



ISSN 2338-0322

# JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

## Analisis Motion dan Tension Mooring Line Kapal Ro-Ro Di Pelabuhan Merak Pada Kondisi Ekstrem

Frengki Yupiter<sup>1)</sup>, Ocid Mursid<sup>1)</sup>, Andi Trimulyono<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Laboratorium Hidrodinamika

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275  
\*e-mail :frengkys441@gmail.com

### Abstrak

Proses bongkar muat kapal di pelabuhan umumnya menggunakan sistem tambat untuk mengurangi olah gerak kapal. Di Pelabuhan ASDP Merak sendiri kerap kali mengalami kecelakaan ketika proses bongkar muat kapal yang diakibatkan oleh gelombang tinggi, khususnya pada bulan Desember-Februari. Kapal Ferry sendiri juga salah satu jenis kapal yang memiliki banyak peraturan yang mengawasi, dikarenakan salah satu objek vital seperti halnya kapal tanker. Tujuan dari penelitian ini dilakukan yaitu untuk mengetahui motion kapal dan juga tegangan tali tambat kapal ketika gelombang tinggi yang kemudian dilaraskan dengan standar API RP-2SK dan PIANC; Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode numerik dengan time domain analysis di Ansys AQWA. Penelitian ini menggunakan objek kapal ro-ro 5000GT dengan sistem tambat yang ada di dermaga Pelabuhan ASDP Merak. Variasi dari penelitian ini yaitu kondisi loadcase kapal (arrival dan departure), ketinggian gelombang, serta sudut arah datang gelombang. Hasil yang didapat dari penelitian ini yaitu pada kondisi loadcase departure pada gelombang 1.05 meter dimana nilai surge = 0.261 m; sway = 0.418 m; heave = 1.202 m; roll = 1.479°; pitch = 2.523°; yaw = 0.728°. Sedangkan pada kondisi loadcase arrival pada gelombang 1.05 meter dimana nilai surge = 0.423 m; sway = 0.421 m; heave = 1.559 m; roll = 1.963°; pitch = 2.689°; yaw = 1.554°. Berdasarkan hasil analisa yang dilakukan, nilai safety factor tension mooring line pada kondisi loadcase departure sudah lebih dari 1.67, sedangkan pada kondisi loadcase arrival terdapat case dimana nilai safety factor tension mooring line kurang dari standar API RP2-SK.

Kata Kunci : Mooring System, Motion, Tension, API RP-2SK, PIANC

### 1. PENDAHULUAN

Sistem tambat (*Mooring System*) merupakan salah satu metode untuk mengurangi pergerakan struktur apung yang diakibatkan oleh beban lingkungan (arus, gelombang, angin) sehingga tetap tertambat pada tali tambat untuk membantu proses operasional bongkar muat kapal ketika di Pelabuhan. Semua komponen sistem tambat ditentukan oleh jenis dan ukuran kapal, serta aspek-aspek lainnya. Terdapat peraturan internasional yang menelaraskan terkait sistem mooring, baik dari “*Requirements concerning mooring, anchoring, and towing*” (IASC, 2007) dan “*Shipboard fittings and supporting hull structures associated with towing and mooring on conventional vessels*” (IACS, 2007b).

Ketika bersandar di Pelabuhan yang dituju, kapal tetap mengalami gaya/beban lingkungan

yang menyebabkan olah gerak kapal seperti *sway*, *surge*, *sagging*, dsb. Oleh karena itu, sistem bongkar muat Pelabuhan di sisi dermaga menuntut sistem tambat yang mampu menambatkan kapal dengan baik agar tetap aman dan tidak berpindah posisi ketika proses bongkar muat berlangsung [1]. Sebagai contoh kasus yang terjadi pada tanggal 23 Desember 2022, sebuah minibus tercebur ke laut ketika hendak masuk kapal melalui rampdoor. Alasan dari kecelakaan tersebut diduga tali kapal yang tidak optimal dalam menahan posisi kapal.

Penelitian sebelumnya yang berkaitan yaitu tentang pembuktian penggunaan metode pendekatan numerik memiliki kelebihan dalam menganalisis respon multivariat dari sistem mooring ketika kapal bersandar. Dimana pendekatan numerik mampu menganalisis dalam berbagai skenario dengan hasil yang hampir akurat respon multivariat dari sistem kapal yang

ditambahkan termasuk pergerakan kapal dan tegangan tali tambat untuk disesuaikan dengan ambang batas operasional yang direkomendasikan[2]. Selain itu, terdapat juga penelitian yang membahas terkait variasi konfigurasi sistem tali tambat untuk mencari konfigurasi yang memiliki nilai yang paling optimal dengan objek kapal LNG saat berlabuh di dermaga. Hasil dari penelitian tersebut adalah konfigurasi line 4-4-3 memiliki nilai respon yang lebih rendah dibanding line 2-3-1. Dari sini juga dapat disimpulkan bahwa konfigurasi line dapat mempengaruhi hasil respon[3].

Objek dari penelitian ini adalah kapal ro-ro 5000 GT dan Dermaga VI Pelabuhan ASDP Merak. Dimana tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai karakteristik kapal atau motion kapal serta nilai tegangan dari *mooring line* ketika kapal bersandar dimana akan terdapat variasi yaitu kondisi loadcase kapal, arah gelombang datang, dan tinggi gelombang yang kemudian akan disesuaikan dengan ambang batas peraturan yang ada yaitu API RP-2SK untuk standar *safety factor* tegangan tali dan PIANC untuk standar olah gerak kapal ketika bersandar.

## 2. METODE

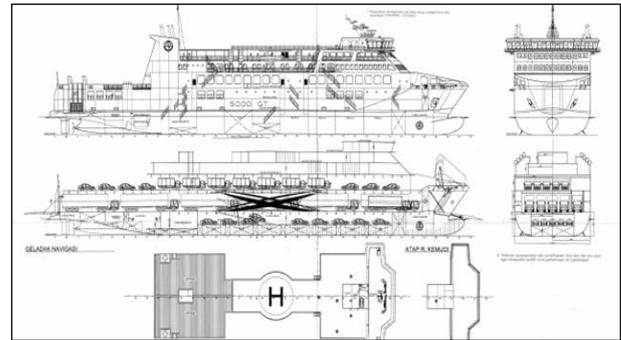
### 2.1. Objek Penelitian

Objek penelitian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sistem tambat kapal pada dermaga VI Pelabuhan ASDP Merak yang terdiri dari data kapal ro-ro 5000 GT, ukuran dermaga yang digunakan, serta data gelombang di perairan sekitar.

