

# PENGEMBANGAN DESAIN KAPAL LNG DENGAN CARGO CONTAINMENT SYSTEM TIPE MEMBRAN BENTUK PRISMATIK SEBAGAI SOLUSI ALTERNATIF KEBUTUHAN ALAT TRANSPORTASI GAS ALAM CAIR DI INDONESIA

Ahmad Fauzan Zakki<sup>1</sup>, Aulia Windyandari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia

<sup>2</sup>Program Diploma Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia

Email: [ahmadfzakki@undip.ac.id](mailto:ahmadfzakki@undip.ac.id)

## Abstrak

Distribusi dengan menggunakan jaringan pipa memiliki beberapa kelemahan yaitu biaya investasi yang sangat tinggi dan bersifat tetap (Fixed Distribution System), sehingga apabila terjadi menurunnya kapasitas produksi LNG atau habisnya cadangan LNG, maka instalasi pipa menjadi sampah konstruksi yang memerlukan biaya pembongkaran instalasi. Berdasarkan kondisi ini penelitian difokuskan pada pengembangan desain hullform kapal LNG tipe membran prismatic dalam menunjang pengembangan desain kapal LNG yang sesuai dengan karakteristik potensi gas alam cair. Linear regression method, geosim procedure method dan cube root format method, digunakan untuk menentukan besarnya ukuran utama. Analisis hidrostatis, perhitungan hambatan, stabilitas dan olah gerak kapal dilakukan untuk mengetahui kinerja dari hullform yang telah dikembangkan. Berdasarkan hasil evaluasi dari kinerja hullform yang diusulkan, hullform bulbous bow memiliki kinerja yang lebih baik dibanding hullform non bulbous bow. Namun berdasarkan kriteria regulasi, kedua desain yang diusulkan layak dan aman untuk digunakan sebagai alternatif hullform pada kapal LNG tipe membran prismatic.

Kata kunci: Desain bentuk lambung, Kapal LNG tipe membran prismatic, Transportasi LNG, Analisis *seakeeping*, *bulbous bow hullform*, *non bulbous bow hullform*

## 1. PENDAHULUAN

Gas alam seperti halnya dengan minyak bumi, terbentuk secara alamiah dan dieksplorasi dari lokasi sumur gas yang terletak jauh dari konsumen. Penggunaan pipa sebagai sistem transmisi dan distribusi, memiliki beberapa kekurangan yaitu hanya untuk jarak yang relatif dekat, dan jalur bersifat tetap (fix distribution system), dengan kata lain masih diperlukan sarana distribusi alternatif yang mampu mengangkut gas dalam jumlah besar dan tidak terikat batasan jarak. Cara yang paling efektif untuk mengangkut gas yaitu dalam bentuk cair dengan menggunakan kapal. Transportasi LNG sangatlah tergantung dengan teknologi kapal LNG, yang mana teknologi ini telah dikembangkan lebih dari 50 tahun yang lalu.

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi kapal LNG, namun belum satu pun kapal LNG

yang beroperasi di Indonesia adalah produk dalam negeri. Oleh karena itu, penelitian-penelitian yang menunjang perkembangan teknologi kapal LNG seharusnya menjadi prioritas bagi bangsa Indonesia. Berdasarkan kondisi ini, penelitian ini ditujukan untuk mengembangkan desain kapal LNG dengan Cargo Containment System tipe membran bentuk prismatic sebagai solusi alternatif kebutuhan alat transportasi gas alam cair di Indonesia.

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan desain hullform yang sesuai dengan karakteristik di perairan Indonesia dan kebutuhan alat transportasi LNG dari gas field ke tiap-tiap terminal LNG. Bentuk lambung yang dihasilkan diharapkan memiliki karakteristik hambatan, *seakeeping* dan stabilitas yang baik. Salah satu pertimbangan tangki membran prismatic adalah stabilitas yang lebih baik, karena besarnya free surface pada tangki lebih kecil

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Beberapa penelitian telah banyak dipublikasi tentang perkembangan dan inovasi-inovasi teknologi kapal LNG. Joseph Cuneo telah memaparkan perkembangan teknologi kapal LNG selama 50 tahun terakhir, [1]. Dalam dekade pertama merupakan awal dikembangkannya teknologi kapal LNG, beberapa kapal perintis LNG tersebut adalah Methane Princess, Methane Progress and Jules Verne. Sejumlah 11,191 juta cbm gas alam cair telah diangkut, dengan total jarak pelayaran 690.381 mil.

Pada dekade kedua dengan adanya instalasi gas cair baru di Marsa el Brega, di Libya empat buah kapal telah dibangun dengan menggunakan free standing tank dan double walled aluminium tank yang telah didesain oleh Esso. Kemudian disusul oleh beberapa instalasi lain yaitu di Lumut- Brunei dan Skikda- Algeria.

Pada tahun 1977, Instalasi gas cair yang pertama di Indonesia telah didirikan di Bontang pantai timur dari Pulau Kalimantan. Pada saat itu tujuan distribusi adalah jepang yaitu di wilayah Senboku, Tobata, Chita dan Himeji. Kapal LNG Zodiac yang digunakan untuk transportasi gas tersebut. LNG Zodiac telah menggunakan Kvaerner Moss spherical tanks untuk sistem pengemasan muatannya.

Pada dekade ketiga terjadi beberapa insiden yaitu gagalnya sistem turbin pada kapal LNG Capricorn. Propeller telah terlepas dari tail-shaft nya dan bagian shaft propeller patah di dalam stern tube. Burma dan Pertamina tidak mengizinkan kapal ini untuk masuk ke terminal bongkar karena kapal tersebut tidak berfungsi. Akibat dari kejadian ini kemudian diputuskan untuk memindah muatan dari kapal LNG Capricorn ke kapal LNG Leo. Ini adalah kasus pertama untuk proses transfer LNG dari kapal ke kapal. Insiden yang lain terjadi pada dekade ini adalah LNG Taurus mengalami kandas akibat cuaca buruk.

Pada dekade keempat Malaysia tidak hanya muncul sebagai produsen gas alam cair, namun dari duapuluh satu armada pelayaran enam belas kapal LNG adalah milik dari pemerintah Malaysia. Namun hanya dua dari kapal-kapal tersebut berbendera malaysia. Perkembangan teknologi pada dekade ini ditunjukkan oleh kapal Polar Eagle dan Arctic Sun, kedua kapal ini

menggunakan tangki kargo prismatic independen. Teknologi ini dikembangkan oleh IHI jepang.

