

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

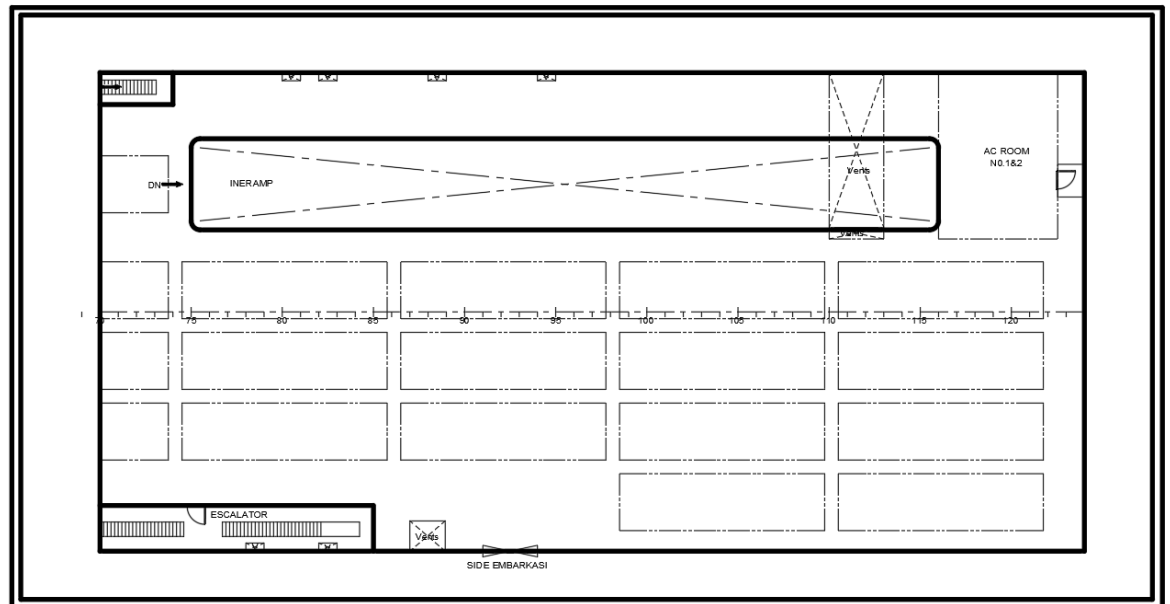
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

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.

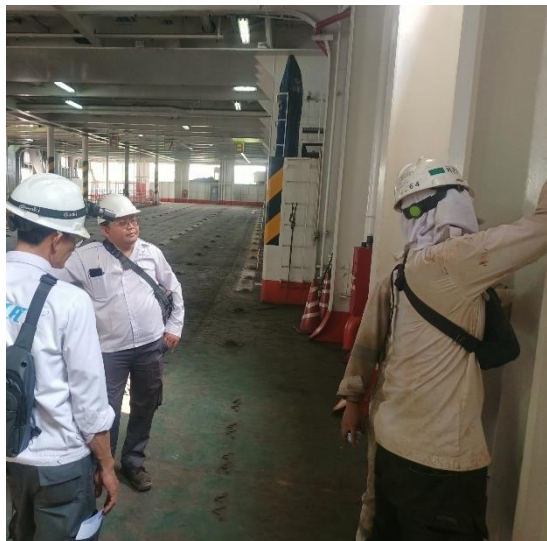
4.1.3 Marking dan Identifikasi Area Pengerjaan

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

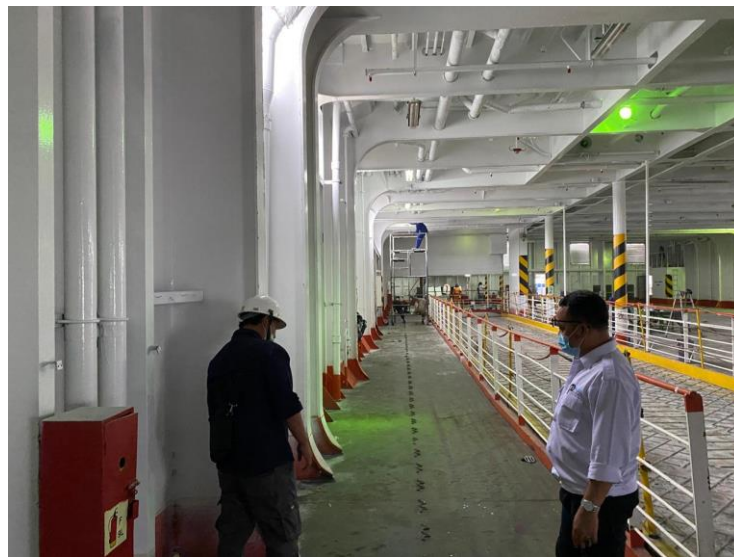
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

