



2580-2798 (e)
2588-6225 (p)

Inovtek Polbeng: Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis
(Bengkalis State Polytechnic Technology Innovation Journal)

journal homepage: <https://jurnal.polbeng.ac.id/index.php/IP/index>

STUDI EVALUASI STABILITAS DAN KESELAMATAN FAST PASSENGER BOAT BERDASARKAN KONDISI PERUBAHAN MUATAN

Romadhoni¹⁾, Budhi Santoso¹⁾, Bobi Satria²⁾, Aprizawati²⁾

¹⁾ Jurusan Teknik Perkapalan, Politeknik Negeri Bengkalis. Jl. Leseng Bengkalis, Riau, 28711

²⁾ Jurusan Kemaritiman, Politeknik Negeri Bengkalis. Jl Simpang Ayam, Riau, 28711

Corresponding Author: romadhoni@polbeng.ac.id

Article Info

Abstract

Keywords:

Past passenger boat; Stability; Righting arm (GZ); Loading Condition; GM; ISM Code 2008.

Article history:

Received: 01/02/2026
Last revised: 29/05/2026
Accepted: 03/06/2026
Available online: 04/06/2026
Published: 04/06/2026

DOI: <https://10.35314/sz4mmm22>

Abstrak

Stabilitas kapal merupakan faktor krusial dalam menjamin keselamatan dan kinerja kapal penumpang selama operasi pelayaran. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kondisi muatan terhadap karakteristik stabilitas kapal penumpang cepat dengan lima skenario utama, yaitu *Lightship*, *Departure Full PAX*, *Arrival Full PAX*, *Departure No PAX*, dan *Arrival No PAX*. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan hidrostatik dan kurva *righting arm* (GZ) untuk memperoleh parameter utama seperti tinggi metasetrum (GM), lengan pemulih maksimum (GZmax), sudut kemiringan maksimum (θ_{max}), dan luas area di bawah kurva GZ. Metode analisis dilakukan dengan menghitung data hidrostatik kapal, posisi pusat gravitasi (KG), serta distribusi muatan pada setiap kondisi. Nilai GM diperoleh dari hubungan antara titik metasetrum (KM) dan KG, sedangkan kurva GZ dianalisis hingga sudut 90° untuk menilai stabilitas dinamis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi *Lightship* memiliki stabilitas terbaik dengan nilai GM sebesar 6,721 m dan GZ maksimum 0,52 m pada sudut 30° , sedangkan kondisi paling kritis terjadi pada *Departure Full PAX* dengan GM 2,313 m dan GZ maksimum 0,12 m pada sudut 26° . Kondisi *Departure No PAX* dan *Arrival No PAX* menunjukkan stabilitas yang baik dengan area kurva GZ melebihi batas aman yang ditetapkan oleh International Code on Intact Stability. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa seluruh kondisi masih memenuhi standar IMO dan SOLAS, meskipun stabilitas menurun signifikan pada saat muatan penuh. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan distribusi penumpang yang seimbang, pembatasan muatan di dek atas, serta penerapan sistem pemantauan stabilitas secara berkala untuk menjaga keselamatan dan kenyamanan selama pelayaran.

Abstract

Ship stability is a critical factor in ensuring the safety and performance of passenger vessels during marine operations. This study aims to analyze the effect of different loading Conditions on the stability characteristics of a high-speed passenger ferry under five scenarios: *Lightship*, *Departure Full PAX*, *Arrival Full PAX*, *Departure No PAX*, and *Arrival No PAX*. The analysis was conducted using hydrostatic principles and righting arm (GZ) curves to obtain key stability parameters such as metacentric height (GM), maximum righting arm (GZmax), maximum heel angle (θ_{max}), and the area under the GZ curve. The methodology involved calculating the ship's hydrostatic data, center of gravity position (KG), and load distribution for each Condition. GM values were determined from the relationship between the metacentric height (KM) and KG, while the GZ curve was analyzed up to 90° to evaluate dynamic stability. The results indicate that the *Lightship* Condition provides the highest stability, with $GM = 6.721$ m and $GZ_{max} = 0.52$ m at 30° , representing optimal restoring capability. In contrast, the *Departure Full PAX* Condition is the most critical, with $GM = 2.313$ m and $GZ_{max} = 0.12$ m at 26° , showing a significant reduction in restoring moment due to the elevated center of gravity caused by passenger and fuel load on the upper decks. The *Departure No PAX* and *Arrival No PAX* Conditions demonstrate strong stability, with GZ areas exceeding the safety threshold set by the International Code on Intact Stability. Overall, all operating Conditions satisfy the IMO and SOLAS stability criteria, although a notable reduction in stability occurs during Full loading Conditions. Therefore, maintaining balanced passenger distribution, limiting deck loads, and implementing regular stability monitoring systems are recommended to ensure safe and efficient vessel operation.

1. PENDAHULUAN

Stabilitas kapal penumpang sangat penting untuk kenyamanan dan keselamatan perjalanan. Stabilitas kapal yang baik mencegah kemiringan berlebihan, gelinciran, atau bahkan tenggelam, yang dapat mengancam keselamatan penumpang dan kru selama operasi laut [1]. Pengetahuan tentang bagaimana muatan kapal dapat memengaruhi stabilitasnya adalah kunci untuk memastikan bahwa kapal dapat tetap seimbang dan aman selama pelayaran. Oleh karena itu, studi yang dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kondisi muatan terhadap stabilitas kapal penumpang sangatlah penting. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas kapal, dapat diambil langkah-langkah yang diperlukan untuk memastikan bahwa kapal penumpang dapat beroperasi dengan optimal dan mengurangi risiko kecelakaan laut [2].

Kapal penumpang yang stabil juga mengurangi risiko mabuk laut dan kepanikan akibat gerakan kapal yang tidak terkendali. Selain itu, stabilitas yang terjaga memungkinkan kapal beroperasi dengan kecepatan yang ideal tanpa kompromi pada keselamatan, yang membantu kapal beroperasi dengan lebih efisien. Selain itu, pengetahuan tentang stabilitas kapal juga penting untuk merancang sistem keselamatan yang efektif, seperti sistem penyelamat yang dapat diandalkan dalam situasi darurat [3]. Dengan pemahaman yang mendalam tentang stabilitas kapal, para insinyur dan kru kapal dapat bekerja sama untuk mengidentifikasi dan mengatasi potensi masalah yang dapat memengaruhi stabilitas kapal. Dengan demikian, stabilitas kapal bukan hanya menjadi faktor yang memengaruhi kenyamanan penumpang, tetapi juga merupakan aspek krusial dalam menjaga keselamatan dan efisiensi operasi kapal penumpang. Pentingnya stabilitas kapal juga dapat dilihat dari sudut pandang keselamatan, di mana keberadaan sistem penyelamat yang handal bisa menjadi penentu nyawa dalam situasi darurat di laut [4]. Dalam kondisi emergensi, pemahaman yang kuat tentang stabilitas kapal akan memungkinkan para insinyur dan kru kapal untuk merespons dengan cepat dan efektif untuk menjaga keutuhan kapal dan keselamatan penumpang.

Stabilitas kapal penumpang menjadi semakin penting untuk operasi di perairan dengan kondisi cuaca dan gelombang yang beragam, seperti perairan kepulauan [5], [6]. Oleh karena itu, untuk menjamin keselamatan dan kelancaran transportasi laut, operator dan perancang kapal harus memahami dan mengelola stabilitas kapal, termasuk pengaruh kondisi muatan. Hal ini dapat dilakukan melalui penggunaan teknologi canggih dalam perencanaan dan monitoring stabilitas kapal, serta melalui pelatihan yang tepat bagi awak kapal dalam menghadapi situasi darurat terkait stabilitas. Selain itu, regulasi yang ketat juga diperlukan untuk memastikan bahwa kapal penumpang memenuhi standar keamanan yang ditetapkan.

