



TUGAS AKHIR

“OPTIMALISASI *FRAME UPPER CAR DECK* SEBAGAI UPAYA PENAMBAHAN MUATAN KAPAL STUDI KASUS: FERRY RORO RUTE PELAYARAN MERAK - BAKAUHENI“

Diajukan untuk memenuhi sebagai
persyaratan memperoleh gelar

Sarjana Terapan

Disusun oleh :

Reikhan Abiyoga Arini Putra
40040421650010

Dosen Pengampu :

Zulfaidah Ariany, S.T.,M.T.

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI PERKAPALAN
DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI
SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG**

2026

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Reikhan Abiyoga Arini Putra

NIM : 40040421650010

Judul Tugas Akhir : OPTIMALISASI FRAME UPPER *CAR DECK* SEBAGAI UPAYA PENAMBAHAN MUATAN KAPAL STUDI KASUS: FERRY RORO RUTE PELAYARAN MERAK - BAKAUHENI

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa penulisan Laporan Tugas Akhir ini berdasarkan hasil penelitian, dan pemaparan asli saya sendiri. Jika terdapat karya orang lain, saya akan mencantumkan sumber yang jelas.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena Tugas Akhir ini dan sanksi lain sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Diponegoro.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar tanpa paksaan dari pihak manapun.

Semarang, 23 April 2026

Yang membuat pernyataan



Reikhan Abiyoga Arini Putra

40040421650010

HALAMAN PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

**OPTIMALISASI *FRAME UPPER CAR DECK* SEBAGAI UPAYA
PENAMBAHAN MUATAN KAPAL STUDI KASUS: FERRY RORO
RUTE PELAYARAN MERAK - BAKAUHENI RORO**

Oleh :

Reikhan Abiyoga Arini Putra

40040421650010

Diajukan pada

Sidang Laporan Tugas Akhir

Tanggal 23 April 2026

Dinyatakan Lulus / Tidak Lulus

Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Zulfaidah Ariany, ST., MT.

Pembimbing

Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T.

Penguji 1

Dr. Aulia Windyandari., S.T., M.T.

Penguji 2



Mengetahui, Ketua Program Studi

Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro



Dr. Mohd Ridwan, S.T.,M.T.

NIP 197008271999031002

ABSTRAK

Kapal *Roll-on/Roll-off* (Ro-Ro) merupakan moda transportasi laut utama yang melayani penyeberangan antarwilayah di Indonesia, termasuk rute strategis Merak–Bakauheni. Tingginya permintaan angkutan kendaraan pada rute tersebut mendorong kebutuhan optimalisasi kapasitas muat kapal tanpa mengorbankan keamanan struktural. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis pengaruh perubahan desain *frame upper Car Deck* terhadap nilai *section modulus* dan kekuatan struktur berdasarkan *Rules for Hull* Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) 2025; (2) menentukan peningkatan kapasitas muatan yang dapat dicapai melalui modifikasi *frame*; dan (3) mengevaluasi kelayakan ekonomi dari implementasi modifikasi tersebut. Objek penelitian adalah *web frame upper Car Deck* pada rentang *frame* 74–116 yang beroperasi di rute Merak–Bakauheni. Metode yang digunakan adalah perhitungan *section modulus* manual berbasis BKI 2025 yang dikombinasikan dengan pengukuran dimensi aktual di lapangan selama periode *docking* di Graving Dock, serta verifikasi oleh Surveyor BKI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa profil *frame existing* (T 550 × 10 FP 200 × 16 mm) berada dalam kondisi *over-designed* dengan nilai *section modulus* aktual 2.356 cm³, atau 125% di atas nilai minimum BKI sebesar 1.047 cm³. Setelah dilakukan redesain menjadi profil T 250 × 10 FP 240 × 16 mm, diperoleh *section modulus* aktual 1.560 cm³ yang tetap memenuhi persyaratan BKI dengan margin keamanan 48,9%. Modifikasi ini menghasilkan *weight saving* sebesar 4,23 ton untuk 42 *frame* yang dimodifikasi dan penambahan kapasitas muat sebesar 7 unit kendaraan roda empat per *trip*. Analisis kelayakan ekonomi menggunakan metode NPV, IRR, *Payback Period*, dan BEP menunjukkan bahwa proyek ini layak secara finansial dengan NPV sebesar Rp 11,66 miliar, IRR 197,7%, dan *Payback Period* ±6,1 bulan pada tingkat *occupancy* 70%. Hasil penelitian ini telah diimplementasikan secara nyata dan diverifikasi oleh BKI, menegaskan bahwa optimalisasi *frame upper Car Deck* berbasis perhitungan *section modulus* merupakan pendekatan yang valid dan aplikatif untuk meningkatkan kapasitas operasional kapal ferry Ro-Ro.

Kata kunci: *web frame*, *upper Car Deck*, *section modulus*, kapal Ro-Ro, BKI, optimalisasi struktur, kelayakan ekonomi

ABSTRACT

Roll-on/Roll-off (Ro-Ro) vessels serve as a primary maritime transportation mode connecting regions across Indonesia, including the strategic Merak–Bakauheni crossing route. The high demand for vehicle transport on this route has driven the need to optimize cargo capacity without compromising structural safety. This study aims to: (1) analyze the effect of *upper Car Deck frame* redesign on *section modulus* values and structural strength in accordance with the Indonesian Classification Bureau (BKI) *Rules for Hull 2025*; (2) determine the cargo capacity increase achievable through *frame* modification; and (3) evaluate the economic feasibility of implementing such modification. The research object is the *web frame* of the *upper Car Deck* at *frame span* 74–116 operating on the Merak–Bakauheni route. The methodology employed manual *section modulus* calculation based on BKI 2025, combined with actual field measurements during the vessel's docking period at Graving Dock, with verification conducted by BKI Surveyors. Results indicate that the existing frame profile (T 550 × 10 FP 200 × 16 mm) is over-designed, with an actual *section modulus* of 2,356 cm³ — 125% above the BKI minimum requirement of 1,047 cm³. The redesigned profile (T 250 × 10 FP 240 × 16 mm) yields an actual *section modulus* of 1,560 cm³, which still satisfies BKI requirements with a safety margin of 48.9%. The modification produces a weight saving of 4.23 tonnes across 42 modified frames and an additional cargo capacity of 7 passenger vehicle units per voyage. Economic feasibility analysis using NPV, IRR, Payback Period, and BEP methods confirms financial viability, with an NPV of IDR 11.66 billion, IRR of 197.7%, and a Payback Period of approximately 6.1 months at 70% occupancy. The findings have been physically implemented and verified by BKI, confirming that *section modulus*-based optimization of the *upper Car Deck frame* is a valid and practically applicable approach to enhance the operational capacity of Ro-Ro ferry vessels.

Keywords: *web frame, upper Car Deck, section modulus, Ro-Ro vessel, BKI, structural optimization, economic feasibility*

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb

Puji syukur kehadiran Allah SWT. Yang Maha Esa atas limpahan Rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “OPTIMALISASI FRAME UPPER *CAR DECK* SEBAGAI UPAYA PENAMBAHAN MUATAN KAPAL STUDI KASUS: FERRY RORO RUTE PELAYARAN MERAK - BAKAUHENI”.

Tugas akhir ini disusun sebagai pemenuhan syarat untuk meraih gelar Sarjana Terapan pada Pendidikan Program studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro

Penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak, maupun secara langsung atau secara tidak langsung. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar- besarnya kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan Rahmat, hidayah dan kesehatan bagi penulis.
2. Tugas akhir ini saya persembahkan kepada Bapak Jainuri dan Almh. Ngasrini yang merupakan orang tua penulis karena pasti doa yang meluncur dari bibir mereka yang takkan pernah berhenti di setiap harap malam untuk melancarkan upaya penulis dalam mencapai masa depan dan masa terang. Saya ucapkan terima kasih karena walaupun tanpa memiliki gelar apapun di belakang nama, kalian akan tetapi selalu berusaha agar anaknya terjamin dalam pendidikan hingga dapat meraih gelar sarjana.
3. Dr. Mohd. Ridwan, S.T., M.T dan Dr. Aulia Windyandari., S.T., M.T selaku Dosen Penguji tugas akhir yang telah memberi kritik, saran, motivasi, dan bimbingan kepada penulis .
4. Ibu Zulfaidah Ariany, ST., MT., selaku Pembimbing “Proyek Tugas Akhir” pada program studi D4 Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.
5. Bapak Dr. Mohd Ridwan, S.T., M.T. selaku Ketua program studi D4 Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro.
6. Seluruh jajaran dosen dan admin Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan yang telah memberikan arahan kepada penulis. .
7. Kepada wanita yang selalu penulis ucapkan diujung doa, yang menjadi alasan penulis tetap berjalan dan menyelesaikan studi. Terima kasih kepada Axzel Dinda Pratiwi yang senantiasa menemani dan memberi dorongan semangat.
8. Bima Wicaksono dan Agung Rafi Eka Permadi, penulis anggap mereka adalah sosok kakak yang juga sebagai senior penulis yang selalu mendoakan serta menjaga penulis seperti adik sendiri.
9. Diri saya sendiri yang telah berjuang untuk menunaikan janji penulis kepada Almh. Ngasrini selaku bunda tercinta untuk bisa mendapatkan gelar di bangku perkuliahan. Terima kasih sudah bertahan hingga saat ini walaupun itu tidak mudah. Pada momen ini penulis ingin memeluk diri sendiri dan memberikan selamat atas pencapaian yang telah penulis capai.

10. Bapak Arul Muklisin selaku Owner Surveyor kapal yang sudah membantu dalam mendapatkan data penelitian dan materi yang diperlukan.
11. LECTURNAL 21 yang telah memberikan semangat dan membantu penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini..
12. Terimakasih juga teruntuk seluruh elemen angkatan yang menemani DNA, NADU, NEGD, NAGG, NORTH, NAVY, NASA, NEUTRAL, NASCAR.

Penulis menyadari bahwa bahwa masih terdapat banyak kekurangan, dan kesalahan dalam pembuatan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya. Penulis juga mengharapkan kritik serta saran atas dari berbagai pihak agar dapat membangun penulis.

Wassalamualaikum Wr.Wb.

Semarang, 23 April 2026

Reikhan Abiyoga Arini Putra

NIM 40040421650010

DAFTAR ISI

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	x
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian Tugas Akhir	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Relevansi atau Manfaat	4
1.6 Hipotesis	4
1.7 Rencana Luaran Tugas Akhir	5
BAB II.....	6
TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Landasan Teori	6
2.1.1 Kapal Ro-ro.....	6
2.1.2 Struktur dan Konstruksi Utama Kapal RoRo.....	7
2.1.3 <i>Upper Car Deck</i> Kapal RoRo	10
2.1.4 <i>Frame Upper Car Deck</i> kapal RoRo	10
2.1.5 Peraturan dan Standar Desain Konstruksi Kapal	11
2.1.6 <i>Section Modulus</i> dan Aplikasinya pada <i>Frame</i> Kapal	13
2.2 Kajian Penelitian Terdahulu	13
BAB III.....	16
ANALISIS PERMASALAHAN & METODE PENELITIAN.....	16
3.1 Rencana Desain.....	16
3.2 Alat	16
3.3 Tempat Pelaksanaan	17

3.4 Metode Penelitian	17
3.5 Variabel Penelitian	17
3.5.1 Variabel Bebas	17
3.5.2 Variabel Terikat	17
3.6 Flowchart Penelitian	18
3.6.1 Identifikasi Masalah	20
3.6.2 Studi Literatur	20
3.6.3 Pengumpulan Data Kapal	20
3.6.4 Analisis Section Modulus Existing	21
3.6.5 Desain <i>Frame</i> Existing dan <i>Frame</i> Modified	22
3.6.6 Perhitungan Section Modulus Modified	22
3.6.7 Analisis Hasil	22
3.6.8 Incremental Analysis	23
3.6.9 Payback Period Calculation	23
3.6.10 3-Scenario Analysis	23
3.6.11 Kesimpulan Dan Rekomendasi	24
3.7 Jadwal Penelitian	24
BAB IV	26
HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Pengumpulan dan Verifikasi Data Kapal	26
4.1.1 Penerimaan Kapal di Galangan	27
4.1.2 Pengapungan Kapal ke Graving Dock	29
4.1.3 Marking dan Identifikasi Area Pengerjaan	31
4.1.4 Pengukuran Dimensi Aktual Web Frame Existing	32
4.2. Perhitungan Beban Rencana (Design Loads)	34
4.2.1 Perhitungan Wave Coefficient (C_w)	35
4.2.2 Perhitungan Beban (<i>Design Loads</i>) Section IV Rules for Hull BKI 2025	35
4.2.2.1 Perhitungan Beban Geladak Cuaca (Load on Weather Decks) Pada Tengah Kapal	35
4.2.2.2 Beban sisi (load on ship side) Section IV B Rules for Hull BKI 2025	36
4.3 Analisis Section Modulus Frame Existing	37
4.3.1 Data Frame Existing	37
4.3.2 Perhitungan Section Modulus Minimum Web Frame Existing (BKI)	38
4.3.3 Verifikasi Kesesuaian	41
4.4 Desain dan Analisis Frame Modified	41

4.4.1 Data Frame Modified	41
4.4.2 Perhitungan Section Modulus Frame Modified	42
4.4.3.1 Gading besar (web frame) – Setelah Perubahan	42
4.4.4 Verifikasi Dimensi <i>Web Frame Modified</i> oleh Surveyor BKI	44
4.5 Perbandingan Frame Existing vs Modified	45
4.5.1 Visualisasi Web Frame Sebelum dan Sesudah Modifikasi.....	46
4.6 Implikasi terhadap Tata Letak Upper <i>Car Deck</i>	48
4.6.1 Kondisi Upper <i>Car Deck</i> Setelah Redesain Web Frame	51
4.7 ANALISIS KELAYAKAN EKONOMI MODIFIKASI WEB FRAME (Berbasis Data OPEX Aktual Rute Merak–Bakauheni April 2026)	53
4.7.1 Biaya Operasional Kapal (OPEX)	53
4.7.1.1 Metodologi Perhitungan OPEX	53
4.7.1.2 Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar	53
4.7.1.3 Komponen Non-Fuel OPEX	54
4.7.1.4 Scaling OPEX – Per Trip hingga Per Tahun	54
4.7.2 Analisis Pendapatan Inkremental Modifikasi Web Frame	55
4.7.2.1 Biaya Operasional Inkremental	55
4.7.2.2 Perhitungan Pendapatan Inkremental per Trip.....	56
4.7.3 Net Present Value (NPV).....	56
4.7.3.1 Konsep dan Rumus.....	56
4.7.3.2 PVIFA dan Perhitungan Faktor Diskonto	57
4.7.3.3 Tabel Arus Kas dan Hasil NPV	57
4.7.3.4 Hasil NPV – Tiga Skenario	58
4.7.4 Internal Rate of Return (IRR)	58
4.7.5 Payback Period (PP)	59
4.7.6 Break Even Point (BEP)	60
4.7.7 Analisis Sensitivitas Occupancy	61
4.7.8 Ringkasan Hasil Analisis Kelayakan Ekonomi	62
BAB V	63
Kesimpulan dan Saran.....	63
5.1 Kesimpulan.....	63
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kapal roro.....	6
Gambar 2.2 Stiffener	9
Gambar 3.1 Flow Chart Penelitian.....	19
Gambar 4.1 Kapal Tiba di Galangan untuk Proses Docking.....	27
Gambar 4.2 Kondisi Kapal Saat Pengapungan ke Graving Dock.....	29
Gambar 4.3 Area <i>Car Deck</i> yang Akan Dikerjakan	31
Gambar 4.4 Proses Identifikasi dan Marking Area Pengerjaan pada Upper <i>Car Deck</i> bersama Tim Teknis Galangan	31
Gambar 4.5 Proses Pengukuran Dimensi Aktual Web Frame Existing pada Upper <i>Car Deck</i> oleh Tim Teknis Galangan dan Surveyor BKI dalam Rangka Final Inspection	32
Gambar 4.6 WEB Frame Sebelum Diubah	40
Gambar 4.7 Web Frame Setelah Perubahan	43
Gambar 4.8 Pengukuran Dimensi Aktual <i>Web Frame Modified</i> oleh Tim Teknis Galangan dan Surveyor BKI sebagai Bagian dari Final Inspection.....	44
Gambar 4.9 Perbandingan Visualisasi Tiga Dimensi Web Frame Sebelum dan Sesudah Modifikasi	46
Gambar 4.10 Perbandingan Visualisasi Dua Dimensi Web Frame Sebelum dan Sesudah Modifikasi	47
Gambar 4.11 General Arrangement Upper <i>Car Deck</i> Tampak Atas — Kondisi Sebelum Modifikasi	49
Gambar 4.12 General Arrangement Upper <i>Car Deck</i> Tampak Atas — Kondisi Sesudah Modifikasi	50
Gambar 4.13 Kondisi Upper <i>Car Deck</i> (Deck-C) Setelah Implementasi Redesain Web Frame pada Rentang Frame 74–116 Sisi Kiri	51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Reduction coefficient n_c	13
Tabel 2.2 Kajian Penelitian Terdahulu	Error! Bookmark not defined.
Tabel 3.1 Data Utama Kapal Ro-Ro Penumpang	16
Tabel 3.2 Spesifikasi Upper <i>Car Deck</i>	16
Tabel 3.3 Reduction coefficient n_c	21
Tabel 3.4 Jadwal Kegiatan Proyek Penelitian Analisa Perubahan Desain <i>Frame Upper Car Deck</i>	24
Tabel 4.1 Principal Particulars.....	28
Tabel 4.2 Data Dokumen Teknis Kapal dan Hasil Pengukuran Lapangan.....	33
Tabel 4.3 Parameter Perhitungan Beban	34
Tabel 4.4 Data Frame Existing	37
Tabel 4.5 Spesifikasi Frame Existing	38
Tabel 4.6 Spesifikasi Frame Modified	41
Tabel 4.7 Rincian Biaya Operasional (OPEX) per One-Way Trip.....	54
Tabel 4.8 Scaling OPEX – Per Trip hingga Per Tahun.....	55
Tabel 4.9 Incremental Cash Flow Per Trip – Tiga Skenario (Berbagai Occupancy)	56
Tabel 4.10 Tabel Arus Kas Tahunan Inkremental – Skenario A (Occupancy 70%).....	57
Tabel 4.11 Hasil NPV – Tiga Skenario	58
Tabel 4.12 Hasil IRR – Tiga Skenario Biaya Inkremental.....	59
Tabel 4.13 Hasil Payback Period – Tiga Skenario	59
Tabel 4.14 Hasil BEP – Tiga Skenario	60
Tabel 4.15 Analisis Sensitivitas Occupancy – Skenario A & C	61
Tabel 4.16 Ringkasan Hasil Analisis Kelayakan Ekonomi	62

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagai negara kepulauan dengan 17.504 pulau, transportasi laut menjadi tulang punggung distribusi logistik nasional (Anugerah, 2022). Efisiensi angkutan laut secara langsung memengaruhi pertumbuhan ekonomi melalui penurunan biaya logistik dan peningkatan aksesibilitas komoditas (Febriansyah & Sahara, 2023). Tantangan geografis ini menuntut kapal dengan desain khusus untuk mengoptimalkan kapasitas muat tanpa mengorbankan keamanan.

Transportasi laut memegang peranan vital dalam mendukung konektivitas antarwilayah di negara kepulauan seperti Indonesia (Tira et al., 2024). Salah satu moda transportasi yang banyak digunakan adalah kapal jenis *Roll-on/Roll-off* (Ro-Ro), terutama ferry penumpang dan kendaraan yang melayani rute jarak pendek hingga menengah (Meo et al., 2023).

Kapal *Roll-on/Roll-off* (RORO) menjadi solusi strategis untuk penyeberangan antar pulau dengan kemampuan mengangkut kendaraan bermotor secara langsung (Nurwahyudy et al., 2024). Kapal ini dirancang untuk memungkinkan kendaraan dapat langsung naik dan turun dari kapal tanpa alat bantu tambahan, menjadikannya pilihan utama dalam sistem transportasi laut *modern* (Khamid, 2023). Seiring dengan peningkatan permintaan, tantangan dalam desain kapal Ro-Ro juga semakin kompleks, terutama pada bagian deck kendaraan, yang harus mampu menahan beban dari berbagai jenis kendaraan mulai dari sepeda motor hingga truk berat (Pratama et al., 2020).

Dalam industri perkapalan modern, peningkatan kapasitas muatan tidak hanya harus memenuhi aspek efisiensi ruang, tetapi juga aspek keselamatan struktural (Ika Wulandari et al., 2021). Struktur kapal RoRo terdiri dari komponen utama seperti lambung, geladak, dan sistem penopang (*frame*) yang harus menahan beban dinamis selama pelayaran (Mufidah et al., 2020). *Car Deck* menjadi area kritis karena berfungsi sebagai tempat parkir kendaraan sekaligus penahan tekanan gelombang (Pawara et al., 2022a). Desain deck kendaraan, khususnya *upper Car Deck* pada kapal ferry Ro-Ro, menghadapi beban dinamis akibat gerakan kendaraan dan beban muatan kendaraan berat (Juniarti, 2022).

Pendekatan perancangan yang mempertimbangkan modulus penampang (*section modulus*) menjadi penting untuk memastikan kekuatan lentur dan integritas struktur deck tetap terjaga sesuai dengan standar klasifikasi seperti Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) (Pawara et al., 2022b). Setiap kapal niaga wajib memenuhi persyaratan badan klasifikasi yang memastikan kekuatan konstruksi yang terpenuhi sebelum diizinkan berlayar (Popa et al., 2024).

Salah satu pendekatan struktural yang umum digunakan untuk mendesain *deck* kapal adalah dengan mengatur jarak antar *frame* dan memilih profil penampang struktur yang optimal. Salah satu studi menunjukkan bahwa variasi jarak antar *frame* memengaruhi nilai momen lentur dan tegangan maksimum pada *deck* kapal secara signifikan (Tuswan et al., 2018a). Jika nilai *section modulus* tidak mencukupi, maka tegangan maksimum pada *frame* dapat melebihi batas izin, berisiko menyebabkan deformasi permanen atau kegagalan struktur (Nur Ardi Nugroho et al., 2023).

Berdasarkan uraian di atas, perlunya penelitian untuk menjawab kebutuhan industri akan desain struktur yang efisien. Salah satu RoRo Ferry yang melayani rute pelayaran Merak – Bakauheni akan dilakukan rancangan baru pada profil *web frame* di area *Car Deck* menggunakan perhitungan modulus penampang berdasarkan standar BKI. Penggunaan pendekatan kuantitatif diharapkan mampu memberikan model desain alternatif yang lebih baik, terutama dalam konteks penguatan struktur tanpa menambah berat signifikan atau mengganggu distribusi beban kapal. Penelitian ini akan menguji desain *Car Deck* yang sudah dimodifikasi, menghitung perubahan modulus, dan mengevaluasi kesesuaian desain tersebut terhadap standar keamanan struktural. Hasil penelitian diharapkan mampu memberikan informasi, pengembangan pengetahuan dalam pengembangan metode desain struktural kapal dan kontribusi praktis bagi industri galangan kapal, khususnya dalam upaya peningkatan efisiensi dan kapasitas muatan kendaraan pada kapal ferry Ro-Ro.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh perubahan desain *frame upper Car Deck* terhadap nilai *section modulus* dan kekuatan struktur berdasarkan aturan klasifikasi?
2. Berapa peningkatan kapasitas muatan yang dapat dicapai dengan modifikasi *frame* di area *Car Deck* tanpa mengorbankan kekuatan struktur?

