



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Kajian Kekuatan Konstruksi *Car Deck* dengan *Finite Element Method* Pada Kapal Ro-Ro 2919 GT

Putri Apriliantin Dwi Wahyudi¹⁾, Imam Pujo Mulyatno²⁾, Samuel³⁾

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 : putriapriliantin@students.undip.ac.id, imampujomulyatno@lecturer.undip.ac.id,
Samuel@lecturer.undip.ac.id

Abstrak

Car deck pada kapal berfungsi sebagai area penyimpanan kendaraan beserta muatannya selama operasi pelayaran. Konstruksi *car deck* harus memenuhi standar keselamatan dan struktur sesuai dengan regulasi yang telah ditetapkan oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). Penelitian ini menggunakan material baja EH 36 dengan muatan 20 ft, 40 ft, dan campuran pada kondisi ketebalan plat 100%, 90%, dan 80% dalam kondisi air tenang, gelombang sagging dan gelombang hogging. Tujuan dari penelitian ini yaitu menganalisis kekuatan struktur serta menentukan faktor keamanan pada konstruksi *car deck* kapal Ro-Ro 2919 GT. Penelitian ini menerapkan metode elemen hingga untuk menentukan nilai tegangan maksimum dan nilai safety factor. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi ketebalan plat deck 100% tercatat tegangan maksimum sebesar 192.7 MPa, pada 90% sebesar 203.5 MPa, dan pada 80% sebesar 215.1 MPa, semuanya terjadi pada kondisi gelombang sagging dengan muatan campuran. Secara keseluruhan semua variasi memenuhi kriteria yang diizinkan BKI, namun pada kondisi ketebalan plat deck 80% mendekati batas aman, yang mengindikasikan perlunya perhatian lebih lanjut terhadap potensi risiko kegagalan struktur.

Kata Kunci : *Car Deck*, Kekuatan Konstruksi, Finite Element Method (FEM), Safety Factor

1. PENDAHULUAN

Car deck atau dikenal dengan geladak kendaraan merupakan komponen struktural penting pada kapal, ponton, atau dermaga yang berfungsi sebagai area untuk memuat kendaraan seperti motor, mobil, truk, atau bus. Konstruksi *car deck* yang tidak memadai akan menyebabkan kegagalan struktur, yang dapat membahayakan keselamatan kapal dan penumpangnya. *Car deck* harus memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban yang diberikan [1].

Diperlukan adanya perhitungan kekuatan konstruksi untuk memastikan agar tidak terjadi kegagalan struktur. Perhitungan dapat dilakukan dengan menerapkan metode elemen, FEM (*Finite Element Method*) merupakan salah satu metode numerik yang efektif untuk menganalisis kekuatan pada struktur yang kompleks seperti *car deck*. Simulasi dapat dilakukan menggunakan FEM

dengan berbagai kondisi pembebanan untuk mendapatkan kinerja struktur dan menentukan faktor keamanan pada konstruksi *car deck*.

Beberapa studi mengenai kekuatan *car deck* telah dilakukan, di antaranya analisis kekuatan *car deck* pada kapal penyeberangan 1000 GT menggunakan metode elemen hingga. Analisis dilakukan dengan tiga variasi muatan kendaraan dan tiga kondisi gelombang. Hasil menunjukkan bahwa nilai tegangan paling maksimum terjadi ketika kapal dalam kondisi gelombang sagging dengan muatan truk mendapatkan tegangan maksimum yang didapatkan pada frame 63 dan node 1889224 yaitu sebesar 173.048 MPa, dengan maksimal defleksi sebesar 1.92 cm [2].

Berdasarkan penelitian lain tentang analisis kekuatan *deck barge* Nania 10070 DWT dengan 2 variasi pembebanan muatan menggunakan metode elemen hingga, menunjukkan bahwa tegangan maksimum terjadi pada area *replating* dengan nilai

masing-masing sebesar 369.97 MPa dan 394.39 MPa. Deformasi yang dihasilkan dari kedua variasi pembebanan adalah 28.765 mm dan 27.783 mm, yang masih berada di bawah batas toleransi deformasi maksimum sebesar 36 mm, dengan nilai *safety factor* berdasarkan tegangan maksimum yang diperoleh sebesar 1.389 dan 1.303. sehingga rata-rata nilai *safety factor* dari seluruh percobaan adalah 1.346, yang berada di atas standar yang ditetapkan [3].

Hasil penelitian lain yang membahas tentang analisis kekuatan konstruksi *car deck* pada Ro-Ro *Passenger ship* terhadap penambahan panjang menggunakan metode elemen hingga, menunjukkan bahwa nilai tegangan yang diperoleh adalah 38.449 MPa dalam kondisi air tenang, 38.029 MPa dalam kondisi gelombang *sagging*, dan 44.057 MPa dalam kondisi gelombang *hogging*. Nilai defleksi yang dihasilkan adalah 0.000744 m pada kondisi air tenang, 0.000749 m dalam kondisi gelombang *sagging*, dan 0.000741 m dalam kondisi gelombang *hogging*. Jika dibandingkan dengan kriteria *safety factor* yang ditentukan, hasil ini menunjukkan bahwa struktur berada dalam kondisi aman dan sesuai dengan persyaratan yang ditetapkan oleh rules BKI [4].

Berdasarkan penelitian tentang kekuatan batas struktur kapal Ferry Ro-Ro dengan variasi jarak gading 700, 800, 900, 1000 dari jarak gading aktual sebesar 600 mm, menunjukkan bahwa jarak gading yang paling optimal berada pada jarak 700 mm, dengan momen batas pada kondisi gelombang *hogging* sebesar 1.88×10^{12} Nmm dan pada kondisi gelombang *sagging* sebesar -1.33×10^{12} Nmm [5].

Penelitian yang sama juga dilakukan pada kapal Ferry Ro-Ro 500 GT mengenai analisis kekuatan *car deck* menggunakan metode elemen hingga. Dilakukan analisa dengan variasi keadaan kapal saat air tenang dan oleng 320, serta perubahan muatan truk sedang ke truk tronton. Hasil analisis menunjukkan tegangan maksimum terjadi saat kapal mengalami perubahan muatan dalam kondisi air tenang, dengan nilai sebesar 142 N/mm². Nilai ini masih dalam batas aman berdasarkan aturan BKI, yang menetapkan batas 190 N/mm². Pada kondisi muatan baru, nilai *safety factor* yang diperoleh adalah 1.33, sehingga perubahan muatan dari truk sedang menjadi truk tronton menunjukkan bahwa konstruksi *car deck* tetap dalam kondisi aman [6].

Berdasarkan uraian di atas, dilakukan analisis dan identifikasi material *car deck* pada kapal Ro-Ro 2919 GT dalam segi kekuatan dan *safety factor* terhadap variasi kondisi tebal plat (80%, 90%, 100%) serta pembebanan yang ditetapkan. Tujuan dari analisis ini adalah memperoleh nilai tegangan

maksimum dan nilai *safety factor* terhadap variasi yang telah ditentukan.

