama kapal yang digunakan mencakup panjang kapal, lebar, tinggi, serta sarat air. Kapal ini dibangun di bawah pengawasan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan dioperasikan oleh awak kapal sebanyak 10 orang. Gambar kapal bisa dilihat pada gambar 2 dan 3.



Gambar 2. Drawing kapal Tug Boat 28 meter



Gambar 3. 3D Model kapal Tug Boat 28 meter

Dimensi utama kapal meliputi panjang keseluruhan (LOA) 28.587 m dan panjang antar garis tegak lurus (LBP) 26.204 m. Lebar kapal adalah 8.600 m, sedangkan tinggi kapal adalah 4.200 m. Kapal memiliki sarat air 3.500 m. Untuk sistem propulsi utamanya, kapal dilengkapi dengan dua mesin utama MITSUBISHI S6R2-MTK3L, masing-masing menghasilkan 759 kW dan beroperasi pada 1.406 rpm. Untuk mendukung kebutuhan daya listrik di atas kapal, terdapat dua generator, masing-masing menghasilkan 42 kW, menggunakan mesin Weichai WP4CD66E200. Rincian dimensi utama kapal dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Ukuran Utama *TugBoat 28M*

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	<i>Length Over All</i>	LOA	28,587	m
2	<i>Length Between Perpendicular</i>	LBP	26,204	m
3	<i>length water line</i>	LWL	27,834	m
4	<i>Beam</i>	B	8,600	m
5	<i>Height</i>	H	4,200	m
6	<i>Draught</i>	d	3.500	m

Spesifikasi material konstruksi Tugboat

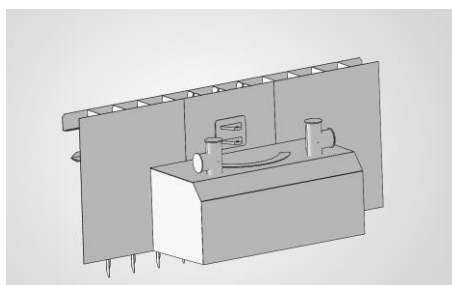
Pada penelitian ini material yang digunakan adalah baja ASTM A36 merupakan baja karbon rendah yang memiliki kekuatan yang baik dapat dirubah bentuk serta mudah dilas, baja ASTM A36 biasanya digunakan dalam dunia industri perkapalan. Material yang digunakan pada model ini adalah baja standar. Dimana kriteria bahan baja ASTM A36 sebagai pada tabel 2[7]

Tabel 2. Kandungan kimia dari baja ASTM A36

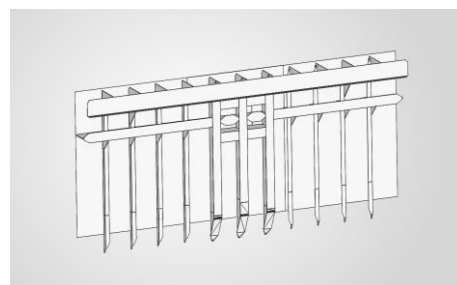
Parameter	ASTM A36
Jenis Material	Carbon Steel
<i>Density</i>	7850 kg/m ³
<i>Yeald Strength</i>	250 Mpa
<i>Ultimate strength</i>	400-550 Mpa
<i>Modulus Elastisitas</i>	200 Gpa
<i>Poisson Ratio</i>	±0.3

Towing Hook

Dalam penelitian ini, penulis mendapatkan data konstruksi *towing hook tug boat 28m* di tempat magang seperti *Drawing, Model 3D* menggunakan *Software Foran, Material Take Off (MTO)* sebagai data analisis tersebut digunakan untuk penelitian ini bisa dilihat untuk model bisa dilihat pada gambar 4 (a) dan (b), dan untuk *drawing* bisa dilihat pada gambar 5 dan 6 ,



(a)



(b)

Gambar 4 (a) dan (b). 3D Model Konstruksi *Towing Hook* tampak depan dan belakang *Software solidworks*

2.3. Permodelan & Simulasi

Simulasi dan Analisis FEM (Finite Element method)

Faktor keamanan (F.S) merupakan kapasitas suatu sistem yang menentukan daya dukung beban di luar beban aktualnya. Faktor keamanan diperlukan untuk memastikan beban yang diberikan lebih kecil dari pada beban yang dapat ditahan oleh suatu benda secara penuh. Nilai faktor keamanan yang spesifik bergantung pada jenis material. Menurut BKI, faktor keamanan harus lebih besar dari satu (>1). Faktor keamanan diperoleh dengan membagi beban tegangan maksimum dengan beban tegangan yang diizinkan[2].