3. Bagaimana analisis kelayakan ekonomi dari segi peningkatan pendapatan operasional akibat penambahan kapasitas muatan?

1.3 Tujuan Penelitian Tugas Akhir

Untuk menjawab semua pertanyaan yang terdapat pada rumusan masalah di atas maka penelitian ini memiliki tujuan sebagai:

1. Untuk mengetahui pengaruh perubahan desain *frame upper Car Deck* terhadap nilai *section modulus* dan kekuatan struktur berdasarkan aturan klas.
2. Untuk memperoleh jumlah kapasitas muatan yang dapat dicapai dengan modifikasi *frame* di area ramp in tanpa mengorbankan kekuatan struktur.
3. Untuk memperoleh nilai kelayakan ekonomi dari segi peningkatan pendapatan operasional akibat penambahan kapasitas muatan.

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya difokuskan pada analisis dan optimalisasi struktur *frame* pada *upper Car Deck* kapal ferry Ro-Ro jenis penumpang dan kendaraan, tanpa melibatkan analisis struktur pada bagian kapal lainnya seperti *hull*, *bottom deck*, atau *ramp*.
2. Kajian dilakukan dengan menggunakan metode perhitungan modulus penampang (*section modulus*) sebagai parameter utama untuk menilai kekuatan lentur struktur *frame*, tanpa metode lain.
3. Standar acuan yang digunakan dalam evaluasi desain struktur adalah Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) terbaru yang berkaitan dengan penilaian kekuatan struktur dek dan *frame* kapal Ro-Ro.
4. Perbandingan dilakukan hanya antara dua model, yaitu model desain serta layout sebelum optimalisasi dan model desain serta layout hasil optimalisasi berdasarkan variasi konfigurasi *frame*.
5. Analisis ekonomi dibatasi pada perhitungan pendapatan kotor per *voyage*, tidak mencakup biaya operasional detail seperti *insurance*, *crew*, dan *maintenance* karena dianalisis menggunakan *incremental analysis*, *payback period*, *3 case sensitivity*.
6. Perhitungan *frame* dibatasi pada *frame* tertentu sebagai area yang memerlukan modifikasi khusus untuk optimalisasi kapasitas muatan.
7. Metode perhitungan menggunakan pendekatan manual berdasarkan Rules for Hull BKI 2025, tanpa metode lain.

1.5 Relevansi atau Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan ilmu tambahan mengenai perhitungan modulus untuk dilakukannya modifikasi frame kapal khususnya *frame upper Car Deck* yang optimal untuk struktur kapal ferry Ro-Ro guna meningkatkan kapasitas muatan kendaraan tanpa mengorbankan kekuatan struktur.
2. Menjadi acuan bagi industri galangan kapal dalam merancang dan merekayasa *frame upper Car Deck* yang efisien dan memenuhi standar keamanan struktural berdasarkan ketentuan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI).
3. Memberikan rekomendasi desain berbasis perhitungan *section modulus* dan simulasi teknis, sehingga dapat meningkatkan efisiensi struktur, meminimalkan potensi kerusakan akibat beban berlebih, dan memperpanjang umur struktur kapal.
4. Menyediakan referensi teknis bagi institusi akademik dan mahasiswa teknik perkapalan, khususnya dalam kajian perhitungan struktur kapal dan penerapan metode numerik dalam optimasi desain.
5. Mendorong pengembangan penelitian lanjutan dalam bidang rekayasa struktur kapal, terutama yang berfokus pada desain *deck*, kekuatan material, dan integrasi perhitungan teknik dengan regulasi klasifikasi.
6. Memberikan model perhitungan ekonomi sederhana untuk evaluasi investasi modifikasi kapal ferry Ro-Ro berbasis peningkatan kapasitas muatan.

1.6 Hipotesis

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah diuraikan, hipotesis penelitian ini adalah sebagai berikut.

Pertama, perubahan dimensi profil *web frame upper Car Deck* dari spesifikasi *existing* menjadi profil yang lebih ramping akan menghasilkan nilai *section modulus* aktual yang tetap memenuhi persyaratan minimum Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) 2025.

Kedua, optimalisasi dimensi profil *web frame* yang menghasilkan reduksi tinggi *web plate* akan menciptakan penambahan ruang vertikal (*clearance*) yang cukup untuk meningkatkan kapasitas muatan *upper Car Deck* tanpa mengorbankan integritas struktural kapal dan tanpa melanggar ketentuan standar klasifikasi yang berlaku.

Ketiga, penambahan kapasitas muatan kendaraan yang diperoleh dari modifikasi *web frame* akan menghasilkan peningkatan pendapatan operasional yang secara ekonomi layak untuk diimplementasikan, ditinjau dari nilai *Net Present Value* yang positif dan *Payback Period* yang lebih pendek dari umur ekonomis investasi.

1.7 Rencana Luaran Tugas Akhir

Bentuk luaran dari penelitian yang dilakukan adalah:

1. Publikasi Jurnal Ilmiah “*Structural Optimization of Upper Car Deck Frame for Enhancing Vehicle Capacity on Ro-Ro Ferries*”
2. Poster Ilmiah tentang “OPTIMALISASI *FRAME UPPER CAR DECK* SEBAGAI UPAYA PENAMBAHAN MUATAN KAPAL” yang di HAKI-kan melalui Universitas Diponegoro
3. Modul tentang “ANALISIS KELAYAKAN EKONOMI REDESAIN WEB FRAME KAPAL RO-RO RUTE MERAK – BAKAUHENI” yang di HAKI-kan melalui Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Pada bab ini penulis menjelaskan bagaimana landasan teori yang terkait dan relevan pada optimalisasi *frame upper Car Deck* kapal RoRo menggunakan metode perhitungan *section modulus* terhadap upaya penambahan muatan kapal. Hal ini dilakukan agar penulis dapat mempermudah penelitian yang akan di teliti.

2.1.1 Kapal Ro-ro



Gambar 2.1 Kapal ro-ro

Sumber : <https://gmi-agency.com/wp-content/uploads/2024/11/c39dd7ea3e3.jpeg>

Kapal Roll-on/Roll-off (RoRo) merupakan jenis kapal yang dirancang khusus untuk memfasilitasi transportasi kendaraan darat dan kargo melalui sistem pemuatan dan pembongkaran yang efisien (Ariany et al., 2018). Konsep dasar dari kapal RoRo adalah kemampuan untuk mengangkut kendaraan yang dapat bergerak sendiri di atas geladak kapal, sehingga proses *loading* dan *unloading* menjadi lebih cepat dan efisien dibandingkan dengan metode konvensional (Ika Wulandari et al., 2022). Dalam konteks ini, istilah "*roll-on/roll-off*" menggambarkan cara kendaraan naik dan turun dari kapal melalui ramp atau pintu khusus, yang membuatnya berbeda dari jenis kapal lainnya yang memerlukan penggunaan derek atau alat bantu lainnya untuk memindahkan muatan (Parvasi et al., 2022)

Secara struktural, kapal RoRo dilengkapi dengan komponen utama seperti *bottom plate*, *deck*, *bulkhead*, *longitudinal and transverse stiffeners* yang

menopang beban yang ada di kapal dan gaya dinamis saat kapal beroperasi (Windyandari et al., 2022). Struktur ini harus didesain agar mampu mendistribusikan beban secara merata ke seluruh bagian lambung kapal, termasuk mempertimbangkan kekuatan terhadap lenturan, geser, dan kelelahan akibat siklus muatan berulang (Man et al., 2021). *Ramp* biasanya diletakkan di buritan atau haluan, dan dirancang dengan kemiringan tertentu agar kompatibel dengan kendaraan berukuran besar.

Desain kapal RoRo modern juga memperhatikan fleksibilitas dalam pengaturan ruang muat maka dari itu beberapa kapal RoRo dilengkapi dengan *deck* kendaraan yang dapat disesuaikan tingginya atau diatur dalam konfigurasi bertingkat untuk menampung kendaraan berbagai jenis, dari sedan hingga truk berat (Soupeze, 2021). Untuk menunjang fleksibilitas ini, struktur penopang seperti *transversal frame* dan *longitudinal girder* harus memenuhi persyaratan kekuatan yang ketat sesuai regulasi klasifikasi seperti IMO atau BKI (Soupeze, 2021).

Secara keseluruhan, kapal RoRo adalah kombinasi antara sistem logistik yang efisien dan sistem struktur yang kompleks (Tao et al., 2024). Dalam konteks penelitian ini, kapal RoRo diposisikan sebagai wadah struktural yang dianalisis dari sisi kekuatan dan efisiensinya, khususnya di bagian *upper Car Deck* yang menopang beban kendaraan. Desain ulang elemen struktural seperti *frame* dan *deck* bertujuan untuk meningkatkan kapasitas muatan tanpa mengorbankan kekuatan struktur kapal itu sendiri (Majnarić et al., 2022).

2.1.2 Struktur dan Konstruksi Utama Kapal RoRo

Struktur kapal terdiri atas komponen-komponen utama seperti pelat dasar (*bottom plate*), geladak (*deck*), sekat (*bulkhead*), dan penopang membujur maupun melintang (*longitudinal and transverse stiffeners*) (A. L. Ikhwan & Misbah, 2019). Salah satu struktur penting dalam mendukung kekuatan kapal adalah *frame*, struktur ini berfungsi untuk menahan beban tekan dan lentur akibat muatan serta gaya dari gelombang laut (Suci et al., 2020). Penempatan dan desain struktur ini harus mempertimbangkan prinsip kekuatan dan kekakuan sesuai standar klasifikasi.

2.1.2.1 Bottom Plate

Bottom plate kapal merupakan salah satu komponen struktur utama dalam desain dan konstruksi kapal karena komponen ini berfungsi untuk memberikan kestabilan dan kekuatan pada bagian bawah kapal, sehingga kapal dapat mengapung dengan aman, serta melindungi struktur internal kapal dari kerusakan yang disebabkan oleh tekanan dari bawah (misalnya oleh dasar laut) (Wulandari et al., 2021).

Selain berfungsi untuk memberikan kestabilan dan kekuatan *bottom plate* juga berfungsi untuk mendistribusikan beban dari kapal, termasuk beban statis yang berasal dari kapal itu sendiri (berat kapal, struktur kapal) dan beban dinamis yang berasal dari muatan yang diangkut (Jokosisworo & Sebastian, 2012). Pada kapal Ro-Ro, muatan utama berupa kendaraan (mobil, truk, dll.) yang bergerak naik dan turun melalui ramp maka dari itu *bottom plate* harus cukup kuat untuk menahan beban ini tanpa mengalami kerusakan.

2.1.2.2 Bulkhead

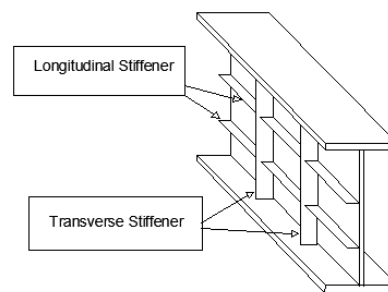
Bulkhead pada kapal khususnya kapal RoRo adalah struktur vertikal yang membagi ruang kapal menjadi beberapa kompartemen atau bagian. Biasanya, *bulkhead* terbuat dari bahan yang kuat, seperti baja, dan dipasang secara vertikal di sepanjang lambung kapal (A. Ikhwan et al., 2019). *Bulkhead* berfungsi untuk meningkatkan kekuatan struktural kapal, mengatur pembagian beban, serta memisahkan berbagai area di dalam kapal sesuai dengan fungsinya. Maka dari itu secara umum, *bulkhead* digunakan untuk memastikan kapal memiliki kestabilan yang lebih baik dan dapat bertahan dari tekanan dinamis, serta membantu menjaga keamanan kapal jika terjadi kebocoran atau kebakaran (Manik et al., 2019).

2.1.2.3 Stiffener

Stiffener pada kapal, khususnya kapal Ro-Ro (*Roll-on/Roll-off*), adalah elemen struktural yang digunakan untuk memperkuat dan meningkatkan

kekakuan bagian-bagian tertentu dari kapal, seperti lambung dan *deck* (Tuswan et al., 2018).

Stiffener umumnya berupa balok atau batang yang dipasang secara membujur (*longitudinal*) atau melintang (*transverse*) pada struktur kapal, dan memiliki fungsi utama untuk menahan beban dan mencegah deformasi pada plat atau dinding kapal yang lebih besar (Alamsyah, Falevi, et al., 2021). Kedua jenis *stiffener* ini saling bekerja bersama untuk memberikan dukungan tambahan terhadap beban yang diterima kapal, serta menjaga kestabilan dan kekuatan struktural kapal selama pelayaran.



Gambar 2.2 *Stiffener*

Sumber: <https://berlianarswendokonstruksikapal1.wordpress.com/2016/04/06/bentuk-bentuk-stiffener/>

2.1.2.4 *Deck*

Deck pada kapal Ro-Ro (*Roll-on/Roll-off*) merupakan komponen struktur kapal yang sangat vital, berfungsi sebagai area tempat kendaraan bermotor seperti mobil, truk, bus, atau kendaraan berat lainnya (Putra et al., 2025). *Deck* ini adalah permukaan horizontal pada kapal yang memungkinkan kendaraan untuk naik dan turun dari kapal dengan mudah melalui ramp tanpa alat bantu tambahan, sesuai dengan karakteristik desain kapal Ro-Ro.

Fungsi utama *deck* pada kapal Ro-Ro adalah untuk menampung kendaraan dan menahan beban yang diberikan oleh kendaraan yang diparkir (Kalam, Mulyatno, & Good, 2017). *Deck* harus dapat menahan beban dinamis yang dihasilkan dari kendaraan yang bergerak dan beban statis dari kendaraan yang diparkir (Man et al., 2021b). Selain itu, *deck* pada kapal Ro-Ro juga

berperan dalam mendukung stabilitas kapal selama pelayaran karena stabilitas kapal sangat bergantung pada distribusi beban yang merata antara bagian *deck* dan *frame* (Alamsyah, Zulkarnaen, et al., 2021).

Deck pada kapal Ro-Ro umumnya dibagi menjadi beberapa bagian, termasuk *Car Deck*, *upper Car Deck*, dan *weather deck*, tergantung pada desain dan fungsinya

2.1.3 Upper Car Deck Kapal RoRo

Upper Car Deck merupakan salah satu bagian struktural utama dari kapal RoRo, yang berfungsi sebagai lantai atas untuk kendaraan atau muatan beroda, dimana struktur ini didesain khusus untuk menahan beban kendaraan dan juga menopang beban dek lain di atasnya (Kalam, Mulyatno, & Good, 2017).

Upper Car Deck secara fungsional digunakan untuk menambah kapasitas muat kendaraan di atas deck utama, sekaligus menjadi bagian dari struktur longitudinal kapal yang menahan beban lentur akibat distribusi muatan sepanjang kapal (Chen & van Hemmen, 2022). Dalam desain nya, *upper Car Deck* juga harus mempertimbangkan dimensi vertikal kapal, posisi pusat gravitasi, dan dampaknya terhadap stabilitas kapal secara keseluruhan.

Secara konstruksi, *upper Car Deck* dibentuk dari kombinasi pelat baja (deck plating), balok memanjang (*longitudinal girders*), dan balok penyangga melintang (*transverse frames*). Sistem ini dikenal sebagai *grillage structure*, yaitu susunan balok silang yang bertujuan untuk menyebarkan beban kendaraan ke elemen struktur yang lebih besar seperti girder utama dan sisi lambung kapal (Liu et al., 2024). Kombinasi elemen ini memungkinkan *upper Car Deck* menahan tekanan dari roda kendaraan serta beban global akibat gaya lentur saat kapal berada dalam kondisi oleng (*rolling*) atau melengkung (*hogging/sagging*).

2.1.4 Frame Upper Car Deck kapal RoRo

Frame pada *upper Car Deck* kapal Ro-Ro adalah elemen struktural yang terletak pada bagian atas kapal yang digunakan untuk menopang *deck* atau geladak tempat kendaraan diparkir (Tuswan et al., 2018). Komponen ini terdiri dari serangkaian balok dan penopang yang saling terhubung, membentuk jaringan struktural yang kuat untuk menahan beban kendaraan. Ketika kendaraan diparkir

di geladak, berat mereka diterima oleh rantai geladak dan kemudian ditransfer ke *frame*, yang selanjutnya menyalurkan beban tersebut ke lambung kapal, *bulkhead*, dan elemen struktural lainnya (Kim et al., 2025).

Setiap *frame* didesain untuk menahan beban berat kendaraan yang diparkir di atasnya, baik beban statis maupun beban dinamis akibat getaran dan gerakan kapal selama pelayaran. Fungsi utama dari *frame upper Car Deck* adalah untuk memberikan kekuatan tambahan pada *deck* kapal yang menerima beban dinamis. Beban dinamis ini berasal dari pergerakan kendaraan yang dimuat dan turun dari kapal, serta gaya yang timbul akibat kondisi laut yang tidak stabil, seperti ombak dan guncangan. (Eyres & Bruce, 2012). *Frame* yang kuat dan efisien membantu menstabilkan kapal dan mencegah deformasi atau kerusakan pada *deck* yang dapat membahayakan keselamatan kapal dan muatan.

2.1.5 Peraturan dan Standar Desain Konstruksi Kapal

PT. Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) merupakan lembaga klasifikasi nasional yang memiliki peran sangat vital dalam menetapkan dan memelihara standar konstruksi kapal di Indonesia (Apriliani et al., 2020). Sebagai otoritas yang berwenang, BKI memastikan bahwa setiap kapal yang dibangun atau beroperasi di perairan Indonesia memenuhi persyaratan keselamatan dan struktural yang ketat melalui berbagai aturan dan regulasi yang berlaku (Wilastari, 2020). Standar yang dikembangkan oleh BKI mencakup beragam aspek teknis konstruksi kapal, yang meliputi elemen-elemen struktural penting seperti *web frame*. *Web frame* sendiri memiliki peran penting dalam menjaga integritas struktural kapal, memberikan dukungan pada kerangka utama kapal, serta menahan berbagai gaya dan beban yang diterima kapal selama operasional di laut (Palippui, 2022). Seiring dengan perkembangan teknologi desain kapal, standar yang ditetapkan oleh BKI pun terus diperbarui untuk mencerminkan kemajuan dalam arsitektur kapal, teknik fabrikasi, serta untuk memastikan keselarasan dengan persyaratan maritim internasional yang semakin kompleks (Miliniati & Setyawan, 2021).

Dalam hal desain *web frame*, peraturan BKI sangat menekankan pada dimensi dan kekuatan elemen-elemen struktural tersebut. *Web frame* yang

dirancang harus memenuhi spesifikasi yang ketat terkait dengan ukuran, kekuatan, serta ketahanan terhadap beban yang akan diterima kapal selama beroperasi (Munandar et al., 2019). Desain *web frame* sendiri bervariasi tergantung pada sistem rangka kapal yang diterapkan. BKI merekomendasikan penggunaan sistem rangka yang berbeda berdasarkan panjang kapal. Sebagai contoh, untuk kapal dengan panjang antara 90 hingga 100 meter, sistem rangka memanjang umumnya lebih direkomendasikan (Tuswan et al., 2023). Oleh karena itu, dalam merancang atau memodifikasi kerangka struktural kapal, peraturan BKI mengharuskan adanya perhitungan yang cermat terhadap *scantling* yaitu dimensi dari komponen struktural untuk menentukan ukuran profil yang tepat bagi *web frame* dan elemen struktural lainnya yang terkait (Eko Budi Djatmiko & Mas Murtedjo, 2017).

Proses perhitungan *scantling* ini memerlukan perhatian khusus terhadap modulus penampang dan momen inersia setiap elemen konstruksi. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa *web frame* tidak hanya memenuhi standar dimensi yang telah ditetapkan, tetapi juga memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan beban dan tegangan yang dialami kapal selama operasi. Dengan perhitungan yang tepat, akan mendapatkan ukuran dan karakteristik struktural *web frame* yang sesuai dengan standar yang disyaratkan oleh BKI. Seluruh elemen ini harus mematuhi ketentuan yang berlaku agar kapal dapat mendapatkan sertifikasi dari BKI dan tetap memenuhi persyaratan keselamatan yang diperlukan untuk beroperasi di perairan Indonesia.

Keterkaitan antara peraturan BKI dan desain *web frame* ini menunjukkan betapa pentingnya peran regulasi dalam proses perubahan atau redesain komponen struktural kapal. Dalam hal ini, peraturan BKI berfungsi sebagai panduan utama dalam memastikan bahwa setiap perubahan, baik itu pada desain *web frame* atau elemen struktural lainnya, tidak hanya mengikuti prinsip-prinsip teknik yang berlaku, tetapi juga memenuhi persyaratan keselamatan dan kekuatan yang ditetapkan. Oleh karena itu, setiap modifikasi yang dilakukan pada *web frame* kapal harus tunduk pada ketentuan yang ditetapkan oleh BKI, agar kapal yang dimodifikasi tetap terjamin kualitas dan keselamatannya sesuai standar yang berlaku.

2.1.6 Section Modulus dan Aplikasinya pada *Frame Kapal*

Section modulus (W) merupakan parameter fundamental dalam desain struktur kapal yang menunjukkan kemampuan penampang dalam menahan momen lentur. Menurut (BKI, 2025), *section modulus* dihitung sebagai:

$$W = I/y$$

Dimana:

- I = momen inersia penampang (cm^4)
- y = jarak dari titik berat ke serat terluar (cm)

Untuk *frame* kapal, *section modulus* minimum dihitung berdasarkan:

$$W = 0,55 \times e \times l^2 \times P \times n \times k \text{ (cm}^3\text{)}$$

Dimana :

- W = Modulus Penampang
- 0.55 = nilai konstanta
- e = modulus elastisitas
- l^2 = panjang web frame
- $P = P_{S3}$ = Beban sisi dibawah garis air
- $n = n_c = \text{number of coss tie coefficient}$
- $k = \text{coefficient material baja}$

Tabel 2.1 *Reduction coefficient* n_c

Number of Cross Tie	n_c
0	1,0
1	0,5
3	0,3
≥ 3	0,2

Pemilihan profil *frame* harus mempertimbangkan efisiensi struktural, yaitu mencapai *section modulus* yang diperlukan dengan berat minimum.

2.2 Kajian Penelitian Terdahulu

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji kekuatan struktural *car deck* kapal ferry Ro-Ro dengan berbagai pendekatan. Analisis kekuatan *car deck* kapal ferry Ro-Ro 500 GT menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dengan variasi beban statis, dan

menemukan bahwa *car deck* merupakan komponen struktur vital yang berperan menahan muatan kendaraan dan geladak di atasnya (Kalam, Mulyatno, & Rindo, 2017). Sejalan dengan itu, penelitian mengenai respon struktur *car deck* akibat variasi jarak *stiffener* pada kapal ferry Ro-Ro dan membuktikan bahwa perubahan jarak antar *stiffener* berpengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan pada dek, meskipun kajian tersebut belum menyentuh aspek optimalisasi profil *frame* secara menyeluruh (Tri Pangestu & Ika Wulandari, 2021). Kemudian, pengembangan mengenai pendekatan berbasis bahasa pemrograman untuk mengoptimasi dimensi *web frame* dan *sent*a kapal sesuai peraturan BKI dengan sistem konstruksi melintang juga telah dilakukan pada jurnal “Optimasi Web Frame dan Senta Kapal Sesuai Peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dengan Bahasa Pemrograman”, namun kajiannya masih bersifat umum pada komponen *web frame* dan *sent*a tanpa menyentuh implikasi terhadap kapasitas muatan *upper car deck* secara spesifik (Miliniati & Setyawan, 2021).

