



Analisis Kekuatan Konstruksi *Car Deck* Kapal Penyeberangan 1000 GT Akibat Perubahan Muatan Dengan Metode Elemen Hingga

Muhammad Harry Pratama¹⁾, Hartono Yudo¹⁾, Imam Pujo Mulyanto¹⁾

¹⁾Laboratorium Konstruksi

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

^{*)}e-mail : muhammadharrypratama@students.undip.ac.id, hartonoyudo@gmail.com,
pujomulyatno2@gmail.com

Abstrak

KMP. BRR 1000 GT beroperasi pada rute pelayaran Pelabuhan Ulee Lheue – Pelabuhan Balohan, yang memakan waktu tempuh kurang lebih dua sampai tiga jam. Hal ini membuat konstruksi kapal harus dalam kondisi selalu aman selama berlayar, terutama konstruksi *car deck*. Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu mendapatkan nilai tegangan dan defleksi maksimum pada *car deck* kapal penyeberangan 1000 GT serta membandingkan dengan tegangan ijin sesuai rules Biro Klasifikasi Indonesia agar mendapatkan nilai *safety factor*. Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga dan terdapat 3 jenis variasi muatan kendaraan, yaitu sedan saja, truk saja, serta sedan-truk. Validasi dilakukan pada geometri dengan menggunakan perhitungan manual defleksi mekanika teknik dan didapatkan nilai error sebesar 3,19 %. Pada penelitian ini, beban yang akan diinputkan yaitu beban gaya akibat berat pada *load condition 1* sebesar 24 ton, *load condition 2* sebesar 96 ton, dan *load condition 3* sebesar 60 ton, serta tekanan hidrostatis kapal sebesar 0,025 Mpa, sehingga diasumsikan terdapat tiga jenis kondisi, yaitu kondisi ketika air tenang, kondisi ketika *sagging* dan kondisi ketika *hogging*. 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. Untuk seluruh kondisi, semuanya memenuhi kriteria kekuatan menurut BKI.

Kata Kunci : Konstruksi *Car Deck*, Stress, Defleksi, Metode Elemen Hingga

1. PENDAHULUAN

Transportasi laut yang sanggup menyambungkan antar pulau-pulau yang ada di Indonesia salah satunya adalah Kapal Penyeberangan. Kapal Penyeberangan adalah kapal yang bisa memuat kendaraan dan penumpang yang berjalan masuk ke dalam kapal dengan penggerakannya sendiri dan bisa keluar dengan sendiri juga, sehingga disebut sebagai kapal *roll on – roll off* atau disingkat dengan *ro-ro* [1].

Konstruksi *car deck* menjadi perhatian penulis karena struktur tersebut dirancang untuk mampu menahan beban dari kendaraan dan rumah geladak yang ada di atasnya [2]. Selain itu, *car deck* juga menjadi lokasi yang kritis dalam kapal *ro-ro* ketika terjadi *collision* [3]. Untuk mencegah kegagalan struktur, *finite element analysis* menjadi salah satu

solusi yang diandalkan oleh banyak peneliti. Saat ini, *finite element analysis* menjadi alat yang kuat untuk menganalisis respon struktur kapal, dengan memodelkan kapal asli menjadi skala yang lebih kecil sehingga lebih mudah untuk dianalisis [4]. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya yang melakukan analisis tentang kekuatan konstruksi *car deck* KM. Gambolo dengan variasi beban didapatkan nilai tegangan sebesar 142 N/mm² pada kondisi muatan baru dan air tenang. Tegangan maksimal terjadi di *Car Deck* pada *node 52219* [5]. Lalu berdasarkan penelitian tugas akhir analisis perbandingan kekuatan *car deck* yang memakai baja konvensional dan *sandwich plate system* pada KM. Gambolo akibat perubahan muatan didapatkan hasil respon struktur tertinggi pada *Loading condition 1* dengan nilai tegangan sebesar

64,4 N/mm² dan nilai deformasi sebesar 1,99 cm pada kondisi *sagging* dan menggunakan *sandwich plate system* [6].

Berdasarkan penjelasan hasil dari beberapa contoh penelitian, penulis akan melakukan penelitian pada tema ini lebih lanjut yang berkaitan dengan kekuatan konstruksi *car deck* Kapal Penyeberangan 1000 GT dengan geometri yang dibuat lebih kompleks sesuai dengan gambar konstruksi yang tersedia dan membandingkan nilai dari perhitungan tegangan dengan nilai tegangan ijin yang diatur sesuai *rules* BKI. Penelitian ini juga menggunakan validasi dengan membandingkan nilai defleksi antara metode numerik dan metode analitik.

Pada penelitian kali ini bertujuan untuk menganalisis besaran respon struktur dari kapal akibat pengaruh dari beban internal maupun eksternal. Lokasi paling kritis dari respon struktur juga diinvestigasi akibat dari variasi peletakan beban. Selanjutnya, nilai dari respon struktur yang didapatkan dari hasil perhitungan numerik akan dibandingkan dengan *rules* yang berlaku, dimana *rules* yang dipakai adalah BKI.

