



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Hull Girder Strength Akibat Modifikasi Layout Penampang Midship Section Pada Tongkang 330 Feet

Firman Setyaji¹⁾, Imam Pujo Mulyatno²⁾, Ahmad Fauzan Zakki³⁾

¹⁾Laboratorium Teknologi Struktur dan Kekuatan Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

^{*)}e-mail : firmansetyaji@students.undip.ac.id

Abstrak

Perubahan konstruksi pada tongkang akan berpengaruh terhadap kekuatan konstruksi dalam menahan beban muatan. Analisa kekuatan dilakukan pada area midship dengan menggunakan beban muatan batu bara pada kondisi loadcase 8309 ton, 10970 ton, dan 11810 ton. Tujuan dari kajian ini adalah mendapatkan nilai tegangan dan defleksi maksimum pada konstruksi area midship, membandingkan berat konstruksi sebelum dan setelah modifikasi, dan memperoleh layout yang efisien. Analisa dilakukan dengan menggunakan software elemen hingga dan menggunakan rules Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) sebagai acuan. Analisa perhitungan untuk memperoleh nilai modulus konstruksi dilakukan menggunakan software Strength Assessment of Hull Structure. Diperoleh untuk konstruksi bottom jumlah longitudinal stiffener semula berjumlah 38 buah menjadi 32 buah, konstruksi deck jumlah longitudinal stiffener semula berjumlah 40 buah menjadi 32 buah, dan konstruksi transverse bulkhead jumlah vertical stiffener semula berjumlah 40 buah menjadi 32 buah. Tegangan maksimum yang terjadi pada model 1 yaitu saat memuat 9301 ton batu bara dengan 4 gunungan yaitu sebesar 153,9 MPa. Sedangkan tegangan maksimum yang terjadi pada model 2 yaitu saat memuat 9301 ton batu bara dengan 4 gunungan yaitu sebesar 174,5 MPa. Berat konstruksi mengalami pengurangan sebesar 1,97%.

Kata Kunci : Hull Girder, Midship Section, Tegangan, Defleksi, Metode Elemen Hingga

1. PENDAHULUAN

Tongkang atau *pontoon* memiliki bentuk lambung yang menyerupai balok, dimana *coeffisien block* mendekati 1, dan tidak memiliki sistem penggerak, listrik, dan perpipaan yang mendukung. Tongkang yang membawa muatan harus memiliki kinerja yang baik, dalam hal daya angkut, kekuatan konstruksi, dan memiliki stabilitas yang baik. Oleh karena itu, efisiensi, ekonomis, dan efektifitas harus dipertimbangkan saat merancang tongkang [1]. Pada umumnya tongkang dapat di tarik dengan menggunakan kapal tunda atau dapat juga di dorong dengan menggunakan pusher tug [2].

Dalam merencanakan desain konstruksi tongkang harus memperhatikan aspek keselamatan agar tidak terjadi kegagalan struktur yang dapat menyebabkan kapal dapat patah. Desain sebuah kapal dapat dianggap sesuai regulasi baik nasional maupun internasional apabila konstruksi dari kapal tersebut mampu menahan beban yang diterima pada konstruksi tersebut [3].

Kekuatan *ultimate hull girder* lambung pada kapal besar merupakan indikator kapasitas beban maksimum yang dapat ditanggung, yang lebih diutamakan dalam perancangan dan penilaian kekuatan struktur dibandingkan dengan *working stress* yang diizinkan [4], [5], [6], [7]. Hal ini dapat dijelaskan karena margin keselamatan struktural tidak dapat ditentukan jika kekuatan *ultimate* tidak diketahui. Sebaliknya, *stress* yang diperbolehkan diformulasikan sebagai suatu fraksi dari sifat mekanik material, seperti tegangan luluh [8].

Analisa elemen hingga digunakan untuk mendapatkan nilai dari kekuatan *ultimate* pada material pelat dan *stiffener* melibatkan berbagai faktor seperti tegangan sisa [9], [10], [11] *initial deformation*, *boundary conditon* dan beban gabungan [12], [13] korosi dan kerusakan pada material pelat [14], [15]. Faktor-faktor tersebut berperan penting dalam evaluasi kekuatan struktur, terutama pada material selain baja [16], [17], [18].

Penelitian yang dilakukan oleh Dominguez dkk, membahas kegagalan struktur yang terjadi pada bagian midship kapal dapat disebabkan oleh

berat muatan serta beban gelombang pada area midship yang lebih besar. Pada penelitian tersebut struktur area midship mengalami penurunan sebesar 36,4 % dari ketebalan geladak akibat korosi. Dan berdasarkan pemodelan FEM, maksimal tegangan normal dan tegangan von mises struktur girder lambung kapal sebesar 175,54 MPa dan masing-masing sebesar 215,53 MPa [19]. Pada penelitian lain yang dilakukan Alamsyah dkk, melakukan analisa kekuatan memanjang kapal akibat perubahan panjang. Hasil analisa momen *ultimate* yang diperoleh pada kondisi *hogging* sebesar $1,49 \times 10^{12}$ Nmm, kondisi *sagging* sebesar $-1,42 \times 10^{12}$ Nmm [20].

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Mubarak dkk, membahas kekuatan batas lambung kapal akibat momen lentur vertikal dengan membandingkan antara grafik momen dengan *displacement*, kapal dapat menerima beban struktur yang diakibatkan oleh beban eksternal dari gelombang serta beban internal dari muatan kapal hingga mencapai *ultimate strength* pada struktur tersebut [21]. Dalam penelitian yang dilakukan Godwin dkk menjelaskan tegangan atau *displacement* yang terjadi pada suatu material pelat lebih dari batas elastis, maka sudah mencapai pada titik luluhnya. Oleh karena itu, material tidak akan kembali ke keadaan semula, oleh karena itu diharapkan dapat ditambahkan pengaku untuk mengeraskan pelat agar menjadi kokoh [22].

Penelitian lain yang dilakukan oleh Yu dkk, dengan judul *A Practical Method for Ship Structural Optimization* menjelaskan bahwa metode optimasi konstruksi kapal baru dilakukan dengan tujuan mengurangi biaya material dan tenaga kerja dengan syarat kekuatan struktur konstruksi terpenuhi sesuai persyaratan. Optimasi dilakukan dengan Finite Element Analysis seperti kekuatan luluh, kekuatan tekuk, dan persyaratan lainnya yang diperhitungkan untuk mengetahui semua beban berbahaya dan kondisi pemuatan diseluruh kondisi [23]. Pada penelitian yang lainnya membahas perhitungan distribusi tegangan dan deformasi pada struktur kapal tidak boleh melebihi nilai *ultimate stress* pada kondisi puncak gelombang terburuk yaitu *hogging* dan *sagging* [24].