Pada dekade kelima Qatar memasuki bisnis gas alam cair dengan begitu besar armada LNG telah dikembangkan. Kapal LNG yang dibangun berukuran diatas 200.000 cbm. Pada dekade ini perkembangan teknologi kapal LNG ditujukan untuk memaksimalkan kapasitas muatan dan meningkatkan tingkat kehandalan dan keselamatan, yaitu meliputi:

1. Shaft dan mesin ganda untuk maksimum keamanan dan kehandalan propulsi dengan mengurangi dampak lingkungan. Selain itu kemudi ganda juga digunakan untuk keselamatan navigasi dan kemampuan manuver.
2. Slow speed diesel engine memberikan efisiensi thermal yang lebih baik daripada turbin uap dan menghasilkan emisi bahan bakar yang lebih kecil 30% dibandingkan dengan kapal LNG sebelumnya.
3. Cargo re-liquefaction plant yang akan mengembalikan muatan yang menguap kembali ke ruang muat, sehingga memaksimalkan kiriman muatan pada terminal bongkar.

Saat ini kapal-kapal LNG banyak dibangun di galangan-galangan kapal di Korea Selatan: Hyundai Heavy Industries (HHI) di Ulsan, Samsung Heavy Industries (SHI) dan Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering (DSME) di Geoje Island.

Penelitian-penelitian yang lain dalam pengembangan teknologi kapal LNG juga dapat dilihat dalam pengembangan teknologi material untuk cryogenic temperature, [2]. Selain itu juga penelitian mengenai beban sloshing pada tipe tangki membran, [3]. Tentang desain membran, [4] dan [5]. Optimisasi ukuran struktur kapal LNG dengan beberapa faktor yang dipertimbangkan yaitu, minimum biaya produksi, berat konstruksi minimum dan kekakuan struktur yang lebih baik, [6].

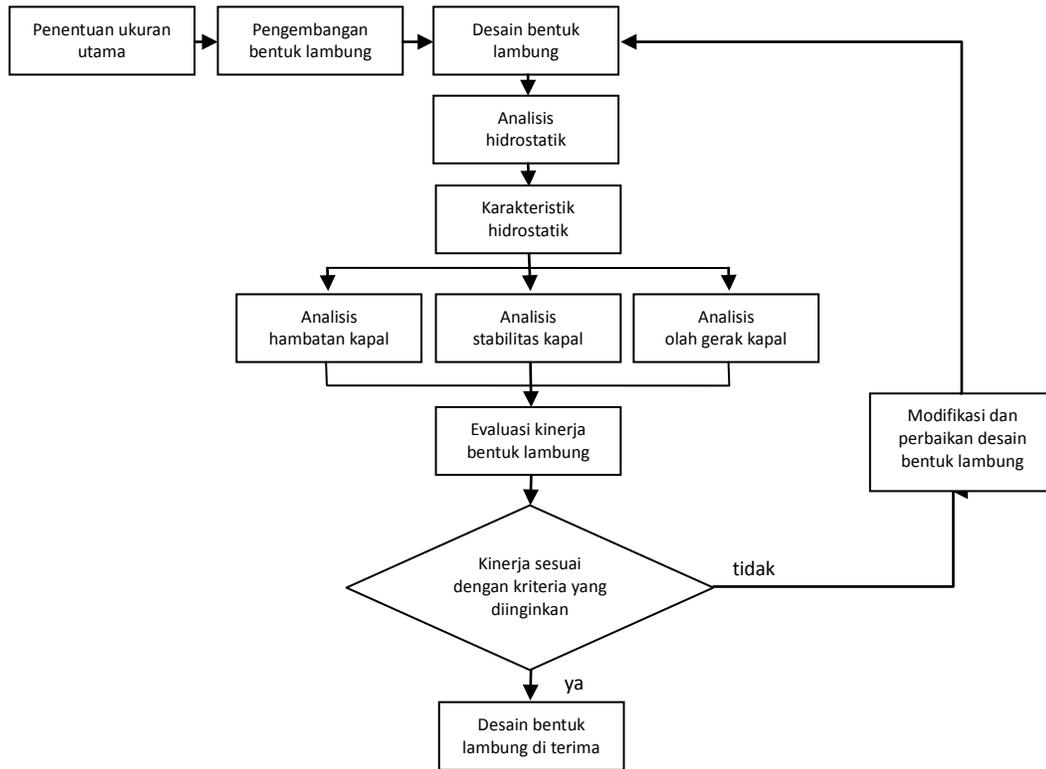
## 3. METODOLOGI PENELITIAN

Metode penelitian untuk mendapatkan bentuk lambung, diawali dengan penentuan besarnya ukuran utama kapal, yang kemudian dilanjutkan dengan pengembangan bentuk lambung. Bentuk

lambung dituangkan dalam rencana garis (lines plan) sebagai deskripsi tiap-tiap bentuk lengkung

kompatibel dari segi teknis maupun ekonomis.

Pada perancangan kapal ini, metode yang



Gambar 1. Diagram alir metodologi penelitian

dari lambung kapal. Lambung kapal ini selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan karakteristik hidrostatiknya. Kajian kinerja juga dilakukan yang meliputi: hambatan kapal, stabilitas kapal dan olah gerak kapal. Metodologi penelitian dalam penelitian ini dapat dilihat dalam diagram alir pada gambar 1.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1. Penentuan ukuran utama dan pengembangan hullform kapal

Secara umum, dalam merencanakan sebuah kapal ada beberapa syarat yang diberikan oleh pemesan (owner and mission requirements) yaitu radius dan rute pelayaran, kecepatan dinas ( $V_s$ ), bobot mati kapal (DWT), jenis barang, kuantitas barang dan kapasitas penumpang, disamping syarat-syarat lain yang berhubungan dengan keamanan, kenyamanan, dan keindahan. Mission requirements tersebut menjadi informasi penting yang akan dijadikan dasar oleh perencana kapal untuk menentukan ukuran utama kapal yang

digunakan adalah metode perbandingan (comparison method). Berikut ini beberapa metode yang termasuk dalam metode perbandingan diantaranya:

1. Metode regresi linier (linear regression method),
2. Cube root format
3. The geosim procedure

Metode perbandingan memiliki kelebihan yaitu waktu penyelesaian perhitungan ukuran utama relatif singkat. Hal ini disebabkan ukuran utama kapal dihasilkan dengan cara mengalikan ukuran utama kapal pembanding dengan faktor skala (scale factor).

Berdasarkan metode-metode yang digunakan, telah didapatkan tiga set ukuran utama sebagai hasil perhitungan dari tiap-tiap metode pendekatan. Ketiga ukuran utama ini kemudian dijadikan referensi dalam menentukan ukuran utama kapal baru. Dari ketiga metode yang digunakan, ukuran utama kapal baru diambil dari metode geosim procedure.

