



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - MN141581**

**ANALISIS PENAMBATAN DAN GERAKAN DOK APUNG  
AKIBAT GAYA-GAYA LUAR DENGAN VARIASI  
KONFIGURASI PENGIKATAN PADA PERAIRAN DANGKAL  
TERBATAS**

**FAJAR ADI PRATAMA**  
NRP. 4112 100 057

Prof. Ir.I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.  
Teguh Putranto, ST., MT.

**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN**  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2016



**TUGAS AKHIR - MN 141581**

**ANALISIS PENAMBATAN DAN GERAKAN DOK APUNG  
AKIBAT GAYA-GAYA LUAR DENGAN VARIASI  
KONFIGURASI PENGIKATAN PADA PERAIRAN DANGKAL  
TERBATAS**

FAJAR ADI PRATAMA  
NRP. 4112 100 057

Prof. Ir.I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.  
Teguh Putranto, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2016



**FINAL PROJECT - MN141581**

**FLOATING DOCK MOORING AND MOTION ANALYSIS  
INDUCED BY EXTERNAL FORCES GIVEN VARIATION OF  
MOORING CONFIGURATION ON SHALLOW RESTRICTED  
WATER**

**FAJAR ADI PRATAMA  
NRP. 4112 100 057**

**Prof. Ir.I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.  
Teguh Putranto, ST., MT.**

**DEPARTMENT OF NAVAL ARCHITECTURE & SHIPBUILDING ENGINEERING  
Faculty of Marine Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2016**

**Lembar Pengesahan**

**ANALISIS PENAMBATAN DAN GERAKAN DOK APUNG  
AKIBAT GAYA-GAYA LUAR DENGAN VARIASI  
KONFIGURASI PENGIKATAN PADA PERAIRAN DANGKAL  
TERBATAS**

**TUGAS AKHIR**

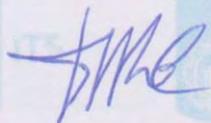
Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika Kapal  
Program S1 Jurusan Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**FAJAR ADI PRATAMA**  
NRP. 4112 100 057

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

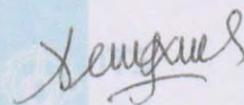
Dosen Pembimbing I



Prof. Ir.I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.  
NIP. 19670406 199203 1 001



Dosen Pembimbing II



Teguh Putranto, ST., MT.  
NIP. 19900513 201404 1 001

SURABAYA, JULI 2016

## Lembar Revisi

# ANALISIS PENAMBATAN DAN GERAKAN DOK APUNG AKIBAT GAYA-GAYA LUAR DENGAN VARIASI KONFIGURASI PENGIKATAN PADA PERAIRAN DANGKAL TERBATAS

### TUGAS AKHIR

Telah direvisi sesuai dengan hasil Ujian Tugas Akhir  
Tanggal 23 Juli 2016

Bidang Keahlian Rekayasa Perkapalan – Hidrodinamika Kapal  
Program S1 Jurusan Teknik Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**FAJAR ADI PRATAMA**  
NRP. 4112 100 057

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tugas Akhir:

1. Dony Setyawan, ST., M.Eng.

2. Dedi Budi Purwanto, ST., MT.

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

1. Prof. Ir. I K.A.P. Utama, M.Sc., Ph.D.

2. Teguh Putranto, ST., MT.



SURABAYA, JULI 2016

# **ANALISIS PENAMBATAN DAN GERAKAN DOK APUNG AKIBAT GAYA-GAYA LUAR DENGAN VARIASI KONFIGURASI PENGIKATAN PADA PERAIRAN DANGKAL TERBATAS**

Nama Mahasiswa : Fajar Adi Pratama  
NRP : 4112 100 057  
Jurusan / Fakultas : Teknik Perkapalan / Teknologi Kelautan  
Dosen Pembimbing : Prof. Ir.I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.  
Teguh Putranto, ST., MT.

## **Abstrak**

Perilaku struktur apung tertambat dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya muatan, angin, arus, gelombang dan faktor eksternal maupun internal lainnya. Dalam tugas akhir ini, metode difraksi 3 dimensi dengan program komputer digunakan untuk perhitungan respons gerakan dan ketahanan sistem penambatan struktur apung di gelombang irreguler yang ditinjau dari perairan Selat Madura. Bentuk struktur apung yang dianalisis adalah dok apung dengan bentuk lambung ponton. Dok apung tersebut kemudian divariasikan menjadi 3 kondisi muatan yaitu muatan kosong, muatan kapal dan muatan balas penuh. Variasi juga dilakukan pada konfigurasi penambatan I dan II. Kemudian variasi dilihat untuk perubahan gerakan struktur dan tegangan pada sistem penambatan dok apung. Sudut datangnya gaya eksternal juga divariasikan dalam interval  $45^0$ , yaitu  $0^0$ ,  $45^0$ ,  $90^0$ ,  $135^0$ ,  $180^0$ ,  $-45^0$ ,  $-90^0$  dan  $-135^0$ . Setelah analisis numerik dilakukan dapat diketahui perubahan muatan menyebabkan perubahan gerakan dan tegangan tali dok apung. Gerakan dok apung berupa perpindahan translasi maupun rotasi dan akselerasi secara vertikal telah memenuhi ketentuan ISO 2631 dan DNV-0030/ND. Tegangan yang dihasilkan pada variasi juga sudah memenuhi kriteria dari API RP2SK<sup>2nd</sup> edition 1999 untuk kondisi ULS.

# **FLOATING DOCK MOORING AND MOTION ANALYSIS INDUCED BY EXTERNAL FORCES GIVEN VARIATION OF MOORING CONFIGURATION ON SHALLOW RESTRICTED WATER**

Author : Fajar Adi Pratama  
ID No. : 4112 100 057  
Dept. / Faculty : Naval Architecture & Shipbuilding Engineering / Marine Technology  
Supervisor : Prof. Ir.I Ketut Aria Pria Utama, M.Sc., Ph.D.  
Teguh Putranto, ST., MT.

## **Abstrack**

*Floating structure's behaviour in the sea was influenced by load, wind, current wave, and other's external-internal factor. In this final project, 3 imensional diffraction with computer software used to calculate respons and ability of float structure mooring system in irreguler wave that looked in Madura strain waterwork. Floating structure shape that analysed was floating dock with barge hull shape. Floating dock was varied into 3 loading condition which is light load, docked ship load and ballast load condition. Variety also doing to mooring configuration I and II. Then variety to observe floating dock moored response motion and tension change when in storage or offloading condition. External forces also veried into 45<sup>0</sup> interval, which is 0<sup>0</sup>, 45<sup>0</sup>, 90<sup>0</sup>, 135<sup>0</sup>, 180<sup>0</sup>, -45<sup>0</sup>, -90<sup>0</sup> and -135<sup>0</sup>. After numerical analysed, alteration in floating dock caused change in structure motion and tension. Floating dock motion about distance-rotation and acceleration fullfill ISO 2631 and DNV-0030/ND. Floating dock moored tension also fullfill API RP2SK<sup>2nd</sup> edition 1999 in ULS condition.*

# Daftar Isi

Lembar Pengesahan .....	iii
Lembar Revisi .....	iv
Kata Pengantar .....	v
Abstrak .....	vi
Abstrack .....	vii
Daftar Isi .....	viii
Daftar Gambar.....	xi
Daftar Tabel .....	xiv
Daftar Simbol.....	xv
Bab I Pendahuluan .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Penelitian .....	4
1.5. Metodologi Penelitian .....	5
1.5.1. Identifikasi dan Rumusan Masalah .....	5
1.5.2. Studi Literatur .....	5
1.5.3. Perancangan Model.....	5
1.5.4. Pengumpulan Data .....	5
1.5.5. Pengolahan Data Penelitian .....	5
1.5.6. Analisis Hasil Penelitian .....	5
1.5.7. Tahap Penarikan Kesimpulan .....	5
1.6. Sistematika Penulisan.....	7
Bab II Studi Literatur .....	9
2.1. Gerakan Dok Apung.....	9
2.1.1. Jari-jari girasi .....	9
2.1.2. Perilaku struktur akibat gelombang .....	11
2.1.3. Gerakan struktur pada gelombang reguler .....	12
2.1.4. Hubungan gerakan dengan kenyamanan.....	13
2.2. Pemodelan lingkungan .....	14
2.2.1. Perairan dangkal.....	14

2.2.2.	Kondisi Gelombang Masa Pendek .....	17
2.2.3.	Elevasi Gelombang.....	18
2.2.4.	Angin .....	19
2.2.5.	Arus .....	20
2.3.	Sistem Penambatan .....	21
2.3.1.	Persamaan katener .....	21
2.3.2.	Standar Desain.....	24
2.4.	Analisis Numerik .....	24
2.4.1.	Teori Difraksi 3D .....	25
2.4.2.	Teori Potongan .....	26
Bab III	Model Dok Apung .....	29
3.1.	Dasar pemodelan.....	29
3.1.1.	Orientasi .....	29
3.1.2.	Kondisi Lingkungan .....	30
3.1.3.	Spesifikasi Dok Apung.....	31
3.1.4.	Spesifikasi Sistem Penambatan .....	32
3.1.5.	Dasar desain numerik .....	36
3.2.	Deskripsi Model.....	37
3.2.1.	Proses Desain.....	37
3.2.2.	Tata Nama Sistem Penambatan .....	52
3.3.	Analisis Model.....	53
Bab IV	Validasi dan Verifikasi .....	57
4.1.	Validasi <i>Wamit</i> .....	57
4.1.1.	Gerakan Translasi.....	58
4.1.2.	Gerakan Rotasi .....	60
4.2.	Verifikasi <i>Strip Theory</i> .....	61
4.2.1.	Grafik Perbandingan Hasil .....	63
4.2.2.	Animasi Perbandingan Hasil .....	64
Bab V	Hasil dan Pembahasan.....	67
5.1.	Perpindahan dan Rotasi Model Dok Apung .....	67
5.1.1.	Konfigurasi I.....	67
5.1.2.	Konfigurasi II .....	69
5.1.3.	Konfigurasi I Vs Konfigurasi II.....	70

5.2.	Akselerasi Gerakan Model Dok Apung .....	72
5.2.1.	Kriteria Kenyamanan Model Dok Apung .....	72
5.3.	Tegangan Tali Penambatan .....	72
5.3.1.	Kriteria Keamanan Tegangan .....	73
5.3.2.	Kondisi muatan balas penuh .....	74
5.4.	Fenomena <i>Bank Effects</i> .....	75
5.4.1.	Variasi Kerapatan Dermaga .....	75
5.4.2.	Animasi Bank Effects .....	79
5.5.	Fenomena <i>Squat Effects</i> .....	80
5.5.1.	Variasi Kedalaman Perairan.....	80
5.5.2.	Pengujian pada Kedalaman Perairan 30 m. ....	82
5.6.	Dermaga sebagai <i>Break Waters</i> .....	84
Bab VI	Kesimpulan dan Saran.....	89
6.1.	Kesimpulan.....	89
6.2.	Saran.....	90
Daftar Pustaka	.....	91
Biodata Penulis	.....	94
Lampiran	.....	93

## Daftar Gambar

Gambar 1.

Gambar 1.1: Berita kenaikan harga tanah di Pulau Madura (Sumber: Surabayapagi.com, 2010)..... 1

Gambar 1.2: Diagram Alir Metode Penelitian ..... 7

Gambar 2.

Gambar 2.1: Sketsa Dok Apung ..... 9

Gambar 2.2: Definisi Gerakan Dok Apung dalam 6 derajat kebebasan..... 12

Gambar 2.3: Contoh sebuah tali pengikatan katener (Faltinsen, 1993)..... 21

Gambar 2.4: Lambung Struktur dibagi dalam beberapa panel..... 25

Gambar 2.5: Pemotongan model menjadi beberapa station. .... 26

Gambar 3.

Gambar 3.1: Lokasi Penempatan Dok Apung. (Sumber: Google Earth, 2016) ..... 30

Gambar 3. 2: Rencana Umum Dok Apung..... 31

Gambar 3.3: Perencanaan Sistem Tambat. .... 32

Gambar 3.4: Tampilan awal *maxsurf professional*..... 38

Gambar 3.5: Model dok apung pada *maxsurf professional*..... 38

Gambar 3.6: Pemasukan nilai sarat dan titik nol. .... 39

Gambar 3.7: Ekspor format dan geometri ..... 40

Gambar 3.8: Hasil impor model dok apung format (.igs) ..... 41

Gambar 3.9: Pemodelan geometri dok apung dan dermaga. .... 43

Gambar 3.10: Tampilan model pada *ansys aqwa hydrodynamic diffraction* ..... 44

Gambar 3.11: *Meshing* pada *ansys aqwa hydrodynamic diffraction*..... 44

Gambar 3.12: Grafik konvergensi hasil..... 46

Gambar 3.13: Input parameter sebelum analisis *hydrodynamic diffraction*..... 47

Gambar 3.14: Hasil RAO's Dok Apung pada gerakan *roll*..... 48

Gambar 3.15: Animasi dok apung akibat gelombang arah  $-90^0$  ..... 48

Gambar 3.16: Proses transfer *hydrodynamic diffraction* ke *hydrodynamic time response* ..... 49

Gambar 3.17: Parameter input sistem penambatan ..... 50

Gambar 3.18: Titik-titik pengikatan ..... 50

Gambar 3. 19: Desain penambatan konfigurasi I.....	51
Gambar 3.20: Desain penambatan konfigurasi II. ....	51
Gambar 3.21: Susunan nama tali penambatan Konfigurasi I.....	52
Gambar 3.22: Arah datangnya gelombang .....	52
Gambar 3.23: Sistem Penambatan kolinier $-90^0$ .....	55
Gambar 4.	
Gambar 4.1: Pembagian panel pada model balok menggunakan <i>wamit</i> .....	57
Gambar 4.2: Pembagian panel pada model balok menggunakan <i>ansys aqwa</i> .....	58
Gambar 4.3: Grafik perbandingan gerakan translasi searah sumbu-x antara <i>ansys aqwa</i> dengan <i>wamit</i> . ....	58
Gambar 4.4: Grafik perbandingan gerakan translasi searah sumbu-y antara <i>ansys aqwa</i> dengan <i>wamit</i> . ....	59
Gambar 4.5: Grafik perbandingan gerakan translasi searah sumbu-z antara <i>ansys aqwa</i> dengan <i>wamit</i> .....	59
Gambar 4.6: Grafik perbandingan gerakan rotasi arah sumbu-x antara <i>ansys aqwa</i> dengan <i>wamit</i> .....	60
Gambar 4.7: Grafik perbandingan gerakan rotasi arah sumbu-y antara <i>ansys aqwa</i> dengan <i>wamit</i> .....	60
Gambar 4.8: Grafik perbandingan gerakan rotasi arah sumbu-z antara <i>ansys aqwa</i> dengan <i>wamit</i> .....	61
Gambar 4.9: Pembagian <i>section</i> pada <i>maxsurf motion</i> . ....	62
Gambar 4.10: Grafik perbandingan hasil <i>ansys aqwa</i> dengan <i>maxsurf motion</i> pada gerakan translasi searah sumbu-z .....	63
Gambar 4.11: Grafik perbandingan hasil <i>ansys aqwa</i> dengan <i>maxsurf motion</i> pada gerakan rotasi arah sumbu-y.....	63
Gambar 4.12: Grafik perbandingan hasil <i>ansys aqwa</i> dengan <i>maxsurf motion</i> pada gerakan rotasi arah sumbu-x.....	64
Gambar 4.13: Visualisasi gerakan model dok apung pada <i>maxsurf motion</i> . ....	64
Gambar 4.14: Visualisasi gerakan model dok apung pada <i>ansys aqwa</i> .....	65
Gambar 5.	
Gambar 5.1: Grafik perbandingan <i>rolling</i> Konfigurasi I dan II saat muatan kosong. ....	70
Gambar 5.2: Grafik perbandingan <i>rolling</i> Konfigurasi I dan II saat muatan kapal.....	71

Gambar 5.3: Grafik perbandingan <i>rolling</i> Konfigurasi I dan II saat muatan balas penuh. ....	71
Gambar 5.4: Diagram perbandingan gerakan translasi searah sumbu positif. ....	76
Gambar 5.5: Diagram perbandingan gerakan translasi searah sumbu negatif. ....	77
Gambar 5.6: Diagram perbandingan gerakan rotasi searah sumbu positif.....	78
Gambar 5.7: Diagram perbandingan gerakan rotasi searah sumbu negatif.....	79
Gambar 5.8: Visualisasi perbandingan perbedaan tekanan akibat <i>bank effects</i> . ....	80
Gambar 5.9: Diagram perbandingan gerakan translasi searah sumbu positif. ....	81
Gambar 5.10: Diagram perbandingan gerakan rotasi searah sumbu positif.....	82
Gambar 5.11: Skenario terbenturnya dasar dok apung dengan dasar laut.....	84
Gambar 5.12: Dermaga sebagai <i>break waters</i> . ....	84
Gambar 5.13: Perbandingan <i>surging</i> RAO's dermaga awal dengan dermaga sebagai <i>break waters</i> . ....	85
Gambar 5.14: Perbandingan <i>pitching</i> RAO's dermaga awal dengan dermaga sebagai <i>break waters</i> . ....	86
Gambar 5.15: Perbandingan <i>yawing</i> RAO's dermaga awal dengan dermaga sebagai <i>break waters</i> . ....	86

## Daftar Tabel

Tabel 3.

Tabel 3.1: Prakiraan Cuaca Selat Madura (Sumber: BMKG Surabaya, 2016).....	30
Tabel 3.2: Massa dan Sarat Dok Apung .....	32
Tabel 3.3: Jarak Minimum Antar Unit. (Sumber: DNV-OS-H203, 2012) .....	33
Tabel 3.4: Kapasitas Sistem Pengikatan. (Sumber: Rulefinder 9.17, 2012).....	34
Tabel 3.5: Spesifikasi Rantai <i>Stud Link</i> . (Sumber: Viking Moorings) .....	35
Tabel 3.6: Spesifikasi <i>Six Stand Rope</i> . (Sumber: Robertson, 2014).....	36
Tabel 3.7: Satuan.....	37
Tabel 3.8: Validasi Model.....	40
Tabel 3.9: Data simulasi konvergensi <i>meshing</i> .....	46
Tabel 3.10: Dimensi rantai.....	53

Tabel 4.

Tabel 5.1: Hasil analisis konfigurasi I saat muatan kosong.....	67
Tabel 5.2: Hasil analisis konfigurasi I saat muatan kapal.....	68
Tabel 5.3: Hasil analisis konfigurasi I saat muatan balas penuh .....	68
Tabel 5.4: Hasil analisis konfigurasi II saat muatan kosong.....	69
Tabel 5.5: Hasil analisis konfigurasi II saat muatan kapal .....	69
Tabel 5. 6: Hasil analisis konfigurasi II saat muatan balas penuh .....	69
Tabel 5.7: Penilaian kenyamanan model dok apung.....	72
Tabel 5.8: Hasil Tegangan maksimal pada tiap-tiap konfigurasi.....	73
Tabel 5.9: Hasil Tegangan maksimal pada kondisi muatan balas penuh.....	74
Tabel 5.10: Nilai Maksimal dan Minimal Perpindahan/Rotasi Dok Apung pada Kedalaman Perairan 30 m .....	83

## Daftar Simbol

$T$	= Periode (Second)
$n_f$	= Frekuensi dasar harmonik (Hertz)
$\omega$	= Frekuensi gelombang (rad/s)
$\omega_p$	= Frekuensi puncak gelombang (rad/s)
$\omega_{nz}$	= Frekuensi Alami gerakan heave (rad/s)
$\omega_{n\phi}$	= Frekuensi Alami gerakan Roll (rad/s)
$\omega_{n\theta}$	= Frekuensi Alami gerakan Pitch (rad/s)
$c_p$	= Kecepatan puncak gelombang (m/s)
$T_p$	= Periode puncak (Second)
$T_n$	= Periode natural (Second)
$x_a$	= Amplitudo gerakan <i>surge</i> (m)
$y_a$	= Amplitudo gerakan <i>sway</i> (m)
$z_a$	= Amplitudo gerakan <i>heave</i> (m)
$\emptyset_a$	= Amplitudo gerakan <i>roll</i> (Derajat)
$\Theta_a$	= Amplitudo gerakan <i>pitch</i> (Derajat)
$\Phi_a$	= Amplitudo gerakan <i>yaw</i> (Derajat)
$g$	= percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
$V$	= Kecepatan kapal (Knot)
$\mu$	= <i>heading angle</i> kapal (Derajat)
$T$	= Periode gerakan (Second)
$\beta$	= Damping Decay (n.d)

## Bab I

### Pendahuluan

#### 1.1. Latar Belakang

Reparasi kapal adalah tindakan untuk memulihkan kondisi mutu awal dari sebuah kapal dengan usaha penggantian/perbaikan dari bagian konstruksi atau permesinan yang dinilai akan membahayakan dari segi keselamatan pelayaran jika dioperasikan lebih lanjut (Muhammad, 2007). Untuk melakukan proses reparasi dibutuhkan lahan yang relatif luas seiring dengan kapasitas kapal yang akan direparasi. Seperti yang diketahui bahwa harga lahan/tanah secara cepat naik seiring berjalannya waktu. Untuk itu, diperlukan suatu solusi untuk meredam laju pembengkakan harga tanah dengan melihat kembali identitas negara Indonesia.

Indonesia merupakan negara maritim dan kepulauan terbesar di dunia (17.504 pulau, Departemen Dalam Negeri 2004), memiliki luas total wilayah laut 2/3 dari luas keseluruhan wilayah, seluas 7.900.000 km<sup>2</sup>. Oleh karena itu, memanfaatkan wilayah perairan seluas itu merupakan hal yang tidak terhindarkan lagi dan juga pemikiran masyarakatnya untuk mengarah ke pemanfaatan wilayah perairan harus dimulai sedini mungkin agar tidak terhambat dengan negara-negara lain. Pemanfaatan wilayah perairan di Indonesia dapat dimulai dari bagian pesisir pantai, tidak jauh dari garis pantai yang merupakan wilayah perairan laut dangkal dengan kondisi air relatif tenang, seperti pada wilayah perairan Laut Jawa yang cocok dimanfaatkan untuk penempatan bangunan terapung. (Wibowo, 2012)



Gambar 1.1: Berita kenaikan harga tanah di Pulau Madura (Sumber: SurabayaPagi.com, 2010).

Seperti berita yang dilansir pada Gambar 1.1, bahwa harga tanah mengalami kenaikan yang sangat signifikan mulai tahun 2010. Tentu kenaikan harga tersebut sangatlah memberatkan bagi investor atau pengusaha yang bergerak dibidang pendedokan kapal. Oleh karena itu, penempatan bangunan terapung merupakan solusi dari mahalnya harga tanah pada daratan dan juga pemanfaatan luas wilayah perairan Indonesia. Terlebih sesuai dengan Peraturan Pemerintah tentang izin lokasi dan izin pengelolaan wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil, yang mengizinkan tiap-tiap pribadi untuk dapat memanfaatkan ruang dari sebagian perairan pesisir yang mencakup permukaan laut dan kolom air sampai dengan permukaan dasar laut pada batas keluasan tertentu (RPP RI, 2015). Hal tersebut tentu membuat keringanan bagi pengusaha atau investor yang dapat memanfaatkan.

Dalam hal tersebut, maka dibutuhkan suatu bangunan terapung yang dapat difungsikan sebagai tempat reparasi kapal atau yang biasa disebut dengan dok apung. Dok apung adalah suatu bangunan terapung dengan konstruksi yang dipasang dari sebuah atau beberapa kompartemen kedap air pada sisi-sisinya dan terbuka pada kedua ujungnya. Dapat ditenggelamkan dengan mengisi kompartemen tersebut dengan air dan kapal akan memasukinya pada saat bangunan tersebut tenggelam, juga akan ke permukaan (timbul) lagi dengan jalan memompa air keluar dari kompartemen-kompartemen. (Muhammad, 2007)

Permasalahan yang selalu ada pada bangunan-bangunan terapung khususnya dok apung adalah kerusakan yang dapat menyebabkan struktur tersebut mengalami kegagalan. Kerusakan bangunan laut terutama terjadi akibat tegangan siklis, baik pada komponen struktur utama maupun struktur sekunder dan tersier. Bangunan terapung cenderung mengalami kelelahan karena beban lingkungan yang bekerja didominasi oleh gelombang yang bersifat siklis, sehingga tegangan adalah penyebab utama kerusakan pada bangunan lepas pantai, di mana struktur merespon secara dinamis gelombang acak serta beban arus dan angin. Disamping itu faktor-faktor operasi lain pada tingkat tertentu juga dapat menambah beban siklis ini, sehingga keadaan struktur bertambah kritis. Struktur yang akan mengalami beban-beban tersebut adalah penambatan pada bangunan terapung. Oleh sebab itu, analisis sistem penambatan pada bangunan terapung adalah hal yang perlu untuk diperhatikan. Selain itu terdapat parameter lain pada dok apung yaitu olah gerak pada bangunan terapung, yang dibatasi oleh standar gerakan maksimum yang ada padanya. Terdapat 2 poin penting dalam analisis gerakan terkait keamanan dan kenyamanan untuk suatu penambatan bangunan terapung, yakni karakteristik dan

percepatan gerakan. Dalam dunia perkapalan terdapat standar ketidaknyamanan atau standar terhadap rasa mual/ingin muntah yang disebabkan oleh gerakan kapal yang biasa disebut dengan *motion sickness incidence*. *Motion sickness incidence* dapat diprediksi dengan cara menghitung respon kapal terhadap gelombang. Menurut O'Hanlon dan Mc Cauley (1974) gelombang secara vertikal dan akselerasi secara lateral dapat dipakai untuk menghitung prosentase terjadinya *motion sickness incidence*. (Purwanto, 2012)

Analisis penambatan dan gerakan merupakan suatu cara yang dapat dilakukan untuk memperkirakan risiko terjadinya kerusakan yang diakibatkan oleh beban berulang, usia dari suatu bangunan dalam menghadapi beban tersebut dan batas aman dalam olah gerak kapal sebagai acuan dalam melakukan desain penambatan dok apung. Dengan melakukan analisis sistem penambatan yang berdampak pada olah gerak dan tegangan tali tambat, risiko timbulnya kerusakan yang fatal dapat diperkecil dan suatu bangunan dapat memenuhi target desain yang telah ditetapkan. (Giverson, 2013)

Pembahasan ini melaporkan hasil analisis perhitungan numerik tegangan pada sistem tambat dan gerakan dok apung akibat beban-beban eksternal (beban gelombang, beban angin dan beban arus) pada kondisi perairan dangkal dan dibatasi oleh dermaga pada salah satu sisi. Beban-beban tersebut akan terjadi selama umur operasi.

Kemajuan pada bidang ICT juga telah memberikan kontribusi dimana pada saat ini telah terdapat beberapa program yang dapat digunakan untuk menganalisis gerakan maupun tegangan pada sistem tambat bangunan terapung, salah satunya adalah Ansys Aqwa. *Software* Ansys Aqwa telah teruji untuk melakukan analisis konfigurasi sistem penambatan dan gerakan pada bangunan terapung, sehingga melalui hasil analisis perhitungan numerik dapat memberi rekomendasi desain penambatan bangunan terapung dalam kondisi aman.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan paparan di atas, permasalahan yang akan dikaji dalam tugas akhir ini adalah sebagaimana yang terdapat pada poin-poin di bawah ini :

1. Bagaimanakah sistem penambatan yang aman dan nyaman untuk dok apung, pada kondisi perairan dangkal dan terbatas;

2. Bagaimanakah perilaku atau respon gerakan dok apung pada desain sistem penambatan yang telah direncanakan.

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang sistem penambatan dok apung pada perairan dangkal dan terbatas;
2. Melakukan analisis sistem penambatan dok apung dengan variasi tertentu menggunakan perangkat lunak Ansys Aqwa;
3. Memberikan gambaran (animasi) perilaku gerakan dok apung akibat beban-beban eksternal dalam bentuk 3 dimensi;
4. Mengetahui adanya efek dari interaksi dermaga (*bank effect*) dan perairan dangkal (*squat effect*).

### 1.4. Batasan Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan memiliki struktur yang kompleks, sehingga beberapa nilai yang menjadi input harus disesuaikan antara kondisi lokasi operasi dengan pemodelan Ansys Aqwa. Batasan utama adalah penempatan dok apung pada kedalaman yang dangkal dan pemberian pembatas berupa dermaga pada salah satu sisi. Namun hal tersebut bersifat tidak mutlak, karena dalam salah satu tujuan penelitian untuk mengetahui efek dari adanya *bank* dan *squat effect* dibutuhkan variasi kedalaman dan variasi jarak antara dok apung dengan dermaga. Analisis hanya dilakukan pada gelombang ireguler.

Secara umum penelitian untuk menganalisis sistem penambatan, penulis hanya memakai satu perangkat lunak yakni Ansys Aqwa, adapun perangkat lunak lain digunakan sebagai alat validasi dan verifikasi. Untuk variasi pada dok apung diantaranya adalah variasi konfigurasi pengikatan, berat muatan dan arah datang gelombang.

## **1.5. Metodologi Penelitian**

### **1.5.1. Identifikasi dan Rumusan Masalah**

Tahap ini merupakan tahap awal dari pengerjaan tugas akhir, yaitu dengan menetapkan tujuan penelitian serta melakukan perumusan dan pembatasan masalah dari apa yang akan dikerjakan pada tugas akhir.

### **1.5.2. Studi Literatur**

Studi literatur dilakukan dengan mencari dan mempelajari referensi baik dari buku, buku elektronik, internet, jurnal, dan peraturan mengenai proses perancangan dan sistem tambat dok apung dengan metode analitik dan juga numerik menggunakan perangkat lunak.

### **1.5.3. Perancangan Model**

Penelitian ini akan dilakukan dalam metode numerik menggunakan perangkat lunak, dimana perangkat lunak yang digunakan untuk memodelkan dok apung adalah program Maxsurf yang nantinya akan di alihkan pada program Ansys Aqwa yang berfungsi untuk melakukan analisis penambatan dan respon gerakan dok apung.

### **1.5.4. Pengumpulan Data**

Dilakukan pengumpulan data-data yang diperlukan dalam melakukan perancangan dok apung, seperti data lingkungan laut (kedalaman, arus, kecepatan angin dan ketinggian gelombang), data ukuran utama maupun kapasitas dok apung, data penunjang sistem tambat, dan lain-lain.

### **1.5.5. Pengolahan Data Penelitian**

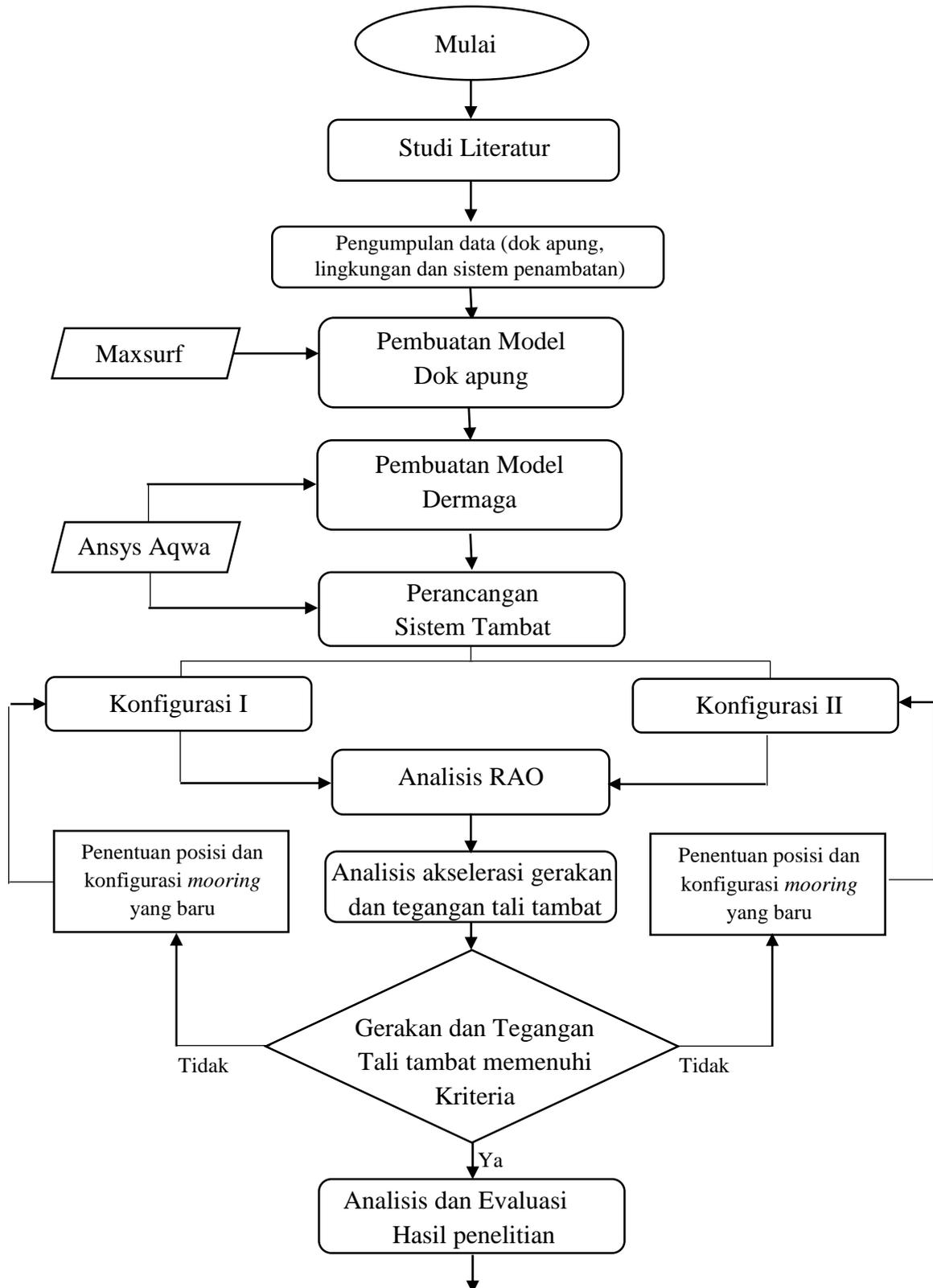
Pada tahap ini dilakukan pengolahan data dengan metode numerik melalui perangkat lunak berdasarkan data yang sebelumnya dikumpulkan.

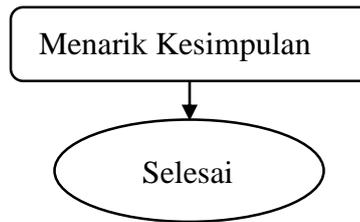
### **1.5.6. Analisis Hasil Penelitian**

Pada tahap ini dilakukan analisis mengenai konsep desain dan hasil kalkulasi perhitungan ketahanan dok apung baik dengan metode numerik maupun dengan metode analitik.

### **1.5.7. Tahap Penarikan Kesimpulan**

Pada tahap kesimpulan dapat diketahui nilai tegangan dari struktur sistem tambat, gerakan (karakteristik dan percepatan) pada dok apung dan juga sistem tambat yang tepat untuk struktur terapung pada kondisi perairan yang telah ditentukan.





Gambar 1.2: Diagram Alir Metode Penelitian

### 1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada laporan ini adalah sebagai berikut. Bab 2 berisi tinjauan pustaka yang digunakan sebagai referensi untuk melakukan penelitian. Bab 3 akan membahas detail dari data kondisi lingkungan dan spesifikasi dok apung sesuai bahan yang menjadi input perangkat lunak. Bab 4 berisi validasi dan verifikasi dari proses pengaturan dan hasil yang didapatkan melalui perangkat lunak. Bab 5 berisi pemodelan dok apung sesuai parameter yang telah ditetapkan, kemudian dilakukan analisis numerik menggunakan perangkat lunak. Bab 6 berisi hasil dan pembahasan yang didapatkan melalui analisis numerik. Terakhir, Bab 7 mengandung kesimpulan dari laporan.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## Bab II

### Studi Literatur

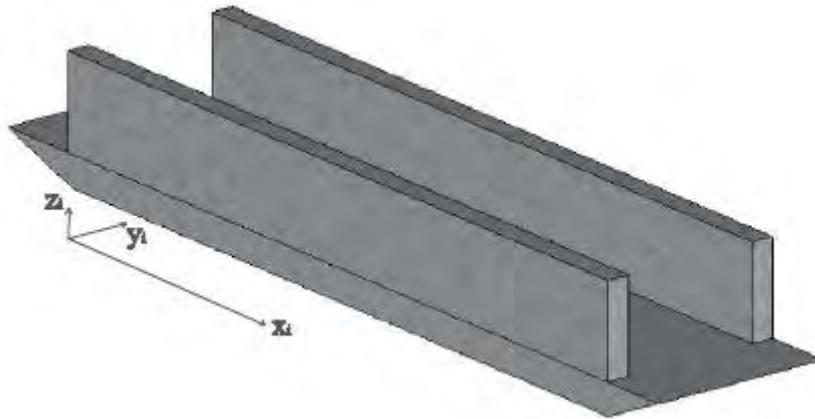
#### 2.1. Gerakan Dok Apung

Gerakan kapal dipengaruhi oleh dua faktor, yakni faktor internal dan faktor eksternal. Pada kasus gerakan dok apung, terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi perilaku stabilitas gerak secara internal, diantaranya koefisien massa dan jari-jari girasi pada tiap-tiap sumbu gerakan. Nilai dari jari-jari girasi menentukan kemampuan dok apung dalam berputar terhadap tiap-tiap sumbu. Gerakan berputar tersebut berkaitan erat dengan momen inersia pada sumbu- $x$  (*roll*), sumbu- $y$  (*pitch*) dan sumbu- $z$  (*yaw*). Secara umum, nilai momen inersia didefinisikan sebagai berikut:

$$I = mR^2 = \int dMr_i^2 \quad (2.1)$$

Dimana,  $I$  adalah momen inersia,  $m$  adalah massa dari benda dan  $R$  adalah jarak diantara titik sumbu dengan sumbu rotasi.

##### 2.1.1. Jari-jari girasi



Gambar 2.1: Sketsa Dok Apung

Pada kasus ini, untuk memberikan gambaran lebih jelas mengenai gerakan yang akan ditimbulkan oleh dok apung terhadap masing-masing sumbu dan memahami persamaan-persamaan yang akan diberikan, ditampilkan gambaran sesuai gambar 2.1.

### 2.1.1.1 Jari-jari girasi terhadap sumbu-x

Secara khusus momen inersia pada sumbu-x (*roll*) mengacu pada persamaan (2.1),

$$I_{xx} = \int dM r_i^2 = \int dM (y_i^2 + z_i^2) \quad (2.2)$$

Sehingga,

$$I_{xx} = \frac{1}{g} \sum [w_i (y_i^2 + z_i^2)] + \sum I_i \quad (2.3)$$

Dimana,  $w_i$  adalah berat benda,  $y_i$  adalah jarak melintang titik berat (gravitasi) benda,  $z_i$  adalah jarak vertikal titik berat benda dari sumbu putarnya, dan  $I_i$  adalah momen inersia benda terhadap titik beratnya.

Jari-jari girasi dok apung dapat ditentukan dari hubungan antara momen inersia, percepatan gravitasi dan displasemen. Ketegaran dok apung terhadap gerakan rotasional sumbu-x dipengaruhi oleh besarnya jari-jari girasi, oleh karena itu jari-jari girasi erat kaitannya dengan momen inersia, seperti dirumuskan pada persamaan (2.4).

$$I_{xx} = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 = I_{xx} = \frac{1}{g} \sum [w_i (y_i^2 + z_i^2)] \quad (2.4)$$

Jari-jari girasi dok apung untuk gerakan rotasional sumbu-x (*rolling*),  $k_{xx}$  ditunjukkan oleh persamaan (2.5)

$$k_{xx} = \sqrt{\frac{\sum w_i (y_i^2 + z_i^2)}{\Delta}} \quad (2.5)$$

### 2.1.1.2 Jari-jari girasi terhadap sumbu-y

Momen inersia pada sumbu-y (*pitch*) diberikan pada persamaan (2.6) dan (2.7),

$$I_{yy} = \int dM r_i^2 = \int dM (x_i^2 + z_i^2) \quad (2.6)$$

Sehingga,

$$I_{yy} = \frac{1}{g} \sum [w_i (x_i^2 + z_i^2)] + \sum I_i \quad (2.7)$$

Dimana,  $w_i$  adalah berat benda,  $x_i$  adalah jarak memanjang titik berat (gravitasi) benda dari sumbu putarnya,  $z_i$  adalah jarak vertikal titik berat benda dari sumbu putarnya, dan  $I_i$  adalah momen inersia benda terhadap titik beratnya.

Jari-jari girasi dok apung dapat ditentukan dari hubungan antara momen inersia, percepatan gravitasi dan displasemen. Hubungan antara jari-jari girasi dengan momen inersia dok apung dapat dirumuskan melalui persamaan (2.8).

$$I_{yy} = \frac{\Delta}{g} k_{yy}^2 = I_{yy} = \frac{1}{g} \sum [w_i (x_i^2 + z_i^2)] \quad (2.8)$$

Jari-jari girasi dok apung untuk gerakan rotasional sumbu-x (*pitching*),  $k_{xx}$  ditunjukkan oleh persamaan (2.9)

$$k_{yy} = \sqrt{\frac{\sum w_i (x_i^2 + z_i^2)}{\Delta}} \quad (2.9)$$

### 2.1.1.3 Jari-jari girasi terhadap sumbu-z

Momen inersia pada sumbu-y (*yaw*) diberikan pada persamaan (2.10) dan (2.11),

$$I_{zz} = \int dM r_i^2 = \int dM (x_i^2 + y_i^2) \quad (2.10)$$

Sehingga,

$$I_{zz} = \frac{1}{g} \sum [w_i (x_i^2 + y_i^2)] + \sum I_i \quad (2.11)$$

Dimana,  $w_i$  adalah berat benda,  $x_i$  adalah jarak memanjang titik berat (gravitasi) benda dari sumbu putarnya,  $y_i$  adalah jarak melintang titik berat (gravitasi) benda dari sumbu putarnya, dan  $I_i$  adalah momen inersia benda terhadap titik beratnya.