Wulandari dkk, melakukan analisa pengaruh jarak gading terhadap kekuatan memanjang kapal, dimana *ultimate strength* kapal dipengaruhi oleh momen tekuk vertikal [25]. Pada penelitian lain kekuatan *ultimate* sisa pada pada suatu material di bawah beban siklik uniaxial dianalisa melalui analisa numerik dengan menggunakan elemen hingga non-linier. Laju perambatan retak di analisa dengan metode sederhana berdasarkan akumulasi regangan sisa pada ujung retak untuk

meningkatkan efisiensi komputasi [26]. Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Hu dkk, mendapati bahwa retakan pada panel tebal lebih cepat dari pada panel tipis. Selain itu, deformasi sisa yang timbul akibat beban siklik relatif kecil karena amplitude beban siklik lebih kecil dari kekuatan monotonik *ultimate* [27]. *Buckling* yang terjadi pada *hull girder* dapat mengalami beberapa siklus beban ekstrim dimana momen lentur yang disebabkan oleh gelombang ekstrim hingga melampaui kekuatan *ultimate* monotonik [28].

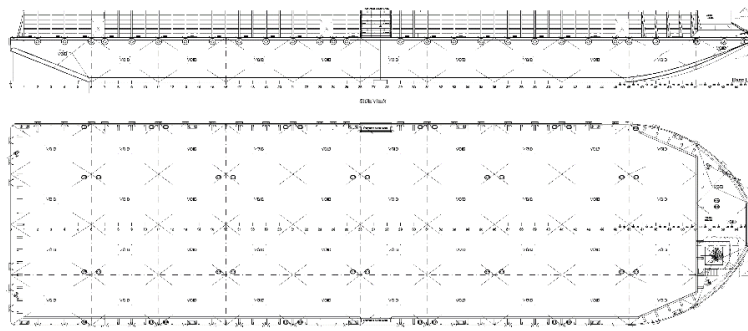
Sayebani dkk, melalui penelitiannya yang berjudul *Weight and Cost Optimization of Midship Section Using Common Structure Rules* menggunakan aturan CSR untuk memperoleh model optimasi yang optimal. Melalui bagian *midship* didapatkan bahwa pada optimasi konstruksi mengalami penurunan berat 2,18% yang disebabkan penurunan berat *plate*, pengurangan biaya konstruksi sebesar 3% yang menyebabkan biaya tenaga kerja terjadi pengurangan dikarenakan terdapat pengurangan jumlah *stiffener* sehingga mengurangi jumlah spot pengelasan yang dikerjakan [29].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penulis ingin melakukan kajian terhadap modifikasi konstruksi yang digunakan pada kapal tongkang 330 *feet* agar mendekati minimum *requirement* dari klasifikasi untuk memperoleh desain yang optimal dan dapat mengefisienkan waktu produksi. Adapun tujuan dari kajian ini yaitu mendapatkan nilai tegangan maksimum dan mengetahui area kritis pada konstruksi *midship* kapal tongkang dengan ukuran 330 *feet*, mendapatkan selisih berat model 2 terhadap model 1, serta mendapatkan model layout yang efisien dan aman.

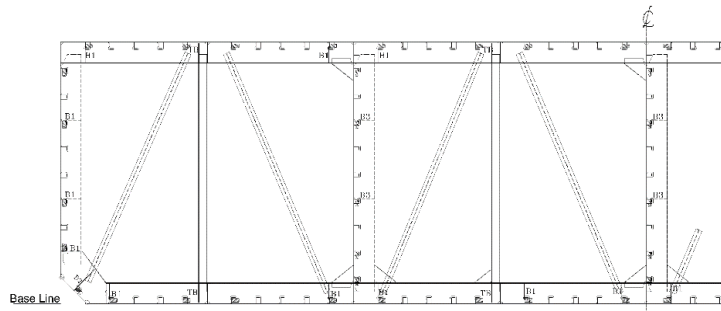
2. METODE

Data objek yang digunakan pada kajian ini adalah kapal tongkang dengan ukuran LOA (*Length Over All*) 100,58 meter, B (*Breadth*) 27,432 meter, H (*Height*) 6,096 meter, T (*Draught*) 4,797 meter. Dikarenakan permintaan pemilik kapal yang ingin pembangunan kapalnya cepat selesai, maka dari itu dilakukan modifikasi agar mendapatkan model layout yang optimal dan efisien.

Sistem konstruksi yang digunakan pada objek penelitian ini yaitu sistem konstruksi memanjang. Modifikasi dilakukan dengan menghitung nilai modulus dan margin setiap bagian konstruksi untuk mengetahui bagian konstruksi yang dapat dilakukan modifikasi hingga mendekati minimum *requirement* dari klasifikasi.



Gambar 1. *General Arrangement*



Gambar 2. *Midship Section*

Gambar 1 menunjukkan rancangan umum kapal yang digunakan untuk memahami distribusi pembagian tanki dan sekat kedap pada kapal. Gambar 2 merupakan gambar penampang melintang bagian tengah kapal yang bertujuan untuk memberikan informasi detail konstruksi seperti tebal pelat, jarak *stiffener*, serta elemen konstruksi lainnya.

2.1. Modifikasi Desain

Perhitungan nilai modulus dan margin konstruksi dilakukan pada bagian *midship section*. Konstruksi yang dihitung meliputi konstruksi *bottom*, *deck*, *side shell*, *longitudinal bulkhead*, dan *transverse bulkhead*. Setelah dilakukan perhitungan modulus dan margin konstruksi, diperoleh data konstruksi yang dapat dilakukan modifikasi mendekati *requirement* klas yaitu pada *longitudinal stiffener* dan *vertical stiffener*. Pada Tabel 1 merupakan data dari modifikasi pada masing-masing bagian konstruksi.

Tabel 1. Modifikasi Konstruksi

No	Bagian Konstruksi	Ukuran Profile (mm)	Jumlah (Intial)	Jumlah (Renew)
1	Bottom	150x90x9	38	32
2	Deck	150x90x9	40	32
3	Transverse Bulkhead	125x75x9	40	32

Data modifikasi konstruksi pada Tabel 1, kemudian di lakukan perhitungan nilai modulus dan margin konstruksi *midship section* sebelum dan setelah dimodifikasi.

Tabel 2. Nilai Modulus dan Margin Konstruksi Sebelum Modifikasi

Posisi Konstruksi	Nilai Modulus dan Margin		
	Wreq (m ³)	Wact (m ³)	Margin (%)
Deck	3,124	3,287	5,22
Bottom	3,124	3,233	3,49

Tabel 3. Nilai Modulus dan Margin Konstruksi Setelah Modifikasi

Posisi Konstruksi	Nilai Modulus dan Margin		
	Wreq (m ³)	Wact (m ³)	Margin (%)
Deck	3,124	3,193	2,21
Bottom	3,124	3,157	1,06

Dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3, modifikasi pada struktur *deck* dan *bottom* menyebabkan penurunan nilai margin dan modulus sehingga mendekati minimum *requirement* dari klas. Nilai modulus aktual masih lebih tinggi dibandingkan nilai minimum *requirement*, sehingga persyaratan konstruksi masih terpenuhi. Penurunan margin ini menunjukkan bahwa modifikasi meningkatkan efisiensi desain tanpa mengurangi kekuatan struktur.

2.2. Konsep Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan teknik matematis yang membagi geometri kompleks menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung melalui *node*. Persamaan yang menggambarkan sifat masing-masing elemen digabungkan menjadi sistem persamaan aljabar yang mewakili keseluruhan geometri. Data yang diperoleh dari perhitungan ini digunakan untuk menganalisis respons elemen-elemen tersebut dalam memperkirakan kondisi batas. Dalam analisis kekuatan, metode ini digunakan untuk menghitung tegangan *von Mises*. Suatu material dianggap aman jika tegangan *von Mises* (σ_{vm}) lebih kecil dari pada tegangan luluh material (σ_y) [30].

