

# Analisis *Damage Stability Accomodation Barge* Pada Saat Operasi *Crawler Crane*

Khoiron S. Perdana, M. Murtedjo, dan Eko B. Djatmiko

Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: mas@oe.its.ac.id

**Abstrak**—Setiap tipe kapal yang beroperasi di laut memiliki resiko kecelakaan yang bisa mengakibatkan kebocoran pada bagian tertentu di kapal. Perhitungan stabilitas untuk kondisi tersebut diharuskan menggunakan *damage stability* karena perhitungan *intact stability* dan *floodable length* telah terbukti tidak lagi aman untuk menjamin keselamatan kapal jika terjadi kebocoran. Objek kapal yang akan dianalisis dalam penelitian ini berupa *accommodation barge* dengan *crawler crane* yang melakukan pengangkatan di atas dek. Referensi yang dipakai untuk menghitung *damage stability* adalah IMO A.1023 (26). Perhitungan *damage stability* menggunakan metode *lost buoyancy* dengan bantuan perangkat lunak Hydromax. Dan perhitungan karakteristik gerakan menggunakan metode *added weight*. Berdasarkan IMO A.1023 jumlah kompartemen yang dibocorkan dalam perhitungan *damage stability* hanya memperhitungkan satu kompartemen bocor dalam setiap kasus pembebanan. Respon gerak maksimal terjadi pada gerakan *roll* untuk arah datang gelombang  $90^\circ$  sebesar  $8.031^\circ$ . Di samping itu respon gerak maksimal juga terjadi pada gerakan *pitch* untuk arah datang gelombang  $135^\circ$  dan  $180^\circ$  berturut – turut sebesar  $3.6^\circ$  dan  $4.003^\circ$ . Hasil analisis stabilitas menunjukkan bahwa kondisi kompartemen 4S mengalami kebocoran memiliki stabilitas paling kecil. Pada kondisi kompartemen 4S bocor memiliki *range of stability*  $58.3.6^\circ$ .

**Kata Kunci**—*accommodation barge, crawler crane, damage stability, range of stability, respon gerak.*

## I. PENDAHULUAN

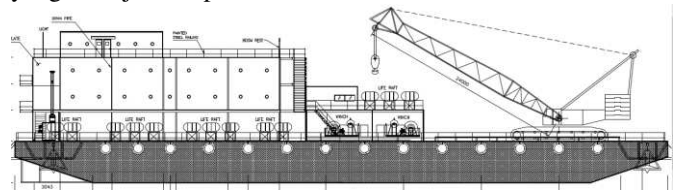
SEMUA tipe kapal memiliki resiko tenggelam jika kehilangan kekedapan, hal itu bisa terjadi karena kapal mengalami kecelakaan, kandas, atau kecelakaan internal kapal itu sendiri seperti ledakan [1]. Setiap kapal selama masa operasinya dapat mengalami kerusakan pada lambung kapal sehingga kapal mengalami *flooding*, yaitu masuknya air laut ke dalam kompartemen kapal karena adanya lubang pada lambung kapal di bawah garis air [2]. Salah satu langkah yang dapat dilakukan untuk mengurangi kemungkinan tenggelamnya kapal karena kebocoran adalah dengan membagi kapal menjadi beberapa ruangan atau kompartemen, yaitu dengan memberikan sekat kedap pada kapal baik secara melintang maupun memanjang [3].

Estimasi perhitungan stabilitas kapal pada tingkatan awal desain sangat penting untuk tingkat keamanan kapal. Enam gerakan (derajat kebebasan) kapal pada kondisi kritis bisa menyebabkan kapal terbalik terutama pada gerakan *rolling* [4]. Untuk struktur terapung yang besar, *roll damping* dihitung

dengan menggunakan teori difraksi/radiasi linear. Sedangkan untuk struktur terapung yang panjang, *roll damping* sangat tidak linear [5]. Naves dan Claudio [6] memperhitungkan pengaruh ketidaklinearan stabilitas *rolling* kapal di *head seas* dengan menggunakan model matematika kopel orde tiga. Interaksi antara *liquid sloshing* di dalam tangki *barge* dan respon gerakan *barge* telah diteliti secara komprehensif melalui program eksperimental [7].

Simonsen [8] melakukan penelitian stabilitas kapal pada kondisi bocor (*damage stability*) dengan memperhitungkan struktur yang mudah rusak akibat kerusakan di dasar *vessel*. Gao [9]-[10] melakukan simulasi terhadap *flooding of compartment* dengan menggunakan persamaan Navier–Stokes yang dikombinasikan dengan volume fluida. Papanikolaou [11] juga melakukan penelitian untuk mengembangkan perpaduan *damage stability* pada kapal kargo dan penumpang. Fjelde [12] melakukan penelitian mengenai stabilitas *barge* baik pada kondisi *intact stability* maupun *damage stability*.