Untuk menentukan apakah desain *towing hook* ini aman dan layak, digunakan 2 tolak ukur utama:

1. Faktor keamanan menurut mott dalam buku “Machine Elements in Mechanical Design” minimal harus 1.5 – 2 sebagai batas aman desain teknik pada umumnya.

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{Maxs}} \quad (1)$$

Keterangan:

σ_y = beban tegangan yang diizinkan

σ_{max} = beban tegangan maksimum

SF = Safety Factor Jika nilai safety factor lebih dari 1.5 maka struktur dianggap aman

2. Menurut Peraturan untuk Lambung Kapal, Bagian 27 C3, tegangan yang diperbolehkan tidak boleh melebihi asumsi beban yang sama dengan gaya putus minimum tali penarik [8]. Secara matematis, hal ini ditulis sebagai berikut:

$$\sigma_y = 0.83 \times R_{EH} \quad (2)$$

Keterangan:

R_{EH} = yield strength 235 N/mm²

Jadi tegangan maksimum hasil FEM harus lebih kecil dari 195,05 MPa agar memenuhi kriteria tersebut.

Software Yang digunakan

Pada penelitian ini desain 3D konstruksi *towing hook* menggunakan *software solidworks*. *software solidworks* adalah perangkat lunak CAD (*Computer-Aided Design*) yang berbasis 3D, digunakan untuk merancang, memodelkan dan menganalisis komponen, *solidWorks* adalah perangkat lunak rekayasa yang menggabungkan kemampuan desain 3D dengan fitur analisis teknik berbasis metode numerik. Dalam penelitian ini, *solidworks* digunakan untuk melakukan simulasi pembebanan tarik pada struktur *towing hook*. Dengan menggunakan fitur *simulation solidWorks*, dapat dilakukan analisis kekuatan struktur dengan mempertimbangkan berbagai parameter, termasuk geometri, material, jenis pembebanan, dan kondisi batas yang sebanding dengan kondisi di lapangan.

Rules BKI (Biro Klasifikasi Indonesia)

Salah satu komponen penting dalam sistem *towing gear* kapal tunda adalah *towing hook*, yang berfungsi sebagai pengait untuk menghubungkan tali *towing* (*tow rope*) dengan kapal atau objek yang ditarik. Berdasarkan aturan Biro Klasifikasi Indonesia, *towing hook* harus ditempatkan serendah mungkin pada kapal dan didesain untuk menahan gaya tarik bolak-balik yang besar serta mampu bekerja dalam berbagai arah tarikan sesuai dengan kondisi operasi di laut. *Towing hook* juga harus memiliki sistem pelepas cepat, yang memungkinkan tali dilepas secara darurat untuk mencegah kecelakaan seperti kapal terbalik karena beban tarik berlebihan. Desain *towing hook* juga harus memenuhi persyaratan kekuatan, material, dan pengujian yang ditetapkan oleh standar klasifikasi. (*bki GUIDELINES FOR SAFE OCEAN TOWING Pt.1 Vol.12*).

Towing capacity ditentukan oleh beban tarik maksimum T (*Towing load*) yang dihitung dari daya mesin, dengan klasifikasi operasional *Tow Rope Pull (T)* dari *BKI Guidelines Pt.1 Vol.12 Section 2 B.1.3*:

T = 30-40 kN (3-4 ton): *Harbor tug* - pelabuhan dalam, manuver kapal kecil

T = 50-70 kN (5-7 ton): *Coastal tug* - operasi pantai, tongkang kecil

T = 80-120 kN (8-12 ton): *Ocean tug* - towing antar pulau, tongkang sedang

T > 150 kN (15+ ton): *Heavy offshore tug* - *ocean towing* jarak jauh, barge besar

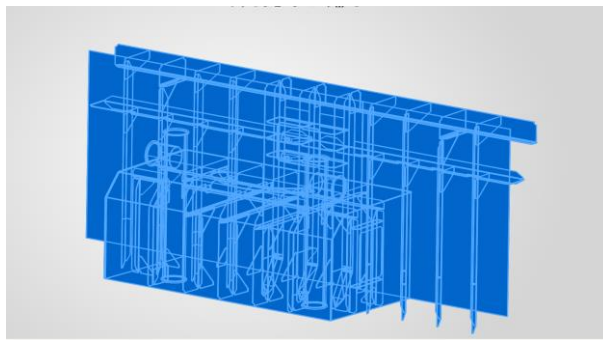
3 Analisa Data Dan Pembahasan

3.1 Simulasi Finite Element Method (FEM)

Analisis kekuatan konstruksi towing hook dilakukan menggunakan metode *Finite Element Method (FEM)* pada perangkat lunak *SolidWorks Simulation*. analisis ini bertujuan untuk mengetahui perilaku struktur towing hook ketika menerima beban tarik yang berbeda-beda. Parameter yang diamati meliputi nilai tegangan *Von Mises*, deformasi maksimum, dan *safety factor*. Material yang digunakan pada simulasi adalah baja ASTM A36 dengan nilai yield strength sebesar 250 MPa. Berdasarkan ketentuan BKI Part 1 Volume II Section 31 B.4, tegangan izin dihitung menggunakan faktor keamanan sebesar 1,5

