



Analisis Sifat Laik Laut Kapal Penumpang KM. Nusantara 76 Pada Kondisi *Overload*

Sonia Liolita^{1*)}, Wilma Amiruddin¹⁾, Muhammad Iqbal¹⁾

¹⁾Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

diajukan pada : 24/05/19

direvisi pada : 26/06/19

diterima pada : 29/07/19

Abstrak

Kelebihan kapasitas muat (*overload*) dapat menyebabkan kecelakaan atau tenggelamnya kapal. Batas kapasitas muat dalam eksploitasi kapal seringkali tidak dihiraukan demi meraup untung besar. Penelitian ini bertujuan untuk melihat batas *overload* yang masih aman pada kapal penyeberangan di Pelabuhan Kali Adem-Kepulauan Seribu. Metode yang digunakan adalah memberikan simulasi tambahan muatan hingga pada batas tertentu dari sarat maksimum desain dimana akan diperoleh kapal masih dalam kondisi layak. Standar yang digunakan adalah IMO Resolution MSC.267 (85) dan Nordforsk 1987. Hasil analisis stabilitas menunjukkan kapal pada sarat maksimum yaitu 1,2 m mampu mengangkut 251 orang dan sarat diatas maksimum (*overload*), yaitu 1,273 m memuat 377 orang. Hasil analisis gerakan *rolling* menggunakan standar kriteria Nordforsk 1987 menunjukkan perhitungan RMS of Roll tertinggi 3,99 deg pada sudut masuk 90°, RMS lateral acceleration at Bridge 0,148 g pada sudut masuk 180°, dan RMS vertical acceleration at Bridge 0,0147 g pada sudut masuk 90° dengan tinggi gelombang 1,25 m. Hasil analisis menunjukkan bahwa KM. Nusantara 76 dengan sarat *overload* yang ditentukan telah memenuhi semua standar kriteria dan aspek kelaiklautan kapal.

Copyright © 2019, **KAPAL**, 1829-8370 (p), 2301-9069(e)

Kata Kunci : Kapal Penumpang, Stabilitas, Maksimum, Sarat, Rolling

1. PENDAHULUAN

Kabupaten Administrasi Kepulauan Seribu merupakan gugusan pulau-pulau di barat Teluk Jakarta yang terkenal dengan pesona bawah lautnya. Pengunjung dari berbagai penjuru meningkat tahun ke tahun seiring pengembangan ekowisata di Kepulauan Seribu yang berdampak terhadap transportasi penyeberangan dari Pelabuhan Kali Adem, Jakarta.

Masyarakat umum biasanya menggunakan kapal penyeberangan bermaterial kayu dari Pelabuhan Kali Adem ke Kepulauan Seribu. Seperti KM. Nusantara 76 yang melayani rute Pelabuhan Kali Adem - Pulau Pramuka. Namun,

batas kapasitas muat dalam eksploitasi kapal seringkali tidak dihiraukan demi meraup untung besar. Apabila dipaksakan mengangkut penumpang, akan mengakibatkan perubahan sarat kapal hingga ke titik maksimum dan berefek pada titik berat (*centre of gravity*), titik apung (*centre of buoyancy*), menurunnya nilai lengan penegak (GZ) dan momen penegak dalam stabilitas kapal, yang mengakibatkan stabilitas kapal kurang baik, serta olah gerak kapal yaitu gerakan *rolling*. Permasalahan yang dihadapi KM. Nusantara 76 adalah jumlah penumpang maksimum yang dapat diangkut belum sesuai regulasi *International Maritime Organization (IMO)* dan aspek keselamatan pada kelaiklautan kapal dalam Undang-Undang No. 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran. Kondisi pengangkutan penumpang

*) Penulis Korespondensi :

Email : sonialiolitaa24@gmail.com

melebihi batas ini dapat menyebabkan kapal terbalik hingga tenggelam.

Merujuk pada penelitian tentang kecelakaan kapal sebelumnya, kelebihan muatan menyumbang angka 16,67 persen pada penyebab kecelakaan utama kapal motor penyeberangan dari data tahun 1996-2007 [1]. Pada penelitian beban muatan maksimum kapal Kharisma Jaya, penambahan empat orang penumpang pada kapal dengan cadik mampu mengangkut dua puluh orang penumpang dengan kondisi stabilitas memenuhi kriteria *International Maritime Organization (IMO)*, dan kondisi batas maksimum pengangkutan yaitu penambahan lima orang menjadi 21 orang yang sudah tidak memenuhi kriteria stabilitas [2].

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut perihal dampak beban muatan penumpang berlebih pada kapal penumpang penyeberangan. Dalam penelitian ini akan dilakukan analisis stabilitas pada sarat maksimum dan sarat diatas maksimum (*overload*), serta analisis gerakan *rolling* pada sarat diatas maksimum (*overload*) hingga didapatkan hasil dan ditentukan sifat laik lautnya berdasarkan kriteria stabilitas dari *International Maritime Organization (IMO)* dan gerakan *rolling* dari *Nordforsk 1987*.

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan jumlah penumpang yang dapat diangkut pada sarat maksimum dan sarat diatas maksimum (*overload*), serta kondisi stabilitas dan gerakan *rolling* pada sarat diatas maksimum (*overload*) sesuai kriteria yang digunakan sebagai rekomendasi bagi pemilik kapal guna memenuhi standar kelaiklautan kapal dan menghindari terjadinya kecelakaan kapal tenggelam akibat kelebihan muatan.

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah kapal penumpang penyeberangan KM. Nusantara 76 tanpa ada perubahan konstruksi pada lambung maupun bangunan atas kapal. Data primer dan sekunder kapal diperoleh dari pengukuran langsung di lapangan, metode observasi gambar-gambar teknis kapal, dan wawancara kepada pemilik kapal serta pihak terkait.

