

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Pada bab ini dijelaskan teori-teori yang akan digunakan sebagai dasar penelitian dan berguna sebagai acuan dalam menganalisis permasalahan yang dibahas. Landasan teori disusun untuk memberikan pemahaman konseptual yang jelas mengenai variable-variabel penelitian, prinsip-prinsip ilmiah yang relevan, serta temuan-temuan sebelumnya yang mendukung arah penelitian. Melalui uraian teori ini, diharapkan penelitian memiliki pijakan ilmiah yang kuat sehingga hasil analisis yang diperoleh dapat di pertanggung jawabkan secara akademis.

2.1.1 Kapal Ferry Ro-Ro

Kapal ferry (Vehicle vessel) merupakan jenis kapal yang digunakan untuk penyebrangan laut yang dapat mengangkut penumpang dan kendaraannya. (Naufal Zaibidi et al., 2021). Kapal ini telah digunakan sebagai moda transportasi darat dan tidak dapat dipungkiri bahwa awal perkembangan kapal ini meniru LST (Landing Ship Tank) yang merupakan kapal perang amfibi yang membawa peralatan pada PD II. dalam kondisi tertentu terutama pada situasi dan kondisi dengan fasilitas pelabuhan yang minim dan kondisi alam yang buruk. (Pawara et al., 2022).

Pengambilan sampel dengan kapasitas yang sama yaitu kapal **KMP BRR** dengan kapasitas 1000 GT, berikut data utama yang akan digunakan yaitu sebagai berikut.

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

Tabel 2.1 Data Utama Kapal, Sumber :(Pratama et al., 2020)

Tabel ukuran utama kapal digunakan untuk menentukan ukuran kapal, pada penelitian ini yang paling utama adalah lebar kapal, dimana ukuran tersebut diambil dan dipakai untuk pembuatan model desain simulasi analisis struktural pada cardeck, menggunakan software ansys nantinya.

2.1.2 Pendefinisian Beban Muatan

Pada penelitian ini terdapat 1 macam beban yang diinputkan, yaitu beban berat dari truk. Untuk mendapatkan beban kendaraan, diperlukan berat kendaraan (kg) dikalikan dengan percepatan gravitasi (m/s^2). Berikut persamaannya

$$W = m \times g \quad (2. 1)$$

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

Karena truk tersebut memiliki enam ban, setiap ban menopang beban di bak truk. Setiap ban menerima beban sebesar 13.067 N. Gunakan fitur gaya untuk memasukkan beban pada satu titik berdasarkan luas permukaan ban dan beban tapak ban truk sebesar 99000 mm².

2.1.3 Midspan

Midspan (titik tengah bentang) hampir selalu menjadi titik ukur utama. Di sinilah lendutan, retak, gaya dalam, dan respons dinamis paling besar muncul, sehingga sangat penting untuk penilaian kinerja, keamanan, dan kalibrasi model numerik. Pada uji lentur empat titik, midspan digunakan untuk mengukur hubungan beban–lendutan dan beban–bukaan retak, misalnya pada balok beton bertulang serat baja, sehingga dapat dikarakterisasi kekakuan, ketangguhan lentur, dan efek serat terhadap retak (Şanal & Hosseini, 2019). Uji rangkai jangka panjang juga mencatat lendutan di midspan untuk menilai apakah balok masih berada pada tahap elastis dan memenuhi batas layanan (misalnya lendutan maksimum < L/250) (Iskhakov et al., 2025). Pada banyak uji balok beton prategang, komposit, maupun pasca-tarik, lendutan midspan dipakai untuk membandingkan perilaku aktual terhadap perhitungan teoritis dan metode peraturan (Gurunaathan et al., 2017).

Untuk beban kejut/impak, lendutan maksimum di midspan dipakai sebagai indeks kerusakan dan dasar pemodelan SDOF dan keseimbangan energi (Yan et al., 2023). Pada balok beton atau baja yang diuji di bawah beban ledakan atau impak, riwayat waktu perpindahan midspan (puncak dan residual) dibandingkan antara uji, model numerik, dan rumus fitting untuk mengevaluasi kekuatan pelat baja tambahan dan skala model (Liu et al., 2024).