Jari-jari girasi dok apung dapat ditentukan dari hubungan antara momen inersia, percepatan gravitasi dan displasemen. Hubungan antara jari-jari girasi dengan momen inersia dok apung dapat dirumuskan melalui persamaan (2.12).

$$I_{zz} = \frac{\Delta}{g} k_{zz}^2 = I_{zz} = \frac{1}{g} \sum [w_i (x_i^2 + y_i^2)] \quad (2.12)$$

Jari-jari girasi dok apung untuk gerakan rotasional sumbu-x (*yawing*),  $k_{xx}$  ditunjukkan oleh persamaan (2.13)

$$k_{zz} = \sqrt{\frac{\sum w_i (x_i^2 + y_i^2)}{\Delta}} \quad (2.13)$$

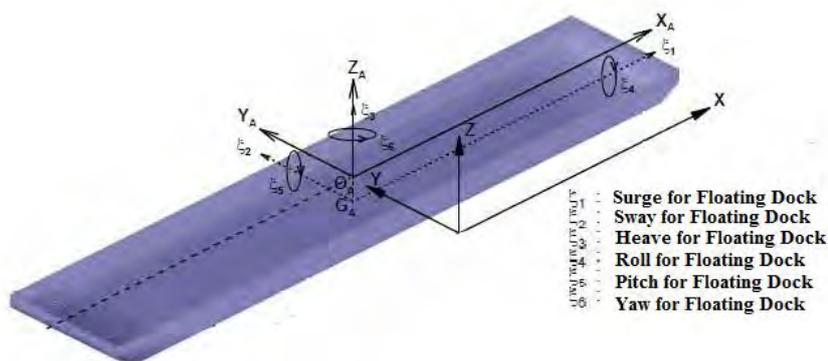
karena suatu dok apung memiliki bentuk simetris, radius girasi gabungan  $k_{yx}$ ,  $k_{zx}$  dan  $k_{zy}$  tidak memiliki nilai atau nol (Børkja, 2015).

### 2.1.2. Perilaku struktur akibat gelombang

Gelombang laut merupakan faktor eksternal yang paling berpengaruh terhadap dinamika gerakan struktur terapung. Gerakan dari sebuah struktur apung hanya berlaku untuk suatu benda yang memiliki ketegaran, yang kemudian dibagi menjadi enam derajat kebebasan, diantaranya:

- Tiga gerakan translasi yang tegak lurus dengan titik gravitasi ( $CoG$ ), pada arah sumbu- $x$ ,  $y$ - dan  $z$ -:
  - Gerakan maju dan mundur searah sumbu- $x$  (*surge*), positif jika struktur maju;
  - Gerakan mengayun searah sumbu- $y$  (*sway*), positif jika struktur bergerak ke arah sisi kiri;
  - Gerakan naik dan turun searah sumbu- $z$  (*heave*), positif jika struktur naik.
- Tiga gerakan rotasi yang mengelilingi titik gravitasi:
  - Gerakan menggulung diantara sumbu- $x$  (*roll*), positif jika berputar ke kanan;
  - Gerakan mengganggu diantara sumbu- $y$  (*pitch*), positif jika berputar ke kanan;
  - Gerakan oleng diantara sumbu- $z$  (*yaw*), positif jika berputar ke kanan.

Definisi tersebut seperti visualisasi yang ditampilkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2: Definisi Gerakan Dok Apung dalam 6 derajat kebebasan

Pada banyak kasus, komponen yang ditimbulkan dari gerakan tersebut memiliki nilai amplitudo yang kecil, karena beberapa gerakan dari kapal maupun struktur apung sebagian besar gerakannya timbul akibat faktor internal (Ship Hydromechanics, 2002)

### 2.1.3. Gerakan struktur pada gelombang reguler

Pada kondisi gelombang reguler, gaya yang mengenai badan struktur meliputi gaya *Froude-Krylov* dan gaya terdifraksi.

- Gaya *Froude-Krylov* adalah gaya yang terjadi akibat adanya tekanan oleh gelombang yang mengenai badan struktur tercelup;
- Gaya Difraksi adalah gaya yang terjadi akibat adanya tekanan yang dipengaruhi oleh gangguan gelombang ketika dalam kondisi operasi.

Gerakan suatu struktur apung pada gelombang reguler disebut sebagai *Response Amplitude Operator's (RAO's)*. RAO's merupakan informasi tentang karakteristik gerakan kapal yang umumnya disajikan dalam bentuk grafik, dimana absisnya adalah parameter frekuensi dan ordinatnya adalah rasio antara amplitudo gerakan pada derajat kebebasan tertentu dengan amplitudo gelombang. RAO's dapat diperoleh dari tes model, perhitungan analitis maupun simulasi numerik dengan perangkat lunak.

RAO's disebut juga sebagai fungsi transfer karena dapat digunakan untuk mentransformasikan beban gelombang menjadi respon struktur. Fungsi transfer yang digunakan dapat menentukan efek gerakan kapal pada kondisi laut tertentu namun fungsi tersebut hanya didefinisikan ketika gerakan kapal diasumsikan linier. Adapun beberapa hal yang mempengaruhi nilai RAO's diantaranya: tambahan massa, gaya redaman dan gaya pengembali sebagaimana dapat dituliskan melalui persamaan (2.13).

$$[m + a(\omega)]x + b(\omega)x + cx = F(\omega) \quad (2.13)$$

Dimana,  $x$  adalah derajat kebebasan sesuai dengan gerakan dok apung,  $m$  adalah massa dok apung,  $a$  adalah tambahan massa,  $b$  adalah redaman secara linier dan  $c$  adalah koefisien dari gaya pengembali.

Dari persamaan (2.13), RAO's gerakan dok apung didapatkan dengan persamaan (2.14)

$$RAO(\omega) = \frac{x}{\zeta_a} = \frac{F_0}{c - [m + a(\omega)]\omega^2 + ib(\omega)\omega} \quad (2.14)$$

Pada gelombang yang panjang, nilai frekuensi gelombang sangat kecil dan efek dinamis terkait penambahan massa dan efek redaman secara virtual dapat diabaikan. Sehingga eksitasi dan reaksi yang dialami oleh kapal sebagian besar disebabkan oleh perubahan gaya apung kapal saat gelombang melewati lambung dok apung.

#### 2.1.4. Hubungan gerakan dengan kenyamanan

Tolok ukur kenyamanan pada gerakan struktur apung erat kaitannya dengan istilah mabuk laut. Mabuk laut adalah gejala sakit yang diakibatkan karena gerakan struktur apung yang mengakibatkan gejala fisik yang tidak nyaman ditandai dengan susah bernafas, pusing mual,

pucat, dan muntah. Penyebab utama mabuk laut adalah tidak adanya kesamaan rangsang antara stimulus, mata dan labirin telinga yang diterima oleh otak manusia (Santoso, 2015).

Dari hasil observasi dan riset, tidak ada hubungan yang pasti antara gerakan struktur apung dan mabuk laut. *Mc Cauley dan O'Hanlon (1999)* secara kuantitatif memperkirakan persentase orang yang akan mengalami mabuk laut. Dalam perkiraan tersebut dihasilkan kesimpulan bahwa percepatan struktur apung secara vertikal merupakan hal yang paling berpengaruh dalam terjadinya mabuk laut, sementara gerakan rotasi terhadap sumbu-x dan sumbu-z hanya memberikan dampak yang relatif kecil.

## 2.2. Pemodelan lingkungan

Bagian ini akan menjelaskan mengenai kondisi lingkungan pada suatu struktur bangunan apung dalam keadaan tertambat. Hal utama yang akan menjadi fokus adalah fenomena gaya-gaya eksternal yang bekerja pada struktur, yakni angin, arus dan gelombang. Selain itu, efek dari perairan dangkal juga akan dieksplorasi. Bahasan ini akan mencoba memberikan informasi yang dibutuhkan untuk memodelkan lingkungan pada suatu struktur apung tertambat dalam perairan dangkal seakurat mungkin.

### 2.2.1. Perairan dangkal

Secara umum, perilaku gerakan dok apung dipengaruhi oleh kedalaman perairan dimana benda tersebut beroperasi. Adapun klasifikasi dari tingkat kedalaman perairan, yang ditujukan berdasarkan rasio antara kedalaman perairan ( $h$ ) dengan sarat benda ( $T$ ), yakni:

- Perairan dalam  $h/T > 3.0$
- Perairan menengah  $1.5 < h/T < 3.0$
- Perairan dangkal  $1.2 < h/T < 1.5$
- Perairan sangat dangkal  $h/T < 1.2$

Efek dari kedalaman perairan baru dapat dirasakan ketika struktur apung maupun kapal berada pada kelas perairan menengah, sangat signifikan pada perairan dangkal dan mendominasi perilaku gerakan struktur apung pada kondisi perairan sangat dangkal (Vantorre, 2003).

Perilaku gelombang pada perairan dalam, menyebabkan perubahan berupa berkurangnya kedalaman air. Pada pertama kali permukaan air laut diperkirakan memiliki kedalaman setengah dari panjang gelombang ( $h < \lambda/2$ ). Kedalaman tersebut kemudian mengganggu gerakan

memutar dari orbit gelombang, yang membuat perubahan energi berupa bergesernya gelombang dari gelombang panjang menjadi pendek, kecepatan propagasi gelombang menurun dan ketinggian gelombang meningkat. Apabila kedalaman mengalami penurunan kurang dari dua puluh kali dari panjang gelombang ( $h < \lambda/2$ ), orbit dari partikel air menjadi tidak teratur dan gerakan partikel menjadi turbulen (Børkja, 2015).

Sifat-sifat dari gelombang pada perairan dangkal dapat ditemukan melalui perhitungan analitis dalam teori potensial manner. Pertama, kecepatan potensial  $\phi$  gelombang harus ditetapkan. Untuk itu, diberikan empat asumsi.

1. Kontinuitas dari potensial fluida tak termampatkan dapat dideskripsikan menjadi persamaan Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.15)$$

2. Potensial kecepatan adalah nol, ketika alas dari struktur apung tidak mengalami kondisi selip:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z=-h} = 0 \quad (2.16)$$

Dimana  $h$  adalah kedalaman perairan.

3. Persamaan Bernoulli yang disesuaikan dengan penampakan perairan, hal ini dinamakan kondisi dinamis:

$$g\zeta + \left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_{z=0} = 0 \quad (2.17)$$

4. Kondisi kinematis mengungkapkan jika partikel fluida pada permukaan gelombang akan berada pada tempat teratas gelombang, hal ini dideskripsikan dengan:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z=0} = 0 \quad (2.18)$$

Dengan menggunakan kondisi di atas, potensial kecepatan dari suatu gelombang perairan dangkal, diberikan dengan:

$$\phi = \frac{g\zeta A \cosh k(h+z)}{w \cosh kh} \sin(kx - \omega t) \quad (2.19)$$

Dari persamaan (2.19), diketahui penyebaran untuk perairan dangkal yaitu:

$$\omega^2 = kg \tan kh \quad (2.20)$$

Potensial kecepatan  $\phi$  sekarang dapat digunakan untuk menunjukkan edaran berbentuk elips dari partikel perairan, gerakan dari partikel air diberikan sebagai berikut:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.21)$$

$$y = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (2.22)$$

Pengintegralan terhadap fungsi waktu:

$$x_A = \int_0^t \frac{\partial \phi}{\partial x} dt = -\zeta_A \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} [\sin(kx - \omega t) - \sin kx] = -\partial x + \partial x_m \quad (2.23)$$

dan:

$$z_A = \int_0^t \frac{\partial \phi}{\partial z} dt = \zeta_A \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} [\cos(kx - \omega t) - \cos kx] = \partial z + \partial z_m \quad (2.24)$$

sekarang  $\partial x$  dan  $\partial z$  dapat dinyatakan dengan:

$$\partial x = -a \sin(kx - \omega t) \quad (2.25)$$

$$\partial z = b \cos(kx - \omega t) \quad (2.26)$$

Dari sini kemudian dihasilkan:

$$\frac{\partial^2 x}{a^2} + \frac{\partial^2 y}{b^2} = 1 \quad (2.27)$$

Jadi, gerakan partikel-partikel air dideskripsikan sebagai edaran elips dengan titik tengah dari  $(x + \partial x_m, z + \partial z_m)$ , dan efek yang terjadi disebutkan dalam paragraf di atas. Diketahui nilai untuk perairan dalam:

$$\tanh kh = 1 \quad (2.28)$$

Dan untuk perairan dangkal:

$$\tanh kh < 1 \quad (2.29)$$

Dan dapat diperkirakan, efek dari perairan dangkal melalui persamaan berikut (Børkja, 2015):

Elevasi gelombang:

$$\zeta(t) = \zeta_A \cos(kx - \omega t) \quad (2.30)$$

Panjang gelombang:

$$\lambda = \frac{2\pi g}{\omega^2} \tanh kh \quad (2.31)$$

Kecepatan gelombang:

$$c_w^2 = \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh kh \quad (2.32)$$

### 2.2.2. Kondisi Gelombang Masa Pendek

Ketika mempertimbangkan kondisi gelombang dengan masa pendek, diasumsikan kondisi pengoperasian selama 3-6 jam yang dapat dianggap sebagai kondisi stasioner. Pada konteks ini daerah perairan dapat dipertimbangkan stasioner ketika parameter lingkungan yang terdeskripsi bernilai konstan.

Pada kasus ini parameter utama yang menjadi bahan pertimbangan adalah nilai dari tinggi gelombang signifikan  $H_s$  dan periode puncak  $T_p$ . Tinggi gelombang signifikan didefinisikan sebagai rata-rata ketinggian gelombang dari sepertiga tinggi gelombang tertinggi pada periode waktu yang diberikan. Periode puncak adalah invers dari frekwensi pada spektrum energi gelombang saat nilai maksimal (DNV-RP-C205, 2010).

#### 2.2.2.1 Spektrum Gelombang

Gelombang spektrum adalah suatu fungsi kekuatan rapat spektral dari suatu displasemen permukaan laut secara vertikal. Hal tersebut menjelaskan distribusi energi gelombang sebagai fungsi dari frekwensi sudut spektral gelombang  $\omega$ . Daerah perairan gelombang masa pendek ireguler biasanya dimodelkan serupa gelombang spektra. Spektra dipilih berdasarkan daerah geografis dan kondisi daerah perairan. Pada kasus ini spektra gelombang JONSWAP akan dideskripsikan.

#### Spektrum JONSWAP

JONSWAP diciptakan dari data yang direkam pada proyek *the Joint North Sea Wave Observation* (Hasselmann et al, 1973). Penelitian tersebut menemukan bahwa suatu spektrum gelombang berhasil dikembangkan secara penuh. Hal ini akan selalu diengaruhi oleh efek-efek yang tidak linier, dengan efek terpenting adalah interaksi diantara gelombang. Spektrum jonswap merupakan pengembangan dari spektrum *pierson-moskowitz* dengan suatu faktor puncak berbentuk  $\gamma$  untuk mecocokkan data yang akan diteliti. Hasil pengembangan seperti yang ditunjukkan pada persamaan di bawah:

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma \exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right) \quad (2.33)$$

Dimana,  $A_\gamma$  adalah faktor normalisasi,  $S_{PM}(\omega)$  adalah spektrum Pierson-Moskowitzs,  $\gamma$  adalah faktor puncak, dan  $\sigma$  adalah parameter lebar spektral.

Faktor normalisasi  $A_\gamma$  diperoleh dari:

$$A_\gamma = 1 - 0.287 \cdot \ln(\gamma) \quad (2.34)$$

Parameter lebar spektral didefinisikan oleh:

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & \omega \leq \omega_p \\ 0.09, & \omega \geq \omega_p. \end{cases} \quad (2.35)$$

Faktor puncak mempengaruhi ketajaman dari puncak spektrum jonswap. Dimana kenaikan nilai akan memberikan peningkatan pada ketajaman puncak gelombang dan turun jika memiliki efek sebaliknya. Faktor dideterminasikan oleh data penelitian, ataupun jika data tidak tersedia maka dapat disajikan persamaan berdasarkan regulasi yang ada (DNV-RP-C205, 2010):

$$\gamma = \begin{cases} 5, & \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6 \\ \exp(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}), & 3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5 \\ 1, & 5 \leq \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \end{cases} \quad (2.36)$$

Spektrum jonswap diasumsikan pada kecocokan kasus yang paling baik. Jika ditemukan hasil keluar dari interval, spektrum jonswap dapat diterapkan dengan penuh perhatian.

### 2.2.3. Elevasi Gelombang

Elevasi gelombang dapat diperoleh dari spektrum gelombang  $S(\omega)$ . Hal ini diperbolehkan untuk mendeskripsikan daerah perairan ireguler melalui penjumlahan beberapa gelombang reguler dengan periode, amplitudo dan sudut fase yang berbeda-beda (Børkja, 2015). Elevasi gelombang  $\zeta$  dari suatu puncak gelombang pendek dideskripsikan persamaan berikut:

$$\zeta(x, y, t) = \zeta_A \cos(\omega t - kx \cdot \cos(\theta) - ky \cdot \sin(\theta) + \varepsilon) \quad (2.37)$$

Dimana  $k$  adalah nomor gelombang,  $\theta$  adalah sudut diantara sumbu-x dan arah gelombang propagasi dan  $\varepsilon$  adalah sudut fase. Dari persamaan di atas didapatkan persamaan dari jumlah beberapa elevasi gelombang dengan frekwensi dan arah yang berbeda-beda.

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \zeta_{Aij} \cos(\omega_i t - k_i x \cdot \cos(\theta_j) - k_i y \cdot \sin(\theta_j) + \varepsilon_{ij}) \quad (2.38)$$

Untuk menyelesaikan persamaan di atas digunakan sebuah spektrum gelombang. Hubungan antara amplitudo gelombang  $\zeta_{ij}$  dan sebuah spektrum gelombang terarah diberikan oleh:

$$\zeta_{Aij} = \sqrt{2S(\omega_i, \theta_j) \Delta\omega \Delta\theta} \quad (2.39)$$

Substitusi antara persamaan (2.39) dengan persamaan (2.38) memberikan persamaan akhir yang mana untuk menghitung elevasi gelombang berdasarkan spektrum gelombang.

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sqrt{2S(\omega_i, \theta_j) \Delta\omega \Delta\theta} \cos(\omega_i t - k_i x \cdot \cos(\theta_j) - k_i y \cdot \sin(\theta_j) + \varepsilon_{ij}) \quad (2.40)$$

#### 2.2.4. Angin

Angin dapat dimodelkan dalam bidang dua dimensi, dalam artian menyebarkan model tersebut dari paralel ke dalam bidang horizontal. Jarak angin dihitung dari bidang tersebut sampai ke batas yang ditentukan. Angin dapat dinyatakan sebagai suatu fungsi dari pertimbangan ketinggian. Fungsi tersebut dapat dideskripsikan seperti pada persamaan berikut:

$$\hat{u}_r(z) = \alpha_r \left( \frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2.41)$$

Dimana,  $z$  adalah ketinggian dari permukaan air,  $z_r$  adalah referensi ketinggian,  $\hat{u}_r$  adalah kecepatan rata-rata saat ketinggian  $z_r$ , dan  $\alpha$  adalah koefisien ketinggian.

Berbagai macam kecepatan angin dapat dimodelkan melalui spektrum angin. Terdapat beberapa alternatif, termasuk spektrum *Davenport*, Spektrum *Harris* atau spektrum ISO 19901-1 NPD. Spektrum tersebut berdasarkan asumsi dari pengaruh angin bebas terhadap permukaan bidang perairan yang luas. Perbedaan utama diantara spektra terjadi untuk frekwensi angin yang rendah.

### 2.2.5. Arus

Arus lautan dapat dibedakan menjadi beberapa kategori, dimana yang paling relevan pada kasus ini adalah arus yang dihasilkan oleh angin dan pasang-surut air laut. Arus angin dihasilkan oleh tekanan angin dan arus pasang-surut terjadi akibat selisih dari ketinggian kondisi pasang dan surut. Arus pasang-surut pada perairan pantai perlu diperhatikan, terlebih pada muara dan sumber perairan. Secara umum, kecepatan arus dapat ditentukan berdasarkan jumlah dari seluruh kontribusi arus yang timbul. Berikut merupakan penerjemahan dari persamaan yang disebutkan:

$$V_c(z) = V_{c.wind}(z) + V_{c.tide}(z) \quad (2.42)$$

Dimana,  $z$  adalah kedalaman perairan

Arus dapat dimodelkan oleh desain profil arus apabila ukuran/parameter arus perairan tidak tersedia dengan cukup. Kecepatan pasang-surut air laut pada perairan dangkal dapat dimodelkan dengan hukum kekuatan (daya). Oleh karena itu, profil tersebut dapat diperoleh melalui persamaan:

$$V_{c.tide}(z) = V_{c.tide}(0) \left( \frac{d+z}{d} \right)^a \quad (2.43)$$

Dimana,  $d$  adalah kedalaman perairan yang tetap,  $V_{c.tide}$  adalah kecepatan arus pasang-surut pada level perairan yang sama,  $z$  adalah jarak dari level perairan yang tetap, dan  $a$  adalah suatu eksponen yang dipilih (umumnya  $a = 1/7$ ).

Angin yang menghasilkan kecepatan arus dapat dideskripsikan oleh desain profil suatu arus linier:

$$V_{c.wind}(z) = V_{c.wind}(0) \left( \frac{d_0+z}{d_0} \right) \quad (2.44)$$

Dimana,  $d_0$  adalah referensi kedalaman untuk arus yang dihasilkan oleh angin, diberikan  $d_0 = 50$  m.

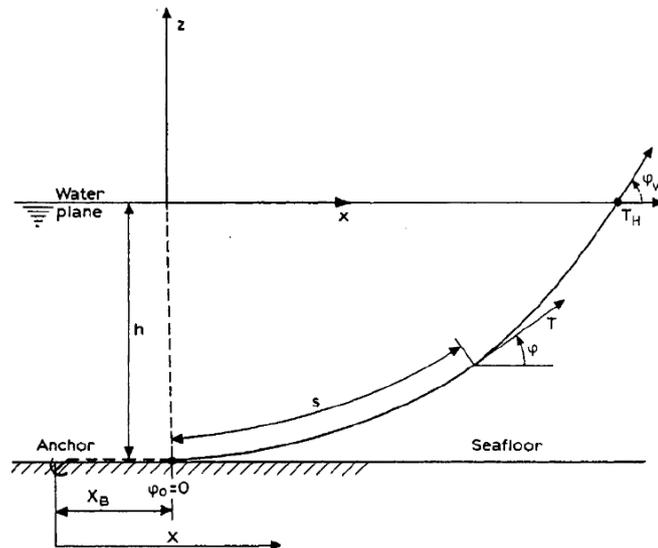
Pada perairan pantai yang dangkal nilai pasang-surut air laut akan memungkinkan untuk berubah dengan drastis dari lokasi ke lokasi. Salah satu jalan yang dapat diandalkan adalah dengan mengukur kecepatan arus pada lokasi tersebut.

### 2.3. Sistem Penambatan

Sebuah penambatan dengan sistem sebar menyusun pengikatan pada struktur apung, yang mana dapat menghalangi gerakan melalui perangkat tali penambatan yang terpasang pada struktur dan dasar perairan (Faltinsen, 1993). Tali pengikatan yang digunakan menggunakan salah satu rantai atau untaian tali. Tegangan (*tension*) yang dihasilkan pada tali pengikatan disebabkan oleh berat dan satuan elastisitas tali pengikatan. *Tension* akan semakin tinggi apabila rentang tali pengikatan diperlebar, namun hal tersebut dapat membuat gaya menghalangi gerakan struktur apung. Tali penambatan dapat dimodelkan melalui persamaan katener.

#### 2.3.1. Persamaan katener

Suatu katener didefinisikan sebagai kurva yang merepresentasikan tali menggantung dengan panjang dan berat dibuat ideal sepanjang dua titik. Pada suatu kasus kedua titik tersebut adalah titik yang menghubungkan antara struktur dengan dasar perairan. Sebuah contoh dari tali pengikatan dengan sistem katener seperti pada gambar 2.3 yang diambil dari buku berjudul “*Sea Loads on Ships and Offshore Structures*” (Faltinsen, 1993).



Gambar 2.3: Contoh sebuah tali pengikatan katener (Faltinsen, 1993).

Berdasarkan pengikatan yang ditunjukkan pada gambar 2.3, pada model tersebut efek dinamis dan kekakuan dengan sengaja diabaikan. Gaya-gaya hidrodinamis dari pengaruh lingkungan pada tali pengikatan dapat dideskripsikan oleh dua gaya  $F$  dan  $D$ , dimana  $F$  adalah sebuah gaya tangensial pada tali dan  $D$  adalah sebuah gaya normal pada tali (BØrkja, 2015). Untuk memper-

mudah proses selanjutnya terdapat beberapa definisi yang kerap terlihat:  $w$  adalah berat per panjang tali yang tercelup,  $T$  adalah tegangan tali (*tension*),  $A$  adalah area potongan tali secara melintang, dan  $E$  adalah modulus elastisitas. Dengan definisi tersebut, persamaan yang menjelaskan hubungan antara gaya-gaya yang berpengaruh pada tali pengikatan adalah sebagai berikut:

$$dT - \rho g A dz = \left[ w \sin \phi - F \left( 1 + \frac{T}{(AE)} \right) \right] ds \quad (2.45)$$

dan:

$$T d\phi - \rho g A z d\phi = \left[ w \cos \phi + D \left( 1 + \frac{T}{(AE)} \right) \right] ds \quad (2.46)$$

Dimana,  $s$ ,  $z$  dan  $\phi$  adalah definisi dari gambar 2.3. Secara khusus persamaan tersebut belum menyelesaikan permasalahan, oleh karena itu, hal tersebut diperlukan dengan mengabaikan gaya  $F$  dan  $D$ . Elastisitas dari tali penambatan juga diabaikan.  $T'$  diberikan sebagai berikut:

$$T' = T \rho g A z \quad (2.47)$$

Menggunakan persamaan tersebut, dan asumsi yang telah dinyatakan sebelumnya mendapatkan persamaan sebagai berikut:

$$dT' = w \sin \phi ds \quad (2.48)$$

dan:

$$T' d\phi = w \cos \phi ds \quad (2.49)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (2.49), diperoleh:

$$s - s_0 = \frac{1}{w} \int_{\phi_0}^{\phi} \frac{T'_0 \cos \phi_0}{\cos \theta \cos \theta} d\theta = \frac{T'_0 \cos \phi_0}{w} [\tan \phi - \tan \phi_0] \quad (2.50)$$

Dimana:

$$T' \cos \theta = T'_0 \cos \phi_0 \quad (2.51)$$

Posisi  $x$  dan  $z$  relatif dari tali dapat ditemukan karena  $dx = \cos \phi ds$  dan  $dz = \sin \phi ds$ . Hasil perhitungan dapat dilihat dalam persamaan di bawah:

$$x - x_0 = \frac{T'_0 \cos \phi_0}{w} \left( \log \left( \frac{1}{\cos \phi} + \tan \phi \right) - \log \left( \frac{1}{\cos \phi_0} + \tan \phi_0 \right) \right) \quad (2.52)$$

dan:

$$z - z_0 = \frac{T'_0 \cos \phi_0}{w} \left[ \frac{1}{\cos \phi} - \frac{1}{\cos \phi_0} \right] \quad (2.53)$$

### 2.3.1.1 Tegangan memanjang

Tegangan (*tension*) tali secara memanjang  $T_H$  pada bidang perairan didefinisikan sebagai:

$$T_H = T \cos \phi_w = T'_0 \quad (2.54)$$

Sebagai tambahan,  $T_H$  dapat diperoleh dengan:

$$\frac{xw}{T_H} = \log \left( \frac{1 + \sin \phi}{\cos \phi} \right) \quad (2.55)$$

Kemudian dimisalkan  $x_0 = 0$  dan  $z_0 = -h$ . Dengan menggunakan asumsi tersebut dan disubstitusi dengan persamaan (2.50), (2.52) dan (2.53),  $s$  dan  $z$  dapat dinyatakan sebagai suatu fungsi dari *tension* secara memanjang, dapat dilihat sebagai berikut:

$$s = \frac{T_H}{w} \sinh \left( \frac{w}{T_H} x \right) \quad (2.56)$$

dan:

$$z + h = \frac{T_H}{w} \left[ \cosh \left( \frac{w}{T_H} x \right) - 1 \right] \quad (2.57)$$

### 2.3.1.2 Tegangan Vertikal

Tegangan (*tension*) tali secara melintang dapat ditemukan melalui persamaan:

$$dT'_z = dT' \sin \phi + T' \cos \phi d\phi = w^2 \sin^2 \phi ds + w^2 \cos^2 \phi ds \quad (2.58)$$

$$T'_z = ws \quad (2.59)$$

### 2.3.1.3 Tegangan Total

Tegangan secara menyeluruh pada tali penambatan dapat ditulis dalam persamaan berikut:

$$T - \rho gAz = T_H + w(z + h) \quad (2.60)$$

$$T = T_H + wh + (w + \rho gA)z \quad (2.61)$$

Dari persamaan tersebut, dapat ditulis nilai tegangan tali maksimal, untuk  $z = 0$ .

$$T_{max} = T_H + wh \quad (2.62)$$

### 2.3.2. Standar Desain

Berdasarkan ketentuan dan rekomendasi dari *Oil Companies International Marine Forum*, mengharuskan semua bangunan terapung yang menggunakan sistem sebar dapat memenuhi standar desain yang berlaku tersebut (Wibowo, 2012). Adapun ketentuan yang harus dipenuhi tersebut adalah:

- Radius penambatan minimal adalah tiga kali panjang kapal desain. Radius yang lebih besar mungkin diperlukan tergantung dari cuaca setempat dan kondisi perairan;
- Sistem tambat dengan 6 jangkar atau sistem lain yang dapat diterima harus terpasang pada sistem dan harus dapat menjaga stabilitas dari sistem walaupun dalam keadaan satu rantai terputus tanpa merusak *under-waterhoses*;
- Semua rantai harus memiliki panjang yang sesuai sehingga dalam kondisi maksimal muatan, masih tetap ada bagian rantai yang menyentuh dasar laut;
- Tegangan maksimal yang terjadi di semua tali pengikatan tidak boleh melebihi 35% dari nilai ketahanan dari rantai tersebut.

Ketentuan tersebut sejalan dengan kriteria yang diberikan oleh API RP 2SK<sup>2nd</sup> *edition* mengenai “*Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*”.

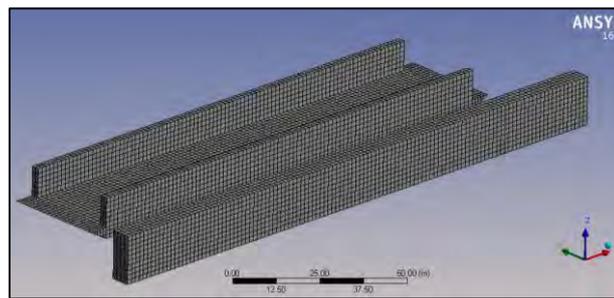
### 2.4. Analisis Numerik

Kemajuan teknologi informasi dan komunikasi memberikan berbagai manfaat khususnya pada bidang hidrodinamika perkapalan. Terdapat berbagai metode numeris yang dapat digunakan untuk menghitung respon gerakan kapal baik dalam kondisi terapung bebas maupun tertambat. Perangkat lunak *ansys aqwa* dan *maxsurf motion* memberikan fasilitas untuk mengerjakan fungsi tersebut. Kedua perangkat lunak tersebut menggunakan metode yang berbeda, *ansys*

*aqwa* menggunakan teori 3D difraksi (3D *diffraction*) sedangkan *maxsurf motion* menggunakan teori potongan (*strip theory*).

### 2.4.1. Teori Difraksi 3D

Metode ini digunakan untuk menganalisa gerakan struktur dengan bentuk sembarang, baik terapung bebas maupun dengan *mooring system*. Permukaan struktur dibagi dalam N panel yang cukup kecil sehingga diasumsikan gaya-gaya hidrodinamis yang bekerja adalah sama di tiap panel (Solihin, 2015), seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2.4: Lambung Struktur dibagi dalam beberapa panel.

Selanjutnya, sebuah persamaan dibentuk sehingga kecepatan potensial dapat diperoleh. Pada kondisi tenang, persamaan kecepatan potensial total  $\Phi$  akibat pengaruh kecepatan  $U$  adalah sebagai berikut:

$$\Phi(x, y, z; t) = [-U_x + \phi_S(x, y, z)] + \phi_T(x, y, z)e^{-i\omega_e t} \quad (2.63)$$

Di mana  $x$ ,  $y$  dan  $z$  menyatakan arah (sistem koordinat). Gaya-gaya akibat gelombang yang bekerja pada tiap panel dihitung dengan formula berikut:

$$F_{kj} = \rho \int_{S_B} \left[ \omega_e^2 X_j (\phi_{jc} + i\phi_{js}) + i\omega_e U X_j \frac{\partial}{\partial j} (\phi_{jc} + i\phi_{js}) \right] n_k ds \quad (2.64)$$

Sehingga gerak struktur dapat dihitung dengan persamaan matrik berikut:

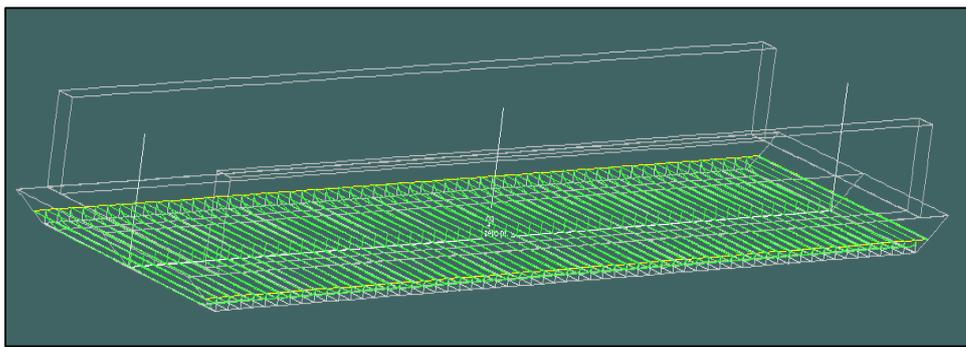
$$X_j^0 = F_k^0 \left[ \sum_{j=1}^6 -\omega_e^2 (M_{kj} + A_{kj}) - i\omega_e B_{kj} + C_{kj} \right]^{-1} \quad (2.65)$$

Dimana,  $X_j$  adalah amplitudo gerakan struktur,  $M_{kj}$  adalah matriks inersia struktur,  $A_{kj}$  adalah matriks koefisien penambahan massa,  $B_{kj}$  adalah matriks koefisien redaman,  $C_{kj}$  koefisien inersia statis, dan  $F_k$  adalah amplitudo akibat gaya gelombang.

### 2.4.2. Teori Potongan

Teori potongan (*Strip Theory*) adalah sebuah metode perhitungan di mana gaya dan gerakan dari sebuah benda terapung dapat ditentukan dengan menggunakan hasil dari perhitungan Teori Potensial 2 Dimensi. Metode ini dijelaskan pada beberapa literatur, salah satunya adalah Thesis Doktor yang dilakukan oleh (Vugts, 1970).

Pada *Strip Theory*, kapal dianggap tersusun dari potongan melintang 2 Dimensi yang terhubung secara kaku satu sama lain, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5. Masing-masing potongan memiliki bentuk yang identik dengan bentuk segmen kapal yang diwakili. Karakter hidrodinamis tiap potongan diperlakukan seolah-olah bagian tersebut adalah segmen dari sebuah silinder terapung dengan panjang tak hingga (Solihin, 2015).



Gambar 2.5: Pemotongan model menjadi beberapa station.

Hal tersebut berarti bahwa semua gelombang yang dihasilkan oleh gerakan osilasi kapal (beban hidrodinamis) dan gelombang terdifraksi (beban gelombang) diasumsikan tegak lurus terhadap garis tengah (sejajar bidang  $yz$ ) kapal. Ini juga mengindikasikan bahwa *Strip Theory* mengasumsikan sisi depan dan belakang benda (misalnya ponton) tidak menghasilkan gelombang pada arah  $x$ . Untuk kasus kecepatan nol, interaksi antar bagian melintang diabaikan.

Ketika menerapkan Teori potongan, beban yang bekerja pada benda dihitung dengan integrasi beban 2 dimensi pada gerak rotasional :

*Roll:*

$$X_{h1} = \int_L^0 X'_{h4} \cdot dx_b \quad (2.66)$$

$$X_{w1} = \int_L^0 X'_{w4} \cdot dx_b \quad (2.67)$$

*Pitch:*

$$X_{h5} = - \int_L^0 X'_{h5} \cdot x_b \cdot dx_b \quad (2.68)$$

$$X_{w5} = - \int_L^0 X'_{w5} \cdot x_b \cdot dx_b \quad (2.69)$$

*Yaw:*

$$X_{h6} = \int_L^0 X'_{h6} \cdot x_b \cdot dx_b \quad (2.70)$$

$$X_{w3} = \int_L^0 X'_{w3} \cdot x_b \cdot dx_b \quad (2.71)$$

Dimana,  $X'_{hj}$  adalah gaya hidrodinamis pada potongan atau momentum pada arah  $j$  tiap satuan panjang kapal,  $X'_{wj}$  adalah gaya akibat gelombang pada potongan atau momentum pada arah  $j$  tiap satuan panjang kapal

Persamaan umum *Strip Theory* untuk memperoleh gaya hidrodinamis adalah sebagai berikut:

$$X^*_{hj} = \frac{D}{Dt} \{M'_{jj} \cdot \zeta_{hj}\} + N'_{jj} \cdot \zeta_{hj} + X'_{rsj} \quad (2.72)$$

$$X^*_{wj} = \frac{D}{Dt} \{M'_{jj} \cdot \zeta_{wj}\} + N'_{jj} \cdot \zeta_{wj} + X'_{fkj} \quad (2.73)$$

Dimana,  $M'_{jj}$  dan  $N'_{jj}$  adalah massa potensial dua dimensi dan koefisien redaman,  $X'_{rsj}$  adalah dua dimensi quasi statis *restoring spring term* dan  $X'_{fkj}$  adalah gaya atau momen dua dimensi *Froude-Krilov*. Dengan menyelesaikan persamaan tersebut, maka gerakan struktur dapat diketahui.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## Bab III

### Model Dok Apung

Model yang digunakan pada makalah ini berdasarkan kondisi dan data dari salah satu galangan perkapalan di Kabupaten Bangkalan, Pulau Madura. Lokasi galangan dan dok apung tersebut bertempat pada Selat Madura, sehingga kondisi operasi termasuk dalam kategori area perairan yang aman, dan termasuk dalam daerah terbatas apabila ditinjau dari faktor lingkungan (DNV-0030/ND). Dok apung diikat dalam suatu sistem konfigurasi pengikatan sederhana, yakni sistem sebar yang mana menggunakan rantai untuk pengikatan di dasar laut dan tali tambat (*wire rope*) pada pengikatan di atas permukaan laut. Pada kasus ini, terdapat suatu dermaga di salah satu sisi dok apung sebagai akses akomodasi pengoperasian dok apung. Dermaga tersebut merupakan salah satu fokus dalam pemodelan, yang akan diangkat dalam makalah ini.

Pemodelan dok apung beserta perangkatnya menggunakan perangkat lunak *maxsurf modeller* dan *ansys aqwa*, dimana membutuhkan spesifikasi komputer tertentu untuk dapat menggunakannya. *Ansys aqwa* dipercaya mampu melakukan perhitungan numerik sesuai kebutuhan analisis yang akan dilakukan. Pada bab ini akan disajikan beberapa bahan pendukung untuk memodelkan dok apung maupun dermaga, proses memodelkan hingga analisis numerik dari perangkat lunak.

#### 3.1. Dasar pemodelan

Terdapat beberapa hal terkait lokasi operasi dan kondisi lingkungan, spesifikasi dok apung, spesifikasi sistem penambatan dok apung, dan metode yang digunakan dalam analisis numerik perangkat lunak, yang akan dibahas dalam bagian bab ini.

##### 3.1.1. Orientasi

Secara spesifik dok apung terletak pada  $7^{\circ} 02' 39''$  lintang selatan dan  $112^{\circ} 40' 00,72''$  bujur timur. Penempatan dok apung tersebut tidak jauh dari bibir pantai sehingga termasuk kelompok perairan dengan kedalaman yang relatif dangkal. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas, kondisi operasi dok apung seperti yang ditampilkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1: Lokasi Penempatan Dok Apung. (Sumber: Google Earth, 2016)

Pada gambar 3.1 merupakan penampakan lokasi dok apung dilihat dari jarak 11015 kaki di atas permukaan bumi melalui satelit. Warna biru pudar menandakan kedalaman perairan yang relatif dangkal, hal tersebut diperkuat dengan batimetrik seperti yang terlampir pada akhir makalah. Dimana dalam batimetrik, diketahui kedalaman perairan kurang lebih 10 meter.

### 3.1.2. Kondisi Lingkungan

Perilaku gerakan pada kapal atau struktur apung dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, dimana benda tersebut beroperasi. Berdasarkan data yang diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Perairan disekitar selat madura diperkirakan memiliki tinggi gelombang signifikan antara 0,3 m – 0,8 m dengan kecepatan angin maksimal antara 2 – 20 knot. Hal tersebut seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.1.

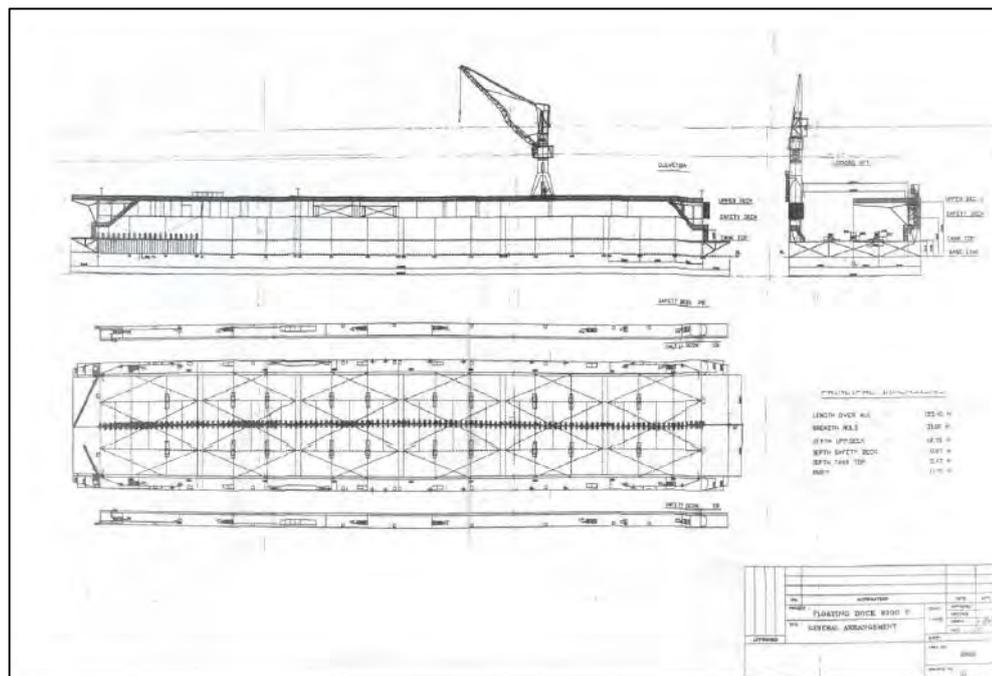
Tabel 3.1: Prakiraan Cuaca Selat Madura (Sumber: BMKG Surabaya, 2016)

Wilayah Perairan	Arah Angin	Kec. Angin	Tinggi gelombang	Tinggi gelombang signifikan	Kecepatan Arus	Pasang Surut	
		Max (knot)	Max (meter)	(meter)	Max (meter/sekon)	Max (meter)	Min (meter)
Selat Madura	Timur - Tenggara	2 – 20	0,5 – 1,3	0,3 – 0,8	0,1 - 1	0,07	- 0,09

Dalam tabel 3.1 terdapat beberapa parameter yang akan digunakan dalam proses pemodelan lingkungan melalui perangkat lunak. Arah arus laut seiring dengan pasang surut pada perairan Selat Madura. Ketika kondisi pasang arah arus laut cenderung ke utara, namun untuk kondisi surut arah arus laut pada arah sebaliknya. Kondisi lingkungan secara lengkap dapat dilihat di lampiran, pada akhir makalah.

