



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisa Kekuatan Konstruksi Pondasi Mesin Akibat Beban Statis *Main Engine* pada Kapal Penyeberangan 1000 GT Menggunakan *Finite Element Method*

Sinatrya Xavier Andratama¹⁾, Imam Pujo Mulyatno¹⁾, Ari Wibawa Budi Santosa¹⁾

¹⁾Laboratorium Struktur dan Kekuatan Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

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

Abstrak

KMP. BRR 1000 GT memiliki jalur pelayaran antara Pelabuhan Ulee Lheue dan Pelabuhan Balohan dengan waktu perjalanan sekitar dua hingga tiga jam. Kondisi ini menuntut agar konstruksi kapal, khususnya pondasi mesin, selalu berada dalam keadaan aman selama perjalanan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengukur tegangan dan defleksi maksimum, membandingkan ketebalan pelat dan profil berdasarkan rules BKI, serta menghitung safety factor dari variasi konstruksi. Metode yang digunakan untuk menganalisis kekuatan struktur pondasi mesin pada KMP. BRR yang memiliki dua mesin induk adalah metode elemen hingga dengan Ansys. Validasi dilakukan melalui perhitungan mekanika teknik, material KI-A36, dan dengan error sebesar 8%. Variasi berupa tebal pelat sesuai konstruksi dan setelah modifikasi pengurangan tebal pelat engine bed. Analisis mencakup kapal berlabuh dan kapal manuver. Pembebanan diinputkan meliputi gaya akibat berat mesin 48.510 N serta gearbox 15.876 N, momen dari torsi mesin utama 4.550 Nm, gaya dorong yang disebabkan oleh thrust block 100.293 N, dan tekanan hidrostatis kapal 0,025 MPa akibat berat air yang menekan lambung kapal. Hasil menunjukkan bahwa modifikasi pondasi mesin mengurangi kekuatan struktur. Pada kondisi berlabuh, tegangan maksimum meningkat dari 22,169 MPa menjadi 23,08 MPa setelah modifikasi, dan pada kondisi manuver, dari 27,756 MPa menjadi 28,276 MPa setelah modifikasi. Defleksi maksimum juga meningkat dari 0,41764 mm menjadi 0,42064 mm saat berlabuh, dan dari 0,45856 mm menjadi 0,46274 mm saat manuver. Perbandingan dengan ketebalan minimum sesuai BKI menunjukkan perbedaan tegangan 14,764 MPa pada kondisi berlabuh dan 19,201 MPa saat manuver. Safety factor terkecil untuk model sesuai konstruksi 8,5, untuk model yang tela dimodifikasi 8,3, dan untuk struktur dengan ketebalan minimum sesuai rules BKI 5.

Kata Kunci : FEM, Pondasi Mesin, Kekuatan, Tegangan, Defleksi

1. PENDAHULUAN

Kapal merupakan salah satu sarana angkutan utama di laut yang memainkan peran penting dalam transportasi barang dan manusia di seluruh dunia. Konstruksi kapal mendapatkan posisi terpenting pada tahap desain sebuah kapal karena menyangkut keselamatan penumpang, kru kapal, dan juga muatan yang diangkut. Konstruksi sebuah kapal harus didesain mengikuti regulasi yang ada dan harus mampu menahan beban yang ada dari *internal* maupun *external* sebuah kapal.

Mesin induk (*main engine*) yang merupakan objek vital karena bertanggung jawab terhadap mobilitas dan kinerja kapal. Namun, tanggungan

tersebut harus dibantu dengan pondasi mesin. Pondasi mesin yang terletak di *engine room* merupakan objek yang krusial dalam suatu konstruksi kapal untuk menjaga supaya mesin selalu tegak pada posisi yang sudah ditentukan. Pondasi mesin mendapatkan beban dari *main engine*, gaya dorong dari *propeller*, serta mendapatkan getaran konstan yang dihasilkan *main engine* [1].

Penelitian sebelumnya tentang analisa struktur pondasi mesin kapal penyeberangan 1000 GT menggunakan metode elemen hingga dengan *software Ansys*. Analisa dari penelitian tersebut meliputi kondisi pada saat berlabuh, manuver, dan melaju. Penelitian tersebut menampilkan bahwa

nilai tegangan paling besar yakni pada saat kapal melakukan manuver atau hanya satu mesin yang beroperasi dengan tegangan maksimum sebesar 60,708 MPa yang terletak di *node* 1239849 [2].

Penelitian tentang analisa kekuatan struktur pondasi mesin kapal TB. Sungai Sepaku 155 GT menggunakan metode elemen hingga dengan variasi momen torsi 100%, 80%, dan 50%. Penelitian tersebut memperoleh tegangan maksimal yang timbul pada momen torsi 100% yaitu 105,75 MPa dengan defleksi maksimal 0,00052876, momen torsi 80% mempunyai nilai tegangan maksimal yaitu 105,72 MPa dengan defleksi maksimal 0,00052861, torsi 50% mempunyai nilai tegangan maksimal yaitu 105,68 MPa dengan defleksi maksimal 0,00052839 serta *safety factor* setiap momen torsi dinyatakan aman karena $Sf > 1$ [3].

Penelitian sebelumnya membahas kekuatan struktur pondasi mesin induk *harbour tug boat* menggunakan metode elemen hingga dengan *software Ansys*. Analisa mencakup *input load* vertikal dan horizontal pada pondasi mesin dengan tujuan mencari *safety factor* pondasi mesin. Hasil penelitian menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar 267,1 MPa serta faktor keamanan (*safety factor*) sebesar 1,12. Struktur pondasi dapat dikategorikan sebagai aman jika nilai faktor keamanan tersebut ($Sf > 1$), [4].

Penelitian sebelumnya membahas tentang analisa kekuatan dan kelelahan pada pondasi mesin *general cargo* 6088 GT menggunakan metode elemen hingga dengan beban berupa *main engine* pada *software Ansys*. Analisa pada penelitian ini adalah dengan pembenanan *main engine* pada pondasi pada rpm 100%. Hasil dari penelitian menunjukkan defleksi maksimal adalah 12,3 mm, tegangan adalah 39,395 MPa, dan *safety factor* 5,76 [5].

Penelitian terdahulu membahas tentang analisa kekuatan struktur *deck crane* kapal tanker 6500 DWT menggunakan metode elemen hingga dengan cara Pembebanan yang diberikan yaitu beban SWL 15 ton dengan beberapa variasi sudut putar dan elevasi. Hasil dari penelitian ini adalah Nilai tegangan minimum pada *deck crane* terjadi pada sudut elevasi 55° dan sudut putar 0° sebesar 31,8 MPa. Area kritis pada penelitian ini terjadi pada struktur *deck*. Hasil penelitian ini kemudian dihitung menggunakan rumus *safety factor*, dapat disimpulkan bahwa instalasi dari konstruksi *deck crane* memenuhi standar aturan tegangan izin BKI sebesar 190 MPa [6].

Penelitian sebelumnya membahas tentang analisa konstruksi *car deck* KMP.BRR akibat perubahan dengan metode elemen hingga menggunakan *software MSC Patran* dan *MSC*

Nastran dengan variasi *car deck* berisi hanya sedan, hanya truk, serta gabungan antara truk dan sedan. Analisa yang dilakukan yaitu pada saat air tenang, *sagging*, dan *hogging*. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa nilai *stress* paling maksimum terjadi pada saat kondisi kapal sedang *sagging* dengan muatan truk. *Stress* maksimum didapatkan pada *frame* 63 dan *node* 1889224 sebesar 173,048 MPa, dengan defleksi paling maksimal sebesar 1,92 cm. Seluruh kondisi memenuhi kriteria kekuatan menurut *rules* BKI [7].