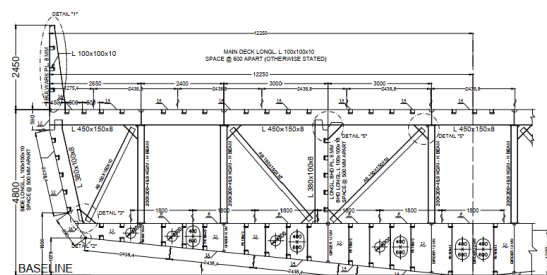
2. METODE

Kapal Ro-Ro (*Roll On–Roll Off*) adalah jenis kapal yang dirancang untuk mengangkut kendaraan, dimana kendaraan yang diangkut dapat berjalan masuk dan keluar dengan rodanya sendiri. Kapal ini dilengkapi dengan pintu rampa di bagian haluan, buritan atau sisi kapal yang dihubungkan dengan *moveble bridge* atau dermaga apung ke dermaga untuk memudahkan kendaraan masuk dan keluar Kapal Ro-Ro mampu mengangkut berbagai jenis kendaraan seperti truk, mobil, trailer, dan sepeda motor. Selain itu juga mengangkut penumpang dan barang [7].

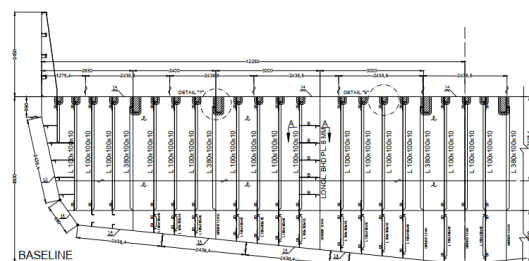
Penelitian ini menggunakan Kapal Motor Penyebrangan Jackwin 2919 GT dengan rute pelayaran Bojonegara-Bakauheni sebagai objek penelitian. Ukuran utama kapal dapat dilihat dalam tabel 1. Konstruksi potongan melintang dari Kapal Motor Penyebrangan Jackwin 2919 GT dapat dilihat pada gambar 1.

Tabel 1. Ukuran Utama Kapal

Nama	Ukuran
<i>Length Overall</i> (LOA)	93.768 m
<i>Length Deck</i> (LDECK)	86.000 m
<i>Length Waterlien</i> (LWL)	84.360 m
<i>Length Perpendiculars</i> (LPP)	81.605 m
<i>Breadth</i> (B)	24.500 m
<i>Height</i> (H)	4.800 m
<i>Scantling Draft</i> (TSC)	3.500 m



TRANSV. WEB SECT. C.L.
(TYP. FR. 24 - 67)



TRANSV. BULKHEAD C.L.
(TYP. FR. 24 ; 26 ; 32 ; 39 ; 46 ; 53 ; 60 ; 67)

Gambar 1. Konstruksi Potongan Melintang

2.1. Variabel Penelitian

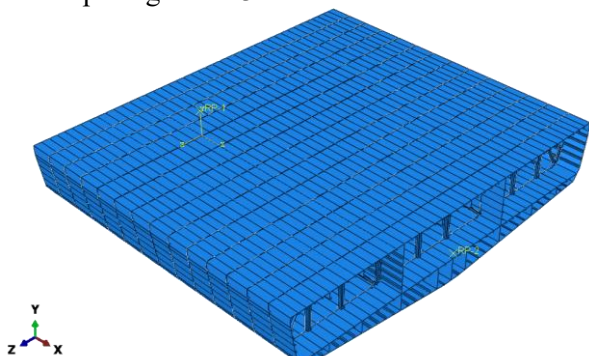
Penelitian ini fokus pada *car deck* dengan variasi ketebalannya dan variasi muatan kendaraan, dengan tujuan untuk menganalisis kekuatan *car deck*.

- Variabel tetap
 - Data ukuran utama kapal ro-ro Jackwin 2919 GT.
- Variabel peubah
 - Kondisi ketebalan plat *deck* (80%, 90%, dan 100%).
 - Muatan kendaraan (20 ft, 40 ft, dan campuran).

2.2. Pembuatan Model dan Meshing

Model yang akan dibuat pada *software* yaitu bagian *parallel midle body* kapal dari *frame* 39-53. Bagian ini dipilih karena ruang muat merupakan bagian rawan pada kapal, selain itu dapat membantu mempermudah pembuatan model geometri.

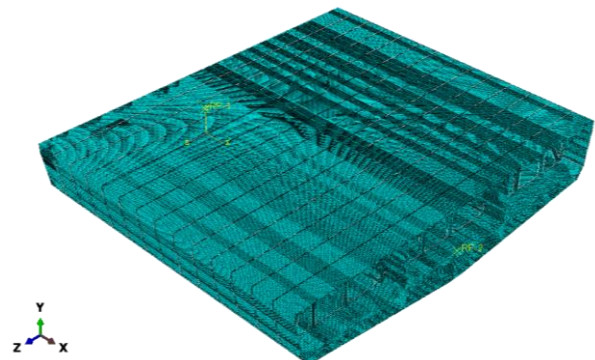
Model dibuat dengan tiga variasi model untuk membandingkan hasil analisis dengan menggunakan perangkat lunak *Finite Element Method* (FEM). Perbandingan dilakukan berdasarkan variasi ketebalan plat *car deck* yang direncanakan. Adapun ketebalan plat *car deck* yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 80% (11,2 mm), 90% (12,6 mm), dan 100% (14 mm) dari ketebalan awal. Model konstruksi kapal yang telah dibuat menggunakan *software* FEM dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 2. Model Konstruksi Kapal

Setelah itu, dilakukan proses *meshing*. *Meshing* merupakan proses dalam simulasi numerik yang memiliki tujuan untuk membagi atau mendiskritisasi model menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung. *Software* berbasis metode elemen hingga dipilih untuk mempermudah dalam perhitungan matematis yang sangat kompleks dalam menyelesaikan permasalahan teknik, terutama dalam analisis struktur.

Ukuran elemen *mesh* yang digunakan pada penelitian ini sebesar 50 mm. Semakin kecil ukuran *mesh*, semakin detail hasil *meshing* yang diperoleh. Hasil *meshing* pada model yang telah dibuat dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Meshing Pada Model

2.3. Pendefinisian Material

Material yang digunakan dalam pemodelan *Finite element* pada model struktur *car deck* kapal Ro-Ro 2919 GT adalah sebagai berikut :

Nama material	: Baja EH36
Modulus Young	: 200 GPa
Shear Modulus	: 76.9 GPa
Density	: 7850 kg/m ³
Yield Stress	: 355 MPa
Ultimate Stress	: 500 MPa
Poisson Ratio	: 0.3

2.4. Perhitungan Beban

Perhitungan beban dilakukan berdasarkan prinsip-prinsip mekanika teknik. Beban yang bekerja pada *car deck* mencakup beban muatan kendaraan serta beban hidrostatik. Beban kendaraan dapat dihitung menggunakan formulasi berikut :

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

Dimana F merupakan simbol gaya berat dalam satuan newton (N), m simbol massa dalam satuan kilogram (kg), dan g simbol dari percepatan gravitasi dalam satuan meter per detik kuadrat (m/s²). Sedangkan beban setiap satuan luas roda kendaraan dapat dihitung dengan,

$$P = \frac{W}{A} \quad (2)$$

Dimana P merupakan gaya tekan dengan satuan newton per meter kuadrat (N/m²), W menunjukkan gaya berat dengan satuan newton

(N), dan A merupakan luasan area yang ditumpu dengan satuan meter kuadrat (m²) [8].

