



TUGAS AKHIR (DC33240)

**ANALISIS MODIFIKASI PADA TANGKI BALLAST TERHADAP
STABILITAS KAPAL CREW BOAT 25 PAX**

YUSRO ULIN NIHA

NRP.0123030049

DOSEN PEMBIMBING:

Ir. I PUTU ARTA WIBAWA S.T.,M.T.Ph.D.

**PROGRAM STUDI D3 TEKNIK PERANCANGAN DAN KONTRUKSI
KAPAL**

JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL

**POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
SURABAYA**

2026



TUGAS AKHIR (DC33240)

**ANALISIS MODIFIKASI PADA TANGKI BALLAST TERHADAP
STABILITAS KAPAL CREW BOAT 25 PAX**

**YUSRO ULIN NIHA
0123030049**

**DOSEN PEMBIMBING :
Ir. I PUTU ARTA WIBAWA S.T.,M.T.Ph.D.**

**PROGRAM STUDI D3 TEKNIK PERANCANGAN DAN KONTRUKSI
KAPAL
JURUSAN TEKNIK BANGUNAN KAPAL
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
2026**

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

ANALISIS MODIFIKASI PADA TANGKI BALLAST TERHADAP STABILITAS KAPAL CREW BOAT 25 PAX

Disusun Oleh:
Yusro Ulin Niha
01230030049

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Kelulusan
Program Studi D3 Teknik Perancangan dan Konstruksi Kapal
Jurusan Teknik Bangunan Kapal
POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA

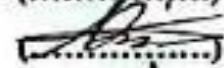
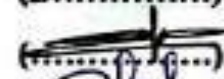
Disetujui oleh Tim penguji Tugas Akhir Tanggal Ujian : 29 Juni 2026
Periode Wisuda : Oktober 2026

Menyetujui,

Dosen Penguji

NIDN/NUPTK

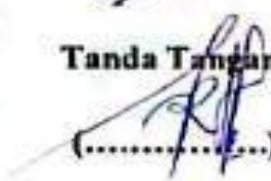
Tanda Tangan

- | | | |
|---|-------------------|---|
| 1. I Putu Arta Wibawa, S.T., M.T., Ph. D. | (10067305) |  |
| 2. M. Rizal Fahmi, S.T., M.T. | (6069105) |  |
| 3. Moh. Saiful Rahman H, S.Pl., M.Si | (004377567130220) |  |
| 4. Imam Nur Rokhim, S.T., M.T. | (0713109304) |  |

Dosen Pembimbing

NIDN/NUPTK

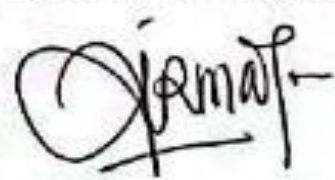
Tanda Tangan

- | | | |
|---|------------|---|
| 1. Putu Arta Wibawa, S.T., M.T., Ph. D. | (10067305) |  |
|---|------------|---|

Mengetahui
Ketua Jurusan,


Priyambodo Nur Ardi Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198103242014041001

Mengetahui
Koordinator Program Studi,


Ir. Irma Rustini Aju, M.T.
NIP. 197010141995122001

	Pernyataan Bebas Plagiat	No : F.WD I. 026 Date : 8 Januari 2026 Rev. : 01 Page : 1 dari 1
---	---------------------------------	---

Yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Yusro Ulin Niha
 NRP. : 0123030049
 Prodi : Teknik Perancangan dan Kontruksi Kapal

Dengan ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa :

Tugas akhir yang akan saya kerjakan dengan judul :

**"ANALISIS MODIFIKASI PADA TANGKI BALLAST TERHADAP STABILITAS
 KAPAL CREW BOAT 25 PAX"**

Adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain.

Apabila dikemudianhari terbukti terdapat plagiat dalam karya ilmiah tersebut,

Maka saya bersedia menerima **sanksi** sesuai ketentuan peraturan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan penuh tanggung jawab.

Surabaya, 28 Juli 2026

Yang Membuat Pernyataan,




Yusro Ulin Niha

NRP. 0123030049

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga Laporan Tugas Akhir dengan judul “[Judul Tugas Akhir]” dapat diselesaikan dengan baik. Laporan ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Ahli Madya pada Program Studi D3 Teknik Perancangan dan Kontruksi Kapal, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS).

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Direktur Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, beserta jajaran pimpinan PPNS yang telah menyediakan fasilitas dan lingkungan belajar yang kondusif selama masa studi.
2. Bapak Ketua Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Bapak Priyambodo, dan Ketua Program Studi D3 Teknik Perancangan dan Kontruksi Kapal, Ibu Irma, yang telah memberikan kesempatan dan kemudahan dalam pelaksanaan penelitian ini.
3. Bapak Ir. I Putu Arta Wibawa, S.T.,M.T.Ph.D. selaku dosen pembimbing utama yang dengan sabar memberikan bimbingan, arahan teknis, dan koreksi, khususnya terkait tugas akhir yang saya jalankan selama 6 bulan kebelakang.
4. Seluruh dosen dan staf Jurusan Teknik Perancangan dan Kontruksi Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, yang telah membekali saya dengan pengetahuan dan keterampilan di bidang perencanaan, fabrikasi, dan pengujian bangunan kapal.
5. Pihak industri atau galangan kapal PT. Tri Ratna Diesel yang telah memberikan izin, data teknis, serta kesempatan praktik/observasi sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik.
6. Kedua orang tua tercinta, ALM. M. Hasan Kamali, Ibu tercinta Suswatin K. Lathifah yang selalu membekali doa dan semangat untuk saya menyelesaikan hal-hal yang tersulit dalam hidup saya. dan kakak-kakak yang paling berjasa untuk masa depan saya (Mila, Khozi, Lika, Nuha)

terimakasih sebesar besarnya atas dukungan, perhatian, motivasi, serta pengorbanan yang begitu besar. Semoga segala kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa.

7. Rekan-rekan mahasiswa D3 Perancangan dan Kontruksi Kapal Angkatan 2023, khususnya teman-teman kelas saya DCD3B, yang telah menjadi mitra diskusi dan memberikan bantuan selama proses penyelesaian Tugas Akhir.
8. Seseorang yang terkasih, M. Hasan Syaifullah, yang selalu memberikan dukungan, perhatian, dan semangat kepada saya dalam menjalani proses perkuliahan dan penyusunan Tugas Akhir ini.

Saya menyadari bahwa Laporan Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi perbaikan di masa mendatang. Semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan praktik di bidang teknik bangunan kapal, serta menjadi bahan pertimbangan bagi pihak-pihak yang berkepentingan.

Surabaya, 28 Juli 2026
penulis

Yusro Ulin Niha

ANALISIS MODIFIKASI PADA TANGKI BALLAST TERHADAP STABILITAS KAPAL CREW BOAT 25 PAX

Oleh:
Yusro Ulin Niha

ABSTRAK

Kapal *Crew Boat 25 PAX* merupakan kapal penumpang yang digunakan untuk mendukung transportasi personel dan kegiatan operasional, sehingga stabilitas menjadi aspek penting dalam keselamatan pelayaran. Pada kondisi awal (*existing condition*), diketahui kapal mengalami *heel angle* sebesar $1,2^{\circ}$ ke arah starboard akibat distribusi massa yang belum seimbang. Penelitian ini menganalisis pengaruh modifikasi *fixed ballast* terhadap distribusi berat, stabilitas, dan periode oleng menggunakan simulasi *Maxsurf Stability*. Hasil analisis menunjukkan penambahan *fixed ballast* beton sebesar 4,285 ton menghasilkan *displacement* sebesar 57,14 ton, *Transverse Arm* sebesar 0 m, dan mengembalikan kapal ke kondisi *even keel* dengan *heel angle* 0° . Evaluasi stabilitas berdasarkan *IMO Resolution A.267(85) Chapter 2 – General Criteria* menunjukkan seluruh kriteria memenuhi persyaratan (*Pass*), dengan nilai maksimum *GZ* sebesar 0,499 m, sudut maksimum *GZ* $36,4^{\circ}$, dan *Initial GMt* sebesar 2,483 m. Periode oleng kapal setelah modifikasi sebesar 2,896 detik, menunjukkan kemampuan pemulihan awal yang baik namun dengan karakteristik gerakan relatif cepat. Modifikasi *fixed ballast* dapat menjadi solusi efektif untuk memperbaiki keseimbangan kapal dan mempertahankan stabilitas sesuai standar keselamatan.

(Kata kunci: *Fixed ballast*, Stabilitas kapal, *Heel angel*).

Halaman sengaja dikosongkan

ANALYSIS OF BALLAST TANK MODIFICATIONS ON THE STABILITY OF 25 PAX CREW BOATS

Oleh:

Yusro Ulin Niha

ABSTRACT

The 25-Passenger Crew Boat is a passenger vessel used to support personnel transportation and operational activities, making stability a critical aspect of navigational safety. In its initial (existing) condition, the vessel exhibits a heel angle of 1.2° to the right due to an unbalanced mass distribution. This study analyzes the effect of fixed ballast modifications on weight distribution, stability, and rolling period using Maxsurf Stability simulation. The analysis results show that adding 4.285 metric tons of concrete fixed ballast results in a displacement of 57.14 metric tons, a Transverse Arm of 0 m, and returns the vessel to an even keel condition with a heel angle of 0° . A stability evaluation based on IMO Resolution A.267(85), Chapter 2 General Criteria shows that all criteria meet the requirements (Pass), with a maximum GZ value of 0.499 m, a maximum GZ angle of 36.4° , and an Initial GMt of 2.483 m. The ship's roll period after modification is 2.896 seconds, indicating good initial recovery capability but with relatively rapid motion characteristics. Fixed ballast modifications can still be an effective solution for improving the ship's balance and maintaining stability in accordance with safety standards.

(keywords: Fixed ballast, ship stability, heel angle).

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

SAMPUL LUAR	Error! Bookmark not defined.
SAMPUL DALAM	i
Pernyataan Bebas Plagiat	iv
KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR RUMUS	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II DASAR TEORI	6
2.1 Pengertian Kapal.....	7
2.2 Kapal <i>TSHD (Trailing Suction Hopper Dredger)</i>	9
2.3 <i>Pump Room</i>	Error! Bookmark not defined.
2.4 <i>Overhead Crane</i>	Error! Bookmark not defined.
2.4.1 Pengertian <i>Overhead Crane</i>	Error! Bookmark not defined.
2.4.2 Peran <i>Overhead Crane</i> di <i>Pump Room</i>	Error! Bookmark not defined.
2.4.3 Keunggulan <i>Overhead Crane</i> di <i>Pump Room</i>	Error! Bookmark not defined.
2.4.4 Bagian – bagian <i>Overhead Crane</i>	Error! Bookmark not defined.
2.4.5 Jenis - jenis <i>Overhead Crane</i>	Error! Bookmark not defined.
2.5 Konstruksi.....	Error! Bookmark not defined.
2.5.1 Konstruksi Baja.....	Error! Bookmark not defined.
2.5.2 Jenis komponen pendukung Konstruksi Baja	Error! Bookmark not defined.
2.5.3 Konstruksi <i>Crane</i>	Error! Bookmark not defined.
2.6 Tegangan	22
2.6.1 Tegangan Normal.....	22
2.6.2 Tegangan Tarik	Error! Bookmark not defined.
2.6.3 Tegangan Geser.....	22
2.1.1 Tegangan Von Misses	Error! Bookmark not defined.
2.1.2 Tegangan Ijin	Error! Bookmark not defined.
2.7 Faktor Keamanan.....	Error! Bookmark not defined.
2.7.1 Kriteria Kekuatan dan Keamanan struktur	Error! Bookmark not defined.

2.8	Metode Analisis Kekuatan Konstruksi.....	Error! Bookmark not defined.
2.8.1	Metode perhitungan manual	Error! Bookmark not defined.
2.8.2	Teori Perhitungan manual untuk struktur Crane....	Error! Bookmark not defined.
2.9	Penelitian Terdahulu dan Gap Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		25
3.1	Diagram Alir.....	25
3.2	Identifikasi Masalah.....	26
3.3	Pengumpulan Data dan Studi Literatur	26
3.4	Analisis Desain Eksisting.....	26
3.5	Perancangan Redesain.....	Error! Bookmark not defined.
3.6	Validasi Pemodelan Redesain	Error! Bookmark not defined.
3.7	Analisis hasil Redesain	Error! Bookmark not defined.
3.8	Kesimpulan.....	Error! Bookmark not defined.
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		29
4.1	Data utama Kapal.....	Error! Bookmark not defined.
4.2	Data perencanaan.....	30
4.2.1	Data umum Crane	Error! Bookmark not defined.
4.2.2	Konfigurasi struktur	32
4.2.3	Data profil baja.....	34
4.2.4	Data Material	37
4.3	Penurunan beban pada runway beam	37
4.3.1	Beban mati (Dead load).....	40
4.3.2	Beban dari Crane (Vertical wheel load).....	40
4.3.3	Faktor dinamis	Error! Bookmark not defined.
4.3.4	Kombinasi beban desain.....	Error! Bookmark not defined.
4.4	Analisa gaya dalam balok runway.....	Error! Bookmark not defined.
4.4.1	Reaksi tumpuan.....	Error! Bookmark not defined.
4.4.2	Gaya geser maksimum	Error! Bookmark not defined.
4.4.3	Momen lentur maksimum	Error! Bookmark not defined.
4.5	Pemeriksaan kekuatan penampang.....	Error! Bookmark not defined.
4.5.1	Tegangan Lentur	Error! Bookmark not defined.
4.5.2	Tegangan geser	Error! Bookmark not defined.
4.6	Pemeriksaan lendutan	Error! Bookmark not defined.
4.6.1	Lendutan akibat beban terpusat	Error! Bookmark not defined.
4.6.2	Lendutan akibat beban merata.....	Error! Bookmark not defined.
4.6.3	Lendutan total dan batas izin.....	Error! Bookmark not defined.
4.7	Penentuan Perlengkapan Crane	Error! Bookmark not defined.
4.7.1	Penentuan Hoist dan Trolley	Error! Bookmark not defined.
4.7.2	Penentuan <i>Brake System</i>	Error! Bookmark not defined.
4.7.3	Penentuan <i>Electrical System</i>	Error! Bookmark not defined.
4.7.4	Penentuan <i>Chain Sling</i>	Error! Bookmark not defined.

4.7.5	Sistem Keselamatan operasi crane.....	Error! Bookmark not defined.
4.8	Tabel data umum <i>Overhead Crane</i>	Error! Bookmark not defined.
4.9	Tabel Konfigurasi struktur <i>Runway beam</i>	Error! Bookmark not defined.
4.10	Tabel Data profil baja Girder	Error! Bookmark not defined.
4.11	Tabel sifat mekanis material SS400.....	Error! Bookmark not defined.
4.12	Tabel penurunan beban pada girder	Error! Bookmark not defined.
4.13	Tabel analisis gaya girder.....	Error! Bookmark not defined.
4.14	Tabel pemeriksaan tegangan	Error! Bookmark not defined.
4.15	Tabel pemeriksaan lendutan.....	Error! Bookmark not defined.
4.16	Tabel Spesifikasi Hoist dan Trolley	Error! Bookmark not defined.
4.17	Tabel sistem rem.....	Error! Bookmark not defined.
4.18	Tabel sistem Kelistrikan.....	Error! Bookmark not defined.
4.19	Tabel Spesifikasi <i>Chain Sling</i>	Error! Bookmark not defined.
4.20	Tabel Sistem keselamatan operasi crane.....	Error! Bookmark not defined.
4.21	Hasil Redesain Overhead Crane menggunakan Autocad	Error! Bookmark not defined.
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		58
5.1	Kesimpulan.....	59
5.2	Saran.....	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN		66

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kapal TSHD. XYZ.....	6
Gambar 2.2 Overhead Crane di area Pump Room	7
Gambar 2.3 Struktur Girder overhead crane	8
Gambar 2.4 End Carriage Overhead Crane (Sumber : Fineworks Crane).....	8
Gambar 2.5 <i>Hoist Crane</i>	9
Gambar 2.6 Wire rope/Chain sling Crane	9
Gambar 2.7 Hook crane	9
Gambar 2.8 Pedant Remote	10
Gambar 2.9 Brake system	10
Gambar 2.10 Perangkat keselamatan	10
Gambar 2.11 H Beam	12
Gambar 2.12 Z-Shape Beam	13
Gambar 2.13 Profil L	13
Gambar 2.14 T Beam.....	14
Gambar 2.15 Profil Bar.....	14
Gambar 2.16 Hss-Shape Beam.....	14
Gambar 2.17 Rod Bar	14
Gambar 2.18 Plat	15
Gambar 2.19 Bracket.....	15
Gambar 2.20 Pengirisan sebuah benda	16
Gambar 2.21 Komponen Tegangan Normal & Tegangan Geser	17
Gambar 2.22 Tegangan Normal	17
Gambar 2.23 Tegangan Tarik.....	18
Gambar 2. 24 Tegangan Geser	18
Gambar 3. Diagram alir	28

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 2.2 Gap Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 1 <i>Principial Dimension</i>	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.2 Katalog material H beam JIS 3192	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.3 Katalog sifat mekanis material SS400	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.4 Tabel karakteristik <i>chain hoist</i>	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.5 Data umum <i>Overhead Crane</i>	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.6 Konfigurasi struktur <i>Girder</i>	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.7 Data profil baja girder	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.8 Sifat mekanis material SS400	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.9 Penurunan beban pada girder	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.10 Analisis gaya dalam girder	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.11 pemeriksaan tegangan	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.12 pemeriksaan lendutan.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.13 Spesifikasi Hoist dan Trolley	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.14 Sistem rem	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.15 Sistem Kelistrikan	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.16 Spesifikasi <i>Chain Sling</i>	Error! Bookmark not defined.
Tabel 4.17 Sistem keselamatan operasional	Error! Bookmark not defined.

Halaman sengaja dikosongkan

DAFTAR RUMUS

Rumus (2.1).....	Error! Bookmark not defined.
Rumus (2.2).....	Error! Bookmark not defined.
Rumus (2.3).....	Error! Bookmark not defined.
Rumus (2.4).....	Error! Bookmark not defined.
Rumus (2.5).....	Error! Bookmark not defined.
Rumus (2.6).....	Error! Bookmark not defined.
Rumus (2.8).....	Error! Bookmark not defined.
Rumus (2.9).....	Error! Bookmark not defined.
Rumus (2.10).....	Error! Bookmark not defined.
Rumus (2.11).....	Error! Bookmark not defined.

Halaman sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapal Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki wilayah perairan lebih luas dibandingkan daratan, sehingga transportasi laut menjadi salah satu sektor yang sangat penting dalam menunjang aktivitas ekonomi maupun industri. Salah satu sektor yang sangat bergantung pada transportasi laut adalah industri minyak dan gas bumi lepas pantai (*offshore*). Dalam kegiatan tersebut, crewboat berfungsi sebagai sarana utama untuk mengangkut personel, logistik, dan peralatan operasional dari pelabuhan menuju anjungan lepas pantai. Karena beroperasi pada perairan terbuka dengan kondisi gelombang yang berubah-ubah, crewboat dituntut memiliki tingkat keselamatan, kecepatan, dan stabilitas yang baik agar operasional dapat berlangsung secara aman dan efisien. Oleh karena itu, stabilitas kapal menjadi salah satu aspek yang sangat menentukan keselamatan pelayaran serta keberhasilan operasi kapal (Bhattacharyya, 1978).

Stabilitas merupakan kemampuan kapal untuk kembali ke posisi tegak setelah mengalami kemiringan akibat pengaruh gaya luar, seperti gelombang, angin, arus, maupun perpindahan beban di atas kapal. Kapal yang memiliki stabilitas baik akan menghasilkan momen penegak (*righting moment*) yang mampu mengembalikan kapal ke posisi seimbang. Sebaliknya, distribusi berat yang tidak merata dapat menyebabkan pusat gravitasi bergeser dari garis tengah kapal sehingga kapal mengalami kemiringan tetap (*permanent heel/list*). Kondisi tersebut tidak hanya mengurangi kenyamanan pelayaran, tetapi juga dapat menurunkan kemampuan olah gerak kapal serta meningkatkan risiko kecelakaan ketika kapal beroperasi pada kondisi laut yang lebih ekstrem (Barrass & Derrett, 2012).

Dalam penelitian ini, evaluasi stabilitas diawali dengan melakukan simulasi kondisi awal (*existing condition*) pada keadaan kapal kosong (*light ship condition*). Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui kondisi hidrostatik dan karakteristik stabilitas kapal berdasarkan konfigurasi konstruksi yang masih asli sebelum dilakukan modifikasi. Hasil simulasi kondisi awal menjadi acuan untuk mengetahui apakah kapal berada pada kondisi *even keel* atau mengalami kemiringan akibat distribusi massa yang tidak seimbang.

Dengan demikian, simulasi awal merupakan tahapan penting dalam proses identifikasi permasalahan sebelum dilakukan tindakan perbaikan terhadap sistem ballast kapal (Rawson & Tupper, 2001).

Berdasarkan hasil simulasi kondisi existing pada kapal crewboat dengan panjang 25 meter, diperoleh nilai *Center of Gravity* (KG) sebesar 2,92 meter, *Keel to Metacenter* (KM) sebesar 1,43 meter, serta *Metacentric Height* (GM) sebesar 2,80 meter. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kapal masih memiliki kemampuan menghasilkan momen penegak. Namun demikian, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa kapal mengalami kemiringan (*heel*) sebesar $1,2^{\circ}$ ke arah kanan (*starboard*), sehingga kapal belum berada pada kondisi *even keel*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa masih terdapat ketidakseimbangan distribusi berat pada kapal yang menyebabkan pusat gravitasi bergeser ke sisi kanan. Apabila kondisi ini dibiarkan, maka kemiringan kapal dapat meningkat ketika kapal menerima tambahan muatan, menghadapi gelombang yang lebih besar, maupun beroperasi pada kondisi cuaca buruk sehingga dapat memengaruhi keselamatan operasional kapal (Lewis, 1988).

