

Analisis Stabilitas *Intact* Sudut Besar terhadap Perubahan COG *Crane barge* saat Operasi *Heavy Lifting*

Nailatul Fadhillah Hafshah, Murdjito, dan Rudi Walujo Prastianto
Departemen Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: murdjito@oe.its.ac.id

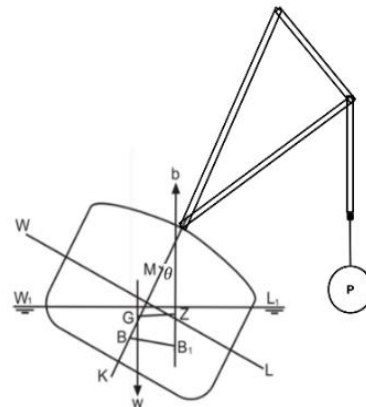
Abstrak—*Crane barge* sebagai *floating crane vessel* dapat dioperasikan untuk operasi *heavy lifting* yang mampu mengangkat beban hingga ribuan ton salah satunya adalah saat instalasi *topside*. Beban yang diangkat berdampak pada perubahan titik pusat massa (COG) yang akan mempengaruhi stabilitas *crane barge* selama operasi *lifting* berlangsung. Dengan skenario perputaran sudut *crane* secara horizontal dari sisi *starboard* hingga sisi *port* *crane barge* dan variasi tinggi *draft* dari 75% hingga 100% kondisi *full load*. Hasil keseluruhan *loadcase* stabilitas *intact crane barge* secara numerik memenuhi ketentuan dari IMO A.749(18). *GZ* maksimum terjadi pada sudut putar 90° ke arah *portside* untuk *heel* 20° untuk ketiga variasi *draft* dan *draft* 90% terjadi saat *heel* 25°. Korelasi perubahan *draft* terhadap besar nilai *GZ* adalah semakin tinggi *draft* yang diaplikasikan maka diperoleh nilai *GZ* yang semakin kecil. COG setelah analisis stabilitas mengalami perubahan yang signifikan pada setiap variasi *draft* sedangkan terhadap perubahan sudut putar perubahan hanya terjadi pada besar VCG *crane barge*. Perbandingan hasil perhitungan analisis stabilitas *crane barge* secara numerik dan analitik memiliki koreksi nilai error yang telah memenuhi ketentuan dari IACS UR L5 yaitu dibawah $\pm 5\%$. Nilai error terbesar terjadi pada sudut kemiringan 60°. Perbedaan stabilitas sudut kecil dan sudut besar adalah sudut kecil hanya dipengaruhi oleh besar kemiringan sudut $\sin \theta$ sedangkan pada stabilitas sudut besar akibat kemiringan yang melebihi nilai *GZ* tidak hanya dipengaruhi sudut $\sin \theta$ melainkan juga sudut $\tan \theta$.

Kata Kunci—*Crane barge*, *Lifting*, *Intact Stability*, *Large Angle*.

I. PENDAHULUAN

EKSPLORASI dan eksploitasi potensi migas di Indonesia salah satunya dapat menggunakan struktur terpancang yang dibangun diperairan yang memiliki kedalaman relative dangkal. Struktur terpancang yang banyak digunakan di Indonesia adalah tipe *Jacket platform* dengan 3 struktur utama, yaitu *jacket* (struktur penyangga) *deck*, *piles*, dan bangunan atas (*topside*). Proses instalasi struktur *jacket* dilakukan berdasarkan pada modul-modul yang dibangun yang mana dapat menggunakan metode *lifting* [1]. Metode *lifting* dilakukan melalui pengangkatan struktur dengan menggunakan *crane* (derek) terapung yang bisa berupa *floating crane barge*.

Crane barge merupakan kapal tongkang yang dilengkapi dengan *crane* (derek) untuk melakukan pekerjaan *lifting operation* (operasi pengangkatan) dilapangan. Perkembangan *crane barge* saat ini telah banyak didesain untuk mengangkat struktur dengan beban yang terhitung berat dengan metode yang disebut *heavy lifting operation*. *Heavy lift vessel* menggunakan kapal yang memiliki boom *crane* berkapasitas relative tinggi dengan sudut yang relatif konstan atau bergerak dengan kecepatan sudut yang pelan selama operasi



Gambar 1. Ilustrasi sudut besar.

berlangsung [2].

Besarnya beban dari luar *barge* yang ditambahkan pada saat proses *lifting* ini dapat menyebabkan letak titik berat atau *Centre of Gravity* (COG) berpindah dan berubah, perubahan tersebut menyebabkan kapal miring dan mempengaruhi stabilitas kapal. Stabilitas statis secara melintang yang dimiliki oleh kapal membantunya tetap tegak saat mengalami kemiringan hingga tercipta sudut yang berpengaruh pada tingkat keamanan kapal selama beroperasi [3]. Sudut kemiringan terbentuk dari titik awal pada kondisi tegak yaitu titik *G* dan kapal akan miring sejauh titik *Z*, titik *GZ* tersebut yang menjadi lengan pengembali kapal ke kondisi semula. Kriteria stabilitas *intact* saat pengangkatan kargo harus mempunyai *heeling angle* $< 15^\circ$ untuk *section* awal antara kemiringan dengan lengan pengembali sudut kecil. Ilustrasi sudut besar tertera pada Gambar 1.

