

**Article Info:**

Received 08 May 2026

Accepted 09 June 2026

Published 27 July 2026

Corresponding Author:

Rifandi Saifullah Trianggoro
Department of Shipbuilding
Engineering
Shipbuilding Institute of
Polytechnic Surabaya
E-mail: -

© 2026 Trianggoro et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license, allowing unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided proper credit is given to the original authors.



Analysis of Stability Condition Improvement and Ship Maneuvering Performance on a Tugboat

Analisa Perbaikan Kondisi Stabilitas dan Olah Gerak Kapal pada Tugboat

Rifandi Saifullah Trianggoro^a, Bambang Teguh Setiawan^a, Muhammad Lukman Arif^a

^a Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, 60111, Indonesia

Abstract

A Tugboat plays an important role in assisting the berthing process of large vessels in ports, requiring optimal stability and seakeeping performance. This study was motivated by the relatively high distance between the keel and the ship's center of gravity (KG), which results in a short rolling period and may reduce operational comfort and safety. The study aims to analyze and compare the stability and seakeeping conditions of a tugboat before and after design improvements, focusing on the application of bilge keel variations. The methods employed include stability and seakeeping simulations on the existing model and seven modified bilge keel models. The evaluation criteria refer to the International Maritime Organization (IMO) Resolution A.749 – Chapter 3: Design Criteria Applicable to All Ships and the NORDFORSK Seakeeping Criteria (1987). The results indicate that the 15° bilge keel variation provides the most significant performance improvement compared to the other models. This configuration demonstrates a greater stability margin than the existing vessel, effectively reduces rolling motion under 2-meter wave height conditions with a 14-second wave period to 3.43°, decreases heave acceleration to 2.486 m/s², and produces an average rolling period of 3.4342 seconds. These findings suggest that a 15° bilge keel modification is effective in improving the stability and seakeeping performance of the tugboat, thereby supporting operational safety and efficiency under various sea conditions.

Keywords: Bilge Keel, IMO Resolution A.749, NORDFORSK Seakeeping Criteria, Seakeeping, Stability, Tugboat

Abstrak

Tugboat merupakan kapal yang berperan penting dalam membantu proses tambat kapal berukuran besar di pelabuhan, sehingga dituntut memiliki kinerja stabilitas dan olah gerak (seakeeping) yang optimal. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh jarak lunas ke titik berat kapal (KG) yang relatif tinggi, yang berimplikasi pada periode oleng yang singkat dan berpotensi menurunkan kenyamanan serta keselamatan operasi. Kajian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan kondisi stabilitas serta seakeeping tugboat sebelum dan sesudah perbaikan desain, dengan fokus pada penerapan variasi bilge keel. Metode yang digunakan meliputi simulasi stabilitas dan seakeeping pada model existing dan tujuh model modifikasi bilge keel. Kriteria evaluasi mengacu pada International Maritime Organization (IMO) Resolution A.749 – Chapter 3: Design Criteria Applicable to All Ships dan NORDFORSK Seakeeping Criteria (1987). Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi bilge keel 15° memberikan peningkatan kinerja paling signifikan dibanding model lainnya. Model ini memiliki margin stabilitas yang lebih besar dibanding kapal existing, mampu meredam gerakan oleng pada ketinggian gelombang 2 m dengan periode 14 detik hingga 3.43°, menurunkan percepatan heave menjadi 2.486 m/s², serta menghasilkan periode oleng rata-rata 3.4342 detik. Temuan ini mengindikasikan bahwa modifikasi bilge keel dengan sudut 15° efektif dalam meningkatkan stabilitas dan performa seakeeping tugboat, sehingga dapat mendukung keselamatan dan efisiensi operasional di berbagai kondisi laut.

Kata Kunci: Bilge keel, IMO Resolution A.749, NORDFORSK Seakeeping Criteria, Olah Gerak, Stabilitas, Tugboat

1. Pendahuluan

Kapal menjadi sarana transportasi laut yang berfungsi untuk memindahkan penumpang maupun muatan melalui jalur perairan. Jenis kapal sangat beragam dan diklasifikasikan berdasarkan fungsi serta peranannya. Kapal tunda (tugboat) termasuk ke dalam kategori kapal yang memiliki fungsi strategis dalam mendukung operasional di industri maritim. Kapal ini dirancang dengan kemampuan manuver yang tinggi dan berfungsi memberikan bantuan terhadap kapal lain, terutama dalam proses sandar dan lepas sandar, baik dengan cara menarik maupun mendorong. Tugboat memiliki peran untuk menarik tongkang, kapal rusak, dan peralatan lainnya. Meskipun memiliki ukuran relatif kecil, kapal ini dibekali dengan mesin bertenaga besar untuk menunjang kemampuan tariknya. Tugboat dituntut memiliki stabilitas memadai agar mampu bertahan pada kondisi laut yang dinamis, sekaligus memiliki olah gerak tinggi untuk melakukan manuver presisi saat membantu kapal besar bersandar atau lepas tambat. Salah satu isu utama yang sering muncul adalah posisi titik berat kapal (KG) yang terlalu tinggi, sehingga periode oleng menjadi pendek dan kapal terasa “keras” saat beroperasi. Kondisi ini berpotensi meningkatkan risiko kelelahan awak dan mengurangi kenyamanan kerja. Sisi lain, upaya perbaikan untuk meningkatkan stabilitas, seperti pemasangan bilge keel, perlu dirancang dengan hati-hati karena meskipun dapat mereduksi gerakan roll, komponen ini berpotensi meningkatkan hambatan gerak kapal dan mengurangi kelincahan manuver (Bertram, 2012; Lewis, 1988).

Penelitian ini, fokus pada salah satu kapal tunda (tugboat) milik perusahaan X yang mengalami permasalahan pada aspek stabilitas kapal dan olah gerak kapal. Data pengukuran mengindikasikan bahwa titik berat vertikal (KG) kapal berada pada ketinggian yang relatif besar, yang berimplikasi pada terjadinya periode oleng (rolling period) dengan durasi yang pendek. Kondisi ini berpotensi mengurangi kenyamanan dan keselamatan operasional, serta meningkatkan risiko terjadinya kehilangan kestabilan secara mendadak, terutama pada kondisi cuaca buruk atau saat manuver mendadak.

