



Tesis -MO142528

**ANALISIS PENGARUH GAYA GELOMBANG NON-LINIER
ORDE-2 TERHADAP STRUKTUR APUNG TERTAMBAT
DENGAN SISTEM *EXTERNAL TURRET MOORING***

YUNI ARI WIBOWO

4114 201 001

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Dr. Ir. Wisnu Wardhana, SE., M.Sc.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK DAN PERANCANGAN BANGUNAN LAUT

PROGRAM PASCASARJANA

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016



Thesis -MO142528

**ANALYSIS OF NON-LINEAR 2nd ORDER WAVE FORCES
EFFECT ON MOORED FLOATING STRUCTURES WITH
EXTERNAL TURRET MOORING SYSTEM
CONFIGURATION**

YUNI ARI WIBOWO

4114 201 001

SUPERVISOR

Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.

Dr. Ir. Wisnu Wardhana, SE., M.Sc.

MASTER PROGRAM

STUDY PROGRAM IN DESIGN OF OCEAN STRUCTURE ENGINEERING

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

"Tidakkah kamu memperhatikan bahwa sesungguhnya kapal itu berlayar di laut dengan nikmat Allah, supaya diperlihatkan-Nya kepadamu sebagian dari tanda-tanda (kekuasaan)-Nya. Sesungguhnya pada yang demikian itu benar-benar terdapat tanda-tanda bagi semua orang yang sangat sabar lagi banyak bersyukur" (Q.S. Luqman : 31)

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik dan lancar. Tesis ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan studi pascasarjana S2 di Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Tesis yang berjudul "**Analisis Pengaruh Gaya Gelombang Non-linier Orde-2 Terhadap Struktur Apung Tertambat dengan Sistem *External Turret Mooring***" ini menjelaskan tentang seberapa besar pengaruh gaya gelombang orde-2 terhadap respon struktur tertambat dan tension tali tambatnya dengan variasi kedalaman perairan.

Penulis menyadari dalam penulisan laporan ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat diharapkan sebagai bahan penyempurnaan laporan selanjutnya. Penulis berharap semoga laporan ini bermanfaat bagi perkembangan teknologi di bidang rekayasa kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Dalam pengerjaan tesis ini penulis tidak terlepas akan naungan Sang Pencipta, Allah SWT serta Rasulullah Muhammad SAW. Penulis sangat berterima kasih kepada kedua orang tua, Tukija, SPd. dan Binariyah yang selalu memberikan dukungan dalam berbagai hal. Kepada kedua adik penulis, Novi Dwi Apsari dan Wahyu Tri Kusuma yang juga senantiasa memberikan motivasi kepada motivasi.

Penulis juga berterima kasih kepada Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. dan Dr. Ir. Wisnu Wardhana, SE., M.Sc. selaku dosen pembimbing atas bimbingan dan arahan yang telah diberikan kepada penulis. Kepada Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D., Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, ST., MT., Nur Syahroni, ST., MT.,

Ph.D. dan Yoyok Setyo Hadiwidodo, ST., MT., Ph.D. selaku dosen penguji, atas saran dan bimbingan yang diberikan. Semoga Allah membalas dengan balasan pahala yang setimpal.

Tesis ini tidak akan selesai dengan lancar tanpa adanya dukungan dari Ir. Murdjito, M.Sc., Eng, Septiyan Adi Nugroho, ST., Raditya Danu, ST., MT., Mochammad Ramzi, ST., Destyariani Liana Putri, ST. Dini Tri Mart, ST. dan rekan-rekan di NaSDEC Indonesia untuk berdiskusi mengenai pengembangan teknologi *turret mooring*.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Fahmi Arifin, ST. Ika Prasetyawan, ST., M.Sc., Ph.D., Fahmi Ardhiansyah, ST., Brian Putra Negara, ST., dan Rizki Amalia Prasiwi, ST. atas kesempatannya untuk belajar dan diskusi bersama mengenai pemodelan dan simulasi numerik menggunakan software MOSES dan OrcaFlex.

Tidak lupa penulis berterima kasih kepada rekan seangkatan prodi Teknik Perancangan Bangunan Laut (TPBL) Nurman Pamungkas, ST, Suheri, ST dan Agung Prasetyo, S.Si. yang telah membantu penulis dalam hal pemahaman materi. Serta rekan-rekan penulis yang tidak bisa disebutkan satu per satu, penulis ucapkan terima kasih, semoga Allah membalas dengan segala kebaikan dunia dan akhirat.

Wassalamu'alaikum, Wr. Wb.

Surabaya, 11 Januari 2016

Yuni Ari Wibowo

LEMBAR PENGESAHAN

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)**

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Yuni Ari Wibowo
4114 201 001**

**Tanggal Ujian : 22 Januari 2016
Periode Wisuda : Maret 2016**

Disetujui oleh :

**1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing I)
NIP. 19581226198403 1 002**

**2. Dr. Ir. Wisnu Wardhana, SE., M.Sc. (Pembimbing II)
NIP. 19581204198702 1 001**

**3. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D. (Penguji)
NIP. 19630728198803 1 001**

**4. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, ST., MT. (Penguji)
NIP. 19710508199703 1 001**

**5. Nur Syahroni, ST., MT., Ph.D. (Penguji)
NIP. 19730602199903 1 002**



Direktur Program Pascasarjana,

**Prof. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.
NIP. 1960120219870 1 001**

**ANALISIS PENGARUH GAYA GELOMBANG NON-LINIER
ORDE-2 TERHADAP STRUKTUR APUNG TERTAMBAT
DENGAN SISTEM *EXTERNAL TURRET MOORING***

Nama Mahasiswa : Yuni Ari Wibowo
NRP : 4114 201 001
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Dr. Ir. Wisnu Wardhana, SE., M.Sc.

ABSTRAK

Struktur apung tertambat pada gelombang acak akan menerima beban gelombang orde-1 dan orde-2. Penelitian mengenai gaya gelombang orde-1 telah cukup banyak dilakukan selama beberapa dekade, mengingat pentingnya gaya orde-1 terhadap struktur apung. Penelitian ini difokuskan untuk mengkaji pengaruh gaya gelombang orde-2 terhadap sistem struktur tertambat *external turret mooring* dengan konfigurasi 6 tali *catenary*. Tipe gaya gelombang yang bekerja divariasikan untuk menyelidiki pengaruhnya terhadap respon struktur tertambat dan gaya tarik (*tension*) tali tambatnya. Simulasi dilakukan dengan memodelkan kapal tanker ukuran Aframax 120.000 DWT dalam 3 kondisi pembebanan : sistem tertambat yang dikenai gaya gelombang orde-1, gaya gelombang orde-2 dan kombinasi keduanya. Penelitian ini menggunakan pendekatan domain frekuensi untuk menghitung perilaku hidrodinamis struktur terapung bebas. Kemudian hasil tersebut digunakan untuk melakukan simulasi dalam domain waktu secara simultan untuk mendapatkan perilaku gerak struktur tertambat dan *tension* tali tambatnya. Respon struktur dan *tension* tali tambat dalam domain waktu kemudian ditinjau kembali dalam domain frekuensi menggunakan metode *fast fourier transform* (FFT) untuk menyelidiki karakteristiknya akibat tipe gaya gelombang yang bekerja.

Simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa meskipun intensitas gaya orde-2 terbilang rendah, namun dapat menghasilkan respon *surge* dan *tension* tali tambat yang cukup tinggi akibat adanya fenomena gerakan seret (*drifting*). Amplitudo respon *surge* akibat gaya orde-1 dengan H_s mencapai 10m adalah sekitar 2m, sedangkan orde-2 menghasilkan sekitar 23m, sehingga rasio perbandingannya sekitar 1 : 11. Amplitudo *tension* akibat orde-1 mencapai 7,5 ton dan akibat orde-2 sekitar 117,5 ton sehingga rasio perbandingannya mencapai 1 : 15. Variasi kedalaman perairan juga diselidiki untuk mengetahui pengaruhnya pada respon tertambat akibat gaya gelombang orde-2, yaitu pada kedalaman 100, 300 dan 500m. Hasil yang didapatkan dari simulasi tersebut mengindikasikan bahwa setiap penambahan kedalaman perairan sebesar 200 m dapat meningkatkan respon *surge* akibat gaya orde-1 sebesar 5 – 9% atau sebesar 2 -5 meter dan akibat orde-2 sebesar 9 – 19% atau sekitar 7 – 12 meter. Penambahan kedalaman perairan juga meningkatkan *tension* tali tambat akibat orde-1 sebesar 60 - 65% atau sekitar 28 – 135 ton dan akibat orde-2 mencapai sekitar 75% atau sekitar 152 ton.

Kata kunci : Gaya gelombang orde-2, *external turret mooring*, domain waktu simultan, respon gerak, *tension* tali tambat

ANALYSIS OF NON-LINEAR 2nd ORDER WAVE FORCES EFFECT ON MOORED FLOATING STRUCTURES WITH EXTERNAL TURRET MOORING CONFIGURATION

Student Name : Yuni Ari Wibowo
REG : 4114 201 001
Supervisor : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D.
Dr. Ir. Wisnu Wardhana, SE., M.Sc.

ABSTRACT

Moored floating structures in random waves are subjected to large first order and small low frequency second order wave forces. Due to the importance of the first order wave force and motions they have been subject to investigation for several decades. This study focuses to investigate the second order wave force effect towards floating structure responses and mooring line tensions. A moored structure is configured as an external turret system which is anchored by 6 catenary mooring lines. Variation in the type of wave forces acts on Tanker model Aframax 120.000 DWT is investigated in order to predict the effect of second order wave force. The simulations are performed in 3 loadcases : moored floating structure subjected to first, second order wave forces and combination of both respectively. In this study, modelling on the basis of the frequency-domain is adopted to compute the hydrodynamic properties of freely floating structure and followed by simulation on the basis of time-domain coupled dynamic analysis to observe the responses of moored floating structure and tension of mooring lines. All responses and its tension re-observed in frequency domain using the Fast Fourier Transform method in order to investigate its characters.

The corresponding analysis reveals that the low frequency second order wave force, even though relatively small in magnitude, could excite large both amplitude of surge motion and tension of mooring lines. It may give rise to the amplitude of surge motion from 2m (first order) to 23m (second order) so the ratio of motion is 1 : 11. And for mooring line tension, it rise from 7,5ton (first order) to 117,5ton (second order, so the ratio of tension is 1 : 15. Variation in the water depth is also investigated in order to calculate its effect towards structure responses and mooring line tensions, namely 100m, 300m and 500m. The analysis reveals that increasing water depth per 200m, it may give rise the surge response due to first order wave force in 5 – 9% (2 – 5 meter) and 9 – 19% (7 – 12 meter) due to second order wave force. Also it may give rise the mooring line tension due to first order wave force in 60-65% (28 – 135 ton) and around 75% (152 ton) due to second order wave force.

Keywords : Second order wave forces, external turret mooring, time domain coupled dynamic, motion behaviors, mooring line tension.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH	3
1.3 TUJUAN	3
1.4 MANFAAT	3
1.5 BATASAN MASALAH	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.2 DASAR TEORI.....	10
2.2.1 Gerakan Struktur Apung	10
2.2.2 Eksitasi Gaya Gelombang	12
2.2.3 Respon Struktur pada Gelombang Reguler.....	21
2.2.4 Fenomena Permasalahan Non Linier	28
2.2.5 Sistem Tambat (<i>Mooring System</i>)	30
2.2.6 Respon Struktur pada Gelombang Acak.....	34
2.2.7 Analisis Perhitungan	37
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	41
3.1 METODE PENELITIAN.....	41
3.2 SUBYEK DAN OBYEK PENELITIAN	41
3.3 PEMILIHAN VARIASI MODEL.....	41
3.4 METODE PENGUMPULAN DATA	42

3.5	PENGOLAHAN DAN ANALISIS DATA.....	42
3.5.1	Data Kapasitas Muatan dan <i>Principal Dimension</i>	42
3.5.2	Data Lingkungan	42
3.5.3	Data Spesifikasi Tali Tambat	43
3.6	DESAIN PENELITIAN.....	43
3.7	PENGUMPULAN DATA.....	49
3.7.1	Data Struktur Apung.....	49
3.7.2	Data Tali Tambat	50
3.7.3	Kombinasi (segmentasi) Tali Tambat.....	50
3.7.4	Data Lingkungan	51
BAB 4	ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN	55
4.1	PEMODELAN STRUKTUR APUNG	55
4.2	SKENARIO ANALISIS KARAKTERISTIK GERAK STRUKTUR ...	59
4.2.1	Perhitungan <i>Center of Gravity</i> Struktur Apung	59
4.2.2	Perhitungan Radius Girasi Struktur Apung.....	63
4.2.3	Skenario Pembebanan.....	64
4.3	ANALISIS KARAKTERISTIK GERAKAN STRUKTUR PADA GELOMBANG REGULER.....	64
4.3.1	Analisis Karakteristik Gaya Tiap Gerakan	65
4.3.2	Analisis Karakteristik Gerakan Struktur.....	72
4.3.3	Analisis Karakteristik <i>Quadratic Transfer Function (QTF)</i>	79
4.4	ANALISIS KARAKTERISTIK GERAKAN STRUKTUR PADA GELOMBANG ACAK.....	85
4.4.1	Analisis Gaya pada Struktur Apung	87
4.4.2	Analisis Respon Gerakan	90
4.4.3	Analisis Tension Tali Tambat	100
4.5	ANALISIS KARAKTERISTIK GAYA, RESPON GERAK DAN TENSION TALI TAMBAT TERHADAP KENAIKAN TINGGI GELOMBANG.....	101
4.5.1	Pengaruh Gaya Gelombang Orde-1	102
4.5.2	Pengaruh Gaya Gelombang Orde-2.....	105

4.6	ANALISIS PENGARUH KEDALAMAN PERAIRAN TERHADAP RESPON STRUKTUR TERTAMBAT (SEGMENTASI : <i>CHAIN</i>) ...	108
4.6.1	Gaya dan Momen 6 DOF Orde-1 (<i>wave load RAO</i>)	109
4.6.2	Respon Gerak 6 DOF akibat Gaya Orde-1 (Segmentasi <i>Chain</i>)...	112
4.6.3	Tension Tali Tambat Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi <i>Chain</i>).....	117
4.6.4	Gaya dan Momen 6 DOF Orde-2 (<i>wave drift load</i>) (Segmentasi <i>Chain</i>)	119
4.6.5	Respon Gerak 6 DOF Akibat Gaya Orde-2 (Segmentasi <i>Chain</i>)..	122
4.6.6	Tension Tali Tambat Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi <i>Chain</i>).....	127
4.7	ANALISIS PENGARUH KEDALAMAN PERAIRAN TERHADAP RESPON STRUKTUR TERTAMBAT (SEGMENTASI <i>CHAIN-WIREROPE</i>).....	128
4.7.1	Gaya dan Momen 6 DOF Orde-1 (<i>wave load RAO</i>) dengan Segmentasi Tali Tambat Chain-Wire Rope	128
4.7.2	Respon Gerak 6 DOF akibat Gaya Orde-1 (Segmentasi <i>Chain-Wire Rope</i>).....	131
4.7.3	Tension Tali Tambat Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi <i>Chain-Wire Rope</i>)	136
4.7.4	Gaya dan Momen 6 DOF Orde-2 (<i>wave drift force</i>) dengan Segmentasi Tali Tambat <i>Chain-Wire Rope</i>	138
4.7.5	Respon Gerak 6 DOF Akibat Gaya Orde-2 (Segmentasi <i>Chain-Wire Rope</i>).....	141
4.7.6	Tension Tali Tambat Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi <i>Chain-Wire Rope</i>)	146
4.8	ANALISIS PENGARUH KEDALAMAN PERAIRAN TERHADAP RESPON STRUKTUR TERTAMBAT.....	148
4.9	ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN TALI TAMBAT <i>CHAIN VS WIRE ROPE</i>	149
BAB 5	PENUTUP	151

5.1	KESIMPULAN	151
5.2	SARAN	154
	DAFTAR PUSTAKA	155
	LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 1-1 Model dengan variasi gaya gelombang yang bekerja	4
Tabel 1-2 Model dengan variasi kenaikan tinggi gelombang 1 s.d. 10 m	4
Tabel 1-3 Model dengan variasi kedalaman perairan	4
Tabel 2-1 Periode natural tanker tertambat (DNV, 2010)	23
Tabel 3-1 Data dimensi umum tanker Aframax 120.000 DWT (NaSDEC, 2015)	49
Tabel 3-2 Data tali tambat (Anchor Manual, 2014)	50
Tabel 3-3 Kombinasi tali tambat	50
Tabel 3-4 Kriteria pembebanan menurut NORSOK N-003 (NORSOK, 2007)....	51
Tabel 3-5 Data distribusi tinggi gelombang (Physe Ltd, 2010)	52
Tabel 3-6 Data periode ulang tinggi dan periode gelombang	52
Tabel 3-7 Data distribusi kecepatan angin (Physe Ltd, 2010)	53
Tabel 3-8 Data periode ulang kecepatan angin (Physe Ltd, 2010).....	53
Tabel 3-9 Data distribusi kecepatan arus (Physe Ltd, 2010).....	54
Tabel 3-10 Data periode ulang kecepatan arus (Physe Ltd, 2010).....	54
Tabel 4-1 Kriteria validasi model (IASC, 2013)	58
Tabel 4-2 Hasil validasi model struktur apung.....	58
Tabel 4-3 Perhitungan center of gravity dan radius girasi kapal dalam beberapa kondisi muatan.....	64
Tabel 4-4 Gaya surge maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	66
Tabel 4-5 Gaya sway maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	67
Tabel 4-6 Gaya heave maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	68
Tabel 4-7 Momen roll maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	69
Tabel 4-8 Momen pitch maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	70

Tabel 4-9 Momen yaw maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	71
Tabel 4-10 RAO surge maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	73
Tabel 4-11 RAO sway maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	74
Tabel 4-12 RAO heave maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	75
Tabel 4-13 RAO roll maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	76
Tabel 4-14 RAO pitch maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	78
Tabel 4-15 RAO yaw maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	79
Tabel 4-16 QTF surge maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	80
Tabel 4-17 QTF sway maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	81
Tabel 4-18 QTF heave maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	82
Tabel 4-19 QTF roll maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	83
Tabel 4-20 QTF pitch maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	84
Tabel 4-21 QTF yaw maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan	85
Tabel 4-22 Signifikasi pengaruh gaya orde-2 terhadap responstruktur tertambat.	99
Tabel 4-23 Variasi kedalaman perairan yang ditinjau dalam penelitian ini.....	109
Tabel 4-24 Segmentasi tali tambat dengan menggunakan material chain	109
Tabel 4-25 Variasi kedalaman perairan yang ditinjau dalam penelitian ini.....	128

Tabel 4-26 Segmentasi tali tambat dengan menggunakan material chain-wire rope	128
Tabel 4-27 Respon struktur tertambat dan tension tali tambat pada kondisi kedalaman perairan 100, 300 dan 500 m	148
Tabel 4-28 Tension dan eskursi pada material tali tambat chain dan kombinasi (kedalaman perairan 300 m).....	149

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A Perhitungan *Center of Gravity* dan Radius Girasi

LAMPIRAN B Pemodelan di MOSES

LAMPIRAN C Pemodelan di OrcaFlex

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1-1 Gerakan surge orde-2 low frequency struktur apung tertambat pada gelombang acak.....	2
Gambar 2-1 Arah gerakan struktur apung berdasarkan sistem sumbu (Wibowo, 2014).....	11
Gambar 2-2 Sistem sumbu dalam perhitungan gaya dan momen gelombang orde-2 (Pinkster, 1980).....	14
Gambar 2-3 Permasalahan hidrodinamika : gaya dan momen struktur yang beresilasi akibat eksitasi gelombang (kiri), gaya dan momen yang beresilasi pada air tenang (tengah) dan gabungan dari-2nya (kanan). (Faltinsen, 1990)	21
Gambar 2-4 Kurva RAO terhadap frekuensi gelombang (Journee and Massie, 2001)	25
Gambar 2-5 Sistem tali tambat turret (API RP 2SK, 2005).....	31
Gambar 2-6 Model tali tambat catenary (MIT, 2011)	33
Gambar 2-7 Elemen kecil tali tambat catenary (MIT, 2011).....	33
Gambar 2-8 Mekanisme gaya-gaya yang bekerja pada tali tambat (Perwitasari, 2010).....	38
Gambar 2-9 Ilustrasi analisis domain waktu secara terpisah (decoupled) maupun langsung (coupled) (Larsen, 2004).....	40
Gambar 3-1a Diagram alir metodologi penelitian	43
Gambar 3-2 Konfigurasi tali tambat dengan sistem external turret mooring (Rika, 2011).....	47
Gambar 4-1 Pemodelan surface model dan linesplan Aframax 120.000 DWT pada Maxsurf : tampak isometri (a), tampak atas (b), tampak samping (c) dan tampak depan (d)	56
Gambar 4-2 Pemodelan surface model Aframax 120.000 DWT pada MOSES : tampak isometri (a), tampak atas (b), tampak samping (c) dan tampak depan (d)	57

Gambar 4-3 Grafik gaya surge dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang.....	65
Gambar 4-4 Grafik gaya sway dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang.....	66
Gambar 4-5 Grafik gaya heave dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	67
Gambar 4-6 Grafik momen roll dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	69
Gambar 4-7 Grafik momen pitch dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	70
Gambar 4-8 Grafik momen yaw dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	71
Gambar 4-9 Grafik RAO gerakan surge dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	72
Gambar 4-10 Grafik RAO gerakan sway dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	73
Gambar 4-11 Grafik RAO gerakan heave dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	74
Gambar 4-12 Grafik RAO gerakan roll dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	76
Gambar 4-13 Grafik RAO gerakan pitch dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	77
Gambar 4-14 Grafik RAO gerakan yaw dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	78
Gambar 4-15 Grafik QTF surge dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	80
Gambar 4-16 Grafik QTF sway dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	81
Gambar 4-17 Grafik QTF heave dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	82

Gambar 4-18 Grafik QTF roll dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang.....	83
Gambar 4-19 Grafik QTF pitch dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	84
Gambar 4-20 Grafik QTF yawl dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang	85
Gambar 4-21 Ilustrasi sistem tertambat yang disiapkan untuk analisis dinamis...	86
Gambar 4-22 Konfigurasi pemasangan tali tambat (L1 – L6) dengan sistem external turret mooring : 6 tali tambat dengan konfigurasi inline	87
Gambar 4-23 Rekam gaya surge pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m.....	88
Gambar 4-24 Rekam gaya sway pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m.....	88
Gambar 4-25 Rekam gaya heave pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m.....	88
Gambar 4-26 Rekam momen roll pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m.....	89
Gambar 4-27 Rekam momen pitch pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m.....	89
Gambar 4-28 Rekam momen yaw pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m.....	89
Gambar 4-29 Respon gerakan surge struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m (a), Respon surge jika ditinjau dari detik ke-4320 s.d. -5100 (b)	92
Gambar 4-30 Densitas spektra gerakan surge	92
Gambar 4-31 Rekam respon gerak sway struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m.....	93
Gambar 4-32 Densitas spektra gerakan sway.....	94
Gambar 4-33 Rekam respon gerak heave struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m.....	94
Gambar 4-34 Densitas spektra gerakan heave.....	95

Gambar 4-35 Rekam respon gerak roll struktur apung selama 10800 detik, dengan Hs = 10 m.....	96
Gambar 4-36 Densitas spektra gerakan roll	96
Gambar 4-37 Rekam respon gerak pitch struktur apung selama 10800 detik, dengan Hs = 10 m.....	97
Gambar 4-38 Densitas spektra gerakan pitch.....	98
Gambar 4-39 Rekam respon gerak yaw struktur apung selama 10800 detik, dengan Hs = 10 m.....	98
Gambar 4-40 Densitas spektra gerakan yaw	99
Gambar 4-41 Rekam tension tali tambat, L1 selama 10800 detik, dengan Hs = 10 m.....	100
Gambar 4-42 Densitas spektra tension tali tambat, L1	101
Gambar 4-43 Karakteristik gaya dan momen struktur apung (orde-1) terhadap kenaikan tinggi gelombang	103
Gambar 4-44 Karakteristik respon gerak struktur apung (orde-1) terhadap kenaikan tinggi gelombang.....	104
Gambar 4-45 Karakteristik tension tali tambat, L1 (orde-1) terhadap kenaikan tinggi gelombang.....	105
Gambar 4-46 Karakteristik gaya dan momen struktur apung (orde-2) terhadap kenaikan tinggi gelombang	106
Gambar 4-47 Karakteristik respon gerak struktur apung (orde-2) terhadap kenaikan tinggi gelombang.....	107
Gambar 4-48 Karakteristik tension tali tambat, L1 (orde-2) terhadap kenaikan tinggi gelombang.....	108
Gambar 4-49 Gaya surge orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	109
Gambar 4-50 Gaya sway orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	110
Gambar 4-51 Gaya heave orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	110

Gambar 4-52 Momen Roll orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	110
Gambar 4-53 Momen Pitch orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	111
Gambar 4-54 Momen Yaw orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	111
Gambar 4-55 Respon surge akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (a) Respon ditinjau pada detik ke-6950 s.d. 7550 detik (b) (segmentasi chain)	113
Gambar 4-56 Respon sway akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain).....	114
Gambar 4-57 Respon heave akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain).....	115
Gambar 4-58 Respon roll akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain).....	116
Gambar 4-59 Respon pitch akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain).....	116
Gambar 4-60 Respon yaw akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain).....	117
Gambar 4-61 Tension tali tambat L1 akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (a) tension L1 jika ditinjau pada detik ke-1200 s.d. 1800 (b) (segmentasi chain).....	118
Gambar 4-62 Gaya surge orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain).....	119
Gambar 4-63 Gaya sway orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain).....	119
Gambar 4-64 Gaya heave orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain).....	120
Gambar 4-65 Momen roll orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain).....	120

Gambar 4-66 Momen pitch orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	120
Gambar 4-67 Momen yaw orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	121
Gambar 4-68 Respon surge akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Respon surge ditinjau pada detik ke-3640 s.d. 4000 detik (segmentasi chain)	123
Gambar 4-69 Respon sway akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	124
Gambar 4-70 Respon heave akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	124
Gambar 4-71 Respon roll akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	125
Gambar 4-72 Respon pitch akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	126
Gambar 4-73 Respon yaw akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)	126
Gambar 4-74 Tension tali tambat L1 akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Tension L1 jika ditinjau pada detik ke-2000 s.d. 7000 (b) (segmentasi chain)	127
Gambar 4-75 Gaya surge orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	129
Gambar 4-76 Gaya sway orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	129
Gambar 4-77 Gaya heave orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	129
Gambar 4-78 Momen Roll orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	130
Gambar 4-79 Momen Pitch orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	130

Gambar 4-80 Momen Yaw orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	130
Gambar 4-81 Respon surge akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Respon surge akibat gaya orde-1 ditinjau pada detik ke-1600 s.d. 2490 detik (b) (segmentasi chain-wire rope)	132
Gambar 4-82 Respon sway akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	134
Gambar 4-83 Respon heave akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	134
Gambar 4-84 Respon roll akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	135
Gambar 4-85 Respon pitch akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	136
Gambar 4-86 Respon yaw akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	136
Gambar 4-87 Tension tali tambat L1 akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Tension L1 jika ditinjau pada detik ke-1800 s.d. 2500 (b) (segmentasi chain-wire rope)	137
Gambar 4-88 Gaya surge orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	138
Gambar 4-89 Gaya sway orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	139
Gambar 4-90 Gaya heave orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	139
Gambar 4-91 Momen roll orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	139
Gambar 4-92 Momen pitch orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	140
Gambar 4-93 Momen yaw orde-2 (wave drift) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	140

Gambar 4-94 Respon surge akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Respon surge ditinjau pada detik ke-3640 s.d. 4000 detik (b) (segmentasi chain-wire rope)	142
Gambar 4-95 Respon sway akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	143
Gambar 4-96 Respon heave akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	144
Gambar 4-97 Respon roll akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	145
Gambar 4-98 Respon pitch akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	145
Gambar 4-99 Respon yaw akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)	146
Gambar 4-100 Tension tali tambat L1 akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Tension L1 jika ditinjau pada detik ke-2000 s.d. 7000 (b) (segmentasi chain-wire rope).....	147
Gambar 4-101 Grafik hubungan offset, tension dan restoring force material chain dan kombinasi	150

BAB 1

PENDAHULUAN

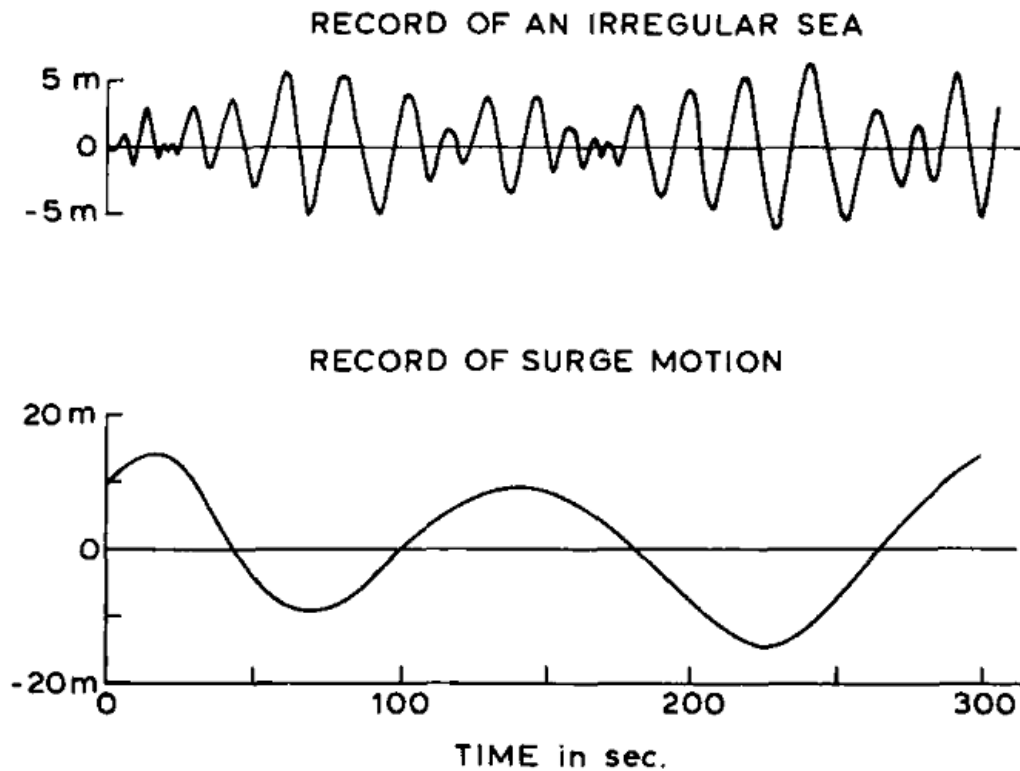
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Struktur apung yang berada pada gelombang acak akan menerima dominansi beban (gaya dan momen) gelombang orde-1. Gaya dan momen tersebut bersifat linier dan proporsional terhadap tinggi gelombang, serta memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi gelombang. Selain itu struktur apung juga menerima beban/gaya gelombang yang cenderung lebih kecil atau yang dikenal dengan gaya dan momen orde-2, yang terdiri dari gaya gelombang *mean drift* dan *low frequency*. Gaya dan momen tersebut bersifat non-linier dan proporsional terhadap tinggi gelombang kuadrat. Jika frekuensi komponen orde-1 berkaitan dengan frekuensi gelombang, maka frekuensi orde-2 *low frequency* berkaitan dengan frekuensi kelompok gelombang (*wave groups*).