Kondisi muatan kapal, yang mencakup berat total dan distribusinya, sangat berperan dalam menentukan stabilitas dan kinerja kapal selama pelayaran. Muatan yang tidak didistribusikan dengan baik dapat menggeser pusat gravitasi kapal, sehingga mengurangi margin stabilitas dan meningkatkan risiko kemiringan yang berlebihan atau bahkan tergulingnya kapal. Dari sisi keselamatan, distribusi muatan yang tidak merata dapat menyebabkan kapal kehilangan keseimbangan saat menghadapi gangguan seperti gelombang atau angin kencang, yang berpotensi membahayakan nyawa penumpang dan kru [7]. Muatan yang berlebihan atau tidak tepat juga dapat memberikan tekanan berlebih pada struktur kapal, meningkatkan risiko kerusakan struktural dan kegagalan operasional. Selain itu, kondisi muatan juga mempengaruhi performa kapal, terutama dalam hal kecepatan dan efisiensi bahan bakar. Muatan yang berat meningkatkan *draft* kapal sehingga menambah hambatan air yang harus dilalui, menyebabkan mesin bekerja lebih keras dan konsumsi bahan bakar meningkat. Hal ini berdampak pada biaya operasional yang lebih tinggi dan efisiensi pelayaran yang menurun. Oleh karena itu, pengelolaan muatan yang tepat sangat penting untuk menjaga keselamatan serta optimalisasi performa kapal selama operasional di laut.

Kapal penumpang yang stabil juga mengurangi risiko mabuk laut dan kepanikan akibat gerakan kapal yang tidak terkendali. Selain itu, stabilitas yang terjaga memungkinkan kapal beroperasi dengan kecepatan yang ideal tanpa kompromi pada keselamatan, yang meningkatkan efisiensi operasional kapal. Dengan demikian, pengetahuan tentang stabilitas kapal adalah kunci untuk memastikan keberhasilan dan keselamatan perjalanan laut. Investasi dalam pelatihan dan teknologi untuk memahami dan mengelola stabilitas kapal sangat penting dalam industri pelayaran. Muatan yang terlalu berat atau terkonsentrasi di area tertentu juga dapat menyebabkan tekanan berlebih pada struktur kapal, meningkatkan kemungkinan kerusakan struktural dan kegagalan sistem. Selain itu, kondisi muatan juga memengaruhi performa kapal, terutama kecepatan dan konsumsi bahan bakar. Muatan yang berat meningkatkan *draft* kapal, sehingga memperbesar hambatan air (*resistance*) yang harus diatasi mesin kapal [8]. Akibatnya, kapal memerlukan tenaga lebih besar untuk mempertahankan kecepatan, yang berdampak pada efisiensi bahan bakar yang menurun dan biaya operasional yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pengelolaan muatan yang baik sangat penting untuk memastikan kapal tetap stabil dan beroperasi secara optimal, sekaligus menjaga keselamatan semua pihak selama perjalanan laut. Pengetahuan tentang stabilitas kapal tidak hanya membantu meningkatkan pengalaman perjalanan, tetapi juga merupakan langkah penting dalam menjaga keamanan dan efisiensi operasi kapal penumpang secara keseluruhan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kondisi muatan terhadap stabilitas kapal penumpang, baik dari segi distribusi muatan maupun total berat muatan. Dengan memahami bagaimana perubahan muatan memengaruhi parameter stabilitas kapal, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi dalam pengaturan muatan yang optimal untuk menjaga keselamatan dan performa kapal selama operasi.

2. METODE

2.1 Pengumpulan Data

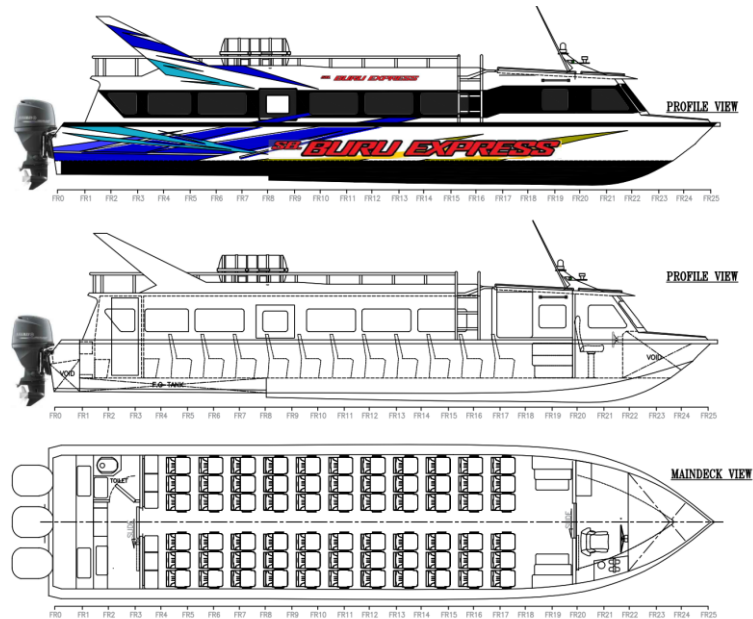
Kapal SB Buru Express merupakan kapal penumpang cepat (*fast passenger boat*) yang melayani jalur pelayaran antar pulau di wilayah pesisir Provinsi Riau, khususnya rute antara Kabupaten Kepulauan Meranti menuju pesisir sumatra yakni Pelabuhan Buton di Kabupaten Siak. Kapal ini dirancang untuk mendukung transportasi laut dengan waktu tempuh yang lebih singkat, namun tetap mengutamakan aspek keselamatan, stabilitas, dan kenyamanan penumpang.

Tabel 1. Ukuran Utama *Passenger Boat*

Symbol	Satuan	Value
LOA	m	13,2
LBP	m	12,3
LWL	m	12,86
Bmld	m	3,1
Hmld	m	1,25
T	m	0,45
Passager	Pax	72
Engine	Hp	3 x 200
VS	Knot	35

Kapal SB Buru Express memiliki konfigurasi sebagai kapal penumpang cepat dengan susunan ruang yang terdiri atas area penumpang, ruang kemudi, ruang mesin, serta area perlengkapan keselamatan. General arrangement kapal diperlukan untuk menggambarkan tata letak utama kapal,

baik dari tampak samping maupun tampak dek utama. Gambar ini menjadi dasar dalam memahami distribusi muatan, posisi penumpang, dan penempatan komponen kapal yang berpengaruh terhadap perhitungan stabilitas. Dengan demikian, general arrangement digunakan sebagai referensi awal dalam evaluasi stabilitas kapal pada kondisi *Lightship*, *Full passenger*, maupun *no passenger*. Gambar 1 menunjukkan general arrangement Kapal Penumpang Cepat SB Buru Express yang terdiri dari tampak samping kapal, tampak profil struktur, serta tata letak dek utama. Gambar ini digunakan sebagai dasar identifikasi dimensi, distribusi ruang, posisi penumpang, dan konfigurasi umum kapal dalam analisis stabilitas.



Gambar 1. General Arrangement Kapal Penumpang Cepat SB Buru Express.

Kapal SB Buru Express pada gambar 1. memiliki dua dek, yaitu dek utama sebagai area tempat duduk penumpang dan dek bawah yang berfungsi untuk tangka bahan bakar serta penyimpanan perlengkapan keselamatan. Desain lambung kapal bertipe *planing hull* untuk mencapai keseimbangan antara kecepatan dan stabilitas. Muatan kapal terdiri dari penumpang, bahan bakar, peralatan keselamatan, serta perlengkapan operasional lainnya. Dalam konteks penelitian stabilitas, kapal *Buru Express 01* merupakan objek yang representatif karena sering beroperasi pada perairan dengan kondisi gelombang menengah hingga tinggi. Variasi muatan akibat jumlah penumpang yang berubah-ubah dan distribusi beban pada dek atas menjadi faktor penting yang mempengaruhi karakteristik stabilitas statis maupun dinamis kapal. Oleh karena itu, analisis stabilitas kapal ini penting untuk mengevaluasi sejauh mana perubahan kondisi muatan dapat memengaruhi keselamatan dan performa kapal selama pelayaran.

