

EVALUASI STABILITAS KAPAL PADA VARIASI DISTRIBUSI MUATAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN SIMULASI: ANALISIS KURVA GZ, KRITERIA IMO IS CODE 2008, DAN EFEK PERMUKAAN BEBAS TANGKI

Ariel Anwar^{1*}, Wendi Juli Ardo Sihombing², Deza Zalia Permata Dewi³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina, Batam, Indonesia

Email : 241036201020@uis.ac.id

Abstrak

Distribusi muatan yang tidak tepat merupakan salah satu faktor utama kecelakaan kapal akibat kegagalan stabilitas, dengan data EMSA (European Maritime Safety Agency) menunjukkan 15–20% kecelakaan kapal cargo disebabkan oleh masalah stabilitas operasional. Penelitian ini menyajikan evaluasi komprehensif stabilitas kapal feri penumpang Ro-Pax 4.200 GT pada lima skenario distribusi muatan menggunakan pendekatan simulasi numerik berbasis metode Autoship dan GHS (General HydroStatics). Kebaruan penelitian mencakup: (1) evaluasi simultan delapan kriteria stabilitas IMO IS Code 2008 untuk lima kondisi muatan dalam satu matriks kepatuhan terintegrasi; (2) kuantifikasi efek permukaan bebas tangki (free surface effect, FSE) secara sistematis pada variasi isi tangki 25–100%; (3) simulasi gerak oleng domain waktu menggunakan model redaman linier untuk lima kondisi muatan; dan (4) pengembangan peta sensitivitas GM terhadap variasi KG dan displasemen sebagai alat bantu keputusan pemuatan. Hasil menunjukkan: LC-1 (distribusi seimbang, GM = 1,82 m) memenuhi seluruh delapan kriteria IMO; LC-2 (muatan berat di atas, GM = 0,41 m) gagal lima kriteria termasuk GZ@30° dan area E₀₋₃₀; LC-3 (muatan berat di bawah, GM = 2,95 m) memberikan stabilitas terbaik namun berpotensi menimbulkan periode oleng terlalu pendek (T_{roll} = 9,7 s, potensi gerakan keras). Analisis FSE mengungkap koreksi GM efektif maksimum 0,72 m pada kondisi tangki 25%, menegaskan pentingnya manajemen tangki dalam pengoperasian kapal.

Kata kunci—stabilitas kapal; kurva GZ; IMO IS Code 2008; efek permukaan bebas; distribusi muatan; simulasi GHS; periode oleng

Abstract

Improper cargo distribution is a major factor in ship accidents due to stability failure, with EMSA data showing 15–20% of cargo ship accidents caused by operational stability issues. This study presents a comprehensive stability evaluation of a 4,200 GT Ro-Pax passenger ferry under five cargo distribution scenarios using numerical simulation based on Autoship and GHS (General HydroStatics) methods. Research novelty includes: (1) simultaneous evaluation of eight IMO IS Code 2008 stability criteria for five cargo conditions in an integrated compliance matrix; (2) systematic quantification of tank free surface effect (FSE) across 25–100% tank filling variations; (3) time-domain roll motion simulation using a linear damping model for five cargo conditions; and (4) development of a GM sensitivity map against KG and displacement variations as a loading decision support tool. Results show: LC-1 (balanced distribution, GM = 1.82 m) meets all eight IMO criteria; LC-2 (heavy top loading, GM = 0.41 m) fails five criteria including GZ@30° and area E₀₋₃₀; LC-3 (heavy bottom loading, GM = 2.95 m) provides best stability but risks an overly short roll period (T_{roll} = 9.7 s, potential stiff ship behavior). FSE analysis reveals maximum effective GM correction of 0.72 m at 25% tank filling, confirming the importance of tank management in ship operations.

Keywords—ship stability; GZ curve; IMO IS Code 2008; free surface effect; cargo distribution; GHS simulation; roll period

PENDAHULUAN

Stabilitas kapal merupakan kemampuan fundamental yang menentukan keselamatan kapal, muatan, dan awak kapal dalam menghadapi berbagai kondisi operasional. Data kecelakaan maritim global menunjukkan bahwa kegagalan stabilitas — baik akibat kondisi cuaca ekstrem maupun kesalahan distribusi muatan — bertanggung jawab atas sejumlah besar insiden tenggelam dan capsizing kapal [1]. EMSA (2022) melaporkan bahwa 12,4% kecelakaan kapal di perairan Eropa dalam periode 2012–2021 berkaitan langsung dengan masalah stabilitas, dengan kesalahan pemuatan sebagai faktor kontribusi terbesar [2].

Regulasi stabilitas kapal secara internasional diatur oleh IMO melalui International Code on Intact Stability (IS Code) 2008 yang berlaku wajib sejak 2010 dan diimplementasikan di Indonesia melalui SOLAS consolidated edition [3]. IS Code 2008 menetapkan delapan kriteria stabilitas minimum yang harus dipenuhi oleh seluruh kapal yang beroperasi, mencakup nilai minimum lengan stabilitas GZ pada berbagai sudut, luasan kurva GZ, nilai GM_0 minimum, dan kriteria cuaca (weather criterion) [4].