Gaya dan momen orde-1 menyebabkan respon gerakannya berasosiasi dengan frekuensi gelombang. Penelitian-penelitian mengenai gaya gelombang orde-1 telah cukup banyak dilakukan, mengingat pentingnya pengaruh gaya gelombang orde-1 terhadap respon yang ditimbulkan. Sehingga dengan banyaknya penelitian yang sudah dilakukan metode penyelesaian menjadi berkembang setiap waktunya dan hasilnya menunjukkan keakuratan yang terus meningkat dengan variasi struktur apung yang berbeda-beda.

Pengaruh komponen gelombang orde-2 yang terdiri dari gaya gelombang *mean drift* dan *low frequency* terhadap perilaku respon struktur tertambat telah dilakukan oleh Pinkster (1978, 1979, 1990), Wichers (1982, 1984, 1986) dan lain sebagainya. Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa komponen gaya gelombang *mean drift* dan *low frequency*, walaupun memiliki intensitas yang relatif kecil tetapi dapat membangkitkan eksitasi amplitudo yang relatif besar pada gerakan horizontal struktur apung tertambat. Fenomena tersebut disebabkan karena frekuensi gelombang orde-2 cenderung mendekati frekuensi gerakan horizontal dari sistem tertambat sehingga menimbulkan terjadinya resonansi. Selain itu juga dipengaruhi oleh redaman gerakan horizontal dari struktur tertambat yang

cenderung kecil sehingga dengan perpaduan kondisi tersebut mengakibatkan kenaikan amplitudo gerakan horizontal. Lihat Gambar 1-1.



Gambar 1-1 Gerakan surge orde-2 *low frequency* struktur apung tertambat pada gelombang acak

Pembahasan dalam tesis ini akan menguraikan pengaruh gelombang non-linier orde-2 terhadap struktur apung tertambat dengan sistem *external turret mooring*. Penelitian ini dilakukan dengan membandingkan gaya dan perilaku respon struktur tertambat saat dikenai tipe gaya gelombang yang berbeda-beda, yaitu : gaya gelombang orde-1, gaya gelombang orde-2 dan kombinasi gaya gelombang orde-1 dan orde-2.

Selain itu model disimulasikan pada kondisi kedalaman perairan yang berbeda-beda : perairan dangkal, menengah, dan dalam, untuk melihat pengaruhnya terhadap respon struktur tertambat, baik respon akibat gaya orde-1 maupun orde-2.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang akan dibahas dalam tesis ini adalah :

1. Bagaimana karakteristik gerakan struktur apung tertambat akibat eksitasi gaya gelombang orde-1?
2. Bagaimana karakteristik gerakan struktur apung tertambat akibat eksitasi gaya gelombang orde-2?
3. Bagaimana pengaruh kedalaman perairan terhadap respon struktur tertambat yang dikenai gaya gelombang orde-2?

1.3 TUJUAN

Tujuan yang ingin dicapai dari tesis ini adalah :

1. Mengetahui karakteristik gerakan struktur apung tertambat akibat eksitasi gaya gelombang orde-1
2. Mengetahui karakteristik gerakan struktur apung tertambat akibat eksitasi gaya gelombang orde-2
3. Mengetahui pengaruh kedalaman perairan terhadap respon struktur tertambat yang dikenai gaya gelombang orde-2

1.4 MANFAAT

Manfaat dari tesis ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh gaya gelombang non-linier orde-2 terhadap perilaku respon struktur apung tertambat *external turret mooring*, yang terdiri dari :

1. Mengetahui perbandingan intensitas gaya dan respon gerak struktur apung tertambat terhadap gaya yang bekerja
2. Mengetahui kenaikan respon struktur apung tertambat akibat gaya gelombang orde-2 terhadap kenaikan tinggi gelombang
3. Mengetahui signifikansi pengaruh kedalaman perairan terhadap respon struktur tertambat yang dikenai gaya gelombang orde-2

1.5 BATASAN MASALAH

Batasan masalah yang digunakan dalam tesis ini adalah sebagai berikut :

1. Struktur apung diasumsikan sebagai *rigid body*, yaitu struktur tidak mengalami deformasi saat dikenai gaya, sehingga detail struktur internal bangunan apung tidak dipertimbangkan
2. Struktur apung yang dikaji dalam penelitian ini adalah tanker dengan kapasitas muat 120.000 DWT
3. Struktur apung ditambatkan menggunakan konfigurasi tali tambat *external turret mooring*
4. Beban lingkungan yang ditinjau terdiri dari beban angin, arus dan gelombang (orde-1 dan orde-2)
5. Gaya gelombang orde-2 yang ditinjau terdiri dari gaya gelombang non-linier *mean drift* dan *low frequency*
6. Simulasi gaya yang bekerja pada struktur apung tertambat divariasikan menjadi :

Tabel 1-1 Kondisi pembebanan (Load Case) dengan variasi gaya gelombang yang bekerja

LC A	LC B	LC C
Struktur apung tertambat menerima gaya gelombang linier orde-1	Struktur apung tertambat menerima gaya gelombang non-linier orde-2	Struktur apung tertambat menerima kombinasi gaya gelombang linier orde-1 + gaya gelombang non-linier orde-2

7. Simulasi kenaikan gelombang dimodelkan dari tinggi gelombang 1 s.d. 10 meter

Tabel 1-2 Kondisi pembebanan dengan variasi kenaikan tinggi gelombang 1 s.d. 10 m

LC	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7	B-8	B-9	B-10
Hs (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

8. Simulasi kedalaman perairan divariasikan dalam 3 macam kondisi perairan : perairan dangkal, menengah dan dalam

Tabel 1-3 Model dengan variasi kedalaman perairan

Model B-I	Model B-II	Model B-III
Perairan dangkal (100 m)	Perairan menengah (300 m)	Perairan dalam (500 m)

9. Arah pembebanan dari beban lingkungan bersifat *collinear* dengan propagasi arah haluan kapal (180 deg)
10. Konsep perhitungan luasan penampang yang terkena gaya angin dan arus mengacu pada aturan *Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs* (OCIMF, 1994)
11. Koefisien beban arus dan angin mengacu pada *Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs* (OCIMF, 1994)
12. Analisis dilakukan dengan metode analisis dinamis (*time domain coupled analysis*) dengan waktu simulasi selama 3 jam (10800 detik)
13. Analisis kekuatan tali tambat berdasarkan kondisi *limit state* (*Ultimate Limit State dan Accidental Limit State*) tidak diperhitungkan

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan tesis ini adalah sebagai berikut :

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang penelitian yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan tesis, manfaat yang diperoleh, serta ruang lingkup penelitian untuk membatasi analisis yang dilakukan dalam tesis ini.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini berisi referensi dan juga teori-teori pendukung yang digunakan sebagai acuan atau pedoman dalam menyelesaikan laporan tesis. Referensi tersebut bersumber pada jurnal lokal maupun internasional, literatur, *rules/code* dan juga buku yang berkaitan dengan topik yang dibahas.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan langkah-langkah pengerjaan yang meliputi : identifikasi data, pemodelan struktur, analisis gerakan struktur pada kondisi terapan bebas, analisis gerakan struktur pada kondisi tertambat dengan mempertimbangkan gaya

gelombang yang bekerja (orde-1 dan orde-2) dan variasi kedalaman perairan. Dari penelitian ini akan didapatkan pengaruh gelombang orde-2 terhadap gaya dan perilaku respon struktur apung tertambat. Selain itu juga akan didapatkan pengaruh kedalaman terhadap respon struktur tertambat yang dikenai gaya gelombang orde-2.

BAB IV. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan mengenai pemodelan struktur, analisis gerakan struktur kondisi terapung bebas, analisis perilaku respon struktur apung tertambat dengan sistem *external turret mooring* dengan mempertimbangkan gaya gelombang yang bekerja (orde-1 dan orde-2) dan variasi kedalaman perairan. Dari penelitian ini akan didapatkan pengaruh gelombang orde-2 terhadap gaya dan perilaku respon struktur apung tertambat. Selain itu juga akan didapatkan pengaruh kedalaman terhadap respon struktur tertambat yang dikenai gaya gelombang orde-2.

BAB V. PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari analisis yang dilakukan pada penelitian ini. Bagian ini juga berisi saran yang bermanfaat guna keberlanjutan penelitian terkait kedepannya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 TINJAUAN PUSTAKA

Kajian literatur mengenai gaya gelombang non-linier orde-2 telah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Pada bagian ini dijelaskan perkembangan penelitian dalam prediksi gaya gelombang orde-2 pada struktur apung dari waktu ke waktu.

Maruo (1960) mengajukan persamaan komponen longitudinal dan transversal gaya gelombang *mean horizontal* dari struktur apung diam (kecepatan = 0) pada gelombang reguler. Teori ini valid pada kondisi 2 dimensi maupun 3 dimensi dan sesuai dengan teori potensial gelombang. Teori ini dikembangkan berdasarkan hukum konservasi momentum dan energi pada aliran fluida di sekitar struktur. Persamaan gaya gelombang orde-2 diturunkan dari potensial gelombang dengan jarak yang masih cukup besar dari struktur apung. Namun hasil perhitungan numeriknya masih terbatas dan kurang sesuai dengan validasi hasil percobaan.

Kudou (1977) melakukan penelitian dengan pendekatan analitik terhadap gaya gelombang *mean horizontal* pada bentuk bola yang terapung dengan menggunakan teori Maruo. Perhitungan yang dilakukannya tersebut menghasilkan luaran yang berkorelasi antara perhitungan dan data ukuran.

Newman (1967) menurunkan kembali persamaan 3 dimensi yang diajukan Maruo untuk komponen gaya *mean horizontal* dan menambahkan ke dalamnya teori momen *mean yaw*. Persamaan tersebut dievaluasi dengan model silinder dan perhitungannya dibandingkan dengan hasil percobaan yang dilakukan oleh Spens dan Lalangas (1962). Karena kurangnya data yang didapatkan dari hasil percobaan, maka tidak ada kesimpulan akhir dari validasi yang didapatkan .

Faltinsen dan Michelsen (1974) memodifikasi persamaan Newman (1967) dan mengevaluasinya dengan mengembangkan program komputer berdasarkan teori potensial gelombang 3 dimensi menggunakan distribusi singularitas yang tersebar seluas permukaan tercelup struktur. Hasil dari perhitungan numerik pada kotak yang menyerupai barge di atas gelombang reguler menunjukkan luaran yang menyerupai dengan hasil percobaan.

Molin (1979) memodifikasi persamaan Maruo (1960) untuk gaya gelombang *mean horizontal* dan mengevaluasinya menggunakan metode *finite element method* pada fluida dalam perhitungan potensial gelombang. Modifikasi yang dilakukan terletak pada pengintegralan bagian permukaan kanal. Molin menggunakan *mean surface* pada struktur tercelup sedangkan Maruo mengaplikasikan ekspansi *asymptotic* yang valid dengan jarak cukup besar dari struktur. Hasil perhitungan yang dilakukan mengenai gaya gelombang *mean horizontal* arah longitudinal, transversal dan momen yaw terhadap tanker menunjukkan perbandingan yang sesuai dengan hasil percobaan.

Ogilvie (1963) mengembangkan persamaan berdasarkan teori potensial gelombang 2 dimensi untuk menghitung gaya gelombang *orde-2* arah vertikal dan horizontal. Perhitungan dilakukan pada silinder tercelup yang dikenai gaya dari gelombang reguler arah *beam seas*. Perhitungan diselesaikan dengan pendekatan analitik dan menghasilkan luaran yang sesuai dengan teori potensial gelombang.

Goodman (1965) menetapkan gaya gelombang yang bekerja pada struktur apung dengan mengintegrasikan langsung tekanan pada keseluruhan permukaan struktur tercelup. Obyek yang diteliti adalah silinder tercelup yang dikenai gaya gelombang reguler *beam seas* dan *head seas*. Namun tidak ada perbandingan antara perhitungan dengan hasil percobaan.

Salvesen (1974) menurunkan persamaan total dari gaya dan momen gelombang *orde-2 mean drift* dan *low frequency* berdasarkan konsep potensial gelombang 3 dimensi. Persamaan dihitung berdasarkan pengintegralan tekanan seluas permukaan struktur tercelup. Perhitungan dibandingkan dengan hasil percobaan yang dilakukan oleh Faltinsen dan Loken (1978) dan dinyatakan bahwa teori tersebut dapat diaplikasikan ke obyek langsing (*slender body*) pada kasus lain.

Pinkster (1976) mengembangkan persamaan dengan metode pengintegralan langsung tekanan *mean* dan *low frequency* dan struktur apung pada gelombang *irregular*. Hasil perhitungan menunjukkan hasil yang sesuai dengan hasil percobaan.

Wichers (1982) meneliti gerakan *low frequency surge* pada struktur apung tertambat dengan menggunakan analisis dinamis *time domain*. Gaya dan momen

gelombang orde-2 diekspresikan ke dalam *Quadratic Transfer Function* (QTF). Obyek penelitian dilakukan pada tanker yang ditambatkan pada 2 tali tambat linier sederhana. Hasil perhitungan menunjukkan signifikansi gerakan *surge low frequency* yang dipengaruhi oleh gelombang orde-2.

Wichers (1984) juga meneliti gaya redaman *low frequency* yang bekerja pada struktur apung tertambat. Berdasarkan penelitian yang dilakukan redaman potensial pada struktur apung relatif cukup kecil dan dapat diabaikan sehingga gaya redaman yang diperhitungkan dalam perhitungan gaya gelombang orde-2 adalah redaman yang disebabkan oleh keberadaan gelombang akibat pengaruh viskositas.

Wichers (1986) meneliti gaya gelombang orde-2 pada struktur apung yang tertambat pada SPM dengan menggunakan simulasi komputer. Simulasi dilakukan dengan memodelkan struktur apung tertambat pada gelombang *irreguler*. Berdasarkan percobaan yang dilakukan menunjukkan gaya reaksi redaman terhadap viskositas gelombang memiliki karakter yang bergerak osilasi cukup lambat pada kondisi air tenang.

Penelitian yang dilakukan pada tesis ini adalah melakukan analisis pada tanker 120.000 DWT yang ditambatkan dengan konfigurasi *external turret mooring* untuk melihat pengaruh dari gaya gelombang orde-2 yang bekerja : *mean drift* dan *low frequency* terhadap respon struktur. Simulasi dilakukan dengan pemodelan struktur apung tertambat yang dikenai gaya gelombang orde-1, orde-2 dan kombinasi orde-1 dan orde-2. Selain itu variabel divariasikan berdasarkan kedalaman dasar laut, untuk melihat pengaruh kedalaman terhadap respon struktur tertambat yang dikenai gaya gelombang orde-2.

2.2 DASAR TEORI

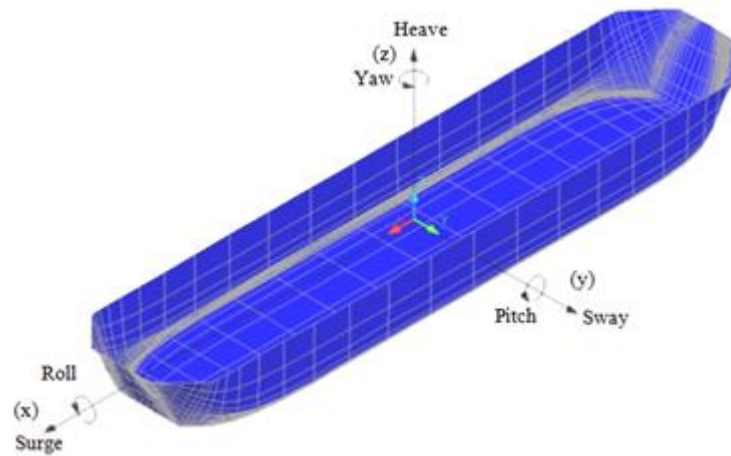
2.2.1 Gerakan Struktur Apung

Gerakan struktur apung pada dasarnya dapat dibagi menjadi dua, gerakan statis dan gerakan dinamis. Gerakan statis atau yang biasa disebut dengan *offset* dihasilkan pada saat perhitungan statis. Sedangkan gerakan dinamis dihasilkan pada saat perhitungan dinamis. Menurut Faltinsen (1990) gerakan dinamis sebuah struktur apung terdiri dari beberapa jenis gerakan, yaitu :

1. Gerakan dalam rentang frekuensi gelombang (*wave frequency motion*)
2. Gerakan dalam rentang frekuensi tinggi (*high-frequency motion*)
3. Gerakan dalam rentang frekuensi rendah dan *mean drift* (*slow-frequency motion and mean drift*)

Dalam penerapannya, gerakan rentang frekuensi tinggi tidak berdampak cukup signifikan pada struktur tertambat dengan konfigurasi tali tambat longgar (*catenary mooring line*), sebagaimana kasus dalam penelitian ini. Gerakan tersebut akan menjadi cukup signifikan jika sistem konfigurasi tali tambatnya bersifat tegang (*taut mooring system*), seperti halnya yang terdapat pada struktur *Tensioned Leg Platform* (TLP).

Jika ditinjau dari arah gerakannya, gerakan struktur apung dibagi menjadi dua jenis, gerakan yang bersifat translasional dan rotasional. Gerakan *rigid body* yang bersifat translasional terdiri dari gerakan *surge*, *sway* dan *heave*. Sedangkan gerakan rotasional terdiri dari *roll*, *pitch* dan *yaw*. Moda gerakan tersebut dapat dilihat penjelasannya pada Gambar 2-1. Dengan memakai konversi sumbu tangan kanan. Tiga gerakan translasi pada arah sumbu x, y dan z, adalah masing-masing *surge* (ζ_1), *sway* (ζ_2) dan *heave* (ζ_3), sedangkan untuk gerakan rotasi terhadap ketiga sumbu adalah *roll* (ζ_4), *pitch* (ζ_5) dan *yaw* (ζ_6).



Gambar 2-1 Arah gerakan struktur apung berdasarkan sistem sumbu (Wibowo, 2014)

Gerakan dalam rentang frekuensi gelombang merupakan gerakan yang terjadi pada rentang frekuensi gelombang pada umumnya, yaitu berkisar di antara 0,3 s.d. 2,0 rad/s, atau jika dinyatakan dalam bentuk periode gelombang berkisar antara 3 s.d. 20 detik. Gerakan dalam rentang frekuensi tinggi akan menjadi cukup signifikan pada struktur TLP, atau yang biasa dikenal dengan istilah “*ringing*” dan “*springing*”.-2 jenis gerakan tersebut akan beresonansi dengan gerakan *heave*, *roll* dan *pitch* pada platform. Periode alami dari moda gerakan tersebut umumnya berkisar antara 2 s.d. 4 detik yang lebih kecil dari periode gelombang pada umumnya. Gerakan tersebut dibangkitkan oleh pengaruh non-linier gelombang, “*Ringing*” berkaitan dengan efek osilasi transien (sementara), sedangkan “*Springing*” berkaitan dengan efek osilasi tetap (Faltinsen, 1990).

Efek non-linier serupa juga menghasilkan gerakan *slow drift* dan *mean drift* terutama saat struktur terkena beban gelombang, angin dan arus. Pada struktur apung tertambat efek non-linier tersebut dapat menghasilkan eksitasi gaya pada periode yang sama dengan periode alami struktur tertambat, sehingga menghasilkan resonansi. Periode resonansi umumnya terjadi dalam rentang 1 s.d. 2 menit. Pada struktur tertambat efek non-linier ini berpengaruh pada moda gerak horizontal (*surge*, *sway* dan *yaw*).

2.2.2 Eksitasi Gaya Gelombang

2.2.2.1 Teori Potensial Gelombang

Pada bagian ini akan dijelaskan konsep teori hidrodinamika sebagai dasar perhitungan gaya gelombang non-linier orde-2: gaya *mean* dan *low frequency* pada struktur apung. Teori ini dikembangkan berdasarkan asumsi dasar bahwa fluida di sekeliling struktur tidak memiliki viskositas (*inviscid*), tak berotasi (*irrotational*), homogen (*homogeneous*), dan tak mampu mampat (*incompressible*). Aliran fluida dapat dideskripsikan sebagai kecepatan potensial ϕ pada kecepatan di sembarang titik medan alirannya, \bar{V} yang diturunkan dari persamaan kemiringannya :

$$\bar{V} = \bar{\nabla} \cdot \phi \quad (2-1)$$

dengan,

$$\bar{\nabla} = \text{vektor operator dan } \phi = \phi(\bar{X}, t) \quad (2-2)$$

dengan \bar{X} merupakan vektor posisi relatif terhadap sistem sumbu tetap dan t adalah waktu.

Dalam kasus sembarang, gerakan partikel fluida dan kecepatan potensial ϕ merupakan faktor yang tidak diketahui dan harus ditentukan terlebih dahulu kondisi batasnya dan persamaan geraknya yang sesuai dengan aliran fluida. Berdasarkan konsep teori hidrodinamika, kecepatan potensial ϕ pada fluida dan komponen-komponen turunannya, seperti kecepatan aliran, tinggi gelombang, tekanan, gaya hidrodinamika dan gerakan suatu objek diasumsikan sebagai deret pangkat konvergen yang bersesuaian dengan parameter kecil ε , sehingga dapat dituliskan menjadi :

Potensial :

$$\phi = \varepsilon \phi^{(1)} + \varepsilon^2 \phi^{(2)} + O(\varepsilon^2) \text{ --- } \varepsilon \ll 1 \quad (2-3)$$

Elevasi gelombang :

$$\zeta = \zeta^{(0)} + \varepsilon \zeta^{(1)} + \varepsilon^2 \zeta^{(2)} + O(\varepsilon^2) \quad (2-4)$$

Gerakan suatu objek :

$$\bar{X} = \bar{X}^{(0)} + \varepsilon \bar{X}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{X}^{(2)} + O(\varepsilon^2) \quad (2-5)$$

Komponen orde-1 beresilasi dengan frekuensi gelombang sedangkan komponen orde-2 selain beresilasi pada frekuensi rendah (*low frequency*) juga pada frekuensi tinggi (*high frequency*). Komponen orde-1 dapat ditandai dengan afiks ⁽¹⁾ dan orde-2 sebagai ⁽²⁾ atau juga dapat disebut sebagai hasil produk orde-1, sebagai contoh komponen tekanan orde-2 didapatkan dari komponen orde-1, sebagai berikut :

$$-\frac{1}{2}\rho|\bar{V}\phi^{(1)}|^2 \quad (2-6)$$

Persamaan 2-6 merupakan salah satu komponen dari orde-2.

Dalam penurunan persamaan gaya gelombang orde-2 pada suatu objek struktur apung dapat dilakukan dengan penjabaran deret pangkat yang bersesuaian dengan parameter kecil ϵ . Dalam menurunkan teori tersebut diasumsikan bahwa gerakan *low frequency* yang disebabkan oleh gaya gelombang orde-2 memiliki harga yang relatif kecil dibandingkan dengan gerakan orde-1. Jika dicermati dalam pengukuran gerakan *low frequency* pada kasus struktur apung tertambat dalam rentang frekuensi rendah didapatkan harga amplitudo yang relatif besar sehingga menyalahi asumsi sebelumnya. Hal ini disebabkan karena intensitas gerakan mengalami resonansi pada frekuensi alaminya dan redaman pada *low frequency* relatif cukup kecil. Dengan mengabaikan intensitas dan redaman yang cukup kecil, gerakan *low frequency* yang disebabkan oleh gaya gelombang orde-2 akan selalu lebih kecil jika dibandingkan dengan gerakan orde-1.