Koneksi Antar Komponen (*Body Connection*)

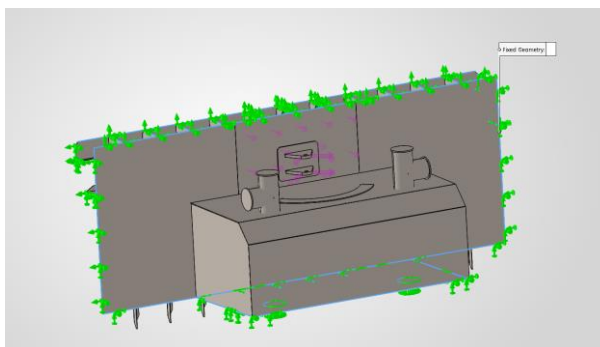
Pada proses analisis menggunakan *SolidWorks Simulation*, hubungan antara *komponen towing hook, bracket, stiffener*, dan *main deck* ditetapkan menggunakan jenis *Bonded Contact*. Pengaturan ini mengasumsikan bahwa tidak terjadi perpindahan maupun pergerakan relatif antar komponen yang saling terhubung, sehingga seluruh struktur bekerja sebagai satu kesatuan dalam menerima beban tarik. Asumsi tersebut disesuaikan dengan kondisi konstruksi sebenarnya, di mana seluruh komponen dihubungkan melalui proses pengelasan (*welded connection*), sehingga sambungan dianggap memiliki ikatan yang sempurna selama proses simulasi FEM.



Gambar 7. *Body Connection*

Boundary Condition

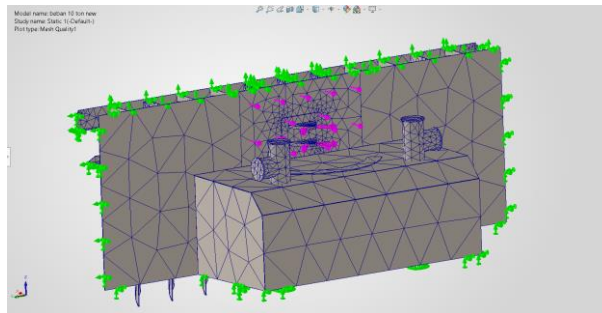
Sebelum analisis dilakukan, kondisi batas (*boundary condition*) pada model konstruksi *towing hook* terlebih dahulu ditentukan. Kondisi batas yang digunakan berupa tumpuan jepit (*Fixed Geometry*) yang diterapkan pada bagian *main deck* sebagai lokasi pemasangan konstruksi towing hook. Penerapan kondisi batas ini bertujuan untuk menahan pergerakan dan perpindahan struktur selama proses simulasi, sehingga respons struktur terhadap pembebanan tarik dapat dianalisis sesuai dengan kondisi aktual.



Gambar 8. *boundary condition*

Meshing

Untuk mempermudah analisis menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*), proses meshing dilakukan dengan membagi model konstruksi towing hook menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Untuk meningkatkan akurasi hasil simulasi, penelitian ini menggunakan kualitas *mesh Fine*. Selain itu, karena model konstruksi *towing hook* memiliki geometri yang cukup kompleks terutama pada bagian bracket, stiffener, dan area sambungan dengan *main deck* parameter *Blended Curvature-Based Mesh* diterapkan. Tujuan pengaturan mesh ini adalah untuk mendapatkan hasil analisis tegangan, deformasi, dan faktor keamanan yang lebih akurat.