2.3. Pendefinisian Material

Material yang digunakan pada penelitian ini yaitu material pelat baja grade KI-A36 sesuai dengan ketentuan BKI, memiliki nilai *Density* 7850 kg/m³, *Modulus Elasticity* 200 GPa, *Ultimate Stress* 400 MPa, *Yield Stress* 235 MPa, *Poisson's Ratio* 0,3 [31].

2.4. Loading Scenario

Loading scenario pada kajian ini dilakukan dengan menghitung *loadcase* pada setiap muatan cargo yang dimuat. Pada kajian ini variasi pembebanan pada muatan terdapat 3 kondisi, dimana nilai saat kondisi kapal *lightship* sebesar 1669 ton yang kemudian menghitung nilai *Still Water Bending Moments* (SWBM) dan *Still Water Shear Force* (SWSF). Untuk mengetahui *loadcase* tidak melebihi *requirement*, perlu mengetahui kondisi maksimum SWBM dan SWSF. Pada perhitungan nilai maksimum SWBM sebesar 120000 kN.m dan nilai maksimum SWSF sebesar 8000 kN. **Error! Reference source not found.** merupakan *Loading Scenario* tiap kondisi *loadcase* dan berat muatan.

Tabel 4. Data *Loadcase* dan *Dead Weight*

Kondisi	<i>Load-case</i> (ton)	<i>Dead Weight</i> (ton)	SWBM (kN.m)	SWSF (kN)
Kondisi 1	8309	6640	66950	3170
Kondisi 2	10970	9301	56360	2870
Kondisi 3	11810	10141	51570	2720

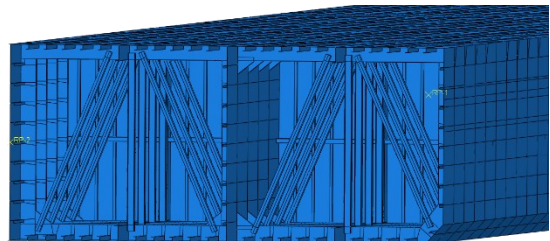
Peningkatan *loadcase* pada Tabel 4, menyebabkan perubahan distribusi beban yang mempengaruhi SWBM dan SWSF, tetapi semua kondisi masih berada dalam batas aman.

2.5. Finite Element Modelling

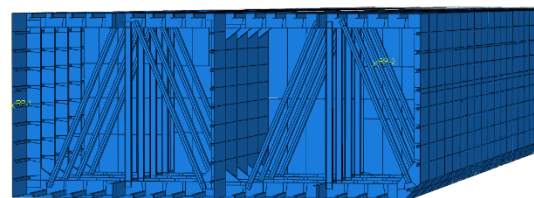
Sebelum melakukan analisa perhitungan numerik dengan menggunakan metode elemen hingga, penulis membuat model yang dimodelkan pada *software* elemen hingga. Salah satu cara pendekatan numerik untuk memecahkan solusi dari masalah-masalah fisik dimana solusi analitiknya sulit diselesaikan yaitu dengan menggunakan metode elemen hingga [32].

Pada penelitian ini, bagian konstruksi yang dimodelkan pada *software* elemen hingga yakni frame 6 – 46. Langkah awal dalam pembuatan model yaitu dengan pembuatan geometri sesuai dengan gambar *construction profile* yang ada.

Dalam kajian ini, permodelan menggunakan satuan *metric* (N/m², m, MPa) untuk settingan pada *software*.



a) Geometri Model 1 (Sebelum Modifikasi)



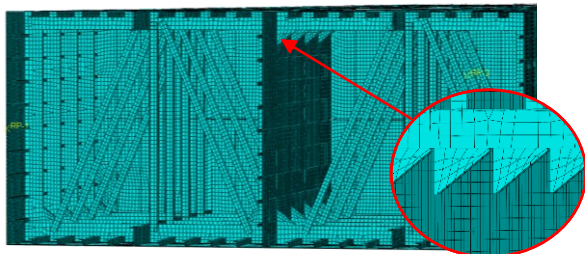
b) Geometri Model 2 (Setelah Modifikasi)

Gambar 3. Geometri Model a) Sebelum Modifikasi b) Setelah Modifikasi

Gambar 3 pada model 1 dan 2 jumlah *longitudinal stiffener* dan *vertical stiffener* sesuai gambar *profile construction* pada konstruksi *deck* dan *transverse bulkhead* berjumlah 40 buah dan *bottom* berjumlah 38 buah. Kemudian setelah dimodifikasi mengalami perubahan jumlah *stiffener* pada konstruksi *deck*, *transverse bulkhead* dan *bottom* yaitu menjadi 32 buah.

2.6. Meshing

Proses *meshing* harus dilakukan secara presisi agar detail struktur seperti *plate*, *profile*, dan penopang lainnya teridentifikasi oleh *software*. *Meshing* yang baik dapat memastikan bahwa hasil analisa yang dilakukan dapat menggambarkan respon struktur pada saat dikenai berbagai kondisi beban.



Gambar 4. Meshing

Dapat dilihat pada Gambar 4, Model ini menggunakan *meshing* dengan ukuran 0,1 m x 0,1 m dengan jenis *hexagonal structure* sehingga menghasilkan 708394 elemen dan menggunakan tipe elemen S4R (*A 4-node doubly curved thin or thick shell, reduced integration, hourglass control, finite membrane strains*).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pembahasan diatas, nilai margin dan modulus sudah mendekati *requirement* dari klasifikasi. Kajian ini akan memperoleh model layout *midship section* yang efisien dengan membandingkan hasil analisa tegangan dan defleksi untuk mengetahui model konstruksi yang telah dilakukan modifikasi apakah dapat menerima beban yang sama atau tidak dengan model konstruksi yang sebelum dimodifikasi.

3.1. Penentuan *Boundary Conditions*

Kondisi batas (*boundary conditions*) merupakan kondisi dimana batas-batas domain yang diterapkan pada analisa. Kondisi ini bersifat krusial dalam memecahkan solusi dari analisa elemen hingga untuk menggambarkan perilaku fisik dari struktur yang dianalisa. *Boundary conditions* mempengaruhi interaksi antara struktur dengan lingkungannya serta distribusi gaya dan respons keseluruhan sistem.

Kondisi *sagging* dan *hogging* pada kapal dalam menghadapi gelombang serta torsi pada gelombang miring merupakan keadaan umum yang terjadi pada struktur lambung kapal. Sebagai komponen yang terhubung dengan pelat *deck* atau pelat *bottom*, *longitudinal* sering berada dalam kondisi tegangan, pembengkokan, atau torsi [33].