Pada bagian ini dijelaskan kondisi batas potensial diformulasikan berdasarkan orde-1 dan orde-2. Jika potensial diketahui sebagai tekanan pada suatu titik dalam fluida maka dapat dideskripsikan ke dalam persamaan Bernoulli :

$$p = p_0 - \rho g X_3 - \rho \phi_t - \frac{1}{2}\rho|\bar{V}\phi^{(1)}|^2 + C(t) \quad (2-7)$$

Gaya fluida yang bekerja pada struktur aping didapatkan dengan metode pengintegralan secara langsung mengikuti persamaan dasar untuk menghitung gaya yaitu dari pengintegralan tekanan terhadap suatu luasan :

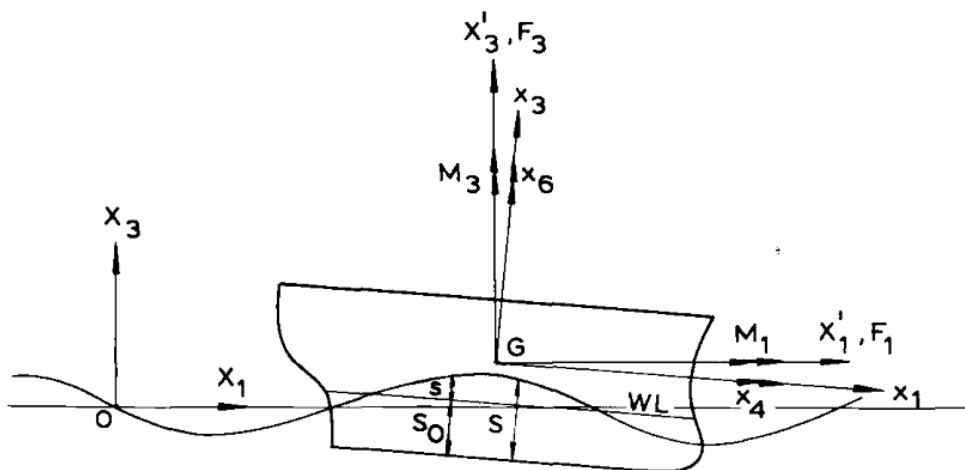
$$\bar{F} = - \iint_S p \cdot \bar{N} \cdot dS \quad (2-8)$$

dan untuk momen :

$$\bar{M} = - \iint_S p. (\bar{X} \times \bar{N}). dS \quad (2-9)$$

2.2.2.2 Sistem Koordinat

Sistem koordinat yang digunakan dalam penyelesaian gaya orde-2 ini dibagi menjadi tiga jenis sumbu (dengan mengacu sistem tangan kanan), sistem-1 adalah $G-x_1-x_2-x_3$ yang terdapat pada struktur dengan G merupakan *centre of gravity* pada struktur apung tersebut. x_1, x_2 dan x_3 mengikuti kemana arah struktur berosilasi. Sistem-2 adalah sumbu berada pada area tetap $O-x_1-x_2-x_3$, titik *origin* sistem ini berada pada permukaan kanal. Sistem ketiga adalah sumbu $G-x_1'-x_2'-x_3'$, titik G berada pada *centre of gravity* struktur dan x_1', x_2', x_3' menunjukkan arah koordinat yang sejajar dengan sistem tetap $O-x_1-x_2-x_3$. Koordinat x_1, x_2 dan x_3 menunjukkan gerakan translasi sedangkan gerakan rotasional struktur didefinisikan dengan simbol x_4, x_5 dan x_6 . Ilustrasi sistem sumbu ditunjukkan pada Gambar 2-2.



Gambar 2-2 Sistem sumbu dalam perhitungan gaya dan momen gelombang orde-2 (Pinkster, 1980)

2.2.2.3 Gerakan dan Kecepatan pada Suatu Titik di Struktur Apung

Jika struktur mengalami gerakan amplitudo kecil dalam 6 derajat kebebasan akibat pengaruh osilasi gelombang orde-1 dan gaya gelombang orde-2 *low*

frequency, maka vektor posisi suatu titik pada struktur apung terhadap sistem O-x₁ -x₂ -x₃ dapat ditulis sebagai berikut :

$$\bar{X} = \bar{X}^{(0)} + \varepsilon \bar{X}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{X}^{(2)} \quad (2-10)$$

dengan, $\bar{X}^{(0)}$ menunjukkan vektor posisi rata-rata dan,

$$\bar{X}^{(0)} = \bar{X}_g^{(0)} + \bar{x} \quad (2-11)$$

$\bar{X}^{(1)}$ menunjukkan gerakan osilasi orde-1 dengan,

$$\bar{X}^{(1)} = \bar{X}_g^{(1)} + \bar{\alpha}^{(1)} \times \bar{x} \quad (2-12)$$

dimana $\bar{\alpha}^{(1)}$ merupakan vektor gerakan rotasional orde-1 dengan komponen x₄, x₅ dan x₆, serta $\bar{X}_g^{(1)}$ merupakan *centre of gravity* dari gerakan orde-1. Begitu juga dengan gerakan orde-2 *low frequency* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\bar{X}^{(2)} = \bar{X}_g^{(2)} + \bar{\alpha}^{(2)} \times \bar{x} \quad (2-13)$$

dimana $\bar{\alpha}^{(2)}$ merupakan vektor gerakan rotasional orde-2 *low frequency* dengan komponen x₄, x₅ dan x₆, serta $\bar{X}_g^{(2)}$ merupakan *centre of gravity* dari gerakan orde-2. Sehingga kecepatannya \bar{V} dapat dituliskan menjadi menjadi :

$$\bar{V} = \dot{\bar{X}} = \varepsilon \dot{\bar{X}}^{(1)} + \varepsilon^2 \dot{\bar{X}}^{(2)} \quad (2-14)$$

$$\text{dengan : } \dot{\bar{X}}^{(1)} = \bar{V}^{(1)} = \dot{\bar{X}}_g^{(1)} + \dot{\bar{\alpha}}^{(1)} \times \bar{x} \quad (2-15)$$

$$\text{dan : } \dot{\bar{X}}^{(2)} = \bar{V}^{(2)} = \dot{\bar{X}}_g^{(2)} + \dot{\bar{\alpha}}^{(2)} \times \bar{x} \quad (2-16)$$

dengan $\dot{\bar{\alpha}}^{(1)}$ dan $\dot{\bar{\alpha}}^{(2)}$ merupakan vektor kecepatan rotasional untuk masing-masing komponen untuk orde-1 dan untuk orde-2.

Orientasi elemen permukaan dari struktur apung relatif terhadap sumbu G-x₁ -x₂ -x₃ dinotasikan sebagai vektor normal n. Vektor normal dari elemen permukaan relatif terhadap sistem sumbu O-x₁ -x₂ -x₃ dan G-x₁' -x₂' -x₃' sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\bar{N} = \bar{N}^{(0)} + \varepsilon \bar{N}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{N}^{(2)} \quad (2-17)$$

dengan,

$$\bar{N}^{(0)} = \bar{n}$$

$$\bar{N}^{(1)} = \bar{\alpha}^{(1)} \times \bar{n}$$

$$\bar{N}^{(2)} = \bar{\alpha}^{(2)} \times \bar{n}$$

2.2.2.4 Kondisi Batas Aliran Fluida

A. Kondisi Batas Fluida Pada Permukaan dan Dasar Kanal

Pada analisis hidrodinamika, aliran fluida dibatasi oleh permukaan dan dasar kanal. Fluida diasumsikan sebagai aliran yang tidak memiliki viskositas (*inviscid*), tak berotasi (*irrotational*), homogen (*homogeneous*), dan tak mampu mampat (*incompressible*) sehingga kecepatan potensial dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\phi = \varepsilon\phi^{(1)} + \varepsilon^2\phi^{(2)} \quad (2-18)$$

Potensial didefinisikan relatif terhadap sistem sumbu tetap $O-x_1-x_2-x_3$ dengan :

$$\phi = \phi(\bar{X}, t) \quad (2-19)$$

dengan t menunjukkan waktu dan \bar{X} menunjukkan vektor posisi pada suatu titik yang ditinjau.

Teori potensial gelombang harus memenuhi kondisi batasan berikut :

- Kondisi fluida di sembarang tempat harus memenuhi persamaan kontinuitas atau dapat dituliskan sebagai :

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (2-20)$$

Untuk memenuhi kondisi batas tersebut persamaan orde-1 dan orde-2 dapat dituliskan menjadi :

$$\nabla^2\phi^{(1)} = 0 \quad (2-21)$$

$$\nabla^2\phi^{(2)} = 0 \quad (2-22)$$

- Kondisi batas di permukaan kanal diasumsikan memiliki tekanan konstan dan kecepatan partikel fluida yang sama dengan tekanan serta kecepatan di permukaan kanal. Secara fisik dapat diartikan bahwa partikel fluida tidak melewati permukaan fluida. Menurut Stoker (1957) kondisi batas yang memenuhi gelombang orde-1 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$g\phi_{x_3}^{(1)} + \phi_{tt}^{(1)} = 0, \text{ pada } X_3 = 0 \quad (2-23)$$

Kondisi batas tersebut akan memenuhi gelombang *orde-2* jika :

$$g\phi_{X_3}^{(2)} + \phi_{tt}^{(2)} = -2\bar{\nabla}\phi^{(1)} \cdot \bar{\nabla}\phi_t^{(1)} + \phi_t^{(1)} \left(\phi_{X_3X_3}^{(1)} + \frac{1}{g}\phi_{ttX_3}^{(1)} \right),$$

pada $X_3 = 0$ (2-24)

Kondisi batas pada dasar kanal diasumsikan bahwa dasar kanal sangat padat, sehingga diasumsikan tidak ada partikel yang melewati batas tersebut. Oleh karena itu kecepatan vertikal dari fluida harus sama dengan nol, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\bar{\nabla}\phi^{(1)} \cdot \bar{n}_b = 0 \quad (2-25)$$

$$\bar{\nabla}\phi^{(2)} \cdot \bar{n}_b = 0 \quad (2-26)$$

dengan \bar{n}_b merupakan vektor normal pada suatu titik di permukaan dasar kanal.

B. Kondisi Batas Fluida pada Permukaan Struktur Apung

Secara umum kondisi batas pada permukaan struktur apung dapat didefinisikan sebagai kondisi dimana kecepatan relatif fluida terhadap struktur (dengan arah normal terhadap strukturnya) memiliki harga nol. Hal ini secara fisik diartikan bahwa partikel fluida tidak menembus permukaan struktur apung. Kondisi batas tersebut dapat dituliskan sebagai :

$$\bar{\nabla}\phi \cdot \bar{N} = \bar{\nabla} \cdot \bar{N} \quad (2-27)$$

Kondisi batas tersebut jika dituliskan sebagai kondisi orde-1 adalah sebagai berikut :

$$\bar{\nabla}\phi^{(1)} \cdot \bar{n} = \bar{\nabla}^{(1)} \cdot \bar{n} \quad (2-28)$$

Dan kondisi batas orde-2 adalah sebagai berikut :

$$\bar{\nabla}\phi^{(2)} \cdot \bar{n} = -(\bar{X}^{(1)} \cdot \bar{\nabla}) \cdot \bar{\nabla}^{(1)} \cdot \bar{n} + (\bar{V}^{(1)} - \bar{\nabla}^{(1)}) \cdot \bar{N}^{(1)} + \bar{V}^{(2)} \cdot \bar{n} \quad (2-29)$$

C. Kondisi Batas Fluida Tak hingga

Batas di depan dan belakang kanal diasumsikan berada cukup jauh dari titik awal gelombang sehingga syarat batasnya dapat diabaikan.

2.2.2.5 Tekanan Suatu Titik dalam Fluida

Jika kecepatan potensial sudah dapat diketahui, maka tekanan fluida pada suatu titik dapat dituliskan dengan persamaan Bernoulli :

$$p = p_0 - \rho g X_3 - \rho \phi_t - \frac{1}{2} \rho |\bar{\nabla} \phi^{(1)}|^2 + C(t) \quad (2-30)$$

dengan,

p_0 = tekanan pada atmosfer

X_3 = jarak arah vertikal di bawah permukaan air

ϕ = kecepatan potensial

$C(t)$ = konstanta/fungsi yang independen terhadap koordinat sistem sumbu fixed

t = waktu

ρ = densitas fluida

Pada persamaan Bernoulli (2-30), variabel p_0 dan $C(t)$ dapat diasumsikan sebagai nol tanpa kehilangan arti dari persamaan umum tersebut, sehingga persamaan 2-30 dapat dituliskan kembali menjadi :

$$p = -\rho g X_3 - \rho \phi_t - \frac{1}{2} \rho |\bar{\nabla} \phi^{(1)}|^2 \quad (2-31)$$

Dengan mengasumsikan tekanan pada suatu titik mengandung komponen orde-1 dan orde-2 *low frequency* maka persamaan tekanan jika dituliskan dalam deret Taylor akan menjadi :

$$p = p^{(0)} + \varepsilon p^{(1)} + \varepsilon^2 p^{(2)} \quad (2-32)$$

dengan :

- Tekanan hidrostatik

$$p^{(0)} = -\rho g X_3^{(0)} \quad (2-33)$$

- Tekanan orde-1

$$p^{(1)} = -\rho g X_3^{(1)} - \rho \phi_t^{(1)} \quad (2-34)$$

- Tekanan orde-2

$$p^{(2)} = -\frac{1}{2} \rho |\bar{\nabla} \phi^{(1)}|^2 - \rho \phi_t^{(2)} - \rho (\bar{X}^{(1)} \cdot \bar{\nabla} \phi_t^{(1)}) - \rho g X_3^{(2)} \quad (2-35)$$

2.2.2.6 Gaya dan Momen Gaya Gelombang Orde-2

A. Gaya Gelombang Orde-2

Gaya gelombang orde-2 didapatkan dari pengintegralan langsung tekanan fluida pada luasan area yang tercelup, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\bar{F} = - \iint_S p \cdot \bar{N} \cdot dS \quad (2-36)$$

dengan S merupakan permukaan tercelup dan N adalah vektor normal terhadap elemen kecil permukaan dS yang relatif terhadap sistem sumbu $G-x_1' -x_2' -x_3'$.

Permukaan tercelup S terbagi menjadi dua bagian : Bagian S_0 yang konstan terhadap garis air statis dan bagian yang berosilasi antara garis air statis dan profil gelombang sepanjang struktur apung.

Substitusi persamaan tekanan p (2-32) dan vektor normal N (2-17) ke dalam persamaan gaya (2-36), menghasilkan persamaan gaya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \bar{F} &= \iint_{S_0} (p^{(0)} + \varepsilon p^{(1)} + \varepsilon^2 p^{(2)}) (\bar{n} + \varepsilon \bar{N}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{N}^{(2)}) dS + \iint_S (p^{(0)} + \\ &\varepsilon p^{(1)} + \varepsilon^2 p^{(2)}) (\bar{n} + \varepsilon \bar{N}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{N}^{(2)}) dS \end{aligned} \quad (2-37)$$

$$= \bar{F}^{(0)} + \varepsilon \bar{F}^{(1)} + \varepsilon^2 \bar{F}^{(2)} + O(\varepsilon^3) \quad (2-38)$$

Gaya hidrostatis $F^{(0)}$ didapatkan dengan cara mengintegalkan tekanan hidrostatis $p^{(0)}$ seluas permukaan struktur yang tercelup S_0 , sehingga dapat dituliskan sebagai :

$$\bar{F}^{(0)} = \rho g \iint_{S_0} X_3^{(0)} \cdot \bar{n} \cdot dS = (0, 0, \rho g V) \quad (2-39)$$

Gaya gelombang osilasi orde-1 didapatkan dengan menuliskan persamaan sebagai berikut :

$$\bar{F}^{(1)} = - \iint_{S_0} (p^{(0)} \cdot \bar{n} + p^{(0)} \cdot \bar{N}^{(1)}) dS \quad (2-40)$$

dengan $\bar{F}^{(1)}$ merupakan total gaya gelombang orde-1 yang terdiri dari gaya pengembali hidrostatis, gaya eksitasi gelombang dan gaya reaksi hidrodinamis. Meninjau persamaan komponen $\bar{F}^{(1)}$ dapat dituliskan kembali berdasarkan hukum Newton sebagai berikut :

$$\bar{F}^{(1)} = M \cdot \ddot{X}_g^{(1)} \quad (2-42)$$

Gaya gelombang orde-2 didapatkan dengan mengintegrasikan semua produk tekanan p dan vektor normal n yang memberikan kontribusi pengaruh gaya seluas bagian konstan S_0 pada permukaan tercelup dan mengintegrasikan komponen tekanan orde-1 seluas permukaan yang berosilasi, s , sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\bar{F}^{(2)} = - \iint_{S_0} (p^{(1)} \cdot \bar{N}^{(1)} + p^{(2)} \cdot \bar{n} + p^{(0)} \cdot \bar{N}^{(2)}) dS - \iint_{S_0} p^{(1)} \cdot \bar{n} \cdot dS \quad (2-43)$$

Meninjau persamaan 2-43, bagian-2 dari integral-1, $p^{(2)}$ didapatkan dari persamaan 2-35. Dan bagian ketiga dari integral-1 merupakan komponen orde-2 hidrostatik :

$$- \iint_{S_0} p^{(0)} \cdot \bar{N}^{(2)} dS = \bar{\alpha}^{(2)} \times - \iint_{S_0} p^{(0)} \cdot \bar{n} \cdot dS \quad (2-44)$$

$$= \bar{\alpha}^{(2)} \times (0, 0, \rho g V) \quad (2-45)$$

Integral-2 dari persamaan diselesaikan dengan mensubstitusikan $p^{(1)}$ dari persamaan 2-34 dan mendeskripsikan elemen permukaan dS sebagai :

$$dS = dX_3 \cdot dl \quad (2-46)$$

serta mendefinisikan tekanan pada garis air sebagai :

$$-\rho \phi_t^{(1)} = \rho g \zeta^{(1)} \quad (2-47)$$

sehingga persamaan integralnya menjadi :

$$- \int_{WL} \int_{X_3 WL}^{\zeta} (-\rho g X_3 + \rho g \zeta^{(1)}) \bar{n} \cdot dX_3 \cdot dl \quad (2-48)$$

dan menghasilkan :

$$- \int_{WL} \frac{1}{2} \rho g \zeta_r^{(1)2} \cdot \bar{n} \cdot dl \quad (2-49)$$

dengan elevasi gelombang relatif yang didefinisikan sebagai :

$$\zeta_r^{(1)} = \zeta^{(1)} - X_{3WL}^{(1)} \quad (2-50)$$

sehingga persamaan akhir dari persamaan 2-43 menjadi :

$$\begin{aligned} \bar{F}^{(2)} = & - \int_{WL} \frac{1}{2} \rho g \zeta_r^{(1)2} \cdot \bar{n} \cdot dl + \alpha^{(1)} \times \left(M \cdot \ddot{X}_g^{(1)} \right) + \\ & - \iint_{S_0} \left\{ -\frac{1}{2} \rho [\bar{\nabla} \phi^{(1)}]^2 - \rho \phi_t^{(2)} - \rho \left(\bar{X}^{(1)} \cdot \bar{\nabla} \phi_t^{(1)} \right) \right\} \bar{n} \cdot dS + \\ & - \iint_{S_0} -\rho g X_3^{(2)} \cdot \bar{n} \cdot dS + \bar{\alpha}^{(2)} \times (0, 0, \rho g V) \end{aligned} \quad (2-51)$$

B. Momen Gelombang Orde-2

Momen gelombang orde-2 dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut :

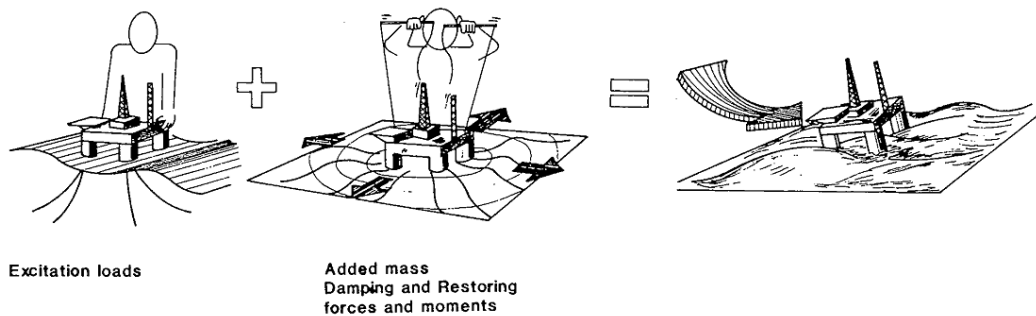
$$\bar{M} = - \iint_S p. (\bar{X}' \times \bar{N}). dS \quad (2-52)$$

Penurunan persamaan untuk mendapatkan momen dilakukan dengan metode yang sama untuk mendapatkan persamaan gaya gelombang orde-2 sehingga persamaan akhir momen gelombang orde-2 dapat dituliskan sebagai

$$\begin{aligned} \bar{M}^{(2)} = & - \int_{WL} \frac{1}{2} \rho g \zeta_r^{(1)2}. (\bar{x} \times \bar{n}). dl + \alpha^{(1)} \times (I. \ddot{\alpha}^{(1)}) + \\ & - \iint_{S_0} \left\{ -\frac{1}{2} \rho [\bar{\nabla} \phi^{(1)}]^2 - \rho \phi_t^{(2)} - \rho (\bar{X}^{(1)}. \bar{\nabla} \phi_t^{(1)}) \right\}. (\bar{x} \times \bar{n}). dS + \\ & - \iint_{S_0} -\rho g X_3^{(2)}. (\bar{x} \times \bar{n}). dS \end{aligned} \quad (2-53)$$

2.2.3 Respon Struktur pada Gelombang Reguler

Struktur apung pada gelombang reguler jika ditinjau dari permasalahan hidrodinamisnya terdiri dari dua bagian : gaya dan momen yang beresilasi pada kondisi air tenang dan gaya dan momen struktur yang beresilasi akibat eksitasi gelombang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-3.



Gambar 2-3 Permasalahan hidrodinamika : gaya dan momen struktur yang beresilasi akibat eksitasi gelombang (kiri), gaya dan momen yang beresilasi pada air tenang (tengah) dan gabungan dari-2nya (kanan). (Faltinsen, 1990)

2.2.3.1 Gaya dan Momen Struktur yang Beresilasi pada Kondisi *Still Water*

Struktur bangunan apung yang beresilasi terhadap dirinya sendiri akan mempengaruhi fluida di sekelilingnya dan interaksi fluida yang terpengaruh akan menghasilkan gaya dan momen yang bekerja pada struktur. Total gaya pada

struktur didapatkan dari hasil integrasi tekanan yang mengenai luasan permukaan struktur yang dikenainya. Berdasarkan persamaan gerak, koefisien massa tambah dan redaman (*damping*) pada gerakan harmonik dapat ditentukan. Gaya pengembali dan momen dapat dihitung berdasarkan perhitungan hidrostatis dan massa.

Struktur apung yang berosilasi pada kondisi air tenang akan menghasilkan gaya inersia yang berkorelasi dengan percepatan gerakan, gaya redaman berkorelasi dengan kecepatan gerakan dan gaya pengembali berkorelasi dengan perpindahan gerakan. Gaya-gaya tersebut jika diformulasikan ke dalam persamaan gerak akan menjadi :

$$(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta = 0 \quad (2-54)$$

dengan,

M = massa struktur (*generalized mass*)

A = massa tambah (*added mass*)

B = koefisien redaman (*redaman*)

C = koefisien pengembali (*restoring*)

2.2.3.2 Gaya dan Momen Struktur yang Berosilasi akibat Eksitasi Gelombang

Pada kondisi ini dijelaskan bahwa struktur apung berosilasi akibat eksitasi gelombang. Gaya dan momen yang bekerja dikenal dengan gaya dan momen Froude-Kriloff dan difraksi. Gaya Froude-Kriloff dihasilkan dari area yang dikenai tekanan yang tidak terganggu pola alirannya (*undisturbed*). Sedangkan gaya difraksi diperoleh dari perubahan area yang dikenai tekanan yang terganggu pola alirannya akibat difraksi. Gaya eksitasi gelombang secara umum diformulasikan sebagai :

$$F e^{-i\omega_e t} = \text{eksitasi gaya eksitasi gelombang} \quad (2-55)$$

2.2.3.3 Periode Natural Struktur Tertambat (Tanker Tertambat)

Periode natural struktur tertambat, berupa kapal tanker yang tertambat menurut standar DNV RP F205 (2010) ditunjukkan pada Tabel 2-1.

Tabel 2-1 Periode natural tanker tertambat (DNV, 2010)

Gerakan	<i>Surge</i>	<i>Sway</i>	<i>Heave</i>	<i>Roll</i>	<i>Pitch</i>	<i>Yaw</i>
Periode natural	>100 s	>100 s	5 – 12 s	5 – 30 s	5 – 12 s	>100 s

Berdasarkan tabel 2-1 ditunjukkan bahwa gerakan vertikal yang terdiri dari *heave*, *roll* dan *pitch* memiliki periode natural sekitar 5 – 30 detik yang bersesuaian dengan frekuensi gelombang orde-1 (3 – 20 detik). Sedangkan gerakan horizontal : *surge*, *sway* dan *yaw* memiliki periode cenderung panjang yang bersesuaian dengan frekuensi gelombang orde-2, *low frequency wave*. Meninjau tabel tersebut dapat disimpulkan juga bahwa gerakan dalam rentang frekuensi tinggi tidak cukup signifikan dalam kasus tanker tertambat karena periode natural gerakannya tidak ada yang menyerupai periode gelombang frekuensi tinggi (*high-frequency wave*), yang berkisar antara 2 – 4 detik.

2.2.3.4 Response Amplitude Operator (RAO)

Persamaan gerak gabungan dari-2 kondisi permasalahan hidrodinamika yang telah dijelaskan sebelumnya menghasilkan total persamaan gerak sebagai berikut :

$$(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta = Fe^{-i\omega_e t} \quad (2-56)$$

dengan mendefinisikan :

$$\eta = \eta_0 \sin(\omega t - \varepsilon) \quad (2-57)$$

Sehingga didapatkan :

$$-(M + A)\omega^2 \eta_0 \sin(\omega t - \varepsilon) + B\omega \eta_0 \cos(\omega t - \varepsilon) + C\eta_0 \sin(\omega t - \varepsilon) = Fe^{-i\omega_e t} \quad (2-58)$$

Karena persamaan tersebut harus berlaku untuk semua harga t, dengan pertimbangan bahwa-2nya saling berkorelasi ortogonal, maka suku $\sin \omega t$ dan $\cos \omega t$ dapat diambil sama dengan nol (Djarmiko, 2012), sehingga persamaan 2-58 menjadi :

$$-(M + A)\omega^2 \eta_0 \cos \varepsilon + B\omega \eta_0 \sin \varepsilon + C\eta_0 \cos \varepsilon = Fe^{-i\omega_e t} \quad (2-59)$$

dan

$$(M + A)\omega^2\eta_0 \sin \varepsilon + B\omega\eta_0 \cos \varepsilon + C\eta_0 \sin \varepsilon = 0 \quad (2-60)$$

Penyelesaian-2 persamaan ini untuk η_0 memberikan :

$$\eta_0 = \frac{F e^{-i\omega t}}{\sqrt{[C-(M+A)\omega^2]^2+(B\omega)^2}} \quad (2-61)$$

Dalam hal ini amplitudo gaya eksitasi $F e^{-i\omega t}$, kekakuan C dan massa $(M + A)$ memiliki harga tetap, sehingga intensitas amplitudo respon gerakan η_0 bervariasi bergantung pada nilai redaman B dan frekuensinya ω . Jika dalam hal ini nilai redaman B diasumsikan tetap, maka amplitudo respon gerakan hanya dipengaruhi oleh frekuensinya.

Jika sistem tersebut dikenai gaya statis searah dengan sumbu vertikal, maka sistem tersebut akan terdefleksi searah sumbu vertikal η_s yang memiliki harga :

$$\eta_s = \frac{F e^{-i\omega t}}{C} \quad (2-62)$$

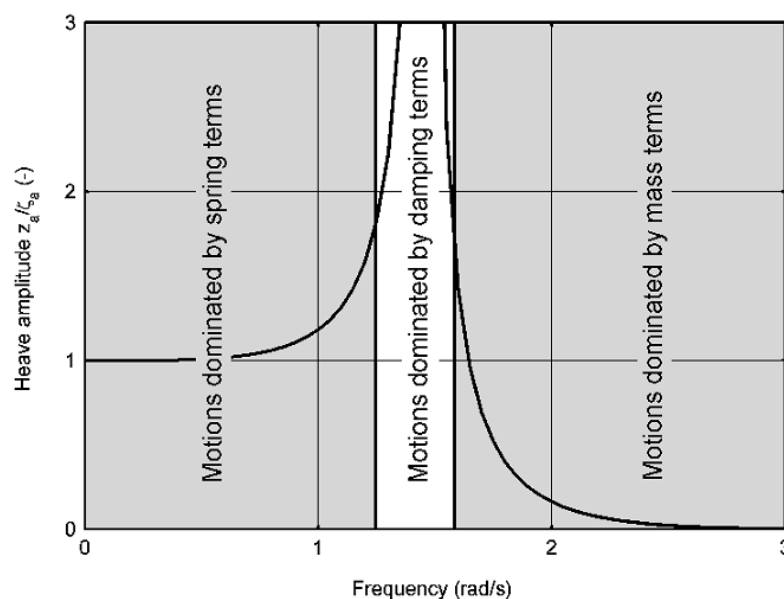
Dengan memperhatikan hubungan persamaan 2-62 dan juga persamaan frekuensi alami $\omega_n = \sqrt{C/(M + A)}$, faktor redaman $B_f = B/B_c$ dengan $B_c = 2(M + A)\omega_n$ persamaan 2-61 dapat dituliskan kembali menjadi :

$$\frac{\eta_0}{\eta_s} = \frac{F e^{-i\omega t}/C}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \{2B_f(\omega/\omega_n)\}^2}} \quad (2-63)$$

Persamaan 2-63 dikenal dengan *transfer function* atau *Response Amplitude Operator* (RAO). RAO merupakan fungsi respon gerakan dinamis struktur yang disebabkan oleh gelombang dengan rentang frekuensi tertentu. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur.