Berdasarkan hasil simulasi tersebut, diperlukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui penyebab terjadinya kemiringan kapal. Analisis dilakukan terhadap distribusi berat kapal, posisi pusat gravitasi (*Center of Gravity*), serta pengaruhnya terhadap keseimbangan melintang kapal. Pergeseran pusat gravitasi ke arah *starboard* menunjukkan bahwa distribusi massa kapal belum simetris terhadap garis tengah (*centerline*), sehingga terbentuk momen oleng (*heeling moment*) yang menyebabkan kapal tidak dapat berada pada posisi tegak secara sempurna. Hasil analisis ini menjadi dasar dalam menentukan metode koreksi yang tepat untuk mengembalikan kapal ke kondisi *even keel* (Principles of Naval Architecture, 2017).

Salah satu metode koreksi yang banyak diterapkan dalam dunia perkapalan adalah penggunaan ballast tetap (*permanent ballast*). Berbeda dengan ballast air yang harus diatur melalui proses ballast dan deballasting selama kapal beroperasi, ballast tetap mampu menghasilkan momen penyeimbang secara permanen sehingga lebih efektif digunakan untuk mengatasi kemiringan yang selalu muncul pada kondisi tertentu. Penambahan

ballast tetap dilakukan pada sisi yang berlawanan dengan arah kemiringan kapal agar pusat gravitasi dapat bergeser kembali menuju garis tengah kapal dan menghasilkan keseimbangan yang lebih baik (IMO, 2008).

Pada kapal yang menjadi objek penelitian, tersedia *void tank* pada sisi kiri (port) yang merupakan ruang kosong di dalam konstruksi *double bottom*. Ruang tersebut direncanakan untuk dimodifikasi menjadi tangki ballast tetap sebagai media pemberat permanen. Pemilihan sisi port didasarkan pada hasil simulasi awal yang menunjukkan bahwa kapal mengalami kemiringan sebesar $1,2^\circ$ ke arah *starboard*, sehingga penempatan ballast pada sisi kiri diharapkan mampu menghasilkan momen penyeimbang yang dapat menggeser pusat gravitasi kembali mendekati garis tengah kapal. Modifikasi ini dipilih karena tidak memerlukan perubahan bentuk lambung kapal, namun berpotensi memberikan peningkatan stabilitas yang lebih efektif dan ekonomis.

Setelah modifikasi dilakukan, tahap selanjutnya adalah melakukan simulasi ulang kondisi stabilitas kapal menggunakan model yang telah dimodifikasi. Simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan nilai KG, KM, GM, distribusi berat, serta besar sudut kemiringan kapal setelah penambahan ballast tetap. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan kondisi *existing* untuk mengetahui sejauh mana modifikasi void tank menjadi tangki ballast tetap mampu mengembalikan kapal menuju kondisi *even keel* sekaligus memenuhi persyaratan stabilitas yang ditetapkan oleh International Maritime Organization (IMO) dan Rules Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) Volume II.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka dapat dirumuskan beberapa masalah yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil perhitungan beban total setelah penambahan tangka ballast?.
2. Apakah perhitungan stabilitas kapal setelah modifikasi pada tangki ballast sesuai dengan persyaratan IMO?
3. Apakah periode oleng kapal setelah adanya modifikasi pada tangki ballast

memenuhi standar kenyamanan penumpang?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghitung beban total kapal setelah penambahan tangki ballast untuk mengetahui pengaruh modifikasi terhadap distribusi berat kapal.
2. Menganalisis stabilitas kapal setelah modifikasi tangki ballast dan memverifikasi apakah kondisi stabilitas kapal telah memenuhi persyaratan IMO berdasarkan nilai *metacentric height* (GM) dan *titik metacenter* (M).
3. Untuk mengetahui periode oleng kapal apabila tidak memenuhi standar kenyamanan penumpang

1.4 Manfaat Penelitian

Dari penulisan tugas akhir ini, penulis berharap dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Bagi Mahasiswa
Mahasiswa mampu mencari solusi teknis yang efektif dan efisien untuk memecahkan masalah operasional seperti masalah olengnya kapal.
2. Bagi Perusahaan
Memanfaatkan ruang kosong yang ada di kapal menjadi fungsi yang lebih berguna tanpa harus mengubah dimensi utama atau struktur besar kapal.
3. Bagi Intuisi
Memperkuat hubungan antara akademisi dan industri maritim melalui riset yang aplikatif dan bermanfaat bagi kebutuhan nyata lapangan.

1.5 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan masalah dalam penulisan tugas akhir ini, agar pembahasan lebih terfokus dan tidak meluas :

1. Penelitian ini berfokus pada analisis stabilitas kapal crew boat 25 PAX yang di reparasi pada perusahaan di lamongan. Berdasarkan *principle dimension* berikut :

Length Over All (LOA) : 25,00 M

Length Between Perpendicular (LPP) : 20,50 M

Breadth (B) : 6,00 M

Depth Moulded (H) : 2,92 M

Design Draft (T) : 1,20 M

2. Analisa dibatasi pada modifikasi tata letak, kapasitas, atau penambahan tangki ballast untuk memperbaiki stabilitas yang kurang baik tanpa merubah dimensi utama lambung.
3. Fokus utama penelitian pada *intact stability* sehingga tidak membahas kondisi stabilitas bocor.
4. Kriteria stabilitas yang digunakan sebagai acuan evaluasi Adalah standar IMO IS CODE 2008 dan aturan dari Biro Klasifikasi Indonesia (BKI).
5. Penelitian ini menganalisis indikator utama stabilitas yang meliputi pusat gravitasi vertikal, grafik kekuatan penegak kapal (GZ), serta batas kemiringan aman sebelum air masuk ke lambung.
6. Kondisi stabilitas diuji pada dua kondisi operasional paling beresiko dan cuaca yang ekstrem, mulai dari muatan penuh hingga kondisi bahan bakar minimum, guna memastikan kapal tetap aman.
7. Proses simulasi dan perhitungan stabilitas dijalankan dengan perangkat lunak seperti maxsurf dengan berpatokan gambar lines plan kapal yang didapatkan dari Perusahaan *on the job training*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Dalam pengerjaan penelitian tugas akhir ini, kajian terhadap penelitian terdahulu diperlukan sebagai referensi dan acuan ilmiah. Studi pustaka ini bertujuan memperkaya teori yang digunakan, memberikan gambaran yang lebih jelas tentang masalah yang diteliti, serta membantu menentukan metode yang tepat untuk penelitian ini.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Sebelumnya

No.	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Tahun	Hasil
1.	Deddy Chrismi anto	Perencanaan safety plan dan Modifikasi Pada Kapal Pinisi Pariwisata Labuan Bajo Berdasarkan Klasifikasi Kapal Kayu BKI	2025	Didapatkan hasil modifikasi layout kapal dengan penambahan safety plan berdasarkan SOLAS, analisis hambatan kapal sesudah modifikasi yang memiliki hasil kebutuhan power lebih kecil yaitu 454,05 kW dibanding kebutuhan power sebelum modifikasi yaitu sebesar 454,06 kW, analisis stabilitas yang telah memenuhi syarat berdasarkan IMO, hasil analisis olah gerak yang telah memenuhi standar berdasarkan kriteria olah gerak U.S. Coast Guard Cutter Certification Plan, serta perhitungan profil konstruksi yang telah disesuaikan dengan regulasi Peraturan Kapal Kayu BKI untuk referensi pembangunan kapal selanjutnya.
2.	Arsyial Hakim	Analisis Pengaruh Penambahan Kapasitas Tangki Bahan Bakar Terhadap Stabilitas Kapal Tugboat Panjang 23 Meter	2025	Berdasarkan hasil penelitian, penambahan tangki F.O.T No.3 pada frame 24-26 menghasilkan kapasitas 52,435 ton yang memenuhi kebutuhan bahan bakar 47,677 ton. Modifikasi ini mengubah berat kapal menjadi 176,487 ton, LCG 10,903 m, dan VCG 2,045 m. Analisis stabilitas menunjukkan seluruh kondisi pembebanan memenuhi kriteria MSC.267(85)-Part A dengan GZ maksimum

				0,384-0,738 meter dan periode oleng 10,224-12,108 detik.
3.	Muhamad Arsikin	Pengaruh Air Ballast Terhadap Stabilitas di MV Aishakamilah	2024	Didapatkan hasil Air ballast memiliki pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas kapal. Penggunaan air ballast memungkinkan penyesuaian berat kapal untuk menjaga keseimbangan dan stabilitas selama berlayar. Oleh karena itu, ada beberapa hal yang harus ditingkatkan mengenai air ballast terhadap stabilitas. Yaitu, pelatihan kepada kru mengenai pedoman operasional pengisian dan pembuangan air ballast, penerapan teknologi yang menggunakan sistem otomatis untuk pengisian dan pembuangan air ballast, dan evaluasi terkait stabilitas kapal guna menghindari masalah nantinya.
4.	Aji Alif Restu	Analisis Penambahan Bangunan Atas Pada Passenger Deck Terhadap Stabilitas Kpal Ferryro-ro KMP. Kirana VII	2021	Pada hasil analisis stabilitas kondisi 1 memperoleh nilai GM sebesar 5.652 meter, kondisi 2 memperoleh nilai GM sebesar 5.152 meter, kondisi 3 memperoleh nilai GM sebesar 7.325 meter, kondisi 4 memperoleh nilai GM sebesar 6.485 meter, kondisi 5 memperoleh nilai GM sebesar 6.807 meter. Hasil analisis stabilitas menunjukkan bahwa semua kondisi pada kapal memenuhi kriteria IMO yang diterapkan. Namun pada perhitungan periode oleng, tidak semua kondisi kapal memenuhi standar kenyamanan penumpang menurut IMO.
5.	Edy Haryanto	Pengaruh Modifikasi Buritan Speed Boat Terubuk Express 6 Terhadap Kecepatan Kapal	2018	bahwa perubahan bentuk buritan pada speed boat terubuk express menyebabkan L/B meningkat sebesar 1.2 %, peningkatan perbandingan nilai L/B tersebut dapat mempengaruhi kemampuan olah gerak dan stabilitas kapal. Hambatan total kapal bertambah sebesar 1,05% dimana pada kecepatan 35 knot sebelum perubahan hambatan totalnya 33,5 kN sedangkan setelah

				perubahan hambatan totalnya menjadi 35, 1 kN. Perubahan power engine yang diinstal dapat memberi kecepatan maksimal sebesar 49 knot dengan hambatan totalnya sebesar 47,5 kN. Peningkatan kecepatan sangat berpengaruh terhadap kedudukan engine dan kekuatan konstruksi serta letak titik tekan memanjang kapal.
--	--	--	--	---

Sumber : Jurnal penelitian terdahulu (diolah peneliti, 2026)

2.1 Kapal Penumpang

Kapal *crewboat* adalah jenis kapal penumpang dirancang untuk transportasi kru ke instalasi lepas pantai dengan kapasitas 60 penumpang dengan ukuran yang menengah dan cocok untuk operasi regional. Modifikasi kapal ini melibatkan perubahan desain untuk meningkatkan kapasitas akomodasi, stabilitas, dan efisiensi, juga mematuhi standar keselamatan internasional. Teori ini mengacu pada prinsip desain kapal, regulasi IMO, dan studi kasus industri, serta untuk menganalisis dampak modifikasi terhadap performa dan risiko (IMO, 1974; Lewis, 2002).

Menurut SOLAS, kapal penumpang diklasifikasikan berdasarkan jarak operasi dan ukuran, dengan *crewboat* sering dikategorikan sebagai kapal penumpang jarak dekat atau tinggi laut tergantung zona operasi. Modifikasi untuk 25 pax memerlukan penyesuaian terhadap persyaratan konstruksi, seperti penambahan ruang akomodasi tanpa mengorbankan stabilitas *hull*. Analisis ini harus mempertimbangkan kriteria stabilitas dari *Intact Stability Code*, di mana perubahan bobot dapat mempengaruhi *center of gravity* dan risiko oleng (IMO, 2008; ABS, 2020).

Modifikasi melibatkan integrasi teknologi seperti waterjet atau autopilot, serta peningkatan sistem keselamatan seperti sekoci dan deteksi kebakaran sesuai *SOLAS Chapter III*. Tantangan utama adalah menjaga efisiensi bahan bakar dan mengurangi emisi, sesuai MARPOL Annex VI, sambil memastikan kapasitas penumpang tidak mengganggu fungsi operasional (IMO, 1997; Offshore Technology, 2015).

Analisis modifikasi dapat menggunakan simulasi software maxsurf untuk evaluasi hidrodinamika dan perhitungan statis untuk struktur, didukung data empiris dari kasus kecelakaan kapal serupa. Kesimpulannya, teori ini menekankan pendekatan holistik untuk memastikan *crewboat* 25 pax aman, efisien, dan berkelanjutan dalam konteks industri maritim (IMO, 2002; Lewis, 2003)

2.2 Air Ballast

Pump room merupakan Menurut konvensi Internasional Pengendalian Air Ballast 2004 Pasal 1 butir 3, disebutkan:“ *Ballast water means water with its suspended mater taken on board a ship to control trim, list, draught, stability or stresses of the ship* “. Artinya, air ballast adalah air dengan zat atau bahan yang memiliki ketergantungan terhadap air tersebut, yang dibawa oleh kapal untuk mengendalikan trim, list (kemiringan), benaman kapal, stabilitas atau tekanan pada kapal.

Sebuah kapal harus mengisi air ballast ke tingkat yang diperlukan untuk menjamin tekanan yang memadai, bahkan jika itu tidak kosong atau hanya menampung sejumlah kecil kargo. Keselamatan kapal selama pengiriman dipastikan dengan stabilitas baling-baling, draft, trim, dan tenggelam sesuai dengan kondisi kapal (*Tanker Manual section 12 Ballast Operation Document number : VMS /TNK/01 section Revision Number : 01 page number 1*).

Muatannya adalah kapal yang tidak memuat atau memiliki muatan ringan, sehingga mereka harus memiliki pemberat yang cukup selama perjalanan menurut Istopo. Air ballast pada perjalanan laut kira-kira sepertiga dari daya dukung, dan beban ballast bervariasi tergantung pada jenis kapal, rute yang dapat dilayari, dan musim berlayar (Istopo, Kapten, 1997).

Penggunaan air ballast yang tepat dapat membantu mengoptimalkan stabilitas, terutama saat kapal mengalami perubahan muatan atau kondisi laut berubah. Peningkatan atau penurunan tingkat air ballast dapat digunakan untuk menjaga stabilitas longitudinal dan lateral kapal. Pengaruh Air Ballast Terhadap Stabilitas Kapal :

1. Air ballast memiliki pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas kapal. Penggunaan air ballast memungkinkan penyesuaian berat kapal untuk menjaga

keseimbangan dan stabilitas saat berlayar. Pemberian atau pengeluaran air ballast dapat mempengaruhi titik berat kapal, sehingga kapten dapat mengatur distribusi beban untuk menghindari kecondongan berlebihan atau bahkan kelistrikan. Dengan demikian, manajemen air ballast merupakan aspek penting dalam memastikan stabilitas kapal yang aman selama pelayaran.

2. Air pemberat sangat penting untuk keselamatan pengoperasian kapal. Digunakan untuk mengatur distribusi dan berat kapal secara keseluruhan agar kapal tetap terapung tegak dan dalam kondisi aman dan stabil. Ballast digunakan untuk mengkompensasi muatan kargo berbeda yang dapat diangkut kapal pada waktu berbeda, termasuk perubahan berat selama bongkar muat. Ini juga memberikan stabilitas dan kemampuan manuver selama pelayaran kapal.
3. Pemberat – proses dimana kapal komersial memompa air ke dalam atau ke luar tangki pemberat saat transit atau di pelabuhan – sangat penting untuk keselamatan, terutama jika kapal membawa muatan berat di satu ruang dan muatan yang lebih ringan di ruang lainnya, atau kosong dan menghadap laut yang ganas. Pembalas tidak sama dengan “*bunkering*” – proses dimana tangki bahan bakar kapal (disebut tangki bunker) diisi dengan bahan bakar laut (disebut bahan bakar bunker) yang diperlukan untuk pelayaran (Inaparts, 2009).

2.3 Stabilitas Kapal

Sebuah kapal dapat mengoleng disebabkan kapal memiliki kemampuan untuk menegak kembali sewaktu kapal *heeling*/ miring dikarenakan adanya pengaruh luar yang bekerja pada kapal. Seperti contoh pengaruh luar melalui arus, ombak, gelombang, angin dan lain sebagainya. Dari sifat olengnya kapal yang terlau lamban, atau kapal mengoleng dengan cepat dan bahkan bisa terlau cepat kembali ke posisi keseimbangan setelah mengalami kemiringan atau bisa disebut gerakan kapal yang menyentak-nyetak (Rawson & Tupper, 2001).

2.4 Titik-titik Penting Dalam Stabilitas Kapal

Stabilitas awal sebuah kapal adalah kemampuan dari kapal untuk kembali ke dalam kedudukan tegaknya semula sewaktu kapal menyenget pada sudut-sudut kecil ($= 6^\circ$), Stabilitas awal ditentukan oleh momen pemulihan yang dihasilkan

oleh pergeseran pusat gravitasi dan *buoyancy*. Pemahaman ini penting dalam desain kapal, terutama untuk *crewboat*, karena stabilitas awal yang baik memastikan kapal tetap aman dan nyaman di gelombang kecil, mencegah gerakan yang tiba-tiba atau tidak terkendali (Lewis, 1988). Stabilitas kapal dipengaruhi oleh tiga titik, antara lain :

1. Titik berat kapal (G / Gravity)

Titik berat kapal adalah sebuah titik di kapal yang merupakan titik tangkap dari Resultan semua gaya berat yang bekerja di kapal itu, dan dipengaruhi oleh konstruksi kapal. Arah bekerjanya gaya berat kapal adalah tegak lurus kebawah. Kedudukan Titik berat kapal dari suatu kapal yang tegak terletak pada bidang simetris kapal yaitu bidang yang dibuat melalui linggi depan, linggi belakang dan lunas kapal. Letak / kedudukan titik berat kapal suatu kapal akan tetap bila tidak terdapat penambahan, pengurangan, atau penggeseran bobot diatas kapal dan akan berpindah tempatnya bila terdapat penambahan, pengurangan atau penggeseran bobot di kapal itu (Larsson & Eliasson, 2000).

2. Titik tekan (B / *Bouyancy*)

Titik tekan = titik apung = *centre of buoyency* Sebuah titik di kapal yang merupakan titik tangkap Resultan semua gaya tekanan keatas air yang bekerja pada bagian kapal yang terbenam didalam air. Arah bekerjanya gaya tekan adalah tegak lurus keatas. Kedudukan titik tekan sebuah kapal senantiasa berpindah pindah searah dengan menyengetnya kapal, maksudnya bahwa kedudukan titik tekan itu akan berpindah kearah kanan apabila kapal menyenget ke kanan dan akan berpindah ke kiri apabila kapal menyenget ke kiri, sebab titik berat bagian kapal yang terbenam berpindah-pindah sesuai dengan arah sengetnya kapal. Jadi dengan berpindah-pindahnya kedudukan titik tekan sebuah kapal sebagai akibat menyengetnya kapal tersebut akan membawa akibatberubah-ubahnya stabilitas kapal tersebut (Larsson & Eliasson, 2000).

3. Titik metasentrum (M / *Metacentre*)

Titik Metasentrum sebuah kapal adalah sebuah titik di kapal yang merupakan titik putus yang busur ayunannya adalah lintasan yang dilalui oleh titik tekan kapal. Titik Metasentrum sebuah kapal dengan sudut-sudut senget

kecil terletak pada perpotongan garis sumbu dan, arah garis gaya tekan keatas sewaktu kapal menyenget. Untuk sudut-sudut senget kecil kedudukan Metasentrum dianggap tetap, sekalipun sebenarnya kedudukan titik itu berubah-ubah sesuai dengan arah dan besarnya sudut senget. Oleh karena perubahan letak yang sangat kecil, maka dianggap tetap (Larsson & Eliasson, 2000).

2.4.1 Perhitungan *Deadweight* dan *Consumable* Kapal

Perhitungan DWT dan consumable kapal dilakukan untuk mengetahui kemampuan kapal dalam membawa beban tambahan di luar berat kapal kosong serta untuk menentukan pengaruh setiap komponen beban terhadap berat total dan titik berat kapal. Komponen consumable seperti bahan bakar, minyak pelumas, air tawar, bahan makanan, crew, barang bawaan, dan cadangan operasional perlu dihitung karena seluruh beban tersebut termasuk dalam deadweight dan akan memengaruhi *displacement*, LCG, TCG, VCG, trim, serta stabilitas kapal. Dengan mengetahui besarnya masing-masing consumable, perencana dapat menentukan sisa kapasitas yang tersedia sebagai muatan bersih sekaligus memastikan bahwa distribusi berat kapal masih berada dalam batas aman. Hal ini sejalan dengan pengertian *deadweight* sebagai selisih antara *displacement* dan *lightweight*, serta sebagai ukuran kemampuan kapal membawa *cargo*, *stores*, *ballast water*, *provisions*, *crew*, dan beban lainnya.