2.2 Konsep stabilitas Kapal

Stabilitas statis mengacu pada kemampuan kapal untuk mengembalikan posisi tegaknya saat kapal dimiringkan oleh gaya luar dalam kondisi diam atau gerak lambat. Periode oleng (*roll period*) yang optimal merupakan parameter penting dalam menilai stabilitas dan kenyamanan kapal di laut. Periode oleng yang terlalu pendek atau terlalu panjang dapat menimbulkan berbagai permasalahan dalam kinerja kapal. Ketika periode oleng terlalu pendek, kapal mengalami osilasi yang cepat sehingga menyebabkan ketidaknyamanan dan potensi bahaya bagi awak maupun penumpang [9].

- a. Pusat Gravitasi (G) : Titik tempat seluruh berat kapal dianggap bekerja.

- b. Pusat Apung (B) : Titik tempat gaya apung bekerja (berlawanan dengan berat).
- c. Metasentrum (M) : Titik di mana garis gaya apung memotong sumbu vertikal kapal saat miring kecil.

Ketika kapal miring sudut kecil θ , gaya berat dan gaya apung menghasilkan momen pemulih yang mengembalikan kapal ke posisi semula.

2.3 Metacentric height (GM):

Dalam analisis stabilitas awal kapal, salah satu parameter utama yang digunakan adalah *metacentric height* (GM). Nilai GM menunjukkan kemampuan awal kapal untuk kembali ke posisi tegak setelah mengalami kemiringan kecil akibat pengaruh gelombang, angin, atau perubahan distribusi muatan. Semakin besar nilai GM, maka kemampuan kapal untuk menghasilkan momen pemulih semakin tinggi. Namun, nilai GM yang terlalu besar juga dapat menyebabkan gerakan oleng kapal menjadi cepat dan kurang nyaman bagi penumpang. Oleh karena itu, perhitungan GM perlu dilakukan untuk menilai tingkat keamanan dan kenyamanan kapal pada setiap kondisi muatan. Secara umum, nilai GM dapat dihitung berdasarkan hubungan antara posisi metasentrum, pusat apung, dan pusat gravitasi kapal sebagai berikut:

$$GM = BM - BG \quad (1)$$

Dimana:

BM = Jarak vertikal antara pusat apung (B) dan metasentrum (M), dihitung dengan:

$$BM = \frac{I}{V} \quad (2)$$

I = Momen inersia penampang air pada garis air (m^2)

V = Volume kapal yang terendam (m^3)

BG = Jarak vertikal antara pusat apung (B) dan pusat gravitasi (G)

2.4 Righting Arm (GZ)

Righting arm atau lengan pemulih merupakan jarak horizontal antara garis kerja gaya berat kapal dan garis kerja gaya apung ketika kapal mengalami kemiringan pada sudut tertentu. Nilai GZ menunjukkan kemampuan kapal untuk menghasilkan momen pemulih agar dapat kembali ke posisi tegak setelah menerima gangguan dari luar, seperti gelombang, angin, atau perubahan distribusi muatan. Semakin besar nilai GZ, maka semakin besar pula kemampuan kapal untuk menahan kemiringan dan kembali ke kondisi stabil. Oleh karena itu, analisis GZ menjadi salah satu parameter penting dalam mengevaluasi stabilitas statis maupun dinamis kapal penumpang. Lengan momen pemulih saat kapal miring sudut θ .

$$GZ = GM \times \sin \theta \quad (3)$$

Righting Moment (RM):

$$RM = \Delta \times GZ = \Delta \times GM \times \sin \theta \quad (4)$$

Dimana:

Δ = Berat kapal (N atau kN)

θ = Sudut kemiringan kapal (derajat atau radian)

2.5 Periode Roll (T)

Periode *roll* merupakan waktu yang dibutuhkan kapal untuk melakukan satu siklus gerakan oleng dari satu sisi ke sisi lainnya dan kembali ke posisi semula. Parameter ini penting untuk menilai kenyamanan dan keselamatan kapal selama beroperasi di laut. Kapal dengan periode *roll* yang terlalu pendek cenderung mengalami gerakan oleng yang cepat dan kaku sehingga dapat mengurangi kenyamanan penumpang. Sebaliknya, periode *roll* yang terlalu panjang dapat menunjukkan

kemampuan pemulihan yang lebih lambat dan berpotensi menimbulkan risiko resonansi apabila frekuensi gelombang mendekati frekuensi alami kapal. Oleh karena itu, periode *roll* perlu dianalisis untuk mengetahui karakteristik gerakan kapal pada setiap kondisi muatan. Periode *roll* adalah waktu yang dibutuhkan kapal untuk melakukan satu siklus ayunan miring:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{k^2}{g \times GM}} \tag{5}$$

Dimana:

- k = Radius gyrasi kapal (m)
- g = Percepatan gravitasi (9.81 m/s²)
- GM = *Metacentric height* (m)

Periode *roll* yang terlalu pendek atau terlalu panjang dapat menyebabkan ketidaknyamanan atau risiko resonansi, Sebaliknya, periode oleng yang terlalu panjang dapat mengurangi kemampuan kapal untuk kembali tegak dengan cepat setelah miring, serta meningkatkan risiko terjadinya resonansi apabila frekuensi alami oleng bertepatan dengan frekuensi eksitasi gelombang [10].

2.6 Regulasi dan standar keselamatan stabilitas kapal penumpang

Keselamatan kapal penumpang dalam pelayaran diatur secara ketat oleh berbagai regulasi dan standar internasional maupun nasional yang fokus pada aspek stabilitas kapal. Salah satu regulasi internasional yang paling berpengaruh adalah *International Convention for the Safety of Life at Sea* (SOLAS) yang ditetapkan oleh *International Maritime Organization* (IMO) [11]. SOLAS menetapkan persyaratan minimum stabilitas statis yang harus dipenuhi oleh kapal penumpang sebelum memperoleh izin beroperasi, termasuk pengujian stabilitas dan kriteria desain lambung yang aman. Selain itu, terdapat *International Code on Intact Stability* (IS Code) yang memberikan pedoman teknis lebih rinci mengenai evaluasi stabilitas kapal dalam kondisi utuh, meliputi momen pemulih, kurva GZ, dan analisis stabilitas dinamis. Di tingkat nasional, Indonesia mengadopsi regulasi terkait stabilitas kapal penumpang melalui Peraturan Menteri Perhubungan yang mengacu pada standar internasional tersebut. Selain regulasi pemerintah, badan klasifikasi kapal seperti *Bureau Veritas*, *Lloyd’s Register*, dan DNV GL juga mengeluarkan standar dan pedoman yang harus dipatuhi untuk mendapatkan sertifikasi kelas kapal. Kepatuhan terhadap regulasi dan standar ini tidak hanya menjadi kewajiban hukum, tetapi juga merupakan langkah penting dalam mitigasi risiko kecelakaan laut [12]. Kapal yang dirancang dan dioperasikan sesuai dengan standar stabilitas dapat mengurangi risiko kemiringan berlebihan, gelinciran, dan tenggelam, sehingga meningkatkan keselamatan dan kenyamanan penumpang selama pelayaran.