RAO dapat diilustrasikan sebagai grafik perbandingan amplitudo respon dengan amplitudo gelombang terhadap frekuensi gelombang, seperti terlihat pada Gambar 2-4. Berdasarkan gambar tersebut ditunjukkan kurva RAO *heave* pada sebuah silinder tercelup. Kurva RAO memiliki bagian-bagian yang dipengaruhi oleh komponen kekakuan, redaman dan massa. Meninjau pada Gambar 2-4 bagian-bagian RAO terdiri dari tiga daerah, yaitu :

1. Daerah frekuensi rendah, $\omega^2 \ll c/(m + a)$, dengan gerakan *heave* yang didominasi oleh komponen kekauan. Pada daerah ini gerakan silinder mengikuti pergerakan gelombang dengan semakin rendahnya frekuensi, sehingga rasio amplitudo gerakan *heave* dengan amplitudo gelombang bernilai 1,00 dan sudut fasenya cenderung bernilai 0. Pada daerah frekuensi rendah, panjang gelombang terlalu panjang jika dibandingkan dengan panjang struktur (diameter silinder), sehingga silinder akan mengikuti pergerakan gelombang.
2. Daerah frekuensi alami, $\omega^2 \approx c/(m + a)$, dengan gerakan *heave* yang didominasi oleh komponen redaman. Pada daerah ini terjadi resonansi gerakan sehingga gerakan mengalami magnifikasi karena kecilnya redaman. Sudut fase sebesar $-\pi$ terjadi pada daerah ini dan pergantiannya cukup curam.
3. Daerah frekuensi tinggi, $\omega^2 \gg c/(m + a)$, dengan gerakan *heave* didominasi oleh komponen massa. Pada daerah ini pergerakan gelombang kehilangan pengaruhnya terhadap struktur (silinder). Semakin tinggi frekuensinya maka semakin rapat antara puncak gelombang yang bersebelahan, sehingga seolah-olah struktur bergerak pada air yang relatif datar.



Gambar 2-4 Kurva RAO terhadap frekuensi gelombang (Journee and Massie, 2001)

2.2.3.5 Quadratic Transfer Function (QTF)

Dalam pembahasan sebelumnya dijelaskan bahwa persamaan gaya dan momen akibat gelombang orde-2 *low frequency* didapatkan dari metode pengintegralan langsung dari komponeb tekanan orde-2 yang bekerja pada elemen permukaan struktur tercelup. Tetapi penyelesaian tersebut relatif sulit untuk diaplikasikan pada penyelesaian numerik. Dalam bab ini akan dijelaskan penyelesaian gaya dan momen akibat gelombang orde-2 *low frequency* yang relatif lebih mudah untuk diaplikasikan pada perhitungan numerik, yaitu sebagai *Quadratic Transfer Function (QTF)*. QTF ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan dinamis dalam ranah frekuensi (*frequency domain*) maupun dalam ranah waktu (*time domain*).

Komponen QTF, *transfer function* pada orde-2 yang bergantung pada komponen-komponen orde-1 didapatkan dengan metode komputasi berdasarkan konsep teori potensial 3 dimensi linier. Pengaruh dari potensial orde-2 dihitung berdasarkan metode yang sama dengan potensial orde-1.

Dalam pembahasan ini, QTF total dibagi berdasarkan komponen pembentuk yang menyusunnya (Pinkster, 1980), yaitu :

1. Elevasi gelombang relatif orde-1

$$-\frac{1}{2}\rho g \int_{WL} \zeta_r^{(1)2} \cdot \bar{n} \cdot dl \quad (2-64)$$

2. Penurunan tekanan akibat kecepatan orde-1

$$-\iint_{S_0} -\frac{1}{2}\rho |\bar{\nabla}\phi^{(1)}|^2 \cdot \bar{n} \cdot dS \quad (2-65)$$

3. Tekanan akibat produk kemiringan tekanan orde-1 dan gerakan orde-1

$$-\iint_{S_0} -\rho \left(\bar{X}^{(1)} \cdot \bar{\nabla}\phi_t^{(1)} \right) \cdot \bar{n} \cdot dS \quad (2-66)$$

4. Pengaruh akibat produk gerakan rotasional orde-1 dan gaya inersia

$$\bar{\alpha}^{(1)} \times \left(M \cdot \ddot{\bar{X}}_g^{(1)} \right) \quad (2-67)$$

5. Pengaruh akibat potensial orde-2

$$-\iint_{S_0} -\rho (\phi_{w_t}^{(2)} + \phi_{d_t}^{(2)}) \cdot \bar{n} \cdot dS \quad (2-68)$$

Metode yang digunakan untuk mendapatkan QTF gaya yang bergantung pada komponen orde-1 (1, 2, 3 dan 4) yaitu dengan mempertimbangkan bagian gaya *low frequency* dari komponen longitudinal struktur terhadap elevasi gelombang relatif :

$$F_1^{(2)} = F_1^{(2)}(t) = - \int_{WL} \frac{1}{2} \rho g \zeta_r^{(1)2}(t, l) \cdot n_1(l) \cdot dl \quad (2-69)$$

dengan,

$\zeta_r^{(1)}(t, l)$ = elevasi gelombang relatif pada titik "l" sepanjang garis air dalam fungsi waktu

$n_1(l)$ = jarak panjang elemen dl pada arah longitudinal

Elevasi gelombang reguler dengan komponen *orde-1* dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\zeta^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^N \zeta_i^{(1)} \cdot \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (2-70)$$

Elevasi gelombang *orde-1* reguler pada kelompok gelombang yang terdiri dari dua gelombang reguler dengan frekuensi dan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\zeta^{(1)}(t) = \sum_{i=1}^2 \zeta_i^{(1)} \cdot \cos(\omega_i t + \varepsilon_i) \quad (2-71)$$

$$= \zeta_1^{(1)} \cdot \cos(\omega_1 t + \varepsilon_1) + \zeta_2^{(1)} \cdot \cos(\omega_2 t + \varepsilon_2) \quad (2-72)$$

Sehingga gaya gelombang orde-2 pada kelompok gelombang tersebut dapat dituliskan sebagai :

$$F^{(2)} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \zeta_i^{(1)} \zeta_j^{(1)} P_{ij} \cdot \cos\{(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)\} + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \zeta_i^{(1)} \zeta_j^{(1)} Q_{ij} \cdot \sin\{(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)\} \quad (2-73)$$

$$= \zeta_1^{(1)2} P_{11} + \zeta_2^{(1)2} P_{22} + \zeta_1^{(1)} \zeta_2^{(1)} (P_{12} + P_{21}) \cdot \cos\{(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)\} + \zeta_1^{(1)} \zeta_2^{(1)} (Q_{12} + Q_{21}) \cdot \sin\{(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)\} \quad (2-74)$$

dengan P dan Q merupakan komponen *in-phase* dan *out-phase* dari *transfer function* dalam fungsi waktu :

$$P_{ij} = P_{(\omega_i, \omega_j)} = \int_{WL} \frac{1}{4} \rho g \zeta'_{r_i}(l) \cdot \zeta'_{r_j}(l) \cdot \cos(\varepsilon_{r_i}(l) - \varepsilon_{r_j}(l)) n_l(l) \cdot dl \quad (2-75)$$

$$Q_{ij} = Q_{(\omega_i, \omega_j)} = \int_{WL} \frac{1}{4} \rho g \zeta'_{r_i}(l) \cdot \zeta'_{r_j}(l) \cdot \sin(\varepsilon_{r_i}(l) - \varepsilon_{r_j}(l)) n_l(l) \cdot dL \quad (2-76)$$

Komponen *in-phase* dan *out-phase* jika dijumlahkan akan menghasilkan pengaruh dari 5 komponen penyusun QTF (Persamaan 2-64 s.d. 2-68).

2.2.4 Fenomena Permasalahan Non Linier

Pada pembahasan sebelumnya perhitungan respon struktur didasarkan pada persamaan Bernoulli, yang menekankan tentang teori linier. Adapun untuk memenuhi kondisi yang mendekati kenyataan, faktor-faktor non-linier harus dipertimbangkan dalam perhitungan, yaitu dengan melengkapi penyelesaian komponen persamaan Bernoulli. Adapun faktor-faktor non-linier yang turut diperhitungkan adalah sebagai berikut : gelombang orde-2, angin dan arus.

2.2.4.1 Gelombang Orde-2

Pengaruh gelombang orde-2 akan tampak pada perilaku struktur apung tertambat. Pada gelombang reguler cara yang paling sederhana untuk mendefinisikan pengaruh non-linier adalah dengan melengkapi persamaan Bernoulli (Faltinsen, 1990) seperti yang dijelaskan sebelumnya. Hasil dari persamaan tersebut dapat diklasifikasikan menjadi tiga komponen penyusun : beban *mean wave (drift)*, beban osilasi pengurangan frekuensi (*difference frequency*) dan beban osilasi dari penjumlahan frekuensi (*sum frequency*).

Beban tersebut muncul pada kelompok gelombang yang memiliki amplitudo dan frekuensi yang berbeda. Berikut ini ditunjukkan dua gelombang yang memiliki amplitudo A_1 dan A_2 serta frekuensi ω_1 dan ω_2 .

Misalkan dua gaya gelombang tersebut dituliskan sebagai :

$$F_1 = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t) \quad (2-77)$$

Maka komponen orde-2nya yang merupakan bentuk *quadratic transfer function* menjadi :

$$F_1^2 = \frac{A_1^2}{2} + \frac{A_2^2}{2} + \frac{A_1^2}{2} \cos(2\omega_1 t) + \frac{A_2^2}{2} \cos(2\omega_2 t) + A_1 A_2 \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t\} + A_1 A_2 \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t\} \quad (2-78)$$

dengan,

$$\begin{aligned} \text{komponen } mean \text{ wave} &= \frac{A_1^2}{2} + \frac{A_2^2}{2} \\ \text{komponen pengurangan frekuensi} &= A_1 A_2 \cos\{(\omega_1 - \omega_2)t\} \\ \text{komponen penjumlahan frekuensi} &= \frac{A_1^2}{2} \cos(2\omega_1 t) + \frac{A_2^2}{2} \cos(2\omega_2 t) + \\ &+ A_1 A_2 \cos\{(\omega_1 + \omega_2)t\} \end{aligned}$$

2.2.4.2 Angin

Berdasarkan OCIMF (1997) *Mooring Equipment Guidelines*, perhitungan beban angin didefinisikan sebagai berikut :

Longitudinal wind force

$$F_{xw} = C_{xw} \left(\frac{\rho_w}{7600} \right) V_w^2 A_T \quad (2-79)$$

Lateral wind force

$$F_{yw} = C_{yw} \left(\frac{\rho_w}{7600} \right) V_w^2 A_L \quad (2-80)$$

dengan,

F_{xw} = gaya angin longitudinal (kN)

F_{yw} = gaya angin lateral (kN)

C_{xw} = koefisien gaya angin longitudinal non dimensional

C_{yw} = koefisien gaya angin transversal non dimensional

ρ_w = densitas udara = 1.223 Kg/m³ pada 20⁰ C

V_w = kecepatan angin pada ketinggian 10m (knot)

A_T = luas penampang transversal diatas air (m²)

A_L = luas penampang longitudinal diatas air (m²)

2.2.4.3 Arus

Arus permukaan di sekitar kapal dibangkitkan dari angin lokal, pasang surut, *stokes drift*, massa jenis arus lokal, dan fenomena *set-up* (Faltinsen, 1990).

Berdasarkan OCIMF (1997) *Mooring Equipment Guidelines*, perhitungan beban arus didefinisikan sebagai berikut :

Longitudinal current force

$$F_{xc} = C_{xc} \left(\frac{\rho_c}{7600} \right) V_c^2 T L_{BP} \quad (2-81)$$

Lateral current force

$$F_{yc} = C_{yc} \left(\frac{\rho_c}{7600} \right) V_c^2 T L_{BP} \quad (2-82)$$

dengan,

F_{xc} = gaya arus longitudinal (kN)

F_{yc} = gaya arus lateral (kN)

C_{xc} = koefisien gaya arus longitudinal non dimensional

C_{yc} = koefisien gaya arus transversal non dimensional

ρ_c = densitas air laut = 1025 Kg/m³ pada 20° C

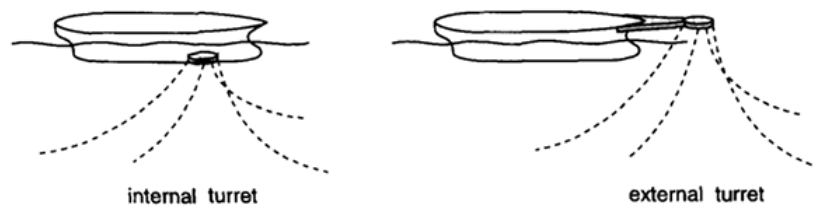
V_c = kecepatan arus pada ketinggian 10 m (knot)

T = sarat kapal (m)

L_{BP} = *length between perpendicular* (m)

2.2.5 Sistem Tambat (*Mooring System*)

Sistem tambat (*mooring system*) pada struktur apung berfungsi untuk menjaga posisinya supaya tetap berada pada tempatnya (*stationer*). Secara garis besar, konfigurasi sistem tambat suatu struktur apung berupa jenis tambat menyebar (*spread mooring*) dan jenis tambat titik tunggal (*single point mooring*) (Prasiwi, 2014). Salah satu jenis *single point mooring* adalah sistem tambat turret (*turret mooring*). *Turret mooring* terdiri dari dua tipe, yakni *external turret system* dan *internal turret system* (API RP 2SK, 2005) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2-5.



Gambar 2-5 Sistem tali tambat turret (API RP 2SK, 2005)

Sistem *turret* terdiri atas *bearings* yang menyebabkan kapal dapat berputar di sekitar kaki jangkar. Sistem *turret* ini memberikan kemampuan kepada struktur apung untuk dapat berputar 360° mengikuti kondisi lingkungannya namun tetap tertambat pada *mooring* (*weathervaning*).

2.2.5.1 Kombinasi (Segmentasi) Tali Tambat

Struktur apung tertambat pada umumnya tidak ditambatkan dengan satu jenis tali tambat terlebih untuk kondisi laut dalam. Tali tambat biasanya dikombinasikan untuk mendapatkan keuntungan dari masing-masing tipe yang digunakan, misal dari segi kekuatan, ekonomis dan beban *payload* (Barltrop, 1998).

Tali tambat bertipe *chain* memiliki karakteristik berat yang lebih besar dan dapat membentuk *catenary* karena beratnya, namun elastisitas dari *chain* relatif cukup rendah. Sedangkan tipe *wire rope* memiliki karakteristik yang lebih ringan dari *chain* dan memiliki elastisitas yang relatif tinggi. Kombinasi dari keduanya cukup lazim digunakan di lapangan karena memiliki performa yang cukup optimal dalam kondisi kedalaman perairan yang bervariasi.

Berikut merupakan contoh kombinasi penggunaan segmentasi tali tambat yang umumnya digunakan di lapangan berdasarkan kondisi kedalaman perairan.

A. Perairan dangkal (*shallow water*, ≤ 100 m)

Pada perairan dangkal tipe tali tambat yang umum digunakan adalah tipe *chain*, karena memiliki daya tahan yang cukup kuat terhadap abrasi pada dasar perairan.

B. Perairan menengah dan dalam (*moderate and deep water, 100 – 1000 m*)

Pada perairan menengah dan dalam biasanya digunakan kombinasi tipe tambat berturut-turut dari *fairlead* ke *anchor* : *wire rope – chain* atau *chain – wire rope – chain*. Kombinasi ini dilakukan untuk mengurangi beban vertikal.

C. Perairan sangat dalam (*ultra deep water, $\geq 1000 m$*)

Pada perairan sangat dalam yang membutuhkan tali tambat yang relatif panjang sehingga umumnya dilakukan kombinasi *fibre rope-chain* atau *chain-fibre rope-chain*. Penggunaan *fibre rope* dimaksudkan untuk mengurangi kapasitas *payload* pada platform karena memiliki karakteristik yang lebih ringan dari *wire rope* dan elastisitas yang lebih tinggi dari *wire rope*, serta memiliki umur lelah yang lebih panjang.

2.2.5.2 Tali Tambat *Catenary*

Tali tambat yang didesain lentur (*catenary*) dihitung berdasarkan persamaan *catenary*. Asumsi yang digunakan dalam metode ini adalah kondisi dasar laut yang horizontal rata dan mengabaikan kekakuan *bending*. Asumsi dengan mengabaikan kekakuan *bending* pada *chain* telah disepakati secara luas, namun untuk jenis *wire rope* hanya *rope* dengan kurvatur kecil yang masih memadai jika menggunakan persamaan *catenary* (MIT, 2011).

Model tali tambat *catenary* dan gaya-gaya yang bekerja pada tali tambat ditunjukkan pada Gambar 2-6 dan 2-7 berturut turut.

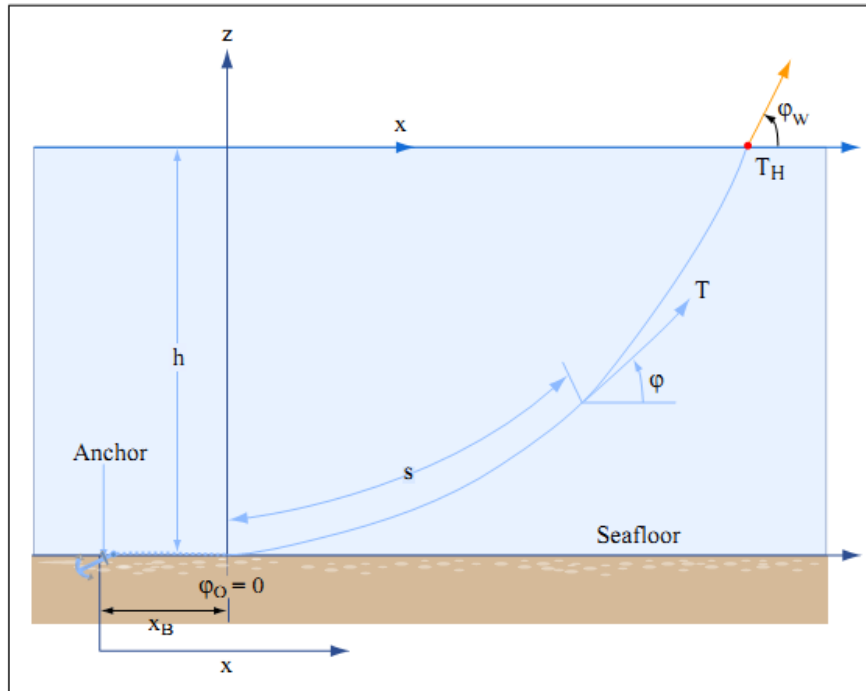


Image by MIT OpenCourseWare.

Gambar 2-6 Model tali tambat *catenary* (MIT, 2011)

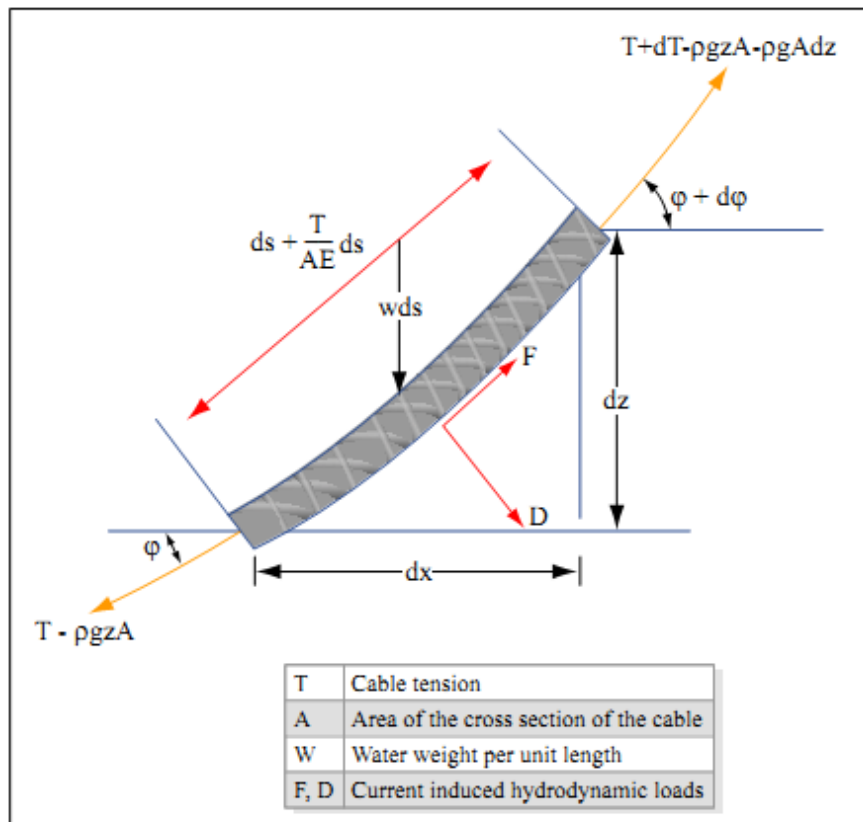


Image by MIT OpenCourseWare.

Gambar 2-7 Elemen kecil tali tambat *catenary* (MIT, 2011)

Dalam hal ini, w adalah berat tali tercelup per satuan panjang, A merupakan luas penampang tali tambat, E adalah modulus elastisitas, dan T adalah tension pada tali tambat. Dengan menghitung kondisi equilibrium pada arah normal dan tangensial pada satu elemen kecil dari tali tambat, maka dapat dituliskan sebagai berikut :

$$dT - \rho g A dz = \left[w \sin \phi - F \left(1 + \frac{T}{AE} \right) \right] ds \quad (2-83)$$

$$T d\phi - \rho g A z d\phi = \left[w \cos \phi - D \left(1 + \frac{T}{AE} \right) \right] ds \quad (2-84)$$

Dalam penyelesaian-2 persamaan di atas, dibutuhkan linierisasi dengan mengabaikan pengaruh dari gaya arus (F dan D), diasumsikan :

$$T' = T - \rho g z A \quad (2-85)$$

Sehingga penyelesaian persamaan dan menjadi :

$$T = T_H + wh + (w + \rho g A)z \quad (2-86)$$

dengan h adalah kedalaman dasar laut, T_H tension horizontal pada *water plane area*. Tension akan mencapai harga maksimumnya pada permukaan air laut ($z=0$) dan tension vertikalnya dapat ditulis sebagai :

$$T_z = ws \quad (2-87)$$

Selain itu panjang minimum tali tambat (dengan asumsi jangkar tidak menerima beban vertikal) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$l_{min} = h \left(2 \frac{T_{max}}{wh} - 1 \right)^2 \quad (2-88)$$

Jarak horizontal dari jangkar pada dasar laut dan ujung tali tambat pada struktur apung dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$X = l - h \left(1 + 2 \frac{a}{h} \right)^{\frac{1}{2}} + a \cosh^{-1} \left(1 + \frac{a}{h} \right) \quad (2-89)$$

Dengan,

$$a = \frac{T_H}{w} \quad (2-90)$$

2.2.6 Respon Struktur pada Gelombang Acak

Dalam analisis respon bangunan apung pada gelombang reguler dapat diketahui pengaruh interaksi hidrodinamiknya pada massa tambah, redaman

potensial dan gaya eksternal. Analisis tersebut menghasilkan respon struktur pada gelombang reguler. Sedangkan struktur apung tertambat, pada kondisi sebenarnya dijumpai pada gelombang acak sehingga dituntut untuk dilakukannya analisis respon struktur pada gelombang acak.

Gelombang acak merupakan superposisi dari komponen-komponen pembentuknya berupa gelombang sinusoidal dalam jumlah yang tak terhingga. Tiap-tiap komponen gelombang memiliki tingkat energi tertentu yang dikontribusikan dan secara keseluruhan dapat diakumulasikan dalam bentuk spektrum energi gelombang (Djarmiko, 2012).

Respon struktur pada gelombang acak dapat dilakukan dengan mentransformasikan spektrum gelombang menjadi spektrum respon. Spektrum respon didefinisikan sebagai respon kerapatan energi pada struktur akibat gelombang. Hal ini dapat dilakukan dengan mengalikan harga pangkat kuadrat dari *Response Amplitude Operator* (RAO) dengan spektrum gelombang pada daerah struktur bangunan apung tersebut beroperasi. Persamaan spektrum respon secara matematis dapat dituliskan sebagai :

$$S_R = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \quad (2-91)$$

dengan :

- S_R = spektrum respons (m^2 -sec)
- $S(\omega)$ = spektrum gelombang (m^2 -sec)
- $RAO(\omega)$ = transfer function
- ω = frekuensi gelombang (rad/sec)

Setelah spektrum respon diperoleh maka intensitas gerakan dapat dihitung sebagai fungsi luasan di bawah kurva spektrum respon atau merupakan variasi elevasi gerakan, yaitu sebagai berikut :

$$m_{r0} = \int_0^{\infty} S_z(\omega) d\omega \quad (2-92)$$

Berdasarkan persamaan 2-92 jika diturunkan akan didapatkan harga-harga statistik gerakan sebagai fungsi varian elevasi gerakan m_{r0} , yaitu misalnya sebagai amplitudo gerakan rata-rata yang dihitung sebagai :

$$\bar{\zeta}_r = 1.25\sqrt{m_{r0}} \quad (2-93)$$

Harga amplitudo gerakan signifikan dihitung sebagai :

$$\zeta_{rs} = 2.0\sqrt{m_{r0}} \quad (2-94)$$

Dan amplitudo respon ekstrim yang berpeluang terjadi dalam waktu T jam dapat dihitung dengan persamaan :

$$\hat{\zeta}_r = \sqrt{m_{r0}} \times \sqrt{\left\{2 \ln \left(\frac{60^2 T}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{r2}}{m_{r0}}} \right)\right\}} \quad (2-95)$$

Harga m_{r2} merupakan momen-2 dari luasan di bawah kurva spektrum respon.

2.2.6.1 Spektra Gelombang

Sebuah gelombang reguler memuat energi yang diidentifikasi pada setiap unit atau satuan luas permukaannya ekuivalen dengan harga kuadrat amplitudonya (Djarmiko, 2012) seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2-96.

$$\frac{dE_T}{dA} = \frac{dE_p + dE_k}{dA} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_0^2 \quad (2-96)$$

dengan,

dE_T	= energi total
dA	= luas permukaan
dE_p	= energi potensial
dE_k	= energi kinetik
ζ_0	= amplitudo gelombang

Penjumlahan energi dari seluruh komponen gelombang reguler per satuan luas permukaan dapat diekspresikan sebagai kepadatan spektrum gelombang atau lebih dikenal dengan istilah spektrum gelombang.

Bersamaan dengan semakin meningkatnya intensitas studi yang dilakukan mengenai respon gerak pada gelombang acak telah banyak dihasilkan spektrum gelombang yang beragam sesuai dengan kondisi lingkungan yang dianalisis. Jenis-jenis spektrum gelombang yang biasa digunakan dalam perhitungan adalah model Pierson-Moskowitz (1964), ISSC (1964), Scott (1965), Bretschneider (1969), JONSWAP (1973), ITTC (1975) dan Wang (1991). Spektrum gelombang yang

digunakan dalam analisis ini mengacu pada spektrum gelombang JONSWAP karena karakteristik perairan Indonesia yang tertutup/kepulauan sehingga cocok dengan karakter spektrum JONSWAP (Djarmiko, 2012).