Studi mengenai *damage stability* di Indonesia masih sedikit dilakukan. Dengan demikian, diperlukan suatu studi tentang *damage stability* pada *accommodation barge* Rajawali seperti yang ditunjukkan pada Gambar.1.



Gambar. 1. Accommodation Barge Rajawali tampak samping.

## II. URAIAN PENELITIAN

Metode yang dipakai dalam analisis dinamis pada penelitian ini adalah dengan menggunakan metode numerik.. Pemodelan numerik dilakukan untuk analisis gerak dan stabilitas dari *accommodation barge*. Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:

### A. Mengumpulkan Data Teknis dan Lingkungan

Tahap pengumpulan data merupakan awal dari penelitian dimulai. Semua data-data yang diperlukan dikumpulkan selengkap-lengkapnyanya untuk mempermudah dan menambah akurasi penelitian. Data teknis yang diperlukan adalah *General Arrangement barge* yang ditunjukkan Gambar.1.

Selanjutnya data lingkungan meliputi data gelombang dan angin yang nantinya akan digunakan sebagai masukan beban lingkungan dalam penelitian ini. Tabel 1. menunjukkan data utama dari *accomodation barge* Rajawali.

Tabel 1.

Data utama Accomodation Barge Rajawali		
Karakteristik	Data	Satuan
Panjang Barge (L)	76.81	m
Lebar Barge (B)	24.38	m
Tinggi Barge (H)	4.87	m
Sarat Barge (T)	3.62	m
Displacement	6125	ton
WSA	2358.16	m <sup>2</sup>
Waterplane area	1868.17	m <sup>2</sup>
LCB from zero pt	38.40	m
LCF from zero pt	38.40	m
BMt	15.49	m
BMI	152.96	m
KMt	17.38	m
KMI	154.85	m

Tabel 2.

Data lingkungan 10 tahunan perairan Sisi Nubi, Selat Makassar		
Parameter	Nilai	Satuan
Kedalaman perairan	70	Meter
Tinggi gelombang signifikan (H <sub>s</sub> )	2.3	Meter
Periode gelombang	8	Detik
Spektrum gelombang	JONSWAP ( $\gamma = 2.5$ )	

**B. Pemodelan Numeris Konfigurasi Lambung Barge**

Tahap pertama dalam pemodelan numerik konfigurasi lambung kapal adalah membuat rencana garis dari data yang ada di *General Arrangement* dengan menggunakan perangkat lunak MAXSURF. Selanjutnya rencana garis yang telah dibuat dijadikan acuan untuk pemodelan berikutnya.

**C. Validasi Model Numeris Konfigurasi Lambung Barge**

Model numeris yang telah dimodelkan menggunakan perangkat lunak MAXSURF divalidasi sebelum digunakan untuk analisis. Validasi dilakukan dengan membandingkan data hidrosatik hasil model numeris dari *accomodation barge* yang telah dimodelkan dengan data hidrostatik yang telah ada. Toleransi selisih antara hasil pemodelan numeris dengan data yang sebenarnya adalah kurang dari 2.5 %. Tabel 3. menunjukkan hasil validasi model dengan data yang telah ada.

Tabel 3.

Validasi hdirostatik hasil model numeris konfigurasi lambung dengan data awal				
Karakteristik	Data	Model	Satuan	Koreksi (%)
Displacement	6125	6134.71	ton	0.158
WSA	2358.166	2399.96	m <sup>2</sup>	1.772
Waterplane area	1868.173	1872.19	m <sup>2</sup>	0.215
LCB from zero pt	38.405	38.405	m	0
LCF from zero pt	38.405	38.405	m	0
BMt	15.491	15.499	m	0.052
BMI	152.967	153.669	m	0.459
KMt	17.38	17.391	m	0.063
KMI	154.856	155.56	m	0.455

**D. Pemodelan Konfigurasi Untuk Analisis Gerakan**

Setelah model hasil dari pemodelan numeris konfigurasi lambung barge telah memenuhi kriteria validasi, langkah selanjutnya adalah membuat model konfigurasi untuk analisis gerakan dengan mentransformasi model dari MAXSURF menjadi model konfigurasi untuk pemodelan numerik gerakan. Letak dan koordinat titik berdasarkan rencana garis hasil dari pemodelan numeris konfigurasi lambung barge.

