

Analisa Gerakan Rolling Kapal Bocor Akibat Beban Gelombang Laut Pada Kapal *Bulk Carrier*

Teguh Putranto *, Dedi Budi Purwanto

Departemen Teknik Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, Indonesia 60111

Abstrak

Stabilitas menjadi syarat utama kapal yang laik layar. Artikel ini memuat analisa gerakan rolling pada kapal bulk carrier yang mengalami kebocoran ketika dikenai beban gelombang dengan sudut heading 90° dan 270° dan tinggi gelombang maksimum. Kapal berada pada kondisi muatan full load saat simulasi dan analisa dilakukan dengan skenario terjadi kebocoran pada ruang muatnya. Karena kapal dengan kebocoran kompartemen mengalami kondisi trim dan oleng maka hasil gerakan rolling menunjukkan perbedaan pada setiap arah datang gelombang. 3D diffraction panel method digunakan untuk mendapatkan gerakan rolling kapal sebagai fungsi waktu. Hasil penelitian tanpa efek sloshing menunjukkan bahwa kapal bulk carrier memiliki resiko tenggelam jika terdapat kebocoran pada dua ruang muatnya.

Kata kunci: bulk carrier; rolling; panel method; gelombang; bocor

Abstract

[Title: An Analysis of Rolling Damage Ship Motion Caused by the Wave Load on Bulk Carrier Vessels]
The stability is a key requirement for the ship to sail safely. This article presents an analysis of rolling movements on bulk carrier vessels that have leaked when subjected to wave loads with heading angles of 90° and 270° and maximum wave height. The ship is in full load condition when the simulation and analysis is carried out with a scenario of leakage in the cargo chamber. Because the vessel with compartment leakage has trim and shaky conditions, the results of the rolling motion show differences in each direction the waves come. The 3D diffraction panel method is used to get the rolling motion of the ship as a function of time. The results of the study without sloshing effects showed that the bulk carrier had the risk of sinking if there were leaks in the two cargo chambers.

Keywords: bulk carrier; rolling; panel method; wave; flooding

1. Pendahuluan

Prinsip stabilitas telah dikenalkan sebelumnya oleh Archimedes pada 250 SM (Archimedes, 2002 dan Nowacki, 2007). Namun, prinsip stabilitas pada kapal diperkenalkan pada abad ke 17/18 ketika studi tentang tinggi metasenter atau GM oleh Paul Hoste pada 1698 (Hoste, 1697). Konsep stabilitas ini dikembangkan lebih jauh lagi oleh Pierre Bouguer pada 1746 dengan menitikberatkan konsep stabilitas pada titik metasenter (Bouguer, 1746). Kemudian Leonhard Euler pada tahun 1749 meneliti momen pengembali yang dimiliki oleh

kapal saat gerakan *rolling* (Euler, 1749). Pada tahun 1798, George Atwood mendapati sudut kapal dapat direpresentasikan sebagai kurva GZ (Atwood, 1798).

Pada perairan bergelombang, kapal akan mengalami gerakan translasi maupun rotasi yang bersarnya bergantung pada karakteristik gelombang yang mengenainya (Putranto & Sulisetyono, 2015). Kemampuan kapal dalam mereduksi akibat beban gelombang menjadi perhatian *designer* kapal dalam merancang bentuk badan kapal. Dengan pertimbangan tersebut, perancangan bentuk badan awal akan memberikan efek sebab-akibat pada gerakan kapal (Tzeng, 2009). Pada kasus kapal bocor, kapal akan tenggelam berdasarkan pada jumlah bocornya kompartemen. Akan tetapi, alasan tersebut tidak dapat

*) Penulis Korespondensi.

E-mail: theories@na.its.ac.id

digunakan untuk menentukan waktu kapan kapal tersebut akan tenggelam saat terjadinya awal kebocoran. Waktu yang dibutuhkan oleh kapal untuk tenggelam juga disebabkan oleh karakteristik gelombang. Dengan pertimbangan karakteristik gelombang maka didapatkan gerakan kapal yang bocor terhadap fungsi waktu (Jasionowski, Vassalos, & Scott, 2011). Jumlah kompartemen mempengaruhi keandalan kapal dalam menghadapi kebocoran (Jasionowski, 2012).