Stabilitas *intact* dianalisis dengan tujuan untuk memastikan bahwa kapal stabil dan tidak mengalami *capsize* saat terkena beban lingkungan dari luar. Pada struktur bangunan terapung dengan sudut kemiringan yang besar, titik *M* tidak dapat digunakan sebagai titik yang tetap dan *GM* sudah tidak sesuai untuk menghitung stabilitas kapal, sehingga digunakan lengan pengembali *GZ* untuk menghitung stabilitasnya [4]. Penelitian mengenai stabilitas *floating crane vessel* secara analitik diperoleh koreksi nilai error momen *lifting* mengikuti perubahan sudut *heeling* kapal, semakin besar sudut *heeling* kapal maka error yang diperoleh juga lebih besar terutama pada sudut *heel* diatas 40 derajat yang disebabkan karena dilakukan perhitungan koreksi pusat massa (COG) dan momen beban *lifting* pada perhitungan manual sehingga berpengaruh pada pengurangan nilai *GZ* [5].

Tabel 1.
Dimensi Utama *Crane barge*

Parameter	Nilai	Satuan
LOA	100	m
LPP	96	m
Breadth	30.50	m
Height	7.62	m
<i>Draft</i> (Maksimum)	5.5	m
LWT	5830	Ton

Tabel 2.
Data Spesifikasi *Crane*

Parameter	Nilai	Satuan
Sudut Jib maksimum	85	derajat
Radius main hook	47.9	m
Kapasitas main hook (@ 15m)	300	MT

Tabel 3.
Data Struktur *Topside*

Parameter	Net Weight (kN)	Cont. Factor	Factored Weight (kN)
<i>Structural Self Weight</i>	479.01	1.07	512.54
<i>Stubbing guide</i>	18	1.07	19.26
<i>Topside Non-Generated Dead Load</i>	66.56	1.1	73.22
<i>Instrument Load</i>	10.99	1.1	12.09
<i>Electrical Load</i>	67.16	1.1	73.88
<i>Telecom load</i>	6.06	1.1	6.67
<i>Safety Load</i>	1.15	1.1	1.27
<i>Mechanical Load Pre-Service</i>	103.79	1.1	114.17
<i>Piping Load Pre-service</i>	25.28	1.1	27.81
<i>Davit crane self weight</i>	16.48	1.1	18.13
Total Lifting Condition weight			859.02

Tabel 4.
Data Lingkungan

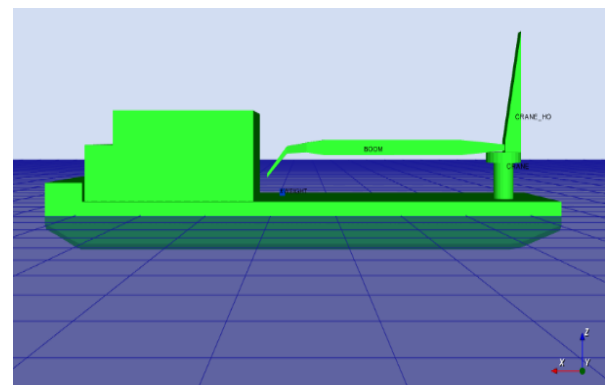
Parameter	Nilai	Satuan
Kecepatan Angin	100	knot

Tabel 5.
Kriteria Stabilitas IMO A.749 (18)

Kode	Kriteria
[1]	Untuk <i>surface</i> dan <i>self-elevating unit</i> , area di bawah kurva <i>righting moment</i> ke second intercept atau <i>downflooding</i> , mana yang lebih kecil, harus tidak kurang dari 40% lebih dari area di bawah kurva wind <i>heeling moment</i> .
[2]	Untuk unit <i>column-stabilized unit</i> , area di bawah kurva <i>righting moment</i> ke <i>second intercept</i> atau <i>downflooding</i> , mana yang lebih kecil, harus tidak kurang dari 30% lebih dari daerah di bawah kurva wind <i>heeling moment</i>
[3]	Kurva <i>righting moment</i> harus positif pada seluruh rentang sudut dari kondisi upright hingga <i>second intercept</i> .

Tabel 6.
Validasi Pemodelan *Crane barge*

Parameter	<i>Stability booklet</i>	MOSES	Koreksi	Remarks
<i>Displacement</i> (t)	16363.14	16370	0.0%	PASS
LCB (m)	50.263	50.178	-0.2%	PASS
VCB (m)	2.833	2.839	0.2%	PASS
LCF (m)	50	50	0.0%	PASS
KMT (m)	17.643	17.642	0.0%	PASS
KML (m)	162.04	161.97	0.0%	PASS



Gambar 2. Pemodelan *crane barge*.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Studi Literatur

Studi literatur bertujuan dalam mengetahui lebih banyak informasi mengenai operasi *lifting* pada floating crane vessel dan pengaruhnya terhadap tingkat stabilitas kapal. Dengan studi literatur dapat membantu memahami dan menguraikan permasalahan dalam penelitian ini. Studi literatur dilakukan dengan mempelajari berbagai bahan acuan seperti jurnal, buku, dan referensi lain seperti artikel di internet.

B. Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini diantaranya adalah data *crane barge*, data *crane*, data struktur *topside*, dan data lingkungan. Seperti yang tertera pada Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3 dan Tabel 4.