Model Ukuran utama kapal yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel 1 :

Tabel 1. Dimensi Utama Kapal

PRINCIPAL PARTICULARS		
Length OA	99.20	M
Length BP	107.5 m	M
Breadth	19.6 m	M
Draft	4.10 m	M
Depth	5.60 m	M
Displacemet	4494.05	Ton/M <sup>3</sup>
CB	0.55	-



Gambar 1. General arrangement kapal ro-ro

Objek dermaga yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dermaga eksekutif Pelabuhan Merak ASDP yang dapat dilihat pada tabel 2 :

Tabel 2. Dimensi Dermaga

No	Nama	Ukuran
1	Kapasitas	12000 GRT
2	Panjang	160 m
3	Lebar	25 m
4	Kedalaman	-8.5 m
5	Jumlah Fender	9 Unit

Data kondisi lingkungan di perairan sekitar dermaga Pelabuhan Merak diambil dari BMKG pada periode 2021-2023 bulan Desember – Februari yang dapat dilihat pada tabel 3:

Tabel 3. Data Gelombang

Waktu		Tinggi Gelombang	
		Hsig(m)	Hmax(m)
Desember 2021	Rata-rata	0.08	0.14
	Max	0.45	0.74
Januari 2022	Rata-rata	0.10	0.16
	Max	0.47	0.78
Februari 2022	Rata-rata	0.10	0.17
	Max	0.43	0.72
Desember 2022	Rata-rata	0.18	0.31
	Max	0.31	0.52
Januari 2023	Rata-rata	0.20	0.27
	Max	0.52	0.68
Februari 2023	Rata-rata	0.20	0.26
	Max	0.80	1.05

Data spesifikasi tali tambat kapal yang digunakan pada dermaga dapat dilihat pada tabel 4

Tabel 4. Data Spesifikasi Tali Tambat

No	Parameter	Nilai
1	Jenis bahan	<i>Polypropylene multifilament rope</i>
2	Diameter	64 mm
3	MBL	49,00 Ton

## 2.2. Variabel Penelitian

Penelitian ini berfokus pada perbandingan akibat pengaruh beban lingkungan serta kondisi muatan kapal ketika kapal bersandar di dermaga yang hasilnya bisa dapat digunakan sebagai pertimbangan operasional ketika kapal melakukan bongkar-muat.

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

- Ketinggian gelombang 0.3 m, 0.5 m, 0.7, dan 1.05 m berdasarkan BMKG.
- Analisa menggunakan gelombang regular.
- Sudut arah datang gelombang yaitu 45°, 90°, dan 135°.
- Kondisi loadcase kapal yaitu *departure* dan *arrival*.

## 2.3. RAO

Respon amplitude operator adalah bentuk informasi yang berisi karakteristik olah gerak kapal, yang biasanya berbentuk grafik. Berikut persamaan rumus RAO[4] :

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}(\omega)}{\zeta_0(\omega)}$$

Untuk gerakan translasi (*sway, surge, heave*) didapat dari perbandingan antara amplitudo gerakan dengan amplitudi gelombang insiden. Persamaan RAO untuk gerakan translasi dapat ditulis sebagai berikut :

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}}{\zeta_0}$$

Sedangkan untuk persamaan RAO gerak rotasi (*roll, pitch, yaw*) didapat dari perbandingan antara amplitude gerakan rotasi dengan kemiringan gelombang, yaitu perkalian antara angka gelombang dengan gelombang insiden. Persamaan RAO untuk gerakan rotasi dapat ditulis sebagai berikut :

$$RAO(\omega) = \frac{\zeta_{k0}}{\zeta_0} = \frac{(\omega^2/g)\zeta_0}{\zeta_0}$$

## 2.4. Mooring System

Tali tambat menjadi komponen penting pada sistem tambat terhadap olah gerak kapal di dermaga. Prinsip dari sistem tambat pada bangunan terapung yaitu berfungsi untuk menjaga dan mempertahankan posisi bangunan terapung agar tetap pada tempatnya.

Kategori sistem tambat yang digunakan pada penelitian kali ini yaitu *non-wheatering*, yang berarti arah dari gerak respon bangunan kapal ditambah gaya lain seperti beban lingkungan yang mengenai dapat ditahan sehingga tidak terlalu

berdampak pada respon struktur bangunan terapung, misalnya *dolphin mooring*[5].

Selain tali tambat, fender juga merupakan elemen penting pada sistem tambat kapal di dermaga. Fender merupakan bantalan yang ditempatkan di dermaga yang berfungsi untuk meredam benturan oleh badan kapal[6]. Jenis fender yang digunakan di dermaga Pelabuhan ASDP Merak yaitu Frontal Frame Fender.

## 2.5. Tegangan

Gaya lingkungan yang bekerja menyebabkan gerakan pada bangunan apung, sehingga ketika terjadi pada struktur bangunan, tali tambat mengalami *tension* atau tegangan. Tegangan pada tali tambat dapat dibedakan menjadi 2 yaitu tegangan rata-rata dan tegangan maksimum.

Untuk mengetahui apakah tali tambat mampu atau tidak, nilai tegangan pada tiap tali tambat harus memenuhi nilai keamanan (*safety factor*). Kriteria standar *safety factor* yang digunakan didasarkan pada rule yang berlaku, dimana pada penelitian ini mengacu pada API RP-2SK. Persamaan faktor keamanan menurut API RP2-SK adalah sebagai berikut[7] :

$$Safety\ Factor = \frac{Minimum\ breaking\ load}{Maximum\ tension}$$

## 2.6. 3D Diffraction Theory

*Diffraction theory* adalah metode untuk menganalisis gerakan struktur bangunan mengapung dengan bentuk sembarang, baik dalam kondisi free floating atau dengan kondisi tertambat pada sistem tambat.[8]

Berlainan dengan metode *strip theory* yang melakukan pendekatan secara 2D, teori 3D difraksi ini menggunakan perhitungan secara 3D berdasarkan permukaan surface dari model yang terbagi dalam n panel sehingga gaya-gaya hidrodinamis diasumsikan sama di tiap panelnya.

