

Analisis Perbandingan Kekuatan dan Deformasi Struktur Fondasi *Main Engine* Kapal Menggunakan Material ASTM A131 Grade A dan Grade AH32

Sanjung Erikson Parhusip^{*1}, Oki Setiawan^{*} and Hendra Saputra^{*}

^{*} Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

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

¹E-mail: info@polibatam.ac.id

Abstrak

Fondasi main engine merupakan komponen penting pada konstruksi kapal yang berfungsi menopang beban mesin induk serta menyalurkan beban operasi ke struktur kapal. Perancangan fondasi harus memenuhi persyaratan kekuatan dan keselamatan sesuai Lloyd's Register Rules and Regulations for the Classification of Ships. Penelitian ini bertujuan menganalisis kekuatan struktur main engine seating foundation, membandingkan desain aktual, desain berdasarkan standar minimum Lloyd's Register, dan desain modifikasi, serta mengevaluasi pengaruh penggunaan material ASTM A131 Grade AH32 dan ASTM A131 Grade A. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) pada ANSYS Mechanical dengan pembebanan berupa berat main engine, gearbox, momen torsi, dan tekanan hidrostatik. Validasi dilakukan melalui perbandingan hasil simulasi dengan perhitungan analitik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh variasi desain memenuhi persyaratan Lloyd's Register karena nilai tegangan maksimum, deformasi, dan safety factor masih berada dalam batas yang diizinkan. Desain aktual menghasilkan tegangan maksimum sebesar 43,12 MPa, deformasi maksimum 0,41479 mm, dan safety factor 10,80, sedangkan desain berdasarkan standar minimum Lloyd's Register menghasilkan tegangan maksimum 75,69 MPa, deformasi maksimum 0,56260 mm, dan safety factor 8,88. Desain modifikasi memberikan performa struktur terbaik dengan tegangan maksimum 36,33 MPa, deformasi maksimum 0,39952 mm, dan safety factor 14,12. Hasil validasi menunjukkan persentase kesalahan sebesar 0,93% dan 0,83%, dan 0,71% yang menunjukkan kesesuaian antara hasil simulasi dan perhitungan analitik. Dengan demikian, desain modifikasi direkomendasikan sebagai alternatif yang lebih baik karena mampu meningkatkan kinerja struktur tanpa mengurangi aspek keselamatan.

Kata kunci: *Finite Element Method*, fondasi *main engine*, Lloyd's Register, tegangan ekuivalen, deformasi, *safety factor*.

Abstract

The main engine foundation is a critical structural component of a ship that supports the engine load and transfers operational loads to the ship's hull structure. Its design must comply with the strength and safety requirements specified in the Lloyd's Register Rules and Regulations for the Classification of Ships. This study aims to evaluate the structural strength of the main engine seating foundation, compare the existing design, the Lloyd's Register minimum design, and the modified design, and investigate the effect of using ASTM A131 Grade AH32 and ASTM A131 Grade A steels. The analysis was performed using the Finite Element Method (FEM) in ANSYS Mechanical under static loading conditions, including the main engine weight, gearbox weight, torsional moment, and hydrostatic pressure. The simulation results were validated through comparison with analytical calculations. The results show that all design variations satisfy the Lloyd's Register requirements, as the maximum stress, deformation, and safety factor remain within the allowable limits. The existing design produced a maximum stress of 43.12 MPa, a maximum deformation of 0.41479 mm, and a safety factor of 10.80. The Lloyd's Register minimum design generated a maximum stress of 75.69 MPa, a maximum deformation of 0.56260 mm, and a safety factor of 8.88. The modified design demonstrated the best structural performance, with a maximum stress of 36.33 MPa, a maximum deformation of 0.39952 mm, and a safety factor of 14.12. The validation results showed percentage errors of 0.93% and 0.83%, indicating good agreement between the numerical simulation and the analytical calculations. Therefore, the modified design is recommended as a better alternative because it improves structural performance while maintaining structural safety.

Keywords : Finite Element Method, main engine foundation, Lloyd's Register, equivalent stress, deformation, safety

factor.

1 Pendahuluan

Batam merupakan kota yang memiliki posisi strategis di sektor maritim karena letaknya yang dekat dengan Selat Malaka, Singapura, dan Malaysia. Kondisi ini mendorong perkembangan industri perkapalan sehingga galangan kapal menjadi salah satu sektor penting di kota tersebut. Dalam operasional kapal, *main engine* berfungsi sebagai penggerak utama yang menentukan performa kapal, sehingga memerlukan fondasi yang kuat dan stabil untuk menopang beban serta menyalurkan gaya ke struktur kapal [1], Fondasi yang tidak kuat dapat mempengaruhi sistem propulsi dan menyebabkan risiko seperti *misalignment* akibat deformasi berlebih[2]. Struktur fondasi *main engine* umumnya berupa konstruksi baja yang dirancang untuk menahan beban statis mesin, sehingga dua parameter utama yang menjadi perhatian adalah tegangan dan deformasi. Tegangan harus berada di bawah *allowable stress* untuk mencegah kegagalan struktur[3], sedangkan deformasi harus dijaga sekecil mungkin agar kestabilan *main engine* tetap terjaga[2].

Dalam perancangan desain fondasi *main engine*, dimensi dan ketebalan pelat diatur oleh salah satu badan klasifikasi seperti *Lloyd's Register* (LR)[4] yang menetapkan ketebalan minimum untuk memenuhi kriteria kekuatan dan keselamatan, Selain ketebalan pelat, pemilihan material juga mempengaruhi performa struktur. Penelitian ini menggunakan material ASTM A131 Grade A dan ASTM A131 Grade AH32 sebagai perbandingan. Berdasarkan yang saya gunakan ASTM A131 Grade AH32 memiliki kekuatan luluh sebesar 363 MPa, sedangkan ASTM A131 Grade A memiliki kekuatan luluh sekitar 323 MPa berdasarkan *material certificate*. Variasi penelitian dibatasi pada ketebalan pelat kondisi aktual dan standar *Lloyd's Register* (LR), dengan analisis difokuskan pada tegangan, deformasi, dan faktor keamanan struktur fondasi *main engine* akibat pembebanan statis ekuivalen.

Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/ FEM*) karena mampu mengidentifikasi distribusi tegangan, deformasi, dan titik kritis struktur berdasarkan kondisi pembebanan[5]. Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa metode elemen hingga (FEM) efektif digunakan untuk menganalisis kekuatan struktur fondasi mesin kapal. Penelitian pada fondasi *main engine* kapal *harbour tug boat* menghasilkan tegangan maksimum 267,1 MPa dengan *safety factor* 1,12 yang masih berada di bawah batas izin 300 MPa[6]. Penelitian lain pada kedudukan mesin kapal menunjukkan tegangan maksimum 31,30 MPa, deformasi 8,64 mm, dan *safety factor* 7,99, meskipun defleksinya masih melebihi batas kekakuan BKI ($L/300$)[2]. Studi mengenai variasi dimensi elemen struktur menunjukkan tegangan maksimum berkisar 35,62–61,99 MPa, masih di bawah tegangan izin 209,09 MPa, serta menunjukkan bahwa dimensi yang lebih kecil dapat menjadi alternatif yang lebih optimal[7]. Pada fondasi mesin kapal Ropax 5000 GT, hasil analisis menunjukkan tegangan maksimum 96,2 MPa dengan *safety factor* 2,44 sehingga struktur dinyatakan aman[8]. Sementara itu, penelitian pada fondasi *main engine* KMP. BRR dengan variasi ketebalan pelat menunjukkan peningkatan tegangan dari 22,16 MPa menjadi 23,08 MPa saat berlabuh dan dari 27,75 MPa menjadi 28,27 MPa saat manuver, dengan *safety factor* masing-masing sebesar 8,5, 8,3, dan 5 yang masih memenuhi kriteria keamanan struktur[9].

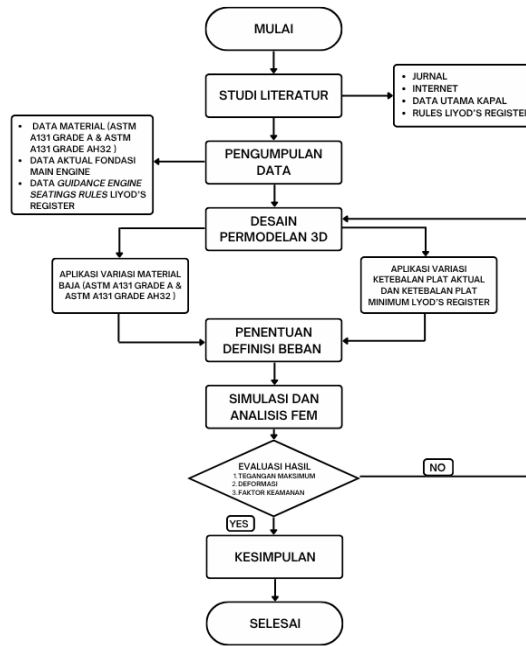
Meskipun banyak penelitian telah dilakukan menggunakan FEM untuk menganalisis kekuatan pondasi mesin kapal, sebagian besar penelitian masih berfokus pada variasi pembebanan, kondisi operasi, dan ketebalan pelat. Kajian mengenai pengaruh perbedaan jenis material terhadap respon struktur masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan kekuatan serta deformasi struktur fondasi *main engine* kapal menggunakan material ASTM A131 Grade A dan ASTM A131 Grade AH32 dengan variasi ketebalan pelat berdasarkan standar *Lloyd's Register* (LR).

Penelitian ini dibatasi pada analisis struktur fondasi *main engine* menggunakan pembebanan statis ekuivalen. Beban dimodelkan sebagai *remote force*, sedangkan sambungan las diasumsikan sebagai *bonded contact* sehingga tidak mempertimbangkan cacat las, tegangan sisa, maupun kegagalan sambungan. Analisis tidak mencakup pengaruh getaran, resonansi, dan *fatigue*. Variasi yang dikaji meliputi ketebalan pelat berdasarkan kondisi aktual dan standar minimum *Lloyd's Register* (LR) dan desain modifikasi penulis, serta material ASTM A131 Grade A dan ASTM A131 Grade AH32. Pemodelan dilakukan menggunakan *Finite Element Method (FEM)* pada modul *Static Structural* ANSYS Workbench 2026 R1. Aspek ekonomi tidak dianalisis secara khusus, namun harga material disajikan sebagai informasi pendukung.

Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh jenis material dan ketebalan pelat terhadap tegangan, deformasi, dan faktor keamanan sehingga diperoleh desain fondasi yang optimal, tetap aman, dan lebih ekonomis melalui penggunaan material dengan biaya lebih rendah namun tetap memenuhi kriteria keselamatan struktur.

2 Metode Penelitian

Penelitian ini menganalisis kekuatan struktur fondasi *main engine* kapal menggunakan FEM (ANSYS) dengan variasi material dan desain *Lloyd's Register* untuk memperoleh nilai tegangan, deformasi, dan faktor keamanan. Berikut adalah penjelasan langkah-langkah pada setiap tahapan proses berdasarkan diagram alir penelitian.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1 Pengumpulan Data

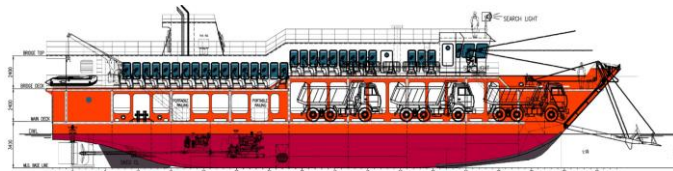
Pengumpulan data meliputi geometri, material, pembebanan, dan *boundary condition* sebagai *input* simulasi *Finite Element Method (FEM)* di ANSYS. Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan struktur secara kompleks[10].