Tekanan hidrostatik yang diterima kapal disebabkan adanya tekanan dari air laut akibat pengaruh gravitasi. Secara sistematis tekanan hidrostatik dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \rho \times g \times h \quad (3)$$

Tekanan hidrostatik dipengaruhi oleh massa jenis air laut (ρ) dalam satuan gram per sentimeter kubik (g/cm³), percepatan gravitasi (g), dalam satuan meter per detik kuadrat (m/s²) dan tinggi sarat kapal (h) dalam satuan meter (m) [9].

2.5. Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode elemen hingga adalah metode numerik yang sering digunakan dalam menyelesaikan berbagai permasalahan dalam teknik dan fisika matematika. Metode elemen hingga dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan, termasuk analisis struktur, aliran fluida, perpindahan massa, perpindahan panas, dan elektromagnetik.

Dalam analisis struktur, penyelesaian yang diperoleh berupa deformasi di setiap titik (*node*), yang kemudian digunakan untuk menentukan besaran tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*). Metode elemen hingga umumnya diselesaikan dengan pendekatan matriks. Pendekatan ini menjadi alat penting dalam metode elemen hingga karena membantu meringkas atau mempermudah perumusan persamaan kekakuan elemen. [10].

2.6. Perhitungan Defleksi

Defleksi merupakan perpindahan atau lendutan suatu struktur akibat beban yang bekerja pada struktur. Perhitungan defleksi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$V_{\max} = \frac{P \times L^3}{3 \times E \times I} \quad (4)$$

Dimana $V_{\max}$ merupakan simbol defleksi maksimum, P simbol gaya dalam satuan newton (N), L simbol panjang model dalam satuan meter (m), E simbol modulus elastisitas (N/m²), dan I simbol dari momen inersia (m⁴) [11].

2.7. Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Safety Factor merupakan ukuran yang digunakan untuk menentukan tingkat kemampuan maksimum suatu material dalam menahan beban.

Gaya yang diperlukan untuk mencapai batas maksimum suatu bahan dalam menahan beban hingga akhirnya mengalami kegagalan disebut beban *ultimate* (*ultimate load*) [12].

Setiap struktur material memiliki tingkat ketahanan yang berbeda, maka dari itu faktor keamanan didapat dari suatu perbandingan (*ratio*) yang dapat ditulis :

$$Safety Factor = \frac{Tegangan \text{ ijin}}{Tegangan_{\max}} \quad (5)$$

Material dapat dikatakan aman jika nilai faktor keamanan lebih besar dari satu. Sebelum melakukan perbandingan, perlu untuk menentukan tegangan ijin. Pada penelitian ini perhitungan tegangan ijin mengacu pada aturan BKI.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

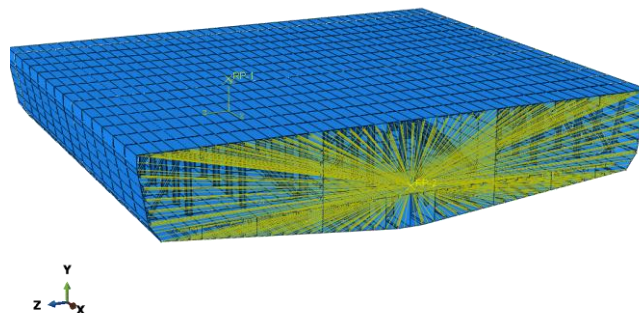
Berdasarkan metode yang telah dijelaskan sebelumnya, penelitian ini akan memperoleh hasil berupa nilai tegangan maksimum dan *safety factor* yang dipengaruhi dengan perubahan kondisi plat serta perubahan beban muatan.

3.1. Pengaturan *Boundary Conditions*

Boundary conditions atau kondisi batas terdiri dari *rigid links* pada setiap ujung model. *Rigid links* berfungsi sebagai penghubung simpul dalam konstruksi memanjang dari ujung model ke titik independen pada sumbu natural di garis tengah. Tabel 2 menunjukkan *boundary conditions* yang akan diterapkan pada model. Penerapan *boundary conditions* pada model dapat dilihat pada gambar 4.

Tabel 2. *Boundary Conditions*

Lokasi	Translasi			Rotasi		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Ujung belakang						
Titik independen	-	Fix	Fix	-	-	-
Ujung depan						
Titik independen	Fix	Fix	Fix	Fix	-	-



Gambar 4. *Boundary Conditions*

3.2. Validasi Perhitungan Deformasi

Validasi model merupakan hal yang penting untuk menunjukkan keakuratan dari suatu model. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil defleksi yang diperoleh dari perhitungan *software* dengan hasil perhitungan manual.

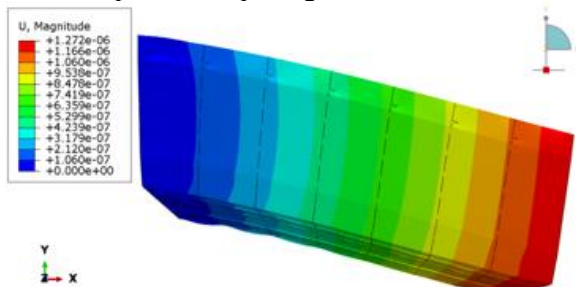
a. Perhitungan manual

Diketahui gaya yang diterima 1000 N, dengan panjang model 10.5 m, nilai modulus elastisitas sebesar $200 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, dan nilai momen inersia sebesar 1.534611 m^4 . Perhitungan manual defleksi dilakukan dengan langkah-langkah berikut :

$$\begin{aligned} V_{\max} &= \frac{P \times L^3}{3 \times E \times I} \\ &= \frac{1000 \times 10.5^3}{3 \times 200 \times 10^9 \times 1.534611} \\ &= 1.26 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

b. Perhitungan *software*

Perhitungan defleksi menggunakan *software* diperoleh nilai sebesar 1.27×10^{-6} dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Hasil Perhitungan *Software*

Tabel 3. Perbandingan Hasil perhitungan Defleksi Manual dengan *Software*

Manual (m)	<i>Software</i> (m)	Koreksi	Ket
1.26×10^{-6}	1.27×10^{-6}	0.79 %	Memenuhi

Tabel 3 menunjukkan nilai defleksi menggunakan perhitungan manual sebesar $1.26 \times 10^{-6} \text{ m}$, perhitungan *software* sebesar $1.27 \times 10^{-6} \text{ m}$, dengan angka koreksi 0.79 %. Defleksi maksimum terjadi pada *frame* 53.