## 2.7. Beban Lingkungan

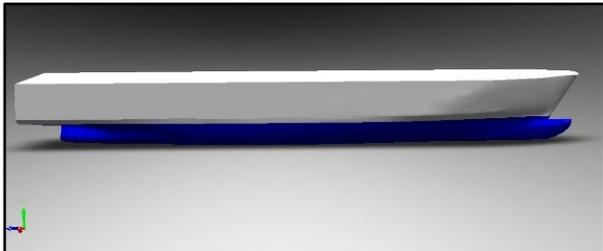
Beban lingkungan adalah beban yang diakibatkan oleh pengaruh lingkungan sekitar yang mempengaruhi gaya hidrodinamis bangunan terapung[9]. Beban gelombang salah satunya dari beban lingkungan yang paling mempengaruhi. Gelombang terbagi menjadi 2 yaitu gelombang reguler dan gelombang ireguler, dan di penelitian kali ini menggunakan gelombang reguler sebagai beban yang bekerja pada proses tambat kapal. Gelombang reguler merupakan elemen sampel gelombang yang bisa dipertimbangkan sebagai

pendekatan dari gelombang asli yang kompleks[10].

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Pembuatan Model Kapal

Pembuatan kapal ro-ro 5000GT menggunakan software Solidworks, dimana pembuatan berdasarkan data gambar kerja yang sudah didapat. Gambar model dapat dilihat pada gambar 2.



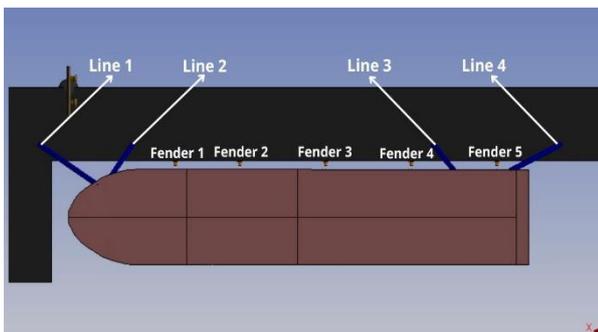
Gambar 2. Model 3D kapal

Setelah permodelan dilakukan, validasi model perlu dilakukan dengan membandingkan nilai dimensi utama kapal dengan model kapal yang sudah dibuat. Berdasarkan tabel 5, validasi model dapat diterima sehingga model kapal dapat digunakan untuk tahap analisis selanjutnya.

Tabel 5. Hasil Validasi Model Kapal

	Model	Data	Validasi	Status
LPP	99.15	99.20	99%	OK!
Breadth	19.60	19.60	100%	OK!
Draft	4.10	4.10	100%	OK!
Disp	4430.52	4494.05	98%	OK!

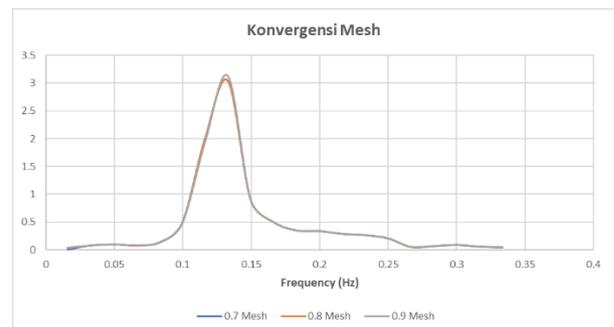
Setelah validasi model kapal memenuhi, selanjutnya yaitu memuat model kapal pada software Ansys. Dengan bantuan ansys, sistem tambat di dermaga dapat dimodelkan, dimana tali tambat dan fender dapat didesain sesuai dengan kondisi objek yang diamati. Pada gambar 3 menunjukkan desain sistem tambat yang sudah dilakukan dengan menggunakan Ansys Modeler.



Gambar 3. Model Sistem Tambat

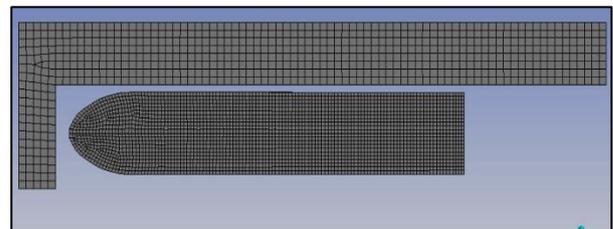
#### 3.2. Konvergensi Mesh

Konvergensi mesh juga salah satu metode untuk menganalisis apakah model kapal valid ketika ingin memulai analisis 3D Diffraction[11]. Model kapal dilakukan *meshing* yang dibuat menjadi 3 ukuran yang kemudian dibuat dalam bentuk grafik perbandingan. Konvergensi mesh dilakukan di *hydrodynamic diffraction* pada Ansys AQWA. Konvergensi dilakukan pada variasi ukuran 0.7; 0.8; dan 0.9 terhadap gerakan *roll* dengan sudut datang 90°. Grafik konvergensi mesh dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Grafik konvergensi mesh pada rolling

Berdasarkan gambar 4 menunjukkan bahwa model dengan ukuran 0.7; 0.8; dan 0.9 menunjukkan hasil yang konvergen, sehingga penulis menggunakan model dengan ukuran mesh 0.8 untuk dilakukan analisa selanjutnya.