Spektrum JONSWAP didasarkan pada percobaan yang dilakukan di North Sea. Persamaan spektrum JONSWAP dapat dituliskan dengan memodifikasi persamaan spektrum Pierson-Moskowitz (DNV RP-C205, 2010), yaitu :

$$S_j(\omega) = A_\gamma S_{pm}(\omega) \gamma^{\exp(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2)} \quad (2-97)$$

dengan,

$$\begin{aligned} S_{pm}(\omega) &= \text{Spektra Pierson-Moskowitz} \\ &= \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \end{aligned} \quad (2-98)$$

γ = parameter puncak (*peakedness parameter*)

σ = parameter bentuk (*shape parameter*) untuk $\omega \leq \omega_0 = 0,07$
dan $\omega \geq \omega_0 = 0,09$

A_γ = normalizing factor = $1 - 0.287 \ln(\gamma)$

ω = wave frequency (rad/sec)

ω_p = angular spectral peak frequency (rad/sec)

H_s = tinggi gelombang signifikan (m)

T_p = periode puncak (s)

2.2.7 Analisis Perhitungan

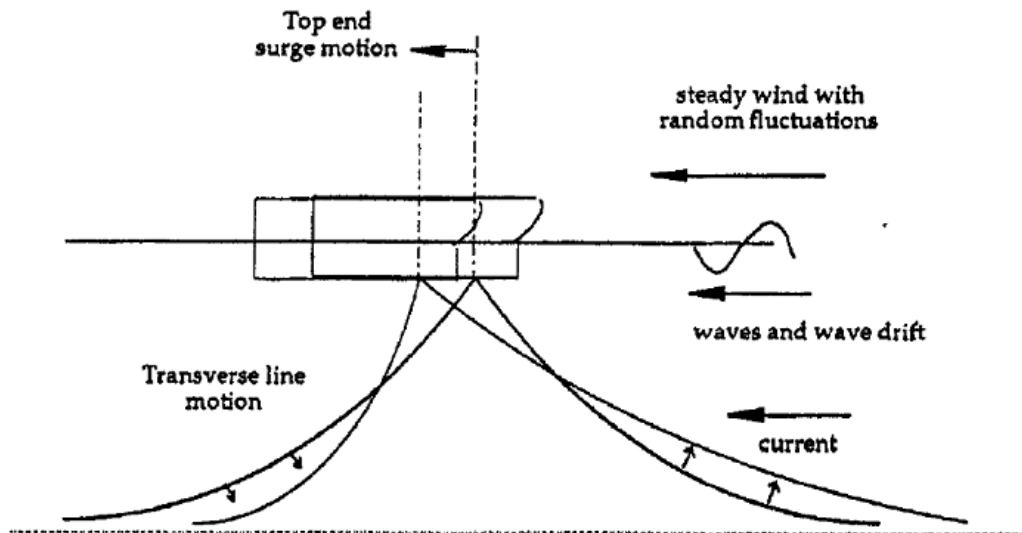
Analisis perhitungan respon struktur apung tertambat terdiri dari dua jenis : analisis statis dan dinamis yang akan dijelaskan lebih detail pada bagian ini.

2.2.7.1 Analisis Statis

Analisis statis digunakan untuk mengetahui posisi sistem tertambat saat berada dalam kondisi equilibrium. Selain itu juga untuk mengetahui jarak horizontal antara *fairlead* dan *seabed* dengan panjang efisien tali tambatnya.

Mekanisme gaya-gaya yang bekerja pada saat analisis statis ditunjukkan pada Gambar 2-8. Berdasarkan tersebut ditunjukkan bahwa gaya-gaya yang bekerja

terdiri dari gaya gelombang (*mean drift*), angin, arus dan gerakan struktur apung itu sendiri.



Gambar 2-8 Mekanisme gaya-gaya yang bekerja pada tali tambat (Perwitasari, 2010)

2.2.7.2 Analisis Dinamis Berbasis Ranah Waktu (*Time Domain*)

Jika suatu sistem linier dan beban gelombang yang bekerja hanya terdiri dari *orde-1* maka beban yang diterima maupun respon yang dihasilkan juga dalam bentuk linier sehingga dapat diselesaikan dengan analisis dinamis berbasis ranah frekuensi (*frequency domain analysis*). Sedangkan jika terkandung di dalamnya faktor-faktor non linier, seperti beban gelombang *second order*, *non-linear viscous damping*, gaya dan momen akibat angin dan arus maka perhitungan *frequency domain analysis* menjadi kurang relevan. Oleh karena itu untuk mengakomodasi faktor-faktor non linier tersebut maka persamaan gerak dari hukum-2 Newton diselesaikan dalam fungsi waktu atau yang lebih dikenal dengan istilah analisis dinamis berbasis ranah waktu (*time domain analysis*).

Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini akan menggunakan prosedur integrasi waktu dan menghasilkan *time history response* berdasarkan fungsi waktu $x(t)$. Metode analisis *time domain* umumnya seperti program komputer dapat digunakan untuk menganalisis semua situasi tali tambat dibawah pengaruh dinamisa frekuensi gelombang. Periode awal harus dimaksimalkan untuk

meminimalkan efek transient. Namun, metode ini dalam membutuhkan proses lebih kompleks dan waktu yang lama. Hal ini membutuhkan simulasi *time history*. *Time history* memberikan hasil tension maksimum, beban jangkar, dan lain-lain.

Penyelesaian dengan metode *time domain* dikenalkan oleh Cummins (1962) dengan mendefinisikan waktu mula-mula, akhir dan selisih waktunya sebagai dasar penyelesaian *time domain*, menurut Cummins (1962) persamaan gerak dapat dituliskan sebagai :

$$(M + A) \cdot \ddot{x}(t) + \int_0^\infty B(t - \tau) \cdot \dot{x}(\tau) \cdot d\tau + C \cdot x(t) = X(t) \quad (2-99)$$

Dengan,

- $\ddot{x}(t)$ = percepatan translasional (atau rotasional) pada waktu t
- $\dot{x}(\tau)$ = kecepatan translasional (atau rotasional) pada waktu t
- $x(t)$ = perpindahan translasional (atau rotasional) pada waktu t
- M = massa struktur (atau massa inersia)
- A = koefisien massa tambah
- $B(t), B(\tau)$ = fungsi retardasi
- C = koefisien kekakuan geometri struktur
- $X(t)$ = gaya eksternal pada waktu t
- t, τ = waktu

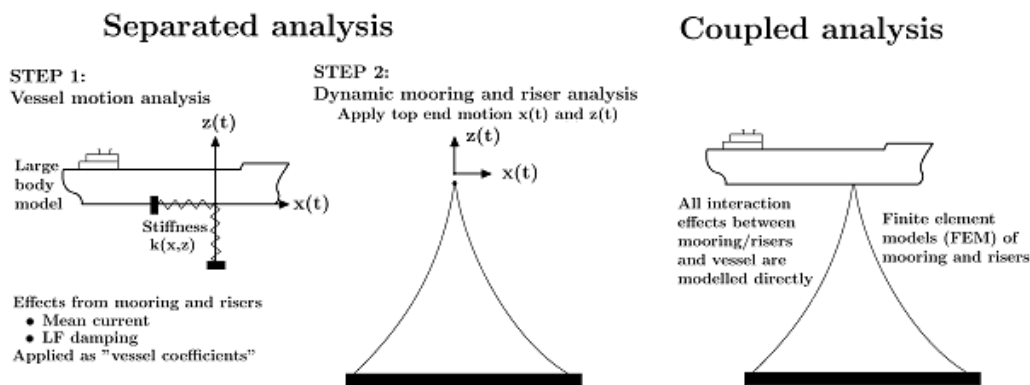
Output dari simulasi time domain adalah :

- a. Simulasi gelombang reguler dapat digunakan untuk memprediksi fungsi transfer dengan mengambil rasio amplitudo respon dengan input amplitudo gelombang.
- b. Spektrum respon dapat dihitung dari *time series*, informasi yang diberikan sama dengan analisa domain frekuensi.
- c. Respon ekstrim dapat disimulasi langsung dari puncak respon selama simulasi.

Keuntungan metode ini dibandingkan *frequency domain* adalah semua tipe non-linier (matrik sistem dan beban-beban eksternal) dapat dimodelkan dengan lebih tepat. Sedangkan kerugiannya adalah membutuhkan waktu perhitungan yang

lebih. Menurut DNV OS E301 (2010), minimal simulasi *time domain* adalah selama 3 jam (10800 detik).

Penyelesaian analisis dinamis dalam domain waktu ini dapat diselesaikan dengan dua metode, secara tidak langsung (*separated/decoupled*) dan secara langsung (*coupled*). Ilustrasi keduanya dapat dilihat pada Gambar 2-9 di bawah ini :



Gambar 2-9 Ilustrasi analisis domain waktu secara terpisah (*decoupled*) maupun langsung (*coupled*) (Larsen, 2004)

Meninjau Gambar 2-9 ditunjukkan bahwa metode tidak langsung (*decoupled*) mensimulasikan gerakan struktur apung terlebih dahulu, kemudian hasilnya menjadi inputan dalam simulasi tali tambat untuk menghitung tensionnya. Sedangkan metode langsung (*coupled*) mensimulasikan gerakan kapal dan tali tambat secara bersamaan. Perhitungan ini dilakukan dengan mensimulasikan keduanya pada suatu tahapan, step 0 dan hasil dari satu tahapan tersebut menjadi inputan pada tahapan selanjutnya dalam fungsi waktu, step $X(t)$.

2.2.7.3 Analisis Dinamis Berbasis Ranah Frekuensi (*Frequency Domain*)

Pada bagian ini, proses pengolahan stokastik dideskripsikan melalui spektra energi. Spektra energi merupakan bentuk yang merepresentasikan sebuah energi dari proses stokastik sebagai fungsi frekuensi. Proses ini dilakukan dengan meninjau hasil respon struktur dan tension tali tambat dalam domain waktu yang kemudian ditransfer ke dalam domain frekuensi dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform*.

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam kajian ini adalah dengan menggunakan simulasi numerik menggunakan bantuan software. Metode yang digunakan diawali dengan analisis hidrodinamis untuk mengetahui perilaku hidrodinamis struktur apung. Kemudian dilanjutkan dengan pemodelan konfigurasi tali tambat dan dilakukan analisis statis untuk mendapatkan posisi mula-mula dari struktur apung dan panjang tali tambat yang dibutuhkan.

Analisis dilanjutkan dengan simulasi dinamis (*time domain coupled analysis*) dengan memvariasikan gaya gelombang yang bekerja pada struktur apung. Variasi gaya gelombang yang dimodelkan terdiri dari gaya gelombang linier orde-1, gaya gelombang non-linier orde-2 dan kombinasi gaya gelombang linier orde-1 dan non-linier orde-2. Analisis tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh gaya gelombang non-linier orde-2 terhadap perilaku hidrodinamika struktur tertambat.

Kemudian dilakukan simulasi dinamis dengan variasi kedalaman air laut, simulasi dilakukan untuk menginvestigasi pengaruh kedalaman perairan terhadap respon struktur tertambat saat dikenai gaya gelombang non-linier orde-2.

3.2 SUBYEK DAN OBYEK PENELITIAN

Subyek dalam penelitian ini adalah kalangan akademisi yang dengannya akan menambah khazanah keilmuan dengan pengembangan studi kasus yang telah ada.

Sedangkan obyek penelitiannya adalah pengaruh beban gelombang non-linier *orde-2* terhadap perilaku respon struktur apung tertambat beserta variasi kedalaman air lautnya.

3.3 PEMILIHAN VARIASI KONDISI PEMBEBANAN

Variasi kondisi pembebanan dilakukan dengan mensimulasikan analisis dinamis dengan perilaku jenis gaya gelombang yang bekerja pada struktur apung tertambat. Simulasi dimodelkan dengan struktur tertambat yang dikenai gaya

gelombang linier orde-1, saat dikenai gaya gelombang non-linier orde-2 dan saat dikenai kombinasi gaya gelombang orde-1 dan orde-2.

Selain itu variasi dilakukan terhadap kedalaman air laut : laut dangkal, menengah dan dalam.

3.4 METODE PENGUMPULAN DATA

Data-data yang digunakan dalam penelitian ini diambilkan dari data-data fisik struktur apung dan data-data lingkungan dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Data material properti tali tambat diambilkan dari katalog tali tambat yang umumnya terdapat di lapangan.

3.5 PENGOLAHAN DAN ANALISIS DATA

3.5.1 Data Kapasitas Muatan dan *Principal Dimension*

Data kapasitas muatan menjadi dasar dalam penentuan data *principal dimension*. Penentuan *principal dimension* kapal dilakukan dengan melakukan regresi dengan kapal dengan jenis yang sama. Data *principal dimension* inilah yang digunakan untuk memodelkan linesplan dan model nurbs 3 dimensi. Pemodelan dilakukan dengan bantuan software MOSES. Kemudian dilakukan validasi model dengan membandingkan displacement dan komponen-komponen stabilitas model dengan kapal sejenis. Kriteria validasi yang digunakan mengacu pada ABS dimana untuk validasi displacement bernilai maksimum 2% dan untuk ketentuan lainnya (komponen stabilitas) bernilai maksimum 1%.

Setelah model divalidasi dan dinyatakan mendekati dengan kondisi sebenarnya maka dilakukan tahapan analisis selanjutnya, yaitu analisis hidrodinamis yang dilakukan dengan bantuan software MOSES untuk menghitung perilaku hidrodinamikanya.

3.5.2 Data Lingkungan

Data tinggi gelombang diolah menjadi tinggi gelombang untuk analisis kurun waktu panjang, dalam hal ini akan dianalisis dalam kurun waktu 10 dan 100 tahunan. Prediksi perhitungan analisis kurun waktu panjang tersebut didasarkan

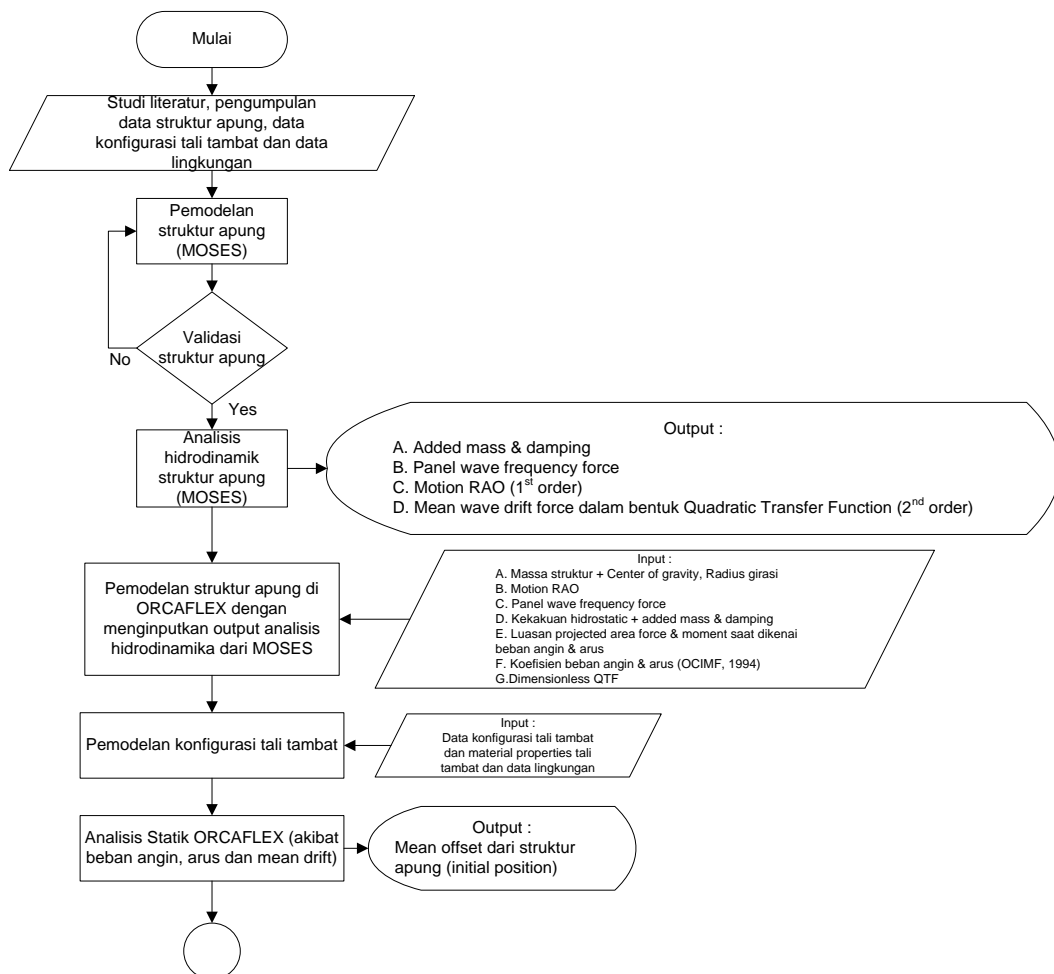
pada pendekatan Weibull. Sedangkan data angin dan data arus dipilih dengan peluang kejadian yang terjadi paling banyak.

3.5.3 Data Spesifikasi Tali Tambat

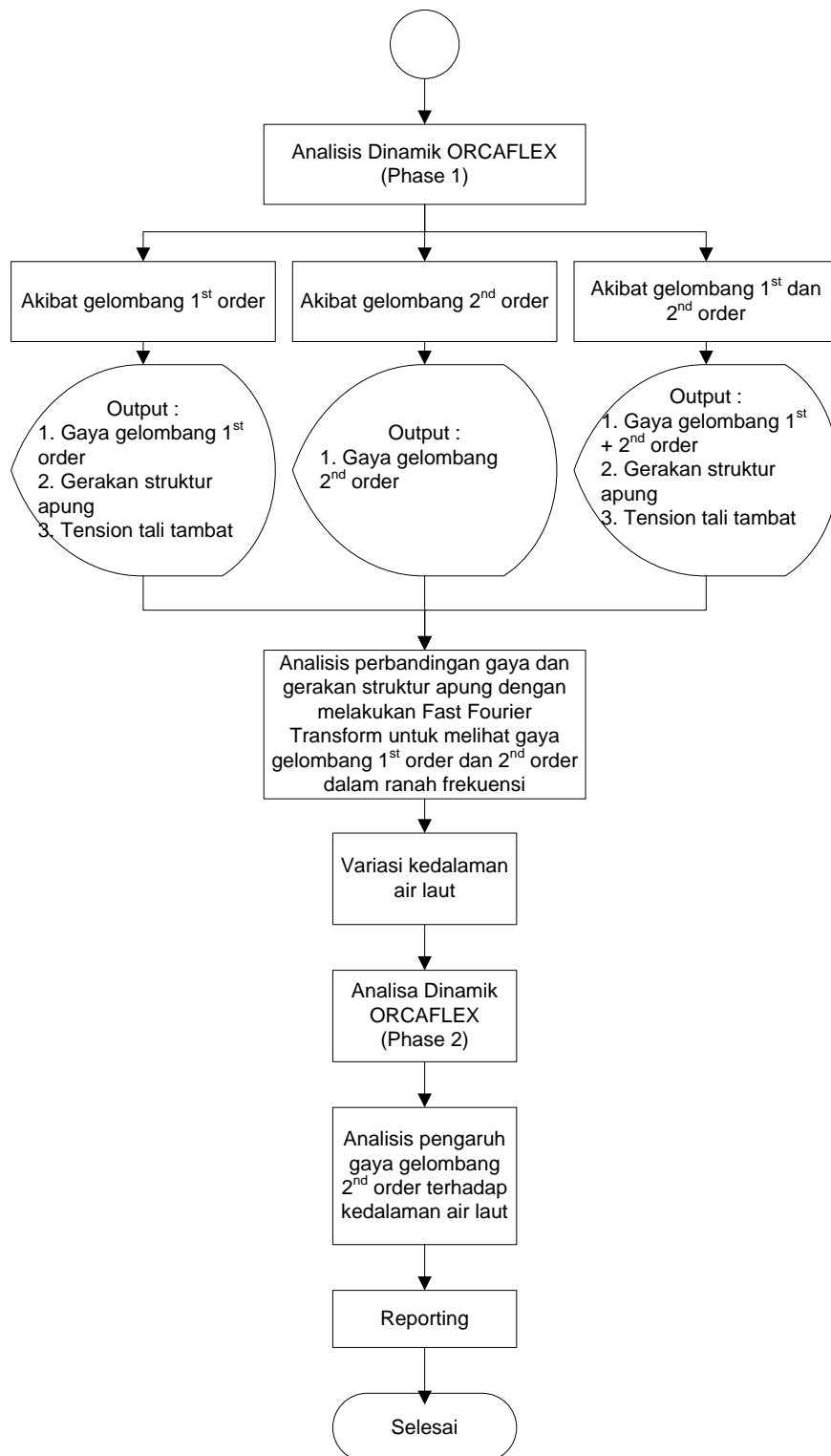
Data spesifikasi tali tambat dihitung untuk memperoleh material properti tali tambat yang memiliki kekuatan (*minimum breaking load*) sesuai dengan simulasi model yang dilakukan.

3.6 DESAIN PENELITIAN

Desain penelitian pada analisis pengaruh gaya gelombang non-linier orde-2 terhadap perilaku struktur apung tertambat dengan sistem *external turret mooring* dapat dilihat pada *flowchart* yang ditunjukkan pada Gambar 3-1a dan 3-1b.



Gambar 3-1a Diagram alir metodologi penelitian



Gambar 3-1b Diagram alir metodologi penelitian (lanjutan)

Penjabaran diagram di atas dijelaskan pada langkah-langkah di bawah ini :

A. Studi literatur dan pengumpulan data

Penelusuran literatur ditujukan untuk mendapatkan informasi penelitian-penelitian sebelumnya terkait dengan analisis pengaruh gelombang non-linier orde-2 terhadap struktur apung tertambat. Pengumpulan data meliputi data struktur apung, konfigurasi tali tambat dan data lingkungan (data sebaran gelombang, angin dan arus).

B. Pemodelan model struktur apung

Pemodelan model struktur apung dilakukan dengan memodelkan *linesplan* dan *generate* model *surface*, 3D *nurbs* sebagai *markers* (koordinat x, y dan z dari struktur apung) di MOSES untuk menghasilkan permukaan struktur apung yang sesuai dengan bentuk aslinya.

C. Validasi model

Model struktur yang telah dimodelkan diperiksa kesesuaiannya dengan data struktur sesungguhnya di lapangan. Untuk validasi model dilakukan analisis hidrostatis untuk mendapatkan komponen-komponen hidrostatisnya. Adapun komponen hidrostatis yang ditinjau (menurut ABS) adalah :

- *Displacement (error 2%)*
- *Water Plane Area (error 1%)*
- *Keel to Metacenter Transversal (error 1%)*
- *Keel to Metacenter Longitudinal (error 1%)*
- *Buoyancy to Metacenter Transversal (error 1%)*
- *Buoyancy to Metacenter Longitudinal (error 1%)*

D. Analisis hidrodinamika

Model yang sudah divalidasi dianalisis perilaku hidrodinamisnya dengan pendekatan analisis dinamis *frekuensi domain*, yaitu dengan menyelesaikan persamaan gerak dalam ranah frekuensi untuk mendapatkan komponen-

komponen hidrodinamis : *added mass*, *redaman*, *load RAO*, *motion RAO* dan *wave drift force QTF*.

E. Pemodelan model struktur apung pada OrcaFlex

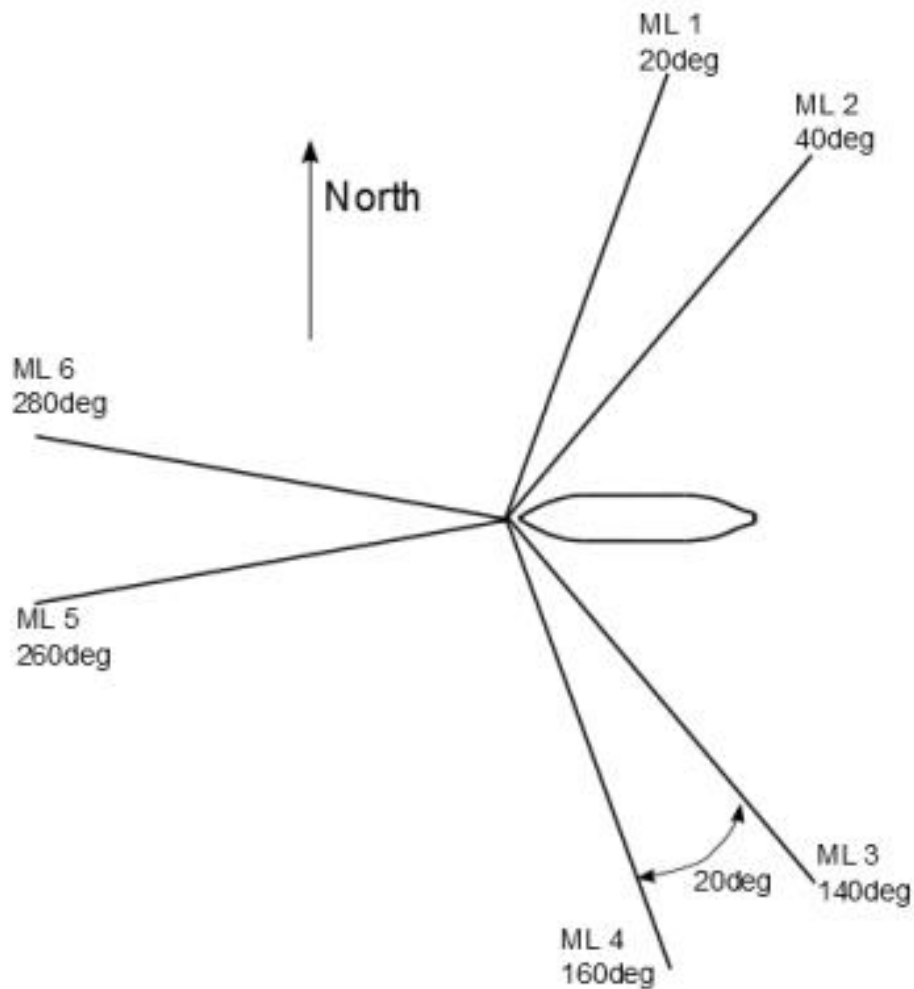
Pemodelan dilanjutkan dengan memodelkan struktur apung pada OrcaFlex dengan memasukkan perilaku hidrodinamis dari hasil analisis dinamis MOSES, yang terdiri dari :

- Geometri struktur (panjang, lebar, tinggi dan sarat air struktur)
- *Displacement* struktur apung dengan titik beratnya (COG)
- Massa inersia struktur apung dengan radius girasinya
- RAO gerakan struktur apung (*displacement RAO*)
- Gaya gelombang orde-1 sebagai gaya panel (*panel wave frequency load*)
- Matriks 6 x 6 *added mass* dan *damping*
- Kekakuan hidrostatis (kekakuan *heave*, *heave-pitch*, *roll* dan *pitch*)
- Gaya arus, dengan memasukkan luas area penampang struktur apung yang terkena gaya arus (luas area penampang surge, sway dan momen yaw), koefisien drag gaya arus berdasarkan *Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs* (OCIMF, 1994)
- Gaya angin, dengan memasukkan luas area penampang struktur apung yang terkena gaya angin (luas area penampang surge, sway dan momen yaw), koefisien drag gaya arus berdasarkan *Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs* (OCIMF, 1994)
- *Quadratic Transfer Function* (QTF) non-dimensional sebagai *transfer function* gaya gelombang orde-2

F. Pemodelan konfigurasi tali tambat dan pengaturan data lingkungan

Pada tahap ini struktur apung ditambatkan dengan konfigurasi tali tambat *external turret mooring* dengan 6 tali tambat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-2. Setelah konfigurasi tali tambat disusun pada struktur apung

,kemudian dilakukan pengaturan data lingkungan yang terdiri : data gelombang, arus dan angin dimasukkan ke dalam simulasi.



Gambar 3-2 Konfigurasi tali tambat dengan sistem *external turret mooring* (Rika, 2011)

G. Analisis statis

Analisis statis dilakukan untuk menghitung kondisi equilibrium struktur apung tertambat, selain itu digunakan sebagai konfigurasi awal dalam perhitungan analisis dinamis. Analisis statistik mempertimbangkan gaya arus, angin dan *mean drift* untuk mendapatkan initial position dari struktur apung tertambat.

H. Analisis dinamis (Fase 1)

Analisis dinamis (*time domain coupled analysis*) dilakukan dengan mensimulasikan model dalam periode waktu tertentu, umumnya periode waktu yang dihitung adalah 3 jam/10800 detik (API RP 2 SK, 2005). *Coupled analysis* diartikan bahwa analisis dinamis dilakukan dengan menghitung respon struktur dan tali tambat secara serempak. Analisis dinamis dilakukan dengan mensimulasikan beban gelombang yang bekerja pada struktur apung : akibat beban gelombang linier orde-1, beban gelombang non-linier orde-2 dan kombinasi beban gelombang linier orde-1 dan non-linier orde-2. Berdasarkan analisis tersebut dihasilkan perilaku struktur apung tertambat.

I. Analisis perbandingan gaya dan perilaku struktur apung tertambat

Gaya-gaya orde-1, orde-2 dan kombinasi orde-1 dan orde-2 dibandingkan untuk mengetahui intensitas gaya yang terbentuk dari ketiga variasi kondisi pembebanan tersebut.