Dalam penelitian ini terdapat dua model tipe

lambung yang diusulkan, untuk kapal LNG tipe membran prismatic. Tipe lambung kapal tersebut

yang menyatakan besarnya konstanta-konstanta yang digunakan untuk menentukan karakteristik

Tabel 1. Data ukuran utama kapal yang diusulkan

<i>Ukuran Utama</i>	<i>Regresi linier</i>	<i>Cube Root</i>	<i>The Geosim Procedure</i>	<i>Kapal yang direncanakan</i>
Panjang (Lpp)	175,2 m	122,0 m	161,0 m	161,0 m
Lebar (B)	27,6 m	19,7 m	26,0 m	26,0 m
Tinggi (H)	17,2 m	-	14,1 m	14,1 m
Sarat (T)	8,8 m	10,7 m	6,1 m	6,1 m

yaitu lambung kapal yang menggunakan bulbous bow dan tanpa bulbous bow. Kedua tipe ini dapat menjadi alternatif bentuk hullform untuk kapal LNG tipe membran prismatic, lihat gambar 2 dan 3.

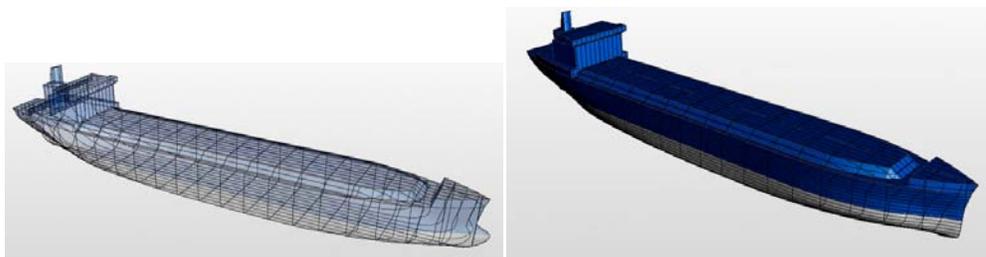
#### 4.2. Perhitungan hidrostatis hullform yang diusulkan

Karakteristik hidrostatis sebuah kapal dipengaruhi oleh kondisi sarat kapal, yang mana besarnya sarat kapal ini ditentukan oleh berat kapal. Adanya kondisi berat kapal yang berfluktuasi sebagai akibat dari aktivitas bongkar muat dan penggunaan consumables, maka perlu dilakukan kajian terhadap karakteristik hidrostatis untuk setiap kapal baru yang direncanakan. Karakteristik hidrostatis kapal tersebut dituangkan dalam sebuah gambar kurva hidrostatis.

Pada kurva hidrostatis dapat dikelompokkan menjadi dua macam kategori berdasarkan fungsi dan kegunaan data lengkungan hidrostatis bagi keperluan analisis kinerja kapal. Kelompok pertama adalah kurva-kurva yang menyatakan besarnya koefisien-koefisien geometri kapal. Koefisien-koefisien ini menggambarkan karakteristik geometri lambung kapal pada setiap kondisi sarat yang berbeda, seperti : Cb (Block Coefficient), Cm (Midship Coefficient), Cw (Coefficient of Water Line), Cp (Prismatic Coefficient). Kelompok kedua adalah kurva-kurva

initial stability kapal, dan untuk menentukan equilibrium kapal pada tiap-tiap kondisi pembebanan. Lengkung hidrostatis yang tergolong dalam kelompok ini misalnya: W (Displacement), WPA (Water Plan Area), TPC (Ton Per Centimetre Immersion), MTC (Moment to change Trim one Centimeter) dan sebagainya.

Berdasarkan hasil perhitungan kurva hidrostatis, telah didapatkan besarnya koefisien dan konstanta hidrostatis dari hullform yang dikembangkan untuk kapal LNG tipe membran prismatic. Besaran dari konstanta dan koefisien didalam kurva hidrostatis tersebut, hendaknya memenuhi kriteria yang diperlukan untuk kapal LNG tipe membran prismatic. Namun, berdasarkan studi literatur, khususnya untuk sebuah kapal LNG, regulasi tentang kriteria penerimaan kurva hidrostatis sebuah kapal, tidak ditemukan. Oleh karena itu evaluasi terhadap kinerja hidrostatis dari hullform yang dikembangkan, akan dilakukan dengan cara membandingkan karakteristik hidrostatis dari kedua hullform baru yaitu tipe bulbous bow dan tipe non bulbous bow. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa bentuk hullform bulbous bow memiliki initial stability yang lebih baik dari non bulbous bow. ini difokuskan pada konstanta-konstanta hidrostatis yang mempengaruhi initial stability dan equilibrium kapal.



Gambar 2. Hullform bulbous bow dan non bulbous bow yang diusulkan untuk kapal LNG

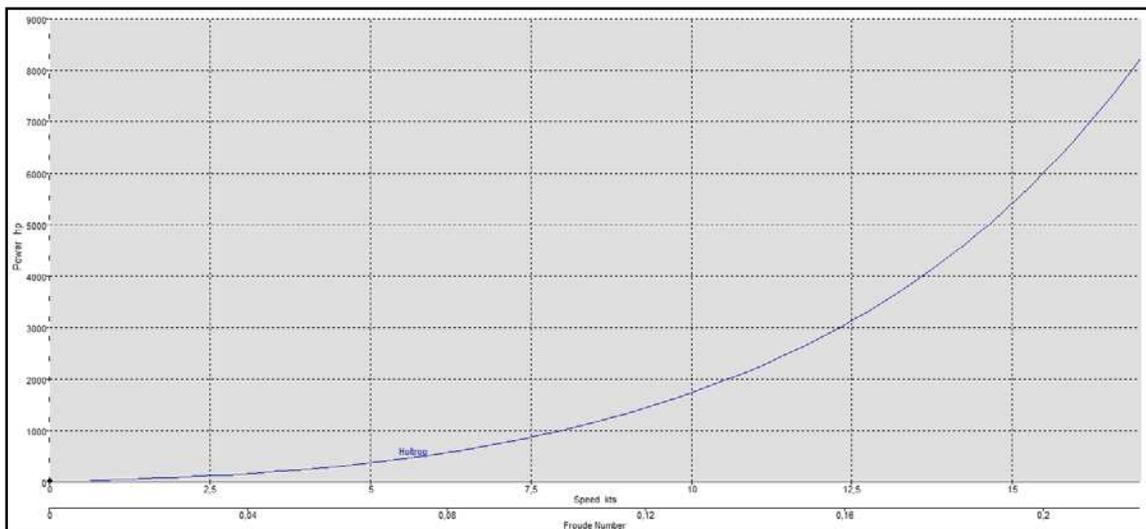
### 4.3. Perhitungan hambatan dengan metode holtrop

Hambatan kapal adalah gaya yang menahan kapal ketika melaju dengan kecepatan dinasnya. Kapal saat berlayar memperoleh hambatan yang berasal dari lambung kapal yang berada dibawah air. Besarnya hambatan ini nantinya dikonversi untuk mendapatkan tenaga yang dibutuhkan oleh sebuah kapal untuk berlayar.