3.3. Pendefinisian Beban

Beban yang diterima oleh kapal pada penelitian ini terdiri dari beban muatan yaitu kendaraan truk 20 *ft* (20 ton), truk 40 *ft* (38 ton) dan beban hidrostatis. Adapun perhitungan beban yang diterima oleh *car deck* adalah sebagai berikut :

a. Load condition 1

Truk 20 *ft* (Beban 20 ton), Berjumlah 14 unit

$$\begin{aligned} W_{\text{truk20ft}} &= 20 \text{ ton} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \\ &= 196200 \text{ N} \end{aligned}$$

Beban setiap luas satuan roda

$$\begin{aligned} P_{\text{truk20ft}} &= 196200 \text{ N} / 0.532 \text{ m}^2 \\ &= 368797 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

b. Load condition 2

Truk 40 *ft* (Beban 38 ton), Berjumlah 7 unit

$$\begin{aligned} W_{\text{truk40ft}} &= 38 \text{ ton} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \\ &= 372780 \text{ N} \end{aligned}$$

Beban setiap luas satuan roda

$$\begin{aligned} P_{\text{truk40ft}} &= 372780 \text{ N} / 0.684 \text{ m}^2 \\ &= 544474 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

c. Load condition 3

Truk 40 *ft* (Beban 38 ton), Berjumlah 7 unit

$$\begin{aligned} W_{\text{truk20ft}} &= 20 \text{ ton} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \\ &= 196200 \text{ N} \end{aligned}$$

Beban setiap luas satuan roda

$$\begin{aligned} P_{\text{truk20ft}} &= 196200 \text{ N} / 0.532 \text{ m}^2 \\ &= 368797 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_{\text{truk40ft}} &= 38 \text{ ton} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \\ &= 372780 \text{ N} \end{aligned}$$

Beban setiap luas satuan roda

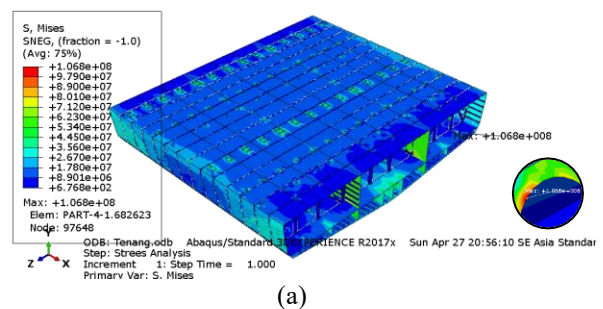
$$\begin{aligned} P_{\text{truk40ft}} &= 372780 \text{ N} / 0.684 \text{ m}^2 \\ &= 544474 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

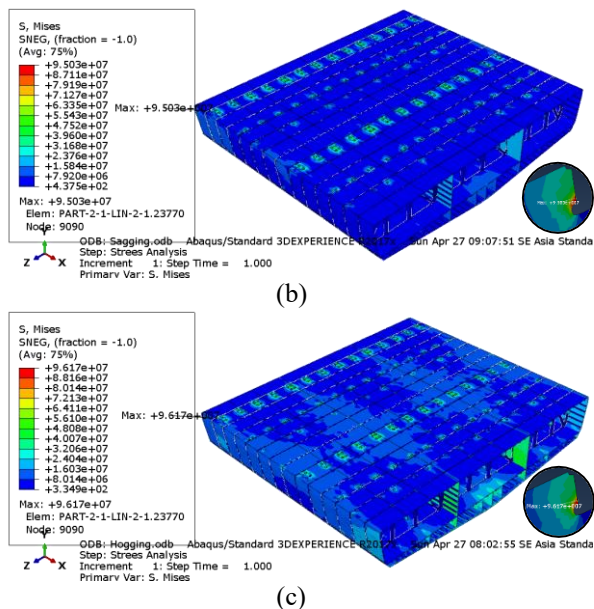
d. Beban hidrostatis

$$\begin{aligned} P &= \rho \times g \times h \\ &= 1025 \text{ kg/m}^3 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 3.5 \text{ m} \\ &= 35193.38 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

3.4. Hasil Analisa Load Condition 1

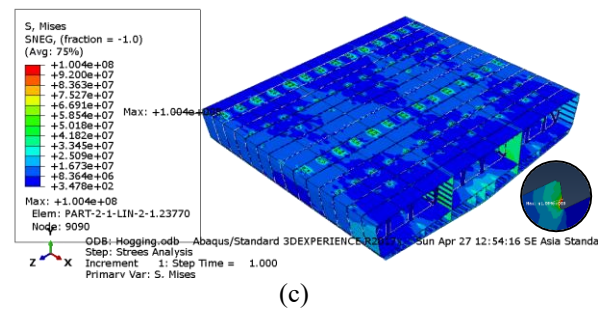
Analisis *load condition* 1 dilakukan dengan menggunakan muatan truk 20 *ft* pada kondisi gelombang air tenang, *sagging*, dan *hogging*, serta variasi ketebalan pelat sebesar 100%, 90%, dan 80%. Berikut adalah nilai tegangan dari hasil analisis menggunakan *software* FEM :





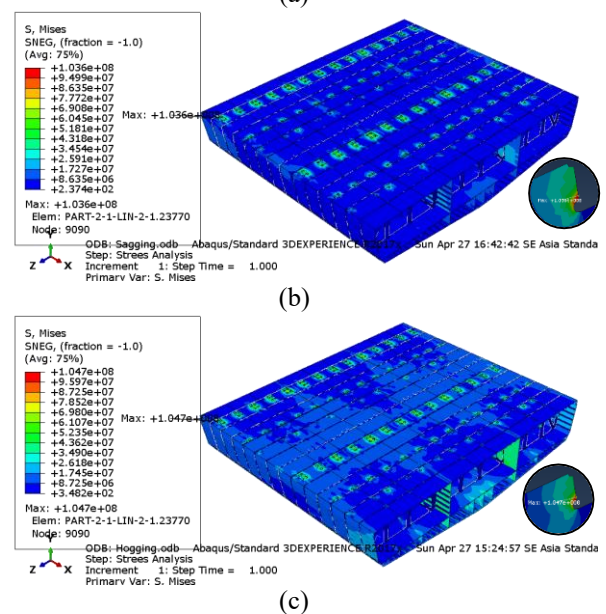
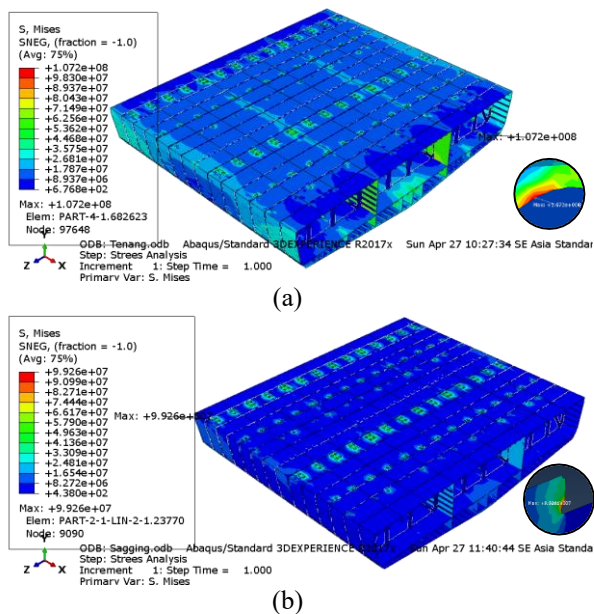
Gambar 6. Tegangan Pada Model 1 dengan Load Condition 1 (a) Air tenang; (b) Sagging; (c) Hogging

