

Analisis Pengaruh Variasi *Load Case* Terhadap Prediksi *Motion Sickness Incidence* Pada Kapal Tugboat 27 m Dalam Tahap Desain Awal

Isa Putra Catur J Pramana^{*1}, Adhe Arysawan^{1*}, Muhammad Irsyad Saihilmi^{2*}

*** Politeknik Negeri Batam**

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: isapramanak@gmail.com

Abstrak

Kenyamanan dan kesehatan kru di atas kapal merupakan faktor fundamental yang memengaruhi efektivitas operasional di sektor maritim. Kapal jenis Tugboat memiliki karakteristik operasional yang khas, di mana kapal ini sering beroperasi pada kondisi lingkungan laut yang dinamis dengan beban kerja tinggi, sehingga sangat rentan terhadap fenomena mabuk laut (*Motion Sickness Incidence*) bagi para kru di dalamnya. Penelitian ini berfokus pada analisis MSI pada kru kapal Tugboat berukuran 27 m yang dilakukan pada tahap Initial Design. Tingkat kenyamanan dipengaruhi oleh respons pergerakan kapal, yang sangat bergantung pada stabilitas kapal. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis pengaruh variasi kondisi muatan atau *Load Case* (98%, 75%, 50%, dan 25%) terhadap stabilitas, yang kemudian dikorelasikan dengan nilai *Response Amplitude Operator* (RAO) pada berbagai sudut datang gelombang (*heading* 0°, 45°, 90°, 135°, dan 180°). Parameter utama yang dianalisis adalah Vertical Acceleration pada titik-titik akomodasi kru, karena percepatan vertikal merupakan pemicu utama terjadinya gangguan keseimbangan pada sistem vestibular manusia. Evaluasi tingkat kenyamanan dan prediksi persentase kru yang mengalami mabuk laut dilakukan dengan mengacu pada standar internasional ISO 2631, yang memberikan batasan mengenai dampak getaran mekanis dan guncangan terhadap kenyamanan manusia. Hasil dari penelitian pada tahap desain awal ini diharapkan dapat menjadi rekomendasi teknis dalam penentuan tata letak akomodasi maupun modifikasi desain lambung guna meningkatkan performa operasional kapal di masa depan.

Kata kunci : *Tugboat, Initial Design, Motion Sickness Incidence, Vertical Acceleration, Load Case*

Abstract

The comfort and health of the crew on board a vessel are fundamental factors that influence operational effectiveness in the maritime sector. Tugboats have unique operational characteristics; they often operate in dynamic marine environments with high workloads, making the crew highly susceptible to motion sickness. This study focuses on the analysis of Motion Sickness Incidence (MSI) among the crew of a 27 m tugboat conducted during the Initial Design phase. Comfort levels are influenced by the vessel's motion response, which is highly dependent on the vessel's stability. Therefore, this study analyzes the influence of varying load conditions (98%, 75%, 50%, and 25%) on stability, which is then correlated with the Response Amplitude Operator (RAO) values at various wave approach angles (0°, 45°, 90°, 135°, and 180°). The primary parameter analyzed is Vertical Acceleration at crew accommodation points, as vertical acceleration is the main trigger for disturbances in the human vestibular system. Comfort level evaluation and prediction of the percentage of crew members experiencing seasickness are conducted in accordance with the international standard ISO 2631, which establishes limits regarding the impact of mechanical vibrations and shocks on human comfort. The results of this preliminary design-phase study are expected to serve as technical recommendations for determining the accommodation layout and hull design modifications to improve the ship's operational performance in the future.

Keywords : *Tugboat, Initial Design, Motion Sickness Incidence, Vertical Acceleration, Load Case*

1 Pendahuluan

Kapal *tugboat* atau kapal tunda memiliki peran yang sangat vital dalam industri maritim, khususnya untuk memandu, menarik, atau mendorong kapal berukuran besar di area pelabuhan maupun laut lepas. Dalam menjalankan operasionalnya, kapal seringkali dihadapkan pada kondisi perairan yang ekstrem. Gerakan kapal yang naik-turun secara terus-menerus akibat gelombang besar di laut lepas dapat menimbulkan gejala pusing, mual, hingga muntah yang dikenal sebagai mabuk laut (*sea sickness* atau *motion sickness*)[1]. Penyebab utama mabuk laut adalah ketidaksesuaian rangsang yang diterima otak antara mata dan organ keseimbangan pada telinga dalam (sistem vestibular)[2]. Dari berbagai jenis gerakan kapal, percepatan vertikal adalah hal yang paling utama menjadi penyebab mabuk laut, sementara rolling dan pitching hanya memberikan sedikit pengaruh.

Kondisi kenyamanan kru bukan sekadar masalah estetika perancangan, melainkan berkaitan erat dengan keselamatan dan efektivitas kerja di atas kapal. Penurunan performa kru akibat *motion sickness* sangat berisiko, terutama bagi mereka yang bertugas di area-area krusial seperti ruang mesin, main deck, dan ruang navigasi[3]. Dalam operasional aslinya, kapal *tugboat* akan berlayar dengan membawa muatan yang bervariasi. Perubahan variasi muatan akan mengubah sarat air serta titik berat kapal, yang secara langsung berdampak pada nilai stabilitas dan kemampuan manuver kapal[4]. Perubahan titik berat ini akan mengubah nilai *Response Amplitude Operator* (RAO) yang merepresentasikan karakteristik olah gerak kapal terhadap gelombang. Selain itu, kapal di laut lepas berhadapan dengan gelombang dari berbagai arah, sehingga pergerakan kapal harus ditinjau dari variasi sudut datang gelombang.

Permasalahan utama dalam penelitian ini berfokus pada tiga hal utama yang saling berkaitan. Pertama, penelitian ini mengkaji bagaimana pengaruh variasi *Load Case* terhadap karakteristik nilai stabilitas statis dan dinamis pada kapal *Tugboat* 27 m. Kedua, penelitian ini merumuskan karakteristik nilai *Response Amplitude Operator* (RAO) kapal pada variasi sudut datang gelombang (*heading* 0°, 45°, 90°, 135°, dan 180°) untuk masing-masing kondisi pemuatan tersebut. Ketiga, bertujuan untuk mengukur besarnya persentase indeks MSI yang dialami oleh kru secara spesifik di titik lokasi kerja utama, yaitu *engine room*, *work/main deck*, dan *navigation deck*[5].