Tabel 1. Data Primer Kapal

No	Dimensi	Skala penuh
1	Length Over All (LOA)	28,5 m
2	Length of Perpendicular (LPP)	24,42 m
3	Breadth (B)	6,2 m

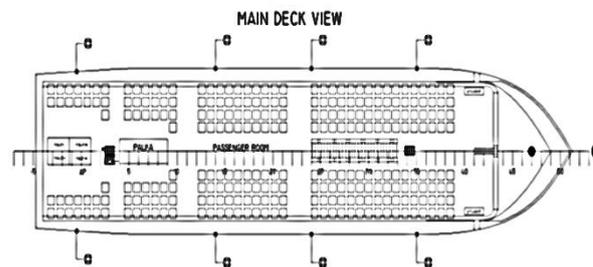
4	Draft Maximum (T max)	1,2 m
5	Depth (H)	2,0 m
6	Vs	11 knot
7	Displacement	111,7 ton
8	Tonnage	97 GT

Tabel 2. Data Sekunder Kapal

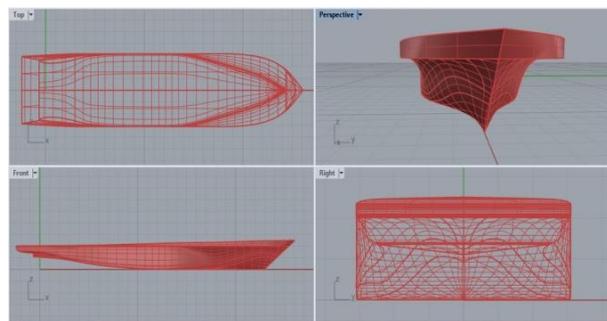
No	Nama	Keterangan
1	Material Lambung	Kayu
2	Jumlah crew	5 orang
3	Penumpang kapasitas	276 Orang
4	Rute Pelayaran	Pelabuhan Kali Adem- P. Pramuka

2.2. Perlakuan Objek Penelitian

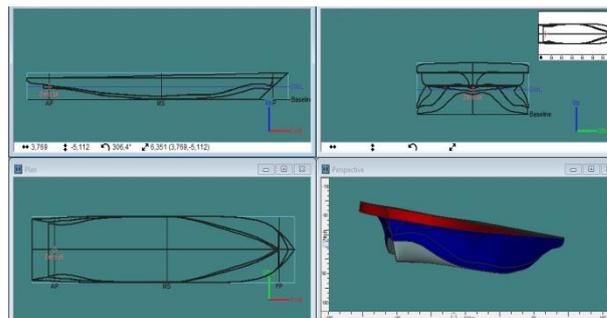
Pembuatan model kapal menggunakan *software Rhinoceros 6.6* dan *Maxsurf Modeler*. Analisis stabilitas menggunakan *software Maxsurf Stability Advanced* dan gerakan *rolling* dengan *Maxsurf Motions Advanced*.



Gambar 1. Main Deck View KM. Nusantara 76



Gambar 2. Pemodelan Kapal dengan *Software Rhinoceros 6.6*

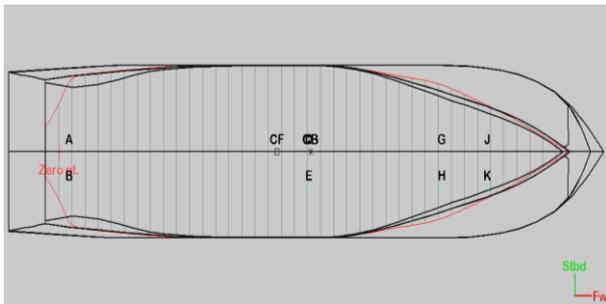


Gambar 3. Pemodelan Kapal dengan *Software Maxsurf Modeler*

Analisis stabilitas dan gerakan *rolling* pada model kapal menggunakan parameter tetap yaitu, LOA, LPP, B, T, H dan Vs. Parameter peubah yaitu, kondisi pembebanan jumlah penumpang, sudut masuk gelombang (*heading*) pada 0° (*stern*), 45° (*stern quartering*), 90° (*beam*), 135° (*bow quartering*) hingga 180° (*head*), dan tinggi gelombang di perairan Laut Jawa yaitu 0,5 m, 1,0 m, dan 1,25 m.

Analisis stabilitas dilakukan dari jumlah penumpang pada sarat maksimum, kemudian dengan beberapa kondisi penambahan penumpang yaitu 25%, 50%, 75%, dan 100%, lalu dilihat dampaknya pada perubahan tinggi sarat dan stabilitas kapal. Kapal akan dianalisis sampai ditetapkan kondisi penambahan penumpang yang memiliki standar kriteria sesuai *IMO Resolution MSC. 267 (85)*. Analisis stabilitas ditinjau dari kurva lengan penagak (GZ).

Analisis gerakan *rolling* untuk mendapatkan hasil sesuai kriteria *RMS of Roll*, *RMS lateral acceleration at Bridge*, dan *RMS of vertical acceleration at Bridge* pada standar Nordforsk 1987. Untuk itu, maka ditentukan 8 *remote location* di *deck* kapal, yaitu A, B, D, E, G, H, J, dan K. *Remote location* diperlukan untuk mendapatkan nilai *Relative Vertical Acceleration* dan *Lateral (due to roll) acceleration*.



Gambar 4. Tampak Atas Pembagian *Remote Location*

2.3. Stabilitas dan Kelaiklautan Kapal

Stabilitas kapal adalah kemampuan kapal untuk kembali ke posisi semula (normal) dari posisi miring (*heeling*) setelah mendapat gaya-gaya sebagai akibat dari faktor eksternal yaitu angin dan gelombang serta faktor internal yaitu perubahan distribusi muatan dalam kapal [3].