Selain itu perilaku struktur seperti respon struktur dalam 6 derajat kebebasan akan ditinjau dan dianalisis untuk mengetahui pengaruh gaya gelombang orde-2 terhadap struktur apung tertambat.

J. Simulasi model dengan variasi kedalaman

Dalam tahap ini akan divariasikan kedalaman air laut : laut dangkal, menengah dan dalam untuk melihat pengaruh gaya gelombang orde-2 terhadap kedalaman air laut yang berbeda.

K. Analisis dinamis (Fase 2)

Analisis ini serupa dengan fase 1 hanya saja dengan simulasi model kedalaman air yang berbeda-beda.

L. Analisis pengaruh kedalaman perairan terhadap respon struktur apung tertambat yang dikenai gaya gelombang non-linier orde-2

Gaya dan perilaku respon struktur akan ditinjau dengan kondisi kedalaman yang berbeda-beda untuk melihat berapa besar pengaruh kedalaman perairan terhadap respon struktur tertambat, terutama saat dikenai gaya gelombang orde-2.

3.7 PENGUMPULAN DATA

3.7.1 Data Struktur Apung

Struktur apung dimodelkan dengan data Tanker berjenis Aframax dengan kapasitas muat sebesar 120.000 DWT. Data dimensi umum tanker tersebut ditunjukkan pada Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Data dimensi umum tanker Aframax 120.000 DWT (NaSDEC, 2015)

Parameter	Unit	Nilai	
		Muatan Penuh	Muatan Ballast
<i>Loa (Length of all)</i>	m	256	256
<i>Lwl (Length of Waterline)</i>	m	252,49	241,34
<i>Breadth</i>	m	43	43
<i>Draft</i>	m	17	7,8
<i>Height</i>	m	24	24
<i>KG (Keel to Gravity)</i>	m	11,72	10,63
<i>Displacement</i>	Ton	156000	67345
<i>Wind longitudinal area</i>	m ²	946	1342
<i>Wind transverse area</i>	m ²	2142	4285
<i>K_{xx} (Radius gyration of Roll)</i>	m	16,17	15,52
<i>K_{yy} (Radius gyration of Pitch)</i>	m	72,66	69,67
<i>K_{zz} (Radius gyration of Yaw)</i>	m	72,66	69,67

3.7.2 Data Tali Tambat

Data tali tambat yang digunakan mengacu pada data pada Tabel 3-2 berikut ini.

Tabel 3-2 Data tali tambat (Anchor Manual, 2014)

Deskripsi	Satuan	Nilai
Tali Tambat		
Banyak tali tambat	tali	6
Sudut antar 2 tali tambat	Deg	20
Wire Rope, type: 8 strand multiplait		
Diameter	m	0,076
Berat di udara	ton/m	0,004
Berat di air	ton/m	0,003
<i>Stiffness</i> , AE	kN	520000
<i>Minimum Breaking Load</i> (MBL)	ton	525
Chain		
Diameter	m	0,076
Berat di udara	ton/m	0,115
Berat di air	ton/m	0,100
<i>Stiffness</i> , AE	kN	546410
<i>Minimum Breaking Load</i> (MBL) (R3)	ton	471

3.7.3 Kombinasi (segmentasi) Tali Tambat

Kombinasi tali tambat yang digunakan mengacu pada Tabel 3-3 berikut.

Tabel 3-3 Kombinasi tali tambat

Model	Perairan dangkal (100 m)	Perairan menengah (300 m)	Perairan dalam (500 m)
Kombinasi tali tambat (<i>fairlead – anchor</i>)	<i>Chain</i>	<i>Chain-wire rope- chain</i>	<i>Chain-wire rope-chain</i>
Panjang tali (m)	345	125-860-50 (total 1035)	210-1430-85 (total 1725)

3.7.4 Data Lingkungan

Data lingkungan yang terdiri dari data gelombang, data angin dan data arus diambilkan dari data metocean di lokasi ladang “*Western Isles*”, Utara North Sea yang memiliki karakteristik perairan dangkal dan kondisi lingkungan yang cukup ganas dengan kecepatan arus yang relatif kuat. Informasi detail metocean Western Isles diambilkan berdasarkan *Physe Ltd* (2010) untuk “*Metocean Criteria for Western Isles*”. Kondisi pembebanan yang dilakukan dalam penelitian ini mengacu pada NORSOK N-003 (2007) yaitu dengan melakukan pembebanan dengan kombinasi periode ulang gelombang 100 tahunan, angin 100 tahunan dan arus 10 tahunan, dengan arah *collinear head seas*. Kriteria pembebanan menurut Norsok (2007) dapat dilihat pada Tabel 3-4.

Tabel 3-4 Kriteria pembebanan menurut NORSOK N-003 (NORSOK, 2007)

Limit state	Wind	Waves	Current	Ice	Snow	Earthquake	Sea level ¹⁾
Ultimate Limit State	10^{-2}	10^{-2}	10^{-1}	-	-	-	10^{-2}
	10^{-1}	10^{-1}	10^{-2}	-	-	-	10^{-2}
	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-2}	-	-	m
	-	-	-	-	10^{-2}	-	m
Accidental Limit State	10^{-4}	10^{-2}	10^{-1}	-	-	-	m*
	10^{-2}	10^{-4}	10^{-1}	-	-	-	m*
	10^{-1}	10^{-1}	10^{-4}	-	-	-	m*
	-	-	-	10^{-4}	-	-	m
	-	-	-	-	-	10^{-4}	m

3.7.4.1 Data Gelombang

Data gelombang yang digunakan mengacu berdasarkan studi metocean yang dilakukan oleh *Physe Ltd* (2010), yaitu tinggi gelombang signifikan sebesar 15,6 m (dengan periode ulang 100 tahunan). Informasi detail dapat dilihat pada Tabel 3-5 dan 3-6 berikut.

Tabel 3-5 Data distribusi tinggi gelombang (Physe Ltd, 2010)

Return Period	Hs (m)	Tz (lower) (s)	Tz (central) (s)	Tz (upper) (s)	Tp, Tass (lower) (s)	Tp, Tass (central) (s)	Tp, Tass (upper) (s)	Hmax (m)	Crest Height (m)
100-years									
N	15.2	11.2	12.5	14.6	15.4	17.4	20.6	27.5	17.0
NE	11.2	9.7	10.7	12.6	13.2	14.9	17.7	20.2	12.5
E	7.9	8.1	9.0	10.6	11.1	12.5	14.9	14.2	8.8
SE	15.3	11.3	12.5	14.7	15.4	17.4	20.6	27.6	17.0
S	15.6	11.4	12.6	14.8	15.5	17.5	20.8	28.2	17.4
SW	14.4	10.9	12.1	14.2	14.9	16.8	20.0	26.0	16.0
W	14.9	11.1	12.4	14.5	15.3	17.2	20.5	26.9	16.6
NW	15.1	11.2	12.4	14.6	15.3	17.2	20.5	27.3	16.8

Tabel 3-6 Data periode ulang tinggi dan periode gelombang

Return Period	Hs (m)	Tz (lower) (s)	Tz (central) (s)	Tz (upper) (s)	Tp, Tass (lower) (s)	Tp, Tass (central) (s)	Tp, Tass (upper) (s)	Hmax (m)	Crest Height (m)
All-year									
1-year	11.4	9.7	10.8	12.7	13.3	15.0	17.8	19.2	11.7
10-years	13.6	10.6	11.8	13.8	14.5	16.4	19.5	23.9	14.7
50-years	15.0	11.2	12.4	14.5	15.3	17.2	20.5	26.9	16.6
100-years	15.6	11.4	12.6	14.8	15.5	17.5	20.8	28.2	17.4
1,000-years	17.6	12.1	13.4	15.7	16.5	18.6	22.1	32.4	20.0
10,000-years	19.4	12.7	14.1	16.5	17.3	19.6	23.3	36.4	22.6

3.7.4.2 Data Angin

Berdasarkan studi yang dilakukan oleh Physe Ltd (2010) didapatkan data kecepatan angin (perhitungan rata-rata 1 jam, pada ketinggian 10 m) sebesar 39 m/s. Informasi detailnya dapat dilihat pada Tabel 3-7 dan 3-8 berikut ini :

Tabel 3-7 Data distribusi kecepatan angin (Physe Ltd, 2010)

	24-hr (m/s)	12-hr (m/s)	6-hr (m/s)	3-hr (m/s)	1-hr (m/s)	10-min (m/s)	1-min (m/s)	15-sec (m/s)	5-sec (m/s)	3-sec (m/s)
100-years										
N	26.8	29.1	31.2	32.5	33.5	37.1	41.7	44.5	46.7	47.8
NE	24.0	26.1	27.9	29.1	30.0	33.0	36.9	39.3	41.1	42.0
E	21.7	23.6	25.2	26.3	27.1	29.7	33.0	35.0	36.6	37.3
SE	29.8	32.5	34.7	36.2	37.3	41.6	47.1	50.4	53.0	54.2
S	31.2	33.9	36.3	37.8	39.0	43.6	49.5	53.1	55.9	57.2
SW	27.8	30.3	32.4	33.8	34.8	38.6	43.6	46.5	48.9	50.0
W	29.0	31.6	33.8	35.2	36.3	40.4	45.7	48.8	51.3	52.5
NW	27.7	30.1	32.2	33.6	34.6	38.4	43.3	46.2	48.5	49.6

Tabel 3-8 Data periode ulang kecepatan angin (Physe Ltd, 2010)

Return Period	24-hr (m/s)	12-hr (m/s)	6-hr (m/s)	3-hr (m/s)	1-hr (m/s)	10-min (m/s)	1-min (m/s)	15-sec (m/s)	5-sec (m/s)	3-sec (m/s)
All-year										
1-year	24.6	26.7	28.6	29.8	30.7	33.8	37.9	40.3	42.2	43.1
10-years	28.1	30.5	32.6	34.0	35.1	39.0	44.0	47.0	49.4	50.5
50-years	30.3	33.0	35.2	36.8	37.9	42.3	47.9	51.3	54.0	55.3
100-years	31.2	33.9	36.3	37.8	39.0	43.6	49.5	53.1	55.9	57.2
1,000-years	34.1	37.1	39.6	41.3	42.6	47.9	54.8	58.9	62.1	63.6
10K-years	36.8	40.0	42.8	44.6	46.0	52.0	59.8	64.5	68.2	69.9

3.7.4.3 Data Arus

Data arus yang digunakan mengacu berdasarkan studi metocean yang dilakukan oleh Physe Ltd (2010) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3-9 dan 3-10.

Tabel 3-9 Data distribusi kecepatan arus (Physe Ltd, 2010)

All currents in cm/s	Tide (M ₂ +S ₂)	Surge current (cm/s)				Total current (cm/s)			
		cm/s	1yr	10yr	50yr	100yr	1yr	10yr	50yr
N	19	11	13	15	16	32	34	35	35
NE	12	11	14	16	17	25	27	29	29
E	11	13	16	18	19	26	29	30	31
SE	17	13	17	19	20	34	37	39	39
S	19	23	29	33	35	42	47	50	52
SW	12	38	48	54	57	54	63	69	71
W	11	27	33	38	40	41	46	50	52
NW	17	11	13	15	16	30	31	32	33

Tabel 3-10 Data periode ulang kecepatan arus (Physe Ltd, 2010)

Height (asb)/Depth Ratio]	North	Northeast	East	Southeast	South	Southwest	West	Northwest	Omni
10 Years									
Surface	0.36	0.29	0.31	0.40	0.50	0.67	0.49	0.33	0.67
75% of Water Depth	0.36	0.29	0.31	0.40	0.50	0.67	0.49	0.33	0.67
50% of Water Depth	0.36	0.29	0.31	0.40	0.50	0.67	0.49	0.33	0.67
40% of Water Depth	0.35	0.28	0.30	0.38	0.49	0.65	0.47	0.32	0.65
30% of Water Depth	0.34	0.27	0.29	0.37	0.47	0.63	0.46	0.31	0.63
20% of Water Depth	0.32	0.25	0.27	0.35	0.44	0.59	0.43	0.29	0.59
10% of Water Depth	0.29	0.23	0.25	0.31	0.40	0.54	0.39	0.26	0.54
5% of Water Depth	0.26	0.21	0.22	0.29	0.36	0.49	0.35	0.24	0.49
Near Bed	0.21	0.17	0.18	0.23	0.30	0.40	0.29	0.20	0.40

BAB 4

ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

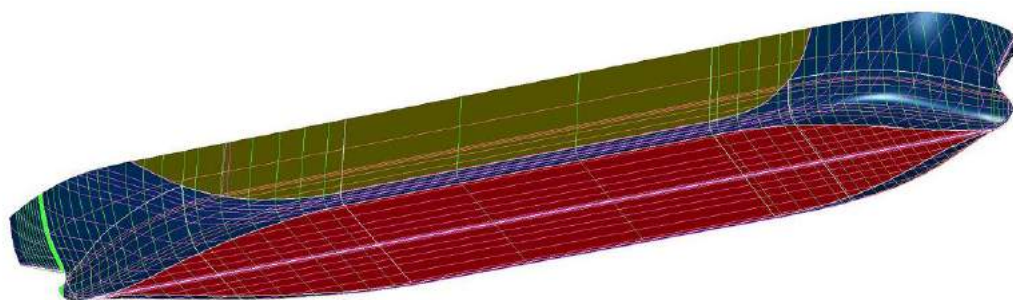
4.1 PEMODELAN STRUKTUR APUNG

Struktur apung yang dianalisis dalam penelitian ini adalah menggunakan model *surface rigid body* yang dimodelkan sesuai dengan data-data dimensi umum yang diberikan pada Bab 3 (Lihat **Tabel 3.1**). Struktur apung yang dimodelkan berupa kapal tanker dengan ukuran Aframax, berkapasitas muat 120.000 DWT dengan panjang, lebar dan tinggi kapal berturut-turut adalah 255, 43 dan 24 meter.

Langkah awal pemodelan dilakukan dengan memodelkan *linesplan* Aframax kemudian *generate* bentuk permukaan lambung kapal (*surface body*) pada Maxsurf. Model yang telah dibentuk dilanjutkan dengan perhitungan hidrostatis dalam dua kondisi muatan : muatan penuh dan ballast.

Perhitungan hidrostatis dilakukan untuk meninjau komponen hidrostatis struktur apung yang nantinya divalidasi berdasarkan data ukuran umum struktur apung. Jika nilai validasi telah memenuhi kriteria yang digunakan (dalam penelitian ini mengacu pada kriteria IASC, 2013), model *surface* dipindahkan ke MOSES untuk dihitung perilaku hidrodinamikanya dengan *generate* koordinat-koordinat (*markers*) pada permukaan badan struktur apung.

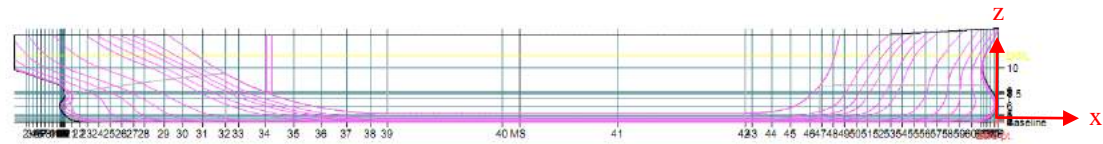
Berikut merupakan pemodelan *surface rigid body* dari struktur apung yang dimodelkan pada Maxsurf ditunjukkan pada Gambar 4-1.



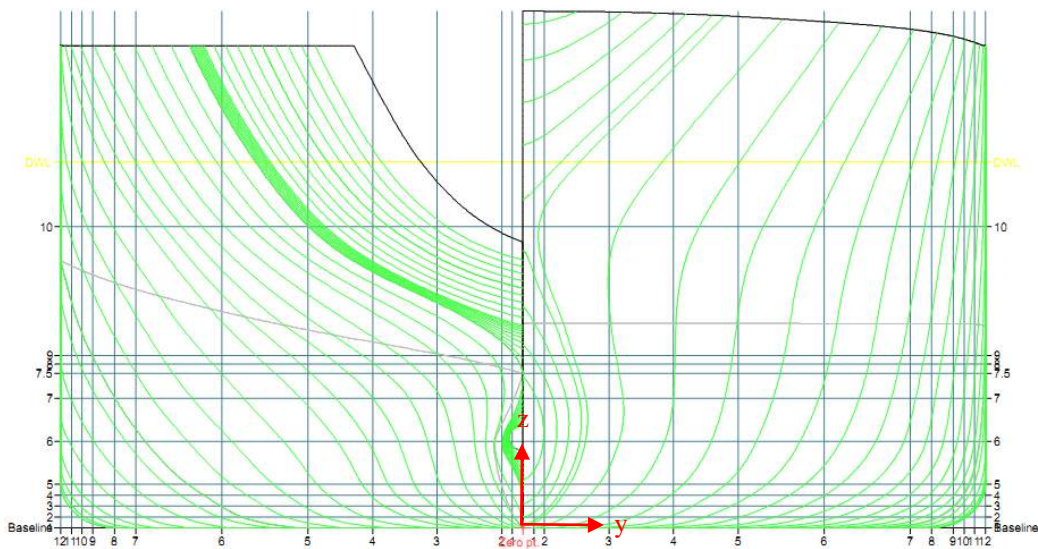
(a)



(b)



(c)

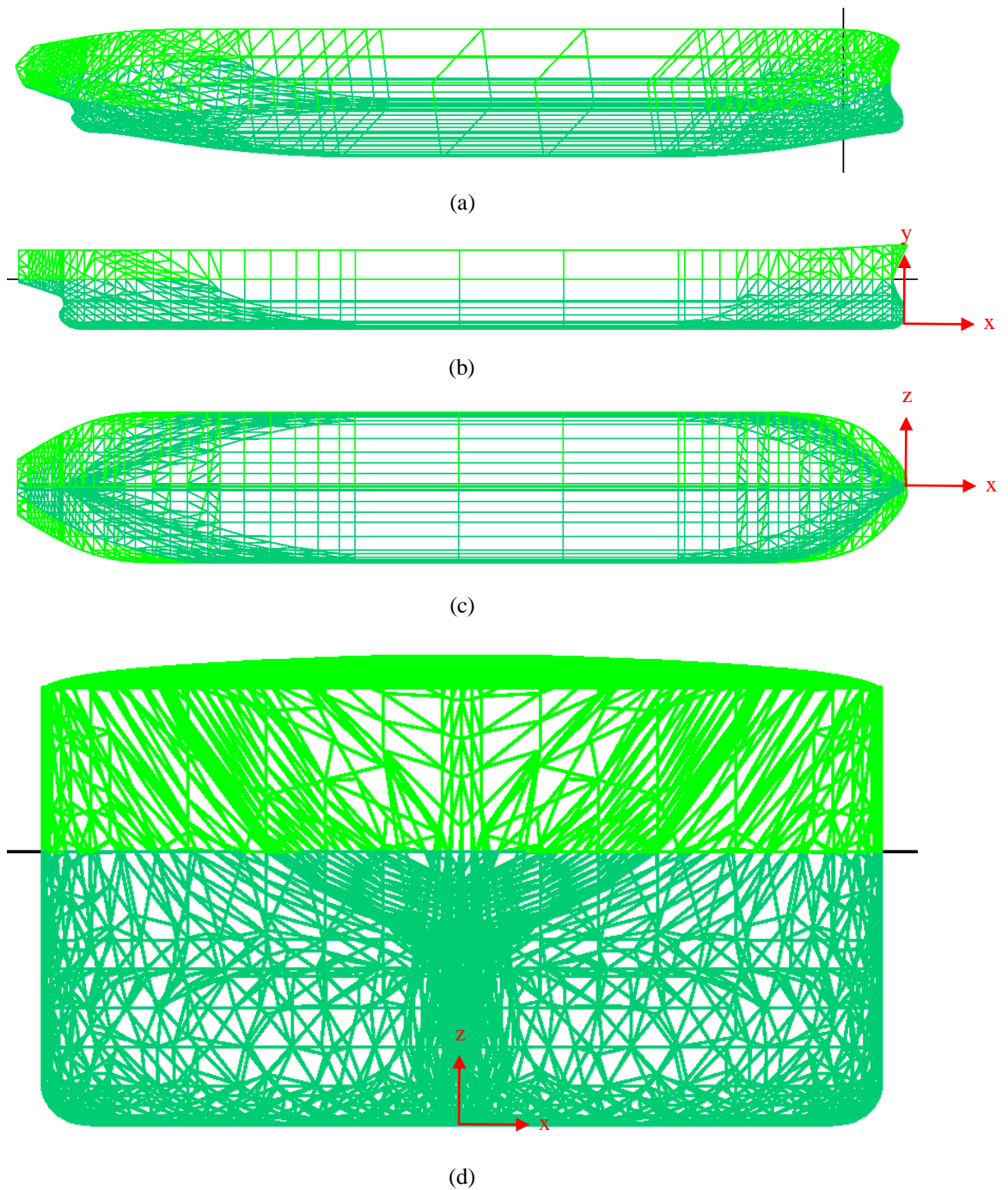


(d)

Gambar 4-1 Pemodelan *surface model* dan *linesplan* Aframax 120.000 DWT pada Maxsurf : tampak isometri (a), tampak atas (b), tampak samping (c) dan tampak depan (d)

Model *surface body* (pada Gambar 4-1) yang telah terbentuk selanjutnya dihitung koordinat-koordinatnya (*markers*) sehingga membentuk permukaan badan struktur apung. *Markers* inilah yang menjadi data input pemodelan pada MOSES.

Berikut merupakan tampilan model struktur apung pada MOSES yang ditunjukkan pada Gambar 4-2.



Gambar 4-2 Pemodelan *surface model* Aframax 120.000 DWT pada MOSES : tampak isometri (a), tampak atas (b), tampak samping (c) dan tampak depan (d)

Model yang sudah terbentuk baik di Maxsurf maupun MOSES harus dilakukan validasi terlebih dahulu terhadap data dimensi umum struktur apung. Hal ini dimaksudkan untuk meninjau keakuratan model struktur apung sehingga dapat diketahui kelayakan modelnya untuk digunakan pada analisis-analisis selanjutnya.

Kriteria validasi model yang digunakan mengacu pada IASC, 2013 (Lihat Tabel 4-1) dengan *error* pada *displacement* bernilai maksimum sebesar 2% dan untuk parameter seperti *water plane area*, *keel to metacenter transversal*, *keel to metacenter longitudinal*, *buoyancy to metacenter transversal* dan *buoyancy to metacenter longitudinal* bernilai maksimum sebesar 1%.

Tabel 4-1 Kriteria validasi model (IASC, 2013)

Hull Form Dependent	
Displacement	2%
Longitudinal center of buoyancy, from AP	1% / 50 cm max
Vertical center of buoyancy	1% / 5 cm max
Transverse center of buoyancy	0.5% of B / 5 cm max
Longitudinal center of flotation, from AP	1% / 50 cm max
Moment to trim 1 cm	2%
Transverse metacentric height	1% / 5 cm max
Longitudinal metacentric height	1% / 50 cm max
Cross curves of stability	5 cm

Berikut merupakan hasil validasi pemodelan antara model maxsurf dan MOSES terdapat data struktur apung :

Tabel 4-2 Hasil validasi model struktur apung

Parameter	Satuan	Data	Maxsurf		MOSES	
			Harga	Error % (dari Data)	Harga	Error % (dari Data)
Panjang (LoA)	m	256	256	0,00	256	0,00
Lebar (B)	m	43	43	0,00	43	0,00
Tinggi (H)	m	24	24	0,00	24	0,00
Sarat (T)	m	17	17	0,00	17	0,00
<i>Displacement</i>	m-tons	156000	156024	0,02	155927	0,06
<i>Water Plane Area (WPA)</i>	m ²	-	9879,44	-	9871,00	0,08*
<i>Keel to Metacenter Transversal (KMT)</i>	m	-	18,01	-	18,01	0,00*
<i>Keel to Metacenter Longitudinal (KML)</i>	m	-	301,64	-	301,21	0,14*
<i>Longitudinal Center of Buoyancy (LCB)</i>	m	-	121,37	-	120,48	0,74*
<i>Buoyancy to Metacenter Transversal (BMT)</i>	m	-	9,19	-	9,18	0,10*
<i>Buoyancy to Metacenter Longitudinal (BML)</i>	m	-	292,82	-	292,39	0,14*

**error* dibandingkan dengan model Maxsurf

Berdasarkan *error* yang terdapat pada Tabel 4-2 yang memiliki nilai di bawah kriteria validasi yang disebutkan IASC, maka dapat diambil kesimpulan bahwa model MOSES tersebut layak digunakan dalam analisis-*analisis* selanjutnya.

4.2 SKENARIO ANALISIS KARAKTERISTIK GERAK STRUKTUR

Sebelum memasuki tahap analisis karakteristik gerak struktur bangunan apung, terlebih dahulu dijelaskan skenario analisis yang terdiri dari skenario muatan pada tanker.

Skenario muatan pada tanker terdiri dari :

- a. Tanker kondisi muatan penuh
- b. Tanker kondisi muatan ballast

Variasi muatan tersebut akan mempengaruhi harga *center of gravity* dan radius girasi struktur bangunan apung (tanker) pada masing-masing kondisi muatan. Besaran *center of gravity* dan radius girasi inilah yang akan berdampak pada perhitungan karakteristik gerak struktur.

4.2.1 Perhitungan *Center of Gravity* Struktur Apung

Center of gravity struktur apung secara keseluruhan dipengaruhi oleh massa komponen-komponen yang menyusunnya. Sebelum menghitung *center of gravity* keseluruhan struktur apung, terlebih dahulu dilakukan perhitungan massa struktur pada tiap-tiap kondisi : kapal kosong (*lightweight*), muatan penuh dan muatan ballast.

4.2.1.1 Perhitungan Massa dan *Center of Gravity* Kapal Kosong

Perhitungan massa dan *center of gravity* struktur apung bergantung pada komponen penyusun kapal kosong (*lightweight*) yang secara garis besar terdiri dari lambung kapal, bangunan atas, permesinan dan peralatan. Perhitungan dilakukan dengan pendekatan (estimasi) perhitungan massa dan *center of gravity* yang telah lazim digunakan pada umumnya. Adapun detail persamaan pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini akan dijelaskan sebagai berikut dengan perhitungan detailnya terlampir pada **Lampiran A**.

A. Lambung Kapal (*hull*)

Perhitungan massa lambung didasarkan pada pendekatan yang dilakukan oleh Cudina *et al* (2010) :

$$W_H = \left(1 - \frac{f_1}{100}\right) \left\{ 0,0282 [L_{pp} \cdot (B + 0,85D + 0,15T)]^{1,36} \left\{ 1 + 0,5 \left[(C_B - 0,7) + (1 - C_B) \frac{0,8D - T}{3} T \right] \right\} + 450 \right\} \quad (4-1)$$

dengan,

W_H = massa lambung (ton)

f_1 = 21-24%, pengurangan berat dengan penggunaan baja high tensile (Okumoto, 2009)

L_{pp} = *length of perpendicular* (m)

B = lebar lambung (m)

D = tinggi lambung (m)

T = sarat air (m)

C_B = koefisien block

Perhitungan *center of gravity* dilakukan dengan pendekatan Kupras (1976) untuk *vertical center of gravity* (VCG) dan pendekatan yang terdapat pada “*Preliminary Ship Design Parameter Estimation*” untuk perhitungan *longitudinal center of gravity* (LCG), sedangkan *transversal center of gravity* (TCG) bernilai 0,00 karena bentuk lambung kapal yang simetris.

$$VCG_H = 0,01D \left[46,6 + 0,135(0,81 - C_B) \left(\frac{L_{pp}}{D} \right)^2 \right] + 0,008D \left(\frac{L_{pp}}{B} - 6,5 \right) \quad (4-2)$$

untuk $L_{pp} \geq 120$ m

$$LCG_H = 0,15 + LCB \quad (4-3)$$

dengan,

LCB = *longitudinal center of buoyancy* (dihitung dari *bow*)

B. Bangunan Atas (*super structure*)

Perhitungan massa bangunan atas didasarkan pada pendekatan yang dilakukan oleh Ventura (2010) :

$$W_s = W_U \times A \quad (4-4)$$

dengan,

W_s = massa bangunan atas (ton)

W_U = massa rata-rata per unit area (kg/m²)

W_s = 225 kg/m² (bangunan atas berada di bagian belakang, aft)

A = luasan area bangunan atas (m²)

Perhitungan *center of gravity* dilakukan dengan mengukur lokasi bangunan atas pada *general arrangement* tanker.