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada objek desain kapal *tugboat* dengan panjang keseluruhan 27 m yang saat ini masih berada dalam tahap pembangunan awal. Analisis stabilitas dalam studi ini difokuskan pada empat variasi kondisi muatan operasional yang spesifik. Sementara itu, evaluasi karakteristik olah gerak kapal (*seakeeping*) untuk memperoleh visualisasi kurva RAO dibatasi pada parameter variasi sudut datang gelombang[6]. Terakhir, penentuan tingkat kenyamanan dan prediksi persentase *Motion Sickness Incidence* (MSI) kru hanya dievaluasi melalui nilai respons percepatan vertikal (*vertical acceleration*) pada area krusial seperti ruang mesin, deck akomodasi dan navigasi deck dengan mengacu pada pemenuhan standar regulasi internasional ISO 2631.

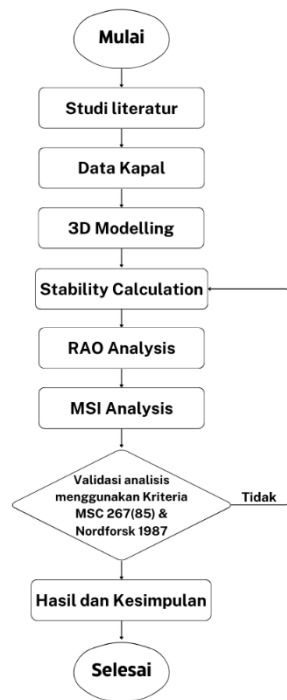
Penelitian ini dilaksanakan dengan tiga sasaran capaian utama. Pertama, untuk menganalisis variasi muatan terhadap karakteristik stabilitas statis dan dinamis kapal *Tugboat* 27 m[7]. Kedua, untuk mendapatkan nilai dari *Response Amplitude Operator* (RAO) akibat pengaruh dari berbagai variasi sudut gelombang. Ketiga, untuk menghitung besarnya persentase MSI yang mungkin dialami kru pada area kerja krusial di atas kapal. Pada akhirnya, hasil perhitungan indeks MSI tersebut akan digunakan untuk mengevaluasi tingkat kenyamanan operasional kru guna memastikan bahwa desain kapal yang sedang dibangun telah memenuhi kriteria keselamatan dan kenyamanan kerja sesuai dengan standar global[8].

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata serta nilai tambah yang baik bagi dunia industri maritim maupun perkembangan akademis. Secara praktis, hasil dari analisis ini dapat dimanfaatkan untuk memberikan rekomendasi teknis yang berharga kepada pihak galangan kapal maupun *engineer* perkapalan terkait batasan pemuatan operasi (*safe loading condition*)[9] yang aman secara regulasi stabilitas sekaligus tetap menjaga kenyamanan dan kesehatan fisik kru selama bertugas di laut. Secara akademis, luaran dari penelitian ini diharapkan mampu memperkaya literatur ilmiah dan menjadi referensi pembandingan dalam pengembangan metodologi desain kapal khususnya tipe *Tugboat*.

2 Metodologi Penelitian

2.1 Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang tersusun secara sistematis agar tujuan penelitian dapat tercapai dengan baik. Secara umum, tahapan penelitian dimulai dari studi literatur, pengumpulan data kapal, pemodelan geometri lambung, analisis variasi muatan, analisis gerakan kapal akibat gelombang pada titik pengamatan, dan diakhiri dengan penarikan kesimpulan. Adapun tahapan penelitian terangkum pada diagram alir yang dapat dilihat pada gambar 1 sebagai berikut:



Gambar 1: Alur Penelitian

2.2 Metode Analisis

2.2.1 Criteria Stability

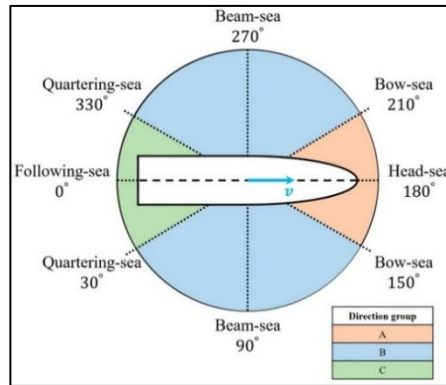
Analisis Stabilitas pada penelitian ini dihitung menggunakan software Maxsurf Stability. Penentuan variasi muatan mengacu pada *BKI Rules for Classification and Construction Part 6 (Statutory), Volume 3 : Guidelines For Intact Stability*, Dimana stabilitas kapal harus dianalisis pada seluruh kondisi pembebanan yang relevan terhadap operasional kapal (*all condition of ship*). Analisa akan dilakukan dengan 4 kondisi yaitu 98% (*full load*) , 75% (*partial load*), 50% (*half load*) dan 25% (*low load*). Kriteria stabilitas yang digunakan yaitu standar keselamatan International Maritime Organization (IMO) yaitu IMO MSC.267 (85) mengatur tentang *code on intact stability*

Tabel 1
Kriteria IMO MSC.267 (85)

No	Criteria	Value	Unit
1	Area 0 to 30	≥ 0.0500	m.rad
2	Area 0 to 40	≥ 0.0900	m.rad
3	Area 30 to 40	≥ 0.0300	m.rad
4	Max GZ at 30 or Greater	0,20	m
5	Angle of Maximum GZ	25°	deg
6	Initial GMt	0,15	m

2.2.2 RAO Criteria

Adapun pada analisis RAO, perhitungan dilakukan menggunakan software Maxsurf Motion. Peneliti menggunakan 5 variasi wave heading yaitu 0° (*following seas*), 45° (*quartering seas*), 90° (*beam seas*), 135° (*bow seas*) dan 180° (*head seas*).



Gambar 2: Arah sudut datang gelombang

kriteria NORDFORSK adalah kriteria yang mengacu pada tingkat akselerasi dibagian dek kapal dan juga mengacu pada tingkat kenyamanan manusia. Kriteria NORDFORSK telah ditetapkan untuk batasan operasional umum untuk berbagai jenis kapal, termasuk dalam hal keamanan dan kinerja dari kapal, efisiensi, dan keberlanjutan dalam industri maritim.

Tabel 2
Kriteria NORDFORSK 1987

General Operability	Merchant Ship	Naval Vessels	Fast Small Craft
Limiting Criteria for ships			
RMS of vertical acceleration at FP	0,275 g	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 Roll	6°	4.0°	4.0°
Probability of slamming	0,3	0,03	0,03
Probability of deck wetness	0,05	0,05	0,05
RMS of Pitch	1.5°	1.5°	1.5°

2.2.3 MSI Criteria

Standar Internasional (ISO 2631) mendefinisikan metode untuk estimasi persentase jumlah penumpang yang mengalami gejala motion sickness pada berbagai posisi di kapal untuk berbagai kriteria. Dimana kriteria tersebut di atas menunjukkan persentase penumpang yang akan mengalami mabuk laut setelah periode tertentu.