Meskipun banyak penelitian sudah menggunakan variasi seperti perbandingan terhadap momen torsi dan *safety factor*, hanya sedikit yang membandingkan konstruksi dengan *rules* akan minimum ketebalan dari BKI terutama untuk kapal besar. Penelitian ini berupaya mengatasi keterbatasan tersebut melalui pendekatan yang lebih komprehensif. Penelitian analisa kekuatan ini diharapkan dapat memberi pemahaman yang lebih mendalam perihal kekuatan pondasi mesin kapal penyeberangan 1000 GT, mengidentifikasi tegangan dan defleksi yang masih sesuai dengan batasan *rules* yang berlaku, serta mendapatkan efisiensi dari produksi konstruksi karena adanya pesanan lebih pelat 25 mm yang seharusnya menggunakan pelat yang ada yaitu 24 mm.

Tujuan dalam penelitian ini adalah mengetahui tegangan dan defleksi konstruksi pondasi ketika diberi beban dari *main engine* sebelum dan setelah modifikasi. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui perbandingan tegangan dan defleksi struktur setelah modifikasi dan sesuai dengan ketebalan minimum menurut *rules* BKI, serta mengetahui *safety factor* dari konstruksi pondasi mesin sesuai dengan ketebalan minimum menurut *rules* BKI.

2. METODE

Penelitian ini adalah penelitian lanjutan yang menganalisis pondasi mesin KMP. BRR 1000 GT. Data yang diperlukan dalam analisa ini diperoleh dari lampiran penelitian sebelum yang menyajikan *detail drawing* khususnya pada bagian kamar mesin dari KMP. BRR 1000 GT. Metode berupa pendefinisian beban serta variasi yang ditunjukkan, diharapkan dapat melengkapi proses selanjutnya berupa *modeling* dan *input* beban dan mendapatkan hasil berupa perbedaan *stress*.

2.1. Objek Penelitian

KMP. BRR merupakan kapal yang dibangun pada tahun 2009 dengan IMO 9549475 dan dimiliki oleh PT. ASDP Indonesia Ferry, sebuah

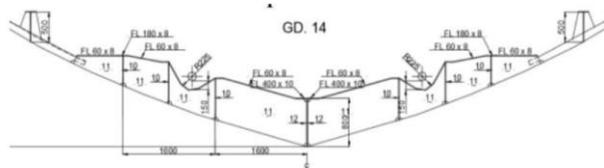
perusahaan di bawah Kementerian Perhubungan yang bertanggung jawab atas layanan Angkutan Sungai, Danau, dan Penyeberangan (ASDP). KMP.BRR dapat dilihat pada Gambar 1. Kapal ini dilengkapi dengan mesin berdaya 2×1100 BHP dan melayani rute penyeberangan antara Pelabuhan Balohan di Sabang dan Pelabuhan Ulee Lheue di Aceh. KMP. BRR merupakan kapal jenis ferry *Roll-On/Roll-Off (Ro-Ro)* yang tidak hanya mengangkut penumpang tetapi juga mampu membawa kendaraan. Kapasitas maksimum untuk penumpang KMP. BRR adalah 250, kapasitas maksimum mobil sedan adalah 24 dengan bobot 24 ton, kapasitas maksimum untuk truk adalah 12 dengan bobot 96 ton, dan kapasitas maksimum untuk sedan dan truk adalah 12 sedan dan 6 truk dengan bobot 60 ton. Ukuran utama kapal yakni adalah sebagai berikut [8].

- *Length Between Perpindicular (LPP)*: 55,0 m.
- *Length Over All (LOA)* : 61,3 m.
- *Service Speed (Vs)* : 15 kn.
- *Breadth (B)* : 13,2 m
- *Draught (T)* : 2,5 m.
- *Height (H)* : 3,9 m.

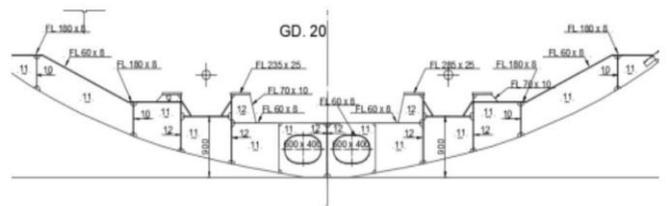


Gambar 1. KMP. BRR 1000 GT

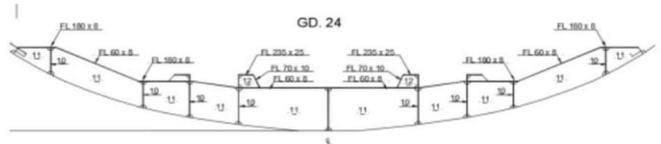
Berdasarkan lampiran dari penelitian sebelumnya, diperoleh *detail drawing* yang merujuk ke konstruksi pondasi mesin. Gambar 2-6. adalah *detail drawing* konstruksi pondasi kapal penyeberangan 1000 GT.



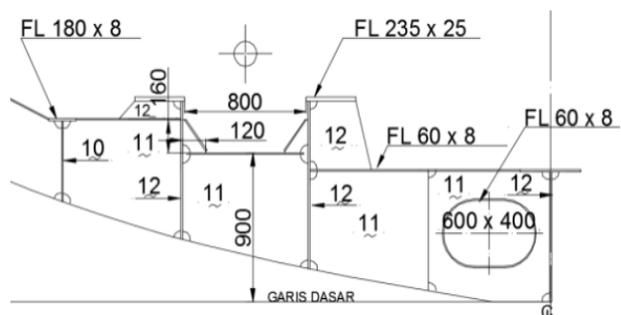
Gambar 2. Konstruksi Melintang Pondasi Mesin Frame 14



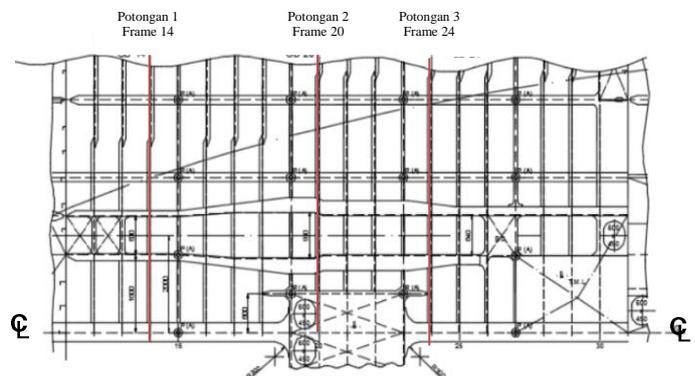
Gambar 3. Konstruksi Melintang Pondasi Mesin Frame 20



Gambar 4. Konstruksi Melintang Pondasi Mesin Frame 24



Gambar 5. Scantling Pondasi Mesin Frame 20



Gambar 6. Tampak Atas Pondasi Mesin

Struktur pondasi ini dibagi menjadi tiga bagian melintang yaitu potongan 1 pada *frame 14*, potongan 2 pada *frame 20*, dan potongan 3 pada *frame 24* untuk memerinci detil konstruksi secara lebih jelas. Gambar 7. menunjukkan kapal penyeberangan KMP. BRR 1000 GT yang dilengkapi dengan mesin *gearbox* utama tipe Yanmar. Spesifikasi *main engine* dan yang digunakan KMP. BRR adalah berikut.

- Tipe Mesin Induk : Yanmar 12AYM WST.
- Daya serta rpm : 1100 BHP serta 1850 RPM.

- Jumlah silinder : 12.
- Ukuran mesin : 2759 mm x 1644 mm x 1707 mm.
- Berat : 4950 kg.