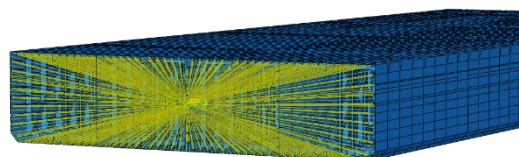
Penggunaan *Multi-Point Constraint* (MPC) ditempatkan pada sumbu netral [34]. Pemberian kondisi batas dengan MPC dapat menggambarkan distribusi tegangan dan deformasi selama *progressive collapse* [35]. Pemberian *boundary conditions* pada kajian ini diterapkan pada ujung model.

Tabel 5. *Boundary Conditions*

<i>Translation</i>			
Lokasi	δ_x	δ_y	δ_z
Ujung model depan	Fix	Fix	Fix
Ujung model belakang	-	Fix	Fix
<i>Rotation</i>			
Lokasi	δ_x	δ_y	δ_z
Ujung model depan	Fix	-	-
Ujung model belakang	Fix	-	-

Tabel 5 merupakan *boundary condition* yang digunakan pada kedua model. Kondisi pada model ini terdiri dari dua jenis beban. Pertama, momen lentur global yang ditentukan pada titik independen yang terhubung melalui MPC. Kedua, beban tekanan hidrostatik.

Kondisi batas ditetapkan sebagai *simply supported* pada setiap tepi kompartemen [36]. Pada tabel diatas keterangan '*fix*' menunjukkan bahwa sumbu tersebut dikunci. Gambar 5 merupakan penentuan kondisi batas pada model penelitian ini.



Gambar 5. *Boundary Conditions*

Gambar 5 menunjukkan representasi kondisi batas pada simulasi model yang telah dibuat dengan pembagian *mesh*. Warna kuning menunjukkan area yang diberi batasan pergerakan (*fixed*).

3.2. Pendefinisian Beban

a. Perhitungan Berat Pada 3 Kondisi Beban

Pada kajian ini terdapat 3 kondisi beban muatan batu bara yang di input, yakni 6640 ton, 9301 ton, dan 10141 ton. Proses *loading* dilakukan tanpa *trimming*. Adapun perhitungan tiap beban yaitu sebagai berikut.

$$W = m \times g \quad (1)$$

Tabel 6. Beban dan Berat Total Batu Bara

Kondisi	Massa (kg)	Berat Total (N)
1	6640000	65138400
2	9301000	91242810
3	10141000	99483210

Tabel 6 menunjukkan perhitungan berat pada 3 kondisi muatan batu bara. Dimana terdapat data dari massa muatan batu bara dan berat total yang didapat dari perhitungan perkalian dengan gravitasi. Kemudian dari data yang didapatkan, dilakukan perhitungan luasan per gunung dan kemudian didapatkan *pressure* per gunung batu bara yang dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Luasan dan *Pressure* Batu Bara per Gunung

Kondisi	Luasan per Gunung (m^3)	<i>Pressure</i> per Gunung (N/m^2)
1	829,82	78497,21
2	624,08	109653,13
3	499,26	119556,22

b. Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik merupakan tekanan yang dialami lambung kapal akibat adanya tekanan yang dihasilkan oleh air laut akibat pengaruh gravitasi. Perhitungan tekanan hidrostatik dihitung berdasarkan persamaan yang langsung dipengaruhi oleh massa jenis air laut (ρ), percepatan gravitasi (g), dan tinggi sarat kapal (h) [37] yang merupakan faktor penting dalam perencanaan analisa kekuatan struktur kapal, faktor tekanan yang tidak diperhitungkan dapat menyebabkan deformasi struktural pada bagian yang tidak teridentifikasi tekanan pada kondisi di laut.

$$Ph = \rho \times g \times h \quad (2)$$

Tabel 8. Tekanan Hidrostatik

Kondisi Beban	Tekanan Hidrostatik (N/m^2)
Kondisi 1	35193,4
Kondisi 2	45248,6
Kondisi 3	48375,8

Data nilai tekanan hidrostatik pada Tabel 8 diatas merupakan tekanan yang bekerja pada lambung kapal. Nilai dari tekanan hidrostatik

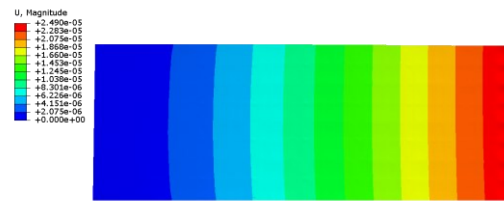
ini digunakan sebagai *input pressure* pada permukaan lambung kapal untuk mensimulasikan beban akibat tekanan air.

3.3. Validasi Model

Validasi model pada penelitian ini dilakukan dengan membandingkan hasil deformasi yang dilakukan pada perhitungan analitik dan hasil deformasi dengan menggunakan *software*. Berdasarkan rumus perhitungan manual buku mekanika bahan, dapat menggunakan perhitungan sebagai berikut [38].

$$V_{max} = \frac{F \cdot L^3}{3 \times E \times I} \quad (5)$$

Dimana, F yaitu *Force* (N), L adalah panjang model (mm), E merupakan modulus elastisitas (MPa), dan I adalah momen inersia (mm^4). Sehingga dilakukan perhitungan analitik dan perhitungan dengan menggunakan *software*.



Gambar 6. Defleksi Model 1



Gambar 7. Defleksi Model 2

Pada Gambar 6, defleksi yang terjadi pada model 1 yaitu pada sebesar 0,0249 mm. Sedangkan pada Gambar 7, defleksi yang terjadi pada model 2 sebesar 0,0243 mm. Pada perhitungan analitik, pada model 1 nilai defleksi sebesar 0,0267 mm dan pada model 2 nilai defleksi sebesar 0,0293 mm.

Tabel 9. Nilai V_{max}

Model	Perhitungan Manual (mm)	Perhitungan <i>Software</i> (mm)	Error
1	0,0267	0,0249	6,87%
2	0,0293	0,0243	2,93%

Pada Tabel 9 merupakan hasil perbandingan antara perhitungan analitik dan perhitungan *software*, didapatkan persentase *error* sebesar

6,87% dan 2,93%. Model sudah dikatakan valid, karena persentase *error* masih dibawah 10%.

3.4. Perhitungan *Midship Section Modulus*

Menurut aturan Biro Klasifikasi Indonesia *Rules for Hull* Edisi 2025, Volume II Section 5. C. 2. 2.1, nilai modulus pada konstruksi *deck* dan *bottom* tidak boleh kurang dari *requirement* berikut [39].

$$W_{min} = k \cdot c_0 \cdot L^2 \cdot B (C_B + 0,7) 10^{-6} \quad (3)$$

$$W_{act} > W_{min} \quad (4)$$

Dimana, untuk kapal yang diklasifikasikan dengan daerah pelayaran terbatas, *requirement* minimum modulus dapat dikurangi yaitu untuk **P** (layanan laut terbatas) sebesar 5%, **L** (layanan pelayaran) sebesar 15%, dan **T** (layanan air terlindung) sebesar 25%. Perhitungan *midship section* modulus sebelum modifikasi dan setelah modifikasi disajikan pada Tabel 10 dan Tabel 11.