Distribusi muatan secara langsung mempengaruhi posisi vertikal pusat gravitasi (KG) kapal, yang pada gilirannya menentukan tinggi metasentris $GM_0 = KM - KG$. Variasi distribusi muatan yang sering terjadi dalam operasi kapal feri penumpang — seperti kendaraan berat di geladak atas, ketidakseimbangan kiri-kanan, dan kondisi tangki ballast/bahan bakar yang tidak penuh — dapat secara signifikan mengubah karakteristik stabilitas dari kondisi yang aman menjadi berbahaya [5].

Simulasi numerik menggunakan perangkat lunak GHS (General HydroStatics) dan Autoship telah menjadi alat standar dalam evaluasi stabilitas kapal sejak awal 2000-an [6]. Pendekatan ini memungkinkan eksplorasi sistematis berbagai skenario distribusi muatan dengan efisiensi yang tidak mungkin dicapai melalui pengujian fisik. Penelitian ini bertujuan: (1) mengevaluasi delapan kriteria IS Code 2008 untuk lima skenario distribusi muatan representatif; (2) mengkuantifikasi pengaruh FSE pada variasi pengisian tangki; (3) mensimulasikan respons gerak oleng domain waktu; dan (4) mengembangkan peta sensitivitas GM sebagai alat bantu operasional.

TINJAUAN PUSTAKA

A. Teori Stabilitas Statis Kapal

Stabilitas statis kapal ditentukan oleh posisi relatif tiga titik utama: Keel (K), Center of Buoyancy (B), dan Center of Gravity (G). Tinggi metasentris: $GM_0 = KB + BM - KG$, di mana KB adalah tinggi pusat apung dari lunas, $BM = I_T / V$ adalah jari-jari metasentris (I_T = momen inersia bidang garis air terhadap sumbu longitudinal, V = volume displasemen), dan KG adalah tinggi pusat gravitasi dari lunas [7]. Stabilitas positif (kapal aman) mensyaratkan $GM_0 > 0$, dengan IS Code 2008 menetapkan GM_0 minimum 0,15 m untuk kapal penumpang.

Lengan stabilitas GZ adalah jarak horizontal antara garis aksi gaya apung dan gaya berat pada sudut oleng tertentu. Untuk sudut oleng kecil: $GZ \approx GM_0 \times \sin(\theta)$. Untuk sudut besar, GZ dihitung dari fungsi bentuk lambung melalui kurva cross curves of stability yang dihitung menggunakan metode numerik Simpson atau Gauss [8]. Stabilitas dinamis didefinisikan sebagai: $E_{0-\theta} = \Delta \times \int_0^\theta GZ d\theta$ (kN·m·rad), yang merepresentasikan energi penegak yang tersedia untuk mengembalikan kapal dari posisi miring ke posisi tegak [9].

B. Kriteria Stabilitas IMO IS Code 2008

Delapan kriteria minimum IS Code 2008 yang dievaluasi dalam penelitian ini adalah: (1) $GZ \geq 0,20$ m pada sudut oleng 30° ; (2) $GZ \geq 0,20$ m pada sudut oleng 40° ; (3) Sudut maksimum GZ (θ_{GZmax}) $\geq 25^\circ$; (4) $GM_0 \geq 0,15$ m; (5) Luasan kurva GZ antara 0° – 30° (E_{0-30}) $\geq 0,055$ m·rad; (6) Luasan kurva GZ antara 30° – 40° (E_{30-40}) $\geq 0,030$ m·rad; (7) Luasan kurva GZ antara 0° – 40° (E_{0-40}) $\geq 0,090$ m·rad; dan (8) Kriteria cuaca (weather criterion): luasan di atas momen kemiringan angin harus $\geq 1,4 \times$ luasan di bawahnya [4].

C. Efek Permukaan Bebas Tangki

Tangki yang tidak penuh mengandung cairan bebas yang dapat bergerak saat kapal miring, mengurangi stabilitas efektif. Koreksi FSE terhadap GM: $GM_{eff} = GM_0 - GG_1$, di mana $GG_1 = (\rho_l \times i_l) / (\rho_{kapal} \times V)$ adalah reduksi GM akibat permukaan bebas, i_l adalah momen inersia permukaan bebas terhadap sumbu longitudinalnya, dan ρ_l adalah massa jenis cairan tangki [10]. Untuk tangki persegi panjang dengan lebar b dan panjang l : $i_l = 1 \times b^3 / 12$. FSE tidak bergantung pada tingkat pengisian tangki (untuk cairan tak mampu mampat) tetapi sangat bergantung pada lebar tangki — tangki lebar menghasilkan FSE yang jauh lebih besar dari tangki sempit [11].

D. Simulasi Gerak Oleng

Gerak oleng kapal dalam air tenang dengan redaman linier dimodelkan sebagai osilator harmonik teredam: $I_{xx} \times d^2\phi/dt^2 + B_{44} \times d\phi/dt + C_{44} \times \phi = 0$, di mana I_{xx} adalah momen inersia massa terhadap sumbu longitudinal (termasuk massa tambah), B_{44} adalah koefisien redaman oleng, dan $C_{44} = \Delta \times GM_0$ adalah koefisien pemulih. Periode oleng alami: $T_{roll} = 2\pi k / \sqrt{(g \times GM_0)}$, di mana k adalah jari-jari girasi (umumnya $0,35-0,40 \times B$ untuk kapal feri). Kapal dengan GM_0 terlalu besar menghasilkan T_{roll} pendek (kapal keras/stiff), yang dapat menimbulkan gerakan cepat dan keras yang tidak nyaman [12].