Penelitian lain yang lebih relevan dengan konteks modifikasi struktural menunjukkan bahwa sebagian besar studi berfokus pada identifikasi kerusakan dan evaluasi kondisi *existing*, bukan pada perancangan ulang yang berorientasi peningkatan kapasitas. Pada jurnal “*A Finite Element Analysis of Structural Strength of Ferry Ro-Ro’s Car Deck*” telah dilakukan analisis FEM terhadap kekuatan *car deck* ferry Ro-Ro dan menghasilkan nilai *safety factor* berdasarkan standar BKI, namun kajiannya terbatas pada kondisi eksisting tanpa mengusulkan modifikasi dimensi profil (Pawara et al., 2022a). Pengajuan metode optimasi desain *lightweight* untuk *vehicle deck* kapal Ro-Ro menggunakan *mixed-integer sequence quadratic programming* yang menghasilkan skema struktur optimal, tetapi pendekatannya bersifat umum dan tidak mempertimbangkan implementasi perhitungan *section modulus* berbasis regulasi BKI secara spesifik (LI Ziqi et al., 2024). Analisis pada jurnal “Analisis Kekuatan Konstruksi *Car Deck* Akibat Penambahan Panjang pada Ro-Ro *Passenger Ship*” mengenai kekuatan konstruksi *car deck* akibat penambahan panjang kapal Ro-Ro dengan metode komputasi struktural ditemukan adanya perubahan distribusi tegangan yang signifikan, namun fokus kajiannya adalah penambahan dimensi longitudinal kapal, bukan optimalisasi profil *frame upper car deck* untuk tujuan penambahan kapasitas muatan (Naufal Zaibidi et al., 2021).

Berdasarkan tinjauan terhadap seluruh penelitian terdahulu di atas, teridentifikasi celah penelitian (*research gap*) yang konsisten: mayoritas kajian menggunakan *Finite*

Element Method untuk evaluasi kekuatan statis kondisi *existing*, sementara belum ada penelitian yang secara khusus mengintegrasikan optimalisasi dimensi profil *web frame upper car deck* berbasis perhitungan *section modulus* manual sesuai *Rules for Hull* BKI 2025 dengan tujuan peningkatan kapasitas muatan yang terukur dan diimplementasikan secara nyata di lapangan. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengkaji ulang profil *web frame* kondisi *existing* yang teridentifikasi *over-designed*, merancang profil yang lebih optimal, memverifikasinya terhadap persyaratan minimum BKI, dan mengukur implikasinya terhadap peningkatan kapasitas muatan serta kelayakan ekonomi operasional kapal.

BAB III

ANALISIS PERMASALAHAN & METODE PENELITIAN

3.1 Rencana Desain

Penelitian dilakukan dengan objek kapal Ro-Ro penumpang dengan data kapal sebagai berikut:

Tabel 3.1 Data Utama Kapal Ro-Ro Penumpang

Nama Kapal	KMP. XXX
Owner	PT. XXX
LOA (<i>Length Over All</i>)	136,60 m
LPP (<i>Length Per Perpendicular</i>)	128,44 m
B (<i>Breadth</i>)	21,00 m
H (<i>Height</i>)	12,00 m
T (<i>Draft</i>)	5,70 m
GRT (<i>Gross Tonnage</i>)	13.413 ton

Penelitian dilakukan dengan menggunakan objek *Car Deck* dengan spesifikasi jumlah muatan seperti yang ditampilkan pada tabel 3.2. jumlah spesifikasi awal adalah sebagai berikut:

Tabel 3.2 Spesifikasi Upper *Car Deck*

Keterangan	Ukuran
Panjang	90,4 m
Lokasi <i>Frame</i>	74-116
Tinggi	5.42 m
Lebar	21 m
Kapasitas Muat Truk	87 Unit
Kapasitas Muat Mobil	20 Unit

3.2 Alat

Alat yang digunakan untuk melakukan penelitian adalah menggunakan *software AutoCAD* untuk membantu dalam membuat desain area pengerjaan di *Car Deck* kapal, membuat desain Web Frame Existing dan Modified.

3.3 Tempat Pelaksanaan

Tempat pelaksanaan penelitian mulai dari pengumpulan data *existing* dilakukan di galangan dan tempat penelitian untuk menganalisis desain *web frame* yang baru akan dilakukan di laboratorium komputer Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro

3.4 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif dengan pendekatan perhitungan struktur manual berdasarkan Rules for Hull BKI 2025.

3.5 Variabel Penelitian

3.5.1 Variabel Bebas

Dalam penelitian ini, variabel bebas yang digunakan terbagi menjadi dua kategori utama yang berperan penting dalam analisis karakteristik struktural *frame*. Kategori pertama adalah dimensi profil *frame* yang terdiri dari empat parameter geometris fundamental. Parameter-parameter tersebut meliputi tinggi web plate yang diukur dalam satuan milimeter sebagai dimensi vertikal utama profil, tebal *web plate* dalam milimeter yang menentukan kekuatan dan kekakuan struktur, dimensi *face plate* dalam milimeter yang berkaitan dengan area kontak dan distribusi beban, serta dimensi *bracket* dalam milimeter yang mempengaruhi sambungan dan transfer beban antar komponen.

Kategori kedua adalah konfigurasi struktur yang mencakup tiga parameter spasial untuk menentukan tata letak dan geometri sistem *frame* dalam struktur. Jarak antar *frame* ditetapkan konstan pada 0,8 meter untuk menjaga konsistensi dalam analisis dan memastikan perbandingan yang valid antar variasi. Sementara itu, panjang bentang *frame* dan lokasi *frame* masih dalam tahap penentuan sesuai dengan kebutuhan dan kondisi spesifik penelitian yang akan dilakukan. Parameter panjang bentang *frame* akan menentukan dimensi horizontal struktur yang dianalisis, sedangkan lokasi *frame* akan menentukan posisi spesifik *frame* dalam sistem struktur keseluruhan.

3.5.2 Variabel Terikat

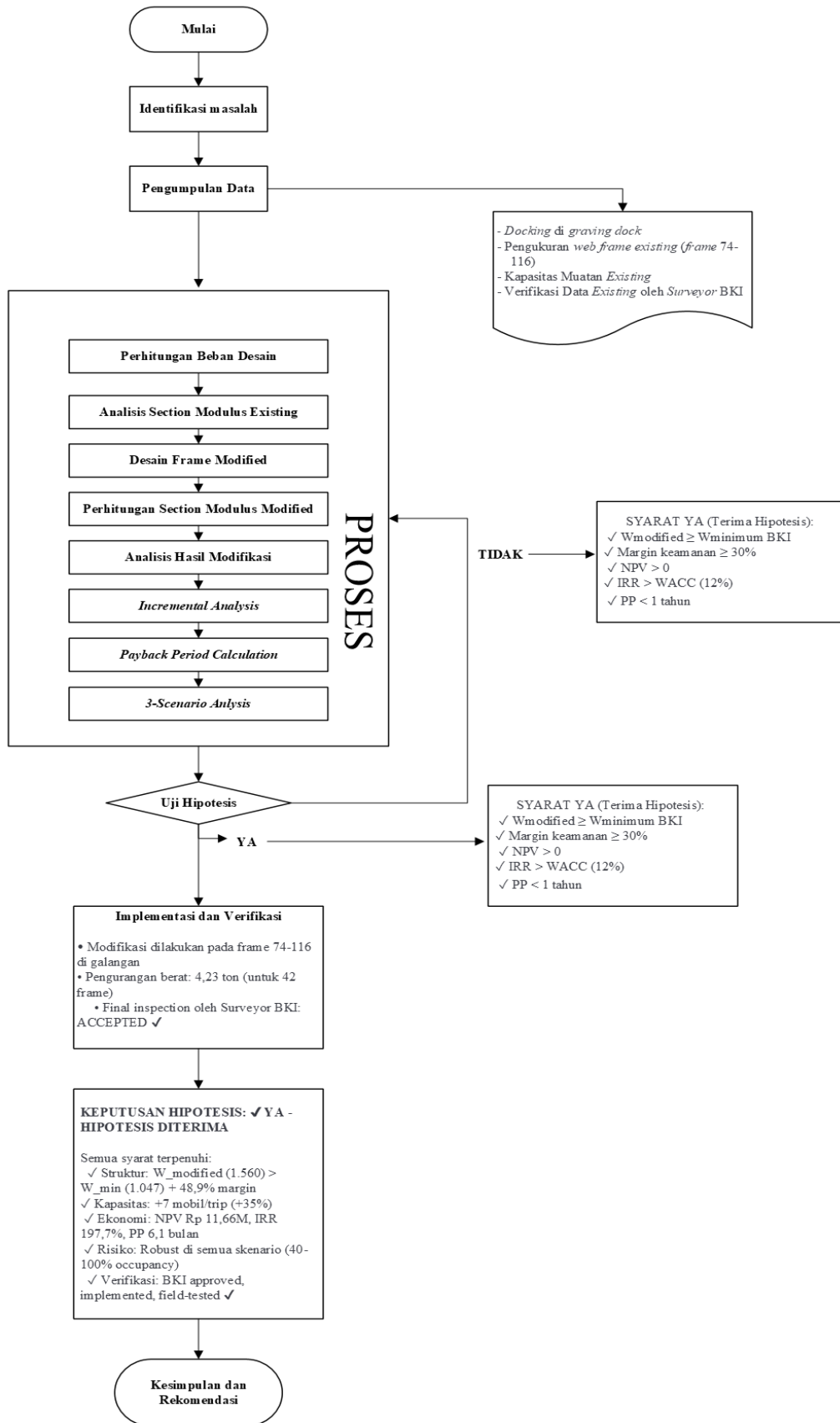
Dalam penelitian ini, variabel terikat yang akan dianalisis terbagi menjadi dua kategori utama yang saling berkaitan dalam evaluasi kinerja struktur *frame*.

Kategori pertama adalah parameter struktural yang mengukur aspek teknis dan keamanan dari desain *frame*. Parameter struktural mencakup *section modulus* yang dinyatakan dalam satuan cm^3 sebagai indikator kemampuan profil dalam menahan momen lentur dan distribusi tegangan. Selain itu, *safety factor* menjadi parameter krusial yang menunjukkan tingkat keamanan struktur dengan membandingkan kekuatan aktual terhadap beban kerja yang dialami.

Kategori kedua adalah parameter ekonomi yang mengevaluasi aspek finansial dan komersial dari implementasi desain *frame*. Parameter ekonomi meliputi kapasitas muatan yang diukur dalam unit kendaraan, yang menentukan daya tampung dan produktivitas operasional struktur. Revenue per voyage dinyatakan dalam rupiah untuk mengukur pendapatan yang dihasilkan dalam setiap perjalanan atau siklus operasi. *Payback period* dalam satuan tahun menunjukkan waktu yang diperlukan untuk mengembalikan investasi awal.

3.6 Flowchart Penelitian

Untuk menyelesaikan masalah diatas, maka akan dilaksanakan penelitian dengan langkah-langkah yang akan penulis cantumkan pada diagram penelitian berikut:



Gambar 3.1 Flow Chart Penelitian

Dalam pengerjaan penelitian ini, proses penelitian akan dibagi menjadi beberapa tahapan yang terstruktur. Berikut adalah penjelasan rinci mengenai setiap tahap:

3.6.1 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah adalah langkah awal yang krusial dalam penelitian ini. Proses ini bertujuan untuk mendefinisikan permasalahan yang ada, serta menyusun definisi tersebut agar lebih terukur dan dapat diolah lebih lanjut. Dengan melakukan identifikasi yang tepat, pertanyaan penelitian dapat diformulasikan dengan jelas dan berdampak pada arah penelitian selanjutnya.

3.6.2 Studi Literatur

Tahap studi literatur merupakan bagian penting dalam memahami konteks penelitian yang lebih dalam. Pada tahap ini, peneliti akan mencari dan mengkaji berbagai sumber yang relevan, seperti jurnal ilmiah, buku, tesis, skripsi, dan makalah terkait. Fokus dari studi literatur ini adalah:

- Mengumpulkan dasar teoritis mengenai **Rules for Hull BKI 2025** yang berkaitan dengan perhitungan kekuatan *frame*.
- Memahami teori *section modulus* dan aplikasinya pada struktur kapal.
- Meneliti penelitian terdahulu yang membahas optimalisasi struktur upper *Car Deck*.
- Menganalisis metode analisis ekonomi yang diterapkan pada kapal ferry.

Melalui studi literatur, peneliti juga dapat menemukan solusi untuk permasalahan yang ada, yang dalam hal ini berkaitan dengan modifikasi desain *frame* pada *Car Deck*.

3.6.3 Pengumpulan Data Kapal

Pengumpulan data merupakan langkah penting untuk mendapatkan informasi yang dibutuhkan untuk analisis lebih lanjut. Pada tahapan ini, data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan sekunder, termasuk:

- **General arrangement** dan **structural drawing** untuk KMP XXX.
- Dokumentasi profil *frame* existing pada area 74-116.
- Data beban operasional serta kapasitas muatan dari desain existing.

- Spesifikasi material dan dimensi struktur yang ada.

Data ini akan menjadi landasan untuk perhitungan dan analisis yang akan dilakukan pada tahap berikutnya.

3.6.4 Analisis Section Modulus Existing

Analisis section modulus pada *frame* existing merupakan langkah penting untuk menilai kekuatan struktural dari desain yang ada. Proses ini melibatkan perhitungan menggunakan formula yang ditetapkan oleh BKI (BKI, 2025):

$$W = \frac{I}{y}$$

Selanjutnya, hasil perhitungan akan diverifikasi terhadap persyaratan minimum yang ditentukan:

$$W_{min} = 0,55 \times e \times l^2 \times P \times n \times k \text{ (cm}^3\text{)}$$

Dimana :

W = Modulus Penampang

0.55 = konstanta perhitungan BKI

e = jarak antar web frame

l² = panjang web frame

P = P_{S3} = Beban sisi dibawah garis air

n = n_c = *number of cross tie coefficient*

k = *coefficient* material baja

Tabel 3.3 *Reduction coefficient n_c*

Number of Cross Tie	n _c
0	1,0
1	0,5
3	0,3
≥3	0,2

Analisis ini akan memberikan gambaran mengenai sejauh mana desain saat ini memenuhi standar keamanan dan kekuatan yang diperlukan

3.6.5 Desain *Frame Existing* dan *Frame Modified*

Setelah menganalisis *frame existing*, peneliti akan melanjutkan dengan merekomendasikan modifikasi desain. Proses ini akan meliputi:

- Analisis beban rencana sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan oleh BKI.
- Penentuan dimensi profil *frame* baru yang diusulkan.
- Optimalisasi desain dengan tujuan mencapai *section modulus* minimum sambil mempertahankan efisiensi material.

Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kapasitas muatan tanpa mengurangi keamanan struktur secara keseluruhan.

3.6.6 Perhitungan Section Modulus Modified

Tahap ini melibatkan perhitungan section modulus dari desain *frame* yang telah dimodifikasi. Fokus utama dari analisis ini meliputi:

- Perhitungan section modulus untuk desain baru dan perbandingan dengan profil existing.
- Verifikasi kesesuaian dengan standar BKI yang relevan.
- Analisis safety factor untuk menilai tingkat keamanan desain yang baru.
- Evaluasi efisiensi struktural dari desain modifikasi yang diusulkan

3.6.7 Analisis Hasil

Pada tahap analisis hasil, simulasikan data yang telah dihimpun untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai efektivitas modifikasi yang dilakukan. Hasil analisis akan mencakup:

- Hasil perhitungan section modulus desain baru dengan perbandingan yang jelas terhadap desain existing.
- Verifikasi kesesuaian dengan standar BKI yang diperlukan.
- Analisis safety factor untuk memastikan bahwa desain modifikasi memenuhi kriteria keselamatan.

- Evaluasi efisiensi struktural yang memungkinkan untuk mengukur apakah modifikasi yang dilakukan memberikan keuntungan dalam hal kinerja dan kapasitas.

3.6.8 Incremental Analysis

Analisis ekonomi incremental untuk mengevaluasi kelayakan finansial modifikasi:

- Incremental revenue calculation: Menghitung tambahan pendapatan dari peningkatan kapasitas muatan berdasarkan tarif yang berlaku
- Incremental cost analysis: Mengidentifikasi dan menghitung biaya tambahan yang timbul akibat modifikasi (material, fabrikasi, dry dock, sertifikasi)
- Net incremental benefit: Menghitung benefit bersih dengan mengurangi incremental cost dari incremental revenue

3.6.9 Payback Period Calculation

Perhitungan periode pengembalian investasi modifikasi:

- Simple payback period: Menghitung waktu yang diperlukan untuk mengembalikan initial investment tanpa mempertimbangkan time value of money
- Sensitivity analysis: Menganalisis pengaruh perubahan key assumptions (load factor, tariff, operational cost) terhadap payback period
- Risk assessment: Mengevaluasi risiko yang dapat mempengaruhi achievement dari projected payback period

3.6.10 3-Scenario Analysis

Analisis sensitivitas dengan tiga skenario untuk mengevaluasi dari investment decision:

- Optimistic scenario: Asumsi kondisi terbaik (high load factor 95%, no cost overrun, stable operation)
- Base case scenario: Asumsi kondisi normal berdasarkan historical data dan reasonable projections

- Pessimistic scenario: Asumsi kondisi terburuk (low load factor, cost overrun, operational disruption)

3.6.11 Kesimpulan Dan Rekomendasi

Kesimpulan merupakan langkah akhir yang menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan di awal penelitian. Pada bagian ini, hasil-hasil dari penelitian diuraikan secara logis dan sistematis. Kesimpulan ini mencakup:

- Perhitungan section modulus dari desain baru dan hasil perbandingan dengan existing.
- Verifikasi kesesuaian hasil analisis dengan standar BKI.
- Analisis safety factor untuk penilaian keamanan desain modifikasi.
- Evaluasi efisiensi struktural yang memberikan perspektif baru tentang potensi desain di masa depan.

Melalui kesimpulan dan rekomendasi, peneliti berharap dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi pengembangan desain struktur kapal yang lebih efisien dan aman.

3.7 Jadwal Penelitian

Tabel 3.4 Jadwal Kegiatan Proyek Penelitian Analisa Perubahan Desain *Frame Upper Car Deck*

No	Kegiatan	Bulan					
		1	2	3	4	5	6
1	Studi Pustaka / Pengumpulan data						
2	Perhitungan beban dan section modulus						
3	Desain <i>frame</i> modified						
4	Pelaksanaan Analisis						
5	Pembuatan Laporan TA						

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan seluruh proses analisis penelitian secara sistematis, mulai dari pengumpulan dan verifikasi data kapal, perhitungan parameter hidrodinamis, analisis *section modulus* kondisi *existing*, perancangan ulang (*redesign*) profil *frame*, perbandingan hasil, hingga penilaian kelayakan ekonomi modifikasi. Seluruh tahapan dilaksanakan secara berurutan sebagaimana yang telah direncanakan dalam metodologi penelitian pada Bab III, mengacu pada standar *Rules for Hull* Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) edisi 2025.

Objek penelitian adalah *upper Car Deck* kapal Ro-Ro penumpang yang melayani rute penyeberangan Merak–Bakauheni. Pemilihan objek didasarkan pada ketersediaan data teknis kapal dan relevansinya dengan kondisi operasional nyata di lapangan. Pendekatan analisis yang digunakan adalah metode perhitungan *section modulus* manual berbasis peraturan BKI 2025, yang dikombinasikan dengan perangkat lunak AutoCAD untuk visualisasi desain *frame* dan verifikasi dimensi profil.

Proses penelitian dilaksanakan melalui tujuh tahapan utama yang saling berkaitan, yaitu:

1. pengumpulan dan verifikasi data teknis kapal;
2. perhitungan koefisien dan beban desain berdasarkan BKI 2025;
3. analisis *section modulus* profil *frame existing*;
4. perancangan profil *frame modified*;
5. perhitungan *section modulus* profil *frame modified* dan verifikasi terhadap persyaratan minimum BKI;
6. perbandingan komprehensif antara kondisi *existing* dan *modified*;
7. analisis kelayakan ekonomi dari implementasi modifikasi. Alur tahapan ini disajikan secara rinci pada uraian berikut.

4.1 Pengumpulan dan Verifikasi Data Kapal

Pengumpulan data lapangan dilaksanakan selama periode docking kapal di Graving Dock. Kegiatan ini merupakan bagian integral dari penelitian karena data teknis aktual yang

diperoleh langsung dari kapal, khususnya dimensi *web frame existing* pada *upper Car Deck* menjadi basis utama seluruh perhitungan analisis struktural yang dilakukan. Tanpa verifikasi lapangan, terdapat risiko ketidaksesuaian antara dimensi yang tercantum pada gambar teknis dengan kondisi aktual komponen yang sudah beroperasi selama bertahun-tahun, mengingat kemungkinan adanya modifikasi sebelumnya atau korosi yang mempengaruhi dimensi profil (Alamsyah, Falevi, et al., 2021).

Kegiatan survei lapangan dilaksanakan dalam empat tahapan berurutan yang mengikuti alur kerja docking kapal, yaitu: (1) penerimaan kapal di galangan; (2) pengapungan kapal ke dalam graving dock; (3) marking dan identifikasi area pengerjaan; serta (4) inspeksi akhir (final inspection) oleh Biro Klasifikasi Indonesia (BKI). Seluruh tahapan ini didokumentasikan secara fotografis untuk keperluan verifikasi data dan transparansi penelitian.

4.1.1 Penerimaan Kapal di Galangan



Gambar 4.1 Kapal Tiba di Galangan untuk Proses Docking

(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Kapal tiba di galangan untuk menjalani proses *docking* periodik sekaligus menjadi kesempatan bagi penulis untuk melakukan pengambilan data teknis secara langsung. Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.1, kapal ini tampak bersandar di dermaga galangan dengan kondisi lambung terawat. Kapal memiliki tampilan khas kapal Ro-Ro penumpang berukuran besar dengan bangunan atas (*superstructure*) bertingkat yang menampung akomodasi penumpang, serta lambung yang ditandai dengan warna putih-merah-biru khas operator.

Proses penerimaan kapal (*ship reception*) di galangan mencakup serangkaian kegiatan administratif dan teknis awal, antara lain verifikasi identitas kapal, penyerahan dokumen teknis dari pemilik kapal kepada pihak galangan, serta pemeriksaan kondisi umum (*initial survey*) oleh tim teknis galangan. Pada tahap ini pula, penulis melakukan konfirmasi awal terhadap data utama kapal yang sebelumnya telah dikumpulkan dari dokumen, berikut data principal particulars yang tercantum di dokumen kapal:

Tabel 4.1 *Principal Particulars*

No.	Kategori	Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
1.	Dimensi	Length Over All (LOA)	136.60	m	Panjang keseluruhan kapal
2.	Dimensi	Length Between Perpendiculars (LBP)	128.44	m	Panjang antar garis tegak
3.	Dimensi	Breadth	21.00	m	Lebar Kapal
4.	Dimensi	Depth	12.03	m	Tinggi kapal
5.	Dimensi	Draught	5.70	m	Sarat muatan desain
6.	Tonase & Muatan	Gross Tonnage	13,413	ton	Tonase kotor (ukuran volume kapal)
7.	Tonase & Muatan	Deadweight	4,024	ton	Kapasitas muatan bersih
8.	Propulsi	Main Engine	NKK-SEMT-PIELSTICK 14PC2-6V × 2	—	Dua unit mesin diesel utama

No.	Kategori	Parameter	Nilai	Satuan	Keterangan
9.	Propulsi	Maximum Continuous Rating (M.C.R.)	9,100 × 520 / 171	PS / RPM	Daya maksimum kontinu
10.	Propulsi	Speed at Sea (Maximum)	20.0 / 21.9	knot	Kecepatan di laut (kemungkinan service / maximum)
11.	Kapasitas Operasional	Passenger	975	orang (P)	Kapasitas penumpang maksimum
12.	Kapasitas Operasional	Truck	87	unit	Kapasitas truk
13.	Kapasitas Operasional	Car	20	unit	Kapasitas mobil penumpang

Konfirmasi awal ini penting untuk memastikan bahwa objek kapal yang dianalisis sesuai dengan yang direncanakan dalam metodologi penelitian.