Suatu benda dikatakan dalam keadaan seimbang jika jumlah gaya yang bekerja pada benda dan jumlah momen (yang bekerja pada benda) terhadap suatu titik sama dengan nol. Keseimbangan disebut stabil jika setelah pengaruh luar hilang/tidak ada maka benda bergerak kembali ke kedudukan semula (Panunggal, 2008).

Karena kapal mengalami trim terhadap *center of flotation*, tinggi sarat pada *aft*, T_A dan *fore*, T_F mengalami perbedaan (Derret, 2006). Sudut trim didapatkan dari Persamaan 1 dan 2.

$$Trim = T_A - T_F \quad (1)$$

$$Sudut, \theta = \frac{T_A - T_F}{L} \quad (2)$$

Begitu juga untuk sudut oleng yang terbentuk didapatkan dari hubungan antara perbedaan sarat *starboard* dan *portside* dengan lebar kapal. Titik berat suatu benda dirumuskan pada Persamaan 3.

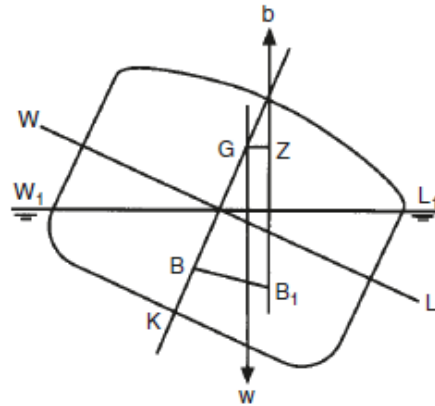
$$x_z, y_z, z_z = \frac{\sum \tau_z}{\sum m_z} \quad (3)$$

dengan :

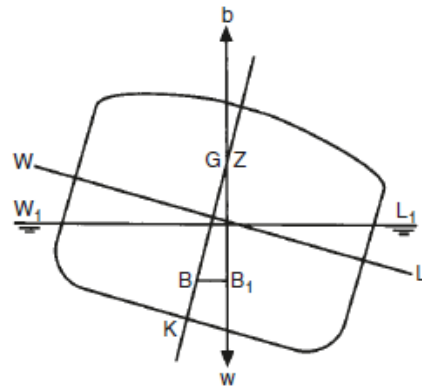
$$\sum \tau_i = \text{total momen berat terhadap masing-masing}$$

$$\sum m_i = \text{total berat yang diangkut sumbu x, y, z}$$

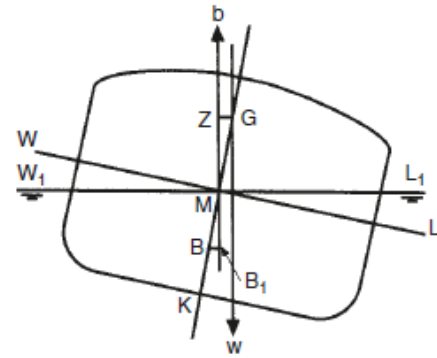
Kapal dinyatakan stabil apabila saat momen gaya angkat berlawanan dengan momen gaya berat terhadap *center of flotation*, Gambar 1 (a). Besarnya sudut *heel* (sudut terhadap *starboard* maupun *portside*) terhadap titik *bouyancy* akan menggeser gaya angkat kearah titik berat. Pada suatu saat, titik *bouyancy* dengan titik berat kapal akan berada pada satu garis vertikal, Gambar 1 (b). Ketika tinggi metasenter awal bernilai negatif, kurva GZ (*righting lever*) juga negatif, maka kapal akan mengalami *capsizing*. Peristiwa ini dapat dilihat pada Gambar 1 (c) (Rawson, 2008).