Tabel 10. Nilai Modulus *Midship Section* Model 1

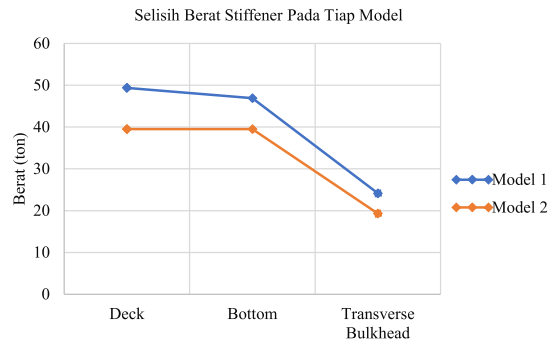
Posisi	$W_{Requirement}$	W_{Actual}	Status
<i>Deck</i>	3,124	3,287	Memenuhi
<i>Bottom</i>	3,124	3,233	Memenuhi

Tabel 11. Nilai Modulus *Midship Section* Model 2

Posisi	$W_{Requirement}$	W_{Actual}	Status
<i>Deck</i>	3,124	3,193	Memenuhi
<i>Bottom</i>	3,124	3,157	Memenuhi

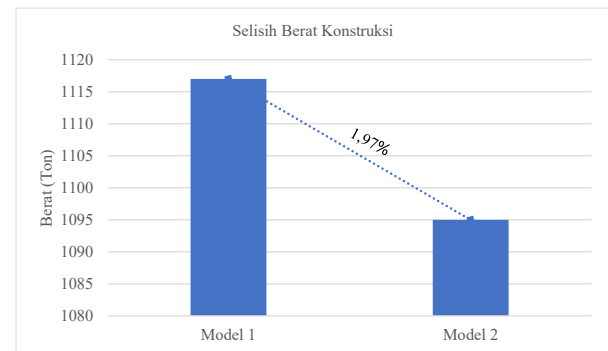
3.5. Hasil Selisih Berat Konstruksi

Dalam perhitungan berat konstruksi terdapat perbedaan antara berat konstruksi yang sebelum dimodifikasi dengan berat konstruksi yang sudah dimodifikasi. Pada penelitian ini berfokus pada konstruksi *longitudinal stiffener* yang mengalami modifikasi pada bagian *deck* dan *bottom*, serta *vertical stiffener* pada *transverse bulkhead*.



Gambar 8. Grafik Selisih Berat *Stiffener* Pada Tiap Model

Pada Gambar 8 merupakan data perhitungan selisih berat *stiffener* pada setiap model. Selisih berat *stiffener* pada konstruksi *deck* yaitu 9,876 ton, pada konstruksi *bottom* sebesar 7,407 ton, dan pada konstruksi *transverse bulkhead* sebesar 4,823 ton. Berat konstruksi mengalami pengurangan sebesar 22 ton dengan persentase 1,97 % yang ditampilkan pada Gambar 9.

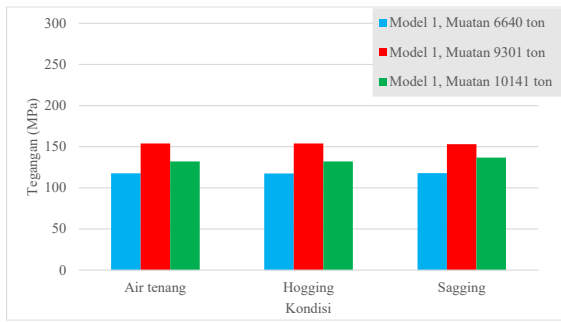


Gambar 9. Persentase Selisih Berat Konstruksi

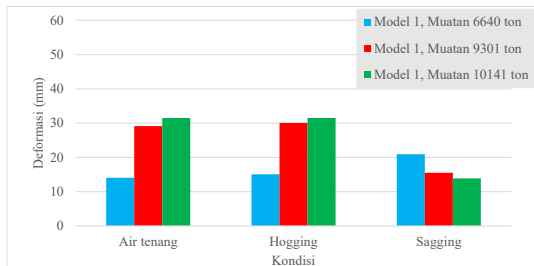
3.6. Hasil Analisa Model

Hasil analisis struktur yang telah dilakukan dirangkum untuk mengetahui gambaran menyeluruh mengenai kekuatan dan respon struktur tongkang setelah modifikasi. Analisis melibatkan evaluasi tegangan maksimum dan deformasi yang terjadi pada berbagai kondisi beban serta membandingkannya dengan model sebelum modifikasi.

Data hasil simulasi dianalisa mencakup tegangan maksimum dan deformasi maksimum. Dari penelitian yang telah dilaksanakan, hasil analisis struktur yang disajikan dalam Gambar 10 dan Gambar 11.



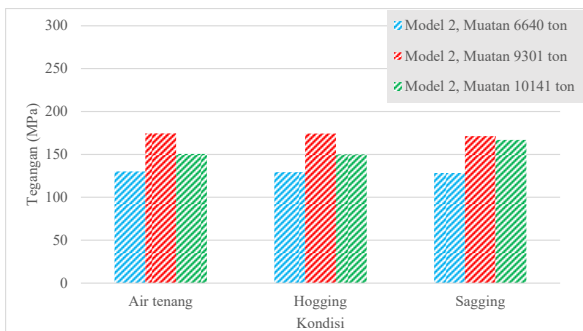
a) Tegangan



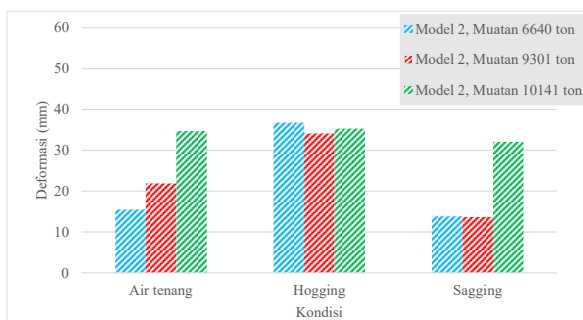
b) Deformasi

Gambar 10. Hasil Analisa a) Tegangan dan b) Deformasi Model 1 Tiap Kondisi

Gambar 10 merupakan data hasil analisa tegangan dan deformasi pada model 1. Pada muatan 6640 ton, tegangan dan deformasi terbesar terjadi pada kondisi *sagging*. Pada muatan 9301 ton, tegangan dan deformasi terbesar terjadi pada kondisi *Hogging*. Pada muatan 10141 ton, tegangan kondisi *sagging* dan deformasi terbesar pada kondisi *hogging*.



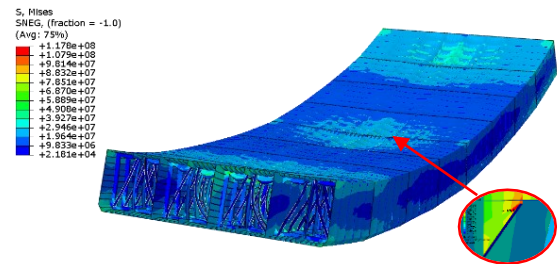
a) Tegangan



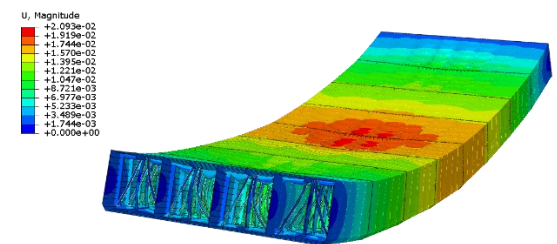
b) Deformasi

Gambar 11. Hasil Analisa a) Tegangan dan b) Deformasi Model 2 Tiap Kondisi

Gambar 11 merupakan data hasil analisa tegangan dan deformasi pada model 2. Pada muatan 6640 ton, tegangan terbesar terjadi pada kondisi air tenang dan deformasi terbesar terjadi pada kondisi *hogging*. Pada muatan 9301 ton, tegangan terbesar terjadi pada kondisi air tenang dan deformasi terbesar terjadi pada kondisi *hogging*. Pada muatan 10141 ton, tegangan terbesar terjadi pada kondisi *sagging* dan deformasi terbesar terjadi pada kondisi *hogging*.



