



ISSN 2338-0322

# JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

## Studi Analisa *Slamming & Deck Wetness* Akibat Gerakan *Heaving – Pitching Coupling & Gerakan Non-Linier Rolling* (Studi Kasus Kapal MT. Pandan)

Azhabul Hayatul Fajar<sup>1)</sup>, Deddy Chrismianto<sup>1)</sup>, Eko Sasmito Hadi<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Email: [Azhabul.Hayatul.Fajar@gmail.com](mailto:Azhabul.Hayatul.Fajar@gmail.com)

### Abstrak

Analisis olah gerak kapal di perairan dikenal sebagai *seakeeping* yang merupakan bidang studi meliputi perilaku dan unjuk kerja kapal diatas gelombang yang menunjukkan kemampuan kapal untuk mempertahankan fungsi dalam menjalankan misinya di laut. Jadi analisa *seakeeping* sangat diperlukan untuk melihat kemampuan kapal untuk bertahan dalam kondisi berbahaya pada saat menghadapi cuaca buruk. Penelitian mengenai karakteristik kapal sebenarnya telah banyak dilakukan namun menentukan karakteristik gerak dinamis yang digabungkan seperti *heaving – pitching*, atau karakteristik gerak Non-Linier *rolling* serta karakteristik *slamming* dan *deck wetness*-nya. Maka dari itu, kajian yang penulis paparkan pada tugas akhir ini adalah studi karakteristik stabilitas dinamis gerakan *Heaving – Pitching Coupling* dimana berdasarkan hasil perhitungan dan analisa yang dilakukan didapatkan grafik RAO untuk tiap sudut datang gelombang. Dari hasil yang didapatkan, nilai amplitudo, *velocity*, dan akselerasi pada respon gerak *heave* dan *pitch* serta *roll* rata – rata jatuh pada arah sudut datang gelombang 90<sup>0</sup> (*beam sea*). Kemudian hasil dari analisa *slamming* dan *deck wetness* menunjukkan telah sesuai menurut *criteria Rules General Operability Limiting Criteria for Ship (NORDFORSK, 1987)*.

Kata Kunci : *Heaving, Pitching, Slamming, Deck Wetness, Non-Linier Rolling*

### 1. PENDAHULUAN

Secara prinsip kapal dibangun dengan tujuan mengangkut manusia dan barang untuk mengerjakan suatu operasi di tengah laut. Agar memenuhi tujuan tersebut suatu kapal harus memenuhi beberapa karakteristik dasar yaitu mengapung dalam posisi tegak lurus, bergerak dengan kecepatan sesuai dengan rancangan awal, cukup kuat untuk menahan beban yang dialami akibat cuaca yang buruk, dan mampu berjalan pada suatu lintasan lurus serta manuver di laut lepas seperti halnya dalam perairan terbatas.

Oleh karena itu perlunya kajian kinerja olah gerak (*seakeeping*) dari kapal selama beroperasi. *Seakeeping* merupakan bidang studi yang meliputi perilaku dan unjuk kerja kapal diatas gelombang yang menunjukkan kemampuan kapal untuk mempertahankan fungsi dalam menjalankan

misinya dilaut. Jadi analisa *seakeeping* sangat diperlukan untuk melihat kemampuan kapal untuk bertahan dalam kondisi berbahaya pada saat menghadapi cuaca buruk.

Beberapa penelitian tentang kapal niaga, komersil, maupun tanker telah diangkat tetapi hanya membahas tentang besar hambatan, stabilitas dan *seakeeping*nya hanya berfokus pada penerimaan karakteristik menurut *Nordfosk 1987* dan belum ada yang membahas tentang karakteristik *deck wetness* dan probabilitas terjadinya *slamming*. Berdasarkan hal tersebut perlu kiranya dilakukan pengkajian ilmiah yang lebih dalam mengenai karakteristik stabilitas dinamis gerakan *Coupling Heaving – Pitching*.

#### 1.1. PerumusanMasalah

Berdasarkanpokokpermasalahan yang terdapatpadalatarbelakang, makarumusan masalah

yang ditentukan antara lain untuk menentukan karakteristik gerak *Heaving – Pitching Couple*, gerak Non-Linier *Rolling*, probabilitas Slamming, dan Deck Wetness pada kapal tanker yang diuji.

### 1.2. Pembatasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan sebagai arahan serta acuan dalam penulisan tugas akhir ini agar sesuai dengan permasalahan serta tujuan yang diharapkan adalah:

1. Sudut gelombang yang digunakan adalah sudut *Beam Sea, Head Sea, dan Following Sea*.
2. Analisa yang dilakukan menggunakan SPP (*Seakeeping Prediction Progame*).
3. Tidak ada pengujian *Towing Tank* maupun MOB (*Maneuvering Ocean engineering Basin*).
4. Kapal tanker yang dianalisa hanya bagian lambung saja (*Hullform*).

### 1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang diatas maka maksud dan tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan hasil dari karakteristik *seakeeping* untuk gerakan *Heaving – Pitching Coupling*.
2. Mendapatkan hasil dari karakteristik *seakeeping* untuk gerakan non-linier *Rolling*.
3. Mendapatkan hasil dari karakteristik *slamming* dan *deck wetness* pada kapal tersebut

### 1.4. Manfaat Penelitian

Setelah diketahui hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat kepada berbagai pihak diantaranya:

1. Sebagai sumbangan pemikiran dan ilmu pembelajaran tentang karakteristik *seakeeping* untuk kapal tanker yang membawa jenis muatan yang berbeda dan berat jenis muatan yang berbeda pula.. Adapun manfaat sebagai sumbangan pemikiran dan ilmu pembelajaran tentang karakteristik *seakeeping* kapal tanker inipada galangan adalah untuk memperoleh desain kapal tanker yang mempunyai olah gerak yang baik dalam keadaan apapun.
2. Memberikan dampak positif bagi industri perkapalan Indonesia untuk penelitian kapal tanker di Indonesia yang bentuk rancangan kapal tanker ke depannya akan lebih baik lagi dalam rancang bangunnya.
3. Memperoleh konsep desain untuk *Hullform* kapal tanker yang memiliki olah gerak yang baik juga mampu memberi panduan dalam mencegah dampak negatif akibat cuaca yang buruk.