Kelaiklautan kapal adalah keadaan kapal yang memenuhi persyaratan keselamatan kapal, pencegahan pencemaran perairan dari kapal, pengawakan, garis muat, pemuatan, kesejahteraan awak kapal dan kesehatan penumpang, status hukum kapal, manajemen keselamatan dan pencegahan pencemaran dari kapal, dan

manajemen keamanan kapal untuk berlayar di perairan tertentu [4].

Sesuai dengan *stability criteria* yang tercantum pada *IMO Resolution MSC.267(85) Adoption of The International Code on Intact Stability 2008*, mensyaratkan ketentuan-ketentuan sebagai berikut [5] :

Tabel 3. Kriteria Stabilitas *IMO Resolution MSC.267(85)*

Code	Criteria	Limit	Unit
267 (85) Ch2	Area 0 to 30	> 0,055	m.rad
267 (85) Ch2	Area 0 to 40	> 0,090	m.rad
267 (85) Ch2	Area 30 to 40	> 0,030	m.rad
267 (85) Ch2	Max GZ at 30 or greater	≥ 0,200	M
267 (85) Ch2	Angle of maximum GZ	≥ 25.0	Deg
267 (85) Ch2	Initial GMt	≥ 0,150	M
3.1 Passenger Ship	Passenger crowding: angle of equilibrium	≤ 10,0	deg
3.1 Passenger Ship	Turning: angle of equilibrium	≤ 10,0	deg

2.4. Gerakan *Rolling*

Rolling adalah gerakan berupa olengan ke arah *starboard-portside*. Stabilitas terjadi ketika kapal mengalami *rolling* atau *trimming*, sehingga kapal akan kembali ke posisi semula (normal) [3]. Persamaan gerakan *rolling* dinyatakan [6] :

$$a \frac{d^2 \theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} + c\theta = M_0 \cos \omega_e t \quad (1)$$

Dimana $a(d^2 \theta / dt^2)$ adalah momen inersia, $b(d\theta / dt)$ adalah momen *damping*, $c\theta$ adalah momen *restoring*, dan $M_0 \cos \omega_e t$ adalah *exciting force*.

2.4.1. Efek Resonansi Gerakan *Rolling*

Resonansi terjadi ketika periode gelombang mendekati periode *rolling* natural kapal yang mengakibatkan amplitudo *roll* yang tinggi [7]. Dapat dikatakan jika frekuensi ayunan paksa lebih besar dari frekuensi ayunan natural atau *rolling* kapal, yang akan menurun dan memaksa badan kapal untuk berayun atau beroleng dengan olengan yang cukup besar [8]. Fenomena kehilangan stabilitas dapat terjadi dan kapal tenggelam jika kapal mengalami olengan ekstrem terus menerus akibat resonansi.

2.5. Response Amplitude Operator (RAO)

Respon gerakan kapal terhadap gelombang reguler dinyatakan dalam RAO, dimana RAO adalah perbandingan antara amplitudo gerakan kapal (baik translasi maupun rotasi) terhadap amplitudo gelombang pada frekuensi tertentu. Metode untuk menghitung nilai RAO pada penelitian ini menggunakan *strip method*.

RAO untuk gerakan translasi merupakan perbandingan langsung antara amplitudo gerakan kapal dengan amplitudo gelombang yang keduanya dinyatakan dalam satuan panjang (lihat Persamaan 2). Sedangkan RAO untuk gerakan rotasi merupakan perbandingan antara amplitudo gerakan rotasi (dalam radian) terhadap kemiringan gelombang yang merupakan perkalian angka gelombang, $k_w = \omega^2/g$ dengan amplitudo gelombang (lihat Persamaan 3).

$$RAO = \frac{Z_0}{\zeta_0} \quad (m/m) \quad (2)$$

$$RAO = \frac{\theta_0}{k_w \zeta_0} = \frac{\theta_0}{(\omega^2/g)\zeta_0} \quad (rad/rad) \quad (3)$$

Gelombang laut adalah gelombang acak sehingga respon kapal terhadap gelombang reguler dinyatakan dalam RAO tidak dapat menggambarkan respon kapal pada keadaan sesungguhnya di laut. Untuk mendapatkan respon gerakan kapal terhadap gelombang acak dapat digambarkan menggunakan spektrum respon dengan mengalikan spektrum gelombang (S_ζ) dengan RAO^2 (lihat Persamaan 4) [9].

$$S_{\zeta r}(\omega) = RAO^2 \times S_\zeta(\omega) \quad (4)$$

2.6. Spektrum Gelombang

Spektrum gelombang yang digunakan dalam penelitian ini adalah JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) seperti pada Persamaan 5 [10]. Tinggi gelombang signifikan (H_s) yang digunakan antara 0,5-1,25 m yang termasuk dalam kondisi perairan *Slight Waters* berdasarkan tipe gelombang *WMO Sea State Code*.

$$S_{JONSWAP\zeta}(\omega) = 0,658 S_{ITTC\zeta}(\omega) C(\omega) \quad (5)$$

$$C(\omega) = 3,3 \uparrow \exp \left[\frac{-1}{2\sigma^2} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - 1 \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$\sigma = 0,07 \text{ untuk } \omega < \omega_0; \sigma = 0,09 \text{ untuk } \omega > \omega_0 \text{ dan } \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} \quad (7)$$

Dimana ω adalah frekuensi gelombang dalam rad/s. Spektrum gelombang (S_w) yang dihasilkan sangat bergantung pada nilai frekuensi gelombang. Akibat pengaruh kecepatan kapal dan sudut datang gelombang, maka frekuensi gelombang insiden (ω_w) akan berubah menjadi frekuensi gelombang papasan atau *encountering wave frequency* (ω_e). Gelombang digunakan untuk membuat spektrum gelombang papasan (S_e). Untuk dapat menghitung frekuensi gelombang papasan dapat menggunakan Persamaan 8.

$$\omega_e = \left(1 - \frac{\omega v}{g} \cos \mu \right) \quad (8)$$

Dimana ω_e adalah frekuensi gelombang papasan dalam rad/s, ω_w adalah frekuensi gelombang dalam rad/s, v adalah kecepatan kapal dalam m/s, g adalah percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$) [9].