- 10 % MSI setelah 8 hours
- 10 % MSI setelah 2 hours
- 10 % MSI setelah 30 menit

Dimana kriteria tersebut diatas menunjukan persentase penumpang yang akan mengalami mabuk laut setelah periode tertentu. Referensi ISO 2631 juga menyebutkan bahwa tingkat kenyamanan atau penyebab MSI yang paling utama adalah adanya percepatan vertikal (*vertical acceleration*).

Tabel 3

Tingkat kenyamanan dan percepatan vertikal

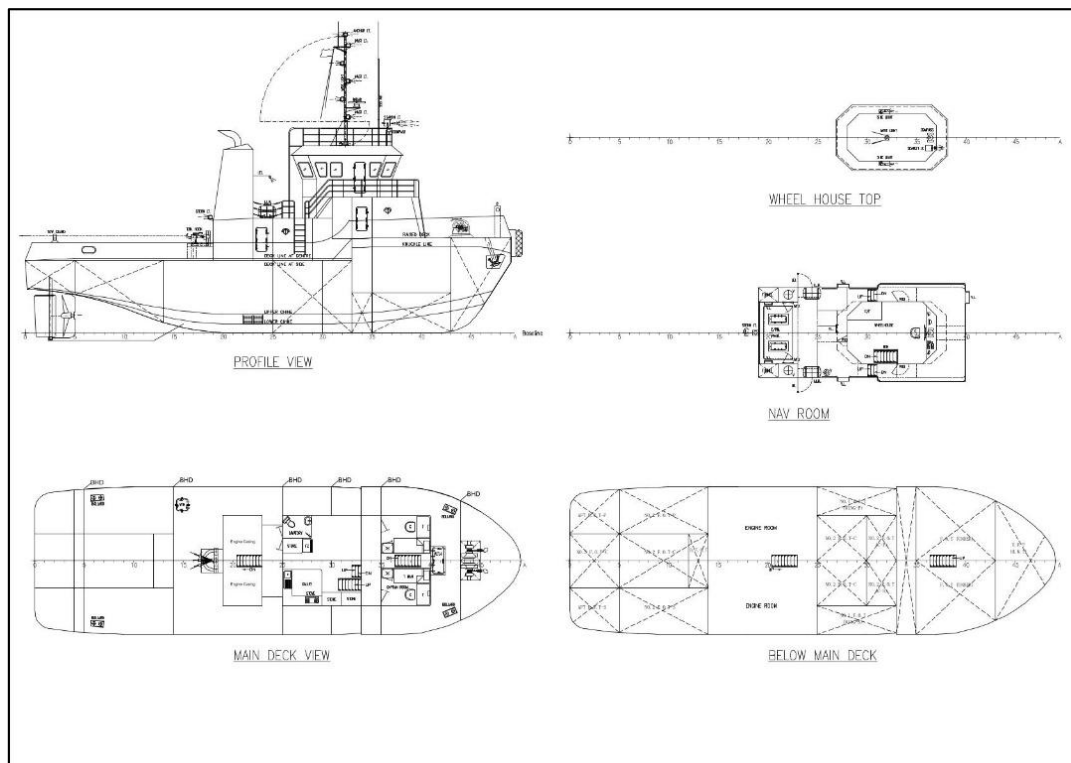
Habitability Acceleration (RMS)	
$< 0,315 \text{ ms}^{-2}$	Not uncomfortable
$0,315 - 0,63 \text{ ms}^{-2}$	A little uncomfortable
$0,5 - 1,0 \text{ ms}^{-2}$	Fairly uncomfortable
$0,8 - 1,6 \text{ ms}^{-2}$	Uncomfortable
$- 2,5 \text{ ms}^{-2}$	Very Uncomfortable
$> 2 \text{ ms}$	Extremely Uncomfortable

2.3 Data Kapal

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data desain awal kapal tugboat 27 m yang masih berada pada tahap pembangunan. Data ini menjadi acuan utama dalam proses pembentukan model geometri kapal dan analisis gerakan kapal pada tahap selanjutnya. Nilai panjang keseluruhan kapal dapat dilihat pada tabel 2 sebesar 27 m, lebar 8.2 m, tinggi 4 m, draft design 3.25 m, dan jumlah kru 10 orang.

Tabel 4

Principal Dimension		
Tugboat		
LoA	27	m
Beam	8.2	m
Depth	4	m
Draft design	3.25	m
Crew	10	person
Serv Speed	10	kn
Max Speed	14	kn



Gambar 3 General Arrangement Tugboat 27 m

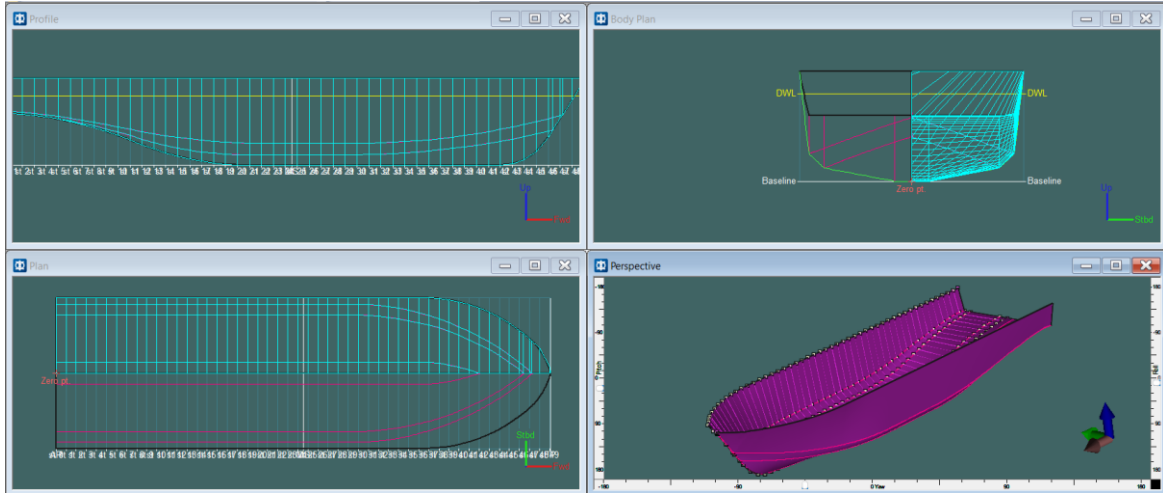
2.4 Data Perairan

Karakteristik perairan selat Singapura didominasi oleh gelombang lokal dengan tinggi gelombang yang umumnya berkisar antara 0.5 m hingga 1.5 m saat cuaca sedang buruk dengan periode gelombang yang tergolong pendek antara 3 detik hingga 6 detik. Bentuk selat Singapura menyerupai "corong" yang menghubungkan perairan Laut China Selatan dan Selat Malaka, menciptakan pola dinamika arus yang cukup ekstrem untuk kapal bertenaga kecil. Spektrum gelombang JONSWAP dipilih karena dikembangkan untuk kondisi laut dengan fetch terbatas (perairan semi-tertutup), yang sesuai dengan karakteristik perairan selat Singapura sebagai perairan sempit atau pulau.