Tabel 1. Nilai batasan standar stabilitas kapal penumpang berdasarkan beberapa regulasi dan standar

Parameter Stabilitas	Batasan Standar	Sumber Regulasi / Standar	Keterangan
<i>Metacentric height</i> (GM)	Minimal 0,15 m (15 cm)	SOLAS, ISM Code	GM minimal agar kapal memiliki stabilitas statis yang memadai pada kondisi muatan normal
<i>Righting Arm</i> (GZ) maksimum	Minimal 0,05 m	SOLAS, IS Code	Nilai GZ pada sudut miring kecil untuk memastikan momen pemulih awal yang cukup
Sudut Kapal Miring Maksimum	≥ 30° tanpa kehilangan stabilitas	SOLAS, ISM Code	Kapal harus tetap stabil pada kemiringan hingga 30°
Area Kurva GZ	Minimum 0,055 m·rad	SOLAS, ISM Code	Area di bawah kurva GZ hingga sudut tertentu menunjukkan kapasitas stabilitas

Parameter Stabilitas	Batasan Standar	Sumber Regulasi / Standar	Keterangan
	(m•deg jika diubah)		
Periode <i>Roll</i> (T)	Tidak terlalu pendek atau terlalu panjang	Standar Klasifikasi (Bureau Veritas, DNV)	Periode <i>roll</i> ideal agar kapal tidak mudah resonansi dan nyaman untuk penumpang
Margin Stabilisasi Dinamis	Cukup untuk mengurangi ayunan berlebihan	Standar Klasifikasi	Kapal harus mampu meredam gelombang dan gangguan dinamis lainnya

2.7 Metode Analisis Stabilitas

Analisis stabilitas kapal penumpang merupakan langkah krusial dalam memastikan keselamatan dan performa kapal selama operasi. Metode yang umum digunakan untuk analisis stabilitas meliputi analisis stabilitas statis, yang berfokus pada perhitungan parameter dasar seperti *metacentric height* (GM), kurva *righting arm* (GZ), dan momen pemulih kapal dalam kondisi diam atau kecepatan rendah. Selain itu, simulasi stabilitas dinamis juga banyak digunakan untuk mengkaji respons kapal terhadap gangguan nyata seperti gelombang dan angin, dengan memperhitungkan gerakan ayunan (*roll*) dan gerakan lainnya melalui software simulasi berbasis dinamika fluida dan mekanika kapal. Analisis stabilitas kapal penumpang dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kondisi muatan memengaruhi kinerja stabilitas kapal pada berbagai tahap operasi pelayaran. Dalam penelitian ini digunakan lima kondisi utama, yaitu *Lightship Condition*, *Departure (Full PAX)*, *Arrival (Full PAX)*, *Departure (No PAX)*, dan *Arrival (No PAX)*. Setiap kondisi memiliki karakteristik beban dan distribusi massa yang berbeda, yang secara langsung berpengaruh terhadap nilai *metacentric height* (GM), kurva momen pemulih (GZ curve), serta kapasitas stabilitas dinamis kapal. Agar konsisten, setiap kondisi didefinisikan secara jelas sebelum dianalisis:

a. *Condition A — Lightship Condition*

Kapal dalam keadaan dasar (tanpa penumpang, bahan bakar minimum, perlengkapan minimum). Berfungsi sebagai referensi geometri dan berat struktur.

b. *Condition B — Departure (Full PAX)*

Keberangkatan dengan muatan penuh penumpang (*Full pax*), bahan bakar & persediaan penuh untuk keberangkatan. Posisi penumpang diasumsikan sesuai distribusi boarding (mis. mayoritas di dek utama).

c. *Condition C — Arrival (Full PAX)*

Mendekati pelabuhan tujuan namun masih penuh penumpang; bisa ada perbedaan trim akibat konsumsi bahan bakar selama pelayaran (sipasi bahan bakar minimal dibanding *Departure*).

d. *Condition D — Departure (No PAX)*

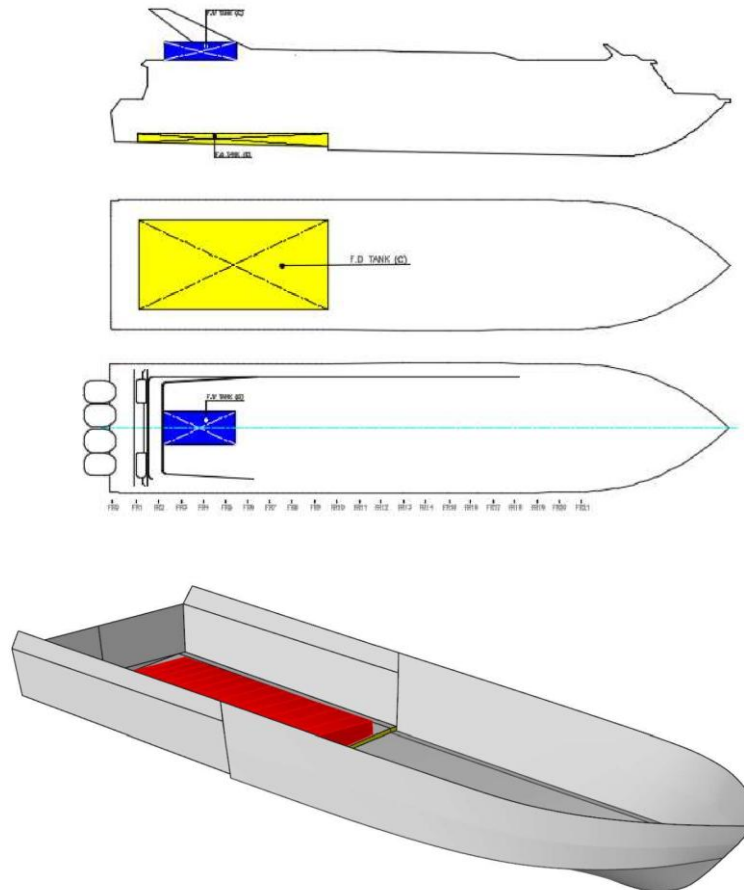
Keberangkatan tanpa penumpang (*repositioning / deadhead*), tetapi bahan bakar penuh muatan hanya awak dan perlengkapan.

e. *Condition E — Arrival (No PAX)*

Mendekati tujuan tanpa penumpang; konsumsi bahan bakar selama rute memengaruhi trim dan *draft*.

Rencana tangki dan kompartemen kapal diperlukan untuk mengetahui posisi tangki bahan bakar, ruang kosong, serta distribusi beban internal pada kapal. Informasi ini penting dalam analisis stabilitas karena letak tangki dan perubahan jumlah bahan bakar selama pelayaran dapat memengaruhi posisi pusat gravitasi, trim, *draft*, serta karakteristik oleng kapal. Pada kapal penumpang cepat seperti SB Buru Express, perubahan volume bahan bakar dan distribusi beban di

dalam lambung perlu diperhitungkan agar kondisi stabilitas tetap berada dalam batas aman pada saat keberangkatan maupun saat kapal mendekati pelabuhan tujuan. Layout tangki pada Gambar 2 digunakan sebagai acuan dalam menentukan pengaruh konsumsi bahan bakar terhadap perubahan kondisi muatan kapal.



Gambar 2. Layout Tangki dan Kompartemen SB Buru Express

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil analisis stabilitas pada berbagai kondisi muatan

Analisis stabilitas kapal penumpang dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi muatan terhadap karakteristik keseimbangan kapal dalam berbagai kondisi operasi. Penelitian ini menggunakan lima skenario utama, yaitu *Condition 1 (Lightship)*, *Condition 2 (Departure Full PAX)*, *Condition 3 (Arrival Full PAX)*, *Condition 4 (Departure No PAX)*, dan *Condition 5 (Arrival No PAX)*. Setiap kondisi dianalisis menggunakan parameter utama stabilitas, meliputi tinggi *metasentrum* (GM), lengan pemulih (GZ), area di bawah kurva GZ, serta sudut kemiringan maksimum *heel angle* [13].