4.1.2 Pengapungan Kapal ke Graving Dock



Gambar 4.2 Kondisi Kapal Saat Pengapungan ke Graving Dock

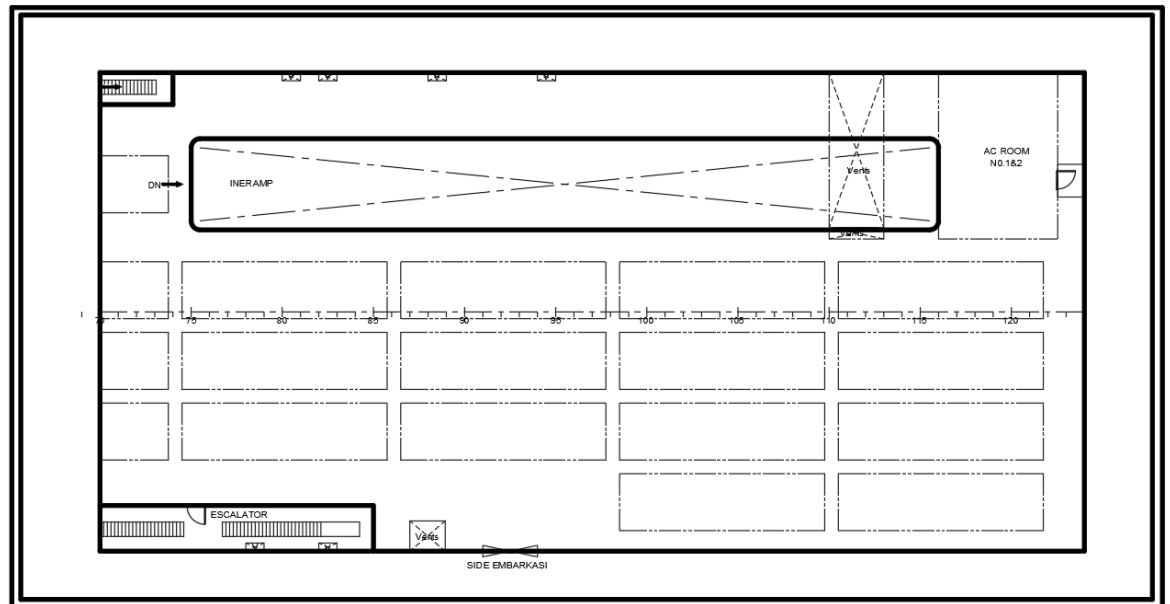
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Tahapan selanjutnya adalah proses pengapungan kapal ke dalam *graving dock* (dok kolam/dok kering), sebagaimana didokumentasikan pada Gambar 4.2. Gambar ini diambil dari sudut pandang darat dengan posisi kamera menghadap ke arah haluan kapal, menampilkan bagian bawah lambung (*underwater hull*) yang telah sepenuhnya berada di luar air setelah proses pengeringan dok dilaksanakan. Pada kondisi ini, seluruh bagian lambung bawah garis air menjadi dapat diakses untuk keperluan inspeksi, pengukuran, dan pengerjaan.

Dari Gambar 4.2 dapat diamati beberapa fitur struktural yang relevan dengan penelitian ini. Pertama, *draft mark* yang tertera pada sisi kanan lambung menunjukkan skala kedalaman sarat kapal, yang bersesuaian dengan nilai $T = 5,70$ m yang digunakan dalam perhitungan beban desain pada sub-bab 4.2. Kondisi *dry dock* juga memungkinkan tim peneliti untuk mengakses ruang-ruang internal kapal, termasuk area *upper Car Deck* pada rentang *frame 74–116*, yang menjadi objek utama analisis dalam penelitian ini. Akses ke area ini tidak dapat dilakukan ketika kapal sedang beroperasi, sehingga periode *docking* merupakan satu-satunya kesempatan untuk melakukan pengukuran dan verifikasi dimensi secara langsung.

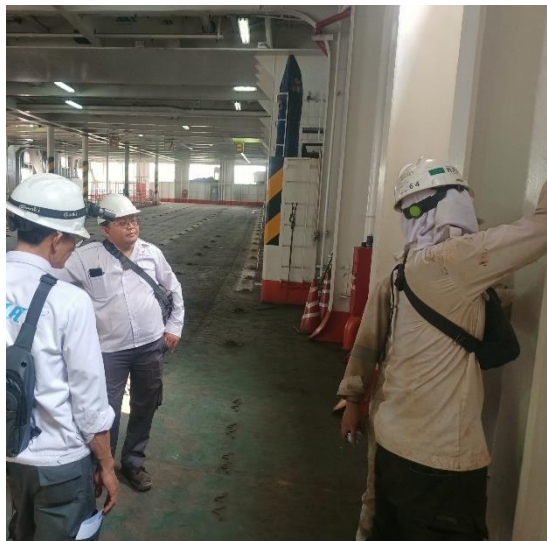
4.1.3 Marking dan Identifikasi Area Pengerjaan

GENERAL ARRANGEMENT TAMPAK ATAS



Gambar 4.3 Area *Car Deck* yang Akan Dikerjakan

(Sumber: Dokumentasi Penulis)



Gambar 4.4 Proses Identifikasi dan Marking Area Pengerjaan pada *Upper Car Deck* bersama Tim Teknis Galangan

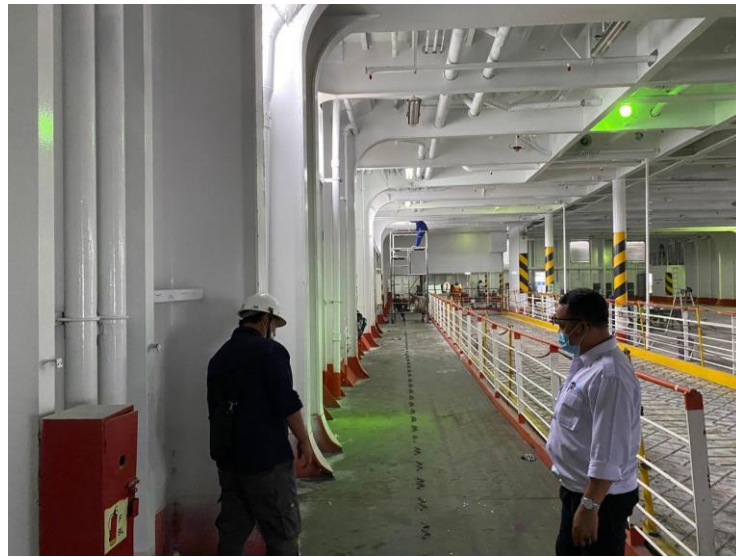
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Setelah kapal berada dalam kondisi *dry dock* dan seluruh akses internal terbuka, dilaksanakan kegiatan *marking* dan identifikasi area pengerjaan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4. Gambar ini merekam momen koordinasi

antara penulis dan tim teknis galangan yang terdiri dari surveyor galangan, teknisi konstruksi, dan koordinator proyek di dalam ruang *upper Car Deck*. Tampak salah satu anggota tim menunjuk dan menandai posisi *web frame* yang menjadi fokus analisis, sementara anggota lainnya melakukan pencatatan dan koordinasi pengukuran berdasarkan gambar teknis yang dibawa.

Proses *marking* dilakukan dengan cara mengidentifikasi satu per satu nomor *frame* pada area *upper Car Deck*, kemudian menandai secara fisik batas-batas area yang akan menjadi lingkup analisis, yaitu dari *frame* 74 hingga *frame* 116. Penandaan ini mengacu pada gambar *midship section* dan *general arrangement* kapal yang disediakan oleh pihak pemilik kapal, serta diverifikasi silang dengan posisi aktual *frame* di lapangan menggunakan meteran dan referensi tanda-tanda *frame spacing* yang tertera pada kulit lambung (*shell plating*).

4.1.4 Pengukuran Dimensi Aktual Web Frame Existing



Gambar 4.5 Proses Pengukuran Dimensi Aktual *Web Frame Existing* pada *Upper Car Deck* oleh Tim Teknis Galangan dan Surveyor BKI dalam Rangka *Final Inspection*

(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Tahap krusial dalam pengumpulan data lapangan adalah kegiatan pengukuran dimensi aktual *web frame existing*, yang sekaligus merupakan bagian dari proses *final inspection* oleh Surveyor Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), sebagaimana didokumentasikan pada Gambar 4.5, Gambar ini memperlihatkan secara detail proses pengukuran yang dilakukan secara bersama oleh tim teknis galangan dan surveyor

BKI, dengan menggunakan meteran baja (*steel tape measure*) yang diaplikasikan langsung pada profil *web frame* yang sedang diperiksa.

Pengukuran yang dilakukan mencakup seluruh parameter geometris profil *web frame* yang diperlukan dalam analisis *section modulus*, yaitu:

1. Tinggi *web plate* (*hw*): diukur dari batas bawah *face plate* hingga ujung bawah *web plate*, menghasilkan nilai 550 mm yang sesuai dengan data dokumen teknis.
2. Tebal *web plate* (*tw*): diukur menggunakan *caliper* pada beberapa titik untuk mendeteksi potensi pengurangan tebal akibat korosi, diperoleh nilai aktual 10 mm.
3. Lebar *face plate* (*bf*): diukur secara horizontal pada bagian atas profil, diperoleh nilai 200 mm.
4. Tebal *face plate* (*tf*): diukur menggunakan *caliper*, diperoleh nilai 16 mm.
5. Lebar *bracket* (*bb*): diukur pada komponen pengaku di kedua ujung *web frame*, diperoleh nilai 450 mm.
6. Tebal *bracket* (*tb*) dan tebal pelat sisi (*ts*): diukur untuk keperluan koreksi modulus penampang, masing-masing 9 mm.

Seluruh hasil pengukuran lapangan ini kemudian direkap dalam Tabel 4.2 berikut dan selanjutnya digunakan sebagai data input dalam perhitungan *section modulus* pada sub-bab 4.3.

Kehadiran Surveyor BKI dalam proses pengukuran ini juga memberikan nilai validasi tambahan terhadap data yang diperoleh. Proses ini memastikan bahwa kondisi aktual komponen struktural kapal telah diperiksa, diukur, dan dicatat secara resmi sesuai dengan prosedur klasifikasi yang berlaku (BKI, 2025). Dengan demikian, data dimensi *web frame existing* yang digunakan dalam penelitian ini bukan hanya bersumber dari dokumen teknis, melainkan telah diverifikasi secara lapangan dan disaksikan oleh pihak klasifikasi yang berwenang.

Tabel 4.2 Data Dokumen Teknis Kapal dan Hasil Pengukuran Lapangan

Komponen	Dimensi Dokumen	Dimensi Aktual Lapangan	Satuan	Keterangan
Profil	T 550 × 10 FP 200 × 16	T 550 × 10 FP 200 × 16	—	Sesuai
Tinggi web plate (<i>hw</i>)	550	550	mm	Sesuai

Komponen	Dimensi Dokumen	Dimensi Aktual Lapangan	Satuan	Keterangan
Tebal web plate (tw)	10	10	mm	Sesuai
Lebar face plate (bf)	200	200	mm	Sesuai
Tebal face plate (tf)	16	16	mm	Sesuai
Lebar bracket (bb)	450	450	mm	Sesuai
Tebal bracket / pelat sisi (ts)	9	9	mm	Sesuai
Lokasi frame	74–116	74–116	—	Sesuai
Jarak antar frame (a)	0,8	0,8	m	Sesuai
Jarak web frame (e)	2,4	2,4	m	Sesuai

4.2. Perhitungan Beban Rencana (Design Loads)

Setelah data kapal terverifikasi, tahap berikutnya adalah menghitung parameter-parameter dasar yang diperlukan dalam perumusan beban desain (*design loads*) berdasarkan *Rules for Hull BKI 2025 Section IV*. Terdapat tiga parameter utama yang dihitung secara berurutan, yaitu koefisien blok (CB), koefisien gelombang (*wave coefficient*, C_o), dan koefisien panjang (CL). Ketiga parameter ini menjadi masukan bagi perhitungan beban dasar dinamis eksternal (*basic external dynamic load*, P_o) dan selanjutnya beban sisi (*side load*, P_s) yang bekerja pada *web frame* yang dianalisis.

Pendekatan perhitungan beban ini sesuai untuk analisis kekuatan *Car Deck* kapal Ro-Ro, di mana beban sisi di bawah garis air (P_{s3}) digunakan sebagai beban desain utama untuk komponen *web frame* dan *side stringer*. (Pratama et al., 2020)

Berdasarkan data utama kapal yang digunakan dalam penelitian:

Tabel 4.3 Parameter Perhitungan Beban

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Length Between Perpendicular	LPP	128,44	m
Breadth	B	21,00	m
Depth	H	12,00	m
Draft	T	5,70	m
Coefficient Block	CB	0,7	-
Vertical distance (upper <i>Car Deck</i>)	z	12,03	m
Service range coefficient	C_{RW}	0,8	-

4.2.1 Perhitungan Wave Coefficient (Co)

Menurut BKI Rules for Hull 2025 Section IV, untuk kapal dengan panjang $90 \leq L \leq 300$ m:

$$\begin{aligned} Co \text{ (Wave Coefficient) for } 90 \leq L \leq 300 \text{ m} &: [10,75 - (\frac{300 - L}{100})1,5] \cdot CRW \\ &: [10,75 - (\frac{300-128,44}{100})1,5] \cdot 0,8 \\ &: [10,75 - (\frac{171,56}{100})1,5] \cdot 0,8 \\ &: [10,75 - (2,247)] \cdot 0,8 \\ &: 6,802 \text{ [kN/m}^2\text{]} \end{aligned}$$

Hasil: Co = 6,802 kN/m²

CL (Length Coefficient) : 1 (for $L \geq 90$ m)

CD : 1 (In Midship)

CF : 1 (In Midship)

4.2.2 Perhitungan Beban (*Design Loads*) Section IV Rules for Hull BKI 2025

4.2.2.1 Perhitungan Beban Geladak Cuaca (Load on Weather Decks) Pada Tengah Kapal

(Section IV A,B Rules for Hull Biro Klasifikasi Indonesia 2025)

$$P_D = P_o \frac{20T}{(10+Z-T)H} C_D \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Sebelum menghitung semua perhitungan maka harus menentukan P_o (basic external dynamic load) terlebih dahulu karena nilai f setiap P_o berbeda karena tergantung penggunaannya.

Po 1 [*use $f = 1$ for plate panels of the outer hull (shell plating, weather decks)*]

$$\begin{aligned} P_o 1 &= 2,1 \cdot (CB + 0,7) \cdot Co \cdot CL \cdot f \\ &= 2,1 \cdot (0,7 + 0,7) \cdot 7,753 \cdot 1 \cdot 1 \\ &= 2,1 \cdot 1,4 \cdot 7,753 \\ &= 22,793 \text{ [kN/m}^2\text{]} \end{aligned}$$

Po 2 [*use $f = 0,75$ for secondary stiffening members of the outer hull (frames, deck beams)*]

$$\begin{aligned}
 P_{o2} &= 2,1 \cdot (CB + 0,7) \cdot C_o \cdot CL \cdot f \\
 &= 2,1 \cdot (0,7 + 0,7) \cdot 7,753 \cdot 1 \cdot 0,75 \\
 &= 17,095 \text{ [kN/m}^2\text{]}
 \end{aligned}$$

Po 3 [0,60 for girders and girder systems of the outer hull (web frames, stringers, grillage systems)]

$$\begin{aligned}
 P_{o3} &= 2,1 \cdot (CB + 0,7) \cdot C_o \cdot CL \cdot f \\
 &= 2,1 \cdot (0,7 + 0,7) \cdot 6,802 \cdot 1 \cdot 0,60 \\
 &= 11,998 \text{ [kN/m}^2\text{]}
 \end{aligned}$$

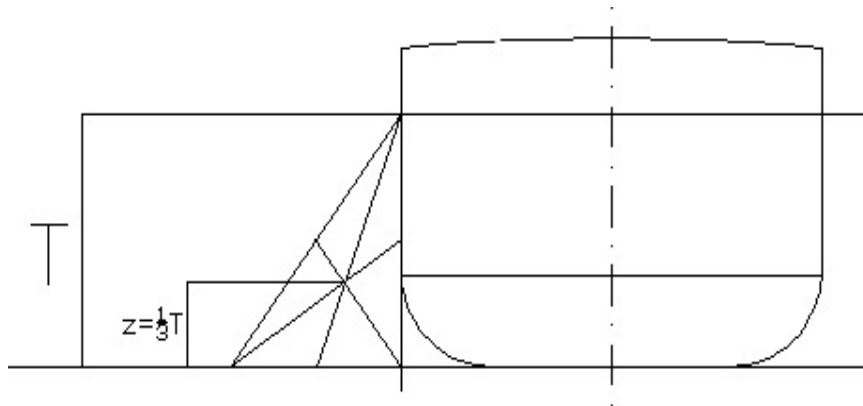
4.2.2.2 Beban sisi (load on ship side) Section IV B Rules for Hull BKI 2025

4.2.2.2.1 Perhitungan beban sisi dibawah garis air pada tengah kapal (For elements the load centre of which is located below load waterline)

$$P_s = 10 (T - z) + P_o \cdot C_f \left(1 + \frac{z}{T}\right) \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$\text{Use } z = \frac{1}{3} T \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{3} \cdot 5,70 \text{ m} \\
 &= 1,90 \text{ m}
 \end{aligned}$$



a. Beban sisi dibawah garis air untuk menghitung gading besar (web frame) dan senta sisi (side stringer)

$$P_{s3} = 10 (T - z) + P_{o3} \cdot C_f \left(1 + \frac{z}{T}\right) \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$P_{s3} = 10 \cdot (5,70 - 1,90) + 11,998 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{1,90}{5,70}\right) \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$P_{s3} = 10 \cdot 3,8 + 11,998 \cdot 1 \cdot 1,333 \quad \text{[kN/m}^2\text{]}$$

$$P_{s3} = 38 + 15,993 \quad \text{[kN/m}^2\text{]}$$

$$P_{s3} = 53,993 \quad \text{[kN/m}^2\text{]}$$

4.3 Analisis Section Modulus Frame Existing

Dengan beban desain yang telah ditetapkan, dilakukan analisis terhadap profil *web frame* yang saat ini terpasang pada *upper Car Deck*. Analisis ini mencakup dua hal: pertama, perhitungan *section modulus* minimum yang disyaratkan oleh BKI 2025 (W_{minimum}) berdasarkan parameter geometri dan beban; kedua, perhitungan *section modulus* aktual profil *existing* (W_{aktual}) menggunakan metode koreksi modulus yang mempertimbangkan dimensi *face plate*, *web plate*, dan *bracket*.

Perbandingan antara W_{aktual} dan W_{minimum} menghasilkan nilai margin keamanan yang menjadi dasar penilaian apakah profil *existing* masih dalam kondisi *over-designed* dan memiliki ruang untuk dioptimalkan. Ikhwan & Misbah (2019) menyatakan bahwa identifikasi kondisi *over-designed* merupakan langkah awal yang esensial dalam optimasi berat konstruksi kapal, karena penghematan berat struktur secara langsung berkontribusi pada peningkatan kapasitas muat dan efisiensi operasional.

4.3.1 Data Frame Existing

Tabel 4.4 Data Frame Existing

No.	Simbol	Parameter / Deskripsi	Nilai	Satuan	Keterangan Teknis & Catatan Ilmiah
1.	P_s	Tebal asli plat midship section	9	mm	Tebal plat konstruksi asli pada section tengah kapal
2.	PS_3	Tekanan desain (PS_3)	53,993	kN/m ²	Tekanan hidrostatis atau beban desain pada plat.
3.	a	Jarak gading	0,80	m	Jarak longitudinal antar frame (<i>stiffener spacing</i>).
4.	e	Jarak antar web frame / Lebar pembebanan	2,4	m	Web frame spacing sekaligus lebar area pembebanan efektif.
5.	l	Panjang tidak ditumpu	5,42	m	Panjang span plat yang tidak mendapat dukungan
6.	k	Faktor material baja	1	—	Material factor untuk baja struktural (biasanya $k = 1$ untuk baja mild steel sesuai aturan klasifikasi).
7.	n	Koefisien (n)	0,5	—	Koefisien reduksi atau faktor bentuk
8.	P	Tekanan yang digunakan dalam perhitungan	53,993	kN/m ²	$P = PS_3$ (tekanan desain yang diadopsi). Nilai identik dengan PS_3 untuk perhitungan langsung.