Secara umum, persamaan deadweight sebagai berikut:

$$DWT = \Delta - LWT \quad (2.1)$$

Dimana:

DWT : *deadweight tonnage* kapal (ton)

Δ : *displacement* kapal pada kondisi muatan tertentu (ton)

LWT : *light weight* tonnage atau berat kapal kosong (ton)

Dalam analisis perencanaan kapal, DWT tidak seluruhnya dapat dianggap sebagai muatan bersih karena sebagian digunakan untuk memenuhi kebutuhan operasional kapal selama pelayaran. Komponen tersebut disebut *consumable*, yaitu beban yang berkurang selama kapal beroperasi.

Consumable meliputi bahan bakar mesin induk, bahan bakar mesin bantu, minyak pelumas, air tawar, bahan makanan, crew dan barang bawaan, serta cadangan operasional. Dengan demikian, berat muatan bersih atau *payload* dapat diperoleh dengan mengurangi DWT terhadap seluruh berat *consumable* yang diperlukan selama pelayaran. Persamaan berat muatan bersih sebagai berikut:

$$W_{pc} = DWT - (W_{fo} + W_{fb} + W_{lo} + W_{fw} + W_p + W_{cp} + W_r) \quad (2.2)$$

Dimana:

W_{pc} : berat muatan bersin atau payload (ton)

W_{fo} : berat bahan bakar mesin induk (ton)

W_{fb} : berat bahan bakar mesin bantu (ton)

W_{lo} : berat minyak pelumas (ton)

W_{fw} : berat air tawar (ton)

W_p : berat bahan makanan/provisions (ton)

W_{cp} : berat crew dan barang bawaan (ton)

W_r : berat Cadangan (ton)

Berat bahan bakar mesin induk dihitung berdasarkan daya mesin, spesifik konsumsi bahan bakar, jarak pelayaran, kecepatan dinas, dan faktor koreksi cadangan. Perhitungan ini diperlukan karena bahan bakar merupakan salah satu komponen *consumable* terbesar pada kapal bermesin. Semakin besar daya mesin, jarak pelayaran, dan faktor cadangan, maka kebutuhan bahan bakar akan semakin meningkat. Rumus estimasi berat bahan bakar mesin induk dapat ditulis sebagai berikut:

$$W_{fo} = BHP \times bme \times (S / V_s) \times 10^{-6} \times C \quad (2.3)$$

Dimana:

W_{fo} : berat bahan bakar mesin induk (ton)

BHP : daya mesin induk (kW)

bme : spesifik konsumsi bahan bakar mesin induk (g/kWh) S

: jarak pelayaran (nautical mile)

V_s : kecepatan dinas kapal (knot)

C : faktor koreksi cadangan bahan bakar

Bahan bakar mesin bantu dihitung sebagai persentase dari bahan bakar mesin induk. Mesin bantu digunakan untuk mendukung kebutuhan kelistrikan, pompa, dan peralatan pendukung lain selama kapal beroperasi. Dalam perhitungan awal, berat bahan bakar mesin bantu dapat diambil sebesar 10% sampai 20% dari berat bahan bakar mesin induk, tergantung kebutuhan operasional kapal. Rumusnya sebagai berikut:

$$W_{fb} = k \times W_{fo} \quad (2.4)$$

Dimana:

W_{fb} : berat bahan bakar mesin bantu (ton)

K : koefisien kebutuhan bahan bakar mesin bantu (0,10-0,20)

W_{fo} : berat bahan bakar mesin induk (ton)

Berat minyak pelumas dihitung berdasarkan daya mesin, konsumsi minyak pelumas, waktu pelayaran, dan faktor cadangan. Minyak pelumas diperlukan untuk menjaga kinerja mesin, mengurangi gesekan, mencegah keausan, serta membantu pendinginan komponen mesin. Rumus estimasi berat minyak pelumas sebagai berikut:

$$W_{lo} = BHP \times b_{lo} \times (S / V_s) \times 10^{-6} \times C \quad (2.5)$$

Dimana:

W_{lo} : berat minyak pelumas (ton)

BHP : daya mesin induk (kW)

b_{lo} : spesifik konsumsi minyak pelumas (g/kWh) S

: jarak pelayaran (nautical mile)

V_s : kecepatan dinas kapal (knot) C

: faktor koreksi cadangan

Air tawar merupakan salah satu komponen consumable yang digunakan untuk kebutuhan minum, mencuci, mandi, memasak, dan pendingin mesin. Besarnya kebutuhan air tawar dipengaruhi oleh jumlah crew, lama pelayaran, kebutuhan harian tiap orang, serta kebutuhan teknis mesin. Secara umum, total berat air tawar diperoleh dari penjumlahan seluruh kebutuhan air tawar selama pelayaran, yaitu:

$$W_{fw} = W_{minum} + W_{cuci} + W_{pendingin} + W_{mandi} + W_{masak} \quad (2.6)$$

Dimana:

W_{fw} : berat total air tawar (ton)

W_{minum} : kebutuhan air minum (ton)

W_{cuci} : kebutuhan air untuk mencuci (ton)

$W_{pendingin}$: kebutuhan air pendingin mesin (ton)

W_{mandi} : kebutuhan air mandi (ton)

W_{masak} : kebutuhan air memasak (ton)

Berat bahan makanan atau *provisions* dihitung berdasarkan jumlah crew dan lama pelayaran. Komponen ini diperlukan untuk memenuhi kebutuhan konsumsi selama kapal beroperasi. Dalam perhitungan awal, berat *provisions* dapat dihitung menggunakan kebutuhan harian per orang yang dikalikan dengan jumlah crew dan durasi pelayaran. Rumusnya sebagai berikut:

$$W_p = q_p \times Z_c \times t \quad (2.7)$$

Dimana:

W_p : berat bahan makanan (ton)

Q_p : kebutuhan bahan makanan per orang per hari
: Z_c : jumlah crew

T : lama pelayaran dalam hari

Berat *crew* dan barang bawaan terdiri dari berat awak kapal serta barang pribadi yang dibawa selama pelayaran. Berat *crew* dihitung berdasarkan asumsi berat rata-rata setiap orang, sedangkan barang bawaan dihitung berdasarkan jumlah *crew* dan lama pelayaran. Komponen ini termasuk dalam DWT karena menjadi beban tambahan yang dibawa kapal saat beroperasi. Rumusnya sebagai berikut:

$$W_{cp} = W_{crew} + W_{barang} \quad (2.8)$$

Dimana:

W_{cp} : berat *crew* dan barang bawaan (ton)

W_{crew} : berat total *crew*(ton)

W_{barang} : berat total barang bawaan *crew* (ton)

Selain *consumable* utama, kapal juga perlu menyediakan berat cadangan. Berat cadangan digunakan untuk mengakomodasi peralatan tambahan, cat, perlengkapan reparasi kecil, serta kebutuhan lain yang mungkin diperlukan selama pelayaran. Pada tahap perencanaan awal, berat cadangan dapat ditentukan sebagai persentase tertentu dari displacement kapal.

$$W_r = k_r \times \Delta \quad (2.9)$$

Dimana:

W_r : berat Cadangan (ton) K_r

: koefisien Cadangan

Δ : displacement kapal (ton)

Setelah berat setiap komponen *consumable* diperoleh, volume tangki dapat ditentukan berdasarkan massa jenis fluida. Volume tangki bahan bakar, minyak pelumas, dan air tawar dihitung dengan membagi berat fluida terhadap massa jenisnya. Untuk perencanaan tangki, volume dasar biasanya ditambah margin tertentu untuk ruang ekspansi, toleransi pengisian, dan cadangan volume tangki. Rumus dasar volume fluida adalah:

$$V = W / \rho \quad (2.10)$$

Dimana:

V : volume fluida (m³) W

: berat fluida (ton)

P : massa jenis fluida (ton/m³)

Berdasarkan uraian tersebut, perhitungan *consumable* memiliki peran penting dalam perencanaan kapal karena berkaitan langsung dengan besarnya DWT, kapasitas muatan bersih, kebutuhan volume tangki, displacement, trim, dan stabilitas kapal. Peningkatan kebutuhan *consumable* akan mengurangi kapasitas payload yang dapat dimanfaatkan sebagai muatan bersih. Oleh sebab itu, analisis *consumable* perlu dilakukan secara sistematis agar hasil perhitungan DWT dan payload sesuai dengan kebutuhan operasional serta tetap mendukung kondisi keseimbangan dan stabilitas kapal.

2.4.2 Macam-macam Kondisi Stabilitas Kapal

Ditinjau dari hubungan-hubungan yang ada antara kedudukan titik berat (G) dan Metasentrumnya (M), sebuah kapal mungkin memiliki stabilitas sebagai berikut:

1. Stabilitas mantap (stabilitas positif), apabila kedudukan metasentrumnya (M) lebih tinggi dari pada kedudukan titik beratnya (G), Sebuah kapal yang memiliki stabilitas mantap sewaktu kapal menyenget, kapal memiliki kemampuan untuk menegak kembali.
2. Stabilitas goyah (stabilitas negatif), apabila kedudukan metasentrumnya (M) lebih rendah dari pada kedudukan titik beratnya (G). Sebuah kapal yang memiliki stabilitas goyah (stabilitas negatif) ini sewaktu kapal menyenget. Kapal tidak memiliki kemampuan untuk menegak kembali, tetapi bahkan sengetnya semakin besar.
3. Stabilitas netral, apabila kedudukan titik beratnya berimpit dengan kedudukan metasentrumnya. Sebuah kapal yang memiliki stabilitas netral ini sewaktu menyenget, kapal tidak memiliki kemampuan untuk menegak kembali demikian pula tidak bertambah menyenget lagi.

Perbedaan terhadap jenis stabilitas sebagaimana tersebut diatas hanya berlaku didalam hal stabilitas awal saja. Mengapa demikian, sebab sudah jelas bahwa kapal yang menyenget dengan sudut-sudut yang besar, pada akhirnya kapal akan menjadi goyah dan terbalik (Larsson, L., & Eliasson, R.E. (2000).

2.4.3 Perhitungan Berat dan Momen Tangki Ballast Tetap

Ballast tetap merupakan pemberat permanen yang ditempatkan pada bagian tertentu kapal untuk memperbaiki distribusi berat dan keseimbangan kapal. Dalam analisis stabilitas, penambahan berat tidak hanya ditinjau dari besar massanya, tetapi juga dari posisi titik beratnya terhadap *centerline* kapal. Apabila suatu berat ditambahkan pada salah satu sisi kapal, titik berat kapal akan bergeser ke arah posisi berat tersebut. Prinsip ini sesuai dengan teori stabilitas kapal yang menjelaskan bahwa perubahan berat, penambahan beban, atau perpindahan beban akan memengaruhi posisi pusat gravitasi

kapal melalui prinsip momen berat (Barrass & Derrett, 2006).

Pada kasus kapal yang mengalami kecenderungan *heel* ke arah *starboard*, ballast tetap dapat ditempatkan pada sisi *port* untuk menghasilkan momen penyeimbang. Penempatan ballast pada sisi yang berlawanan dengan arah kemiringan bertujuan untuk menggeser *transverse center of gravity* atau TCG agar mendekati *centerline* kapal. Nilai TCG yang semakin dekat dengan nol menunjukkan bahwa distribusi berat melintang kapal semakin seimbang. Oleh karena itu, perhitungan momen melintang perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh ballast terhadap keseimbangan kapal (Barrass & Derrett, 2006).

Material ballast tetap dapat berupa beton, baja, atau material padat lain yang memiliki massa jenis cukup besar. Pada penelitian ini, material ballast yang digunakan adalah beton. Beton dipilih karena memiliki massa jenis yang cukup tinggi dan dapat digunakan sebagai pemberat tetap. Massa jenis beton normal umumnya berada pada kisaran sekitar 2400 kg/m^3 atau setara dengan $2,4 \text{ ton/m}^3$, sehingga nilai tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam perhitungan berat ballast tetap (UltraTech Cement, n.d.).

Berat ballast tetap dapat dihitung berdasarkan hubungan antara volume dan massa jenis material. Secara umum, massa jenis didefinisikan sebagai perbandingan antara massa dan volume. Oleh karena itu, berat ballast dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$W_{ballast} = V_{ballast} \times \rho_{beton} \quad (2.11)$$

Dimana:

W : berat ballast (ton)

V : volume ballast (m³)

P : massa jenis beton (ton/m³)

Selain berat ballast, momen melintang ballast juga perlu dihitung karena posisi ballast terhadap centerline kapal menentukan besar pengaruhnya terhadap TCG kapal. Momen melintang dihitung dengan mengalikan berat ballast terhadap jarak TCG ballast dari centerline kapal.

$$M_{ballast} = W_{ballast} \times TCG_{ballast} \quad (2.12)$$

Dimana:

M : momen melintang ballast (ton.m)

W : berat ballast tetap (ton)

TCG : posisi titik berat ballast terhadap centerline kapal (m)

Setelah berat dan momen ballast diketahui, TCG total kapal setelah modifikasi dapat dihitung dengan prinsip jumlah momen dibagi jumlah berat. Persamaan ini digunakan untuk mengetahui posisi titik berat melintang kapal setelah ballast tetap ditambahkan.

$$TCG_{total} = \Sigma(W_i \times TCG_i) / \Sigma W_i \quad (2.13)$$

Dimana:

TCG total : titik berat melintang total kapal (m)

W : berat setiap komponen (ton)

TCG : posisi titik berat melintang setiap komponen terhadap *centerline* (m)

Dengan menggunakan prinsip tersebut, penambahan ballast tetap pada sisi port dapat dihitung pengaruhnya terhadap keseimbangan melintang kapal. Apabila nilai TCG total setelah modifikasi semakin mendekati *centerline*, maka distribusi berat kapal menjadi lebih seimbang. Dalam penelitian ini, perhitungan ballast tetap digunakan sebagai dasar untuk menjelaskan perubahan TCG kapal pada Kondisi 3 setelah adanya penambahan ballast beton.

2.4.4 Periode Olang

Periode olang kapal adalah waktu yang diperlukan kapal untuk menyelesaikan satu siklus gerakan olang (*rolling*) penuh, diukur dari posisi kemiringan maksimum ke arah satu sisi hingga kembali ke posisi maksimum ke arah sisi berlawanan. Analisis stabilitas kapal saat periode olang yang terlalu pendek dapat menyebabkan gerakan yang tidak stabil dan tidak nyaman, sedangkan yang terlalu panjang dapat memperlambat respons kapal terhadap gelombang laut. Dasar teori periode olang berasal dari mekanika fluida dan dinamika kapal, yang dapat dijelaskan melalui persamaan gerak harmonik sederhana (Gillmer, T.P. & Homola, J.R, 1986), dengan rumus :

$$T = 2\pi \sqrt{K^2/GM} \quad (2.14)$$

Dimana :

T : Periode olang (dalam detik).

K : Jari-jari kelembaman (*radius of gyration*) di sekitar sumbu longitudinal (untuk olengan melintang)

GM : Tinggi metasentris (*Metacentric Height*), jarak vertikal Antara:
titik berat (G) dan metasentrum (M).

2.4.5 Software Bantu

merupakan software bantu berperan penting sebagai alat simulasi dan perhitungan untuk menganalisis dampak modifikasi tangki pada stabilitas kapal. Software ini memungkinkan pemodelan virtual kapal, perhitungan parameter stabilitas seperti *metacentric height* (GM), kurva *righting arm* (GZ), dan *efek free surface*, tanpa perlu eksperimen fisik yang mahal dan berisiko. Penggunaan software ini didasarkan pada prinsip naval architecture dan hidrodinamika, memastikan analisis akurat dan efisien. Pemilihan software didasarkan pada kemampuan untuk menangani model 3D kapal kecil seperti crewboat, dengan integrasi data input seperti dimensi kapal, distribusi massa, dan kondisi beban (Bhattacharyya, R. (1978).

2.4.6 Tegangan

AutoCAD adalah perangkat lunak desain dan drafting komputer yang dikembangkan oleh Autodesk sejak tahun 1982, dirancang untuk membuat gambar teknis 2D dan 3D dengan presisi tinggi, serta mendukung simulasi dan analisis di bidang arsitektur, teknik sipil, mekanik, dan konstruksi. Software ini menawarkan fitur seperti kolaborasi cloud, kustomisasi melalui bahasa pemrograman AutoLISP, dan kompatibilitas dengan format file DWG, menjadikannya alat esensial bagi profesional industri kreatif dan teknis (Autodesk, Inc. 2023).

2.4.7 Maxsurf

Maxsurf adalah paket perangkat lunak desain kapal yang menggabungkan pembuatan hull 3D dengan analisis kinerja seperti hidrostatik, stabilitas, dan *seakeeping*, sehingga alur desain dapat berjalan dalam satu lingkungan terpadu. Modul utamanya mencakup modeler untuk membentuk lambung, *Stability/Hydrostatics* untuk evaluasi gaya apung dan stabilitas, *Resistance* untuk memperkirakan hambatan, serta motion untuk analisis respons terhadap gelombang [referensi umum dari sumber tutorial dan panduan Maxsurf}. Studi dan dokumentasi akademik menunjukkan tren penggunaan Maxsurf sebagai alat desain dan simulasi kapal, dengan fokus pada kombinasi antara pemodelan geometris dan analisis performa beberapa

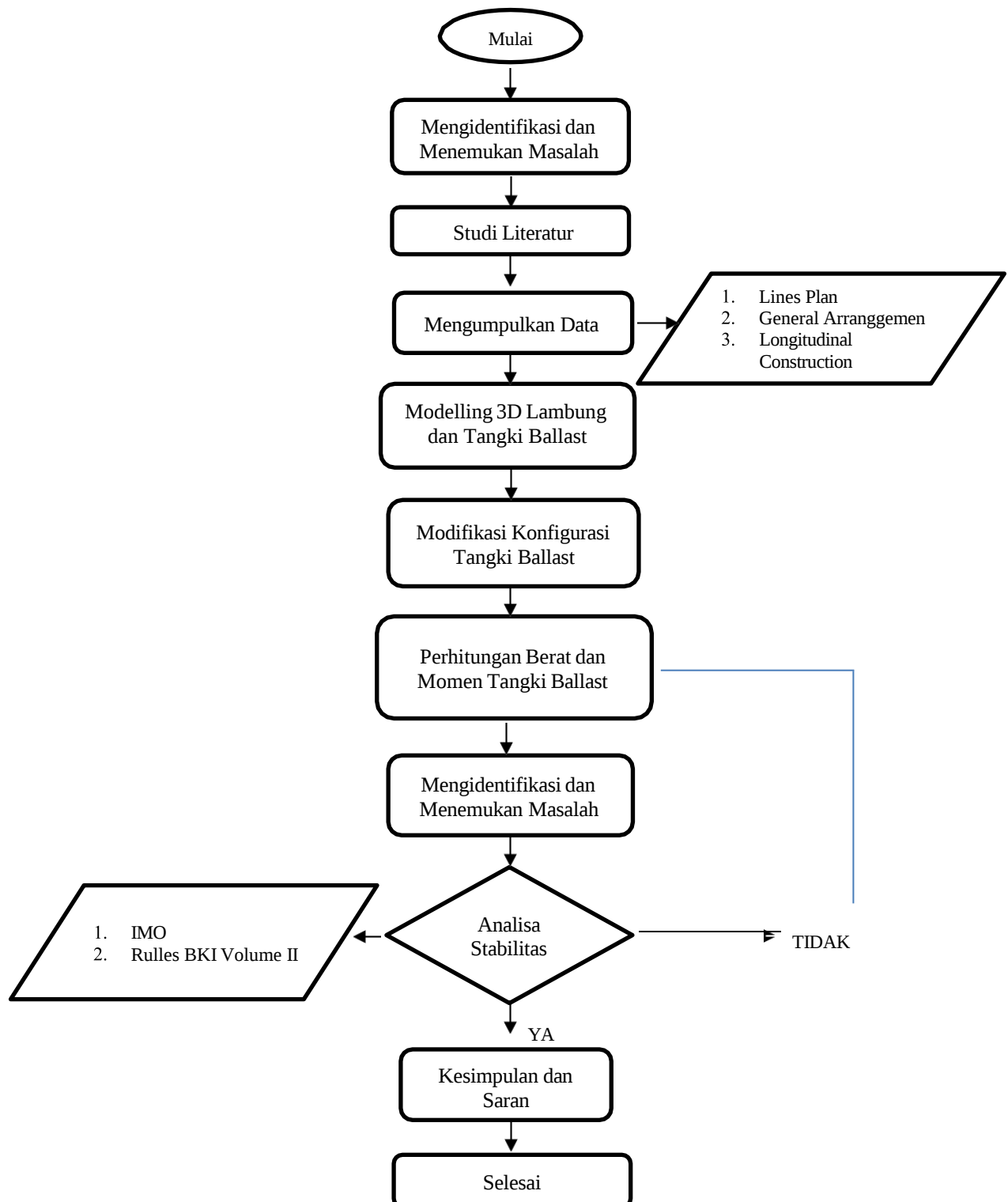
karya juga membahas penerapan maxsurf pada kapal skala berbeda serta potensi keterbatasan model untuk kapal kecil hingga menengah. Ringkasnya, maxsurf mendeskripsikan lingkungan komprehensif untuk perancangan kapal yang mengintegrasikan geometri hull dan evaluasi kinerja, dengan dukungan panduan praktis dan literatur akademik yang membahas metodologi serta aplikasi perangkat lunak tersebut (Bentley Systems, Inc. (2020)).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Berikut Langkah-langkah yang dilakukan berdasarkan *flow chart*.
Lebih jelasnya bisa dilihat pada (Gambar 3.1)



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi

3.2 Identifikasi Masalah

Pada Langkah awal ini dilakukan identifikasi terhadap permasalahan guna mendapatkan rumusan dan tujuan dari penelitian. Oleh karena itu ditentukan masalah berupa stabilitas kapal terhadap modifikasi pada tangki ballast kapal crew boat 25 PAX.