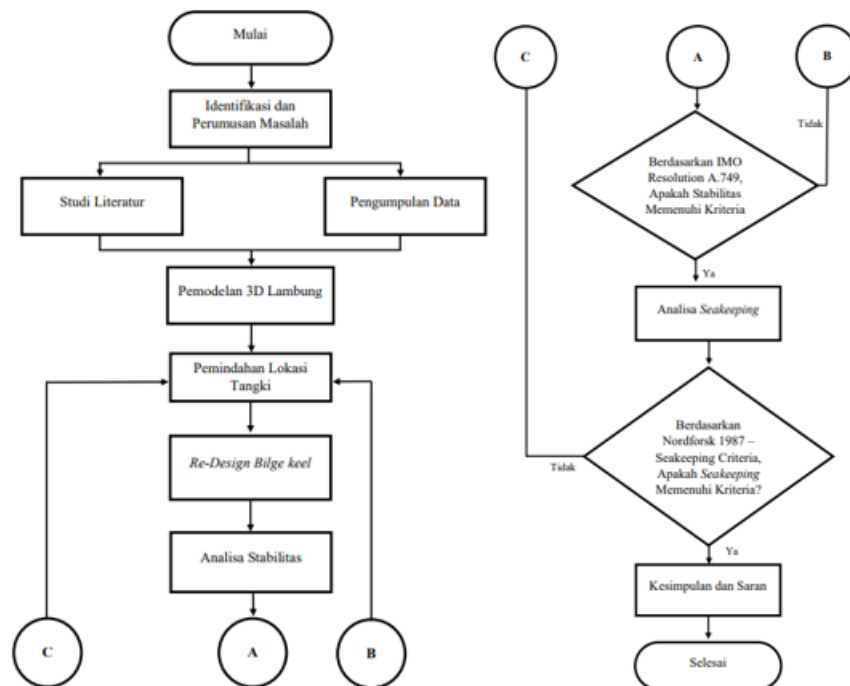
Upaya untuk mengurangi potensi permasalahan, kapal perlu dirancang secara optimal dengan mempertimbangkan berbagai faktor teknis dan operasional. Salah satu faktor krusial dalam proses perancangan maupun pengoperasian kapal adalah aspek stabilitas (Yulianti et al., 2017). Stabilitas kapal sangat berpengaruh pada kapal karena stabilitas yang tidak baik pada kapal bisa mengakibatkan kapal mengalami oleng berlebihan bahkan hingga tenggelam. Ada beberapa hal yang berpengaruh pada stabilitas seperti titik G, titik M, dan juga titik B. Beberapa titik tersebut sangat berpengaruh pada stabilitas kapal karena posisi dari titik tersebut menentukan bagaimana stabilitas yang dimiliki kapal tersebut. Posisi titik tersebut juga dapat dipengaruhi oleh gaya luar, seperti tekanan gelombang laut yang menghantam lambung kapal, maupun gaya dari dalam, seperti efek free surface pada tangki yang mengurangi stabilitas metasantrik. Kedua faktor ini dapat menyebabkan pergeseran titik berat kapal secara dinamis dan mempengaruhi kurva GZ (Rawson & Tupper, 2001; Bhattacharyya, 1978).

Kajian ini menitikberatkan pada analisis peningkatan kestabilan kapal dengan menerapkan metode penurunan titik berat vertikal (KG) yang sebelumnya berada pada posisi yang relatif tinggi. Salah satu caranya adalah dengan mengatur pendistribusian beban yang tepat pada kapal tersebut. Selain dengan mengatur pendistribusian beban, merubah bilge keel juga bisa menjadi salah satu cara yang diharapkan kapal mendapatkan stabilitas yang baik setelah dilakukan perubahan. Analisis seakeeping juga dilakukan untuk mengukur kinerja kapal dalam mengantisipasi kondisi laut pasca penambahan beban dan perubahan desain.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini mengacu pada prosedur teknis dan perhitungan hidrostatik yang terukur, serta mempertimbangkan pengaruh distribusi beban, konfigurasi lambung, dan kondisi lingkungan perairan. Pendekatan yang digunakan mencakup pengumpulan data teknis kapal, pengujian atau simulasi manuver, serta evaluasi hasil terhadap kriteria stabilitas dan olah gerak berdasarkan regulasi internasional dan nasional. Proses metodologi diawali dengan tahap identifikasi dan perumusan masalah, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur serta pengumpulan data yang digunakan dalam pembuatan model tiga

dimensi lambung kapal. Selanjutnya dilakukan analisis stabilitas mengacu pada IMO Resolution A.749 (Tabel 1) serta analisis *seakeeping* berdasarkan pedoman Nordforsk 1987. Secara rinci dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir kerangka kerja penelitian

Tahap awal metodologi dimulai dari identifikasi dan perumusan masalah, yang dilakukan melalui survei lapangan serta observasi langsung untuk mengetahui isu utama yang akan dibahas dalam tugas akhir ini. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa kapal mengalami oleng berkelanjutan pada kecepatan tertentu. Analisis awal mengindikasikan penyebabnya antara lain posisi titik berat (G) yang terlalu dekat dengan titik *metacenter* (M), serta kecenderungan oleng ke kiri akibat adanya nilai *Transverse Center of Gravity* (TCG) pada data stabilitas yang diterima. Sebagai data pendukung, dilakukan pula analisis aliran fluida pada kondisi operasi normal guna merumuskan solusi yang tepat. Studi literatur dilaksanakan untuk memperoleh referensi yang relevan, menggunakan sumber terpercaya seperti buku, jurnal ilmiah, tugas akhir, dan publikasi daring. Pengumpulan data dilakukan untuk menunjang pengerjaan, meliputi ukuran utama kapal, *general arrangement* (GA), denah ruang mesin, gambar konstruksi, lines plan, serta dokumen pendukung lainnya yang diperoleh dari galangan pembangun kapal. Selanjutnya, pemodelan tiga dimensi lambung kapal dibuat menggunakan perangkat lunak Maxsurf Modeller Advanced. Model ini harus presisi agar hasil analisis stabilitas dan *seakeeping* akurat.

Simulasi perlu dilakukan pada tahap sebelum dan sesudah modifikasi kapal, dengan tujuan memastikan tercapainya performa optimal pada aspek stabilitas serta kemampuan olah gerak kapal. Hasil dari simulasi tersebut selanjutnya akan dilakukan perbandingan untuk mengetahui perbedaan yang terjadi akibat perubahan yang dialami kapal. Perubahan ini dibagi menjadi beberapa skema untuk dilakukan pengujian untuk melihat hasil yang paling maksimal diantara yang lain. Berikut skema perubahan yang diterapkan pada kapal : model 1 (perubahan hanya pada tangki F.O.D), model 2 (perubahan hanya pada *bilge keel* 15°), model 3 (perubahan hanya pada *bilge keel* 30°), model 4 (perubahan hanya pada *bilge keel* 45°), model 5 (perubahan pada *bilge keel* 15° dan tangki F.O.D), model 6 (perubahan pada *bilge keel* 30° dan tangki F.O.D), dan model 7 (perubahan pada *bilge keel* 45° dan tangki F.O.D).