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 Breadth	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)]

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

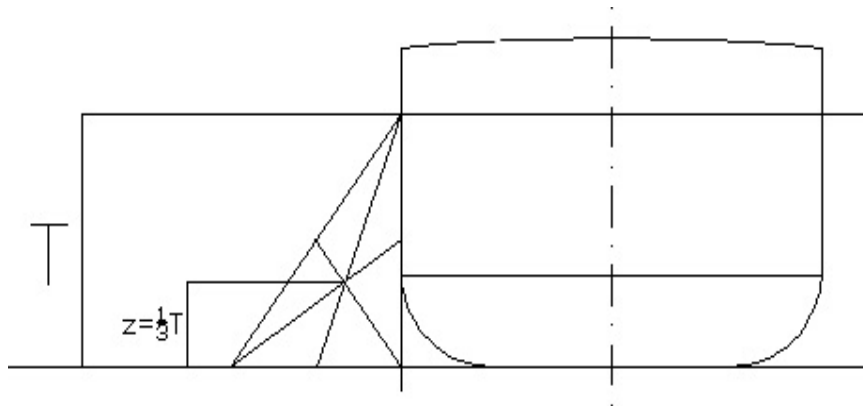
4.2.2.2 Beban sisi (load on ship side) Section IV B Rules for Hull BKI 2025

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 (stiffener spacing).
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.