Gambar 9. Meshing

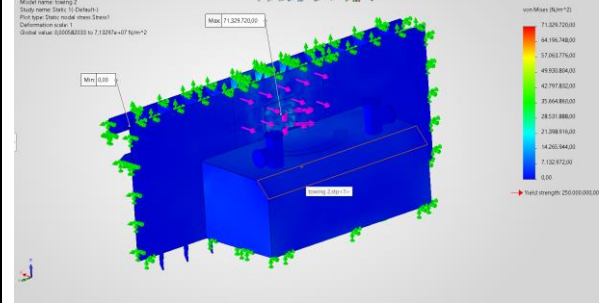
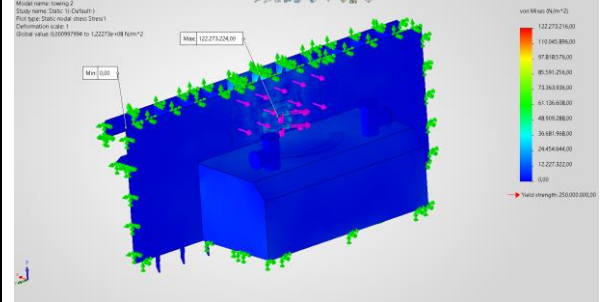
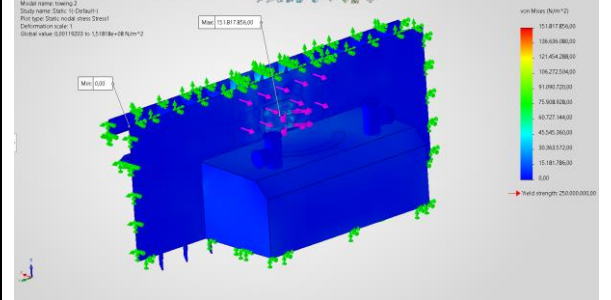
Mesh Details	
Study name	Static 1*(-Default-)
DetailsMesh type	Solid Mesh
Meshes Used	Blended curvature-based mesh
Jacobian points for High quality mesh	16 points
Max Element Size	202.69 mm
Min Element Size	10.1345 mm
Mesh quality	High
Total nodes	80478
Total elements	34411
Maximum Aspect Ratio	424.15
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	16,6
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	35,1
Percentage of distorted elements	0
Number of distorted elements	0
Reuse mesh for identical bodies	Off
Number of bodies that have reused mesh	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:02:44
Computer name	BAYUSETYA26

Gambar 10. Mesh Detail

3.2 Analisis Pembebanan pada data kapal (Sebelum Modifikasi)

Tabel 4 Hasil Analisis Pengujian pada data kapal

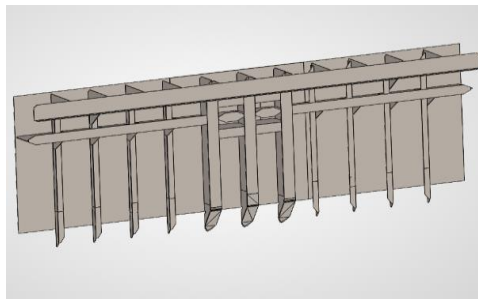
	Beban(N)	: 39.240 N(4 Ton)
	Displacement(Deformasi)	: 0.094
	Hasil Tegangan(Mpa)	: 40.483
	Tegangan Izin (Mpa)	: 195.05
	Safety Factor	: 6,18 (min)
	Kreteria	:Aman

	Beban(N) : 68.670 N(7 Ton) Displacement(Deformasi) : 0.168 Hasil Tegangan(Mpa) : 71.329 Tegangan Izin (Mpa) : 195.05 Safety Factor : 3,50(min) Kreteria :Aman
	Beban(N) : 117.720 N(12 Ton) Displacement(Deformasi) : 0.289 Hasil Tegangan(Mpa) : 122.274 Tegangan Izin (Mpa) : 195.05 Safety Factor : 2,04(min) Kreteria :Aman
	Beban(N) : 147.150 N(15 Ton) Displacement(Deformasi) : 0.352 Hasil Tegangan(Mpa) : 151.817 Tegangan Izin (Mpa) : 195.05 Safety Factor : 1,65(min) Kreteria :Aman

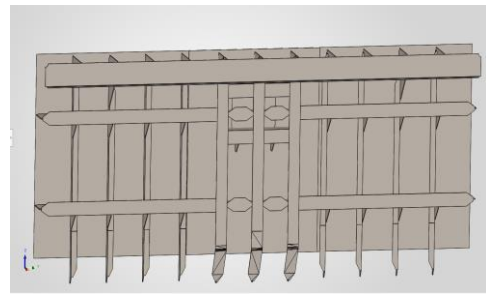
Berdasarkan hasil simulasi menggunakan metode Finite Element Method (FEM), konstruksi towing hook pada desain awal mampu menahan beban tarik hingga 15 ton (147,15 kN). Pada pembebanan tersebut diperoleh tegangan Von Mises maksimum sebesar 151,817 MPa dengan safety factor sebesar 1,65. Nilai tegangan yang dihasilkan masih berada di bawah tegangan izin BKI sebesar 195,05 MPa, sehingga konstruksi dinyatakan memenuhi kriteria berdasarkan peraturan BKI. Hasil ini menunjukkan bahwa pada pembebanan 15 ton, konstruksi towing hook masih berada dalam kondisi aman dan memiliki margin keamanan yang memadai terhadap batas tegangan yang diizinkan.