2.1.1 Objek Penelitian

Kapal yang menjadi objek dalam penelitian ini memiliki ukuran utama kapal sebagai berikut:

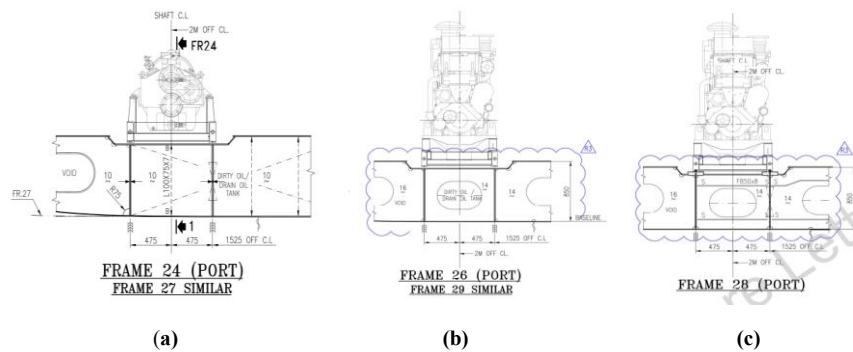
Tabel 1. Dimensi Utama Kapal [PT. Pertama Pasific Shipyard, (2025)]

PRINCIPAL DIMENSION		
<i>Length Over All (LOA)</i>	41,90	m
<i>Breadth (B)</i>	10,60	m
<i>Depth (H)</i>	3,4	m
<i>Service Speed</i>	10	knot
<i>Main Engine</i>	2 x 373	kW
<i>Passenger</i>	175	orang

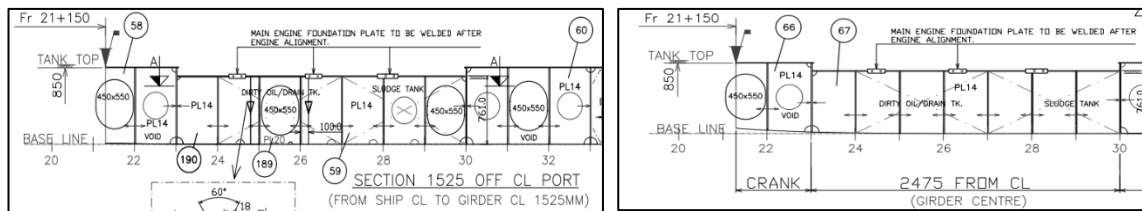


Gambar 2. Gambar Kapal [PT. Pertama Pasific Shipyard, (2025)]

Fondasi *main engine* terintegrasi dengan struktur melintang dan memanjang. Pada arah melintang, fondasi berada pada *frame* 24, 26, dan 28, sedangkan pada arah memanjang berada pada posisi 1525 mm dan 2475 mm dari *center line (CL)*. Struktur tersebut berperan sebagai penopang utama yang memengaruhi kekuatan dan kekakuan fondasi. Detail konstruksi ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Konstruksi Melintang Pondasi Mesin (a) frame 24, (b) frame 26, dan (c) frame 28 [PT.Pertama Pasific Shipyard, (2025)]



Gambar 4. Konstruksi Memanjang Pondasi Mesin (a)section 1525 of CL, (b)section 2475 of CL [PT.Pertama Pasific Shipyard, (2025)]

Dengan demikian, ketebalan pelat pada setiap konstruksi yang terdapat pada fondasi *main engine* dapat disederhanakan sebagai dasar variasi dalam penelitian ini. Data tersebut disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2. Ketebalan Plat Konstruksi Pondasi Main Engine [Sumber : PT.Pertama Pasific Shipyard]

Jenis Konstruksi	Tebal Plat	Satuan
Top Plate	28	mm
Main Engine Girder	14	mm
Solid Floor	14	mm

2.2.2 Spesifikasi Main Engine

Kapal yang menjadi objek penelitian ini menggunakan *main engine* tipe Cummins, adapun spesifikasi mesin induk beserta *gearbox weight* yang digunakan yaitu sebagai berikut pada tabel 2 berikut.

Tabel 3. Spesifikasi Main engine dan Gearbox

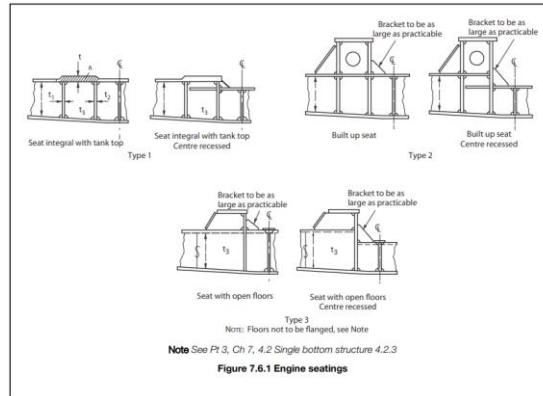
Nama	Spesifikasi
Engine Model	Cummins K19-M500
Rated Engine Power	500 BHP / 373 kW
Rated Engine Speed	1800 rpm
Weight Engine Only	1725 kg
Gearbox Weight	526 kg



Gambar 5. Mesin Induk Cummins K19-M500 [Cummins.com]

2.2.3 Modifikasi Desain Variasi Ketebalan Plat serta Profil

Variasi desain dilakukan dengan membandingkan desain aktual fondasi *main engine* dengan desain yang menggunakan ketebalan pelat minimum berdasarkan standar Lloyd's Register (LR). Detail variasi ketebalan ditunjukkan pada Tabel 2. Perhitungan yang berkaitan dengan struktur fondasi mesin mengacu pada *Lloyd's Register Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 3 Ship Structures (General)*, Chapter 7 *Machinery Spaces* – Section 6 *Engine Seating*,[4] dengan ketentuan sebagai berikut:



Gambar 6. Engine Seating Double Bottom Lyod Register [Lloyd's Register, (2020)]

Berdasarkan Lloyd's Register (LR), ketebalan minimum pelat fondasi *main engine* diklasifikasikan menjadi tiga tipe konfigurasi. Kapal pada penelitian ini termasuk Tipe 1 (*seat integral with tanktop centre recessed*), sesuai karakteristik geometri pada LR Figure 7.6.1 serta desain aktual yang ditunjukkan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Tabel 2. Lloyd's Register Part 3 Chapter 7 Section 6.1.3 menyatakan bahwa untuk mesin berdaya besar, *engine seating* direkomendasikan menyatu dengan struktur *double bottom* agar mampu menahan beban gravitasi, torsi, dan beban dinamis secara efektif [4]. Oleh karena itu, variasi ketebalan pelat pada penelitian ini ditentukan berdasarkan persamaan Lloyd's Register.

Engine Factor :

$$f = \frac{P}{Rl} \quad (1)$$

$$f = \frac{506}{2106 \times 2,8}$$

$$f = 0,08$$

Minimum Thickness of Top Plate :

$$t = (25 + 3,4f) \text{ mm} \quad (2)$$

$$t = 25,27 \text{ mm}$$

Minimum Thickness of Main Engine Girder :

$$t_1 = (15 + 4,8f) \text{ mm} \quad (3)$$

$$t_1 = 15,38 \text{ mm}$$

Minimum Thickness of Floor :

$$t_3 = (10 + 1,5f) \text{ mm} \quad (4)$$

$$t_3 = 10,12 \text{ mm}$$

l = effective length of engine foundation plate, in metres (m)

P = power of one engine at maximum service speed, in kW (bhp)

R = rev/min of engine at maximum service speed (rpm)

f = engine factor

t = minimum thickness of top plate, in (mm)

t_1 = main engine girder thicknesses, in (mm)

t_3 = floor plate thickness under seating (mm)

Dengan demikian disajikan perbandingan ketebalan plat antara aktual kapal dan ketebalan minimum yang merujuk pada *rules Lloyd's Register (LR)* dan hasil modifikasi tersedia pada tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Ketebalan Plat

Jenis Konstruksi	Desain Aktual	Minimum <i>Lloyd's Register</i>	Desain Modifikasi
<i>Top Plate</i>	28 mm	26 mm	30 mm
<i>Main Engine Girder</i>	14 mm	16 mm	18 mm
<i>Solid Floor</i>	14 mm	10 mm	16 mm

2.2.4 Karakteristik Material dan Harga

Karakteristik material sangat mempengaruhi respon struktur terhadap pembebanan, terutama pada tegangan dan deformasi. Oleh karena itu, berikut perbandingan karakteristik material ASTM A131 grade A dan AH32 pada tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Karakteristik Material [Mill Certificate of Tangshan Heavy Plate Co, Ltd, (2025)]

Parameter	ASTM A131 Grade A	ASTM A131 Grade AH32
<i>Density</i>	7850 kg/m ³	7850 kg/m ³
<i>Yield Strength</i>	323 MPa	363 MPa
<i>Ultimate Strength</i>	466 MPa	492 MPa
<i>Modulus Elastisitas</i>	200 GPa	200 GPa
<i>Poisson Ratio</i>	0,3	0,3

Data dan spesifikasi material yang digunakan akan dimasukkan ke dalam *Engineering Data* pada ANSYS. Berdasarkan *invoice* pembelian di salah satu untuk harga material dengan kode ASTM A131 Grade AH32 adalah 0,9 USD/kg dan ASTM A131 Grade A adalah 0,7 USD/kg.

2.2.4 Tegangan izin, Deformasi dan Faktor Keamanan

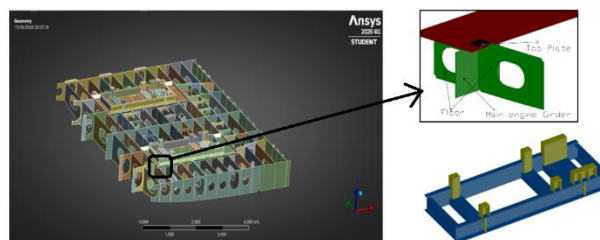
Tegangan maksimum pada struktur harus lebih kecil dari tegangan izin agar memenuhi kriteria keselamatan. Nilai tegangan izin ditentukan berdasarkan tegangan luluh (*yield strength*) masing-masing material. Sesuai ketentuan *Lloyd's Register Rules and Regulations for the Classification of Ships* Part 3, Chapter 14, Section 4, tegangan kerja tidak boleh melebihi tegangan izin (*permissible stress*) yang dinyatakan sebagai fraksi dari tegangan luluh material yaitu $\sigma_{izin} = 0,67\sigma_y$. Berdasarkan ketentuan tersebut, Material ASTM A131 grade AH32 mendapatkan nilai nilai tegangan izin sebesar 243,2 MPa, dan Material ASTM A131 grade A mendapatkan nilai tegangan izin sebesar 216,4 MPa.

Berdasarkan ketentuan *Lloyd's Register Rules and Regulations for the Classification of Ships*, faktor keamanan dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara tegangan luluh material dengan tegangan izin, sehingga diperoleh $SF = 1,5$ (jika nilai *safety factor* > 1,5, maka dinyatakan aman).

Berdasarkan ketentuan *Lloyd's Register Rules and Regulations for the Classification of Ships*[4], batas defleksi maksimum pada struktur utama dibatasi sebagai fungsi dari panjang bentang struktur. Defleksi maksimum yang diizinkan adalah $\delta_{max} \leq 0,0056l_g$. Dengan demikian, deformasi maksimum yang diperbolehkan pada struktur adalah sebesar 1,12 mm.