2.1.4 Material

1. Beton / *Concrete (Drucker-Prager)*

Model beton "Concrete (Drucker-Prager)" adalah pendekatan konstitutif yang menggunakan kriteria leleh Drucker-Prager untuk menggambarkan perilaku elastoplastik beton, khususnya dalam kondisi tekanan dan kerusakan. Model ini mampu memprediksi kekuatan tekan beton yang dikurung dengan serat polimer (FRP), termasuk beton yang mengalami kerusakan akibat beban, kebakaran, dan laju regangan, dengan akurasi tinggi berdasarkan data eksperimen yang luas (Zhang et al., 2022). Selain itu, model ini juga dapat mengakomodasi efek kerusakan *elastoplastik* dan pengaruh suhu pada perilaku mekanik beton, sehingga cocok untuk simulasi numerik struktur beton pada berbagai kondisi termal dan mekanis. (Li et al., 2021).

Dalam aplikasi rekayasa, model Drucker-Prager digunakan dalam perangkat lunak elemen hingga untuk memprediksi perilaku kolom beton bertulang yang dikurung CFRP, memperlihatkan kemampuan dalam menangani konsentrasi tegangan dan hubungan tegangan-regangan yang kompleks. Secara umum, model Drucker-Prager memberikan kerangka kerja yang efektif untuk analisis

dan desain beton yang mempertimbangkan perilaku nonlinier dan kerusakan material secara realistis.(Zhang et al., 2022).

2. Baja ASTM A36

Pelat baja ASTM A36 adalah baja karbon rendah yang banyak digunakan dalam aplikasi struktural karena sifat mekaniknya yang baik dan kemudahan pengelasannya. Baja ini memiliki kekuatan tarik maksimum sekitar 400-550 MPa, dan menunjukkan perilaku mekanik yang dapat dipengaruhi oleh perlakuan panas, seperti quenching dan tempering, yang dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya secara signifikan (Agrawal et al., 2025). ASTM A36 juga menunjukkan ketahanan korosi yang bervariasi tergantung pada kondisi permukaan dan lingkungan, dengan peningkatan korosi yang terkait dengan peningkatan kekasaran permukaan akibat pitting (Arifin et al., 2020). Proses pengelasan dengan variasi input panas memengaruhi mikrostruktur dan sifat mekanik sambungan las, di mana peningkatan input panas cenderung menurunkan kekuatan tarik dan kekerasan sambungan las (Senthilkumar et al., 2023).

Selain itu, perlakuan pasca-pembakaran dan metode pendinginan memengaruhi kekuatan tarik dan keuletan baja ASTM A36, dengan pendinginan air dari suhu tinggi meningkatkan kekuatan tarik namun mengurangi keuletan secara signifikan (Sajid & Kiran, 2018). Baja ASTM A36 juga rentan terhadap retak korosi tegangan terutama setelah mengalami deformasi plastis, yang dapat menurunkan kemampuan regangan dan meningkatkan kekuatan tarik akibat pengerasan regangan (Navidnezhad et al., 2025). Beberapa kandungan yang terdapat pada jenis baja ASTM A36 sebagai berikut,

Elemen	Isi
Karbon, C	0,25 – 0,29 %
Tembaga, Cu	0,2 %
Besi, Fe	98,0 %
Mangan, Mn	1,03 %
Fosfor, P	0,04 %
Silikon, Si	0,28 %
Belerang, S	0,05 %

Tabel 2.2 Kandungan Pelat Baja ASTM A36 (Sumber : <https://www.gneesteel.com/id/products/steel-plate/carbon-steel/a36-steel.html>)

Produk baja A36 yang memenuhi syarat harus memiliki rentang kekuatan tarik tertinggi dari 58.000 hingga 79.800 psi. Ini bukan angka pasti karena dipengaruhi oleh komposisi kimia dan metode produksinya. Dalam pengujian tarik, batang baja ASTM A36 dapat memanjang hingga sekitar 20% dari panjang aslinya. Ini juga menunjukkan kekuatan tumbukan yang sangat

baik pada suhu kamar. Berikut tabel kekuatan mekanis dari pelat baja ASTM A36 :