3.3 Modifikasi Struktur Konstruksi

Hasil analisis pada desain awal menunjukkan bahwa konstruksi towing hook mampu menahan beban tarik 15 ton dengan tetap memenuhi kriteria keamanan berdasarkan ketentuan BKI. Untuk meningkatkan kapasitas beban tarik serta mengoptimalkan kinerja struktur, dilakukan modifikasi konstruksi melalui penambahan stiffener dan bracket pada area yang mengalami konsentrasi tegangan. Modifikasi tersebut bertujuan untuk meningkatkan kekuatan struktur, memperbaiki distribusi beban, serta mengurangi konsentrasi tegangan yang terjadi pada konstruksi towing hook. Selanjutnya, model hasil modifikasi dianalisis kembali menggunakan metode Finite Element Method (FEM) untuk mengevaluasi perubahan nilai tegangan Von Mises, faktor keamanan, dan kapasitas beban tarik dibandingkan dengan desain awal.



(a)



(b)

Gambar 11 (a) dan (b). 3D Model sebelum modifikasi (a) dan sesudah modifikasi (b)

Pembebanan pada Modifikasi Struktur Konstruksi (Sesudah Modifikasi)

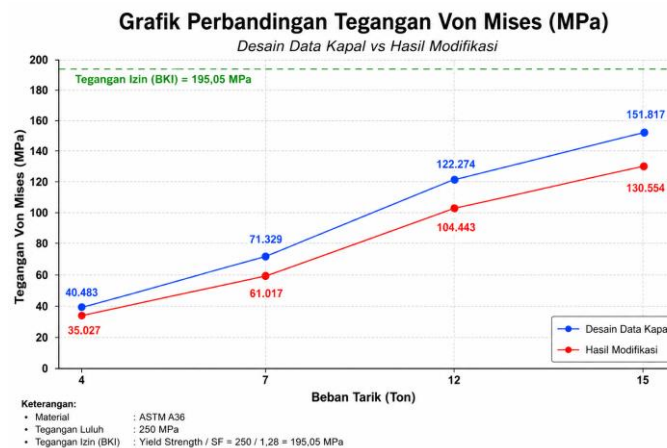
Tabel 5 Hasil Analisis Pengujian pada Modifikasi Struktur Konstruksi

	Beban(N) : 39.240 N(4 Ton) <i>Displacement</i>(Deformasi) : 0.156 Hasil Tegangan(Mpa) : 35.027 Tegangan Izin (Mpa) : 195.05 <i>Safety Factor</i> : 7,13(min) Kreteria :Aman
	Beban(N) : 68.670 N(7 Ton) <i>Displacement</i>(Deformasi) : 0.272 Hasil Tegangan(Mpa) : 61.017 Tegangan Izin (Mpa) : 195.05 <i>Safety Factor</i> : 4,09(min) Kreteria :Aman
	Beban(N) : 117.720 N(12 Ton) <i>Displacement</i>(Deformasi) : 0.466 Hasil Tegangan(Mpa) : 104.443 Tegangan Izin (Mpa) : 195.05 <i>Safety Factor</i> : 2,39(min) Kreteria :Aman
	Beban(N) : 147.150 N(15 Ton) <i>Displacement</i>(Deformasi) : 0.582 Hasil Tegangan(Mpa) : 130.554 Tegangan Izin (Mpa) : 195.05 <i>Safety Factor</i> : 1,91(min) Kreteria :Aman

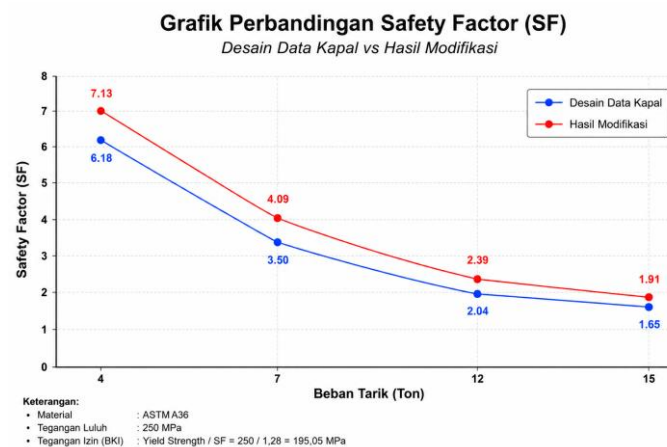
Hasil simulasi *Finite Element Method* (FEM) menunjukkan bahwa penambahan *stiffener* dan *bracket* berhasil meningkatkan kekuatan konstruksi *towing hoo*. Konstruksi hasil modifikasi mampu menahan beban tarik hingga 186.390 N (19 ton) dengan tegangan Von Mises sebesar 165,366 MPa dan faktor keamanan 1,51, sehingga masih memenuhi batas tegangan izin BKI sebesar 195.05 MPa.