(a)



(b)

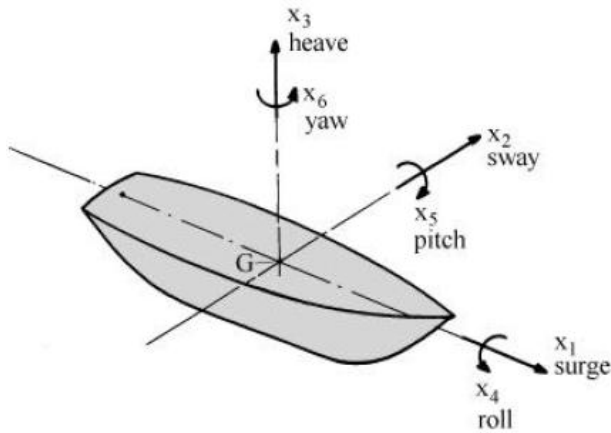


(c)

Gambar 1. Letak titik *bouyancy* terhadap titik berat dengan berbagai kondisi sudut (Derret, 2006)

Kapal yang berlayar pada perairan bergelombang akan mengalami gerakan. Gerakan kapal dibagi menjadi 6 derajat kebebasan meliputi *surge*, *sway*, *heave* untuk gerakan translasi sedangkan *roll*, *pitch*, *yaw* untuk

gerakan rotasi (Putranto & Sulisetyono, 2017). Gerakan-gerakan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Enam derajat kebebasan kapal (Journee, 2010)

Menurut Hukum Newton kedua, persamaan gerakan untuk 6 (enam) derajat kebebasan pada kapal yang dipengaruhi oleh gelombang dapat dilihat pada Persamaan 4.

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ M_{ij} \cdot \ddot{x}_i \right\} = F \quad (4)$$

Karena sebuah sistem linier telah ditentukan pada penelitian ini, maka gaya dan momen pada persamaan ini terdiri dari superposisi:

1. *Hydromechanics force and moment*, yang disebabkan oleh gerakan harmonik dari benda yang kaku di permukaan yang tercelup pada fluida; dan
2. *Exciting wave force and moment*, pada benda yang terbatas dan disebabkan oleh gelombang harmonik yang datang (Putranto, Suastika, & Gunanta, 2017).

Dengan ini, sistem akan bergerak dengan 6 derajat kebebasan di gelombang yang bergantung pada linear *mass damper spring system* dengan koefisien frekuensi bebas dan linear *exciting forces and moments* dimana dapat dilihat pada Persamaan 5.

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ (M_{ij} + a_{ij}) \cdot \ddot{x}_i + b_{ij} \cdot \dot{x}_i + c_{ij} \cdot x_i \right\} \quad (5)$$

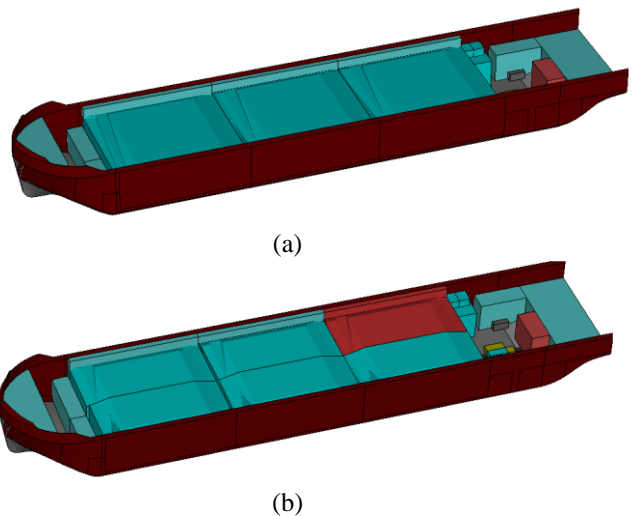
Dalam hal ini, x_i dengan $i = 1,2,3$ adalah translasi G (*surge, sway, heave*) dan x_i dengan $i = 4,5,6$ adalah

rotasi dari axis terhadap G (*roll, pitch, yaw*). Indikasi ij menunjukkan gerakan i *coupling* dengan gerakan j.

2. Metode Penelitian

Proses penelitian ini diawali oleh studi literatur dan perumusan masalah. Ini dilakukan dengan cara mencari bahan pustaka dan mencari permasalahan yang akan diangkat menjadi penelitian kali ini. Kemudian, sebagai bahan analisa, penelitian ini dilakukan dengan membuat studi kasus. Gambar *lines plan* dan data gelombang dibutuhkan untuk membuat model. Kapal *bulk carrier* dijadikan sebagai jenis kapal yang akan dianalisa.