Gambar 7. Yanmar 12AYM-WST

Gearbox yang digunakan pada KMP. BRR adalah *gearbox* yang sesuai dengan tipe *main engine*. Kode produk *gearbox* KMP. BRR adalah Yanmar YXH-500L-1 dengan berat 1620 Kg [9].

2.2. Variasi Ketebalan Pelat serta Profil

Dalam penelitian ini, variasi dilakukan pada ketebalan pelat dan profil dengan membandingkan kondisi awal sesuai konstruksi asli dan kondisi setelah adanya modifikasi pada *engine bed*. Struktur yang telah dimodifikasi tersebut kemudian dibandingkan lagi dengan ketebalan minimum yang ditetapkan dalam aturan BKI. Perbandingan terhadap *rules* BKI dilakukan dengan tujuan mengetahui nilai *stress*, defleksi, dan *safety factor* terendah dari konstruksi yang dapat terjadi pada struktur pondasi mesin KMP. BRR [10].

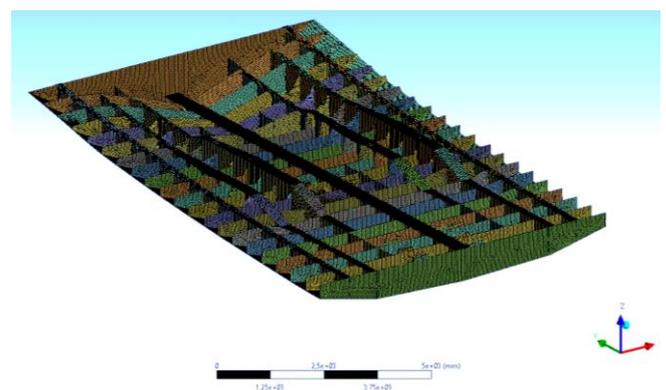
Perbandingan variasi yang dilakukan diharapkan dapat menghasilkan konstruksi yang optimal karena menurunkan pelat yang sebelumnya adalah 25 mm menjadi 24 mm. Perbandingan juga meliputi analisa kondisi I yaitu pada saat kapal berlabuh dan kondisi II pada saat kapal melakukan manuver. Kapal yang berlabuh diasumsikan beban yang dialami hanya beban dari *main engine*, *gearbox*, dan tekanan hidrostatik kapal. Kapal yang melakukan manuver diasumsikan hanya satu mesin yang beroperasi sehingga beban yang terjadi meliputi beban *main engine*, *gearbox*, tekanan hidrostatik kapal, momen torsi *engine* aktif, dan *thrust block engine* aktif. Tabel 1. adalah perbandingan ketebalan pelat yang diteliti.

Tabel 1. Variasi Ketebalan Pelat dan Profil.

Jenis Konstruksi	Tebal Sesuai Konstruksi	Tebal Setelah Modifikasi	Tebal Minimum sesuai BKI
<i>Center Girder</i>	12 mm	12 mm	6 mm
<i>Solid Floor</i>	11 mm	11 mm	8 mm
<i>Engine Girder</i>	12 mm	12 mm	6 mm
<i>Side Girder</i>	10 mm	10 mm	6 mm
<i>Bottom Plate</i>	8 mm	8 mm	8 mm
<i>Engine Bed</i>	25 mm	24 mm	23 mm

2.3. Pembuatan Model, Meshing, dan Validasi

Pendekatan yang digunakan untuk menuntaskan masalah mekanika teknik, khususnya dalam analisis struktural adalah metode elemen hingga yang memanfaatkan perhitungan numerik. Bagian yang dilakukan pemodelan mencakup pondasi mesin dan struktur bagian bawah kapal, mulai dari sekat buritan hingga sekat ruang mesin, meliputi *centre girder*, *solid floor*, *side girder*, *bottom plate*, *engine girder*, serta pelat penopang tambahan, sesuai dengan gambar konstruksi yang tersedia. Pemodelan *surface* dilakukan dengan menggunakan *software Rhino* dan pendefinisian koneksi *surface*, *thickness*, serta *meshing* dilakukan pada *software Ansys Structural mechanics (Mechanical APDL)* dengan ukuran elemen 30 mm, *nodes* sebanyak 336625, dan *elements* 323360. Gambar 8. adalah hasil dari *meshing surface software Ansys Structural mechanics* [11].



Gambar 8. Model Pondasi sesudah Meshing

Validasi pada model dilakukan dengan perhitungan analitik dan numerik atau perbandingan antara perhitungan manual dengan perhitungan *software*. Perhitungan dengan analitik dilakukan dengan menerapkan pendekatan yang berdasarkan pada rumus defleksi yang digunakan dalam mekanika teknik. Defleksi merujuk pada

perubahan bentuk atau penyimpangan dari posisi awal suatu struktur saat diberikan beban. Untuk menghitung defleksi, digunakan rumus tertentu yang telah terbukti efektif dalam menjelaskan fenomena tersebut. Persamaan 1. adalah rumus yang digunakan untuk melakukan perhitungan defleksi.

$$\text{Defleksi} = \frac{F \times L^3}{3 \times E \times I} \quad (1)$$

Di mana :

F = Force (N)

L = Panjang model (mm)

E = Modulus Elasticity (Mpa)

I = Inersia (mm⁴)

2.4. Pendefinisian Material

Penelitian ini menggunakan data material sesuai yang digunakan pada KMP. BRR. Komponen yang digunakan adalah baja standar yang telah disesuaikan dengan spesifikasi dari BKI dengan notasi KI-A36. Adapun nilai-nilai spesifik dari material KI-A36 yang digunakan dalam penelitian ini dijabarkan berikut [12].

Modulus Elasticity	= 200000 MPa
Yield	= 250 MPa
Poisson Ratio	= 0,3
Shear Modulus	= 79300 MPa
Density	= 7850 kg/m ³
Ultimate Stress	= 400 MPa

2.5. Pendefinisian Beban

Penelitian ini menggunakan lima jenis beban yang dilakukan penginputan sesuai data yang tersedia, yakni beban berat *gearbox*, beban berat *main engine*, beban momen torsi, yang dihasilkan saat mesin beroperasi, beban gaya dorong yang disebabkan oleh interaksi *thrust block*, dan beban tekanan hidrostatis pada kapal. Metode perhitungan untuk mengetahui beban adalah sebagai berikut.

2.5.1. Beban Mesin Induk

Mesin induk KMP. BRR merupakan Yanmar 12AYM-WST. Pembebanan dilakukan dengan cara *Multiple Point Loads (MPL)* dengan satu titik ditetapkan sebagai *load* dan *node* lain adalah *node* yang disalurkan gaya dari *load*. Titik yang berada di kupingan *main engine* membebani *engine bed*. Persamaan 2. merupakan perhitungan beban mesin induk [13].

$$Wme = Mme \times g \quad (2)$$

Di mana :

Wme = Beban *main engine* (N)

Mme = Berat *main engine* (kg)

g = Gravitasi (m/s²)

2.5.2. Beban Gearbox

Gearbox KMP. BRR menggunakan *gearbox* Yanmar YXH-500L-1. Pembebanan dilakukan dengan cara *Multiple Point Loads (MPL)* dengan satu titik ditetapkan sebagai *load* dan *node* lain adalah *node* yang disalurkan gaya dari *load*. Persamaan 3. adalah perhitungan dari beban *gearbox*.

$$Wg = Mg \times g \quad (3)$$

Di mana :

Wg = Beban *gearbox* (N)

Mg = Berat *gearbox* (kg)

g = Gravitasi (m/s²)