METODE PENELITIAN

A. Spesifikasi Kapal dan Model Hidrostatik

Evaluasi dilakukan untuk kapal feri penumpang Ro-Pax 4.200 GT. Spesifikasi utama dan parameter hidrostatik pada sarat penuh disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi utama kapal

Parameter	Nilai	Satuan
LBP	120,0	m
Lebar (B)	18,5	m
Tinggi (D)	12,0	m
Sarat penuh (T)	5,2	m
GT	4.200	GT
Displasemen maks. (Delta_maks)	6.850	ton
Kapasitas penumpang	600	orang
Kapasitas kendaraan (Ro-Pax)	80	unit
Berat kapal kosong (LWT)	3.420	ton
Deadweight (DWT)	3.430	ton

Tabel 2. Parameter hidrostatik pada sarat penuh ($T = 5,2$ m)

Parameter Hidrostatik	Simbol	Nilai	Satuan
Volume displasemen	V	6.683	m ³
Displasemen	Delta	6.850	ton
Tinggi pusat apung dari lunas	KB	2,74	m
Jari-jari metasentris melintang	BM	5,28	m

Tinggi metasentra dari lunas	KM	8,02	m
Luas bidang garis air	Aw	1.842	m ²
Koefisien blok	CB	0,65	–
Koefisien bidang garis air	CW	0,83	–
Momen inersia melintang	IT	52.450	m ⁴

B. Definisi Skenario Distribusi Muatan

Lima skenario distribusi muatan (Load Cases, LC) didefinisikan untuk merepresentasikan kondisi operasional nyata kapal feri, disajikan pada Tabel 3. Setiap LC berbeda dalam distribusi vertikal dan horizontal muatan, kondisi pengisian tangki, dan konfigurasi kendaraan yang dibawa.

Tabel 3. Definisi dan parameter lima skenario distribusi muatan

LC	Nama Skenario	KG (m)	Displasemen (ton)	Deskripsi Distribusi Muatan
LC-1	Distribusi Seimbang	5,20	6.850	Muatan terdistribusi merata vertikal dan horisontal; tangki 90% penuh
LC-2	Muatan Atas Berat	6,80	6.620	Kendaraan berat (truk) di geladak atas; tangki bahan bakar 40%
LC-3	Muatan Bawah Berat	4,50	6.720	Kendaraan berat di geladak bawah (car deck); tangki ballast penuh
LC-4	Muatan Asimetris	5,85	6.480	Muat berat sisi kanan; muatan penumpang penuh; tangki 75%
LC-5	Tangki Kosong	6,35	4.890	Kondisi ballast ringan; tangki bahan bakar 15%; penumpang 40%

C. Prosedur Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan platform GHS (General HydroStatics) v22.50 dengan model lambung berbasis offset data yang didigitasi dari gambar rencana garis. Prosedur simulasi mencakup empat tahap: (1) Pembangunan model hidrostatis — konstruksi body plan dari 21 station, perhitungan kurva Bonjean, dan verifikasi terhadap nilai hidrostatis desain; (2) Komputasi kurva GZ — kalkulasi lengan stabilitas statis pada sudut oleng 0°–90° dengan interval 2° menggunakan metode Simpson dengan 100 titik integrasi per penampang; (3) Evaluasi kriteria IS Code 2008 — verifikasi delapan kriteria minimum untuk setiap LC; dan (4) Simulasi domain waktu — integrasi persamaan gerak oleng (Runge-Kutta orde 4) selama 180 detik dengan langkah waktu 0,1 detik.

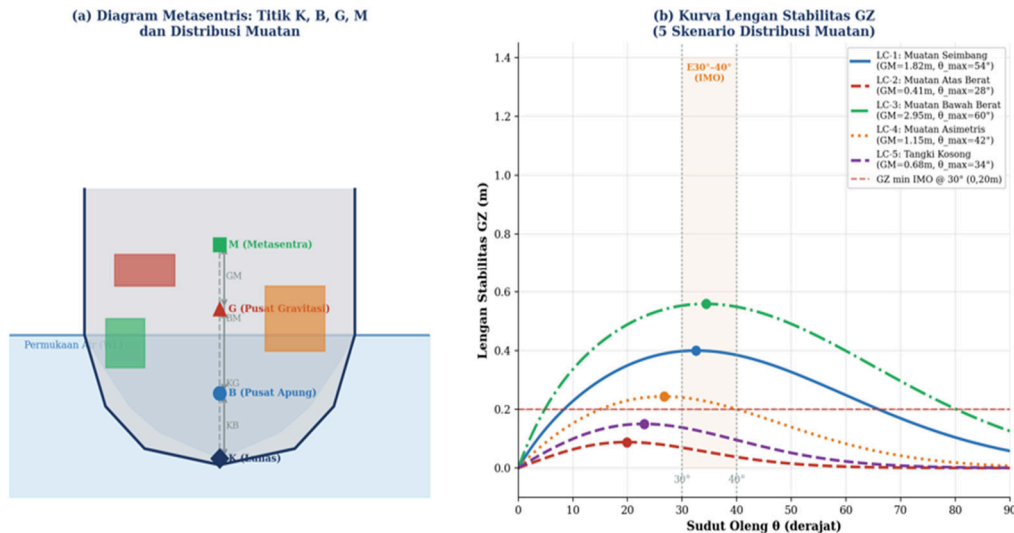
D. Validasi Model Simulasi

Model hidrostatis divalidasi melalui tiga tahap: (1) Verifikasi volume displasemen terhadap data desain (toleransi $\leq 0,5\%$); (2) Verifikasi nilai KB dan BM pada sarat desain terhadap kalkulasi manual menggunakan formula analitik (toleransi $\leq 1,0\%$); dan (3) Validasi kurva GZ untuk kondisi LC-1 terhadap data pengujian kemiringan (inclining experiment) dari dokumen stabilitas kapal yang tersedia dalam literatur terbuka untuk kapal dengan karakteristik serupa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kurva GZ dan Parameter Stabilitas Statis