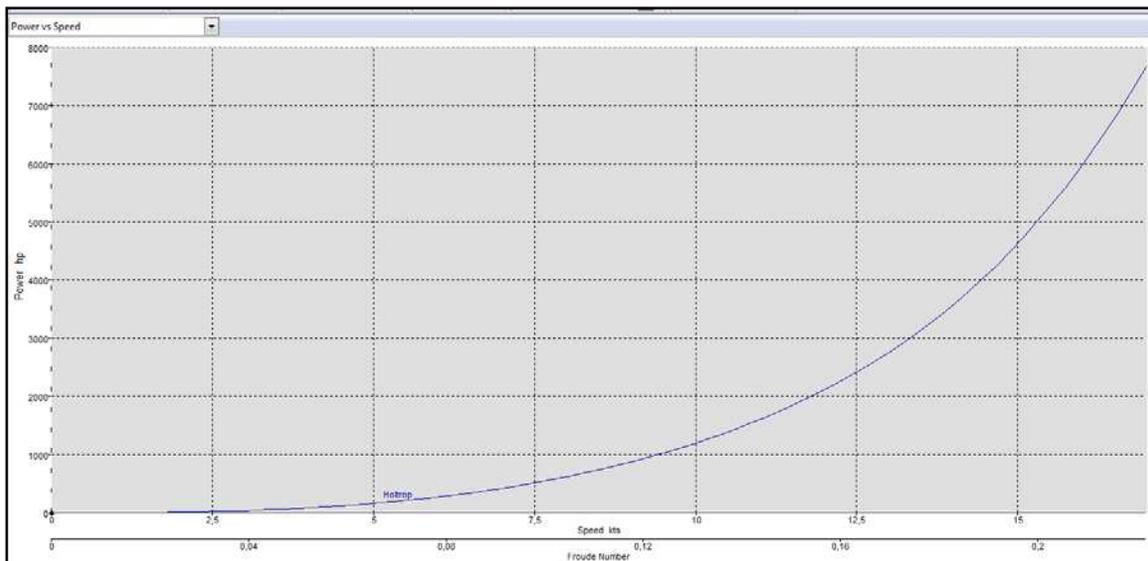
Dalam menentukan besarnya hambatan yang terjadi pada kapal yang telah direncanakan, perhitungan dilakukan dengan bantuan software Hull Speed. Metode estimasi yang digunakan adalah metode holtrop dari paket perhitungan pada

program Hull Speed. Besarnya hambatan tersebut dihitung sampai dengan kondisi kecepatan maksimum sebesar 17 knot.

Berdasarkan hasil perhitungan hambatan (Gambar 3 dan 4) dari kedua desain yang diusulkan, maka dapat ditunjukkan bahwa bentuk hullform bulbous bow memiliki hambatan yang lebih kecil bila dibandingkan dengan bentuk hullform non bulbous bow. Pada kecepatan 17 knot, hullform bulbous bow memerlukan gaya sebesar 562,09 kN, sedangkan pada hullform non bulbous bow memerlukan gaya sebesar 588,88 kN. Hal ini dapat dijelaskan bahwa dengan adanya bulbous bow, maka besarnya wave making resistance dapat diturunkan, sehingga hambatan total kapal dapat diturunkan. Meskipun terdapat



Gambar 3. Grafik karakteristik hambatan hullform bulbous bow



Gambar 4. Grafik karakteristik hambatan hullform non bulbous bow

perbedaan besarnya hambatan yaitu sebesar 4.76%, namun hullform non bulbous bow yang diusulkan tetap dapat diterima sebagai alternatif hullform kapal LNG tipe membran prismatic.

Perbandingan besarnya hambatan dari hullform yang diusulkan seharusnya juga dilakukan terhadap bentuk-bentuk hullform dari kapal LNG yang sudah ada. Hal ini dilakukan untuk mengetahui besarnya improvement dari hullform baru yang diusulkan. Namun, keterbatasan data yang disebabkan karena hullform merupakan dokumen yang sifatnya rahasia, maka perbandingan dengan hullform kapal LNG yang sudah ada tidak dapat dilakukan.

#### 4.4. Analisis dan perhitungan stabilitas

Pada perhitungan stabilitas, skenario kondisi pembebanan ditentukan sejumlah 6 (enam) kondisi yang menggambarkan kondisi beban operasional kapal yang mungkin terjadi. Penentuan kriteria penerimaan stabilitas kapal ini menggunakan kriteria-kriteria yang telah tersedia dalam perangkat lunak software komersial, dalam hal ini kriteria yang akan digunakan adalah kriteria stabilitas kapal dari IMO

Skenario kondisi pembebanan pada

perhitungan stabilitas kapal yang direncanakan, ditentukan berdasarkan besarnya jumlah crew yang dibutuhkan kapal yang direncanakan yaitu sebesar 29 orang. Selain dari itu kondisi pembebanan ditentukan berdasarkan fluktuasi besarnya nilai volume tangki-tangki consumables juga tangki-tangki muatan kargo. Adapun skenario pembebanan yang digunakan meliputi sebagai berikut :

1. Kondisi 1 : merupakan kondisi diasumsikan tangki muatan 100%
2. Kondisi 2 : merupakan kondisi diasumsikan tangki muatan 75%
3. Kondisi 3 : merupakan kondisi diasumsikan tangki muatan 50%
4. Kondisi 4 : merupakan kondisi diasumsikan tangki muatan 25%
5. Kondisi 5 : merupakan kondisi diasumsikan tangki muatan 10%
6. Kondisi 6 : merupakan kondisi diasumsikan pada kondisi berat kapal kosong (LWT)

Standar stabilitas yang ditetapkan IMO adalah mengenai besarnya lengan stabilitas (GZ), dimana nilai GZ ini telah diatur tidak boleh kurang dari standar yang telah ditetapkan. Adapun kriteria IMO yang digunakan untuk karakteristik stabilitas dari hullform yang diusulkan adalah sebagai

Tabel 3. Hasil analisis stabilitas kapal LNG dengan bulbous bow

No	Rule	Criteria	Required	Kondisi					
				I	II	III	IV	V	VI
1	IMO.A.749(18) Ch.3.1.2.1	Area 0° to 30°	3,15 m.deg	29,06	29,73	29,29	43,19	52,19	93,35
2	IMO.A.749(18) Ch.3.1.2.1	Area 0° to 40°. or Downflooding point	5,16 m.deg	51,83	50,83	45,60	66,73	77,63	135,33
3	IMO.A.749(18) Ch.3.1.2.1	Area 30° to 40°. or Downflooding point	1,719 m.deg	22,77	21,11	16,31	23,54	25,44	41,98
4	IMO.A.749(18) Ch.3.1.2.2	GZ at 30°. or greater	0,2 m	2,42	2,18	1,67	2,38	2,64	4,31
5	IMO.A.749(18) Ch.3.1.2.3	Angle of GZ max	25 deg	41,80	39,10	30,90	31,80	27,30	27,30
6	IMO.A.749(18) Ch.3.1.2.4	GM	0,15 m	3,30	3,48	3,72	5,85	7,79	16,30

berikut, [7] :