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Kapal Ferry Ro-Ro atau kapal *roll on/roll off* adalah jenis kapal yang memuat penumpang dan kendaraan. Kapal Ferry Ro-Ro juga langsung terintegrasi dengan sistem transportasi darat dan jangka waktu bongkar muat yang cepat, dimana kendaraan masuk dan keluar kapal dengan penggerakannya sendiri [7]. Kapal Motor Penumpang BRR 1000 GT adalah tipe *Ro – Ro Passenger Ship* milik Direktorat Jendral Perhubungan Darat yang beroperasi di Pelabuhan Ulee Lheue dengan rute pelayaran Ulee Lheue-Balohan.



Gambar 1. KMP BRR.

Adapun ukuran utama kapal yaitu sebagai berikut.

- *Length Over All (LOA)* : 61,3 m.
- *Length Between Perpendicular (LPP)*: 55,0 m.
- *Breadth (B)* : 13,2 m.

- *Height (H)* : 3,9 m.
- *Draught (T)* : 2,5 m.
- *Service Speed (Vs)* : 15 kn.

Geladak kendaraan merupakan suatu lapisan struktur di bagian atas *hull* kapal berupa plat baja dan ditopang oleh balok geladak. Geladak kendaraan pada kapal pada kapal *ro-ro* berfungsi menampung muatan berupa kendaraan. *Car Deck* adalah komponen konstruksi yang penting karena dirancang untuk menampung beban tidak hanya muatan kendaraan, tetapi sebagai penahan beban dari dek yang ada di atasnya. Gambar berikut dibawah ini merupakan gambar struktur *hull* kapal yang digunakan sebagai data primer Kapal Penyeberangan 1000 GT. Beberapa jenis *Car deck* diantaranya:

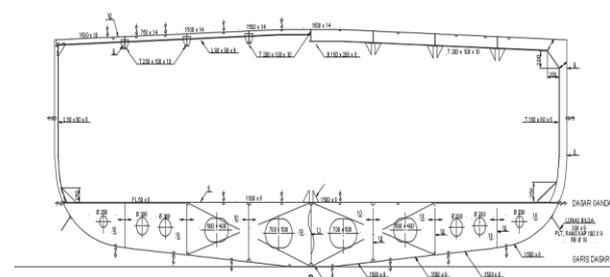
1. Geladak Kendaraan dengan sistem Terpadu
2. Geladak Kendaraan dengan sistem tak terpadu



Gambar 2. Konstruksi Geladak Kendaraan Tampak Atas.



Gambar 3. Konstruksi Potongan Memanjang Hull Kapal



Gambar 4. Konstruksi Penampang Melintang Hull Kapal

Pada gambar 2 ditampilkan gambar konstruksi geladak kendaraan tampak atas pada salah satu ruang muat. Pada gambar 3 ditampilkan salah satu gambar konstruksi terhadap potongan memanjang, gambar 3 menampilkan posisi potongan sebesar 1600 mm dari *centre line*. Pada gambar 4 ditampilkan gambar konstruksi tampak melintang. Gambar 4 menampilkan *web frame* dan *main frame* pada *hull* kapal. Pada penelitian kali ini, pembuatan geometri hanya dari sekat haluan sampai buritan, atau dari *frame 11* sampai dengan *frame 79*. Geometrik kapal yang dibuat di dalam software sepanjang 40,8 meter. Geometri kapal yang dibuat pada penelitian ini menyesuaikan terhadap gambar konstruksi yang sudah ada.

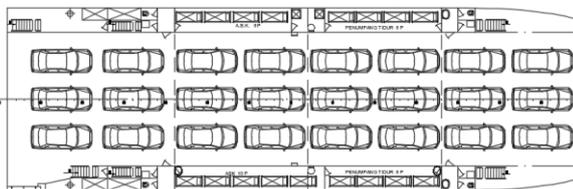
2.2. Variasi Pembebanan dan Susunan Muatan

Konstruksi *Car Deck* menerima beban secara arah vertikal atau searah sumbu y dari muatan kendaraan. Pembebanan didefinisikan *linear static*, dengan sumbu ordinat yang tetap pada perhitungan numerik [8]. Pada penelitian ini, variasi pembebanan yang digunakan ada 3 *Loading Condition*. Berikut di bawah ini:

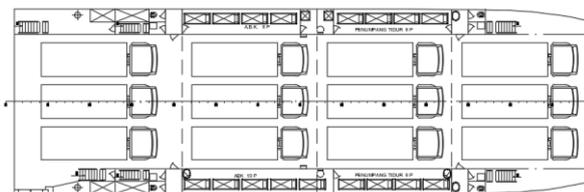
Tabel 1. *Loading Condition*

| Susunan Muatan | Muatan Kendaraan | Total Berat (ton) |
|-------------------------|---------------------|-------------------|
| <i>Load Condition 1</i> | 24 Sedan | 24 |
| <i>Load Condition 2</i> | 12 Truk | 96 |
| <i>Load Condition 3</i> | 12 Sedan dan 6 Truk | 60 |

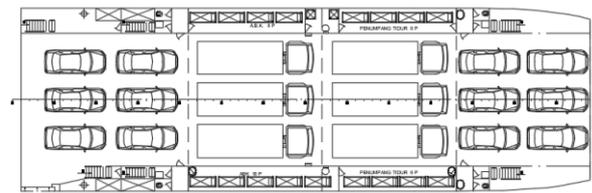
Pada tabel 1 dijelaskan jenis kendaraan, jumlah kendaraan, dan berat dari kendaraan itu sendiri dalam masing masing *Load Condition*. Setiap *load condition* memiliki susunan dan berat kendaraannya masing-masing. Berikut adalah gambar ilustrasi susunan kendaraan.