Gambar 6 menunjukkan distribusi tegangan Von Mises pada Model 1 dengan kondisi ketebalan plat 100% untuk tiga kondisi gelombang yang berbeda menggunakan Load Condition 1. Pada Gambar 6 (a) kondisi gelombang air tenang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.068×10^8 Pa atau 106.8 MPa, (b) kondisi gelombang sagging, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 9.503×10^7 Pa atau 95.03 MPa, (b) kondisi gelombang hogging, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 9.617×10^7 Pa atau 96.17 MPa.



Gambar 7. Tegangan Pada Model 2 dengan Load Condition 1 (a) Air tenang; (b) Sagging; (c) Hogging

Gambar 7 menunjukkan distribusi tegangan Von Mises pada Model 2 dengan kondisi ketebalan plat 90% untuk tiga kondisi gelombang yang berbeda menggunakan Load Condition 1. Pada Gambar 7 (a) kondisi gelombang air tenang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 11.072×10^8 Pa atau 107.2 MPa, (b) kondisi gelombang sagging, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 9.926×10^7 Pa atau 99.26 MPa, (b) kondisi gelombang hogging, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.004×10^8 Pa atau 100.4 MPa.

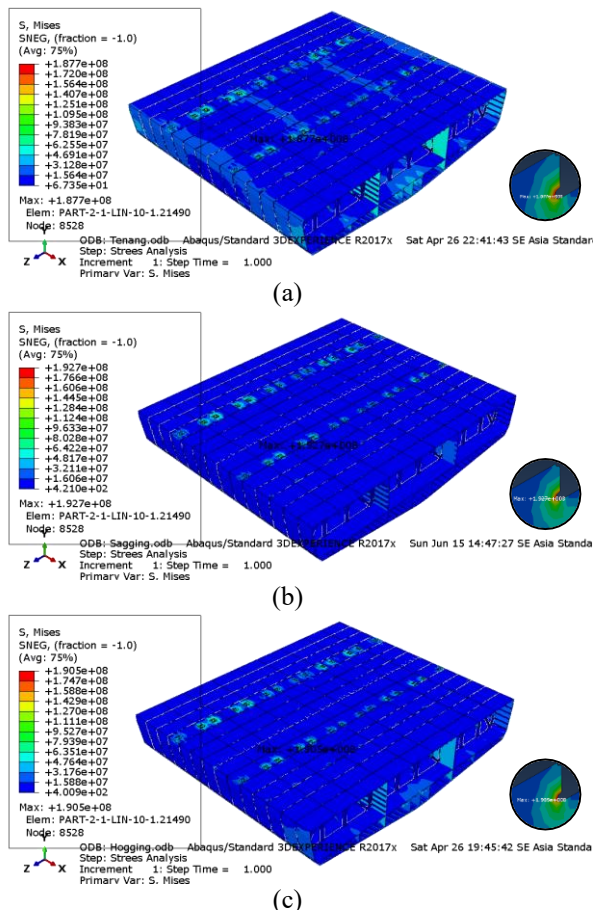


Gambar 8. Tegangan Pada Model 3 dengan Load Condition 1 (a) Air tenang; (b) Sagging; (c) Hogging

Gambar 8 menunjukkan distribusi tegangan *Von Mises* pada Model 3 dengan kondisi ketebalan plat 80% untuk tiga kondisi gelombang yang berbeda menggunakan *Load Condition 1*. Pada Gambar 8 (a) kondisi gelombang air tenang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.095×10^8 Pa atau 109.5 MPa, (b) kondisi gelombang *sagging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.036×10^8 Pa atau 103.6 MPa, (b) kondisi gelombang *hogging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.047×10^8 Pa atau 104.7 MPa.

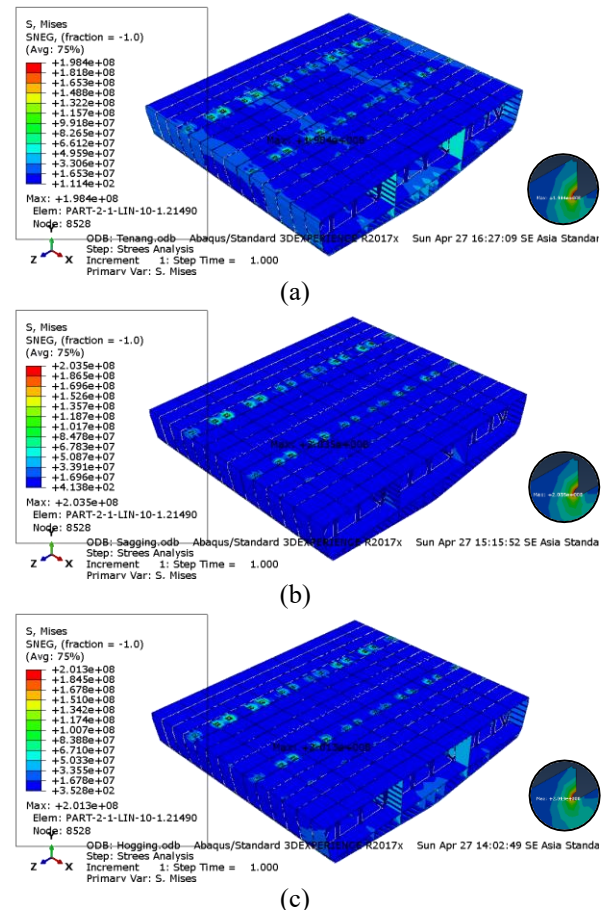
3.5. Hasil Analisa *Load Condition 2*

Analisis *load condition 2* dilakukan dengan menggunakan muatan truk 40 *ft* pada kondisi gelombang air tenang, *sagging*, dan *hogging*, serta variasi ketebalan pelat sebesar 100%, 90%, dan 80%. Berikut adalah nilai tegangan dari hasil analisis menggunakan *software FEM* :