C. Permesinan (*machinery*)

Perhitungan massa permesinan didasarkan pada pendekatan yang dilakukan oleh Watson dan Gilfillan (1977) :

$$W_m(diesel) = \sum_i 12 \left[\frac{MCR_i}{RPM_i} \right]^{0,84} + Auxiliary\ wt. \quad (4-5)$$

dengan,

W_m = massa permesinan (ton)

MCR = daya mesin (kw)

RPM = putaran mesin

$Auxiliary\ wt. = 0,72 \times (MCR)^{0,7}$ untuk tanker

Perhitungan *center of gravity* dilakukan dengan pendekatan Watson dan Gilfillan (1977) untuk *vertical center of gravity* (VCG) dan dengan mengukur lokasi permesinan yang terpasang pada ruang mesin, untuk perhitungan *longitudinal center of gravity* (LCG).

$$VCG_M = h_{DB} + 0,35(D - h_{DB}) \quad (4-6)$$

dengan,

h_{DB} = tinggi double bottom = 2.00 m

D. Peralatatan (*equipment*)

Perhitungan massa peralatan didasarkan pada pendekatan yang dilakukan oleh Cudina *et al* (2010) :

$$W_E = \left(0,28 - \frac{L_{pp}}{1620}\right) \times L_{pp} \times B \quad (4-7)$$

dengan,

W_E = massa peralatan (ton)

Perhitungan *center of gravity* dilakukan dengan pendekatan Kupras (1976) untuk *vertical center of gravity* (VCG) dan dengan mengukur lokasi peralatan yang terpasang pada struktur bangunan apung, untuk perhitungan *longitudinal center of gravity* (LCG).

$$VCG_E = D + 1,25 + 0,01(L_{pp} - 125)$$

untuk $125 \leq L_{pp} \leq 250$ m (4-8)

Massa beserta *center of gravity* tiap-tiap komponen penyusun tanker jika disuperposisikan akan menghasilkan massa dan *center of gravity* dari kapal kosong (*lightweight*).

4.2.1.2 Perhitungan Massa dan *Center of Gravity* Kapal Kondisi Muatan Penuh

Massa dan *center of gravity* kapal kondisi muatan penuh didapatkan dari superposisi massa dan *center of gravity* kapal kosong dengan muatannya dalam kondisi penuh. Muatan kondisi penuh didapatkan dengan menghitung volume tanki muatan yang dikalikan dengan densitas muatannya.

4.2.1.3 Perhitungan Massa dan *Center of Gravity* Kapal Kondisi Muatan Ballast

Sedangkan massa dan *center of gravity* kapal kondisi muatan ballast didapatkan dari superposisi massa dan *center of gravity* kapal kosong dengan 10%

muatannya dan ballast. Muatan kondisi ballast didapatkan dengan menghitung volume tanki muatan yang terisi 10% dari kapasitas muatannya (dalam kondisi ballast) yang dikalikan dengan densitas muatannya dan menghitung massa air ballast pada tanki ballast dengan mengalikan volume tanki ballast dengan densitas air ballast.

4.2.2 Perhitungan Radius Girasi Struktur Apung

Perhitungan radius girasi struktur didasarkan pada persamaan yang diajukan oleh Bhattacharyya (1978) dimana radius girasi dari gerak rotasi struktur merupakan hasil akar kuadrat dari jumlah massa dikalikan masing-masing jarak massa tersebut dari *center of gravity* struktur.

- Radius girasi *roll*

$$k_{xx} = \sqrt{\frac{\sum w_i(y_i^2 + z_i^2)}{\Delta}} \quad (4-9)$$

- Radius girasi *pitch*

$$k_{yy} = \sqrt{\frac{\sum w_i(x_i^2 + z_i^2)}{\Delta}} \quad (4-10)$$

- Radius girasi *yaw*

$$k_{zz} = \sqrt{\frac{\sum w_i(x_i^2 + y_i^2)}{\Delta}} \quad (4-11)$$

Menurut Bhattacharyya (1978) perhitungan ini dilakukan dengan membagi kapal dalam bentuk bagian-bagian kecil kemudian dihitung dengan perkalian faktor Simpson. Namun sejak bentuk kapal yang akan dianalisis berbentuk tidak homogen sehingga akan relatif susah menentukan titik *point mass* dari sebuah volume benda tak beraturan, maka dalam penelitian ini perhitungan radius girasi dilakukan dengan pendekatan standard Bureau Veritas, yaitu sebagai berikut :

- Radius girasi *roll*

$$k_{xx} = 0,289 * B * \left(1,0 + \left(\frac{2 \overline{KG}}{B}\right)^2\right) \quad (4-12)$$

- Radius girasi *pitch* = radius girasi *yaw*

$$k_{yy} = k_{zz} = \sqrt{\frac{1}{12}} L \quad (4-13)$$

dengan,

- B = lebar kapal (meter)
- \overline{KG} = jarak *keel to gravity* (meter)
- L = *Length of Water Line* (meter)

Berikut ini merupakan hasil perhitungan *center of gravity* dan radius girasi kapal dalam kondisi muatan penuh dan ballast ditunjukkan pada Tabel 4-3.

Tabel 4-3 Perhitungan center of gravity dan radius girasi kapal dalam beberapa kondisi muatan

Kondisi Muatan	Displacement (ton)	Sarat (m)	Center of Gravity (m)			Radius Girasi (m)		
			x	y	z	R _{xx}	R _{yy}	R _{zz}
Kosong	27.695	-	131,29	0,00	12,65	-	-	-
Penuh	155.926	17,00	120,49	0,00	12,12	16,40	72,89	72,89
Ballast	89.495	10,00	122,60	0,00	7,82	14,12	70,22	70,22

4.2.3 Skenario Pembebanan

Dalam penelitian ini akan dilakukan pembebanan dengan beban propagasi gelombang dari arah samping kapal (*beam seas*, 90 deg), arah seperempat haluan (*quartering seas*, 135 deg) dan arah haluan (*head seas*, 180 deg).

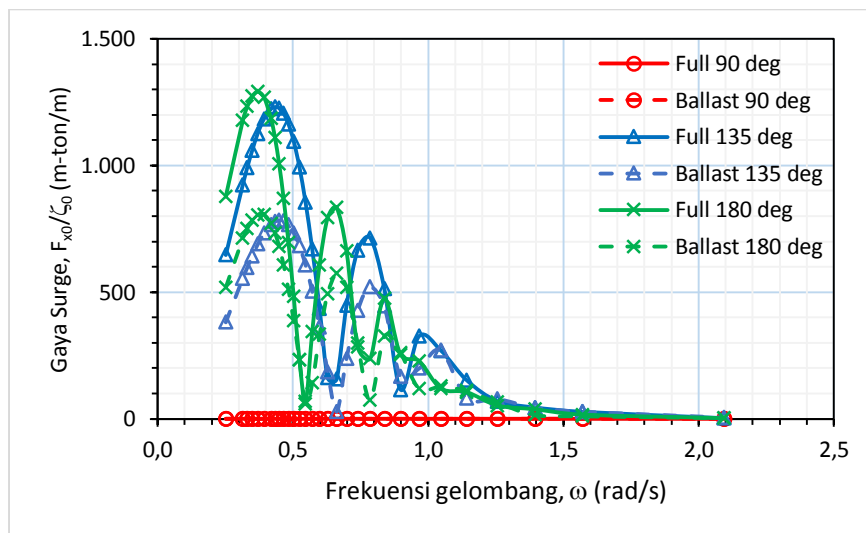
4.3 ANALISIS KARAKTERISTIK GERAKAN STRUKTUR PADA GELOMBANG REGULER

Karakteristik gerakan struktur yang ditinjau pada bagian ini merupakan gerakan struktur pada gelombang reguler. Analisis ini akan menghasilkan karakteristik gaya tiap gerakan akibat gaya gelombang orde-1, karakteristik gerakan yang dimanifestasikan dalam bentuk *Response Amplitude Operator* (RAO), dan karakteristik gaya *mean wave drift* akibat pengaruh gaya gelombang orde-2 yang dimanifestasikan ke dalam bentuk *Quadratic Transfer Function* (QTF).

4.3.1 Analisis Karakteristik Gaya Tiap Gerakan

4.3.1.1 Gaya Surge

Karakteristik gaya *surge* pada tanker ditunjukkan pada Gambar 4-3. Meninjau pada gambar tersebut terlihat bahwa gaya *surge* didominasi oleh propagasi gelombang dari arah haluan (180 deg) dan arah seperempat haluan (135 deg). Kecenderungan gaya *surge* untuk arah haluan dan seperempat haluan memiliki karakter yang sama, yaitu memiliki tiga puncak magnifikasi gaya. Puncak pertama memiliki besaran gaya tertinggi kemudian puncak lainnya memiliki besaran gaya yang lebih rendah jika dibandingkan dengan puncak pertama.



Gambar 4-3 Grafik gaya *surge* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Jika dibandingkan besaran gayanya, gaya *surge* pada propagasi gelombang arah haluan memiliki gaya yang lebih tinggi dibandingkan pada arah seperempat haluan, yaitu 1.292 ton/m berbanding 1.230 ton/m pada puncak pertama masing-masing arah gelombang. Hal ini disebabkan karena arah gelombang dari haluan bekerja searah dengan gerakan *surge* sedangkan arah gelombang dari seperempat haluan memiliki sudut kemiringan sebesar 45 derajat dari arah gerakan *surge*. Gaya *surge* akibat propagasi gelombang arah samping bernilai nol karena arah datang gelombang tegak lurus terhadap gerakan *surge*.

Perbandingan variasi kondisi muatan antara muatan penuh dengan ballast menghasilkan beda sekitar 1,60 kali lebih besar pada kondisi muatan penuh. Hal ini

dikarenakan luasan yang tercelup pada kondisi muatan penuh lebih besar jika dibandingkan dengan luasan saat kondisi ballast.

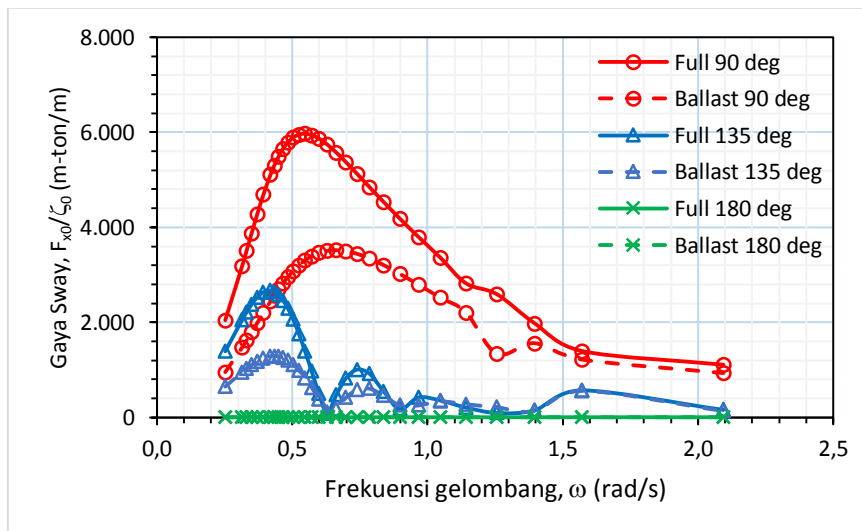
Berikut rangkuman besaran gaya *surge* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-4.

Tabel 4-4 Gaya *surge* maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Gaya Surge						
Muatan	Gaya maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	Gaya (m-ton/m)	ω (rad/s)	Gaya (m-ton/m)	ω (rad/s)	Gaya (m-ton/m)	ω (rad/s)
Full	0,00	semua	1230,00	0,43	1292,00	0,37
Ballast	0,00	semua	784,00	0,45	806,00	0,39

4.3.1.2 Gaya Sway

Karakteristik gaya *sway* pada tanker dapat dilihat pada Gambar 4-4. Gaya *sway* didominasi akibat propagasi gelombang arah samping. Karakteristik gaya *sway* akibat propagasi gelombang arah samping memiliki satu puncak sedangkan dari arah seperempat haluan memiliki tiga puncak.



Gambar 4-4 Grafik gaya *sway* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Besaran gaya *sway* akibat propagasi arah samping memiliki harga maksimal 5.966 ton/m pada frekuensi 0,55 rad/s dan dari arah seperempat haluan memiliki harga 3.517 ton/m pada puncak pertamanya (frekuensi sekitar 0,66 rad/s), atau sekitar 0,58 kalinya jika dibandingkan dengan gaya *sway* dari arah samping. Gaya

sway akibat propagasi gelombang haluan bernilai nol karena arahnya tegak lurus dengan gerakan *sway*.

Adapun perbandingan kondisi muatan penuh dengan ballast yaitu sekitar 1,7 kali lebih besar kondisi muatan penuh. Sama halnya dengan gaya *surge*, gaya *sway* kondisi muatan penuh lebih besar jika dibandingkan dengan kondisi ballast karena pengaruh luasan yang terkena gelombang.

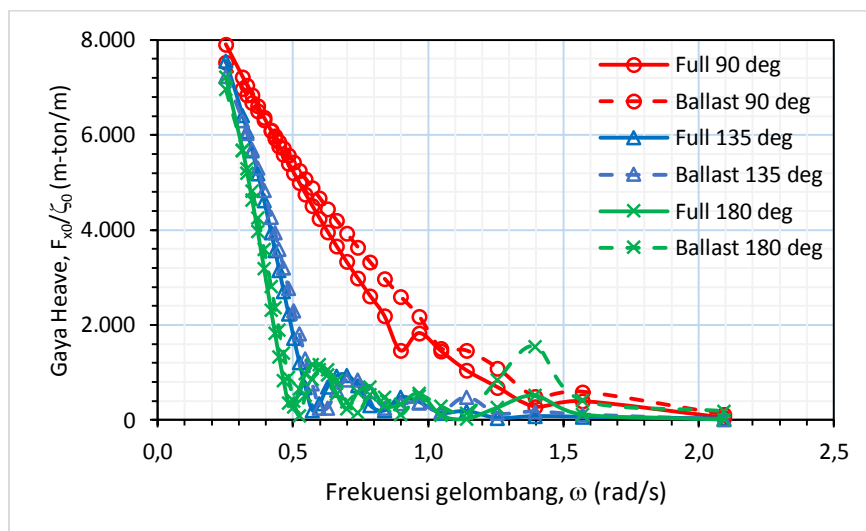
Berikut rangkuman besaran gaya *sway* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-5.

Tabel 4-5 Gaya *sway* maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Gaya Sway						
Muatan	Gaya maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	Gaya (m-ton/m)	ω (rad/s)	Gaya (m-ton/m)	ω (rad/s)	Gaya (m-ton/m)	ω (rad/s)
Full	5966,00	0,55	2667,00	0,42	0,00	semua
Ballast	3517,00	0,66	1288,00	0,43	0,00	semua

4.3.1.3 Gaya Heave

Karakteristik gaya *heave* pada tanker ditunjukkan pada Gambar 4-5. Berdasarkan gambar tersebut dapat ditinjau bahwa kecenderungan grafik gaya *heave* bergerak menurun terhadap kenaikan frekuensinya.



Gambar 4-5 Grafik gaya *heave* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Besaran gaya akibat propagasi gelombang arah samping cenderung memiliki harga yang relatif lebih besar dibandingkan dengan arah lainnya, hal itu dapat dilihat dari karakteristik gayanya yang memiliki luasan di bawah kurva lebih besar dibandingkan dari arah seperempat haluan maupun arah haluan.

Besaran gayanya pada frekuensi rendah memiliki harga yang cenderung sama, yaitu berkisar sekitar 7.200 s.d. 7.900 ton/m, kemudian gayanya turun terhadap kenaikan frekuensi gelombang dengan kemiringan kurva yang berbeda-beda.

Perbandingan kondisi muatan antara muatan penuh dan ballast tidak terlalu signifikan, yaitu hanya sekitar 1,05 kali lebih besar kondisi muatan penuh pada frekuensi rendah. Tetapi pada frekuensi menengah hingga tinggi, gaya heave lebih besar terjadi pada kondisi ballast dibandingkan muatan penuh, yaitu dengan beda 1,7 kali pada frekuensi 0,89 rad/s.

Berikut rangkuman besaran gaya *heave* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-6.

Tabel 4-6 Gaya heave maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

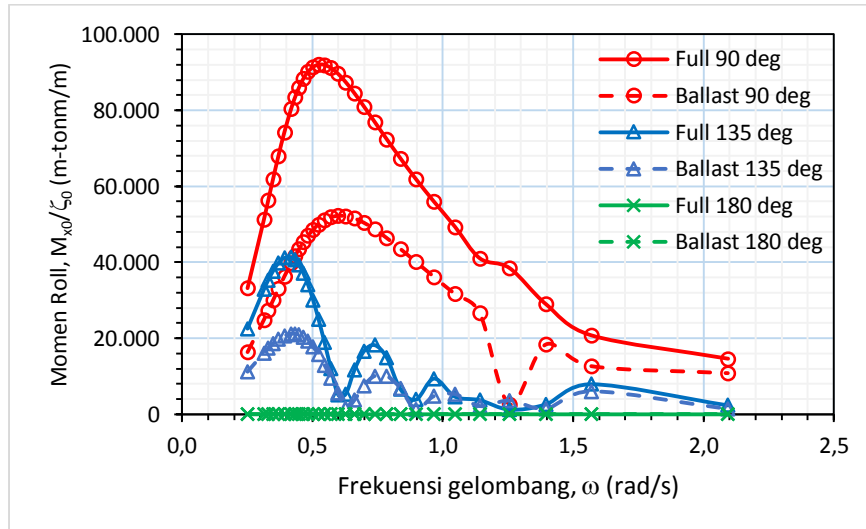
Karakteristik Gaya Heave						
Muatan	Gaya maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	Gaya (m-ton/m)	ω (rad/s)	Gaya (m-ton/m)	ω (rad/s)	Gaya (m-ton/m)	ω (rad/s)
Full	7908,00	0,25	7558,00	0,25	7224,00	0,25
Ballast	7528,00	0,25	7238,00	0,25	6960,00	0,25

4.3.1.4 Momen *Roll*

Karakteristik momen *roll* pada tanker dapat dilihat pada Gambar 4.6. Meninjau gambar tersebut kecenderungan momen roll relatif mirip karakternya dengan gaya *sway*. Karakteristik momen *sway* akibat propagasi gelombang arah samping memiliki satu puncak sedangkan dari arah seperempat haluan memiliki tiga puncak.

Besaran momen *roll* maksimal akibat propagasi gelombang arah samping memiliki harga sekitar 92.025 tonm/m (kondisi muatan penuh) dan dari arah seperempat haluan mempunyai harga sekitar 41.280 tonm/m pada puncak

pertamanya (kondisi ballast). Sedangkan besaran momen pada arah haluan bernilai nol karena arah gelombang tidak searah dengan arah gerakan *roll*.



Gambar 4-6 Grafik momen *roll* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Adapun perbandingan besaran momen antara kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast adalah sekitar 1,8 kali lebih besar pada saat kondisi muatan penuh. Hal ini disebabkan karena besarnya luasan penampang yang terkena gaya pada saat muatan penuh lebih besar daripada saat ballast.

Rangkuman besaran momen *roll* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-7.

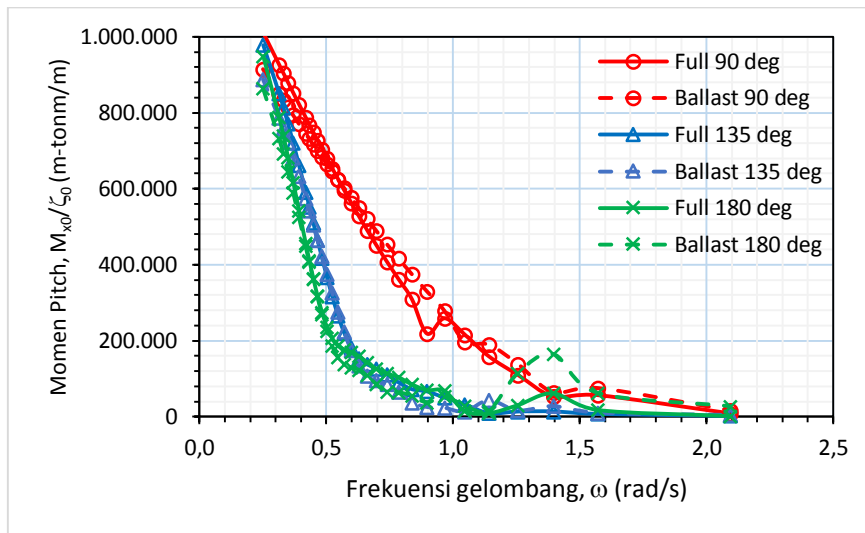
Tabel 4-7 Momen roll maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Momen Roll						
Muatan	Momen maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	Momen (m-tonm/m)	ω (rad/s)	Momen (m-tonm/m)	ω (rad/s)	Momen (m-tonm/m)	ω (rad/s)
Full	92025,00	0,52	41280,00	0,42	18,00	1,05
Ballast	52290,00	0,60	21167,00	0,42	44,00	1,04

4.3.1.5 Momen Pitch

Karakteristik momen *pitch* pada tanker ditunjukkan pada Gambar 4-7. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa karakteristik momen *pitch* cenderung menyerupai gaya *heave*. Karakteristik momen *pitch* pada frekuensi rendah memiliki harga sekitar 1.010.643 tonm/m kemudian bergerak turun terhadap kenaikan frekuensi gelombang. Jika diperhatikan lebih detail, tren momen *pitch*

akibat propagasi arah haluan memiliki puncak kedua pada frekuensi 1,4 rad/s yang pada gaya *heave* juga memiliki puncak kedua serupa. Hal ini disebabkan efek kopel gerakan *heave-pitch* dan menghasilkan matriks inertiya yang memiliki efek kopel pada komponen matriksnya.



Gambar 4-7 Grafik momen *pitch* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Karakteristik momen *pitch* akibat propagasi arah samping memiliki harga yang paling besar jika dibandingkan dengan arah seperempat haluan maupun arah haluan. Besaran momen *pitch* pada frekuensi rendah akibat arah gelombang samping, seperempat haluan dan haluan berturut turut adalah 1.010.643, 977.838 dan 949.058 tonm/m (kondisi muatan penuh). Adapun besaran momen *pitch* pada kondisi muatan penuh maupun kondisi ballast memiliki beda yang kurang signifikan, yaitu sekitar 1,10 kali lebih besar kondisi muatan penuh.

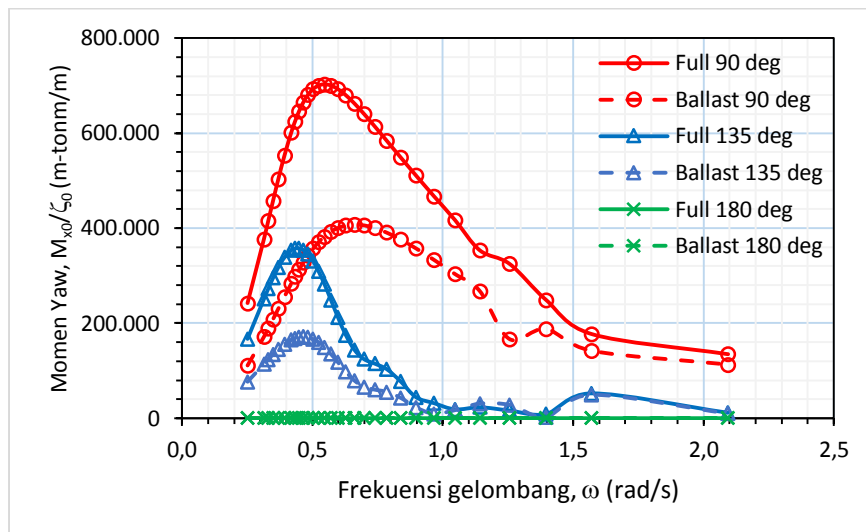
Rangkuman besaran momen *pitch* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-8.

Tabel 4-8 Momen *pitch* maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Momen <i>Pitch</i>						
Muatan	Momen maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	Momen (m-tonm/m)	ω (rad/s)	Momen (m-tonm/m)	ω (rad/s)	Momen (m-tonm/m)	ω (rad/s)
Full	1010643,00	0,25	977838,00	0,25	949058,00	0,25
Ballast	915227,00	0,25	887785,00	0,25	863407,00	0,25

4.3.1.6 Momen *Yaw*

Karakteristik momen *yaw* pada tanker ditunjukkan pada Gambar 4-8. Meninjau gambar tersebut dapat diketahui bahwa kurva momen *yaw* baik akibat propagasi gelombang arah samping dan seperempat haluan memiliki bentuk yang sama, yakni memiliki satu puncak. Adapun puncak kedua yang terbentuk memiliki kenaikan yang tidak begitu signifikan.



Gambar 4-8 Grafik momen *yaw* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Besaran momen *yaw* akibat propagasi gelombang arah samping mendominasi besarnya momen. Kemudian diikuti oleh arah dari seperempat haluan, sedangkan dari arah haluan besarnya momen *yaw* yang terbentuk cukup kecil jika dibandingkan dengan kedua arah lainnya.

Berikut rangkuman besaran momen *yaw* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-9.

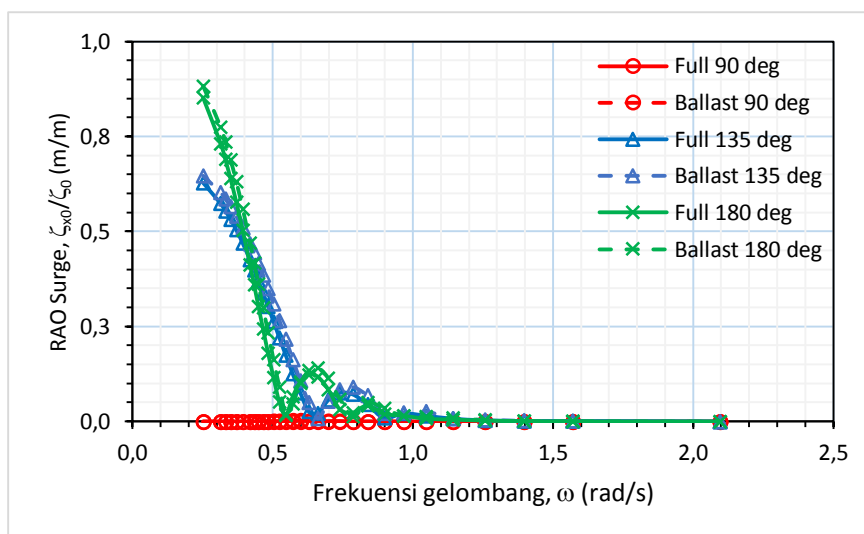
Tabel 4-9 Momen *yaw* maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Momen <i>Yaw</i>						
Muatan	Momen maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	Momen (m-tonm/m)	ω (rad/s)	Momen (m-tonm/m)	ω (rad/s)	Momen (m-tonm/m)	ω (rad/s)
Full	702883,00	0,55	357563,00	0,45	186,00	1,05
Ballast	407737,00	0,66	171473,00	0,47	484,00	1,40

4.3.2 Analisis Karakteristik Gerakan Struktur

4.3.2.1 Gerakan Surge

Karakteristik gerakan *surge* tanker ditunjukkan pada Gambar 4-9. Berdasarkan gambar tersebut ditunjukkan bahwa karakteristik gerakan *surge* akibat propagasi gelombang haluan memiliki harga tertinggi jika dibandingkan dengan arah propagasi gelombang dari seperempat haluan maupun dari arah samping. Hal ini disebabkan karena arah gelombang haluan searah dengan pergerakan *surge*.



Gambar 4-9 Grafik RAO gerakan *surge* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Karakteristik gerakan *surge* akibat propagasi gelombang arah haluan dan perempat haluan memiliki karakteristik yang cenderung serupa, yaitu memiliki harga RAO sekitar 0,88 m/m (180 deg, kondisi ballast) dan 0,65 m/m (135 deg, kondisi ballast) pada frekuensi rendah, 0,25 rad/s. Kemudian tren bergerak menurun mengikuti kenaikan frekuensi gelombang. Terlihat pada Gambar 4.10, puncak kedua maupun ketiga terjadi pada frekuensi sekitar 0,63 dan 0,83 rad/s (180 deg) juga terjadi pada frekuensi sekitar 0,74 dan 1,05 rad/s (135 deg).