2.7. Root Mean Square (RMS)

Luasan di bawah kurva spektrum respon dinyatakan dalam m_0 (lihat Persamaan 9). Jika nilai akar kuadrat atau RMS dari masing-masing amplitudo gerakan (ζ) dinyatakan dalam $\sqrt{m_0}$, maka untuk mendapatkan nilai rata amplitudo dinyatakan dalam Persamaan 10. Kemudian untuk mendapatkan amplitudo signifikan atau disebut dengan rata-rata dari 1/3 amplitudo tertinggi dinyatakan dalam Persamaan 11.

$$m_0 = \int_0^\infty S_{\zeta r}(\omega) d\omega \quad (9)$$

$$(\zeta)_{av} = 1,253 \sqrt{m_0} \quad (10)$$

$$(\zeta)_s = 2 \sqrt{m_0} \quad (11)$$

Persamaan 12 dan 13 merupakan luasan spektrum respon kecepatan dan percepatan yang dinyatakan dalam m_2 dan m_4 . RMS kecepatan dan percepatan dari setiap gerakan tersebut dinyatakan dalam $\sqrt{m_2}$ dan $\sqrt{m_4}$. Selanjutnya metode untuk menghitung kecepatan dan percepatan rata-rata maupun signifikan dapat menggunakan Persamaan 10 dan 11 dengan mengganti nilai RMS-nya [9].

$$m_2 = \int_0^\infty \omega^2 S_{\zeta r}(\omega) d\omega \quad (12)$$

$$m_4 = \int_0^\infty \omega^4 S_{\zeta r}(\omega) d\omega \quad (13)$$

2.8. Standar Kriteria Olah Gerak

Analisis gerakan *rolling* menyesuaikan standar kriteria *seakeeping* tergantung dari jenis kapal. Standar kriteria *Nordforsk* 1987 mensyaratkan ketentuan sebagai berikut [11].

Tabel 4. Standar Kriteria *Nordforsk* 1987

Descriptions	Merchant Ships
RMS of vertical acceleration at FP	0,275 g ($L \leq 100$ m) 0,050 g ($L \leq 330$ m)
RMS of vertical acceleration at Bridge	0,15 g
RMS of lateral acceleration at Bridge	0,12 g
RMS of Roll	6,0 deg
Probability of Slamming	0,03 ($L \leq 100$ m) 0,01 ($L \leq 300$ m)
Probability of Deck Wetness	0,05

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Stabilitas

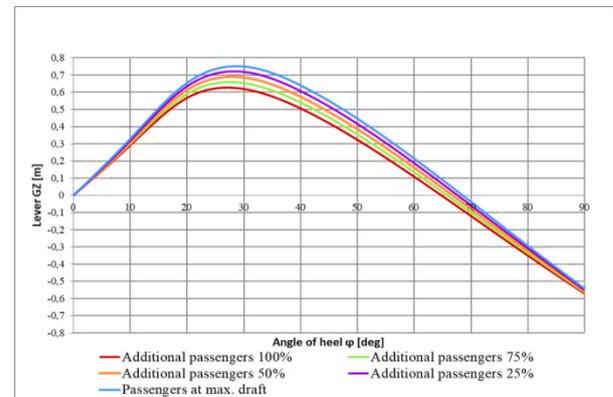
Hasil analisis stabilitas kapal menunjukkan pada sarat maksimum, yaitu 1,2 m kapal ternyata hanya mampu memuat 251 penumpang. Pada penambahan 25% penumpang menjadi 314 orang, terjadi kenaikan sarat 3,6 cm. Pada penambahan 50% penumpang menjadi 377 orang, terjadi kenaikan sarat 7,3 cm. Pada penambahan 75% penumpang menjadi 439 orang, terjadi kenaikan sarat 10,9 cm. Pada penambahan 100% penumpang menjadi 502 orang, terjadi kenaikan sarat 14,5 cm. Hal ini membuktikan bahwa penambahan jumlah penumpang linier dengan kenaikan sarat kapal.

Kriteria 3.1.1 *Passenger crowding : angle of equilibrium* adalah kondisi ketika penumpang berkerumun di satu sisi kapal, yang dihitung dengan *software Maxsurf Stability*. Akan dihitung sudut kemiringan yang dihasilkan dari perhitungan jumlah penumpang, berat penumpang, dan jarak transversal dari *centre line* lokasi penumpang berada (*pass. crowding arm: $nPass M / disp. D \cos^n \pi$*). Diestimasi jarak transversal dari *center line* adalah 1,3 m, yaitu setengah dari lebar *deck* kapal, berat penumpang 75 kg, dan jumlah penumpang sesuai kondisi pembebanan. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 5, 6, 7, 8, dan 9.

Kriteria 3.1.2 *Turning : angle of equilibrium* adalah kondisi ketika kapal berbelok. Lengan kemiringan berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan kapal ketika belok dan berbanding

terbalik dengan radius dari lingkaran belokan (*turn arm: $a v^2 / (R g) h \cos^n \pi$*) [12]. Dimana a adalah konstanta (1,02), v adalah kecepatan kapal 11 knot, h adalah nilai KG-sarat rata-rata/2, R adalah radius belokan. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 5, 6, 7, 8, dan 9.