### 3.1.3. Spesifikasi Dok Apung

Analisis gerakan dan tegangan pada sistem penambatan dok apung ini dilakukan dengan metode numerik dimana model dok apung dibuat model matematiknya melalui perangkat lunak komputer. Gambar rencana umum dan ukuran utama dok apung diperlukan dalam rangka pembuatan model agar supaya model matematik sesuai dengan kondisi riil. Distribusi berat dok apung diasumsikan homogen dimana persebaran berat meata mulai dari ujung depan hingga ujung belakang, tentu hal tersebut akan mempengaruhi stabilitas gerak dok apung.



Gambar 3. 2: Rencana Umum Dok Apung

Melalui rencana umum pada gambar 3.2 dapat diketahui geometri dari dok apung sebagai dasar pembuatan bentuk lambung melalui perangkat lunak dan ukuran utama berupa panjang, lebar, tinggi, dan sarat. Gambar rencana umum digunakan untuk mengetahui posisi kompartemen dok apung, sebagaimana gambar tersebut diketahui bahwa dok apung termasuk dalam jenis *box dock* (Cornick, 1968).

Selain rencana umum perlu diketahui beberapa spesifikasi pembebanan dok apung ditinjau dari beberapa kondisi. Hal ini dibutuhkan terkait analisis yang akan dilakukan meninjau dok apung tidak hanya dalam kondisi operasi, melainkan kondisi saat sarat kosong dan balas penuh juga akan ditinjau.

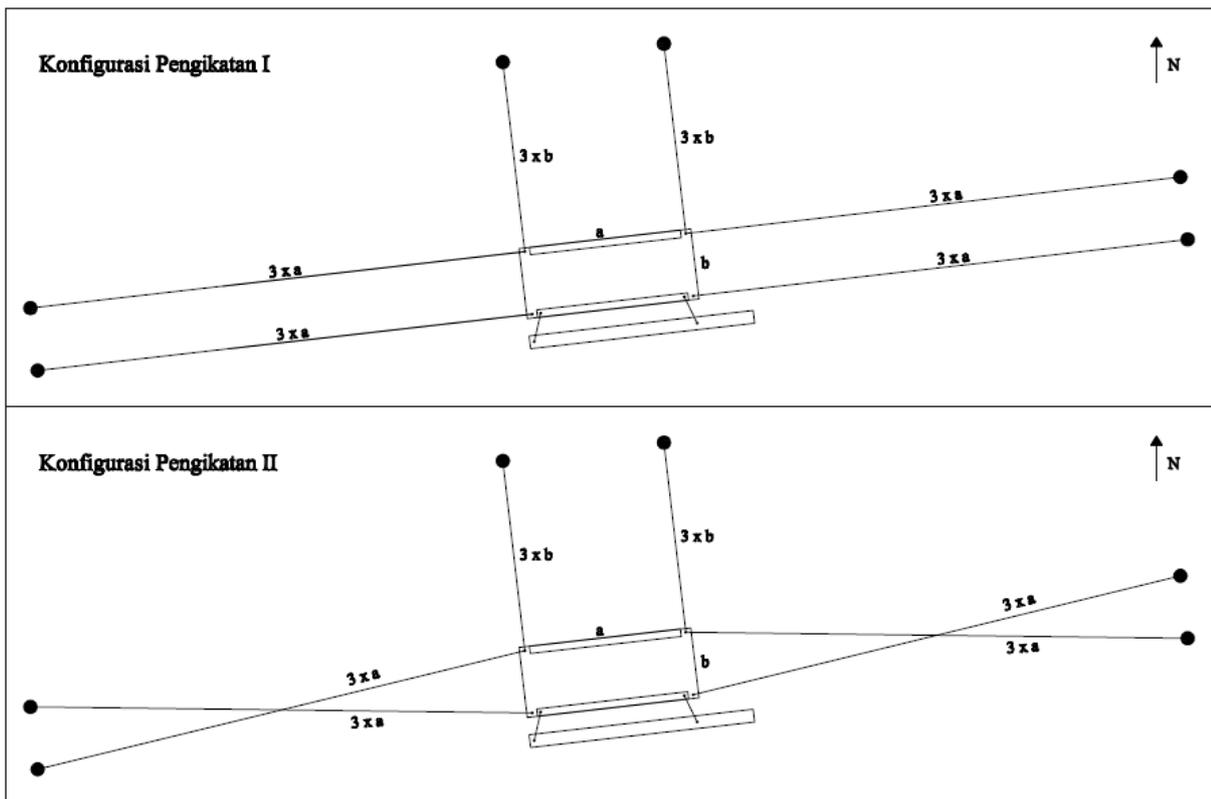
Tabel 3.2: Massa dan Sarat Dok Apung

Massa Dok Apung	5672	ton
Kapasitas muat maksimal	4764	ton
Sarat kosong	1,25	meter
Sarat muat kapal	2,3	meter
Sarat balas penuh	9	meter

Tabel 3.2 menunjukkan data berupa massa, kapasitas muat dan sarat dok apung dari tiap-tiap kondisi pembebanan. Kondisi tersebut nantinya akan digunakan dalam dasar pembuatan dok apung.

### 3.1.4. Spesifikasi Sistem Penambatan

Sistem penambatan yang akan dilakukan menggunakan sistem sebar, dimana nantinya sistem sebar akan divariasikan menjadi 2 konfigurasi, seperti yang terlihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3: Perencanaan Sistem Tambat.

Pada gambar 3.3, dapat diketahui sistem konfigurasi pengikatan I menggunakan sistem sebar sederhana dengan menjalarkan rantai secara lurus, lain halnya dengan sistem konfigurasi pengikatan II yang menjalarkan rantai dengan teknik menyilang. Jarak antara dok apung dengan

dermaga juga diatur sesuai dengan tabel 3.3, dimana jarak minimum antara keduanya yakni 5 m. Perbandingan efektifitas antara konfigurasi I dan II nantinya akan menjadi bahasan pada makalah ini.

Tabel 3.3: Jarak Minimum Antar Unit. (Sumber: DNV-OS-H203, 2012)

<i>Units/structures involved</i>	<i>Text references<sup>1)</sup></i>	<i>Clearance during positioning</i>		<i>Clearance in normal operation</i>	
		<i>Vertical</i>	<i>Horizontal</i>	<i>Vertical</i>	<i>Horizontal</i>
Floating and fixed units, or two floating units		See 402	50 m	See 402	ALS: 10 m
Floating and fixed units, or two floating units, weather restricted operations	C300		50 m		<div style="border: 2px solid blue; padding: 2px;">           ULS: 5 m            ALS: 3 m         </div>

Sesuai tabel 3.3 bahwa pada kondisi tertambat penuh (ULS), jarak memanjang antara benda terapung dengan bangunan permanen maupun antar benda terapung sebesar 5 m pada kondisi perairan daerah terbatas. Kondisi tersebut sesuai dengan kasus pengoperasian yang akan dianalisis, berdasarkan DNV-OS-H101 *Marine Operation*. Berdasarkan pertimbangan aturan pada tabel 3.3 dan kapasitas dari jembatan akses, ditentukan jarak antara dok apung dengan dermaga sejauh 9,5 m.

Simulasi sistem penambatan akan dilakukan dengan komponen rantai secara utuh dan tali tambat (*wire rope*) secara utuh. Untuk sistem pengikatan di atas permukaan air laut menggunakan *wire rope* karena selain lebih ringan dari rantai juga memiliki gaya pengembali yang lebih baik dari rantai. Namun untuk pengikatan di dasar laut, digunakan rantai sebagai komponen utama karena *wire rope* diyakini tidak mampu menahan abrasi air laut, lain halnya dengan rantai yang tahan terhadap abrasi dan cocok untuk mengoptimalkan kapasitas jangkar (API RP2SK<sup>2nd</sup> edition, 1996).

Untuk mengetahui kapasitas dari sistem penambatan sesuai untuk dok apung, perlu diketahui nilai perlengkapan ( $Z$ ).  $Z$  dapat digunakan untuk mendeterminasikan karakteristik dari jumlah, berat, dimensi dan lain-lain dari jangkar, rantai, tali penambatan dan tali berlabuh. Namun dalam analisis kedepan, nilai yang perlu untuk diketahui adalah kapasitas dari rantai dan tali penambatan.

$$Z = \Delta^{\frac{2}{3}} + 2hB + 0,1A \quad (3.1)$$

Dimana  $\Delta$  adalah berat displasemen dok apung,  $h$  adalah ketinggian dari lambung timbul,  $B$  adalah lebar dok apung dan  $A$  adalah luas area disamping dok apung di atas sarat. Persamaan (3.1) merupakan perhitungan  $Z$  yang diberikan oleh klasifikasi *Lloyd's Register*. Berdasarkan persamaan tersebut diperoleh nilai  $Z$  sebesar 1029,57. Kemudian nilai  $Z$  tersebut disesuaikan berdasarkan tabel mengenai perencanaan sistem penambatan dan labuhan, seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.4: Kapasitas Sistem Pengikatan. (Sumber: Rulefinder 9.17, 2012)

EQUIPMENT NUMBER		MOORING LINES	TOW LINE <small>see footnote</small>
Exceeding	Not exceeding	Minimum breaking strength (kN)	Breaking strength (kN)
1	2	3	4
50	70	34	98
70	90	37	98
90	110	39	98
110	130	44	98
130	150	49	98
150	175	54	98
175	205	59	112
205	240	64	129
140	280	69	150
180	320	74	174
320	360	78	207
360	400	88	224
400	450	98	250
450	500	108	277
500	550	123	306
550	600	132	338
600	660	147	370
660	720	157	406
720	780	172	441
780	840	186	449
840	910	201	518
910	980	216	559
980	7060	230	603
1060	1140	250	647
1140	1220	270	691

Berdasarkan tabel 3.3 nilai  $Z$  dok apung berada pada kisaran 980 sampai 1060, dengan nilai ketahanan maksimal sebesar 230 kN, oleh karena itu diperlukan kapasitas sistem penambatan dengan ketahanan lebih dari 230 kN.

- Rantai Pengikatan

Dalam perhitungan sebelumnya didapatkan nilai minimum untuk sistem penambatan yang akan dilakukan sebesar 230 kN. oleh karena itu, dibutuhkan suatu komponen dengan nilai yang lebih besar. Nilai tersebut dapat dicari melalui katalog rantai sesuai yang berlaku, seperti yang ditampilkan pada tabel 3.4.

Tabel 3.5: Spesifikasi Rantai *Stud Link*. (Sumber: Viking Moorings)

Weight kg / shot incl Kenter	mm	inches	U2		U3		ORQ	
			PL kN	BL kN	PL kN	BL kN	PL kN	BL kN
222	19	3/4	150	211	211	301		
306	22	7/8	200	280	280	401		
418	26	1	278	389	389	556		
497	28	1 1/8	321	449	449	642		
652	32	1 1/4	417	583	583	833		
734	34	1 5/16	468	655	655	937		
826	36	1 7/16	523	732	732	1050		
919	38	1 1/2	581	812	812	1160		
1105	42	1 5/8	703	981	981	1400		
1209	44	1 3/4	769	1080	1080	1540		
1437	48	1 7/8	908	1280	1280	1810		
1555	50	2	981	1370	1370	1960	1400	2110
1809	54	2 1/8	1140	1590	1590	2270	1620	2441
1946	56	2 3/16	1220	1710	1710	2430	1746	2639
2100	58	2 5/16	1290	1810	1810	2600	1854	2797
2253	60	2 3/8	1380	1940	1940	2770	1976	2978
2573	64	2 1/2	1560	2190	2190	3130	2230	3360
2742	66	2 5/8	1660	2310	2310	3300	2361	3559

Berdasarkan tabel 3.5, dengan mempertimbangkan kondisi pembebanan yang belum diketahui karakteristiknya, dipilih dimensi rantai dengan ketahanan 2110 kN.

- Tali pengikatan (*wire rope*)

Seperti halnya rantai, pemilihan *wire rope* dilakukan melalui metode yang sama. Dengan nilai minimum ketahanan sebesar 230 kN, dipilih tali dengan diameter 40 mm sesuai tabel 3.6. Tali tersebut memiliki kapasitas ketahanan beban sebesar 1411 kN atau 143,9 ton dengan modulus elastisitas sebesar 85 MN. Tali yang dipilih berjenis enam helai, yang diyakini memiliki nilai ketahanan terhadap beban lebih baik dari tali jenis lainnya.

Untuk mengetahui dimensi lebih lengkap dari jenis tali pengikatan ini, dapat dilihat melalui katalog sepeti yang diberikan pada tabel 3.6.

Tabel 3.6: Spesifikasi *Six Stand Rope*. (Sumber: Robertson, 2014)

Diameter (mm)	Approx. nominal length mass (kg/m)	Minimum breaking force (F <sub>min</sub> ) EIPS/1960 grade		Axial stiffness @20% load (MN)	Torque generated @20% load		Metallic cross section (mm <sup>2</sup> )
		(kN)	(t)		Ordinary (Nm)	Lang's (Nm)	
<b>Dyform 8x19S</b>							
10	0.47	88.2	8.99	5.3	12	16	53
11	0.57	107	10.9	6.5	16	21	65
12	0.68	127	12.9	7.7	21	27	77
13	0.80	149	15.2	9.0	27	35	90
14	0.92	173	17.6	10	34	44	105
15	1.06	198	20.2	12	42	54	120
16	1.20	226	23.0	14	51	65	137
17	1.36	255	26.0	15	61	78	154
<b>Dyform 8x26WS</b>							
18	1.52	286	29.1	17	72	93	173
19	1.70	318	32.5	19	85	109	193
20	1.88	353	36.0	21	99	127	214
22	2.28	427	43.5	26	131	169	258
24	2.71	508	51.8	31	171	219	308
26	3.18	596	60.8	36	217	279	361
28	3.69	691	70.5	42	271	349	419
30	4.23	794	80.9	48	333	429	481
32	4.82	903	92.1	55	405	520	547
34	5.44	1020	103.9	62	485	624	617
<b>Dyform 8x36WS</b>							
36	6.10	1143	116.5	69	576	741	692
38	6.79	1274	129.8	77	678	871	771
40	7.53	1411	143.9	85	790	1016	854
42	8.30	1556	158.6	94	915	1176	942
44	9.11	1708	174.1	103	1052	1352	1034
46	9.95	1866	190.2	113	1202	1545	1130

### 3.1.5. Dasar desain numerik

Pemodelan komputer yang akan dilakukan untuk analisis menggunakan perangkat lunak Ansys Aqwa, yang mana menunjang untuk dilakukannya analisis dinamis. Proses analisis dinamis ini sesuai dengan kasus penambatan dok apung yang ditambatkan pada suatu tempat dalam jangka waktu yang lama. Perangkat lunak ini menggunakan teori 3D difraksi yang digunakan untuk melakukan proses analisis struktur terapung bebas maupun tertambat. Metode ini digunakan dengan membagi struktur global menjadi struktur lokal dengan jumlah elemen yang lebih kecil sehingga gaya-gaya hidrodinamis bekerja pada tiap-tiap elemen lokal yang kemudian disatukan menjadi struktur global.

Kemampuan menarik dari perangkat lunak ini adalah analisis dapat digunakan untuk beberapa model dalam satu kondisi (multi bodi), memberikan perhitungan secara lengkap efek interaksi hidrodinamis yang terjadi antar model/benda (Aqwa Users Manual, 2013).

### 3.2. Deskripsi Model

Model yang akan dibuat adalah Dok Apung melalui perangkat lunak Maxsurf kemudian pemberian dermaga langsung melalui Ansys Aqwa. Pemodelan dok apung mengacu pada rencana umum dan data dalam kondisi sebenarnya. Perangkat-perangkat tambahan seperti halnya derek, tangga, jembatan penghubung dan lain-lain dengan sengaja diabaikan. Struktur dari sistem penambatan menggunakan pengikatan katener, yang mana dapat dilakukan perhitungan untuk tegangan tali dan efek-efek dinamis yang terjadi.

#### Satuan

Satuan dasar yang digunakan dalam analisis model adalah satuan internasional, seperti yang didefinisikan pada tabel 3.7.

Tabel 3.7: Satuan

Parameter:	Satuan (SI):
Panjang	m
Waktu	s
Massa	kg
Gaya	N
Tekanan	Pa (N/m <sup>2</sup> )

#### Sistem koordinat

Pemodelan komputer dibuat sedemikian sehingga panjang dok apung seiring sumbu-x. Lebar dok apung mengikuti sumbu-y dan sumbu-z mengarahkan ketinggian dok apung. Tiap-tiap sudut yang tampak pada pemodelan, seperti halnya sudut pembebanan diukur dari sumbu-x.

##### 3.2.1. Proses Desain

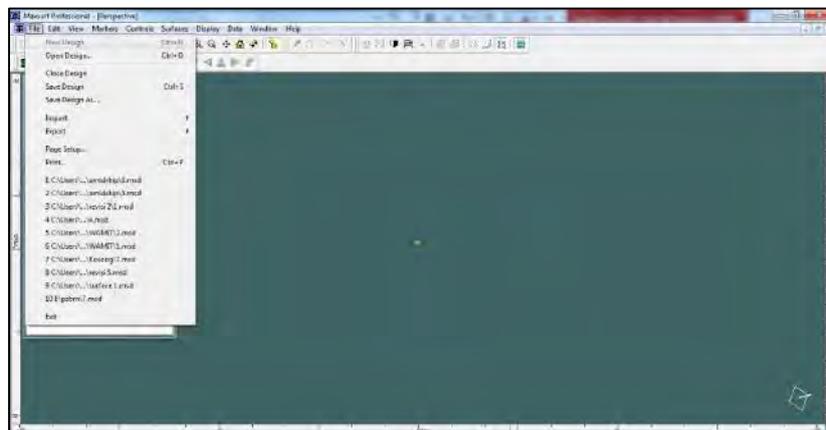
Dalam bagian bab ini akan dibahas mengenai proses pemodelan terhadap benda yang akan dianalisis. Benda yang akan dianalisis adalah dok apung dengan dermaga di salah satu sisinya, dengan harapan mengetahui efek dari interaksi kedua benda tersebut. Proses pemodelan dok apung dan dermaga dengan menggunakan dua perangkat lunak yang berbeda sesuai dengan kapasitas dan hasil yang diinginkan.

### 3.2.1.1 Proses Pemodelan Dok Apung

Berdasarkan data baik berupa angka maupun gambar rencana umum dilakukan pemodelan dok apung melalui perangkat lunak Maxsurf. Metode yang digunakan dalam pembuatan model dengan membuat penampang-penampang secara memanjang, melintang dan vertikal. Hal ini dapat dilakukan mengingat bentuk dok apung yang sederhana.

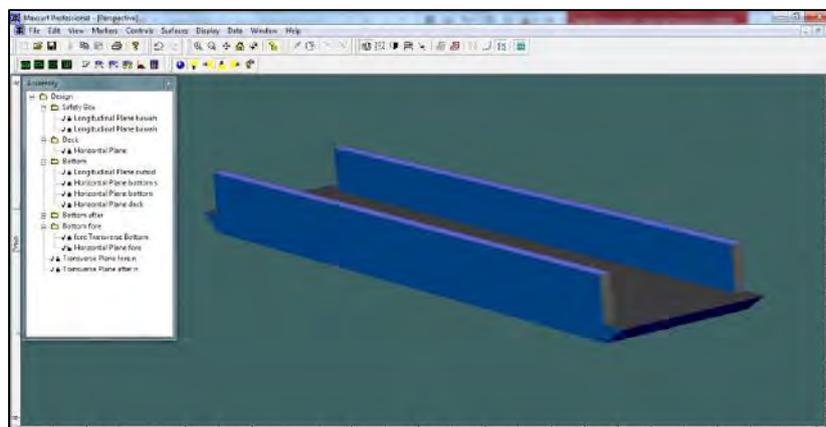
Untuk lebih detailnya, langkah proses pemodelan melalui Maxsurf adalah sebagai berikut:

1. Membuka program *Maxsurf Professional* kemudian pada menu *file* memilih *new design*. Tampilan awal perangkat lunak seperti yang tampak pada gambar 3.4.



Gambar 3.4: Tampilan awal *maxsurf professional*.

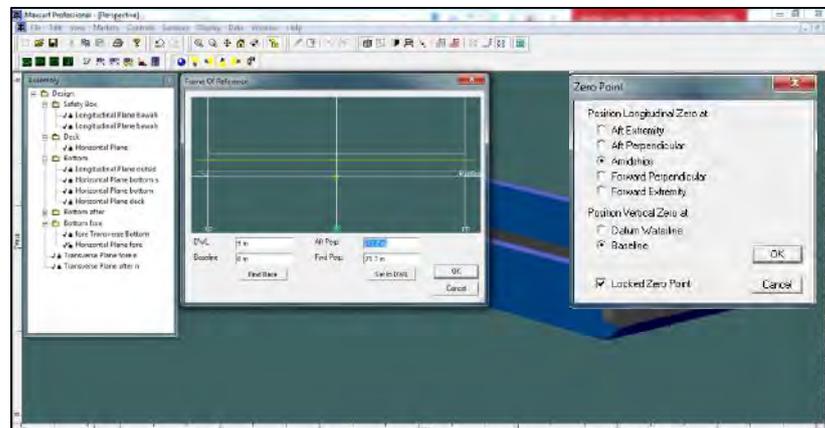
2. Membuat penampang berdasarkan masing-masing sumbu, dengan cara pada menu *surfaces* dipilih *add surface* kemudian memasukkan penampang melintang, memanjang dan vertikal. Penampang disesuaikan baik dalam bentuk maupun dimensi menyerupai bentuk dok apung.



Gambar 3.5: Model dok apung pada *maxsurf professional*

Gambar 3.5 merupakan bentuk dok apung setelah proses penyesuaian beberapa penampang.

3. Setelah bentuk dan ukuran disesuaikan kemudian menentukan nilai sarat dan titik nol dari dok apung, hal tersebut digunakan sebagai validasi model dan memudahkan dalam proses pengerjaan pada perangkat lunak selanjutnya. Langkah dalam menentukan titik nol dan sarat pada dok apung adalah melalui menu *data* dipilih *frame of reference* dan *zero point* seperti yang digambarkan pada gambar 3.6. Kemudian nilai titik nol dan sarat disesuaikan dengan data. Berdasarkan pengalaman nilai titik nol lebih baik ditempatkan pada tengah model agar supaya tidak terjadi permasalahan dalam analisis melalui perangkat lunak selanjutnya.



Gambar 3.6: Pemasukan nilai sarat dan titik nol.

Setelah langkah-langkah tersebut telah selesai dikerjakan, selanjutnya adalah memeriksa, apakah titik-titik dari tiap-tiap penampang telah menjadi satu kesatuan. Biasanya untuk menggabungkan antar titik menggunakan perintah *bond edges*, namun dalam kasus ini hal tersebut tidak diperlukan mengingat bentuk dok apung yang tidak berbentuk kurva atau lengkungan.

Setelah model selesai dibuat, selanjutnya melakukan validasi kesamaan dengan data yang sebelumnya diketahui. Untuk data tambahan yang perlu divalidasi dapat dilihat pada *calculate hydrostatics* melalui menu *data*. Toleransi ketidaksamaan ditinjau berdasarkan regulasi ABS, dimana memberi persyaratan data dapat dinilai valid apabila selisih ketidaksamaan untuk berat displasemen  $< 2\%$  dan parameter lainnya  $< 1\%$ . Berikut hasil validasi pada model dok apung.

Tabel 3.8: Validasi Model

Parameter	Satuan	Data	Hasil Pemodelan	Selisih (%)	Kriteria	
					ABS	Ket.
Displasemen	kg	5672000	5746959	-1,304	< 2%	memenuhi
Sarat	m	1,25	1,25	0	< 1%	memenuhi
Panjang	m	155,4	155,4	0	< 1%	memenuhi
Lebar	m	31	31	0	< 1%	memenuhi
Tinggi	m	12.7	12,7	0	< 1%	memenuhi

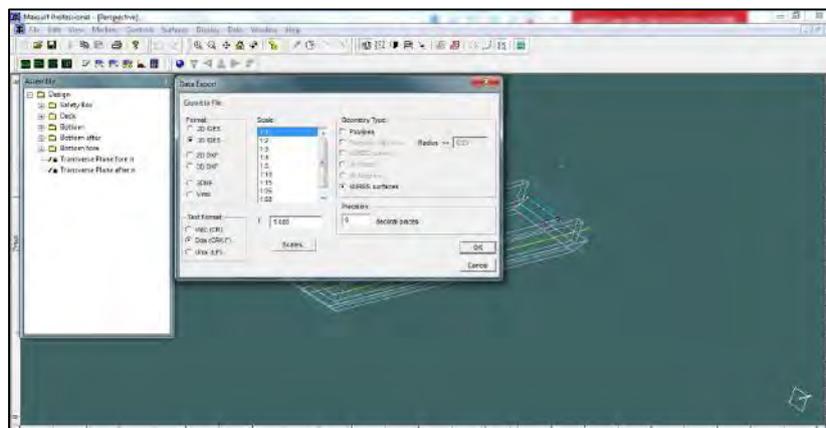
Berdasarkan tabel 3.8, dapat disimpulkan bahwa pembuatan model dok apung melalui *maxsurf professional* sesuai dengan kriteria ABS.

### 3.2.1.2 Pemodelan Sistem Penambatan Dok Apung beserta Dermaga pada *Ansys Aqwa*

*Ansys Aqwa* merupakan perangkat lunak dengan spesialisasi analisis gerakan dan sistem penambatan pada struktur apung. Selain itu perangkat lunak tersebut dipercaya mampu melakukan analisis struktur lebih dari satu benda (*multibodies*). Terdapat beberapa tahapan yang perlu dilakukan sebelum mencapai tahap analisis tersebut, diantaranya:

#### 1. Konversi geometri *maxsurf* ke dalam *ansys aqwa*;

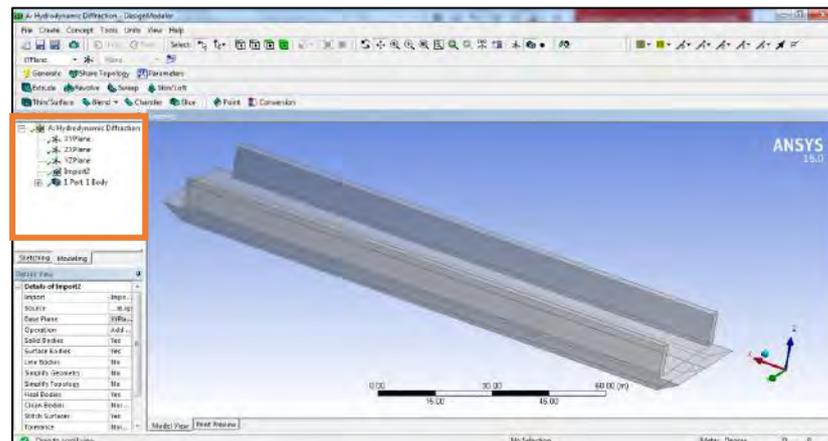
Setelah model dok apung selesai dibuat melalui *maxsurf professional*, selanjutnya adalah melakukan konversi format dan geometri program dari (.msd) menjadi 3D (.igs) dan *polylines* menjadi *nurb surfaces* dengan cara mengekspor berkas. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7: Ekspor format dan geometri

Format (.igs) adalah salah satu format pemodelan yang mampu dibaca oleh *ansys aqwa*, oleh karena itu, hasil ekspor tersebut akan digunakan sebagai input model. Sebelum masuk ke *ansys aqwa* hal yang perlu dipastikan adalah tiadanya celah pada permukaan model dan antar titik harus saling bertemu. Jika hal tersebut terjadi maka perangkat lunak *ansys aqwa* tidak dapat melakukan analisis.

Setelah geometri telah sesuai dengan format *ansys aqwa*, selanjutnya adalah mengimpor berkas ke dalam perangkat lunak. proses melakukan impor model dok apung ke dalam program, dengan cara pada menu *file* di tampilan awal program pilih *import external geometri file* kemudian pilih berkas yang telah dikonversi (.igs). Berdasarkan pengalaman proses impor berkas tersebut perlu dilakukan dua kali, karena pada proses pertama seringkali terjadi kegagalan yang belum diketahui akar permasalahannya.



Gambar 3.8: Hasil impor model dok apung format (.igs)

Pada gambar 3.8 ditampilkan hasil impor dok apung pada berkas yang sebelumnya telah dikonversi. Untuk mengetahui hasil impor tersebut sukses dilakukan, dapat dilihat pada kotak berwarna hijau pada gambar tersebut hasil impor diberi tanda centang hijau.

## 2. Pengaturan geometri dok apung pada *ansys aqwa*;

Terdapat beberapa langkah dalam pengaturan geometri pada *ansys aqwa*, langkah tersebut adalah sebagai berikut:

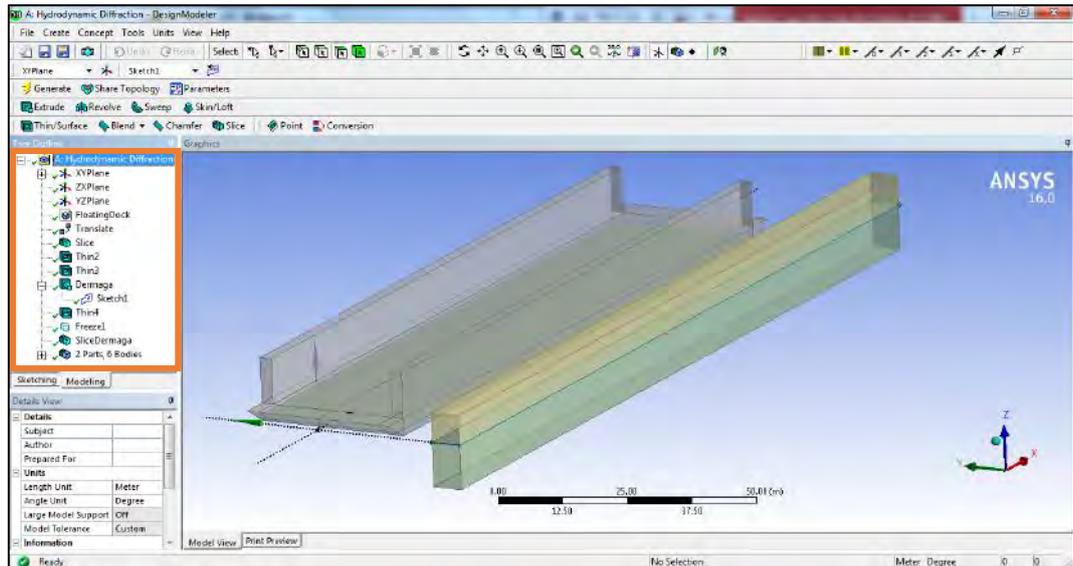
- Pertama adalah memilih *body operation*, kemudian memilih *translation*. Langkah ini dilakukan untuk membuat posisi sarat dok apung berada pada sumbu xy;
- Memilih perintah *freeze*, berfungsi merubah badan dok apung menjadi transparan. Biasanya perintah tersebut secara otomatis sudah terpilih.

- Memilih perintah *create* → *slice* kemudian *translate*, untuk mendefinisikan dok apung menjadi bagian atas dan bawah sesuai sumbu koordinat. Fungsi ini berguna untuk mendefinisikan sarat dok apung.
- Karena bentuk dok apung semuanya tertutup atau kedap, *ansys aqwa* mendefinisikan bentuk tersebut menjadi bentuk solid. Bentuk tersebut tidak diperkenankan oleh program untuk bisa dianalisis. Cara menyiasati hal tersebut dengan menggunakan perintah *thin/surface* kemudian mengklik pada model dok apung, lalu pada form *thickness* diinput nilai nol. Hal tersebut merupakan teknik rekayasa ketebalan dok apung menjadi sangat tipis sehingga area atau permukaan model dapat didefinisikan oleh program tanpa mempengaruhi hasil yang didapatkan.
- Menggabungkan bagian atas dan bawah dok apung melalui perintah *new part*. Perintah tersebut akan membuat dok apung menjadi satu benda / satu bodi.

### 3. Pembuatan model dermaga pada *ansys aqwa*

Bentuk dermaga yang akan dimodelkan cukup sederhana berbentuk balok dengan struktur masif berdimensi panjang, lebar dan tinggi berturut-turut 180 m, 6 m dan 16 m. Bentuk tersebut disesuaikan pada kondisi lapangan meskipun tidak dengan dimensi yang sama. terdapat beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mendesain dermaga mengingat bentuknya yang sederhana, namun pada makalah ini hanya akan ditunjukkan satu metode untuk membuatnya. langkah-langkah dalam pemodelan dermaga adalah sebagai berikut:

- Melalui rancangan desain dok apung yang telah diimpor ke dalam *ansys aqwa*, dibuat sketsa dermaga di sebelah dok apung. Memilih perintah *extrude* pada menu *create* kemudian menyesuaikan penempatan dan dimensi sesuai ukuran yang telah direncanakan. Pada perintah *extrude* didefinisikan ketinggian berdasarkan permukaan perairan. Jadi, diperlukan input ketinggian struktur di atas dan di bawah garis air.
- Karena bentuk struktur bersifat kedap sama seperti dok apung, dermaga didefinisikan oleh *ansys aqwa* sebagai benda pejal. Dengan cara yang sama untuk menyiasatinya dilakukan perintah *thin/surface* lalu mengklik model dermaga, kemudian pada form *thickness* diinput nilai nol.
- Menggabungkan bagian atas dan bawah dermaga melalui perintah *new part*.



Gambar 3.9: Pemodelan geometri dok apung dan dermaga.

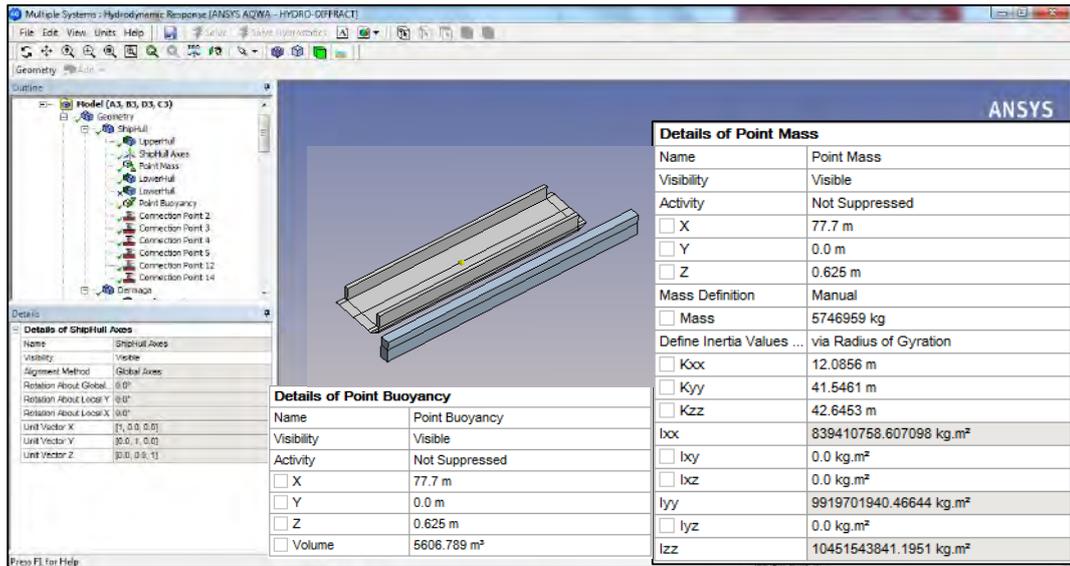
Pada gambar 3.9 merupakan bentuk pemodelan dok apung dan dermaga dalam satu kasus pada *ansys aqwa*. Pada kotak berwarna jingga merupakan urutan proses pembuatan model geometri.

#### 4. Proses *meshing* model dok apung dan dermaga pada *ansys aqwa*

Setelah kedua model selesai dibuat dan geometri telah diatur pada *ansys aqwa design modeler*. Langkah selanjutnya adalah pendefinisian *meshing* dan parameter model dok apung maupun dermaga untuk proses analisis numeris. Proses *meshing* bertujuan untuk mendefinisikan benda menjadi elemen-elemen kecil sehingga nilai hidrodinamis benda dapat langsung didapatkan.

*Meshing* merupakan proses yang sangat penting karena hasil yang didapatkan dipengaruhi olehnya. Semakin kecil area yang ditinjau atau semakin banyak panel yang ditentukan maka nilai yang didapatkan semakin teliti dan akurat (mendekati nilai sebenarnya). Langkah-langkah untuk proses *meshing* adalah sebagai berikut:

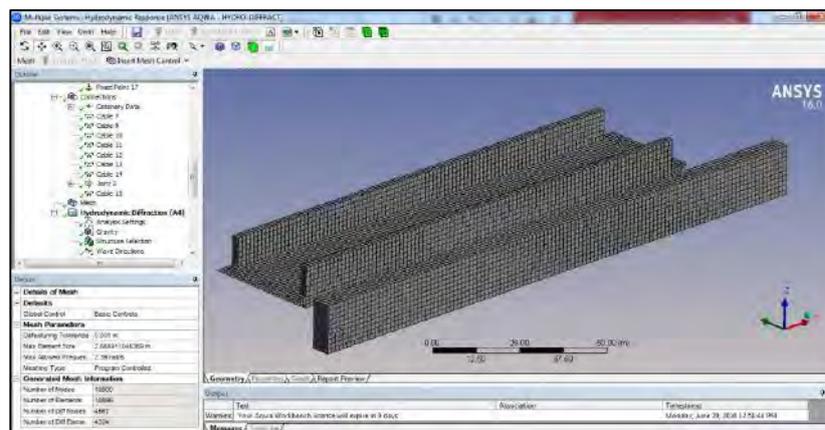
- Mendefinisikan parameter sesuai dengan data, antara lain: massa, volum displasemen, titik berat, titik apung, massa jenis, radius girasi. Pendefinisian massa dan titik-titik tersebut dapat ditentukan langsung oleh program, namun untuk hasil yang lebih akurat nilai tersebut dapat didefinisikan secara manual sesuai data.



Gambar 3.10: Tampilan model pada *ansys aqwa hydrodynamic diffraction*

Pada gambar 3.10 ditampilkan parameter massa, radius girasi, titik berat, dan lain-lain sebagai input sebelum proses *meshing*.

- Selanjutnya pada menu *mesh* memasukkan nilai ukuran elemen yang diinginkan. Dari besaran ukuran elemen yang dimasukkan secara otomatis program dapat menentukan jumlah dari elemen yang berhasil dibuat. Memang pada dasarnya semakin kecil ukuran elemen atau semakin banyak jumlah elemen yang dibuat akan mendapatkan hasil yang semakin akurat, namun faktor lain juga menjadi perhatian antara lain: waktu dalam proses analisis dan kapasitas komputer yang digunakan. Oleh karena itu dibutuhkan besaran ukuran *mesh* yang dinilai efektif.



Gambar 3.11: *Meshing* pada *ansys aqwa hydrodynamic diffraction*

Bentuk dari *mesh* harus memiliki kontur yang rapi, agar tidak terdapat celah ataupun ketidakteraturan elemen yang nantinya mempengaruhi hasil *mesh*. Pada gambar 3.11 menunjukkan hasil *meshing* yang rapi.

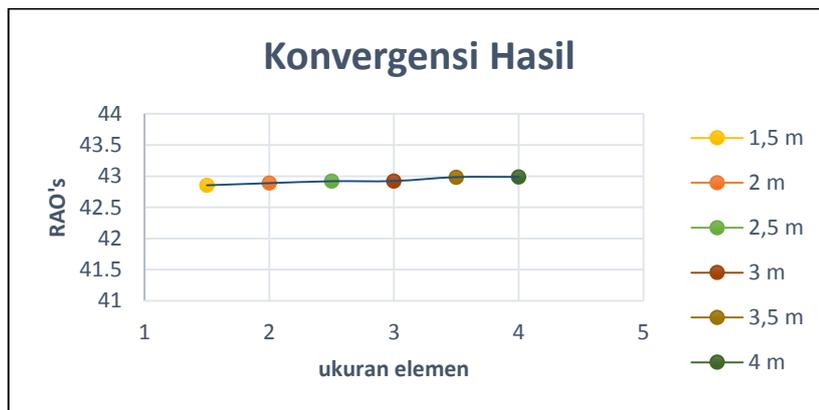
## 5. Konvergensi *meshing*

*Meshing* akan menentukan tingkat ketelitian hasil yang didapatkan, oleh karena itu perlu dilakukan penentuan ukuran atau jumlah elemen yang akan digunakan sebagai acuan untuk simulasi model. Semakin tinggi tingkat spesifikasi dari komputer yang digunakan maka semakin cepat pula proses analisis yang dilakukan program. Dalam *ansys aqwa* versi 16 terdapat batasan dalam pembagian jumlah elemen yang bisa untuk dianalisis, yakni sebanyak 40.000 elemen.

Dalam proses konvergensi *meshing* ini mengacu pada *A First Course In The Finite Element Method 4<sup>th</sup> edition*, mengenai *Practical Consideration in Modeling*, karangan *Dary L. Logan*. Proses konvergensi minimal dilakukan dengan variasi 5 ukuran elemen (Logan, 2007). Pada kasus ini proses konvergensi akan dilakukan dengan 6 ukuran elemen dengan selisih masing-masing elemen sebesar 0,5 m. Hasil yang akan dibandingkan adalah nilai RAO gerakan translasi searah sumbu-x (*surge*) dalam sudut pembebanan gelombang  $-135^{\circ}$ . Untuk lebih jelasnya seperti yang ditampilkan dalam tabel 3.9 dan gambar 3.12.