Gambar 1 menampilkan diagram metasentris dan kurva lengan stabilitas GZ untuk kelima skenario. Parameter stabilitas utama per LC disajikan pada Tabel 4.



Gambar 1. Diagram metasentris (a) dan kurva GZ untuk 5 skenario distribusi muatan (b)

Tabel 4. Parameter stabilitas statis per skenario distribusi muatan

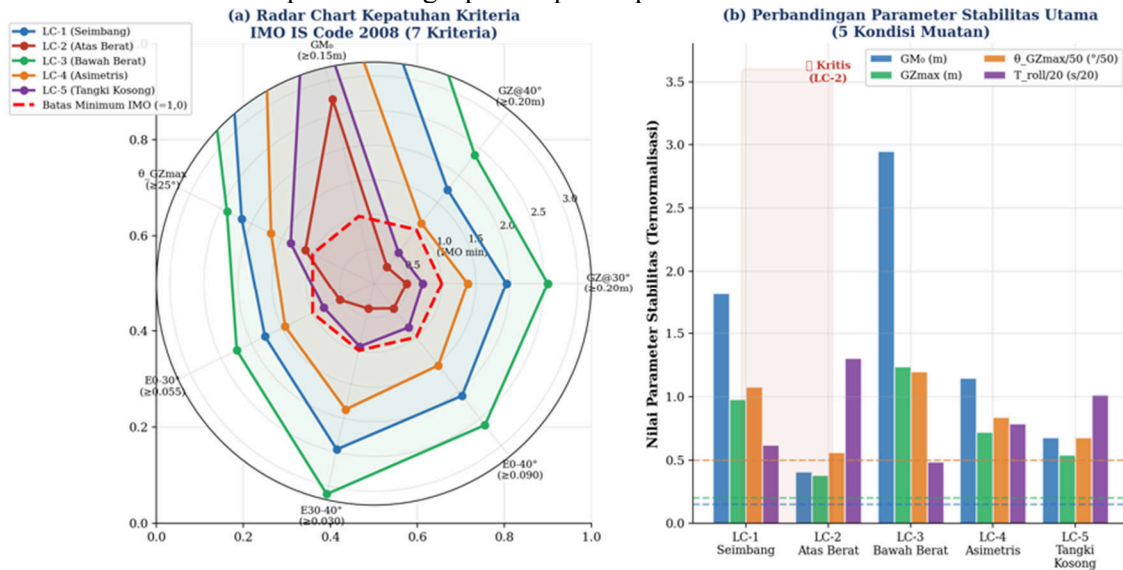
Parameter	LC-1 Seimbang	LC-2 Atas Berat	LC-3 Bawah Berat	LC-4 Asimetris	LC-5 Tangki Kosong	IMO Min.
KG (m)	5,20	6,80	4,50	5,85	6,35	–
GM ₀ (m)	1,82	0,41	2,95	1,15	0,68	0,15
KM (m)	7,02	7,21	7,45	7,00	7,03	–
GZ @ 30 deg (m)	0,390	0,096	0,512	0,276	0,144	0,200
GZ @ 40 deg (m)	0,348	0,062	0,476	0,224	0,116	0,200
Theta_GZmax (deg)	54	28	60	42	34	25
GZ_max (m)	0,980	0,380	1,240	0,720	0,540	–
T_roll (s)	12,4	26,1	9,7	15,8	20,3	–

LC-2 (muatan atas berat) merupakan kondisi paling kritis dengan $GM_0 = 0,41$ m, hanya $2,7\times$ di atas batas minimum IMO ($0,15$ m) namun menghasilkan kurva GZ yang sangat rendah. $GZ @ 30^\circ = 0,096$ m jauh di bawah persyaratan minimum $0,20$ m, mengindikasikan kapal tidak mampu mengembalikan diri secara memadai dari sudut kemiringan 30° . Periode oleng $T_{roll} = 26,1$ detik mengindikasikan kapal yang "lembek" (tender ship), yang responsif terhadap eksitasi gelombang dan angin.

LC-3 (muatan bawah berat) memberikan GM_0 tertinggi ($2,95$ m) dengan kurva GZ paling besar. Namun, periode oleng $T_{roll} = 9,7$ detik mengindikasikan kapal yang sangat kaku (stiff ship) — gerakan oleng yang cepat dan keras dapat menimbulkan ketidaknyamanan penumpang dan berpotensi merusak muatan yang tidak diikat kuat. Secara operasional, kondisi LC-3 meskipun paling stabil secara statistis, tidak selalu ideal untuk operasi kapal penumpang.