Berikut adalah grafik dan hasil analisis stabilitas kapal pada sarat maksimum dan semua kondisi penambahan penumpang.



Gambar 5. Kurva Lengan GZ Hasil Analisis Stabilitas

Tabel 5. Hasil Perhitungan Stabilitas Penumpang Sarat Maksimum

Criteria	Limit	Unit	Actual	Status
Area 0 to 30	3.1513	m.deg	13.8699	Pass
Area 0 to 40	5.1566	m.deg	20.9308	Pass
Area 30 to 40	1.7189	m.deg	7.0608	Pass
Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.750	Pass
Angle of maximum GZ	25.0	deg	29.1	Pass
Initial GMt Passenger crowding: angle of equilibrium	0.150	m	1.878	Pass
Turning: angle of equilibrium	10.0	deg	6.8	Pass
Turning: angle of equilibrium	10.0	deg	0.5	Pass

Tabel 6. Hasil Perhitungan Stabilitas Penambahan Penumpang 25%

Criteria	Limit	Unit	Actual	Status
Area 0 to 30	3.1513	m.deg	13.4004	Pass
Area 0 to 40	5.1566	m.deg	20.1327	Pass
Area 30 to 40	1.7189	m.deg	6.7323	Pass
Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.718	Pass
Angle of maximum GZ	25.0	deg	28.2	Pass
Initial GMt Passenger crowding: angle of equilibrium	0.150	m	1.814	Pass
Turning: angle of equilibrium	10.0	deg	8.4	Pass

Turning: angle of equilibrium	10.0	deg	0.5	<i>Pass</i>
-------------------------------	------	-----	-----	-------------

Tabel 7. Hasil Perhitungan Stabilitas Penambahan Penumpang 50%

Criteria	Limit	Unit	Actual	Status
Area 0 to 30	3.1513	m.deg	12.9234	<i>Pass</i>
Area 0 to 40	5.1566	m.deg	19.3200	<i>Pass</i>
Area 30 to 40	1.7189	m.deg	6.3966	<i>Pass</i>
Max GZ at 30 or greater	0.200	M	0.686	<i>Pass</i>
Angle of maximum GZ	25.0	Deg	28.2	<i>Pass</i>
Initial GMt	0.150	M	1.754	<i>Pass</i>
Passenger crowding: angle of equilibrium	10.0	deg	9.9	<i>Pass</i>
Turning: angle of equilibrium	10.0	deg	0.6	<i>Pass</i>

Tabel 8. Hasil Perhitungan Stabilitas Penambahan Penumpang 75%

Criteria	Limit	Unit	Actual	Status
Area 0 to 30	3.1513	m.deg	12.4455	<i>Pass</i>
Area 0 to 40	5.1566	m.deg	18.5045	<i>Pass</i>
Area 30 to 40	1.7189	m.deg	6.0590	<i>Pass</i>
Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.653	<i>Pass</i>
Angle of maximum GZ	25.0	deg	27.3	<i>Pass</i>
Initial GMt	0.150	m	1.697	<i>Pass</i>
Passenger crowding: angle of equilibrium	10.0	deg	11.3	<i>Fail</i>
Turning: angle of equilibrium	10.0	deg	0.6	<i>Pass</i>

Tabel 9. Hasil Perhitungan Stabilitas Penambahan Penumpang 100%

Criteria	Limit	Unit	Actual	Status
Area 0 to 30	3.1513	m.deg	11.9544	<i>Pass</i>
Area 0 to 40	5.1566	m.deg	17.6643	<i>Pass</i>
Area 30 to 40	1.7189	m.deg	5.7098	<i>Pass</i>
Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.619	<i>Pass</i>
Angle of maximum GZ	25.0	deg	27.3	<i>Pass</i>
Initial GMt	0.150	m	1.641	<i>Pass</i>
Passenger crowding: angle of equilibrium	10.0	deg	12.7	<i>Fail</i>
Turning: angle of equilibrium	10.0	deg	0.6	<i>Pass</i>

Penambahan penumpang menyebabkan kenaikan *displacement*, garis air muat, dan sarat kapal. Kenaikan *displacement* berefek pada naiknya titik apung kapal (B) karena meningkatnya gaya tekan ke atas, yang bisa ditinjau dari nilai KB (*keel to buoyancy*).

Ketika muatan ditambahkan ke atas kapal, titik berat (G) kapal akan bergerak langsung menuju titik berat (G) dari muatan yang ditambahkan [3]. Pada Gambar 5 terlihat bahwa semakin besar persentase penambahan penumpang, maka semakin menurunnya nilai lengan GZ (lengan penegak) dan nilai GMT (*transverse of metacentric height*). Hal ini dikarenakan titik berat kapal (G) yang merangkak naik ke arah titik berat muatan, membuat jarak antara titik berat (G) dan titik metasentra (M) mengecil. Lengan penegak merupakan fungsi dari nilai GM. Apabila nilai GM kapal besar, maka nilai GZ akan besar pula sehingga momen penegaknya juga besar. Nilai GM yang kecil menyebabkan kapal mempunyai momen penegak yang kecil, yang mana hal ini mengurangi stabilitas kapal. Nilai GM juga berpengaruh terhadap periode *rolling*. Nilai GM yang besar mengakibatkan kapal mempunyai periode *rolling* yang pendek dengan percepatan tinggi. Kondisi ini seringkali dianggap tidak nyaman oleh kebanyakan orang.

Pergeseran letak beban secara vertikal dapat berpengaruh terhadap stabilitas kapal. Muatan yang dipindahkan secara transversal dapat mengurangi stabilitas saat berpindah ke sisi yang sama dengan letak muatan [12]. Posisi penumpang yang berkerumun di satu sisi kapal mempengaruhi titik TCG (*transverse centre of gravity*) mengakibatkan kapal mengalami *list* (oleng) ke sisi tersebut dengan sudut *equilibrium* yang berbeda-beda.