Tabel 3.9: Data simulasi konvergensi *meshing*

No.	Ukuran elemen	Jumlah elemen	Jumlah node	Lama proses analisis
1	4 m	4698	4700	15 menit
2	3,5 m	6706	6710	25 menit
3	3 m	8812	8816	45 menit
4	2,5 m	10896	10900	70 menit
5	2 m	17378	17382	140 menit
6	1,5 m	31294	31298	330 menit



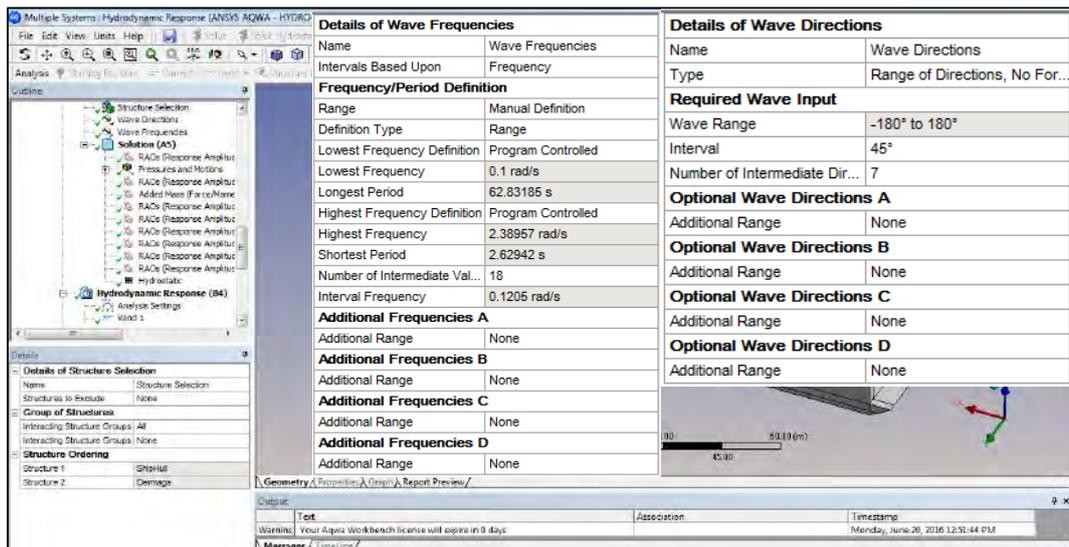
Gambar 3.12: Grafik konvergensi hasil

Berdasarkan grafik pada gambar 3.12 terlihat bahwa grafik telah konvergen saat ukuran elemen sebesar 3 m dengan tingkat *error* 0.08 % dari ukuran elemen setelahnya. Namun berdasarkan pertimbangan spesifikasi komputer dan kerapian elemen dalam menyusun model dipilih ukuran elemen sebesar 2,5 m yang lebih memiliki tingkat ketelitian hasil lebih tinggi dibanding ukuran elemen 3 m. Spesifikasi ukuran elemen 2,5 m dapat dilihat dalam tabel 3.9.

## 6. Proses analisis model dok apung pada *ansys aqwa hydrodynamic diffraction*

Proses analisis pada *ansys aqwa hydrodynamic diffraction* menghasilkan beberapa nilai diantaranya: tambahan massa, gaya redaman, tegangan geser, RAO's, animasi gerakan dan tekanan dari benda, dan lain-lain. Analisis ini termasuk dalam analisis berbasis frekuensi. Untuk kasus ini nilai yang dicari dalam analisis hanya berupa RAO's yang digunakan untuk meninjau karakteristik gerakan dan animasi gerakan terhadap arah gelombang tertentu.

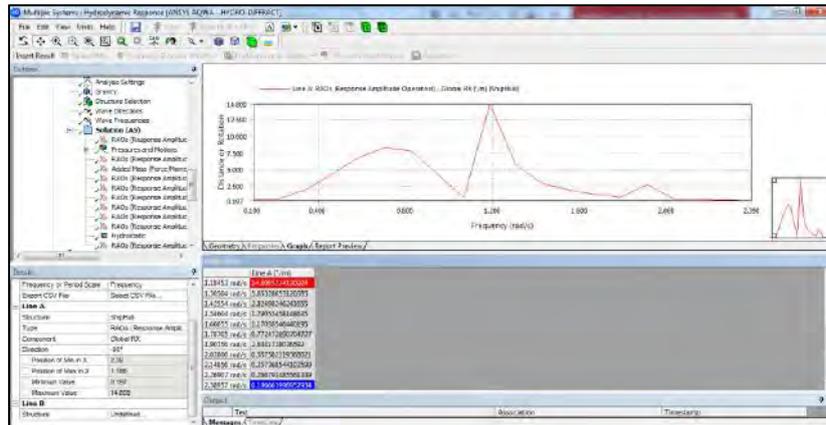
Sebelum proses analisis dilakukan, terdapat beberapa parameter yang harus ditentukan seperti frekuensi dan arah datang gelombang. Dalam kasus multi benda dapat ditentukan benda yang mana yang akan dianalisis. Untuk kasus ini benda yang akan dilakukan analisis adalah dok apung dengan interaksi dermaga di sebelahnya.



Gambar 3.13: Input parameter sebelum analisis *hydrodynamic diffraction*

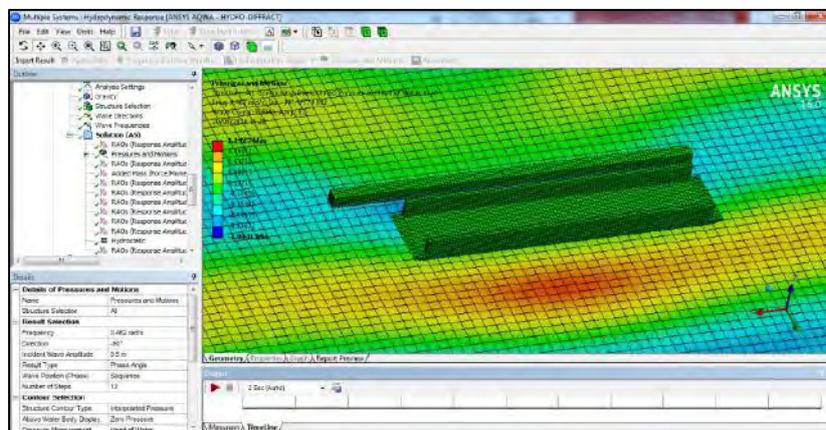
Seperti yang ditampilkan pada gambar 3.13, analisis RAO's dapat ditinjau dari beberapa arah kondisi pembebanan sekaligus dan dapat menentukan nilai frekuensi yang dibutuhkan.

Gambar 3.14 berikut merupakan salah satu contoh hasil analisis RAO's dok apung pada arah datang gelombang  $-90^0$  yang didapatkan dalam *ansys aqwa hydrodynamic diffraction*. Dalam hasil analisis dapat diketahui nilai maksimal dan minimal dari RAO's yang didapatkan.



Gambar 3.14: Hasil RAO's Dok Apung pada gerakan roll

Seperti yang ditampilkan pada gambar 3.14, hasil maksimal RAO ditandai dengan latar belakang angka warna merah sedangkan untuk hasil minimal ditandai dengan latar belakang angka warna biru. Grafik tersebut menandakan karakteristik gerakan dok apung ditinjau dari beberapa frekuensi. Seperti pengertian pada landasan teori, absis grafik adalah frekuensi dan rasio antara amplitudo dengan gerakan sebagai ordinat.

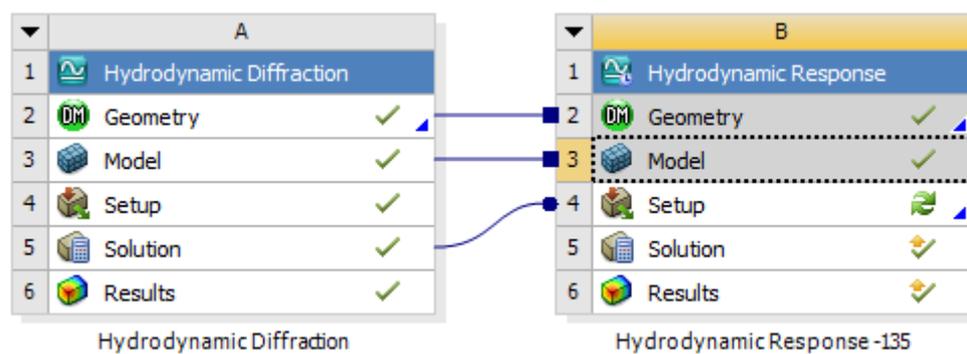


Gambar 3.15: Animasi dok apung akibat gelombang arah  $-90^{\circ}$

Untuk memberikan simulasi pergerakan dok apung terhadap parameter yang telah ditentukan, dapat dilihat animasi gerakan pada gambar 3.15. Warna yang tampak pada struktur menggambarkan nilai tekanan yang terjadi dan warna pada permukaan gelombang menggambarkan amplitudo gelombang.

## 7. Perancangan sistem tambat dok apung

Setelah analisis *hydrodynamic diffraction* selesai dilakukan, selanjutnya adalah merencanakan desain penambatan untuk mengetahui gerakan dok apung saat struktur tertambat dan tegangan pada tiap-tiap tali. Pada struktur tertambat dengan penempatan dalam jangka waktu yang lama (permanen) membutuhkan metode analisis dinamis berdasarkan peraturan DNV GL terkait *Guidelines for Moorings* (DNV-ND/030, 2015). Oleh karena itu pengaturan pada *ansys aqwa hydrodynamic diffraction* perlu ditransfer ke *hydrodynamic time response*.

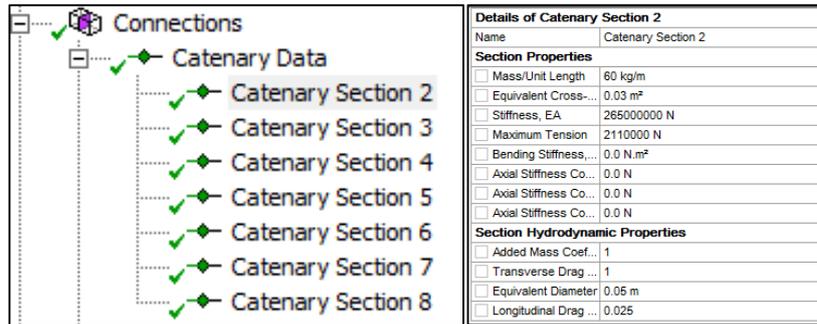


Gambar 3.16: Proses transfer *hydrodynamic diffraction* ke *hydrodynamic time response*

Terdapat beberapa parameter tambahan yang dapat dimanfaatkan pada fitur *hydrodynamic time response*, diantaranya pemilihan gelombang yang akan digunakan beserta faktor eksternal yang bekerja pada benda.

Setelah transfer dilakukan, langkah selanjutnya adalah melakukan desain konfigurasi sistem penambatan. Parameter penambatan disesuaikan dengan data yang telah terkumpul dan standar yang membatasi. Untuk langkah detail dalam pembuatan desain sistem tambat adalah sebagai berikut:

- Pertama, **memilih sistem penambatan yang dilakukan**. Untuk kasus ini dipilih sistem penambatan katener, yakni dengan cara pada menu *connection* → *catenary* → *catenary section*. Pada *catenary section* diberi input beberapa nilai sifat-sifat material sesuai katalog baik rantai maupun *wire rope*. Nilai tersebut diantaranya: kekakuan, ketahanan maksimal tali penambatan, diameter, luasan ekuivalen, dan berat material per satuan panjang.



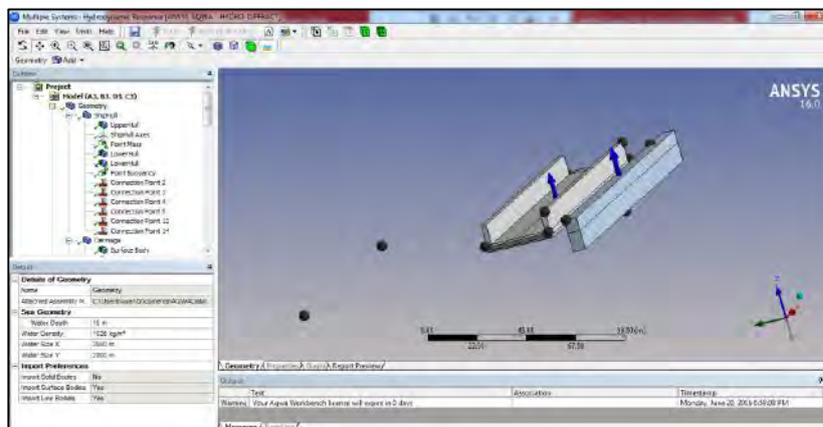
Gambar 3.17: Parameter input sistem penambatan

Gambar 3.17 merupakan nilai-nilai yang diperlukan dalam mendefinisikan kapasitas tali tambat. Sebagian besar nilai input diketahui pada katalog, seperti pada kasus ini nilai dari kekakuan rantai tidak dihadirkan dalam katalog. Kekakuan yang menjadi nilai input adalah perkalian antara modulus elastisitas dengan area melintang rantai. Pada perangkat lunak *ansys aqwa* diberikan persamaan berdasarkan pengalaman program, sebagai berikut:

$$EA = 5 \cdot 10^6 \times \text{massa/panjang rantai} \quad (3.2)$$

Melalui persamaan (3.2) didapatkan harga kekakuan sebesar 265000 kN. kemudian untuk tiap-tiap tali tambat diperlukan beberapa *catenary section*, seperti yang ditampilkan pada gambar 3.17.

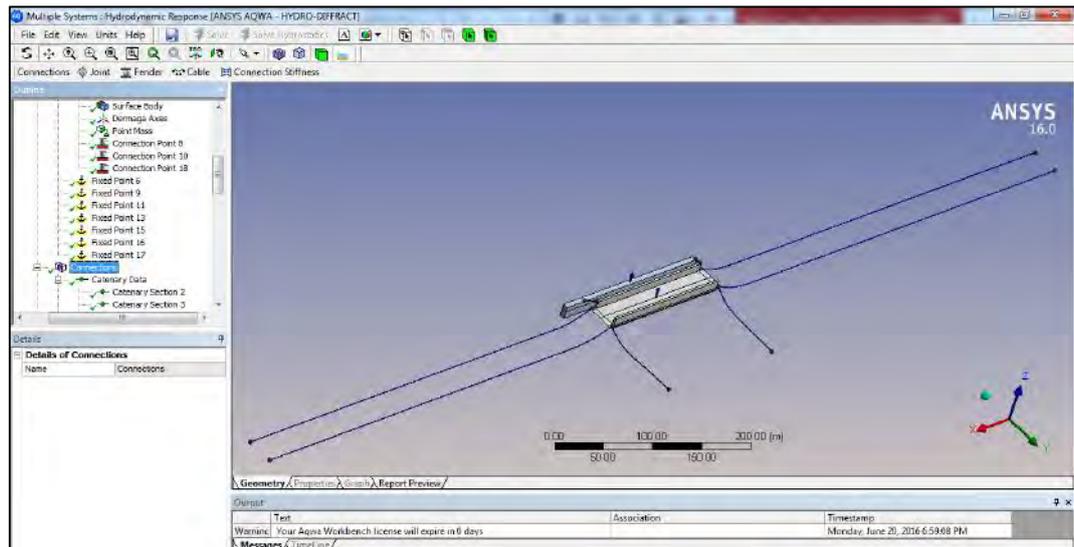
- **Menentukan titik-titik penempatan jangkar dan bollard.** Penempatan jangkar didasarkan pada panjang tali penambatan yang akan dipasang. Panjang tali tambat diatur berdasarkan *Oil Companies International Marine Forum (OCIMF)* yang mensyaratkan panjang rantai minimal sepanjang 3x struktur desain dan panjang *wire rope* minimal harus lebih dari jarak minimal antara struktur apung dan dermaga. Terdapat 6 instalasi jangkar dan 8 instalasi *bollard* yang terdapat pada rencana desain, dimana 2 *bollard* pada dermaga dan 6 *bollard* pada dok apung.



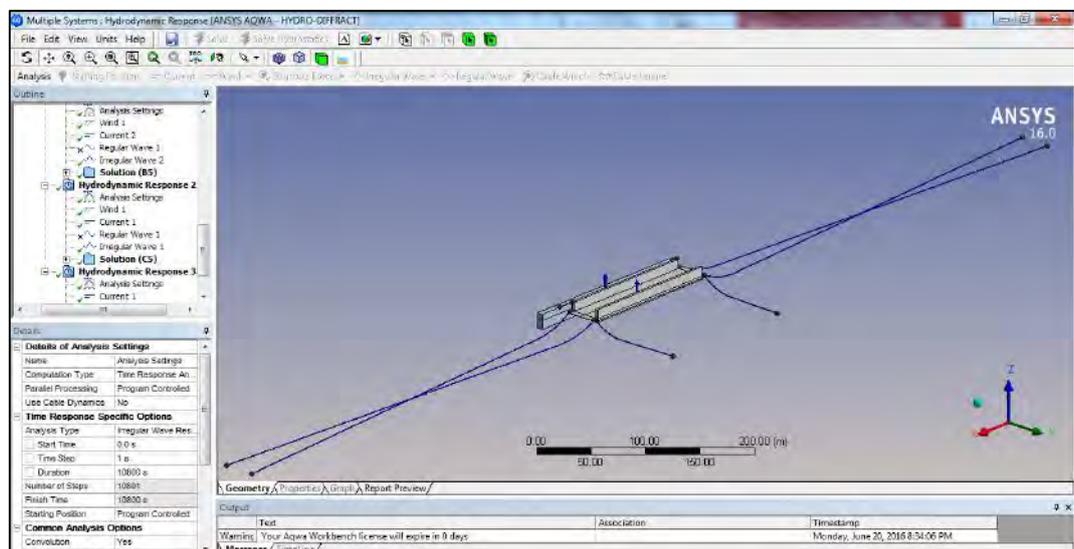
Gambar 3.18: Titik-titik pengikatan

Titik-titik pengikatan pada gambar 3.18 ditunjukkan dengan titik berwarna hitam. Terdapat titik hitam pada dasar dermaga karena struktur tersebut direncanakan menetap (*fixed*).

- **Instalasi tali penambatan.** Setelah titik tersebut ditentukan kemudian memasang tali penghubung menggunakan bahan yang telah ditentukan. Panjang tali tersebut dibagi menjadi beberapa bagian dengan nilai per satuan yang nilainya hampir sama.



Gambar 3. 19: Desain penambatan konfigurasi I.



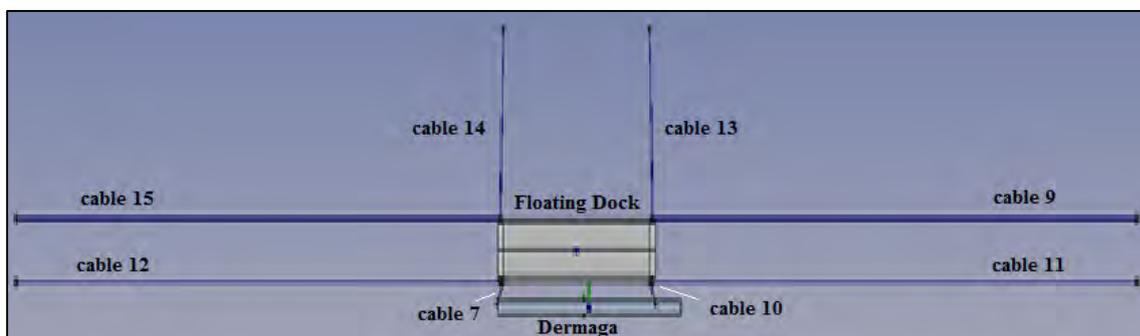
Gambar 3.20: Desain penambatan konfigurasi II.

Pada kasus ini dilakukan variasi konfigurasi pengikatan I dan II seperti pada gambar 3.19 dan 3.20. Nilai hasil analisis dari masing-masing konfigurasi selanjutnya akan dibandingkan untuk menentukan konfigurasi yang lebih efektif dalam segi gerakan

maupun tegangan pada tali tambat. Parameter yang dimasukkan antar konfigurasi dengan nilai yang sama.

### 3.2.2. Tata Nama Sistem Penambatan

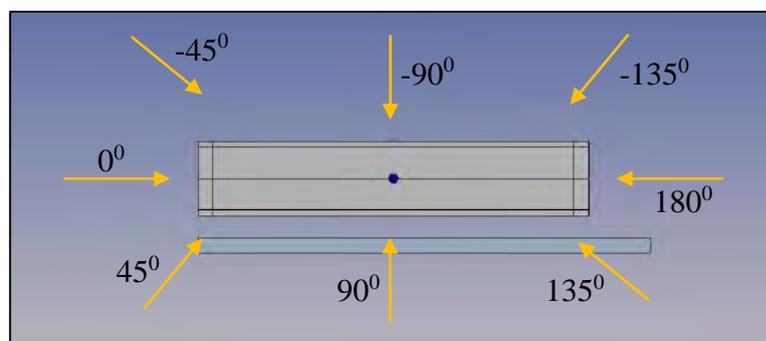
Dibutuhkan penyusunan skema penamaan pada komponen-komponen struktur yang telah dibuat. Struktur penamaan diberikan berdasarkan penamaan yang telah ada pada model desain. Tali penambatan merupakan unsur yang paling penting untuk dinamai karena hasil yang didapatkan sebagian besar merupakan nilai dari tali tambat.



Gambar 3.21: Susunan nama tali penambatan Konfigurasi I.

Pada *ansys aqwa* terdapat kelemahan yang didapati dari segi penamaan, adalah tidak disediakan fitur dari penggantian nama pada menu penambatan, sehingga nama-nama tersebut mengikuti kemauan perangkat lunak. Kemudian untuk konfigurasi II susunan penamaan sama dengan konfigurasi I (gambar 3.21), mengikuti bagian tali yang terpasang pada *bollard*.

Terdapat hal penting lainnya yang perlu diketahui dalam penamaan, yaitu arah dari sudut datangnya gelombang yang divisualisasikan pada gambar 3.22.



Gambar 3.22: Arah datangnya gelombang

### Dimensi Tali Tambat

Dimensi pada sistem penambatan ditunjukkan pada tabel 3.10.

Tabel 3.10: Dimensi rantai

Nama:	Panjang (m)	Diameter (m)	Jenis (m)
Cable 7	14	0,04	<i>Wire rope</i>
Cable 9	476	0,05	Rantai
Cable 10	14	0,04	<i>Wire rope</i>
Cable 11	476	0,05	Rantai
Cable 12	476	0,05	Rantai
Cable 13	96	0,05	Rantai
Cable 14	96	0,05	Rantai
Cable 15	476	0,05	Rantai

### 3.3. Analisis Model

Analisis dilakukan dalam satu kali waktu dimana di dalamnya langsung terdapat analisis perpindahan dan rotasi benda, analisis tegangan tali tambat dan analisis percepatan gerakan benda. Durasi analisis yang digunakan mengacu pada aturan yang ditentukan oleh API mengenai rekomendasi analisis pada sistem penambatan (API RP2SK<sup>2nd</sup> edition, 1996). Terdapat beberapa hal yang perlu ditentukan sebelum melakukan analisis tersebut, diantaranya:

#### 1. Memilih sistem analisis yang dipakai,

Pada kasus ini analisis yang dipakai adalah analisis dinamis maka dipilih analisis berdasarkan waktu yang sesuai dengan kriteria tersebut.

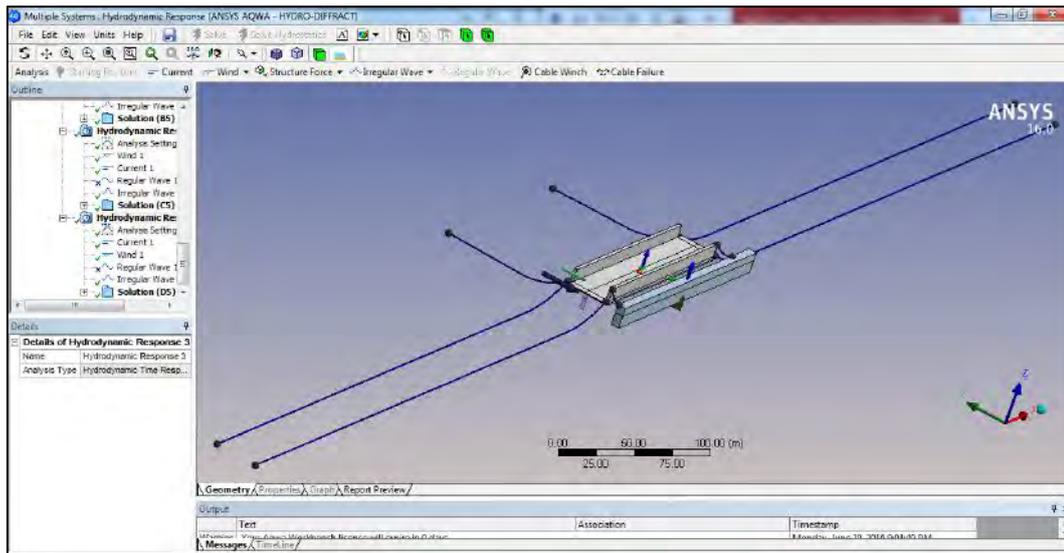
## 2. Menentukan jenis gelombang yang ditinjau,

*Ansys aqwa* menawarkan beberapa jenis gelombang yang dapat dihitungnya melalui analisis numeris, diantaranya: analisis pada gelombang reguler, gelombang irreguler dan gelombang irreguler dengan aliran rendah. Pada kasus ini ditentukan gelombang irreguler sebagai jenis gelombang yang akan dianalisis. Penentuan gelombang irreguler didasarkan pada kondisi perairan yang ditinjau, karena perairan tergolong dalam lingkup pantai maka karakteristik gelombang cenderung pada perairan dengan gelombang irreguler.

Dalam analisis pada gelombang irreguler terdapat juga beberapa tipe-tipe gelombang irreguler yang dapat dipilih, diantaranya: *Jonswap* ( $H_s$ ), *Jonswap* ( $\alpha$ ), *Gaussian*, *Pierson-Moskowitz*, penentuan spektrum manual dan pendefinisian riwayat waktu secara manual. Pada kasus ini dipilih gelombang irreguler dengan jenis *Jonswap* ( $H_s$ ) yang dapat menentukan kondisi ekstrim saat operasi (Habibie et al, 2013).

### 3. Input nilai arah dan besaran kecepatan angin dan arus.

Untuk mengetahui kondisi ekstrim pada hasil analisis yang diharapkan, analisis yang dipakai menggunakan sistem kolinier dimana arah dari tiap-tiap gaya eksternal diasumsikan sama. dan pada kasus ini analisis akan ditinjau pada interval gelombang setiap  $45^0$ , seperti pada gambar 3.22.



Gambar 3.23: Sistem Penambatan kolinier  $-90^0$ .

Pada gambar 3.23 menunjukkan kondisi sistem penambatan setelah parameter-parameter yang dibutuhkan telah diinput. Analisis yang didapatkan pada pengaturan tersebut berupa perpindahan translasi dan rotasi model, percepatan gerakan model dan tegangan pada tiap-tiap tali tambat.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## Bab IV

### Validasi dan Verifikasi

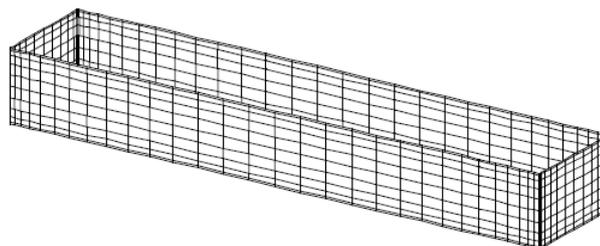
Dalam melakukan analisis numerik dibutuhkan suatu kepastian bahwa program memiliki tingkat kebenaran yang tinggi. Oleh karena itu dibutuhkan pemeriksaan atau penelitian terhadap suatu obyek permasalahan. Pada kasus ini akan dilakukan validasi perangkat lunak *ansys aqwa* menggunakan perangkat lunak *wamit*. Sedangkan proses verifikasi hasil dilakukan dengan membandingkan metode pendekatan difraksi 3 dimensi terhadap *strip theory*.

Proses validasi dibutuhkan untuk meninjau kebenaran dari perangkat lunak sehingga dilakukan saat maupun sedang dalam proses pengejaan, sedangkan proses verifikasi dilakukan ketika hasil telah ditemukan.

#### 4.1. Validasi *Wamit*

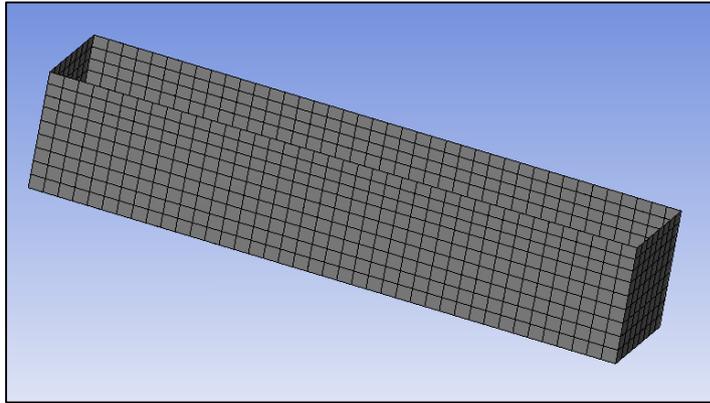
Saat analisis numerik melalui *ansys aqwa* telah dilakukan, selanjutnya adalah melakukan validasi perangkat lunak tersebut dengan yang lain. Validasi menggunakan perangkat lunak *wamit* yang mana menggunakan metode analitik yang sama dengan *ansys aqwa*, yakni metode panel, difraksi 3 dimensi. Dalam validasi ini mengacu pada sebuah paper yang berjudul “*Hydrdynamic Analysis Comparison Study*” yang diterbitkan oleh McDermot.

Pada validasi ini akan membandingkan hasil yang didapatkan pada analisis yang diberikan *wamit* dengan analisis yang akan dilakukan dengan *ansys aqwa*. Untuk mengetahui hasil yang didapatkan valid, maka nilai yang dihasilkan harus saling bersesuaian. Dalam kasus ini digunakan model berbentuk balok yang sebelumnya telah dianalisis menggunakan *wamit*, kemudian perangkat lunak *ansys aqwa* menyesuaikan parameter dari pembuatan model balok.



Gambar 4.1: Pembagian panel pada model balok menggunakan *wamit*.

Model balok yang akan dianalisis seperti pada gambar 4.1, memiliki ukuran utama panjang, lebar dan sarat berturut-turut 200 m, 40 m dan 28 m. Balok juga diketahui memiliki displasemen dan titik gravitasi vertikal sebesar 229.645 dan 28 m. Berdasarkan data yang telah didapatkan, kemudian dapat dimodelkan bentuknya melalui *ansys aqwa*.

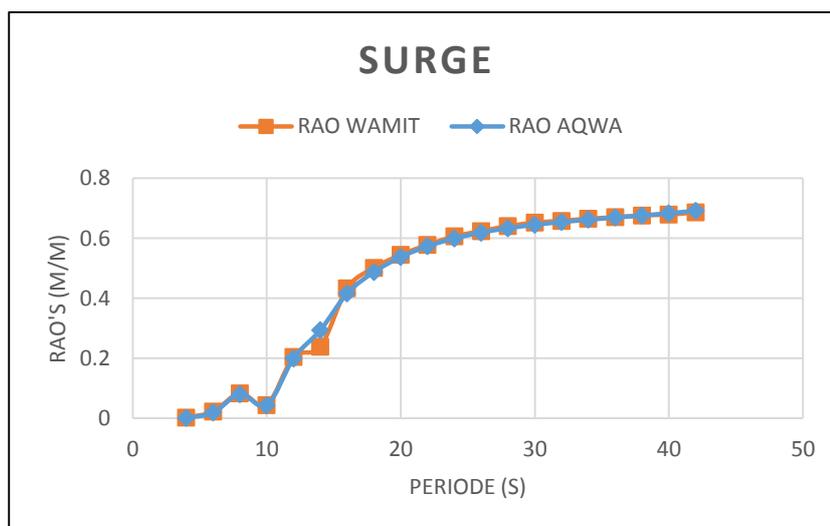


Gambar 4.2: Pembagian panel pada model balok menggunakan *ansys aqwa*

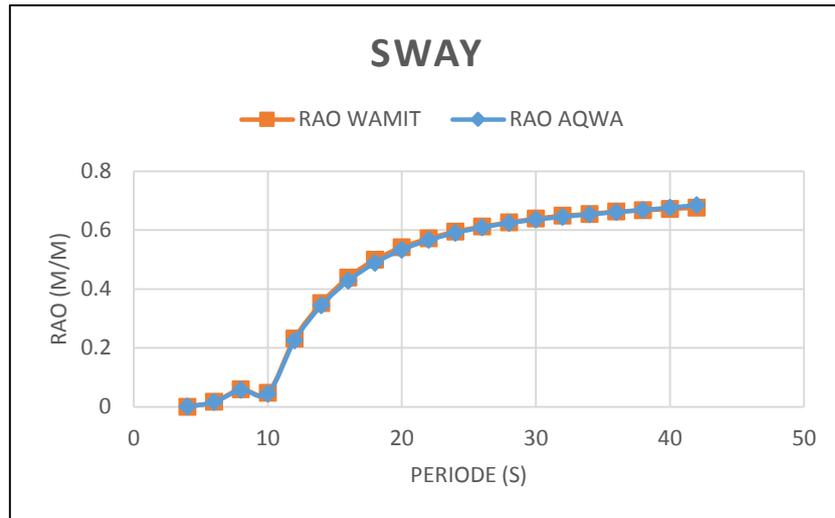
Setelah model balok dibuat dan dilakukan *meshing* seperti gambar 4.2 kemudian menganalisis melalui perangkat lunak. Analisis yang dilakukan untuk mendapatkan nilai RAO dari model, diuji dalam arah pembebanan gelombang  $45^{\circ}$ .

#### 4.1.1. Gerakan Translasi.

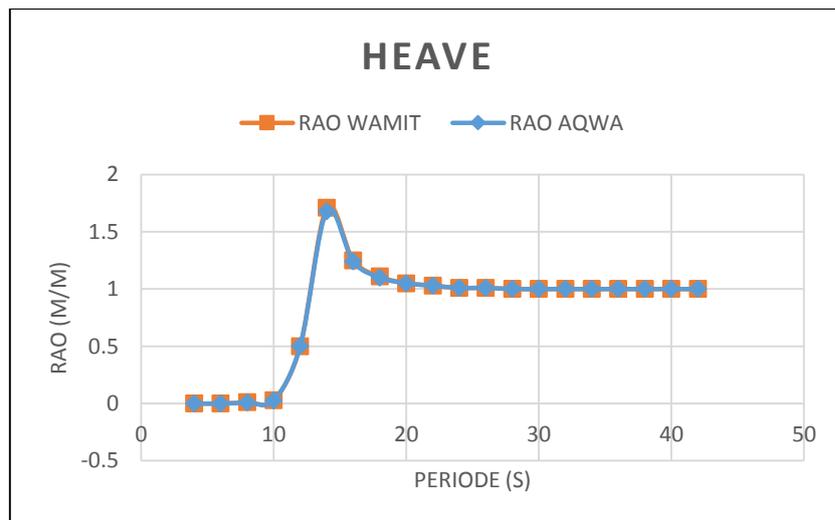
Berikut merupakan RAO perbandingan antar perangkat lunak dalam gerakan translasi:



Gambar 4.3: Grafik perbandingan gerakan translasi searah sumbu-x antara *ansys aqwa* dengan *wamit*.



Gambar 4.4: Grafik perbandingan gerakan translasi searah sumbu-y antara *ansys aqwa* dengan *wamit*.

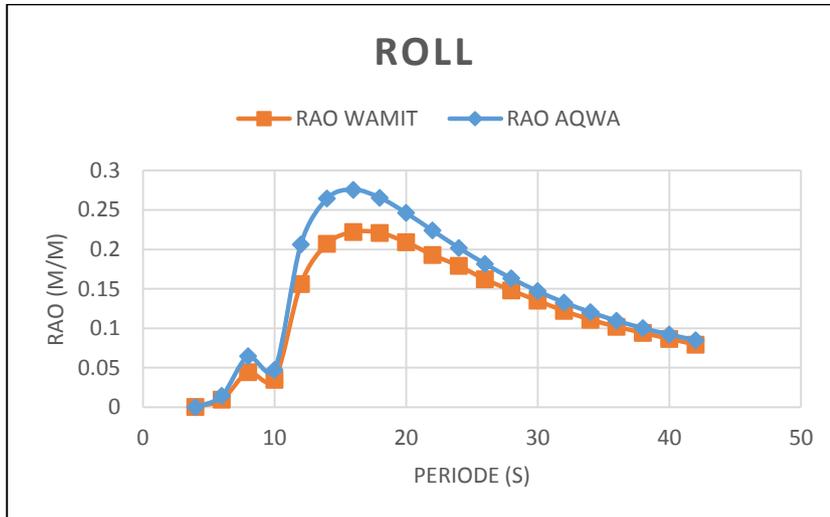


Gambar 4.5: Grafik perbandingan gerakan translasi searah sumbu-z antara *ansys aqwa* dengan *wamit*.

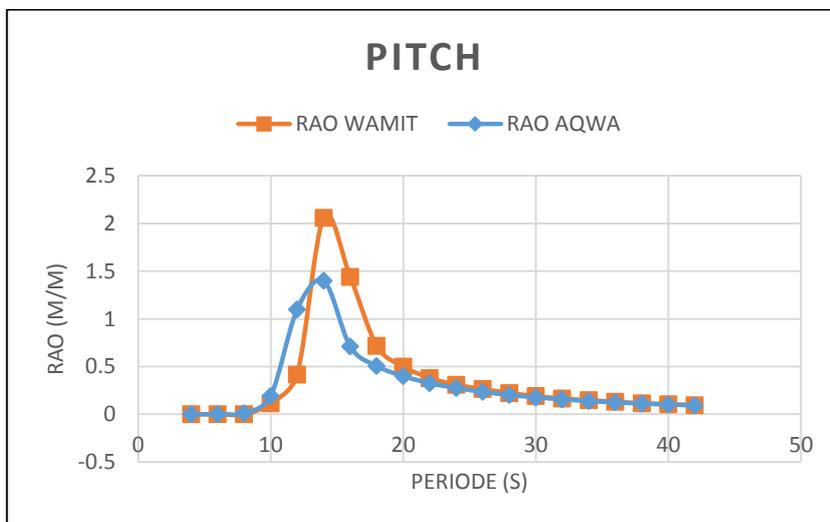
Dalam analisis yang telah dilakukan dalam gerakan translasi, didapatkan hasil yang hampir sama persis antara keduanya seperti pada gambar 4.3, gambar 4.4 dan gambar 4.5. Rata-rata prosentase selisih keduanya antar tiap-tiap derajat kebebasan sebesar 0,2 %. Kesamaan ini didapatkan karena metode yang dipakai dalam perhitungan menggunakan teori yang sama yaitu difraksi 3 dimensi.

### 4.1.2. Gerakan Rotasi

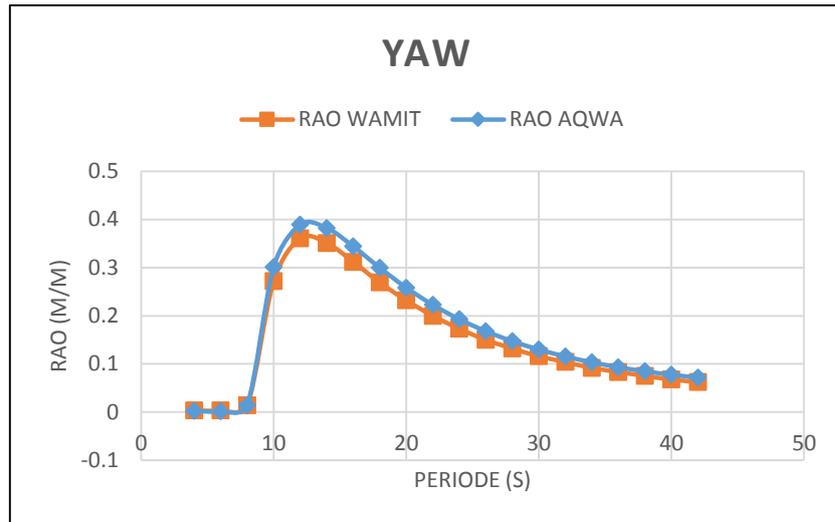
Berikut merupakan RAO perbandingan antar perangkat lunak dalam gerakan rotasi:



Gambar 4.6: Grafik perbandingan gerakan rotasi arah sumbu-x antara *ansys aqwa* dengan *wamit*.



Gambar 4.7: Grafik perbandingan gerakan rotasi arah sumbu-y antara *ansys aqwa* dengan *wamit*.



Gambar 4.8: Grafik perbandingan gerakan rotasi arah sumbu-z antara *ansys aqwa* dengan *wamit*.

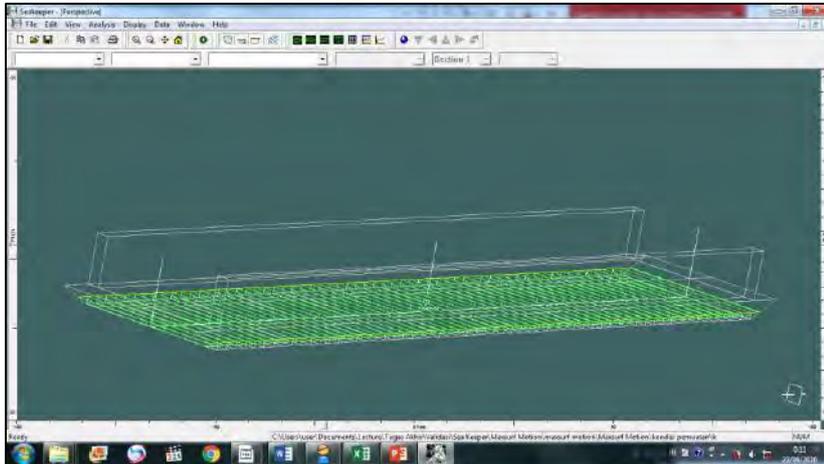
Berdasarkan grafik hasil yang ditampilkan pada gambar 4.6, gambar 4.7 dan gambar 4.8 bahwa untuk tiap-tiap gerakan rotasi memiliki tren yang sama. namun hasil tersebut tidak seperti pada gerakan translasi, selain memiliki tren yang sama gerakan translasi memiliki nilai yang hampir sama juga. Perbedaan hasil antara program *ansys aqwa* dengan *wamit* cukup berarti, seperti halnya gerakan *rolling* memiliki selisih sebesar 4,13%.

*Ansys aqwa* dan *wamit* memang memiliki kesamaan metode dalam menganalisis suatu model. Setelah dilakukan peninjauan lebih lanjut terdapat perbedaan dalam perangkat lunak merepresentasikan gelombang, selain menggunakan radiasi dan difraksi gelombang multi benda pada orde pertama *wamit* juga meninjau gelombang bikromatik dalam orde kedua. Hal tersebut diyakini sebagai penyebab terkait perbedaan nilai antara *ansys aqwa* dengan *wamit* dalam gerakan rotasional.