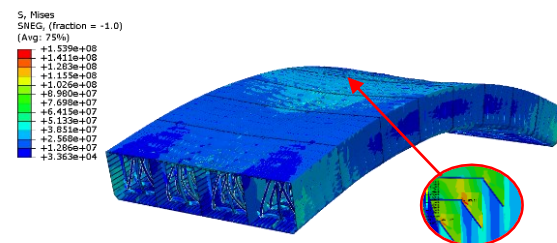
a) Kontur Tegangan



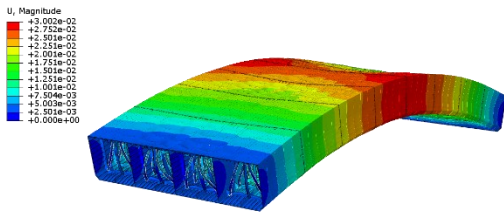
b) Kontur Deformasi

Gambar 12. Kontur a) Tegangan dan b) Deformasi Terbesar Model 1 Pada Muatan 6640 ton

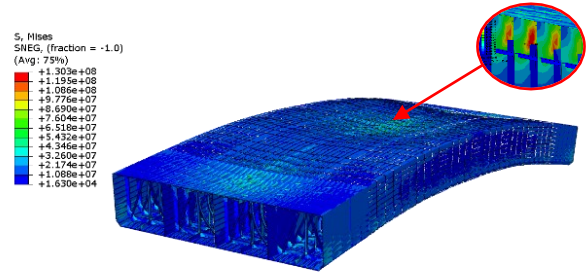
Gambar 12 merupakan kontur tegangan dan deformasi terbesar model 1 pada muatan 6640 ton dengan metode 3 gunungan. Tegangan terbesar terjadi pada *bracket* dengan nilai *ultimate strength* (*von mises*) yang terjadi sebesar 117,8 MPa pada *node* 240704 dengan deformasi terbesar sebesar 20,93 mm.



a) Kontur Tegangan



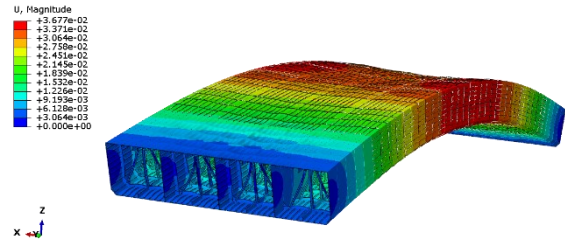
b) Kontur Deformasi



a) Kontur Tegangan

Gambar 13. Kontur a) Tegangan dan b) Deformasi Terbesar Model 1 Pada Muatan 9301 ton

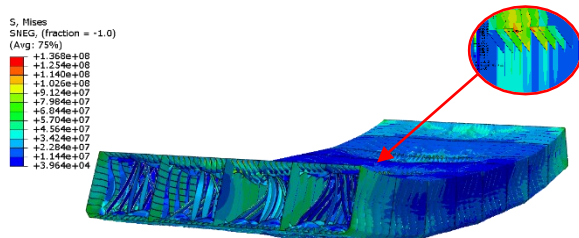
Gambar 13 merupakan kontur tegangan dan deformasi terbesar model 1 pada muatan 9301 ton dengan metode 4 gunungan. Tegangan terbesar terjadi pada *bracket* dengan nilai *ultimate strength (von mises)* yang terjadi sebesar 153,9 MPa pada *node* 193975 dengan deformasi terbesar sebesar 30,02 mm.



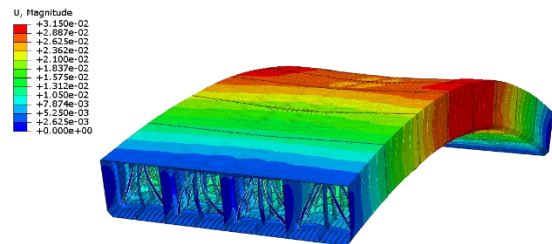
b) Kontur Deformasi

Gambar 15. Kontur a) Tegangan dan b) Deformasi Terbesar Model 2 Pada Muatan 6640 ton

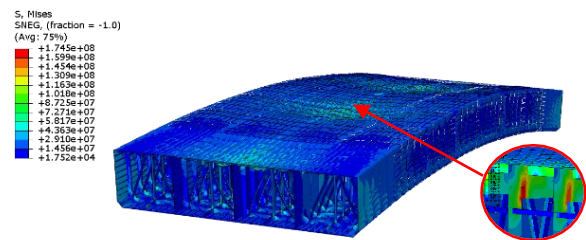
Gambar 15 merupakan kontur tegangan dan deformasi terbesar model 2 pada muatan 6640 ton dengan metode 3 gunungan. Tegangan terbesar terjadi pada *transverse web deck* dengan nilai *ultimate strength (von mises)* yang terjadi sebesar 130,3 MPa pada *node* 1331 dengan deformasi terbesar sebesar 36,77 mm.



a) Kontur Tegangan



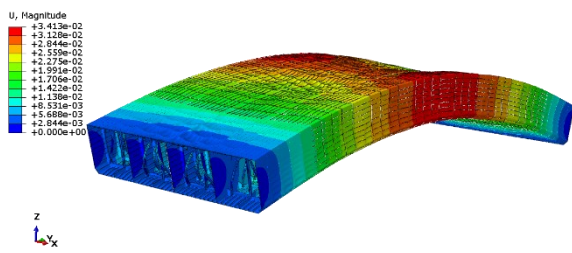
b) Kontur Deformasi



a) Kontur Tegangan

Gambar 14. Kontur a) Tegangan dan b) Deformasi Terbesar Model 1 Pada Muatan 10141 ton

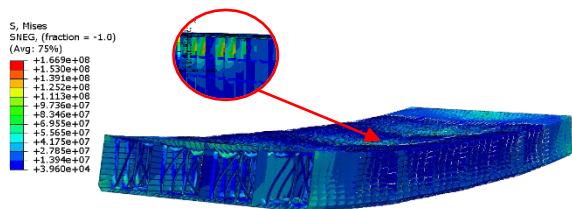
Gambar 14 merupakan kontur tegangan dan deformasi terbesar model 1 pada muatan 10141 ton dengan metode 5 gunungan. Tegangan terbesar terjadi pada *bracket* dengan nilai *ultimate strength (von mises)* yang terjadi sebesar 136,8 MPa pada *node* 85044 dengan deformasi terbesar sebesar 31,5 mm.