Berdasarkan kriteria yang telah ditetapkan diperoleh hasil perhitungan yang menunjukkan bahwa hampir seluruh kondisi jumlah penumpang yang ditinjau kapal memiliki kriteria stabilitas yang baik, kecuali kondisi jumlah penumpang 75%-100%. Hasil tersebut dapat dilihat pada Tabel 8 dan 9. Berdasarkan kondisi tersebut direkomendasikan batas maksimum penumpang yang boleh diangkut diatas kapasitas maksimum rencana adalah sebesar 50% dari kapasitas maksimum yang dimaksud. Besarnya jumlah tambahan penumpang tersebut adalah 126 orang, sehingga diperoleh jumlah total 377 orang.

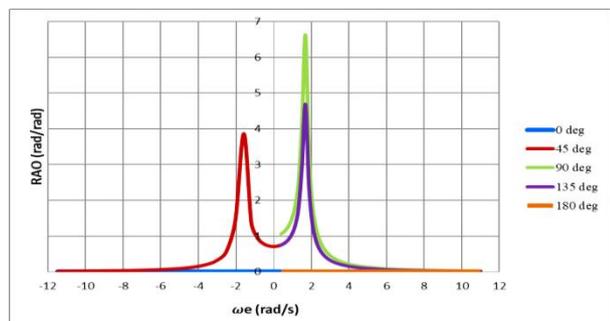
Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan *angle of equilibrium* kapal 18,3° untuk kondisi *overload*, penambahan penumpang 50% [13]. Perbedaan ini terjadi karena selain bentuk lambung kapal, juga akibat jumlah penumpang

dan jarak dari *center line* ke pusat massa dari kerumunan penumpang di satu sisi kapal. Sehingga, *heeling arm* yang terjadi melebihi *righting arm* (GZ) dan kapal terbalik (*capsize*).

3.2. Analisis Gerakan *Rolling*

3.2.1. Hasil Perhitungan RAO

Respon gerakan kapal terhadap gelombang reguler digambarkan dalam Gambar RAO. Respon gerakan kapal dikatakan minimum ketika puncak dari RAO minimum [14].



Gambar 6. RAO *Rolling*

Gambar 6 menunjukkan RAO *rolling* pada sudut 0° dan 180° bernilai 0. Sedangkan pada sudut masuk gelombang 90° memiliki puncak RAO tertinggi.

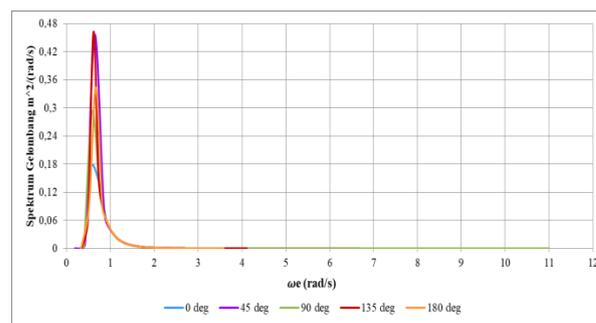
Puncak kurva RAO yang tinggi menandakan amplitudo yang besar. Resultan gaya akibat perubahan tekanan hidrodinamis yang bekerja pada seluruh permukaan badan kapal tegak lurus dengan permukaan gelombang pada sudut 90° (arah *beam seas*), yang dikemukakan oleh William Froude pada persamaan *rolling* dengan menambahkan fungsi gaya tersebut [7]. Hasil penelitian sebelumnya diterangkan bahwa damping yang kecil dapat memberikan respon *roll* dengan amplitudo yang besar [15]. Sementara damping yang besar karena aliran fluida dari dalam dan luar tangki dan kompartemen kapal berefek terhadap respon *roll* yang rendah [16].

Frekuensi gelombang papasan mengarah ke nilai negatif pada sudut 45° (*quartering seas*). Ketika kecepatan gelombang lebih kecil dari kecepatan kapal dikali *cosinus* dari sudut gelombang papasan, ($V_w < V_s \cos\beta$), frekuensi gelombang papasan negatif dan kapal bergerak mendekati gelombang, namun tidak menimbulkan masalah ketika mengintegrasikan spektrum [17].

3.2.2. Spektrum Gelombang JONSWAP

Spektrum gelombang JONSWAP sering digunakan untuk menggambarkan perairan pesisir

dan selalu memiliki tinggi, puncak lebih sempit dari spektrum ITTC [10].