3 Analisa Data dan Pembahasan

3.1 3D Modelling

Tahap pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak *Maxsurf Modeler*. Pemodelan dilakukan dengan mengacu pada data ukuran utama kapal, yaitu LoA, Beam dan Depth.



Gambar 4 Lines Plan Tugboat 27 m

3.2 Stability Calculation (Load Case Condition)

Analisis stabilitas dilakukan untuk mengetahui karakteristik keseimbangan kapal *Tugboat 27m* pada skenario *load case*, didasarkan pada persentase kapasitas tangki dan perlengkapan operasional kapal, yang mencakup kondisi 98%, 75%, 50%, dan 25%. Rincian distribusi massa pada masing-masing kondisi pemuatan tersebut disajikan pada Tabel 5 berikut;

Tabel 5
Load case scenario kapal tugboat 27 m

Item Name	Specific Gravity	Fluid Type	Unit Mass Tonne	LC 98%	LC 75%	LC 50%	LC 25%
Lightship			220.808	220.808	220.808	220.808	220.808
Crew			0.075	0.750	0.750	0.750	0.750
Provision & store			2.000	2.000	1.500	1.000	0.500
AFT BWT (P)	1.025	Sea Water	11.336	0.000	0.000	0.000	0.000
No.3 BWT (C)	1.025	Sea Water	14.149	0.000	0.000	0.000	0.000
AFT BWT (S)	1.025	Sea Water	11.336	0.000	0.000	0.000	0.000
No.2 FOT (C)	0.84	Diesel	22.682	22.229	17.012	11.341	5.671
No.2 FOT (C)	0.84	Diesel	1.364	1.337	1.023	0.682	0.341
No.2 FOT (C)	0.84	Diesel	4.367	4.279	3.275	2.183	1.092
No.2 FOT (S)	0.84	Diesel	18.764	18.389	14.073	9.382	4.691
DOT (C)	0.84	Oil	3.027	2.967	2.271	1.514	0.757
LO TANK	0.84	Lube Oil	0.475	0.465	0.356	0.237	0.119
Sewage Tank	1	Fresh Water	1.164	1.141	0.873	0.582	0.291
Sludge Tank	0.84	Oil	1.164	1.141	0.873	0.582	0.291
No.1 FOT (P)	0.84	Diesel	17.336	16.989	13.002	8.668	4.334
No.1 FOT (S)	0.84	Diesel	17.336	16.989	13.002	8.668	4.334
No.1 FOT (CP)	0.84	Diesel	13.060	12.799	9.795	6.530	3.265
No.1 FOT (CS)	0.84	Diesel	13.060	12.799	9.795	6.530	3.265
No.1 FOT (BP)	0.84	Diesel	6.042	5.921	4.532	3.021	1.511
No.1 FOT (BS)	0.84	Diesel	6.042	5.921	4.532	3.021	1.511
FWT (P)	1	Fresh water	20.506	20.096	15.380	10.253	5.127
FWT (S)	1	Fresh Water	20.506	20.096	15.380	10.253	5.127
FPT			18.025	0.000	0.000	0.000	0.000
Total Loadcase				387.116	348.230	306.006	263.782
FS correction				0.000	0.148	0.169	0.196
VCG fluid				0.883	0.797	0.576	0.384

Setelah mendapatkan nilai total dari masing-masing load case, maka akan memperoleh sebuah data berupa output hidrostatik untuk menilai kondisi stabilitas dan keseimbangan kapal berdasarkan kondisi muatan tertentu seperti yang terlihat pada tabel 6 sebagai berikut:

Tabel 6

Output hydrostatic as per load case scenario

Heel to Starboard deg	98%	75%	50%	25%
GZ m	0.004	0.005	0.007	0.009
Area under GZ curve from zero heel m.rad	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Displacement t	387.1	348.2	306.	263.7
Draft at FP m	2.958	2.658	2.311	1.940
Draft at AP m	3.194	3.022	2.842	2.671
Draft at LCF m	3.095	2.871	2.624	2.374
Draft Amidships m	3.076	2.840	2.576	2.305
Trim (+ve by stern) m	0.235	0.365	0.531	0.731
WL Length m	26.325	26.128	25.905	25.676
Beam max extents on WL m	7.996	7.946	7.890	7.834
Wetted Area m ²	268.479	255.785	244.205	229.256
Waterpl. Area m ²	186.246	183.230	179.972	176.680
Prismatic coeff. (Cp)	0.690	0.678	0.660	0.637
Block coeff. (Cb)	0.606	0.592	0.573	0.549
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	13.210	13.219	13.223	13.217
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	12.117	12.019	11.909	11.795
KB m	1.865	1.734	1.589	1.439
Max deck inclination deg	0.5263	0.8153	1.1881	1.6349
Trim angle (+ve by stern) deg	0.5263	0.8153	1.1881	1.6349

Berdasarkan pembagian pembebanan yang telah diatur, selanjutnya dilakukan pengujian stabilitas menggunakan software maxsurf stability pada masing-masing loadcase. Adapun kriteria yang digunakan yaitu International Maritime Organization (IMO) MSC.267(85) yang mengatur tentang code on intact stability pada tabel 7.

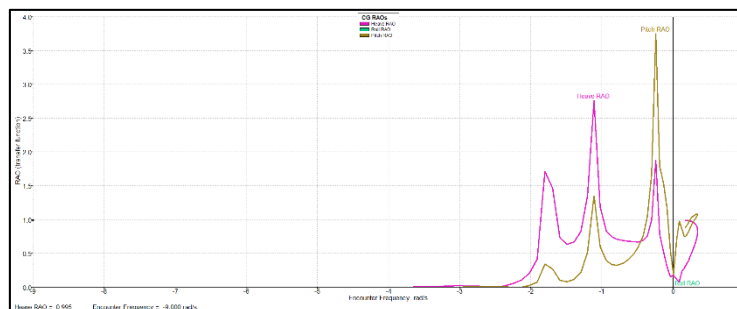
Tabel 7

Hasil kriteria IMO MSC.267 (85) Code On Intact Stability

No	Criteria	Value	Unit	Load Case			
				98%	75%	50%	25%
1	Area 0 to 30	≥ 0.0500	m.rad	0.1405	0.1448	0.1568	0.1519
2	Area 0 to 40	≥ 0.0900	m.rad	0.1847	0.2172	0.2464	0.2376
3	Area 30 to 40	≥ 0.0300	m.rad	0.0442	0.0724	0.0895	0.0857
4	Max GZ at 30 or Greater	0,20	m	0.416	0.452	0.519	0.506
5	Angle of Maximum GZ	25°	deg	32.3	32.7	33.6	30.9
6	Initial GMt	0,15	m	1.155	1.088	1.127	1.117
Status				Pass	Pass	Pass	Pass