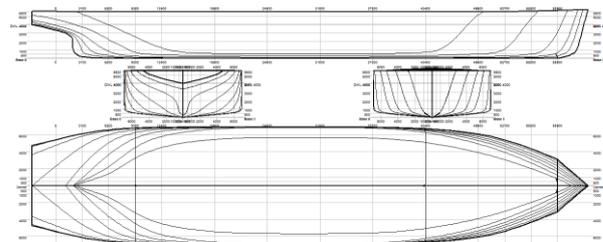
## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Olah Gerak Kapal (*Seakeeping*)

Kemampuan olah gerak kapal akan dipengaruhi oleh faktor dari luar maupun dari dalam serta faktor dari manusia itu sendiri. Hal ini perlu dipahami mengingat keterbatasan kemampuan kapal menghadapi cuaca dan perairan maupun laut yang berbeda – beda, serta gerakan kapal di air juga memerlukan ruang gerak yang cukup. Contohnya pengaruh angin dan sudut datang gelombang. Studi kasus untuk penelitian ini adalah kapal tanker MT. Pandan milik Pertamina yang beroperasi didaerah pantai utara Jawa. Data – data yang diperoleh berupa Lines plan dan ukuran utama kapal dapat dilihat dalam tabel 1 dan gambar 1.

Tabel 1. *Principal Dimension*

No.	Deskripsi	Simbol	Unit	Nilai
1	Length Overall	LoA	m	66,00
2	Length Between Perpendicular	Lpp	m	62,00
3	Breadth	B	m	13,80
4	Depth	H	m	5,50
5	Draft	T	m	4,00
6	Service Speed	Vs	knot	10,00
7	Coefficient Block	Cb	-	0,68



Gambar 1. *Lines Plan* Kapal MT. Pandan

### 2.2. Arah Kapal Terhadap Arah Gelombang Datang

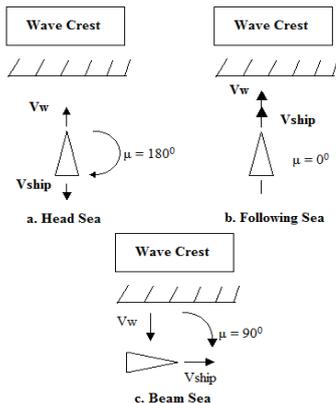
Desain *seakeeping* keseluruhan dapat dibagi menjadi 3 bidang, yaitu:

1. Kelayakhunian, ini berkaitan dengan daerah lingkungan yang mana kru dapat melaksanakan tugasnya secara efektif sehingga tidak ada gangguan kinerja karena perilaku kapal di perairan laut. Kelayakhunian sangat penting untuk kapal yang berlayar di perairan yang ekstrim karena bisa membuat awak kapal bekerja dengan optimal jika kapal mempunyai kelayakhunian yang baik. Namun, persyaratan kelayakhunian sangat tergantung pada jenis misi untuk kapal tertentu.
2. Pengoperasian, ini berada penelitian meliputi operasi yang tepat dari semua peralatan

mekanis atau sistem instrumentasi, keamanan dek kargo, dan kualitas manuver kapal dalam lingkungan laut.

3. Bertahan hidup, bagian ini berkaitan dengan faktor-faktor yang sangat penting jika kapal atau bagian utama mengalami kerusakan atau hancur dalam kasus ini kedua kelayakhunian dan pengoperasian tidak lagi menjadi perhatian.

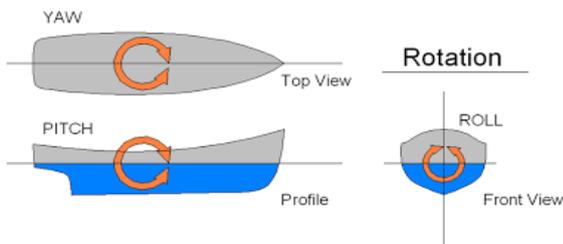
Selain faktor gelombang, terdapat juga faktor gelombang papasan, dimana gelombang tersebut berpapasan terhadap kapal. Sebagai gambaran arah kapal terhadap arah datang gelombang untuk kondisi *head sea*, *following sea* dan *beam sea* dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2. Definisi arah kapal terhadap arah datang gelombang

Dalam memperoleh perlakuan dari gelombang, kapal mengalami 2 jenis gerakan :

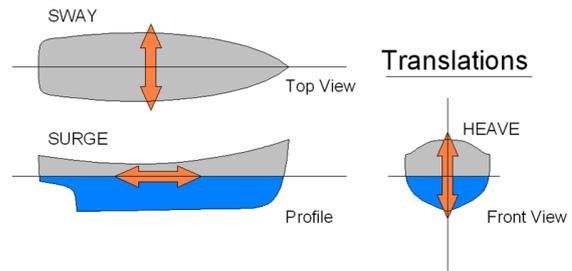
1. Mode Gerak Osilasi Rotasional
  - a. *Rolling*, gerakan osilasi rotasional terhadap sumbu x
  - b. *Pitching*, gerakan osilasi rotasional terhadap sumbu y
  - c. *Yawing*, gerakan osilasi rotasional terhadap sumbu z



Gambar 3. Gerak rotasi kapal

2. Mode Gerak Osilasi Translasional
  - a. *Surging*, gerakan osilasi translasional terhadap sumbu x
  - b. *Swaying*, gerakan osilasi translasional terhadap sumbu y