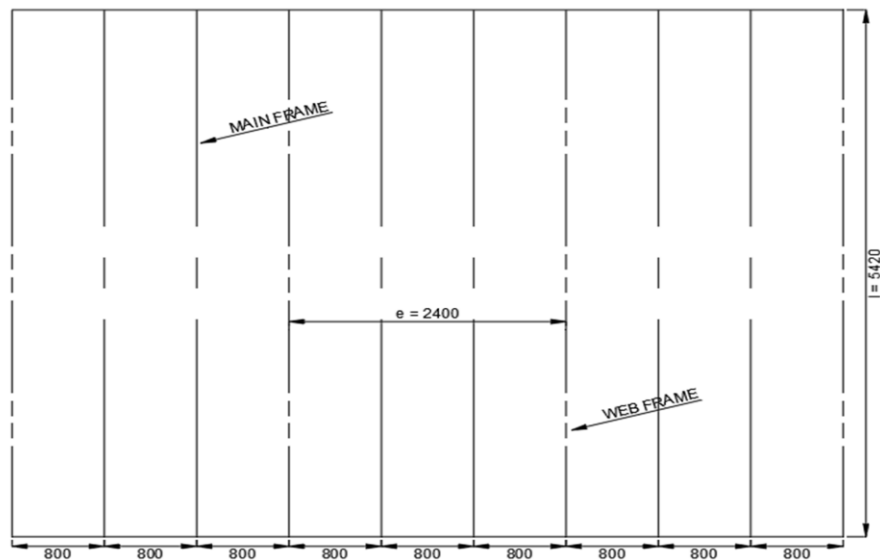
Tabel 4.5 Spesifikasi *Frame Existing*

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 $w = 0,95$

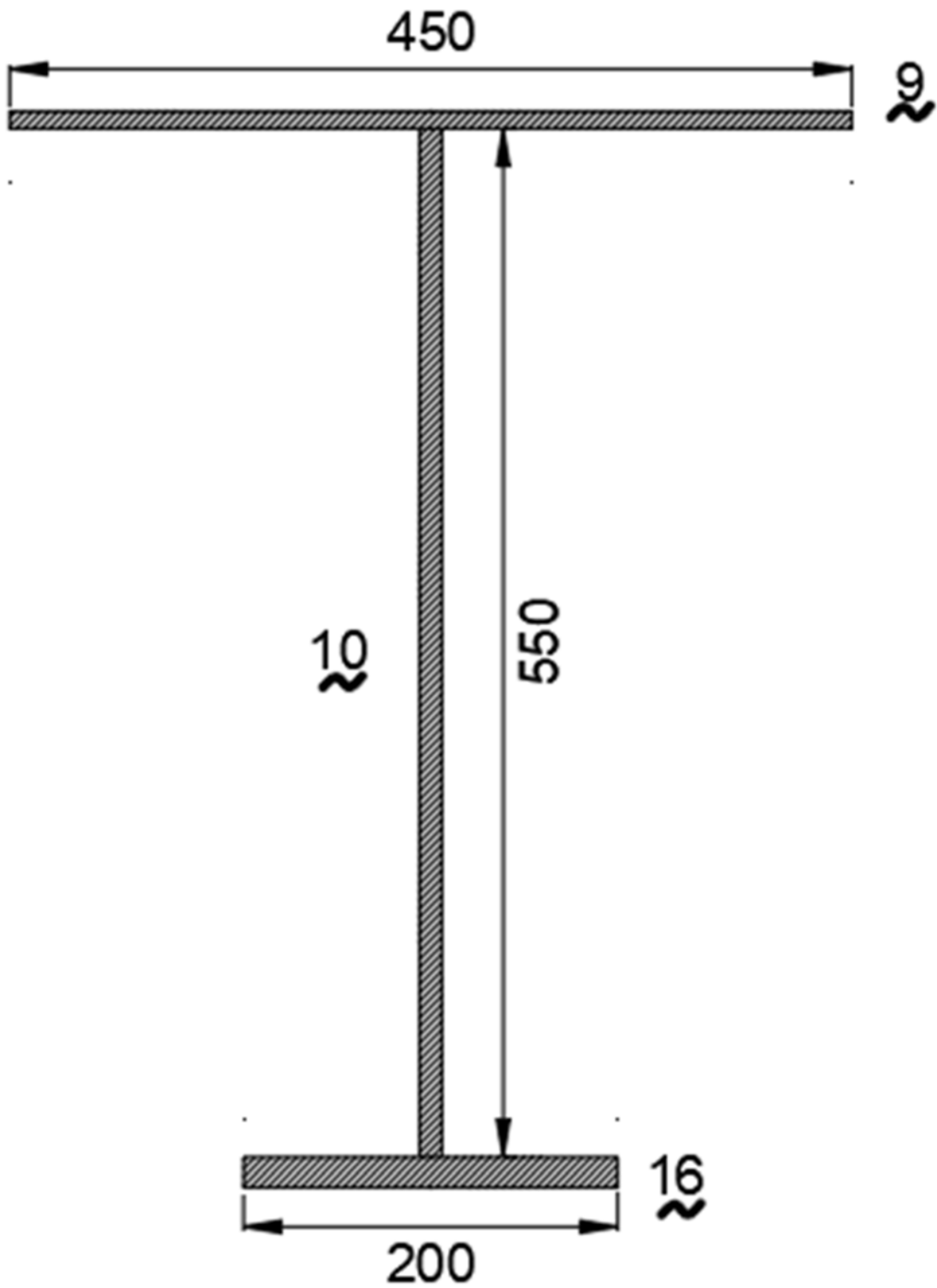
Maka profil tersebut mempunyai modulus penampang.

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

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

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

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 :

$$W = 0,55 \cdot e \cdot l^2 \cdot P_s \cdot n \cdot kcm^3$$

Dimana:

$$W = 0,55 \cdot e \cdot l^2 \cdot P_s \cdot n \cdot kcm^3$$

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

$$W = 1046,84 \cdot cm^3$$

Koreksi modulus :

$$W = 1047 \cdot cm^3$$

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

Keterangan :

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

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

- 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:

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

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

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

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.