Salah satu solusi yang diterapkan adalah memindahkan lokasi tangki F.O.D. untuk meningkatkan stabilitas dan olah gerak, tanpa mengabaikan regulasi yang berlaku. Perubahan lokasi ini dilakukan karena posisi tangki F.O.D. yang berada 900 mm dari center line diduga mempengaruhi nilai TCG dan momen kapal. Selain itu, dilakukan *redesign bilge keel* untuk meningkatkan *rolling damping*. Perancangan ulang meliputi ukuran, posisi, sudut kemiringan, dan bentuk melintang, dengan tiga variasi sudut kemiringan (15°, 30°, dan 45°) serta perubahan lebar dari 150 mm menjadi 300 mm dengan panjang 2 meter. Tujuannya

adalah mendapatkan konfigurasi yang memberikan pengaruh optimal terhadap kestabilan kapal. Analisis stabilitas pasca modifikasi dilakukan menggunakan bantuan aplikasi Maxsurf Stability mengacu pada kriteria IMO Resolution A.749, seperti batas luas kurva GZ, nilai GZ maksimum, sudut maksimum, dan nilai GM awal. Analisis *seakeeping* dilakukan menggunakan bantuan aplikasi Maxsurf Motion untuk menilai perilaku kapal di laut, dengan target pemenuhan kriteria keselamatan yang mengacu pada Nordforsk 1987 – *Seakeeping Criteria*. Hasil akhir diharapkan dapat memastikan kapal beroperasi dengan aman dan nyaman bagi awak kapal. Secara rinci *seakeeping criteria* dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3. Selain itu juga harus memperhatikan parameter olah gerak kapal, seperti arah gelombang, kecepatan, tinggi gelombang, dan periode gelombang (Tabel 1).

Tabel 1. Kriteria Stabilitas IMO

Kriteria Stabilitas IMO	Persyaratan (m degree)	Keterangan
Luas kurva GZ dari 0°–30°	$\geq 3,15$ m degree	(0,055 m rad $\times$ 57,2958)
Luas kurva GZ dari 0°–40° atau sudut downflooding	$\geq 5,16$ m degree	(0,090 m rad $\times$ 57,2958)
Luas kurva GZ dari 30°–40° atau sudut downflooding	$\geq 1,72$ m degree	(0,030 m rad $\times$ 57,2958)
Nilai GZ maksimum	$\geq 0,20$ m pada sudut 25°–30°	Lengan pemulih maksimum
GM awal	$\geq 0,15$ m	Stabilitas awal
Sudut GZ maksimum	$\geq 25^\circ$	Titik puncak kurva GZ
Sudut downflooding	> Sudut GZ maksimum	Hindari air masuk lebih awal

Tabel 2. General Operability Limiting Criteria for Ships (NORDFOSK, 1987)

Description	Merchant Ships	Navy Vessels	Fast Small Craft
RMS of vertical acceleration at FP	0.275 g ($L \leq 100$ m) 0.050 g ($L \geq 330$ m)	0.275 g	0.65 g
RMS of vertical acceleration at Bridge	0.15 g	0.20 g	0.275 g
RMS of lateral acceleration at Bridge	0.12 g	0.10 g	0.10 g
RMS of <i>Rolling</i>	6.0 deg 0.03 ($L \leq 100$ m)	4.0 deg	4.0 deg
Probability of Slamming	0.01 ($L \geq 300$ m)	0.03	0.03
Probability of Deck Wetness	0.05	0.05	0.05

Tabel 3. Criteria for Acceleration and Rolling (NORDFORSK, 1987)

Description	RMS Vertical Acceleration	RMS Lateral Acceleration	RMS Rolling Motion
Light Manual Work	0.20 g	0.10 g	6.0°
Heavy Manual Work	0.15 g	0.07 g	4.0°
Intellectual Work	0.10 g	0.05 g	3.0°
Transit Passengers	0.05 g	0.04 g	2.5°
Cruise Liner	0.02 g	0.03 g	2.0°

Tabel 4. Parameter Olah Gerak Kapal

Parameter	Nilai
Arah Gelombang	0°
	90°
	180°
Kecepatan	7 knot
	0.5 Meter
	1 Meter
Tinggi Gelombang	1.5 Meter
	2 Meter
Periode Gelombang	0.5 - 1.25 m = 13 s
	1.25 - 2.5 m = 14 s

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Dimensi Utama Kapal

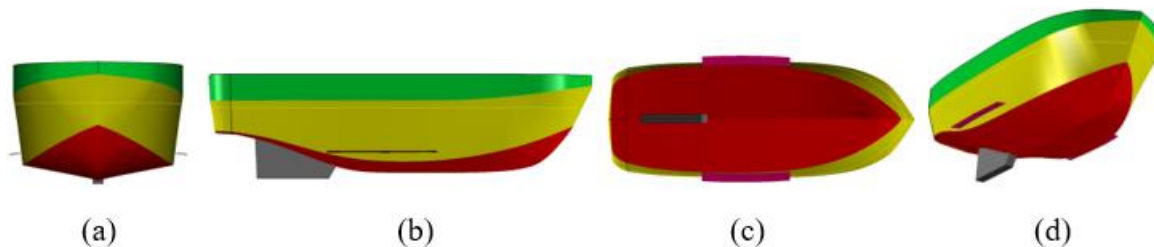
Tahap awal penelitian, ada beberapa data yang diperlukan sebagai data utama. Adapun data tersebut, meliputi data ukuran dimensi utama kapal, gambar rencana garis, dan beberapa kondisi muatan kapal. Data kapal tersebut menjadi sangat penting sebagai dasar dari seluruh proses simulasi dan analisis yang akan dilakukan. Data ukuran dimensi utama pada kapal tunda (tugboat) milik perusahaan X dapat dilihat pada Tabel 5. Selanjutnya data tersebut akan digunakan untuk membuat pemodelan lambung kapal yang dilakukan sebagai langkah awal sebelum proses analisis dan simulasi dilakukan (Gambar 2).

Tabel 5. Ukuran Dimensi Utama Kapal.