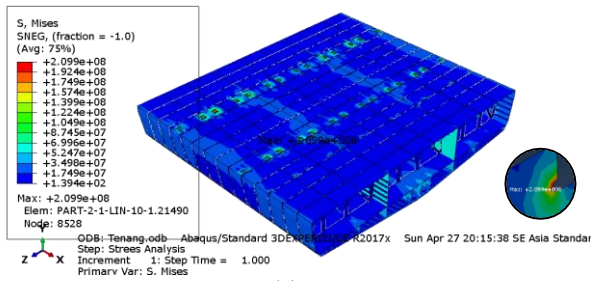
Gambar 9. Tegangan Pada Model 1 dengan *Load Condition 2* (a) Air tenang; (b) *Sagging*; (c) *Hogging*

Gambar 9 menunjukkan distribusi tegangan *Von Mises* pada Model 1 dengan kondisi ketebalan plat 100% untuk tiga kondisi gelombang yang berbeda menggunakan *Load Condition 2*. Pada Gambar 9 (a) kondisi gelombang air tenang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.877×10^8 Pa atau 187.7 MPa, (b) kondisi gelombang *sagging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.927×10^8 Pa atau 192.7 MPa, (b) kondisi gelombang *hogging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.905×10^8 Pa atau 190.5 MPa.

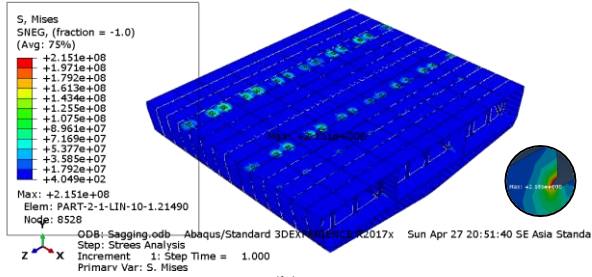


Gambar 10. Tegangan Pada Model 2 dengan *Load Condition 2* (a) Air tenang; (b) *Sagging*; (c) *Hogging*

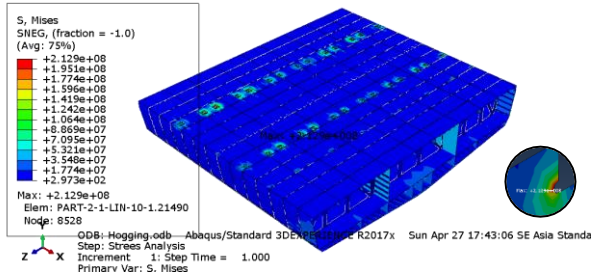
Gambar 10 menunjukkan distribusi tegangan *Von Mises* pada Model 2 dengan kondisi ketebalan plat 90% untuk tiga kondisi gelombang yang berbeda menggunakan *Load Condition 2*. Pada Gambar 10 (a) kondisi gelombang air tenang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.984×10^8 Pa atau 198.4 MPa, (b) kondisi gelombang *sagging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 2.035×10^8 Pa atau 203.5 MPa, (b) kondisi gelombang *hogging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 2.013×10^8 Pa atau 201.3 MPa.



(a)



(b)



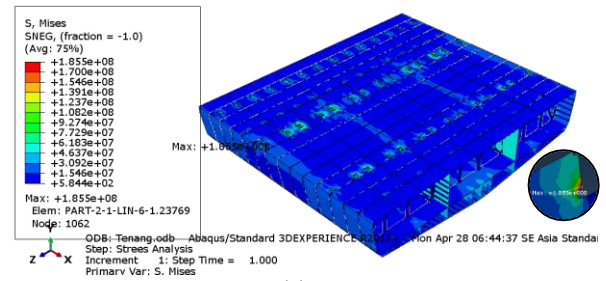
(c)

Gambar 11. Tegangan Pada Model 3 dengan *Load Condition* 2 (a) Air tenang; (b) *Sagging*; (c) *Hogging*

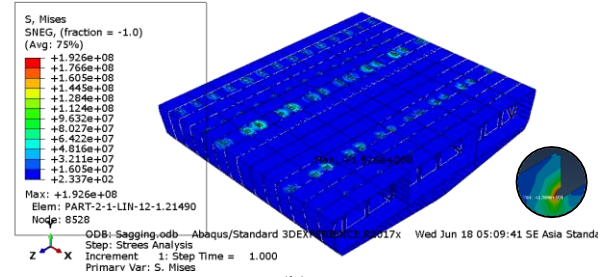
Gambar 11 menunjukkan distribusi tegangan *Von Mises* pada Model 3 dengan kondisi ketebalan plat 80% untuk tiga kondisi gelombang yang berbeda menggunakan *Load Condition* 2. Pada Gambar 11 (a) kondisi gelombang air tenang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 2.099×10^8 Pa atau 209.9 MPa, (b) kondisi gelombang *sagging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 2.151×10^8 Pa atau 215.1 MPa, (b) kondisi gelombang *hogging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 2.129×10^8 Pa atau 212.9 MPa.

3.6. Hasil Analisa *Load Condition* 3

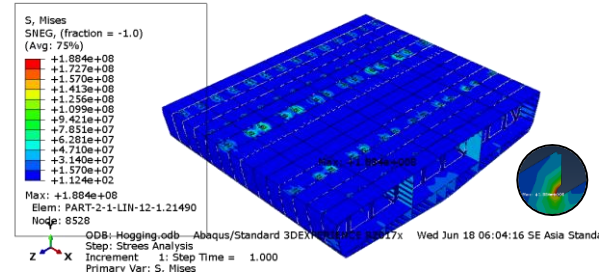
Analisis *load condition* 3 dilakukan dengan menggunakan muatan campuran truk 20 *ft* dan 40 *ft* pada kondisi gelombang air tenang, *sagging*, dan *hogging*, serta variasi ketebalan pelat sebesar 100%, 90%, dan 80%. Berikut adalah nilai tegangan dari hasil analisis menggunakan *software* FEM :



(a)



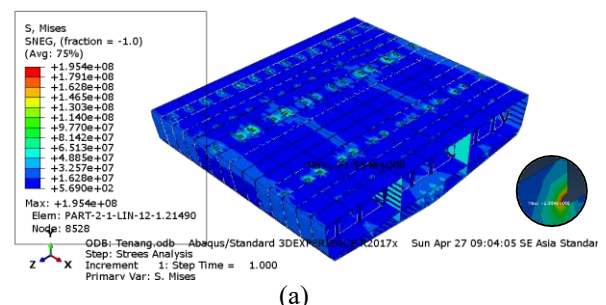
(b)