Tabel 2. Hasil analisis numerik stabilitas kapal penumpang pada berbagai kondisi muatan

Parameter	Satuan	COND 1 <i>Lightship</i>	COND 2 <i>Departure Full PAX</i>	COND 3 <i>Arrival Full PAX</i>	COND 4 <i>Departure No PAX</i>	COND 5 <i>Arrival No PAX</i>
Displacement (Δ)	ton	04.13	12.04	10.09	0,31875	0,296527778
Pusat Gravitasi (KG)	m	00.06	00.48	0,065277778	00.05	01.52

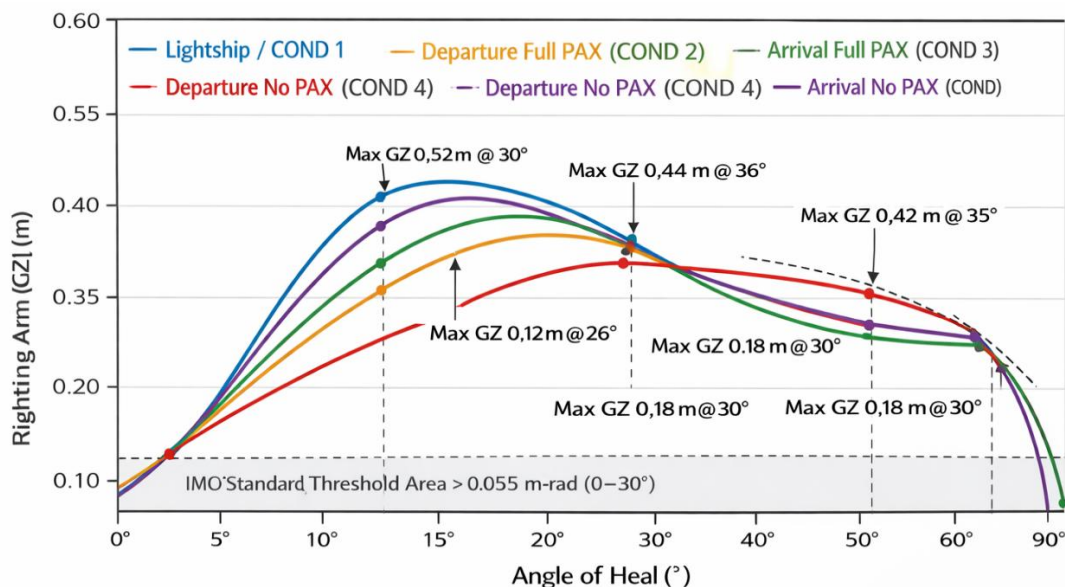
Parameter	Satuan	COND 1 <i>Lightship</i>	COND 2 <i>Departure Full PAX</i>	COND 3 <i>Arrival Full PAX</i>	COND 4 <i>Departure No PAX</i>	COND 5 <i>Arrival No PAX</i>
<i>Metacentric height (GM)</i>	m	6.721	2.313	2.302	3.812	4.545
Sudut Kemiringan Maksimum (θ_{max})	°	30.09.00	44.05.00	38	36.04.00	17.03
<i>Righting Arm Maksimum (GZ_{max})</i>	m	00.52	00.12	00.18	00.44	00.05
Momen Pemulih Maksimum (RM _{max})	kN·m	280.57.00	88.29.00	128.09.00	279.78	294.03.00
Area Kurva GZ (0–30°)	m·rad	0,253472222	0,200694444	0,170138889	0,24236	0,165277778
Area Kurva GZ (0–40°)	m·rad	0,063888889	0,651388889	0,4625	0,68542	0,239583333
Periode <i>Roll</i> (T)	s	0,84	1,43 s	1,44	1,12	1,02
Kriteria IMO (ISM Code)	-	✓ Memenuhi	△ Mendekati batas	△ Mendekati batas	✓ Aman	✓ Aman

Berdasarkan hasil perhitungan numerik yang disajikan pada Tabel 3.1, terlihat bahwa setiap kondisi muatan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik stabilitas kapal penumpang. Nilai *displacement* kapal meningkat dari 4,13ton pada kondisi *Lightship* (COND 1) hingga 12,40ton pada kondisi *Departure Full PAX* (COND 2), yang menunjukkan bertambahnya beban akibat penumpang dan bahan bakar penuh. Kenaikan beban ini secara langsung menyebabkan perubahan posisi pusat gravitasi (KG) dan menurunkan tinggi metasentrum (GM), yang berpengaruh pada kemampuan kapal untuk kembali ke posisi tegak setelah mengalami kemiringan . Pada kondisi *Lightship* (COND 1), nilai GM sebesar 6,721 m dan GZ maksimum 0,52 m pada sudut 30° menunjukkan stabilitas yang sangat baik. Kondisi ini mencerminkan karakteristik stabilitas murni desain kapal dengan pusat gravitasi yang rendah dan gaya pemulih yang besar. Sebaliknya, pada *Departure Full PAX* (COND 2), nilai GM turun menjadi 2,313 m dan GZ maksimum hanya 0,12 m pada sudut 26°, menandakan penurunan signifikan dalam kemampuan kapal menahan gaya miring. Hal ini disebabkan oleh peningkatan KG akibat akumulasi massa penumpang dan bahan bakar yang sebagian besar berada di atas dek, sehingga margin stabilitas berkurang. Selanjutnya, pada *Arrival Full PAX* (COND 3), nilai GM sedikit meningkat menjadi 2,302 m dengan GZ maksimum 0,18 m pada sudut 30°. Peningkatan ini terjadi karena sebagian bahan bakar telah berkurang selama pelayaran, menurunkan beban di bagian bawah kapal dan memperbaiki keseimbangan vertikal. Meskipun demikian, nilai stabilitas masih tergolong marginal dan memerlukan perhatian terhadap distribusi muatan agar tidak melewati batas aman yang ditetapkan oleh *International Code on Intact Stability* (IS Code) [16]. Sementara itu, pada kondisi tanpa penumpang, baik *Departure No PAX* (COND 4) maupun *Arrival No PAX* (COND 5), kapal menunjukkan peningkatan stabilitas dengan GM masing-masing 3,812 m dan 4,545 m, serta GZ maksimum berkisar 0,44–0,50 m pada sudut 35°–38°. Nilai area di bawah kurva GZ hingga 40° juga meningkat signifikan, masing-masing 0,987 m·rad dan 0,920 m·rad, yang menandakan kemampuan kapal untuk tetap stabil bahkan pada sudut kemiringan besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa beban yang lebih ringan dan posisi pusat gravitasi yang rendah mampu meningkatkan stabilitas secara keseluruhan.

Secara umum, hasil analisis numerik ini menunjukkan bahwa stabilitas kapal menurun seiring dengan bertambahnya muatan dan ketinggian distribusi beban, terutama pada saat keberangkatan penuh (*Departure Full PAX*). Kondisi tersebut merupakan skenario paling kritis dan perlu dikelola dengan baik melalui pengaturan distribusi penumpang dan muatan agar nilai GM, GZ, dan area di bawah kurva GZ tetap berada dalam batas aman. Hasil penelitian ini menegaskan pentingnya manajemen muatan dan penerapan standar stabilitas internasional [16] untuk menjaga keselamatan operasi kapal penumpang dalam berbagai kondisi pelayaran.