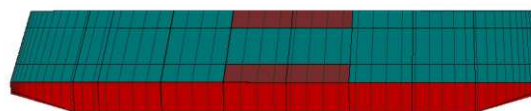
**E. Validasi Model Konfigurasi Untuk Analisis Gerakan**

Model numeris yang telah dimodelkan divalidasi sebelum digunakan untuk analisis gerakan. Validasi dilakukan dengan membandingkan data hidrosatik hasil model numeris gerakan dari *accomodation barge* yang telah dimodelkan dengan data hidrostatik yang telah ada. Toleransi selisih antara hasil pemodelan numeris dengan data yang sebenarnya adalah kurang dari 2 %. Tabel 4. menunjukkan hasil validasi model dengan data yang telah ada.

Tabel 4.

Validasi data hdirostatik hasil model numeris gerakan dengan data awal				
Karakteristik	Data	Model	Satuan	Koreksi (%)
Displacement	6125	6139.15	ton	0.231
WSA	2358.166	2399.9	m <sup>2</sup>	1.77
Waterplane area	1868.173	1873	m <sup>2</sup>	0.258
LCB from zero pt	38.405	38.41	m	0.013
LCF from zero pt	38.405	38.4	m	0.013
BMt	15.491	15.5	m	0.058
BMI	152.967	153.7	m	0.479
KMt	17.38	17.39	m	0.058
KMI	154.856	155.6	m	0.48

Hasil pemodelan numeris yang telah memenuhi kriteria validasi ditunjukkan pada Gambar. 2.



Gambar. 2. Model numeris yang digunakan untuk analisis gerakan dan stabilitas tampak isometris.

**F. Perencanaan Kondisi Kebocoran**

Pada tahap ini adalah merencanakan kompartemen yang akan dibocorkan dalam proses analisis damage stability. Kompartemen yang akan dibocorkan dalam analisis ini sebanyak enam buah, yaitu kompartemen 4C, 4P, 4S, 7C, 7P, 7S. Berdasarkan IMO A.1023 [13] skenario kebocoran yang digunakan yaitu dengan membocorkan setiap satu kompartemen dalam setiap analisis pada setiap kasus pembebanan. Sehingga untuk setiap kasus pembebanan terdapat enam kondisi kebocoran.

**G. Pemodelan Numerik Gerak Accomodation Barge**

Pemodelan numerik gerakan dilakukan dengan menerapkan teori difraksi dan metode panel. Dalam metode ini distribusi tekanan potensial pada setiap panel diberikan dengan linearisasi persamaan Bernoulli [14]:

$$p = -\rho \left( gz + \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) \quad (1)$$

dengan,

- $\rho$  = massa jenis fluida
- $g$  = percepatan gravitasi
- $z$  = kedalaman
- $\phi$  = kecepatan potensial

Dengan mengintegrasikan tekanan pada seluruh body, akan didapatkan gaya hidrodinamis pada body. Pada tahap ini dihitung matriks dari added mass damping yang akan melengkapi properti hidrodinamis. Properti hidrodinamis dihitung dengan menggunakan teori difraksi tiga dimensi.

Berdasarkan gaya hidrodinamis, gerakan linear pada enam derajat kebebasan diperkirakan dalam bentuk RAO (Response Amplitude Operator). Hal ini dilakukan dengan menggunakan persamaan gerak di bawah ini [15]:

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\eta}_k + B_{jk}\dot{\eta}_k + C_{jk}\eta_k] = F_j(t) \quad (2)$$

dengan,

- $M_{jk}$  = massa body
- $A_{jk}$  = massa hidrodinamis (added mass)
- $B_{jk}$  = koefisien redaman (damping)
- $C_{jk}$  = koefisien kekakuan (restoring)
- $\eta$  = gerakan body
- $F_j$  = gaya eksitasi

RAO akan disajikan dalam bentuk diagram tranfer fungsi dengan menyelesaikan terlebih dahulu persamaan gerak di atas pada setiap frekuensi. Bentuk umum dari persamaan RAO dalam fungsi frekuensi dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut [16]:

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \quad (3)$$

dengan,

- $RAO(\omega)$  = fungsi transfer (*transfer function*)
- $X_p(\omega)$  = amplitudo struktur
- $\eta(\omega)$  = amplitudo gelombang.

Respon yang didapatkan dalam bentuk RAO merupakan respon linear, selanjutnya RAO yang telah diperoleh dapat dikalikan dengan spektrum gelombang sehingga akan didapatkan spektrum respon. Spektrum gelombang yang digunakan adalah JONSWAP. Spektrum gelombang tersebut diformulasikan di bawah ini [17]:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[ -1,25 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[ \frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2} \right] \quad (4)$$

dengan,

- $S(\omega)$  = spektrum gelombang
- $\gamma$  = parameter puncak (*peakedness parameter*)
- $\tau$  = parameter bentuk (*shape parameter*).