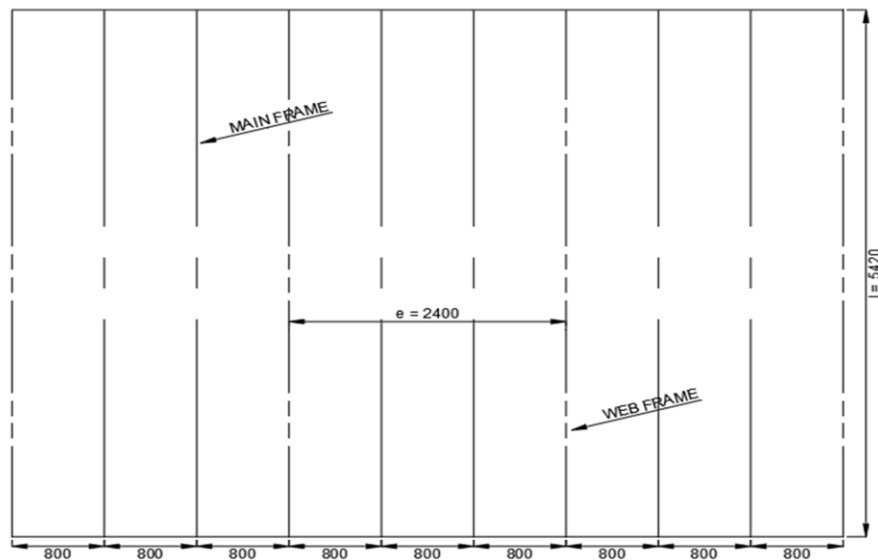
Tabel 4.5 Spesifikasi *Frame Existing*

Komponen	Dimensi	Satuan
Profil	T 550 × 10 FP 200 × 16	mm
Tinggi web plate	550	mm
Tebal web plate	10	mm
Lebar face plate	200	mm
Tebal face plate	16	mm
Lebar bracket	450	mm
Tebal asli dari midship section	9	mm
Lokasi frame	74-116	-
Jarak antar frame (a)	0,8	m
Jarak web frame (e)	2,4	m

4.3.2 Perhitungan Section Modulus Minimum Web Frame Existing (BKI)

Modulus penampang gading besar tidak boleh kurang dari :

$$W = 0,55 \cdot e \cdot l^2 \cdot P_s \cdot n \cdot k \text{ cm}^3$$



$$W = 0,55 \cdot e \cdot l^2 \cdot P_s \cdot n \cdot k \text{ cm}^3$$

$$W = 0,55 \cdot 2,4 \cdot 5,422 \cdot 53,993 \cdot 0,5 \cdot 1 \text{ cm}^3$$

$$W = 1046,8 \text{ cm}^3$$

Koreksi modulus :

$$W = 1046,8$$

$$t_s = 9 \text{ mm (tebal asli dari midship section)}$$

Keterangan :

Lebar pelat pengikat atau pelat sisi = (40 sampai 50) x t_s

$$\text{Saya ambil } 50 \times t_s = 50 \times 9 = 450 \text{ mm}$$

$$\text{Ukuran pelat hadap} = 200 \times 16 \text{ mm}$$

$$\text{Ukuran pelat bilah} = 550 \times 10 \text{ mm}$$

$$\text{Ukuran pelat pengikat} = 450 \times 9 \text{ mm}$$

Koreksi modulus :

$$\text{Luas pelat hadap (f)} = 20 \times 1,6 \text{ cm} = 32 \text{ cm}^2$$

$$\text{Luas pelat bilah (fs)} = 55 \times 1,0 \text{ cm} = 55 \text{ cm}^2$$

$$\text{Luas pelat pengikat (F)} = 50 \times 0,9 \text{ cm} = 45 \text{ cm}^2$$

Koreksi :

$$\underline{f} = \frac{32}{45} = 0,711$$

$$F \quad 45$$

$$\underline{fs} = \frac{55}{45} = 1,222$$

$$F \quad 45$$

Dari diagram koordinasi didapatkan $w = 0,95$

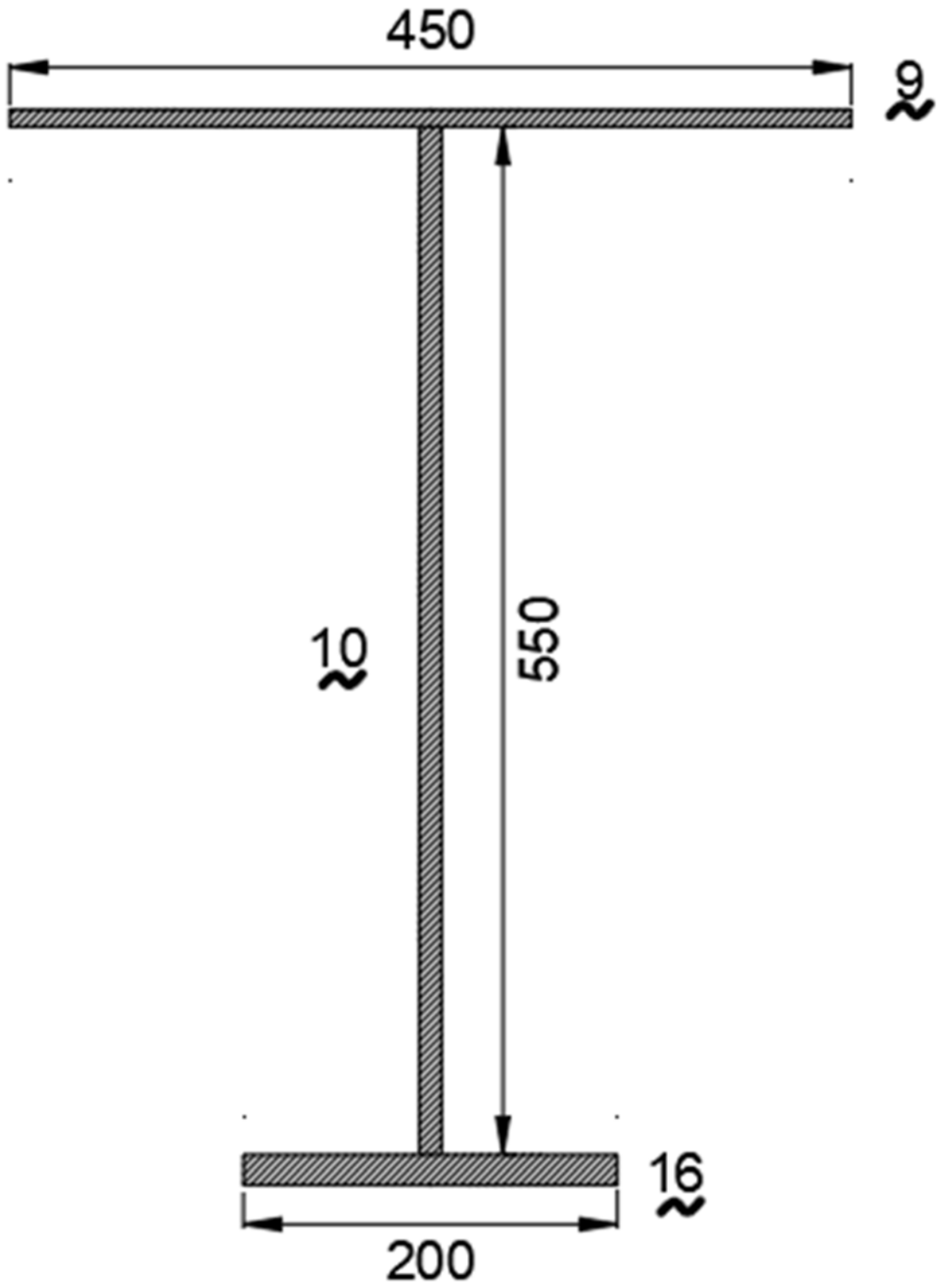
Maka profil tersebut mempunyai modulus penampang.

$$\begin{aligned} W \text{ koreksi} &= w \cdot F \cdot h \text{ cm}^3 \\ &= 0,952 \cdot 45 \text{ cm} \cdot 55 \text{ cm} \\ &= 2356,2 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$W \text{ koreksi} > W \text{ Perhitungan}$$

$$2356,2 \text{ cm}^3 > 1046,8 \text{ cm}^3$$

Ukuran profil direncanakan : T 550 x 10 FP 200 x 16



Gambar 4.6 WEB Frame Sebelum Diubah

4.3.3 Verifikasi Kesesuaian

$$W_{\text{existing}} (2356 \text{ cm}^3) > W_{\text{minimum}} (1047 \text{ cm}^3) \checkmark$$

$$\text{Margin} = ((2356 - 1047) / 1047) \times 100\%$$

$$\text{Margin} = 125\%$$

Kesimpulan: Frame existing memiliki section modulus yang sangat berlebihan (*over-designed*), memberikan peluang untuk optimalisasi.

4.4 Desain dan Analisis Frame Modified

Berdasarkan temuan pada Tahap sebelumnya, dilakukan perancangan ulang profil *frame (redesign)*. Konsep modifikasi berfokus pada pengurangan tinggi *web plate* untuk menciptakan ruang bebas (*clearance*) tambahan, serta penyesuaian dimensi *face plate*. Prinsip desain yang digunakan adalah mencapai *section modulus* yang cukup untuk memenuhi persyaratan minimum BKI 2025 dengan dimensi profil yang lebih ramping.

4.4.1 Data Frame Modified

Gading besar (*web frame*) – Setelah Perubahan

Diket:

$$t_s = 9 \quad \text{mm} \quad (\text{Tebal asli dari midship section})$$

$$a = 0,80 \quad \text{m} \quad (\text{Jarak gading})$$

$$e = 2,4 \quad \text{m} \quad (\text{Jarak antara web frame})$$

$$l = 5,42 \quad \text{m} \quad (\text{Panjang tidak ditumpu})$$

$$k = 1 \quad (\text{Faktor material baja})$$

$$n = 0,5$$

$$P = PS_3 = 53,993 \quad [\text{kN/m}^2]$$

Tabel 4.6 Spesifikasi Frame Modified

Komponen	Dimensi	Perubahan	Satuan
Profil	T 250 × 10 FP 240 × 16	-	mm
Tinggi web plate	250	↓ 300 mm	mm
Tebal web plate	10	Tetap	mm
Lebar face plate	240	↑ 40 mm	mm
Tebal face plate	16	Tetap	mm
Lebar bracket	450	Tetap	mm
Tebal bracket	9	Tetap	mm

4.4.2 Perhitungan Section Modulus Frame Modified

Setelah dimensi profil *frame modified* ditetapkan, dilakukan perhitungan *section modulus* aktual menggunakan prosedur koreksi yang sama. Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan W_{minimum} untuk memverifikasi kesesuaian dengan persyaratan BKI 2025. Tahap ini merupakan tahap kritis karena hasil verifikasi menentukan apakah desain *modified* dapat dinyatakan layak secara struktural.

4.4.3.1 Gading besar (*web frame*) – Setelah Perubahan

Modulus penampang gading besar tidak boleh kurang dari :

$$W = 0,55 \cdot e \cdot l^2 \cdot P_s \cdot n \cdot k \text{ cm}^3$$

Dimana:

$$W = 0,55 \cdot e \cdot l^2 \cdot P_s \cdot n \cdot k \text{ cm}^3$$

$$W = 0,55 \cdot 2,4 \cdot 5,422 \cdot 53,993 \cdot 0,5 \cdot 1 \text{ cm}^3$$

$$W = 1046,84 \text{ cm}^3$$

Koreksi modulus :

$$W = 1047 \text{ cm}^3$$

$$t_s = 9 \text{ mm (Tebal asli dari midship section)}$$

Keterangan :

Lebar pelat pengikat atau pelat sisi = (40 sampai 50) x t_s

Saya ambil $50 \times t_s = 50 \times 9 = 450 \text{ mm}$

- Ukuran pelat hadap = $240 \times 16 \text{ mm}$
- Ukuran pelat bilah = $250 \times 10 \text{ mm}$
- Ukuran pelat pengikat = $450 \times 9 \text{ mm}$

Koreksi modulus:

$$\bullet \text{ Luas face plate } (f) = 24 \times 1,6 = 38,4 \text{ cm}^2$$

$$\bullet \text{ Luas web plate } (f_s) = 25 \times 1,0 = 25 \text{ cm}^2$$

$$\bullet \text{ Luas bracket } (F) = 45 \times 0,9 = 40,5 \text{ cm}^2$$

Rasio penampang:

Koreksi:

$$\frac{f}{F} = \frac{38,4}{40,5} = 0,948$$

$$\frac{f_s}{F} = \frac{25}{40,5} = 0,617$$

Dari diagram koordinasi didapatkan $w = 1,58$

Maka profil tersebut mempunyai modulus penampang.

$$W \text{ Koreksi} = w \cdot F \cdot h \text{ cm}^3$$

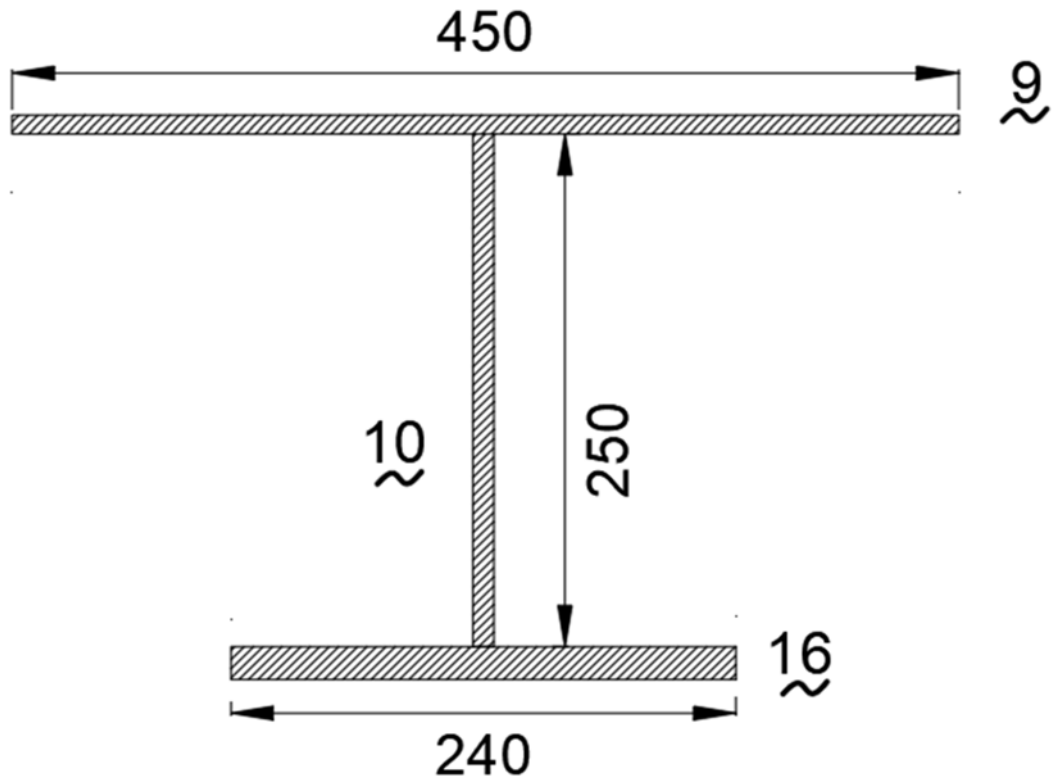
$$= 1,58 \cdot 40,5 \text{ cm}^2 \cdot 25 \text{ cm}$$

$$= 1560 \text{ m}^3$$

$W \text{ koreksi} > W \text{ Perhitungan}$

$$1560 \text{ cm}^3 > 1047 \text{ cm}^3$$

Ukuran profil direncanakan : T 250 x 10 FP 240 x 16



Gambar 4.7 Web Frame Setelah Perubahan

4.4.4 Verifikasi Dimensi *Web Frame Modified* oleh Surveyor BKI



Gambar 4.8 Pengukuran Dimensi Aktual *Web Frame Modified* oleh Tim Teknis Galangan dan Surveyor BKI sebagai Bagian dari Final Inspection

(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Gambar 4.8 mendokumentasikan tahapan *final inspection* yang dilaksanakan oleh Surveyor Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) bersama tim teknis galangan setelah seluruh pekerjaan redesain *web frame* pada rentang *frame* 74–116 selesai dikerjakan. Berbeda dengan pengukuran awal yang bertujuan mengumpulkan data dimensi *existing*, kegiatan pengukuran pada tahap ini bersifat **verifikatif** yakni memastikan bahwa dimensi *web frame* yang telah dipasang sesuai secara aktual dengan gambar desain yang telah disetujui sebelumnya. Pada gambar, terlihat dua orang teknisi mengambil posisi merunduk untuk mengakses bagian profil *Web Frame Modified* yang baru terpasang, menggunakan meteran baja yang diaplikasikan langsung pada permukaan profil. Seorang anggota tim memegang dokumen lembar periksa (*checklist sheet*) untuk mencatat setiap hasil pengukuran secara sistematis. Profil putih yang tampak pada gambar adalah *web frame* hasil modifikasi dengan spesifikasi T 250 × 10 FP 240 × 16 mm — terlihat secara visual lebih ramping dibandingkan profil *existing* T 550 × 10 FP 200 × 16 mm, mencerminkan pengurangan tinggi *web plate* sebesar 300 mm yang menjadi inti dari optimalisasi dalam penelitian ini.

Proses verifikasi yang dilakukan mencakup pengukuran ulang seluruh parameter geometris profil *modified*, yaitu tinggi *web plate* (target: 250 mm), tebal *web plate* (10 mm), lebar *face plate* (240 mm), tebal *face plate* (16 mm), lebar *bracket* (450 mm), serta tebal *bracket* dan pelat sisi (9 mm). Seluruh hasil pengukuran aktual dibandingkan satu per satu dengan dimensi yang tercantum pada gambar desain, dan dinyatakan sesuai (*acceptable*) oleh Surveyor BKI.

Keluaran dari tahapan *final inspection* ini adalah persetujuan resmi dari BKI bahwa profil *Web Frame Modified* yang terpasang pada *upper Car Deck* telah memenuhi persyaratan dimensi sebagaimana yang didesain, sekaligus memenuhi ketentuan *section modulus* minimum yang disyaratkan dalam *Rules for Hull* BKI 2025. Persetujuan ini merupakan validasi institusional yang paling kuat dalam penelitian ini, karena menunjukkan bahwa hasil analisis perhitungan yang dilakukan secara teoritis — yang menghasilkan nilai $W_{\text{modified}} = 1.560 \text{ cm}^3 > W_{\text{minimum}} = 1.047 \text{ cm}^3$ — telah diwujudkan secara fisik dan diakui kelayakannya oleh badan klasifikasi yang berwenang.

Dengan demikian, penelitian ini tidak berhenti pada tataran analitis semata, melainkan telah melalui siklus penuh dari identifikasi masalah, perancangan solusi, implementasi fisik, hingga verifikasi oleh otoritas klasifikasi — sebuah rangkaian yang memberikan bobot validitas dan relevansi praktis yang signifikan terhadap temuan penelitian.

$$W_{\text{Modified}} (1560 \text{ cm}^3) > W_{\text{Minimum}} (1047 \text{ cm}^3)$$

$$\text{Margin} = ((1560 - 1047) / 1047) \times 100\%$$

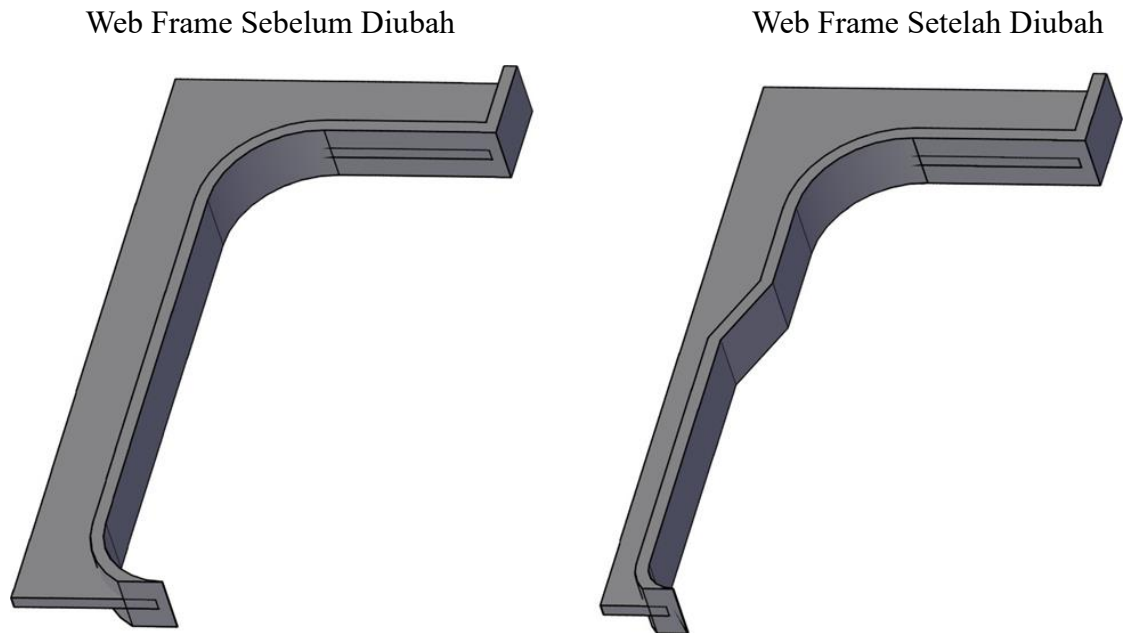
$$\text{Margin} = 48,9\%$$

Kesimpulan: Frame modified tetap memenuhi persyaratan BKI dengan margin keamanan yang cukup (48,9%).

4.5 Perbandingan Frame Existing vs Modified

Setelah kedua profil terverifikasi, dilakukan perbandingan komprehensif yang mencakup: visualisasi *web frame existing* dan *modified* serta implikasi terhadap tata letak *upper Car Deck*. Penambahan kapasitas dihitung berdasarkan peningkatan ruang vertikal yang tersedia setelah reduksi tinggi *web plate*, dikaitkan dengan dimensi standar kendaraan yang dimuat pada dek tersebut.

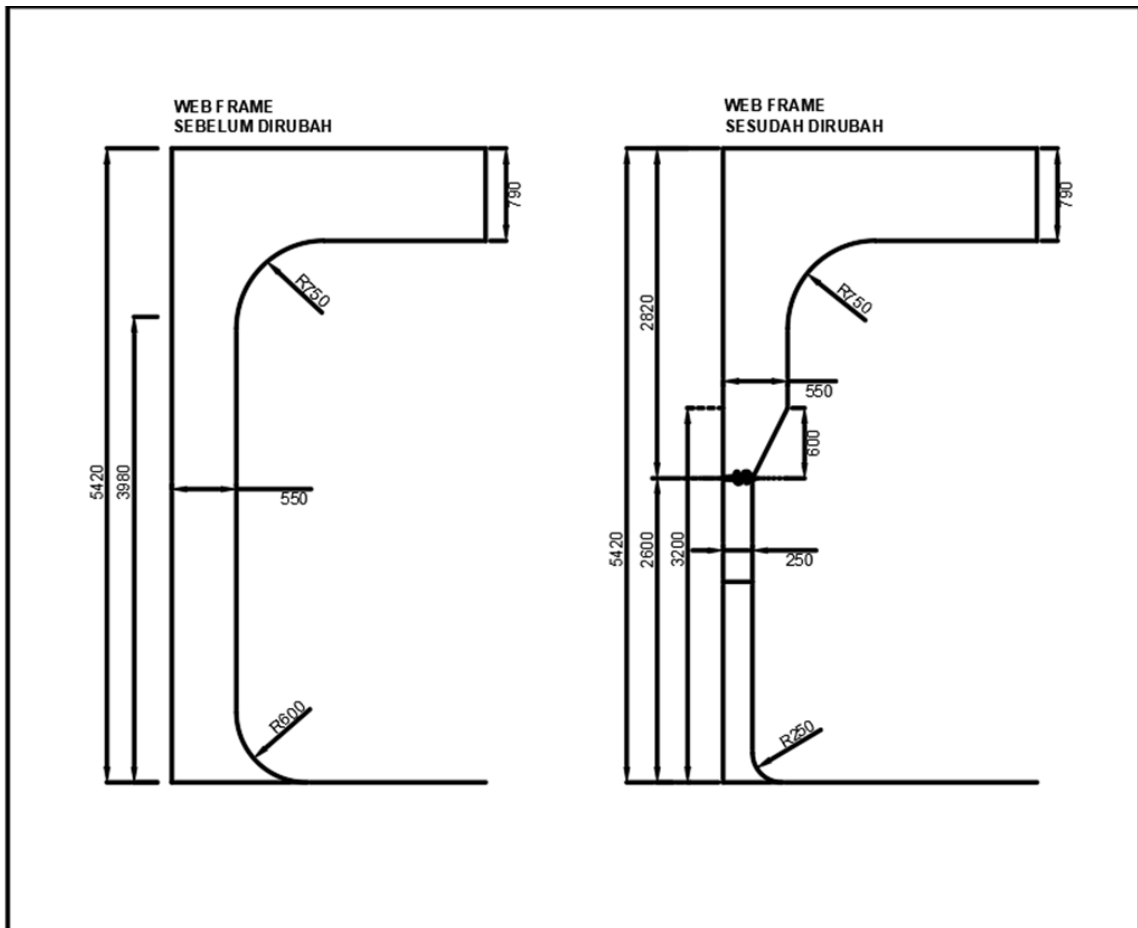
4.5.1 Visualisasi Web Frame Sebelum dan Sesudah Modifikasi



Gambar 4.9 Perbandingan Visualisasi Tiga Dimensi Web Frame Sebelum dan Sesudah Modifikasi

(Sumber: Hasil Desain AutoCAD)

Gambar 4.9 menyajikan visualisasi tiga dimensi (*3D solid model*) dari *web frame upper Car Deck* dalam dua kondisi: kondisi *existing* (sebelum modifikasi, ditampilkan di sisi kiri) dan kondisi *modified* (sesudah modifikasi, ditampilkan di sisi kanan). Kedua model dikerjakan menggunakan perangkat lunak AutoCAD dan dirender dalam tampilan perspektif isometrik untuk memudahkan perbandingan visual terhadap perubahan geometri profil.