3.3 Studi Literatur

Studi ini dilakukan dengan mengumpulkan referensi-referensi dari berbagai sumber diantaranya perpustakaan, jurnal, buku dan juga dari tugas akhir terdahulu. Studi literatur dilakukan untuk memperoleh dasar teori yang akan digunakan untuk menyelesaikan tugas akhir ini.

3.4 Mengumpulkan Data

Dilakukan pengumpulan data-data pendukung yang dibutuhkan diantaranya berupa data sekunder dari *linesplan* dan *General arrangement*. Data pendukung ini didapatkan dari galangan Perusahaan di Lamongan.

3.5 Membuat Model Lambung dan Tangki

Pembuatan ulang model lambung, tangki dan ruang kedap pada kapal dengan menggunakan software autocad, *maxsurf modeler*, dan *maxsurf stability* berdasarkan data kapal yang diperoleh.

3.6 Menghitung Beban Volume dan Berat Tangki Ballast

Berdasarkan geometri ini dihitung volume dan berat tiap tangki ballast serta posisi pusat beratnya, untuk mendapatkan kondisi muat total. Selanjutnya dilakukan analisis *maxsurf stability* (GM, kurva GZ, dan parameter terkait), yang dibandingkan dengan persyaratan stabilitas utuh berlaku untuk menilai pengaruh modifikasi tangki ballast terhadap kestabilan kapal.

3.7 Menghitung Beban Total Kapal

Setelah dihitung beban tambahan, maka dapat diketahui beban total kapal sesudah dimodifikasi pada tangki ballast dengan bantuan gambar linesplan dan general arrangement untuk mengetahui ukuran-ukuran yang dibutuhkan. Perhitungan beban kapal dilakukan dengan software excel, untuk mempermudah perhitungan.

3.8 Analisis Stabilitas

penelitian ini menggunakan metode analisis stabilitas maxsurf stability . Setelah dilakukan pembuatan ulang linesplan kapal berdasarkan pendekatan terhadap general arrangement serta perhitungan beban total kapal, dilakukan pemodelan 3D lambung dan kondisi muat pada perangkat lunak untuk memperoleh data hidrostatis dan kurva stabilitas. Analisis stabilitas kapal kemudian dilaksanakan sesuai persyaratan stabilitas utuh (intact stability) yang diterapkan oleh IMO dan rules BKI volume II sehingga diperoleh parameter seperti nilai GM dan kurva GZ untuk berbagai kondisi muat. Berdasarkan hasil tersebut, dapat ditentukan nilai GM maksimum dan dihitung nilai periode oleng kapal sebagai indikator karakteristik gerak dan kenyamanan kapal.

3.9 Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini dilakukan pengambilan kesimpulan dari analisis stabilitas yang telah dilakukan pada Maxsurf Stability. Dapat diketahui apakah hasil analisis stabilitas ini memenuhi persyaratan IMO yang diterapkan. Kemudian saran-saran yang dapat memudahkan pembaca untuk memahami hasil dari analisis pada tugas akhir ini.

3.10 Menarik Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini dilakukan pengambilan kesimpulan dari analisis stabilitas yang telah dilakukan pada Maxsurf Stability. Dapat diketahui apakah hasil analisis stabilitas ini memenuhi persyaratan IMO yang

diterapkan. Kemudian saran-saran yang dapat memudahkan pembaca untuk memahami hasil dari analisis pada tugas akhir ini.

3.11 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian bertempat di perusahaan yang berlokasi di Paciran, Lamongan. Penentuan lokasi ini dipertimbangkan berdasarkan adanya permasalahan kapal crew boat mengalami oleng (miring) secara terus-menerus ke satu sisi dan tidak dapat kembali ke posisi tegak secara otomatis, sehingga dilakukan modifikasi pada tangki ballast untuk mengatasi masalah tersebut. Penelitian dilaksanakan mulai bulan November 2025 Hingga Juni 2026.

3.12 Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini tentu sudah didapatkan parameter – parameter yang diinginkan. Dari hasil analisa simulasi dapat ditarik beberapa kesimpulan dan saran – saran utama kepada pembaca untuk memudahkan dalam memahami hasil analisa.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Permodelan Crew Boat 25 PAX

Sebelum dilakukan analisis, perlu dibuat model menggunakan software modeller dengan ukuran utama kapal sebagai berikut :

Length Over All (LOA) : 25,00 M

Length Between Perpendicular (LPP) : 20,50 M

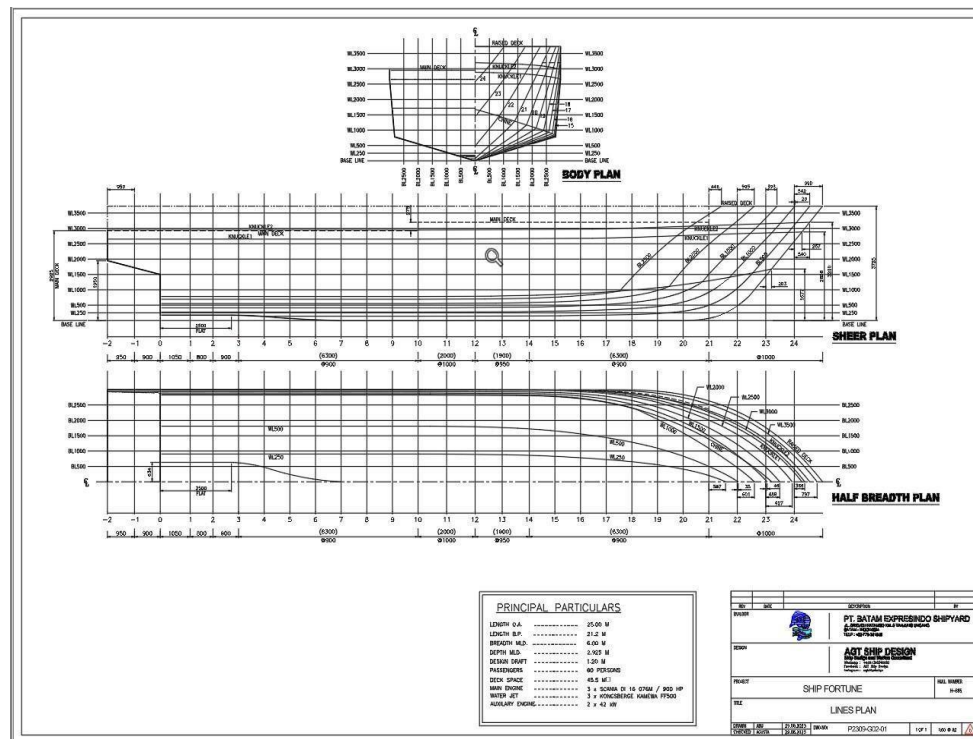
Breadth (B) : 6,00 M

Depth Moulded (H) : 2,92 M

Design Draft (T) : 1,20 M

Main Engine : 3x SCANIA DI 16 076 M / 900 HP

Ship type : Crew Boat

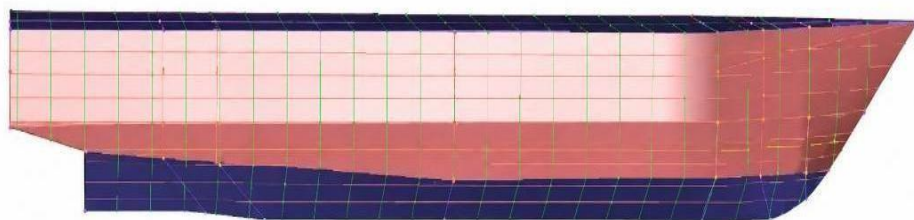


Gambar 4.1 *Linesplane Crewboat 25 PAX*
(Sumber : Galangan PT. Tri Ratna Diesel, 2025)

Permodelan kapal crewboat merupakan tahap awal yang dilakukan sebelum proses analisis teknis terhadap karakteristik kapal. Pada tahap ini

bentuk kapal dibuat dalam model tiga dimensi menggunakan perangkat lunak permodelan kapal agar bentuk lambung, dimensi utama, serta susunan umum kapal dapat dipresentasikan secara lebih jelas. Permodelan ini bertujuan untuk memperoleh gambaran bentuk kapal yang mendekati kondisi sebenarnya, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam proses analisis berikutnya. Kapal *crewboat* merupakan jenis kapal cepat yang umumnya digunakan untuk mengangkut awak kapal, teknisi, maupun kebutuhan operasional menuju lokasi kerja diperairan. Oleh karena itu, bentuk lambung kapal perlu dirancang dengan mempertimbangkan aspek kecepatan, stabilitas, keselamatan dan kenyamanan penumpang. Dalam permodelan ini, bentuk lambung dibuat berdasarkan ukuran utama kapal serta acuan desain yang sesuai dengan karakteristik kapal *crew boat*.

Proses permodelan dilakukan dengan pendekatan terhadap data ukuran utama kapal, seperti panjang kapal, lebar kapal, tinggi kapal dll. Data tersebut menjadi dasar dalam membentuk geometri lambung kapal agar sesuai dengan fungsi operasionalnya. Selain itu permodelan juga memperhatikan bagian-bagian penting seperti haluan, buritan, geladak utama, dll. Hasil dari permodelan kapal *crewboat* ini nantinya yang digunakan sebagai objek analisis pada tahap berikutnya. Dengan adanya model kapal, proses analisis dapat dilakukan secara lebih terarah, karena bentuk kapal telah divisualisasikan dalam bentuk yang lebih mendekati kondisi rancangan sebenarnya. Bisa dilihat dari gambar 4.2 sebagai berikut.



Gambar 4.2 Permodelan Crew Boat 25 PAX
Sumber : Dokumentasi Pribadi Maxsurf Modeller, 2025

Pada permodelan kapal crewboat Gambar 4.2 menjelaskan model yang dibuat berfokus pada bentuk lambung kapal sebagai dasar untuk proses analisis teknis lanjutan. Permodelan dilakukan menggunakan pendekatan geometri tiga dimensi dengan memperhatikan bentuk haluan, buritan, dan sisi lambung serta bagian dasar kapal. Garis-garis pada model menunjukkan pembagian permukaan lambung yang membantu melihat kelengkungan dan kesesuaian bentuk kapal. Perangkat lunak *Maxsurf Modeller* dapat digunakan untuk memodelkan berbagai bentuk lambung kapal dan menghasilkan data desain seperti *hull lines*, *table of offsets*, serta data hidrostatik (Bentley Systems, 2022).

4.2 Validasi Data Kapal

Setelah melakukan pemodelan kapal, tahap selanjutnya adalah membandingkan model tersebut dengan data kapal sebenarnya. Validasi dilakukan dengan membandingkan parameter hidrostatik kapal menggunakan batas toleransi error sebesar 2%. Sebelum hasil validasi ditampilkan dalam bentuk tabel, perlu dijelaskan bahwa parameter hidrostatik digunakan sebagai dasar pembanding karena berkaitan langsung dengan karakteristik geometri dan daya apung kapal. Parameter tersebut dapat menunjukkan ketepatan bentuk, ukuran, dan volume model kapal yang telah dibuat.

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan pada model dengan data kapal sebenarnya sehingga tingkat kesesuaian model dapat diketahui. Menurut ITTC (2021), proses validasi bertujuan untuk menilai kesesuaian hasil simulasi atau pemodelan terhadap data acuan dengan memperhatikan besarnya kesalahan dan ketidakpastian hasil. Perbedaan nilai pada setiap parameter dihitung dalam bentuk persentase error. Nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan batas toleransi yang telah ditetapkan. Semakin kecil nilai error, semakin tinggi tingkat kesesuaian model terhadap kapal sebenarnya. Hasil validasi juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya kesalahan pada proses pemodelan. Dengan demikian, proses validasi dapat meningkatkan keandalan hasil analisis kapal.

Apabila nilai error masih berada dalam batas toleransi 2%, model kapal dapat dianggap cukup representatif untuk digunakan pada tahap analisis lanjutan. Hasil validasi model kapal dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Validasi Desain Maxsurf

No.	Item	Desain	Data	Koreksi	Unit	Status
1	Volume displacement	80,18	84,18	4,96	m ²	Memenuhi
2	displacemen	80,18	84,18	4,96	ton	Memenuhi
3	Cb	0,551	0,556	1,27	-	Memenuhi
4	Cm	0,659	0,774	17,45	-	Memenuhi
5	Cp	0,814	0,829	1,84	-	Memenuhi
6	Cw	0,886	0,883	-0,34	-	Memenuhi

Sumber : *Maxsurf Modeller* (2025)

Dari tabel tersebut dapat diketahui nilai-nilai setiap item yang dibandingkan. Nilai-nilai item yang dibandingkan tidak terpaut jauh dari kata data kapal sebenarnya. Yang berarti bahwa desain maxsurf sudah mendekati bentuk kapal sebenarnya. Dibutuhkan dengan koreksi yang diterapkan sebesar 2% dan setiap item menunjukkan status memenuhi.

4.3 Simulasi Awal Kapal Pada Kondisi Kosong

Objek imulasi awal kapal pada kondisi kosong dilakukan untuk mengetahui kondisi keseimbangan dasar kapal sebelum diberikan beban muatan. Pada tahap ini, kapal belum membawa muatan utama, sehingga berat yang bekerja hanya berasal dari berat struktur kapal, mesin, perlengkapan tetap, serta komponen permanen lainnya. Kondisi kosong menjadi acuan penting karena dapat menunjukkan apakah kapal sudah memiliki keseimbangan awal yang baik sebelum dilakukan simulasi pada kondisi bermuatan.

Berdasarkan hasil simulasi awal, kapal pada kondisi kosong mengalami kemiringan sebesar 1,2° ke arah *starboard* atau sisi kanan kapal. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapal tidak berada pada posisi tegak sempurna saat mengapung. Meskipun sudut kemiringan tersebut tergolong kecil, kondisi ini tetap

perlu diperhatikan karena kapal dalam keadaan kosong seharusnya berada dalam posisi mendekati seimbang. Dalam stabilitas kapal, kemiringan yang terjadi tanpa adanya gaya luar lebih tepat dipahami sebagai list awal, sedangkan heel umumnya disebabkan oleh gaya luar seperti angin, gelombang, atau gaya saat kapal bermanuver. List terjadi karena adanya gaya dari dalam kapal, misalnya pergeseran atau ketidakseimbangan berat di dalam kapal, Plato, *Stability of Fishing Vessels: List and Loll*.

Kemiringan $1,2^\circ$ ke arah *starboard* menunjukkan adanya kemungkinan pergeseran titik berat kapal ke sisi kanan. Titik berat atau *center of gravity (G)* merupakan titik tempat seluruh berat kapal dianggap bekerja ke bawah. Posisi titik berat sangat dipengaruhi oleh distribusi berat kapal, baik dari struktur, mesin, tangki, perlengkapan, maupun komponen lainnya. Apabila berat komponen lebih dominan pada sisi *starboard*, maka titik berat kapal akan bergeser ke kanan dan kapal akan mencari posisi keseimbangan baru dengan cara miring ke sisi tersebut Danish Maritime Authority, *Stability Guide for Smaller Vessels*.

Kondisi ini dapat dikatakan kurang baik karena simulasi kosong seharusnya menjadi kondisi awal yang paling netral. Apabila pada kondisi kosong kapal sudah mengalami kemiringan, maka ketika kapal diberi muatan, bahan bakar, penumpang, atau perlengkapan tambahan, kemiringan tersebut berpotensi bertambah apabila beban tidak ditempatkan secara seimbang. Dengan demikian, kemiringan awal sebesar $1,2^\circ$ tidak boleh diabaikan karena dapat memengaruhi kenyamanan, efisiensi, serta stabilitas kapal pada tahap pengoperasian berikutnya.

Dari sudut pandang stabilitas, kapal yang baik harus memiliki kemampuan untuk kembali ke posisi tegak setelah mengalami gangguan kecil. Kemampuan ini dipengaruhi oleh hubungan antara titik berat kapal dan titik apung kapal. Titik apung atau *center of buoyancy (B)* merupakan titik resultan gaya apung yang bekerja ke atas pada bagian lambung yang tercelup air. Ketika kapal miring, posisi titik apung akan berubah dan membentuk lengan penegak atau *righting arm (GZ)*. Selain itu, nilai *metacentric height (GM)* juga digunakan sebagai ukuran awal stabilitas kapal, terutama pada sudut kemiringan kecil. Sumber: International Maritime Organization, *International Code on Intact Stability, 2008*.

Berdasarkan hasil tersebut, simulasi awal kapal kondisi kosong menunjukkan

bahwa desain kapal belum sepenuhnya ideal. Kemiringan $1,2^\circ$ ke arah starboard menjadi indikator adanya ketidakseimbangan awal pada distribusi berat kapal. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap posisi komponen tetap, nilai *transverse center of gravity (TCG)*, kesimetrisan lambung, serta kemungkinan adanya beban yang terlalu dominan di sisi kanan kapal. Perbaikan dapat dilakukan dengan memindahkan sebagian komponen berat mendekati garis tengah kapal, menyeimbangkan komponen dengan sisi *port*, atau mengatur ulang distribusi ballast apabila diperlukan.

Dengan demikian, hasil simulasi awal ini menunjukkan bahwa kapal masih memerlukan koreksi desain sebelum dianalisis pada kondisi bermuatan. Kemiringan kecil pada kondisi kosong bukan hanya menjadi hasil angka simulasi, tetapi menjadi tanda awal bahwa distribusi berat kapal belum seimbang secara melintang. Jika tidak diperbaiki, kondisi ini dapat memengaruhi hasil simulasi berikutnya dan berpotensi menyebabkan stabilitas kapal menjadi kurang optimal ketika kapal menerima beban operasional.

4.4 Analisis Solusi Kapal Kembali Tegak dengan Penambahan Ballast Tetap

Profil girder Berdasarkan hasil simulasi awal, kapal kondisi kosong mengalami kemiringan sebesar $1,2^\circ$ ke arah *starboard*. Kemiringan ini menunjukkan bahwa kapal belum berada dalam kondisi tegak seimbang. Oleh karena itu, diperlukan solusi untuk mengembalikan posisi kapal agar mendekati *upright condition* atau kondisi tegak. Dalam pembahasan ini, istilah *even keel* digunakan untuk menggambarkan kondisi kapal yang kembali seimbang, tidak mengalami kemiringan ke *port* maupun *starboard*, serta berada pada posisi yang lebih ideal untuk dianalisis pada kondisi pembebanan berikutnya.

Solusi yang digunakan untuk mengatasi kemiringan tersebut adalah dengan menambahkan *ballast tetap* pada sisi yang berlawanan dengan arah kemiringan kapal. Karena kapal mengalami *heel/list* ke arah ***starboard***, maka ballast tetap perlu ditempatkan pada sisi *port*. Tujuan dari penambahan ballast ini adalah untuk menghasilkan momen penyeimbang terhadap kemiringan yang terjadi, sehingga titik berat kapal dapat bergeser kembali mendekati garis tengah kapal. Dalam konsep stabilitas kapal, penambahan berat pada posisi tertentu akan memengaruhi letak titik berat atau *center of gravity (G)*. Oleh karena itu, ballast harus ditempatkan

secara tepat agar mampu mengoreksi ketidakseimbangan tanpa menimbulkan masalah stabilitas baru Danish Maritime Authority, *Stability Guide for Smaller Vessels*.

Penambahan ballast tetap dipilih karena permasalahan yang terjadi merupakan kemiringan awal pada kondisi kosong, bukan kemiringan sementara akibat pengaruh gelombang atau manuver kapal. Ballast tetap berfungsi sebagai beban koreksi permanen yang membantu menyeimbangkan distribusi berat kapal secara melintang. Dengan adanya ballast tetap, kapal diharapkan tidak lagi memiliki kecenderungan miring ke starboard saat berada dalam kondisi kosong. Namun, penambahan ballast tidak boleh dilakukan secara sembarangan karena setiap penambahan berat akan memengaruhi displacement, sarat kapal, *freeboard*, serta karakteristik stabilitas kapal secara keseluruhan US Coast Guard, *A Best Practices Guide to Vessel Stability*.

Penempatan ballast tetap dilakukan pada *bagian port side* modifikasi dari tangki VOID kapal, tepatnya pada area *double bottom* kapal. Penempatan ballast pada posisi rendah bertujuan untuk membantu menurunkan titik berat kapal sehingga stabilitas awal kapal menjadi lebih baik. Ballast tidak disarankan ditempatkan pada bagian atas kapal karena dapat menaikkan titik berat dan berisiko mengurangi stabilitas. Selain itu, posisi ballast juga perlu diatur agar tidak terlalu jauh ke arah haluan atau buritan, karena penempatan yang terlalu ekstrem secara memanjang dapat menimbulkan perubahan trim. Oleh sebab itu, lokasi yang lebih disarankan adalah pada sisi port bagian bawah, mendekati area tengah kapal atau mendekati posisi *longitudinal center of gravity* (LCG) FAO, *Safety Practices Related to Small Fishing Vessel Stability*.

Secara teknis, penempatan ballast tetap dilakukan dengan prinsip menyeimbangkan momen melintang kapal. Karena kapal miring ke *starboard*, maka tambahan berat diberikan pada sisi *port* agar menghasilkan momen koreksi ke arah berlawanan. Semakin jauh posisi ballast dari garis tengah kapal, semakin besar pengaruh momen koreksinya. Namun, jarak tersebut tetap harus mempertimbangkan keamanan struktur dan ruang penempatan di dalam kapal. Ballast juga harus dipasang secara permanen dan kuat agar tidak bergeser saat kapal beroperasi, karena pergeseran ballast justru dapat menimbulkan ketidakseimbangan baru dan membahayakan stabilitas kapal.