Peralatan Mekanis	Metrik	Imperial
Kekuatan Tarik, Ultimate	400-550 Mpa	58000-79800 psi
Kekuatan Tarik, Hasil	250 Mpa	36300 psi
Perpanjangan saat Putus (dalam 50 mm)	23,0’’%	23,0’’%
Modulus Elastisitas	200 Gpa	29000 ksi
Modulus Massal (Tipikal untuk Baja)	140 Gpa	203000 ksi
Rasio Poison	0,26	0,26
Modulus geser	79,3 Gpa	11500 ksi

Tabel 2.3 Kekuatan Mekanis Pelat Baja ASTM A36 (Sumber : <https://www.gneesteel.com/id/products/steel-plate/carbon-steel/a36-steel.html>)

2.1.5 Tegangan (*Stress*)

Tegangan adalah intensitas gaya yang bekerja pada area yang sangat kecil pada suatu benda dan terdiri dari berbagai besaran dan arah (Naufal Zaibidi et al., 2021). Reaksi ini bersifat internal, dan ketika gaya melebihi kapasitas objek, deformasi atau kegagalan akan terjadi. Analisis tegangan berperan dalam hal ini. Secara umum, tegangan adalah gaya internal yang bekerja pada area yang sangat kecil dari suatu objek dan terdiri dari berbagai besaran dan arah. (Pawara et al., 2022).

Untuk menentukan tegangan pada dek kapal, langkah pertama adalah menghitung beban yang bekerja pada dek, beban yang diberikan adalah beban aktual selama operasi kapal sehingga menghasilkan hasil analisis yang komprehensif. (Driantama Arwan et al., 2021). Tegangan normal adalah tegangan yang terjadi ketika gaya yang diterapkan tegak lurus terhadap luas penampang material. (Naufal Zaibidi et al., 2021). Beban yang digunakan adalah beban aktual selama operasi kapal untuk memberikan hasil analisis komprehensif yang selaras dengan yang diamati di lapangan. Beban yang digunakan adalah satu truk dengan berat total 82800 kg. Oleh karena itu, nilai beban yang dimasukkan ke dalam model ditentukan menggunakan persamaan berikut. (Driantama Arwan et al., 2021).

$$Load\ Press = \frac{Total\ beban}{Luas\ penampang\ model} \quad (2.2)$$

Langkah selanjutnya dilakukan perhitungan tegangan yang terjadi pada konstruksi *car deck* kapal. Suatu tegangan pada sebuah titik, secara matematis dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut. (R. C. Hibbeler, 2018).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

Dimana F adalah gaya yang bekerja tegak lurus terhadap penampang, sedangkan A adalah luas. Ini normal Tegangan tersebut dapat menghasilkan tegangan tarik yang diakibatkan oleh beban tarik atau beban yang arahnya searah tegak lurus terhadap luas permukaan, Tegangan tekan yang diakibatkan oleh beban atau beban tekan. Tegangan geser yang disebabkan oleh suatu gaya yang arahnya sejajar

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_2^2 + 3\tau^2} \quad (2.4)$$

Dimana σ_v merupakan tegangan ekuivalen, σ merupakan tegangan normal, dan τ merupakan tegangan geser.