Spesifikasi	Ukuran
<i>Length Over All (LOA)</i>	7.20 meter
<i>Length Water Line (LWL)</i>	6.94 meter
<i>Breadth (B)</i>	2.70 meter
<i>Height (H)</i>	1.80 meter
<i>Draught (T)</i>	1.20 meter
<i>Speed Max. (V_{max})</i>	7.00 knots

3.2. Pemodelan Lambung Kapal

Pemodelan lambung kapal merupakan tahap krusial dalam proses desain dan analisis hidrodinamika, di mana bentuk geometris lambung direpresentasikan secara matematis maupun digital untuk memprediksi kinerja kapal di berbagai kondisi operasi. Proses ini melibatkan penggambaran garis-garis *lines plan* (*sheer, buttock, dan waterline*), penghalusan permukaan, serta penentuan parameter utama seperti panjang garis air (LWL), lebar (B), sarat (T), dan koefisien bentuk (C_b , C_p , C_m). Pemodelan yang akurat memungkinkan analisis stabilitas, tahanan, olah gerak, dan distribusi beban dilakukan secara tepat melalui perangkat lunak CAD dan CFD. Dengan model yang tepat, desainer dapat melakukan optimasi bentuk lambung untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar, stabilitas, dan kemampuan *manuver*, sekaligus meminimalkan risiko *slamming*, *green water*, dan getaran berlebih dalam operasi.



Gambar 2. Pemodelan lambung kapal (a) tampak depan kapal; (b) tampak samping kapal; (c) tampak bawah kapal; (d) tampak isometri kapal

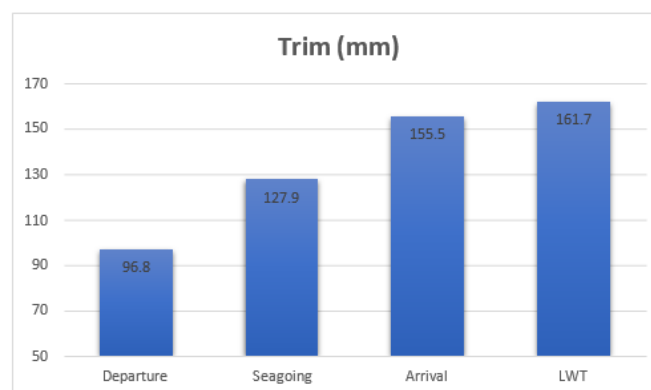
3.3. Simulasi Stabilitas Sebelum Perubahan

Simulasi ini dilakukan untuk memperoleh data awal mengenai stabilitas kapal sebelum dilakukan modifikasi, sekaligus sebagai acuan pembandingan setelah perubahan diterapkan guna mengetahui sejauh mana pengaruhnya terhadap kinerja kapal. Sebelum proses simulasi, kapal dikategorikan ke dalam empat kondisi utama, yaitu departure, seagoing, arrival, dan LWT, yang dibedakan berdasarkan variasi jumlah muatan pada Fuel Oil Tank (FOT) dan Fuel Oil Daily Tank (FODT). Pada kondisi Departure, kedua tangki diisi hingga 98%, pada Seagoing hanya terisi 50%, saat Arrival muatan tersisa sekitar 10%, dan pada LWT kapal berada dalam keadaan tanpa muatan selain berat kosongnya. Perbedaan kapasitas ini merepresentasikan kondisi operasional kapal di berbagai tahap pelayaran. Simulasi stabilitas dilakukan dengan empat kondisi muatan kapal (Tabel 4.2).

Tabel 6. Stabilitas Tugboat Sebelum Perubahan (Existing)

Kriteria IMO	Ketentuan IMO	Satuan	Kondisi			
			Departure	Seagoing	Arrival	LWT
Luas kurva GZ dari 0°–30°	≥ 3.15	m.deg	3.47	3.51	3.56	3.74
Luas kurva GZ dari 0°–40° atau sudut downflooding	≥ 5.16	m.deg	6.15	6.21	6.29	6.69
Luas kurva GZ dari 30°–40° atau sudut downflooding	≥ 1.72	m.deg	2.68	2.70	2.73	2.95
Nilai GZ maksimum	$\geq 0,20$ m pada sudut 25°–30°	m	0.30	0.30	0.30	0.33
Sudut GZ maksimum	$\geq 25^\circ$	deg	47.3	47.3	47.3	47.3

Berdasarkan hasil pengukuran stabilitas, seluruh indikator yang diuji tidak hanya memenuhi, tetapi juga melampaui batas minimal yang ditetapkan dalam IMO Intact Stability Code. Seluruh kondisi operasi departure, seagoing, arrival, dan light weight luas area kurva GZ untuk rentang sudut 0° – 30° berkisar antara 3.47 hingga 3.74 m $\cdot$ deg, melampaui nilai ambang 3.15 m $\cdot$ deg. Kondisi ini mencerminkan tersedianya cadangan stabilitas awal yang cukup besar. Sementara itu, luas kurva GZ dari 0° – 40° atau hingga sudut downflooding juga secara signifikan lebih tinggi daripada ketentuan minimal 5.16 m $\cdot$ deg, dengan capaian tertinggi 6.69 m $\cdot$ deg pada kondisi LWT, yang menunjukkan ketahanan kapal terhadap momen oleng pada sudut besar. rentang 30° – 40° , nilai luas kurva GZ berada antara 2.68 dan 2.95 m $\cdot$ deg, jauh di atas batas minimal 1.72 m $\cdot$ deg, sehingga menegaskan adanya cadangan stabilitas tambahan pada sudut oleng menengah–besar. Nilai GZ puncak yang terukur (0.30–0.33 m) melampaui standar minimal 0.20 m, sedangkan sudut kemunculan GZ maksimum tercatat 47.3° , yang berarti kemampuan pemulihan kapal terhadap oleng besar tergolong sangat baik. Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa kapal berada dalam kondisi stabil di setiap fase operasi, dengan cadangan stabilitas yang memadai untuk menghadapi beragam kondisi gelombang, sesuai panduan IMO (2008), sehingga menjamin keamanan pelayaran dan meminimalkan potensi terbalik (capsizing).



Gambar 3. Nilai trim

Grafik diatas memperlihatkan variasi nilai trim kapal pada empat kondisi operasi, yaitu departure, seagoing, arrival, dan Light Weight (LWT). Nilai trim terendah teridentifikasi pada kondisi departure sebesar 96.8 mm, mencerminkan distribusi muatan yang relatif seimbang pada awal pelayaran. Peningkatan nilai trim pada fase seagoing menjadi 127.9 mm diduga dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar dan pergeseran muatan yang mengubah distribusi berat kapal. Pada kondisi arrival, nilai trim bertambah menjadi 155.5 mm, kemungkinan akibat pengurangan bahan bakar dan redistribusi massa yang terkonsentrasi pada salah satu ujung kapal. Nilai trim tertinggi terjadi pada kondisi LWT, yakni 161.7 mm, yang umum terjadi ketika kapal berada tanpa muatan dan dengan tangki bahan bakar penuh, sehingga distribusi massa menjadi kurang optimal. Secara keseluruhan, tren peningkatan nilai trim dari departure hingga LWT mengindikasikan bahwa perubahan distribusi beban dan konsumsi bahan bakar memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan longitudinal kapal. Hal ini sejalan dengan ketentuan International Maritime Organization (IMO) – IS Code 2008, yang menekankan pentingnya menjaga keseimbangan trim melalui pengaturan ballast dan distribusi muatan guna menjamin kelaiklautan, keamanan operasional, dan efisiensi hidrodinamika kapal di berbagai kondisi pelayaran (IMO, 2008).