2.5.3. Beban Momen Torsi Mesin

Momen torsi mesin adalah momen yang ditimbulkan akibat adanya putaran mesin yang menjadi beban pada pondasi mesin. Momen torsi dihitung dengan perbandingan antara daya mesin dan putaran mesin (rpm). *Node* pembebanan didefinisikan sebagai *center of mass* mesin menggunakan fungsi *moment* pada *software* Ansys ke kupingan-kupingan mesin. Persamaan 4. adalah rumus untuk menetapkan momen torsi mesin.

$$T_{eng} [\text{kNm}] = \frac{P_{eng} [\text{KW}] \times 9,55}{\omega_{eng} [\text{rpm}]} \quad (4)$$

Di mana :

T_{eng} = Momen torsi mesin (kNm)

P_{eng} = Daya mesin (KW)

ω_{eng} = RPM mesin (rpm)

2.5.4. Beban Gaya Dorong

Beban gaya dorong muncul dari interaksi dengan *thrust block*, yang mentransfer gaya propeller ke struktur kapal. Beban dianggap sebagai beban statis karena konstan saat kapal beroperasi. Persamaan 5. adalah perhitungan gaya dorong [14].

$$T = \frac{Rt}{(1-t)} \quad (5)$$

Di mana :

T = Beban gaya dorong (kN)

Rt = Hambatan total (Kn)

t = Fraksi deduksi gaya dorong

Nilai hambatan total (Rt) didapatkan melalui perhitungan menggunakan metode *holtrop* dan *software Maxsurf*. Nilai fraksi deduksi gaya dorong didapatkan dengan mengetahui Cp pada kapal dan jumlah *propeller*. Persamaan 6. adalah rumus untuk mengetahui nilai fraksi deduksi gaya dorong (t)

$$t = (0,5 \times Cp) - 0,19 \text{ (twin screw) (6)}$$

Di mana :

t = Fraksi deduksi gaya dorong

Cp = *Prismatic coefficient*

2.5.5. Tekanan Hidrostatik

Tekanan hidrostatik merupakan tekanan yang yang dihasilkan oleh air laut sebagai akibat adanya gaya grafitasi dengan perhitungan tekanan hidrostatik. Persamaan 7 adalah rumus untuk menentukan tekanan hidrostatik.

$$P = (\rho \ g \ h) \quad (7)$$

Di mana :

P = Tekanan (MPa)

ρ = Massa jenis air laut (kg/m³)

g = Grafitasi (m/s²)

h = *Draft* kapal (m)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil berupa perbandingan analisa berbagai variasi didapatkan melalui metode elemen hingga menggunakan *software Ansys*. Proses yang dilakukan diantara lain perhitungan beban, *boundary condition*, validasi model, analisa kondisi I dan II dengan variasi plat yang ada, dan membandingkan hasil variasi kedua kondisi.

3.1. Perhitungan Beban

Model *finite element* yang telah selesai dibuat kemudian diberikan *boundary condition* yang akan berfungsi selaku tumpuan tetap (translasi serta rotasi pada sumbu x, y, serta z *fix*).

3.1.1. Beban Mesin Induk

Mesin induk yang digunakan KMP.BRR merupakan Yanmar 12AYM-WST dengan bobot 4950 kg. Berikut adalah perhitungan beban *main engine* menggunakan Persamaan 2.

$$\begin{aligned} W_{me} &= 4950 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 \\ &= 48510 \text{ N} \end{aligned}$$

Main engine yang disertai dengan 4 kupingan mengakibatkan beban diinput dengan menggunakan metode MPL. Perhitungan beban diinput dengan membuat elemen *rigid, node* yang berada pada ketinggian 595 mm dari *solid floor* dijadikan sebagai *independent node*. *Nodes* yang terhubung ke *engine bed* berperan sebagai *dependent node*. Beban yang diinputkan pada *node* ini adalah beban berat *main engine* yaitu 48.510 N.

3.1.2. Beban Gearbox

Gearbox KMP. BRR menggunakan *gearbox* Yanmar YXH-500L-1 dengan bobot 1620 kg. Berikut adalah perhitungan beban *gearbox* menggunakan Persamaan 3.

$$\begin{aligned} W_g &= 1620 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 \\ &= 15876 \text{ N} \end{aligned}$$

Gearbox yang disertai dengan 2 kupingan mengakibatkan beban diinput dengan menggunakan metode MPL. Perhitungan beban diinput dengan membuat elemen *rigid, node* yang berada pada ketinggian 595 mm dari *solid floor* dijadikan sebagai *independent node*. *Nodes* yang terhubung ke *engine bed* berperan sebagai *dependent node*. Beban yang diinputkan pada *node* ini adalah beban berat *gearbox* yaitu 15.876 N.

3.1.3. Beban Momen Torsi Mesin

Diketahui bahwa mesin utama memiliki daya sebesar 882 kW dan kecepatan 1850 rpm torsi mesin dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$T_{eng} [\text{kNm}] = \frac{882 \times 9,55}{1850} = 4,55 \text{ kNm}$$

Torsi mesin yang dihasilkan melalui persamaan 4 adalah 4550 x 10³ Nmm. Perhitungan beban dilakukan dengan elemen *rigid, node* yang berada di ketinggian 595 mm dari *solid floor* dijadikan *independent node*. *Nodes* yang terhubung ke *engine bed* berperan sebagai *dependent node*.

3.1.4. Beban Gaya Dorong

Melalui data kapal didapatkan *coefficient perismatic* (Cp) adalah 0,613. Perhitungan gaya dorong dilakukan dengan menghitung nilai fraksi deduksi gaya dorong terlebih dahulu menggunakan Persamaan 6.

$$\begin{aligned} t &= (0,5 \times 0,613) - 0,19 \\ &= 0,1165 \end{aligned}$$

Perhitungan hambatan total (R_t) dilakukan menggunakan *software Maxsurf* serta metode holtrop. Nilai total hambatan yang didapatkan melalui *software* adalah sebesar 88,6 Kn. Berikut adalah perhitungan gaya dorong pada kapal menggunakan Persamaan 5.

$$T = \frac{88,6}{(1-0,1165)} \\ = 100,293 \text{ kN} \\ = 100293 \text{ N.}$$

Hasil yang ditunjukkan dari persamaan beban gaya dorong adalah 100293 N. Nilai tersebut diinput ke *software* dengan metode *MPL* pada bagian *thrust block* kapal.

3.1.5. Tekanan Hidrostatik

Massa jenis air laut (ρ) adalah 1025 kg/m³, gravitasi (g) adalah 9,81 m/s², serta kedalaman kapal (h) adalah 2,5 m. Persamaan 7. merupakan cara untuk mendapatkan nilai tekanan.

$$P = (1025 \times 9,81 \times 2,5) \\ P = 25138,13 \text{ Pa.} \\ P = 0,025 \text{ MPa.}$$

Hasil yang ditunjukkan dari persamaan, didapatkan tekanan hidrostatik 0,025 Mpa. Nilai tersebut diinput kepada *surface bottom plate* dengan nilai Z menuju sumbu negatif.

3.2. Penentuan Boundary Condition

Model *finite element* yang telah selesai dibuat kemudian diberikan *boundary condition* yang akan berfungsi selaku tumpuan tetap (translasi serta rotasi pada sumbu x, y, serta z *fix*). *Boundary condition* KMP.BRR diletakan pada *neutral axis* kapal. Pembuatan *remote displacement* dilakukan pada kedua *surface* sekat yang bersifat *rigid*, yaitu sekat *engine room* dan sekat buritan. *Surface* yang terletak pada sekat dihubungkan ke ketinggian *neutral axis* dijadikan sebagai *node fix support*. Tinggi *neutral axis* adalah 1703,363 mm untuk kapal penyeberangan dengan bobot 1000 GT.