Gambar 4.10 Perbandingan Visualisasi Dua Dimensi Web Frame Sebelum dan Sesudah Modifikasi

(Sumber: Hasil Desain AutoCAD)

Pada kondisi *existing*, *web frame* menggunakan profil T dengan spesifikasi *web plate* berukuran 550×10 mm dan *face plate* berukuran 200×16 mm. Profil ini membentuk konfigurasi *T-bar* dengan tinggi mencapai 550 mm, ditambah *bracket* penghubung berukuran 450×9 mm pada kedua ujung bawahnya. Pada tampilan 3D, profil *existing* tampak lebih masif dan dalam (*deep section*), mencerminkan nilai *section modulus* aktual yang jauh melampaui persyaratan minimum BKI 2025, dengan margin *over-design* sebesar 125%.

Pada kondisi *modified*, dilakukan reduksi tinggi *web plate* dari 550 mm menjadi 250 mm — suatu penurunan sebesar 300 mm atau sekitar 54,5% dari dimensi awal. Sebagai kompensasi terhadap berkurangnya kontribusi *web plate*, lebar *face plate* diperlebar dari 200 mm menjadi 240 mm. Dimensi *bracket* tidak mengalami perubahan, yaitu tetap 450×9 mm, karena fungsinya sebagai penyalur

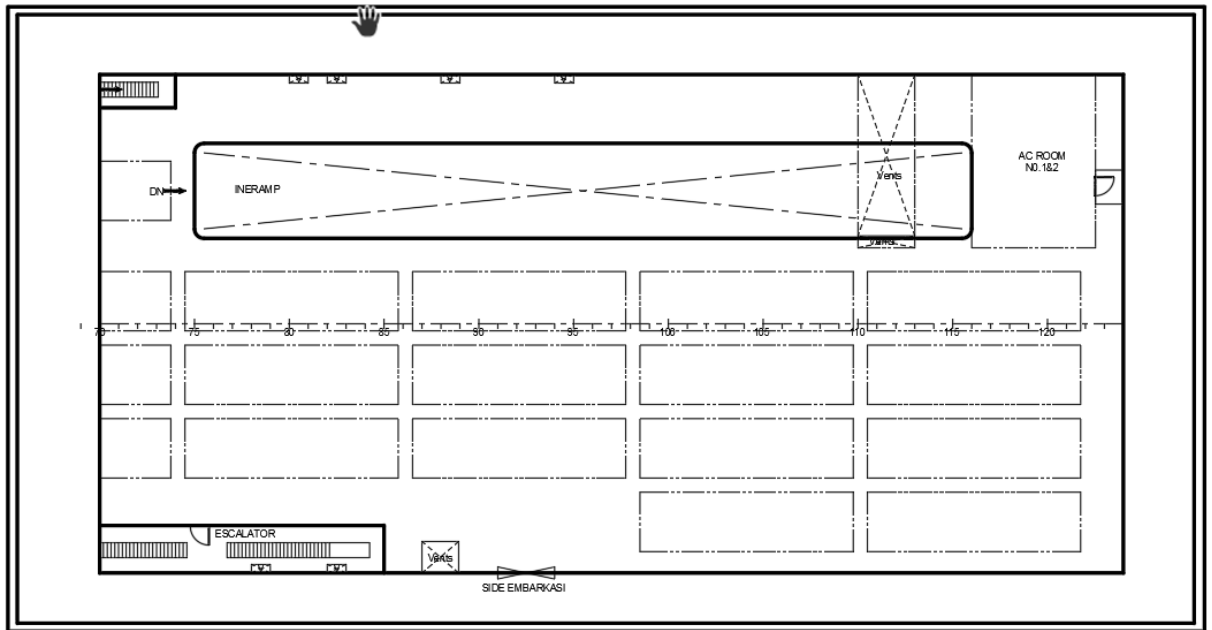
beban antara *web frame* dan struktur sekitarnya tidak berkaitan langsung dengan kapasitas *section modulus* yang dihitung. Hasil perancangan ini menghasilkan profil yang secara visual tampak lebih ramping dibandingkan kondisi *existing*, sebagaimana terlihat jelas pada model dua dan tiga dimensi di sisi kanan.

Secara geometris, pengurangan tinggi *web plate* sebesar 300 mm ini berdampak langsung pada bertambahnya ruang bebas vertikal (*vertical clearance*). Penambahan *clearance* ini menjadi dasar bagi peningkatan kapasitas muatan, karena ruang yang sebelumnya ditempati oleh bagian *web plate* yang direduksi kini dapat dimanfaatkan untuk mengakomodasi kendaraan dengan dimensi yang lebih besar, atau dalam konteks penelitian ini, untuk menambah jumlah lajur parkir kendaraan roda empat. Dengan tetap terpenuhinya persyaratan *section modulus* minimum BKI 2025 sebesar $W_{\text{minimum}} = 1.047 \text{ cm}^3$ — dimana $W_{\text{modified}} = 1.560 \text{ cm}^3$ — modifikasi ini terbukti mampu mencapai keseimbangan antara efisiensi struktural dan peningkatan kapasitas operasional.

4.6 Implikasi terhadap Tata Letak Upper Car Deck

Optimalisasi dimensi profil *web frame* tidak hanya berdampak pada parameter struktural, tetapi juga menghasilkan perubahan nyata pada tata letak (*layout*) *upper Car Deck* secara keseluruhan. Perubahan ini dapat diamati secara visual melalui perbandingan gambar *General Arrangement* (GA) tampak atas (*top view*) antara kondisi sebelum dan sesudah modifikasi, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12.

GENERAL ARRANGEMENT TAMPAK ATAS



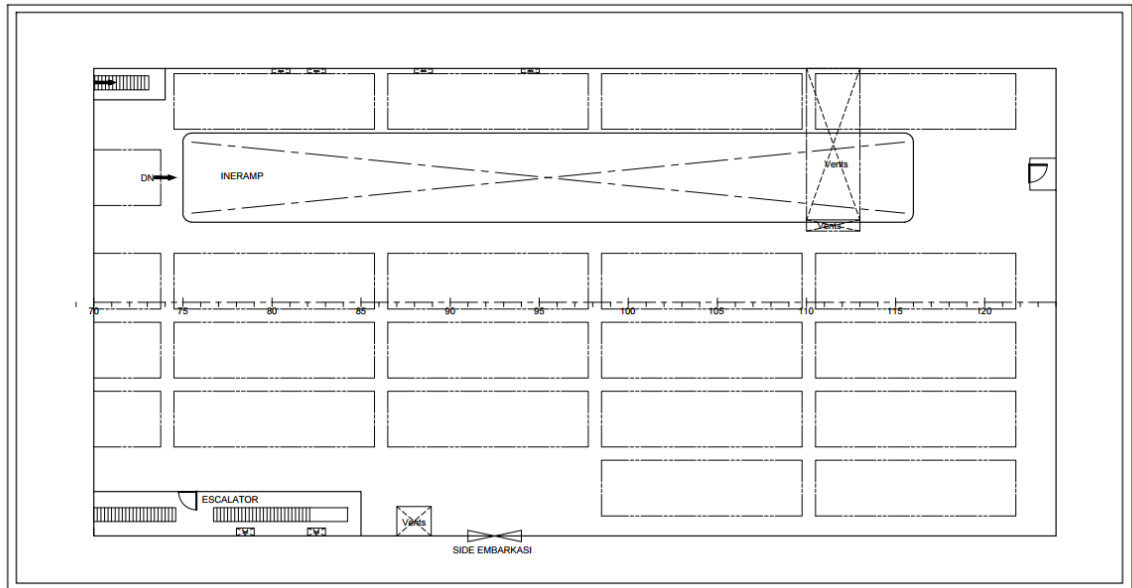
Gambar 4.11 General Arrangement Upper *Car Deck* Tampak Atas — Kondisi Sebelum Modifikasi

(Sumber: Gambar Desain AutoCAD)

Gambar 4.11 menampilkan kondisi tata letak *upper Car Deck* pada keadaan semula (*existing*) dalam proyeksi tampak atas. Dek ini memiliki panjang efektif 90,4meter yang mencakup rentang *frame* nomor 74 hingga 116. Pada bagian kiri (haluan) terdapat *ineramp* atau rampa internal yang menghubungkan dek kendaraan bawah dengan *upper Car Deck*, serta akses *escalator* untuk penumpang di sisi kiri buritan. Area tengah dek dipergunakan sebagai ruang parkir kendaraan yang terbagi dalam beberapa lajur memanjang kapal.

Pada kondisi *existing*, tata letak parkir yang dapat diakomodasi adalah kapasitas untuk 20unit mobil penumpang. Posisi *web frame* pada kondisi ini memiliki tinggi profil yang relatif besar (total tinggi 550 mm), sehingga menimbulkan batasan geometri terhadap ruang vertikal yang tersedia di atas area parkir. Meskipun batasan ini tidak secara langsung terlihat pada tampilan tampak atas, dampaknya tercermin pada konfigurasi lajur parkir yang ada.

GENERAL ARRANGEMENT TAMPAK ATAS



Gambar 4.12 General Arrangement Upper *Car Deck* Tampak Atas — Kondisi Sesudah Modifikasi

(Sumber: Gambar Desain AutoCAD)

Gambar 4.12 memperlihatkan tata letak *upper Car Deck* setelah optimalisasi *web frame* dilakukan. Pada tampilan tampak atas, perbedaan yang paling signifikan terlihat pada konfigurasi lajur parkir kendaraan di bagian tengah dek. Dengan berkurangnya tinggi *web plate* sebesar 300 mm, ruang vertikal yang tersedia di bawah *upper Car Deck* bertambah secara signifikan, memungkinkan penambahan lajur parkir kendaraan roda empat (*car slot*) yang sebelumnya tidak dapat diakomodasi.

Berdasarkan perhitungan kapasitas yang mengacu pada dimensi standar kendaraan roda empat dan *clearance* minimum yang dipersyaratkan, penambahan *clearance* sebesar 300 mm ini menghasilkan penambahan kapasitas sebanyak **7 unit kendaraan roda empat per trip**. Penambahan ini ditunjukkan oleh bertambahnya kotak-kotak *slot* parkir pada bagian tertentu dari *upper Car Deck* di Gambar 4.Z dibandingkan dengan Gambar 4.Y.

Selain penambahan kapasitas, perubahan tata letak ini juga mempertahankan akses dan sirkulasi kendaraan yang ada, termasuk lebar *ineramp*, posisi *escalator*, dan jalur sirkulasi antar lajur. Hal ini penting untuk memastikan bahwa optimalisasi yang dilakukan tidak mengganggu operasional dek dan keselamatan mobilisasi kendaraan saat proses *embarking* dan *disembarking*.

Perbandingan kedua gambar ini secara keseluruhan menunjukkan bahwa modifikasi *web frame* yang dilakukan bukan sekadar perubahan struktural pada tingkat

komponen, melainkan menghasilkan dampak operasional yang nyata dan terukur pada tingkat sistem dek secara keseluruhan.

4.6.1 Kondisi Upper *Car Deck* Setelah Redesain Web Frame



Gambar 4.13 Kondisi Upper *Car Deck* (Deck-C) Setelah Implementasi Redesain Web Frame pada Rentang Frame 74–116 Sisi Kiri

(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Gambar 4.13 merupakan dokumentasi kondisi *upper Car Deck* yang pada kapal ini diberi label **Deck-C** setelah seluruh proses redesain *web frame* pada rentang *frame* 74–116 sisi kiri telah selesai dilaksanakan. Gambar ini diambil dari posisi dalam dek menghadap ke arah haluan, memperlihatkan konfigurasi aktual ruang dek beserta kendaraan-kendaraan roda empat yang sudah terparkir di dalamnya, memberikan konteks visual yang nyata terhadap hasil akhir dari optimalisasi yang telah dianalisis dalam penelitian ini.

Beberapa hal penting dapat diamati dari Gambar 4.13. struktur langit-langit (*overhead structure*) dek yang terlihat di bagian atas gambar menampilkan profil *web frame* yang telah dimodifikasi tampak lebih ramping dibandingkan kondisi *existing* sebelumnya. Profil yang kini terpasang adalah T 250 × 10 FP 240 × 16 mm, yang secara visual terlihat lebih rendah profilnya dibandingkan profil lama T 550 × 10 FP 200 × 16 mm, mencerminkan pengurangan tinggi *web plate* sebesar 300 mm yang menjadi inti dari modifikasi.

Ruang vertikal (*vertical clearance*) yang tersedia di atas kendaraan-kendaraan parkir terlihat lebih lapang dibandingkan kondisi sebelum modifikasi. Penambahan ruang bebas sebesar 300 mm ini yang berasal dari reduksi tinggi *web plate* secara operasional memungkinkan peningkatan kapasitas parkir kendaraan roda empat. Dari gambar, tampak kendaraan-kendaraan berukuran sedan dan MPV dapat terparkir dengan *clearance* yang memadai di bawah *overhead structure* hasil modifikasi.

Secara keseluruhan, Gambar 4.13 merupakan bukti visual yang paling langsung dan kuat dari penelitian ini: bahwa optimalisasi yang dirancang secara teoritis yakni pengurangan dimensi *web frame* sesuai standar BKI 2025 telah berhasil diterapkan secara nyata pada kapal dan menghasilkan peningkatan kualitas ruang *upper Car Deck* yang dapat diamati secara empiris. Ini sekaligus menjembatani antara analisis perhitungan yang dilakukan dalam penelitian dengan implementasi praktis di industri perkapalan.

4.7 ANALISIS KELAYAKAN EKONOMI MODIFIKASI WEB FRAME (Berbasis Data OPEX Aktual | Rute Merak–Bakauheni | April 2026)

4.7.1 Biaya Operasional Kapal (OPEX)

4.7.1.1 Metodologi Perhitungan OPEX

Biaya operasional kapal (*ship operational costs* / OPEX) dihitung menggunakan pendekatan engineering berbasis *Specific Fuel Oil Consumption* (SFOC) resmi pabrikan mesin, yaitu mesin **NKK-SEMT-PIELSTICK 14PC2-6V** (MAN Energy Solutions., 2023). Metode ini telah digunakan secara luas dalam analisis biaya operasional kapal ferry di Indonesia (Amanda et al., 2024)

Total daya propulsi dioperasikan pada 80% MCR (*Maximum Continuous Rating*) sesuai praktik operasional ferry di Selat Sunda untuk efisiensi bahan bakar optimal sambil mempertahankan cadangan daya yang cukup bagi kondisi cuaca. Kurniawan et al. (2022) mencatat bahwa rute Merak–Bakauheni memiliki waktu transit rata-rata 2–2,5 jam dengan 3–4 round trip per hari pada kapal besar (Kurniawan et al., 2022)

4.7.1.2 Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar

Langkah 1: Daya Propulsi (80% MCR)

Daya propulsi rata-rata dihitung dari 80% MCR total mesin:

$$P_{\text{prop}} = 0,80 \times P_{\text{MCR total}} = 0,80 \times 13.386 \text{ kW} = 10.709 \text{ kW}$$

Referensi: (MAN Energy Solutions., 2023) – SFOC resmi mesin SEMT Pielstick PC2.6B.

Langkah 2: Konsumsi BBM Propulsi

$$\dot{m}_{\text{propulsi}} = P_{\text{prop}} \times \text{SFOC} = 10.709 \text{ kW} \times 0,182 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 1.949 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} = 1,95 \text{ ton/jam}$$

SFOC (*Specific Fuel Oil Consumption*) pada beban 80% adalah 182 g/kWh berdasarkan spesifikasi teknis resmi mesin PC2-6 series (MAN Energy Solutions., 2023)

Langkah 3: Konsumsi Mesin Bantu (Auxiliary)

$$\dot{m}_{\text{auxiliary}} = 1.200 \text{ kW} \times 0,21 \text{ kg/kWh} = 0,25 \text{ ton/jam}$$

Langkah 4: Total Konsumsi saat Berlayar

$$\dot{m}_{\text{total}} = \dot{m}_{\text{propulsi}} + \dot{m}_{\text{auxiliary}} = 1,95 + 0,25 = 2,20 \text{ ton/jam}$$

Langkah 5: Konsumsi per One-Way Trip (Sea Time 2 Jam)

$$\dot{m}_{fuel} = 2,20 \text{ ton/jam} \times 2 \text{ jam} = 4,40 \text{ ton}$$

$$V_{total} = m_{fuel} / \rho = 4.400 \text{ kg} / 0,96 \text{ kg/liter} = 4.583,33 \text{ liter}$$

dimana ρ adalah densitas MFO Low Sulphur $\approx 0,96 \text{ kg/liter}$.

Langkah 6: Biaya BBM per One-Way Trip

$$V_{total} = V_{fuel} \times H_{BBM} = 4.583,33 \text{ liter} \times Rp 10.460 = Rp 47.941.632$$

Harga BBM MFO Low Sulphur sebesar Rp 10.460/liter merupakan data yang ditetapkan oleh pengguna berdasarkan harga aktual April 2026.

4.7.1.3 Komponen Non-Fuel OPEX

Komponen biaya non-bahan bakar dihitung secara harian berdasarkan data industri ferry Ro-Ro di Indonesia (Amanda et al., 2024). kemudian diprorata per one-way trip dengan membagi 3 (jumlah trip per hari):

Tabel 4.7 Rincian Biaya Operasional (OPEX) per One-Way Trip

No.	Komponen OPEX	Biaya/Trip (Rp)	% Total	Dasar Perhitungan
1.	BBM (MFO Low Sulphur)	Rp 47.941.632	73,3%	$4.583,33 \text{ L} \times Rp 10.460/L$ (Langkah 6)
2.	Crew / ABK	Rp 2.920.000	4,5%	$70 \text{ orang} \times Rp 7,5 \text{ jt/bln} \div 30 \text{ hari} \div 3 \text{ trip}$
3.	Lube Oil + Stores	Rp 1.330.000	2,0%	$SLOC 1,2 \text{ g/kWh}$, prorata harian $\div 3$
4.	Maintenance & Repair	Rp 3.330.000	5,1%	$2,5\% \text{ nilai kapal Rp } 200 \text{ M/tahun} \div 340 \div 3$
5.	Insurance (Hull + P&I)	Rp 1.500.000	2,3%	$1,5\% \text{ nilai kapal Rp } 200 \text{ M/tahun} \div 340 \div 3$
6.	Port Dues & Fees	Rp 6.670.000	10,2%	$Berthing, wharfage, pilotage$ $GT 13.413 \div 3$
7.	Admin, Survey, Misc.	Rp 1.670.000	2,6%	$Overhead \text{ regulasi, harian} \div 3$
TOTAL	TOTAL OPEX / TRIP	Rp 65.361.632	100%	

4.7.1.4 Scaling OPEX – Per Trip hingga Per Tahun

Berdasarkan profil operasional 3 one-way trip per hari selama 320 hari per tahun (960 trip/tahun), total OPEX dapat diskalakan sebagai berikut:

Tabel 4.8 *Scaling OPEX* – Per Trip hingga Per Tahun

Skala Waktu	Jumlah Trip	BBM (Rp)	Non-Fuel (Rp)	TOTAL OPEX (Rp)
Per One-Way Trip	1	Rp 47.941.632	Rp 17.420.000	Rp 65.361.632
Per Round Trip	2	Rp 95.883.264	Rp 34.840.000	Rp 130.723.264
Per Hari (3 trip)	3	Rp 143.824.896	Rp 52.260.000	Rp 196.084.896
Per Bulan (90 trip)	90	Rp 4.314.746.880	Rp 1.567.800.000	Rp 5.882.546.880
Per Tahun (960 trip)	960	Rp 46.023.966.720	Rp 16.723.200.000	Rp 62.747.166.720

4.7.2 Analisis Pendapatan Inkremental Modifikasi Web Frame

Analisis ini berfokus pada **pendapatan inkremental**, yaitu tambahan pendapatan yang secara langsung dihasilkan oleh modifikasi web frame berupa penambahan 7 slot kendaraan roda 4 per trip. Pendekatan ini sesuai dengan prinsip *incremental analysis* dalam analisis ekonomi teknik (Blank Leland & Tarquin Anthony, 2024).

4.7.2.1 Biaya Operasional Inkremental

Penambahan 7 slot kendaraan roda 4 menghasilkan biaya operasional inkremental yang sangat kecil karena: (1) berat tambahan 7 mobil \approx 10,5 ton dari DWT 4.024 ton setara 0,26% – peningkatan konsumsi BBM diabaikan; (2) *Gross Tonnage* kapal tidak berubah – biaya pelabuhan tetap; (3) tidak ada penambahan ABK. Kondisi ini merupakan karakteristik umum proyek *capacity expansion* pada kapal yang sudah beroperasi.

Untuk mengakomodasi ketidakpastian, tiga skenario biaya inkremental digunakan: **Skenario A (0%)** – tanpa biaya tambahan;

Skenario B (3%) – biaya overhead handling moderat; **Skenario C (5%)**
– skenario konservatif.

4.7.2.2 Perhitungan Pendapatan Inkremental per Trip

$$Rev_{\text{tambahan/trip}} = 7 \text{ unit} \times Rp 481.800 \times \text{Occupancy}$$

$$Rev_{\text{tambahan/trip}} (100\% \text{ occ}) = Rp 3.372.600$$

$$Rev_{\text{tambahan/trip}} (100\% \text{ occ}) = Rp 3.372.600 \times 960 \text{ trip} \\ = Rp 3.237.696.000$$

Tabel 4.9 *Incremental Cash Flow Per Trip* – Tiga Skenario (Berbagai Occupancy)

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Occ (%)	Rev Inkrem /Trip (Rp)	Skenario A Opex Inc.	CF Bersih A /Trip (Rp)	Skenario B Opex Inc. 3%	CF Bersih B /Trip (Rp)	Skenario C Opex Inc. 5%
40%	Rp 1.349.040	Rp 0	Rp 1.349.040	Rp 40.471	Rp 1.308.569	Rp 67.452
50%	Rp 1.686.300	Rp 0	Rp 1.686.300	Rp 50.589	Rp 1.635.711	Rp 84.315
60%	Rp 2.023.560	Rp 0	Rp 2.023.560	Rp 60.707	Rp 1.962.853	Rp 101.178
70%	Rp 2.360.820	Rp 0	Rp 2.360.820	Rp 70.825	Rp 2.289.995	Rp 118.041
80%	Rp 2.698.080	Rp 0	Rp 2.698.080	Rp 80.942	Rp 2.617.138	Rp 134.904
90%	Rp 3.035.340	Rp 0	Rp 3.035.340	Rp 91.060	Rp 2.944.280	Rp 151.767
100%	Rp 3.372.600	Rp 0	Rp 3.372.600	Rp 101.178	Rp 3.271.422	Rp 168.630

4.7.3 Net Present Value (NPV)

4.7.3.1 Konsep dan Rumus

Net Present Value (NPV) adalah selisih antara nilai sekarang dari seluruh arus kas masuk dengan biaya investasi awal. Metode ini

mengakomodasi konsep *time value of money* sehingga merupakan indikator kelayakan yang paling komprehensif (Blank Leland & Tarquin Anthony, 2024).

$$NPV = \sum [CF_t / (1 + r)^t] - I_0 \text{ untuk } t = 1, 2, \dots, 10$$

Dimana:

CF_t = arus kas inkremental tahun ke-t

r = tingkat diskonto (12%)

I₀ = investasi awal

t = periode tahun

Keputusan:

$NPV > 0 \rightarrow \text{LAYAK} \mid NPV < 0 \rightarrow \text{TIDAK LAYAK}$ (Pasaribu, 2020).