Pada tahap simulasi ballast tetap, model kapal yang sebelumnya mengalami kemiringan $1,2^\circ$ ke *starboard* diberikan tambahan ballast pada sisi *port*. Simulasi dilakukan secara bertahap dengan menyesuaikan berat dan posisi ballast sampai sudut kemiringan kapal berkurang. Pada percobaan awal, penambahan ballast pada sisi *port* mulai menghasilkan perubahan posisi kapal, yaitu sudut kemiringan ke *starboard* menjadi lebih kecil dibandingkan kondisi awal. Hal ini menunjukkan bahwa ballast bekerja sebagai beban penyeimbang yang mampu menggeser titik berat kapal kembali mendekati garis tengah.

Setelah dilakukan penyesuaian berat dan posisi ballast, hasil simulasi menunjukkan bahwa kapal dapat kembali mendekati posisi tegak. Kondisi ini ditandai dengan berkurangnya sudut *heel/list* hingga mendekati 0° . Dengan kata lain, momen berat kapal di sisi *port* dan *starboard* menjadi lebih seimbang. Apabila pada simulasi awal kapal mengalami kemiringan $1,2^\circ$ ke *starboard*, maka setelah penambahan ballast tetap pada sisi *port*, kapal berada pada kondisi lebih stabil karena tidak lagi menunjukkan kemiringan yang signifikan ke salah satu sisi.

Kondisi akhir setelah penambahan ballast tetap menunjukkan bahwa kapal telah mencapai kondisi *even keel* atau tegak seimbang. Pada kondisi ini, kapal tidak lagi mengalami kecenderungan miring ke *starboard* seperti pada simulasi awal. Posisi kapal yang lebih tegak menunjukkan bahwa distribusi berat melintang telah berhasil diperbaiki. Dengan tercapainya kondisi *even keel*, hasil simulasi ini dapat dijadikan dasar bahwa penambahan ballast tetap merupakan solusi yang efektif untuk mengoreksi ketidakseimbangan awal pada kapal kondisi kosong.

Meskipun demikian, penambahan ballast tetap tetap perlu dievaluasi lebih lanjut terhadap parameter lain seperti perubahan displacement, sarat kapal, freeboard, nilai GM, serta kurva GZ. Hal ini penting karena kapal yang sudah tegak belum tentu otomatis memiliki stabilitas yang paling optimal. Stabilitas kapal tidak hanya dilihat dari kondisi tegak secara visual, tetapi juga dari kemampuan kapal menghasilkan momen penegak ketika mengalami kemiringan. Maka dari itu, setelah kapal mencapai kondisi *even keel*, analisis stabilitas lanjutan tetap perlu dilakukan untuk memastikan bahwa kapal aman pada kondisi kosong maupun saat menerima muatan operasional Sumber: International Maritime Organization, *International Code on Intact Stability*, 2008.

Dengan demikian, solusi penambahan ballast tetap dapat digunakan untuk

mengoreksi kemiringan awal kapal sebesar $1,2^\circ$ ke arah *starboard*. Ballast ditempatkan pada sisi *port* bagian bawah kapal, mendekati area tengah kapal, agar mampu memberikan momen koreksi tanpa menimbulkan *trim* berlebih. Hasil simulasi setelah penambahan ballast menunjukkan bahwa kapal dapat kembali berada pada posisi tegak atau *even keel*. Kondisi ini menandakan bahwa permasalahan ketidakseimbangan melintang pada simulasi awal telah berhasil dikoreksi, sehingga kapal lebih layak untuk dianalisis pada tahap simulasi pembebanan berikutnya.

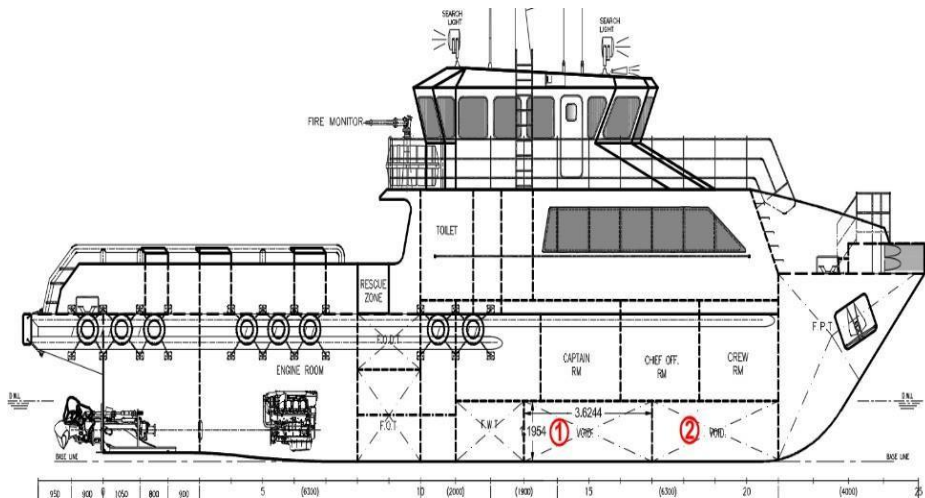
4.5 Perhitungan Volume dan Berat Fixed Ballast

Sebelum memasuki tahapan perhitungan, perlu dijelaskan bahwa penambahan fixed ballast dilakukan sebagai upaya untuk memperbaiki kondisi keseimbangan kapal yang sebelumnya masih mengalami kemiringan ke arah *starboard*. Ballast direncanakan menggunakan material beton dengan volume tertentu sesuai kebutuhan yang diperoleh dari hasil analisis loadcase, bukan berdasarkan kapasitas penuh tangki ballast. Penggunaan beton dipilih karena material tersebut memiliki massa jenis yang cukup besar, mudah diperoleh, dan dapat ditempatkan secara permanen di dalam tangki. Selain itu, beton relatif mudah dibentuk menyesuaikan ruang tangki yang tersedia.

Penentuan volume ballast dilakukan secara terukur agar penambahan berat tidak berlebihan dan tetap sesuai dengan tujuan koreksi stabilitas melintang kapal. Penambahan ballast yang terlalu besar dapat meningkatkan displacement kapal dan memengaruhi sarat, freeboard, serta karakteristik stabilitasnya. Oleh karena itu, jumlah ballast harus disesuaikan dengan selisih momen melintang yang menyebabkan kapal mengalami kemiringan. Posisi ballast juga harus diperhatikan agar momen koreksi yang dihasilkan bekerja secara efektif. Penempatan ballast direncanakan pada sisi yang berlawanan dengan arah kemiringan kapal.

Perhitungan berikut difokuskan untuk menentukan volume efektif beton, tinggi pengisian ballast di dalam tangki, serta momen melintang yang dihasilkan ballast terhadap centerline kapal. Nilai momen tersebut diperoleh berdasarkan perkalian antara berat ballast dan jarak titik berat ballast terhadap centerline. Hasil perhitungan kemudian digunakan untuk memperkirakan perubahan posisi titik berat

melintang kapal. Dengan pendekatan ini, penambahan ballast diharapkan mampu menggeser titik berat melintang kapal menuju posisi yang lebih seimbang sehingga kapal dapat kembali berada dalam kondisi tegak tanpa kemiringan. Kondisi akhir kapal selanjutnya diperiksa kembali melalui analisis loadcase terbaru. Data ukuran tangki ballast yang digunakan dalam perhitungan memiliki dimensi sebagai berikut:



Gambar 4.3 Tangki VOID 1 sebagai Modifikasi *Fixed Ballast*

Sumber : Data Internal dari Perusahaan

Tabel 4.1 Dimension Tangki

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1	Panjang Tangki	3,635	m
2	Lebar Tangki	1,058	m
3	Tinggi Tangki	1,196	m

Sumber : Data Internal Perusahaan

Volume total ruang tangki dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{tangki}} &= L \times B \times H \\
 &= 3,635 \times 1,058 \times 1,196 \\
 &= 4,600 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil tersebut, volume total tangki adalah 4,600 m³. Namun, volume ini tidak digunakan seluruhnya. Apabila tangki diisi penuh dengan beton, maka berat ballast menjadi terlalu besar dan tidak sesuai dengan kebutuhan.

lokasi tangki ballast tetap di sisi kiri dengan :

$$TCG_{\text{ballast}} = -0,711 \text{ m}$$

Massa jenis beton yang digunakan adalah :

$$\rho_{\text{beton}} = 2,400 \text{ ton/m}^3$$

Momen melintang dihitung dengan rumus :

$$\begin{aligned}\Sigma M &= \Sigma W \times TCG \\ &= 50,795 \times 0,060 \\ &= 3,047 \text{ ton} \cdot \text{m}\end{aligned}$$

Berat ballast :

$$\begin{aligned}W_{\text{ballast}} &= \Sigma M_{\text{awal}} / TCG_{\text{ballast}} \\ &= 3,047 / -0,711 \\ &= 4,285 \text{ ton}\end{aligned}$$

Setelah ballast ditetapkan, total berat dan momen adalah :

$$\begin{aligned}\Sigma w_{\text{total}} &= \Sigma W_{\text{awal}} + W_{\text{ballast}} \\ &= 50,795 + 4,285 \\ &= 55,08 \text{ ton}\end{aligned}$$

Jika dasar tangki punya luas $L \times B = 3,635 \times 1,058$, tinggi isi ballast :

$$h = \frac{V_{\text{ballast}}}{L \times B} = 0,496 \text{ m}$$

Dengan konfigurasi tersebut, penambahan fixed ballast beton hanya memanfaatkan sebagian volume tangki, sehingga berat tambahan tetap terkontrol dan tidak melampaui kebutuhan koreksi stabilitas melintang. Massa 4,285 ton yang ditempatkan di tangki sisi kiri dengan TCG $-0,711 \text{ m}$ menghasilkan momen melintang yang cukup untuk meniadakan momen awal kapal, sehingga total momen melintang menjadi nol dan pusat berat melintang bergeser kembali ke *centerline*. Volume efektif beton yang diisikan sampai tinggi tertentu di dalam tangki memastikan bahwa fungsi ballast tercapai tanpa mengorbankan kapasitas ruang maupun mengakibatkan *over-ballasting*. Dengan tercapainya kondisi $\Sigma M = 0$ dan $TCG_{\text{total}} = 0,000 \text{ m}$, kapal dapat dinyatakan telah kembali pada keadaan seimbang melintang dan tidak lagi menunjukkan kecenderungan miring ke arah starboard. Penutup ini menegaskan bahwa penambahan fixed ballast dirancang secara spesifik sebagai solusi korektif yang terukur terhadap masalah kemiringan awal, sehingga kapal dapat mencapai kondisi *even keel* yang lebih aman dan sesuai tujuan operasi.

4.6 Stabilitas Sebelum Modifikasi Fixed Ballast

Analisis stabilitas pada penelitian ini diawali dengan mengevaluasi kondisi awal kapal (*initial condition*) menggunakan perangkat lunak *Maxsurf Stability*. Kondisi yang dianalisis merupakan kondisi kapal kosong (*lightship condition*), yaitu keadaan ketika kapal hanya terdiri atas berat konstruksi, mesin, dan perlengkapan tetap tanpa adanya muatan, penumpang, awak kapal, bahan bakar, air tawar, maupun ballast. Seluruh tangki, termasuk tangki bahan bakar (FOT), tangki diesel (FODT), tangki air tawar (FWT), tangki ballast, serta tangki haluan (FPT), diasumsikan berada pada kondisi 0% terisi sehingga tidak memberikan kontribusi terhadap berat maupun momen kapal.

Hasil analisis pada kondisi awal menunjukkan bahwa kapal mengalami kemiringan (*heel*) sebesar $1,2^\circ$ ke arah *starboard*. Kemiringan tersebut disebabkan oleh distribusi berat awal kapal (*lightship*) yang belum sepenuhnya seimbang terhadap garis tengah (*centerline*), sehingga menghasilkan momen melintang yang menyebabkan kapal tidak berada pada kondisi tegak (*even keel*). Oleh karena itu, kondisi ini dijadikan sebagai kondisi dasar dalam penelitian untuk mengevaluasi pengaruh modifikasi ballast tetap terhadap perbaikan stabilitas melintang kapal. Seluruh tahapan analisis selanjutnya dilakukan dengan membandingkan hasil setelah penambahan ballast tetap terhadap kondisi awal ini.

Data komponen penyusun loadcase pada kondisi awal kapal memuat informasi mengenai massa setiap komponen, volume, posisi longitudinal atau Longitudinal Center of Gravity (LCG), posisi melintang atau Transverse Center of Gravity (TCG), posisi vertikal atau Vertical Center of Gravity (VCG), serta nilai Free Surface Moment (FSM). Analisis stabilitas dilakukan menggunakan perangkat lunak *Maxsurf Stability*. Proses analisis diawali dengan memasukkan distribusi beban pada loadcase *lightship* sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.4. Data tersebut digunakan untuk menggambarkan kondisi berat kosong kapal sebelum menerima tambahan muatan, penumpang, bahan bakar, maupun ballast. Ketepatan penempatan setiap komponen sangat memengaruhi posisi titik berat total kapal. Selanjutnya, hasil input loadcase digunakan sebagai dasar dalam perhitungan stabilitas dan evaluasi kondisi keseimbangan kapal.

Tabel 4.4 Analisi pada Loadcase *Lightship Existing conditional*

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
Lightship	1	50,8	50,8			10,5	0,06	2,771	0	User Specified
Passanger 60	0	0,075	0			15,2	12,2	1,03	0	User Specified
Crew 8	0	0,075	0			14,2	13	1	0	User Specified
Provisions	0	0,5	0			12,2	7,2	0	0	User Specified
FOT (P)	0%	2,709	0	2,869	0	7,31	0	0,028	0	Maximum
FOT (S)	0%	2,719	0	2,879	0	7,31	0	0,028	0	Maximum
FODT (P)	0%	3,694	0	3,912	0	8,12	-1,98	1,817	0	Maximum
FODT (S)	0%	3,693	0	3,911	0	8,12	1,98	1,817	0	Maximum
FWT	0%	9,729	0	9,729	0	11,9	0	0,022	0	Maximum
TANK BALLAST	0%	18,28	0	18,28	0	15,5	0	0,006	0	Maximum
VOID H (C)	0%	17,73	0	17,73	0	16,9	0	0,001	0	Maximum
FPT	0%	14,16	0	14,16	0	19,3	0	0,085	0	Maximum
Total Loadcase			50,8	73,47	0	10,5	0,06	2,771	0	
FS correction								0		
VCG fluid								2,771		

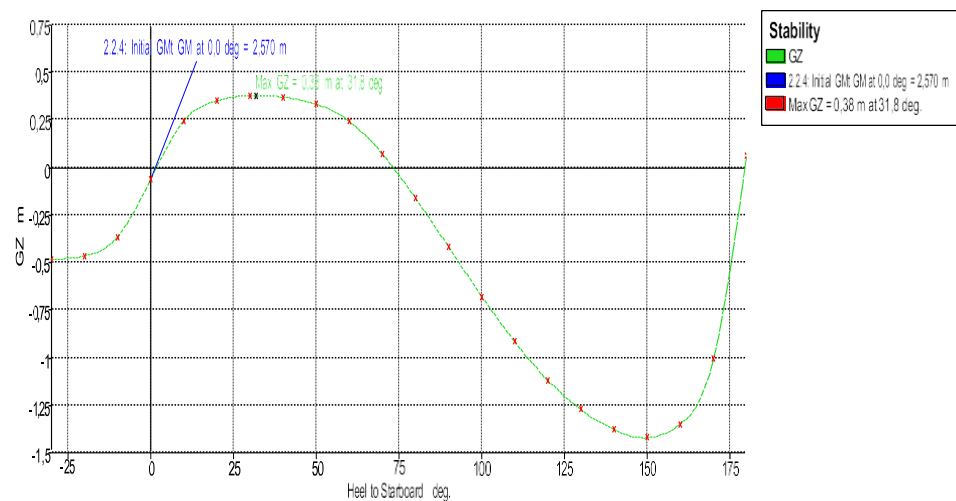
Sumber : *Maxsurf Stability*

Dari tabel 4.4 Pada simulasi awal *lightship*, total displacement kapal hanya berasal dari berat konstruksi dan perlengkapannya, dengan nilai sebesar 50,795 ton sebagai satu-satunya kontribusi massa pada loadcase ini. Seluruh komponen lain seperti penumpang 60 orang (0 ton), crew 8 orang (0 ton), provisions (0 ton), bahan bakar (FOT dan FODT), air tawar (FWT), ballast, VOID H (C), maupun FPT masih bernilai 0 pada kolom “Total Mass”, sehingga total beban tambahan di luar lightship adalah 0 ton dan total “Total Loadcase” tetap 50,795 ton. Pada kondisi ini, tidak ada volume fluida yang terisi (Total Volume = 0 m³) sehingga tidak muncul pengaruh permukaan bebas, dan total FSM (*Free Surface Moment*) keseluruhan tetap 0,000 tonne.m.

Secara geometris, pusat gravitasi total kapal pada kondisi kosong ini berada

pada LCG 10,500 m, TCG 0,060 m, dan VCG 2,771 m. Nilai *Transverse Arm* yang bernilai positif menunjukkan bahwa posisi pusat massa kapal mengalami pergeseran ke arah kanan kapal (*starboard side*). Pergeseran massa ke arah *starboard* tersebut menyebabkan kapal memiliki kecenderungan mengalami kemiringan awal (*initial heel*) menuju sisi kanan kapal, sedangkan LCG 10,500 m akan menjadi acuan untuk membandingkan pergeseran pusat gravitasi memanjang ketika penumpang, *crew*, *provisions*, dan fluida mulai ditambahkan pada *loadcase* lain. Karena semua tangki masih kosong (FOT, FODT, FWT, ballast, VOID H (C), FPT = 0%), total FSM = 0,000 tonne.m dan tidak diperlukan *free surface correction* pada kondisi ini, sehingga nilai KG/VCG yang digunakan benar-benar merepresentasikan karakteristik stabilitas dasar kapal dalam keadaan kosong.

Setelah itu dilakukan pemilihan criteria dengan rule yang digunakan, yaitu IMO Code on Intact Stability for High-Speed Craft (HSC 2000). Selanjutnya dilakukan running pada fungsi *large angle stability* terhadap model *Crewboat 25 PAX* yang telah dibuat. Grafik stabilitas pada kondisi ini dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Grafik Stabilitas Loadcase Lightship

Sumber : Grafik *Maxsurf stability*

Berdasarkan Grafik 4.3 Kurva GZ pada simulasi kapal kosong menunjukkan karakteristik stabilitas yang kurang baik. Nilai GMt awal pada sudut oleng 0 derajat

sebesar 2,570 m kemampuan stabilitas awal yang cukup besar, namun bentuk kurva GZ yang relatif rendah dengan maksimum hanya sekitar 0,38 m pada sudut 31,8 derajat mengindikasikan bahwa kemampuan pemulihan kapal terhadap oleng besar tidak terlalu kuat. Lengan penegak positif hanya mencapai nilai sedang dan kemudian cepat menurun pada sudut oleng besar, sehingga cadangan stabilitas (*reserve stability*) kapal pada kondisi ini dapat dikategorikan kurang optimal.

Selain itu, pada sudut mendekati 70 hingga 170 derajat, nilai GZ sudah berada pada wilayah negatif, yang menggambarkan bahwa kapal kehilangan kemampuan pemulihnya dan masuk ke kondisi tidak stabil pada sudut oleng sangat ekstrem. Dengan mempertimbangkan bahwa pada simulasi ini kapal sudah berada dalam keadaan sekitar 1,2 derajat, bisa dilihat pada hasil equilibrium ini memperkuat kesimpulan bahwa konfigurasi massa dan pusat gravitasi pada kondisi kapal kosong belum memberikan tingkat stabilitas yang memadai dan perlu diperbaiki pada tahap desain atau pengaturan beban berikutnya.

Tabel 4.5 Parameter Hydrostatik Kapal

No.	Parameter	Nilai
1	Draft Amidships m	1,019
2	Displacement t	50,79
3	Heel deg	1,2
4	Draft at FP m	1,058
5	Draft at AP m	0,979
6	Draft at LCF m	1,014
7	Trim (+ve by stern) m	-0,08
8	WL Length m	20,657
9	Beam max extents on WL m	5,597
10	Wetted Area m ²	109,848
11	Waterpl. Area m ²	100,788
12	Prismatic coeff. (Cp)	0,814
13	Block coeff. (Cb)	0,413
14	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,515
15	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,872
16	LCB from zero pt. (+ve fwd) m	10,522
17	LCF from zero pt. (+ve fwd) m	10,168
18	KB m	0,694
19	KG fluid m	2,771
20	BMt m	4,497

21	BML m	60,553
22	GMt corrected m	2,42
23	GML m	58,476
24	KMt m	5,19
25	KML m	61,234
26	Immersion (TPc) tonne/cm	1,033
27	MTc tonne.m	1,291
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	2,145
29	Max deck inclination deg	1,2014
30	Trim angle (+ve by stern) deg	-0,1989

Sumber : Maxsurf Stability

Pada Tabel 4.5 dapat dijelaskan Pada simulasi kapal kosong ini, geometri dan hidrostatik menunjukkan bahwa kapal berada pada *Draft Amidships* sebesar 1,019 m, dengan *Draft at FP* sebesar 1,058 m dan *Draft at AP* sebesar 0,979 m. Perbedaan nilai sarat tersebut menghasilkan nilai *Trim (+ve by stern)* sebesar -0,08 m dengan *Trim Angle (+ve by stern)* sebesar -0,1989°, yang menunjukkan bahwa kapal mengalami kecenderungan *trim by bow*, dimana bagian haluan memiliki sarat lebih besar dibandingkan bagian buritan. Kondisi ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan distribusi massa secara memanjang yang menyebabkan posisi keseimbangan kapal bergeser ke arah depan. *Displacement* kapal tercatat sebesar 50,79 ton dengan panjang garis air (*WL Length*) sebesar 20,657 m dan lebar maksimum pada garis air (*Beam max extents on WL*) sebesar 5,597 m, sedangkan luas bidang basah (*Wetted Area*) sebesar 109,848 m² dan luas bidang garis air (*Waterplane Area*) sebesar 100,788 m².