2.1.6 Deformasi

1. Deformasi Total Pada Simulasi Elemen Hingga (ANSYS)

Dalam analisis elemen hingga dengan ANSYS, deformasi total (total deformation) adalah besaran perpindahan gabungan di setiap titik/elemen struktur akibat beban. Secara fisik, ini adalah jarak antara posisi awal dan posisi setelah dibebani, yang merupakan hasil penjumlahan vektor dari semua komponen perpindahan (arah x , y , dan z). Salah satu studi menjelaskan bahwa deformasi total adalah jumlah (total) deformasi elastis dan plastis suatu material, sehingga menggambarkan perubahan bentuk keseluruhan baik yang sementara maupun permanen (Fariz et al., 2023). Studi lain menegaskan bahwa deformasi total adalah jumlah vektor semua arah perpindahan dalam sistem; misalnya, pada meja TV parametrik, deformasi terbesar terjadi pada arah sumbu- Y (arah gravitasi dan beban) dan nilai total deformasi meningkat seiring bertambahnya beban, menunjukkan hubungan yang sebanding antara besarnya beban dan perpindahan global struktur (Fariz et al., 2023). Dalam banyak penelitian, deformasi total digunakan sebagai indikator kekakuan dan kestabilan struktur: semakin kecil total deformasi untuk beban tertentu, semakin kaku dan semakin baik kinerja strukturalnya. Misalnya, pada balok komposit kantilever, total deformasi maksimum 1,254 mm menunjukkan respon lentur utama di sumbu- z dan dipakai untuk membandingkan susunan lapisan komposit yang berbeda (Al wazir, 2022), pada keel prostetik komposit, total deformasi maksimum hanya 0,00058 mm di bawah beban 1000 N, yang diinterpretasikan sebagai struktur sangat kaku dan aman (Subhi et al., 2022). Dalam desain furnitur TV, nilai deformasi total sekitar $2,06 \times 10^{-5}$ m pada beban 1000 N digunakan untuk menyimpulkan bahwa tidak terjadi perubahan bentuk signifikan maupun kegagalan, sehingga meja mampu menahan beban hingga 100 kg (Fariz et al., 2023).

Pada berbagai aplikasi lain seperti gantry mesin presisi, jembatan rangka baja, poros kereta cepat berongga, rangka alat pertanian, cerobong baja tahan karat, dan struktur komposit selama proses curing, deformasi total selalu dianalisis sebagai “lendutan global maksimum” struktur; nilai yang kecil menandakan bahwa defleksi masih dalam batas layanan, sedangkan pola kontur deformasi total membantu mengidentifikasi lokasi paling fleksibel dan potensi titik lemah struktur (Гребеников et al., 2021). Dengan demikian, pada hasil simulasi ANSYS, deformasi total adalah keluaran utama pasca-proses yang merepresentasikan seberapa jauh dan ke mana geometri berpindah di ruang 3D akibat kombinasi beban, kondisi batas, dan sifat

material, dan digunakan baik untuk verifikasi kekuatan maupun kenyamanan/lendutan layanan struktur.

$$U(total) = \sqrt{(U_x^2 + U_y^2 + U_z^2)} \quad (2.5)$$

(U_x) = deformasi arah X

(U_y) = deformasi arah Y

(U_z) = deformasi arah Z

$U(total)$ = deformasi total/resultan perpindahan

2. Batas Deformasi Berdasarkan Aturan BKI

Proses pemanasan dan pendinginan pada logam las memicu terjadinya pemuaihan yang menyebabkan deformasi (perubahan bentuk) akibat tegangan. Jika dibiarkan, kondisi ini berisiko menurunkan kekuatan struktural sekaligus mengganggu efisiensi operasional kapal (Bulan Purnama & Taufiqur Rahman, 2024). Deformasi pada cardeck kapal ro-ro adalah perubahan bentuk struktur geladak kendaraan akibat beban kendaraan, gelombang, dan kondisi seperti sagging atau hogging, yang dievaluasi melalui tegangan von Mises dan regangan untuk memastikan faktor keamanan di atas 1 sesuai standar BKI.

Asosiasi Perkapalan Indonesia (BKI) adalah badan pemerintah Indonesia yang bertanggung jawab untuk memeriksa dan mengawasi kapal, baik yang sedang dibangun maupun yang saat ini beroperasi di Indonesia. Standardisasi ketebalan pelat untuk penggantian pelat sesuai dengan peraturan BKI. (Biro Klasifikasi Indonesia) 2013 Vol. II Sec. B.2.3.