Spektrum respons didefinisikan sebagai respons kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Spektrum respons merupakan perkalian antara spektrum gelombang dengan RAO kuadrat, secara matematis persamaan dirumuskan [18]

$$S_x(\omega) = |RAO(\omega)|^2 S_F(\omega) \quad (5)$$

dengan,

- $S_x(\omega)$  = spektrum respon
- $S_F(\omega)$  = spektrum gelombang

#### H. Analisis Stabilitas Accomodation Barge

Analisis stabilitas dalam penelitian ini dapat dilakukan dengan dengan memperhitungkan momen pengembali (*righting moment*) dan momen kemiringan (*heeling moment*) akibat angin dan operasi pengangkatan beban di atas *accommodation barge*. Perhitungan momen pengembali untuk sudut kemiringan yang kecil (<15°) menggunakan persamaan di bawah ini [19]:

$$M_R = \Delta GM \sin \theta \quad (6)$$

dengan,

- $M_R$  = momen pengembali (ton.m)
- $\Delta$  = displasemen (ton)
- $GM$  = tinggi metasenter terhadap titik berat G (m)
- $\theta$  = sudut kemiringan kapal (deg)

Sedangkan untuk kemiringan yang besar (>15°) momen pengembali dihitung dengan formulasi *wall-sided* [19] seperti dalam persamaan di bawah ini

$$M_R = \Delta \left[ GM + \frac{1}{2} BM \tan^2 \theta \right] \sin \theta \quad (7)$$

dengan,

- $BM$  = tinggi metasenter terhadap titik buoyancy B (m)

Untuk perhitungan momen kemiringan yang diakibatkan oleh angin dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini [19]

$$M_H = Py_1 \quad (8)$$

dengan,

- $M_H$  = momen kemiringan (ton.m)
- $P$  = gaya angin (ton)
- $y_1$  = jarak dari jarak vertikal pusat *buoyancy* ke pusat luas bagian yang terkena angin

Kemudian untuk menghitung lengan kemiringan akibat angin (*the wind heeling arm*) digunakan persamaan sebagai berikut [20]:

$$y_2 = \frac{(Py_1 \cos^2 \theta)}{\Delta} \quad (9)$$

dengan,

- $y_2$  = lengan kemiringan akibat angin (m)
- Selanjutnya untuk perhitungan lengan kemiringan akibat operasi pengangkatan beban dapat digunakan persamaan di bawah ini [21]:

$$b = \frac{Wd - Zz}{\Delta} \quad (10)$$

dengan,

- $b$  = lengan kemiringan akibat pengangkatan beban (m)
- $W$  = berat beban yang diangkat (ton)
- $d$  = jarak transversal antara beban yang diangkat dengan *longitudinal plane* (m)
- $Z$  = berat ballas yang digunakan untuk berat pengembali, Jika bisa digunakan (ton)
- $z$  = jarak transversal antara titik berat Z dengan *longitudinal plane* (m)

Setelah selesai dianalisis dan dan hasil didapatkan, maka

dilakukan pengecekan hasil apakah memenuhi standar yang diacu. Adapun standar yang diacu adalah IMO A.1023.

### III. HASIL DAN DISKUSI

#### A. Analisis Respon Gerak Di Gelombang Reguler

Analisis respon gerakan *accomodation barge* dilakukan dengan membandingkan respon gerakan yang terjadi pada beberapa kasus pembebanan saat kondisi *intact* dan mengalami kebocoran. Analisis respon gerak hanya dilakukan pada tiga jenis gerakan yaitu heave, roll, dan pitch. Terdapat empat kasus pembebanan dalam penelitian ini yaitu kasus pertama *lightship* tanpa *crawler crane* beroperasi di atas *accomodation barge*. Kasus kedua yaitu *lightship* dengan *crawler crane* beroperasi di atas *accomodation barge*. Kasus ketiga yaitu *full* tanpa *crawler crane* beroperasi di atas *accomodation barge*. Kasus keempat yaitu *Full* dengan *crawler crane* beroperasi di atas *accomodation barge*. Selain itu arah pembebanan yang digunakan sebanyak tiga arah yaitu 90°, 135°, dan 180°.

Respon gerak di gelombang reguler terbesar ditunjukkan dalam bentuk grafik respon amplitude operator (RAO) dari Gambar. 3. sampai dengan Gambar. 5. Dari Gambar. 3. pada arah pembebanan 90° nilai gerakan *roll* maksimum terjadi ketika kompartemen 4P mengalami kebocoran dengan nilai 9.057 deg/m pada frekuensi 1.1424 rad/det. Di samping itu dari Gambar. 4. pada arah pembebanan 135° nilai gerakan *roll* maksimum terjadi ketika kompartemen 4P mengalami kebocoran dengan nilai 2.677 deg/m pada frekuensi 1.1424 rad/det. Selain itu dari Gambar. 5. pada arah pembebanan 180° nilai gerakan *pitch* maksimum terjadi ketika kompartemen 7C mengalami kebocoran dengan nilai 2.318 deg/m pada frekuensi 0.7392 rad/det.