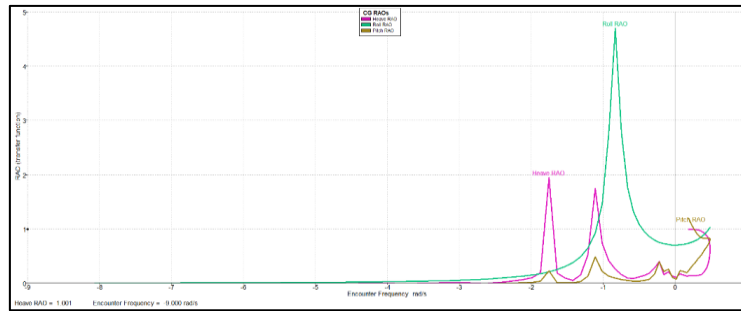
Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 7, seluruh kondisi muatan memenuhi semua kriteria IMO MSC.267(85) dengan status **Pass**. Artinya kapal memiliki kemampuan untuk tetap tegak dan aman saat beroperasi dalam kondisi normal tanpa mengalami kerusakan atau kebocoran pada lambung kapal

3.3 Response Amplitude Operator



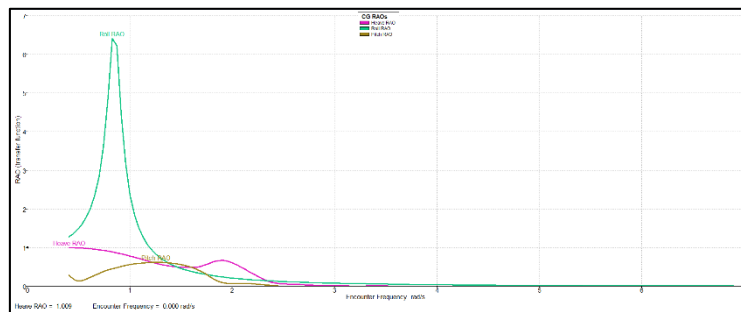
Gambar 5.A : RAO 6 degrees of movement tugboat 27 m Heading 0°

Gambar 5.A memperlihatkan RAO gerakan *heave*, *pitch*, *roll*. Di mana pada sudut gelombang 0° hasil untuk nilai *heave* 0.451 m, nilai *pitch* 2.71°, nilai *roll* 0°, nilai *sway* 0 m, nilai *yaw* 0°, dan nilai *surge* 0.934 m.



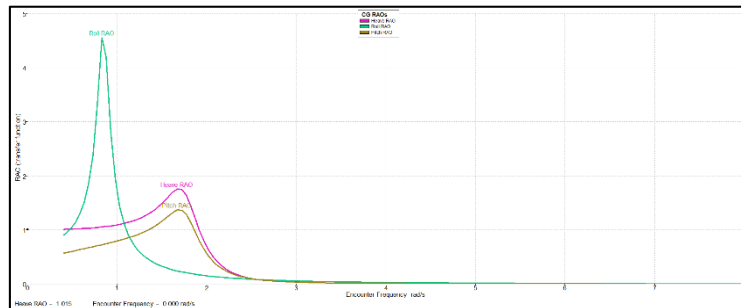
Gambar 5.B : RAO 6 degrees of movement Tugboat 27 m Heading 45°

Gambar 5.B memperlihatkan RAO gerakan *heave*, *pitch*, *roll*. Di mana pada sudut gelombang 45° hasil untuk nilai *heave* 0.462 m, nilai *pitch* 1.67°, nilai *roll* 3.25°, nilai *sway* 0.697 m, nilai *yaw* 2.203°, dan nilai *surge* 0.661 m.



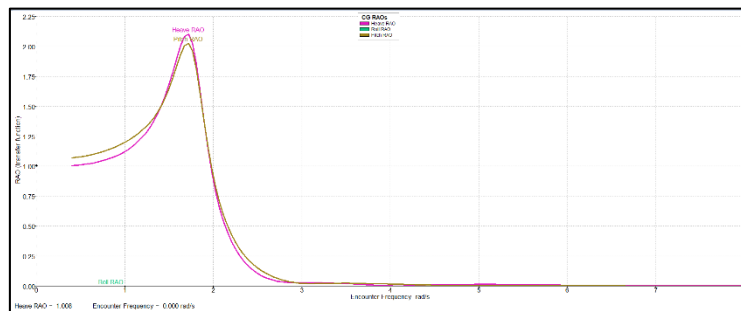
Gambar 5.C : RAO 6 degrees of movement Tugboat 27 m Heading 90°

Gambar 5.C memperlihatkan RAO gerakan *heave*, *pitch*, *roll*. Di mana pada sudut gelombang 90° hasil untuk nilai *heave* 0.512 m, nilai *pitch* 1.17°, nilai *roll* 6.09°, nilai *sway* 0.986 m, nilai *yaw* 0.155°, dan nilai *surge* 0.003 m.



Gambar 5.D : RAO 6 degrees of movement Tugboat 27 m Heading 135°

Gambar 5.D memperlihatkan RAO gerakan *heave*, *pitch*, *roll*. Di mana pada sudut gelombang 135° hasil untuk nilai *heave* 0.622 m, nilai *pitch* 1.79°, nilai *roll* 3.69°, nilai *sway* 0.697 m, nilai *yaw* 2.404°, dan nilai *surge* 0.661 m.



Gambar 5.E : RAO degrees of movement Tugboat 27 m Heading 180°

Gambar 5.E memperlihatkan RAO gerakan *heave*, *pitch*, *roll*. Di mana pada sudut gelombang 180° hasil untuk nilai *heave* 0.667 m, nilai *pitch* 2.47°, nilai *roll* 0°, nilai *sway* 0 m, nilai *yaw* 0°, dan nilai *surge* 0.934 m.