3.4. Simulasi Olah Gerak Kapal (Seakeeping) Sebelum Perubahan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa respon olah gerak kapal berbeda pada tiga kondisi gelombang utama: following sea, beam sea, dan head sea. Pada following sea, RMS vertical acceleration relatif rendah pada semua ketinggian gelombang, mulai dari 0.025 m/s² pada 0.5 m hingga 0.099 m/s² pada 2 m di bagian buritan. Nilai ini jauh di bawah ambang batas kenyamanan awak kapal menurut Nordforsk (1987), yang menyatakan percepatan vertikal di atas 0.315 m/s² mulai mempengaruhi kenyamanan. Tidak terdeteksi RMS lateral acceleration dan rolling motion, mengindikasikan kondisi following sea cenderung stabil bagi kapal ini. Saat beam sea terjadi peningkatan signifikan RMS vertical acceleration dari 0.062 m/s² (0.5 m) menjadi 0.253 m/s² (2 m). RMS lateral acceleration muncul mulai ketinggian gelombang 1 m, meningkat hingga 0.144 m/s² pada 2 m. RMS rolling motion juga meningkat dari 1° (0.5 m) menjadi 3.48° (2 m). Kondisi ini sejalan dengan karakteristik beam sea yang cenderung

menghasilkan rolling maksimum (Bhattacharyya, 1978). Saat head sea RMS vertical acceleration tertinggi dibanding dua kondisi lainnya, naik dari 0.206 m/s^2 (0,5 m) menjadi 0.789 m/s^2 (2 m). Nilai ini mendekati atau melebihi ambang batas kenyamanan untuk pelayaran cepat (0.7 m/s^2 menurut ISO 2631-1), yang berpotensi menyebabkan kelelahan awak. Tidak ada lateral acceleration maupun rolling motion yang terdeteksi, menunjukkan dominasi gerakan heave dan pitch pada arah head sea.

Temuan ini konsisten dengan teori seakeeping, di mana kapal umumnya mengalami percepatan vertikal tertinggi pada head sea akibat interaksi langsung gelombang dengan haluan (Lloyd, 1989). Gerakan rolling paling signifikan pada beam sea karena gaya gelombang bekerja tegak lurus terhadap sumbu memanjang kapal (Faltinsen, 1990). Respon yang relatif tenang pada following sea karena gelombang bergerak searah dengan kapal, mengurangi perbedaan kecepatan relatif antara kapal dan gelombang (Bhattacharyya, 1978). Berdasarkan IS Code 2008 dan kriteria Nordforsk (1987), nilai percepatan yang diperoleh masih berada dalam batas aman untuk operasi normal, kecuali pada head sea dengan gelombang $\geq 1,5 \text{ m}$, di mana kenyamanan awak dapat menurun. Oleh karena itu, mitigasi seperti pengaturan kecepatan, perubahan haluan terhadap arah gelombang, atau modifikasi desain lambung untuk meningkatkan seakeeping dapat dipertimbangkan (Djarmiko, 2012; Fajar et al., 2017).

Tabel 7 Kondisi *Following sea*

Parameter	Nilai	Nilai Gelombang 0.5 m		Nilai Gelombang 1 m		Nilai Gelombang 1.5 m		Nilai Gelombang 2 m	
		Haluan	Buritan	Haluan	Buritan	Haluan	Buritan	Haluan	Buritan
RMS Vertical Acceleration (m/s^2)	1.961	0.025	0.027	0.050	0.054	0.069	0.075	0.091	0.099
RMS Lateral Acceleration (m/s^2)	0.981	0	0	0	0	0	0	0	0
RMS Rolling Motion (Degree)	6	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel 8 Kondisi *Beam Sea*

Parameter	Nilai	Nilai Gelombang 0.5 m		Nilai Gelombang 1 m		Nilai Gelombang 1.5 m		Nilai Gelombang 2 m	
		Haluan	Buritan	Haluan	Buritan	Haluan	Buritan	Haluan	Buritan
RMS Vertical Acceleration (m/s^2)	1.961	0.062	0.074	0.125	0.148	0.162	0.189	0.216	0.253
RMS Lateral Acceleration (m/s^2)	0.981	0	0.042	0.001	0.084	0.001	0.108	0.002	0.144
RMS Rolling Motion (Degree)	6	1	1	2.01	2.01	2.61	2.61	3.48	3.48

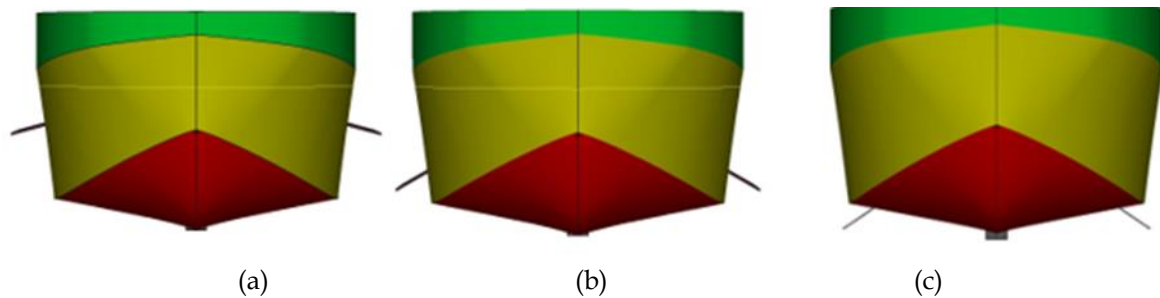
Tabel 9 Kondisi *Head sea*

Parameter	Nilai	Nilai Gelombang 0.5 m		Nilai Gelombang 1 m		Nilai Gelombang 1.5 m		Nilai Gelombang 2 m	
		Haluan	Buritan	Haluan	Buritan	Haluan	Buritan	Haluan	Buritan
RMS Vertical Acceleration (m/s^2)	1.961	0.206	0.228	0.413	0.455	0.537	0.592	0.716	0.789
RMS Lateral Acceleration (m/s^2)	0.981	0	0	0	0	0	0	0	0
RMS Rolling Motion (Degree)	6	0	0	0	0	0	0	0	0