3.3. Validasi Model

Validasi pada model dilaksanakan guna memahami similaritas dari model *finite element* yang sudah dilakukan pembuatan. Satu diantara metode yang dilaksanakan adalah dengan perbandingan perhitungan numerik dan analitik.

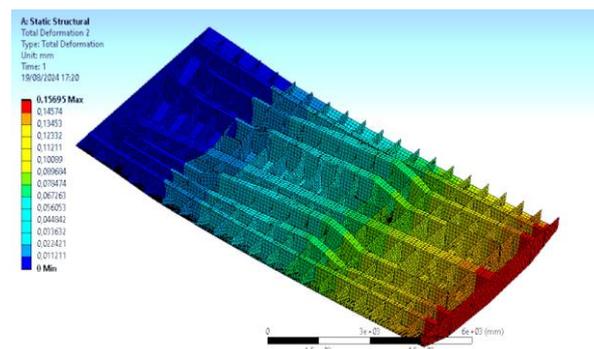
3.3.1 Perhitungan Analitik

Perhitungan defleksi merujuk pada perubahan bentuk atau penyimpangan dari posisi awal suatu struktur saat diberikan beban. F yakni *Force* (N) yaitu 1000 N, L ialah Panjang model (mm) yaitu 12000 mm, E ialah *Modulus Elasticity* (MPa) yaitu 200000 MPa, serta I ialah *Inersia* (mm⁴) yakni 16957388963 mm⁴. Hasil perhitungan defleksi menggunakan Persamaan 1 adalah sebagai berikut.

$$\text{Defleksi} = \frac{1000 \times 12000^3}{3 \times 200000 \times 16957388963} \\ = 0,16983 \text{ mm.}$$

Hasil defleksi adalah 0,16983 mm melalui rumus. Hasil dari perhitungan tersebut kemudian menjadi perbandingan dengan perhitungan secara *software*.

3.3.2 Perhitungan Numerik



Gambar 9. Validasi Model Pondasi

Perhitungan secara numerik dilaksanakan dengan memanfaatkan *software Ansys* sesuai dengan model yang sudah dikembangkan sebelumnya. Gambar 9. adalah proses perhitungan numerik yang memiliki hasil defleksi sebesar 0,15695 mm.

Tabel 2. Perbandingan hasil analitik dan hasil numerik.

Hasil Analitik	Hasil Numerik	Error
0,16983 mm	0,15695 mm	8%

Tabel 2. Menjelaskan perbandingan diantara perhitungan analitik dengan numerik memiliki persentase error yakni 8%. Model telah dinyatakan valid, dikarenakan persentase error < 10%.

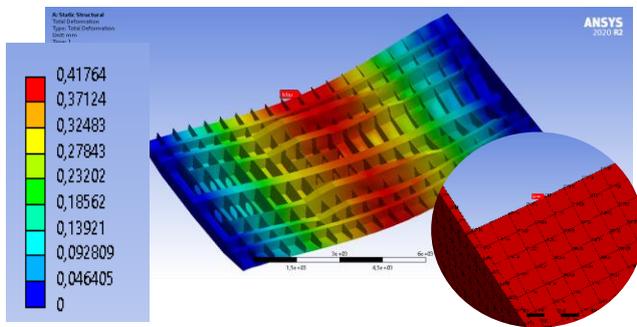
3.4. Hasil Analisis Kondisi I

Kondisi I dianggap saat kapal sedang berlabuh. Beban yang terjadi pada saat kapal berlabuh diasumsikan hanya beban berat kedua *main engine*, *gearbox* serta *hydrostatic pressure*. Hasil analisis penelitian meliputi 2 variasi ketebalan yang berbeda yaitu tebal yang sesuai dengan konstruksi dan tebal yang sudah dimodifikasi.

3.4.1 Tebal Sesuai Konstruksi

Konstruksi sesuai dengan kapal saat ini memiliki tebal pelat yang tertera pada Tabel 1. Berikut adalah hasil analisis defleksi dan *stress* untuk tebal pelat sesuai dengan konstruksi.

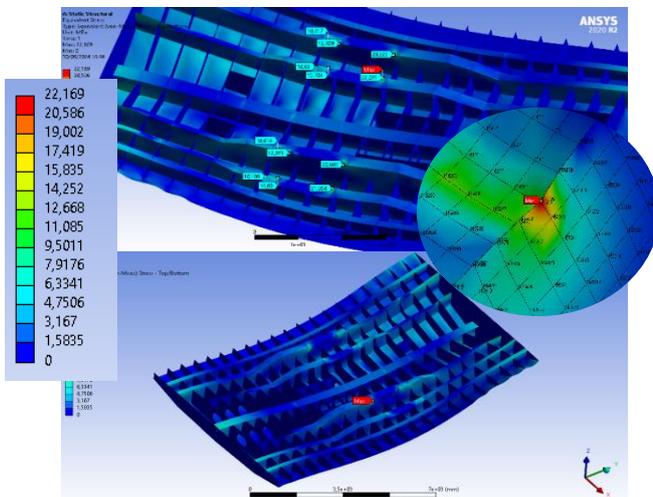
a. Defleksi



Gambar 10. Defleksi Kondisi I Sesuai Konstruksi

Gambar 10. menunjukkan defleksi maksimal terjadi pada *bottom plate* antara *frame* 20 dan 21 di *node* 215114. Nilai defleksi maksimal adalah 0,41764 mm.

b. Stress



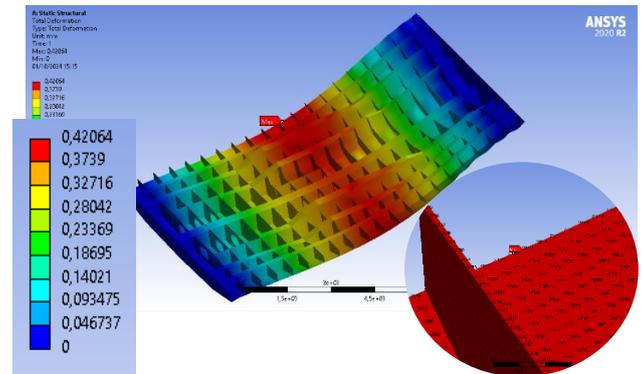
Gambar 11. *Stress* Kondisi I Sesuai Konstruksi

Gambar 11. menampilkan tegangan maksimum yang timbul antara sambungan *engine girder* dengan *engine bed frame* 20 dan 21 di *node* 157739. Nilai *stress* maksimum adalah 22,169 MPa.

3.4.2 Tebal Setelah Modifikasi

Konstruksi setelah modifikasi memiliki tebal pelat yang tertera pada Tabel 1. Berikut adalah hasil analisis defleksi dan *stress* setelah adanya modifikasi pada konstruksi.

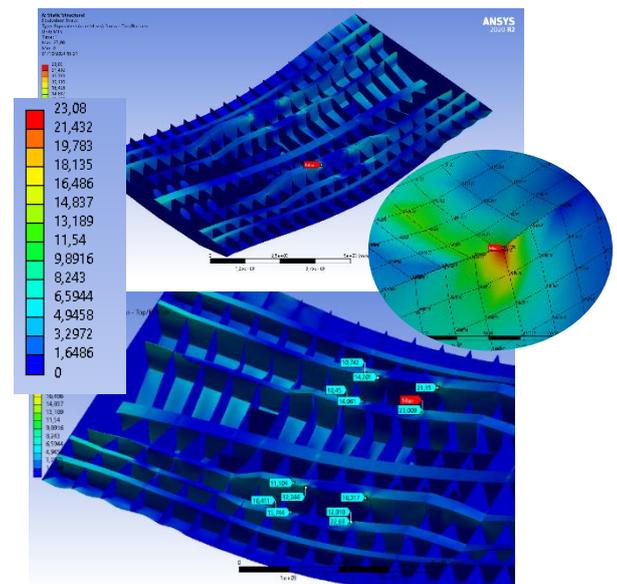
a. Defleksi



Gambar 12. Defleksi Kondisi I Setelah Modifikasi

Gambar 12. menampilkan defleksi maksimum yang timbul pada *bottom plate* antara *frame* 20 dan 21 di *node* 21511. Nilai defleksi maksimum adalah 0,42064 mm.

b. Stress



Gambar 13. *Stress* Kondisi I Setelah Modifikasi

Gambar 13. menampilkan tegangan maksimum yang timbul antara *frame* 20 dan 21 pada sambungan *engine girder* dengan *engine bed* di *node* 157739. Nilai *stress* maksimum adalah 23,08 MPa.