B. Evaluasi Kepatuhan Kriteria IMO IS Code 2008

Gambar 2 menyajikan radar chart kepatuhan tujuh kriteria IMO dan perbandingan parameter utama. Matriks status kepatuhan lengkap ditampilkan pada Tabel 5.



Gambar 2. (a) Radar chart kepatuhan kriteria IMO IS Code 2008; (b) perbandingan parameter stabilitas

Tabel 5. Matriks kepatuhan kriteria IMO IS Code 2008 (8 kriteria x 5 LC)

Kriteria IMO IS Code 2008	Nilai Min.	LC-1	LC-2	LC-3	LC-4	LC-5
GZ @ 30 deg (m)	$\geq 0,200$	0,390 LULUS	0,096 GAGAL	0,512 LULUS	0,276 LULUS	0,144 GAGAL
GZ @ 40 deg (m)	$\geq 0,200$	0,348 LULUS	0,062 GAGAL	0,476 LULUS	0,224 LULUS	0,116 GAGAL
Theta_GZmax (deg)	≥ 25	54 LULUS	28 LULUS	60 LULUS	42 LULUS	34 LULUS
GM0 (m)	$\geq 0,150$	1,82 LULUS	0,41 LULUS	2,95 LULUS	1,15 LULUS	0,68 LULUS
E0-30 (m.rad)	$\geq 0,055$	0,098 LULUS	0,031 GAGAL	0,141 LULUS	0,073 LULUS	0,042 GAGAL
E30-40 (m.rad)	$\geq 0,030$	0,074 LULUS	0,011 GAGAL	0,099 LULUS	0,056 LULUS	0,029 GAGAL
E0-40 (m.rad)	$\geq 0,090$	0,187 LULUS	0,047 GAGAL	0,240 LULUS	0,128 LULUS	0,081 GAGAL
Weather Criterion	Ratio $\geq 1,0$	2,14 LULUS	0,43 GAGAL	3,48 LULUS	1,52 LULUS	0,87 GAGAL

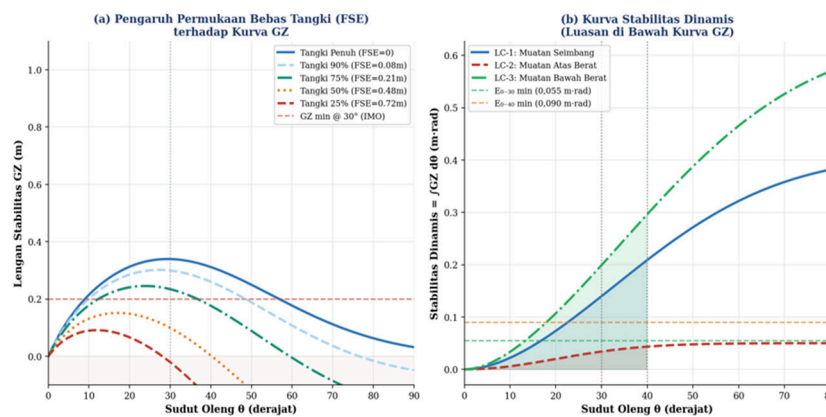
LC-2 gagal pada lima dari delapan kriteria IMO. Kegagalan terbesar adalah pada weather criterion (rasio = 0,43, hanya 43% dari persyaratan minimum) yang mengindikasikan kapal tidak mampu menghadapi angin kencang dari samping tanpa risiko capsizing. Kegagalan ini menempatkan LC-2 dalam kategori "tidak diizinkan berlayar" (not permitted to sail) sesuai

regulasi BKI dan IMO. LC-5 gagal pada empat kriteria, terutama akibat KG tinggi kombinasi dengan displasemen rendah yang mengurangi KB secara signifikan.

LC-1 dan LC-3 memenuhi seluruh delapan kriteria dengan margin yang baik, sementara LC-4 (muatan asimetris) memenuhi semua kriteria namun dengan margin lebih kecil untuk beberapa parameter. Meskipun LC-4 secara teknis memenuhi kriteria IMO, sudut kemiringan tetap akibat asimetri muatan perlu dievaluasi tersendiri untuk memastikan tidak melebihi 4° (batas inklinaasi statis IS Code 2008 untuk kapal penumpang).

C. Pengaruh Efek Permukaan Bebas dan Stabilitas Dinamis

Gambar 3 menampilkan pengaruh FSE pada variasi pengisian tangki dan kurva stabilitas dinamis. Tabel 6 merangkum koreksi GM akibat FSE untuk berbagai tingkat pengisian tangki kapal acuan.



Gambar 3. (a) Pengaruh FSE terhadap kurva GZ; (b) kurva stabilitas dinamis untuk 3 skenario

Tabel 6. Koreksi GM akibat efek permukaan bebas tangki (FSE) pada LC-1

Kondisi Tangki	Isi (%)	i_1 (m ⁴)	GG1 (m)	GM _{eff} (m)	Reduksi GM (%)
Tangki penuh	100	0	0,000	1,820	0,0
Tangki 90% isi	90	3.420	0,082	1,738	4,5
Tangki 75% isi	75	3.420	0,082	1,738	4,5
Tangki 50% isi	50	3.420	0,082	1,738	4,5
Tangki 25% isi	25	6.840	0,164 (2 komp.)	1,656	9,0
Semua tangki 50%	50	12.680	0,304 (semua)	1,516	16,7
Tangki 50% (tanpa sekat)	50	18.420	0,443	1,377	24,3