3.5. Perubahan Bilge keel dan Pemindahan Lokasi Tangki

Modifikasi bilge keel dan relokasi tangki diharapkan dapat meningkatkan stabilitas kapal. Perubahan bilge keel dirancang pada tiga posisi kemiringan, yaitu 15° , 30° , dan 45° , dengan lebar 300 mm. Sudut kemiringan ini dihitung dari titik perpotongan garis center line dengan garis sarat ketika sarat di sisi portside dan starboard berada pada kondisi seimbang. Setiap variasi desain tersebut (Gambar 4) dianalisis melalui simulasi stabilitas dan seakeeping untuk mengevaluasi pengaruh perubahan yang dilakukan. Tujuannya adalah memperoleh peningkatan stabilitas

dibandingkan kondisi awal kapal sebelum modifikasi. Selain itu, dilakukan pula pemindahan lokasi tangki FOD untuk menghilangkan nilai Transverse Center of Gravity (TCG) yang dimiliki kapal, sehingga diharapkan memberikan kontribusi positif terhadap perbaikan stabilitas keseluruhan.



Gambar 4 Model *bilge keel* (a) 15°, (b) 30°, (c) 45°

3.6. Perbandingan Sebelum Perubahan dan Setelah Perubahan

Hasil simulasi pada tabel 10 hingga tabel 13 menunjukkan peningkatan kinerja stabilitas dan olah gerak kapal setelah dilakukan perubahan desain pada berbagai model. Parameter stabilitas utama, seperti Area under GZ curve untuk rentang 0°–30° dan 0°–40°, maximum GZ, sudut maximum GZ, serta initial GMt, mengalami peningkatan konsisten pada semua kondisi muat (departure, seagoing, arrival, dan Light Weight Condition/LWT) dibandingkan Kondisi existing. Peningkatan ini mengindikasikan bertambahnya cadangan stabilitas dan kemampuan pemulihan momen kapal setelah mengalami heeling, yang sesuai dengan persyaratan minimum IMO IS Code 2008. Pada aspek olah gerak (Tabel 14–16), nilai rolling amplitude cenderung menurun atau stabil, menunjukkan perbaikan kenyamanan dan pengurangan efek beam sea. Sementara itu, pitch motion dan heave acceleration tetap berada pada batas aman di semua kondisi gelombang, termasuk following sea dan head sea. Temuan ini sejalan dengan studi Bhattacharyya (1978) yang menyatakan bahwa peningkatan stabilitas transversal tidak selalu mengorbankan kenyamanan, apabila desain modifikasi mempertimbangkan keseimbangan antara GMt, distribusi berat, dan bentuk lambung. Hasil ini membuktikan bahwa modifikasi desain yang dilakukan tidak hanya memenuhi ketentuan IMO IS Code 2008, tetapi juga memberikan peningkatan performa seakeeping tanpa mengorbankan aspek keselamatan maupun kenyamanan pelayaran.

Tabel 10 Perbandingan Hasil Simulasi Stabilitas Pada Kondisi Departure

Item	Nilai	Model							
		<i>Existing</i>	1	2	3	4	5	6	7
<i>Area 0° to 30° (m.deg)</i>	3.151	3.469	3.641	3.478	3.471	3.465	3.650	3.644	3.638
<i>Area 0° to 40° (m.deg)</i>	5.156	6.151	6.382	6.163	6.153	6.142	6.394	6.384	6.373
<i>Area 30° to 40° (m.deg)</i>	1.718	2.682	2.740	2.685	2.682	2.677	2.744	2.741	2.735
<i>Max GZ at 30° (m)</i>	0.200	0.298	0.304	0.298	0.298	0.298	0.304	0.304	0.303
<i>Angle of Max GZ (deg)</i>	25.0	47.3	47.3	47.3	47.3	48.2	47.3	47.3	47.3
<i>Initial GMt (m)</i>	0.150	0.445	0.448	0.446	0.446	0.445	0.448	0.448	0.447
Akumulasi Nilai		60.344	60.815	60.370	60.350	61.227	60.840	60.821	60.796

Tabel 11 Perbandingan Hasil Simulasi Stabilitas Pada Kondisi *Seagoing*

Item	Nilai	Model							
		<i>Existing</i>	1	2	3	4	5	6	7
Area 0° to 30° (m.deg)	3.151	3.508	3.590	3.517	3.511	3.505	3.599	3.592	3.586
Area 0° to 40° (m.deg)	5.156	6.206	6.314	6.218	6.208	6.196	6.326	6.316	6.305
Area 30° to 40° (m.deg)	1.718	2.697	2.724	2.700	2.697	2.692	2.727	2.724	2.718
Max GZ at 30° (m)	0.200	0.300	0.302	0.300	0.300	0.300	0.303	0.302	0.302
Angle of Max GZ (deg)	25.0	47.3	2247.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3
Initial GMt (m)	0.150	0.439	0.439	0.439	0.439	0.439	0.439	0.439	0.439
Akumulasi Nilai		60.450	60.669	60.474	60.455	60.432	60.693	60.673	60.650

Tabel 12 Perbandingan Hasil Simulasi Stabilitas Pada Kondisi *Arrival*

Item	Nilai	<i>Existing</i>	Model						
			1	2	3	4	5	6	7
Area 0° to 30° (m.deg)	3.151	3.563	3.579	3.572	3.565	3.559	3.587	3.581	3.574
Area 0° to 40° (m.deg)	5.156	6.290	6.310	6.301	6.291	6.280	6.322	6.312	6.300
Area 30° to 40° (m.deg)	1.718	2.727	2.732	2.729	2.726	2.721	2.735	2.731	2.726
Max GZ at 30° (m)	0.200	0.303	0.303	0.303	0.303	0.303	0.304	0.303	0.303
Angle of Max GZ (deg)	25.0	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3
Initial GMt (m)	0.150	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.435	0.434
Akumulasi Nilai		60.617	60.658	60.640	60.621	60.597	60.683	60.662	60.638

Tabel 13 Perbandingan Hasil Simulasi Stabilitas Pada Kondisi LWT

Item	Nilai	<i>Existing</i>	Model						
			1	2	3	4	5	6	7
Area 0° to 30° (m.deg)	3.151	3.741	3.741	3.749	3.742	3.735	3.749	3.742	3.735
Area 0° to 40° (m.deg)	5.156	6.691	6.691	6.702	6.691	6.678	6.702	6.691	6.678
Area 30° to 40° (m.deg)	1.718	2.951	2.951	2.953	2.950	2.943	2.953	2.950	2.943
Max GZ at 30° (m)	0.200	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333
Angle of Max GZ (deg)	25.0	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3	47.3
Initial GMt (m)	0.150	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448	0.448
Akumulasi Nilai		61.464	61.464	61.484	61.464	61.438	61.484	61.464	61.438