1. Section A.749 (18), Chapter 3.1.2.1 :
  - a. Luasan pada daerah dibawah kurva GZ pada sudut oleng  $0^{\circ}$ –  $30^{\circ}$  (deg) tidak boleh kurang atau sama dengan 3,151 m.deg.
  - b. Luasan pada daerah dibawah kurva GZ pada sudut oleng  $0^{\circ}$ –  $40^{\circ}$  (deg) tidak boleh kurang atau sama dengan 5,157 m.deg.
  - c. Luasan pada daerah dibawah kurva GZ pada sudut oleng  $30^{\circ}$ –  $40^{\circ}$  (deg) tidak boleh kurang atau sama dengan 1,719 m.deg.
2. Section A.749 (18), Chapter 3.1.2.3 : sudut pada nilai GZ maksimum tidak boleh kurang atau sama dengan  $25^{\circ}$  (deg)
3. Section A.749 (18), Chapter 3.1.2.4 : nilai GM awal pada sudut  $0^{\circ}$  (deg) tidak boleh kurang atau sama dengan 0,15 m.

Berikut ini adalah tabulasi dari hasil perhitungan stabilitas kapal LNG pada kondisi I s/d kondisi VI dengan standar kriteria IMO yang terangkum dalam bentuk tabel 2 dan 3:

Berdasarkan hasil perbandingan antara karakteristik stabilitas kapal dengan kriteria penerimaan yang ditentukan oleh IMO, maka dapat disimpulkan bahwa hullform kapal yang diusulkan memenuhi persyaratan IMO. Dengan kata lain bahwa kedua hullform tersebut aman untuk digunakan sebagai alternatif hullform untuk kapal LNG tipe membran prismatic.

#### 4.5. Evaluasi karakteristik *seakeeping*

Pada penelitian ini, evaluasi *seakeeping* dilakukan untuk mendapatkan perilaku gerakan dari hullform yang diusulkan. Perbandingan antara kinerja hullform non bulbous bow dengan hullform bulbous bow dilakukan untuk

mengetahui keunggulan dan kekurangan perilaku *seakeeping* satu sama lain. Hal ini diperlukan dalam memberikan rekomendasi desain hullform yang lebih baik untuk digunakan pada kapal LNG tipe membran prismatic.

Kriteria penerimaan kinerja olah gerak kapal telah didiskusikan dalam Nordic co-operative project “Seakeeping performance of ships”, [8]. Namun, tidak ditemukan kriteria penerimaan olah gerak khusus untuk kapal LNG, sehingga kriteria NORDFORSK tersebut yang akan digunakan dalam penelitian ini. General operability limiting criteria for ships yang ditetapkan NORDFOSK mengatur standar penerimaan olah gerak untuk kapal niaga (merchant ship), kapal perang (naval vessels) dan kapal cepat kecil (fast small craft), lihat tabel 4.

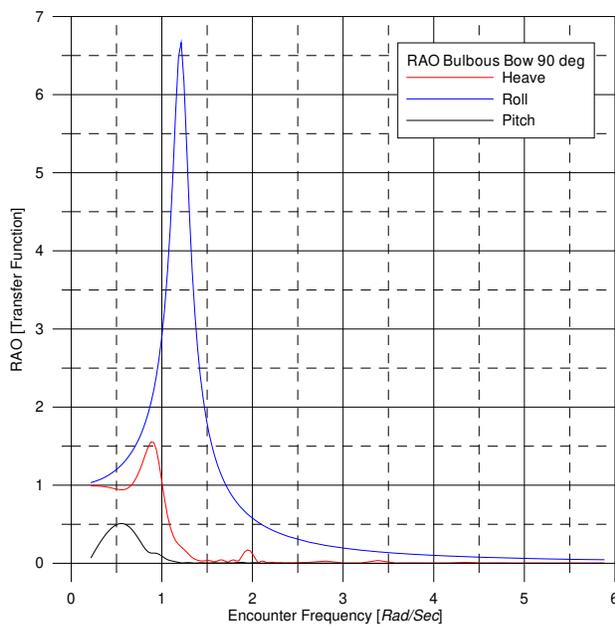
Analisis olah gerak dihitung dengan menggunakan bantuan software komersial yang menggunakan frequency domain strip theory. Hasil running dari analisis *seakeeping*, salah satunya adalah berupa Response Ampitude Operator (RAO). RAO adalah fungsi transfer yang menyatakan hubungan antara wave spectrum dengan gerakan respon kapal (ship response spectrum). Karakteristik gerakan respon kapal yang diusulkan dapat dilihat dari RAO. Pada grafik RAO, besarnya sensitifitas response kapal terhadap gaya eksitasi yang disebabkan gelombang laut dapat dilihat. Besarnya RAO pada hullform bulbous dan non bulbous dapat dilihat pada Gambar 5-8.

Berdasarkan grafik yang didapat dari perhitungan (Gambar 5-8), nampak bahwa respon gerakan kapal bulbous bow hampir sama dengan non bulbous bow. Pada kondisi sudut datang gelombang sebesar  $90^{\circ}$  derajat, RAO menunjukkan

Tabel 4. Kriteria penerimaan kinerja olah gerak kapal, NORDFORSK 1987

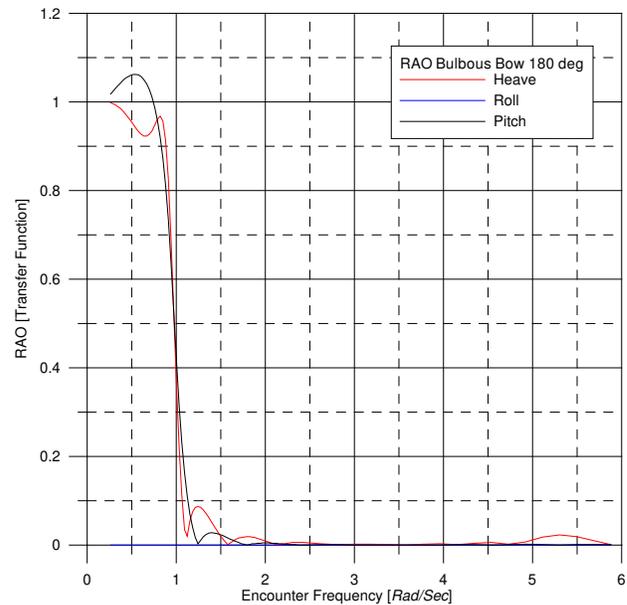
General Operability Limiting Criteria for Ships (NORDFORSK, 1987)			
Description	Merchant Ships	Navy Vessels	Fast Small Craft
RMS of vertical acceleration at FP	0.275 g ( $L \leq 100m$ ) 0.059 g ( $L \geq 330m$ )	0.275 g	0.65 g
RMS of vertical acceleration at Bridge	0.15 g	0.20 g	0.275 g
RMS of lateral acceleration at Bridge	0.12 g	0.10 g	0.10 g
RMS of Roll	6.0 deg	4.0 deg	4.0 deg
Probability of Slamming	0.03 g ( $L \leq 100m$ ) 0.01 g ( $L \geq 330m$ )	0.03 g	0.03 g
Probability of Deck Wetness	0.05	0.05	0.05