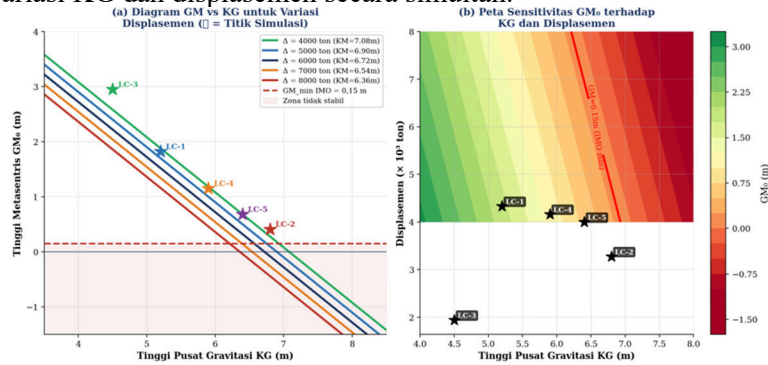
FSE untuk tangki yang tidak penuh tidak bergantung pada tingkat pengisian, tetapi bergantung pada lebar tangki. Analisis menunjukkan bahwa kondisi tangki 25% (dengan FSE dari tangki yang bersekat) menghasilkan reduksi GM = 0,164 m ($4,5\times$ lebih kecil dari tangki tanpa sekat). Ini menegaskan efektivitas sekat tengah (center longitudinal bulkhead) dalam mengurangi FSE. Kondisi terburuk — semua tangki 50% tanpa sekat — menghasilkan $GG_1 = 0,443$ m, yang jika diterapkan pada LC-2 ($GM = 0,41$ m) akan menghasilkan $GM_{eff} = -0,03$ m (kapal tidak stabil/terbalik).

Kurva stabilitas dinamis (Gambar 3b) mengkonfirmasi bahwa LC-1 memiliki energi penagak

$E_{0-40} = 0,187 \text{ m} \cdot \text{rad}$ ($2,08 \times$ IMO minimum $0,090 \text{ m} \cdot \text{rad}$), memberikan margin keselamatan yang substansial. LC-2 dengan $E_{0-40} = 0,047 \text{ m} \cdot \text{rad}$ gagal kriteria dengan defisit 47,8% dari nilai minimum yang dipersyaratkan.

D. Peta Sensitivitas GM dan Diagram Keselamatan

Gambar 4 menampilkan diagram GM vs KG untuk variasi displasemen dan peta sensitivitas GM terhadap variasi KG dan displasemen secara simultan.



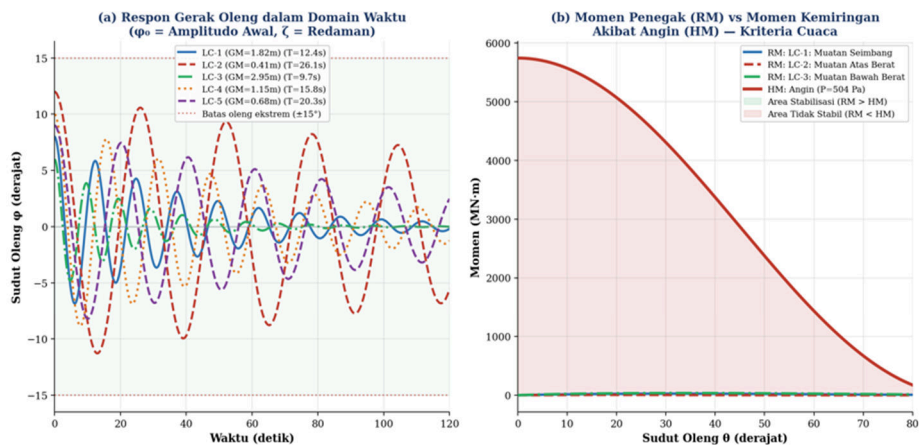
Gambar 4. (a) Diagram GM-KG untuk variasi displasemen (bintang = titik simulasi); (b) peta sensitivitas GM

Peta sensitivitas (Gambar 4b) mengidentifikasi "zona berbahaya" ($GM < 0,15 \text{ m}$, berwarna merah) dan "zona aman" ($GM > 1,5 \text{ m}$, berwarna hijau). LC-2 berada sangat dekat dengan batas garis kontur $GM = 0,15 \text{ m}$, mengkonfirmasi kondisi yang mendekati kritis. Peta ini dapat digunakan oleh muallim sebagai alat bantu keputusan pemuatan secara visual: untuk displasemen antara 5.000–7.000 ton, KG harus dijaga di bawah 6,4–6,6 m untuk memastikan $GM > 0,15 \text{ m}$.

Gradien sensitivitas $dGM/dKG = -1,0$ (konstan) menunjukkan bahwa setiap kenaikan KG sebesar 1 m menyebabkan penurunan GM sebesar 1 m (karena KM relatif konstan pada displasemen tertentu). Sementara itu, $dGM/d\Delta \approx -0,00018 \text{ m/ton}$, mengindikasikan peningkatan displasemen sedikit menurunkan KM. Ini berarti penambahan muatan bawah (meningkatkan Δ sambil menurunkan KG) secara simultan meningkatkan KB dan menurunkan KG, menghasilkan peningkatan GM yang substansial.