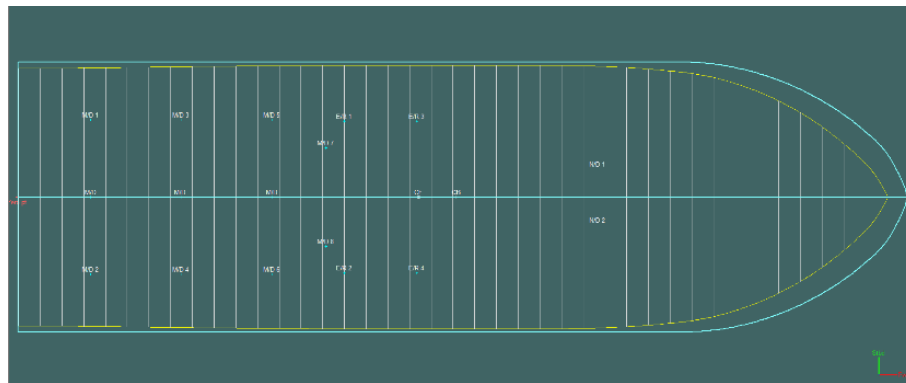
Tabel 8
Nilai RMS kapal Tugboat 27 m dari berbagai Heading

Parameter	Nordforsk	Result				
		0 deg	45 deg	90 deg	135 deg	180 deg
Ver Acc at FP	0.65°	0.160°	0.315°	0.716°	1.351°	2.049°
Roll	4.0°	0°	3.25°	6.09°	3.69°	0°
Pitch	1.5°	2.71°	1.67°	1.17°	1.79°	2.47°
Heave	N/A	0.451 m	0.462 m	0.512 m	0.622 m	0.667 m
Sway	N/A	0 m	0.697 m	0.986 m	0.697 m	0 m
Yaw	N/A	0°	2.203°	0.155°	2.404°	0°
Surge	N/A	0.934 m	0.661 m	0.003 m	0.661 m	0.934 m

Berdasarkan hasil analisis, nilai pitch tertinggi sebesar 2,71° terjadi pada heading 0°, diikuti heading 180° (2,47°) dan heading 135° (1,79°); ketiganya melebihi batas NORDFORSK 1987 sebesar 1,5°. Nilai pitch terkecil sebesar 1,17° terjadi pada heading 90°. Sementara itu, nilai roll tertinggi sebesar 6,09° terjadi pada heading 90°, yang juga melebihi batas NORDFORSK sebesar 4,0°. Nilai sway tertinggi pada heading 90° (0,986 m), surge tertinggi pada heading 0° dan 180° (0,934 m), serta yaw tertinggi pada heading 45° dan 135° (2,404°).

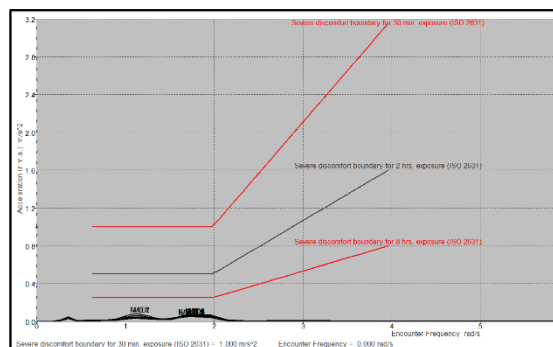
3.4 Motion Sickness Incidence

Pada tahapan ini, analisis nilai MSI didapatkan dengan menempatkan location pada area engine room, main deck, dan navigasi deck. Penempatan terbagi atas beberapa titik yang diteliti secara memanjang dan diukur secara melintang pada setiap area dengan kondisi kapal pada kecepatan tetap 14 knot dengan arah gelombang yang bervariasi.

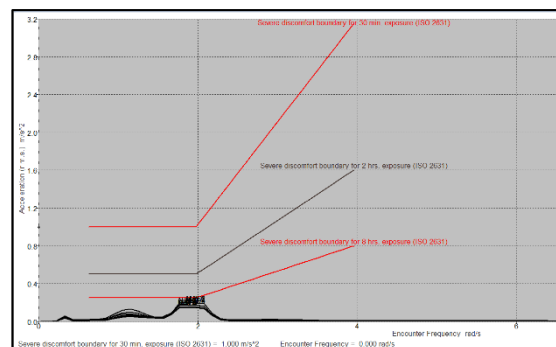


Gambar 6 : Remote Location MSI Tugboat 27 m

3.4.1 MSI pada 14 knot, Following Seas



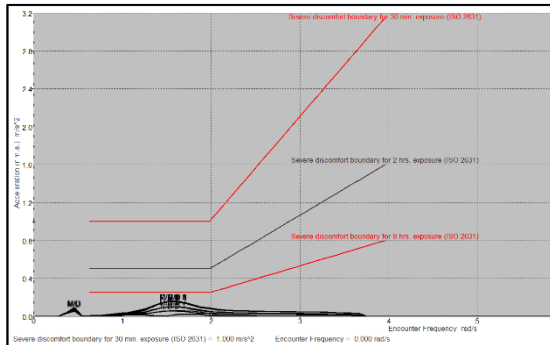
Gambar 7.A : MSI load case 98% & 75%, Heading 0°



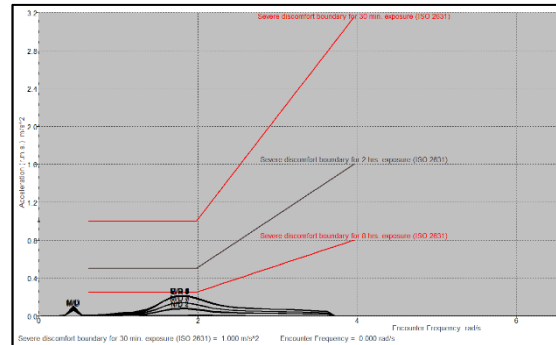
Gambar 7.B : MSI load case 25% & 50%, Heading 0°

Gambar 7.A dan 7.B menunjukkan hasil simulasi MSI pada heading 0° untuk keempat load case. Pada LC 98% dan 75% (Gambar 7.A), kurva percepatan vertikal di seluruh area kerja berada jauh di bawah batas Severe Discomfort ISO 2631 sehingga kru diprediksi aman. Pada LC 50% dan 25% (Gambar 7.B), kurva terlihat naik lebih tinggi dibanding LC 98% dan 75%, namun posisinya masih di bawah batas kritis, sehingga kondisi kru pada heading ini tetap aman di seluruh variasi muatan.