4.7.3.2 PVIFA dan Perhitungan Faktor Diskonto

Present Value Interest Factor of Annuity (PVIFA) untuk r=12%, n=10 tahun:

$$PVIFA (12\%, 10) = \sum [1/(1 + 0,12)^t] = 5.650223$$

4.7.3.3 Tabel Arus Kas dan Hasil NPV

Tabel 4.10 Tabel Arus Kas Tahunan Inkremental – Skenario A (Occupancy 70%)

Tabel menggunakan CF Skenario A (0% biaya inkremental), Occupancy 70%

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Tahun (t)	CF/Tahun (Rp)	Faktor PV $1/(1,12)^t$	Present Value (Rp)	Kumulatif PV (Rp)
0	(Rp 1.146.258.186)	1,000000	(Rp 1.146.258.186)	(Rp 1.146.258.186)
1	Rp 2.266.387.200	0.892857	Rp 2.023.560.000	Rp 877.301.814
2	Rp 2.266.387.200	0.797194	Rp 1.806.750.000	Rp 2.684.051.814
3	Rp 2.266.387.200	0.711780	Rp 1.613.169.643	Rp 4.297.221.457
4	Rp 2.266.387.200	0.635518	Rp 1.440.330.038	Rp 5.737.551.495
5	Rp 2.266.387.200	0.567427	Rp 1.286.008.963	Rp 7.023.560.458
6	Rp 2.266.387.200	0.506631	Rp 1.148.222.288	Rp 8.171.782.746

7	Rp 2.266.387.200	0.452349	Rp 1.025.198.472	Rp 9.196.981.218
8	Rp 2.266.387.200	0.403883	Rp 915.355.778	Rp 10.112.336.996
9	Rp 2.266.387.200	0.360610	Rp 817.281.945	Rp 10.929.618.941
10	Rp 2.266.387.200	0.321973	Rp 729.716.022	Rp 11.659.334.963
NPV			Rp 12.805.593.149	Rp 11.659.334.963

4.7.3.4 Hasil NPV – Tiga Skenario

Tabel 4.11 Hasil NPV – Tiga Skenario

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Skenario	CF/Tahun (Rp)	NPV (Rp)	Kelayakan
A (0%)	Rp 2.266.387.200	Rp 11.659.334.963	✓ LAYAK (NPV > 0)
B (3%)	Rp 2.198.395.200	Rp 11.275.164.999	✓ LAYAK (NPV > 0)
C (5%)	Rp 2.153.067.840	Rp 11.019.055.305	✓ LAYAK (NPV > 0)

Berdasarkan Tabel 4.10 dan 4.11, nilai NPV pada ketiga skenario biaya inkremental bersifat positif ($NPV > 0$) untuk occupancy 70%. Nilai NPV Skenario A sebesar Rp 11.659.334.963 menunjukkan bahwa nilai kini seluruh arus kas inkremental selama 10 tahun melampaui biaya investasi sebesar Rp 1.146.258.186 dengan margin yang sangat signifikan. Berdasarkan kriteria NPV, proyek modifikasi web frame kapal rute merak – bakauheni ini dinyatakan **LAYAK** pada ketiga skenario.

4.7.4 Internal Rate of Return (IRR)

IRR adalah tingkat diskonto yang membuat NPV proyek sama dengan nol. IRR dihitung secara numerik (iterasi) karena tidak memiliki solusi analitik langsung untuk $n > 1$ (Blank & Tarquin, 2024).

$$0 = \sum [CF_t / (1 + IRR)^t] - I_0 \rightarrow \text{cari nilai IRR numerik}$$

Keputusan: $IRR > WACC (12\%) \rightarrow \text{LAYAK}$.

Perlu dicatat bahwa nilai IRR yang diperoleh cenderung tinggi karena karakteristik proyek *capacity expansion*: investasi relatif kecil dibandingkan tambahan pendapatan tahunan yang hampir 3× lipat. Hal ini umum terjadi pada proyek penambahan kapasitas di atas aset yang sudah beroperasi dan tidak memerlukan infrastruktur baru.

Tabel 4.12 Hasil IRR – Tiga Skenario Biaya Inkremental

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Occupancy (%)	CF Sken A/Thn (Rp)	IRR Sken A (%)	CF Sken C/Thn (Rp)	IRR Sken C (%)	Keputusan
40%	Rp 1.295.078.400	112.9%	Rp 1.230.324.480	107.3%	✓ LAYAK
50%	Rp 1.618.848.000	141.2%	Rp 1.537.905.600	134.1%	✓ LAYAK
60%	Rp 1.942.617.600	169.5%	Rp 1.845.486.720	161.0%	✓ LAYAK
70%	Rp 2.266.387.200	197.7%	Rp 2.153.067.840	187.8%	✓ LAYAK
80%	Rp 2.590.156.800	226.0%	Rp 2.460.648.960	214.7%	✓ LAYAK
90%	Rp 2.913.926.400	254.2%	Rp 2.768.230.080	241.5%	✓ LAYAK
100%	Rp 3.237.696.000	282.5%	Rp 3.075.811.200	268.3%	✓ LAYAK

4.7.5 Payback Period (PP)

Payback Period adalah waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan seluruh investasi awal melalui arus kas bersih proyek ((Blank & Tarquin, 2024). Semakin pendek PP, semakin rendah risiko finansial.

$$PP = I_0 / CF \text{ per Tahun} \quad (\text{dalam bulan: } PP \times 12)$$

Tabel 4.13 Hasil Payback Period – Tiga Skenario

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Occ (%)	CF Sken A/Thn (Rp)	PP Sken A (Bulan)	CF Sken C/Thn (Rp)	PP Sken C (Bulan)	Status
---------	--------------------	-------------------	--------------------	-------------------	--------

40%	Rp 1.295.078.400	10.6 bln	Rp 1.230.324.480	11.2 bln	✓ LAYAK
50%	Rp 1.618.848.000	8.5 bln	Rp 1.537.905.600	8.9 bln	✓ LAYAK
60%	Rp 1.942.617.600	7.1 bln	Rp 1.845.486.720	7.5 bln	✓ LAYAK
70%	Rp 2.266.387.200	6.1 bln	Rp 2.153.067.840	6.4 bln	✓ LAYAK
80%	Rp 2.590.156.800	5.3 bln	Rp 2.460.648.960	5.6 bln	✓ LAYAK
90%	Rp 2.913.926.400	4.7 bln	Rp 2.768.230.080	5.0 bln	✓ LAYAK
100%	Rp 3.237.696.000	4.2 bln	Rp 3.075.811.200	4.5 bln	✓ LAYAK

4.7.6 Break Even Point (BEP)

BEP (Titik Impas) menunjukkan jumlah unit produksi atau waktu operasi hingga investasi tertutup sepenuhnya (Athallah et al., 2025). Dalam penelitian ini BEP dihitung dalam satuan trip dan occupancy minimum.

BEP dalam Satuan Trip:

$$BEP_{\text{trip}} = \frac{I_0}{REV_{\text{tambahan per trip}}}$$

$$BEP_{\text{trip}} (100\% \text{ occ}) = Rp 1.146.258.186 / Rp 3.372.600 = 340 \text{ trip}$$

BEP Occupancy Minimum (NPV = 0, r = 12%, n = 10 tahun):

$$PVIFA (12\%, 10) = 5.650223$$

$$CF \text{ minimum/tahun} = Rp 1.146.258.186 / 5.650223 = Rp 202.869.547$$

$$Occ \text{ minimum} = Rp 202.869.547 / Rp 3.237.696.000 \times 100\% = 6.27\%$$

Tabel 4.14 Hasil BEP – Tiga Skenario

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Skenario	Rev/Trip 100% occ (Rp)	BEP Trip	BEP Hari	BEP Bulan	Occ Min (%)
----------	---------------------------	-------------	-------------	--------------	----------------

A (0%)	Rp 3.372.600	340 trip	114 hari	≈3.8 bln	6.27%
B (3%)	Rp 3.271.422	351 trip	117 hari	≈3.9 bln	6.46%
C (5%)	Rp 3.203.970	358 trip	120 hari	≈4.0 bln	6.60%

4.7.7 Analisis Sensitivitas Occupancy

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji ketahanan (*robustness*) kelayakan proyek terhadap berbagai skenario tingkat keterisian slot mobil tambahan. Hal ini penting mengingat asumsi occupancy 100% merupakan kondisi ideal (Blank Leland & Tarquin Anthony, 2024).

Tabel 4.15 Analisis Sensitivitas Occupancy – Skenario A & C

(Sumber: Hasil Perhitungan)

Skenario	Occ (%)	CF Sken A /Tahun (Rp)	NPV Sken A (Rp)	IRR A	CF Sken C /Tahun (Rp)	NPV Sken C (Rp)
Sangat Pesimistis	40%	Rp 1.295.078.400	Rp 6.171.223.613	112.9%	Rp 1.230.324.480	Rp 5.805.349.523
Pesimistis	50%	Rp 1.618.848.000	Rp 8.000.594.063	141.2%	Rp 1.537.905.600	Rp 7.543.251.451
Moderat Rendah	60%	Rp 1.942.617.600	Rp 9.829.964.513	169.5%	Rp 1.845.486.720	Rp 9.281.153.378
Moderat (Dasar)	70%	Rp 2.266.387.200	Rp 11.659.334.963	197.7%	Rp 2.153.067.840	Rp 11.019.055.305
Moderat Tinggi	80%	Rp 2.590.156.800	Rp 13.488.705.413	226.0%	Rp 2.460.648.960	Rp 12.756.957.233
Optimis	90%	Rp 2.913.926.400	Rp 15.318.075.862	254.2%	Rp 2.768.230.080	Rp 14.494.859.160
Sangat Optimis	100%	Rp 3.237.696.000	Rp 17.147.446.312	282.5%	Rp 3.075.811.200	Rp 16.232.761.087

Tabel 4.15 menunjukkan bahwa pada seluruh tingkat occupancy yang diuji (40%–100%), proyek tetap menghasilkan NPV positif dan IRR jauh di atas WACC 12% pada kedua skenario. **Proyek sangat robust terhadap risiko penurunan permintaan.** Occupancy minimum agar proyek tidak merugi dalam 10 tahun adalah sangat rendah (< 7%), jauh di bawah occupancy aktual kapal yang rata-rata $\geq 70\%$.

4.7.8 Ringkasan Hasil Analisis Kelayakan Ekonomi

Tabel 4.16 Ringkasan Hasil Analisis Kelayakan Ekonomi

(Sumber: Hasil Perhitungan)

1.	Biaya Investasi	Rp 1.146.258.186	Rp 1.146.258.186
2.	CF Inkremental/Tahun (70% occ)	Rp 2.266.387.200	Rp 2.153.067.840
3.	NPV (r=12%, n=10 tahun)	Rp 11.659.334.963	Rp 11.019.055.305
4.	IRR	197.7%	187.8%
5.	Payback Period	±6.1 Bulan	±6.4 Bulan
6.	BEP (100% occ)	±340 trip	±358 trip
7.	Occupancy Minimum (NPV=0)	6.27%	6.60%
8.	Kelayakan	✓ LAYAK	✓ LAYAK

Berdasarkan hasil analisis kelayakan menggunakan empat metode (NPV, IRR, Payback Period, dan BEP), proyek modifikasi web frame yang menghasilkan penambahan kapasitas 7 unit kendaraan roda 4 per trip dinyatakan **LAYAK secara ekonomi** pada kedua skenario biaya inkremental dan seluruh tingkat occupancy yang diuji. Investasi sebesar **Rp 1.146.258.186** memberikan tingkat pengembalian yang sangat signifikan dengan modal yang dapat kembali dalam waktu kurang dari 1 tahun operasi.

BAB V

Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan seluruh rangkaian analisis yang telah dilakukan dalam penelitian ini mulai dari pengumpulan dan verifikasi data lapangan, perhitungan beban desain, analisis *section modulus*, perancangan profil *frame modified*, hingga evaluasi kelayakan ekonomi dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Profil *web frame existing* pada *upper Car Deck* (T 550 × 10 FP 200 × 16 mm) terbukti berada dalam kondisi *over-designed* dengan nilai *section modulus* aktual sebesar 2.356 cm³, atau 125% di atas nilai minimum yang disyaratkan BKI 2025 sebesar 1.047 cm³. Setelah dilakukan redesain menjadi profil T 250 × 10 FP 240 × 16 mm — dengan pengurangan tinggi *web plate* dari 550 mm menjadi 250 mm dan pelebaran *face plate* dari 200 mm menjadi 240 mm — diperoleh nilai *section modulus* aktual sebesar 1.560 cm³. Nilai ini tetap melampaui persyaratan minimum BKI 2025 dengan margin keamanan 48,9%, sehingga profil *frame modified* dinyatakan **memenuhi persyaratan kekuatan struktur** sesuai aturan kelas.
2. Pengurangan tinggi *web plate* sebesar 300 mm menghasilkan penambahan ruang vertikal (*clearance*) yang memungkinkan peningkatan kapasitas parkir kendaraan pada *upper Car Deck*. Berdasarkan perhitungan tata letak dan dimensi standar kendaraan roda empat, penambahan *clearance* tersebut menghasilkan **penambahan kapasitas muatan sebesar 7 unit kendaraan roda empat per trip**. Penambahan kapasitas ini telah diimplementasikan secara nyata pada dan diverifikasi oleh Surveyor BKI selama proses *docking* di Graving Dock dan dibuktikan secara nyata dengan menampilkan kondisi aktual lapangan setelah pengerjaan, menegaskan bahwa peningkatan kapasitas dapat dicapai sepenuhnya dengan tetap memenuhi persyaratan kekuatan struktur sesuai kelas.
3. Analisis kelayakan ekonomi menggunakan empat metode — *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Payback Period* (PP), dan *Break-Even Point* (BEP) — pada tingkat *occupancy* dasar 70% dan tingkat diskonto 12% menunjukkan hasil sebagai berikut: NPV sebesar Rp 11,66 miliar (positif, layak); IRR sebesar 197,7% (jauh di atas WACC 12%, layak); *Payback Period* ±6,1 bulan (kurang dari 1 tahun operasi, sangat layak); dan BEP tercapai pada 340 *trip* atau *occupancy* minimum

6,27%. Analisis sensitivitas terhadap berbagai tingkat *occupancy* (40%–100%) dan tiga skenario biaya inkremental (0%, 3%, 5%) menunjukkan bahwa proyek tetap layak secara ekonomi pada seluruh skenario yang diuji. Dengan biaya investasi awal sebesar Rp 1.146.258.186, proyek modifikasi *web frame* dinyatakan **LAYAK secara ekonomi** dan memberikan tingkat pengembalian yang sangat signifikan.

5.2 Saran

Berdasarkan temuan dan keterbatasan penelitian ini, beberapa saran diajukan untuk keperluan pengembangan penelitian selanjutnya maupun implementasi praktis di industri perkapalan.

1. Penelitian ini menggunakan metode perhitungan *section modulus* manual sebagai satu-satunya pendekatan analisis struktural. Untuk memperoleh validasi yang lebih komprehensif, disarankan penelitian lanjutan melakukan verifikasi hasil menggunakan metode *Finite Element Method* (FEM) dengan perangkat lunak seperti ANSYS atau Abaqus, sehingga distribusi tegangan aktual pada profil *frame modified* dapat diamati secara lebih mendetail, termasuk pada titik-titik kritis seperti sambungan *bracket* dan area transisi profil.
2. Penelitian ini tidak mencakup analisis stabilitas kapal pasca modifikasi. Mengingat modifikasi *web frame* berdampak pada pengurangan berat struktur sebesar 4,23 ton dan penambahan muatan 7 kendaraan, disarankan dilakukan analisis stabilitas menggunakan perangkat lunak *Maxsurf Stability* untuk memverifikasi bahwa kondisi *GM* (metacentric height) dan kurva lengan tegak (*GZ curve*) kapal setelah modifikasi tetap memenuhi persyaratan IMO MSC.267(85) dan peraturan stabilitas BKI yang berlaku.
3. Penelitian ini dibatasi pada satu kapal dengan konfigurasi spesifik (GRT 13.413 ton, rute Merak–Bakauheni). Disarankan penelitian serupa dilakukan pada kapal Ro-Ro dengan ukuran dan konfigurasi yang berbeda misalnya kapal berukuran lebih kecil (GRT 5.000–8.000 ton) atau yang beroperasi pada rute dengan kondisi gelombang lebih ekstrem untuk menguji generalitas pendekatan optimalisasi *section modulus* ini pada konteks yang lebih luas.
4. Dari perspektif industri, hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan oleh pemilik kapal dan galangan dalam merencanakan modifikasi serupa pada kapal-kapal Ro-Ro yang beroperasi di Indonesia, terutama yang memiliki kondisi *over-designed* pada

komponen struktural tertentu. Namun demikian, setiap implementasi tetap harus melalui proses evaluasi individual terhadap masing-masing kapal, mengingat perbedaan kondisi operasional, usia kapal, dan spesifikasi teknis yang dapat memengaruhi hasil analisis.

5. Analisis kelayakan ekonomi dalam penelitian ini menggunakan data tarif dan asumsi *occupancy* yang bersifat aktual per April 2026. Mengingat fluktuasi tarif penyeberangan dan kondisi pasar transportasi laut yang dinamis, disarankan dilakukan pembaruan analisis ekonomi secara berkala khususnya apabila terdapat perubahan kebijakan tarif atau perubahan harga bahan bakar yang signifikan agar proyeksi kelayakan finansial tetap relevan dengan kondisi operasional terkini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alamsyah, A., Falevi, A. R., Wulandari, A. I., Pawara, M. U., Setiawan, W., & Arifuddin, A. M. N. (2021). Investigating the Local Stress of Car Deck Ro-Ro 5000 GT. *EPI International Journal of Engineering*, 4(1), 57–62. <https://doi.org/10.25042/epi-ije.022021.08>
- Alamsyah, A., Zulkarnaen, Z., & Suardi, S. (2021). The Stability Analyze of KM. Rejeki Baru Kharisma of Tarakan – Tanjung Selor Route. *TEKNIK*, 42(1), 52–62. <https://doi.org/10.14710/teknik.v42i1.31283>
- Amanda, M., Kelana, S., & Farhana, A. (2024a). Evaluation of Ferry Transport Tariffs Based on Operational Costs of Ships Operating on The Merak-Bakauheni Route. *AtlantisPress*, 29–34. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-486-0_5
- Amanda, M., Kelana, S., & Farhana, A. (2024b). Evaluation of Ferry Transport Tariffs Based on Operational Costs of Ships Operating on The Merak-Bakauheni Route. *Atlantis Press*, 29–34. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-486-0_5
- Anugerah, B. (2022). Pemberdayaan Angkatan Laut Nasional Indonesia Dalam Rangka Memperkuat Pertahanan Nasional. *Jurnal Kebijakan Pembangunan*, 17(1), 151–166. <https://doi.org/10.47441/jkp.v17i1.237>
- Apriliani, I. M., Dewanti, L. P., Herawati, H., Riyantini, I., & Maulana, M. (2020). ANALISIS TEKNIS KAPAL HIBAH YANG BERBASIS DI PANGANDARAN BERDASARKAN STANDAR BIRO KLASIFIKASI INDONESIA (BKI). *ALBACORE Jurnal Penelitian Perikanan Laut*, 3(3), 235–240. <https://doi.org/10.29244/core.3.3.235-240>
- Ariany, Z., Hendra, A., & Febriary, S. (2018). STANDART PELAYANAN MINIMAL (SPM) DAN SISTEM LASING PADA KAPAL RO-RO UNTUK KESELAMATAN TRANSPORTASI PENYEBRANGAN LAUT (Studi Kasus KMP. LEGUNDI). *GEMA TEKNOLOGI*, 20(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/gt.v20i1.21081>
- Athallah, M., Satya, N., & Gafur, A. (2025). Technical and Economic Analysis of Yamaha E15CMHL Outboard Engine Use for 3 GT Fishing Boat Propulsion in Tlocor Village. *Journal of Mechanical, Electrical & Industrial Technology*, 2(1). <https://doi.org/10.35991/mein.v2i1.45>
- BKI. (2025). *BKI Rules for Classification and Construction* (Vol. 2).
- Blank, L., & Tarquin, A. (2024). *Engineering Economy(9th)*. McGraw-Hill Education.
- Chen, T., & van Hemmen, R. F. (2022). Pushing Boundaries: Investigating the Golden Ray and Other vessel catastrophes. *SNAME Maritime Convention*. <https://doi.org/10.5957/SMC-2022-052>
- Eko Budi Djatmiko, I., & Mas Murtedjo, I. (2017). *LONGITUDINAL STRENGTH AND LONGITUDINAL BUCKLING ANALYSIS ON SEISMIC SURVEY SHIP GEOMARIN IV*.
- Eyres, D. J., & Bruce, G. J. (2012). Decks, hatches, and superstructures. In *Ship Construction* (pp. 225–240). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097239-8.00019-2>

- Febriansyah, A., & Sahara, S. (2023). Analisis Pengaruh Program Tol Laut Terhadap Efisiensi Logistik Di Indonesia. *JURNAL EKONOMIKA45*, 10(2), 515–522. <https://doi.org/https://doi.org/10.30640/ekonomika45.v10i2.1956>
- Ika Wulandari, A., Uswah Pawara, M., & Yusuf Al-Hafidz, M. (2022). Analisis kekuatan struktur ramp door haluan pada kapal Ferry Ro-Ro 1500 GT dengan variasi beban menggunakan Finite Element Method. *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*. <https://doi.org/https://doi.org/10.24127/trb.v11i2.2161>
- Ika Wulandari ir, A., Widia Devi Rahmasari, N., Putri Adnyani, L., & Jamal Ikwani, R. (2021). Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan Fatigue Analysis Of 5000 GT Ferry Ro-Ro s Car Deck Using Finite Element Method H) Check for. *Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Kelautan*, 18(3), 160–170. <https://doi.org/10.14710/kapal>
- Ikhwan, A., Ikhwan, A. L., & Misbah, M. N. (2019). Optimasi Berat Konstruksi Sekat Melintang Kapal dengan Variasi Penegar Sekat. *Jurnal Teknik ITS*, 8(2), G136–G143. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v8i2.48071>
- Ikhwan, A. L., & Misbah, M. N. (2019). Optimasi Berat Konstruksi Sekat Melintang Kapal dengan Variasi Penegar Sekat. *Jurnal Teknik ITS*, 8(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v8i2.48071>
- Jokosisworo, S., & Sebastian, J. (2012). ANALISA FATIGUE KEKUATAN STERN RAMP DOOR AKIBAT BEBAN DINAMIS PADA KM. KIRANA I DENGAN METODE ELEMEN HINGGA DISKRIT ELEMEN SEGITIGA PLANE STRESS. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Kelautan*, 8(3), 119–125. <https://doi.org/10.14710/kpl.v8i3.3185>
- Juniarti, M. (2022). *OPTIMALISASI PERSIAPAN CAR DECK PADA KAPAL KM. KUMALA Diajukan dalam Rangka Penyelesaian Program Studi Diploma III Program Studi Diploma III Nautika. POLITEKNIK TRANSPORTASI SUNGAI DANAU DAN PENYEBRANGAN PALEMBANG.*
- Kalam, A. H., Mulyatno, I. P., & Rindo, G. (2017). Kajian Teknis Kekuatan Car Deck Pada Kapal Ferry Ro-Ro 500 GT Akibat Perubahan Muatan Dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 5(1). <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/naval>
- Kalam, A. H., Mulyatno, P., & Good, R. (2017). JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Kajian Teknis Kekuatan Car Deck Pada Kapal Ferry Ro-Ro 500 GT Akibat Perubahan Muatan Dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 5(1). <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/naval>
- Khamid, L. A. (2023). *OPTIMALISASI PENDINGINAN MAIN ENGINE DENGAN PEMASANGAN FRESH WATER COOLER DI MT. ANGGRAINI EXCELLENT. POLITEKNIK ILMU PELAYARAN SEMARANG.*
- Kim, H. S., Cho, M. G., Kwak, B., Choi, K., Park, J. I., Kim, J. H., & Kang, S. (2025). Design and Structural Safety Assessment of a Hinge-Based Hoistable Car Deck for Ro-Ro Vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/jmse13091662>
- Kurniawan, A., Hutapea, G., Hardianto, S., Suhartana, I. K., Yuliani, A., Putra, T. P., Siahaan, W. J., Hidayat, K., Humang, W. P., Paotonan, C., & Paroka, D. (2022). Finding a New