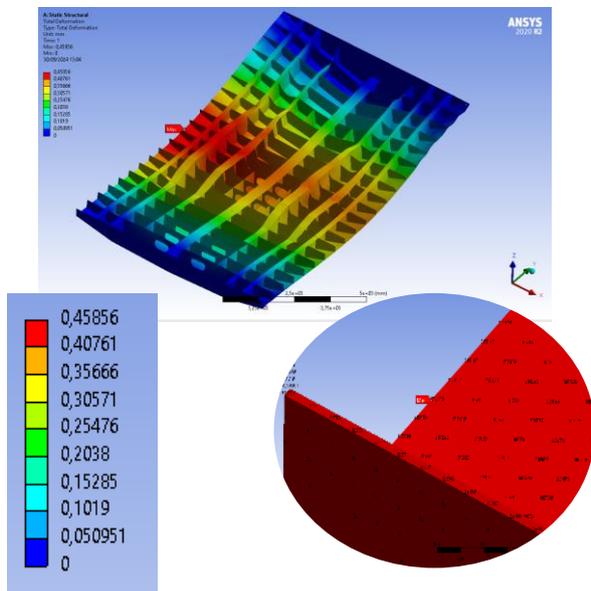
3.5. Hasil Analisis Kondisi II

Kondisi II dianggap saat kapal sedang melakukan manuver ke kiri sehingga hanya *main engine* kanan yang beroperasi. Diasumsikan beban yang terjadi yaitu berat kedua *main engine*, *gearbox*, *hydrostatic pressure* yang diakibatkan oleh adanya tekanan dari air laut, dan gaya dorong dari *thrust block*. Hasil dari analisis kondisi II meliputi 2 variasi yang berbeda yaitu tebal sesuai dengan konstruksi dan tebal setelah adanya modifikasi.

3.5.1 Tebal Sesuai Konstruksi

Konstruksi sesuai dengan kapal saat ini memiliki tebal pelat yang tertera pada Tabel 1. Berikut adalah hasil analisis defleksi dan *stress* sesuai dengan konstruksi.

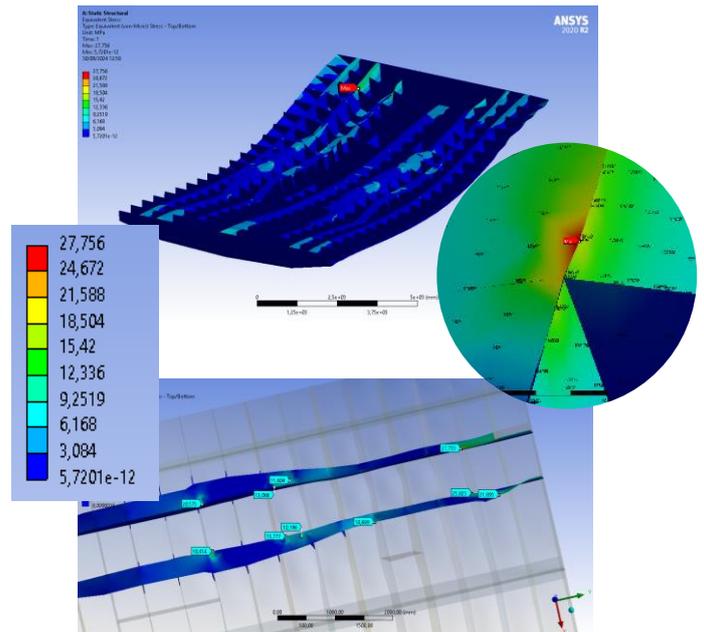
a. Defleksi



Gambar 14. Defleksi Kondisi II Sesuai Konstruksi

Gambar 14. menampilkan defleksi maksimum yang timbul pada *bottom plate* antara *frame* 20 dan 21 di *node* 215116. Nilai defleksi tertinggi adalah 0,45856 mm.

b. Stress



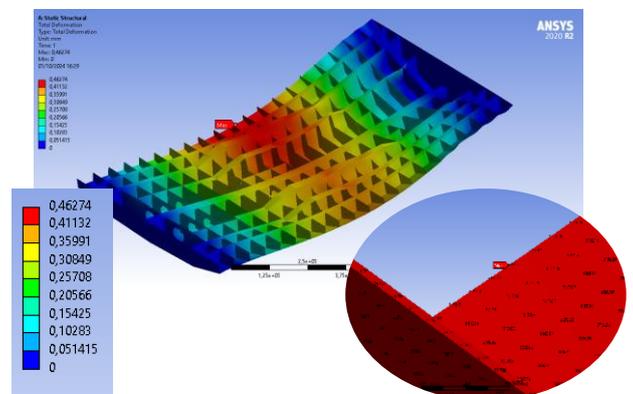
Gambar 15. *Stress* Kondisi II Sesuai Konstruksi

Gambar 15. menampilkan tegangan maksimal yang terjadi pada sambungan *engine girder* dengan *engine bed* antara *frame* 12 dan 13 di *node* 143433. Nilai *stress* tertinggi adalah 27,756 MPa.

3.5.2 Tebal Setelah Modifikasi

Konstruksi setelah modifikasi memiliki tebal pelat tertera pada Tabel 1. Berikut adalah hasil analisis defleksi dan *stress* setelah adanya modifikasi pada konstruksi.

a. Defleksi

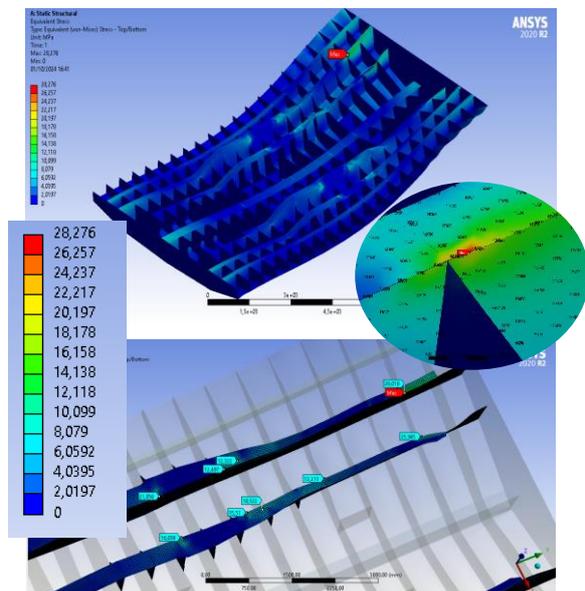


Gambar 16. Defleksi Kondisi II Setelah Modifikasi

Gambar 16. menampilkan defleksi maksimal yang terjadi pada *bottom plate* antara *frame* 20 dan

21 di *node* 215116 yang tertera. Nilai defleksi tertinggi adalah 0,46274 mm.

a. *Stress*



Gambar 17. *Stress* Kondisi II Setelah Modifikasi

Gambar 17. menampilkan tegangan maksimum yang terjadi pada sambungan *engine girder* dengan *engine bed* antara *frame* 12 dan 13 di *node* 143433. Nilai *stress* tertinggi adalah 28,276 MPa

3.6. Rangkuman Analisis Struktur

Data berupa tegangan dan defleksi setiap variasi dan kondisi diperoleh melalui analisa kondisi dengan variasi yang dilakukan sebelumnya. Tabel 3. dan Tabel 4. adalah rangkuman analisis dari struktur sesuai konstruksi dan setelah modifikasi.