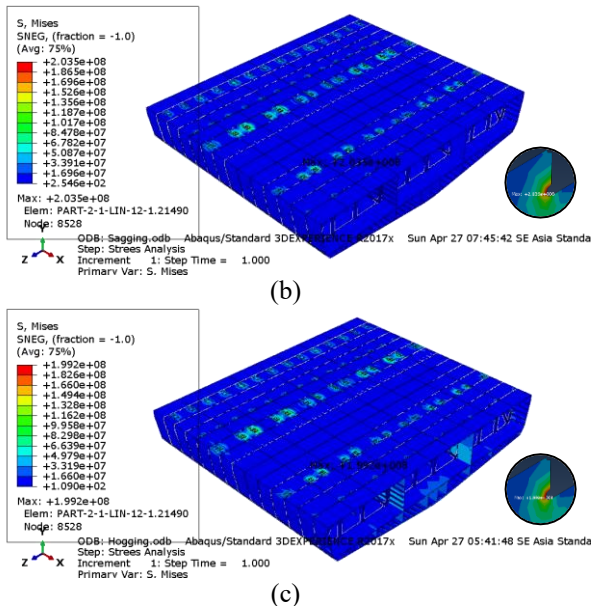
(c)

Gambar 12. Tegangan Pada Model 1 dengan *Load Condition* 3 (a) Air tenang; (b) *Sagging*; (c) *Hogging*

Gambar 12 menunjukkan distribusi tegangan *Von Mises* pada Model 1 dengan kondisi ketebalan plat 100% untuk tiga kondisi gelombang yang berbeda menggunakan *Load Condition* 3. Pada Gambar 12 (a) kondisi gelombang air tenang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.855×10^8 Pa atau 185.5 MPa, (b) kondisi gelombang *sagging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.926×10^8 Pa atau 192.6 MPa, (b) kondisi gelombang *hogging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.884×10^8 Pa atau 188.4 MPa.

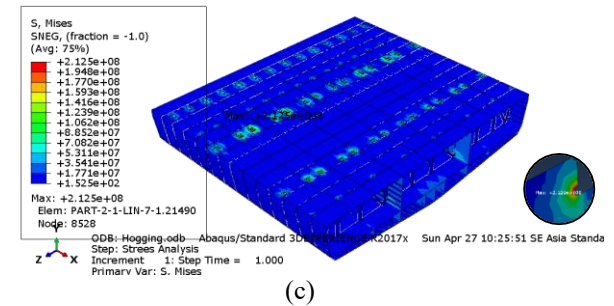
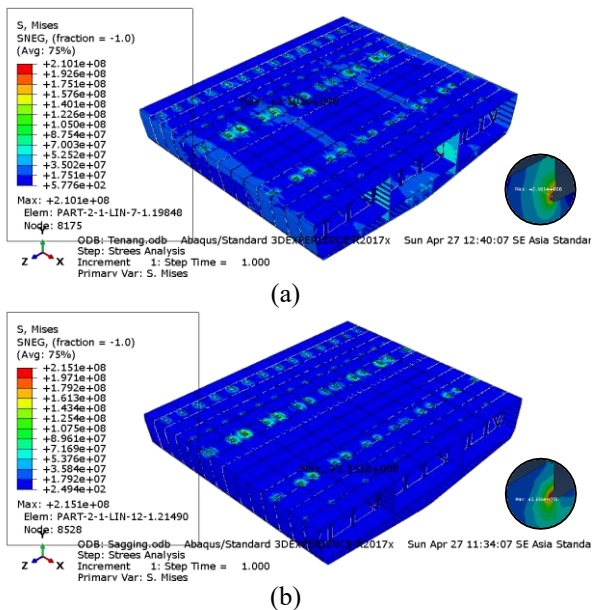


(a)



Gambar 13. Tegangan Pada Model 2 dengan *Load Condition 3* (a) Air tenang; (b) *Sagging*; (c) *Hogging*

Gambar 13 menunjukkan distribusi tegangan *Von Mises* pada Model 2 dengan kondisi ketebalan plat 90% untuk tiga kondisi gelombang yang berbeda menggunakan *Load Condition 3*. Pada Gambar 13 (a) kondisi gelombang air tenang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.954×10^8 Pa atau 195.4 MPa, (b) kondisi gelombang *sagging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 2.035×10^8 Pa atau 203.5 MPa, (c) kondisi gelombang *hogging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 1.992×10^8 Pa atau 199.2 MPa.



Gambar 14. Tegangan Pada Model 3 dengan *Load Condition 3* (a) Air tenang; (b) *Sagging*; (c) *Hogging*

Gambar 14 menunjukkan distribusi tegangan *Von Mises* pada Model 3 dengan kondisi ketebalan plat 80% untuk tiga kondisi gelombang yang berbeda menggunakan *Load Condition 3*. Pada Gambar 14 (a) kondisi gelombang air tenang, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 2.101×10^8 Pa atau 210.1 MPa, (b) kondisi gelombang *sagging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 2.151×10^8 Pa atau 215.1 MPa, (c) kondisi gelombang *hogging*, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 2.125×10^8 Pa atau 212.5 MPa.

3.7. Safety Factor

Tegangan maksimum diperoleh setelah dilakukan analisis pada setiap kondisi, kemudian dilakukan perhitungan *safety factor* dari perbandingan nilai tegangan izin dengan nilai tegangan maksimum, diperoleh hasil sebagai berikut :

Tabel 4. Nilai *Safety Factor* pada *Load Condition 1*

Air Tenang				
Model	Maximum Stress	Tegangan Ijin	SF	Ket
1	106.8 MPa	263.89 MPa	2.4709	OK
2	107.2 MPa	263.89 MPa	2.4617	OK
3	109.5 MPa	263.89 MPa	2.4009	OK
Sagging				
1	95.03 MPa	263.89 MPa	2.7769	OK
2	99.26 MPa	263.89 MPa	2.6586	OK
3	103.6 MPa	263.89 MPa	2.5472	OK
Hogging				
1	96.17 MPa	263.89 MPa	2.7440	OK
2	100.4 MPa	263.89 MPa	2.6284	NO
3	104.7 MPa	263.89 MPa	2.5204	NO

Tabel 5. Nilai *Safety Factor* pada *Load Condition 2*

Air Tenang				
Model	Maximum Stress	Tegangan Ijin	SF	Ket
1	187.7 MPa	263.89 MPa	1.4059	OK
2	198.4 MPa	263.89 MPa	1.3301	OK
3	209.9 MPa	263.89 MPa	1.2572	OK
Sagging				
1	192.7 MPa	263.89 MPa	1.3694	OK
2	203.5 MPa	263.89 MPa	1.2968	OK
3	215.1 MPa	263.89 MPa	1.2268	OK
Hogging				
1	190.5 MPa	263.89 MPa	1.3852	OK
2	201.3 MPa	263.89 MPa	1.3109	OK
3	212.9 MPa	263.89 MPa	1.2395	NO

Tabel 6. Nilai *Safety Factor* pada *Load Condition 3*

Air Tenang				
Model	Maximum Stress	Tegangan Ijin	SF	Ket
1	185.5 MPa	263.89 MPa	1.4226	OK
2	195.4 MPa	263.89 MPa	1.3505	OK
3	210.1 MPa	263.89 MPa	1.2560	OK
Sagging				
1	192.6 MPa	263.89 MPa	1.3701	OK
2	203.5 MPa	263.89 MPa	1.2968	OK
3	215.1 MPa	263.89 MPa	1.2268	OK
Hogging				
1	188.4 MPa	263.89 MPa	1.4007	OK
2	199.2 MPa	263.89 MPa	1.3247	NO
3	212.5 MPa	263.89 MPa	1.2418	NO

Tabel 4, 5, dan 6 menyajikan nilai *safety factor* (SF) pada struktur *car deck* kapal Ro-Ro untuk tiga kondisi pembebanan (*Load Condition 1*, 2, dan 3). Nilai *safety factor* dihitung dari perbandingan antara tegangan ijin (263.89 MPa) dengan tegangan maksimum yang terjadi. Nilai tegangan maksimum kondisi Jika dibandingkan dengan aturan BKI, hasil analisis ini tetap memenuhi standar keamanan. Nilai *Safety Factor* > 1 menunjukkan bahwa struktur tidak melampaui batas tegangan ijin dan masih dalam batas aman sesuai aturan BKI.