Proses pembuatan model pada *Maxsurf* dilakukan pada penelitian ini. Model kapal ini meliputi desain lambung kapal dan letak kompartemennya. Berat baja kapal didefinisikan secara manual pada program beserta letak titik beratnya. Penentuan kompartemen ini akan mempengaruhi letak titik berat kapal total akibat diberi muatan.



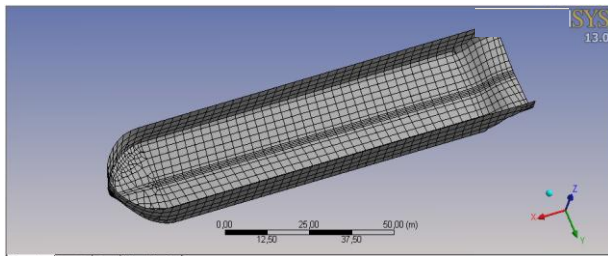
Gambar 3. (a) Kondisi kapal *intact* dan (b) Kondisi kapal *damage* ruang Muat no. 3 (D3)

Pada penelitian ini, muatan di kompartemen akan divariasikan berdasarkan kondisi kapal *intact* dan *damage* seperti dapat dilihat pada Gambar 3. Untuk kondisi *damage*, divariasikan menjadi:

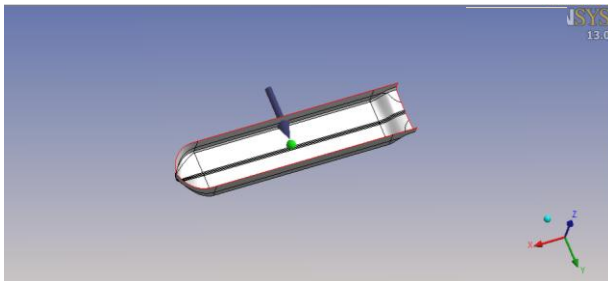
1. Ruang Muat no. 1 (D1);
2. Ruang Muat no. 2 (D2);
3. Ruang Muat no. 3 (D3);
4. Ruang muat no. 1 dan 2 (D4);
5. Ruang muat no. 2 dan 3 (D5); dan
6. Ruang muat no. 1, 2, dan 3 (D6)

Untuk menentukan gerakan *rolling* kapal digunakan *3D Diffraction Package Software*. Pada kasus

kapal tanker pengaruh *sloshng* muatan di ruang muat akibat beban gelombang menjadi perhatian karena pengaruh ini menjadi gaya luar yang dominan. Pada penelitian ini, kapal *bulk carrier* adalah kapal yang mengangkut bukan fluida sehingga apabila kapal bocor dan air masuk ke ruang muat, maka air akan bercampur dengan muatan kapal sehingga pengaruh *sloshing* pada penelitian ini diabaikan. Sebelum melakukan *running* pada model, model harus di *meshing* yang bertujuan untuk membagi model menjadi elemen-elemen kecil. Untuk penentuan elemen, elemen segi empat dilakukan pada pemodelan seperti terlihat pada Gambar 4. Untuk arah datang gelombang, divariasikan menjadi 2 arah yaitu *heading angle* 90^0 dan 270^0 seperti dilihat pada Gambar 5. Gelombang reguler digunakan pada penelitian ini dengan tinggi gelombang 2 m dan periode 7,5 detik.



Gambar 4. Proses *meshing*



Gambar 5. Arah datang gelombang

Setelah proses *running*, didapatkan gerakan *rolling* kapal terhadap fungsi waktu atau *time series*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan kriteria kapal *capsize* pada kondisi kapal *intact* dan *damage*. Untuk itu peraturan SOLAS /CONF.3 - Resolutions of the Conference of Contracting Governments to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 - (November 1995) - Resolution 14 (Lloyd Register Rulefinder, 2007), diambil sebagai rujukan atau acuan untuk gerakan *rolling* kapal yang menyebabkan kapal *capsizing*.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini, akan ditunjukkan hasil dari analisa yang dilakukan dengan model kapal yang telah dijelaskan pada bagian metodologi. Untuk ukuran utama kapal diberikan data seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Ukuran utama kapal

No	Ukuran	Nilai
1	Lwl	134,2 m
2	Lpp	130,1 m
3	B	26,4 m
4	T	5,4 m
5	H	11 m

Pada analisa gerakan *rolling* kapal saat bocor, gelombang yang mengenai kapal diasumsikan sebagai gelombang reguler dengan data gelombang sebagai pada Tabel 2.