Tabel 3. Rangkuman hasil analisis sesuai konstruksi

Jenis Kondisi	σ maks (MPa)	δ maks (mm)
Kondisi I	22,169	0,418
Kondisi II	27,756	0,459

Tabel 4. Rangkuman hasil analisis setelah modifikasi

Jenis Kondisi	σ maks (MPa)	δ maks (mm)
Kondisi I	23,08	0,421
Kondisi II	28,276	0,463

Tabel 3. dan Tabel 4. menunjukkan perbedaan defleksi maksimum sesuai konstruksi dan setelah

modifikasi pada kondisi I sebesar 0,003 mm dan pada kondisi I terdapat perbedaan defleksi maksimum 0,004 mm. Penambahan defleksi yang tidak terlalu signifikan terlihat karena adanya pengurangan ketebalan pada *engine bed*.

Perbedaan tegangan sesuai konstruksi dengan setelah modifikasi pada kondisi I sebanyak 0,911 MPa dan perbedaan kondisi II yaitu 0,52 MPa. Menurut analisa, kenaikan hasil tegangan dan defleksi maksimum dipicu akibat penurunan tebal pada *engine bed*. Kenaikan pada kondisi I lebih signifikan dibandingkan Kondisi II, hal ini terjadi akibat pada kondisi I *stress* lebih banyak terjadi pada daerah *engine bed* yang dikurangi tebalnya, sedangkan *stress* pada kondisi II lebih banyak terjadi pada area *thrust block*.

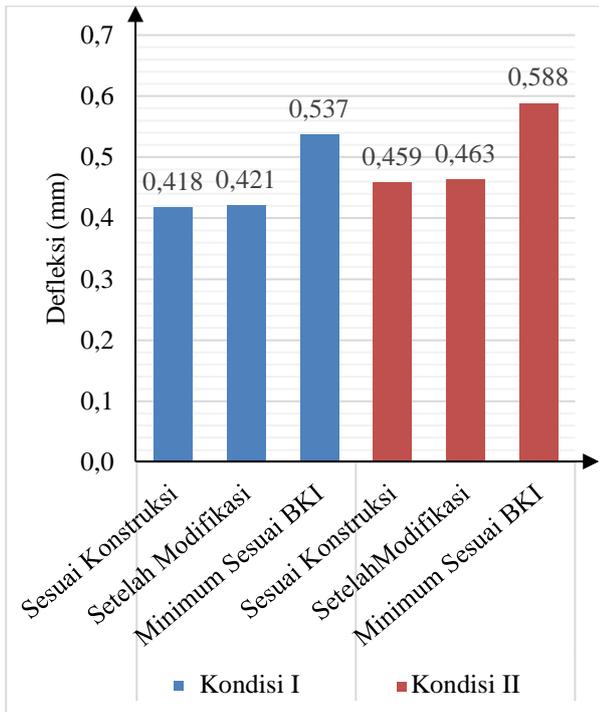
Gambar 13. dengan Gambar 17. menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan. Kondisi I atau Gambar 13. menjelaskan bahwa *stress* lebih rentan terjadi di area *engine girder*, sedangkan pada kondisi II atau Gambar 17. *stress* terjadi pada *engine girder* bagian *thrust block* kapal. Perbedaan sebanyak 5,196 MPa terjadi pada analisis *stress* antara kondisi I dan II setelah modifikasi. Perbedaan letak *stress* ini terjadi karena besarnya gaya dorong dari *propeller* ke *thrust block* yang lebih besar dibandingkan beban *main engine* dan *gearbox*.

3.7. Perbandingan Hasil Variasi

Perbandingan hasil variasi dilakukan pada model yang sesuai dengan membandingkan konstruksi asli, ketebalan pelat yang sudah dimodifikasi, dan dengan ketebalan pelat minimal yang diatur dalam rules BKI. Perbandingan hasil variasi dilakukan dengan tujuan mendapatkan nilai defleksi dan *stress* dari masing-masing variasi. Hasil perbandingan yang menunjukkan pengaruh variasi ketebalan terhadap struktur diperoleh melalui analisa kondisi berlabuh dan kondisi pada saat manuver. Tabel 5. dan Tabel 6. adalah hasil dari perbandingan defleksi dan *stress* maksimum. Gambar 18. dan Gambar 19. merupakan grafik perbandingan defleksi dan *stress* maksimum.

Tabel 5. Perbandingan hasil defleksi maksimum

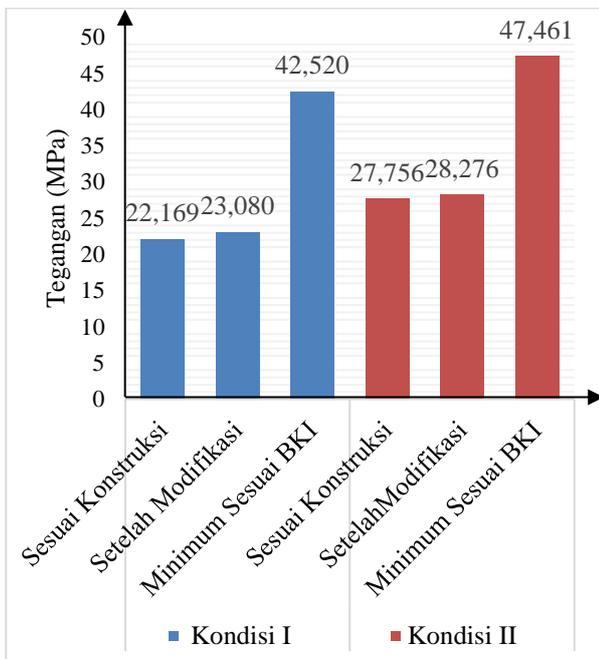
Jenis Kondisi	Tebal Sesuai Gambar Konstruksi	Tebal Setelah Modifikasi	Tebal Minimum Sesuai BKI
Kondisi I	0,418	0,421	0,537
Kondisi II	0,459	0,463	0,588



Gambar 18. Grafik Perbedaan Defleksi

Tabel 6. Perbandingan Hasil Tegangan Maksimum

Jenis Kondisi	Tebal Sesuai Gambar Konstruksi	Tebal Setelah Modifikasi	Tebal Minimum Sesuai BKI
Kondisi I	22,169	23,08	42,52
Kondisi II	27,756	28,276	47,461



Gambar 19. Grafik Perbedaan Tegangan

3.7 Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Faktor keamanan atau disebut juga *safety factor* merupakan kapabilitas keamanan material

apabila mendapat beragam beban dari luar, yakni *tensile load* (beban tarik) maupun *compressive load* (beban tekan). Sebuah struktur diungkapkan aman, jika nilai $S_f > 1$.