#### 4.2. Verifikasi *Strip Theory*

Setelah proses validasi dilakukan selanjutnya adalah proses verifikasi dimana akan memeriksa hasil dari model dok apung yang telah dibuat melalui pendekatan yang berbeda. *Maxsurf motion* merupakan perangkat lunak yang menggunakan teori tersebut. Tidak seperti *ansys aqwa*, *maxsurf motion* hanya mampu menganalisis gerakan kapal atau struktur apung hanya dengan 3 derajat kebebasan. Derajat kebebasan tersebut merupakan gerakan dari olah gerak (*sea-keeping*).

Proses verifikasi ini dilakukan melalui parameter yang sama dengan parameter input *ansys aqwa* dan model yang sama pula. Dalam melakukan proses pengaturan perangkat lunak, meskipun teori yang digunakan berbeda namun perlu dilakukan penyesuaian untuk mendapatkan hasil yang paling mendekati.

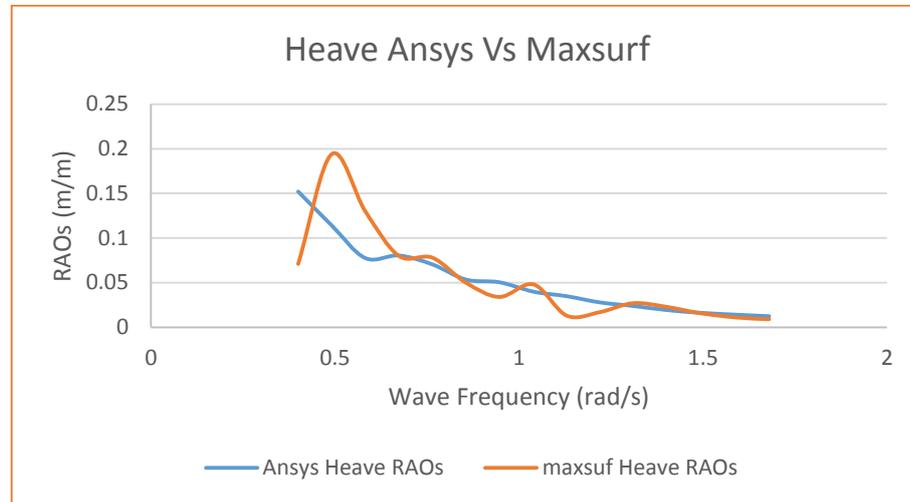


Gambar 4.9: Pembagian *section* pada *maxsurf motion*.

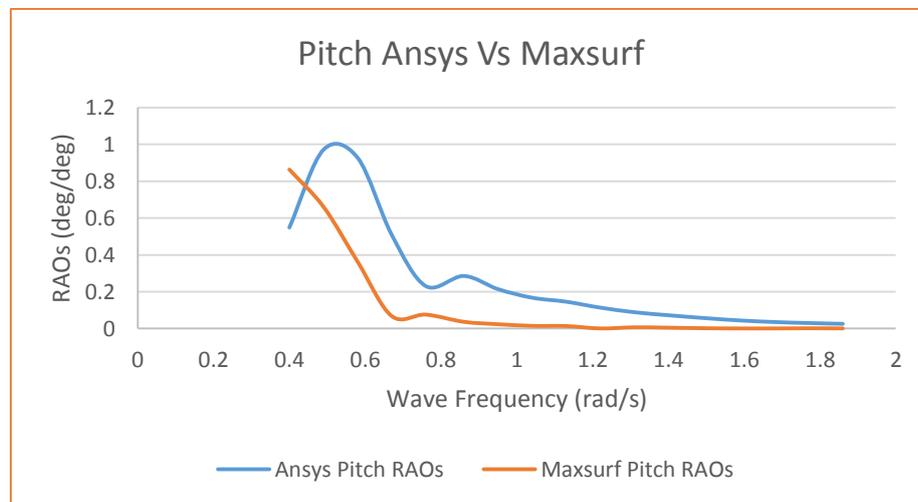
Proses pembagian jumlah seksi dari model dok apung dilakukan penyesuaian dengan pemilihan ukuran panel pada *ansys aqwa* yang telah dilakukan. Apabila sebelumnya telah dipilih ukuran panel sebesar 2,5 m maka jarak antar seksi pada *strip theory* kurang lebih sejauh 2,5 m. Dalam penyesuaian antara panjang dan lebar didapatkan jumlah seksi sebanyak 62 lembar yang terbentang sepanjang dok apung (155,4 m).

#### 4.2.1. Grafik Perbandingan Hasil

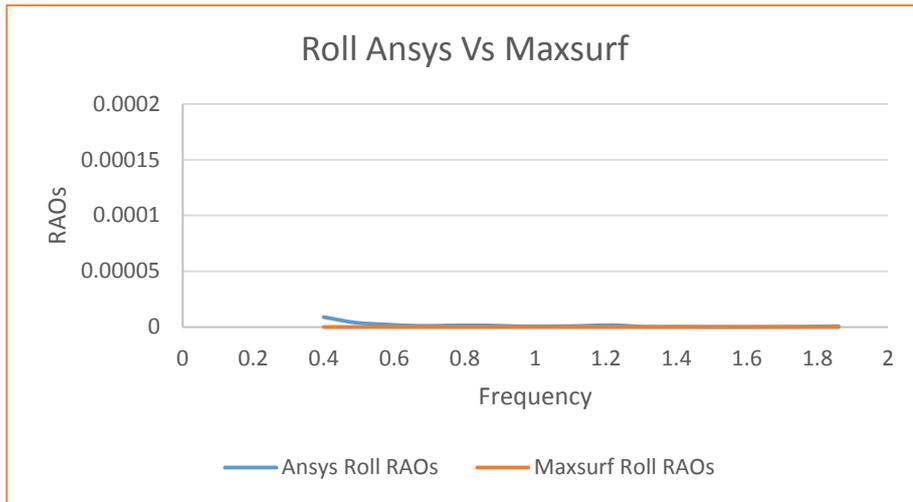
Dalam analisis yang telah dilakukan pada arah datang gelombang  $0^0$  didapatkan hasil gerakan *sea keeping* sebagai berikut:



Gambar 4.10: Grafik perbandingan hasil *ansys aqwa* dengan *maxsurf motion* pada gerakan translasi searah sumbu-z



Gambar 4.11: Grafik perbandingan hasil *ansys aqwa* dengan *maxsurf motion* pada gerakan rotasi arah sumbu-y.

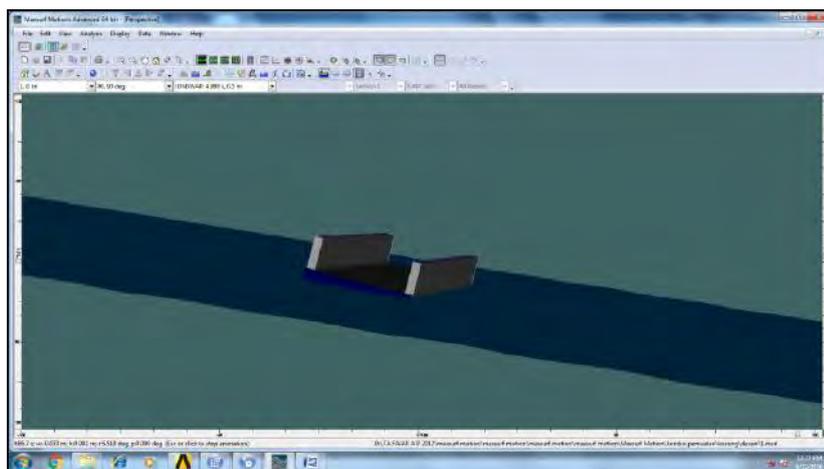


Gambar 4.12: Grafik perbandingan hasil *ansys aqwa* dengan *maxsurf motion* pada gerakan rotasi arah sumbu-x.

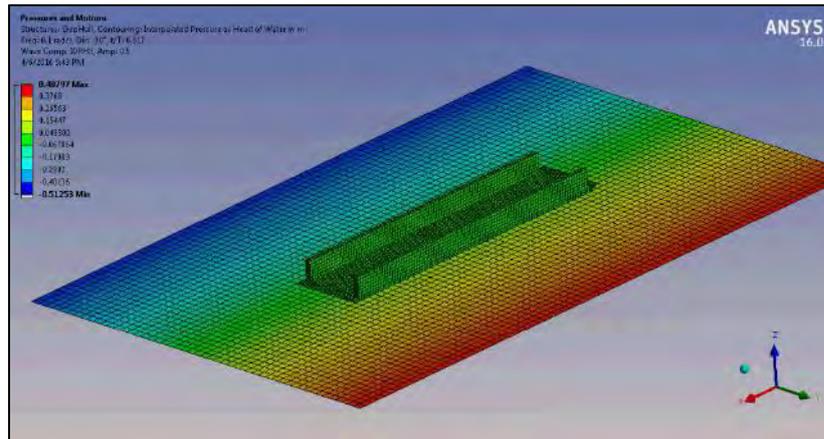
Secara garis besar hasil yang ditampilkan pada gambar 4.10, gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan bahwa tren garis pada arah yang sama. namun untuk nilai yang didapatkan memiliki hasil yang cukup berbeda, seperti teori yang dihadirkan sebelumnya bahwa pendekatan yang dilakukan menggunakan seksi dan panel. Rasio panjang dengan lebar pada *strip theory* menggambarkan hasil yang tidak lebih akurat dari pendekatan difraksi 3 dimensi.

#### 4.2.2. Animasi Perbandingan Hasil

Selain perbandingan disajikan dalam bentuk grafik, akan ditampilkan juga perbandingan berdasarkan animasi yang ditampilkan dari kedua perangkat lunak.



Gambar 4.13: Visualisasi gerakan model dok apung pada *maxsurf motion*.



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## Bab V

### Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini akan dikaji hasil yang telah didapatkan dari analisis numerik 3D difraksi melalui *ansys aqwa*. Jumlah hasil yang didapatkan sebanyak 48 buah dari variasi muatan berdasarkan arah gaya eksternal untuk tiap-tiap analisis.

#### 5.1. Perpindahan dan Rotasi Model Dok Apung

Perbedaan respon dok apung saat adanya perubahan muatan ketika kondisi kosong maupun balas penuh perlu untuk diperiksa. Diharapkan perubahan muatan tidak membuat rentang hasil yang drastis pada dok apung. Muatan dok apung divariasikan menjadi 3 kondisi, yaitu kondisi muatan kosong, kondisi muatan kapal dan kondisi balas penuh. Sudut yang divariasikan untuk gaya eksternal divariasikan setiap  $45^{\circ}$ , yakni  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ ,  $-45^{\circ}$ ,  $-90^{\circ}$ , dan  $-135^{\circ}$ . Pada tiap-tiap variasi tersebut ditinjau menurut konfigurasi pengikatan I dan II.

##### 5.1.1. Konfigurasi I

Berikut merupakan hasil analisis perpindahan baik translasi maupun rotasi pada konfigurasi pengikatan I dok apung. Analisis pada tabel 5.1, tabel 5.2 dan tabel 5.3 ditinjau pada tiap-tiap arah pembebanan. Max dan min dalam tabel menunjukkan arah gerakan positif dan negatif pada model dok apung.

Tabel 5.1: Hasil analisis konfigurasi I saat muatan kosong

SUDUT (deg)	Distance (m)						Rotation (deg)					
	Surge		Sway		Heave		Roll		Pitch		Yaw	
	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
0	0.043	-0.044	0.031	-0.028	0.032	-0.032	0.132	-0.117	0.092	-0.1	0.046	-0.048
45	0.032	-0.031	0.03	-0.031	0.026	-0.029	0.175	-0.196	0.104	-0.094	0.084	-0.077
90	0.016	-0.015	0.125	-0.137	0.076	-0.085	0.454	-0.514	0.053	-0.051	0.035	-0.035
135	0.03	-0.033	0.02	-0.02	0.027	-0.028	0.116	-0.111	0.095	-0.093	0.07	-0.064
180	0.041	-0.044	0.026	-0.025	0.031	-0.033	0.109	-0.099	0.093	-0.093	0.056	-0.051
-45	0.065	-0.061	0.086	-0.083	0.057	-0.058	0.331	-0.319	0.19	-0.201	0.184	-0.201
-90	0.016	-0.021	0.76	-0.768	0.308	-0.275	3.257	-3.16	0.068	-0.063	0.031	-0.035
-135	0.057	-0.059	0.082	-0.075	0.048	-0.044	0.305	-0.31	0.237	-0.215	0.201	-0.193

Dalam tabel 5.1 diketahui nilai yang paling signifikan untuk dok apung tanpa muatan ada pada gerakan rotasi sumbu-x (*roll*) arah kolinier  $-90^{\circ}$  dengan nilai 3,257<sup>0</sup>.

Tabel 5.2: Hasil analisis konfigurasi I saat muatan kapal

SUDUT (deg)	Distance (m)						Rotation (deg)					
	Surge		Sway		Heave		Roll		Pitch		Yaw	
	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
0	0.045	-0.044	0.031	-0.031	0.036	-0.031	0.207	-0.225	0.09	-0.091	0.054	-0.054
45	0.035	-0.033	0.035	-0.035	0.04	-0.041	0.376	-0.386	0.117	-0.112	0.094	-0.084
90	0.017	-0.016	0.121	-0.13	0.09	-0.098	0.77	-0.86	0.055	-0.049	0.036	-0.04
135	0.019	-0.019	0.014	-0.013	0.021	-0.018	0.14	-0.148	0.048	-0.043	0.035	-0.037
180	0.023	-0.024	0.014	-0.013	0.021	-0.02	0.131	-0.123	0.052	-0.053	0.031	-0.035
-45	0.067	-0.059	0.081	-0.083	0.057	-0.053	0.42	-0.419	0.17	-0.176	0.194	-0.201
-90	0.015	-0.017	0.677	-0.732	0.352	-0.343	4.129	-4.129	0.049	-0.053	0.032	-0.033
-135	0.056	-0.06	0.075	-0.072	0.044	-0.046	0.47	0.044	0.208	-0.209	0.202	-0.192

Dalam tabel 5.2 diketahui nilai yang paling signifikan untuk dok apung muatana kapal ada pada gerakan rotasi sumbu-x (*roll*) positif dan negatif pada arah gaya-gaya luar  $-90^0$  dengan nilai  $4,129^0$ .

Tabel 5.3: Hasil analisis konfigurasi I saat muatan balas penuh

SUDUT (deg)	Distance (m)						Rotation (deg)					
	Surge		Sway		Heave		Roll		Pitch		Yaw	
	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
0	0.027	-0.031	0.031	-0.031	0.015	-0.017	0.016	-0.018	0.023	-0.025	0.021	-0.022
45	0.013	-0.016	0.054	-0.059	0.024	-0.024	0.045	-0.041	0.022	-0.019	0.046	-0.019
90	0.005	-0.006	0.101	-0.101	0.04	-0.042	0.006	-0.005	0.016	-0.014	0.046	-0.014
135	0.014	-0.011	0.043	-0.047	0.02	-0.021	0.036	-0.035	0.02	-0.022	0.049	-0.048
180	0.028	-0.028	0.023	-0.025	0.013	-0.015	0.02	-0.015	0.025	-0.023	0.023	-0.024
-45	0.013	-0.013	0.036	-0.038	0.013	-0.013	0.044	-0.04	0.069	-0.058	0.042	-0.039
-90	0.007	-0.006	0.148	-0.118	0.062	-0.056	0.167	-0.174	0.007	-0.007	0.016	-0.016
-135	0.012	-0.012	0.049	-0.05	0.012	-0.011	0.052	-0.046	0.047	-0.042	0.071	-0.074

Dalam tabel 5.3 diketahui nilai yang paling signifikan untuk dok apung muatana balas penuh ada pada gerakan rotasi sumbu-x (*roll*) negatif pada arah kolinier  $-90^0$  dengan nilai  $0,174^0$ . Namun pada analisis kondisi balas terjadi suatu kegagalan dengan durasi 3 jam karena nilai tension saat kisaran waktu 100 sekon mendapatkan nilai yang diluar batas tegangan izin *ansys aqwa*. Oleh karena itu nilai pada tabel 4.3 merupakan hasil analisis dalam durasi 100 s.

### 5.1.2. Konfigurasi II

Berikut merupakan hasil analisis perpindahan baik translasi maupun rotasi pada konfigurasi pengikatan II dok apung. Analisis pada tabel 5.4, tabel 5.5 dan tabel 5.6 ditinjau pada tiap-tiap arah pembebanan. Max dan min dalam tabel menunjukkan arah gerakan positif dan negatif pada model dok apung.

Tabel 5.4: Hasil analisis konfigurasi II saat muatan kosong

SUDUT (deg)	Distance (m)						Rotation (deg)					
	Surge		Sway		Heave		Roll		Pitch		Yaw	
	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
0	0.043	-0.044	0.031	-0.028	0.032	-0.032	0.132	-0.117	0.092	-0.1	0.046	-0.048
45	0.032	-0.035	0.032	-0.03	0.028	-0.029	0.187	-0.183	0.096	-0.103	0.065	-0.068
90	0.017	-0.016	0.124	-0.136	0.076	-0.085	0.456	-0.515	0.053	-0.049	0.035	-0.034
135	0.03	-0.033	0.02	-0.02	0.027	-0.028	0.115	-0.112	0.096	-0.091	0.07	-0.064
180	0.041	-0.045	0.026	-0.025	0.031	-0.033	0.109	-0.099	0.094	-0.092	0.056	-0.05
-45	0.065	-0.06	0.086	-0.082	0.059	-0.057	0.331	-0.308	0.189	-0.201	0.185	-0.199
-90	0.019	-0.021	0.755	-0.773	0.311	-0.277	3.204	-3.185	0.071	-0.075	0.032	-0.032
-135	0.055	-0.06	0.082	-0.075	0.048	-0.044	0.307	-0.297	0.237	-0.217	0.201	-0.191

Dalam tabel 5.4 diketahui nilai yang paling signifikan untuk dok apung tanpa muatan ada pada gerakan rotasi sumbu-x (*roll*) positif dengan arah kolinier  $-90^0$  bernilai 3,204<sup>0</sup>.

Tabel 5.5: Hasil analisis konfigurasi II saat muatan kapal

SUDUT (deg)	Distance (m)						Rotation (deg)					
	Surge		Sway		Heave		Roll		Pitch		Yaw	
	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
0	0.045	-0.044	0.031	-0.031	0.036	-0.031	0.207	-0.224	0.09	-0.091	0.054	-0.054
45	0.035	-0.033	0.035	-0.035	0.039	-0.042	0.373	-0.387	0.117	-0.112	0.094	-0.083
90	0.017	-0.016	0.122	-0.13	0.089	-0.098	0.775	-0.858	0.055	-0.049	0.036	-0.04
135	0.032	-0.036	0.022	-0.024	0.025	-0.027	0.166	-0.153	0.08	-0.085	0.074	-0.069
180	0.044	-0.046	0.028	-0.027	0.03	-0.031	0.156	-0.157	0.08	-0.08	0.058	-0.056
-45	0.028	-0.028	0.031	-0.03	0.026	-0.028	0.206	-0.154	0.067	-0.082	0.085	-0.09
-90	0.015	-0.016	0.679	-0.725	0.348	-0.329	3.735	-4.12	0.045	-0.053	0.032	-0.032
-135	0.056	-0.059	0.075	-0.072	0.044	-0.046	0.463	-0.437	0.207	-0.207	0.202	-0.195

Dalam tabel 5.5 diketahui nilai yang paling signifikan untuk dok apung muatana kapal ada pada gerakan rotasi sumbu-x (*roll*) negatif pada arah kolinier  $-90^0$  dengan nilai 4,12<sup>0</sup>.

Tabel 5. 6: Hasil analisis konfigurasi II saat muatan balas penuh

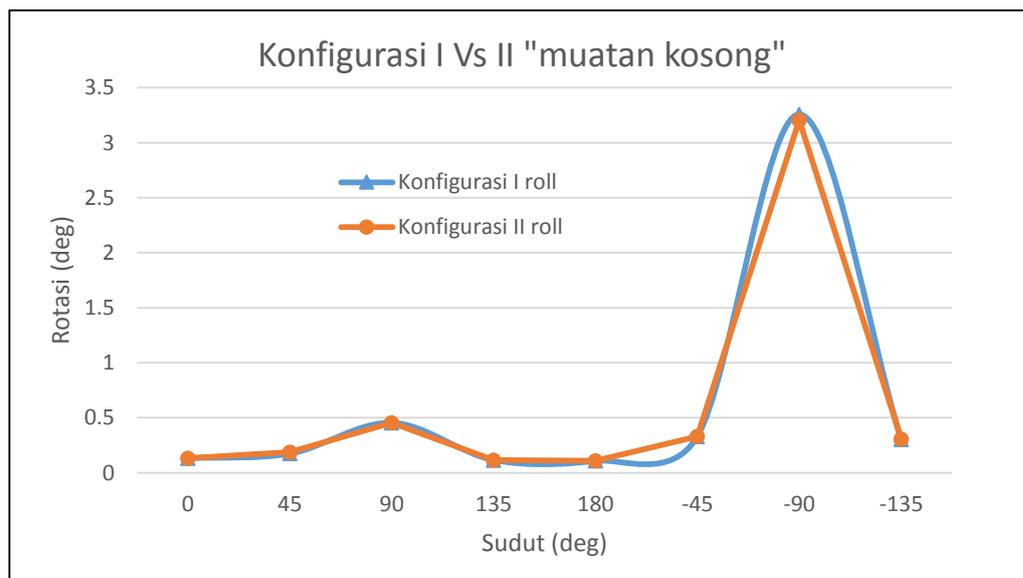
SUDUT (deg)	Distance (m)						Rotation (deg)					
	Surge		Sway		Heave		Roll		Pitch		Yaw	
	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
0	0.027	-0.031	0.032	-0.031	0.015	-0.017	0.016	-0.018	0.023	-0.025	0.021	-0.022
45	0.013	-0.016	0.054	-0.058	0.024	-0.024	0.044	-0.041	0.022	-0.019	0.046	-0.054
90	0.005	-0.007	0.104	-0.101	0.04	-0.042	0.046	-0.05	0.006	-0.005	0.017	-0.015
135	0.013	-0.01	0.043	-0.047	0.02	-0.021	0.036	-0.035	0.02	-0.022	0.049	-0.048
180	0.029	-0.028	0.023	-0.025	0.013	-0.015	0.02	-0.015	0.025	-0.023	0.023	-0.024
-45	0.013	-0.013	0.036	-0.038	0.013	-0.013	0.042	-0.039	0.044	-0.04	0.068	-0.057
-90	0.007	-0.006	0.148	-0.118	0.062	-0.056	0.167	-0.174	0.007	-0.007	0.016	-0.016
-135	0.012	-0.012	0.048	-0.05	0.012	-0.011	0.052	-0.046	0.047	-0.042	0.072	-0.074

Dalam tabel 5.6 diketahui nilai yang paling signifikan untuk dok apung muatana balas penuh ada pada gerakan rotasi sumbu-x (*roll*) negatif pada arah gaya eksternal  $-90^0$  dengan nilai  $0,174^0$ . Sama seperti analisis konfigurasi I, pada analisis kondisi balas untuk konfigurasi II ini juga terjadi suatu kegagalan dalam durasi analisis 3 jam karena nilai tension saat kisaran waktu 100 sekon mendapatkan nilai yang diluar batas tegangan izin *ansys aqwa*. Oleh karena itu nilai pada tabel 4.6 merupakan hasil analisis dalam durasi 100 s.

### 5.1.3. Konfigurasi I Vs Konfigurasi II

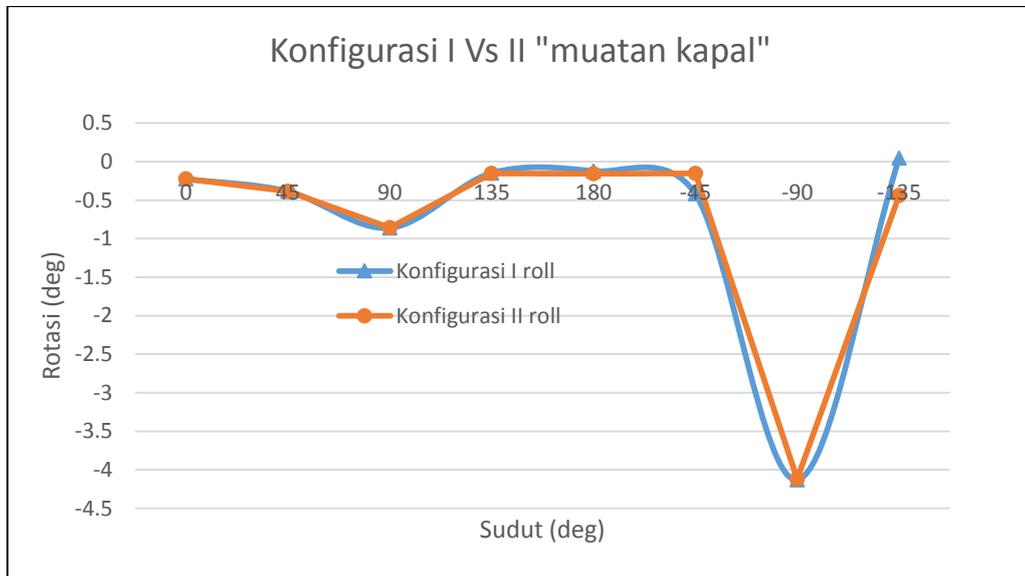
Seperti yang telah diketahui bahwa pada tiap-tiap kondisi muatan nilai terbesar terjadi pada gerakan rotasi pada sumbu-x (*roll*) dengan arah kolinier  $-90^0$  terhadap dok apung, untuk menentukan konfigurasi pengikatan yang lebih efektif perlu membandingkan hasil analisis kedua konfigurasi tersebut. Perbandingan tersebut cukup dilihat dari nilai ekstrim yang telah didapatkan.

Berdasarkan perbandingan tabel didapati bahwa pada kondisi kosong dan muat penuh dok apung mengalami gerakan lebih tenang saat penambatan secara melintang atau konfigurasi II. Sedangkan gerakan pada kondisi balas nilai maksimal yang didapatkan sama, namun berdasarkan parameter lainnya konfigurasi II mendapatkan nilai yang lebih kecil. Untuk lebih jelasnya ditampilkan dalam bentuk grafik sesuai gambar 4.1, gambar 4.2 dan gambar 4.3.



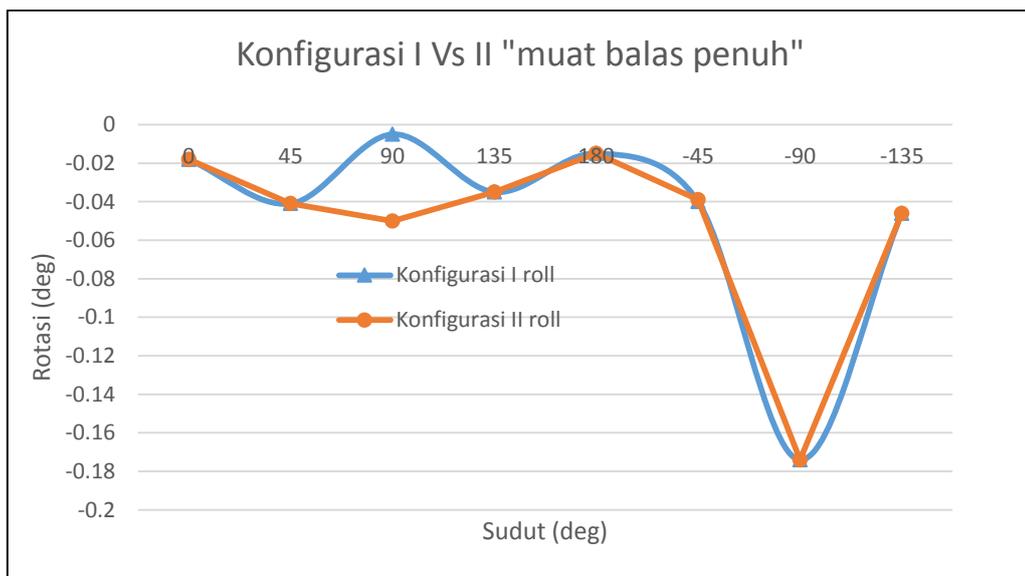
Gambar 5.1: Grafik perbandingan *rolling* Konfigurasi I dan II saat muatan kosong.

Terlihat grafik pada gambar 5.1, konfigurasi I ditandai pada garis warna biru secara visual memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan garis berwarna oranye (konfigurasi II).



Gambar 5.2: Grafik perbandingan *rolling* Konfigurasi I dan II saat muatan kapal.

Terlihat grafik pada gambar 5.2, konfigurasi I ditandai pada garis warna biru secara visual memiliki nilai yang lebih negatif dibandingkan dengan garis berwarna oranye (konfigurasi II). Disini nilai negatif lebih dominan artinya gerakan dok apung cenderung ke arah dermaga.



Gambar 5.3: Grafik perbandingan *rolling* Konfigurasi I dan II saat muatan balas penuh.

Terlihat grafik pada gambar 5.3, konfigurasi I ditandai pada garis warna biru secara jumlah memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan garis berwarna oranye (konfigurasi II). Namun untuk nilai maksimal yang didapatkan kedua konfigurasi mendapatkan nilai yang sama.

## 5.2. Akselerasi Gerakan Model Dok Apung

Sesuai landasan teori yang telah diberikan bahwa akselerasi gerakan struktur apung secara vertikal dan lateral memberikan ukuran kenyamanan pada struktur. Seperti halnya ISO 2631 memberikan beberapa tingkat untuk penilaian kenyamanan suatu struktur apung.

### 5.2.1. Kriteria Kenyamanan Model Dok Apung

Dalam kasus ini ditemukan nilai akselerasi maksimal terhadap muatan kosong dan muatan kapal dari dok apung terhadap masing-masing konfigurasi dan semua arah kolinier. Didapatkan nilai maksimal saat dok apung dalam kondisi kosong dengan konfigurasi pengikatan I dan arah kolinier  $-90^0$ , seperti yang ditampilkan pada tabel 4.7.

Tabel 5.7: Penilaian kenyamanan model dok apung

KONFIGURASI I dan KONFIGURASI II			
MAKSIMUM AKSELERASI GERAKAN MUATAN KOSONG DAN MUATAN KAPAL			
Vertikal ( $m/s^2$ )	ISO 2631	Kondisi eksternal:	Konfigurasi:
0.308	<i>not uncomfortable</i>	kosong ( $-90^0$ )	Konfigurasi I

Menurut kriteria sesuai tabel 5.7, dinyatakan saat kondisi akselerasi gerakan vertikal mencapai nilai maksimal dok apung mendapatkan kategori nyaman. Jadi, untuk gerakan lainnya dok apung secara otomatis mendapatkan gerakan yang lebih nyaman.

Pada tabel 5.7 hanya dibandingkan oleh muatan kosong dan muatan kapal karena untuk muatan balas penuh durasi simulasi dalam rentang waktu yang berbeda, oleh karena itu kondisi balas tidak dapat digolongkan pada kriteria tersebut akibat durasi tidak sesuai standar.

## 5.3. Tegangan Tali Penambatan

Pada kesempatan penulisan ini akan dikaji tegangan yang terjadi pada setiap tali tambat pada model dok apung. Adapun tegangan pada tiap-tiap pergerakan yang akan dibahas, diantaranya: pergerakan arah sumbu-x, arah sumbu-y dan arah sumbu-z. Selain itu juga akan dihadirkan

tegangan resultan (tension) yang dihasilkan terhadap semua derajat kebebasan yang ditimbulkan dok apung.

Kriteria batasan dari tegangan tali pada sistem penambatan struktur apung mengacu pada standar yang telah ditetapkan oleh *American Petroleum Institute* (API), yakni minimal faktor keselamatan sebesar 1,67. Oleh karena itu, akan diupayakan untuk membuat desain yang sesuai dengan rekomendasi standar yang telah ditetapkan.

### 5.3.1. Kriteria Keamanan Tegangan

Untuk kriteria keamanan akan dihadirkan nilai-nilai maksimal yang terjadi pada tiap-tiap arah kolinier berdasarkan kondisi muatan, pengujian sistem penambatan hanya pada kondisi (ULS) atau semua tali dalam keadaan tertambat.

Tabel 5.8: Hasil Tegangan maksimal pada tiap-tiap konfigurasi.

Konfigurasi:	Kondisi:	Jenis:	Tegangan (N):	Kriteria (API):
Konfigurasi I	Muatan Kosong	Rantai	794128.1	✓
		<i>Wire rope</i>	1415262	x
	Muatan Kapal	Rantai	1603832	✓
		<i>Wire Rope</i>	1419582	x
Konfigurasi II	Muatan Kosong	Rantai	1172172	✓
		<i>Wire Rope</i>	1415234	x
	Muatan Kapal	Rantai	1349754	✓
		<i>Wire Rope</i>	1419580	x

Berdasarkan analisis numerik yang telah dilakukan sesuai tabel 5.8, selama 3 jam simulasi benda apung didapatkan untuk tegangan pada rantai semua nilai memenuhi kriteria. Namun yang menjadi permasalahan adalah nilai dari *wire rope* yang kurang sesuai, terlepas dari itu *wire rope* berhasil diuji dalam kriteria *ansys aqwa* selama 3 jam.

Secara keseluruhan tegangan maksimal terjadi ketika gaya eksternal kolinier pada arah  $-90^0$ , seperti halnya perpindahan dan rotasi gerakan maksimal dok apung. Hal demikian terjadi karena area dok apung yang mengalami interaksi dari gaya eksternal (khususnya angin) mengenai bidang dengan luasan terbesar. Hal serupa sesuai dengan penelitian pada kasus yang

sama (*bank* pada salah satu sisi) namun dengan obyek TLP, yang mendapatkan harga *tension* tertinggi ketika arah gaya yang diakibatkan oleh angin, arus dan gelombang kolinier  $-90^0$  (Shimada et al, 2010).

### 5.3.2. Kondisi muatan balas penuh

Analisis tegangan sistem tambat dok apung pada kondisi muat balas penuh seperti halnya analisis gerakan, pengujian dalam durasi 3 jam menyebabkan beban yang diterima pada tali pengikatan melebihi batas yang diizinkan oleh perangkat lunak. Hal tersebut membuat analisis tidak dapat dilakukan dalam kurun waktu tersebut, sehingga durasi pengujian diperkecil menjadi hanya 100 sekon. Meskipun pada dasarnya pengujian tersebut tidak memiliki landasan yang kuat namun analisis tersebut dapat dipertanggungjawabkan jika meninjau karakteristik kondisi dok apung muat balas penuh.

Berdasarkan kondisi operasi dok apung, kondisi muatan balas penuh hanya dilakukan saat akan masuk dan keluarnya kapal yang akan direparasi. Proses keluar masuk kapal ke dalam dok apung biasa dibantu oleh kapal tunda (Departemen Pendidikan Nasional, 2003). Oleh karena itu, proses tersebut hanya memakan waktu kurang dari satu hari. Proses pengujian tegangan sistem tambat pada kondisi operasi tersebut tidak termasuk dalam standar pengujian tegangan durasi 3 jam (DNV-OS-E301, 2015).

Tabel 5.9: Hasil Tegangan maksimal pada kondisi muatan balas penuh.

Konfigurasi:	Kondisi:	Jenis:	Tegangan (N):
Konfigurasi I	Muatan Balas Penuh	Rantai	2110068.75
		<i>Wire Rope</i>	1419841.375
Konfigurasi II	Muatan Balas Penuh	Rantai	2110061.25
		<i>Wire Rope</i>	1419854.375

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan seperti yang ditunjukkan pada tabel 5.9, tegangan maksimal yang dihasilkan pada seluruh material pengikatan tidak memenuhi kriteria untuk pengujian 3 jam. Namun hal tersebut tidak dapat dijadikan sebagai dasar dalam menentukan kriteria keamana untuk sistem tambat dok apung kondisi muatan balas penuh karena pengujian hanya dilakukan dalam durasi 100 sekon.

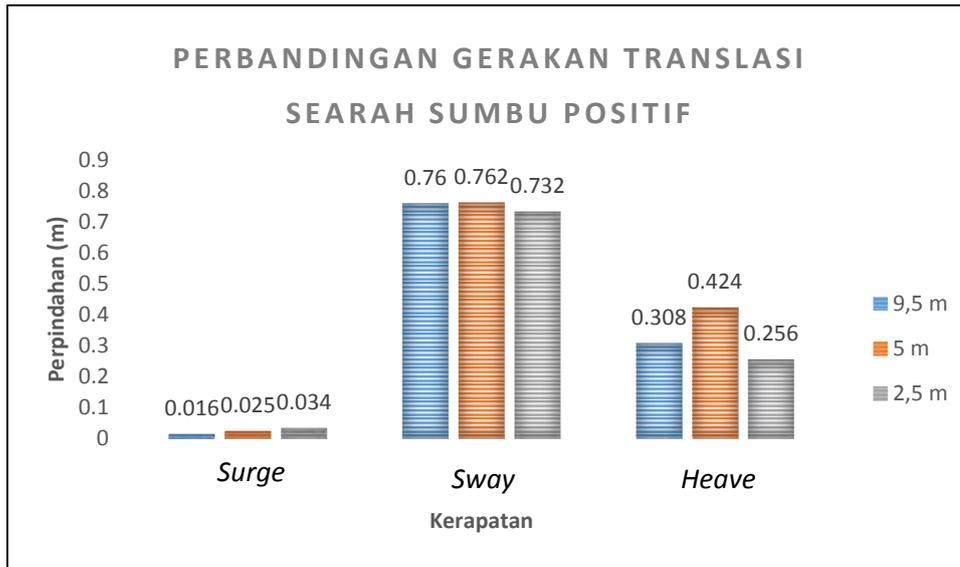
Selain dalam bentuk angka hasil analisis yang didapatkan juga berupa animasi gerakan dari struktur dok apung tertambat. Untuk memperjelas ketidakmampuan material pengikatan dalam menahan gerakan dok apung maka dilakukan peninjauan melalui visualisasi animasi yang dihasilkan. Peninjauan ini dilakukan dengan mengubah domain analisis (kedalaman) dari sebelumnya 10 m menjadi 30 m. Hal tersebut dilakukan karena perkiraan dari ketidakamanan tegangan yang terjadi berasal dari kondisi operasi perairan. Perairan tempat dianalisisnya dok apung berada pada perairan yang sangat dangkal sehingga diyakini *squat effect* dan *bank effect* berperan terhadap hasil yang didapatkan.

#### **5.4. Fenomena *Bank Effects***

Penambahan dermaga pada salah satu sisi dermaga memberikan perbedaan tekanan yang mempengaruhi gerakan dari dok apung. Adapun suatu cara untuk mengidentifikasi perbedaan tekanan ini yakni melalui peninjauan perubahan nilai dalam bentuk perpindahan dan rotasi serta akselerasi serta pengamatan secara visual melalui animasi yang diberikan perangkat lunak.

##### **5.4.1. Variasi Kerapatan Dermaga**

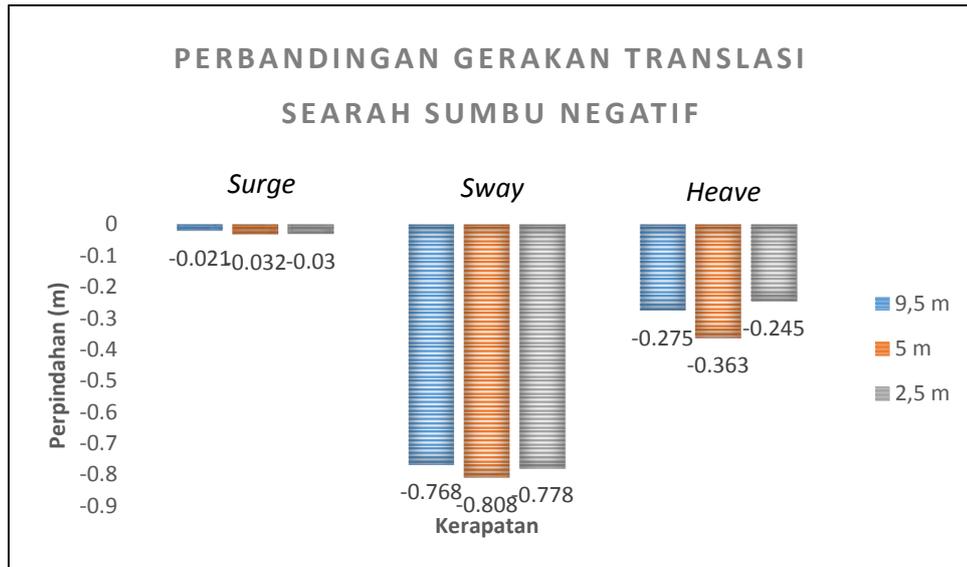
Diagram yang akan diberikan merupakan diagram perbandingan nilai gerakan ditinjau dari beberapa jarak antara dok apung dengan dermaga dalam gaya eksternal kolinier  $-90^0$ . Diagram tersebut ditujukan untuk mempermudah dan memperjelas perbandingan dari perbedaan nilai. Variasi kerapatan dermaga dimulai dari jarak 2,5 m; 5 m dan 9,5 m. Gerakan yang dihasilkan berupa gerakan pada arah positif dan negatif terhadap masing-masing derajat kebebasan. Berikut merupakan perbandingan gerakan terhadap variasi kerapatan dermaga yang disajikan dalam bentuk diagram batang.



Gambar 5.4: Diagram perbandingan gerakan translasi searah sumbu positif.

Dalam diagram pada gambar 5.4 dapat dilihat mengenai gerakan yang paling dominan saat gerakan *sway* dan *heave* pada saat jarak dermaga terhadap dok apung sejauh 5 m. Sedangkan pada gerakan *surge*, semakin rapat jarak dermaga semakin besar pula nilai gerakan searah sumbu-x yang dihasilkan.

Gerakan translasi yang menjadi perhatian adalah gerakan *sway*, karena gerakan ini dapat mengakibatkan dok apung mengalami kontak fisik terhadap dermaga. Namun dalam gerakan searah sumbu-x positif belum dapat diketahui kontak fisik terhadap keduanya, karena gerakan *sway* ke arah sumbu-x positif mengindikasikan perpindahan yang terjadi pada dok apung menjauhi sisi dermaga. Untuk mengetahui perpindahan dok apung ke arah dermaga dibutuhkan nilai perpindahan dok apung terhadap sumbu negatif, seperti pada diagram berikut.