Tabel 2. Data gelombang

No	Parameter	Nilai
1	Tinggi gelombang	2 m
2	Periode gelombang	7,5 detik
3	Arah gelombang	$90^0 / 270^0$

Kondisi kapal saat *intact* dan *damage* direkapitulasi pada Tabel 3.

Tabel 3. Kondisi kapal *intact* dan *damage*

	I	D1	D2	D3	D4	D5	D6
A1	0,1	2,8	2,7	2,4	4,6	4,4	5,1
A2	4,2	4,5	4,4	4,1	5,1	4,4	5,7
A3	4,5	4,9	5,1	5,4	5,0	5,6	5,7
A4	4,3	4,8	4,8	4,8	5,1	5,1	5,7
A5	0,2	0,2	0,3	0,5	0	0,5	0
A6	-3	-8	-4	-1	-9	-2	-7

Keterangan:

A1 = *Heel to Starboard degrees*

A2 = *Draft at FP m*

A3 = *Draft ar AP m*

A4 = *Draft at LCF m*

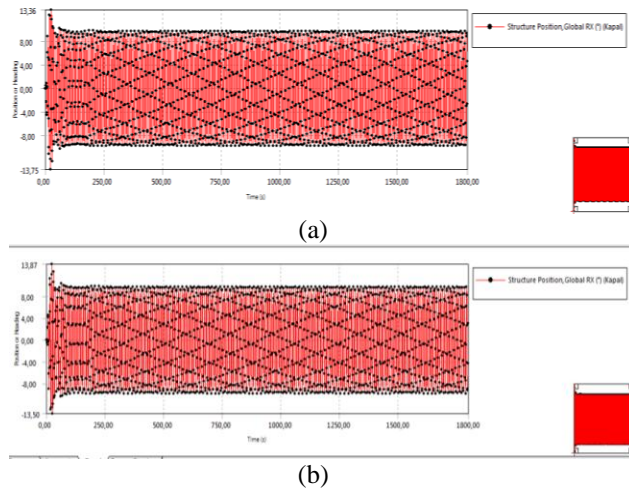
A5 = *Trim angle (+stern) degrees*

A6 = *LCF from Amidship (+forward) m*

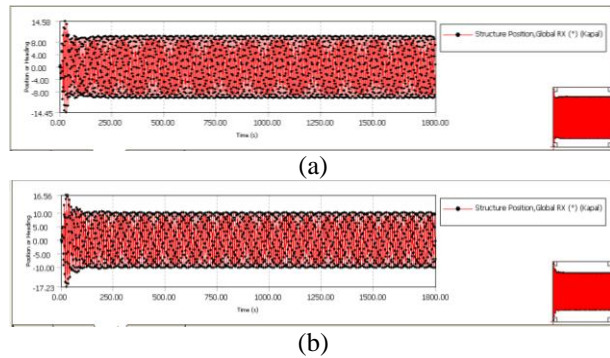
Dari Tabel 3, dapat disimpulkan bahwa terlihat perbedaan titik apung, sudut trim, sudut oleh, perbedaan sarat pada masing-masing kondisi. Untuk nilai berat kapal, berdasarkan hukum Archimedes bahwa berat air yang tercelup adalah sama dengan berat benda tersebut. Oleh karena itu, pada tabel diatas tidak ditunjukkan nilai beratnya akan tetapi berdasarkan nilai-nilai diatas dan dipadukan dengan model kapalnya, maka berat kapal akan dapat ditentukan. *3D Diffraction Package Software*

dapat membaca kondisi seperti yang dijelaskan sebelumnya.

Kondisi pada Tabel 3 sebagai *input* dalam menghitung gerakan *rolling* kapal. Simulasi dilakukan dalam waktu 1800 detik. Gelombang reguler seperti yang dijelaskan pada sebelumnya. Gelombang yang datang dipusatkan pada letak titik pusat apung. Gerakan *rolling* kapal *intact* maupun *damage* dapat dilihat pada Gambar 6 sampai 12.