Gambar 5. Susunan *Load Condition 1*



Gambar 6. Susunan *Load Condition 2*



Gambar 7. Susunan *Load Condition 3*

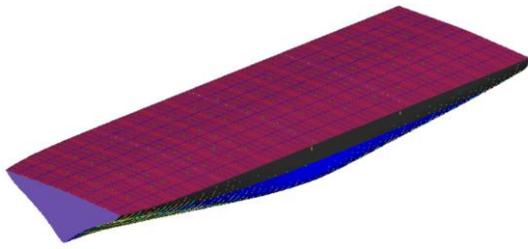
Pada gambar 5 ditampilkan susunan *load condition 1* yang terdiri atas 24 buah sedan yang satuan beratnya adalah 1 ton, dengan total berat 24 ton. Gambar 6 menampilkan susunan *load condition 2* yang terdiri atas 12 buah truk yang satuan beratnya adalah 8 ton, dengan total berat 96 ton. Lalu yang terakhir, gambar 7 menampilkan susunan *load condition 3* yang terdiri atas 12 buah sedan dan 8 buah truk, sehingga total beratnya adalah 60 ton. Seluruh muatan pada tiap *load condition* tersebar dari *frame 11* sampai dengan *frame 79* atau sepanjang 40,8 meter.

Untuk *load condition 3* yang terdiri dari 12 buah sedan dan 6 truk, kendaraan sedan diletakkan pada *frame 11-35* dan *frame 63-79*. Sedangkan, kendaraan truk diletakkan pada *frame 35-47* dan *frame 47-63*.

2.3. Pembuatan Geometri dan *Element Meshing*

Permasalahan dalam engineering salah satunya adalah analisis struktural, yang penyelesaiannya dengan perhitungan numerik dengan metode elemen hingga [9]. Konstruksi yang dibuatkan geometri pada *software* yaitu bagian *hull* kapal sampai bagian geladak kendaraan, yang mencakup sepanjang sekat buritan sampai sekat haluan. Geometri dibuat sesuai dengan gambar konstruksi yang ada. Pembuatan *element meshing* menggunakan *FEM software*, dengan tipe elemen *mixed mesh (trias and quad elements)* dan ukuran elemen 30 mm.

Pembuatan geometri sesuai dengan gambar konstruksi yang ada, lalu menggunakan fitur *midsurface* pada *software* dengan tujuan membentuk geometri menjadi *surface*. Selanjutnya, *surface* yang ada dilakukan proses *meshing* menggunakan elemen 2D. Akibat perbandingan sebuah geometri antara lebar dengan panjang & tinggi yang terlalu jauh, maka dipilihlah elemen 2D [10] yang akan diisi nilai ketebalan sesuai gambar konstruksi yang ada dengan fitur *input property* yaitu *PSHELL*, dan juga pendefinisian material yang digunakan akan dimasukkan ke dalam fitur tersebut. Pada gambar 8 merupakan geometri *hull* yang sudah dilakukan proses *meshing* pada *FEM software* yang menggunakan tipe elemen 2D.



Gambar 8. Geometri Hull Kapal Setelah Meshing.

2.4. Pendefinisian Material

Pada penelitian ini, jenis material yang digunakan yaitu material baja yang sesuai dengan standar BKI yang menggunakan notasi KI-A36 [15].

| | |
|--------------------|--------------------------|
| Modulus Elastisity | = 200 Gpa |
| Shear Modulus | = 79,3 Gpa |
| Poisson Ratio | = 0,3 |
| Density | = 7850 kg/m ³ |
| Yield | = 250 Mpa |
| Ultimate Stress | = 400 Mpa |

2.5. Pendefinisian Beban

Pada penelitian ini terdapat 3 macam beban yang diinputkan, yaitu beban berat dari mobil sedan, beban berat dari truk, serta beban dari tekanan hidrostatis kapal. Adapun perhitungan tiap beban yang ada yaitu sebagai berikut.

a. Beban Mobil Sedan

Untuk mendapatkan beban kendaraan, diperlukan berat kendaraan (kg) dikali dengan percepatan gravitasi (m/s²). Berikut adalah persamaannya.

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

$$\begin{aligned} W_s &= \text{Berat mobil sedan} \times \text{gravitasi} \\ &= 1000 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 \\ &= 9810 \text{ N} \end{aligned}$$

Dikarenakan mobil sedan mempunyai 4 ban, maka tiap ban dari mobil sedan akan sebagai penumpu dari beban yang diterima oleh geladak. Setiap ban menerima beban sebesar 2452,5 N. Pijakan ban sedan sebesar 30000 mm².

b. Beban Truk

$$\begin{aligned} W_t &= \text{Berat truk} \times \text{gravitasi} \\ &= 8000 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 \\ &= 78400 \text{ N.} \end{aligned}$$

Dikarenakan truk mempunyai 6 ban, maka tiap ban dari truk akan sebagai penumpu dari beban yang diterima oleh geladak. Setiap ban menerima beban sebesar 13067 N. Gunakan fitur *force* untuk menginput

beban pada tiap pijakan ban, lalu gunakan fitur *nodally distributed* agar *force* tersebar merata pada tiap *node* sesuai dengan luasan pijakan ban. Pijakan ban truk sebesar 99000 mm².

c. Tekanan Hidrostatis

Tekanan Hidrostatis adalah tekanan yang diberikan oleh air laut kepada badan kapal akibat adanya gaya gravitasi. Tekanan hidrostatis dipengaruhi oleh massa jenis air laut (ρ), gravitasi (g) dan tinggi dari sarat kapal (h). Berikut di bawah ini adalah persamaan tekanan hidrostatis.