Tabel 14 Nilai *Rolling Amplitude* Seluruh Model

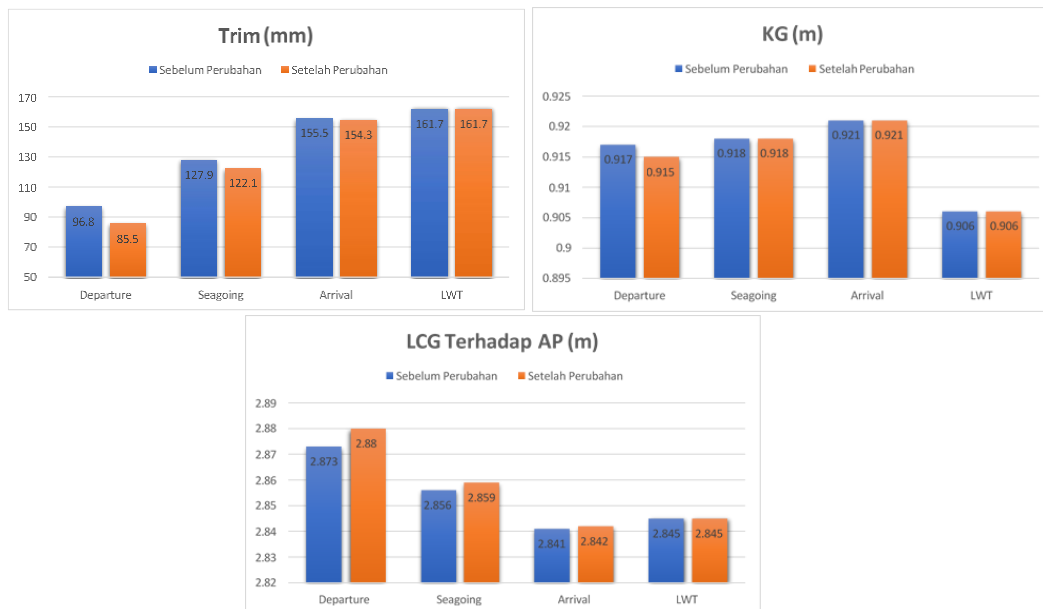
Model	Tinggi Gelombang				Simulasi
	0.5 m	1 m	1.5 m	2 m	Nilai
Model Existing	1	2.01	2.61	3.48	9.1
Model 1	1.01	2.01	2.61	3.48	9.11
Model 2	0.99	1.98	2.58	3.44	8.99
Model 3	1	1.99	2.59	3.45	9.03
Model 4	1.01	2.02	2.62	3.49	9.14
Model 5	0.99	1.98	2.57	3.43	8.97
Model 6	0.99	1.99	2.59	3.45	9.02
Model 7	1.01	2.01	2.61	3.49	9.12

Tabel 15 Nilai Periode Olang Seluruh Model

Model	Kondisi				Simulasi Nilai
	Departure	Seagoing	Arrival	LWT	
Model Existing	3.4244	3.4477	3.4635	3.4129	13.7484
Model 1	3.4129	3.4477	3.4635	3.4129	13.7369
Model 2	3.4205	3.4477	3.4635	3.4129	13.7446
Model 3	3.4205	3.4477	3.4635	3.4129	13.7446
Model 4	3.4244	3.4477	3.4635	3.4129	13.7484
Model 5	3.4129	3.4477	3.4635	3.4129	13.7369
Model 6	3.4129	3.4477	3.4635	3.4129	13.7369
Model 7	3.4167	3.4477	3.4675	3.4129	13.7448

Tabel 16 Nilai *Rolling Motion*, *Pitch Motion*, dan *Heave Acceleration*

Gelombang	Rolling Motion (deg)								Pitch Motion (deg)								Heave Acceleration (m/s ²)							
	Exist	1	2	3	4	5	6	7	Exist	1	2	3	4	5	6	7	Exist	1	2	3	4	5	6	7
Following sea - 0.5 meter	0	0	0	0	0	0	0	0	0.32	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.32	0.32	0.026	0.026	0.026	0.026	0.026	0.025	0.026	0.026
Following sea - 1 meter	0	0	0	0	0	0	0	0	0.64	0.62	0.61	0.62	0.62	0.64	0.64	0.64	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051	0.051
Following sea - 1.5 meter	0	0	0	0	0	0	0	0	0.85	0.82	0.81	0.82	0.82	0.85	0.85	0.85	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Following sea - 2 meter	0	0	0	0	0	0	0	0	1.13	1.09	1.08	1.09	1.09	1.13	1.13	1.13	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094
Beam sea - 0.5 meter	0.99	1.01	0.99	1	1.01	0.99	0.99	1.01	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.064	0.064
Beam sea - 1 meter	1.98	2.01	1.98	1.99	2.02	1.98	1.99	2.01	0.48	0.49	0.49	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48	0.126	0.126	0.126	0.127	0.127	0.126	0.127	0.127
Beam sea - 1.5 meter	2.57	2.61	2.58	2.59	2.62	2.57	2.59	2.61	0.68	0.69	0.69	0.68	0.68	0.68	0.67	0.67	0.166	0.166	0.165	0.167	0.167	0.166	0.167	0.167
Beam sea - 2 meter	3.43	3.48	3.44	3.45	3.49	3.43	3.45	3.49	0.91	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.9	0.9	0.222	0.221	0.221	0.222	0.222	0.221	0.222	0.222
Head sea - 0.5 meter	0	0	0	0	0	0	0	0	0.56	0.57	0.57	0.56	0.56	0.55	0.54	0.54	0.184	0.185	0.185	0.187	0.187	0.184	0.186	0.186
Head sea - 1 meter	0	0	0	0	0	0	0	0	1.11	1.15	1.14	1.12	1.12	1.1	1.08	1.08	0.368	0.369	0.369	0.373	0.373	0.368	0.372	0.372
Head sea - 1.5 meter	0	0	0	0	0	0	0	0	1.46	1.51	1.5	1.47	1.47	1.45	1.42	1.42	0.479	0.48	0.481	0.486	0.486	0.479	0.485	0.485
Head sea - 2 meter	0	0	0	0	0	0	0	0	1.94	2.01	1.99	1.96	1.96	1.93	1.9	1.9	0.639	0.64	0.641	0.648	0.648	0.639	0.647	0.647