Gambar 2.1 Dinding kapal yang mengalami deformasi, (Sumber: Penulis 2026)

Peraturan BKI mengenai penipisan pelat kapal diatur dalam *Rules for Classification and Surveys, Part 1 - Seagoing Ships, Volume I, Section 3 (Survey Requirements)* dan *Rules for Hull, Volume II, Section B (General Construction)*. Berikut ini adalah contoh keausan maksimal yang diperbolehkan BKI:

Jenis	Bagian	Presentase keausan Maksimal (%)
Pelat Lambung	Pelat alas (<i>bottom plat</i>)	20
	Pelat lajur bilga (<i>bilga plating</i>)	30
	Pelat lajur alas (<i>sheer stroke</i>)	20
Pelat Alas dalam (<i>tanktop</i>)	Pelat tepi (<i>margin plat</i>)	20
	Pelat Alas (<i>tank top</i>)	20
Pelat geladak utama (<i>main deck</i>)	Pelat tepi geladak (<i>stringer plat</i>)	20
	Pelat geladak antara lubang palka	20
Pelat geladak lainnya	-	30
Dinding sekat	-	20-30

Tabel 2.4 Keausan maksimal yang diperbolehkan BKI, (Sumber: Rules BKI)

Dengan demikian pelat *cardeck* memiliki keausan maksimal sebesar 20%, dan jika keausan mencapai angka tersebut, maka diwajibkan untuk dilakukannya penggantian pelat (*replating*).

2.1.7 Faktor Keamanan (*Safety Faktor*)

Dalam analisis struktur dengan ANSYS, safety factor (faktor keamanan) adalah ukuran seberapa jauh suatu komponen “aman” terhadap kegagalan ketika menerima beban. Secara umum, nilai ini diperoleh dari perbandingan antara kekuatan material (misalnya yield strength atau tegangan ijin) dengan tegangan maksimal hasil simulasi (biasanya tegangan ekuivalen von Mises). Dalam analisis poros roda berongga kereta cepat, safety factor didefinisikan sebagai perbandingan antara yield strength terhadap tegangan maksimum; nilai ini lalu dibandingkan dengan rentang standar (misal 1–1,5 untuk kondisi terkendali, hingga >4,5 untuk kondisi beban/lingkungan tidak pasti) untuk menilai apakah desain sudah cukup aman (Tito Syahril Sobarudin Izha Mahendra & Muhamad Fitri, 2025). Jika safety factor > 1 dan di atas batas minimum standar (misalnya 1,25; 1,5; 4,5 tergantung aturan), komponen dianggap sanggup menahan beban tanpa leleh atau gagal (Wibawa et al., 2020).

Banyak studi memakai ANSYS Workbench untuk menghitung tegangan von Mises, deformasi, lalu secara otomatis atau manual mendapatkan safety factor; misalnya pada rangka sepeda disabilitas, desain terbaik dipilih karena mempunyai safety factor tertinggi (6,6) dengan tegangan von Mises masih jauh di bawah kekuatan material (Pratama et al., 2025). Pada analisis pisau penyanggul, tegangan von Mises sangat kecil sehingga safety factor ≈ 15 , menunjukkan desain sangat aman tetapi mungkin terlalu konservatif (Prasetyo et al., 2022). Dalam analisis silinder tabung motor roket berdinding tebal dan tipis, safety factor > 1 atau > 1,25 untuk berbagai kombinasi tekanan internal dan ketebalan dinding

diartikan bahwa tabung masih mampu menahan beban statik tanpa gagal (Wibawa, 2020). Pada studi cerobong baja tahan karat, safety factor 8,39 pada klem dan 1,71 pada modul menunjukkan bahwa, meski tegangan meningkat pada beberapa bagian, semua nilai masih berada dalam batas aman (Tanriver et al., 2025). Di sisi lain, bila safety factor < 1 (atau < batas standar), seperti pada model implan gigi tertentu di bawah beban miring 200 N atau spesimen dengan takik tajam dalam uji tarik, desain dinilai tidak memenuhi kriteria keamanan dan berpotensi mengalami kegagalan (Elsayed et al., 2025).