besar respons gerakan roll yang cukup signifikan pada kedua bentuk hullform yang diusulkan. Pengaruh gelombang datang pada gerakan heaving juga terlihat ada, meskipun tidak sebesar pada gerakan roll. Sedangkan pada gerakan pitch, gelombang dari arah 900 tidak berpengaruh secara signifikan. Hal ini sudah sesuai secara teori, bahwa gelombang datang pada posisi samping (arah sumbu y) tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap gerakan rotasi pada sumbu y (pitch motion). Perbandingan besarnya gerakan heave dan roll dapat disimpulkan bahwa damping motion pada heave tampak lebih besar dibandingkan dengan damping motion pada gerakan roll.



Gambar 5. RAO hullform bulbous bow sudut gelombang 90 derajat

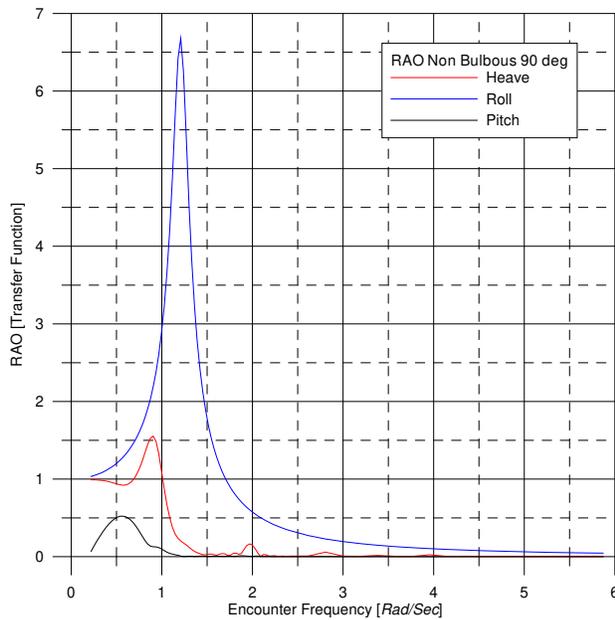
Pada kondisi sudut gelombang datang 1800, tampak bahwa gaya eksitasi yang disebabkan oleh gelombang tidak berpengaruh terhadap gerakan roll. Hal ini bisa dijelaskan dikarenakan bentuk kapal adalah simetri terhadap sumbu x, maka letak center of floatation dan center of buoyancy tepat pada centerline kapal, sehingga gerakan heave akibat gelombang (sudut 1800) tidak dapat memicu terjadinya coupling gerakan roll. Berdasarkan teori, gaya eksitasi memanjang dan vertikal akibat gelombang dari arah sumbu x, tidak berpengaruh secara langsung terhadap gerakan rotasi pada sumbu x (rolling motion)



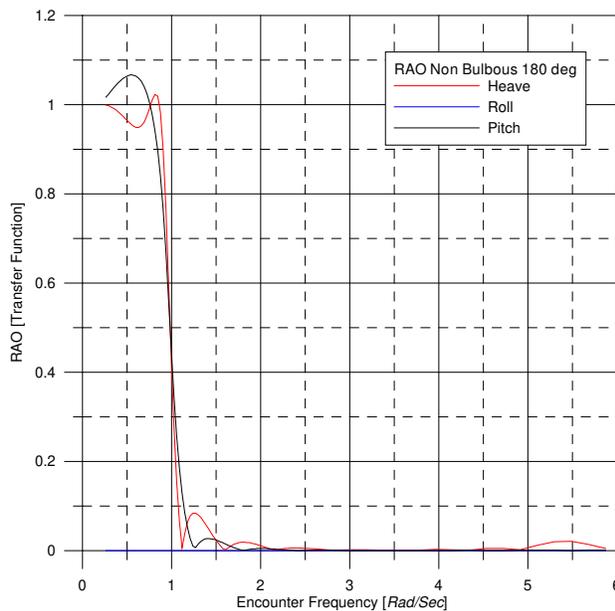
Gambar 6. RAO hullform bulbous bow sudut gelombang 180 derajat

Pada kurva RAO telah ditunjukkan bahwa ketika frekuensi rendah (long wavelength), nilai RAO adalah satu, secara fisik ini dapat diartikan bahwa gerakan kapal hampir sama dengan gerakan gelombang. Kapal bergerak naik turun mengikuti profil gelombang seperti sebuah kayu. Pada frekuensi tinggi (very short wavelength) gerakan gelombang-gelombang ini sangat kecil bila dibandingkan dengan panjangnya kapal, hampir dapat dikatakan tidak memiliki pengaruh terhadap gerakan kapal. Diantara kondisi frekuensi rendah dan tinggi, nilai maksimum terdapat pada grafik RAO, angka ini secara fisik dapat diartikan adalah puncak resonansi (peak of resonant) pada sebuah sistem gerak harmoni tereksitasi. Pada kondisi resonansi ini, gerakan kapal dapat mencapai beberapa kali dari gelombang. Frekuensi pada puncak ini adalah natural frequency dari kapal. Tingginya puncak resonansi ini tergantung dari besarnya peredam (damping) gerakan tersebut. Gerakan heave dan pitch memiliki redaman yang lebih tinggi bila dibandingkan gerakan roll.

Pada hullform yang diusulkan, dalam range frekuensi rendah, nilai RAO besarnya mendekati satu, kemudian seiring bertambahnya frekuensi nilai RAO juga meningkat. Namun peningkatan yang dialami dari tipe gerakan untuk tiap kondisi gelombang berbeda.