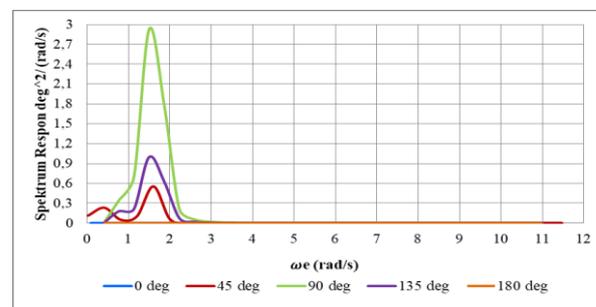


Gambar 7. Spektrum Gelombang JONSWAP H_s 1,25 m T_m 8,360 s

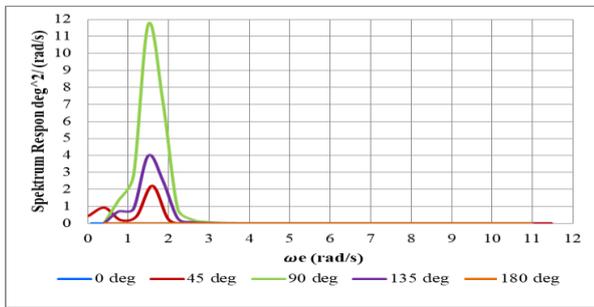
Gambar 7 menunjukkan perbedaan nilai spektrum gelombang sesuai dengan sudut heading seperti yang dijelaskan pada persamaan 5, 6, dan 7, bahwa sudut heading dan kecepatan kapal mempengaruhi nilai spektrum gelombang. Tinggi spektrum gelombang berbanding terbalik dengan frekuensi gelombang papasan. Semakin kecil frekuensi gelombang papasan, semakin tinggi spektrum gelombang. Jika frekuensi pada puncak spektrum gelombang papasan berdekatan atau bahkan sama dengan frekuensi pada puncak RAO, maka akan terjadi resonansi yaitu meningkatnya respon kapal dengan signifikan pada frekuensi tersebut yang akan tergambar pada kurva spektrum respon [9].

3.2.3. Spektrum Respon *Roll*

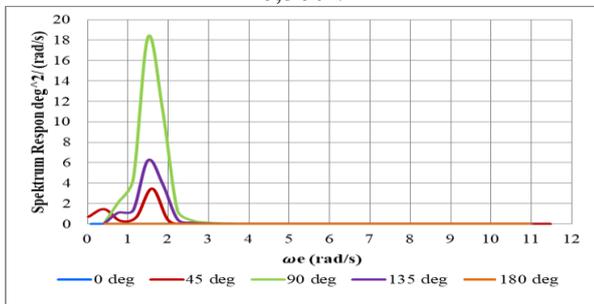
Peristiwa resonansi *rolling* dapat ditentukan dari kurva spektrum respon *roll* pada tiap tinggi gelombang.



Gambar 8. Spektrum Respon *Roll* H_s 0,5 m T_m 8,360 s



Gambar 9. Spektrum Respon *Roll* H_s 1,0 m T_m 8,360 s



Gambar 10. Spektrum Respon *Roll* H_s 1,25 m T_m 8,360 s

Gambar 8, 9, dan 10 menunjukkan adanya dua puncak pada kurva spektrum respon *roll* pada sudut 45°, 90°, dan 135° pada penambahan penumpang 50%, yang mengindikasikan tidak terjadinya peristiwa resonansi *rolling*. Puncak kurva pertama menggambarkan spektrum gelombang papasan dan puncak kurva kedua adalah puncak frekuensi dimana frekuensi natural bekerja. Frekuensi pada puncak spektrum gelombang papasan dan puncak frekuensi tidak saling berdekatan dilihat dari Gambar 8, 9, dan 10.

Puncak kurva pertama berada pada frekuensi sekitar 0,4 rad/s dan puncak kurva kedua berada pada frekuensi 1,6 rad/s, terdapat selisih sebesar 1,2 rad/s pada sudut 45°. Sedangkan pada sudut 90° dan 135°, puncak kurva pertama berada pada frekuensi sekitar 0,8 rad/s dan puncak kurva kedua berada pada frekuensi sekitar 1,5 rad/s, terdapat selisih sebesar 0,7 rad/s. Perbedaan ini dikarenakan frekuensi penggambaran dengan absis ω_e (*encounter frequency*/frekuensi papasan).

3.2.4. Hasil Perhitungan RMS

Kriteria *Nordforsk* 1987 meninjau dari nilai RMS yang dihasilkan. Berikut adalah hasil perhitungan *RMS of Roll*, *RMS lateral acceleration at Bridge*, dan *RMS of vertical acceleration at Bridge* dari semua sudut masuk terhadap semua tinggi gelombang.

Tabel 10. Hasil Perhitungan *RMS of Roll*

Wave Heading (deg)	Limit	Unit	Wave Height (m)		
			0,5	1,0	1,25
0	6.0	deg	0	0	0
45	6.0	deg	0,70	1,40	1,74
90	6.0	deg	1,60	3,19	3,99
135	6.0	deg	0,93	1,86	2,32
180	6.0	deg	0	0	0

Tabel 11. Hasil Perhitungan *RMS of vertical acceleration at Bridge* H_s 1,25 m

Point	Limit (g)	Wave Heading (deg)				
		0	45	90	135	180
A	0.15	0,010	0,006	0,039	0,081	0,107
B	0.15	0,010	0,008	0,046	0,090	0,107
D	0.15	0,012	0,003	0,025	0,077	0,136
E	0.15	0,012	0,008	0,034	0,095	0,136
G	0.15	0,011	0,004	0,028	0,101	0,143
H	0.15	0,011	0,009	0,036	0,095	0,143
J	0.15	0,012	0,005	0,030	0,103	0,148
K	0.15	0,012	0,008	0,038	0,097	0,148

Tabel 12. Hasil Perhitungan *RMS of lateral acceleration at Bridge* H_s 1,25 m

Point	Limit (g)	Wave Heading (deg)				
		0	45	90	135	180
A	0.12	0	0,0038	0,0146	0,0091	0
B	0.12	0	0,0038	0,0146	0,0091	0
D	0.12	0	0,0038	0,0147	0,0091	0
E	0.12	0	0,0038	0,0147	0,0091	0
G	0.12	0	0,0038	0,0147	0,0091	0
H	0.12	0	0,0038	0,0147	0,0091	0
J	0.12	0	0,0038	0,0147	0,0091	0
K	0.12	0	0,0038	0,0147	0,0091	0

Tabel 10 menunjukkan nilai *RMS of Roll* dari sarat diatas maksimum meningkat seiring naiknya tinggi gelombang. Nilai tertinggi ada pada sudut 90° (*beam seas*) dengan tinggi gelombang 1,25 m, yaitu 3,99 deg.