Dalam analisis kelelahan (fatigue) dan beban siklik, ANSYS dapat menelusuri perubahan safety factor terhadap waktu; penurunan bertahap SF selama pembebanan siklik pada shock absorber menunjukkan akumulasi kerusakan sehingga nilai faktor keamanan tidak boleh hanya dilihat pada kondisi statik awal saja (Maiya et al., 2023). Berbagai penelitian ini memperlihatkan bahwa interpretasi safety factor di ANSYS selalu terkait dengan: pemilihan kriteria kegagalan (umumnya von Mises), data kekuatan material yang tepat, standar atau regulasi yang dipakai, serta jenis beban (statik, termal, dinamis, kelelahan). Dengan demikian, bukan hanya besarnya yang penting, tetapi juga konteks aplikasinya: untuk struktur berisiko tinggi sering disyaratkan SF jauh di atas 1, sementara untuk aplikasi tertentu SF mendekati 1 bisa ditoleransi asalkan sesuai standar material dan kondisi kerja yang diasumsikan. Rumus dari safety factor sendiri dapat di definisikan sebagai berikut.

$$SF = \frac{\sigma_{\{y\}}}{\sigma_{\{VM,maks\}}} \quad (2.6)$$

2.1.8 Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*– FEM)

Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM) adalah teknik numerik yang efektif untuk menyelesaikan persamaan diferensial, baik persamaan diferensial biasa maupun parsial, dengan membagi domain masalah menjadi elemen-elemen yang lebih kecil yang lebih mudah dianalisis. FEM banyak digunakan dalam berbagai disiplin ilmu teknik seperti hidrodinamika, konduksi panas, dan mekanika geoteknik karena kemampuannya menangani masalah dengan geometri kompleks dan kondisi batas yang beragam. (Saeed & Almutairi, 2025).

Metode ini mengubah persamaan diferensial menjadi sistem persamaan aljabar yang lebih mudah diselesaikan, sering kali menggunakan fungsi basis linear dan metode Galerkin untuk pendekatan solusi (Chávez-Páez et al., 2024). Studi perbandingan menunjukkan bahwa FEM umumnya memberikan akurasi yang lebih tinggi dibandingkan metode beda hingga, terutama pada domain dengan kondisi batas yang kompleks. (Almutairi & Saeed, 2025). Selain itu, pengembangan terbaru seperti metode Companion-Based Multi-Level FEM memungkinkan penyelesaian persamaan diferensial nonlinier dengan banyak solusi, meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam kasus-kasus sulit. (Hao et al., 2023). FEM juga dapat diadaptasi untuk domain acak dan masalah stokastik, serta dioptimalkan dengan teknik seperti two-grid methods dan representasi tensor untuk efisiensi komputasi yang lebih baik. (K. Wang, 2024).

2.2 Kajian Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu mengenai Analisa kekuatan plat cardeck menggunakan metode finite element telah banyak dilakukan sebelumnya. Studi yang dilakukan oleh M. U. Pawara dkk. (2022) menunjukkan bahwa ketebalan pelat cardeck mempengaruhi tegangan, deformasi, dan safety factor. Namun, penelitian-penelitian tersebut umumnya fokus untuk meneliti kekuatan pada beban kendaraan, tanpa ada variasi terkait material tambahan. Oleh karena itu penelitian ini berupaya untuk mengisi kekosongan tersebut dengan melakukan pengujian menggunakan metode finite element dan menambahkan variasi terhadap bahan material tambahan.

Penelitian yang dilakukan oleh M. U. Pawara dkk. pada tahun 2022 mengungkapkan bahwa ketebalan pelat car deck memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur kapal Ro-Ro. Melalui simulasi FEA menggunakan perangkat lunak ANSYS, ditemukan bahwa pelat dengan ketebalan terkecil cenderung mengalami tegangan maksimum yang paling besar dibandingkan variasi ketebalan lainnya. Meskipun demikian, hasil analisis menunjukkan bahwa faktor keamanan pada seluruh variasi ketebalan yang diuji masih memenuhi standar yang ditetapkan oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), sehingga struktur dinilai aman untuk dioperasikan dalam kondisi pembebanan yang diperhitungkan.

Disisi lain, Penelitian yang dilakukan oleh Ferdie Hanafi Putra dkk. pada tahun 2025 mengungkapkan bahwa kondisi hogging merupakan kondisi kritis yang menghasilkan tegangan maksimum paling tinggi pada pelat car deck kapal Ro-Ro. Dengan metode kuantitatif yang menggabungkan FEA dan perhitungan manual, diperoleh nilai tegangan maksimum sebesar 188,23 MPa dan defleksi sebesar 0,077 m pada saat kapal menerima beban truk penuh dalam kondisi hogging. Nilai faktor keamanan yang dihasilkan sebesar 1,3281 menunjukkan bahwa struktur masih berada dalam batas aman sesuai standar BKI, meskipun kondisi hogging memberikan tekanan struktural yang lebih besar dibandingkan kondisi pembebanan lainnya.