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

$$P = 1,025 \times 9,81 \times 2,5$$

$$P = 25138,13 \text{ Pa}$$

$$P = 0,025 \text{ Mpa}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Penentuan Boundary Condition

Geometri yang sudah terbentuk *element* diberikan *boundary condition* untuk sebuah *finite element analysis*. Peletakan *boundary condition* berada di *Neutral Axis* kapal, dengan cara membuat *rigid element* RBE2 di kedua sekat, yaitu sekat haluan dan sekat buritan. *Nodes* yang ada pada sekat sebagai *dependent*, sedangkan tinggi *Neutral Axis* sebagai titik *independent*. Adapun *Neutral Axis* pada kapal penyeberangan 1000 GT yaitu 1703,363 mm.

Tabel 2. Kondisi Batas (Translasi)

| Lokasi | Sumbu | | |
|---------------------------------|-------|-----|-----|
| | x | y | z |
| Titik independen ujung belakang | Fix | Fix | Fix |
| Titik Independen ujung depan | Fix | Fix | Fix |

Tabel 3. Kondisi Batas (Rotasi)

| Lokasi | Sumbu | | |
|---------------------------------|-------|---|-----|
| | x | y | z |
| Titik independen ujung belakang | - | - | - |
| Titik Independen ujung depan | - | - | Fix |

Pada tabel 2 dan tabel 3 merupakan *boundary condition* yang dipakai adalah berdasarkan dari aturan *Korean Register of Shipping : Rules for the Classification of Steel Ships* [11], berdasarkan arah translasi dan rotasi. *Boundary condition* sangat mempengaruhi sebuah proses *finite element*

terutama untuk struktur kapal. *Boundary condition* harus didefinisikan pada kedua ujung model, yaitu depan dan belakang [12]. Kondisi batas atau *boundary condition* akan mempengaruhi hasil analisis.

3.2. Validasi Geometri

Validasi geometri digunakan untuk membandingkan hasil antara perhitungan numerik dan analitik dari sebuah geometri *finite element* yang telah dibuat [13]. Pada penelitian ini metode yang digunakan yaitu dengan membandingkan hasil antara perhitungan analitik (sesuai dengan rumus) dan numerik dari *software*. Perhitungan akan dilakukan sebagai berikut:

a. Perhitungan Analitik

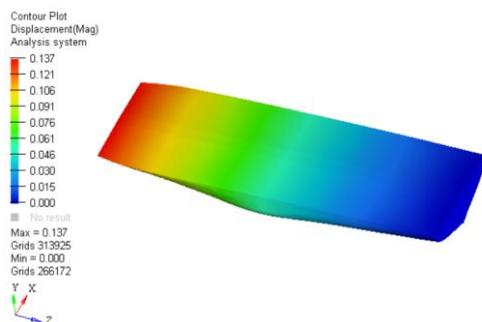
Rumus perhitungan defleksi yaitu sebagai berikut [14].

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

F yaitu *Force* (N) sebesar 1000 N, L adalah Panjang model (mm) sebesar 40800 mm, E adalah Modulus Elastisitas (Mpa) sebesar 200000 Mpa, dan I adalah Inersia (mm⁴) sebesar 853514067330 mm⁴. Hasil perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} &= \frac{1000 \times 40800^3}{3 \times 200000 \times 853514067330} \\ &= 0,1326 \text{ mm.} \end{aligned}$$

b. Perhitungan Numerik



Gambar 9. Perhitungan Numerik.

Pada gambar 9 merupakan hasil dari perhitungan numerik menggunakan *FEM software* didapatkan nilai defleksi sebesar 0,137 mm.

Tabel 4. Hasil Validasi.

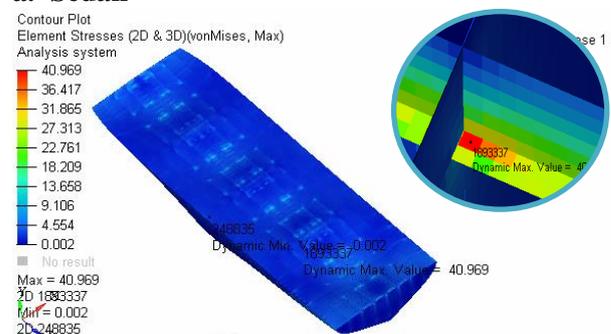
| Hasil Analitik | Hasil Numerik | Error |
|----------------|---------------|--------|
| 0,1326 mm | 0,137 mm | 3,19 % |

Berdasarkan hasil perbandingan antara perhitungan analitik sesuai rumus dengan numerik menggunakan *FEM software*, didapatkan persentase *error* sebesar 3,19 %. Dari Tabel 3 disimpulkan bahwa persentasi *error* masih dibawah 10% dan dapat dikatakan bahwa geometri sudah valid.