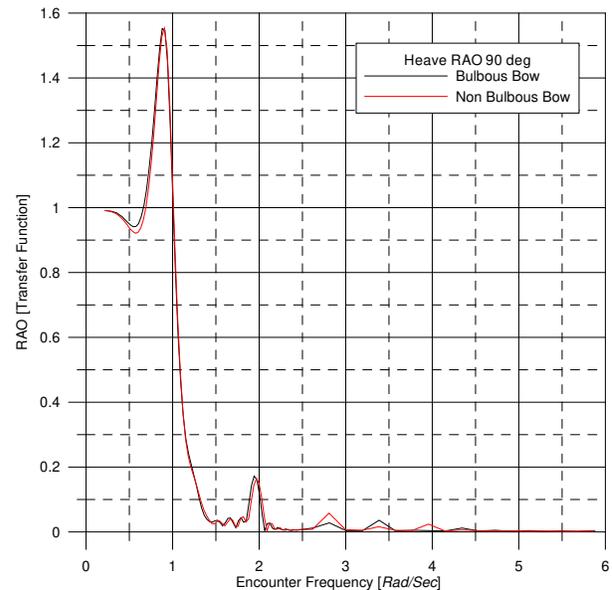
Gambar 7. RAO hullform non bulbous bow sudut gelombang 90 derajat



Gambar 8. RAO hullform bulbous bow sudut gelombang 180 derajat

Pada gelombang dengan sudut 900, gerakan pitching nampak tidak terpengaruh. Pada gerakan heave dan roll terjadi kenaikan, dan mencapai puncaknya pada frekuensi 0.905 rad/sec dan 1.209 rad/sec dengan nilai RAO sama dengan 1.553 dan 6.68 untuk tipe tanpa bulbous bow. Pada tipe

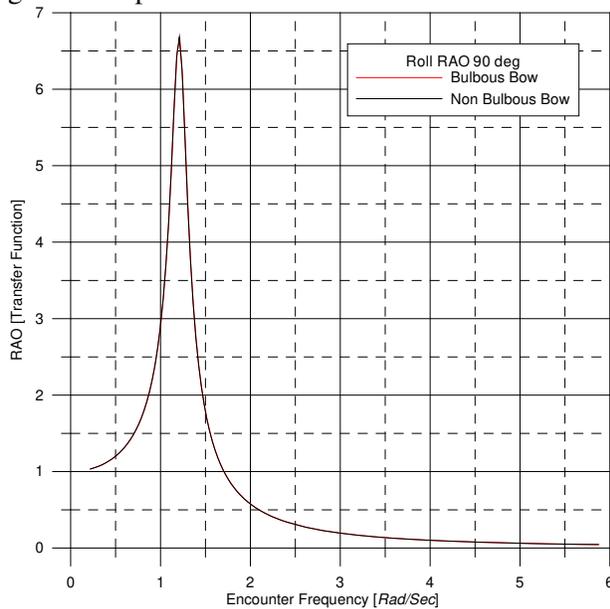
bulbous bow, frekuensi puncak resonansi terjadi pada 0.88 rad/sec dan 1.214 rad/sec, dengan nilai RAO 1.552 dan 6.67 untuk gerakan heave dan roll. Pada gelombang dengan sudut 1800, gerakan roll tampak tidak terpengaruh. Namun pada gerakan heave dan pitch nampak terjadi kenaikan dan mencapai puncak pada frekuensi 0.814 rad/sec dan 0.541 rad/sec dengan nilai RAO 1.023 dan 1.067, untuk tipe non bulbous bow. Pada tipe bulbous bow untuk gerakan heave dan pitch memiliki frekuensi puncak 0.263 rad/sec dan 0.546 rad/sec, dengan nilai RAO 0.998 dan 1.062. Pada kondisi gelombang 1800, berdasarkan nilai puncak RAO yang terjadi pada kedua hullform yang diusulkan, tampak bahwa adanya bulbous bow telah memberikan gaya redaman yang lebih tinggi terhadap gaya eksitasi akibat gelombang. Hal ini dapat dilihat dari penurunan nilai puncak RAO sebesar sekitar 2.5% untuk gerakan heave dan 0.47% untuk gerakan pitch. Grafik perbandingan nilai RAO pada kondisi gelombang 900 dan 1800 untuk hullform tipe bulbous dan non bulbous bow dapat dilihat pada Gambar 9-12.



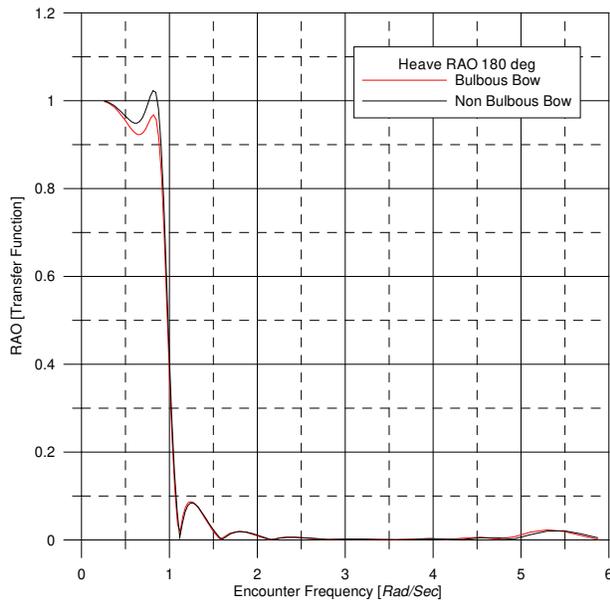
Gambar 9. Perbandingan RAO untuk gerakan heave pada sudut gelombang 90 derajat

Selain grafik RAO, hasil yang lain dari analisis olah gerak kapal adalah besarnya nilai amplitudo, velocity dan akselerasi dari gerakan heave, pitch dan roll kapal. Keluaran ini adalah root mean square (RMS) dari nilai tiap-tiap variabel respon

gerakan kapal.



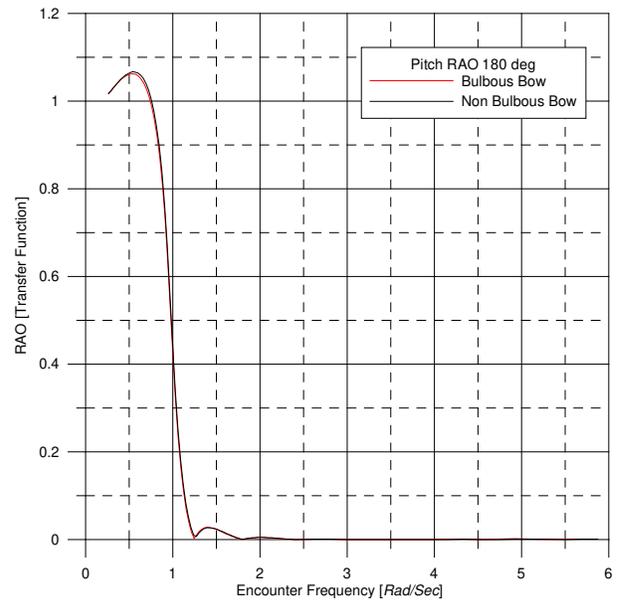
Gambar 10. Perbandingan RAO untuk gerakan roll pada sudut gelombang 90 derajat



Gambar 11. Perbandingan RAO untuk gerakan heave pada sudut gelombang 180 derajat

Berdasarkan kriteria penerimaan yang ditetapkan oleh NORDFORSK, besarnya kriteria akselerasi vertikal, atau dapat disebut juga akselerasi gerakan heave adalah 0.275g pada lokasi FP dan 0.15g pada lokasi di anjungan kapal. Berdasarkan kriteria ini maka untuk hullform yang

diusulkan, telah memenuhi kriteria, dimana besarnya maksimum akselerasi heave sama dengan 0,448 m/s<sup>2</sup> atau setara dengan 0.047g. Berdasarkan kriteria gerakan roll, maksimum simpangan gerakan roll yang diijinkan adalah sebesar 6 derajat. Pada karakteristik gerakan roll dari respon kedua hullform yang diusulkan, tampak bahwa desain yang diusulkan telah memenuhi kriteria yang ditentukan. Deck wetness juga tidak terjadi pada desain tersebut. Berdasarkan hasil perbandingan dengan kriteria penerimaan, desain yang diusulkan dapat dinyatakan layak untuk digunakan sebagai lambung kapal LNG tipe membran prismatik. Hasil keluaran nilai amplitudo, velocity dan akselerasi dapat dilihat pada Tabel 5-6.