3.4.2 MSI pada 14 knot, Quartering Seas



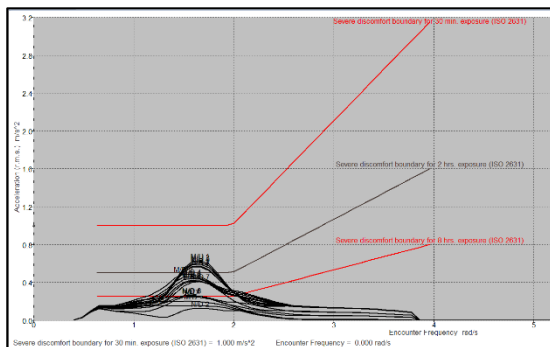
Gambar 8.A : MSI load case 98% & 75%, Heading 45°



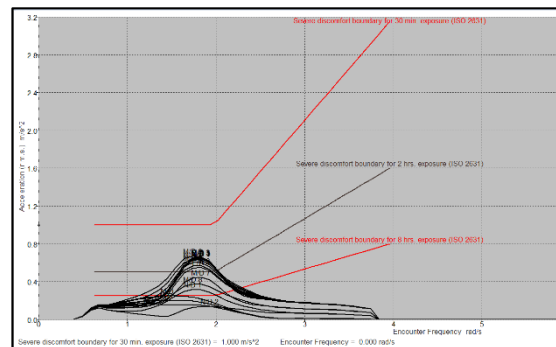
Gambar 8.B : MSI load case 50% & 25%, Heading 45°

Gambar 8.A dan 8.B menunjukkan pola kurva yang relatif konsisten pada keempat load case, di mana percepatan vertikal di seluruh area kerja masih berada di bawah batas Severe Discomfort ISO 2631, sehingga kru pada heading ini diprediksi tetap aman tanpa risiko MSI.

3.4.3 MSI pada 14 knot, Beam Seas



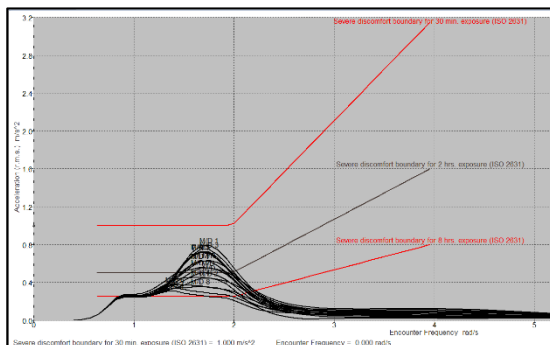
Gambar 9.A : MSI load case 98% & 75%, Heading 90°



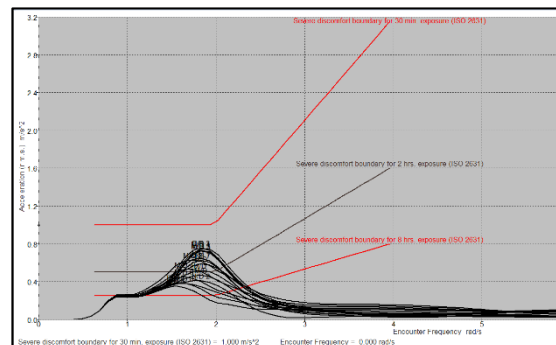
Gambar 9.B : MSI load case 50% & 25%, Heading 90°

Gambar 9.A dan 9.B menunjukkan bahwa pada keempat load case, kurva percepatan vertikal di area main deck dan engine room mulai melewati batas 8 jam hingga pada batas kurva 2 jam, sehingga kru di kedua area tersebut diprediksi mulai mengalami mabuk laut, sementara navigation deck relatif masih aman. Pola ini konsisten di seluruh variasi muatan tanpa perbedaan yang menonjol antar load case.

3.4.4 MSI pada 14 knot, Bow Seas



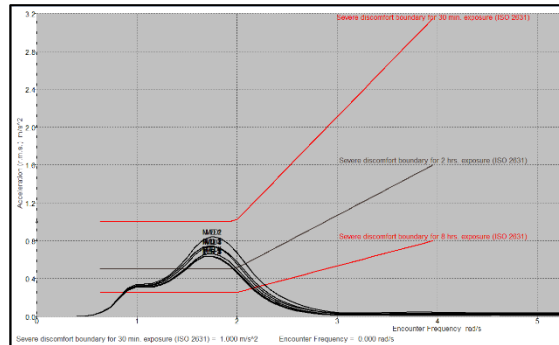
Gambar 10.A : MSI load case 98% & 75%, Heading 135°



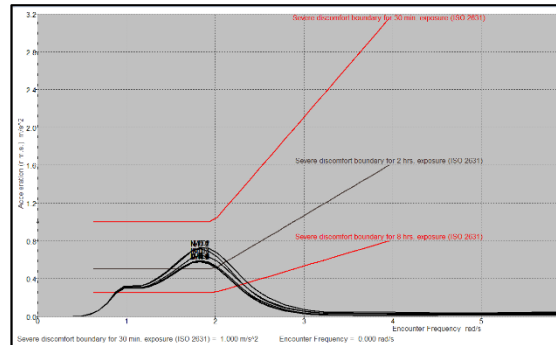
Gambar 10.B : MSI load case 50% & 25%, Heading 135°

Gambar 10.A dan 10.B menunjukkan pola serupa heading 90°, di mana kurva percepatan vertikal pada area main deck dan engine room melewati batas 8 jam bahkan melewati batas 2 jam paparan pada keempat load case, sehingga risiko MSI pada kedua area tersebut tetap tinggi di seluruh kondisi muatan.

3.4.5 MSI pada 14 knot, Head Seas



Gambar 11.A : MSI load case 98% & 75%, Heading 180°



Gambar 11.B : MSI load case 50% & 25%, Heading 180°

Gambar 11.A dan 11.B menunjukkan kondisi paling kritis dalam penelitian ini. Pada keempat load case, kurva percepatan vertikal di seluruh area kerja (engine room, main deck, dan navigation deck) melewati batas Severe Discomfort ISO 2631 untuk paparan 2 jam, sehingga seluruh kru diprediksi berisiko tinggi mengalami MSI, dengan kondisi paling ekstrem terjadi pada Load Case 25%.

Berdasarkan Lloyd 1998, Subjective Magnitude merupakan parameter berbasis respon mekanis/keseimbangan (dengan skala 0 hingga 30) yang mengukur tingkat kesulitan mobilitas fisik akibat guncangan kapal.

Tabel 9

SM Level

SCALE	MSI CATEGORY
0_>5	Moderate
5_>10	Serious
10_>15	Severe
15_>20	Hazardous
20_>30	Intolerable

Tabel 10

Rekap tingkat kenyamanan Load Case 98% & 75%

Lokasi	Heading				
	0°	45°	90°	135°	180°
Engine Room	0.009	1.01	12.424	18.909	18.134
	0.009	0.976	8.869	10.287	18.134
	0.007	0.972	11.894	19.135	17.904
	0.007	0.951	8.204	9.118	17.904
Main Deck	0.093	1.192	15.594	21.724	25.373
	0.093	1.137	12.573	18.15	25.373
	0.093	0.011	6.593	18.47	25.374
	0.041	1.152	14.402	20.194	21.891
	0.041	1.099	11.167	14.883	21.891
	0.041	0.006	4.85	15.987	21.892
	0.016	1.106	13.391	19.283	19.315
	0.016	1.06	9.955	12.065	19.315
	0.016	0.003	3.368	14.111	19.316
	0.01	0.296	8.164	16.776	18.351
Navigation Deck	0.01	0.279	5.263	11.163	18.351
	0.028	0.041	3.566	16.987	21.278
	0.028	0.038	1.487	12.283	21.278