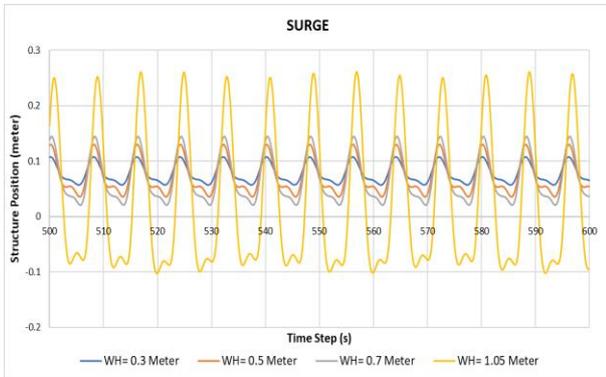


Gambar 5. Model mesh 0.8

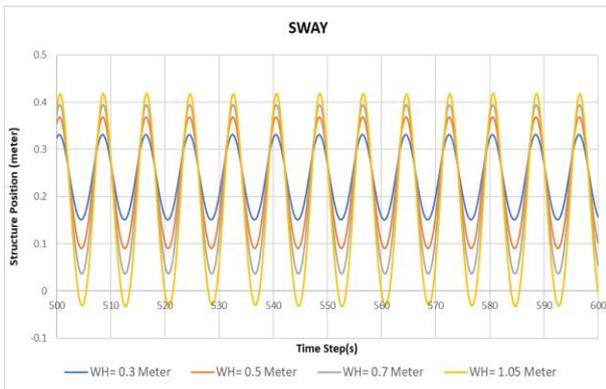
#### 3.3. Analisa Olah Gerak Kapal

Olah gerak kapal dianalisis menggunakan *hydrodynamic response* pada Ansys AQWA. Analisis dilakukan berdasarkan parameter penelitian yang sudah ditetapkan sebelumnya yaitu variasi ketinggian gelombang dan juga loadcase kapal. Hasil analisis berisi nilai 6 sumbu gerak kapal (DOF) yaitu gerakan translasi (*surge, sway, dan heave*) dan gerakan rotasi (*roll, pitch, dan yaw*). Analisa dilakukan menggunakan gelombang regular dengan sudut arah masuk gelombang 90°. Analisa dilakukan menggunakan metode *time domain* atau berbasis waktu dengan waktu 1200 detik.

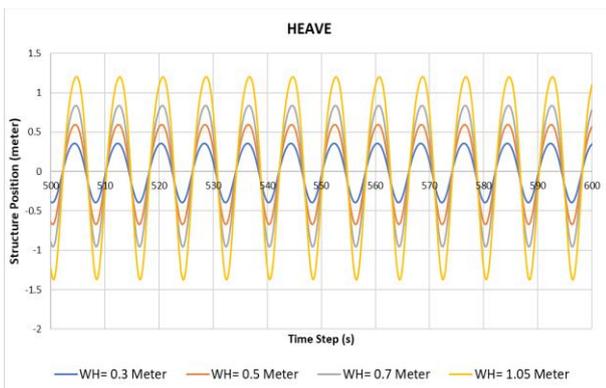
Analisis pertama yaitu model kapal dengan loadcase departure, dimana kondisi ini berarti muatan kapal (*payload*) kapal terisi penuh 100% dan *consumables* kapal juga terisi penuh. Sehingga hasil *time domain* gerakan *roll*, *pitch*, *yaw*, *heave*, *surge*, dan *sway* yang dapat dilihat pada grafik di bawah.



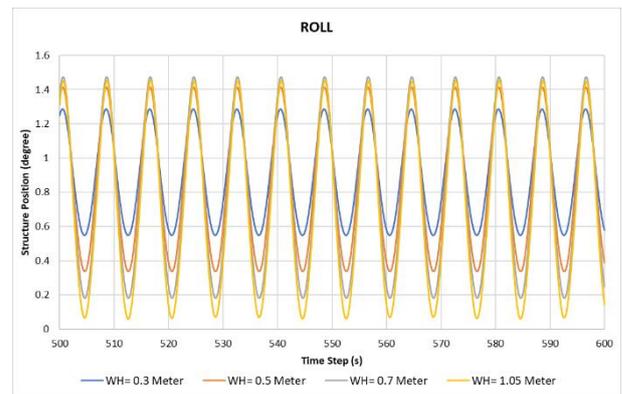
Gambar 6. Grafik *time domain* Surge



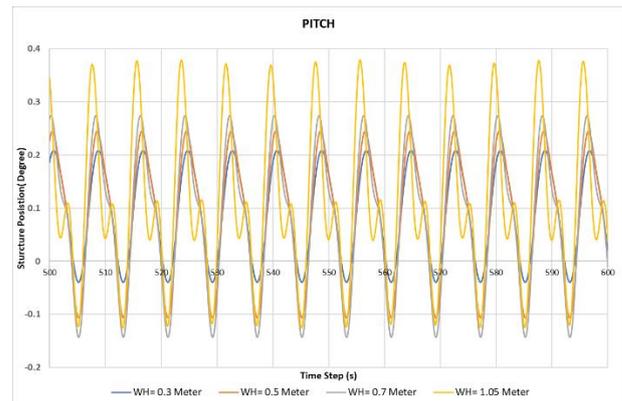
Gambar 7. Grafik *time domain* Sway



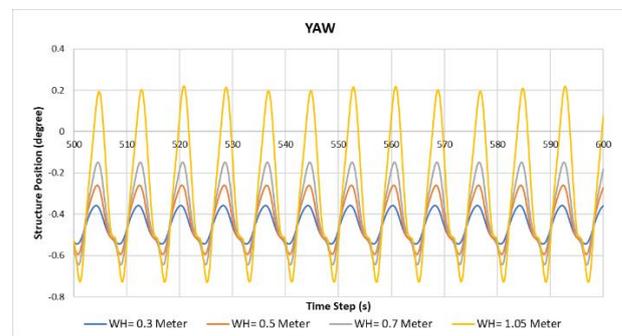
Gambar 8. Grafik *time domain* heave



Gambar 9. Grafik *time domain* roll



Gambar 10. Grafik *time domain* pitch



Gambar 11. Grafik *time domain* yaw

Berdasarkan gambar 6, data grafik surge dapat menunjukkan nilai maksimum dan minimum yang didapatkan sesuai dengan tabel 6.

Tabel 6. Nilai surge saat departure

Wave Height (m)	Max (m)	Time (s)	Min (m)	Time (s)
0.3	0.1075	564.2	0.0569	561.4
0.5	0.1300	508.2	0.0355	505.6
0.7	0.1445	508.2	0.0205	507.5
1.05	0.2610	556.5	-0.102	519.3

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 6 dapat diketahui jika nilai surge terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 0.2610 m pada 556.5s dan nilai minimum = -0.102m dengan 519.3s.

Selanjutnya, nilai sway maksimum dan minimum yang diperoleh memiliki nilai seperti pada tabel 7.