3.4 Hasil Pengujian *Finite Element Method (FEM)*

Hasil simulasi *Finite Element Method (FEM)* menunjukkan bahwa penambahan *bracket* dan *stiffener* mampu meningkatkan kinerja konstruksi *towing hook*. Pada seluruh variasi pembebanan, nilai tegangan *Von Mises* mengalami penurunan sekitar 13–15%, yaitu dari 40,483 MPa menjadi 35,027 MPa (4 ton), 71,329 MPa menjadi 61,017 MPa (7 ton), 122,274 MPa menjadi 104,443 MPa (12 ton), dan 151,817 MPa menjadi 130,554 MPa (15 ton). Selain itu, nilai *Safety Factor (SF)* meningkat dari 6,18 menjadi 7,13, 3,50 menjadi 4,09, 2,04 menjadi 2,39, dan 1,65 menjadi 1,91 pada masing-masing variasi pembebanan. Dengan demikian, modifikasi konstruksi terbukti mampu mengurangi konsentrasi tegangan, meningkatkan faktor keamanan, dan seluruh nilai tegangan maksimum yang diperoleh masih berada di bawah tegangan izin BKI sebesar 195,05 MPa, sehingga konstruksi *towing hook* dinyatakan memenuhi persyaratan kekuatan dan aman terhadap variasi pembebanan yang dianalisis.



Gambar 12. Perbandingan tegangan Von Mises(Mpa)



Gambar 13. Perbandingan *Safety Factor*

Pada kondisi ekstrem, dilakukan evaluasi terhadap kapasitas maksimum konstruksi *towing hook* berdasarkan dua kriteria, yaitu *BKI Permissible Stress* dan *BKI Material Strength*. Analisis ini bertujuan untuk menentukan beban tarik maksimum yang masih dapat diterima oleh konstruksi sebelum mencapai batas tegangan yang diizinkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kondisi batas berdasarkan *BKI Permissible Stress* tercapai pada tegangan *Von Mises* sebesar 195,05 MPa dengan safety factor 1,01, sedangkan berdasarkan *BKI Material Strength*, kondisi batas terjadi pada tegangan *Von Mises* sebesar 396,04 MPa dengan safety factor 1,01. Dengan demikian, kedua nilai tersebut dapat dijadikan acuan dalam menentukan kapasitas pembebanan maksimum konstruksi *towing hook* pada kondisi operasi ekstrem.

Tabel 6
SAFETY FACTOR BY BKI PERMISSIBLE STRESS CRITERION

Beban(ton)	σ_{Max} (Mpa)	Summary Probe (Max)	$\sigma_{permissible}$ (Mpa)	SF	Mark
18.5	195.01	88.950.192 N/m ²	195.05	1.29	Aman
22	231.90	105.786.264 N/m ²	195.05	1.08	Tidak Aman
25	263.53	141.687.952 N/m ²	195.05	0.95	Tidak Aman
37	390.02	209.697.248 N/m ²	195.05	0.64	Tidak Aman

Tabel 7
SAFETY FACTOR BY BKI MATERIAL STRENGTH CRITERION

Beban(ton)	σ_{Max} (Mpa)	Summary Probe (Max)	$\sigma_{permissible}$ (Mpa)	SF	Mark
18.5	195.01	88.950.192 N/m ²	396.04	1.29	Aman
22	231.90	105.786.264 N/m ²	396.04	1.08	Aman
25	263.53	141.687.952 N/m ²	396.04	0.95	Aman
37	390.02	209.697.248 N/m ²	396.04	0.64	Aman