3.3. Hasil Analisis Kondisi I (Air tenang)

Kondisi I adalah ketika dalam air tenang yang dimana ada 3 jenis muatan, yaitu sedan, truk, serta campuran sedan truk. Beban yang ada hanya dari beban berat kendaraan dan tekanan hidrostatis kapal. Kondisi air tenang adalah kondisi yang pertama digunakan pada penelitian ini. Berikut adalah nilai defleksi dan nilai *stress* dari hasil analisis menggunakan *FEM software*:

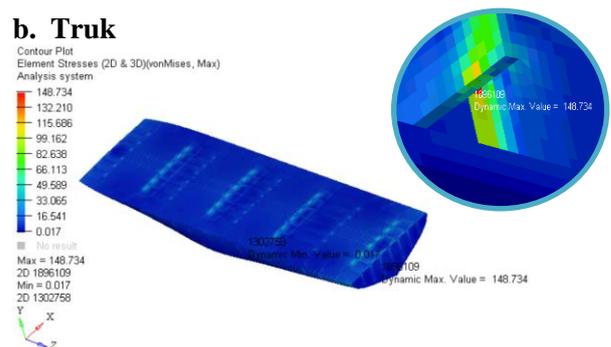
a. Sedan



Gambar 10. *Stress* Kondisi I Sedan.

Pada gambar 10 dijelaskan *stress* paling maksimal terjadi pada *frame* 31 dan *node* 1883337 sebesar 40,969 Mpa, dengan defleksi sebesar 0,5017 cm.

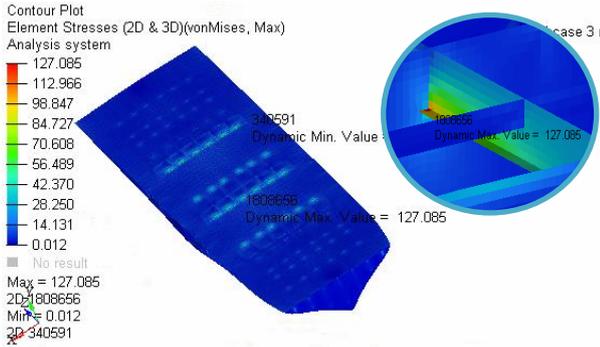
b. Truk



Gambar 11. *Stress* Kondisi I Truk.

Pada gambar 11 dijelaskan *stress* paling maksimal terjadi pada *frame* 11 dan *node* 1896109 sebesar 148,73 Mpa, dengan defleksi sebesar 1,37 cm.

c. Truk dan sedan



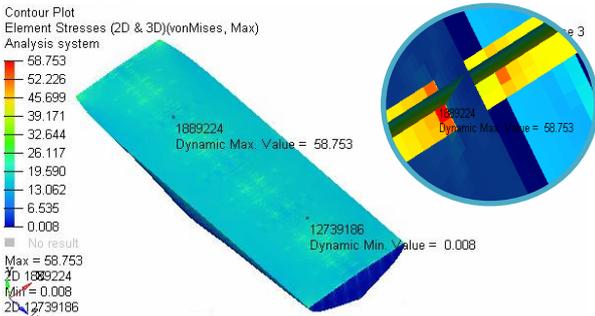
Gambar 12. *Stress* Kondisi I Truk dan sedan.

Pada gambar 12 dijelaskan *stress* paling maksimal terjadi pada *frame* 47 dan *node* 1808656 sebesar 127,085 Mpa, dengan defleksi sebesar 1,026 cm.

3.4. Hasil Analisis Kondisi II (*Sagging*)

Kondisi II adalah ketika dalam posisi *sagging* yang dimana ada 3 jenis muatan, yaitu sedan, truk, serta campuran sedan truk. Beban yang ada dari beban berat kendaraan dan tekanan hidrostatik kapal.

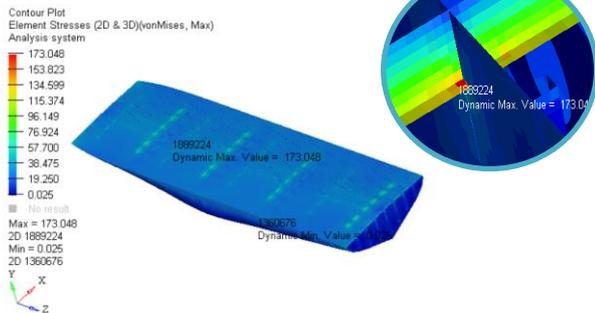
a. Sedan



Gambar 13. *Stress* Kondisi II Sedan.

Pada gambar 13 dijelaskan *stress* paling maksimal terjadi pada *frame* 63 dan *node* 1889224 sebesar 58,753 Mpa, dengan defleksi sebesar 0,9225 cm.

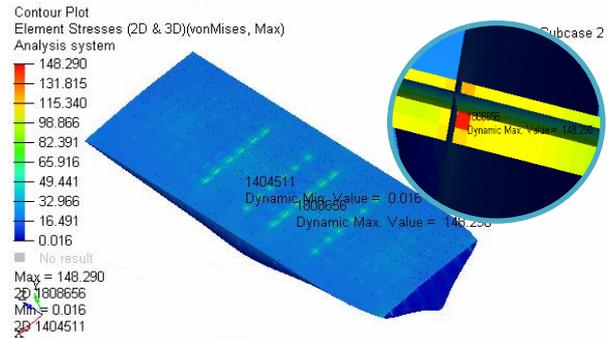
b. Truk



Gambar 14. *Stress* Kondisi II Truk.