Tabel 11

Rekap tingkat kenyamanan Load Case 50% & 25%

Lokasi	Heading				
	0°	45°	9°	135°	180°
Engine Room	0.484	1.848	14.151	18.411	16.166
	0.484	1.885	12.905	11.629	16.166
	0.456	1.712	14.151	19.195	16.517
	0.456	1.805	11.552	10.183	16.517
Main Deck	1.665	2.407	15.636	19.042	20.92
	1.665	2.288	18.699	19.544	20.92
	1.666	0.008	7.074	17.008	20.924
	1.021	2.252	15.029	18.281	18.315
	1.021	2.182	16.673	16.432	18.315
	1.021	0.005	5.208	14.852	18.318
	0.635	2.078	14.636	18.165	16.657
	0.635	2.062	14.74	13.642	16.657
	0.636	0.003	3.628	13.302	16.658
	0.512	0.69	9.178	16.006	16.216
Navigation Deck	0.512	0.73	8.385	11.594	16.216
	0.865	0.087	5.303	17.309	20.365
	0.865	0.138	1.684	11.976	20.365

Secara keseluruhan dari seluruh variasi muatan, kondisi guncangan kapal yang paling berbahaya selalu terpusat pada area main deck dan navigation deck saat berhadapan langsung dengan gelombang dari arah 135.0° dan 180.0°, di mana kondisi muatan berat (98% & 75%) terbukti memicu tingkat keparahan ekstrem yang lebih tinggi dibandingkan saat kapal beroperasi dengan muatan ringan (50% & 25%).

4 Kesimpulan

Analisis stabilitas menunjukkan seluruh variasi muatan memenuhi kriteria *Intact Stability* IMO MSC.267(85), sehingga kapal *Tugboat* 27 m dinyatakan stabil pada seluruh kondisi operasional. Semakin rendah muatan, nilai *trim by stern* semakin besar, dari 0,235 m pada LC 98% menjadi 0,731 m pada LC 25%, sementara VCG menurun dari 0,883 m menjadi 0,384 m. Nilai GM yang relatif tinggi (1,088–1,155 m) menunjukkan kapal tergolong *stiff ship*, sehingga periode oleng lebih pendek dan percepatan yang dirasakan kru semakin besar. Analisis *Response Amplitude Operator* (RAO) pada lima variasi sudut datang gelombang menghasilkan respons gerakan kapal yang berbeda-beda. Percepatan vertikal tertinggi terjadi pada heading 180° (*head seas*) sebesar 2,049g, sedangkan yang terendah terjadi pada heading 0° (*following seas*) sebesar 0,160g. Nilai *pitch* tertinggi terjadi pada heading 180° (2,47°) dan nilai *roll* tertinggi terjadi pada heading 90° (6,09°), keduanya melampaui batas NORDFORSK 1987. Perhitungan menunjukkan persentase risiko *Motion Sickness Incidence* (MSI) meningkat tajam seiring berkurangnya muatan kapal, terutama pada heading 135° dan 180°. Kondisi paling kritis terjadi pada *load case* 25% heading 180°, di mana seluruh area kerja krusial (*engine room*, *main deck*, dan *navigation deck*) melewati batas *severe discomfort* ISO 2631 untuk paparan 2 jam, sehingga risiko MSI bagi kru sangat tinggi.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran diajukan sebagai bahan pertimbangan: pertama, penelitian ini hanya meninjau percepatan vertikal (*vertical acceleration*) sebagai parameter tunggal penyebab MSI. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas evaluasi dengan menyertakan *Motion Induced Interruptions* (MII) dan *lateral acceleration* guna memperoleh gambaran kenyamanan operasional kru yang lebih komprehensif. Selanjutnya yaitu perancangan sistem distribusi tangki balas (*ballast tank*) perlu dioptimalkan guna mengendalikan nilai *trim by stern* agar tidak melebihi batas kritis, terutama pada kondisi muatan rendah, sehingga kenyamanan dan keselamatan kru dapat terjaga dalam seluruh kondisi operasional kapal.

5 Daftar Pustaka

- [1] D. P. Putra, D. Chrismianto, and M. Iqbal, “ANALISA SEAKEEPING DAN PREDIKSI MOTION SICKNESS INCIDENCE (MSI) PADA KAPAL PERINTIS 500 DWT DALAM TAHAP DESAIN AWAL (INITIAL DESIGN),” 2016.
- [2] T. A. Giacon *et al.*, “Oxidative stress and motion sickness in one crew during competitive offshore sailing,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-05219-6.
- [3] A. K. Yusim and B. Hasrianti, “Analysis of Seakeeping And Motion Sickness Incidence (MSI) Prediction Of The Ship’s Bow When Sailing In Cilacap Sea,” *Marit. Park J. Marit. Technol. Soc.*, vol. 1, no. June, pp. 23–28, 2022, doi: 10.20956/maritimepark.v1i2.21953.
- [4] I. K. Dewi, D. Chrismianto, and B. A. Adietya, “Analisa Stabilitas, Olah Gerak, Motion Sickness Incidence(MSI) dan Motion Induced Interruptions(MII) Kapal Feri Ro-Ro500 GT, 1100 GT dan 1300 GT di Perairan Aceh,” *Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 4, pp. 236–247, 2019.
- [5] M. Santoso, “Analisis Prediksi Motion Sickness Incidence (Msi) Pada Kapal Catamaran 1000 Gt Dalam Tahap Desain Awal (Initial Design),” *Kapal J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 12, no. 1, pp. 42–49, 2015, [Online]. Available: <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/kapal/article/view/8346>
- [6] E. B. DJATMIKO, *PERILAKU DAN OPERABILITAS BANGUNAN LAUT DI ATAS GELOMBANG ACAK*. 2012.
- [7] B. Al and F. Liddin, “Analisis Stability Berdasarkan IMO Pada Kapal Crew Boat 40M,” vol. 2, no. 2, 2023.
- [8] C. A. Adhitama, E. S. Hadi, and S. Jokosisworo, “Analisa Stabilitas Dan Olah Gerak (Seakeeping) Kapal Pada MV. Pan Marine Setelah Dikonversi Dari Kapal Kru Menjadi Kapal Wisata,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 07, no. 1, pp. 37–48, 2019, [Online]. Available:

<https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>

- [9] B. Santoso *et al.*, “Inovtek Polbeng : Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis
IMPLEMENTASI PERHITUNGAN HYDROSTATIKA untuk SAFE LOADING CONDITION
KAPAL BARGE 240 FEET,” vol. 15, no. 01, pp. 1–16, 2025, doi: 10.35314/scnk2x40.