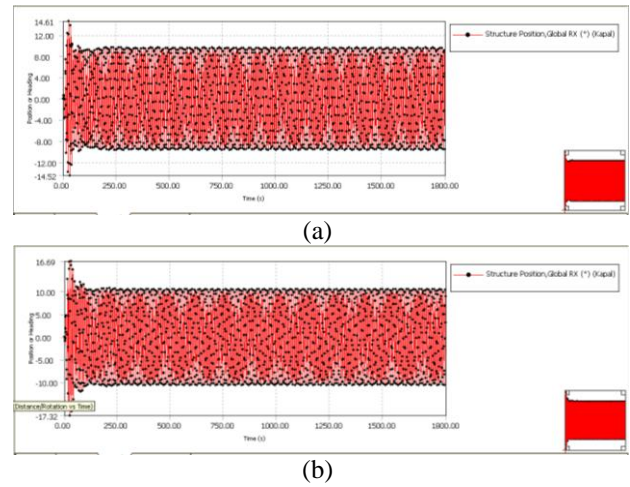
Gambar 6. Gerakan *rolling* (*degree*) terhadap waktu (detik) selama 1800 detik pada kondisi *intact* dan (a) sudut *heading* 90° (b) sudut *heading* 270°



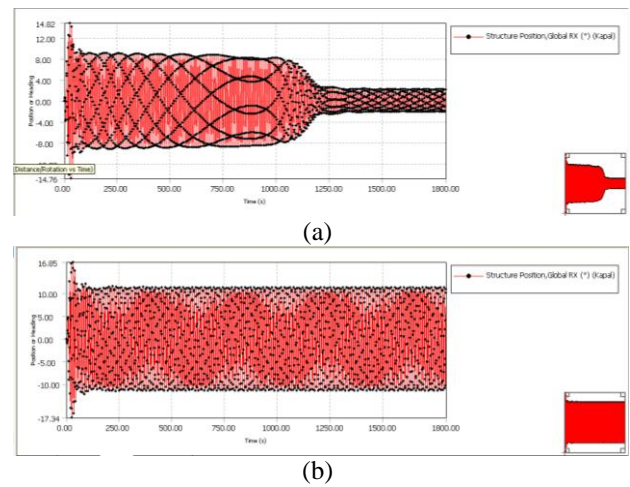
Gambar 7. Gerakan *rolling* (*degree*) terhadap waktu (detik) selama 1800 detik pada kondisi *Damage 1* dan (a) sudut *heading* 90° (b) sudut *heading* 270°

Perilaku grafik yang ditunjukkan diatas memberikan kesimpulan bahwa pengaruh *damage* dapat mempengaruhi kondisi gerakan *rolling* kapal. Selain itu, arah datang gelombang juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sudut oleng kapal. Berdasarkan grafik pada Gambar 6 sampai 12, perilaku grafik secara

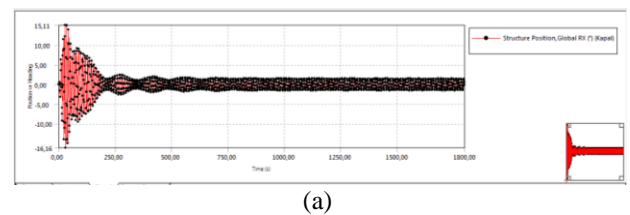
umum menunjukkan reguler saat berada pada detik ke 250 dan seterusnya.