2.3 Desain dan Permodelan 3D

Pemodelan dilakukan dengan merepresentasikan kondisi aktual struktur sehingga hasil yang diperoleh dapat menggambarkan perilaku struktur secara mendekati kondisi sebenarnya[3]. Model yang telah dibuat kemudian disiapkan untuk proses selanjutnya di ANSYS *Static Structural* yang dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Desain 3D Permodelan Struktur Konstruksi Pondasi Main Engine [Sumber : Reddraw Penulis]

2.4 Penentuan Definisi Beban

2.4.1 Beban Main engine

Beban main engine sebesar 16.905 N diterapkan menggunakan metode *Multiple Point Loads* (MPL) dan didistribusikan pada titik-titik *engine mounting* untuk merepresentasikan kondisi pembebanan aktual.

2.4.2 Beban Gearbox

Beban *gearbox* dihitung berdasarkan berat komponen dan diterapkan menggunakan metode *Multiple Point Loads* (MPL). Beban sebesar 5.154,8 N didistribusikan pada titik-titik dudukan *gearbox*.

2.4.3 Beban Momen Torsi Mesin

Momen torsi merupakan beban puntir akibat putaran main engine yang dihitung berdasarkan daya mesin 373 kW dan putaran 1800 (*rpm*). Hasil perhitungan menunjukkan momen torsi sebesar 1,979 kN·m, pada area *engine bed*.

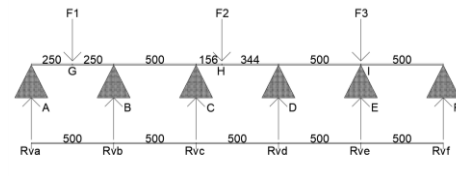
2.4.4 Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik merupakan tekanan air laut akibat gaya gravitasi yang dipengaruhi oleh massa jenis air laut, percepatan gravitasi, dan sarat kapal. Pada penelitian ini, tekanan hidrostatik sebesar 0,025 MPa diterapkan pada struktur *double bottom* sebagai beban pada simulasi ANSYS.

3 Analisa Data dan Pembahasan

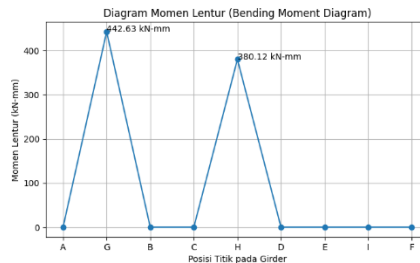
3.1 Analisa Tegangan Manual

Untuk memperoleh momen lentur maksimum, struktur disederhanakan ke dalam *Free Body Diagram* (FBD) agar reaksi tumpuan dan momen dapat dihitung menggunakan persamaan keseimbangan statis [11]. Pada model ini, *frame* diasumsikan sebagai tumpuan, sedangkan beban *main engine* didistribusikan pada titik-titik dudukan sesuai kondisi pembebanan aktual.



Gambar 8. *Free Body Diagram* (fbd) [Desain Penulis]

Hasil perhitungan keseimbangan statis menghasilkan reaksi tumpuan sebesar $R_{VA} = R_{VB} = 1.770,5 \text{ N}$, $R_{VC} = 2.436,69 \text{ N}$, $R_{VD} = 1.104,79 \text{ N}$, $R_{VE} = 3.541 \text{ N}$, dan $R_{VF} = 0 \text{ N}$. Reaksi ini selanjutnya digunakan untuk menentukan diagram gaya geser dan momen lentur.



Gambar 9. *Bending Moment Diagram* (BMD)

Berdasarkan *Bending Moment Diagram* (BMD), diperoleh momen lentur pada beberapa titik, yaitu $M_G = 442,63 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, $M_H = 380,12 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, dan $M_D = 2 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, sedangkan titik lainnya bernilai 0. Momen lentur maksimum yang diperoleh adalah 442,63 kN·mm, yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan tegangan manual. Adapun hasil perhitungan karakteristik penampang berupa titik berat dan momen inersia untuk kedua variasi desain dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Titik berat dan Momen Inersia

Parameter	Desain Aktual	Minimum <i>Lloyd's Register</i>	Desain Modifikasi
Titik Berat (y)	385,9 mm	381,7 mm	388,5 mm
Momen Inersia (I_x)	$3,97 \times 10^9 \text{ mm}^4$	$2,25 \times 10^9 \text{ mm}^4$	$4,77 \times 10^9 \text{ mm}^4$

a) Desain aktual

- Tegangan

$$\sigma_x = \frac{M \times Z_{NA}}{I}$$

$$\sigma_x = \frac{442,63 \times 10^3 \text{ Nmm} \times 385,9 \text{ mm}}{3,97 \times 10^9 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma_x = 43,04 \text{ MPa}$$

- Tegangan geser torsi

$$\tau_t = \frac{Tc}{J}$$

$$\tau_t = \frac{(1.979 \times 10^6 \text{ Nmm})(385,9 \text{ mm})}{5,112 \times 10^9 \text{ mm}^4}$$

$$\tau_t = 0,149 \text{ MPa}$$

- Tegangan ekuivalen

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau^2}$$

$$\sigma_v = \sqrt{43,04^2 + 3(0,149)^2}$$

$$\sigma_v = 43,04 \text{ MPa}$$

b) Desain LR

- Tegangan

$$\sigma_x = \frac{442,63 \times 10^3 \text{ Nmm} \times 381,7 \text{ mm}}{2,25 \times 10^9 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma_x = 75,07 \text{ MPa}$$