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

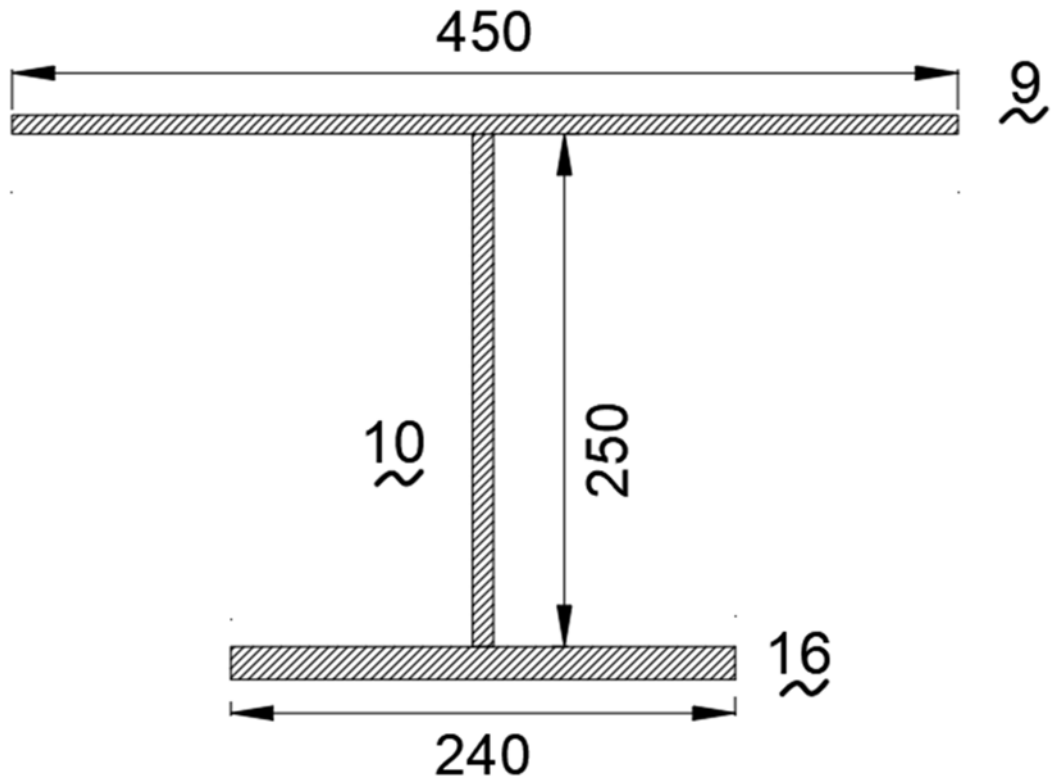
$$= 1,58 \cdot 40,5 \text{ cm}^2 \cdot 25 \text{ cm}$$

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

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

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

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.

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

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

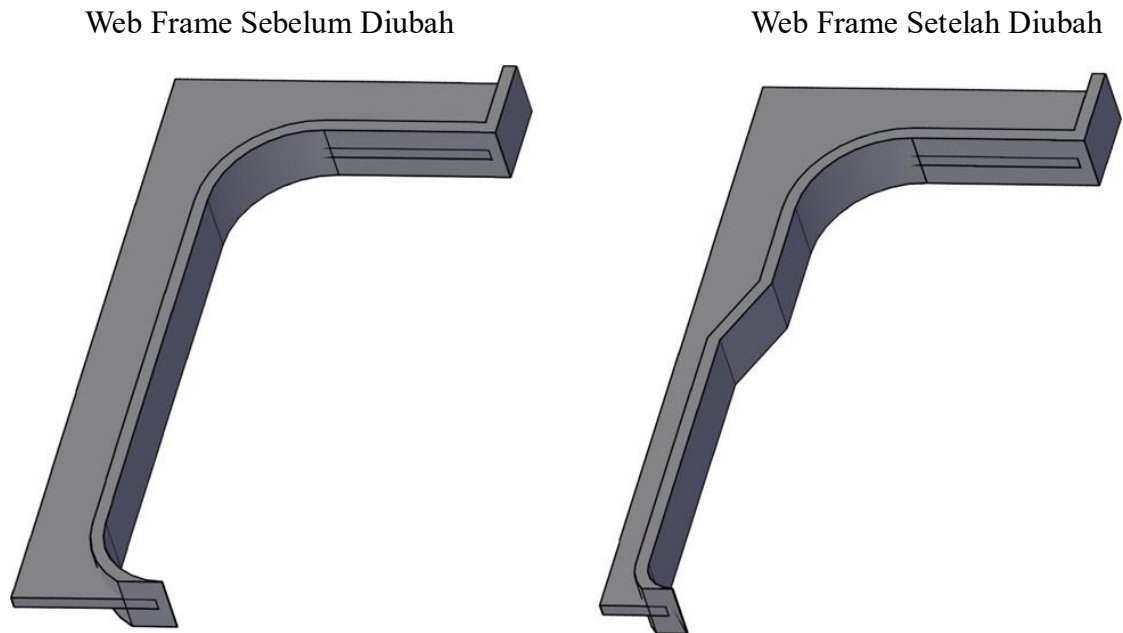
$$\text{Margin} = 48,9\%$$

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.