C. Setup Skenario Operasi

Skenario operasi *lifting* struktur *topside* dilakukan dari sudut putar *crane* bagian 90° sisi *starboard* ke arah belakang dan kearah 120° dari belakang kapal ke sisi *portside* dengan analisis yang dilakukan setiap perpindahan 15 derajat. Dari setiap *loadcase* tersebut terdapat 4 variasi *draft* yaitu 4.12 m (75% *full load*), 4.4 m (80% *full load*), 4.95 m (90% *full load*), dan 5.5 m (100% *full load*).

D. Pemodelan *crane barge* dan *Topside*

Pemodelan *crane barge* sekaligus kompartemen dibantu dengan software *MOSES Executive* mengikuti data pada Tabel 1. Hasil pemodelan dilakukan validasi dengan data hidrostatis dari *Stability booklet*. Pemodelan struktur yang diangkat berupa *topside* menggunakan *SACS* yang selanjutnya dikonversi ke model *MOSES*.

E. Analisis Stabilitas secara Numerik

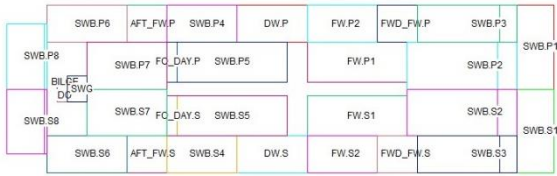
Tahap analisis stabilitas secara numerik mengikuti skenario yang telah didefinisikan pada Subbab C. Metode numerik diperlukan pengaturan ballast untuk mencapai kestabilan. Hasil analisis stabilitas divalidasi dengan IMO A.749 (18). Tabel 5 adalah kriteria validasi IMO A.749 (18) untuk jenis MODU.

F. Perhitungan Hidrostatis Manual

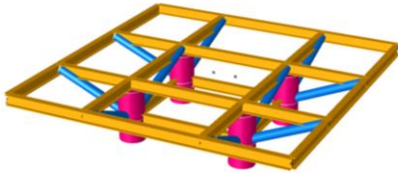
Perhitungan secara manual dibantu dengan linesplan yang telah dimodelkan menggunakan *MOSES Modeler*. Hasil perhitungan divalidasi dengan data hidrostatis pada *astability booklet*.

G. Analisis Stabilitas Analitik

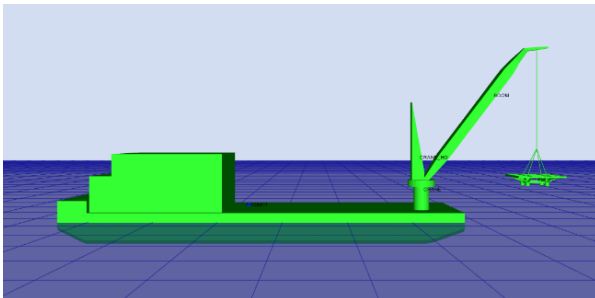
Metode analitik dilakukan perhitungan dari kondisi equilibrium hingga kondisi *heel* pada sudut batas *downflooding*. Hasil perhitungan stabilitas secara analitik



Gambar 3. Layout pemodelan tangki.



Gambar4. Pemodelan Struktur Topside.



Gambar 5. Struktur Topside terpasang pada crane.

divalidasi dengan IMO A.749 (18).

H. Komparasi Hasil Metode Analitik dan Numerik

Perbandingan hasil perhitungan secara analitik dan numerik memperhatikan nilai pengembali pada setiap sudut kemiringan. Pengecekan nilai error antara kedua metode mengikuti aturan dari IACS UR L5.

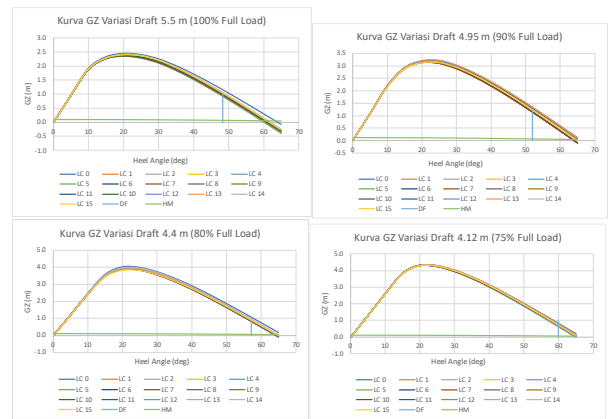
I. Kesimpulan

Dari keseluruhan penelitian yang dilakukan maka ditarik kesimpulan sebagai luaran dari penelitian ini

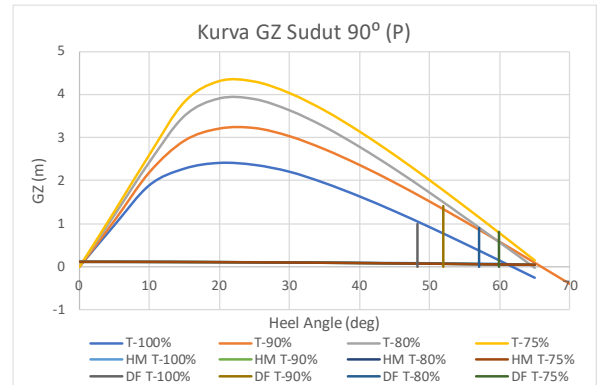
III. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan Crane barge dan Tangki