- Tegangan geser torsi

$$\tau_t = \frac{(1.979 \times 10^6 \text{ Nmm})(381,7 \text{ mm})}{4,771 \times 10^9 \text{ mm}^4}$$

$$\tau_t = 0,158 \text{ MPa}$$

- Tegangan ekuivalen

$$\sigma_v = \sqrt{75,07^2 + 3(0,158)^2}$$

$$\sigma_v = 75,07 \text{ MPa}$$

c) Desain Modifikasi

- Tegangan

$$\sigma_x = \frac{442,63 \times 10^3 \text{ Nmm} \times 388,5 \text{ mm}}{4,77 \times 10^9 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma_x = 36,07 \text{ MPa}$$

- Tegangan geser torsi

$$\tau_t = \frac{(1.979 \times 10^6 \text{ Nmm})(388,5 \text{ mm})}{5,80 \times 10^9 \text{ mm}^4}$$

$$\tau_t = 0,133 \text{ MPa}$$

- Tegangan ekuivalen

$$\sigma_v = \sqrt{36,07^2 + 3(0,133)^2}$$

$$\sigma_v = 36,07 \text{ MPa}$$

Dengan :

σ_x = Tegangan normal (MPa)

τ_t = Tegangan geser akibat torsi (MPa)

σ_v = Tegangan ekuivalen *Von-Mises* (MPa)

M = momen bending (Nmm)

Z_{NA} = jarak sumbu netral ke sisi terjauh penampang (mm)

I = momen inersia (mm⁴)

T = Momen torsi (Nmm)

c = Jarak dari pusat/sumbu netral ke serat terluar penampang (mm)

J = momen inersia polar (mm⁴)

3.2 Analisa Pada Software

3.2.1 Penentuan *Boundary Condition* dan Pembebanan

Model menggunakan *fixed support* pada *frame double bottom* dan *bonded contact* antar komponen. Pembebanan meliputi berat *main engine*, *gearbox*, momen torsi, dan tekanan hidrostatik yang bekerja pada 6 titik *engine mounting*.

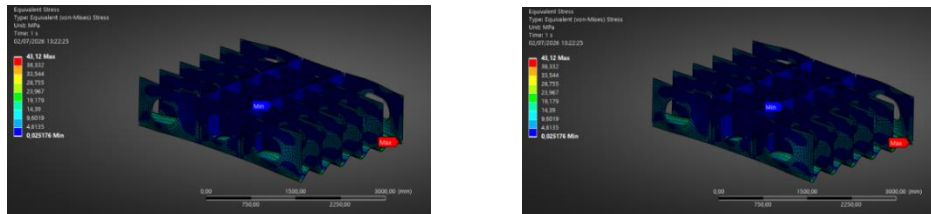
3.2.2 *Meshing*

Dalam analisis menggunakan metode elemen hingga, proses *meshing* dilakukan dengan mendiskretisasi model struktur fondasi menjadi kumpulan elemen-elemen berukuran kecil sehingga perhitungan numerik dapat dilakukan pada setiap elemen tersebut[12].

3.2.3 Hasil Analisis Tegangan dan Deformasi

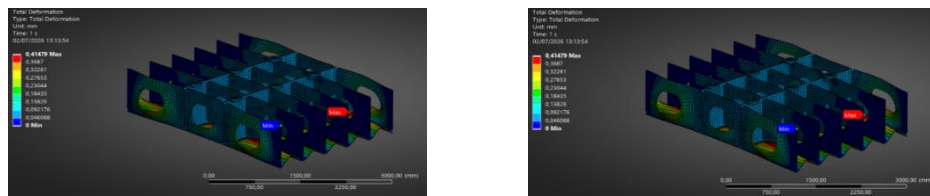
a) Desain Aktual

Hasil simulasi pada desain aktual menunjukkan tegangan ekuivalen maksimum sebesar 43,12 MPa untuk material ASTM A131 Grade AH32 dan 43,12 MPa untuk material ASTM A131 Grade A.



Gambar 10. (a) *Equivalent Stress* Desain Aktual Grade AH32 (b) *Equivalent Stress* Desain Aktual Grade A

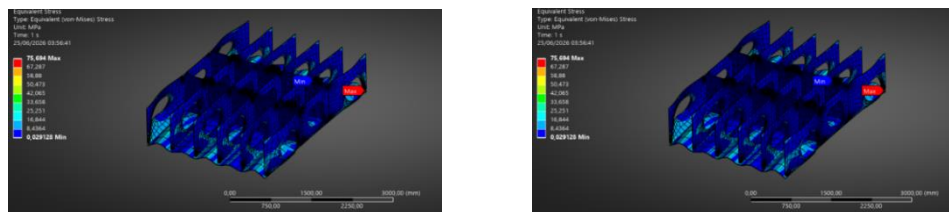
Deformasi maksimum desain aktual sebesar 0,41479 mm untuk kedua material ASTM A131 Grade AH32 dan ASTM A131 Grade A, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. (a) *Max Deformation* Desain Aktual Grade AH32 (b) *Max Deformation* Desain Aktual Grade A

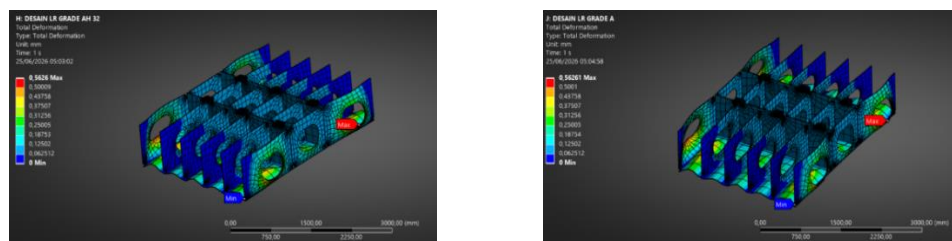
b) Desain Standar Minimum Lloyd's Register

Hasil simulasi pada desain standar minimum Lloyd's Register menunjukkan tegangan ekuivalen maksimum sebesar 75,69 MPa untuk material ASTM A131 Grade AH32 dan 75,69 MPa untuk material ASTM A131 Grade A, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12 [4].