Tabel 7. Nilai sway saat departure

Wave Height (m)	Max (m)	Time (s)	Min (m)	Time (s)
0.3	0.3310	508.5	0.1509	504.4
0.5	0.3685	505.8	0.0903	502.6
0.7	0.3947	508.6	0.0364	514.5
1.05	0.4185	516.4	-0.032	512.3

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 7 dapat diketahui jika nilai sway terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 0.4185 m pada 516.4s dan nilai minimum=-0.032m pada 512.3s.

Selanjutnya, nilai heave maksimum dan minimum yang diperoleh memiliki nilai seperti pada tabel 8.

Tabel 8. Nilai heave saat departure

Wave Height (m)	Max (m)	Time (s)	Min (m)	Time (s)
0.3	0.3563	535.8	-0.393	521.9
0.5	0.5953	535.8	-0.671	521.9
0.7	0.8373	536.2	-0.955	522.4
1.05	1.2027	536.5	-1.374	524.1

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 8 dapat diketahui jika nilai heave terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 1.2027 m pada 536.5s dan nilai minimum=-1.374m pada 524.1s.

Selanjutnya, nilai roll maksimum dan minimum yang diperoleh memiliki nilai seperti pada tabel 9.

Tabel 9. Nilai roll saat departure

Wave Height (m)	Max (°)	Time (s)	Min (°)	Time (s)
0.3	1.2864	508.8	0.5486	513.1
0.5	1.4141	517.4	0.3373	513.6
0.7	1.4783	508.9	0.1812	506.1
1.05	1.4791	502.6	0.0590	506.2

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 9 dapat diketahui jika nilai roll terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 1.4791 pada 502.6s dan nilai minimum= 0.0590 pada 506.1s.

Selanjutnya, nilai pitch maksimum dan minimum yang diperoleh memiliki nilai seperti pada tabel 10.

Tabel 10. Nilai Pitch saat departure

Wave Height (m)	Max (°)	Time (s)	Min (°)	Time (s)
0.3	0.2082	548.7	-0.039	521.4
0.5	0.2447	500.5	-0.106	505.2
0.7	0.2738	500.3	-0.143	521.4
1.05	0.3789	555.6	-0.125	513.1

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 10 dapat diketahui jika nilai Pitch terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 0.3789 pada 555.6s dan nilai minimum=-0.125 pada 513.1s.

Selanjutnya, nilai Yaw maksimum dan minimum yang diperoleh memiliki nilai seperti pada tabel 11.

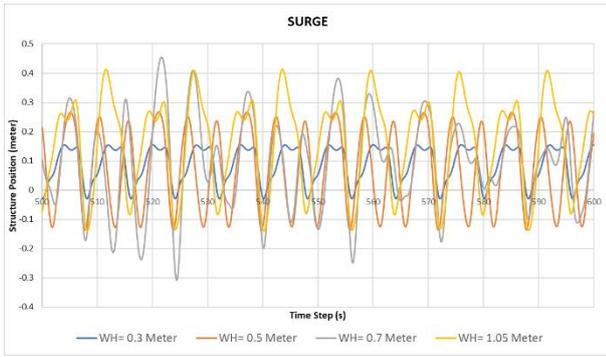
Tabel 11. Nilai Yaw saat departure

Wave Height (m)	Max (°)	Time (s)	Min (°)	Time (s)
0.3	-0.357	537.1	-0.543	502.2
0.5	-0.259	505.5	-0.593	502.1
0.7	-0.148	505.6	-0.644	502.2
1.05	0.2213	521.6	-0.728	525.1

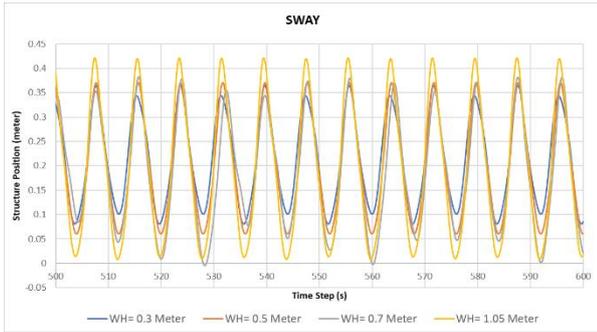
Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 11 dapat diketahui jika nilai Yaw terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 0.2213 pada 521.6s dan nilai minimum=-0.728 pada 525.1s.

Dari hasil analisis penelitian yang dilakukan pada kondisi loadcase departure yang kemudian dibandingkan dengan standar yang digunakan dalam penelitian ini yaitu PIANC 1995. Maka dapat dilihat hampir semua nilai stabilitas pada kondisi departure memenuhi kriteria yang ditetapkan PIANC kecuali pada nilai heave pada gelombang 1.05 meter dengan nilai 1.20 meter dimana melebihi dari kriteria, yaitu maksimal sebesar 0.8 meter[12].

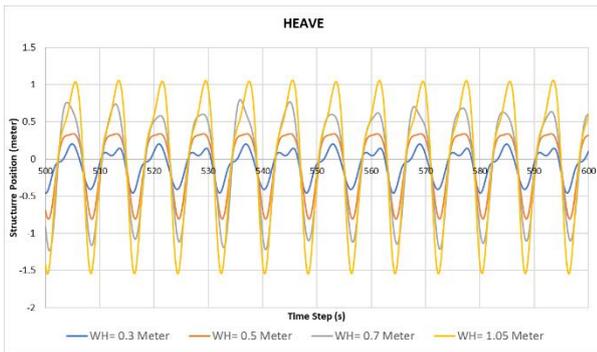
Analisis selanjutnya yaitu model kapal dengan kondisi loadcase arrival, yang berarti kondisi muatan kapal (*payload*) 100% dan kondisi consumable 10% dimana sarat kapal menjadi 3.7 meter. Hasil grafik *time domain* gerak surge, heave, sway, pitch, yaw, dan rolling dapat dilihat pada gambar dibawah.