- c. *Heaving*, gerakan osilasi translasional terhadap sumbu z



Gambar 4. Gerak translasi kapal

Dalam kajian olah gerak kapal, gerakan yang ditinjau adalah gerakan yang hanya mampu direspon oleh kapal, yaitu *rolling*, *heaving*, *pitching*. Respon dari gerakan kapal ini meliputi :

- *Added mass inertial force* adalah penambahan massa pada kapal untuk kembali pada posisi semula.
- *Damping force* adalah gaya peredam yang berlawanan arah dengan arah gerak kapal yang menghasilkan pengurangan *amplitude* gerakan kapal secara berangsur-angsur.
- *Restoring force* adalah gaya untuk mengembalikan kapal ke posisi semula (*equilibrium position*). Gaya ini merupakan gaya *buoyancy* tambahan.
- *Exciting force* adalah gaya eksternal yang bekerja pada kapal. *Exciting force* berasal dari hasil integrasi gaya apung tambahan dan gelombang sepanjang kapal.

### 2.3 Response Amplitude Operator (RAO)

Response Amplitude Operator (RAO) atau sering disebut sebagai *Transfer Function* adalah fungsi respon yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi yang mengenai struktur lambung. RAO dapat juga didefinisikan sebagai hubungan antara amplitudo respon kapal terhadap amplitudo gelombang [5]. Dapat dinyatakan dengan bentuk matematis yaitu ( $\zeta_{respon}/\zeta_{gelombang}$ ).

Bentuk umum dari persamaan RAO dalam fungsi frekuensi adalah sebagai berikut :

$$S_{\phi}(\omega_e) = S_{\zeta}(\omega_e) |H(\omega_e)|^2 \quad (3)$$

$$S_{\phi} = S_{\zeta}(\omega_e) \left[ \frac{\phi_a}{S_{\zeta}} \right]^2 \quad (4)$$

$$RAO = \left( \frac{\text{amplitudo respon gerakan}}{\text{amplitudo gelombang}} \right)^2 = \left( \frac{\phi_a}{S_{\zeta}} \right)^2 \quad (5)$$

Dimana :

$S_{\zeta}(\omega_e)$  : Fungsi densitas spectrum gelombang [m<sup>2</sup>-det]

$S_{\phi}(\omega_e)$  : Fungsi densitas spectrum respon gerakan [m<sup>2</sup>-det]

- $S_\phi$  : Spektrum respon gerakan [m]
- $|H(\omega_e)|^2$  : Response Amplitude Operator (RAO)
- $\Phi_a$  : Amplitudo respon gerakan [m] atau [deg]
- $\zeta_a$  : Amplitudo gelombang [m]

#### 2.4 Coupled Heaving and Pitching Motions

Dalam buku *Dynamics of Marine Vehicles* menurut *Bhattacharyya* persamaan untuk *heave-pitch* dituliskan dalam :

$$(m + a_z)\ddot{z} + b\dot{z} + cz + d\ddot{\theta} + e\dot{\theta} + h\theta = F(t).....(1)$$

$$(I_{yy} + A_{yy})\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta + D\ddot{z} + E\dot{z} + Hz = M(t)..(2)$$

Keterangan :

- m = massa kapal (ton)
- $a_z$  = added mass heaving
- b,B = damping coefficient heaving, pitching
- $c_n, C$  = restoring force coefficient heaving, pitching
- d,D = inertial moment coefficient heaving, pitching
- e,E = damping moment coefficient heaving, pitching
- F = exciting force
- $I_{yy}$  = momen inersia kapal
- $A_{yy}$  = add mass pitching
- M = exciting moment

Langkah selanjutnya adalah menghitung komponen – komponen hidrodinamis sampai didapatkan persamaan untuk gerakan *coupleheaving* dan *pitching* yang dituliskan dalam persamaan :

Untuk *Heave* :

$$z = Re\bar{z}e^{i\omega_e t} = Re z_a e^{i(\omega_e t + \delta)}$$

$$= z_a \cos(\omega_e t + \delta).....(3)$$

Untuk *Pitch* :

$$\theta = Re \theta e^{i\omega_e t} = Re \theta_a e^{i(\omega_e t + \delta)}$$

$$= \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon).....(4)$$

Dimana :

- $z_a$  = amplitudo gerak *heaving*
- $\theta_a$  = amplitudo gerak *pitching*
- $\delta$  = fase gerak *heaving* saat gelombang dititik CG
- $\varepsilon$  = fase gerak *pitching* saat gelombang dititik CG

#### 2.5 Teori Gelombang

##### a. Teori Gelombang Linear

Gelombang dikategorikan linear artinya puncak dan lembah gelombang memiliki amplitudo yang sama atau sinusoidal dengan SWL (*Still Water Level*) sebagai acuannya. Teori gelombang yang paling sering digunakan dalam menghitung beban gelombang (*wave load*) yang terjadi pada struktur. Teori Gelombang Airy juga bisa disebut

dengan teori gelombang amplitude kecil, bahwa asumsi tinggi gelombang adalah sangat kecil jika dibandingkan terhadap panjang gelombang atau kedalaman laut.

Periode gelombang diasumsikan sebagai variable konstan yang tidak berubah terhadap waktu. Jadi jika dilaut diukur periode gelombang adalah 10 detik, maka periodenya akan tetap 10 detik selama gelombang tersebut menjalar.

Nama Teori Gelombang Airy merupakan penghargaan kepada Sir. George Biddell Airy (1845) atas dedikasinya yang menemukan teori gelombang ini.

Gelombang Linear yang sering diidealisasikan sebagai teori gelombang amplitudo kecil (airy) menggunakan 2 parameter *nondimensional*, yaitu *wave steepness*(H/L) dan *relative depth* (d/L). *Wave Steepness* atau kecuraman gelombang adalah perbandingan antara tinggi gelombang dibagi dengan panjang gelombang. Harga *wave steepness* yang besar menyebabkan teori gelombang Airy tidak valid digunakan. Sedangkan *relative depth* atau kedalaman relatif adalah perbandingan kedalaman dibagi panjang gelombang. Kedalaman relatif menentukan apakah gelombang terdispersi atau tidak dan menentukan apakah kecepatan gelombang menjalar, panjang dan tinggi gelombang dipengaruhi oleh kedalaman.