#### B. Analisis Respon Gerak Di Gelombang Acak

Respon gerak *accomodation barge* di atas gelombang acak juga dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi respon spektrum gerakan *accommodation barge*. Hal ini dapat dilakukan dengan mengalikan harga pangkat dua dari RAO *accommodation barge* dengan spektrum gelombang pada frekuensi yang sama. Pada penelitian ini spektrum gelombang yang digunakan adalah spektrum JONSWAP dengan tinggi gelombang signifikan  $H_s = 2.3$  m dan periode  $T = 8$  detik. Respon gerakan di gelombang acak terbesar ditunjukkan dalam Tabel.5.

Tabel 5.

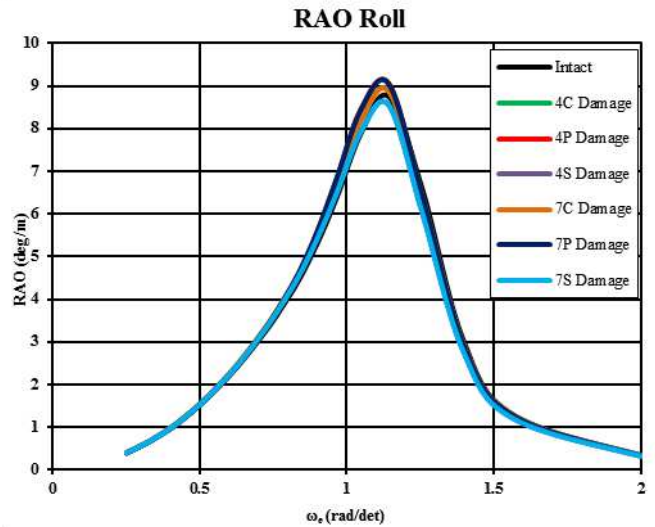
Respon gerakan maksimum setiap gerakan dan arah pembebanan

Jenis Gerakan	Nilai	Satuan	Arah
Roll	8.031	deg	90°
Pitch	3.6	deg	135°
Pitch	4.003	deg	180°

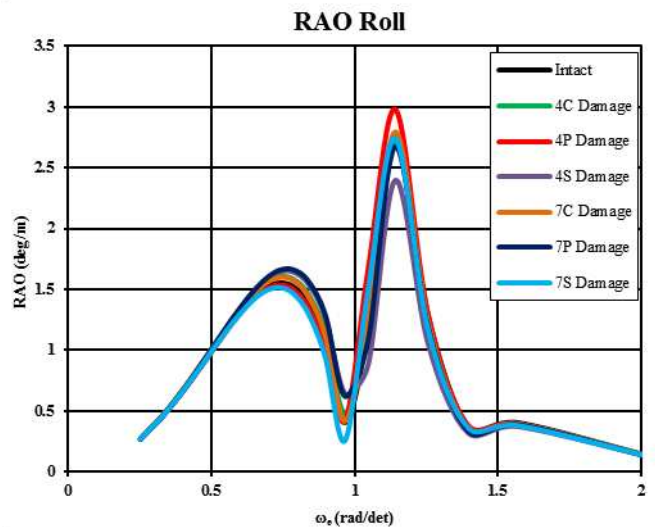
#### C. Analisis Stabilitas Accomodation Barge

Stabilitas dari *accomodation barge* dihitung dengan menggunakan model numeris MAXSURF untuk mendapatkan parameter stabilitas yang disyaratkan oleh IMO A.1023.

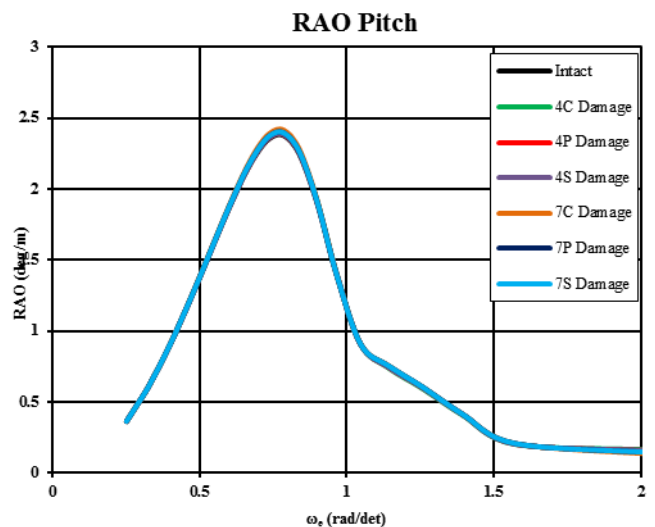
Gambar. 6. menunjukkan kurva stabilitas di setiap kondisi kebocoran dari kasus pembebanan keempat.