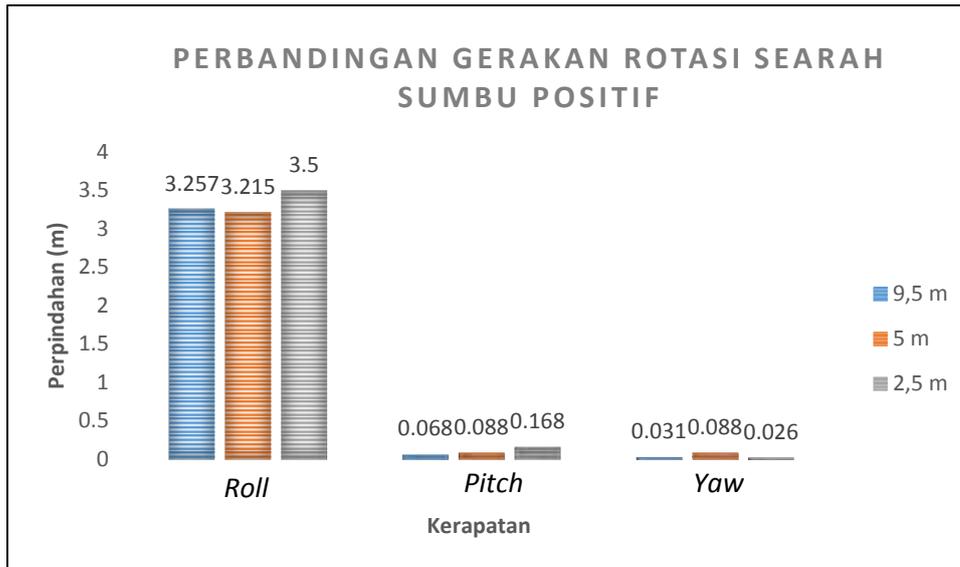


Gambar 5.5: Diagram perbandingan gerakan translasi searah sumbu negatif.

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.5, tren nilai yang didapatkan pada gerakan translasi searah sumbu-x negatif terhadap tiap-tiap derajat kebebasan sama dengan gerakan translasi searah sumbu-x positif. Seperti pembahasan sebelumnya bahwa nilai perpindahan yang menjadi fokus adalah perpindahan akibat *sway*, hasil perpindahan terbesar yang didapatkan sebesar 0.808 m ke arah dermaga. Nilai tersebut masih dalam jangkauan aman terhadap terbenturnya kedua benda, mengingat jarak bentangan kedua benda pada nilai tersebut sejauh 5 m.

Meskipun jarak kedua benda sejauh 5 m termasuk dalam *domain* aman. Untuk kasus yang dilakukan analisis dengan mendalam dipilih bentangan jarak dermaga terhadap dok apung sejauh 9,5 m, karena jarak minimal untuk suatu bangunan terapung terhadap bangunan permanen (dermaga) harus lebih besar dari 5 m (DNV-OS-H203, 2012).

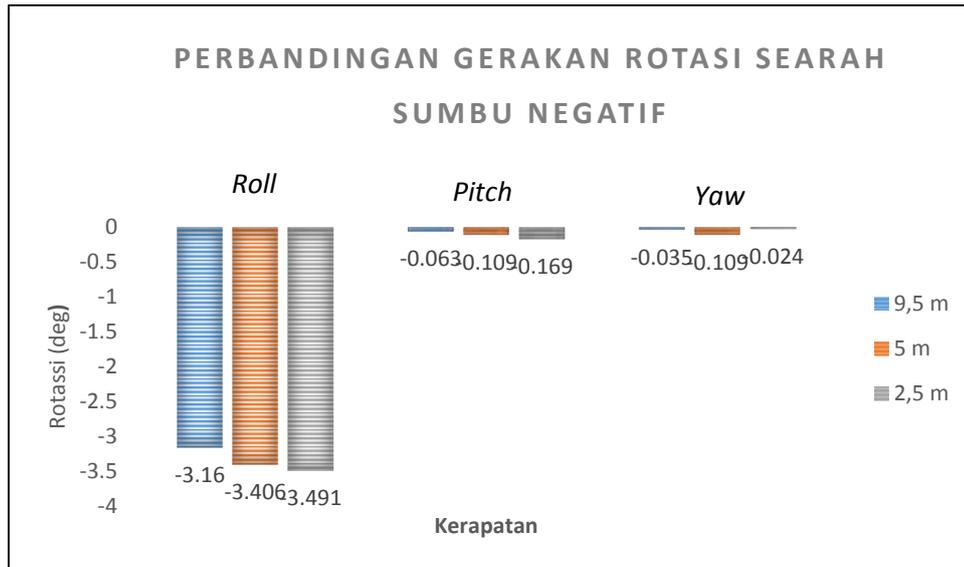
Untuk meninjau lebih detail lagi bagaimana karakteristik perbedaan antar tiap-tiap variasi jarak dermaga, diberikan diagram yang menunjukkan perbedaan nilai gerakan rotasional dari dok apung terhadap tiap-tiap derajat kebebasan seperti pada gambar berikut.



Gambar 5.6: Diagram perbandingan gerakan rotasi searah sumbu positif.

Berdasarkan diagram pada gambar 5.3, diketahui gerakan rotasi yang paling dominan adalah gerakan rotasi searah sumbu-x (*roll*). Gerakan *pitch* menunjukkan bahwa semakin rapat dok apung terhadap dermaga semakin besar nilai gerakan *pitch* yang dihasilkan sedangkan untuk gerakan *yaw* nilai terbesar saat jarak antar kedua benda sejauh 5 m. Gerakan *roll* dok apung terbesar bernilai  $3,5^0$  pada kerapatan dermaga sejauh 2,5 m, dimana kerapatan tersebut masih sesuai kriteria yang diizinkan.

Adanya dermaga pada salah satu sisi dok apung lebih tampak kehadirannya dengan meninjau gerakan rotasi pada arah sebaiknya (negatif), seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



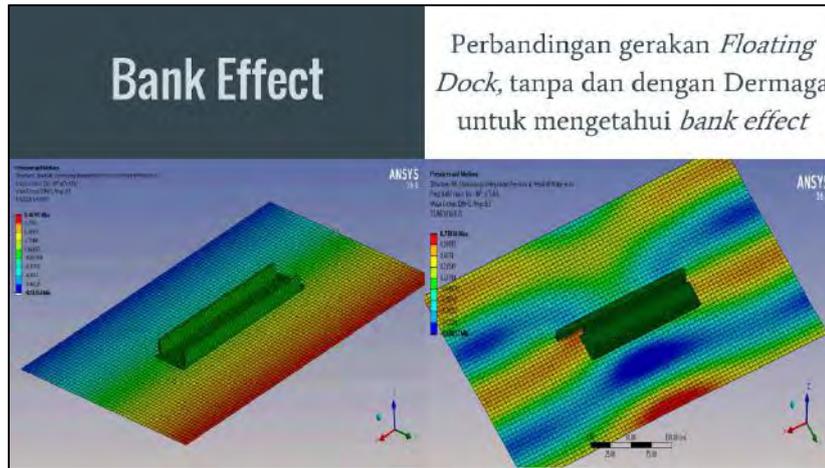
Gambar 5.7: Diagram perbandingan gerakan rotasi searah sumbu negatif.

Hasil yang didapatkan pada gambar 5.4 menunjukkan bahwa semakin rapat dermaga semakin besar pula nilai dari gerakan *roll* dan *pitch*. Gerakan *yaw* paling besar nilainya saat kerapatan dermaga sejauh 5 m. Dalam diagram tersebut nilai yang paling dominan ada pada gerakan *roll* saat kerapatan 2,5 m. Sejumlah hasil tersebut mengindikasikan bahwa adanya dermaga memberi pengaruh terhadap perubahan tren dan nilai maksimal yang didapatkan dari gerakan.

Hasil maksimal yang didapatkan dalam gerakan *roll* negatif sebesar  $3,491^0$  memberikan nilai yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan *roll* positif sebesar  $3,5^0$ . Hal tersebut mengindikasikan bahwa gerakan *roll* mendekati arah dermaga mendapatkan redaman sebagai akibat dari perbedaan tekanan yang terjadi. Oleh karena itu, efek pantulan yang terjadi membuat gerakan *roll* dok apung menjauhi dermaga lebih besar dibandingkan *roll* mendekati dermaga.

#### 5.4.2. Animasi Bank Effects

Seperti yang telah disinggung dalam subbab sebelumnya, bahwa *bank effects* mengakibatkan perbedaan tekanan pada area terradiasi. Perangkat lunak *ansys aqwa* dipercaya mampu menampilkan perbedaan tekanan yang terjadi dalam bentuk visual. Perbedaan tekanan tersebut dapat diketahui melalui pergerakan perairan akibat gerakan dok apung dan gelombang. Bentuk visual yang ditampilkan pada perangkat lunak seperti pada gambar berikut.



Gambar 5.8: Visualisasi perbandingan perbedaan tekanan akibat *bank effects*.

Perbedaan tekanan secara visual dapat ditunjukkan dengan membandingkan karakteristik perairan antara dok apung secara independen dan dok apung dengan dermaga sesuai gambar 5.5. pada gambar tersebut tampak karakteristik perairan saat dok apung independen bergerak secara linier beraturan, sedangkan pada dok apung dengan struktur *fixed* di salah satu sisinya membuat karakteristik perairan menjadi tidak linier. Dalam perbandingan ini dapat diketahui bahwa adanya dermaga membuat perbedaan tekanan pada perairan sekitar dok apung, perbedaan tersebut mengakibatkan tinggi gelombang yang terjadi tidak stabil.

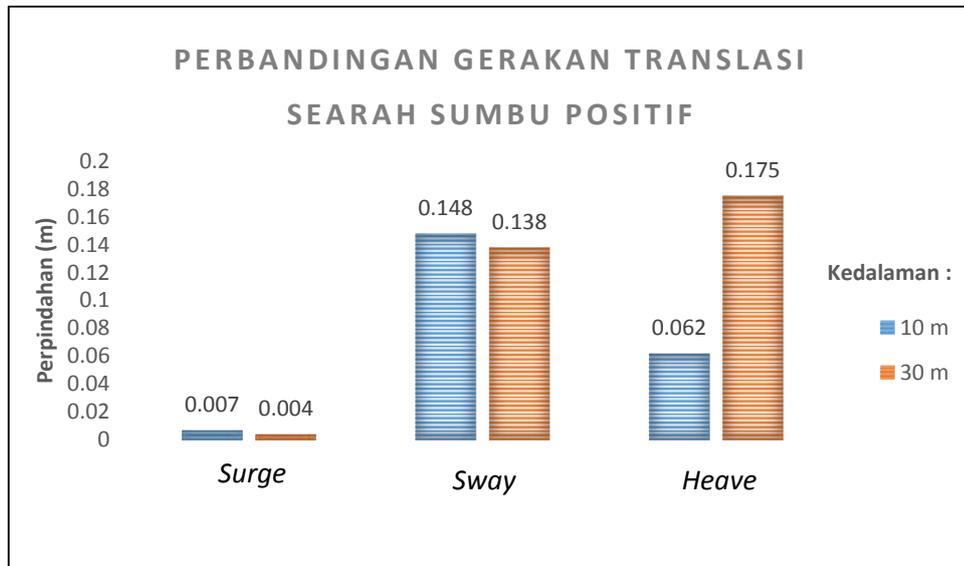
## 5.5. Fenomena *Squat Effects*

Kedangkalan perairan pada kondisi lokasi operasi dok apung menyebabkan suatu pengaruh terhadap perilaku gerakan dok apung. Kondisi perairan dangkal dok apung ada pada kondisi muatan balas penuh dimana selisih antara kedalaman perairan dengan sarat dok apung hanya sebesar 1 m. Sebagaimana pada analisis sebelumnya, kondisi tersebut menyebabkan model dok apung tidak dapat dilakukan pengujian hingga durasi 3 jam.

### 5.5.1. Variasi Kedalaman Perairan

Untuk mengetahui pengaruh akibat kedangkalan perairan, dilakukan pengujian pada dok apung pada kondisi sarat yang sama namun dengan penambahan kedalaman perairan pada lokasi pengujian. Pengujian akan dilakukan pada perairan dengan kedalaman 30 m. Dalam hasil analisis pengujian yang dilakukan kemudian dilakukan perbandingan perpindahan maupun rotasi dengan hasil analisis perairan pada kedalaman 10 m.

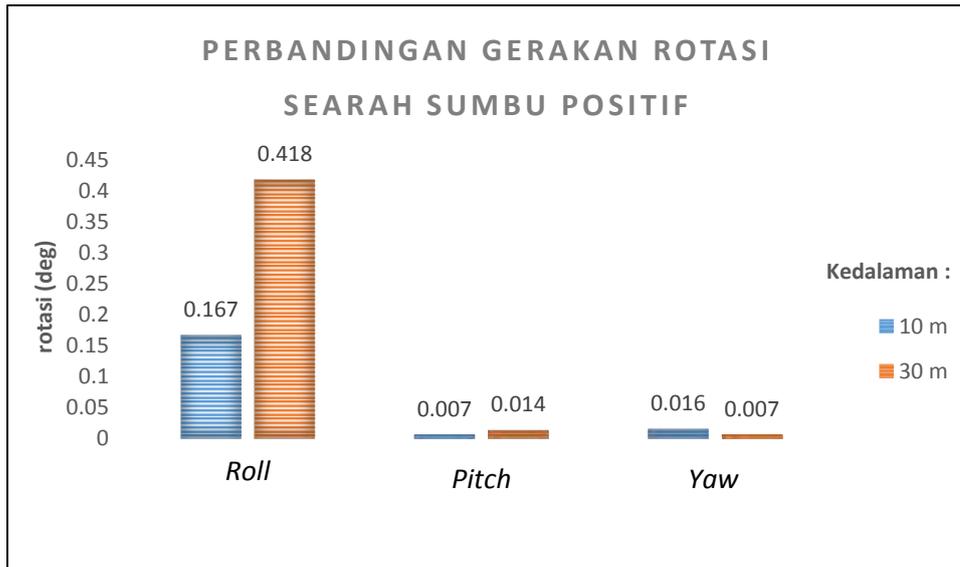
Perbandingan pengujian akan menentukan nilai yang lebih dominan diantara kedalaman perairan 10 m dengan 30 m. Agar pada variabel uji yang sama maka pengujian dilakukan pada durasi 100 sekon dengan arah sudut gaya-gaya eksternal  $-90^0$ . Perbedaan nilai tersebut akan disajikan dalam bentuk diagram seperti yang ditampilkan pada kedua gambar berikut.



Gambar 5.9: Diagram perbandingan gerakan translasi searah sumbu positif.

Hasil perbandingan gerakan translasi antara kedua kedalaman ditunjukkan pada gambar 5.6. berdasarkan hasil tersebut didapatkan bahwa pada durasi pengujian 100 sekon, gerakan *surge* dan *sway* dok apung lebih dominan pada kedalaman perairan 10 m sedangkan gerakan *heave* pada keadaan sebaliknya.

Gerakan *heave* dok apung mendapatkan nilai selisih terbesar diantara gerakan translasi lainnya yakni sebesar 0,113 m. Berdasarkan hasil tersebut semakin tinggi nilai kedalaman perairan membuat nilai perpindahan gerakan *heave* semakin besar, sebaliknya gerakan *surge* dan *sway* mendapatkan nilai yang semakin kecil. Kemudian pada perbandingan gerakan rotasi dok apung akan ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 5.10: Diagram perbandingan gerakan rotasi searah sumbu positif.

Hasil perbandingan gerakan rotasi variasi kedalaman mendapatkan nilai maksimal perpindahan gerakan *roll* dan *pitch* kedalaman perairan 30 m lebih besar dibandingkan dengan kedalaman perairan 10 m. Sebaliknya nilai maksimal perpindahan gerakan *pitch* kedalaman perairan 30 m mendapatkan nilai yang lebih kecil. Berdasarkan nilai tersebut semakin tinggi nilai kedalaman perairan semakin besar gerakan *roll* dok apung sedangkan gerakan *pitch* dan *yaw* mendapatkan nilai yang lebih kecil. Selisih perbedaan terbesar ada pada gerakan *rolling* dengan nilai sebesar  $0,251^{\circ}$ .

Keunikan pada perbandingan perpindahan dan rotasi untuk gerakan translasi maupun rotasi adalah gerakan *manouver* dok apung mendapatkan kesimpulan nilai yang berlawanan dengan gerakan *sea keeping*. Semakin besar nilai kedalaman maka semakin tinggi pula nilai gerakan *sea keeping* dan semakin rendah kedalaman semakin besar nilai dari gerakan *manouver*.

### 5.5.2. Pengujian pada Kedalaman Perairan 30 m.

Pada pengujian sebelumnya bahwa kedalaman perairan 30 m dilakukan pada durasi uji 100 sekon. Untuk menguji lebih lanjut kedalaman perairan tersebut akan dilakukan pada durasi 10800 sekon (3 jam). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh *squat effect* pada dok apung, apabila pada pengujian kedalaman perairan 10 m untuk kondisi muatan balas penuh gerakan dok apung berada pada ambang batas yang ditentukan oleh perangkat lunak.

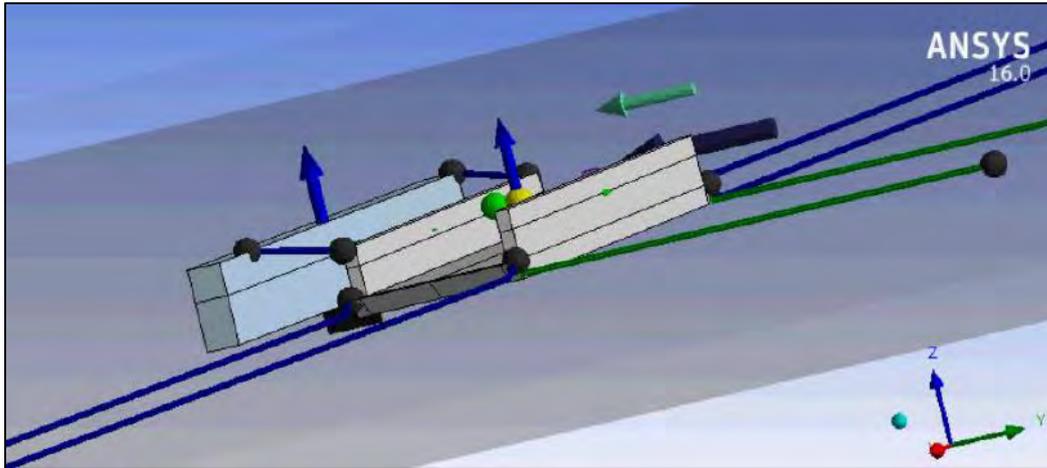
Pada penelitian sebelumnya pengaruh *squat effects* memberi andil sangat besar terhadap kegagalan pengujian geraan dok apung untuk durasi 3 jam. Untuk membuktikan besarnya pengaruh tersebut terhadap parameter kegagalan, maka diperlukan analisis gerakan dok apung pada kondisi ekstrim dengan kedalaman perairan 30 m pada durasi yang sama (3 jam). Hasil yang ditampilkan seperti pada tabel berikut.

Tabel 5.10: Nilai Maksimal dan Minimal Perpindahan/Rotasi Dok Apung pada Kedalaman Perairan 30 m

duration	Perpindahan (m)						Rotasi (deg)					
	Surge		Sway		Heave		Roll		Pitch		Yaw	
	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
10800 s	-0.01	0.009	0.29	-0.268	0.457	-0.434	0.77	-0.83	0.025	-0.026	0.015	-0.015

Hasil pengujian yang didapatkan bahwa pada durasi uji 10800 sekon untuk kedalaman 30 m mendapatkan nilai yang berada pada kondisi aman kriteria. Hal ini membuktikan bahwa efek dari kedangkalan perairan (*squat effect*) pada dok apung tidak memberikan pengaruh saat kedalaman perairan sebesar 30 m. Lain halnya dengan pengujian sebelumnya pada perairan dengan kedalaman 10 m saat kondisi muatan balas penuh, dok apung mendapatkan *squat effects* yang sangat besar sehingga membuat gerakan dok apung diluar batas kriteria keamanan.

Perairan dangkal dengan rasio sarat dan kedalaman perairan hanya sebesar 1 m membuat dok apung mengalami benturan dengan *sea bed* sehingga gerakan yang terjadi sangat liar. Skenario terbenturnya alas dok apung dengan *sea bed* dapat diamati melalui hasil analisis berupa animasi. Animasi tersebut membantu memperjelas nilai yang didapatkan, seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.

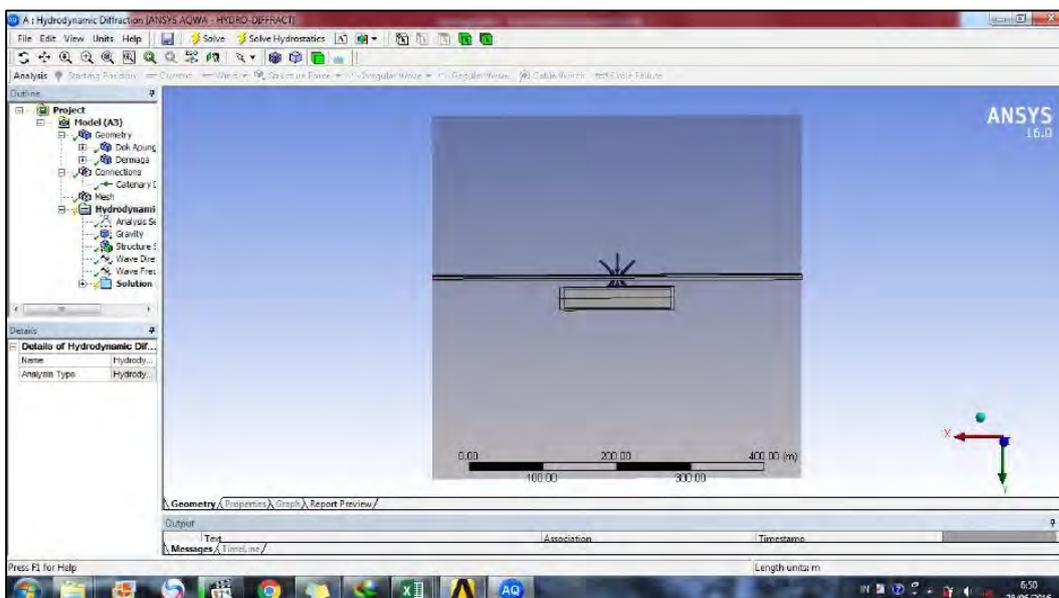


Gambar 5.11: Skenario terbenturnya dasar dok apung dengan dasar laut.

Kedalaman perairan 10 m menyebabkan dasar dok apung berbenturan dengan dasar laut sehingga tali pengikatan mengalami perpendekan seperti pada gambar 5.8. Kedua tali berwarna hijau menandakan rantai mengalami perpendekan.

### 5.6. Dermaga sebagai *Break Waters*

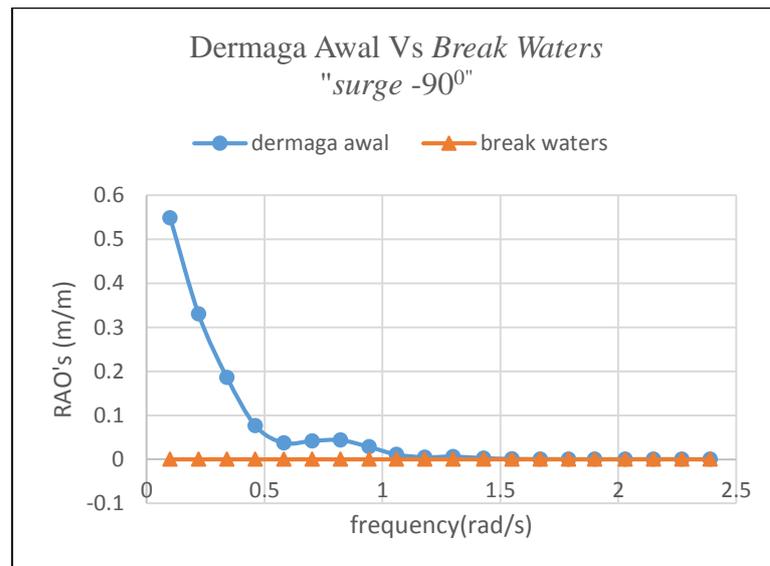
Pada suatu kasus tertentu, dermaga memiliki dimensi panjang yang cukup besar sehingga menyebabkan redaman atau hilangnya pengaruh gelombang terhadap salah satu sisi dok apung. Dampak yang diakibatkan menyerupai dampak dari adanya *break waters*. Pada bahasan kali ini akan dilakukan analisis gerakan dari dok apung dengan kasus dermaga sebagai *break waters*. Untuk memperjelas kalimat tersebut, ditampilkan gambaran kasus sesuai gambar berikut.



Gambar 5.12: Dermaga sebagai *break waters*.

Analisis gerakan dok apung dilakukan pada domain perairan 500 m x 500 m dengan kedalaman 10 m. Sisi dermaga diasumsikan membentang sepanjang domain perairan seperti yang ditampilkan pada gambar 5.6. Hal tersebut bertujuan untuk menghilangkan pengaruh gelombang pada salah satu sisi dok apung. Oleh karena itu, peninjauan gerakan dok apung dilakukan dengan gelombang pada arah  $0^{\circ}$ ,  $-45^{\circ}$ ,  $-90^{\circ}$ , dan  $-135^{\circ}$ . Analisis yang dihasilkan akan dibandingkan dengan hasil analisis pada penelitian sebelumnya yang telah dikerjakan.

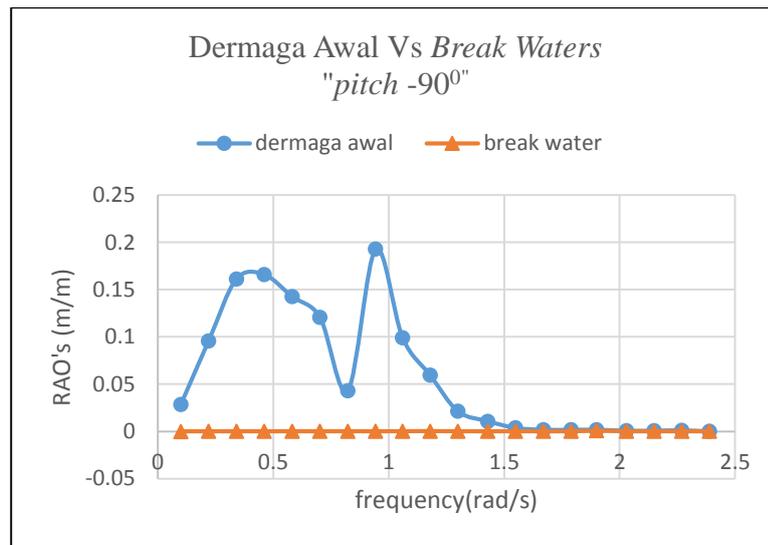
Berdasarkan perbandingan analisis yang telah dilakukan, didapatkan beberapa perbedaan tren yang cukup signifikan antara dermaga awal dengan dermaga sebagai *break waters*. Hasil perbandingan terhadap perbedaan tersebut akan disajikan dalam bentuk grafik seperti pada gambar berikut.



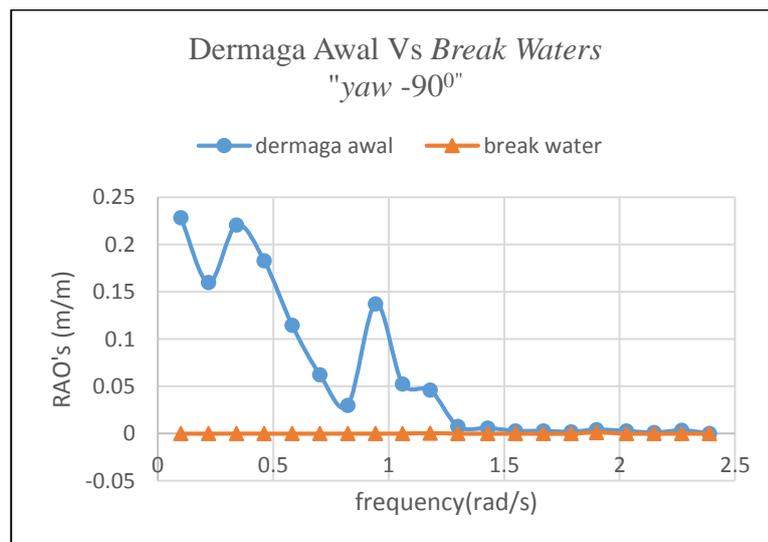
Gambar 5.13: Perbandingan *surging* RAO's dermaga awal dengan dermaga sebagai *break waters*.

Pada gerakan translasi searah sumbu-x (*surge*) dengan arah pembebanan gelombang  $-90^{\circ}$  terjadi perbedaan RAO yang signifikan antara gerakan dok apung dermaga awal dengan *break waters*. Nilai RAO yang dihasilkan dok apung akibat *break waters* sangat kecil akibat efek redaman yang ditimbulkan gerakan dok apung, sedangkan untuk dermaga awal nilai RAO yang dihasilkan relatif besar akibat adanya sisi terbuka dermaga karena dimensi lebih kecil dari *break waters* sehingga gelombang tidak terpantul dan tidak meredam gerakan.

Adapun untuk gerakan rotasional juga terdapat beberapa gerakan dok apung yang mengakibatkan perbedaan yang signifikan antara dok apung konfigurasi dermaga awal dengan dermaga sebagai *break waters*. Perbedaan signifikan RAO's tersebut ada pada gerakan rotasi sumbu-y (*pitch*) dan rotasi sumbu-z (*yaw*) dengan kondisi pembebanan gelombang arah  $-90^{\circ}$ . Untuk mengetahui tren dan nilai perbedaan yang didapatkan, diberikan grafik perbandingan seperti pada gambar berikut.



Gambar 5.14: Perbandingan *pitching* RAO's dermaga awal dengan dermaga sebagai *break waters*.



Gambar 5.15: Perbandingan *yawing* RAO's dermaga awal dengan dermaga sebagai *break waters*.

Pada saat yang sama, baik gerakan *pitch* maupun *yaw* dok apung untuk kasus dermaga sebagai *break waters* memiliki nilai RAO's mendekati nol (0) seperti yang ditampilkan pada gambar 5.8 dan 5.9. Lain kasus pada dermaga awal yang memiliki nilai RAO *pitch* dan *yaw* maksimal berturut-turut 0,19 m/m dan 0,23 m/m. Nilai mendekati nol yang didapatkan pada kasus *break waters* menunjukkan bahwa terjadi efek persebaran dari *bank* (dermaga) yang merata sehingga membuat distribusi gaya luar yang terjadi juga merata. Gerakan dok apung yang terjadi mendapatkan redaman yang cukup besar akibat *bank effects*.

Keunikan yang didapatkan dalam analisis yang telah dilakukan adalah selisih perbedaan nilai RAO's signifikan terjadi hanya pada gerakan *manouvering* (*surge* dan *yaw*) dan gerakan *sea keeping* (*pitch*) dengan arah pembebanan gelombang  $-90^0$ . Gaya yang ditimbulkan gelombang dari salah satu sisi dok apung membuat aktifitas gerakan untuk dok apung mengangguk, maju dan mundur serta membelok terhambat hingga mendekati diam. Hasil analisis perbandingan secara lengkap disajikan pada lembar terlampir.

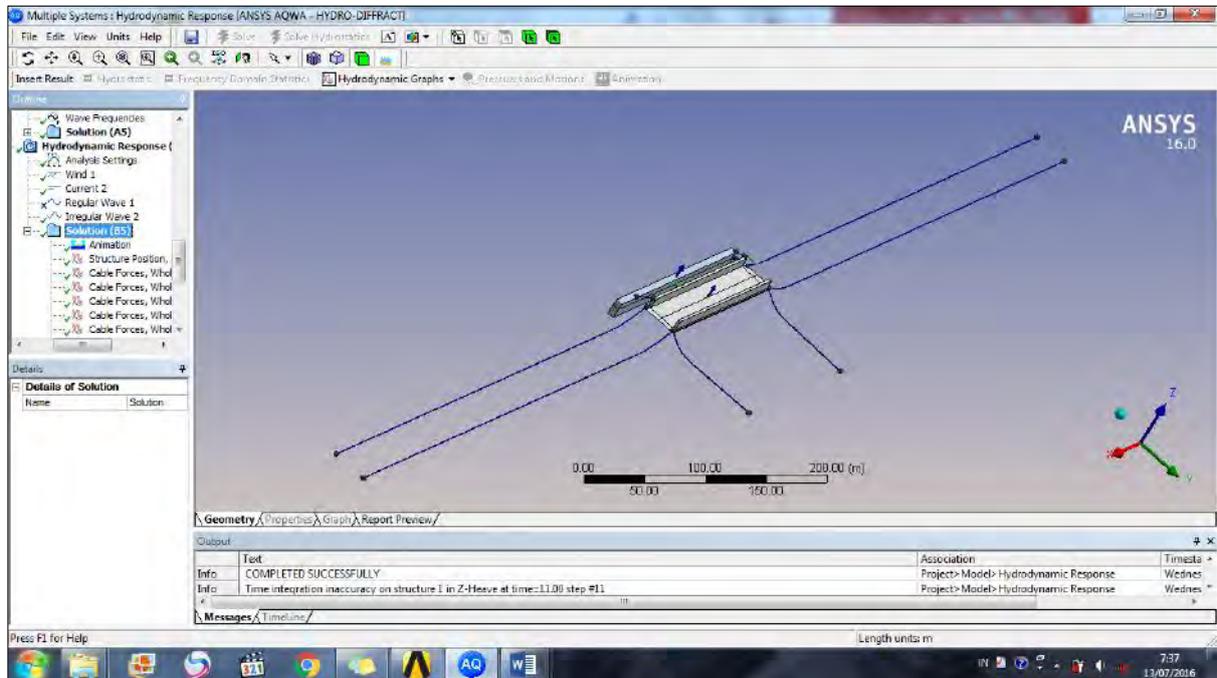
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## Lampiran

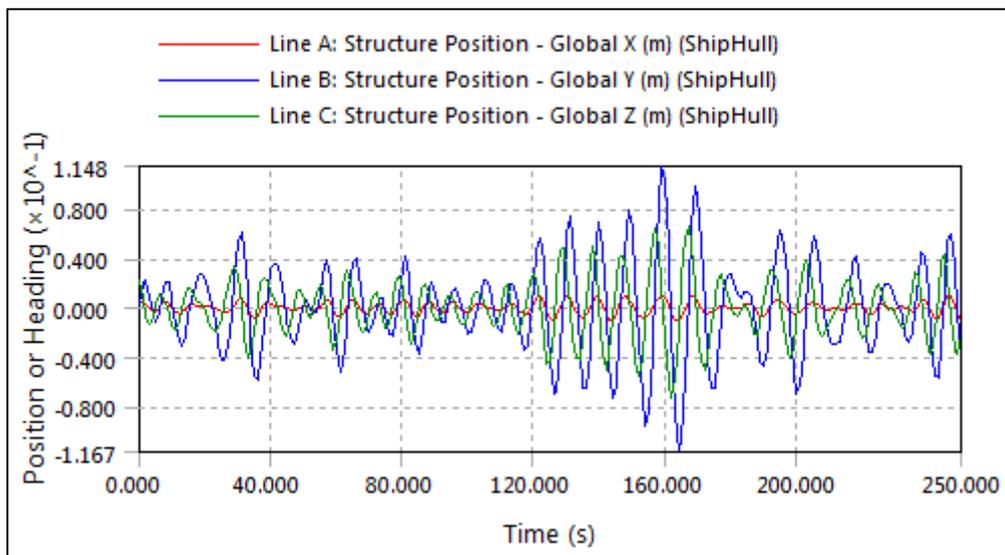
- Contoh hasil tampilan running *ansys aqwa* durasi 250 sekon pada arah gaya eksternal kolinier  $90^0$ ;
- Hasil perbandingan dimensi dan penempatan dermaga baru (*break water*);
- Hasil Perbandingan variasi jarak dermaga;
- Hasil Perbandingan variasi kedalaman pada kondisi muatan balas penuh;

Contoh hasil tampilan running *ansys aqwa* durasi 250 sekon pada arah gaya eksternal kolinier  $90^0$ ;

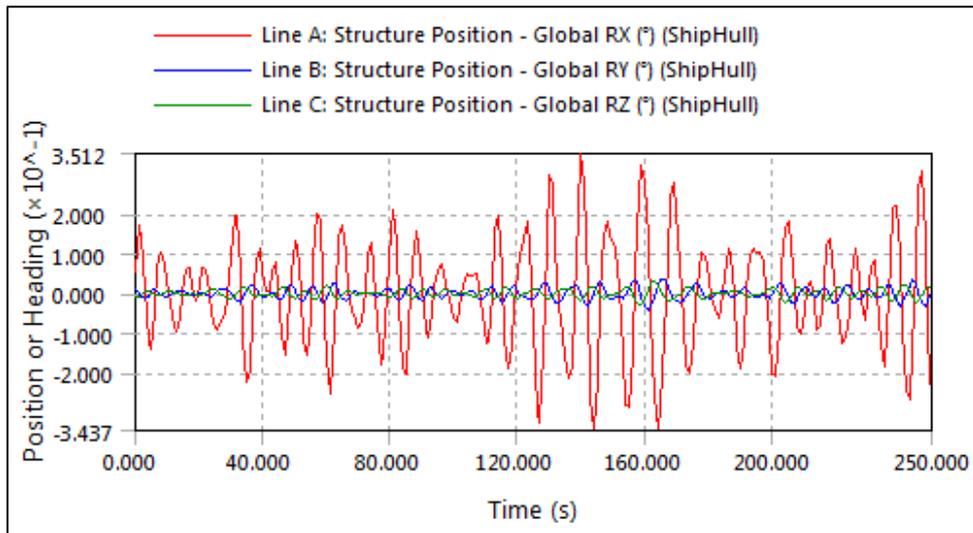
Beberapa luaran dalam analisis dok apung melalui perangkat lunak *ansys aqwa*, diantaranya perpindahan dan rotasi gerakan, akselerasi gerakan dan tegangan (*tension*) yang disajikan dalam bentuk grafik fungsi waktu. Berikut merupakan tampilan model yang akan dilakukan analisis pada gaya eksternal kolinier  $90^0$  dalam gelombang ireguler durasi 250 sekon beserta hasil yang disajikan dalam grafik fungsi waktu (*time series*).



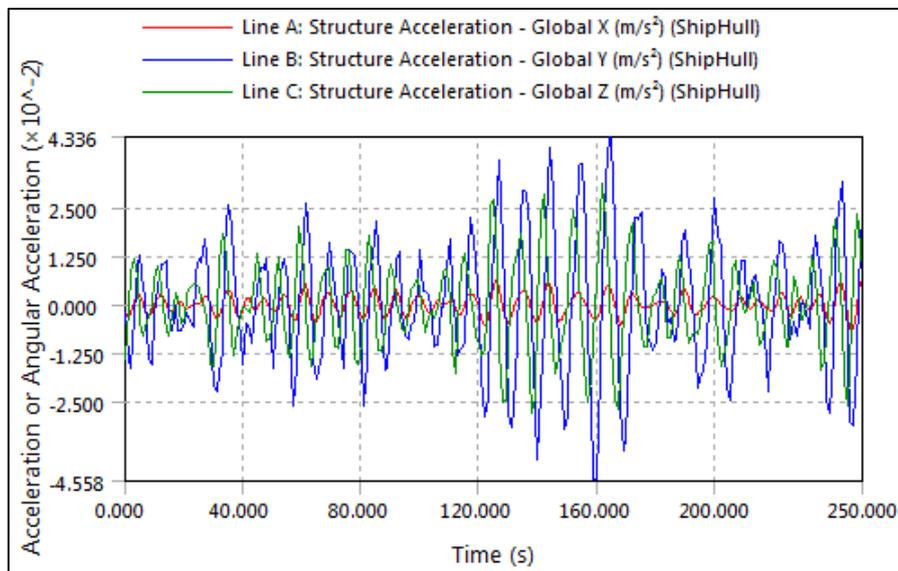
Gambar 1: Pemodelan Sistem Penambatan Dok Apung.



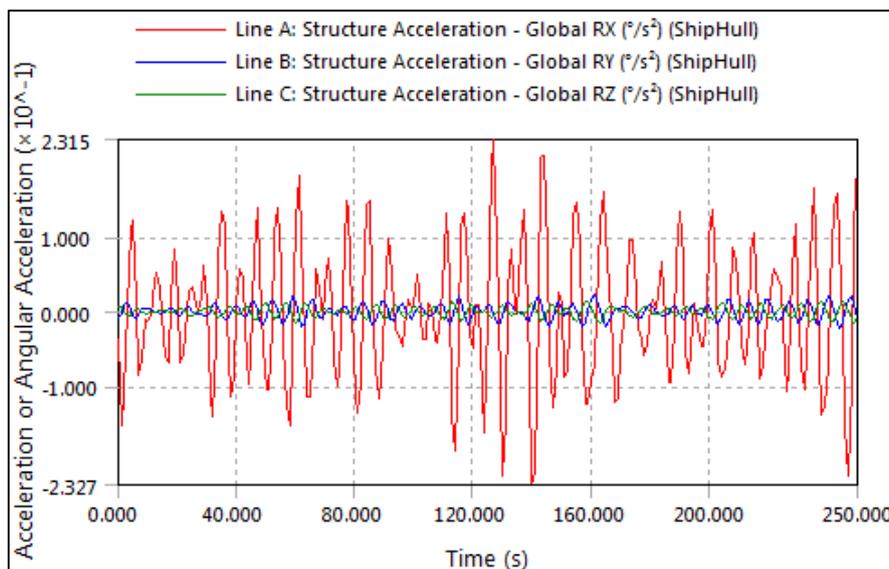
Gambar 2: Grafik *time series* perpindahan model dalam gerakan translasi.



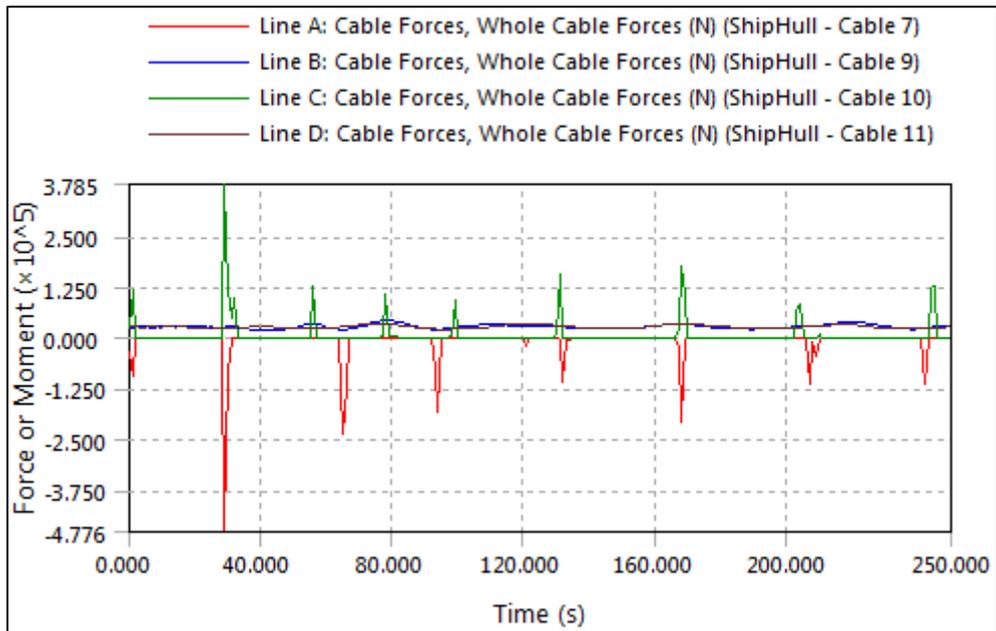
Gambar 3: Grafik *time series* rotasi model dalam gerakan rotasional.