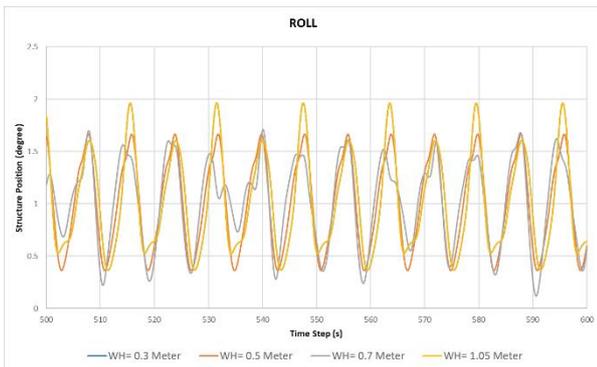
Gambar 12. Grafik *time domain* surge



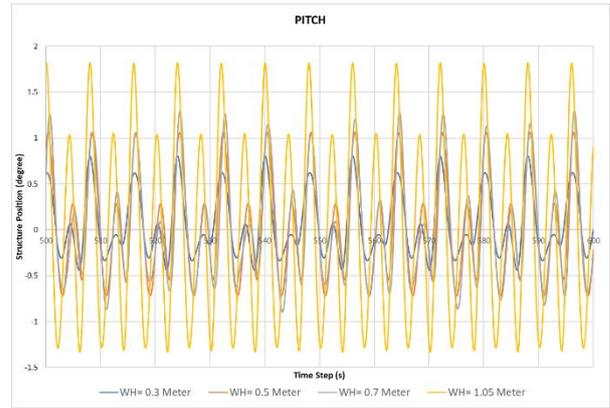
Gambar 13. Grafik *time domain* sway



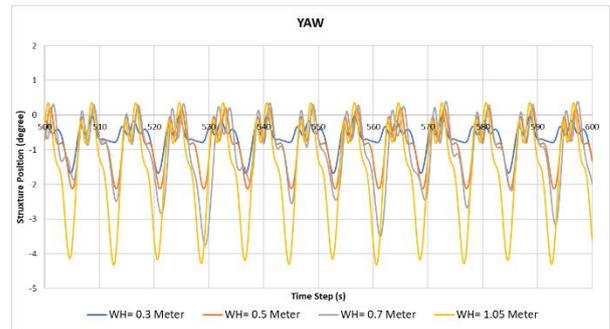
Gambar 14. Grafik *time domain* heave



Gambar 15. Grafik *time domain* roll



Gambar 16. Grafik *time domain* pitch



Gambar 17. Grafik *time domain* yaw

Berdasarkan gambar 12, data grafik *time domain* surge dapat menunjukkan nilai maksimum dan minimum yang didapatkan sesuai dengan tabel 12.

Tabel 12. Nilai surge saat arrival

Wave Height (m)	Max (m)	Time (s)	Min (m)	Time (s)
0.3	0.1555	521.1	-0.029	523.7
0.5	0.2677	520	-0.137	532.1
0.7	0.4238	521.8	-0.14	524.2
1.05	0.4545	514.7	-0.30	510.6

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 12 dapat diketahui jika nilai surge terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 0.4545 m pada 514.6s dan nilai minimum = -0.30m pada 510.6s.

Selanjutnya nilai sway maksimum dan minimum yang diperoleh memiliki nilai seperti pada tabel 13.

Tabel 13. Nilai sway saat arrival

Wave Height (m)	Max (m)	Time (s)	Min (m)	Time (s)
0.3	0.3645	507.6	0.0805	537.7
0.5	0.3704	515.7	0.0603	535.9
0.7	0.3825	515.7	-0.004	528.3
1.05	0.4214	579.6	0.008	552.6

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 13 dapat diketahui jika nilai sway terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 0.4214 m pada 579.6s dan nilai minimum= 0.008m pada 552.6s.

Selanjutnya nilai heave maksimum dan minimum yang diperoleh memiliki nilai seperti pada tabel 14.

Tabel 14. Nilai heave saat arrival

Wave Height (m)	Max (m)	Time (s)	Min (m)	Time (s)
0.3	0.2023	504.9	-0.459	500.1
0.5	0.3378	513.1	-0.807	500.5
0.7	0.7970	535.9	-1.234	501.6
1.05	1.0594	560.9	-1.542	524.7

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 14 dapat diketahui jika nilai heave terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 1.625 m pada 560.9s dan nilai minimum= -1.614m pada 524.7s.

Selanjutnya, nilai roll maksimum dan minimum yang diperoleh memiliki nilai seperti pada tabel 15.

Tabel 15. Nilai roll saat arrival

Wave Height (m)	Max (°)	Time (s)	Min (°)	Time (s)
0.3	1.9635	547.5	0.3672	511.1
0.5	1.6663	507.8	0.3626	534.8
0.7	1.7102	540.1	0.3614	590.6
1.05	1.9635	546.3	0.3672	543.1

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 15 dapat diketahui jika nilai roll terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 1.9635 pada 546.3s dan nilai minimum=0.367 pada 543.1s.

Selanjutnya, nilai pitch maksimum dan minimum yang diperoleh memiliki nilai seperti pada tabel 16.

Tabel 16. Nilai pitch saat arrival

Wave Height (m)	Max (°)	Time (s)	Min (°)	Time (s)
0.3	0.8040	540.1	-0.440	506.1
0.5	1.0607	500.1	-0.719	511
0.7	1.2944	524.5	-0.896	543.2
1.05	1.8161	509.1	-1.332	506.9

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 16 dapat diketahui jika nilai pitch terjadi pada

gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 1.816 pada 509.1s dan nilai minimum=-1.33 pada 506.9s.

Selanjutnya, nilai yaw maksimum dan minimum yang diperoleh memiliki nilai seperti pada tabel 17.

Tabel 17. Nilai yaw saat arrival

Wave Height (m)	Max (°)	Time (s)	Min (°)	Time (s)
0.3	-0.0283	508.6	-1.681	536.7
0.5	0.2103	501	-2.127	513
0.7	0.3926	573.3	-3.753	529.3
1.05	0.3578	557.9	-4.325	554.4

Berdasarkan data yang diperoleh dari tabel 17 dapat diketahui jika nilai yaw terjadi pada gelombang 1.05 meter dengan nilai maksimum = 0.3578 pada 557.9s dan nilai minimum=-4.32 pada 554.4s.

Dari hasil analisis penelitian yang dilakukan pada kondisi loadcase arrival yang kemudian dibandingkan dengan standar yang digunakan dalam penelitian ini yaitu PIANC 1995. Maka dapat dilihat terdapat beberapa kondisi dimana nilai melebihi standar kriteria yang ada, heave pada gelombang 1.05 meter memiliki nilai 1.059 dimana standar heave 0.8. Selanjutnya ada gerak yaw pada gelombang 1.05 meter memiliki nilai 4.325° dimana standar yaw yaitu 3°.