Pada gambar 14 dijelaskan *stress* paling maksimal terjadi pada *frame* 63 dan *node* 1889224 sebesar 173,048 Mpa, dengan defleksi sebesar 1,92 cm.

c. Truk dan sedan



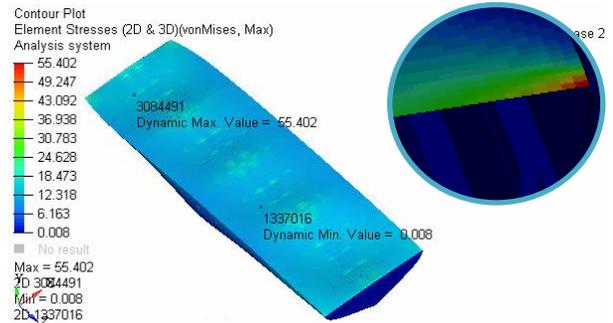
Gambar 15. *Stress* Kondisi II Truk dan Sedan.

Pada gambar 15 dijelaskan *stress* paling maksimal terjadi pada *frame* 47 dan *node* 1808656 sebesar 148,29 Mpa, dengan defleksi sebesar 1,75 cm.

3.5. Hasil Analisis Kondisi III (*Hogging*)

Kondisi II adalah ketika dalam posisi *hogging* yang dimana ada 3 jenis muatan, yaitu sedan, truk, serta campuran sedan truk. Beban yang ada dari beban berat kendaraan dan tekanan hidrostatik kapal.

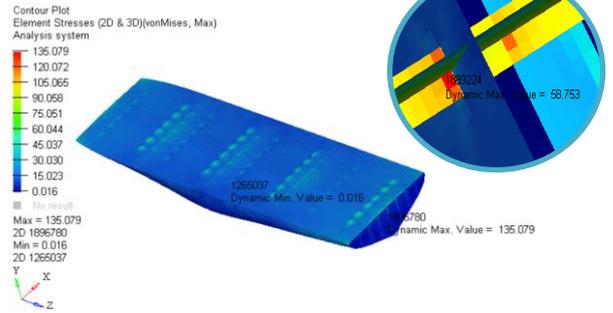
a. Sedan



Gambar 16. *Stress* Kondisi III Sedan.

Pada gambar 16 dijelaskan *stress* paling maksimal terjadi pada *frame* 79 dan *node* 3084491 sebesar 55,402 Mpa, dengan defleksi sebesar 0,4167 cm.

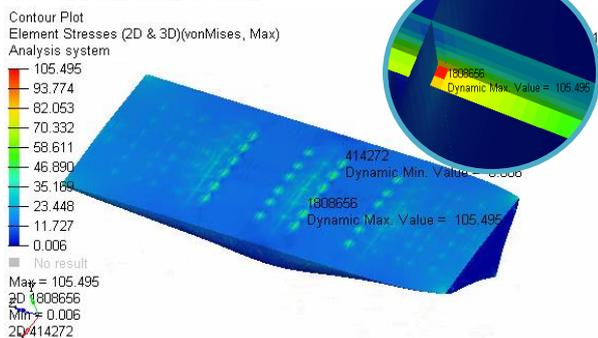
b. Truk



Gambar 17. *Stress* Kondisi III Truk.

Pada gambar 17 dijelaskan *stress* paling maksimal terjadi pada *frame* 11 dan *node* 1896780 sebesar 135,079 Mpa, dengan defleksi sebesar 0,98 cm.

c. Truk dan sedan



Gambar 18. *Stress* Kondisi III Truk dan Sedan.

Pada gambar 18 dijelaskan *stress* paling maksimal terjadi pada *frame* 47 dan *node* 1808656 sebesar 105,495 Mpa, dengan defleksi sebesar 0,36 cm.

3.6. Rangkuman Hasil Analisis Struktur

Tabel 5. Rangkuman Hasil Analisis Kondisi I.

| Jenis Kondisi | σ maks (Mpa) | δ maks (cm) |
|----------------|---------------------|--------------------|
| Sedan | 40,969 | 0,5017 |
| Truk | 148,734 | 1,37 |
| Truk dan sedan | 127,065 | 1,02 |

Tabel 6. Rangkuman Hasil Analisis Kondisi II.

| Jenis Kondisi | σ maks (Mpa) | δ maks (cm) |
|----------------|---------------------|--------------------|
| Sedan | 58,753 | 0,92 |
| Truk | 173,048 | 1,92 |
| Truk dan sedan | 148,29 | 1,75 |

Tabel 7. Rangkuman Hasil Analisis Kondisi III.

| Jenis Kondisi | σ maks (Mpa) | δ maks (cm) |
|----------------|---------------------|--------------------|
| Sedan | 55,402 | 0,416 |
| Truk | 135,079 | 0,988 |
| Truk dan sedan | 105,495 | 0,36 |

Pada tabel 5 merupakan rangkuman analisis dari kondisi air tenang, tabel 6 merupakan rangkuman analisis dari kondisi *sagging*, dan tabel 7 rangkuman analisis kondisi *hogging*. Dari ketiga rangkuman analisis tersebut, pada tabel 6 didapatkan *stress* terbesar terjadi pada kondisi *sagging* dengan muatan Truk, nilai *stress* sebesar 173,048 Mpa dan defleksi sebesar 1,92 cm pada *frame* 63, dikarenakan pada kondisi ini terdapat nilai momen yang besar dengan beban dari truk. Sedangkan, pada tabel 5 didapatkan *stress* terkecil, yaitu pada kondisi air tenang dengan muatan sedan, nilai *stress* sebesar 40,969 Mpa dan defleksi sebesar 0,5017 cm pada *frame* 31, dikarenakan pada kondisi ini terdapat nilai momen yang kecil dan beban dari kendaraan sedan itu sendiri lebih kecil daripada truk.