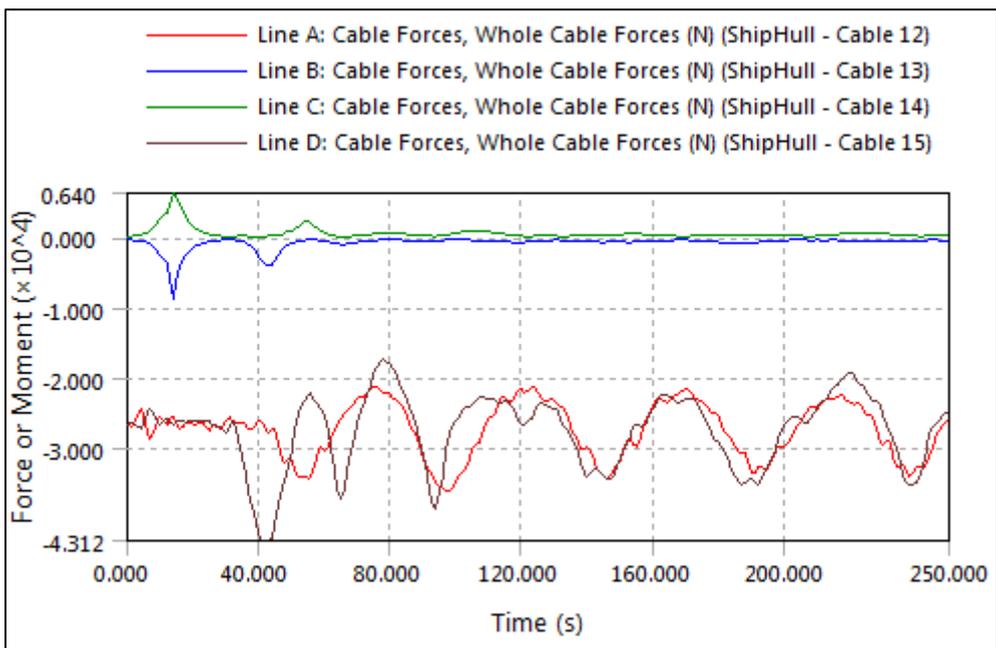
Gambar 4: Grafik *time series* akselerasi model dalam gerakan translasi.



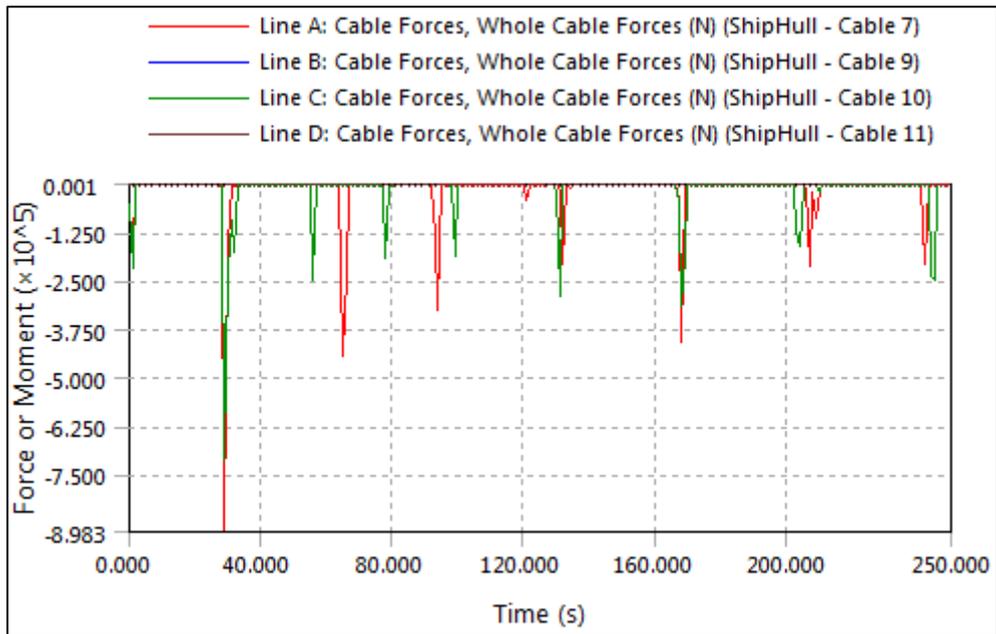
Gambar 5: Grafik *time series* akselerasi model dalam gerakan rotasional.



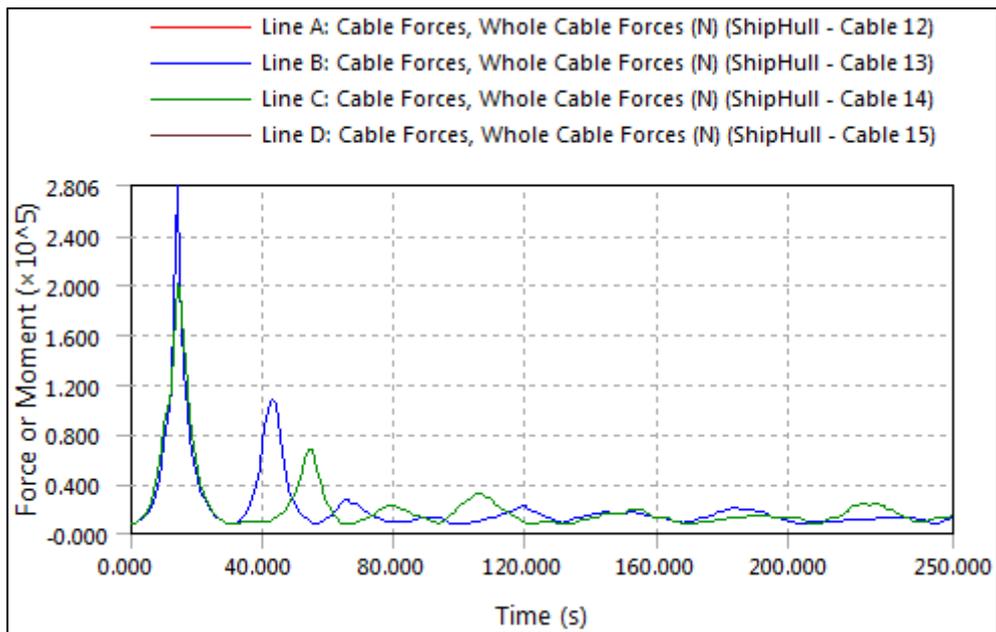
Gambar 6: Grafik *time series, force* sistem tambat model pada kabel 7, 9, 10, dan 11 akibat gerakan *surge*.



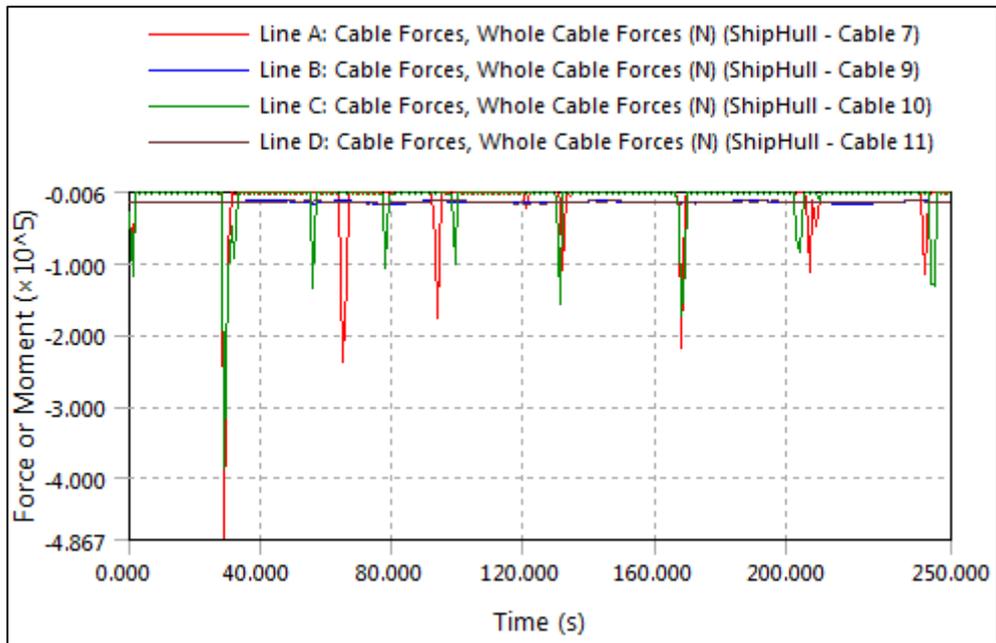
Gambar 7: Grafik *time series, force* sistem tambat model pada kabel 12, 13, 14, dan 15 akibat gerakan *surge*.



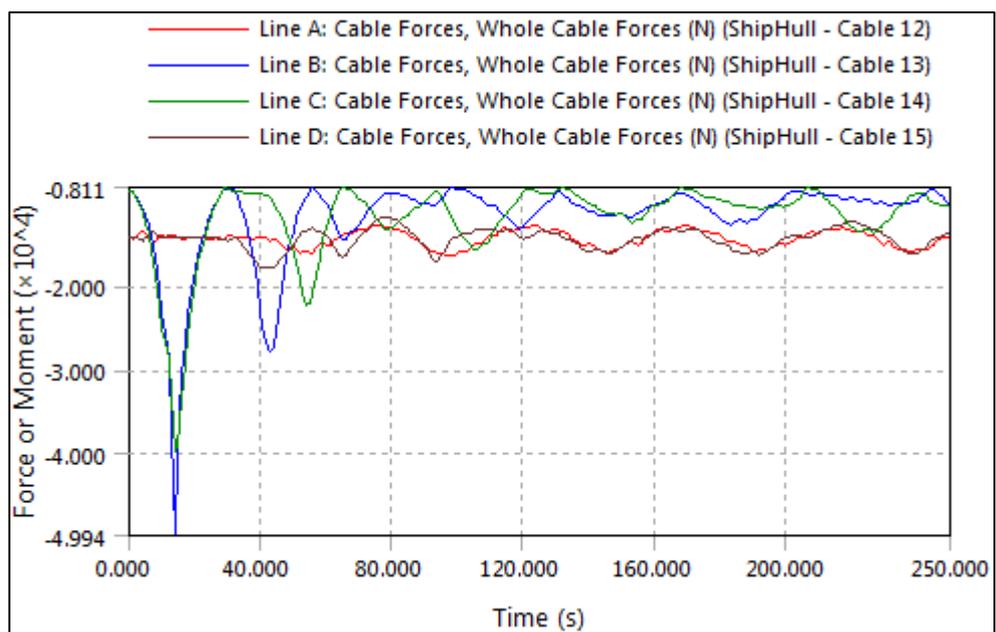
Gambar 8: Grafik *time series, force* sistem tambat model pada kabel 7, 9, 10, dan 11 akibat gerakan *sway*.



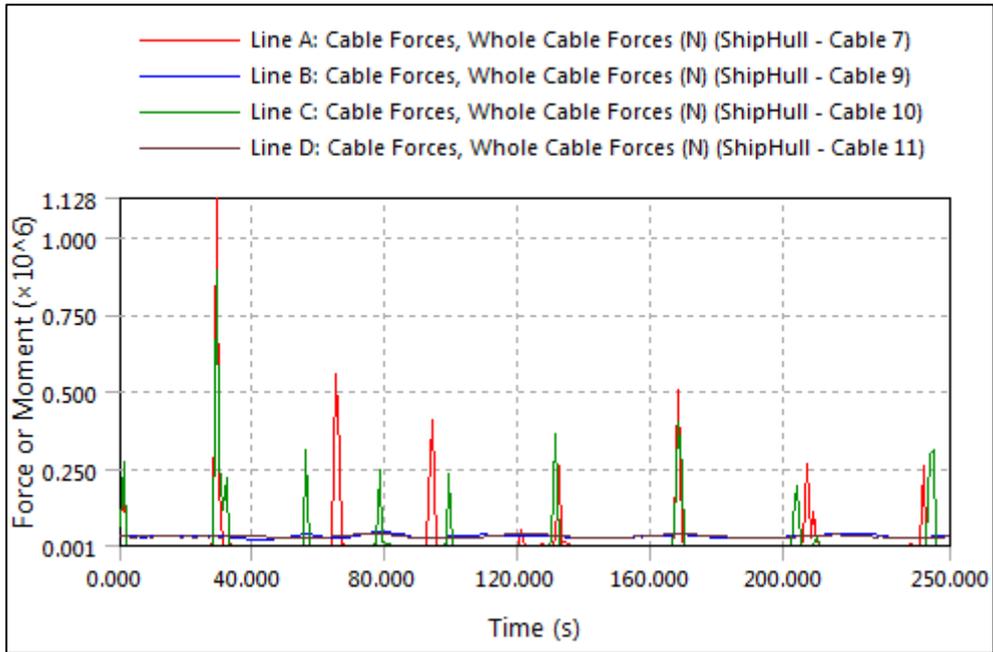
Gambar 9: Grafik *time series, force* sistem tambat model pada kabel 12, 13, 14, dan 15 akibat gerakan *sway*.



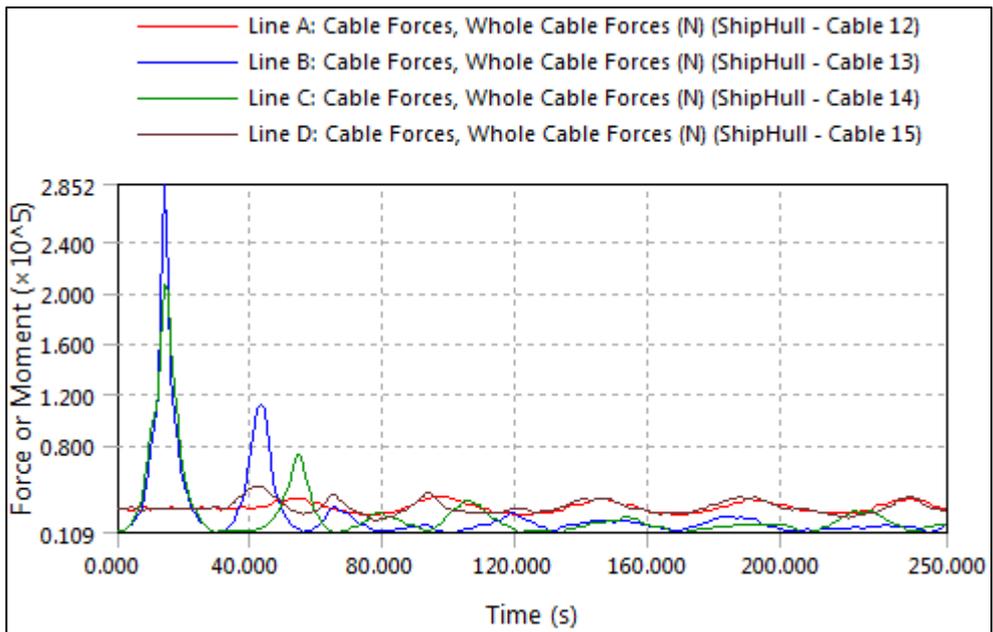
Gambar 10: Grafik *time series, force* sistem tambat model pada kabel 7, 9, 10, dan 11 akibat gerakan *heave*.



Gambar 11: Grafik *time series, force* sistem tambat model pada kabel 12, 13, 14, dan 15 akibat gerakan *sway*.

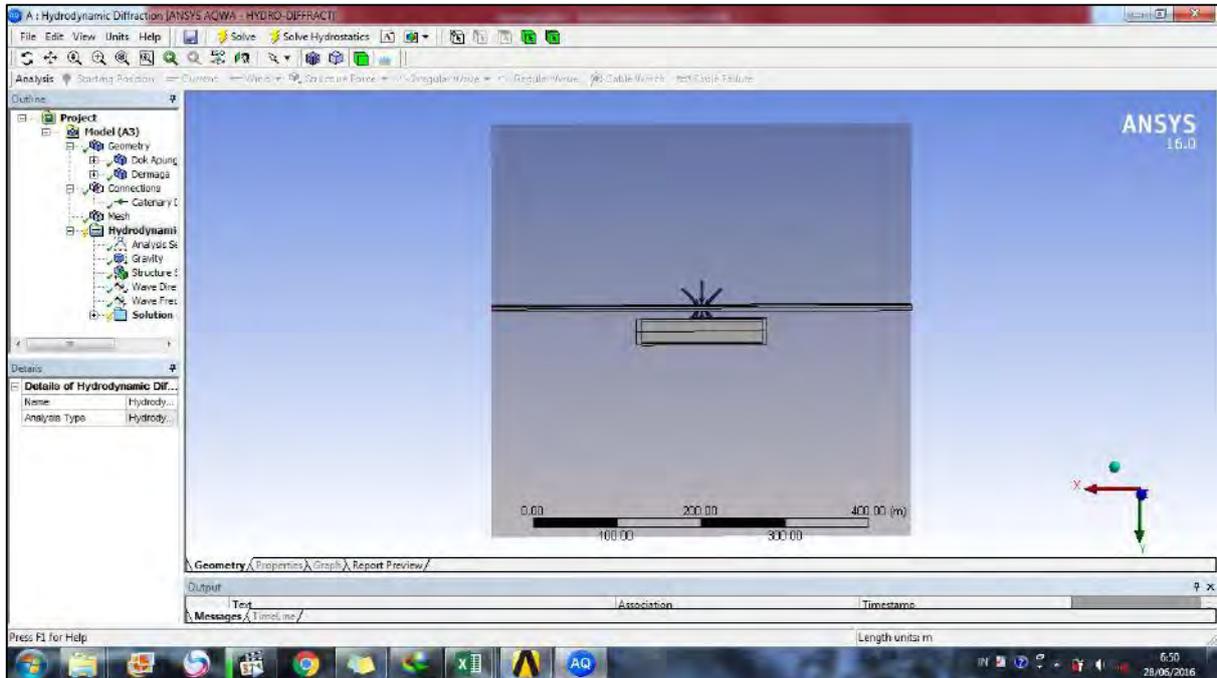


Gambar 12: Grafik *time series, tension* sistem tambat model pada kabel 7, 9, 10, dan 11.



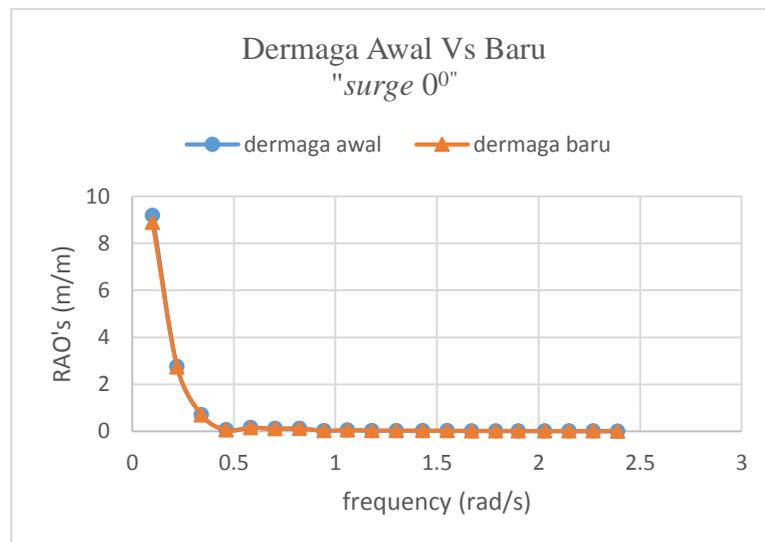
Gambar 13: Grafik *time series, tension* sistem tambat model pada kabel 12, 13, 14, dan 15.

Hasil perbandingan dimensi dan penempatan dermaga baru (*break water*);

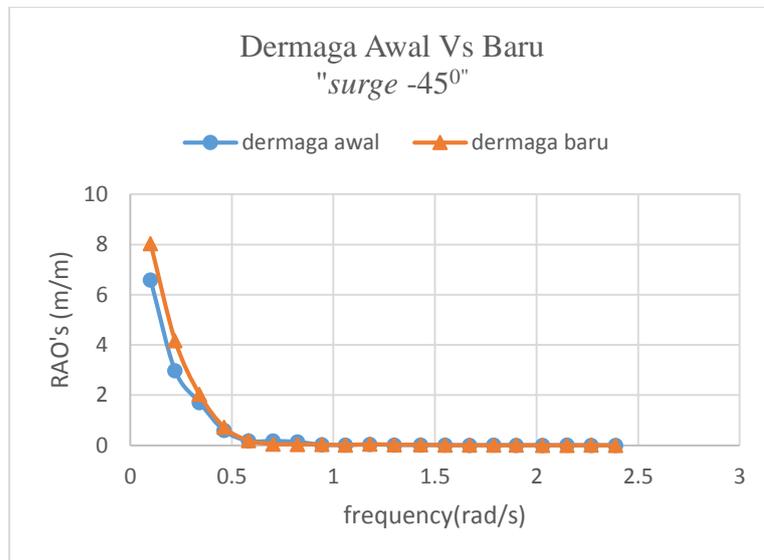


Gambar 1: Dermaga sebagai *break water*.

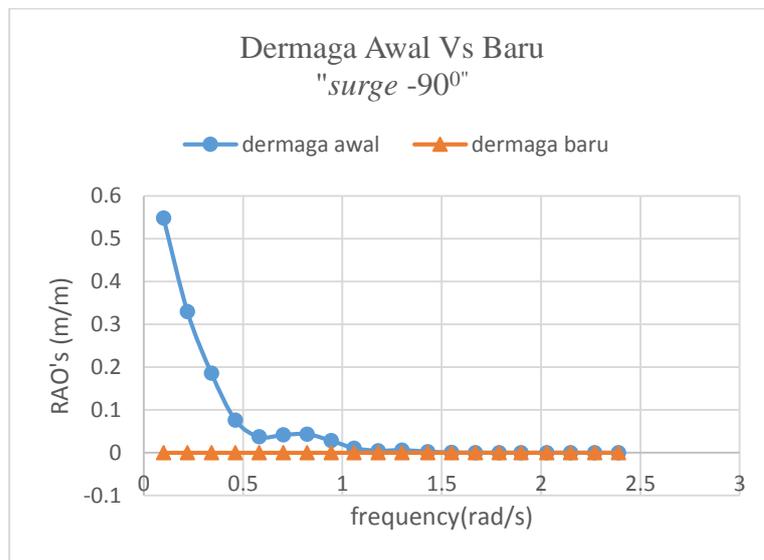
Perbandingan gerakan translasi pada sudut datang gelombang  $0^0$ ,  $-45^0$ ,  $-90^0$ , dan  $-135^0$ :



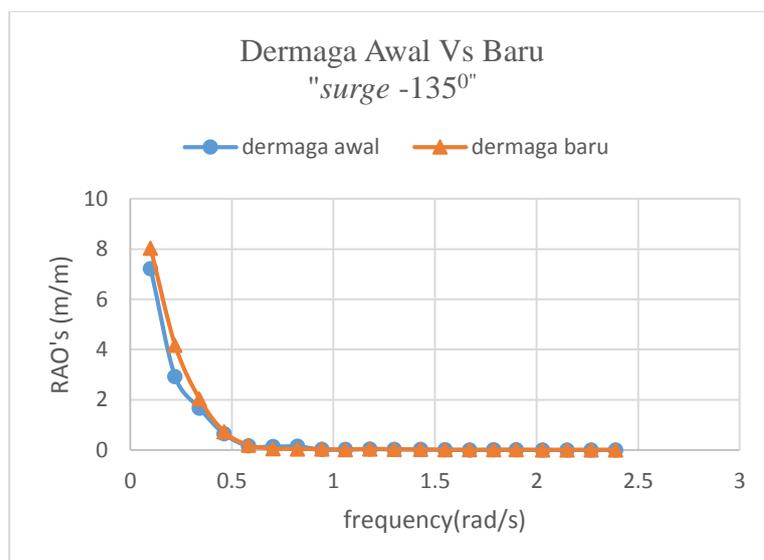
Gambar 2: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-x sudut datang  $0^0$ .



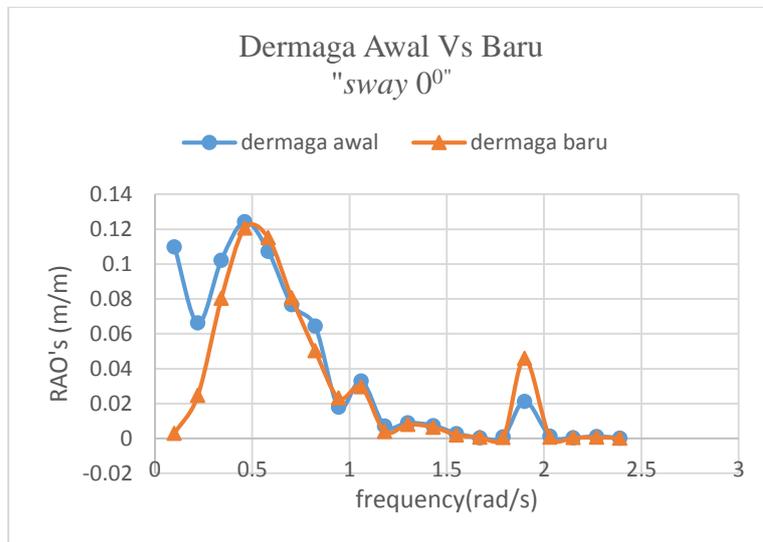
Gambar 3: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-x sudut datang -45°.



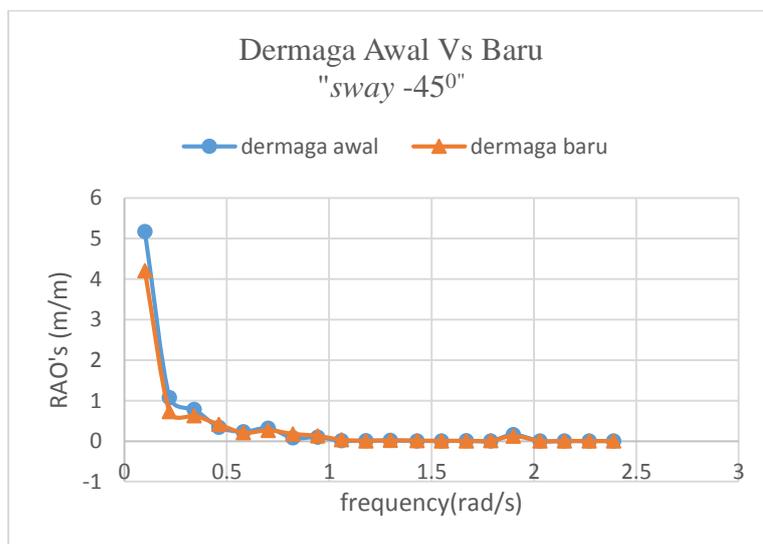
Gambar 4: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-x sudut datang -90°.



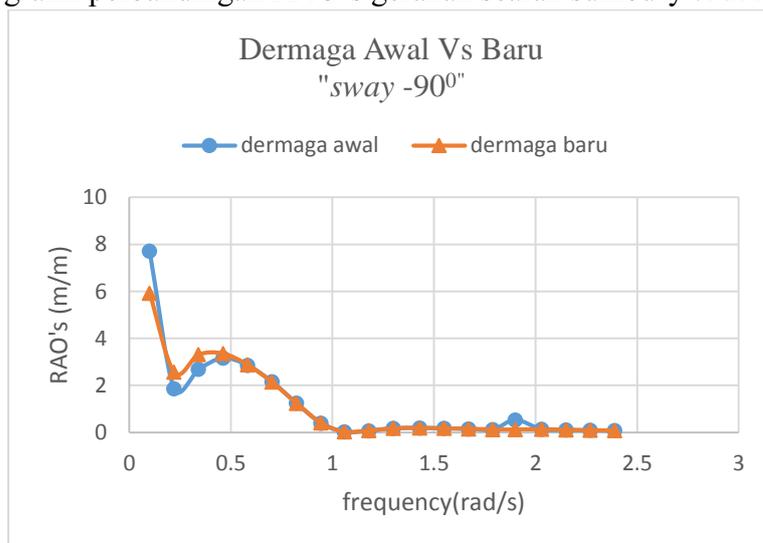
Gambar 5: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-x sudut datang -135°.



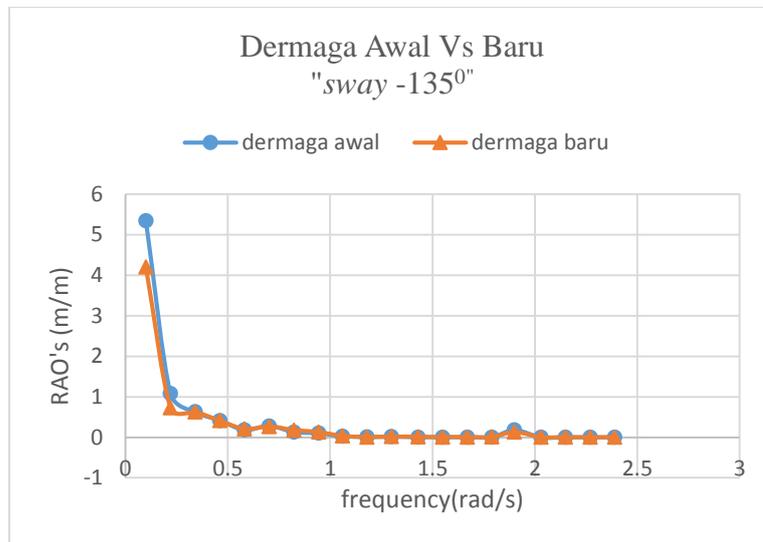
Gambar 6: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-y sudut datang  $0^{\circ}$ .



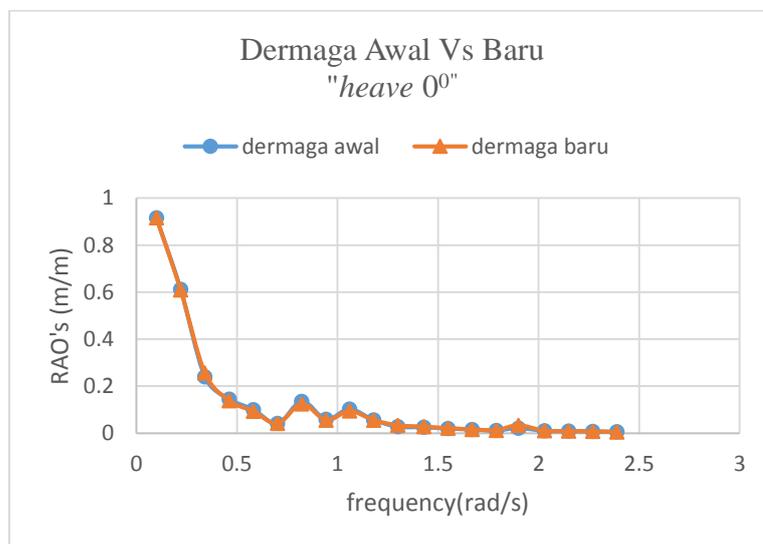
Gambar 7: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-y sudut datang  $-45^{\circ}$ .



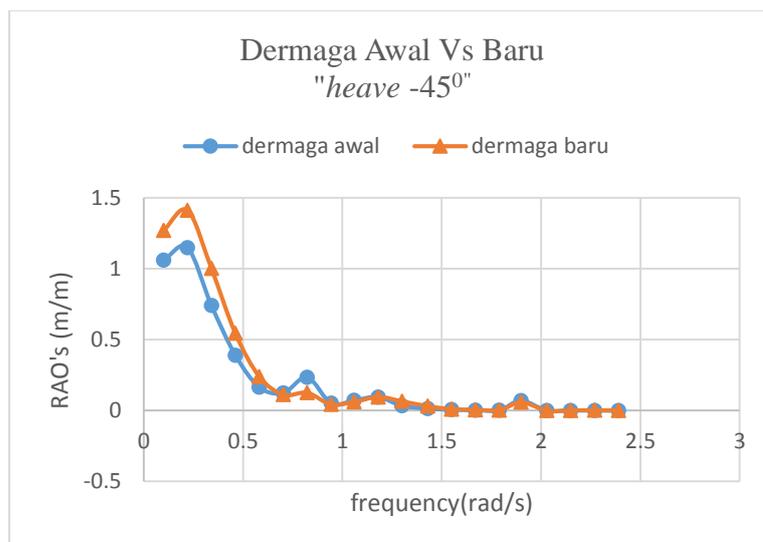
Gambar 8: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-y sudut datang  $-90^{\circ}$ .



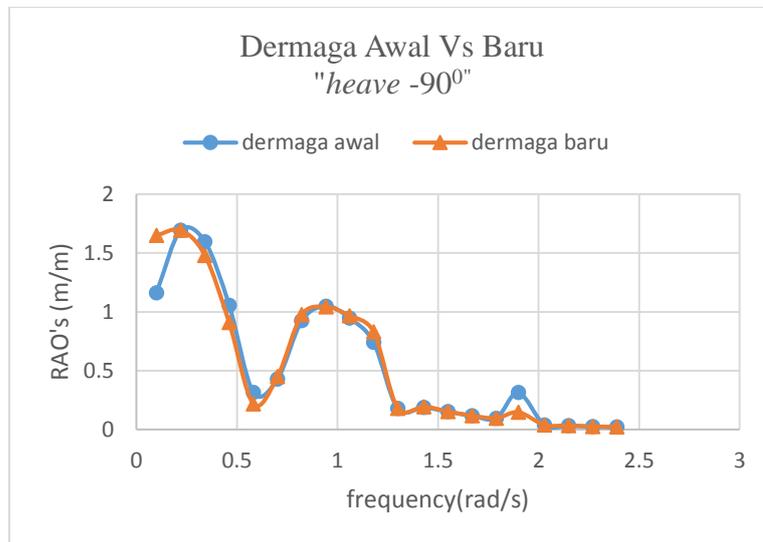
Gambar 9: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-y sudut datang  $-135^{\circ}$ .



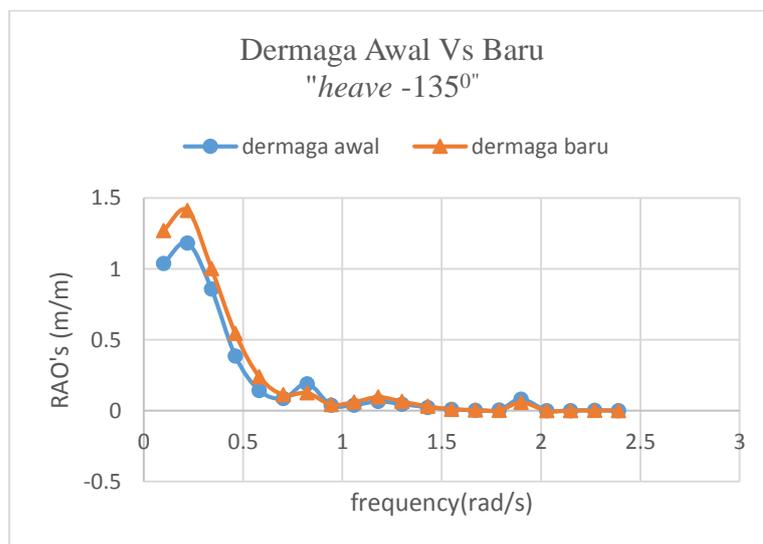
Gambar 10: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-z sudut datang  $0^{\circ}$ .



Gambar 11: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-z sudut datang  $-45^{\circ}$ .

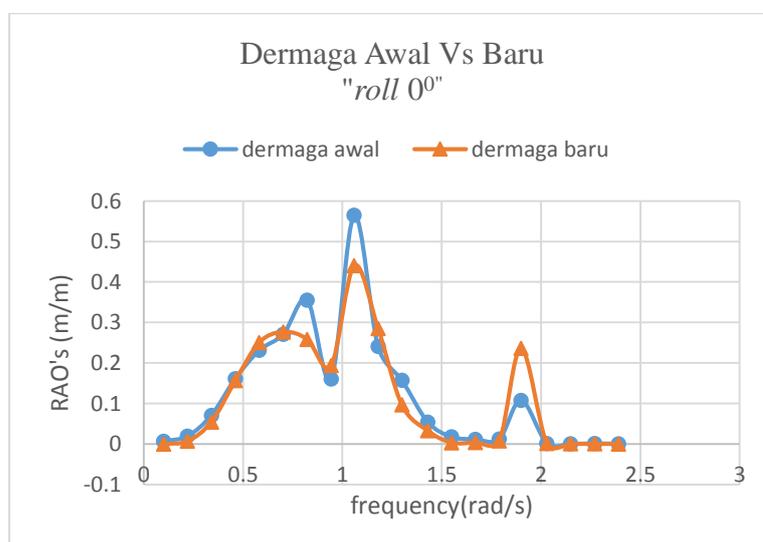


Gambar 12: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-z sudut datang  $-90^{\circ}$ .

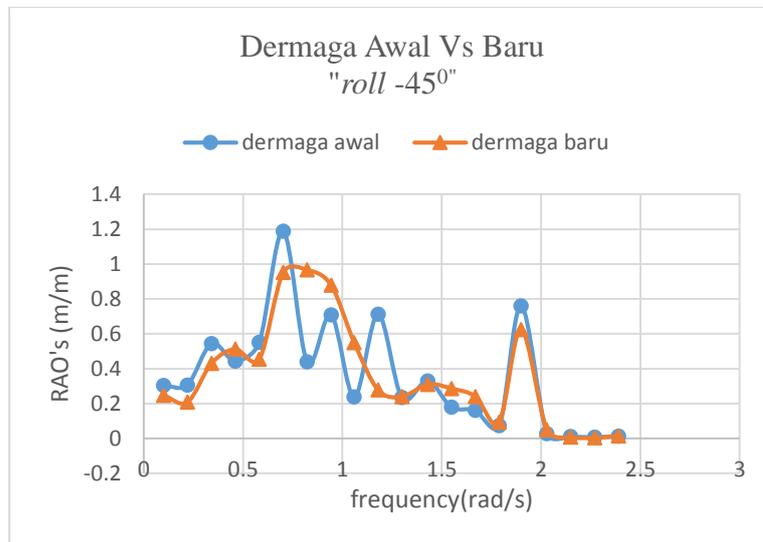


Gambar 13: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-z sudut datang  $-135^{\circ}$ .

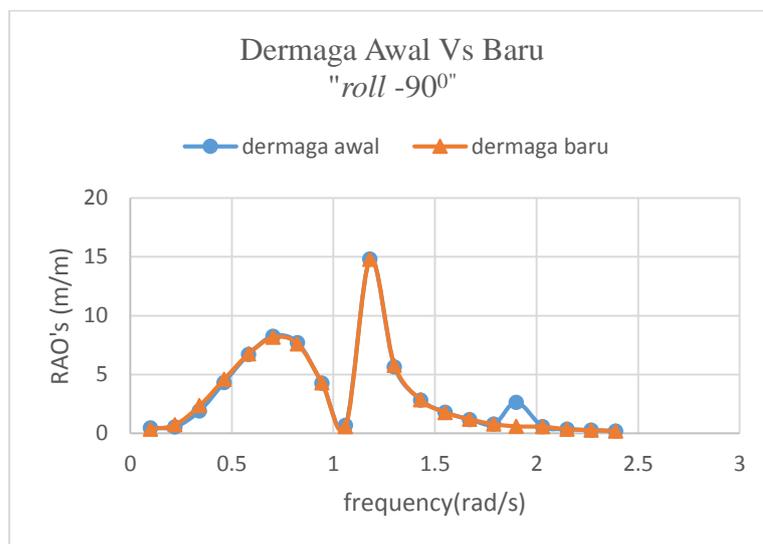
Perbandingan gerakan Rotasi pada sudut datang gelombang  $0^{\circ}$ ,  $-45^{\circ}$ ,  $-90^{\circ}$ , dan  $-135^{\circ}$ :



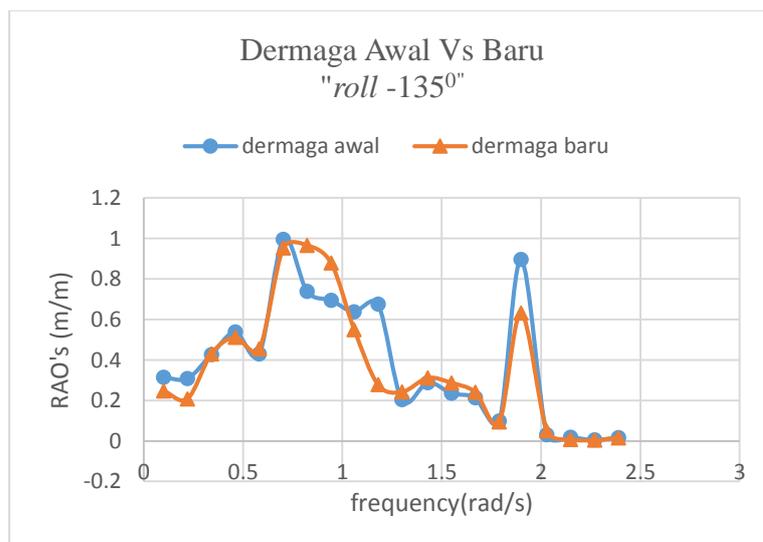
Gambar 14: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-x sudut datang  $0^{\circ}$ .