Berdasarkan kedalaman relatif (d/L) didefinisikan kondisi dari gelombang yang terjadi, yaitu diklasifikasikan menjadi 3 kondisi *Shallow Water*, *Transitional Water*, dan *Deep Water* :

- Gelombang di Laut Dangkal (*Shallow Water*) jika  $d/L \leq 1/25$
- Gelombang di Laut Transisi (*Transitional Water*) jika  $1/25 < d/L < 1/2$
- Gelombang di Laut Dalam (*Deep Water*) jika  $d/L \geq 1/25$

##### b. Teori Gelombang Non-Linier

Gelombang non linear artinya amplitude gelombang pada puncak dan lembah besarnya berbeda, dengan acuan dari SWL (*Still Water Level*). Menurut Teori Gelombang Stokes (1847, 1880) mengembangkan formulasi dari teori gelombang Airy yang mengasumsikan

tinggi gelombang adalah sangat kecil jika dibandingkan dengan panjangnya atau kedalamannya. Apabila tinggi gelombang relative besar, maka digunakan teori gelombang yang memiliki orde lebih tinggi, yaitu teori gelombang Stokes atau teori gelombang lain. Teori gelombang stokes dapat bervariasi sesuai tinggi orde yang digunakan. Semakin tinggi orde semakin banyak suku ‘tambahan’ pada formula besaran<sup>2</sup> gelombang. Teori gelombang stokes orde 2, orde 3, orde 4, orde 5 dan seterusnya.

Ketika kapal berada di laut bergelombang secara alami kapal akan mendapat gaya hidrostastik dan gaya gelombang dari laut. Karena adanya gaya – gaya tersebut maka kapal akan meresponnya sehingga kapal akan bergerak dan berosilasi kearah enam derajat kebebasan (*Degree of Freedom/DOF*) terhadap titik berat massa kapal yang tergantung pada arah gaya yang diresponnya. Untuk analisa *capsizing* gerakan kapal dapat ditinjau menjadi gerakan *roll* saja (*uncouple*), dimana gaya gelombang terbesar terhadap kapal terjadi dari arah samping (*beam sea*). Sehingga persamaan gerakan *rolling* kapal dapat dituliskan menjadi :

$$(I_{xx} + a_{44})\ddot{\phi} + b_{44}\dot{\phi} + \rho g V_0 GM\phi = M_0 \cos(\omega_e t) \dots \dots \dots (5) \text{ atau}$$

$$a\ddot{\phi} + b\dot{\phi} + c\phi = M_0 \cos(\omega_e t) \dots \dots \dots (6)$$

Dimana :

- $I_{xx}$  =  $[(\Delta + \Delta'/g) K_{xx}]$
- $\Delta$  = Displacement Kapal
- $\Delta'/g$  = Massa Tambahan sudut *rolling*
- $K_{xx}$  = Radius Girasi
- $a$  = momen inersia
- $b$  = koefisien damping
- $V_0$  = kecepatan kapal
- $GM$  = tinggi metasetra
- $\phi$  = sudut *rolling*
- $c$  = koefisien *restoring moment*

$$M_0 \cos(\omega_e t) = \text{exciting force}$$

Berdasarkan prinsip gerakan linear *rolling* setelah kapal mengalami gaya eksitasi maka kapal akan mendapatkan amplitudo sesaat, selanjutnya karena ada efek *damping* kapal akan mengalami osilasi menuju frekuensi gelombang. Sedangkan gerakan *non linear rolling* tidak, belum tentu kapal kembali ke frekuensi gelombang setelah mendapatkan eksitasi bahkan dapat menyebabkan kapal mengalami *capsizing*, hal ini dapat terjadi

pada sudut *roll* yang besar  $>5^\circ$ . Komponen gerakan *rolling non linier* yaitu *non linier damping* dan *restoring* (Bhattacharyya, 1972). Kedua koefisien tersebut dapat didekati dengan menggunakan *polynomial fitting* atau *fairing* sehingga dapat ditulis sebagai berikut :

$$a\ddot{\phi} + (b_1\phi + b_2|\phi|\phi + b_3\phi^3 + \dots) + (c_1\phi + c_2|\phi|\phi + c_3\phi^3 + \dots) = f_0 \cos(\omega_e t) \dots \dots \dots (7)$$

Dimana :

- $a$  = inersia moment
- $b$  = damping coefficient
- $c$  = restoring coefficient
- $\phi$  = sudut *rolling*
- $f_0 \cos(\omega_e t)$  = exciting force

## 2.6 Deck Wetness dan Slamming

*Deck Wetness* merupakan kondisi dimana frekuensi gelombang memiliki nilai amplitudo besar yang menyebabkan air masuk ke geladak kapal. Hal ini berkaitan dengan keselamatan kapal dimana semakin besar gelombang amplitudonya maka semakin besar pula ombak yang naik.

Sedangkan *Slamming* merupakan keadaan dimana kondisi gelombang amplitudo sejajar dengan *Center of Gravity* (CG) kapal yang berakibat hampasan gelombang sehingga haluan kapal keluar dari permukaan air dan kembali jatuh ke permukaan air. Kecepatan jatuhnya bagian haluan berdampak pada kerusakan sturktur

Ada dua cara untuk memperbaiki situasi *deck wetness* yang bersangkutan, yang pertama adalah untuk meningkatkan *freeboard*. Cara lain adalah untuk merancang *foredeck* sedemikian rupa bahwa sejumlah besar air dapat dikirim keluar kapal dengan cepat dan aman, yaitu menggunakan *camber* yang memadai dan pemecah gelombang.