Pemodelan crane barge mengikuti data principal dimension crane barge pada Tabel 1 dan diperoleh hasil pada Gambar 2. Hasil pemodelan divalidasi dengan stability booklet terkait properti hidrostatis antara model dengan kondisi existing mengikuti aturan dari ABS Rules For Building And Classing MOU. Tabel 6 adalah hasil validasi pemodelan crane barge terhadap data stability booklet. Berdasarkan hasil validasi pada Tabel 6 menunjukkan bahwa koreksi antara stability booklet dengan pemodelan menggunakan MOSES telah memnuhi ketentuan yaitu untuk displacement memiliki batas nilai maksimum ±2% dan properti hidrostatis yang lainnya ±1%. Pemodelan tangki crane barge dalam analisis stabilitas sangat dibutuhkan karena kapasitas yang terisi berpengaruh terhadap kestabilan kapal. Pemodelan mengikuti layout yang terdapat pada General Arrangement dan kapasitas tiap tangki divalidasi dengan kondisi tangki yang sebenarnya mengikuti aturan ABS Rules For Building And Classing MOU untuk kriteria displacement. Gambar 3 adalah layout pemodelan tangki.



Gambar 6. Kurva GZ Metode Numerik seluruh loadcase.



Gambar 7. Kurva GZ Loadcase 13.

B. Operasi Pengangkatan Struktur

Struktur yang diangkat pada operasi lifting ini adalah Topside Meliwis, dalam pemodelannya menggunakan software SACS. Dengan mengikuti data yang tersedia pada Tabel 3 dan Gambar 4 adalah hasil pemodelan Topside.

Menurut Noble Denton "Guidelines For Lifting Operations By Floating Crane Vessels", clearance antara muatan yang diangkat dengan lambung barge minimal berjarak 3 meter secara horizontal maupun vertikal. Hasil pemodelan SACS dikonversi ke MOSES untuk dipasangkan pada sling crane barge tertera pada Gambar 5.

Kemiringan boom crane saat lifting operation mengikuti grafik SWL (Safe Working Load) yang diperoleh diperoleh kemiringan sebesar 52.8°.

C. Analisis Stabilitas Intact Secara Numerik

Tahap analisis secara numerik dilakukan pada 15 loadcase (sudut putar crane) yang mana satu loadcase dianalisis untuk 4 variasi draft. Beban angin berpengaruh penting terhadap hasil analisis stabilitas, maka dari itu perlu dilakukan plot kurva wind heeling arm pada kurva stabilitas. Perhitungan wind heeling moment menurut IMO.A749(18) adalah sebagai berikut:

$$H(\phi) = \frac{A}{\Delta} \cos^n(\phi)$$

Dimana :

- ϕ = sudut heel
- A = Besar heeling moment
- Δ = Displacement
- \cos^n = Deskripsi bentuk kurva

Downflooding merupakan titik atau lubang yang dapat menyebabkan kapal mulai kemasukan air pada sudut

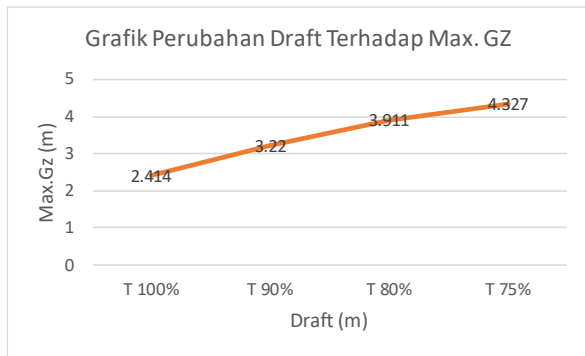
Tabel 7.
Nilai Lengan Pengembali *Loadcase* 13

Heel (deg)	Righting Arm (m)			
	T 100%	T 90%	T 80%	T 75%
0	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.969	1.074	1.203	1.295
10	1.898	2.196	2.435	2.616
15	2.282	2.927	3.506	3.844
20	2.414	3.207	3.911	4.327
25	2.367	3.219	3.893	4.314
30	2.207	3.029	3.632	4.044
35	1.945	2.727	3.249	3.641
40	1.633	2.362	2.783	3.149
45	1.288	1.955	2.269	2.602
50	0.919	1.516	1.719	2.016
55	0.534	1.056	1.147	1.406
60	0.140	0.581	0.563	0.782
65	-0.259	0.097	-0.026	0.149
70	-	-0.392	-	-0.487

Tabel 8.

Validasi Kriteria Stabilitas *Intact* Numerik

IS CODE	Kondisi <i>Draft</i>			
	T 100%	T 90%	T 80%	T 75%
[1]	PASS	PASS	PASS	PASS
[2]	PASS	PASS	PASS	PASS
[3]	positive	positive	positive	positive



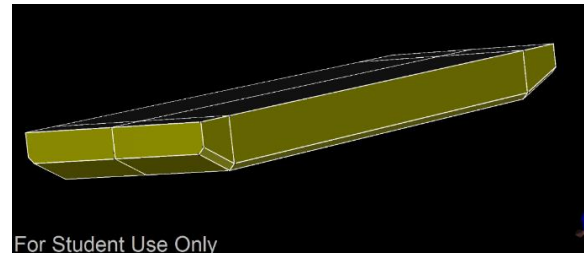
Gambar 8. Grafik perubahan *draft* terhadap GZ.

kemiringan tertentu. Dalam analisis stabilitas dibutuhkan plot besar *downflooding* point untuk kebutuhan validasi ketentuan dari IMO A.749(18). Gambar 6 adalah hasil analisis stabilitas secara numerik pada setiap variasi *draft*nya.