Tabel 11 adalah hasil perhitungan *RMS of vertical acceleration at Bridge* pada semua *remote location* dan sudut masuk gelombang. Pada H_s 0,5 m berada di kisaran nilai 0,001-0,059 g. Pada H_s 1,0 m berada di kisaran nilai 0,002-0,118 g. Pada H_s 1,25 m berada di kisaran nilai 0,003-0,148 g. Nilai tertinggi yaitu 0,148 g dicapai titik J dan K pada sudut 180° (*head seas*), yang mendekati limit kriteria, namun memenuhi standar.

Sedangkan Tabel 12 adalah hasil perhitungan *RMS lateral acceleration at Bridge* semua sudut masuk gelombang. Pada H_s 0,5 m berada di kisaran nilai 0-0,0058 g. Pada H_s 1,0 m berada di kisaran nilai 0-0,0117 g. Pada H_s 1,25 m berada di kisaran nilai 0-0,0147 g. Nilai tertinggi yaitu 0,0147 g dicapai titik E, G, H, J, dan K, pada sudut

90° (*beam seas*) dan semua hasil memenuhi standar kriteria.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian yang dilakukan dari analisis stabilitas menunjukkan diperoleh tambahan jumlah penumpang dari kapasitas maksimum sebesar 50% yaitu dari 251 orang menjadi 377 orang atau terjadi penambahan 126 orang. Tidak direkomendasikan menambahkan penumpang melebihi 377 orang, karena dapat mengakibatkan kapal terbalik (apabila penumpang berada di salah satu sisi kapal, kriteria stabilitas IMO 3.1.1), atau dalam kasus terburuk tenggelam.

Analisis gerakan *rolling* menunjukkan tidak terjadi peristiwa resonansi gerakan *rolling* yang dapat membahayakan keselamatan kapal sebagaimana digambarkan dalam Gambar spektrum respon.

Hasil perhitungan pada *remote location* menunjukkan *RMS of Roll* tertinggi dicapai oleh sudut 90°, yaitu 3,99 deg. *RMS vertical acceleration at Bridge* tertinggi dicapai sudut 180° dengan nilai 0,148 g. *RMS lateral acceleration at Bridge* tertinggi dicapai sudut 90° dengan nilai 0,0147 g. Semua hasil perhitungan RMS yang dianalisis dipenuhi pada semua sudut masuk dan tinggi gelombang dalam kriteria Nordforsk 1987.

Hasil penelitian memberikan kesimpulan bahwa KM. Nusantara 76 masih dapat memuat penumpang dalam kondisi berlebih (*overload*) dengan jumlah maksimum tambahan penumpang 126 orang dengan kondisi kapal masih memenuhi kriteria keselamatan dan kenyamanan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Hafsar, "Analisa Potensi Penyebab Kecelakaan Kapal Motor Penyeberangan di Indonesia," 2008.
- [2] A. Andilala, W. Amiruddin, and A. W. Budi, "Analisa Beban Muatan Maksimum Yang Diperbolehkan Untuk Keselamatan Penumpang Pada Kapal Kharisma Jaya," *J. Tek. Perkapalan, Univ. Diponegoro*, vol. 5, no. 2, pp. 421–430, 2017.
- [3] C. B. Barrass and D. R. Derrett, *Ship Stability for Masters and Mates*, Sixth. Elsevier, 2006.
- [4] "Undang-Undang No. 17 Tahun 2008 tentang Pelayaran."
- [5] International Maritime Organization (IMO), "Resolution MSC.267(85), Adoption of The International Code on Intact Stability," International Maritime

- Organization, 2008.
- [6] R. Bhattacharyya, *Dynamics of Marine Vehicles*. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [7] A. Molland, "The Maritime Engineering Reference Book : A Guide to Ship Design, Construction and Operation," 1st ed., A. Molland, Ed. Elsevier Ltd, 2008, pp. 483, 485–577.
- [8] W. Amiruddin, "Efek Resonansi Gelombang Laut Terhadap Stabilitas Kapal," no. 1, pp. 1–6, 2004.
- [9] M. Iqbal and G. Rindo, "Optimasi Bentuk Demihull Kapal Katamaran Untuk Meningkatkan Kualitas Seakeeping," *Kapal J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 12, no. 1, pp. 19–24, 2015.
- [10] 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)," *Kapal J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 4, no. 3, pp. 562–575, 2016.
- [11] Nordforsk, "Assessment Of Ship Performance In A Seaway: The Nordic Co-Operative Project: 'Seakeeping Performance Of Ships,'" 1987.
- [12] A. Biran and R. L. Pulido, *Ship Hydrostatics and Stability*, Second. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [13] K. S. Iqbal, K. Hasegawa, G. Bulian, M. M. Karim, and Z. I. Awal, "Passenger Ferry Accidents in Bangladesh: Design and Socio-economic Aspects," no. October, 2007.
- [14] G. J. Grigoropoulos, "Hull Form Optimization for Hydrodynamic Performance," *Mar. Technol.*, vol. 41, No. 4, no. October 2004, pp. 167–182, 2014.
- [15] C. SJM, "Prediksi Gerak Desain Awal Kapal Ferry Dengan Metode Teori Strip," *J. Wave, UPT.BPPH-BPPT*, vol. 5, no. 1, pp. 5–12, 2011.
- [16] E. Begovic, G. Mortola, A. Incecik, and A. H. Day, "Experimental Assessment Of Intact And Damaged Ship Motions In Head , Beam And Quartering Seas," *Ocean Eng.*, vol. 72, pp. 209–226, 2013.
- [17] G. E. Hearn and A. V Metcalfe, "Spectral Analysis in Engineering: Concepts and Case Studies," Oxford: Elsevier Ltd, 1995, pp. 161–183.