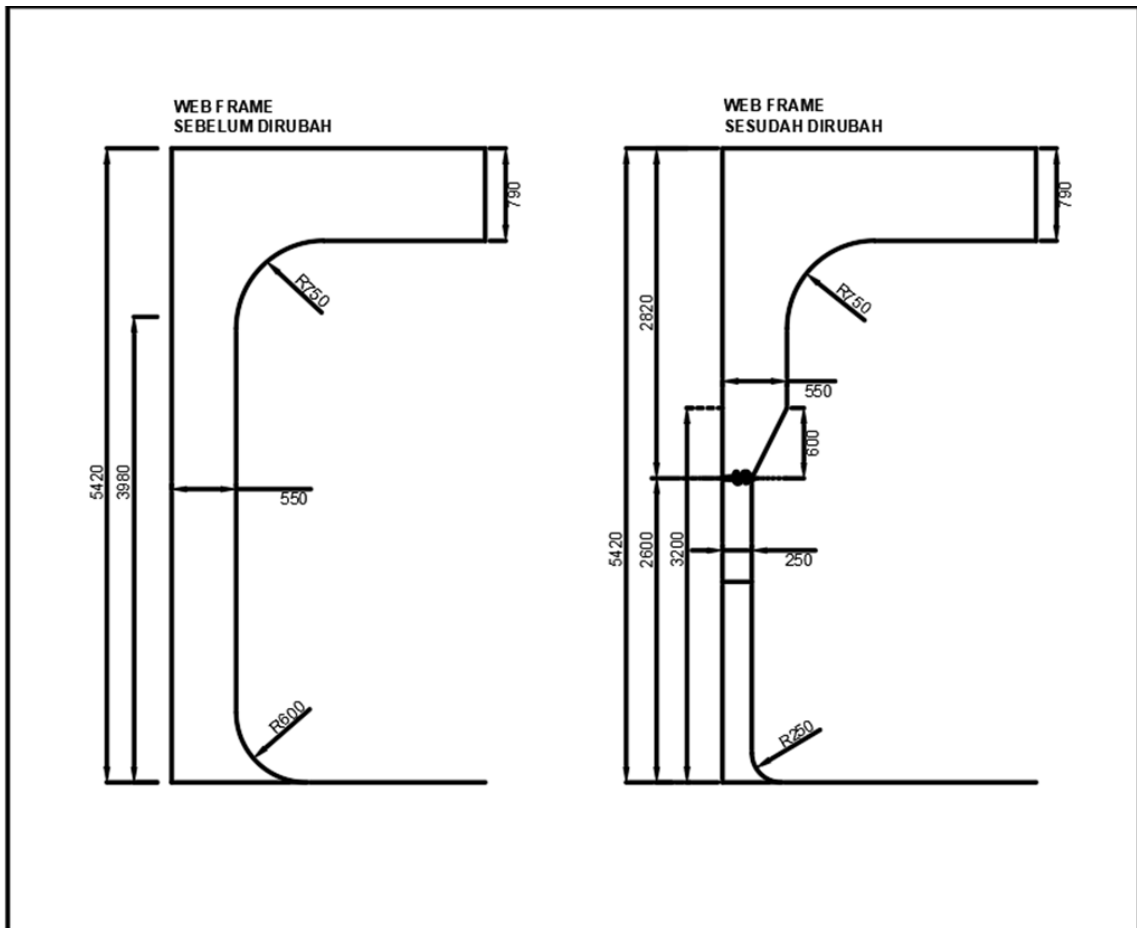
4.5.1 Visualisasi Web Frame Sebelum dan Sesudah Modifikasi