Dari hasil penelitian berdasarkan dua kondisi loadcase yakni departure dan arrival, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa kondisi muatan serta draft pada kapal mempengaruhi nilai karakteristik stabilitas kapal. Hal ini disebabkan nilai displacement dan COG pada dua kondisi kapal memiliki nilai yang cukup signifikan berbeda sehingga nilai karakteristik RAO juga dipengaruhi. Pernyataan ini juga sesuai dengan penelitian sebelumnya yang mengatakan kondisi muatan mempengaruhi karakteristik dari stabilitas kapal itu sendiri[3][13].

### 3.4. Analisa Tegangan Tali Tambat

Analisis menggunakan *hydrodynamic response* pada Ansys AQWA dimana kapal ditambatkan dengan 4 tali tambat linier yang juga dibantu dengan penambahan fender. Sketsa sistem tambat bisa dilihat pada gambar 3.

Analisa pada mooring line berupa nilai tegangan maksimum yang terjadi ketika simulasi dilakukan dengan memasukan parameter yang sudah ditetapkan. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode *time domain* dengan waktu 1200 detik.

Kondisi pertama yaitu kondisi loadcase departure dengan sudut arah datang gelombang 90° yang selanjutnya hasil maksimum dapat memperoleh nilai *safety factor* sesuai perhitungan rumus dari API-RP 2SK. Hasil nilai pada variasi ketinggian gelombang 0.3 meter yang diperoleh dari analisis dapat dilihat pada tabel 18.

Tabel 18. Nilai max tension gelombang 0.3

Line	Maximum (N)	Time	SF
Line 1	84956	546.4	5.65
Line 2	139848	577.1	3.43
Line 3	207665	575.8	2.31
Line 4	136320	562.4	3.52

Berdasarkan tabel 18, nilai maksimum tegangan tali yang terjadi berada pada line 3 senilai 207665 N pada waktu 577.1s dengan nilai SF yakni 2.31.

Selanjutnya hasil analisis pada variasi ketinggian gelombang 0.5 meter yang dapat dilihat pada tabel 19.

Tabel 19. Nilai max tension gelombang 0.5

Line	Maximum (N)	Time	SF
Line 1	105267	593.1	4.56
Line 2	173962	513.3	2.76
Line 3	251107	576.4	1.91
Line 4	170958	513.3	2.81

Berdasarkan tabel 19, nilai maksimum tegangan tali yang terjadi berada pada line 3 senilai 264035 N pada waktu 576.4s dengan nilai SF yakni 1.91.

Selanjutnya hasil analisis pada variasi ketinggian gelombang 0.7 meter yang dapat dilihat pada tabel 20.

Tabel 20. Nilai max tension gelombang 0.7

Line	Maximum (N)	Time	SF
Line 1	121134	589.2	3.96
Line 2	200303	526.4	2.40
Line 3	287005	524.7	1.68
Line 4	199301	500.2	2.41

Berdasarkan tabel 20, nilai maksimum tegangan tali yang terjadi berada pada line 3 senilai 287005 N pada waktu 524.7s dengan nilai SF yakni 1.68.

Selanjutnya hasil analisis pada variasi ketinggian gelombang 1.05 meter yang dapat dilihat pada tabel 21.

Tabel 21. Nilai max tension gelombang 1.05

Line	Maximum (N)	Time	SF
Line 1	130303	508.3	3.68
Line 2	242686	548.1	1.98
Line 3	314281	548.3	1.52
Line 4	244216	516.6	1.96

Berdasarkan tabel 21, nilai maksimum tegangan tali yang terjadi berada pada line 3 senilai 314281 N pada waktu 548.3s dengan nilai SF yakni 1.52. Pada kondisi ini menunjukkan nilai pada line 3 tidak memenuhi standar API RP-2SK.

Selanjutnya kondisi kedua yaitu kondisi loadcase arrival dengan sudut arah datang gelombang sebesar 90°. Hasil nilai tegangan pada variasi gelombang 0.3 meter dapat dilihat pada tabel 22.

Tabel 22. Nilai max tension gelombang 0.3

Line	Maximum (N)	Time	SF
Line 1	168659	546.2	2.85
Line 2	191559	577.4	2.05
Line 3	280085	575.1	1.72
Line 4	184683	562.3	2.60

Berdasarkan tabel 22, nilai maksimum tegangan tali yang terjadi berada pada line 3 senilai 280085 N pada waktu 575.1s dengan nilai SF yakni 1.72.

Selanjutnya hasil analisis pada variasi ketinggian gelombang 0.5 meter yang dapat dilihat pada tabel 23.

Tabel 23. Nilai max tension gelombang 0.5

Line	Maximum (N)	Time	SF
Line 1	176403	593.3	2.72
Line 2	273544	513.8	1.76
Line 3	281770	575.4	1.70
Line 4	207447	513.6	2.31

Berdasarkan tabel 23, nilai maksimum tegangan tali yang terjadi berada pada line 3 senilai 281770 N pada waktu 575.4s dengan nilai SF yakni 1.70.

Selanjutnya hasil analisis pada variasi ketinggian gelombang 0.7 meter yang dapat dilihat pada tabel 24.

Tabel 24. Nilai max tension gelombang 0.7

Line	Maximum (N)	Time	SF
Line 1	219283	589.2	2.19
Line 2	323167	526.4	1.49

Line 3	359659	524.9	1.33
Line 4	276528	500.4	1.74

Berdasarkan tabel 24, nilai maksimum tegangan tali yang terjadi berada pada line 2 senilai 323167 N pada waktu 526.4s dengan nilai SF yakni 1.49, selanjutnya pada line 3 senilai 359659 N pada waktu 524.9s dengan nilai SF yakni 1.33. Pada kedua kondisi tersebut menyatakan line 2 dan line 3 tidak memenuhi standar safety pada API RP-2SK.

Selanjutnya hasil analisis pada variasi ketinggian gelombang 1.05 meter yang dapat dilihat pada tabel 25.