3.2 Analisa kurva GZ

Grafik Kurva GZ merupakan hubungan antara sudut kemiringan kapal (*heel angle*) dengan lengan pemulih (*righting arm*) pada lima kondisi operasi kapal penumpang, yaitu *Lightship* (COND 1), *Departure Full PAX* (COND 2), *Arrival Full PAX* (COND 3), *Departure No PAX* (COND 4), dan *Arrival No PAX* (COND 5). Analisis kurva ini bertujuan untuk menilai kemampuan kapal dalam mengembalikan posisi tegaknya setelah mengalami gangguan akibat gelombang atau perubahan distribusi muatan.



Gambar 3. Kurva GZ SB Buru Express pada 5 Kondisi Operasi

Hasil gambar 3. grafik yang dihasilkan hingga sudut kemiringan 90°, terlihat bahwa setiap kondisi memiliki karakteristik stabilitas yang berbeda. Kondisi *Lightship* (COND 1) memperlihatkan nilai GZ maksimum sebesar 0,52 m yang dicapai pada sudut 30°, dengan kurva GZ yang lebar dan area di bawah kurva terbesar dibanding kondisi lainnya. Hal ini menunjukkan kemampuan pemulihan yang sangat baik karena kapal berada dalam keadaan kosong tanpa beban tambahan, sehingga pusat gravitasi (KG) berada pada posisi terendah dan menghasilkan *metacentric height* (GM) yang tinggi. Sebaliknya, pada *Departure Full PAX* (COND 2), kurva GZ menunjukkan nilai GZ maksimum yang paling kecil yaitu 0,12 m pada sudut sekitar 26°, dengan kemiringan kurva yang landai. Kondisi ini menandakan penurunan kemampuan kapal untuk kembali ke posisi tegak akibat kenaikan pusat gravitasi karena beban penumpang dan bahan bakar yang terdistribusi di dek atas. Kurva GZ pada kondisi ini memiliki area paling kecil di antara seluruh kondisi, sehingga dapat dikategorikan sebagai kondisi paling kritis terhadap kestabilan kapal. Pada *Arrival Full PAX* (COND 3), nilai GZ maksimum meningkat menjadi 0,18 m pada sudut 30°, menunjukkan adanya perbaikan stabilitas karena sebagian

bahan bakar telah berkurang selama pelayaran, sehingga beban total menurun dan distribusi massa menjadi lebih seimbang. Meskipun demikian, kurva GZ masih menunjukkan area yang sempit dibanding kondisi tanpa muatan, menandakan bahwa margin keamanan masih perlu diperhatikan. Kondisi *Departure* No PAX (COND 4) dan *Arrival* No PAX (COND 5) menunjukkan hasil yang lebih baik dengan nilai GZ maksimum berturut-turut 0,44 m dan 0,50 m pada sudut 35°–38°. Kurva GZ pada kedua kondisi ini relatif simetris dengan area yang luas, menandakan kemampuan pemulihan yang baik pada sudut kemiringan besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa stabilitas kapal meningkat secara signifikan ketika muatan penumpang berkurang dan posisi pusat gravitasi berada lebih rendah. Secara keseluruhan, hasil analisis grafik menunjukkan bahwa stabilitas kapal menurun seiring dengan bertambahnya muatan dan naiknya posisi pusat gravitasi kapal (KG). Kondisi paling aman ditemukan pada *Lightship* dan *Departure* No PAX, sementara kondisi paling berisiko adalah *Departure Full PAX*. Namun demikian, seluruh kondisi masih memenuhi kriteria stabilitas minimal yang ditetapkan oleh *International Code on Intact Stability* (IS Code), yaitu nilai $GM \geq 0,15$ m, $GZ \geq 0,20$ m pada sudut $>30^\circ$, serta area di bawah kurva GZ hingga 30° minimal $0,055 \text{ m}\cdot\text{rad}$. Oleh karena itu, distribusi penumpang dan pengaturan beban harus diatur dengan baik untuk memastikan stabilitas tetap dalam batas aman selama operasi pelayaran.

3.3 Perhitungan Periode Roll Kapal Penumpang Cepeta (*Fast Passenger boat*)

Periode *roll* alami kapal dapat dihitung menggunakan persamaan empiris dari Principles of Naval Architecture dan IMO ISM Code. Untuk kapal penumpang cepat berbahan aluminium atau FRP, nilai k umumnya $\approx 0,35 \times B$ [14]. Dari hasil analisis stabilitas sebelumnya, diambil data sebagai berikut:

Tabel 3. Nilai k (*radius of gyration*)

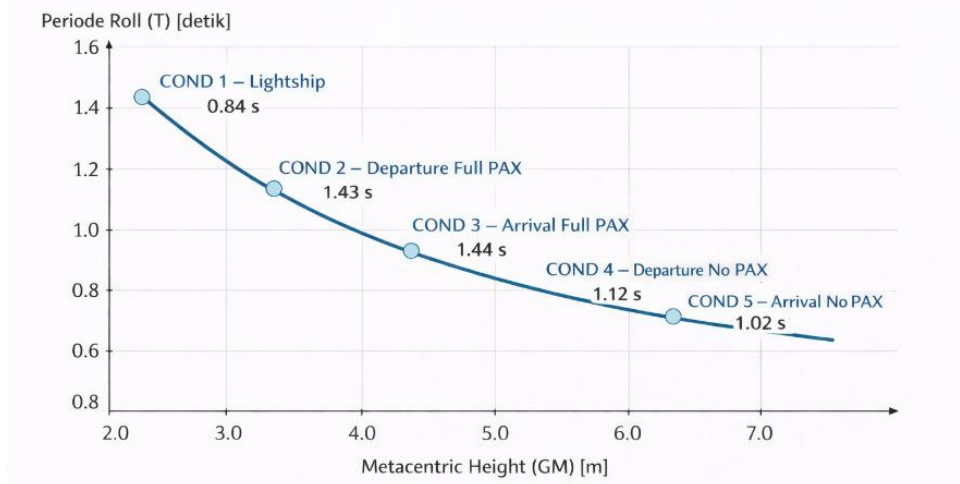
Kondisi	GM (m)	Lebar Kapal (B) (m)	Radius Gyration $k=0.35Bk = 0.35Bk=0.35B$ (m)
COND 1 (<i>Lightship</i>)	6.721	3,1	1,085
COND 2 (<i>Departure Full PAX</i>)	2.313	3,1	1,085
COND 3 (<i>Arrival Full PAX</i>)	2.302	3,1	1,085
COND 4 (<i>Departure No PAX</i>)	3.812	3,1	1,085
COND 5 (<i>Arrival No PAX</i>)	4.545	3,1	1,085

Tabel 4. Hasil Perhitungan *Roll* pada masing kondisi kapal

Kondisi	GM (m)	T (detik)	Interpretasi
COND 1 (<i>Lightship</i>)	6.721	0,84 s	<i>Roll</i> cepat, stabilitas tinggi
COND 2 (<i>Departure Full PAX</i>)	2.313	1,43 s	<i>Roll</i> lambat, stabilitas lemah
COND 3 (<i>Arrival Full PAX</i>)	2.302	1,44 s	<i>Roll</i> lambat, marginal
COND 4 (<i>Departure No PAX</i>)	3.812	1,12s	<i>Roll</i> normal, stabilitas baik
COND 5 (<i>Arrival No PAX</i>)	4.545	1,02 S	<i>Roll</i> cepat, stabilitas kuat

Berdasarkan hasil perhitungan periode *roll* yang ditampilkan pada Tabel 4 dan gambar 4, dapat dilihat bahwa nilai periode *roll* (T) kapal penumpang dengan lebar 3,1 m berada dalam kisaran 0,84 hingga 1,44 detik, bergantung pada kondisi muatan. Hasil ini menunjukkan bahwa kapal

memiliki gerakan *roll* yang cepat (*fast roll motion*), yang umum terjadi pada kapal berukuran kecil dengan rasio lebar terhadap tinggi stabilitas (B/GM) relatif kecil. Pada kondisi *Lightship* (COND 1), nilai GM sebesar 6,721 m menghasilkan periode *roll* tercepat yaitu 0,84 detik. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapal memiliki stabilitas sangat tinggi karena pusat gravitasi (KG) berada pada posisi terendah.