Gambar 12. (a) *Equivalent Stress* Desain LR ASTM A131 Grade AH32 (b) *Equivalent Stress* Desain LR ASTM A131 Grade A

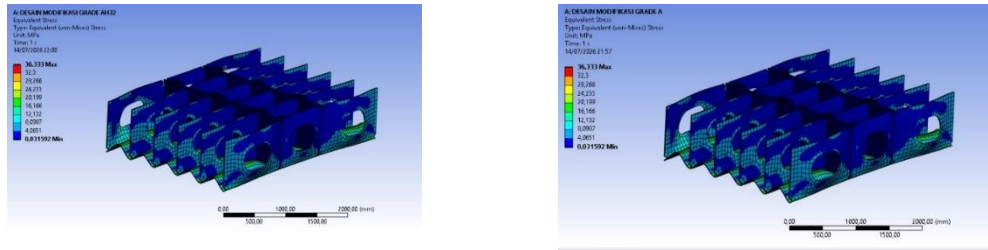
Hasil simulasi menunjukkan deformasi maksimum pada desain standar minimum Lloyd's Register sebesar 0,56260 mm untuk material ASTM A131 Grade AH32 = ASTM A131 Grade A (Gambar 13).



Gambar 13. (a) *Total Deformation* Desain Aktual Grade AH32 (b) *Total Deformation* Desain Aktual Grade A

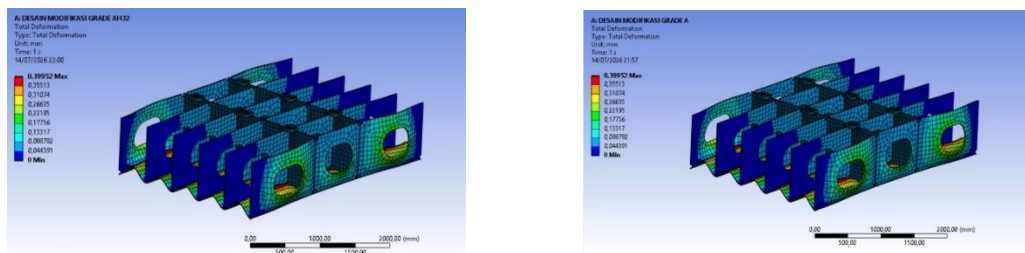
c) Desain Modifikasi

Hasil simulasi pada desain modifikasi menunjukkan tegangan ekuivalen maksimum sebesar 36,33 MPa untuk material ASTM A131 Grade AH32 dan 36,33 MPa untuk material ASTM A131 Grade A, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14 [4].



Gambar 14. (a) *Equivalent Stress* Desain Modifikasi ASTM A131 Grade AH32 (b) *Equivalent Stress* Desain Modifikasi ASTM A131 Grade A

Hasil simulasi menunjukkan deformasi maksimum pada desain standar minimum Lloyd's Register sebesar 0,39952 mm untuk material ASTM A131 Grade AH32 dan 0,39952 mm untuk material ASTM A131 Grade A (Gambar 15).



Gambar 15. *Total Deformation* Desain Modifikasi Grade AH32 (b) *Total Deformation* Desain Modifikasi Grade A

3.2.5 Validasi Hasil

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan manual dan hasil simulasi ANSYS untuk mengetahui tingkat keakuratan analisis [9]. Hasil validasi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Validasi Hasil

Desain	Perhitungan Manual (MPa)	Software FEM (MPa)	Persentase Error
Desain Aktual	43,04	43,12	0,99%
Desain Standar Minimum Lloyd's Register	75,07	75,69	0,83%
Desain Modifikasi	36,07	36,33	0,71%

Hasil validasi menunjukkan persentase *error* sebesar 0,93% pada desain actual, 0,83% pada desain standar Lloyd's Register dan 0,71% desain modifikasi. Nilai tersebut memenuhi kriteria valid karena berada di bawah batas 5% [11], sehingga hasil simulasi memiliki akurasi yang baik dan layak digunakan sebagai dasar analisis struktur.

3.2.6 Faktor Keamanan (*safety factor*)

Berdasarkan *Lloyd's Register Rules and Regulations for the Classification of Ships* [4], *safety factor* dihitung sebagai perbandingan antara *yield strength* dan *allowable stress*. Seluruh nilai *safety factor* lebih besar dari 1,5, sehingga seluruh variasi desain dinyatakan aman sesuai ketentuan Lloyd's Register [4].

Tabel 7. Analisis *Safety Factor*

<i>Safety Factor</i>	Desain Aktual	Standar Minimum Lloyd's Register	Desain Modifikasi	Standar	Status
ASTM A131 Grade AH32	10,80	8,88	14,12	1,5	Aman
ASTM A131 Grade A	10,80	8,88	14,12	1,5	Aman

3.2.7 Perbandingan Kekuatan Struktur, Deformasi dan Faktor Keamanan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh perbandingan kinerja struktur antara desain aktual dan desain berdasarkan standar minimum Lloyd's Register sebagai berikut:

Tabel 8. Perbandingan Kekuatan Struktur, Deformasi dan Faktor Keamanan

Desain	Material	Tegangan Maksimum (MPa)	Tegangan Izin (MPa)	Deformasi (mm)	Batas Deformasi (mm)	Safety Factor	Standar SF	Status
Aktual	ASTM A131 Grade AH32	43,12	243,2	0,41479	1,12	10,80	1,5	Aman
	ASTM A131 Grade A	43,12	216,4	0,41479	1,12	10,80	1,5	Aman
Standar Minimum LR	ASTM A131 Grade AH32	75,69	243,2	0,56260	1,12	8,88	1,5	Aman
	ASTM A131 Grade A	75,69	216,4	0,56261	1,12	8,88	1,5	Aman
Desain Modifikasi	ASTM A131 Grade AH32	36,33	243,2	0,39952	1,12	14,12	1,5	Aman
	ASTM A131 Grade A	36,33	216,4	0,39952	1,12	14,12	1,5	Aman