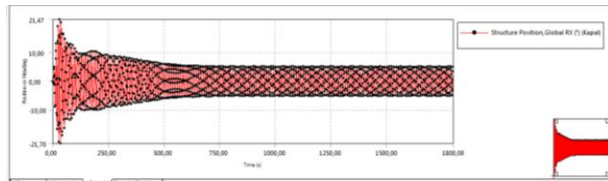


Gambar 8. Gerakan *rolling* (*degree*) terhadap waktu (detik) selama 1800 detik pada kondisi *Damage 2* dan (a) sudut *heading* 90° (b) sudut *heading* -90°



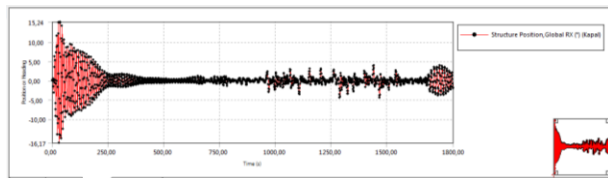
Gambar 9. Gerakan *rolling* (*degree*) terhadap waktu (detik) selama 1800 detik pada kondisi *Damage 3* dan (a) sudut *heading* 90° (b) sudut *heading* 270°



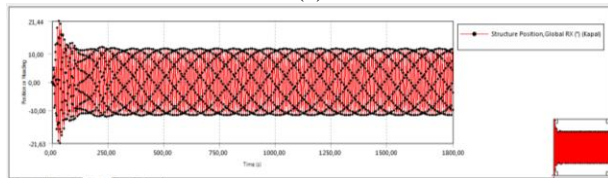


(b)

Gambar 10. Gerakan *rolling* (*degree*) terhadap waktu (detik) selama 1800 detik pada kondisi *Damage 1,2* dan (a) sudut *heading* 90^0 (b) sudut *heading* 270^0

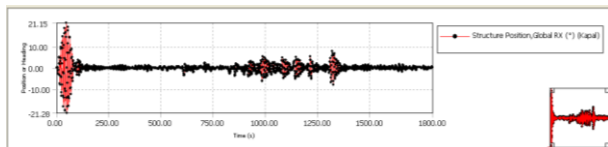


(a)

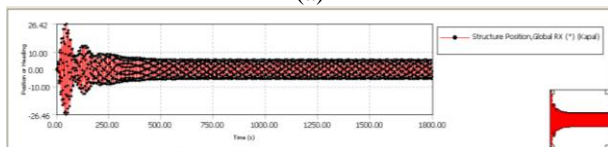


(b)

Gambar 11. Gerakan *rolling* (*degree*) terhadap waktu (detik) selama 1800 detik pada kondisi *Damage 2, 3* dan (a) sudut *headin* 90^0 (b) sudut *heading* 270^0



(a)



(b)

Gambar 10. Gerakan *Rolling* (*Degree*) Terhadap Waktu (Detik) Selama 1800 Detik Pada Kondisi *Damage 1, 2, 3* dan (a) Sudut *Heading* 90^0 (b) Sudut *Heading* 270^0

Tabel 4 menunjukkan sudut *roll* maksimum yang terjadi pada arah *portside* dan *starboard*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan kriteria kapal yang *capsizing* akibat gelombang dan kondisi *intact* dan *damaganya*. Untuk menentukan kriteria tersebut, digunakan SOLAS/CONF.3 (Lloyd Register Rulefinder, 2007) yang mengatur tentang persyaratan stabilitas kapal. Berdasarkan peraturan SOLAS (Lloyd Register

Rulefinder, 2007), kapal yang termasuk kriteria *capsizing* adalah kapal yang melampaui sudut roll sebesar 20^0 . Sehingga kondisi kapal yang termasuk kriteria *capsizing* adalah sebagai berikut:

1. *Damage CG1,2 WB1,2;*
2. *Damage CG2,3 WB 2,3;* dan *Damage CG1,2,3 WB1,2,3.*

Tabel 4. Rekapitulasi nilai *rolling* (*degree*) pada kondisi maksimum dan minimum

Kondisi	Sudut Oleng	<i>Rolling maximum</i> (<i>degrees</i>) to <i>starboard</i>	<i>Rolling maximum</i> (<i>degrees</i>) to <i>portside</i>
<i>Intact</i>	90^0	13,36	13,75
	-90^0	13,87	13,50
<i>Damage CG1 WB1</i>	90^0	14,58	14,45
	-90^0	16,58	17,23
<i>Damage CG2 WB2</i>	90^0	14,61	14,52
	-90^0	16,69	10
<i>Damage CG3 WB3</i>	90^0	14,82	14,76
	-90^0	16,85	17,34
<i>Damage CG1,2 WB1,2</i>	90^0	15,11	16,16
	-90^0	21,47	21,70
<i>Damage CG2,3 WB 2,3</i>	90^0	15,24	16,17
	-90^0	21,44	21,63
<i>Damage CG1,2,3 WB1,2,3</i>	90^0	21,15	21,28
	-90^0	26,42	26,46