Gambar. 3. RAO gerakan roll untuk kondisi intact dan damage dengan arah datang gelombang 90°.



Gambar. 4. RAO gerakan roll untuk kondisi intact dan damage dengan arah datang gelombang 135°.

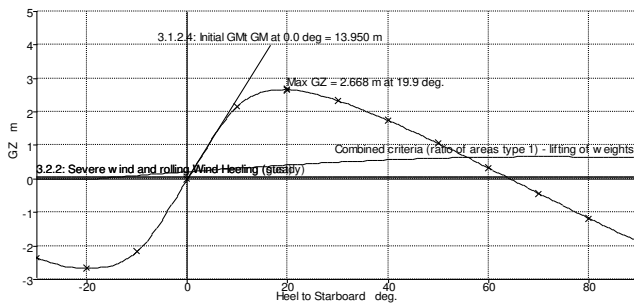


Gambar. 5. RAO gerakan pitch untuk kondisi intact dan damage dengan arah datang gelombang 180°.

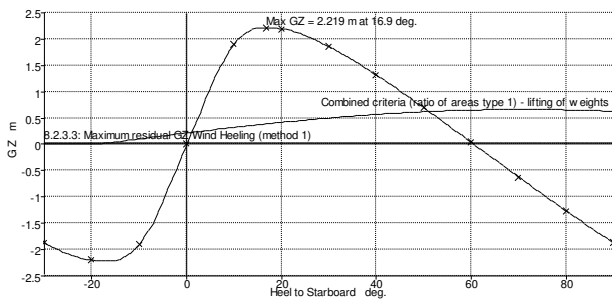
Pada kondisi intact, 4C, 7C bocor, sudut kemiringan awal stabilitas *accommodation barge* berada pada sudut 0°. Hal ini dikarenakan kompartemen yang dibocorkan berada di tengah *accommodation barge* sehingga tidak mempengaruhi kemiringan stabilitas melintang *accommodation barge*.

Pada kondisi kompartemen 4P dan 7P bocor, sudut kemiringan awal stabilitas *accommodation barge* bernilai negatif. Dan pada kondisi kompartemen 4S dan 7S bocor, kemiringan awal stabilitas *accommodation barge* bernilai > 0°. Nilai sudut kemiringan awal stabilitas yang negatif dan > 0° dikarenakan daya apung pada kompartemen yang mengalami kebocoran akan hilang sehingga menyebabkan daya apung ke atas pada bagian kiri *accommodation barge* akan berkurang.

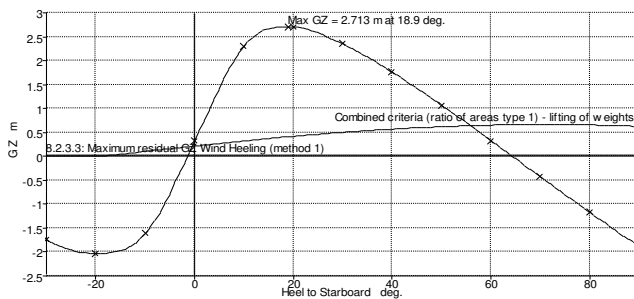
Beban akibat angin berpengaruh pada sudut kemiringan *steady accommodation barge*. Beban angin menyebabkan kemiringan *accommodation barge* menjadi sebesar 0.2° pada kondisi *steady heel*. Operasi pengangkatan beban di atas *accommodation barge* berpengaruh terhadap nilai stabilitas. Pengaruh ini disebabkan ketika operasi pengangkatan beban menimbulkan *heeling arms* yang mengurangi luasan di bawah kurva lengan pengembali (GZ).