Berdasarkan hasil simulasi FEM pada kondisi pembebanan ekstrem, evaluasi dilakukan menggunakan BKI Permissible Stress dan BKI Material Strength. Berdasarkan BKI Permissible Stress, konstruksi towing hook masih dinyatakan aman pada beban 18,5 ton dengan tegangan Von Mises sebesar 195,01 MPa dan safety factor 1,29. Namun, pada beban 22 ton, 25 ton, dan 37 ton, tegangan meningkat menjadi 231,90 MPa, 263,53 MPa, dan 390,02 MPa, sehingga melampaui tegangan izin BKI dan dinyatakan tidak aman. Sementara itu, berdasarkan BKI Material Strength sebesar 396,04 MPa, seluruh variasi pembebanan masih berada di bawah batas kekuatan material, sehingga konstruksi tetap aman terhadap kegagalan material. Oleh karena itu, beban 18,5 ton merupakan batas pembebanan yang direkomendasikan berdasarkan kriteria BKI Permissible Stress, sedangkan berdasarkan BKI Material Strength, konstruksi masih memiliki cadangan kekuatan hingga mendekati batas maksimum material.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis menggunakan *Finite Element Method (FEM)*, modifikasi konstruksi *towing hook* berupa penambahan *bracket* dan *stiffener* terbukti mampu meningkatkan performa struktur. Pada variasi pembebanan 4–15 ton, tegangan *Von Mises* menurun sekitar 13–15%, yaitu dari 40,483 MPa menjadi 35,027 MPa (4 ton), 71,329 MPa menjadi 61,017 MPa (7 ton), 122,274 MPa menjadi 104,443 MPa (12 ton), dan 151,817 MPa menjadi 130,554 MPa (15 ton). Selain itu, nilai *safety factor* meningkat dari 6,18 menjadi 7,13, 3,50 menjadi 4,09, 2,04 menjadi 2,39, dan 1,65 menjadi 1,91 pada masing-masing variasi pembebanan. Pada kondisi pembebanan ekstrem, berdasarkan *BKI Permissible Stress Criteria*, konstruksi masih memenuhi batas tegangan izin sebesar 195,05 MPa pada beban 18,5 ton dengan tegangan *Von Mises* 195,01 MPa dan safety factor 1,29. Namun, pada beban 22 ton, 25 ton, dan 37 ton, tegangan meningkat menjadi 231,90 MPa, 263,53 MPa, dan 390,02 MPa, sehingga melampaui tegangan izin BKI dan dinyatakan tidak aman untuk kondisi operasi. Sementara itu, berdasarkan *BKI Material Strength Criteria* sebesar 396,04 MPa, konstruksi masih berada di bawah batas kekuatan material hingga pembebanan 37 ton, sehingga belum mengalami kegagalan material. Dengan demikian, modifikasi konstruksi towing hook terbukti mampu meningkatkan distribusi tegangan, faktor keamanan, dan kapasitas struktur, sedangkan batas pembebanan operasi yang direkomendasikan berdasarkan ketentuan BKI adalah 18,5 ton.

Saran yang bisa dilakukan

Modifikasi konstruksi tidak hanya terbatas pada penambahan bracket dan stiffener, tetapi juga dapat dilakukan melalui variasi ketebalan pelat, perubahan dimensi bracket, perubahan bentuk stiffener, maupun optimasi geometri konstruksi sehingga diperoleh desain yang lebih efisien.

Variasi material selain ASTM A36, seperti AH36, DH36, EH36, atau baja berkekuatan tinggi lainnya dapat digunakan sebagai pembanding untuk mengetahui material yang paling optimal berdasarkan kekuatan, berat, dan biaya konstruksi.