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

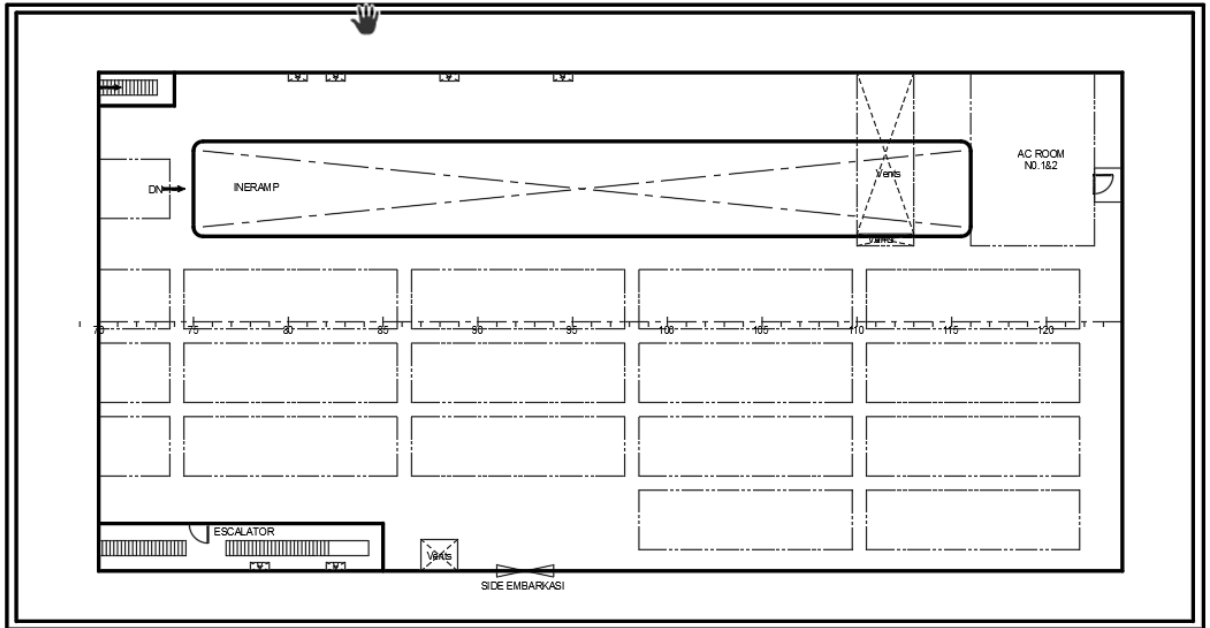
beban antara *web frame* dan struktur sekitarnya tidak berkaitan langsung dengan kapasitas *section modulus* yang dihitung. Hasil perancangan ini menghasilkan profil yang secara visual tampak lebih ramping dibandingkan kondisi *existing*, sebagaimana terlihat jelas pada model dua dan tiga dimensi di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



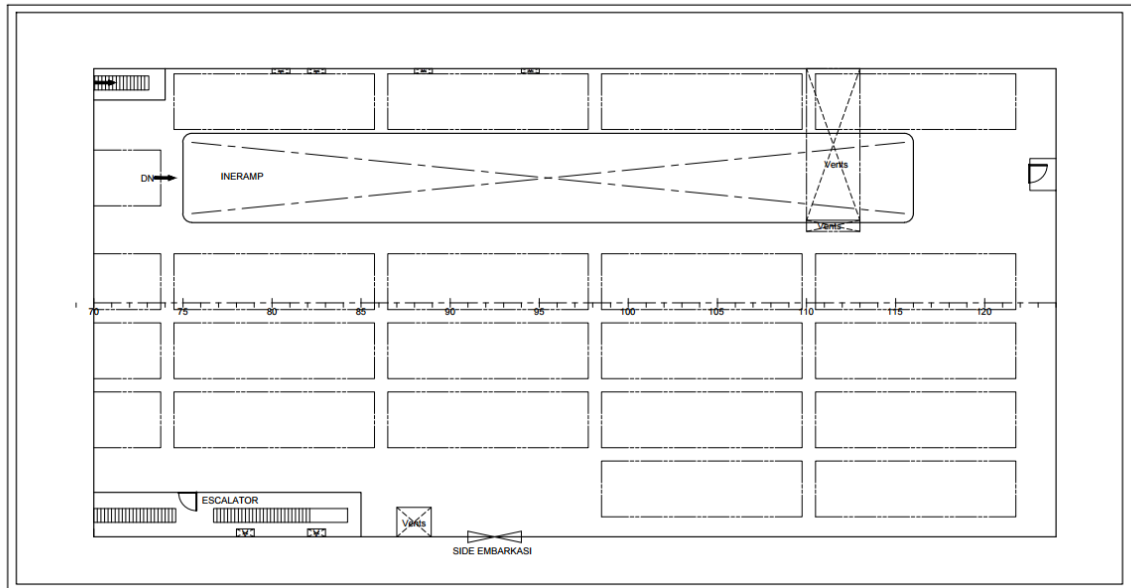
Gambar 4.11 General Arrangement Upper *Car Deck* Tampak Atas — Kondisi Sebelum Modifikasi

(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 **7unit 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)

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

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

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

Langkah 6: Biaya BBM per One-Way Trip

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

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%	$4.583,33 \text{ L} \times \text{Rp } 10.460/\text{L}$ (Langkah 6)
2.	Crew / ABK	Rp 2.920.000	4,5%	$70 \text{ orang} \times \text{Rp } 7,5 \text{ jt/bln} \div 30 \text{ hari} \div 3 \text{ trip}$
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.