Lebih lanjut, Penelitian yang dilakukan oleh Amam Baharullah dkk. pada tahun 2025 mengungkapkan bahwa kondisi overload pada pelat car deck kapal Ferry Ro-Ro menyebabkan tegangan yang jauh melampaui batas desain normal, dengan nilai tegangan tertinggi mencapai 486,1 MPa. Menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan FEA dan metode Sonderberg, penelitian ini mengevaluasi umur kelelahan (fatigue life) struktur car deck secara komprehensif. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi overload, umur lelah pelat car deck hanya berkisar 4,3 tahun, jauh lebih pendek dari umur desain yang diharapkan. Temuan ini mengindikasikan adanya risiko kelelahan struktural yang serius apabila kapal dioperasikan secara konsisten melebihi kapasitas beban yang telah ditetapkan, sehingga pengawasan muatan secara ketat sangat diperlukan untuk menjaga integritas struktural jangka panjang.

Selain itu, Penelitian yang dilakukan oleh Amalia IkaWulandar dkk. pada tahun 2021 mengungkapkan bahwa variasi ketebalan pelat car deck kapal Ferry Ro-Ro berpengaruh sangat signifikan terhadap umur kelelahan struktural. Dengan menggunakan metode Finite Element Method (FEM), penelitian ini membandingkan performa struktural pelat pada berbagai tingkat ketebalan mulai dari 80% hingga 110% dari ketebalan standar. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan dari 80% menjadi 110% mampu memperpanjang umur lelah secara drastis. Pada ketebalan 80% dengan tegangan 109,47 MPa, umur lelah pelat bawah hanya mencapai 14,13

tahun, sedangkan pada ketebalan 110% dengan tegangan 103,07 MPa, umur lelah meningkat menjadi 74,23 tahun. Temuan ini membuktikan bahwa penambahan ketebalan pelat secara terukur merupakan strategi efektif untuk meningkatkan daya tahan struktural dan memperpanjang masa operasional kapal secara keseluruhan.

Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Ferdie Hanafi Putra dkk. pada tahun 2025 mengungkapkan bahwa optimalisasi desain tata letak (re-layout) pada pelat car deck kapal Ro-Ro memberikan dampak positif yang signifikan terhadap distribusi beban dan efisiensi struktural. Melalui pendekatan Finite Element Method (FEM), penelitian ini menganalisis berbagai skenario konfigurasi struktural untuk mengidentifikasi desain yang paling optimal dari segi kekuatan dan keamanan. Hasil penelitian memberikan wawasan penting terkait optimalisasi distribusi beban yang lebih merata, sekaligus merekomendasikan studi lanjutan yang mencakup simulasi beban dinamis, evaluasi material alternatif, serta pengembangan metodologi desain yang lebih canggih. Seluruh rekomendasi tersebut diarahkan untuk meningkatkan keselamatan operasional kapal secara maksimal dalam berbagai kondisi pelayaran.

Terakhir, Penelitian yang dilakukan oleh Tengyang Fu dkk. pada tahun 2024 mengungkapkan bahwa distribusi tegangan pada struktur panel ship deck yang diperkuat tiffener di bawah beban terdistribusi merata dapat dianalisis secara akurat menggunakan kombinasi FEA dan perhitungan teoritis. Penelitian ini secara khusus mengkaji perilaku panel kaku (stiffened panel) yang umum digunakan pada geladak kapal, dengan mempertimbangkan berbagai kondisi pendukung dan parameter pembebanan. Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi tegangan di dalam panel dipengaruhi oleh kondisi pendukung struktur yang kompleks, sehingga diperlukan beberapa asumsi penyederhanaan dalam proses pemodelan. Meskipun demikian, pendekatan numerik yang digunakan terbukti mampu memberikan gambaran distribusi tegangan yang representatif, dan penelitian ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan kompleksitas keseluruhan sistem struktur dalam proses desain dan evaluasi keamanan geladak kapal.