Tabel 25. Nilai max tension gelombang 1.05

Line	Maximum (N)	Time	SF
Line 1	303397	508.1	1.58
Line 2	385307	548.8	1.24
Line 3	364786	548.6	1.32
Line 4	262892	516.4	1.83

Berdasarkan tabel 25, nilai maksimum tegangan tali yang terjadi berada pada line 2 senilai 385307 N pada waktu 548.8s dengan nilai SF yakni 1.24. Selanjutnya pada line 3 senilai 364786 pada waktu 548.6s dengan nilai SF yakni 1.32. Kemudian diikuti line 1 senilai 303397 N pada waktu 508.1s dengan nilai SF yakni 1.58. Pada ketiga kondisi tersebut menyatakan bahwa pada line 1, line 2, dan line 3 tidak memenuhi standar safety yang telah ditetapkan API RP-2SK.

Dari hasil analisis tegangan maksimum mooring line yang dilakukan pada dua kondisi loadcase yaitu arrival dan departure yang kemudian dibandingkan dengan standar yang digunakan dalam penelitian ini yaitu API RP2-SK, dimana nilai *safety factor* tiap tali tidak boleh melebihi 1.67. Maka terdapat beberapa kondisi dimana nilai faktor keamanan tali melebihi standar yaitu pada loadcase arrival gelombang 1.05, dimana nilai faktor keamanan pada line 1, line 2, dan line 3 kurang dari batas *safety factor* yang ditetapkan API RP 2-SK.[7]

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan pada model 3D kapal dengan bantuan software Ansys AQWA, dengan demikian dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

a) Kondisi loadcase kapal salah satu hal yang berpengaruh pada olah gerak kapal ketika bersandar di dermaga, dimana kondisi loadcase departure ( *payload 100% & consumables 100%*) memiliki nilai stabilitas yang lebih baik

dibanding dengan kondisi loadcase arrival (*payload 100% & consumables 10%*).

- b) Beban lingkungan menjadi faktor yang mempengaruhi nilai stabilitas, dalam penelitian ini didapatkan bahwa semakin tinggi gelombang, maka nilai RAO akan semakin besar juga.
- c) Dari hasil penelitian didapatkan bahwa, pada kondisi loadcase departure nilai maksimal surge sebesar 0.261 meter, nilai maksimal sway sebesar 0.418 meter, nilai maksimal heave sebesar 1.202 meter, nilai maksimal roll sebesar 1.479°, nilai maksimal pitch 2.523°, dan nilai maksimal yaw sebesar 0.728° yang semuanya terjadi pada gelombang 1.05 meter. Selanjutnya pada kondisi loadcase arrival didapatkan nilai maksimal surge sebesar 0.423 meter, nilai maksimal sway sebesar 0.421 meter, nilai maksimal heave sebesar 1.559 meter, nilai maksimal roll sebesar 1.963°, nilai maksimal pitch 2.689°, dan nilai maksimal yaw sebesar 1.553° yang semuanya terjadi pada gelombang 1.05 meter.
- d) Pada kondisi loadcase departure, terdapat satu kondisi yang didapati tidak memenuhi standar safety yang ditetapkan. Sedangkan pada kondisi loadcase arrival, terdapat 5 kondisi dimana nilai SF kurang dari 1.67. Dari setiap line, nilai tegangan maksimum lebih besar terjadi di line 2 dan line 3, hal ini diakibatkan pembebanan di kedua line tersebut lebih besar. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Villa-Caro, J. C. Carral, J. Á. Fragueta, M. López, and L. Carral, "A review of ship mooring systems," *Brodogradnja*, vol. 69, no. 1, pp. 123–149, 2018, doi: 10.21278/brod69108.
- [2] E. Romano-Moreno, G. Diaz-Hernandez, A. Tomás, and J. L. Lara, "Multivariate assessment of port operability and downtime based on the wave-induced response of moored ships at berths," *Ocean Eng.*, vol. 283, no. June, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115053.
- [3] I. A. T. Yasmin Zein, E. B. Djatmiko, and Murdjito, "Mooring Tension Analysis of the Effect of Mooring Configuration Variations when LNG Carrier Moored to a Jetty," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 972, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/972/1/012023.
- [4] E. B. Djatmiko, "Perilaku dan Operabilitas

- Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak,” *ITS Press*, no. September, pp. 1–27, 2012.
- [5] S. K. Chakrabarti, <*Handbook of Offshore Engineering, Vol 2.pdf*>, vol. I. 2005.
- [6] S. W. Lee, K. Sasa, S. ich Aoki, K. Yamamoto, and C. Chen, “New evaluation of ship mooring with friction effects on mooring rope and cost-benefit estimation to improve port safety,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 13, pp. 306–320, 2021, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2021.04.002.
- [7] “API RP 2SK - Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures | Engineering360.” [Online]. Available: [https://standards.globalspec.com/std/9958013/API RP 2SK](https://standards.globalspec.com/std/9958013/API%20RP%202SK)
- [8] T. Gourlay, A. von Graefe, V. Shigunov, and E. Lataire, “Comparison of AQWA, GL Rankine, MOSES, OCTOPUS, PDStrip and WAMIT With Model Test Results for Cargo Ship Wave-Induced Motions in Shallow Water,” pp. 1–10, 2015, doi: 10.1115/omae2015-41691.
- [9] R. Bhattacharyya, *Dynamics of marine vehicles*. 1978.
- [10] N. Dementyev, “Quasi-dynamic global strength analysis of a passenger ship in regular waves,” 2019, [Online]. Available: [www.aalto.fi](http://www.aalto.fi)
- [11] F. Liu, W. W. Hager, and A. V. Rao, “Adaptive mesh refinement method for optimal control using nonsmoothness detection and mesh size reduction,” *J. Franklin Inst.*, vol. 352, no. 10, pp. 4081–4106, 2015, doi: 10.1016/j.jfranklin.2015.05.028.
- [12] “PIANC - 1995 - Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours - A Practical Guide.pdf.”
- [13] M. I. Afdhal, U. Budiarto, and I. P. Mulyatno, “JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Optimasi Disain Spread Mooring Dengan Konfigurasi Variasi Line Terhadap Six Degrees Of Freedom (DOF) Olah Gerak Pada Kapal Floating Storage And Offloading (FSO),” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 7, no. 1, pp. 81–92, 2019, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/aval>