Demikian pula, *slamming* juga dapat diantisipasi selama tahap desain misalnya, bentuk bagian *forward* harus dirancang sedemikian rupa untuk mengurangi kerataan dibagian lambung. Hal ini sering menjadi kasus bahwa bentuk lambung telah dirancang khusus untuk mengurangi *deck wetness* dan *slamming* saat menerima amplitudo gerak yang besar gerak dan percepatan dengan kecepatan tinggi dalam perairan yang ekstrim.

Pertimbangan desain untuk *deck wetness* dan *slamming* dalam mengurangi terjadinya *deck wetness* dan *slamming*, harus tersedianya informasi berikut:

- a. Frekuensi terjadinya dampak *slamming*
- b. Waktu antara dampak *slamming* berturut – turut
- c. Intensitas dampak tekanan

- d. Tekanan terbesar yang paling mungkin serta tekanan yang ekstrim
- e. Distribusi dampak tekanan dan akibat dampak kekuatan *slamming*
- f. Perubahan percepatan *slamming*

Sedangkan untuk regulasi yang digunakan yaitu:

Tabel 2. Tabel *Rules of Nordforsk*

<b>NORDFOSK (1987) - Seakeeping Criteria</b>			
General Operability Limiting Criteria for Ships (NORDFOSK, 1987)			
Description	Merchant Ships	Navy Vessels	Fast Small Craft
RMS of vertical acceleration at FP	0.275 g (L ≤ 100 m)	0.275 g	0.65 g
	0.050 g (L ≥ 330 m)		
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 (L ≤ 100 m)	0.03	0.03
	0.01 (L ≥ 300 m)		
Probability of Deck Wetness	0.05	0.05	0.05

Criteria for Acceleration and Roll (NORDFORSK, 1987)

Description	RMS Vertical Acceleration	RMS Lateral Acceleration	RMS Roll Motion
Light Manual Work	0.20 g	0.10 g	6.0°
Heavy Manual Work	0.15 g	0.07 g	4.0°
Intellectual Work	0.10 g	0.05 g	3.0°
Transit Passengers	0.05 g	0.04 g	2.5°
Cruise Liner	0.02 g	0.03 g	2.0°

Seakeeping performance criteria for human effectiveness - Limiting Criteria with regard to accelerations (vertical and lateral) and roll motion (NORDFORSK, 1987)

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Pengumpulan Data

Untuk mencari dan mengumpulkan data – data yang diperlukan dalam upaya menyelesaikan penelitian ini, antara lain:

- a. Studi Lapangan

Mencari data yang dibutuhkan untuk penelitian *seakeeping* kapal tanker ini seperti di galangan kapal dan dosen yang menguasai bidang materi yang diperlukan untuk membantu menyelesaikan pembuatan tugas akhir ini.

- b. Studi Literatur

Mencari literatur berupa referensi tertulis baik jurnal, buku – buku penunjang, internet, artikel, dan lainnya.

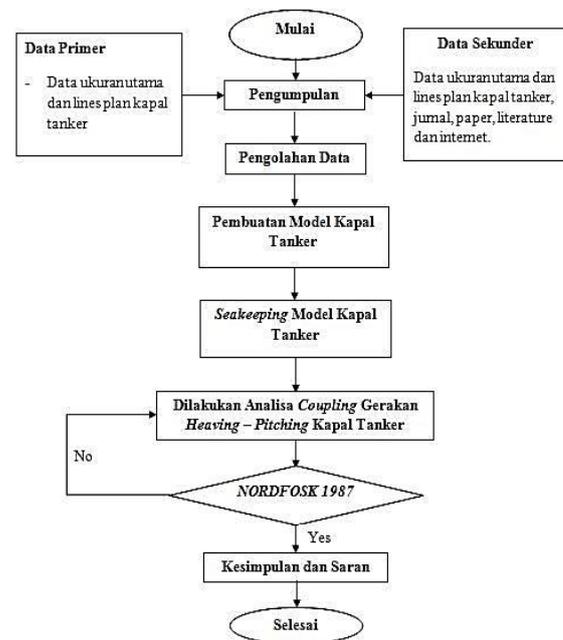
#### 3.2 Pengolahan Data

Kemudian dilakukan pengolahan data yang telah diperoleh dari hasil pengumpulan data. Data yang telah diperoleh tersebut akan diolah menggunakan *software* untuk membantu perhitungan dan analisa.

#### 3.3 Pemodelan dan Simulasi

Data yang telah didapat kemudian dibuat pemodelan dengan menggunakan *software Delftship Version 4.03.68* lalu dilanjutkan dengan gerak kapal menggunakan *software Maxsurf Motion Version 20 V8i*.

#### 3.4 Flow Chart Metodologi Penelitian



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

#### 3.5 Kesimpulan Hasil dan Analisis Data

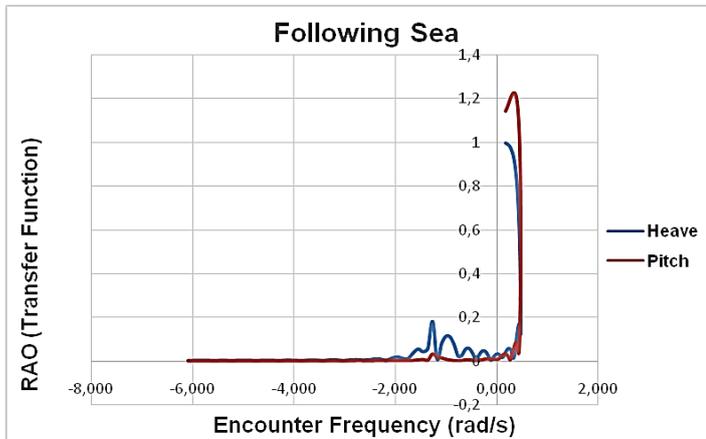
Berdasarkan hasil simulasi maka akan diperoleh grafik stabilitas dinamis dan juga karakteristik olah gerak kapal (*seakeeping*) gerakan *Coupling Heaving - Pitching* kapal tanker MT. Pandan. Apabila hasilnya buruk maka akan dilakukan variasi dan perbaikan karakteristik

namun jika lebih baik akan dilanjutkan ketahapan kesimpulan dan saran.