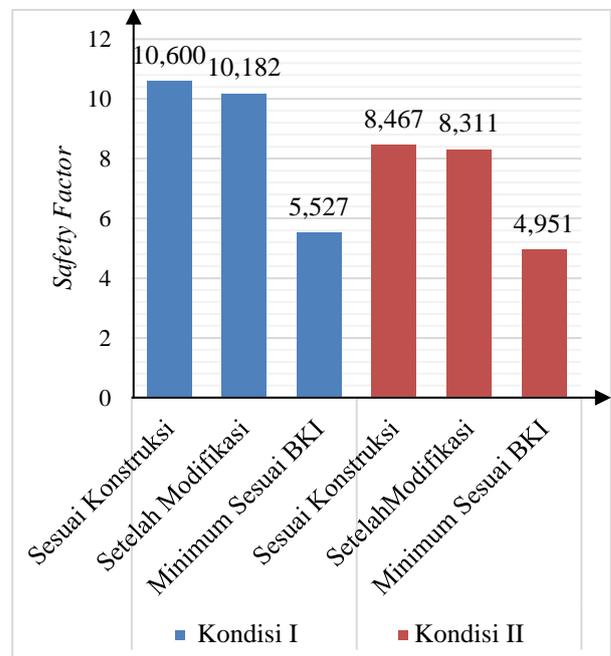
Tabel 7. Kriteria Kekuatan Menurut BKI

Jenis Kondisi	σ maks (MPa)	σ izin (MPa)	Keterangan
Kondisi I	22,169	235	Memenuhi
Kondisi II	23,08	235	Memenuhi

Struktur *bottom* memiliki tegangan izin yakni 230 MPa, sesuai dengan yang ada pada BKI 2024 *Volume II Section 8. B. 8. 2. 2*. Tabel 7. menunjukkan bahwa kondisi I dan II mencukupi kriteria kekuatan *rules* BKI.

Tabel 8. Perbandingan *Safety Factor* pada Berbagai Material

Jenis Kondisi	σ maks (MPa)	σ izin (MPa)	<i>Safety Factor</i>
Ketebalan Sesuai Konstruksi			
Kondisi I	22,169	235	10,6
Kondisi II	27,756	235	8,5
Ketebalan Sesudah Modifikasi			
Kondisi I	23,08	235	10,2
Kondisi II	28,26	235	8,3
Ketebalan Minimum Sesuai BKI			
Kondisi I	42,52	235	5,5
Kondisi II	47,461	235	5



Gambar 20. Grafik *Safety Factor*

Tegangan izin berdasarkan material yang tercantum dalam *rules* BKI *Volume II* Bagian 2 yakni 235 MPa. Berdasarkan data Tabel 8, *safety factor* paling kecil ditemukan pada kondisi II, yakni untuk model struktur dengan ketebalan pelat

serta profil sesuai dengan konstruksi adalah 8,5, untuk model yang sudah dimodifikasi sebesar 8,3 dan untuk model yang sudah divariasikan dengan ketebalan pelat serta profil minimal sesuai dengan aturan BKI sebesar 5. Data tersebut menunjukkan konstruksi pondasi mesin yang sesuai konstruksi maupun setelah modifikasi berada dalam kondisi aman berdasarkan ketebalan material yang digunakan ($S_f > 1$).

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari kekuatan konstruksi pondasi mesin akibat beban statis *main engine* pada KMP. BRR menggunakan *finite element method* yang telah dilakukan adalah hasil yang berupa nilai defleksi dan tegangan, perbandingan terhadap ketebalan pelat minimum sesuai *rules* BKI, dan *safety factor* dari variasi yang dianalisis.

Modifikasi yang dilakukan pada konstruksi pondasi *main engine* mengurangi kekuatan struktur karena pengurangan material pada *engine bed*. Hal ini ditunjukkan dengan peningkatan tegangan maksimum dari 22,169 MPa menjadi 23,08 MPa untuk kondisi pada saat kapal berlabuh, dan dari 27,756 MPa menjadi 28,276 MPa untuk kondisi kapal melakukan manuver, serta peningkatan defleksi maksimum dari 0,41764 mm menjadi 0,42064 mm pada kondisi kapal sedang berlabuh, dan dari 0,45856 mm menjadi 0,46274 mm pada kondisi kapal sedang melakukan manuver.

Hasil antara struktur model yang sudah dimodifikasi ketebalannya dengan ketebalan pelat serta profil minimal yang merujuk pada *rules* BKI diperoleh perbedaan tegangan dan defleksi yang dominan terlihat pada pelat yang merujuk pada *rules* BKI. Perbedaan dari *stress* maksimal adalah sebesar 14,764 MPa pada kondisi kapal berlabuh dan 19,201 MPa pada kondisi kapal sedang melakukan manuver. Perbedaan defleksi yang terjadi pada kondisi kapal berlabuh adalah 0,116 mm dan kondisi pada saat manuver adalah 0,125 mm. Perbedaan yang terjadi adalah akibat dari ketebalan pelat yang sesuai dengan minimum BKI lebih tipis dibandingkan yang sudah dimodifikasi namun, menurut keamanan masih mencukupi.

Safety factor paling kecil yang diperoleh dari struktur pondasi mesin kapal KMP. BRR yakni untuk model sesuai konstruksi yang digunakan sebesar 8,5, untuk model struktur yang telah dilakukan modifikasi sebesar 8,3, dan untuk model yang sudah dilakukan variasi dengan ketebalan pelat serta profil minimal yang merujuk pada *rules* BKI sebesar 5.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Grubišić, N. Vulić, and S. Sönnichsen, *Structural Durability Validation of Bearing Girders*. Southampton: University of Southampton, 2007.
- [2] F. A. Saputro, H. Yudo, and I. P. Mulyatno, "Studi Perhitungan Respon Struktur Pondasi Mesin Kapal Penyeberangan 1000 GT Akibat Pembebanan Statis," *Tek. Perkapalan*, vol. 8, no. 2, pp. 167–174, 2020.
- [3] Alamsyah, A. I. Wulandari, and N. R. Pamungkas, "Analisis Kekuatan Struktur Pondasi Mesin Kapal TB. Sungai Sepaku 155 GT Dengan Metode Elemen Hingga," *TRAKSI Maj. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 20, pp. 81–92, 2020, doi: <https://dx.doi.org/10.26714/traksi.20.2.2020.81-92>.
- [4] K. M. Y. Emily, P. N. A. Nugroho, and B. Herijono, "Kajian Kekuatan Struktur Pondasi Mesin Induk *Harbour Tug Boat*," *Mar. Sci. Technol. J.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2021.
- [5] N. Bonita, A. W. Husodo, and H. Poernomo, "Analisis Kekuatan Dan Kelelahan Konstruksi Pondasi Mesin Kapal *General Cargo 6088 Gt*," no. 2655, pp. 4–8, 2023.
- [6] A. Trihantoro, I. P. Mulyatno, and W. Amiruddin, "Analisa Kekuatan Struktur *Deck Crane* Kapal Tanker 6500 DWT Menggunakan Metode Elemen Hingga," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 10, no. 4. p. 52, 2022.
- [7] M. H. Pratama, H. Yudo, and I. P. Mulyanto, "Analisis Kekuatan Konstruksi *Car Deck* Kapal Penyeberangan 1000 GT Akibat Perubahan Muatan Dengan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 8, no. 3, pp. 426–434, 2020.
- [8] K. Dokkum, "*Ship Knowledge : A Modern Encyclopedia*," *Dokmar*. p. 340, 2003.
- [9] Yanmar, *Marine Diesel Engine Product Guide*. Yanmar.com, 2014.
- [10] Biro Klasifikasi Indonesia, *Rules for Hull*, vol. II. 2024.
- [11] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, vol. IV, no. 2. 1987.
- [12] Biro Klasifikasi Indonesia, *Rules for materials*, vol. V, no. January. 2025.
- [13] E. P. Popov, *Mechanics of Materials*, vol. II. 1996.
- [14] MAN Diesel & Turbo, *Basic Principles of Ship Propulsion*. 2011.