Gambar 12. Perbandingan RAO untuk gerakan pitch pada sudut gelombang 180 derajat

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Telah diusulkan bentuk hullform alternatif yang dapat digunakan untuk kapal LNG tipe membran prismatik sesuai dengan karakteristik perairan di Indonesia. Metode regresi linier, metode geosim procedure dan metode cube root format, telah digunakan untuk menentukan besarnya ukuran utama. Berdasarkan ukuran utama yang telah didapat, desain lambung dengan bulbous bow dan non bulbous bow telah diusulkan sebagai bentuk lambung alternatif. Prosedur yang dilakukan untuk mendapatkan bentuk lambung

tersebut adalah modifikasi hullform yang sudah ada. Penskalaan master desain yang terpilih dilakukan, agar dimensi utama sesuai dengan dimensi yang direncanakan untuk kapal baru. Selanjutnya perubahan bentuk pada bagian haluan dan buritan dilakukan untuk mencapai besarnya koefisien blok yang telah ditetapkan. Proses pemeriksaan streamline pada tiap-tiap lengkung badan kapal sebagai tahapan akhir dalam pembuatan bentuk lambung kapal baru.

Berdasarkan hasil analisis numerik, simulasi dan perhitungan strip theory dalam menentukan kinerja hullform yang dikembangkan, hullform bentuk bulbous bow memiliki keunggulan dalam berbagai aspek dibandingkan dengan hullform non bulbous bow. Namun kedua hullform yang dikembangkan memenuhi semua standar kriteria penerimaan, sehingga keduanya dapat digunakan

sebagai alternatif hullform untuk kapal LNG tipe membran prisma.

Meskipun secara numerik hullform ini telah dinyatakan layak dan aman untuk digunakan sebagai lambung kapal LNG tipe membran prisma, namun pembuktian secara eksperimen perlu dilakukan sebelum diaplikasikan secara riil. Template ini dibuat untuk memudahkan proses pencetakan jurnal. Kerjasama dan kesediaan penulis mengikuti acuan penerbitan sangat diharapkan.

Tabel 5. Nilai Amplitudo, Velocity, Acceleration hullform bulbous bow

Item	Wave heading (deg)	Kapal LNG Berbulbous		
		Amplitudo	Velocity	Acceleration
Heaving	0	0,147 m	0,043 m/s	0,023 m/s <sup>2</sup>
	45	0,323 m	0,155 m/s	0,097 m/s <sup>2</sup>
	90	0,757 m	0,546 m/s	0,448 m/s <sup>2</sup>
	180	0,321 m	0,279 m/s	0,251 m/s <sup>2</sup>
Rolling	0	0	0	0
	45	3,48 deg	0,07729 rad/s	0,10239 rad/s <sup>2</sup>
	90	4,93 deg	0,20739 rad/s	0,26915 rad/s <sup>2</sup>
	180	0	0	0
Pitching	0	0,68 deg	0,00327 rad/s	0,00098 rad/s <sup>2</sup>
	45	0,94 deg	0,00656 rad/s	0,00352 rad/s <sup>2</sup>
	90	0,70 deg	0,00828 rad/s	0,00590 rad/s <sup>2</sup>
	180	0,63 deg	0,00996 rad/s	0,00932 rad/s <sup>2</sup>

Tabel 6. Nilai Amplitudo, Velocity, Acceleration hullform non bulbous bow

Item	Wave heading (deg)	Kapal LNG Tak Berbulbous		
		Amplitudo	Velocity	Acceleration
Heaving	0	0,155 m	0,054 m/s	0,032 m/s <sup>2</sup>
	45	0,329 m	0,158 m/s	0,099 m/s <sup>2</sup>
	90	0,763m	0,569 m/s	0,452 m/s <sup>2</sup>
	180	0,341 m	0,298 m/s	0,268 m/s <sup>2</sup>
Rolling	0	0	0	0
	45	3,48 deg	0,07738 rad/s	0,10242 rad/s <sup>2</sup>
	90	4,95deg	0,20756 rad/s	0,26932 rad/s <sup>2</sup>
	180	0	0	0
Pitching	0	0,71 deg	0,00355 rad/s	0,00129 rad/s <sup>2</sup>
	45	0,95 deg	0,00709 rad/s	0,00369 rad/s <sup>2</sup>
	90	0,73 deg	0,00875 rad/s	0,00623 rad/s <sup>2</sup>
	180	0,64 deg	0,01023 rad/s	0,00960 rad/s <sup>2</sup>

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Joseph Cuneo, James Lewis, Peter Noble, Willian duBarry Thomas, 2009."The First 50Years of Liquefied Natural Gas, LNG, Ocean Shipping: 1959-2009". SNAME 2009 Annual Meeting Paper Proposal.
- [2] Jang Hyun Lee, Kyung Su Kim, Jae Beom Lee, Yong Sik Yang, Mi Ji Yoo,2009." A numerical simulation model of cyclic hardening behavior of AC4C-T6 for LNG cargo pump using finite element analysis". Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22 (2009) 889–896.
- [3] Lee,D.H, Kim, M. H, Kwon, S. H, Lee, Y. B, 2007." A parametric sensitivity study on LNG tank sloshing loads by numerical simulations". Ocean Engineering 34 (2007) 3–9.
- [4] Kim Myung Hyun, 2010." Fatigue strength assessment of MARK-III type LNG cargo containment system". Ocean Engineering, Vol. 37 pp.1243-1252.
- [5] Byung Chul Kim, Soon Ho Yoon, Dai Gil Lee, 2011." Pressure resistance of the corrugated stainless steel membranes of LNG carriers". Ocean Engineering 38 (2011) 592–608.
- [6] Caprace, J. D, Bair, F, Rigo, P, 2010." Scantling multi-objective optimisation of a LNG carrier". Marine Structures 23 (2010) 288–302.
- [7] Barrass, C. B. 2004. Ship Design and Performance for Masters and Mates. Butterworth Heinemann. Oxford British
- [8] NORDFORSK, 1987. Seakeeping Criteria. Nordic co-operative project.