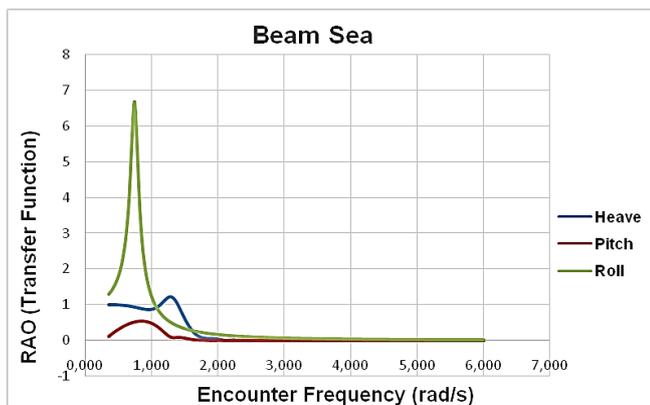
#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Hasil Analisa Grafik RAO

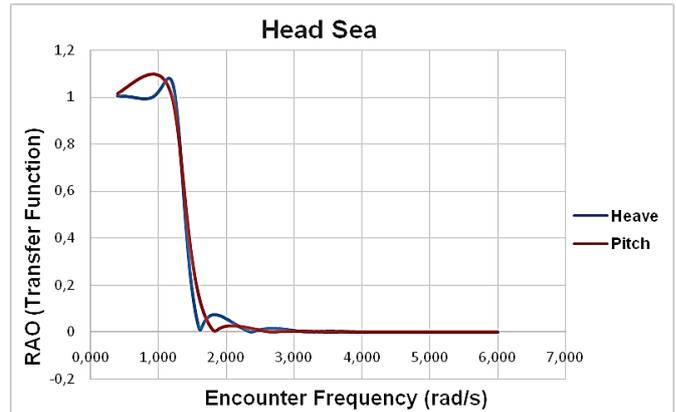
Berdasarkan hasil pengolahan data dari software Maxsurf Motions, didapatkan hasil berupa grafik untuk *Response Amplitude Operator* (RAO) pada kecepatan maksimum ditiap sudut gelombang, antara lain :



Grafik 1. Grafik RAO sudut gelombang 0°



Grafik 2. Grafik RAO sudut gelombang 90°



Grafik 3. Grafik RAO sudut gelombang 180°

##### 4.2 Hasil Perhitungan *Coupled Heaving – Pitching Motions*

Berikut hasil perhitungan untuk respon gerak akibat *heave – pitch coupling* kapal MT. Pandan dengan variasi tiga arah gelombang dan lima kecepatan yang berbeda yang disajikan dalam bentuk tabel :

Speed (knots)	Wave Heading (deg)	Amplitudo (m)	Velocity (m/s)	Acceleration (m/s <sup>2</sup> )
2	0	0,114	0,084	0,066
	90	0,305	0,292	0,300
	180	0,133	0,116	0,106
4	0	0,109	0,072	0,050
	90	0,294	0,281	0,290
	180	0,149	0,142	0,140
6	0	0,105	0,062	0,037
	90	0,282	0,270	0,280
	180	0,173	0,178	0,189
8	0	0,102	0,054	0,028

	90	0,269	0,258	0,270
	180	0,199	0,219	0,248
	0	0,101	0,046	0,021
10	90	0,256	0,246	0,260
	180	0,222	0,259	0,308

Dari tabel diatas dapat kita lihat bahwa untuk gerakan *heave*, amplitudo terbesar terjadi pada arah gelombang 90° (*beam sea*). Sedangkan arah gelombang 0° (*following sea*) memiliki amplitudo yang lebih landai daripada arah gelombang 180° (*head sea*).

Kemudian untuk *velocity* dan akselerasi terbesar juga datang dari arah gelombang 90°

(*beam sea*) kecuali pada kecepatan maksimum 10 knot dimana *velocity* dan akselerasi terbesar justru berada pada arah datangnya gelombang 180° (*head sea*).

Sedangkan untuk respon gerak pada pitch disajikan dalam tabel dibawah ini :

Tabel 4. Respon Gerak *Pitch*

Speed (knots)	Wave		Amplitudo (deg)	Velocity (deg/s)	Acceleration (deg/s <sup>2</sup> )
	Heading (deg)				
2	0		1,010	0,014	0,011
	90		0,500	0,008	0,008
	180		0,760	0,013	0,012
4	0		0,940	0,012	0,008
	90		0,530	0,009	0,008
	180		0,810	0,014	0,015
6	0		0,890	0,010	0,006
	90		0,560	0,009	0,009
	180		0,840	0,016	0,018
8	0		0,840	0,008	0,005
	90		0,590	0,010	0,009
	180		0,860	0,017	0,020
10	0		0,800	0,007	0,003
	90		0,620	0,010	0,010
	180		0,860	0,018	0,022

Dari tabel diatas dapat kita lihat bahwa untuk gerakan *pitch*, amplitudo terbesar terjadi pada kecepatan 2 knot, 4 knot, dan 6 knot datang arah gelombang 0° (*following sea*). Sedangkan untuk kondisi kapal dengan kecepatan 8 knot dan 10 knot arah gelombang 180° (*head sea*) memiliki amplitudo yang lebih besar dimana arah datangnya gelombang pada 90° (*beam sea*) lebih landai.