Gambar 5 Perbandingan nilai trim, KG, dan LCG

Berdasarkan hasil analisis grafik trim, KG, dan LCG (Gambar 5), modifikasi tangki F.O.D menunjukkan dampak yang bervariasi pada empat kondisi operasional kapal (*departure*, *seagoing*, *arrival*, dan *light weight*). Perubahan trim paling nyata terjadi pada kondisi *departure*, dengan penurunan dari 96.8 mm menjadi 85.5 mm, yang menunjukkan distribusi muatan awal pelayaran menjadi lebih seimbang. Kondisi *seagoing* juga mengalami penurunan dari 127.9 mm menjadi 122.1 mm, kemungkinan akibat redistribusi massa seiring konsumsi bahan bakar, sedangkan perubahan pada *arrival* dan LWT relatif kecil atau tidak ada. Parameter KG, perbedaan hanya signifikan pada *departure*, di mana nilai turun dari 0.917 m menjadi 0.915 m, menandakan penurunan ketinggian titik berat yang dapat meningkatkan stabilitas transversal, sementara pada kondisi lainnya perubahan tidak berarti. Sementara itu, LCG menunjukkan pergeseran ke arah haluan dengan peningkatan paling besar pada *departure* (0.007 m), dan perubahan pada kondisi lainnya di bawah 0.003 m atau tidak berubah. Secara keseluruhan, modifikasi tangki F.O.D berdampak paling besar pada kondisi Departure, baik pada trim, KG, maupun LCG, yang mengindikasikan adanya redistribusi massa yang berpotensi memperbaiki stabilitas dan keseimbangan kapal pada awal pelayaran.

4. Kesimpulan

Pemindahan tangki F.O.D memberikan dampak positif terhadap parameter keseimbangan kapal. Hal ini terlihat dari penurunan nilai trim terbesar pada kondisi departure, yakni dari 96.8 mm menjadi 85.5 mm atau berkurang 11.3 mm. Perubahan nilai KG pada kondisi yang sama juga menunjukkan perbaikan, dari 0.917 m menjadi 0.915 m (selisih 0.002 m). Adapun pergeseran LCG terbesar tercatat pada kondisi departure, dari 2.873 m menjadi 2.880 m, sehingga selisihnya adalah 7 mm. Kinerja stabilitas kapal setelah modifikasi juga tergolong baik. Berdasarkan perbandingan dengan kriteria IMO, model dengan bilge keel sudut 15° menunjukkan margin terbesar dibandingkan model lainnya, serta memenuhi persyaratan IMO Resolution A.749 – Intact Stability Criteria. Kondisi departure, margin total kapal sebelum modifikasi adalah 420,36%, sedangkan pada model bilge keel 15° mencapai 439,42%, atau meningkat sebesar 19,07%. Nilai GZ pada model ini juga menjadi yang tertinggi, dari 298,2 mm menjadi 303,8 mm (selisih 5.6 mm). Sisi performa seakeeping, model bilge keel 15° unggul dibandingkan model lain dan memenuhi kriteria NORDFORSK 1987 – Seakeeping Criteria. Hal ini tercermin dari nilai roll amplitud yang paling rendah di semua variasi tinggi gelombang: 0.99° (0.5 m), 1.98° (1 m), 2.57° (1.5 m), dan 3.43° (2 m). Model ini juga mencatat percepatan heave terendah dengan akumulasi 2,486 m/s², sedikit lebih rendah dibandingkan kapal awal (2.488 m/s²). Selain itu, rata-rata periode olengnya adalah 3.4342 detik, menjadikannya yang paling cepat di antara seluruh model yang diuji.

Konflik Kepentingan

Tidak ada konflik yang perlu dilaporkan

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi kepada Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya atas dukungan fasilitas dan izin penelitian, serta ucapan terima kasih kepada Bapak Ir. Bambang Teguh Setiawan,, M.T. dan Muhammad Lukman Arif, S.Pd.I., M.Pd.I atas bimbingan dan masukannya selama proses penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada semua pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Pernyataan Penggunaan AI dalam Penulisan

Selama penyusunan karya ini, penulis menggunakan ChatGPT untuk memeriksa kepaduan kalimat yang diterjemahkan dan Grammarly untuk meninjau keakuratan tata bahasa. Setelah menggunakan alat/layanan ini, penulis meninjau dan mengedit konten sesuai kebutuhan dan bertanggung jawab penuh atas isi publikasi tersebut

Daftar Pustaka

- Bertram, V. (2012). Practical ship hydrodynamics (2nd ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Bhattacharya, R. (1978). Dynamics of marine vehicles. New York: United States of America.
- Djarmiko, E. B. (2012). Perilaku dan operabilitas bangunan laut di atas gelombang acak. ITS Press. Surabaya, Indonesia.
- Djaya, I. K. (2008). Teknik konstruksi kapal baja. Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional.
- Dokum, K. V. (2003). Ship knowledge: A modern encyclopedia. Dokmar. Enkhuizen, The Netherlands.
- Fajar, A. H., Chrismianto, D., & Hadi, E. S. (2017). Studi analisa slamming & deck wetness akibat gerakan heaving-pitching coupling & gerakan non-linier rolling (Studi kasus kapal MT. Pandan). Jurnal Teknik Perkapalan, 5(4), 677-687.
- Faltinsen, O. M. (1990). Sea loads on ships and offshore structures. Cambridge University Press.
- International Maritime Organization. (1993). Resolution A.749(18) Code on intact stability for all types of ships covered by IMO instruments. IMO Publishing.
- International Maritime Organization. (2008). International code on intact stability, 2008 (IS Code 2008). IMO Publishing.
- Lewis, E. V. (Ed.). (1988). Principles of naval architecture (Vol. 3: Motions in waves and controllability). Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Lloyd, A. R. J. (1909). Seakeeping: Ship behaviour in rough water. Ellis Horwood Ltd. New York, NY.
- Prakoso, C., & Yannes, M. P. (2010). Pengembangan anjungan kapal tugboat penarik tongkang batubara berbasis ergonomi. Jurnal Tingkat Sarjana Senirupa dan Desain, 1(1), 1-7. Fakultas Seni Rupa dan Desain, ITB.
- Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). Basic ship theory (5th ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Rumbawa, R. H. R., & Azhar, A. (2020). Stabilitas kapal pengangkut ikan hidup. CV. Penerbit Lakeisha.
- Susanto, A. (2010). Evaluasi desain dan stabilitas kapal penangkapan ikan di Pelabuhan Ratu (Studi kasus kapal PSP 01) [Tesis, Institut Pertanian Bogor]. IPB Repository.
- Yulianti, M. L., Mulyanto, I. P., & Budi, A. W. (2017). Analisa stabilitas kapal perintis 500 DWT setelah penambahan variasi posisi sudut dan lebar bilga keel. Jurnal Teknik Perkapalan, 5(1). Universitas Diponegoro.