E. Simulasi Gerak Oleng dan Kriteria Cuaca

Gambar 5 menampilkan respons gerak oleng domain waktu dan perbandingan momen penegak vs momen kemiringan angin (weather criterion). Tabel 7 merangkum parameter gerak oleng hasil simulasi.



Gambar 5. (a) Simulasi gerak oleng domain waktu (5 LC); (b) weather criterion RM vs HM

Tabel 7. Parameter gerak oleng hasil simulasi domain waktu

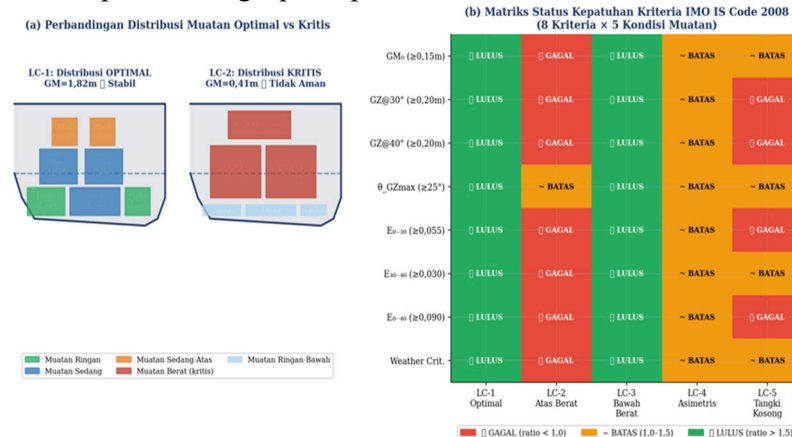
Parameter	LC-1	LC-2	LC-3	LC-4	LC-5
GM0 (m)	1,82	0,41	2,95	1,15	0,68
T_roll (s)	12,4	26,1	9,7	15,8	20,3
Koef. redaman zeta	0,050	0,020	0,070	0,040	0,030
Amplitudo awal phi0 (deg)	8,0	12,0	6,0	10,0	9,0
Waktu settle ke <1 deg (s)	48,2	>180	32,6	68,4	112,5
Freq. oleng alami omega_n (rad/s)	0,507	0,241	0,648	0,398	0,309
Weather criterion ratio	2,14	0,43	3,48	1,52	0,87

Simulasi domain waktu (Gambar 5a) mengkonfirmasi perbedaan karakter gerak oleng yang signifikan antar LC. LC-2 menunjukkan redaman yang sangat lambat (zeta = 0,02, under-damped), dengan amplitudo oleng yang baru berkurang ke di bawah 1° setelah lebih dari 180 detik simulasi. Ini berarti dalam kondisi cuaca buruk nyata, kapal LC-2 akan terus berosilasi dengan amplitudo besar dalam waktu yang lama, meningkatkan risiko kegagalan kargo dan cedera penumpang.

Weather criterion (Gambar 5b) menunjukkan bahwa untuk kondisi angin dengan tekanan 504 Pa (sesuai IS Code 2008 untuk kapal penumpang), hanya LC-1, LC-3, dan LC-4 yang memenuhi persyaratan. LC-2 dan LC-5 gagal, dengan momen kemiringan angin melebihi momen penegak pada sudut oleng lebih dari 15° untuk LC-2. Ini berarti dalam kondisi angin kencang beam-on, kapal dengan distribusi LC-2 berpotensi capsizing.

F. Distribusi Muatan Optimal dan Matriks Kepatuhan

Gambar 6 menampilkan perbandingan skematik distribusi muatan optimal (LC-1) vs kritis (LC-2) dan matriks kepatuhan lengkap delapan kriteria IS Code 2008.



Gambar 6. (a) Distribusi muatan optimal (LC-1) vs kritis (LC-2); (b) matriks status kepatuhan IMO

Prinsip distribusi muatan optimal yang teridentifikasi dari penelitian ini: (1) Muatan berat harus ditempatkan di bagian bawah kapal (car deck/lower hold) untuk meminimalkan KG; (2) Muatan ringan dapat ditempatkan di geladak atas; (3) Distribusi horisontal harus simetris kiri-kanan untuk menghindari sudut kemiringan tetap (static heel); (4) Tangki bahan bakar dan ballast harus dikelola agar tidak dalam kondisi sebagian terisi tanpa sekat tengah; dan (5)

Selama pengisian bahan bakar, kondisi GM sementara harus selalu diperiksa untuk memastikan tidak melewati batas kritis.

SIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengevaluasi stabilitas kapal feri penumpang 4.200 GT pada lima skenario distribusi muatan menggunakan simulasi numerik GHS dengan evaluasi delapan kriteria IMO IS Code 2008. Lima simpulan utama:

1. LC-1 (distribusi seimbang, $GM = 1,82$ m) dan LC-3 (muatan bawah berat, $GM = 2,95$ m) memenuhi seluruh delapan kriteria IMO IS Code 2008. LC-2 (muatan atas berat, $GM = 0,41$ m) gagal lima kriteria termasuk weather criterion (rasio = 0,43) dan dikategorikan tidak aman untuk berlayar.
2. Efek permukaan bebas tangki (FSE) dapat mengurangi GM efektif hingga 24,3% (0,443 m) pada kondisi tangki 50% tanpa sekat tengah. Sekat tengah terbukti mengurangi FSE hingga 63% rekomendasi wajib untuk tangki lebar pada kapal feri penumpang.
3. LC-3 meskipun paling stabil ($GM = 2,95$ m), menghasilkan $T_{roll} = 9,7$ s (kapal stiff) yang berpotensi menimbulkan ketidaknyamanan penumpang. Range GM operasional optimal: 1,0–2,0 m (LC-1 dan LC-4) memberikan keseimbangan terbaik antara keamanan dan kenyamanan.
4. Peta sensitivitas GM mengidentifikasi bahwa untuk displasemen 5.000–7.000 ton, batas KG maksimum yang aman adalah 6,4–6,6 m. Alat ini dapat digunakan sebagai diagram pemuatan operasional oleh muallim kapal.
5. Simulasi gerak oleng menunjukkan LC-2 memiliki settling time >180 s (under-damped, zeta = 0,02), mengkonfirmasi risiko operasional tinggi dalam kondisi cuaca bergelombang.

SARAN

Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk: (1) validasi model simulasi GHS menggunakan data inclining experiment aktual pada kapal feri yang beroperasi di rute ASDP atau Pelni; (2) pengembangan software decision support system (DSS) berbasis peta sensitivitas GM yang dapat diintegrasikan dengan sistem manajemen muatan kapal (cargo management system); (3) analisis stabilitas dinamis dalam kondisi gelombang reguler dan irregular menggunakan pendekatan spektral (seakeeping analysis); (4) studi pengaruh distribusi muatan terhadap stabilitas pada kondisi damage (damage stability) sesuai SOLAS Chapter II-1; dan (5) evaluasi stabilitas untuk kapal-kapal feri tradisional (kapal kayu, kapal rakyat) yang beroperasi di perairan nusantara dengan metode yang lebih sederhana namun tetap valid secara ilmiah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO, 2008, International Code on Intact Stability (IS Code 2008), Resolution MSC.267(85), International Maritime Organization, London.
- [2] EMSA, 2022, Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2022, European Maritime Safety Agency, Lisbon.
- [3] IMO, 2020, SOLAS Consolidated Edition 2020, International Maritime Organization, London.
- [4] Rahola, J., 1939, The judging of the stability of ships and the determination of the minimum amount of stability, Thesis, Helsinki.
- [5] Francescutto, A., 2016, Intact ship stability – the way ahead, Marine Technology, vol. 43, no. 1, pp. 1–13.
- [6] Creative Systems Inc., 2022, GHS: General HydroStatics User Manual, Release 22.50, Creative Systems Inc., Port Townsend, WA.
- [7] Lewis, E. V. (ed.), 1988, Principles of Naval Architecture, Volume I: Stability and Strength, 2nd rev. ed., Society of Naval Architects and Marine Engineers, Jersey City, NJ.
- [8] Barras, C. B. and Derrett, D. R., 2012, Ship Stability for Masters and Mates, 7th ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.

- [9] Biran, A. and Pulido, R. L., 2014, *Ship Hydrostatics and Stability*, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [10] Tagg, R., 2010, Development of the new generation damage stability regulations for ships, in *Proceedings of the 11th International Ship Stability Workshop*, Wageningen, pp. 1–10.
- [11] Vassalos, D. and Jasionowski, A., 2015, Emergency response in ship flooding casualties, *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 143, pp. 126–141.
- [12] Lloyd, A. R. J. M., 1998, *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather*, Ellis Horwood, Chichester.
- [13] Bulian, G. and Francescutto, A., 2004, A simplified modular approach for the prediction of the roll motion due to the combined action of wind and waves, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M*, vol. 218, no. 3, pp. 189–212.
- [14] Papanikolaou, A., 2014, *Ship Design: Methodologies of Preliminary Design*, Springer, Dordrecht.
- [15] Degtyarev, A. B. and Boukhanovsky, A. V., 2000, Peculiarities of roll motions for ships with low GM, in *Proceedings of the 7th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB 2000)*, Tasmania, pp. 689–702.
- [16] Bassler, C. C., Belenky, V., Bulian, G., Francescutto, A., Spyrou, K., and Umeda, N., 2009, A review of available methods for application to second level vulnerability criteria, in *Proceedings of the 10th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles*, St. Petersburg, pp. 1–15.
- [17] Spyrou, K. J. and Thompson, J. M. T. (eds.), 2000, The nonlinear dynamics of ship motions: a field overview and some recent developments, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 358, no. 1771, pp. 1735–1760.
- [18] BKI, 2023, *Rules for the Classification and Construction of Sea-going Steel Ships*, Volume II – Stability, Biro Klasifikasi Indonesia, Jakarta.
- [19] Paulling, J. R. and Rosenberg, R. M., 1959, On unstable ship motions resulting from nonlinear coupling, *Journal of Ship Research*, vol. 3, no. 1, pp. 36–46.
- [20] Kobylinski, L. and Kastner, S., 2003, *Stability and Safety of Ships*, Elsevier, Amsterdam.
- [21] Umeda, N., 2013, Current status of second generation intact stability criteria development and some recent efforts, in *Proceedings of the 13th International Ship Stability Workshop*, Brest.
- [22] Peters, W. and Belenky, V., 2014, On the stability criteria: The probability of capsizing and the energy approach, *Ocean Engineering*, vol. 120, pp. 82–91.