Untuk muatan kendaraan campuran truk dan sedan, lokasi *stress* terbesar berada antara *frame* 35 sampai dengan 63. Hal ini dikarenakan muatan truk yang bebannya lebih besar daripada sedan diletakkan sepanjang *frame* 35 sampai 63, sehingga titik *hotspot* berada pada area tersebut.

3.7. Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

Faktor keamanan atau *safety factor* adalah sebuah kemampuan suatu bahan menerima berbagai macam beban dari luar, yaitu *compressive load* (beban tekan) ataupun *tensile load* (beban tarik) [14]. Suatu struktur dikatakan aman, apabila nilai $Sf > 1$.

Tabel 8. Kriteria Kekuatan BKI Kondisi I.

| Jenis Kondisi | σ maks (Mpa) | Kriteria Kekuatan BKI (Mpa) | Ket |
|----------------|---------------------|-----------------------------|-----|
| Sedan | 40,969 | 194,44 | Ok |
| Truk | 148,734 | 194,44 | Ok |
| Truk dan sedan | 127,065 | 194,44 | Ok |

Tabel 9. Kriteria Kekuatan BKI Kondisi II.

| Jenis Kondisi | σ maks (Mpa) | Kriteria Kekuatan BKI (Mpa) | Ket |
|----------------|---------------------|-----------------------------|-----|
| Sedan | 58,753 | 194,44 | Ok |
| Truk | 173,048 | 194,44 | Ok |
| Truk dan sedan | 148,29 | 194,44 | Ok |

Tabel 10. Kriteria Kekuatan BKI Kondisi III.

| Jenis Kondisi | σ maks (Mpa) | Kriteria Kekuatan BKI (Mpa) | Ket |
|----------------|---------------------|-----------------------------|-----|
| Sedan | 55,402 | 194,44 | Ok |
| Truk | 135,079 | 194,44 | Ok |
| Truk dan sedan | 105,495 | 194,44 | Ok |

Kriteria kekuatan pada struktur *car deck* kapal menurut aturan BKI yaitu 194,44 Mpa [15], sesuai dengan yang terdapat pada aturan BKI Volume II. Pada tabel 8, tabel 9, dan tabel 10 merupakan perbandingan *stress* tiap kondisi dengan kriteria kekuatan BKI. Pada tabel 9 menunjukkan *stress* paling maksimal terjadi pada kondisi II Truk, yaitu sebesar 173,048 Mpa. Sedangkan, pada tabel 8 ditunjukkan *stress* terkecil terjadi pada kondisi I Sedan sebesar 40,969 Mpa. Berdasarkan tabel 8, 9, dan 10, semua kondisi memenuhi kriteria kekuatan BKI.

Tabel 11. *Safety Factor* Kondisi I.

| Jenis Kondisi | σ maks (Mpa) | Yield Stress (Mpa) | Safety Factor |
|----------------|---------------------|--------------------|---------------|
| Sedan | 40,969 | 235 | 5,73 |
| Truk | 148,734 | 235 | 1,58 |
| Truk dan sedan | 127,065 | 235 | 1,85 |

Tabel 12. *Safety Factor* Kondisi II.

| Jenis Kondisi | σ maks (Mpa) | Yield Stress (Mpa) | Safety Factor |
|----------------|---------------------|--------------------|---------------|
| Sedan | 58,753 | 235 | 3,99 |
| Truk | 173,048 | 235 | 1,35 |
| Truk dan sedan | 148,29 | 235 | 1,58 |

Tabel 13. *Safety Factor* Kondisi III.

| Jenis Kondisi | σ maks (Mpa) | Yield Stress (Mpa) | Safety Factor |
|----------------|---------------------|--------------------|---------------|
| Sedan | 55,402 | 235 | 4,24 |
| Truk | 135,079 | 235 | 1,74 |
| Truk dan sedan | 105,495 | 235 | 2,22 |

Tegangan ijin berdasarkan material yang terdapat pada aturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) Volume II Section 2 yaitu 235 MPa [15]. Pada tabel 11, tabel 12, dan tabel 13 merupakan perbandingan *stress* tiap kondisi dengan kriteria bahan/material sesuai aturan BKI untuk *safety factor*. Pada tabel 12, didapatkan *safety factor* berdasarkan kriteria bahan yang terkecil terjadi pada kondisi II Truk atau keadaan *sagging* muatan truk sebesar 1,35. Sedangkan, pada tabel 11 didapatkan faktor keamanan terbesar pada kondisi I sedan atau kondisi air tenang muatan sedan sebesar 5,73. Hal itu menandakan bahwa struktur *car deck* masih aman berdasarkan material yang digunakan ($Sf > 1$).