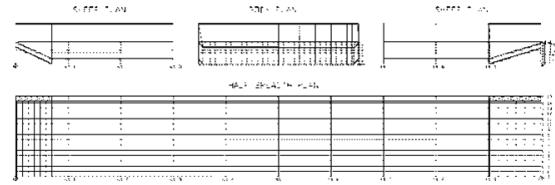
Hasil analisis stabilitas dari keseluruhan *loadcase* didapatkan bahwa perbedaan besar nilai GZ (lengan pengembali) antar *loadcase* tidak dalam rentang yang besar. Kenaikan variasi *draft* dalam analisis stabilitas mengubah besar nilai GZ menjadi semakin besar. Nilai GZ maksimum terjadi pada *loadcase* 13 yang mana terjadi operasi *lifting* muatan *topside* pada arah 90° sisi port. Posisi *crane* yang terletak pada sisi *starboard* kapal menyebabkan boom *crane* melewati sisi *portside* kapal dan mempengaruhi beban ballasting pada sisi kapal yang sama dengan posisi beban angkut, sehingga menghasilkan nilai GZ yang lebih besar daripada *loadcase* lainnya. Tabel 7 adalah hasil nilai GZ *Loadcase* 13.

Dari hasil nilai GZ pada setiap sudut kemiringan diperoleh maksimum nilai GZ terjadi pada saat sudut kemiringan 20° untuk variasi kondisi *draft* 100%, 80%, dan 75%. Sedangkan variasi kondisi *draft* 90%, nilai GZ maksimum terjadi pada sudut kemiringan 25°.

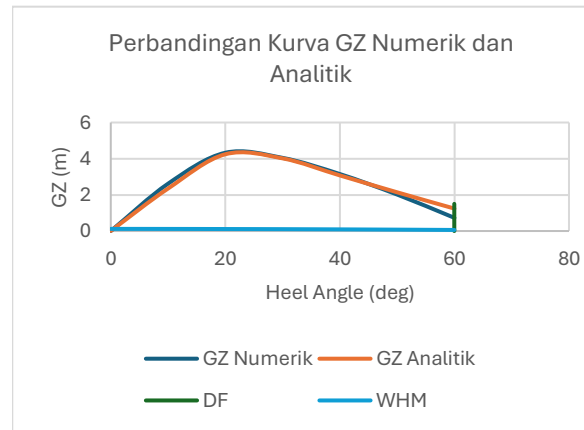
Nilai GZ diplot dalam grafik untuk membentuk kurva GZ, selain itu perlu ditambahkan *heeling moment* untuk pengaruh faktor windage area dan penambahan titik *downflooding*.



Gambar 9. Pemodelan menggunakan *MOSES* Modeler.



Gambar 10. Linesplan *crane barge*.



Gambar 11. Perbandingan kurva GZ numerik dan analitik.

Kurva GZ *loadcase* 13 ditunjukkan pada Gambar 7, dan validasi kriteria stabilitas *intact* menurut IMO A.749 (18) tertera pada Tabel 8.

Hasil validasi stabilitas *intact* yang disajikan dalam Tabel 8 dapat diketahui bahwa pada *loadcase* 13 ini telah memenuhi semua kriteria, sehingga dapat disimpulkan untuk kondisi *loadcase* 13 dikatakan stabil. Berdasarkan pada Kurva GZ pada Gambar 8 diketahui bahwa korelasi nilai GZ terhadap perubahan *draft* adalah semakin rendah *draft* yang diaplikasikan semakin besar nilai GZ yang diperoleh. Hal tersebut dipengaruhi oleh hubungan nilai *displacement* berbanding terbalik dengan tinggi metasetra (GM), sehingga semakin rendah *draft* kapal maka nilai GM semakin besar. Nilai GM merupakan parameter penting dalam perhitungan besar nilai GZ yang nilainya berbanding lurus dengan hasil nilai GZ tersebut. Nilai GZ maksimum terjadi pada kondisi *draft* 4.12 meter dengan kemiringan 20°.

Perubahan COG terhadap perubahan sudut putar *crane* tidak berubah untuk COG arah x dikarenakan dalam analisis stabilitas berat struktur yang diangkat dengan *crane barge* itu sendiri menjadi gabungan 1 COG, sedangkan pada COG arah z mengalami perubahan yang cukup signifikan. Perubahan COG arah z tergantung pada kapasitas ballast tangki yang dioperasikan pada *loadcase* tersebut.

D. Analisis Stabilitas *Intact* Secara Analitik

Analisis stabilitas metode analitik menggunakan *draft* terendah dengan pertimbangan posisi titik *downflooding* untuk *draft* 4.12 meter memiliki sudut terbesar, sehingga