Untuk *velocity* dengan kecepatan 2 knot arah datang gelombang dengan sudut 0° (*following sea*) merupakan yang terbesar sedangkan untuk kecepatan 4 knot sampai kecepatan maksimum

arah datang gelombang yang terbesar jatuh pada sudut 180° (*head sea*).

Kemudian untuk akselerasi terbesar datang dari arah gelombang 180° (*head sea*). Dimana akselerasi terkecil datang dari arah gelombang 0° (*following sea*) kecuali pada kecepatan 2 knot dan 4 knot.

### 4.3 Hasil Perhitungan Gerakan Non-Linier *Rolling*

Berikut hasil perhitungan untuk respon gerak nonlinier *rolling* pada kapal MT. Pandan dengan variasi tiga arah gelombang dan lima kecepatan yang berbeda yang disajikan dalam bentuk tabel :

Tabel 5. Respon Gerak *Roll*

Speed	Wave	Amplitudo	Velocity	Acceleration
-------	------	-----------	----------	--------------

(knots)	Heading (deg)	(deg)	(deg/s)	(deg/s <sup>2</sup> )
	0	0,000	0,000	0,000
2	90	3,460	0,051	0,050
	180	0,000	0,000	0,000
4	0	0,000	0,000	0,000
	90	3,460	0,051	0,050
6	180	0,000	0,000	0,000
	0	0,000	0,000	0,000
8	90	3,460	0,051	0,050
	180	0,000	0,000	0,000
10	0	0,000	0,000	0,000
	90	3,460	0,051	0,050
	180	0,000	0,000	0,000

Dari tabel diatas dapat kita lihat bahwa untuk gerakan *roll*, amplitudo terbesar terjadi pada arah gelombang 90° (*beam sea*). Sedangkan arah gelombang 0° (*following sea*) dan arah gelombang 180° (*head sea*) tidak memiliki simpangan amplitudo apapun.

#### 4.4 Hasil Perhitungan Slamming

Menurut *criteria Rules General Operability Limiting Criteria for Ship (NORDFORSK, 1987)* nilai maksimal *Probability of Slamming* adalah 0,03. Rumus yang digunakan untuk mendapatkan nilai *Probability of Slamming* adalah:

$$\text{Nilai Slamming} = \exp^{-T^2/2(Mo)}$$

Dimana :

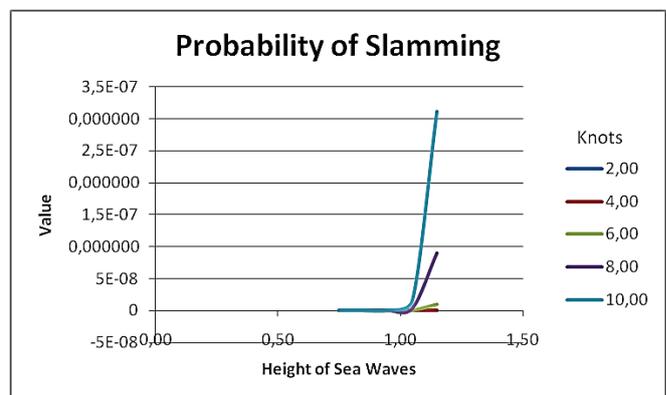
T = Sarat Kapal

Mo = nilai *F relative vertical motion (M0)* 180°.

Kemudian hasil dari perhitungan untuk probabilitas *slamming* sendiri disajikan dan dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 6. *Probability of Slamming*

Speed	Variasi Ketinggian Gelombang				
	0,75	0,85	0,95	1,05	1,15
2,00	2,67 x 10 <sup>-28</sup>	2,63 x 10 <sup>-22</sup>	5,18 x 10 <sup>-18</sup>	8,59 x 10 <sup>-15</sup>	1,67 x 10 <sup>-12</sup>
	5,35 x 10 <sup>-23</sup>	2,84 x 10 <sup>-18</sup>	9,78 x 10 <sup>-15</sup>	4,06 x 10 <sup>-12</sup>	2,85 x 10 <sup>-10</sup>
4,00	2,09 x 10 <sup>-19</sup>	1,90 x 10 <sup>-15</sup>	1,83 x 10 <sup>-12</sup>	2,68 x 10 <sup>-10</sup>	9,88 x 10 <sup>-09</sup>
	3,42 x 10 <sup>-17</sup>	1,21 x 10 <sup>-13</sup>	4,57 x 10 <sup>-11</sup>	3,69 x 10 <sup>-09</sup>	8,97 x 10 <sup>-08</sup>
8,00	4,95 x 10 <sup>-16</sup>	1,26 x 10 <sup>-12</sup>	2,85 x 10 <sup>-10</sup>	1,56 x 10 <sup>-08</sup>	3,12 x 10 <sup>-07</sup>



Grafik 4. *Probability of Slamming*

Untuk probabilitas *slamming*, hasil dari tabel dan grafik menunjukkan bahwa kemungkinan terjadinya *slamming* bahkan pada kecepatan maksimum dengan ketinggian gelombang dari gelombang rendah hingga gelombang tinggi adalah 0%. Hal ini telah sesuai menurut *criteria Rules General Operability Limiting Criteria for Ship (NORDFORSK, 1987)* dimana nilai maksimal *Probability of Slamming* adalah 0,03 atau 3%.