- Home: Rerouting of Ferry Ships from Merak–Bakauheni to East Indonesian Trajectories. *Sustainability*, 15(1), 630. <https://doi.org/10.3390/su15010630>
- LI Ziqi, FENG Shuoqiu, & YUE Jingxia. (2024). Local strength analysis and structural optimization design of Ro-Ro ship's vehicle deck. *Chinese Journal of Ship Research*, 81–89. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03653>
- Liu, B., Li, C., & Liu, K. (2024). Advanced Analysis of Marine Structures—Edition II. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(10), 1763. <https://doi.org/10.3390/jmse12101763>
- Majnarić, D., Bolf, D., & Zamarin, A. (2022). Structural Analysis of Hybrid Ro-Pax Ferry. *Journal of Maritime & Transportation Science, Special edition* 4(4), 115–135. <https://doi.org/10.18048/2022.04.08>
- MAN Energy Solutions. (2023). S.E.M.T. Pielstick PC2.6 B Marine Propulsion. *MAN Energy Solutions SE*. www.man-es.com
- Man, R., Bak, J., Son, C., Kim, S., & Jung, Y. (2021a). Automatic path generation for tractor-trailers according to the ramp slope of Ro-Ro ships. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(1), 316–329. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa080>
- Man, R., Bak, J., Son, C., Kim, S., & Jung, Y. (2021b). Automatic path generation for tractor-trailers according to the ramp slope of Ro-Ro ships. *Journal of Computational Design and Engineering*, 8(1), 316–329. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa080>
- Manik, P., Abdurrofi, A., Kiryanto, K., & Adietya, B. A. (2019). Analisis Pengaruh Variasi Lebar Kompartemen Samping terhadap Damage Stability pada Kapal Small Open Deck Ro-Ro Passenger. *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Kelautan*, 16(3), 115–122. <https://doi.org/10.14710/kapal.v16i3.25901>
- Meo, L. B., Tamba, P., & Gunadi, W. (2023). FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KEPUASAN PENUMPANG SERTA DAMPAKNYA TERHADAP LOYALITAS PENUMPANG: STUDI KASUS PADA PT ASDP INDONESIA FERRY (PERESRO) DI WILAYAH BIAK DAN SORONG. *Journal of Economics and Business UBS*, 12(4), 1–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.52644/joeb.v12i4.303>
- Miliniati, G. I., & Setyawan, D. (2021). Optimasi Web Frame dan Senta Kapal Sesuai Peraturan Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) Dengan Bahasa Pemrograman. *Jurnal Teknik ITS*, 10(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v10i2.80474>
- Mufidah, A., Nur Ardi Nugroho, P., & Karyono, T. (2020). EFEK PENAMBAHAN PANJANG TERHADAP KEKUATAN STRUKTUR KONSTRUKSI ALAS GANDA KAPAL RORO. *Jurnal Teknologi Maritim*.
- Munandar, R., Ardianti, A., Sitepu, G., Nugraha, A. M., Hamzah, H., & Hayatuddin, M. I. (2019). Study on Transverse Strength of the Deck-Container Ships due to Laying All Containers on Deck. *EPI International Journal of Engineering*, 2(2), 178–184. <https://doi.org/10.25042/epi-ije.082019.14>
- Naufal Zaibidi, M., Putu Sindu Asmara, I., & Nur Ardi Nugroho, P. (2021). Analisis Kekuatan Konstruksi Car Deck Akibat Penambahan Panjang pada Ro-Ro Passenger Ship. *Jurnal Teknologi Maritim*, 4(1), 9–18.

- Nur Ardi Nugroho, P., Abdullah, K., & Khairunnisa. (2023). Stress Analysis of 91.5 Metre Coal Carrier Pontoon with Variations of Frame Distance Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0). *Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, 17(1), 11–18.
- Nurwahyudy, A., Pitana, T., & Nugroho, S. (2024). Domestic RoRo Ferry Safety Performance Level Monitoring Based on Risk Assessment Model Using IoT: A Literature Review and Application. *TransNav*, 18(4), 785–793. <https://doi.org/10.12716/1001.18.04.04>
- Palippui, H. (2022). Selection Of Profiles In Midship Vessel Structure Operating The Regulations Of The Indonesian Classification Bureau. *Maritime Technology and Society*, 1(2), 46–52. <https://doi.org/10.62012/mp.v1i2.21952>
- Parvasi, S. P., Main, A. R., & Pacino, D. (2022). RoRo Ships Stowage Planning: Using a Novel MIP Model and Stability Constraints. *2022 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 1309–1311. <https://doi.org/10.1109/CoDIT55151.2022.9804029>
- Pawara, M. U., Alamsyah, A., Ikhwan, R. J., Siahaan, A. R., & Nugraha Arifuddin, A. M. (2022a). A Finite Element Analysis of Structural Strength of Ferry Ro-Ro's Car Deck. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional Dan Teknologi*, 22(1), 47–60. <https://doi.org/10.24036/invotek.v22i1.959>
- Pawara, M. U., Alamsyah, A., Ikhwan, R. J., Siahaan, A. R., & Nugraha Arifuddin, A. M. (2022b). A Finite Element Analysis of Structural Strength of Ferry Ro-Ro's Car Deck. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional Dan Teknologi*, 22(1), 47–60. <https://doi.org/10.24036/invotek.v22i1.959>
- Popa, A., Manea, M. G., & Ristea-Komornicki, M. V. (2024). FEM Structural Analysis for Ship's Beam Modification: A Case Study. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(4), 15848–15853. <https://doi.org/10.48084/etasr.7885>
- Pratama, M. H., Yudo, H., & Mulyanto, P. (2020). JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Analisis Kekuatan Konstruksi Car Deck Kapal Penyeberangan 1000 GT Akibat Perubahan Muatan Dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 8(3), 426. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Putra, F. H., Priyambodo Nur Ardi Nugroho, & Herijono, B. (2025). Structural Strength Analysis of Car Deck Re-Layout Impact on Ro-Ro Ships Using Structural Analysis Method. *Jurnal Konversi Energi Dan Manufaktur*, 61–69. <https://doi.org/10.21009/JKEM.10.1.7>
- Soupeze, J.-B. R. G. (2021). *Ships and Maritime Transportation* (pp. 1139–1164). https://doi.org/10.1007/978-3-030-47035-7_25
- Suci, I. M., Arafat, A. M. A., Sagita, R., Padaunan, A. M., & Alie, M. Z. M. (2020). STUDI PENELAAHAN BEBERAPA METODE PADA ANALISIS KEKUATAN KAPAL. *Riset Sains Dan Teknologi Kelautan*, 19–25. <https://doi.org/10.62012/sensistek.v3i1.13235>
- Tao, S., Zhu, L., Liang, Q., & Zhang, Q. (2024, June 9). Reliability Analysis of Ro-Ro Vessel Movable Vehicle Ramps Under Vehicle Moving Load. *Volume 2: Structures, Safety, and Reliability*. <https://doi.org/10.1115/OMAE2024-124733>

- Tira, Y., Ginting, M., Tua, H., & Simanjuntak, R. F. (2024). Tata Kelola Pelayanan Kapal Ro-Ro Dumai-Tanjung Kapal Provinsi Riau. *Journal of Law Education and Business*. <https://doi.org/https://doi.org/10.57235/jleb.v2i2.2594>
- Tri Pangestu, S., & Ika Wulandari, A. (2021). Respon struktur akibat perubahan jarak stiffener pada car deck Kapal Ferry Ro-Ro. *Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro*. <https://doi.org/https://doi.org/10.24127/trb.v10i2.1705>
- Tuswan, ., Zubaydi, A., Budipriyanto, A., & Sujiatanti, S. H. (2018a). Comparative Study on Ferry Ro-Ro's Car Deck Structural Strength by Means of Application of Sandwich Materials. *Proceedings of the 3rd International Conference on Marine Technology*, 87–96. <https://doi.org/10.5220/0008542800870096>
- Tuswan, ., Zubaydi, A., Budipriyanto, A., & Sujiatanti, S. H. (2018b). Comparative Study on Ferry Ro-Ro's Car Deck Structural Strength by Means of Application of Sandwich Materials. *Proceedings of the 3rd International Conference on Marine Technology*, 87–96. <https://doi.org/10.5220/0008542800870096>
- Tuswan, T., Rezaldy, A., Mursid, O., Yudo, H., & Rio Prabowo, A. (2023). Application of Sandwich Plate System (SPS) on 155 m Barge: Framing System Configuration, Weight saving, and Dynamic Characteristic Assessment. *Naše More*, 70(1), 58–76. <https://doi.org/10.17818/NM/2023/1.6>
- Wilastari, S. (2020). Pentingnya Badan Klasifikasi Kapal Dalam Industri Maritim. *Dinamika Bahari*, 1(1), 27–30. <https://doi.org/10.46484/db.v1i1.180>
- Windyandari, A., Sasono, E. J., Said, S. D., & Zakki, A. F. (2022). Ultimate Strength Analysis of Roro Passenger Ship under Combined Global and Local Load Using Nonlinear Finite Element Method. *Trends in Sciences*, 19(9), 3968. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.3968>
- Wulandari, A. I., Alamsyah, & Agusty, C. L. (2021). ANALISIS TEGANGAN REGANGAN PADA PELAT DECK DAN BOTTOM KAPAL FERRY RO-RO MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD. *Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, 15(1), 45–52. <https://doi.org/10.29122/jurnalwave.v15i1.4782>

LAMPIRAN

Lampiran 1: Poster Ilmiah tentang “OPTIMALISASI FRAME UPPER CAR DECK SEBAGAI UPAYA PENAMBAHAN MUATAN KAPAL”



OPTIMALISASI FRAME UPPER CAR DECK SEBAGAI UPAYA PENAMBAHAN MUATAN KAPAL

Studi Kasus: Ferry Ro-Ro Rute Merak-Bakauheni · Berdasarkan Rules for Hull BKI 2024
Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan · Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro · 2026

Dr. Zulfaidah Ariany S.T, M.T. | Reikhan Abiyoga Arini Putra

1. LATAR BELAKANG

Komponen web frame pada upper car deck kapal Ro-Ro berfungsi menahan beban lentur akibat kendaraan yang diparkir. Profil web frame yang ada sering dirancang dengan safety margin berlebihan (over-designed), sehingga membatasi ruang vertikal yang dapat dimanfaatkan untuk penambahan kapasitas muatan.

Pendekatan perancangan berbasis section modulus (W) memastikan kekuatan lentur dan integritas struktur deck terjaga sesuai standar Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), sekaligus memungkinkan optimalisasi dimensi profil web frame.

2. TUJUAN PENELITIAN (OBJECTIVES)

- Menganalisis pengaruh perubahan desain frame upper car deck terhadap nilai section modulus dan kekuatan struktur berdasarkan Rules for Hull BKI 2024
- Mengkaji potensi penambahan kapasitas muatan kendaraan roda empat melalui optimalisasi dimensi profil web frame

Hipotesis: Perubahan desain web frame tertentu tetap memenuhi persyaratan section modulus minimum BKI 2024 dan menghasilkan penambahan kapasitas muatan secara nyata.

3. METODOLOGI PENELITIAN

$$W = I / y \rightarrow W_{\min} = 0,55 \cdot e \cdot I^2 \cdot PS_3 \cdot n \cdot k \text{ (cm}^3\text{)}$$

BKI Rules for Hull 2024 Section IV

- Pengumpulan Data & Survei Lapangan: pengambilan dimensi aktual profil web frame existing saat docking ($h_w, t_w, b_f, t_f, \text{ bracket}$)
- Perhitungan Beban Desain BKI 2024: hitung C_0 (wave coefficient) $\rightarrow PS_3$ (beban sisi bawah garis air)
- Analisis Section Modulus Existing: hitung W_{aktual} profil existing via metode koreksi modulus; identifikasi over-designed
- Perancangan Profil Modified: reduksi h_w 550 \rightarrow 250 mm; kompensasi pelebaran b_f 200 \rightarrow 240 mm; iterasi $W_{\text{aktual}} \geq W_{\min}$
- Verifikasi Section Modulus Modified: $W_{\text{modified}} \geq W_{\min}$ BKI 2024 dengan safety margin aman

PARAMETER BEBAN DESAIN (HASIL PERHITUNGAN) :

6,802

C₀ (kN/m²)
Wave Coefficient

53,993

PS₃ (kN/m²)
Beban Desain

5,42

I (m)
Panjang Bentang

2,4

e (m)
Jarak Web Frame

Alat: AutoCAD 2D/3D Solid Modeling · Metode: Perhitungan manual berbasis BKI 2024 · Validasi: Surveyor BKI Final Inspection

4. HASIL & ANALISIS

A. SPESIFIKASI PROFIL WEB FRAME – EXISTING vs MODIFIED

Parameter	Existing	Modified	Perubahan
Tinggi web plate (h_w)	550 mm	250 mm	↓ 54,5%
Tebal web plate (t_w)	10 mm	10 mm	–
Lebar face plate (b_f)	200 mm	240 mm	↑ 20%
Tebal face plate (t_f)	16 mm	16 mm	–
Bracket ($b_b \times t_b$)	450×9 mm	450×9 mm	–

B. PERBANDINGAN SECTION MODULUS

Kondisi	W _{aktual} (cm ³)	W _{min} BKI (cm ³)	Safety Margin	Status
Frame Existing	2.356	1.047	125%	Over-designed
Frame Modified	1.560	1.047	48,9%	✓ Optimal / Memenuhi BKI

C. VERIFIKASI DIMENSI WEB FRAME MODIFIED OLEH SURVEYOR BKI

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

“Verifikasi dimensional oleh Surveyor BKI mengesahkan bahwa profil web frame modified (T 250×10 FP 240×16 mm) memenuhi semua spesifikasi desain dan persyaratan section modulus minimum dengan margin keamanan 48,9%.”

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Optimalisasi dimensi web frame terbukti secara empiris meningkatkan kualitas ruang upper car deck—clearance 300 mm lebih luas, kapasitas parkir meningkat menjadi 7 unit mobil, dan tetap memenuhi persyaratan BKI.



KONDISI UPPER CAR DECK SETELAH REVISI DESAIN WEB FRAME

D. HASIL UTAMA PENELITIAN

↓ 54,5%

Reduksi Tinggi Web Plate: 550 mm \rightarrow 250 mm

+330mm

Tambahkan Clearance Vertikal Upper Car Deck

+7 unit

Penambahan Kapasitas Mobil / Trip

48,9%

Safety Margin Section modulus $W_{\text{modified}} > W_{\min}$

Fr.74 - 116

Ruang Frame dimodifikasi, an portside 304 cm

✓ BKI

Terverifikasi Final Inspection BKI 2024

5. KESIMPULAN

- Profil web frame existing (T 550×10 FP 200×16 mm) terbukti over-designed dengan $W_{\text{aktual}} = 2.356 \text{ cm}^3$ (125% di atas $W_{\min} = 1.047 \text{ cm}^3$ BKI 2024), memberikan ruang optimalisasi signifikan.
- Profil modified (T 250×10 FP 240×16 mm) memenuhi persyaratan section modulus minimum BKI 2024 dengan $W_{\text{modified}} = 1.560 \text{ cm}^3$ dan safety margin 48,9% – layak secara struktural dan telah diverifikasi Surveyor BKI melalui final inspection.
- Reduksi tinggi web plate 300 mm menghasilkan tambahan 7 unit kendaraan roda empat per trip (20 \rightarrow 27 unit), telah diimplementasikan dan diverifikasi oleh Surveyor BKI pada kondisi nyata di galangan.

6. DAFTAR PUSTAKA

Biro Klasifikasi Indonesia. (2024). Rules for Hull. Jakarta: BKI.
 Alamsyah, A., et al. (2021). Investigating the local stress of car deck Ro-Ro 5000 GT. EPI International Journal of Engineering, 4(1), 57–62. DOI: <https://doi.org/10.25042/eji-ije.022021.08>
 Eyles, D. J., & Bruce, G. J. (2012). Ship construction (8th ed.). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-08-097239-8.00001-5
 Ika Wulandari, A., et al. (2021). Fatigue analysis of 5000 GT ferry Ro-Ro car deck. Jurnal Kapal, 18(3), 160–170. <https://doi.org/10.14710/kapal.v18i3.39268>
 Gea, M., & Dony, S. (2021). Optimasi web frame dan senta kapal sesuai peraturan BKI dengan bahasa pemrograman. DOI: 10.12962/j23373539.v1i02.80474
 Du, L., et al. (2019). Trimaran structural weight optimization based on classification rules. JSPD, 35(1), 31–40. DOI:10.5957/JSPD.170033

71

Lampiran 2: Bukti Submit Poster Ilmiah tentang “OPTIMALISASI FRAME UPPER CAR DECK SEBAGAI UPAYA PENAMBAHAN MUATAN KAPAL”


NO URUT:
0542
*Misi penerima berkas

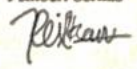
BAGIAN INOVASI UNIVERSITAS DIPONEGORO
TANDA TERIMA BERKAS PENGAJUAN (HAK CIPTA / PATEN)

Pada hari Rabu, 15 April 2026 (hari, tanggal) telah diterima dokumen pengajuan (Hak Cipta / Paten) yang berjudul Poster, Optimalisasi Frame Upper Car Deck Sebagai Upaya Penambahan (jenis, judul) dengan rincian sebagai berikut: Muatan

1. Formulir permohonan
2. Surat pernyataan
3. Surat pengalihan hak
4. Draft paten (khusus untuk paten)

Dokumen tersebut telah diterima dalam keadaan baik untuk kemudian dapat ditindaklanjuti sesuai dengan prosedur yang berlaku.

Penerima berkas


Pemberi berkas

Reikhan Abiyoga

*call center: 0811-3848-555, email: daftarkipa.live.undip.ac.id

Abiyoga

CS Dipindai dengan CamScanner

Lampiran 3: Modul tentang “ANALISIS KELAYAKAN EKONOMI REDESAIN WEB FRAME KAPAL RO-RO RUTE MERAK – BAKAUHENI”



Disusun oleh :

Reikhan Abiyoga Arini Putra
40040421650010

Dosen Pengampu :
Zulfaidah Ariany, S.T., M.T.

PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA KONSTRUKSI PERKAPALAN
DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI
SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2026

Lampiran 4: Sertifikat Pencatatan Ciptaan dari DJKI untuk Modul “ANALISIS KELAYAKAN EKONOMI REDESAIN WEB FRAME KAPAL RO-RO RUTE MERAK – BAKAUHENI”



Lampiran 5: Jurnal Ilmiah “Structural Optimization of Upper Car Deck Frame for Enhancing Vehicle Capacity on Ro-Ro Ferries”

Structural Optimization of Upper Car Deck Frame for Enhancing Vehicle Capacity on Ro-Ro Ferries

Reikhan Abiyoga Arini Putra¹, Zulfaidah Ariany^{2*}

¹Naval Construction Engineering Technology, Vocational College, Universitas Diponegoro, Semarang 50275, Indonesia

^{2*} Department of Industrial Technology, Vocational College, Universitas Diponegoro, Semarang 50275, Indonesia

** Corresponding Author. E-mail: zariany@live.undip.ac.id
Telp: +62-81254153111*

Abstract

Roll-on/Roll-off (Ro-Ro) vessels are essential for supporting efficient inter-island transportation in Indonesia, where increasing cargo capacity without altering main dimensions is a key challenge. This study aims to optimize the upper car deck web frame to improve structural efficiency and enhance vehicle capacity while maintaining safety standards. The method uses a section modulus approach based on the BKI Rules for Hull 2024. The existing frame is evaluated using actual geometric and loading data, followed by a redesign through modifications to the web height and flange dimensions. The modified structure is then verified against classification requirements and compared with the original design. The results show that the existing frame is overdesigned, with a section modulus exceeding the required value by about 125%. The optimized design reduces the web height by 300 mm while still meeting safety requirements, with a margin of 48.9%. This reduction increases vertical clearance and allows an additional 7 vehicles per trip. These findings confirm that structural optimization can improve both structural efficiency and cargo capacity without compromising safety.

Keywords: Ro-Ro vessel; upper car deck; structural optimization; section modulus; cargo capacity

1. Introduction

As an archipelagic country comprising more than 17,000 islands, Indonesia relies heavily on maritime transportation as the backbone of national logistics and regional connectivity (Boy Anugerah, 2022; Febriansyah & Sahara, 2023). The role of sea transportation becomes increasingly significant in supporting inter-island mobility, particularly through short- to medium-distance crossings served by Roll-on/Roll-off (Ro-Ro) vessels (Tira et al., 2024; Meo et al., 2023). These vessels provide an efficient transportation system by enabling vehicles to be directly loaded and unloaded without additional handling equipment, thus improving operational efficiency and reducing turnaround time (Ariany et al., 2018; Ika Wulandari et al., 2022; Parvasi et al., 2022).

Lampiran 6: Bukti Submit Jurnal di JVSAR

#31919 Summary

Summary (<https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jvsar/author/submission/31919>) | Review (<https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jvsar/author/submissionReview/31919>) | Editing (<https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jvsar/author/submissionEditing/31919>)

Submission

Authors Zulfaidah Ariany, Reikhan Abiyoga Arini Putra

Title Structural Optimization of Upper Car Deck Frame for Enhancing Vehicle Capacity on Ro-Ro Ferries

Original file [31919-112810-1-SM.docx \(https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jvsar/author/downloadFile/31919/112810/1\)](https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jvsar/author/downloadFile/31919/112810/1) 18-04-2026

Supp. files None [Add a Supplementary File \(https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jvsar/author/add\)](https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jvsar/author/add)

Submitter Zulfaidah Ariany <mailto:zulfaidah%20ariany%20%3Czariany0409%40gmail.com%3E&redirectUrl=https%3A%2F%2Fejournal2.undip.ac.id%2Findex.php%2Fjvsar%2Fauthor%2Fsubmission%2F31919&subject=Structural%20Ro%20Ferries&articleId=31919>

Date submitted April 19, 2026 - 12:02 AM

Section Original Research Articles

Editor None assigned

Author comments We hope that this paper will enrich the vocational knowledge in the field of maritime industrial technology.

Reviewers suggestion Budhi Santoso, Department of Naval Architecture, Politeknik Negeri Bengkalis, Bengkalis, 28711, E-mail: budhisantoso@polbeng.ac.id (<mailto:budhisantoso@polbeng.ac.id>).

Status

Status	Submitted
Initiated	19-04-2026
Last modified	19-04-2026