Tabel 9.
Perubahan COG crane barge

LC	Turning Angle	Draft 5.5 meter			Draft 4.95 meter			Draft 4.4 meter			Draft 4.12 meter		
		x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
0	-90°	50.18	0	5.84	50.2	0	5.9	50.23	0	6.04	50.24	0	6.22
1	-90°	50.18	0	6.09	50.2	0	6.19	50.23	0	6.36	50.25	0	6.44
2	-75°	50.18	0	6.09	50.2	0	6.19	50.23	0	6.36	50.24	0	6.45
3	-60°	50.18	0	6.1	50.2	0	6.19	50.23	0	6.36	50.24	0	6.45
4	-45°	50.18	0	6.1	50.2	0	6.19	50.23	0	6.36	50.24	0	6.45
5	-30°	50.18	0	6.11	50.2	0	6.2	50.23	0	6.36	50.24	0	6.46
6	-15°	50.18	0	6.17	50.2	0	6.2	50.23	0	6.36	50.25	0	6.48
7	0°	50.18	0	6	50.2	0	6.18	50.23	0	6.39	50.25	0	6.46
8	15°	50.18	0	6.04	50.2	0	6.14	50.23	0	6.38	50.24	0	6.45
9	30°	50.18	0	6.04	50.2	0	6.14	50.23	0	6.38	50.25	0	6.45
10	45°	50.18	0	6.01	50.2	0	6.15	50.23	0	6.37	50.25	0	6.46
11	60°	50.18	0	6	50.2	0	6.16	50.23	0	6.37	50.25	0	6.46
12	75°	50.18	0	5.99	50.2	0	6.16	50.23	0	6.36	50.25	0	6.47
13	90°	50.18	0	5.99	50.2	0	6.17	50.23	0	6.36	50.25	0	6.47
14	105°	50.18	0	5.99	50.2	0	6.17	50.23	0	6.04	50.24	0	6.22
15	120°	50.18	0	6	50.2	0	6.17	50.23	0	6.36	50.25	0	6.44

Tabel 10.
Validasi Hidrostatik Pemodelan Crane barge

Parameter	Stability booklet	MOSES	Koreksi	Remarks
Disp (t)	16363.14	16296	-0.41%	PASS
LCB (m)	50.263	50.3	0.07%	PASS
VCB (m)	2.833	2.848	0.53%	PASS
LCF (m)	50	50	0.00%	PASS
KMT (m)	17.643	17.719	0.43%	PASS
KML (m)	162.04	162.715	0.42%	PASS

Tabel 11.
Perhitungan Hidrostatik kondisi even keel

Parameter	Nilai	Satuan
V displacement	11697.6	m3
Displacement	11990.345	ton
LCB	49.730	m3
WPA	3050	m2
LCF	50	m
IT	236438.542	m4
TPC	31.263	ton/cm
KB	2.155	m
BMT	20.212	m
KMT	22.367	m
GMT	13.588	m

Tabel 12.
Validasi Hidrostatik Analitik

Parameter	Stability booklet	MOSES	Koreksi	Remarks
Disp (ton)	12048.93	11990.35	-0.49%	PASS
LCB (m)	49.643	49.73023	0.18%	PASS
VCB (m)	2.139	2.154875	0.74%	PASS
LCF (m)	50	50	0.00%	PASS
KMT (m)	22.242	22.36693	0.56%	PASS
TPC (m)	31.262	31.2625	0.00%	PASS
WPA (m)	3050	3050	0.00%	PASS

dapat memperkecil potensi crane barge kemasukan air. Perhitungan stabilitas secara manual menggunakan linesplan yang dimodelkan menggunakan MOSES Modeler. Pemodelan divalidasi untuk mengecek kesesuaiannya dengan vessel yang sebenarnya. Gambar 9 adalah hasil pemodelan crane barge dengan menggunakan MOSES Modeler. Sedangkan linesplan tertera pada Gambar 10.

Validasi pemodelan mengikuti aturan ABS Rules For Building And Classing MOU dan diperoleh semua kriteria telah memenuhi. Berdasarkan dari linesplan yang telah dimodelkan, maka dilakukan pengukuran dimensi half breadth posisi starboard side dan port side, serta bonjean area untuk setiap station. Analisis secara manual terbagi menjadi 3 tahap besar yaitu perhitungan hidrostatik kondisi even keel, perhitungan stabilitas kondisi setimbang, dan

perhitungan stabilitas pada setiap sudut kemiringan. Perubahan COG ditunjukkan pada Tabel 9 dan validasi hidrostatik tertera pada Tabel 10.

Perhitungan hidrostatik mengikuti langkah perhitungan pada buku “Ship Hydrostatic and Stability” milik Adrian Biran [6]. Perhitungan hidrostatik kondisi evenkeel dilakukan untuk validasi keakuratan persamaan hidrostatik yang digunakan, Tabel 11 adalah hasil hidrostatik pada kondisi even keel. Hasil perhitungan hidrostatik pada Tabel 11. Selanjutnya divalidasi dengan data stability booklet dengan mengikuti aturan dari ABS Rules For Building And Classing MOU dan semua kriteria telah memenuhi dapat dilihat pada Tabel 12.

Perhitungan stabilitas pada initial condition bertujuan untuk memperoleh nilai GZ (Lengan Pengembali) ada

Tabel 13.
Perhitungan Hidrostatik kondisi *initial*

Parameter	Nilai	Satuan
V displacement	11708.370	m ³
Displacement	12001.800	ton
LCB	50.209	m ²
WPA	3049.962	m ²
LCF	50.000	m
IT	236429.708	m ⁴
TPC	31.262	ton/cm
KB	2.154	m
BMT	20.193	m
KMT	22.347	m
GGo	1.715	m
KGo	8.185	m
GoMT	12.448	m