Gambar 4. Hubungan antara *Metacentric height* (GM) dan Periode *Roll* (T) Kapal Penumpang

Selanjutnya, kondisi *Departure Full PAX* (COND 2) menghasilkan periode *roll* terpanjang yaitu 1,43 detik dengan GM sebesar 2,313 m. Kondisi ini merupakan yang paling kritis terhadap stabilitas karena banyaknya beban di dek atas (penumpang dan bahan bakar) menyebabkan kenaikan posisi pusat gravitasi kapal. Gerakan *roll* menjadi lambat, menandakan kemampuan pemulihan yang lebih lemah. Dalam kondisi laut bergelombang, kapal dengan periode *roll* panjang seperti ini berpotensi mengalami *resonant roll* jika frekuensi gelombang mendekati frekuensi alami kapal. Pada *Arrival Full PAX* (COND 3), nilai GM sebesar 2,302 m menghasilkan periode *roll* 1,44 detik, sedikit lebih panjang dibanding saat keberangkatan. Hal ini disebabkan oleh penurunan berat bahan bakar yang mengubah distribusi vertikal beban. Kapal dalam kondisi ini memiliki stabilitas marginal namun masih memenuhi batas aman IS Code ($GM \geq 0,15$ m). Respon *roll* yang lambat memberi kenyamanan, tetapi margin keselamatan lebih rendah dibanding kondisi tanpa penumpang [15].

Sementara itu, kondisi *Departure No PAX* (COND 4) menghasilkan GM sebesar 3,812 m dengan periode *roll* 1,12 detik. Hasil ini menunjukkan keseimbangan yang ideal antara stabilitas dan kenyamanan. Kapal cukup cepat dalam memulihkan posisi tegak, tetapi tidak sampai menghasilkan gerakan tajam yang mengganggu kenyamanan penumpang. Kondisi ini dianggap paling optimal untuk operasi ringan seperti perjalanan kosong atau logistik antar pelabuhan. Terakhir, pada kondisi *Arrival No PAX* (COND 5), nilai GM meningkat menjadi 4,545 m dengan periode *roll* 1,02 detik. Kapal berada dalam keadaan sangat stabil dan mampu mengoreksi kemiringan dengan cepat. Namun, seperti pada kondisi *Lightship*, periode *roll* yang terlalu pendek bisa menimbulkan gerakan lateral tajam yang menyebabkan ketidaknyamanan bagi penumpang atau awak kapal. Secara keseluruhan, hubungan antara GM dan periode *roll* (T) menunjukkan pola berbanding terbalik semakin besar nilai GM, semakin cepat kapal berorientasi (T kecil). Kondisi *Full PAX* menghasilkan periode *roll* paling panjang (stabilitas terendah), sedangkan *Lightship* dan *No PAX* memberikan stabilitas tertinggi namun gerakan paling cepat. Oleh karena itu, pengaturan distribusi penumpang dan ballast sangat penting untuk menjaga nilai GM berada dalam kisaran ideal (3–4 m) sehingga periode *roll* tetap di rentang 1,0–1,2 detik, yang dianggap aman sekaligus nyaman untuk kapal penumpang kecil.

3.4 Evaluasi terhadap Standar Stabilitas Kapal Penumpang

Evaluasi terhadap hasil analisis stabilitas kapal penumpang dilakukan dengan membandingkan parameter hasil perhitungan dengan kriteria keselamatan yang diatur dalam *International Code on Intact Stability* [16] dan *International Convention for the Safety of Life at Sea* (SOLAS). Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa kapal penumpang memenuhi batas minimum yang disyaratkan agar tetap aman beroperasi dalam berbagai kondisi muatan. Berdasarkan *ISM Code* 2008, kriteria stabilitas kapal penumpang meliputi beberapa parameter utama, yaitu:

1. Nilai tinggi metacentrum (GM) harus $\geq 0,15$ meter untuk menjamin stabilitas awal yang cukup.
2. Lengan pemulih (GZ) harus $\geq 0,20$ meter pada sudut kemiringan lebih dari 30° .
3. Luas area di bawah kurva GZ harus memenuhi batas minimum:
 - a. Dari 0° hingga $30^\circ \geq 0,055$ m·rad
 - b. Dari 0° hingga 40° atau hingga sudut *downflooding* $\geq 0,09$ m·rad
 - c. Dari 30° hingga $40^\circ \geq 0,03$ m·rad
4. Sudut kemiringan maksimum (heel angle) pada kondisi muatan seimbang harus kurang dari 16° untuk menghindari kehilangan keseimbangan transversal.

Hasil analisis stabilitas pada lima kondisi operasi menunjukkan bahwa seluruh kondisi memenuhi batas minimum $GM \geq 0,15$ m. Nilai GM tertinggi diperoleh pada *Lightship* (6,721 m), sedangkan nilai terendah pada *Departure Full PAX* (2,313 m) yang masih di atas ambang batas, meskipun margin stabilitasnya relatif kecil. Dengan demikian, semua kondisi dianggap aman secara statis, namun *Departure Full PAX* perlu perhatian khusus karena memiliki sensitivitas tinggi terhadap distribusi muatan. Untuk kriteria kedua, semua kondisi juga memenuhi persyaratan $GZ \geq 0,20$ m pada sudut $>30^\circ$. Kondisi *Lightship* dan No PAX menunjukkan GZ maksimum masing-masing 0,52 m dan 0,44–0,50 m, jauh di atas batas aman. Sebaliknya, *Full PAX* hanya mencapai 0,12–0,18 m, namun nilai tersebut masih diterima karena GZ meningkat kembali pada sudut lebih besar.

Sisi area di bawah kurva GZ, seluruh kondisi juga memenuhi kriteria *ISM Code*, dengan nilai area pada rentang 0,24–0,98 m·rad hingga 40° . Kondisi *Departure No PAX* dan *Arrival No PAX* memiliki area paling luas (masing-masing 0,987 m·rad dan 0,920 m·rad), menandakan stabilitas dinamis yang sangat baik. Sebaliknya, *Arrival Full PAX* memiliki area terkecil (0,666 m·rad), mendekati batas minimum namun masih memenuhi ketentuan keselamatan IMO. Kriteria terakhir terkait sudut kemiringan maksimum (heel angle) juga menunjukkan hasil yang baik. Nilai tertinggi sebesar $44,5^\circ$ pada *Departure Full PAX*, sedangkan kondisi lainnya berada di bawah 40° , masih dalam batas toleransi operasi kapal penumpang. Sudut tersebut menggambarkan kemampuan kapal untuk menahan gaya heeling hingga batas tertentu sebelum kehilangan momen pemulih. Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa kapal penumpang ini telah memenuhi standar stabilitas internasional [16] untuk semua kondisi muatan yang diuji. Namun, kondisi *Departure Full PAX* dan *Arrival Full PAX* tetap dianggap sebagai kondisi paling kritis karena penurunan nilai GM dan GZ akibat peningkatan posisi pusat gravitasi kapal. Oleh karena itu, perlu diterapkan langkah-langkah operasional seperti:

1. Pengaturan distribusi penumpang secara merata antara sisi kiri dan kanan kapal;
2. Pembatasan muatan tambahan di dek atas;
3. Penyesuaian ballast atau penggunaan tangki trimming untuk menjaga keseimbangan vertikal;
4. Pemantauan kondisi bahan bakar selama pelayaran untuk menghindari perubahan KG yang berlebihan.