5 Daftar Pustaka

- [1] FADHL ALHAKIM, “ANALISA PERHITUNGAN KEKUATAN STRUKTUR PONDASI WINDLASS PADA KAPAL HARBOUR TUG DENGAN METODE ELEMEN HINGGA,” 2021, hlm. 102.
- [2] T. A. Mizan, A. Fiveriati, M. A. Wahid, dan A. Hamid, “Analisa Kekuatan Konstruksi Pad Eye Towing Hook Kapal Tugboat 27 Meter Dengan Metode Elemen Hingga,” *1, Maret 2025*, pp.22-28, vol. 12, no. 1, 2025.
- [3] Z. A. Bhakti dan Subekti, “Analisis kekuatan dan safe working load (SWL) pada single crane hook menggunakan SolidWorks,” *KOLECER*, vol. 1, no. 2, hlm. 60–73, Des 2025, doi: 10.23969/ksjme.v1i2.28230.
- [4] A. I. Wulandari, Alamsyah, dan C. L. Agusty, “ANALISIS TEGANGAN REGANGAN PADA PELAT DECK DAN BOTTOM KAPAL FERRY RO-RO MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD,” *Jurnal Wave*, vol. 15, no. 1, hlm. 45–52, Des 2021, doi: 10.29122/jurnalwave.v15i1.4782.
- [5] A. Alamsyah, S. T. Pangestu, dan A. I. Wulandari, “Respon struktur akibat perubahan jarak stiffener pada car deck Kapal Ferry Ro-Ro,” *Turbo*, vol. 10, no. 2, Des 2021, doi: 10.24127/trb.v10i2.1705.
- [6] M. Z. Arifin, D. Kustono, dan W. Widiyanti, “Characteristics of ASTM A36 steel plate corrosion rate due to bending treatment with angle, corrosion media, and corrosion time variations,” *JEATech*, vol. 1, no. 1, Okt 2020, doi: 10.21831/jeatech.v1i1.31478.
- [7] I. P. Mulyatno, “ANALISA KEKUATAN KONSTRUKSI BRACKET TOWING HOOK PADA TB. BONTANG DENGAN METODE ELEMEN HINGGA DAN RULES BKI”.
- [8] P. Valentino, H. Yudo, dan A. F. Zakki, “Strength Analysis of Towing Hook Support Structure on TB. Khatulistiwa 01,” *IJMEIR*, vol. 7, no. 4, Des 2022, doi: 10.12962/j25481479.v7i4.14734.
- [9] Y. Prastyo, I. P. Mulyatno, H. Yudho, dan T. Perkapalan, “ANALISA KEKUATAN KONSTRUKSI MODIFIKASI DOUBLE BOTTOM AKIBAT ALIH FUNGSI PADA KAPAL ACCOMODATION WORK BARGE (AWB) 5640 DWT DENGAN METODE ELEMEN HINGGA”.
- [10] J. A. Putra dan M. N. Misbah, “Studi Pengaruh Ukuran Bracket Pondasi Mesin terhadap Tegangan dengan Menggunakan Finite Element Method,” *JTITS*, vol. 11, no. 1, hlm. G1–G6, Apr 2022, doi: 10.12962/j23373539.v11i1.82025.
- [11] R. Dahlan, “ANALISA PEMBEBANAN STATIS MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA”.
- [12] M. N. Zaibidi, I. P. S. Asmara, dan P. N. A. Nugroho, “Analisis Kekuatan Konstruksi Car Deck Akibat Penambahan Panjang pada Ro-Ro Passenger Ship,” *. e*, vol. 4, no. 1.
- [13] S. Rahayuningsih, G. Redhaningrum, T. Tiyasmihadi, F. Mahfud, M. A. Hazman, dan A. S. Khaqiqi, “ANALISIS KEKUATAN PONDASI TOWING WINCH KAPAL AHTS 7600 HP DENGAN FEM,” vol. 11, no. 1, 2025.
- [14] M. Aransyah, Y. Nurhuda, dan N. Pamungkas, “Analisis Kekuatan Sideboard pada Kapal Tongkang dengan Variasi Stanchion Menggunakan Simulasi FEM (Solidwork Simulation)”.
- [15] Hendrian Syah, “Analisis Kekuatan Struktur Kapal Tugboat Akibat Modifikasi Deck House,” *Dec 3, 2025*,

no. Vol. 19 No. 2 (2025).

[16] I. Surya *dkk.*, “Analisis Kekuatan Tarik Baja Karbon Sedang S45C Berdasarkan Eksperimen dan Simulasi Numerik Menggunakan SolidWorks”.

[17] M. A. Hazman, I. I. Widyastuti, S. Rahayuningsih, dan A. S. Khaqiqi, “ANALISIS PERBANDINGAN KEKUATAN KONSTRUKSI PARALLEL MIDDLE BODY OIL TANKER 5000DWT MENGGUNAKAN METODE TEORI BALOK DAN FINITE ELEMENT METHOD,” *IP*, vol. 15, no. 1, hlm. 66–76, Jun 2025, doi: 10.35314/7haf8862.

[18] K. Ayuhikmatin Sekarjati, T. Rusianto, A. A. Putu Susatriawan, dan A. Bagus Prasetyo, “Analisis Variasi Desain Beriket Towing Bar Menggunakan Metode Elemen Hingga Terhadap Nilai Keamanan Desain,” *JEMMTEC*, vol. 3, no. 02, hlm. 22–28, Jul 2024, doi: 10.61844/jemmttec.v3i02.776.

[19] D. Prabowo, U. Satria Jati, U. Ulikaryani, dan P. Hardini, “Simulasi Tegangan (Stress) Pada Komponen Rangka Mesin Uji Tarik Sealent Menggunakan Solidworks,” *infotekmesin*, vol. 14, no. 2, hlm. 405–412, Jul 2023, doi: 10.35970/infotekmesin.v14i2.1947.

[20] L. Damanik dan I. P. Mulyatno, “KAJIAN TEKNIK KEKUATAN KONSTRUKSI KAPAL TUGBOAT 2 x 800 HP DENGAN METODE ELEMEN HINGGA”.