Tabel 14.
Perhitungan Hidrostatik kondisi *heel 0°*

Parameter	Nilai	Satuan
V displacement	11715.924	m ³
Displacement	12008.822	ton
LCB	48.805	m ³
WPA	3050	m ²
LCF	50	m
IT	236438.542	m ⁴
TPC	31.263	ton/cm
KB	2.153	m
BMT	20.181	m
KMT	22.334	m
GGo	1.714	m
KGo	8.184	m
GoMT	12.437	m
GMT	14.150	m
GZ	0.007	m

kondisi equilibrium awal. Besar sudut *rolling* pada kondisi tersebut diperoleh sebesar 0.03° ke arah *port* dikarenakan posisi boom *crane* yang meregang ke arah dan dilakukan operasi *lifting topside*. Selanjutnya dilakukan perhitungan hidrostatik dengan persamaan yang sama pada kondisi *even*

Hal ini berpengaruh pada titik berat kapal (G) yang keluar dari bidang center line sehingga titik G mengalami kenaikan dan nilai GM menjadi lebih kecil. Persamaan *free surface effect* sebagai berikut:

$$GG_0 = \frac{FSM}{Displacement}$$

Dimana :

FSM : *Free Surface Moment* (ton.m)

Skenario yang digunakan pada penelitian adalah stabilitas *intact* tanpa terjadi *trim*, oleh karena itu perlu dilakukan pengecekan *trim* dengan menggunakan persamaan (3). Nilai *trim* yang diperoleh sebesar 0 meter menunjukkan tidak terjadi *trim*.

$$Trim = \frac{BG \times Displacement}{MTC \times 100}$$

Dimana :

BG : Selisih antara LCB dan LCG (m)

MTC : *Moment to change trim on centimeter* (t-m)

Perhitungan nilai GZ kondisi initial tertera pada Tabel 13. Kondisi initial termasuk dalam kategori sudut kecil, sehingga perhitungan GZ menggunakan persamaan berikut:

$$GZ = G_0M \times \sin\theta$$

keel. Saat kapal mengalami kemiringan terjadi *free surface effect*, yang mana permukaan cairan didalam tangki yang tidak penuh akan berkumpul pada sisi kemiringan saat kapal miring.

$$GZ = \left(G_0M + \frac{1}{2}BM \tan^2\theta \right) \sin\theta$$

Dimana :

GoM : tinggi metacenter terhadap titik berat *Gravity* (m)

BM : tinggi metacenter terhadap titik berat *Bouyancy* (m)

θ : sudut kemiringan kapal (derajat)

Dengan menggunakan persamaan tersebut diperoleh nilai GZ pada kondisi initial adalah 0.013 meter. Dalam melakukan analisis stabilitas titik *floatation* akan berubah seiring dengan perubahan sudut kemiringan kapal secara melintang. Titik *floatation* tersebut disebut sebagai TCF (*Transverse Centre OF Floatation*). TCF akan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$TCF = \frac{(-yp \times (-0.5yp)) - (ys \times 0.5ys)}{(-yp - ys)}$$

Dimana :

yp : Panjang half breadth sisi *port* (m)

ys : Panjang half breadth sisi *starboard* (m)

Nilai TCF yang diperoleh akan digunakan sebagai acuan tinggi *draft* untuk koreksi dan akan menjadi pengganti titik *centre line* untuk sudut berikutnya. Perubahan nilai TCF pada setiap sudut *heel* mengakibatkan tinggi *draft* pada setiap kondisi sudut *heel* akan berubah, oleh karena itu setiap

Tabel 15.
Perbandingan GZ Numerik dan Analitik

Heel (deg)	GZ MOSES	GZ manual	Error
0	0	0.007	0.00%
10	2.616	2.348	-0.10%
20	4.327	3.934	-0.09%
30	4.044	3.729	-0.08%
40	3.149	3.074	-0.02%
50	2.016	2.140	0.06%
60	0.728	1.241	0.70%

perubahan sudut *heel* dilakukan perhitungan nilai *draft* baru dengan menggunakan persamaan berikut :

$$New\ Draft = Last\ Draft - (\tan \theta_{new} \times TCF) + (\tan \theta_{last} \times TCF)$$

Dengan menggunakan nilai *draft* yang baru, maka dilanjutkan perhitungan hidrotatis seperti pada langkah sebelumnya. Hal yang harus diperhatikan pada tahap ini adalah *displacement*, pada kondisi *heel* harus memiliki besar *displacement* yang sama seperti kondisi *initial*. Kapal dalam keadaan *heeling* yang berubah hanyalah faktor momen penegaknya, sehingga nilai *displacement* kapal selalu bernilai tetap. Apabila *displacement* pada kondisi *heel* berbeda dengan saat kondisi *initial*, maka perlu dilakukan koreksi tinggi *draft* untuk diperoleh besar *displacement* yang sama dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\varepsilon = \frac{(TCF_{current\ heel} - TCF_{last\ heel})}{2 \cdot \tan(90 - (\theta_{current\ heel} - \theta_{last\ heel}))}$$

$$Correction\ Draft = Last\ Draft - \frac{\varepsilon}{\cos\theta}$$

Dari koreksi *draft* tersebut, maka dilakukan perhitungan properti hidrostatis dan nilai GZ ulang pada sudut kemiringan yang sama. Pada *heel* 0° sebelum dilakukan koreksi diperoleh nilai *displacement* 12271 ton, setelah dikoreksi diperoleh properti hidrostatis dan nilai GZ pada Tabel 14.

Setelah dilakukan koreksi diperoleh nilai *displacement* sebesar 12008.822 ton yang mana diperoleh nilai yang mendekati kondisi *displacement*. Nilai GZ yang diperoleh pada kemiringan 0° lebih kecil daripada pada kondisi *initial*, diakrenakan sudut 0° terletak sebelum sudut kemiringan kondisi *initial* yaitu 0.03°.