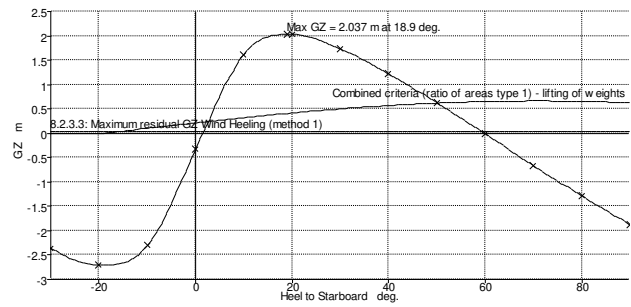
(a)



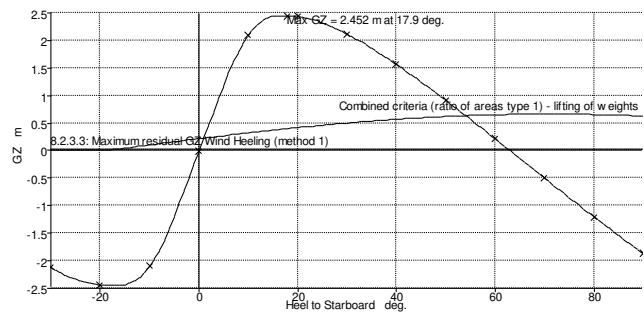
(b)



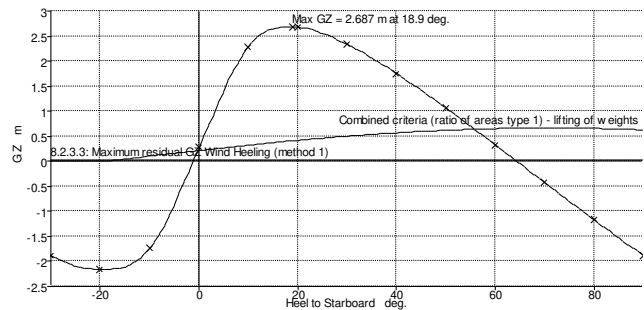
(c)



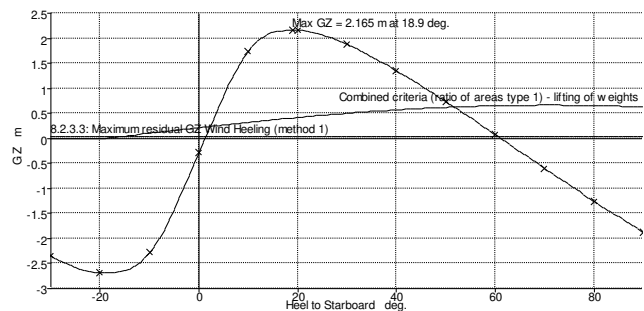
(d)



(e)



(f)



(g)

Gambar. 6. Kurva stabilitas pada kasus pembebanan keempat untuk kondisi: (a) intact; dan bocor pada kompartemen (b) 4C; (c) 4P; (d) 4S; (e) 7C; (f) 7P; (g) 7S.

Dari ketujuh grafik kurva stabilitas di atas nilai parameter stabilitas terkecil berada pada kondisi kompartemen 4S bocor. Hasil kriteria stabilitas pada kondisi tersebut bila dirangkum ke dalam bentuk tabel maka didapatkan hasil seperti pada Tabel 7.

Untuk pembebanan kasus keempat, dari semua kriteria hasil analisis model konfigurasi lambung *barge*, kondisi yang paling kecil terjadi ketika kompartemen 4S mengalami

kebocoran. Hal ini terjadi karena untuk kasus pembebanan kedua terdapat operasi pengangkatan beban yang berada di depan accommodation barge dekat dengan kompartemen 4S berada. Sehingga jika kompartemen yang ada di depan dibocorkan akan lebih berpengaruh terhadap pengurangan nilai kriteria stabilitas dibanding kompartemen lain mengalami kebocoran.

Tabel 7.

Perbandingan kriteria stabilitas pada kasus pembebanan keempat untuk kondisi kompartemen 4S bocor dengan standar IMO A.1023

Kriteria Stabilitas	Satuan	4S	IMO
Luas kurva di bawah sisa lengan GZ	deg.m	30.9	> 0.859
Sisa Lengan GZ maksimum (angin)	m	2.0	> 0.100
Lengan GZ minimal pada sudut $\geq 30^\circ$	m	1.7	> 0.200
Sudut pada saat GZ bernilai maksimal	deg	18.9	> 15
Range of Stability (ROS)	deg	58.3	> 10
Sudut kemiringan <i>steady</i>	deg	2.6	< 15
Luas 1 / luas 2	%	77.5	> 40
Perpotongan GZ / GZ maksimal	%	39	< 60

#### IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Respon gerakan *accomodation barge* di atas gelombang reguler untuk berbagai kasus dan arah pembebanan saat kondisi *intact* dan *damage* yang paling maksimum adalah gerakan roll pada arah pembebanan  $90^\circ$  dengan nilai maksimum 9.057deg/m pada frekuensi 1.1424 rad/det. Respon gerakan *accomodation barge* di atas gelombang acak untuk berbagai kasus dan arah pembebanan saat kondisi *intact* dan *damage* yang paling maksimum adalah gerakan *roll* dengan nilai maksimum 8.031 deg. Stabilitas *accomodation barge* paling kecil untuk berbagai kasus dan arah pembebanan saat kondisi *intact* dan *damage* adalah pada kasus keempat ketika kompartemen 4S mengalami kebocoran. Pada Kondisi 4S bocor memiliki nilai  $GZ$  at  $\geq 30^\circ = 1.74$  m, sudut maksimal  $GZ = 18.9^\circ$ , *range of stability* =  $58.3.6^\circ$ , luasan di bawah kurva  $GZ = 30.9$  m.deg, maksimum residual  $GZ = 2.0$ , dan *angle of steady heel* = 2.6 deg. Perhitungan *damage stability* untuk semua kasus pembebanan dan kebocoran memenuhi kriteria IMO A.1023.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lewis, E.V., *Principles of Naval Architecture Volume I: Stability and Strength*. New Jersey: The Society of Naval Architects and Marine Engineers (1988) Ch. 3.
- [2] Zubalady, Robert B., *Applied Naval Architecture*. Centreville Maryland: Cornell Maritime Press (1996) Ch. 2.
- [3] Rawson, K.J. dan Tupper, E.C., *Basic Ship Theory Volume 1*. Oxford: Butterworth-Heinemann (2001). Ch.5.
- [4] Surendran, S. dan Reddy, J.V.R., "A Technical Note on Numerical Simulation of Ship Stability for Dynamic Environment". *J. Ocean Engineering*, Vol. 30 (2003) 1305-1317.
- [5] Chakrabarti, S., "A Technical Note on Empirical Calculation of Roll Damping for Ships and Barges". *J. Ocean Engineering*, Vol. 28 (2001) 915-932.
- [6] Neves, M. A. S. dan Claudio, "Influence of Non-Linearities On The Limits of Stability of Ships Rolling in Head Seas". *J. Ocean Engineering*, Vol. 34 (2007) 1618 -1630.
- [7] Nasar, T., S. A. Sannasiraj, V. Sundar., "Motion Responses of Barge Carrying Liquid Tank". *J. Ocean Engineering*, Vol. 37 (2010) 935-946.
- [8] Simonsen, B. C., Rikard Tornqvist, Marie Lutzen., "A Simplified Grounding Damage Prediction Method and Its Application in Modern Damage Stability Requirements". *J. Marine Structure*, Vol. 22 (2009) 62-83.
- [9] Gao, Zhiliang, Dracos Vassalos, Qiuxin Gao., "Numerical Simulation of Water Flooding Into A Damaged Vessel's Compartment by The Volume of Fluid Method". *J. Ocean Engineering*, Vol. 37 (2010) 1428 - 1442.
- [10] Gao, Zhiliang, Dracos Vassalos, Qiuxin Gao., "Numerical Simulation of Flooding of A Damaged Ship". *J. Ocean Engineering*, Vol. 38 (2011) 1649 - 1662.
- [11] Papanikolaou, A. dan Eliopoulou, E., "On The Development of The New Harmonized Damage Stability Regulation for Dry Cargo and Passenger Ships". *J. Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 93 (2008): 1305 - 1316.
- [12] Fjelde, Sindre., *Stability and Motion Response of Transport with Barge*. Master's Thesis. Department of Offshore Technology. The University of Stavanger. (2008).
- [13] IMO A.1023 (26). Code For The Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units (2009 IMO MODU CODE). International Maritime Organization. (2010).
- [14] Larsen, Truls Jarand, "Modelling of Wave Induced Motions of a SPAR Buoy in MOSES". *Project Thesis*. Trondheim: Departemen of Marine Hydrodynamic NTNU. (2002).
- [15] Faltinsen, O.M., *Sea Loads On Ships and Offshore Structures*. Cambridge: Cambridge University Press. (1990) Ch. 3.
- [16] Chakrabarti, S.K., *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Boston: Computational Mechanics Publications (1987) Ch. 7.
- [17] Chakrabarti, S.K., *Handbook of Offshore Engineering Volume 1*. Oxford: Elsevier. (2005) Ch.3.
- [18] Bhattacharyya, Rameswar., *Dynamic of Marine Vehicles*. New York: John Wiley and Sons Inc. (1978) Ch. 6.
- [19] Biran, A.B., *Ship Hydrostatics and Stability*. Oxford: Butterworth-Heinemann. (2003) Ch. 5.
- [20] Barrass, C.B. dan Derrett, D.R., *Ship Stability for Masters and Mates*. Oxford: Butterworth-Heinemann. (2006) Ch. 15
- [21] Veritas, Bureau., *Rules For The Clasification of Steel Ships*. Paris: Bureau Veritas. (2006) Ch. 19.