3.8. Perhitungan Nilai *Midship Section Modulus*

Nilai minimum *midship section modulus* diatur pada *Rules BKI Vol. II Section 5 C.2.1*, digunakan dalam perhitungan kekuatan memanjang struktur kapal [15].

$$W_{min} = k \cdot c_0 \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_b + 0.7) 10^{-6} \quad (4)$$

$$W > W_{min} \quad (5)$$

Tabel 14. Perhitungan *Midship Section Modulus*

| Bagian | Modulus | Kriteria BKI | Keterangan |
|-----------------|---------------------|----------------------|------------|
| <i>W deck</i> | 0,37 m ³ | 0,137 m ³ | Memenuhi |
| <i>W bottom</i> | 0,45 m ³ | 0,137 m ³ | Memenuhi |

Dimana, W_{min} adalah nilai modulus minimum (m^3), k adalah faktor bahan, c_0 koefisien gelombang, L adalah Panjang kapal (m), B adalah lebar kapal (m), dan C_b adalah koefisien blok kapal. Modulus dihitung terhadap geladak (*Wdeck*) dan bottom (*Wbottom*). Pada tabel 14, perhitungan modulus sudah masuk kriteria dari aturan BKI.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis perhitungan kekuatan konstruksi *car deck* pada kapal penyeberangan 1000GT akibat perubahan muatan yang telah dilakukan didapatkan hasil yaitu: 1) *Stress* paling maksimum terjadi pada saat kondisi kapal sedang *sagging* dengan muatan truk. *Stress* terjadi pada *frame* 63 dan *node* 1889224 sebesar 173,048 Mpa dengan defleksi sebesar 1,92 cm. *Stress* paling kecil terjadi pada saat kondisi kapal pada air tenang dengan muatan sedan. *Stress* terjadi pada *frame* 31 dan *node* 1883337 sebesar 40,969 Mpa dengan defleksi sebesar 0,5017 cm. 2) Untuk muatan kendaraan campuran truk dan sedan, lokasi *stress* terbesar berada antara *frame* 35 sampai 63. Hal ini dikarenakan muatan truk yang bebannya lebih besar daripada sedan diletakkan sepanjang *frame* 35 sampai 63, sehingga titik *hotspot* berada pada area tersebut. 3) Faktor keamanan berdasarkan kriteria bahan terkecil terjadi pada kondisi *sagging* muatan Truk sebesar 1,35. Sedangkan, berdasarkan kriteria bahan faktor keamanan terbesar terjadi pada kondisi air tenang muatan sedan sebesar 5,73. Menurut kriteria kekuatan BKI, semua kondisi memenuhi dari kriteria kekuatan BKI.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih sebanyak-banyaknya oleh penulis disampaikan kepada Allah SWT yang selalu memberikan berkah, rahmat, dan kesehatan selalu, serta Orang Tua dan Keluarga yang selalu mendukung dan mendoakan penulis, dan juga kepada Dosen pembimbing 1 dan Dosen pembimbing 2, serta teman-teman yang sudah membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dokkum, V. Klaas, "Ship Knowledge - A Modern Encyclopedia", The Netherlands: Dokmar, 2003.
- [2] M. Z. M. Alie, G. Sitepu, and A. M. Nugraha, "The influence of superstructure on the longitudinal ultimate strength of a RO-RO

- Ship," in *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*, Greece, 2016.
- [3] M. Z. M. Alie, G. Sitepu, and S. I. Latumahina, "The Assessment of the Ultimate Hull Girder Strength of RO-RO Ship after Damages," in *The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*, USA, 2017.
- [4] M. A. G. Calle and M. Alves, "A review-analysis on material failure modeling in ship collision," *Ocean Engineering*, Vol. 106, p. 20-38, 2015.
- [5] A. H. Kalam, I. Pujo M, and G. Rindo, "Kajian Teknis Kekuatan Car Deck Pada Kapal Ferry Ro-Ro 500 GT Akibat Perubahan Muatan Dengan Metode Elemen Hingga", *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, Vol. 5, no.1, 2017.
- [6] R. Aizzat W, A. F. Zakki, and H. Yudo, "Analisa Kekuatan Sandwich Plate System pada Konstruksi Geladak Kendaraan Kapal Ferry Ro-Ro 500 GT Akibat Perubahan Muatan", *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, Vol. 10, no.10, 2019.
- [7] A. F. Molland, "The Maritime Engineering Reference Book: A Guide to Ship Design, Construction and Operation," *Elsevier*. p. 920, 2011.
- [8] D. Setyawan, "Kekuatan Struktur Kapal," Jakarta: Pradnya Pramita, 1999.
- [9] D. L. Logan, "A First Course in the Finite Element Methode," Canada: Chris Carson, 2007.
- [10] J. E. Brancheau, "Practical Aspects of Finite Element Simulation: A Study Guide," *The HyperWoks University Team*, 2015.
- [11] Korean Register Of Shipping, "Rules for the Classification of Steel Ships", 2009.
- [12] T. Okawa, Y. Sumi, and M. Mohri, "Simulation-based fatigue crack management of ship structural details applied to longitudinal and transverse connections", *Marine structures*, Vol. 19, no. 4, 2006.
- [13] S. Haris and J. Amdahl, "Analysis of ship-ship collision damage accounting for bow and side deformation interaction", *Marine Structures*, Vol. 32, 2013.
- [14] E.P. Popov, "Mechanics of Materials", 2nd edition, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1994.
- [15] B. K. Indonesia, "Rules For Hull", *Rules Classif. Constr.*, vol. II, 2018.