Dari kalkulasi manual ini dapat diketahui perbedaan antara perhitungan stabilitas untuk sudut besar dan sudut kecil. Pada perhitungan sudut kecil, nilai GM cenderung sama dengan nilai GM awal atau bahkan tetap pada sudut yang kecil. Hal tersebut disebabkan pada sudut kecil posisi nilai G dan M sangat dekat dengan titik potong centerline, bahkan nilai G dan M berhimpitan pada sudut kemiringan yang dekat dengan 0°. Pada perhitungan manual ini dapat diketahui hingga sudut 10° yang tergolong dalam rentang sudut kecil memiliki nilai GM yang berdekatan dengan nilai GM kondisi awal. Sedangkan pada stabilitas sudut besar, nilai GM tidak sama dengan nilai GM awal, hal ini disebabkan buoyancy akibat *displacement* bergerak cukup jauh ke samping dari posisi buoyancy pada saat kondisi tegak sehingga tidak memotong centre line sejajar dengan titik M. Oleh karena itu, pada perhitungan nilai GZ untuk sudut besar dipengaruhi oleh besar jarak buoyancy ke metacenter yang dapat dilihat pada persamaan (5). GZ pada sudut kecil memiliki nilai GM

sebesar 14.7 meter berselisih 0% dengan kondisi *initial* sedangkan pada sudut besar memiliki GM terkecil 0.89 meter diperoleh selisih hingga 0.9% terhadap kondisi *initial*

Perbedaan stabilitas sudut kecil dan sudut besar dapat diketahui dari persamaan yang digunakan. Pada perhitungan sudut kecil tidak dipengaruhi oleh parameter sudut tan θ, yang mana pada sudut kecil nilai tan juga semakin kecil. Nilai tan 0° bernilai 0, oleh karena itu pada sudut kecil perhitungan nilai lengan pengembali tidak menggunakan parameter BM tan θ. Pertambahan sudut kemiringan membuat nilai tan θ juga semakin besar, disisi lain nilai buoyancy yang semakin kecil, sehingga pada perhitungan nilai GZ sudut besar dipengaruhi besar BM tanθ.

E. Perbandingan kurva GZ perhitungan analitik dan numerik

Setelah dilakukan perhitungan manual untuk keseluruhan sudut miring, hasil nilai GZ yang diperoleh dibandingkan dengan nilai GZ secara numerik. Koreksi presentasi error antara hasil lengan pengembali (GZ) analitik dan numerik menggunakan ketentuan dari IACS UR L5. Batas koreksi error nilai GZ antara perhitungan manual dengan numerik sebesar ±5% atau ±5 cm. Perbandingan GZ tertera pada Tabel 15.

Hasil kedua metode tersebut di plot pada kurva GZ dan dilakukan validasi dengan IMO A.749 (18) yang ditunjukkan pada Gambar 11. Berdasarkan pada Tabel 15 hasil koreksi error perhitungan GZ menggunakan *MOSES* semuanya telah memenuhi batas nilai menurut IACS UR L5. Nilai GZ pada sudut 60° memiliki error yang besar disebabkan karena pada proses perhitungannya telah diketahui, bahwa garis *waterline* pada saat kemiringan 60° melewati centre line kapal. Sehingga nilai yang diperoleh selisih cukup besar dengan hasil analisis menggunakan *software*.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan diperoleh bahwa perubahan *draft* dan posisi muatan *lifting* mempengaruhi besar lengan pengembali (GZ). COG kapal akibat perubahan *draft* didapatkan semakin rendah *draft*nya, ketiga arah COG mengalami kenaikan. Perubahan COG akibat sudut putar *crane* tidak berpengaruh signifikan. Korelasi antara perubahan *draft* terhadap nilai GZ adalah semakin rendah *draft* kapal maka semakin besar nilai GZ yang diperoleh. Hasil validasi stabilitas *intact* mengikuti codes IMO A.749 (18) telah memenuhi semua kriteria. Perbandingan hasil analisis stabilitas *crane barge* secara analitik dan manual diperoleh hasil koreksi error antar kedua metode telah memenuhi aturan IACS UR L5 yaitu tidak lebih dari dari ±5%. Sudut Besar dipengaruhi oleh besar kemiringan sudut tan θ dan sin θ sedangkan pada sudut kecil hanya dipengaruhi oleh besar nilai sin θ.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Racharias P., "Studi Komparasi Biaya Instalasi Floatover Vs Lifting pada Topside CPP (Central Processing Platform)," Departemen Teknik Kelautan: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [2] M. L. P. Gorat, "Analisis Stabilitas Crane Barge saat Operasi Heavy Lifting," Departemen Teknik Kelautan: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [3] E. Martono, "Analisis Stabilitas Lanjut Kapal Trimaran Pengangkut Ikan Kerapu Dengan Bantuan Software Hydromax Pro," Departemen Teknik Mesin: Universitas Sebelas Maret, 2020.

- [4] E. C. Tupper, *Introduction to Naval Architecture*. Tokyo: Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN: 978-0939773213.
- [5] M. Faiz, R. Prastianto, E. Djatmiko, S. Nugroho, and Y. Hadasa, "Intact stability analysis of crane barge due to loading orientation effect During heavy lifting operation.," in *IOP Proceedings Series*, 2024.
- [6] A. Biran and R. López-Pulido, *Ship Hydrostatic and Stability*. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN: 0750649887.