4. Kesimpulan

Pada kondisi *intact* maupun *damage*, kapal bulk carrier yang diamati menunjukkan perilaku sudut *rolling* terhadap fungsi waktu mengalami perubahan osilasi yang berbeda dan perubahan osilasi yang relatif sama. Grafik *rolling* terhadap fungsi waktu menunjukkan perilaku reguler pada saat detik ke 250. Berdasarkan peraturan SOLAS (Lloyd Register Rulefinder, 2007), kapal bulk carrier dengan kondisi *Damage CG1,2 WB1,2;* *Damage CG2,3 WB 2,3;* *Damage CG1,2,3 WB1,2,3* masuk kriteria *capsize* karena melampaui sudut roll 20^0 . Hasil penelitian tanpa efek sloshing menunjukkan bahwa kapal bulk carrier memiliki resiko tenggelam jika terdapat kebocoran pada dua ruang muatnya. Penelitian selanjutnya adalah dengan nonlinear-kan koefisien *damping* gerakan *rolling*.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) ITS yang telah mendukung dana untuk riset ini dalam skema Penelitian Pemula 2016.

Daftar Pustaka

- Archimedes (2002). *The Works of Archimedes*, diedit oleh T. Heath, Mineola: Dover.
- Atwood, G. (1798). *A Disquisition on the Stability of Ships*. By George Atwood, Esq. F.R.S, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Volume 88.
- Bouguer, P. (1746). *Traite du Navire de sa Construction et de ses Mouvemens*, Jombert. Paris.
- Euler, L. (1749). *Scientia Navalis seu Tractatus de Construendis ac Dirigendis Navibus*, Volume 2. St. Petersburg.
- Hoste, P. (1697). *Theorie de la construction des vaisseaux (Theory of Ship Construction)*, Arisson & Posule. Lyon.
- Jasionowski, A., Vassalos, D., Scott, A. (2011) *Ship Vulnerability to Flooding*, *Safety At Sea Ltd*. Universities of Glasgow and Strathclyde.
- Jasionowski, A. (2012). *Investigation Into The Safety of Ro-Ro Passenger Ships Fitted With Long Lower Holds – Phase II*, *Research Project 592*. Safety At Sea Ltd.
- Journee, J.M.J., Adegees. (2010). *Theoretical Manual of Strip Theory Program SEAWAY for Windows*. Delft: TU Delft.
- Lloyd Register Rulefinder. (2007). SOLAS/CONF.3. Adopted on 29 November 1995, Annex – Stability requirement pertaining to the agreement.
- Nowacki, H. (2007). *Leonard Euler and The Theory of Ships*. Michigan: Department of Naval Architecture and Marine Engineering University of Michigan.
- Panunggal, P.E. (2008). *Teori Bangunan Kapal I*, Surabaya: Jurusan Teknik Perkapalan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Putranto, T, Sulisetyono, A. (2015). *Analisa Numerik Gerakan dan Kekuatan Kapal Akibat Beban Slamming Pada Kapal Perang Tipe Corvette*, *KAPAL Jurnal Ilmu Pengetahuan & Teknologi Kelautan*, 12(3): 158-164.
- Putranto, T., Suastika, K., Gunanta, J. (2017). *Intact Stability Analysis of Crew Boat with Variation of Deadrise Angle*, *IPTEK Journal of Proceeding Series*, 2: 124-127.
- Putranto, T. and Sulisetyono, A. (2017). *Lift-Drag Coefficient and Form Factor Analyses of Hydrofoil due to The Shape and Angle of Attack*. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12 (21): 11152-11156.
- Rawson, K.J., Tupper. (2008). *Basic Ship Theory*. Ed.5. Vol.1. Butterworth Heinemann.
- Tzeng, C.Y. (2009). *On the Design and Analysis of Ship Stabilizing Fin Controller*, *Journal of Marine Science and Technology*, B(2): 177-124..