Bentuk badan kapal pada kondisi ini ditinjau berdasarkan nilai koefisien bentuk, yaitu *Prismatic Coefficient (Cp)* sebesar 0,814, *Block Coefficient (Cb)* sebesar 0,413, *Max Sectional Area Coefficient (Cm)* sebesar 0,515, dan *Waterplane Area Coefficient (Cwp)* sebesar 0,872. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kapal memiliki bentuk badan yang cukup penuh dengan distribusi volume bawah air yang relatif besar terhadap panjang kapal. Selain itu, posisi pusat volume kapal berada pada *LCB from zero point (+ve fwd)* sebesar 10,522 m dan posisi pusat garis apung (*LCF from zero point (+ve fwd)*) sebesar 10,168 m, yang menunjukkan bahwa distribusi volume kapal lebih dominan ke arah depan sehingga berkontribusi

terhadap munculnya kecenderungan *trim by bow* pada kondisi kosong.

Pada simulasi ini, kapal mengalami *heel angle* sebesar $1,2^\circ$ dengan nilai *Max deck inclination* sebesar $1,2014^\circ$, yang menunjukkan bahwa kapal berada dalam kondisi miring meskipun belum menerima beban operasional tambahan. Kondisi ini menunjukkan bahwa distribusi massa kapal dalam arah melintang belum sepenuhnya seimbang. Kemiringan awal tersebut dapat disebabkan oleh adanya pergeseran pusat massa akibat distribusi perlengkapan tetap, struktur, maupun *outfit* kapal yang tidak sepenuhnya simetris terhadap garis tengah kapal (*centerline*), sehingga kapal mencari posisi keseimbangan baru pada sudut kemiringan tertentu.

Berdasarkan hasil parameter hidrostatik tersebut, kondisi kapal kosong dapat dinilai kurang optimal karena masih terdapat kemiringan awal sebesar $1,2^\circ$ dan perubahan posisi keseimbangan akibat distribusi massa yang belum merata. Nilai *RM at 1 deg = GMt Displacement sin(1)* sebesar 2,145 tonne.m, *GMt corrected* sebesar 2,420 m, serta adanya nilai *Trim Angle* sebesar $-0,1989^\circ$ menunjukkan bahwa konfigurasi massa kapal masih perlu dievaluasi. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian distribusi berat dan posisi komponen utama kapal agar kondisi *equilibrium* dapat lebih mendekati posisi tegak, mengurangi kecenderungan *heel* ke satu sisi, serta meningkatkan performa stabilitas kapal pada kondisi operasi sebenarnya. Pada kondisi kapal kosong ini dapat dinilai kurang baik. hal ini mengarah pada perlunya perbaikan distribusi beban dan penyesuaian posisi massa utama agar kapal dapat mencapai kondisi *equilibrium* yang lebih tegak dan memberikan cadangan stabilitas yang lebih aman pada tahap desain berikutnya.

Kemudian nilai tersebut disesuaikan dengan criteria yang telah ditentukan yang dapat dilihat pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Hasil Criteria Loadcase Lightship

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 30	3,1513	m.deg	7,8527	Pass	+149,19
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 40	5,1566	m.deg	11,6323	Pass	+125,58
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 30 to 40	1,7189	m.deg	3,7796	Pass	+119,89
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0,200	m	0,380	Pass	+90,00
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.3: Angle of maximum GZ	25,0	deg	31,8	Pass	+27,27
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.4: Initial GMt	0,150	m	2,570	Pass	+1613,33

Sumber : *Maxsurf Stability*

Dari Tabel 4.6 berdasarkan hasil criteria, meskipun secara angka semua kriteria IMO *Resolution A.267(85) Chapter 2 – General Criteria* tercatat “Pass”, yang berarti kapal secara perhitungan numerik telah memenuhi batas minimum yang dipersyaratkan. Nilai luas area kurva *GZ* pada rentang 0–30° sebesar 7,8527 m.deg lebih besar dibandingkan nilai minimum 3,1513 m.deg dengan margin +149,19%. Selanjutnya, luas area *GZ* pada rentang 0–40° mencapai 11,6323 m.deg dibandingkan batas minimum 5,1566 m.deg dengan margin +125,58%, sedangkan area antara 30–40° memiliki nilai 3,7796 m.deg dibandingkan standar minimum 1,7189 m.deg dengan margin +119,89%. Nilai *GZ maximum* sebesar 0,380 m juga telah melewati batas minimum 0,200 m dengan margin +90,00%, dan sudut maksimum *GZ* sebesar 31,8° masih memenuhi persyaratan karena lebih besar dari batas minimum 25° dengan margin +27,27%. Selain itu, nilai *Initial GMt* sebesar 2,570 m jauh melebihi nilai minimum 0,150 m dengan margin +1613,33%.

Meskipun seluruh parameter pada kriteria IMO tersebut dinyatakan “Pass”, hasil tersebut belum sepenuhnya menggambarkan kondisi stabilitas kapal yang baik secara operasional. Pemenuhan kriteria hanya menunjukkan bahwa karakteristik kurva *GZ* masih berada di atas batas minimum standar, namun tidak secara langsung menunjukkan bahwa distribusi massa kapal telah optimal. Pada kondisi simulasi ini, kapal masih mengalami *heel angle* awal sebesar 1,2°, yang menunjukkan bahwa kapal tidak berada pada kondisi tegak sempurna sejak awal meskipun dalam kondisi kosong tanpa tambahan beban penumpang, kru, maupun fluida tangki.

Dengan adanya *heel* awal tersebut, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi distribusi massa dan posisi pusat gravitasi kapal masih belum ideal karena keseimbangan melintang kapal telah mengalami penyimpangan sebelum kapal menerima beban operasional. Nilai *GZ*, luas area kurva, dan *Initial GMt* yang memenuhi standar menunjukkan bahwa kapal masih memiliki kemampuan pemulih (*righting ability*) yang cukup secara teoritis, tetapi belum mampu mempertahankan kondisi *equilibrium* yang benar-benar tegak. Oleh karena itu, secara praktis kondisi stabilitas kapal ini masih perlu diperbaiki melalui evaluasi distribusi massa, penyesuaian posisi komponen tetap kapal, serta pemerataan

beban agar kecenderungan *heel* awal dapat dikurangi dan kapal mampu mencapai kondisi operasi yang lebih stabil dan aman.

4.7 Analisis Setelah modifikasi Fixed Ballast

Berdasarkan hasil analisis kondisi awal *lightship*, kapal mengalami permasalahan berupa kemiringan awal (*initial heel*) sebesar $1,2^\circ$ yang menunjukkan bahwa distribusi massa kapal belum sepenuhnya seimbang secara melintang. Kondisi tersebut terjadi sebelum kapal menerima beban operasional seperti penumpang, bahan bakar, air tawar, maupun *ballast*, sehingga menunjukkan bahwa sumber ketidakseimbangan berasal dari konfigurasi massa kapal kosong (*lightship condition*), seperti distribusi berat struktur, perlengkapan tetap (*fixed equipment*), maupun komponen *outfit* kapal yang tidak simetris terhadap garis tengah kapal (*centerline*). Walaupun hasil evaluasi stabilitas masih memenuhi kriteria *IMO Resolution A.267(85)*, keberadaan *heel angle* awal sebesar $1,2^\circ$ menunjukkan bahwa posisi keseimbangan kapal belum berada pada kondisi tegak secara optimal.

Sebagai solusi terhadap permasalahan tersebut, dilakukan modifikasi berupa penambahan *fixed ballast* menggunakan material beton. Metode penambahan *fixed ballast* merupakan salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam desain kapal untuk memperbaiki distribusi massa dan mengoreksi ketidakseimbangan melintang akibat posisi pusat gravitasi kapal yang tidak sesuai. Berbeda dengan *water ballast* yang dapat berubah selama operasi, *fixed ballast* memiliki posisi dan massa yang tetap sehingga dapat memberikan koreksi permanen terhadap kondisi keseimbangan kapal. Penempatan beton sebagai *fixed ballast* dilakukan pada lokasi tertentu yang berlawanan dengan arah kemiringan kapal (*heel to starboard*) sehingga menghasilkan momen penyeimbang (*correcting moment*) yang mampu mengurangi kecenderungan kapal miring ke satu sisi.

Perhitungan kebutuhan massa dan posisi pemasangan *fixed ballast* dilakukan berdasarkan besarnya momen kemiringan akibat distribusi massa awal kapal serta kebutuhan momen koreksi untuk mengembalikan kapal menuju kondisi *equilibrium* yang lebih tegak. Detail perhitungan massa beton, posisi longitudinal, transversal, dan vertikal dari *fixed ballast* dapat dilihat pada Tabel

4.1. Hasil perhitungan tersebut kemudian dimasukkan sebagai komponen tambahan pada simulasi *loadcase* untuk mengevaluasi pengaruh modifikasi terhadap perubahan posisi kapal, nilai *heel angle*, serta karakteristik stabilitas setelah dilakukan penambahan *fixed ballast*.

Tabel 4.7 Analisis Loadcase Lightship Setelah Modifikasi

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
Lightship	1	50,8	50,8			10,5	0,06	2,771	0	User Specified
Passanger 60	0	0,075	0			15,2	12,2	1,03	0	User Specified
Crew 8	0	0,075	0			14,2	13	1	0	User Specified
Provisions	0	0,5	0			12,2	7,2	0	0	User Specified
FOT (P)	0%	2,709	0	2,869	0	7,31	0	0,028	0	Maximum
FOT (S)	0%	2,719	0	2,879	0	7,31	0	0,028	0	Maximum
FODT (P)	0%	3,694	0	3,912	0	8,12	-1,98	1,817	0	Maximum
FODT (S)	0%	3,693	0	3,911	0	8,12	1,98	1,817	0	Maximum
FWT	0%	9,729	0	9,729	0	11,9	0	0,022	0	Maximum
TANK BALLAST	0%	18,28	0	18,28	0	15,5	0	0,006	0	Maximum
VOID H (C)	0%	17,73	0	17,73	0	16,9	0	0,001	0	Maximum
FPT	0%	14,16	0	14,16	0	19,3	0	0,085	0	Maximum
TANK BALLAST TETAP	1	4,285	4,285			14,2	-0,71	0,626	0	User Specified
Total Loadcase			55,08	73,47	0	10,8	0	2,604	0	
FS correction								0		
VCG fluid								2,604		

Sumber : *Maxsurf Stability*

Berdasarkan hasil simulasi modifikasi *loadcase* dengan penambahan *fixed ballast* berupa beton, terlihat bahwa penambahan *TANK BALLAST TETAP* berhasil menjadi solusi untuk mengatasi permasalahan *heel angle* awal sebesar

1,2° pada kondisi *lightship* sebelumnya. Pada kondisi awal, kapal mengalami ketidakseimbangan distribusi massa secara melintang yang menyebabkan kapal cenderung miring ke arah *starboard*. Untuk mengatasi kondisi tersebut, dilakukan penambahan *fixed ballast* dengan massa sebesar 4,285 ton yang ditempatkan pada posisi *Long. Arm* 14,232 m, *Trans. Arm* -0,711 m, dan *Vert. Arm* 0,626 m. Posisi *Transverse Arm* yang bernilai negatif menunjukkan bahwa *fixed ballast* ditempatkan pada sisi yang berlawanan terhadap arah kemiringan awal kapal, sehingga menghasilkan momen penyeimbang (*correcting moment*) untuk mengembalikan posisi kapal menuju kondisi tegak.

Setelah penambahan *TANK BALLAST TETAP*, nilai total massa kapal meningkat dari kondisi awal 50,795 ton menjadi 55,080 ton, sedangkan komponen lain seperti penumpang, kru, perbekalan, bahan bakar (*FOT* dan *FODT*), air tawar (*FWT*), *TANK BALLAST*, *VOID H (C)*, dan *FPT* masih berada dalam kondisi kosong dengan nilai *Total Mass* sebesar 0 ton. Penambahan massa tetap tersebut menyebabkan perubahan posisi pusat massa kapal, dimana *Longitudinal Arm* total berubah menjadi 10,804 m, *Transverse Arm* menjadi 0 m, dan *Vertical Arm* menjadi 2,604 m. Nilai *Transverse Arm* sebesar 0 m menunjukkan bahwa distribusi massa kapal telah kembali simetris terhadap garis tengah kapal (*centerline*), sehingga kecenderungan kemiringan ke arah *starboard* akibat ketidakseimbangan massa sebelumnya berhasil dikoreksi.

Selain itu, setelah dilakukan modifikasi, nilai *Total FSM* tetap sebesar 0 tonne.m karena seluruh tangki fluida masih dalam kondisi kosong dan *fixed ballast* berupa beton tidak memberikan pengaruh terhadap efek permukaan bebas (*free surface effect*). Nilai *VCG fluid* setelah modifikasi menjadi 2,604 m, lebih rendah dibandingkan kondisi awal sebesar 2,771 m, yang menunjukkan adanya perubahan posisi pusat massa vertikal akibat penambahan massa ballast pada posisi yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa penempatan *fixed ballast* tidak hanya memperbaiki distribusi massa secara melintang, tetapi juga memberikan pengaruh positif terhadap posisi pusat gravitasi kapal.

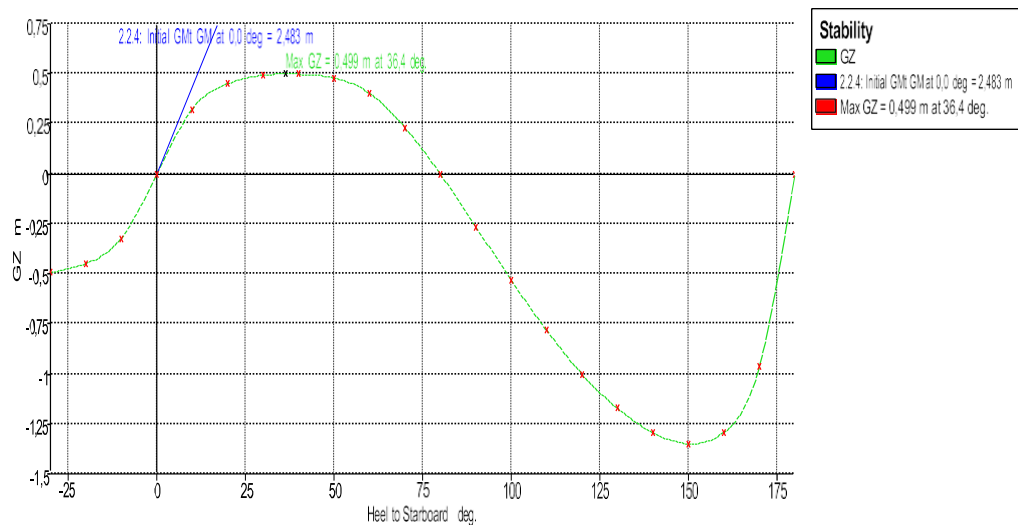
Berdasarkan hasil simulasi tersebut, penambahan *fixed ballast* menggunakan beton dapat dinyatakan sebagai solusi yang tepat untuk memperbaiki permasalahan keseimbangan kapal pada kondisi awal *lightship*. Modifikasi ini berhasil menghilangkan pergeseran massa melintang yang

sebelumnya menyebabkan kapal mengalami *heel* sebesar $1,2^\circ$, sehingga kapal dapat mencapai kondisi *even keel* dengan distribusi massa yang lebih seimbang. Dengan demikian, pemasangan *TANK BALLAST TETAP* mampu meningkatkan kondisi *equilibrium* kapal dan memberikan konfigurasi pembebanan yang lebih sesuai sebelum kapal menerima beban operasional.

Setelah data loadcase terbaru diperoleh, analisis selanjutnya dilakukan dengan mengevaluasi stabilitas kapal berdasarkan kriteria IMO Code on Intact Stability for High-Speed Craft (HSC 2000). Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui perubahan karakteristik stabilitas kapal setelah dilakukan penambahan ballast tetap pada posisi vertikal yang lebih tinggi. Analisis dilakukan menggunakan fungsi large angle stability yang menggambarkan kemampuan kapal dalam menghasilkan lengan penegak atau righting arm (GZ) pada berbagai sudut kemiringan.

Melalui kurva GZ, kondisi stabilitas kapal dapat diamati secara lebih menyeluruh, mulai dari respons kapal pada sudut kemiringan kecil, peningkatan nilai GZ hingga mencapai titik maksimum, sudut terjadinya GZ maksimum, sampai dengan sudut hilangnya stabilitas positif atau angle of vanishing stability. Luas area di bawah kurva GZ juga dianalisis karena menunjukkan besarnya energi pemulih yang dimiliki kapal untuk kembali ke posisi tegak setelah mengalami kemiringan akibat pengaruh gaya eksternal, seperti gelombang, angin, atau perubahan distribusi beban.

Hasil grafik stabilitas pada loadcase terbaru kemudian dibandingkan dengan kondisi sebelum penambahan ballast. Perbandingan tersebut digunakan untuk menilai apakah kenaikan posisi vertikal ballast dapat menurunkan nilai GM yang sebelumnya terlalu besar, memperpanjang periode oleng kapal, dan mengurangi karakteristik stiff yang menyebabkan gerakan kapal terasa cepat serta tidak nyaman. Meskipun demikian, perubahan tersebut tetap harus menghasilkan nilai GZ maksimum, rentang stabilitas positif, dan luas area kurva yang memenuhi batas minimum sesuai ketentuan HSC 2000. Dengan demikian, analisis ini tidak hanya menilai peningkatan kenyamanan gerak kapal, tetapi juga memastikan bahwa perubahan konfigurasi ballast tetap mempertahankan tingkat keselamatan dan stabilitas kapal yang dipersyaratkan.



Gambar 4.7 Grafik Stabilitas Setelah Modifikasi

Sumber : *Maxsurf stability*

Berdasarkan Grafik Kurva GZ setelah modifikasi *fixed ballast*, hasil simulasi menunjukkan adanya peningkatan karakteristik stabilitas kapal dibandingkan kondisi awal sebelum dilakukan penambahan *TANK BALLAST TETAP*. Setelah penambahan *fixed ballast* beton, nilai *Initial GMt* pada sudut oleng (*heel*) 0° sebesar 2,483 m masih menunjukkan kemampuan stabilitas awal yang baik. Nilai maksimum *GZ* (*Righting Arm*) meningkat menjadi sekitar 0,499 m pada sudut oleng $36,4^{\circ}$, yang menunjukkan bahwa kapal memiliki kemampuan pemulihan yang lebih baik terhadap gangguan kemiringan dibandingkan kondisi sebelum modifikasi. Peningkatan nilai maksimum *GZ* ini menunjukkan bahwa penambahan *fixed ballast* berhasil memperbaiki distribusi massa kapal sehingga menghasilkan momen pemulihan yang lebih besar.

Kurva *GZ* setelah modifikasi menunjukkan pola yang lebih stabil dengan nilai *GZ* positif yang bertahan hingga sudut oleng sekitar 80° sebelum memasuki daerah negatif. Hal ini menunjukkan bahwa cadangan stabilitas (*reserve stability*) kapal mengalami peningkatan karena kapal masih mampu menghasilkan gaya pemulihan pada sudut oleng yang lebih besar. Pada sudut oleng ekstrem, nilai *GZ* tetap mengalami penurunan hingga mencapai nilai minimum sekitar $-1,3$ m pada sudut mendekati 150° , yang merupakan kondisi dimana kapal kehilangan kemampuan pemulihnya. Namun, dibandingkan kondisi awal, perubahan bentuk

kurva menunjukkan bahwa distribusi massa setelah penambahan *fixed ballast* memberikan kondisi keseimbangan yang lebih baik.

Berdasarkan hasil tersebut, modifikasi menggunakan *fixed ballast* beton dapat dinilai berhasil dalam memperbaiki permasalahan stabilitas awal kapal. Penambahan ballast tetap mampu mengoreksi ketidakseimbangan melintang yang sebelumnya menyebabkan kapal mengalami *heel* sebesar $1,2^\circ$, sehingga kapal dapat mencapai kondisi *even keel* dengan posisi keseimbangan yang lebih tegak. Meskipun nilai *Initial GMt* sedikit mengalami perubahan menjadi 2,483 m, kemampuan pemulih kapal meningkat yang ditunjukkan oleh kenaikan nilai maksimum *GZ* menjadi 0,499 m. Dengan demikian, pemasangan *fixed ballast* merupakan solusi yang efektif untuk memperbaiki distribusi massa kapal dan meningkatkan kemampuan kapal dalam mempertahankan kondisi stabil selama operasi.

Setelah kecenderungan stabilitas dari kurva diperoleh, data equilibrium kemudian digunakan untuk melihat kondisi keseimbangan aktual kapal, termasuk besar sudut *heel*, trim, serta posisi titik beratnya. Data equilibrium bisa dilihat pada Tabel 4.13 berikut.