Tabel 7. Nilai *Safety Factor* berdasarkan Kriteria Bahan pada *Load Condition 1*

Air Tenang				
Model	Maximum Stress	Yield Stress	SF	Ket
1	106.8 MPa	355 MPa	3.3240	OK
2	107.2 MPa	355 MPa	3.3116	OK
3	109.5 MPa	355 MPa	3.2420	OK
Sagging				
1	95.03 MPa	355 MPa	3.7357	OK
2	99.26 MPa	355 MPa	3.5765	OK
3	103.6 MPa	355 MPa	3.4266	OK

Hogging

1	96.17 MPa	355 MPa	3.6914	OK
2	100.4 MPa	355 MPa	3.5359	OK
3	104.7 MPa	355 MPa	3.3906	OK

Tabel 8. Nilai *Safety Factor* berdasarkan Kriteria Bahan pada *Load Condition 2*

Air Tenang				
Model	Maximum Stress	Yield Stress	SF	Ket
1	187.7 MPa	355 MPa	1.8913	OK
2	198.4 MPa	355 MPa	1.7893	OK
3	209.9 MPa	355 MPa	1.6913	OK
Sagging				
1	192.7 MPa	355 MPa	1.8422	OK
2	203.5 MPa	355 MPa	1.7445	OK
3	215.1 MPa	355 MPa	1.6504	OK
Hogging				
1	190.5 MPa	355 MPa	1.8635	OK
2	201.3 MPa	355 MPa	1.7635	OK
3	212.9 MPa	355 MPa	1.6674	OK

Tabel 9. Nilai *Safety Factor* berdasarkan Kriteria Bahan pada *Load Condition 3*

Air Tenang				
Model	Maximum Stress	Yield Stress	SF	Ket
1	185.5 MPa	355 MPa	1.9137	OK
2	195.4 MPa	355 MPa	1.8168	OK
3	210.1 MPa	355 MPa	1.6897	OK
Sagging				
1	192.6 MPa	355 MPa	1.8432	OK
2	203.5 MPa	355 MPa	1.7445	OK
3	215.1 MPa	355 MPa	1.6504	OK
Hogging				
1	188.4 MPa	355 MPa	1.8843	OK
2	199.2 MPa	355 MPa	1.7821	OK
3	212.5 MPa	355 MPa	1.6706	OK

Tabel 7, 8, dan 9 menyajikan nilai *safety factor* berdasarkan kriteria bahan, yaitu perbandingan antara tegangan luluh (*yield stress*) material sebesar 355 MPa dengan tegangan maksimum yang terjadi pada struktur *car deck* kapal Ro-Ro. Secara keseluruhan, analisis ini menunjukkan bahwa seluruh model masih memenuhi standar keamanan berdasarkan kriteria tegangan luluh bahan dan batas minimum *safety factor* menurut aturan BKI.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan terhadap kekuatan struktur *car deck* kapal Ro-Ro 2919 GT menggunakan metode elemen hingga dapat disimpulkan, bahwa struktur *car deck* model 1 menunjukkan respons yang aman terhadap beban, dengan tegangan maksimum 192.7 MPa pada kondisi gelombang

sagging dan *safety factor* lebih besar dari 1 pada semua kondisi.

Pengurangan ketebalan plat *car deck* pada model 2 dan model 3 mengakibatkan peningkatan tegangan maksimum, terutama pada kondisi *sagging*. Meskipun kedua model tetap dalam batas aman, model 3 dengan tegangan maksimum 215.1 MPa dan *safety factor* 1.2268 pada kondisi gelombang *sagging*, menunjukkan tegangan yang mendekati batas aman.

Berdasarkan aturan BKI, *safety factor* harus bernilai lebih besar dari 1 untuk dinyatakan aman. Secara keseluruhan semua model memenuhi kriteria, namun tegangan pada model 3 mendekati batas aman, yang mengindikasikan perlunya perhatian lebih lanjut terhadap potensi risiko kegagalan struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Lamb, *Ship Design and Construction*. SNAME, 1969.
- [2] M. H. Pratama, H. Yudo, and I. P. Mulyatno, "Analisis Kekuatan Konstruksi Car Deck Kapal Penyeberangan 1000GT Akibat Perubahan Muatan Dengan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 8, no. 3, pp. 426–434, 2020.
- [3] L. P. Adnyani, N. Aisyah, S. Sulistijono, R. G. Harahap, A. Dianiswara, and N. Nurmawati, "Analisa Kekuatan Deck BARGE NANIA 10070 DWT Dengan Dua Metode Pembebanan," *Kapal J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 16, no. 2, pp. 49–55, 2019.
- [4] M. N. Zaibidi, I. P. S. Asmara, and P. N. A. Nugroho, "Analisis Kekuatan Konstruksi Car Deck Akibat Penambahan Panjang pada Ro-Ro Passenger Ship," *J. Teknol. Marit.*, vol. 4, no. 1, 2020.
- [5] A. I. Wulandari, G. Sitepu, and M. Z. M. Alie, "Analisis Jarak Gading dan Kekuatan Batas Struktur Kapal Ferry Ro-Ro," *J. Penelit. Enj.*, vol. 22, no. 1, pp. 15–19, 2018.
- [6] A. H. Kalam, I. P. Mulyatno, and G. Rindo, "Kajian Teknis Kekuatan Car Deck Pada Kapal Ferry Ro-Ro 500 GT Akibat Perubahan Muatan Dengan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 1, 2017.
- [7] K. Van Dokkum, *Ship Knowledge—A Modern Encyclopedia*. Netherlands, 2003.
- [8] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons, 2013.
- [9] F. M. White, *Mekanika Fluida*. Erlangga, 1988.
- [10] D. L. Logan, *A First Course In The Finite Element Method*, vol. 4. Thomson, 2011.
- [11] R. C. Hibbeler, *Mechanics of Materials*. Pearson Education India, 2005.
- [12] E. P. Popov and Z. Astamar, "Mekanika Teknik (Mechanics Of Material) Edisi Kedua (Versi SI)," *Jakarta: Erlangga*, 1984.