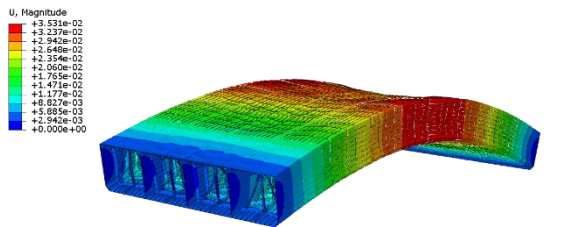
b) Kontur Deformasi

Gambar 16. Kontur a) Tegangan dan b) Deformasi Terbesar Model 2 Pada Muatan 9301 ton

Gambar 16 merupakan kontur tegangan dan deformasi terbesar model 2 pada muatan 9301 ton dengan metode 4 gunungan. Tegangan terbesar terjadi pada *transverse web deck* dengan nilai *ultimate strength (von mises)* yang terjadi sebesar 174,5 MPa pada node 16340 dengan deformasi terbesar sebesar 34,13 mm.



a) Kontur Tegangan



b) Kontur Deformasi

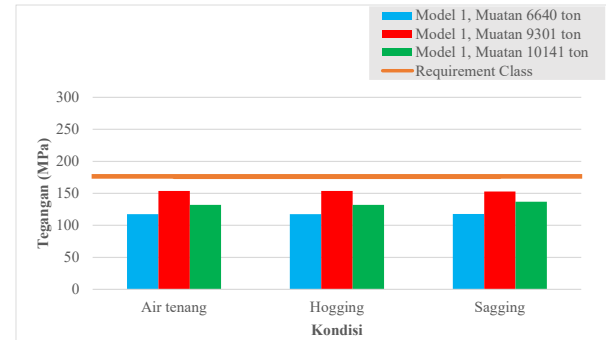
Gambar 17. Kontur a) Tegangan dan b) Deformasi Terbesar Model 2 Pada Muatan 10141 ton

Gambar 17 merupakan kontur tegangan dan deformasi terbesar pada model 2 pada muatan 10141 ton dengan metode 5 gunungan. Tegangan terjadi pada *transverse web deck* dengan nilai *ultimate strength (von mises)* yang terjadi sebesar 166,9 MPa pada node 1195 dengan deformasi terbesar sebesar 35,31 mm.

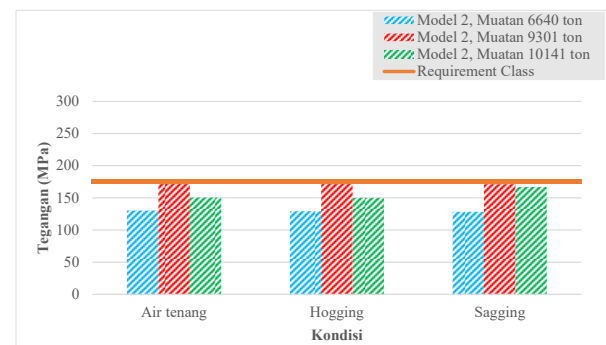
3.7. Faktor Keamanan Terhadap Requirement Klasifikasi

Untuk melihat faktor keamanan dari suatu konstruksi, dilakukan pengecekan dengan

membandingkan nilai kekuatan maksimum dengan tegangan ijin sesuai aturan BKI. Berdasarkan *Rules For Hull* BKI Edisi 2025, Volume II tegangan ijin kekuatan memanjang untuk material grade A yaitu 175 N/mm². Pada Gambar 18 telah dirangkum perbandingan nilai tegangan maksimum yang terjadi terhadap tegangan ijin dari BKI.



a) Model 1



b) Model 2

Gambar 18. Grafik Perbandingan Nilai Tegangan Maksimum a) Model 1 dan b) Model 2 Dengan Tegangan Ijin BKI

Gambar 18 merupakan grafik yang menunjukkan perbandingan nilai tegangan pada model 1 dan model 2 dengan tiga variasi beban dalam kondisi air tenang, *hogging*, dan *sagging* dengan *requirement class*. Hasil analisa menunjukkan bahwa tegangan meningkat seiring bertambahnya beban, dengan nilai tertinggi pada kondisi *hogging* dan *sagging*. Namun, seluruh tegangan yang dihasilkan masih berada di bawah batas *requirement class*, sehingga kedua model tetap memenuhi persyaratan desain struktural dalam skenario pembebanan yang diuji.

4. KESIMPULAN

- 1) Tegangan maksimum yang terjadi pada model 1 adalah saat memuat 9301 ton batu bara dengan 4 gunungan yaitu sebesar 153,9 MPa. Dan tegangan maksimum yang terjadi pada model 2 adalah saat memuat 9301 ton batu bara dengan 4 gunungan yaitu sebesar 174,5

MPa. Tegangan maksimum terjadi pada *bracket* dan *transverse web deck*.

- 2) Berat konstruksi model 2 mengalami pengurangan sebesar 1,97% dari model 1.
- 3) Model 2 merupakan model yang efisien karena dengan pengurangan *stiffener* nilai tegangan yang terjadi masih memenuhi kriteria minimum BKI dan konstruksi lebih ringan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Shabrina Riyanto, H. Yudo, dan A. Trimulyono, "Analisa Kekuatan Deck Akibat Perubahan Muatan Pada Tongkang TK. NELLY – 34," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 8, no. 3, Jul 2020, [Daring]. Tersedia pada: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [2] D. R. Lekatompessy, "Efisiensi Penggunaan Material Konstruksi Tongkang Melalui Analisis Resonansi Getaran," Feb 2024.
- [3] K. Fajri, I. Pujo Mulyatno, dan Kiryanto, "Analisa Kekuatan Deck pada Kapal Landing Craft Tank (LCT) 1100 DWT akibat Perubahan Muatan Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 11, no. 2, Apr 2023.
- [4] J. K. Paik dan A. K. Thayamballi, *Ship-shaped offshore installations: design, building, and operation*. Cambridge University Press, 2007.
- [5] J. K. Paik dan A. K. Thayamballi, *Ultimate Limit State Design of Steel Plated Structures*. Wiley, 2003.
- [6] "Ships and marine technology—Ship structures, Part 1: General requirements for their limit state assessment," Geneva, 2007.
- [7] "Ships and marine technology—Ship structures, Part 2: Requirements for their ultimate limit state assessment," Geneva, 2008.
- [8] A. W. A. Hussein, C. G. Soares, dan A. M. P. Teixeira, "Impact of the New Common Structural Rules On the Reliability of a Bulk Carrier," dalam *Advances in Marine Structures - Proceedings of MARSTRUCT 2007*, 2007, hlm. 529–538.
- [9] J. K. Paik dan J. M. Sohn, "Effects of Welding Residual Stresses on High Tensile Steel Plate Ultimate Strength: Nonlinear Finite Element Method Investigations," dalam *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, 2010, hlm. 213–220.
- [10] I. A. Khan dan S. Zhang, "Effects of welding-induced residual stress on ultimate strength of plates and stiffened panels," *Ships and Offshore Structures*, vol. 6, hlm. 297–309, 2011.
- [11] L. Gannon, Y. Liu, N. Pegg, dan M. J. Smith, "Effect of welding-induced residual stress and distortion on ship hull girder ultimate strength," *Marine Structures*, vol. 28, hlm. 25–49, 2012.
- [12] S. Zhang dan L. Jiang, "Effects of initial imperfection shapes on plate ultimate strength under combined loads," dalam *Analysis and Design of Marine Structures*, 2015, hlm. 497–502.
- [13] W. Cui, Y. Wang, dan P. T. Pedersen, "Strength of Ship Plates Under Combined Loading," *Marine Structures*, vol. 15, hlm. 75–97, 2002.
- [14] Â. P. Teixeira dan C. G. Soares, "Ultimate Strength of Plates with Random Fields of Corrosion," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 4, hlm. 363–370, 2008.
- [15] S. Saad-Eldeen, Y. Garbatov, dan C. G. Soares, "Ultimate Strength analysis of a Highly Damaged Plates," *Marine Structures*, vol. 45, hlm. 63–85, 2016.
- [16] V. T. Doan, B. Liu, Y. Garbatov, W. Wu, dan C. Guedes Soares, "Strength assessment of aluminium and steel stiffened panels with openings on longitudinal girders," *Ocean Engineering*, vol. 200, 2020.
- [17] B. Liu, V. T. Doan, Y. Garbatov, W. Wu, dan C. Guedes Soares, "Study on Ultimate Compressive Strength of Aluminium-Alloy Plates and Stiffened Panels," *Journal of Marine Science and Application*, vol. 19, hlm. 534–552, 2020.
- [18] C. Li, H. Ren, Z. Zhu, dan C. Guedes Soares, "FEM Analysis of the Ultimate Strength of Aluminum Stiffened Panels