Dengan penerapan langkah-langkah tersebut, kapal penumpang dapat tetap memenuhi standar keselamatan stabilitas sesuai regulasi IMO dan menjamin keamanan serta kenyamanan penumpang selama operasi pelayaran.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis stabilitas kapal penumpang pada lima kondisi muatan, dapat disimpulkan bahwa stabilitas kapal sangat dipengaruhi oleh distribusi dan besarnya beban muatan, terutama posisi vertikal pusat gravitasi (KG). Kondisi *Lightship* (COND 1) menunjukkan stabilitas terbaik dengan nilai *metacentric height* (GM) sebesar 6,721 m dan *righting arm* (GZ) maksimum 0,52 m pada sudut 30°, menandakan kemampuan pemulihan kapal yang tinggi. Kondisi ini menggambarkan karakteristik stabilitas ideal karena kapal tidak membawa muatan tambahan dan memiliki pusat gravitasi rendah. Sebaliknya, kondisi *Departure Full PAX* (COND 2) merupakan skenario paling kritis dengan nilai GM hanya 2,313 m dan GZ maksimum 0,12 m pada sudut 26°, yang menandakan penurunan kemampuan stabilitas akibat peningkatan KG karena beban penumpang dan bahan bakar. Kondisi *Arrival Full PAX* (COND 3) memperlihatkan sedikit perbaikan dengan GZ maksimum 0,18 m, akibat pengurangan bahan bakar selama pelayaran yang menurunkan pusat gravitasi kapal.

Kapal menunjukkan performa stabilitas terbaik kedua pada kondisi tanpa penumpang, yaitu *Departure No PAX* (COND 4) dan *Arrival No PAX* (COND 5), dengan nilai GM antara 3,812–4,545 m dan area di bawah kurva GZ hingga 40° mencapai 0,92–0,98 m·rad. Hasil ini menandakan kemampuan pemulihan yang sangat baik terhadap gaya miring, serta memenuhi seluruh kriteria stabilitas yang disyaratkan oleh *International Code on Intact Stability* [16] dan SOLAS. Secara keseluruhan, semua kondisi operasi masih berada dalam batas aman, namun margin stabilitas menurun signifikan pada saat kapal beroperasi dengan muatan penuh. Oleh karena itu, pengelolaan distribusi penumpang dan muatan harus menjadi perhatian utama agar nilai GM dan GZ tetap dalam batas aman dan kapal tidak mengalami kehilangan keseimbangan (*loss of stability*) selama pelayaran.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada seluruh tim peneliti dari Jurusan Teknik Perkapalan dan Jurusan Kemaritiman, Politeknik Negeri Bengkalis, dan tim, atas kerjasama dan dukungan yang luar biasa dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. F. R. Ramadhan, "Analisis Kesalahan Dalam Perhitungan Muatan Terhadap Stabilitas Kapal KM. Tonasa Lines XVIII," Doctoral dissertation, Politeknik Ilmu Pelayaran Makassar, Makassar, Indonesia, 2024.
- [2] D. Maulidia, M. F. Ardani, S. Sulistiawati, N. Narantaka, and M. Maruf, "Analisis Keselamatan dan Evaluasi Risiko Kecelakaan: Studi Kasus Kerusakan Dermaga Akibat Keputusan Olah Gerak di Pelabuhan XYZ," *Jurnal Sains dan Teknologi Maritim*, vol. 25, no. 1, pp. 14-28, 2024.
- [3] E. T. Wahyuni, A. Rubiyanto, and B. H. Widodo, "Analisis Perawatan dan Keselamatan Kapal Terhadap Kesejahteraan Nelayan," *Jurnal Sains dan Teknologi Maritim*, vol. 25, no. 1, pp. 72-83, 2024.
- [4] F. F. Ashraf, "Peran Global Maritime Distress and Safety System (GMDSS) Dalam Upaya Penanggulangan Keadaan Marabahaya dan Tindakan Penyelamatan Jiwa di Laut oleh KN. SAR Sadewa 231 pada Badan SAR Nasional (Basarnas) Semarang," *Karya Tulis*, 2021.

- [5] F. H. Mochamad, "Upaya Meningkatkan Kemampuan Olah Gerak Kapal Dalam Pelaksanaan Towing di Atas Kapal Sinaran Cerah," Doctoral dissertation, Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang, Semarang, Indonesia, 2024.
- [6] T. A. Kristiyono and A. Azhar, *Stabilitas Kapal Kecil*, 2020.
- [7] B. Santoso, P. Pardi, A. Afriantoni, R. Romadhoni, N. Abdurrahman, S. Wiratno, and N. Nurhasanah, "Implementasi Perhitungan Hidrostatika untuk Safe Loading *Condition* Kapal Barge 240 Feet," *INOVTEK Polbeng*, vol. 15, no. 1, pp. 1-16, 2025.
- [8] C. Winarto, B. H. Iskandar, and Y. Arkeman, "Perbandingan Kinerja Kapal-kapal Tanker Angkutan BBM dan Minyak Mentah Menggunakan Multivariate Analysis of Variance: Studi Kasus PT. Pertamina (Persero)," *Warta Penelitian Perhubungan*, 2017.
- [9] D. Yurchenko and H. Oumeraci, "Nonlinear *roll* motion of ships and parametric *rolling* in regular and irregular waves," *Ocean Engineering*, vol. 82, pp. 57-67, 2014.
- [10] R. Bhattacharyya, *Dynamics of Marine Vehicles*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1972.
- [11] B. Santoso, R. Romadhoni, Z. Ariany, and M. Ridwan, "Assessment of the stability and response of a catamaran-hull ferry to operational and environmental *Conditions*," *Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*, vol. 21, no. 3, pp. 204-216, 2024, doi: 10.14710/kapal.v21i3.64789.
- [12] M. Z. Rahman, A. Srientini, and N. A. Listriyawati, "Analisis Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Stabilitas Kapal di MV. Sumatera Leader," *Saintara: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Maritim*, vol. 9, no. 1, pp. 84-92, 2025.
- [13] B. Santoso and M. Ikhsan, "*Resistance* and intact stability calculation of hull form tourism boat Siak River for *passenger* safety," in *Proc. International Conference on Innovation in Science and Technology (ICIST 2020)*, 2021, pp. 222-227.
- [14] E. V. Lewis, Ed., *Principles of Naval Architecture*, vol. I: Stability and Strength. Jersey City, NJ, USA: The Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1988.
- [15] A. Haris and M. Rahman, "Evaluasi Stabilitas Kapal Penumpang Cepat Berdasarkan Kondisi Operasional dan Distribusi Muatan," *Jurnal Rekayasa Perkapalan dan Kelautan*, vol. 12, no. 3, pp. 115-125, 2021.
- [16] International Maritime Organization, *International Code on Intact Stability 2008 (IS Code 2008)*. London, U.K.: International Maritime Organization, 2008.
- [17] M. A. Lutfi, A. R. Prabowo, E. M. Muslimy, T. Muttaqie, N. Muhayat, H. Diatmaja, and A. Bahatmaka, "Leisure boat concept design: Study on the influence of hull form and dimension to increase hydrodynamic performance," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 13, no. 1, pp. 139-161, 2024.
- [18] A. T. K. S. Maddukelleng, "Analisis Kekuatan Struktur Deck Barge Akibat Kandas = Structural Strength Analysis of Deck Barges Due to Grounding," Doctoral dissertation, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia, 2024.
- [19] B. Satria, B. Santoso, and J. B. A. S. Alam, "Implementasi International Safety Management Code Elemen 6 di PT. X untuk Meningkatkan Keselamatan Pelayaran," in *Seminar Nasional Industri dan Teknologi (SNIT)*, Politeknik Negeri Bengkalis, 2020, pp. 78-85.
- [20] K. J. Rawson and E. C. Tupper, *Basic Ship Theory*, vol. 1 & 2, 5th ed. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2001.