#### 4.5 Hasil Perhitungan Deck Wetness

*Deck Wetness* adalah menurut *criteria Rules General Operability Limiting Criteria for Ship (NORDFORSK, 1978)* nilai maksimal *Probability of Deck Wetness* adalah 0,05. Rumus yang digunakan untuk mendapatkan nilai *Probability of Deck Wetness* adalah:

$$\text{Nilai Deck Wetness} = \exp^{-F^2/2(Mo)}$$

Dimana :

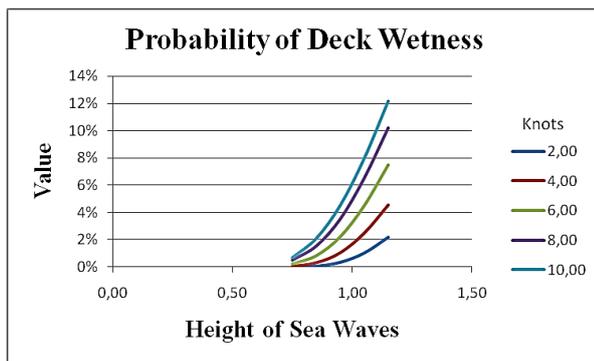
F = *Freeboard* kapal

Mo= nilai FP *relative vertical motion* (M0) 180°.

Kemudian hasil dari perhitungannya dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 7. *Probability of Deck Wetness*

Speed	Variasi Ketinggian Gelombang				
	0,75	0,85	0,95	1,05	1,15
2,00	0%	0%	0%	1%	2%
4,00	0%	0%	1%	3%	5%
6,00	0%	1%	2%	5%	7%
8,00	0%	2%	4%	7%	10%
10,00	1%	2%	5%	8%	12%



Grafik 5. *Probability of Deck Wetness*

Untuk probabilitas *deck wetness*, hasil dari tabel dan grafik menunjukkan bahwa kemungkinan air masuk geladak bahkan pada kecepatan 6 knot dengan ketinggian gelombang 1 m adalah 5%. Menurut *criteria Rules General Operability Limiting Criteria for Ship (NORDFORSK, 1978)* dimana nilai maksimal *Probability of Deck Wetness* adalah 0,05 atau 5% maka saat gelombang mencapai ketinggian 1,05 m disarankan untuk melaju dalam kecepatan 6 knot.

## 5 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dan hasil perhitungannya dapat disimpulkan sebagai berikut:

### 5.1 Kesimpulan

1. Untuk respon gerak *heave*, amplitudo, *velocity*, dan akselerasi terbesar datang dari arah gelombang 90° (*beam sea*). Sedangkan untuk respon gerakan *pitch*, amplitudo terbesar terjadi pada arah gelombang 0° (*following sea*) dan 180° (*head sea*). Untuk *velocity* yang terbesar jatuh pada sudut 180° (*head sea*). Lalu akselerasi terbesar datang dari arah gelombang 180° (*head sea*).
2. Untuk tabel respon gerakan *roll*, amplitudo terbesar terjadi pada arah gelombang 90° (*beam sea*). Sedangkan

arah gelombang 0° (*following sea*) dan arah gelombang 180° (*head sea*) tidak memiliki simpangan amplitudo apapun.

3. Untuk probabilitas *slamming*, hasil dari tabel dan grafik menunjukkan bahwa kemungkinan terjadinya *slamming* adalah 0%. Sedangkan untuk probabilitas *deck wetness*, hasil dari tabel dan grafik menunjukkan bahwa kemungkinan air masuk geladak maksimal pada kecepatan 6 knot dengan ketinggian gelombang 1 m adalah 5%.

## 5.2 Saran

Selanjutnya dari pembahasan penelitian ini, dapat dirangkum beberapa saran yang berkaitan dengan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk menaikkan atau meninggikan *freeboard* sehingga mencegah terjadinya air masuk ke geladak.
2. Mengingat semakin besarnya nilai probabilitas *slamming* dan *deck wetness* dalam kondisi tinggi gelombang dan laju kapal terbesar, maka disarankan untuk memacu kapal dalam kecepatan 6 knot untuk kondisi gelombang 1 m.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Priatno, Dany., Iskendar. *Ketakstabilan Memanjang Kapal Bersayap Sebelum Tinggal Permukaan*. Pusat Teknologi Industri dan Sistem Transportasi Deputi TIRBR – BPPT
- [2] Baso, Suandar., Asri, Syamsul., Rosmani. *Prediksi Gerak Heave dan Pitch Kapal Feri di Gelombang Nonlinier Menggunakan A Coupled Eulerian Scheme With Lagrangian Particle*. Makassar: Jurusan Teknik Perkapalan, Universitas Hasanuddin
- [3] Sriyana. *Kerusakan Unit Lapis Lindung Breakwater Akibat Gelombang Acak Spektrum Bretschneider*. Semarang: Jurusan Teknik Sipil, Universitas Diponegoro
- [4] Akhwady, Rudhy., Mukhtasor., D Armono, Haryo., Musta'in, Mahud. 2014. *Pengaruh Gelombang Reguler dan Irreguler Terhadap Koefisien Transmisi Peredam Gelombang Ambang Terbenam Tipe Silinder Berongga (Bottle Reef<sup>m</sup>)*. Jakarta: Staf Balitbang KKP RI
- [5] Hasanudin, ST; Ir. Wasis Dwi Aryawan, M.Sc, Ph.D; Ir. Hesty Anita Kurniawati, M.Sc. *Studi Pengaruh Gelombang Terhadap Ship Capsizing Probability Menggunakan Safe Basin Erosion*. Surabaya: Mahasiswa S2, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS); Staf

Pengajar S2, Fakultas Teknologi Kelautan,  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

- [6] Khoirul Arsad, Ashar., Sulisetyono, ST, MA.Sc., Ph.D, Aries. 2013. *Studi Gerakan Sloshing Terhadap Tangki Kotak (Rectangular Tank) Dengan dan Tanpa Pelat Memanjang (Baffle) Akibat Gerakan Rolling Kapal Dengan Metode Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Surabaya: Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
- [7] Chabibi, Erik; Yulianto, Totok; Suastika, I Ketut. 2013. *Analisa Tegangan pada Cross Deck Kapal Ikan Katamaran 10 GT Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
- [8] Murtedjo, Mas. 2003. *Penentuan Added Mass Hycat Akibat Gerakan Couple Heaving Pitching pada Gelombang Reguler*. Surabaya: Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)