Tabel 4.13 Parameter Hidrostatik Kapal

No.	Parameter	Nilai
1	Draft Amidships m	1,073
2	Displacement t	57,14
3	Heel deg	0,0
4	Draft at FP m	1,06
5	Draft at AP m	1,085
6	Draft at LCF m	1,074
7	Trim (+ve by stern) m	0,026
8	WL Length m	20,668
9	Beam max extents on WL m	5,681
10	Wetted Area m ²	115,81
11	Waterpl. Area m ²	105,46
12	Prismatic coeff. (Cp)	0,838
13	Block coeff. (Cb)	0,445
14	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,542
15	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,898

16	LCB from zero pt. (+ve fwd) m	10,222
17	LCF from zero pt. (+ve fwd) m	9,984
18	KB m	0,732
19	KG fluid m	1,876
20	BMt m	4,537
21	BML m	57,118
22	GMt corrected m	2,483
23	GML m	55,974
24	KMt m	5,268
25	KML m	57,85
26	Immersion (TPc) tonne/cm	1,081
27	MTc tonne.m	1,391
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	3,383
29	Max deck inclination deg	0,0644
30	Trim angle (+ve by stern) deg	0,0644

Sumber : *Maxsurf Stability*

Pada Tabel 4.13 setelah dilakukan penambahan *fixed ballast* berupa beton, kapal berada pada kondisi *heel* sebesar $0,0^\circ$, yang menunjukkan bahwa distribusi massa secara melintang telah kembali seimbang dan kapal berhasil mencapai kondisi *even keel*. Nilai *Displacement* kapal meningkat menjadi 57,14 ton dengan *Draft Amidships* sebesar 1,073 m, sedangkan nilai *Draft at FP* sebesar 1,060 m dan *Draft at AP* sebesar 1,085 m. Perbedaan nilai sarat tersebut menghasilkan *trim* sebesar 0,026 m dengan *Trim Angle (+ve by stern)* sebesar $0,0644^\circ$, yang menunjukkan bahwa kapal hanya mengalami kecenderungan *trim by stern* yang sangat kecil selisih 2 derajat dan masih dalam kondisi yang terkendali. Dalam praktik desain kapal, kondisi *trim by stern* dengan sudut sekitar 1 hingga 5 derajat masih diperbolehkan karena dapat memberikan keuntungan terhadap performa propulsi dan efisiensi aliran menuju propeller selama tidak menyebabkan perubahan sarat yang mengganggu keselamatan operasi kapal (Tupper, 2004).

Secara geometris, karakteristik bentuk kapal pada kondisi setelah modifikasi memiliki *WL Length* sebesar 20,668 m dan *Beam max extents on WL* sebesar 5,681 m, dengan luas bidang basah (*Wetted Area*) sebesar 115,81 m² serta

luas bidang garis air (*Waterplane Area*) sebesar 105,46 m². Koefisien bentuk kapal menunjukkan nilai *Prismatic Coefficient (Cp)* sebesar 0,838, *Block Coefficient (Cb)* sebesar 0,445, *Max Sectional Area Coefficient (Cm)* sebesar 0,542, dan *Waterplane Area Coefficient (Cwp)* sebesar 0,898. Nilai tersebut menunjukkan bahwa karakteristik bentuk badan kapal tidak mengalami perubahan signifikan akibat penambahan *fixed ballast*, karena modifikasi hanya memengaruhi distribusi massa dan tidak mengubah bentuk geometri lambung kapal.

Setelah pemasangan *fixed ballast*, posisi pusat volume kapal berada pada *LCB from zero point (+ve fwd)* sebesar 10,222 m dan posisi pusat garis air (*LCF from zero point (+ve fwd)*) sebesar 9,984 m. Nilai *KG fluid* sebesar 1,876 m menunjukkan adanya perubahan posisi pusat massa akibat penambahan ballast tetap yang ditempatkan pada posisi tertentu untuk mengoreksi ketidakseimbangan awal. Nilai *GMt corrected* setelah modifikasi sebesar 2,483 m, dengan *KMt* sebesar 5,268 m, sedangkan nilai *RM at 1 deg* sebesar 3,383 tonne.m menunjukkan bahwa kapal masih memiliki kemampuan menghasilkan momen pemulih terhadap kemiringan kecil.

Selain itu, nilai *Max deck inclination* sebesar 0,0644° menunjukkan bahwa kemiringan geladak setelah modifikasi telah berkurang secara signifikan dibandingkan kondisi awal yang mengalami *heel* sebesar 1,2°. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemasangan *fixed ballast* berhasil menghilangkan kecenderungan kapal untuk miring ke arah *starboard* akibat ketidakseimbangan distribusi massa. Berdasarkan hasil *equilibrium* terbaru, modifikasi *TANK BALLAST TETAP* dapat dinilai efektif karena mampu mengembalikan posisi kapal menjadi lebih tegak (*even keel*), memperbaiki distribusi massa melintang, dan menghasilkan kondisi keseimbangan yang lebih sesuai untuk tahap analisis stabilitas berikutnya. sebagaimana criteria dapat dilihat pada Tabel 4.14 berikut.

Tabel 4.14 Hasil Analisis Setelah Modifikasi

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 30	3,1513	m.deg	10,4530	Pass	+231,71
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 40	5,1566	m.deg	15,4315	Pass	+199,26
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 30 to 40	1,7189	m.deg	4,9785	Pass	+189,63
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0,200	m	0,499	Pass	+149,50

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.3: Angle of maximum GZ	25,0	deg	36,4	Pass	+45,46
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.4: Initial GMt	0,150	m	2,483	Pass	+1555,33

Sumber : *Maxsurf Stability*

Dari Tabel 4.14 berdasarkan hasil *criteria assessment* setelah modifikasi *fixed ballast*, seluruh parameter stabilitas berdasarkan *IMO Resolution A.267(85) Chapter 2 – General Criteria* menunjukkan status “Pass”, yang menunjukkan bahwa kondisi kapal setelah penambahan *fixed ballast* telah memenuhi persyaratan stabilitas yang ditetapkan. Nilai luas area kurva *GZ* pada rentang 0–30° sebesar 10,4530 m.deg dibandingkan dengan nilai minimum 3,1513 m.deg, menghasilkan margin sebesar +231,71%. Selanjutnya, luas area kurva *GZ* pada rentang 0–40° memiliki nilai aktual sebesar 15,4315 m.deg dengan margin +199,26% terhadap batas minimum 5,1566 m.deg, sedangkan area 30–40° sebesar 4,9785 m.deg masih berada di atas persyaratan minimum 1,7189 m.deg dengan margin +189,63%.

Parameter *maximum GZ* pada kondisi setelah modifikasi memiliki nilai sebesar 0,499 m pada sudut oleng maksimum 36,4°. Nilai tersebut lebih besar dibandingkan kriteria minimum 0,200 m dengan margin +149,50%, sedangkan sudut maksimum *GZ* sebesar 36,4° juga telah memenuhi persyaratan minimum 25° dengan margin +45,46%. Selain itu, nilai *Initial GMt* sebesar 2,483 m jauh berada di atas batas minimum 0,150 m dengan margin +1555,33%, menunjukkan bahwa karakteristik stabilitas awal kapal masih berada dalam batas aman berdasarkan kriteria yang digunakan.

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, kondisi kapal setelah modifikasi *fixed ballast* telah memenuhi seluruh kriteria *IMO Resolution A.267(85) Chapter 2 – General Criteria*. Penambahan *fixed ballast* juga menghasilkan kondisi keseimbangan kapal yang lebih baik dengan posisi kapal mencapai *even keel* dan nilai *heel angle* sebesar 0°. Dengan terpenuhinya seluruh parameter area *GZ*, nilai maksimum *GZ*, sudut maksimum *GZ*, serta *Initial GMt*, konfigurasi massa setelah modifikasi menunjukkan kondisi stabilitas yang lebih sesuai untuk digunakan sebagai konfigurasi desain kapal pada tahap selanjutnya.

4.8 Periode Olang Setelah Penambahan Fixed Ballast

Setelah dilakukan analisis kriteria stabilitas di atas, selanjutnya dilakukan perhitungan periode olang kapal. Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik gerakan olang kapal serta menilai apakah gerakan tersebut masih memenuhi standar kenyamanan dan keselamatan. Analisis periode olang dilakukan pada kondisi kapal kosong, mengingat tidak terdapat penambahan beban. Selain itu, diketahui bahwa kapal dalam kondisi kosong kini diketahui kemiringan sebesar 0,0 derajat dan memiliki stabilitas yang dinilai sangat baik dari sebelumnya. Perhitungan ini menggunakan rumus pendekatan periode olang menurut Gillmer, T.P. & Homola, J.R, (1986) untuk mengetahui hasil periode olang yang diperoleh dapat digunakan sebagai bukti tambahan mengevaluasi perilaku olang kapal, apakah cenderung terlalu cepat (periode pendek) yang menyebabkan gerakan tidak nyaman, atau terlalu lambat (periode panjang) yang berpotensi menimbulkan ketidakamanan saat beroperasi. Berikut perhitungan periode olang.

$$\begin{aligned} T_r &= \frac{2\pi \times c \times B}{\sqrt{g \times X \times X \times MG}} \\ &= \frac{2(3,14) \times 0,4 \times 5,681}{\sqrt{9,81 \times 2,483}} \\ &= 2,896 \text{ s} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan periode olang kapal setelah modifikasi *fixed ballast*, diperoleh nilai periode olang sebesar 2,896 detik. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kapal memiliki respons gerakan olang yang relatif cepat karena dipengaruhi oleh nilai *GMt corrected* sebesar 2,483 m yang masih cukup besar. Periode olang yang lebih pendek menunjukkan bahwa kapal memiliki kemampuan pemulihan awal yang tinggi, sehingga kapal dapat kembali menuju posisi tegak dalam waktu yang lebih singkat setelah mengalami gangguan kemiringan. Kondisi ini sesuai dengan hasil simulasi *equilibrium* setelah penambahan *fixed ballast*, dimana kapal telah mencapai kondisi *even keel* dengan nilai *heel angle* sebesar 0°.

Perhitungan periode olang ini menggunakan pendekatan rumus periode olang pada *IMO 2008 Intact Stability Code* yang dijelaskan dalam *MSIS43 Intact Stability Instructions to Surveyors*, dimana periode olang dipengaruhi oleh koefisien distribusi

massa (C), lebar kapal (B), percepatan gravitasi (g), dan nilai tinggi metasentris melintang (GMt). Dengan menggunakan nilai *Beam max extents on WL* sebesar 5,681 m, nilai *GMt corrected* sebesar 2,483 m, serta koefisien $C = 0,4$, diperoleh periode oleng sebesar 2,896 detik.

Nilai periode oleng tersebut menunjukkan bahwa setelah penambahan *fixed ballast*, karakteristik gerakan kapal telah berada dalam kondisi terkendali. Meskipun nilainya masih berada sedikit di bawah kisaran evaluasi praktis periode oleng kapal kecil 3–6 detik, kondisi ini masih berkaitan dengan karakteristik kapal yang memiliki nilai *GMt* cukup besar sehingga menghasilkan respons oleng yang lebih cepat. Dengan mempertimbangkan bahwa kapal telah mencapai kondisi *even keel*, tidak mengalami *heel* awal, serta seluruh kriteria stabilitas *IMO Resolution A.267(85)* terpenuhi, maka hasil periode oleng setelah modifikasi menunjukkan konfigurasi kapal yang lebih seimbang dan memiliki kemampuan pemulihan yang baik terhadap gangguan kemiringan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan Berdasarkan proses analisis yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Berdasarkan hasil analisis kondisi awal (*existing condition*) sebelum dilakukan modifikasi, kapal mengalami permasalahan keseimbangan melintang berupa *heel angle* sebesar $1,2^{\circ}$ ke arah *starboard*. Kondisi tersebut terjadi pada kondisi *lightship*, dimana kapal belum menerima beban operasional seperti penumpang, kru, bahan bakar, maupun fluida tangki. Hal ini menunjukkan bahwa penyebab kemiringan berasal dari distribusi massa kapal kosong (*lightship*) yang belum sepenuhnya seimbang terhadap garis tengah kapal (*centerline*). Berdasarkan hasil simulasi awal, kondisi tersebut menyebabkan kapal belum berada pada posisi *even keel*, sehingga diperlukan metode koreksi melalui penambahan massa tetap untuk mengembalikan keseimbangan melintang kapal.
2. Hasil analisis menunjukkan bahwa perhitungan beban total setelah penambahan tangki ballast tetap, diperoleh bahwa modifikasi *fixed ballast* menggunakan beton memberikan pengaruh terhadap distribusi berat kapal. Penambahan *fixed ballast* dilakukan dengan massa sebesar 4,285 ton yang ditempatkan pada posisi yang menghasilkan momen koreksi terhadap arah kemiringan awal kapal. Setelah dilakukan modifikasi, total *displacement* kapal menjadi 57,14 ton dengan nilai *Transverse Arm* total sebesar 0 m. Nilai tersebut menunjukkan bahwa distribusi massa secara melintang telah kembali seimbang terhadap garis tengah kapal. Hasil simulasi *equilibrium* setelah modifikasi menunjukkan nilai *heel angle* sebesar 0° , sehingga kapal dapat mencapai kondisi *even keel* dan tidak lagi mengalami kecenderungan miring ke arah *starboard*.
3. Berdasarkan hasil evaluasi analisis stabilitas setelah modifikasi tangki ballast, kapal dinyatakan memenuhi persyaratan stabilitas berdasarkan *IMO Resolution A.267(85) Chapter 2 – General Criteria*. Seluruh

parameter evaluasi stabilitas memperoleh status Pass, dimana luas area kurva *GZ* pada rentang 0° – 30° sebesar 10,4530 m.deg, area 0° – 40° sebesar 15,4315 m.deg, dan area 30° – 40° sebesar 4,9785 m.deg. Nilai maksimum *GZ* sebesar 0,499 m pada sudut $36,4^{\circ}$ telah memenuhi batas minimum 0,200 m, serta nilai *Initial GMt* sebesar 2,483 m berada di atas batas minimum 0,150 m. Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi kapal setelah modifikasi memiliki kemampuan pemulih (*righting ability*) yang baik dan tetap memenuhi kriteria stabilitas yang dipersyaratkan.

4. Berdasarkan hasil perhitungan periode oleng setelah dilakukan modifikasi tangki ballast, diperoleh nilai periode oleng kapal sebesar 2,896 detik. Perhitungan dilakukan menggunakan parameter *Beam max extents on WL* sebesar 5,681 m, *GMt corrected* sebesar 2,483 m, percepatan gravitasi $9,81 \text{ m/s}^2$, serta koefisien distribusi massa $C = 0,4$. Nilai periode oleng tersebut menunjukkan bahwa kapal memiliki respons gerakan oleng yang relatif cepat akibat nilai *GMt* yang cukup besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapal memiliki kemampuan pemulihan awal yang tinggi, namun karakteristik tersebut juga menyebabkan kapal cenderung lebih kaku (*stiff vessel*) untuk ukuran kapal kecil. Oleh karena itu, meskipun aspek keselamatan stabilitas telah terpenuhi, evaluasi lanjutan terhadap kenyamanan gerakan kapal tetap diperlukan agar diperoleh keseimbangan antara kemampuan pemulih dan kenyamanan penumpang.

1.2 Saran

Berdasarkan proses analisis yang telah dilakukan, diperoleh saran sebagai berikut :

1. Penempatan ballast tetap perlu diperhatikan tidak hanya dari segi berat, tetapi juga dari posisi LCG, TCG, dan VCG. Ballast yang ditempatkan terlalu rendah memang dapat meningkatkan stabilitas awal, tetapi dapat membuat nilai *GMt* terlalu besar dan menyebabkan kapal menjadi stiff. Oleh karena itu, penempatan ballast sebaiknya dilakukan secara proporsional agar kapal tetap stabil namun tidak menghasilkan gerakan oleng yang terlalu cepat.

2. Perlu dilakukan pengecekan teknis terhadap kekuatan struktur pada area penempatan fixed ballast, terutama karena ballast tetap bekerja sebagai beban permanen pada kapal. Pemeriksaan konstruksi lokal, kekuatan dudukan ballast, serta sistem pengikatan ballast perlu dilakukan agar ballast tidak bergeser selama kapal beroperasi.
3. Untuk penelitian lanjutan, sebaiknya analisis tidak hanya dilakukan pada kondisi intact stability, tetapi juga dapat dikembangkan pada analisis damage stability, olah gerak kapal, dan respons kapal terhadap gelombang. Hal ini penting agar pengaruh modifikasi ballast tidak hanya dinilai dari kondisi statis, tetapi juga dari perilaku kapal pada kondisi operasional sebenarnya.
4. Nilai *GMt corrected* kapal setelah modifikasi sebesar 2,483 m masih tergolong relatif besar untuk karakteristik kapal kecil, sehingga pada tahap desain berikutnya perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap distribusi massa dan posisi komponen kapal untuk mengoptimalkan nilai *GMt*. Nilai *GMt* yang terlalu besar dapat menyebabkan periode oleng menjadi lebih pendek dan menghasilkan gerakan kapal yang lebih cepat (*stiff vessel*), sehingga selain mempertimbangkan aspek keselamatan stabilitas, desain kapal juga perlu memperhatikan kenyamanan gerakan kapal selama operasi.
5. Sebelum diterapkan secara nyata, hasil simulasi Maxsurf sebaiknya divalidasi kembali dengan pengujian lapangan atau inclining test. Validasi ini diperlukan untuk memastikan bahwa nilai KG, *GMt*, heel, trim, dan periode oleng hasil simulasi benar-benar mendekati kondisi kapal aktual setelah ballast tetap dipasang.

memperoleh konfigurasi yang paling optimal. Variasi tersebut dapat dilakukan dengan membandingkan beberapa nilai pengisian ballast terhadap perubahan GMT, GZ maksimum, trim, *heel*, dan periode oleng kapal.

6. Penelitian berikutnya dapat dikembangkan dengan menambahkan analisis stabilitas bocor atau *damage stability*. Hal ini diperlukan agar tingkat keselamatan kapal dapat diketahui tidak hanya pada kondisi stabilitas utuh, tetapi juga ketika terjadi kebocoran pada salah satu kompartemen.

DAFTAR PUSTAKA

- Autodesk. (2025). *AutoCAD 2026* [Computer software]. Autodesk.
- Ariskin, Muhammad. (2024). *Pengaruh Air Ballast Terhadap Stabilitas di MV Aishakamillah*.
- Barrass, C. B., & Derrett, D. R. (2012). *Ship Stability for Masters and Mates* (7th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Bentley Systems. (2022). *MAXSURF®* [Product brochure] .BentleySystems.
- Bentley Systems. (2024). *MAXSURF Manuals* (Modeler Manual, Stability Manual, dll.) [Online documentation]. Bentley Systems.
- Bentley Systems, Inc. (2020). *OpenFlows WaterGEMS User Guide*. Exton, PA: Bentley Systems, Inc.
- Biro Klasifikasi Indonesia. (2005). *Guidelines for the Preparation of Damage Stability Calculations and Damage Control Documentation on Board*. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia.
- Bhattacharyya, R. (1978). *Dynamics of Marine Vehicles*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Capt. Istopo. 1997. *Stabilitas Kapal*. Jakarta: Yayasan Corp Alumni Akademi Ilmu Pelayaran (CAAIP).
- Chrismianto, Deddy. (2025). *Perencanaan Safety Plan dan Modifikasi Pada Kapal Pinisi Pariwisata Labuan Bajo Berdasarkan Klasifikasi Kapal Kayu BKI*.
- Erwin Darmawan, Berlian Arswendo A., Untung Budiarto. “Studi Perancangan Glass Bottom Catamaran untuk Menunjang Objek Wisata di Kawasan Anak Gunung Krakatau.” *Jurnal Teknik Perkapalan UNDIP*, 2014.
- Fyson, dkk. (1985). *Kemampuan kapal untuk Kembali ke posisi aman setelah mengalami cuaca gelombang dan muatan di kapal*.ltd, England.
- Gillmer, T.P. & Homola, J.R. (1986). *Design of Ships and Marine Structures*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Hakim, Arsyal. (2025). *Analisis Pengaruh Penambahan Kapasitas Tangki Bahan Bakar Terhadap Stabilitas Kapal Tugboat Panjang 23 Meter*.

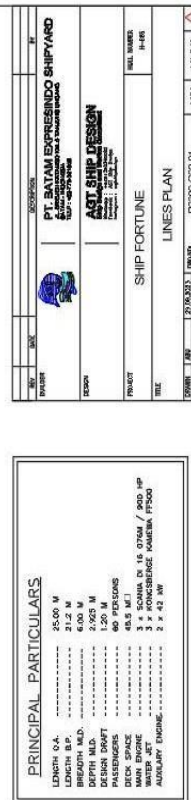
- Haryanto, Edy. (2018). *Pengaruh Modifikasi Buritan Speed Boat Terubuk Express 6 Terhadap Kecepatan Kapal*.
- Inaparts. 2009. "Cara Kerja Sistem dan Fungsi Ballast Kapal", <https://inaparts.com/marine-equipment/cara-kerja-sistem-dan-fungsi-ballast-kapal/>,
- International Maritime Organization. (1974). *International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974 (as amended)*. London: International Maritime Organization.
- International Maritime Organization. (1997). *Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 (Annex VI: Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships)*. London: International Maritime Organization.
- International Maritime Organization. 1998. *International Code on Intact Stability for High-Speed Craft (HSC 2000)*, MSC.97(73).
- International Maritime Organization (IMO). (2004). *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (Ballast Water Management Convention)*. London: IMO Publishing.
- International Maritime Organization. (2008). *International Code on Intact Stability, 2008 (2008 IS Code)* (Resolution MSC.267(85)). London: International Maritime Organization.
- International Maritime Organization. Offshore Technology. (2015). *Artikel//ulasan mengenai regulasi MARPOL Annex VI dan efisiensi operasional kapal* [Artikel web]. Offshore Technology. (Diakses 3 Januari 2026).
- International Maritime Organization. (2023). *SOLAS Consolidated Edition 2023*. London: International Maritime Organization.
- Lewis, E. V. (Ed.). (1988). *Principles of Naval Architecture: Volume I—Stability and Strength* (2nd rev.). Jersey City, NJ: The Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME).
- Lewis, E.V. (1988). *Principles of Naval Architecture, Volume II: Resistance, Propulsion, and Vibration*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Larsson, L., & Eliasson, R.E. (2000). *Principles of Yacht Design* (2nd ed.). International Marine Publishing.