With Fixed and Floating Transverse Frames,” 2015.

- [19] C. M. Salazar-Domínguez, J. Hernández-Hernández, E. D. Rosas-Huerta, G. E. Iturbe-Rosas, dan A. L. Herrera-May, “Structural Analysis of a Barge Midship Section Considering the Still Water and Wave Load Effects,” *J Mar Sci Eng*, vol. 9, no. 1, hlm. 1–21, Jan 2021, doi: 10.3390/jmse9010099.
- [20] Alamsyah, A. Ika Wulandari, dan A. Noor Aini, “Analisis Kekuatan Memanjang Akibat Perubahan Panjang Pada Kapal Ferry Ro-Ro 687 GT,” *JURNAL INOVTEK POLBENG*, vol. 11, no. 2, Nov 2021.
- [21] A. Aras Mubarak, G. Sitepu, dan M. Zubair Muiz Alie, “Kekuatan Batas Lambung Kapal dalam Menahan Momen Lentur Vertikal,” *Jurnal Penelitian Enjiniring*, vol. 22, no. 1, hlm. 56–61, Mei 2018, doi: 10.25042/jpe.052018.10.
- [22] U. Godwin, A. Pullar, dan U. Precious, “Effect of Static Load on Work Barge Deck Structure,” *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, vol. 11, hlm. 79–91, Jul 2023, [Daring]. Tersedia pada: www.ijres.org
- [23] Y.-Y. Yu, C.-G. Jin, Y. Lin, dan Z.-S. Ji, *A Practical Method for Ship Structural Optimization*. Beijing: International Society of Offshore and Polar Engineering Conference, 2010.
- [24] L. A. Moise, C. Hogaş, L. Domnişoru, dan C. I. Mocanu, “Global Strength Analysis For a Split Hopper Barge Subject To Head Equivalent Design Wave,” 2019.
- [25] A. Ika Wulandari, Alamsyah, dan N. Aprilia Dewi, “Analisis Pengaruh Jarak Gading Terhadap Kekuatan Memanjang Kapal Ferry Ro-Ro 5000 GT,” *Jurnal Teknologi Terpadu*, vol. 2, Okt 2020.
- [26] T. Xia, P. Yang, C. Li, dan K. Hu, “Numerical research on residual ultimate strength of ship hull plates under uniaxial cyclic loads,” *Ocean Engineering*, vol. 172, hlm. 385–395, Des 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.12.017.
- [27] K. Hu, P. Yang, dan T. Xia, “Ultimate strength prediction of cracked panels under extreme cyclic loads considering crack propagation,” *Ocean Engineering*, vol. 266, Okt 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112948.
- [28] S. Li, Z. Hu, dan S. Benson, “Progressive collapse analysis of ship hull girders subjected to extreme cyclic bending,” *Marine Structures*, vol. 73, Jul 2020, doi: 10.1016/j.marstruc.2020.102803.
- [29] M. Sayebani, A. Mohammadrahimi, dan H. K. Looyeh, “Weight and Cost Optimization of Midship Section Using Common Structural Rules,” *Journal of Ship Production and Design*, vol. 36, no. 3, hlm. 171–180, Agu 2020, doi: 10.5957/JSPD.01190002.
- [30] D. D. Sanjaya, S. H. Sujiatanti, dan T. Yulianto, “Analisis Kekuatan Konstruksi Wing Tank Kapal Tanker Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *Jurnal Teknik ITS*, vol. 6, no. 2, 2017, doi: 10.12962/j23373539.v6i2.27408.
- [31] Biro Klasifikasi Indonesia, “Rules For Material,” 2024 ed., vol. 5, 2024, Section 4.
- [32] D. L. Logan, “A First Course in the Finite Element Method,” 4 ed., H. James, Ed., Carson, Chris, 2007.
- [33] L. Fan, H. Yu-meng, F. Guo-qing, Z. Weidong, dan Z. Ming, “A Study on the Multi-Objective Optimization Method of Brackets in Ship Structures,” *China Ocean Engineering*, vol. 36, no. 2, hlm. 208–222, Nov 2021, doi: 10.1007/s13344-022-0018-7.
- [34] T. Rizkiani, M. I. Ramadhan, dan M. Z. M. Alie, “Progressive Collapse Behaviour of VLCC under Longitudinal Bending,” dalam *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Okt 2019. doi: 10.1088/1757-899X/619/1/012008.
- [35] K. : Jurnal, I. Pengetahuan, T. Kelautan, I. M. Suci, G. Sitepu, dan M. Z. M. A. Alie, “Longitudinal Strength Analysis Considering the Cargo Load on Very Large Crude Carrier (VLCC),” *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, vol. 18, no. 3, hlm. 171–177, Des 2021.
- [36] A. F. Zakki dan S. J. Sisworo, “Hull Girder Ultimate Strength Analysis of 17500 LTDW Oil Tanker under the Combined

Global and Local Load using Explicit Finite Element Analysis,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 1198, no. 1, hlm. 012003, Jun 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1198/1/012003.

- [37] V. E. Cardoso dan S. Botello, “Parallel Meshing for Finite Element Analysis,” *High Performance Computer Applications*, vol. 595, hlm. 156–168, Apr 2016.
- [38] J. M. Gere dan S. P. Timoshenko, “MEKANIKA BAHAN,” 4 ed., W. Hardani, Ed., Ciracas, Jakarta: Erlangga.
- [39] Biro Klasifikasi Indonesia, “Rules For Hull,” 2025 ed., vol. 2, 2025. Tersedia pada: www.bki.co.id