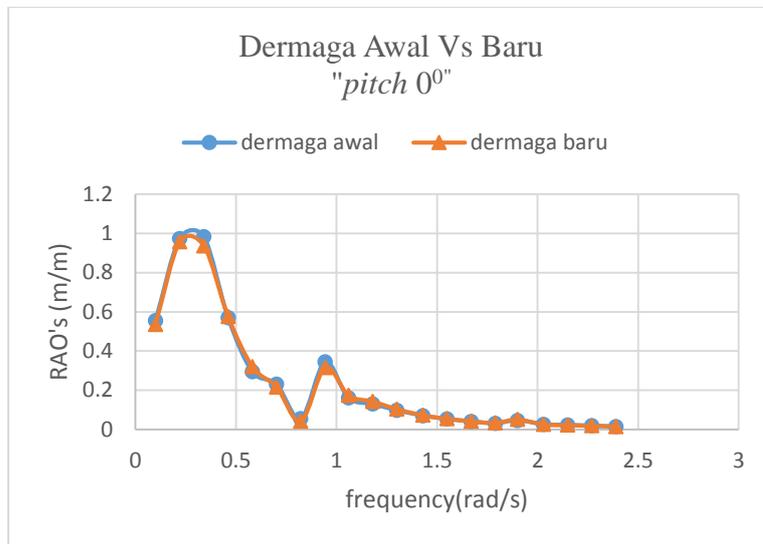
Gambar 15: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-x sudut datang  $-45^{\circ}$ .



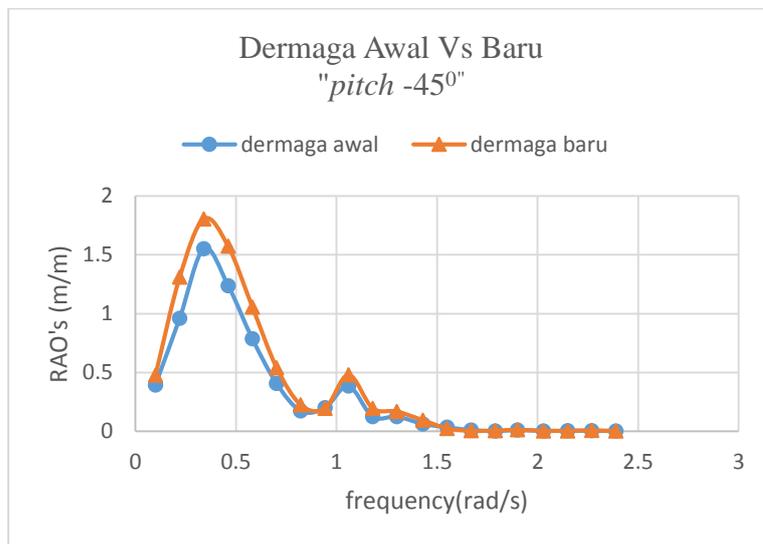
Gambar 16: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-x sudut datang  $-90^{\circ}$ .



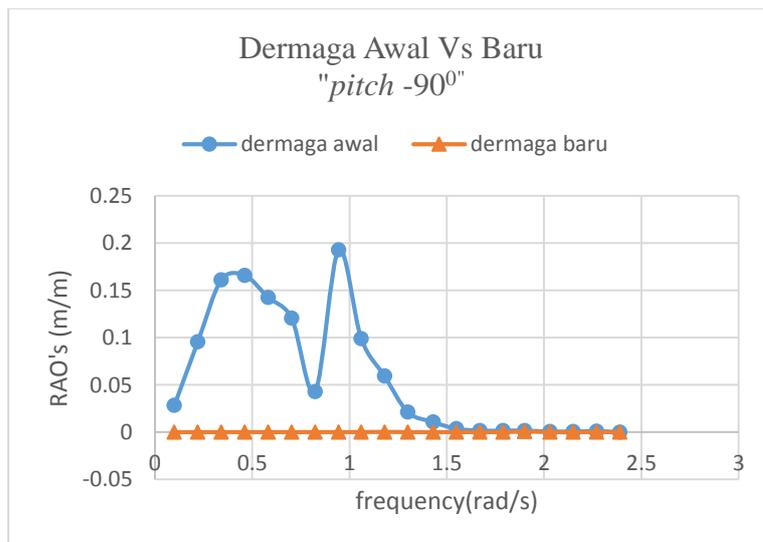
Gambar 17: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-x sudut datang  $-135^{\circ}$ .



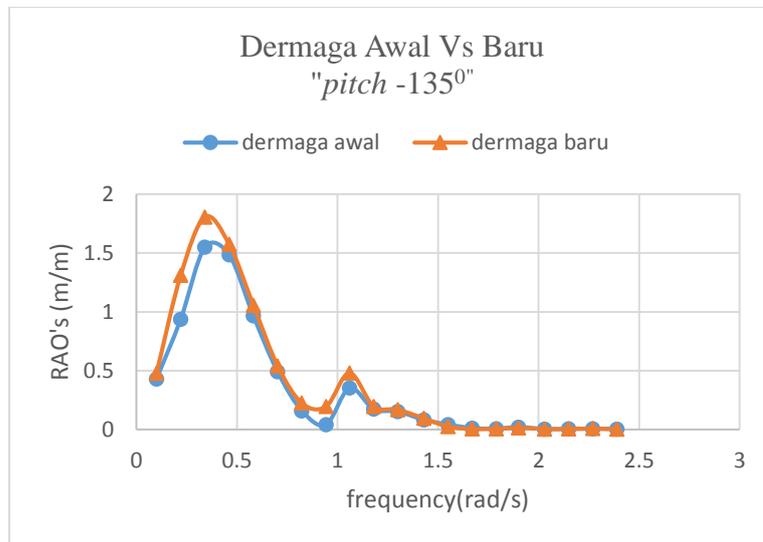
Gambar 18: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-y sudut datang 0°.



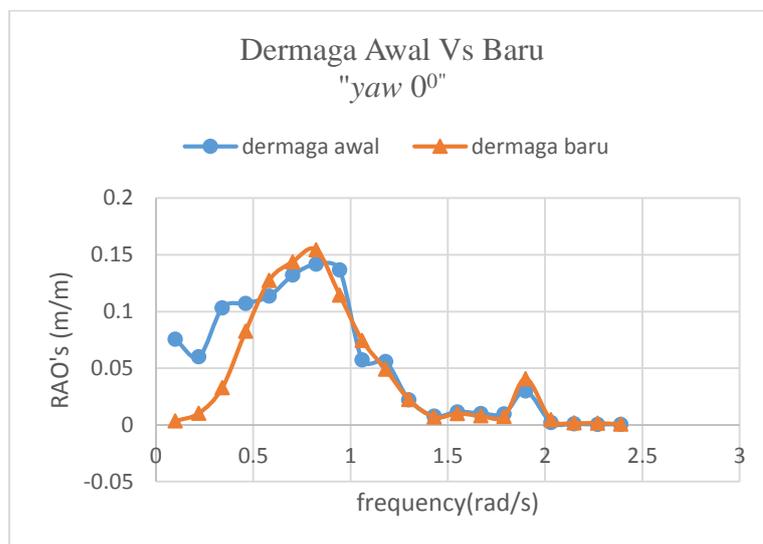
Gambar 19: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-y sudut datang -45°.



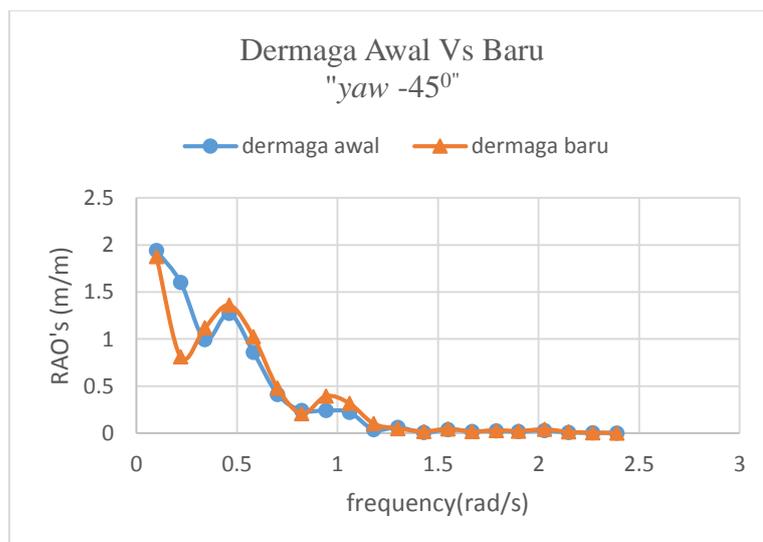
Gambar 20: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-y sudut datang -90°.



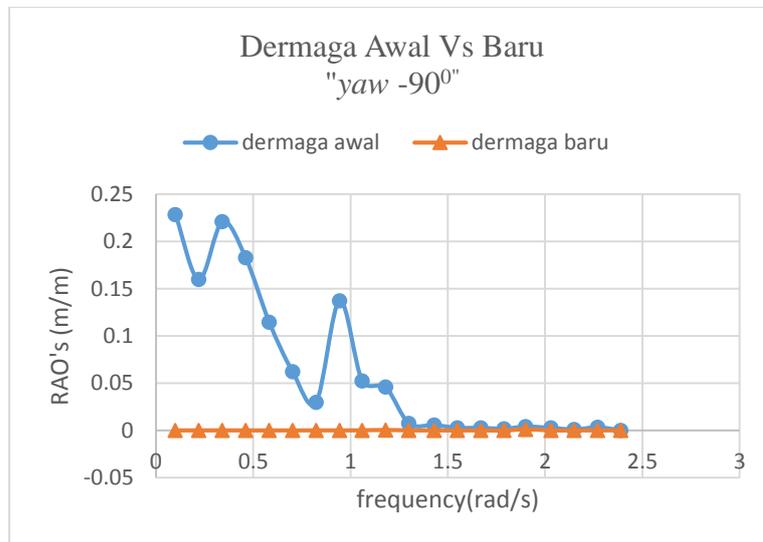
Gambar 21: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-y sudut datang  $-135^{\circ}$ .



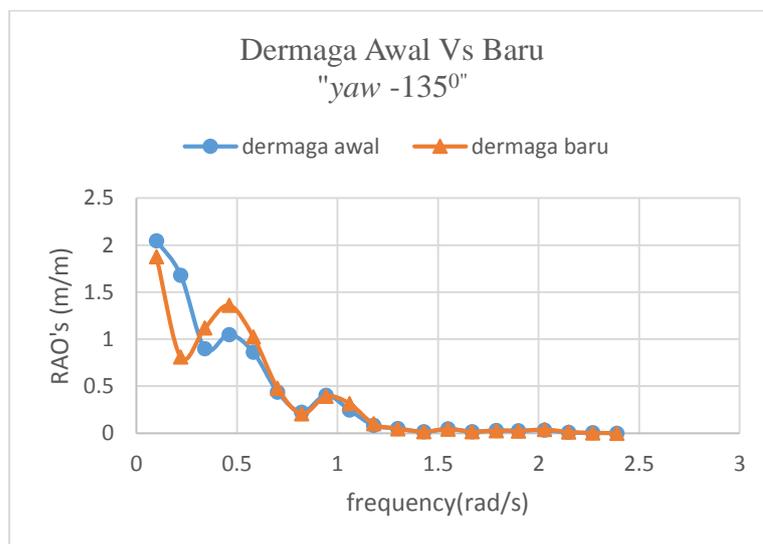
Gambar 22: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-z sudut datang  $0^{\circ}$ .



Gambar 23: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-z sudut datang  $-45^{\circ}$ .



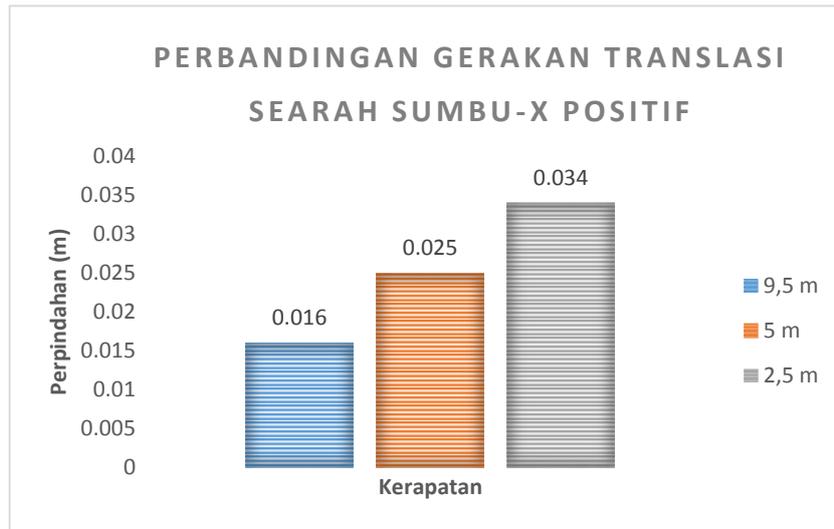
Gambar 24: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-z sudut datang  $-90^{\circ}$ .



Gambar 25: grafik perbandingan RAO's gerakan searah sumbu-z sudut datang  $-135^{\circ}$ .

Hasil Perbandingan variasi jarak dermaga;

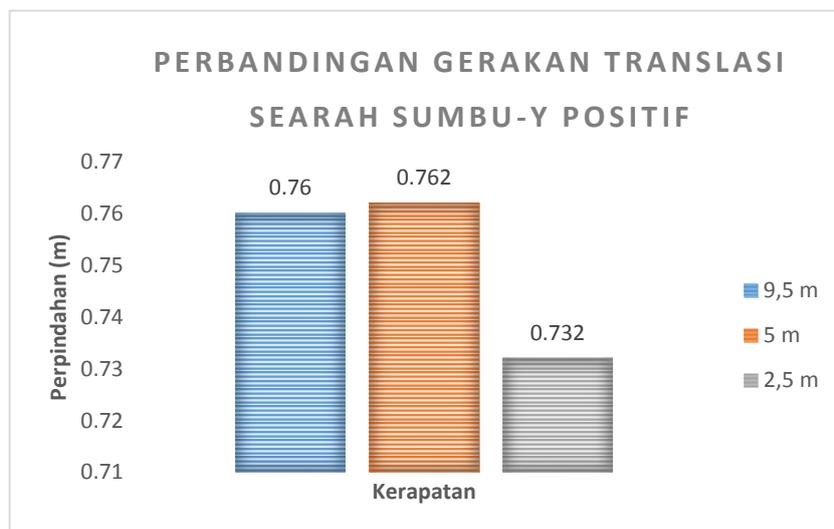
Berikut merupakan diagram perbandingan gerakan dok apung secara translasi maupun rotasi terhadap tiap-tiap jarak dengan dermaga pada saat gaya eksternal kolinier  $-90^{\circ}$ :



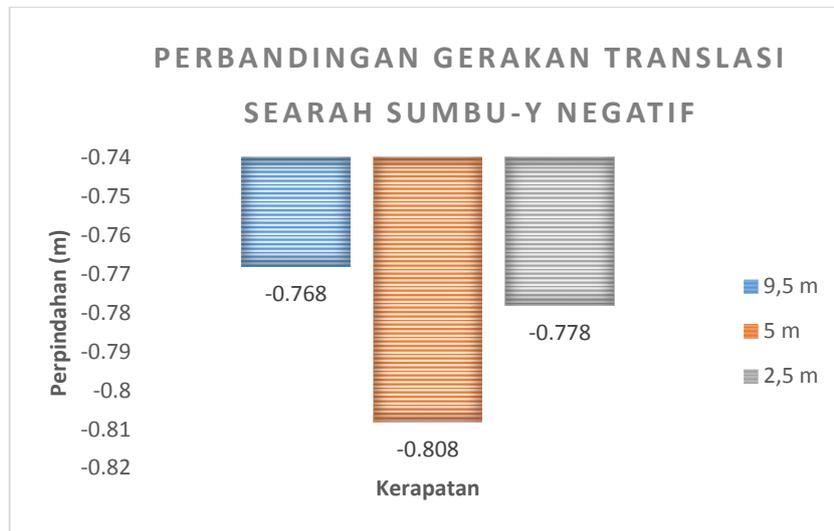
Gambar 1: Diagram perbandingan perpindahan dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-x positif.



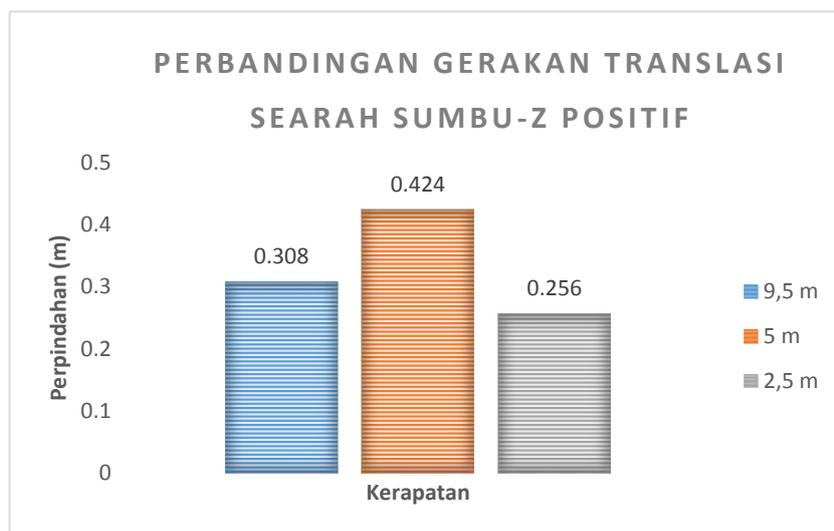
Gambar 2: Diagram perbandingan perpindahan dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-x negatif.



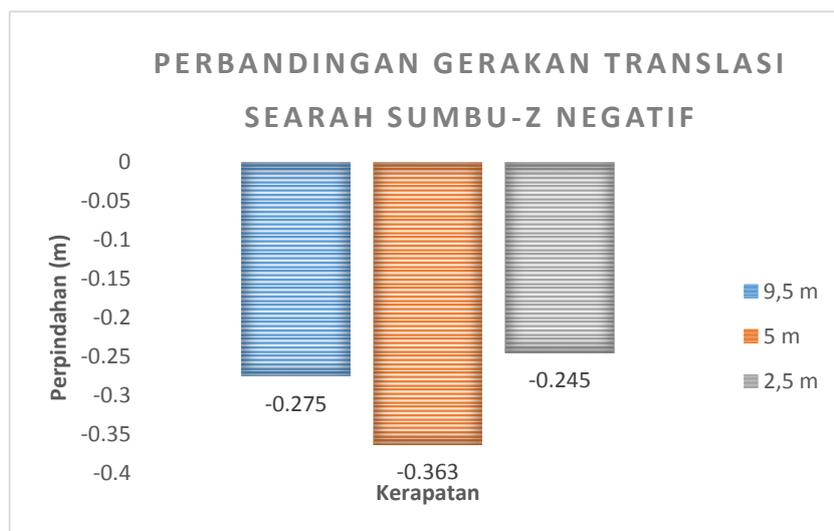
Gambar 3: Diagram perbandingan perpindahan dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-y positif.



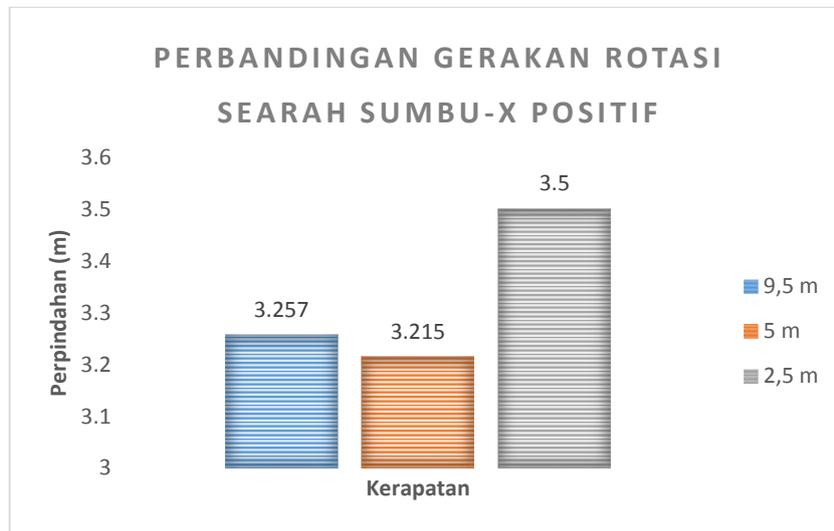
Gambar 4: Diagram perbandingan perpindahan dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-y negatif.



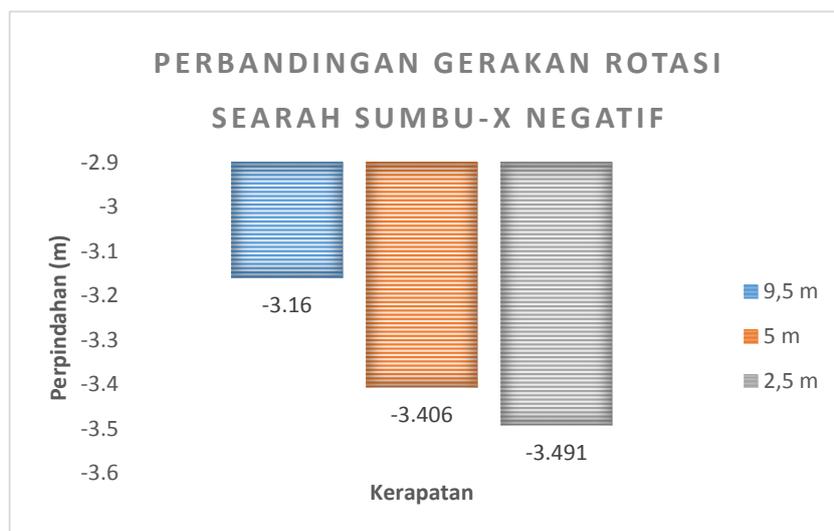
Gambar 5: Diagram perbandingan perpindahan dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-z positif.



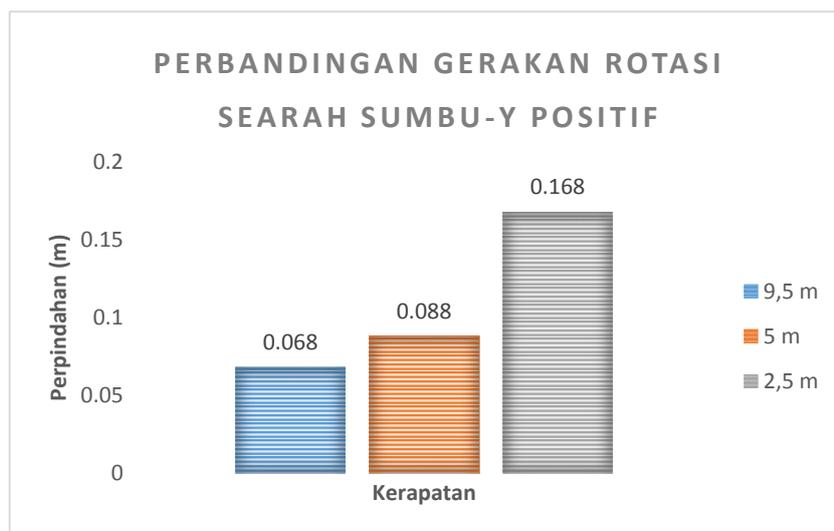
Gambar 6: Diagram perbandingan perpindahan dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-z negatif.



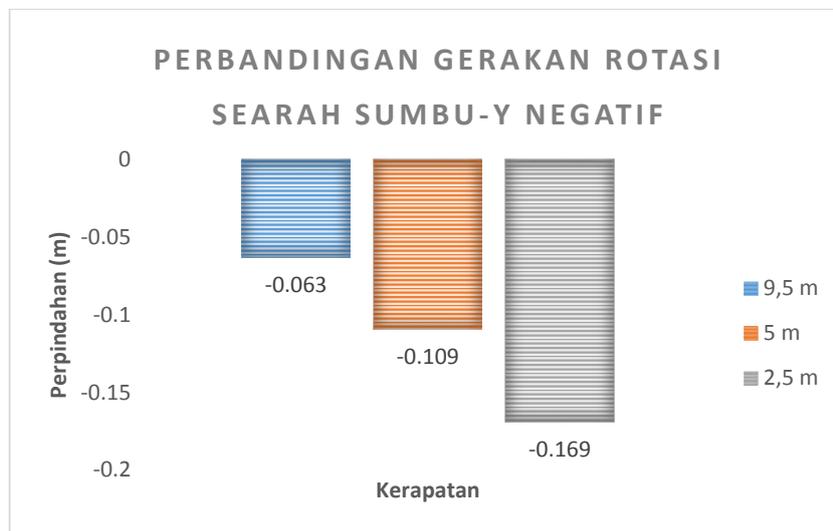
Gambar 7: Diagram perbandingan rotasi dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-x positif.



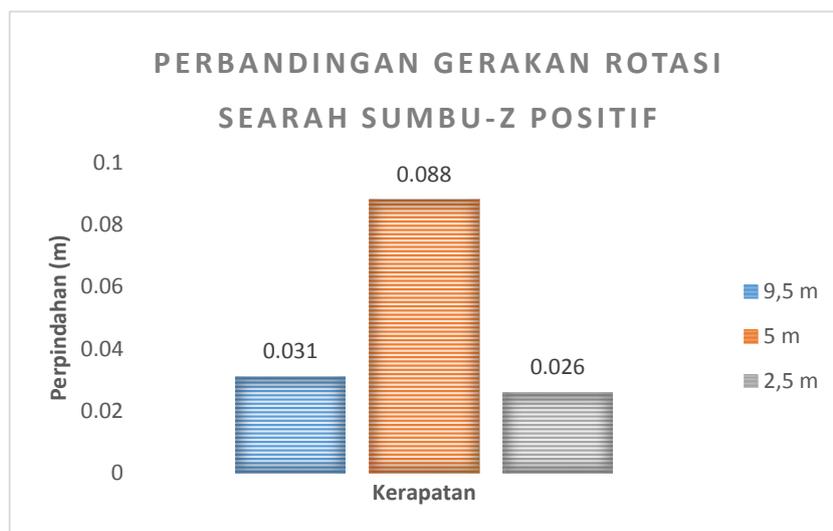
Gambar 8: Diagram perbandingan rotasi dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-x negatif.



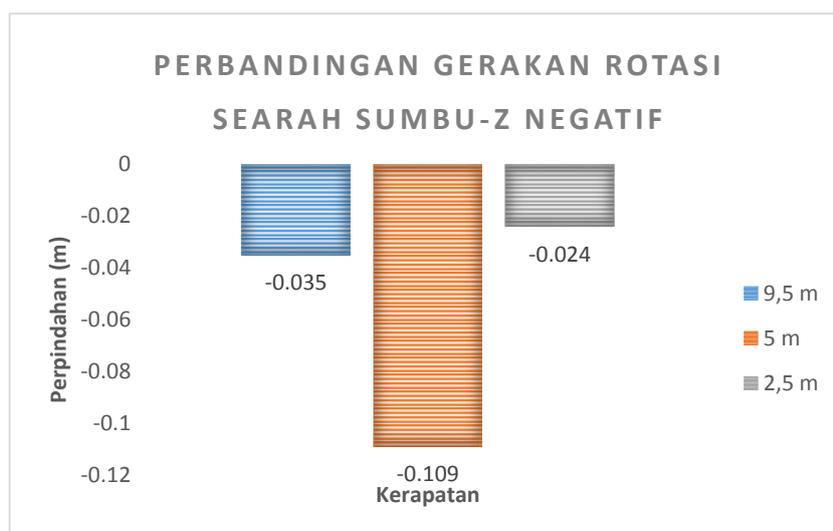
Gambar 9: Diagram perbandingan rotasi dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-y positif.



Gambar 10: Diagram perbandingan rotasi dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-y negatif.



Gambar 11: Diagram perbandingan rotasi dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-z positif.



Gambar 12: Diagram perbandingan rotasi dok apung terhadap kerapatan dermaga pada arah sumbu-z negatif.

Hasil Perbandingan variasi kedalaman pada kondisi muatan balas penuh;

Analisis gerakan dan tegangan sistem tambat pada kedalaman 10 m dan 30 m dilakukan untuk mengetahui fenomena dari *squat effects*. Variasi kedalaman 10 m dan 30 m dibandingkan dengan durasi analisis 100 sekon, dan untuk mengetahui lebih detail analisis kedalaman 30 m dilakukan dalam durasi 10800 sekon. Selain sajian dalam bentuk diagram yang ditulis pada pembahasan, nilai hasil analisis lebih lengkap terdapat pada tabel berikut.

Tabel 1: Rekapitulasi perpindahan dan rotasi model pada variasi kedalaman.

Depth	duration	Perpindahan (m)						Rotasi (deg)					
		Surge		Sway		Heave		Roll		Pitch		Yaw	
		max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
10 m	100 s	0.007	-0.006	0.148	-0.118	0.062	-0.056	0.167	-0.174	0.007	-0.007	0.016	-0.016
30 m	10800 s	-0.01	0.009	0.29	-0.268	0.457	-0.434	0.77	-0.83	0.025	-0.026	0.015	-0.015
30 m	100s	0.004	-0.004	0.138	-0.138	0.175	-0.179	0.418	-0.458	0.014	-0.014	0.007	-0.008

Tabel 2: Rekapitulasi percepatan model pada variasi kedalaman.

Depth	duration	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )											
		Surge		Sway		Heave		Roll		Pitch		Yaw	
		max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min
10 m	100 s	0.004	-0.004	0.086	-0.101	0.025	-0.024	0.152	-0.16	0.152	-0.16	0.025	-0.024
30 m	10800 s	0.006	-0.006	0.236	-0.287	0.197	-0.213	0.731	-0.687	0.014	-0.015	0.012	-0.012
30 m	100s	0.002	-0.002	0.143	-0.132	0.09	-0.084	0.352	-0.327	0.01	-0.009	0.008	-0.009

Tabel 3: Force dan Tension model pada kabel 7.

CABLE 7										
Depth	duration	Force (N)						Tension (N)		
		Surge		Sway		Heave		Tension (N)		
		max	min	max	min	max	min	max	min	max
10 m	100 s	-74.218	-721813	-54.329	-1307786	-61.191	-705919	1419362	110.473	
30 m	10800 s	-101.573	-673743	-155.202	-1319043	242660	-490.148	1419543	488.737	
30 m	100s	-176.96	-44428.6	-302.862	-92931	12265	-393.137	103733	523.422	

Tabel 4: Force dan Tension model pada kabel 9.

CABLE 9										
Depth	duration	Force (N)						Tension (N)		
		Surge		Sway		Heave		Tension (N)		
		max	min	max	min	max	min	max	min	max
10 m	100 s	368965	2299.46	337.071	-7315.04	-3606.19	-53126	372842	4276.93	
30 m	10800 s	419771	75975.8	1070.8	-1332.02	-33209.2	-77177.2	426807	82917.4	
30 m	100s	177563	170862	120.106	-679.064	-49311.2	-50524.7	184612	177835	

Tabel 5: Force dan Tension model pada kabel 10.

CABLE 10									
Depth	duration	Perpindahan (m)						Tension	
		Surge		Sway		Heave		max	min
		max	min	max	min	max	min		
10 m	100 s	731634	59.646	-40.86	-1315011	111.166	-595774	1419499	87.73
30 m	10800 s	663741	99.354	-158.952	-1312710	211538	-482.273	1419544	489.59
30 m	100s	45918.5	186.279	-324.313	-96053.1	12684.7	-386.13	107218	532.996

Tabel 6: Force dan Tension model pada kabel 11.

CABLE 11									
Depth	duration	Force (N)						Tension (N)	
		Surge		Sway		Heave		max	min
		max	min	max	min	max	min		
10 m	100 s	146269	1786.83	292.813	-1072.18	-3105.9	-32636.4	149865	3583.21
30 m	10800 s	433714	78800	1298.13	-1259.09	-33702.4	-78132.5	440666	85704.7
30 m	100s	178972	169410	47.963	-754.934	-49081.2	-50801.3	186042	176377

Tabel 7: Force dan Tension model pada kabel 12.

CABLE 12									
Depth	duration	Force (N)						Tension (N)	
		Surge		Sway		Heave		max	min
		max	min	max	min	max	min		
10 m	100 s	-3867.29	-122987	588.003	-152.145	-5420.14	-30295.9	126663	6658.41
30 m	10800 s	-77815	-403085	1513.53	-1431.3	-33693.2	-75303.8	409965	84799.7
30 m	100s	-170353	-179426	93.928	-754.743	-49290.9	-50849.6	186493	177343

Tabel 8: Force dan Tension model pada kabel 13.

CABLE 13									
Depth	duration	Force (N)						Tension (N)	
		Surge		Sway		Heave		max	min
		max	min	max	min	max	min		
10 m	100 s	-3867.29	-122987	2097019	-0.331	-2611.81	-320880	2110061	2611.81
30 m	10800 s	127.199	-29667.2	935474	-3023.29	-12118.7	-260501	971515	12490.8
30 m	100s	-566.947	-1264.87	39540.1	17227.9	-17156	-24634.3	46603.2	24319.8

Tabel 9: Force dan Tension model pada kabel 14.

CABLE 14									
Depth	duration	Force (N)						Tension (N)	
		Surge		Sway		Heave		max	min
		max	min	max	min	max	min		
10 m	100 s	64727.6	0.674	2096394	14.215	-1917.31	-329642	2110024	1917.39
30 m	10800 s	33843.5	-588.682	1041112	-17301.5	-8433.06	-273364	1076915	19256.3
30 m	100s	1369.12	567.171	42374.4	17233.2	-17158.4	-25433.2	49440	24325.2

Tabel 10: *Force* dan *Tension* model pada kabel 15.

CABLE 15									
Depth	duration	Force (N)						Tension (N)	
		Surge		Sway		Heave		max	min
		max	min	max	min	max	min		
10 m	100 s	-989.338	-85064.9	914.466	-359.971	-2734.92	-26947.1	89235.2	2908.37
30 m	10800 s	-78378.9	-419950	949.279	-1438.62	-33896.9	-77045.7	426961	85394.9
30 m	100s	-170141	-177916	163.719	-678.747	-49249.8	-50621.1	184977	177127

## Bab VI

### Kesimpulan dan Saran

#### 6.1. Kesimpulan

Analisis numeris gerakan dan *tension* model dok apung mendapatkan konfigurasi pengikatan II dengan nilai yang lebih efektif dibandingkan dengan konfigurasi pengikatan I dan gerakan paling dominan terjadi pada arah gaya-gaya eksternal kolinier  $-90^0$ . Berdasarkan hasil analisis, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Gerakan yang terjadi baik berupa perpindahan, rotasi maupun akselerasi didominasi oleh gaya eksternal kolinier  $-90^0$ . Hal ini terjadi dikarenakan pada arah tersebut area yang terpengaruh oleh gaya eksternal memiliki nilai paling luas sehingga gaya interaksi yang ditimbulkan sangat besar;
2. Tegangan (*tension*) paling tinggi dialami rantai oleh dok apung saat gaya eksternal dengan arah kolinier  $-90^0$ . Tegangan yang paling dominan ini seiring dengan gerakan yang timbul. Ketika gerakan dominan pada saat gaya eksternal kolinier  $-90^0$  maka tegangan juga akan dominan ketika gaya eksternal di arah  $-90^0$ .
3. Konfigurasi pengikatan II lebih efektif dibandingkan konfigurasi pengikatan I, ditinjau dari gerakan maupun tegangan pada tali tambat model dok apung. Seperti fakta dalam hitungan numerik yang telah dilakukan bahwa dalam parameter yang sama konfigurasi tersebut memberikan reduksi yang lebih baik dalam mengendalikan gerakan dok apung.
4. Penggunaan tali penambatan *wire rope* dibutuhkan spesifikasi yang lebih tinggi dibanding dengan perencanaan sebelumnya, sebab dalam kondisi ekstrim nilai ketahanan tali tidak sesuai dengan kriteria API;
5. Terdapat suatu efek (*Bank effect*) pada dok apung akibat interaksi dengan dermaga, dan juga pada kondisi muatan balas penuh terdapat suatu efek (*squat effect*) yang menyebabkan gerakan kapal mengalami perubahan. Efek tersebut dapat diketahui melalui perubahan nilai yang terjadi dan visualisasi dari animasi setelah hasil yang didapatkan analisis numerik. Analisis perbandingan variasi kedalaman perairan dan kerapatan dermaga juga dapat mengetahui besaran efek gerakan dan tegangan sistem tambat yang terjadi pada dok apung.
6. Analisis RAO's dok apung terhadap dimensi dan penempatan dermaga yang berbeda (menyerupai *break waters*) sebagian besar mendapatkan hasil dengan nilai yang relatif

sama. Adapun beberapa nilai dengan selisih nilai yang signifikan saat dok apung pada gerakan *pitch*, *yaw* dan *surge* dalam arah pembebanan gelombang  $-90^0$ .

## 6.2. Saran

Saran untuk pengembangan penelitian lebih lanjut yang dapat penulis berikan, antara lain:

1. Terdapat banyak variasi lebih lanjut untuk penelitian berikutnya, diharapkan penelitian selanjutnya agar memperhitungkan detail-detail lainnya dan juga perhitungan analitisnya.

## Daftar Pustaka

- American Bureau of Shipping. (2013). *Design Guideline for Stationkeeping Systems of Floating Offshore Wind Turbines*. Houston, Texas: Corporate Offshore Technology.
- API RP 2SK<sup>2nd</sup> edition. (1996). *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington, DC
- Aqwa Theory Manual. (2013). *User Guide*. Ansys Inc.
- Aqwa Users Manual. (2013). *User Guide*. Ansys Inc.
- Børkja, J.L.B., (2015). *Dynamic Analysis of Floating Dock Structures*. Master Thesis. Department of Marine Technology. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway.
- Dietrich, G., (2013). Pengaruh Riser terhadap *Fatigue Life* Tali Tambat Studi Kasus : SPM FPSO Seagood 101. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- DNV 0001/ND. (2015). *General Guidelines for Marine Projects*. Det Norske Veritas, Norway.
- DNV 0030/ND. (2015). *Guidelines for Marine Transportations*. Det Norske Veritas, Norway.
- DNV 0032/ND. (2015). *Guidelines for Moorings*. Det Norske Veritas, Norway.
- DNV OS H203. (2012). *Transit and Positioning of Offshore Units*. Det Norske Veritas, Norway.
- DNV OS E301. (2015). *Position Mooring*. Det Norske Veritas, Norway.
- DNV RP C205. (2010). *Environmental Conditions and Environmental Loads*. Det Norske Veritas, Norway.
- Fajar, P., (2014). Kajian Potensi Arus Laut Sebagai Energi Alternatif Pembangkit Listrik di Perairan Sekitar Jembatan Suramadu Selat Madura. *Jurnal Oseanografi*. Jurusan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro, Semarang
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., (1973). *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During The Joint North Sea Wave Project (jonswap)*.
- Journee, J.M.J dan Pinkster, J., (2002). *Introduction in Ship Hydromechanics*. Delf University of Technology, Mekelweg.

- Shimada, K., Miyakawa, M., Ohyama, T., Ishihara, T., Fukumoto, Y., Anno, K., Okada, H., Moriya, Y., (2010). *Preliminary Study on Optimum Design of A Tension Leg Platform for The Offshore Wind Generated Energy System*. Tokyo, Japan.
- Lloyd's Register. (2015). *Rules and Regulations for the Construction and Classification of Floating Docks*. London: Lloyd's Register Group.
- Muhammad, A.N., (2007). Modifikasi ponton pada dok apung (*Floating Dock*) untuk Menghindari Waktu yang Hilang saat Reparasi. Tugas Akhir. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Oregon Wave Energy Trust. (2009). *Sea & Technology engineering Solutions: Advanced Anchoring and Mooring Study*. Oregon Innovation Council.
- Perdani, A.I., (2007). Perencanaan Pembangunan Dermaga Penyeberangan Ferry di Nusa Penida. Tugas Akhir. Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Perwitasari, R.N., (2010). *Hydrodynamic Interaction and Mooring Analysis for Offloading between FPSO and LNG Shuttle Tanker*. Master Thesis. Department of Marine Technology. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway.
- Prasiwi, R.A., (2013). Analisis Peilaku FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) Terhadap *Internal Turret Mooring System* Berbasis Simulasi *Time Domain*. Jurnal Sains dan Seni POMITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Purwanto, R.D., (2012). Perancangan Awal *Floating Production Unit* (FPU) untuk Lapangan Gas di Selat Madura. Jurnal Sains dan Seni POMITS. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Teresa, M.H., O'brien, T., Berwick, B., Wood, C.I., Duffy, J., Renilson, M., (1999). *Ship-Bank Interaction Effects: A Case Study-Port of Townsville*. Townsville Port Authority, Australia.
- Wibowo, M.H., (2012). Stabilitas dan Sistem Tambat Model *Cottage* Terapung dengan Lambung Silindris. Tugas Akhir. Program Studi Teknik Perkapalan. Universitas Indonesia, Depok.

## Lampiran

- Contoh hasil tampilan running *ansys aqwa* durasi 250 sekon pada arah gaya eksternal kolinier  $90^0$ ;
- Hasil perbandingan dimensi dan penempatan dermaga baru (*break water*);
- Hasil Perbandingan variasi jarak dermaga;
- Hasil Perbandingan variasi kedalaman pada kondisi muatan balas penuh;

## Biodata Penulis



**Fajar Adi Pratama.** Lahir di Jombang pada Desember 1994. Sejak tahun 2012 sampai sekarang, ia menjadi mahasiswa pada Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Sebelum menyentuh pendidikan tinggi, penulis menempuh pendidikan dasar di SDN 1 Trosobo pada tahun 2000-2006. Kemudian melanjutkan ke SMPN 1 Taman pada tahun 2006-2009 dan SMA Trimurti Surabaya pada tahun 2009-2012.

Semasa kuliah, penulis aktif di berbagai organisasi diantaranya sebagai Kepala Departemen Mentoring periode 2013-2014 dan 2014-2015, Staf Departemen Hubungan Luar Lembaga Minat dan Bakat (LMB) ITS periode 2013-2014, dan Staf Departemen Kaderisasi ITS *Badminton Community* (IBC) periode 2013-2014 dan 2014-2015. Selama itu penulis juga aktif dalam berbagai kepanitiaan kegiatan kampus, diawali sebagai Koordinator perlengkapan IBC *Internal Cup* tahun 2012. Selain itu, penulis juga aktif mengikuti beberapa pelatihan diantaranya Pelatihan Ketrampilan Manajemen Mahasiswa (LKMM pra TD dan LKMM TD-LMB) pada tahun 2012 dan 2013, Pelatihan Pengoperasian Maxsurf tahun 2014, Pembinaan Rohaniah (BSI) tahun 2013, Pelatihan Hydrostar dan Ariane oleh Bureau Veritas Asia tahun 2015, dan beberapa pelatihan lainnya.

Pada akhir perkuliahan, penulis aktif dalam beberapa olimpiade dan lomba karya ilmiah tingkat nasional, diantaranya Olimpiade Sains Nasional (OSN) Pertamina kategori Proyek, Pekan Kreatifitas Mahasiswa kategori Teknologi (PKM-T) dan Pekan Kreatifitas Mahasiswa kategori Karsa Cipta (PKM-KC). Sampai laporan ini selesai ditulis PKM-T dan PKM-KC sampai tahap didanai dan menunggu seleksi Pekan Ilmiah Nasional.