- Muhammad Farhan Naufal, Kiryanto, Tuswan. "Perancangan Kapal General Cargo 22200 DWT Untuk Rute Pelayaran Surabaya–Balikpapan." *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. 12, No. 2, 2024.
- Moh Nurdin Septiantono R., Deddy Chrismianto, Eko Sasmito Hadi. "Studi Perancangan Kapal Pariwisata Tipe Katamaran dengan Sistem Hybrid..." *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. 4, No. 1, 2016.
- Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2011). *Ship resistance and propulsion: Practical estimation of ship propulsive power*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511974383>
- Rawson, K.J., & Tupper, E.C. (2001). *Basic Ship Theory*, Volume 1 (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Rosalena Audina, Wilma Amiruddin, Good Rindo. "Analisa Teknis Ekonomis Modifikasi Kapal Monohull Menjadi Kapal Trimaran, Studi Kasus Kapal Dongkrok di Jepara." *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. 8, No. 1, 2020.
- Restu, Aji Alif. (2021). *Analisis Penambahan Bangunan Atas Pada Passenger Deck Terhadap Stabilitas Kapal Ferry Ro-Ro KMP. Kirana VII*. UltraTech Cement. (n.d.). *Understanding the Density of Concrete*. UltraTech Cement.
- Woo, D., Kim, D. J., & lainnya. (2021). *Analysis of the Relationship between GM and IMO Intact Stability Criteria*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(7), 735. <https://doi.org/10.3390/jmse9070735>

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1
(LINES PLANE KAPAL)

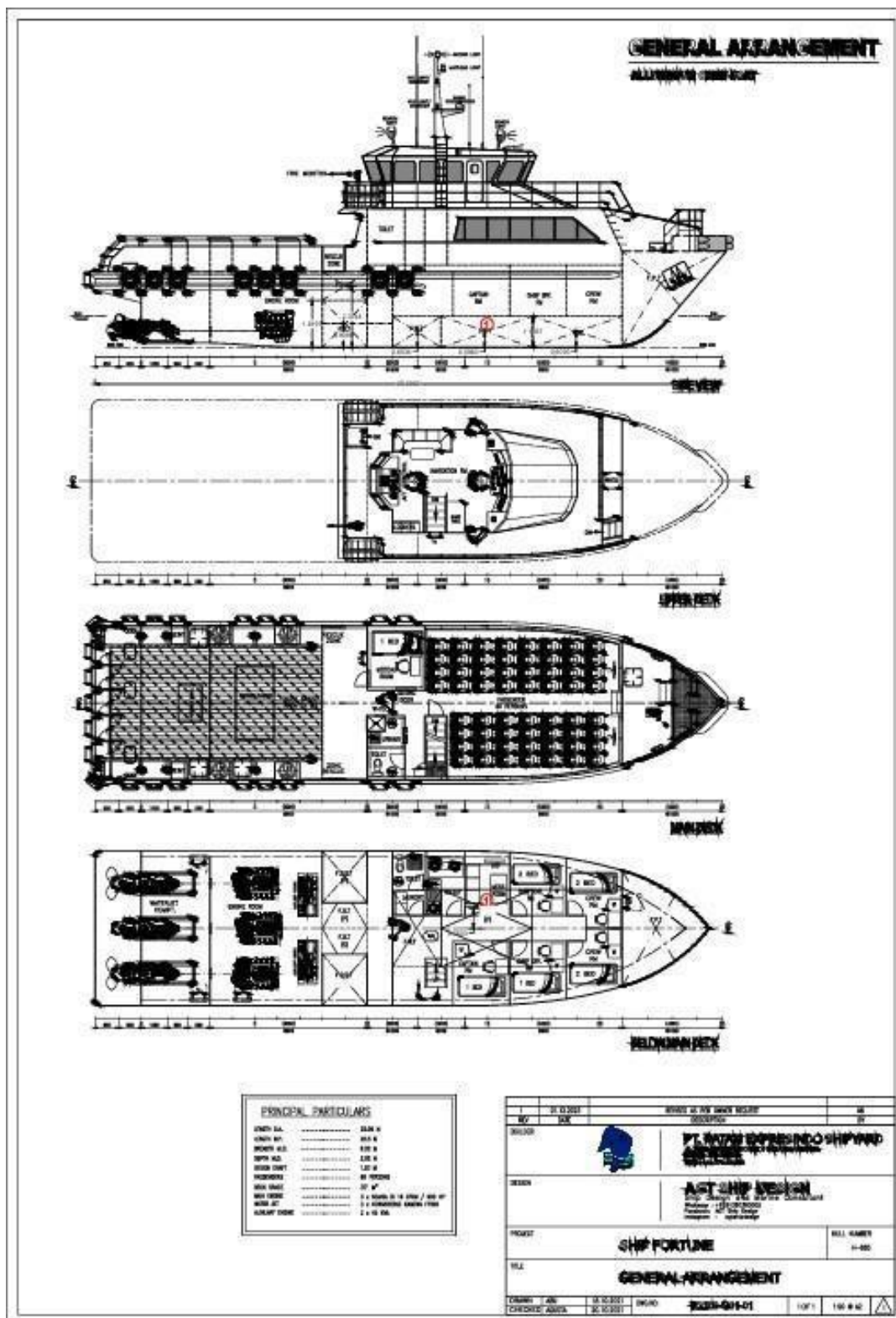
Halaman ini sengaja dikosongkan



Halaman ini sengaja dikosongkan

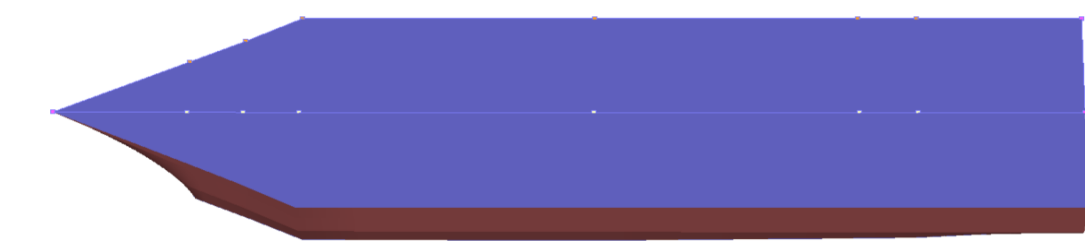
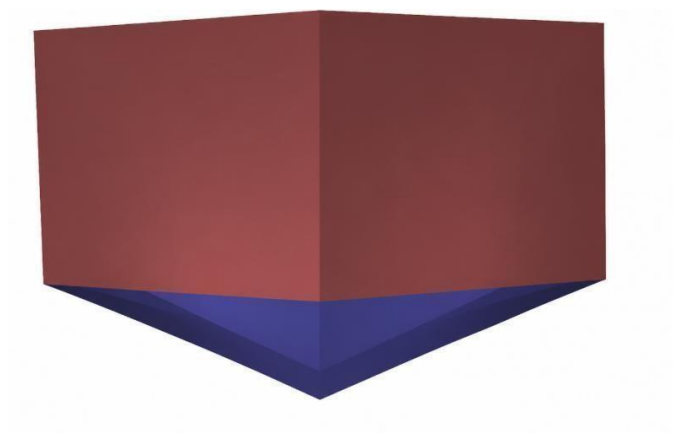
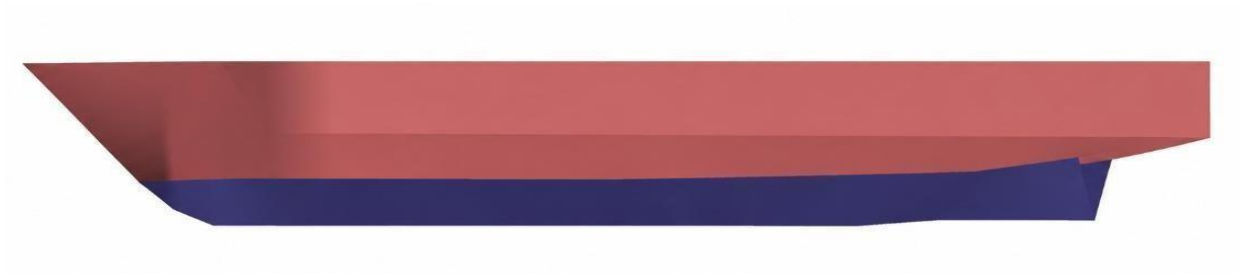
LAMPIRAN II
(*GENERAL ARRANGEMENT KAPAL*)

Halaman ini sengaja dikosongkan



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN III
(*MODELLING 3 DIMENSI*)



Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN IV
(*PERHITUNGAN BERAT DAN TITIK BERAT KAPAL*)

Halaman ini sengaja dikosongkan

Machinaery

No.	Item		Weight (ton)		AP-G	Moment	KG	Moment	Dimension
	Name	Quantity	Per unit	Total	m	ton.m	m	ton.m	cm
1	Main Engine	2	11.00	22.00	7.20	158.400	2.46	54.120	
2	Aux Engine	2	1.01	2.02	4.30	8.703	2.50	5.060	
3	Emer Genset	1	0.32	0.32	3.30	1.040	9.95	3.134	
4	Propeller	2	0.11	0.21	1.20	0.252	0.90	0.189	
5	Sewage Pump	1	0.04	0.04	2.10	0.084	2.70	0.108	
6	Bilge / Vballast Pump	2	0.17	0.34	7.30	2.482	2.05	0.697	
7	FW Hydrophore	1	0.02	0.02	4.40	0.088	2.75	0.055	
8	Fresh Water Hydrophore	1	0.14	0.14	4.40	0.598	2.75	0.374	
9	FW Pump	1	0.21	0.21	5.70	1.197	2.50	0.525	
10	SW Hydrophore	1	0.02	0.02	5.00	0.100	2.75	0.055	
11	Sea Water Hydrophore	1	0.14	0.14	5.00	0.700	2.75	0.385	
12	SW Pump	1	0.21	0.21	6.30	1.323	2.50	0.525	
13	FO Transfer Pump	1	0.05	0.05	6.90	0.373	2.00	0.108	
14	Oily Water Separator	1	0.23	0.23	2.50	0.575	2.70	0.621	
15	Fire & G/S Pump	1	0.17	0.17	7.50	1.275	2.00	0.340	
16	Main Bilge Pump	1	0.17	0.17	8.10	1.377	2.00	0.340	
		1	0.17	0.17	3.30	0.561	2.70	0.459	
		1	0.17	0.17	3.30	1.100	2.70	1.650	
17	Sewage Treatment Plan	1	0.55	0.55	2.00		3.00		
18	Piping	1	4.07	4.07	12.53	51.035	1.30	5.295	
19	Main Switch Board	1	1.50	1.50	6.30	9.450	2.80	4.200	
Total				32.58	7.39	240.71	2.40	78.24	

SUMMARY OF HULL CONSTRUCTIONS, EQUIPMENT AND INTERIOR

No.	Item	Weight	AP-G	Moment	KG	Moment	Dimension
		ton	m	ton.m	m	ton.m	cm
I	HULL CONSTRUCTIONS	310.719	17.558	5455.466	3.437	1067.932	
II	EQUIPMENT	15.608	32.118	501.290	5.985	118.150	
III	INTERIOR	8.634	3.030	26.162	6.709	110.436	
IV	MACHINERY	32.582	7.388	240.712	2.401	78.240	
TOTAL WEIGHT		367.543	16.933	6223.631	3.740	1374.758	

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN IV
(*RESULT 3 STABILITAS*)

Halaman ini sengaja dikosongkan

Stability calculation - DESAIN INI BUAT TA

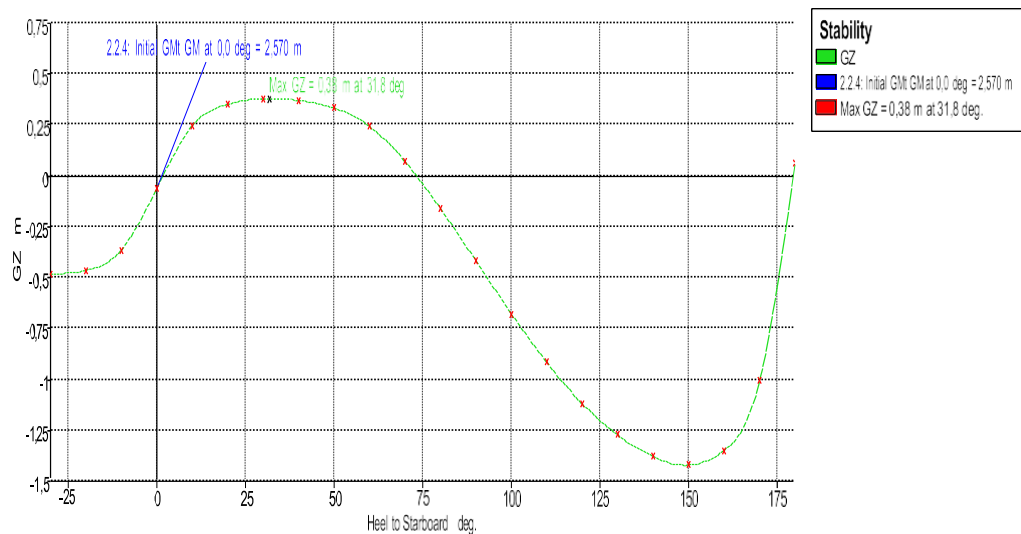
Loadcase – 1 *LIGHTSHIP CONDITIONAL*

Damage Case - Intact Free to Trim

Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m³)

Fluid analysis method: Use corrected VCG

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
Lightship	1	50,8	50,8			10,5	0,06	2,771	0	User Specified
Passanger 60	0	0,075	0			15,2	12,2	1,03	0	User Specified
Crew 8	0	0,075	0			14,2	13	1	0	User Specified
Provisions	0	0,5	0			12,2	7,2	0	0	User Specified
FOT (P)	0%	2,709	0	2,869	0	7,31	0	0,028	0	Maximum
FOT (S)	0%	2,719	0	2,879	0	7,31	0	0,028	0	Maximum
FODT (P)	0%	3,694	0	3,912	0	8,12	-1,98	1,817	0	Maximum
FODT (S)	0%	3,693	0	3,911	0	8,12	1,98	1,817	0	Maximum
FWT	0%	9,729	0	9,729	0	11,9	0	0,022	0	Maximum
TANK BALLAST	0%	18,28	0	18,28	0	15,5	0	0,006	0	Maximum
VOID H (C)	0%	17,73	0	17,73	0	16,9	0	0,001	0	Maximum
FPT	0%	14,16	0	14,16	0	19,3	0	0,085	0	Maximum
Total Loadcase			50,8	73,47	0	10,5	0,06	2,771	0	
FS correction								0		
VCG fluid								2,771		



Tabel Hydrostatik Kapal

No.	Parameter	Nilai
1	Draft Amidships m	1,019
2	Displacement t	50,79
3	Heel deg	1,2
4	Draft at FP m	1,058
5	Draft at AP m	0,979
6	Draft at LCF m	1,014
7	Trim (+ve by stern) m	-0,08
8	WL Length m	20,657
9	Beam max extents on WL m	5,597
10	Wetted Area m ²	109,848
11	Waterpl. Area m ²	100,788
12	Prismatic coeff. (Cp)	0,814
13	Block coeff. (Cb)	0,413
14	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,515
15	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,872
16	LCB from zero pt. (+ve fwd) m	10,522
17	LCF from zero pt. (+ve fwd) m	10,168
18	KB m	0,694
19	KG fluid m	2,771
20	BMt m	4,497
21	BML m	60,553
22	GMt corrected m	2,42
23	GML m	58,476
24	KMt m	5,19
25	KML m	61,234
26	Immersion (TPc) tonne/cm	1,033
27	MTc tonne.m	1,291
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	2,145
29	Max deck inclination deg	1,2014
30	Trim angle (+ve by stern) deg	-0,1989

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 30	3,1513	m.deg	7,8527	Pass	+149,19
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 40	5,1566	m.deg	11,6323	Pass	+125,58
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 30 to 40	1,7189	m.deg	3,7796	Pass	+119,89
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0,200	m	0,380	Pass	+90,00
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.3: Angle of maximum GZ	25,0	deg	31,8	Pass	+27,27
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.4: Initial GMt	0,150	m	2,570	Pass	+1613,33

Stability calculation - DESAIN INI BUAT TA

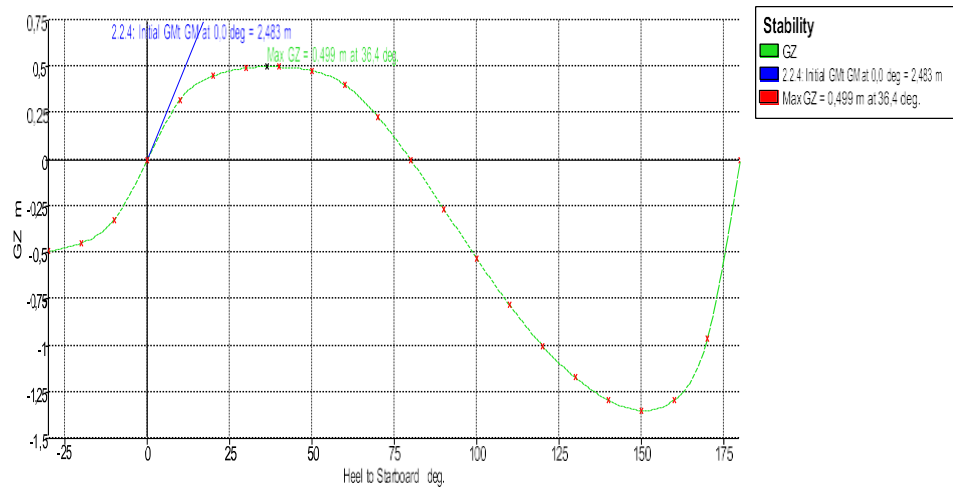
Loadcase – 1 *LIGHTSHIP AND MODIFICATION FIXED BALLAST TANK*

Damage Case - Intact Free to Trim

Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m³)

Fluid analysis method: Use corrected VCG

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
Lightship	1	50,8	50,8			10,5	0,06	2,771	0	User Specified
Passanger 60	0	0,075	0			15,2	12,2	1,03	0	User Specified
Crew 8	0	0,075	0			14,2	13	1	0	User Specified
Provisions	0	0,5	0			12,2	7,2	0	0	User Specified
FOT (P)	0%	2,709	0	2,869	0	7,31	0	0,028	0	Maximum
FOT (S)	0%	2,719	0	2,879	0	7,31	0	0,028	0	Maximum
FODT (P)	0%	3,694	0	3,912	0	8,12	-1,98	1,817	0	Maximum
FODT (S)	0%	3,693	0	3,911	0	8,12	1,98	1,817	0	Maximum
FWT	0%	9,729	0	9,729	0	11,9	0	0,022	0	Maximum
TANK BALLAST	0%	18,28	0	18,28	0	15,5	0	0,006	0	Maximum
VOID H (C)	0%	17,73	0	17,73	0	16,9	0	0,001	0	Maximum
FPT	0%	14,16	0	14,16	0	19,3	0	0,085	0	Maximum
TANK BALLAST TETAP	1	4,285	4,285			14,2	-0,71	0,626	0	User Specified
Total Loadcase			55,08	73,47	0	10,8	0	2,604	0	
FS correction								0		
VCG fluid								2,604		



Tabel Hydrostatik

No.	Parameter	Nilai
1	Draft Amidships m	1,073
2	Displacement t	57,14
3	Heel deg	0,0
4	Draft at FP m	1,06
5	Draft at AP m	1,085
6	Draft at LCF m	1,074
7	Trim (+ve by stern) m	0,026
8	WL Length m	20,668
9	Beam max extents on WL m	5,681
10	Wetted Area m ²	115,81
11	Waterpl. Area m ²	105,46
12	Prismatic coeff. (Cp)	0,838
13	Block coeff. (Cb)	0,445
14	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,542
15	Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,898
16	LCB from zero pt. (+ve fwd) m	10,222
17	LCF from zero pt. (+ve fwd) m	9,984
18	KB m	0,732
19	KG fluid m	1,876
20	BMt m	4,537
21	BML m	57,118
22	GMt corrected m	2,483
23	GML m	55,974
24	KMt m	5,268
25	KML m	57,85
26	Immersion (TPc) tonne/cm	1,081

27	MTc tonne.m	1,391
28	RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	3,383
29	Max deck inclination deg	0,0644
30	Trim angle (+ve by stern) deg	0,0644

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 30	3,1513	m.deg	10,4530	Pass	+231,71
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 40	5,1566	m.deg	15,4315	Pass	+199,26
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 30 to 40	1,7189	m.deg	4,9785	Pass	+189,63
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0,200	m	0,499	Pass	+149,50
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.3: Angle of maximum GZ	25,0	deg	36,4	Pass	+45,46
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.4: Initial GMt	0,150	m	2,483	Pass	+1555,33