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kekuatan struktur main engine seating foundation menggunakan metode Finite Element Method (FEM), dapat disimpulkan bahwa:

1. Seluruh desain memenuhi persyaratan Lloyd's Register karena menghasilkan tegangan maksimum di bawah tegangan izin material, deformasi lebih kecil dari batas deformasi sebesar 1,12 mm, serta safety factor lebih besar dari nilai minimum 1,5. Desain aktual menghasilkan tegangan maksimum 43,12 MPa, deformasi 0,41479 mm, dan safety factor 10,80. Desain standar minimum Lloyd's Register menghasilkan tegangan maksimum 75,69 MPa, deformasi 0,56260 mm, dan safety factor 8,88, sedangkan desain modifikasi menghasilkan tegangan maksimum 36,33 MPa, deformasi 0,39952 mm, dan safety factor 14,12.
2. Desain modifikasi memberikan kinerja struktur terbaik karena tebal plat yang relatif lebih besar dengan tegangan maksimum dan deformasi terendah, masing-masing sebesar 36,33 MPa dan 0,39952 mm, serta safety factor tertinggi sebesar 14,12, sehingga mampu meningkatkan kekuatan dan keamanan struktur dibandingkan desain aktual maupun desain standar minimum Lloyd's Register.
3. Material ASTM A131 Grade AH32 dan ASTM A131 Grade A sama-sama memenuhi persyaratan kekuatan struktur karena tegangan maksimum yang terjadi masih berada di bawah tegangan izin masing-masing material sehingga masih dalam area elastisitas material berdasarkan standar. Selain itu, penggunaan dimensi struktur sesuai standar minimum Lloyd's Register berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan material dan biaya konstruksi tanpa mengurangi tingkat keselamatan struktur.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penelitian selanjutnya disarankan untuk mempertimbangkan pengaruh beban dinamis, seperti getaran mesin dan analisis kelelahan (*fatigue*), sehingga perilaku struktur dapat direpresentasikan lebih mendekati kondisi operasi yang sebenarnya. Selain itu, kajian mengenai optimasi dimensi struktur, pengaruh korosi, serta aspek biaya material dan proses manufaktur juga perlu dilakukan untuk memperoleh desain pondasi *main engine* yang tidak hanya memenuhi persyaratan kekuatan dan keselamatan, tetapi juga lebih efisien dan ekonomis.

5 Daftar Pustaka

- [1] D. A. Saputra, E. Pranatal, and B. Setyono, “Analisis Kekuatan Pondasi Mesin Kapal SPOB Menggunakan Finite Element Method”.
- [2] I. I. Widyastuti, M. H. P. Kurniawan, A. N. A. Maulidhia, and U. Mudjiono, “Analisis Kekuatan Dudukan Kamar Mesin Kapal dengan Metode Elemen Hingga,” *Blend Sains J. Tek.*, vol. 4, no. 2, pp. 417–422, Oct. 2025, doi: 10.56211/blendsains.v4i2.1289.
- [3] I. M. W. Karisma, I. P. Mulyatno, and G. Rindo, “Analisa Kekuatan Struktur Pondasi Mesin Dengan Interaksi Trust Block Pada Kapal Ferry 500 GT Dengan Metode Elemen Hingga”.
- [4] “Lloyd’s Register Rules and Regulations for the Classification of Ships July 2020.”
- [5] S. Jokosisworo and E. Widiyanto, “Analisa Kekuatan Pondasi Mesin Pada Mt. Nsl-Iv Karena Perubahan Kapasitas Main Engine Di Pt. Jasa Marina Indah Dengan Metode Elemen Hingga”.
- [6] K. M. Y. Emily, P. N. A. Nugroho, and B. Herijono, “Kajian Kekuatan Struktur Pondasi Mesin Induk Harbour Tug Boat,” 2021.
- [7] J. A. Putra and M. N. Misbah, “Studi Pengaruh Ukuran Bracket Pondasi Mesin terhadap Tegangan dengan Menggunakan Finite Element Method,” *J. Tek. ITS*, vol. 11, no. 1, pp. G1–G6, Apr. 2022, doi: 10.12962/j23373539.v11i1.82025.
- [8] B. A. Nugroho and I. P. Mulyatno, “Analisa Kekuatan Struktur Pondasi Mesin Dengan Interaksi Trust Block Pada Kapal Ropax 5000 Gt Dengan Metode Elemen Hingga”.
- [9] S. X. Andratama, I. P. Mulyatno, and A. W. B. Santosa, “Analisa Kekuatan Konstruksi Pondasi Mesin Akibat Beban Statis Main Engine pada Kapal Penyeberangan 1000 GT Menggunakan Finite Element Method”.
- [10] F. A. Saputro, H. Yudo, I. P. Mulyanto, and J. Soedarto, “Studi Perhitungan Respon Struktur Pondasi Mesin Kapal Penyeberangan 1000 GT Akibat Pembebanan Statis”.
- [11] Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Q. Ardelia, P. Nur Ardi Nugroho, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, A. Prasetyo Utomo, and Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, “Analisis Kekuatan dan Potensi Resonansi pada Pondasi Diesel Generator Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *Infotekmesin*, vol. 16, no. 2, pp. 338–346, Jul. 2025, doi: 10.35970/infotekmesin.v16i2.2049.
- [12] D. Doan, A. Szeleziński, L. Murawski, and A. Muc, “Finite Element Method in Modeling of Ship Structures. Part II – Practical Analysis Example,” *Sci. J. Gdyn. Marit. Univ.*, no. 105, pp. 19–31, Sep. 2018, doi: 10.26408/105.02.