Perbandingan karakteristik RAO gerakan *surge* pada kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast memiliki perbedaan yang kurang signifikan, yaitu sekitar 3% lebih besar saat kondisi ballast.

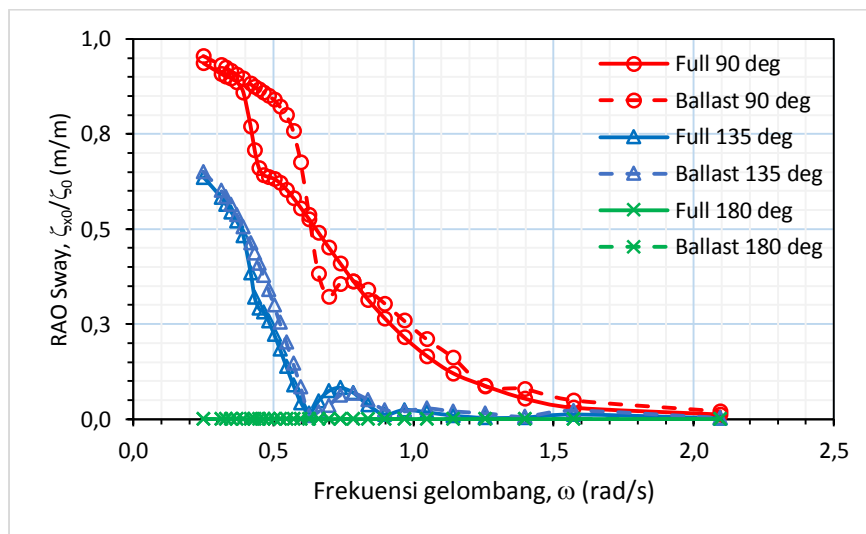
Adapun rangkuman besaran RAO gerakan *surge* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-10.

Tabel 4-10 RAO surge maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Gerakan Surge						
Muatan	RAO maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	RAO (m/m)	ω (rad/s)	RAO (m/m)	ω (rad/s)	RAO (m/m)	ω (rad/s)
Full	0,00	0,57	0,63	0,25	0,85	0,25
Ballast	0,00	semua	0,65	0,25	0,88	0,25

4.3.2.2 Gerakan Sway

Karakteristik gerakan *sway* tanker dapat ditinjau pada Gambar 4-10. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa karakteristik gerakan *sway* akibat propagasi gelombang dari arah samping memiliki harga yang cukup dominan jika dibandingkan dengan arah perempat haluan dan arah haluan. Harga RAO *sway* akibat propagasi gelombang arah haluan bernilai nol karena arah propagasinya tegak lurus dengan arah gerakan *sway*. Kurva RAO yang terbentuk mengalami penurunan seiring dengan kenaikan frekuensi gelombang, dengan beberapa puncak yang terbentuk pada frekuensi sekitar 0,74 rad/s.



Gambar 4-10 Grafik RAO gerakan *sway* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Perbandingan karakteristik RAO gerakan *sway* antara kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast juga tidak menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan, yaitu selisih sekitar 2,12% lebih besar pada kondisi ballast jika dibandingkan dengan muatan penuh.

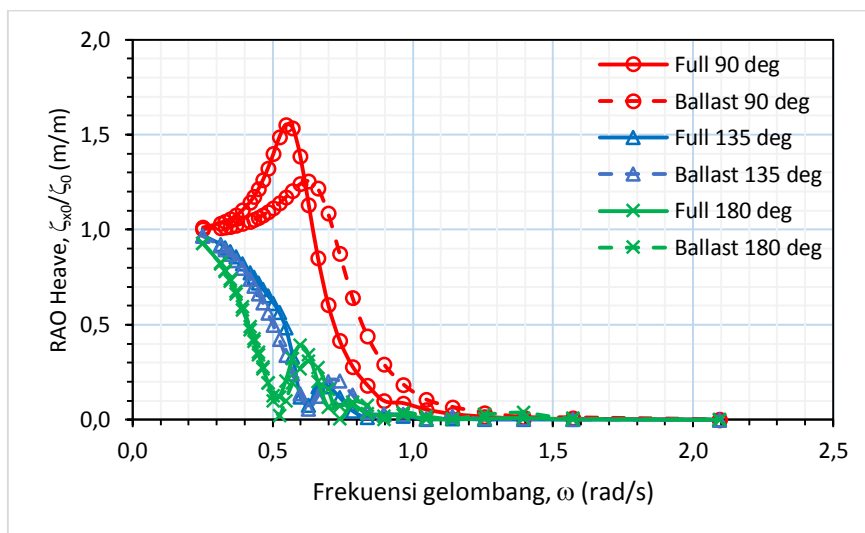
Berikut rangkuman besaran RAO gerakan *sway* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-11.

Tabel 4-11 RAO sway maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Gerakan Sway						
Muatan	RAO maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	RAO (m/m)	ω (rad/s)	RAO (m/m)	ω (rad/s)	RAO (m/m)	ω (rad/s)
Full	0,94	0,25	0,64	0,25	0,00	semua
Ballast	0,96	0,25	0,65	0,25	0,00	semua

4.3.2.3 Gerakan Heave

Karakteristik gerakan *heave* pada tanker dapat dilihat pada Gambar 4-11. Meninjau gambar tersebut dapat diketahui bahwa RAO gerakan *heave* akibat propagasi gelombang arah samping memiliki harga RAO paling besar jika dibandingkan dengan kedua arah lainnya. Karakteristik RAO *heave* akibat gelombang samping memiliki harga RAO sekitar 1,00 m/m pada frekuensi rendah. Kemudian bergerak naik hingga mencapai harga sekitar 1,54 m/m (kondisi muatan penuh) dan 1,22 m/m (kondisi ballast) pada frekuensi 0,57 rad/s (muatan penuh) dan 0,66 rad/s (ballast) yang merupakan frekuensi alami gerakan *heave*. Setelah melewati puncak tersebut tren RAO *heave* bergerak turun pada frekuensi tinggi.



Gambar 4-11 Grafik RAO gerakan *heave* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Karakteristik RAO *heave* akibat gelombang perempat haluan dan gelombang haluan memiliki harga RAO sekitar 1,00 m/m pada frekuensi rendah

kemudian bergerak turun seiring bertambahnya frekuensi gelombang. Harga RAO naik cukup tajam hingga membentuk puncak sekitar 0,20 m/m (arah gelombang perempat haluan) dan sekitar 0,34 m/m (arah gelombang haluan). Hal ini terjadi karena pengaruh kopel gerakan *pitch*, yaitu dipengaruhi oleh resonansi gerakan *pitch*, walaupun puncak yang terbentuk pada gerakan *heave* cenderung bergeser ke kanan (frekuensinya) dibandingkan resonansi gerakan *pitch*nya.

Perbandingan harga puncak RAO *heave* kondisi muatan penuh dan ballast pada gerakan *heave* akibat gelombang samping mencapai sekitar 25% lebih besar saat kondisi muatan penuh. Sedangkan perbandingan kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast pada saat arah gelombang perempat haluan dan gelombang haluan tidak terlalu signifikan.

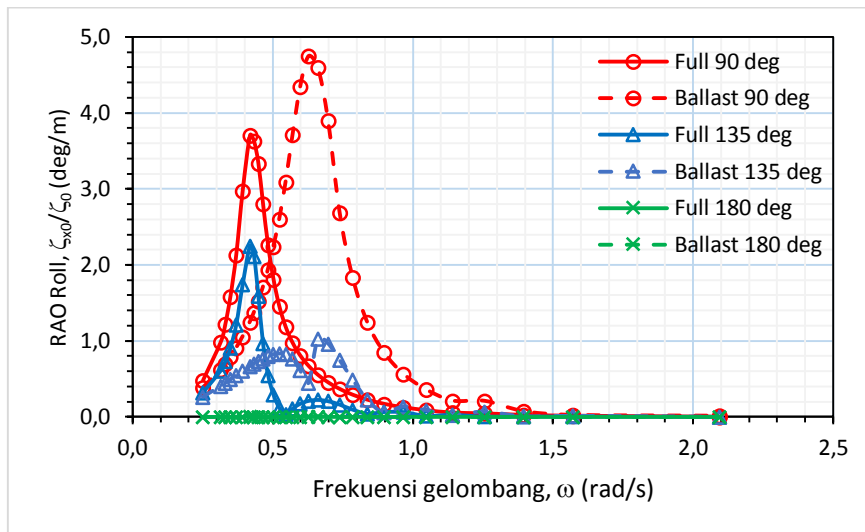
Berikut rangkuman besaran RAO gerakan *heave* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-12.

Tabel 4-12 RAO *heave* maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Gerakan Heave						
Muatan	RAO maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	RAO (m/m)	ω (rad/s)	RAO (m/m)	ω (rad/s)	RAO (m/m)	ω (rad/s)
Full	1,55	0,55	0,97	0,25	0,93	0,25
Ballast	1,26	0,63	0,97	0,25	0,93	0,25

4.3.2.4 Gerakan Roll

Karakteristik gerakan *roll* pada tanker ditunjukkan pada Gambar 4-12. Meninjau gambar tersebut terlihat bahwa karakteristik gerakan *roll* akibat gelombang samping memiliki harga RAO roll tertinggi dibandingkan dengan kedua arah propagasi gelombang lainnya. RAO roll memiliki harga sekitar 0,3 deg/m pada frekuensi rendah kemudian naik secara tajam pada frekuensi 0,43 rad/s (kondisi muatan penuh) dan pada frekuensi 0,63 rad/s yang merupakan frekuensi alami gerakannya. Resonansi gerakannya dapat menaikkan harga RAO roll hingga mencapai 3,63 deg/m (kondisi muatan penuh) dan 4,75 deg/m (kondisi ballast). Kemudian tren RAO *roll* bergerak menurun seiring dengan pertambahan tinggi frekuensi gelombang.



Gambar 4-12 Grafik RAO gerakan *roll* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Karakteristik RAO *roll* akibat gelombang perempat haluan memiliki kenaikan pada frekuensi sekitar 0,52 rad/s yang merupakan frekuensi resonansi gerakan *yaw* dan *pitch*, sehingga memberikan efek kopel. Efek kopel ini menaikkan harga RAO *roll* hingga mencapai 0,83 deg/m, walaupun harganya tidak terlalu signifikan, namun hal ini perlu diperhatikan.

Perbandingan harga puncak RAO *roll* pada kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast akibat propagasi gelombang arah samping, yaitu sekitar 30% lebih besar saat kondisi ballast.

Berikut rangkuman besaran RAO gerakan *roll* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4.13.

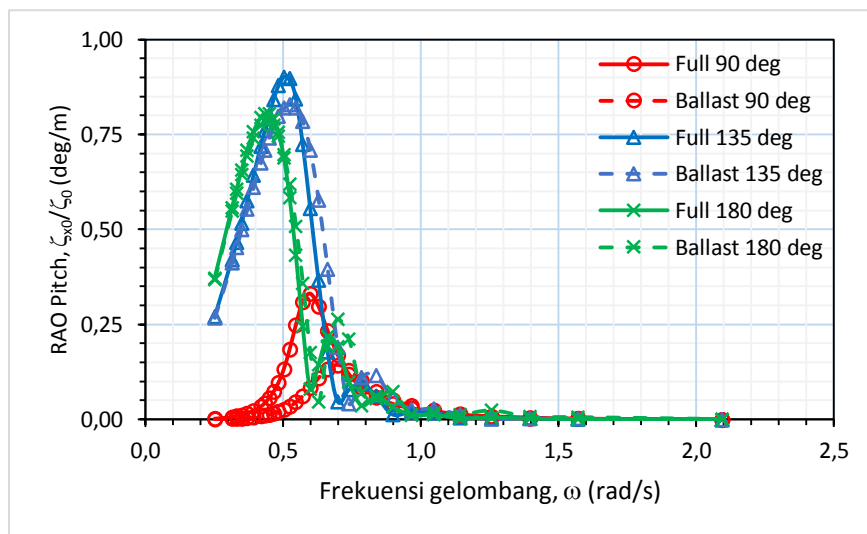
Tabel 4-13 RAO *roll* maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Gerakan <i>Roll</i>						
Muatan	RAO maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	RAO (deg/m)	ω (rad/s)	RAO (deg/m)	ω (rad/s)	RAO (deg/m)	ω (rad/s)
Full	3,70	0,42	2,25	0,42	0,00	0,42
Ballast	4,75	0,63	0,83	0,52	0,00	0,63

4.3.2.5 Gerakan *Pitch*

Karakteristik gerakan *pitch* pada tanker dapat diketahui pada Gambar 4-13. Berdasarkan gambar tersebut dapat diketahui bahwa harga RAO *pitch* tertinggi terjadi akibat propagasi gelombang arah perempat haluan, kemudian disusul oleh

gelombang haluan, kemudian gelombang samping. RAO *pitch* akibat propagasi gelombang arah samping mengalami kenaikan pada frekuensi sekitar 0,57 rad/s (kondisi muatan penuh) dan juga terjadi pada frekuensi sekitar 0,74 rad/s terjadi karena pengaruh frekuensi resonansi gerakan *pitch* dengan mengalami pergeseran frekuensi ke arah kanan. Hal ini menyebabkan terjadinya efek kopel gerakan *roll-pitch* dan menghasilkan matriks inersia yang memiliki efek kopel pada komponen matriksnya.



Gambar 4-13 Grafik RAO gerakan *pitch* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Karakteristik RAO *pitch* memiliki harga sekitar 0,00 s.d. 0,30 deg/m pada frekuensi rendah kemudian bergerak naik hingga mencapai frekuensi resonansi gerakannya masing-masing. Kemudian bergerak turun pada rentang frekuensi tinggi.

Perbandingan kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast yang cukup mencolok terlihat pada RAO *pitch* akibat gelombang arah samping, yaitu memiliki beda sekitar dua kali lebih besar saat kondisi muatan penuh.

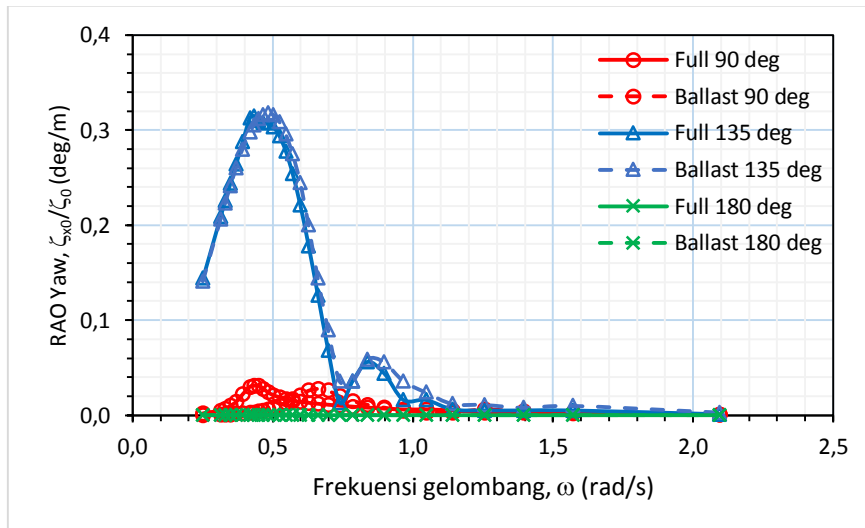
Berikut rangkuman besaran RAO gerakan *pitch* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-14.

Tabel 4-14 RAO pitch maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Gerakan Pitch						
Muatan	RAO maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	RAO (deg/m)	ω (rad/s)	RAO (deg/m)	ω (rad/s)	RAO (deg/m)	ω (rad/s)
Full	0,33	0,60	0,90	0,50	0,81	0,43
Ballast	0,14	0,70	0,83	0,52	0,79	0,43

4.3.2.6 Gerakan Yaw

Karakteristik gerakan yaw pada tanker ditunjukkan pada Gambar 4-14. Berdasarkan gambar tersebut ditunjukkan bahwa gerakan yaw didominasi akibat propagasi gelombang arah perempat haluan. Sedangkan kedua arah lainnya memiliki harga RAO yaw yang tidak signifikan.



Gambar 4-14 Grafik RAO gerakan yaw dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Karakteristik RAO gerakan yaw akibat gelombang perempat haluan memiliki harga RAO sekitar 0,14 deg/m pada frekuensi rendah. Kemudian bergerak naik hingga mencapai frekuensi resonansinya yaitu sekitar 0,43 rad/s. Setelah melewati frekuensi tersebut, karakteristik harga RAO yaw bergerak menurun, kemudian meningkat lagi membentuk puncak kedua dengan harga RAO mencapai 0,06 deg/m pada frekuensi sekitar 0,84 rad/s.

Perbandingan kondisi muatan antara muatan penuh dengan kondisi ballast tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, terlihat dari grafik keduanya yang saling merapat.

Berikut rangkuman besaran RAO gerakan *yaw* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-15.

Tabel 4-15 RAO *yaw* maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik Gerakan <i>Yaw</i>						
Muatan	RAO maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	RAO (deg/m)	ω (rad/s)	RAO (deg/m)	ω (rad/s)	RAO (deg/m)	ω (rad/s)
Full	0,03	0,43	0,32	0,43	0,00	semua
Ballast	0,03	0,66	0,32	0,48	0,00	semua

4.3.3 Analisis Karakteristik *Quadratic Transfer Function* (QTF)

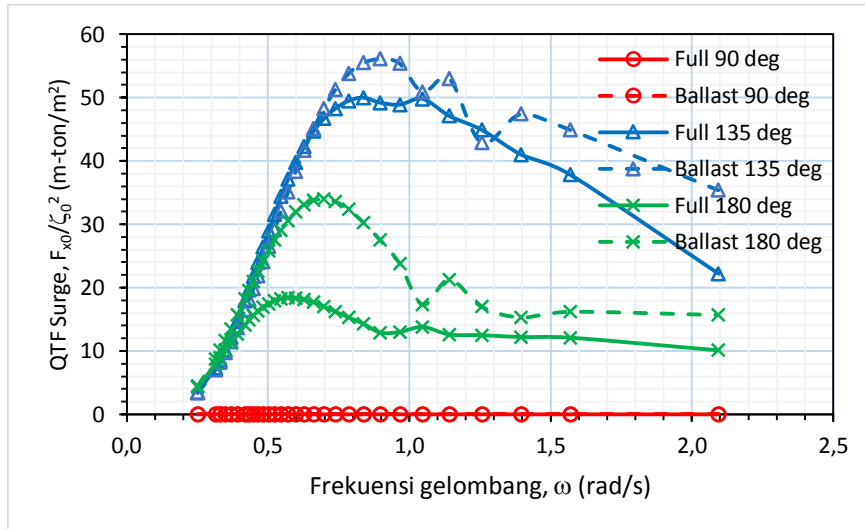
Quadratic Transfer Function (QTF) merupakan suatu *transfer function* yang memuat gaya-gaya nonlinier orde-2. QTF didapatkan dari analisis difraksi pada suatu objek tercelup yang ditampilkan berdasarkan ranah waktu (*frequency domain*). Dalam penyelesaian masalah difraksi, gelombang tidak hanya menghasilkan gaya-gaya linier orde-1 yang proporsional terhadap tinggi gelombang, melainkan juga menghasilkan gaya-gaya nonlinier yang dimanifestasikan ke dalam bentuk QTF. Harga QTF proporsional terhadap tinggi gelombang kuadrat.

Pada dasarnya QTF cenderung serupa dengan gaya RAO, yaitu mendefinisikan fungsi operator komponen gelombang yang berkontribusi gaya-gaya gelombang. Namun, berbeda halnya dengan gaya RAO yang diaplikasikan pada satu amplitudo dan frekuensi yang menyatakan gaya gelombang orde-1, QTF diaplikasikan untuk menyatakan sepasang amplitudo dan frekuensi yang mendefinisikan perilaku gaya-gaya orde-2.

4.3.3.1 *Quadratic Transfer Function* (QTF) *Surge*

Karakteristik QTF *surge* pada tanker ditunjukkan pada Gambar 4-15. Berdasarkan gambar tersebut ditunjukkan bahwa karakteristik QTF *surge* didominasi akibat propagasi gelombang arah perempat haluan, kemudian disusul akibat propagasi gelombang arah haluan. Karakteristik QTF *surge* arah gelombang samping menunjukkan harga 0,00 ton/m² sepanjang frekuensi gelombang. Hal ini

disebabkan karena arah gelombang samping tidak searah dengan arah gerakan *surge*.



Gambar 4-15 Grafik QTF *surge* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Karakteristik QTF *surge* memiliki harga 0,00 ton/m² pada frekuensi rendah, kemudian bergerak naik hingga mencapai puncaknya pada frekuensi sekitar 0,69 rad/s (gelombang arah haluan) dan pada frekuensi sekitar 0,89 rad/s (gelombang arah perempat haluan). Setelah melewati puncaknya harga QTF bergerak turun seiring dengan pertambahan frekuensi gelombang.

Perbandingan kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast terlihat mencolok pada QTF akibat propagasi gelombang arah haluan yaitu memiliki beda sekitar 80 persen lebih besar saat kondisi ballast.

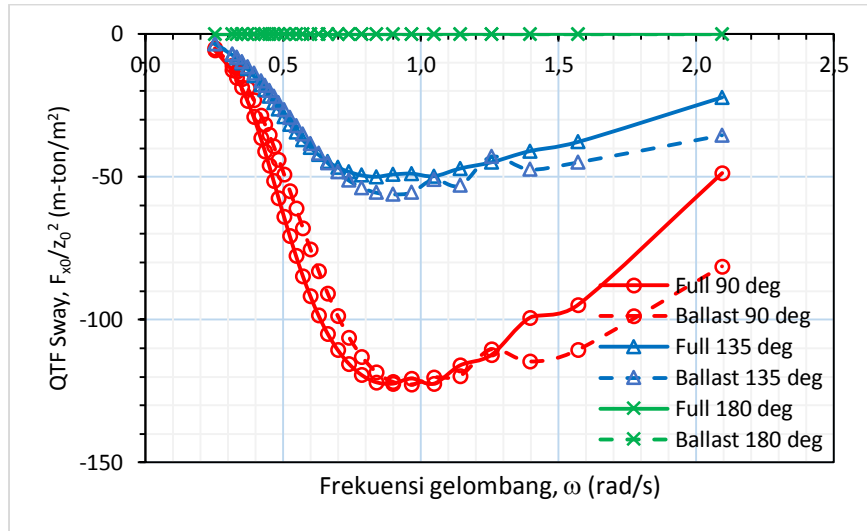
Berikut rangkuman besaran QTF *surge* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-16.

Tabel 4-16 QTF surge maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik QTF Surge						
Muatan	QTF maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)
Full	0,00	semua	50,00	0,84	18,40	0,57
Ballast	0,00	semua	56,10	0,90	34,00	0,70

4.3.3.2 Quadratic Transfer Function (QTF) Sway

Karakteristik QTF *sway* pada tanker dapat dilihat pada Gambar 4-16. Meninjau pada Gambar 4-16 dapat diketahui bahwa QTF *sway* didominasi akibat gelombang arah samping. Berbeda halnya dengan karakteristik QTF *surge*, QTF *sway* memiliki harga negatif dan memiliki puncak pada frekuensi sekitar 0,97 rad/s.



Gambar 4-16 Grafik QTF *sway* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Perbedaan QTF *sway* pada kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast terlihat tidak begitu signifikan hingga mencapai frekuensi sekitar 1,26 rad/s. Kemudian setelah melewati frekuensi tersebut, terlihat perbesaan sekitar 15% lebih besar saat kondisi ballast.

Berikut rangkuman besaran QTF *sway* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-17.

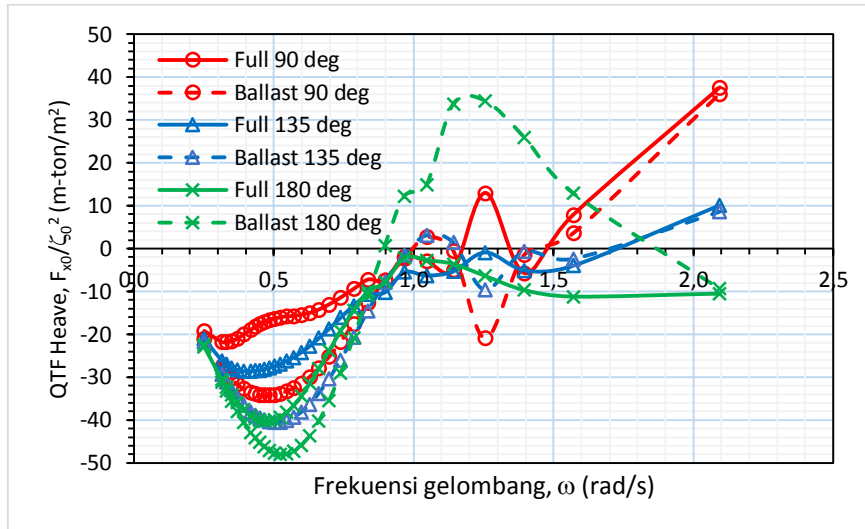
Tabel 4-17 QTF *sway* maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik QTF Sway						
Muatan	QTF maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)
Full	-122,40	0,90	-50,00	0,84	0,00	semua
Ballast	-122,70	0,97	-56,10	0,90	0,00	semua

4.3.3.3 Quadratic Transfer Function (QTF) Heave

Karakteristik QTF *heave* pada tanker ditunjukkan pada Gambar 4-17. Meninjau gambar tersebut terlihat bahwa harga QTF *heave* bernilai negatif pada

frekuensi rendah kemudian bergerak naik ke zona positif pada frekuensi sekitar 1,10 rad/s hingga mencapai frekuensi tinggi.



Gambar 4-17 Grafik QTF *heave* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Perbandingan QTF *heave* antara kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast memiliki beda sekitar 50% lebih tinggi saat kondisi ballast (akibat gelombang samping).

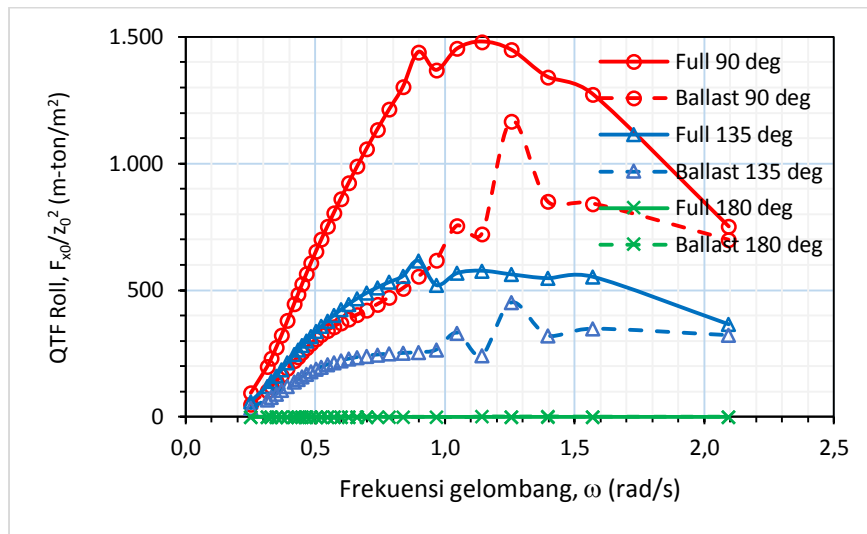
Berikut rangkuman besaran QTF *heave* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-18.

Tabel 4-18 QTF *heave* maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik QTF Heave						
Muatan	QTF maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)
Full	37,60	2,09	-28,60	0,39	-40,30	0,47
Ballast	36,10	2,09	-40,60	0,50	-48,00	0,52

4.3.3.4 Quadratic Transfer Function (QTF) Roll

Karakteristik QTF *roll* pada tanker dapat dilihat pada Gambar 4-18. Berdasarkan gambar tersebut dapat ditinjau bahwa karakteristik QTF *roll* akibat propagasi gelombang arah samping memiliki harga QTF yang paling tinggi jika dibandingkan dengan kedua arah lainnya.



Gambar 4-18 Grafik QTF roll dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Karakteristik QTF roll akibat gelombang samping memiliki harga QTF sekitar 0,00 ton/m² pada frekuensi rendah. Kemudian melonjak tajam hingga mencapai harga sekitar 1500 ton/m² pada frekuensi sekitar 1,20 rad/s.

Perbandingan QTF roll antara kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast terlihat cukup signifikan pada saat gelombang samping, yaitu mencapai sekitar 25% pada puncaknya.

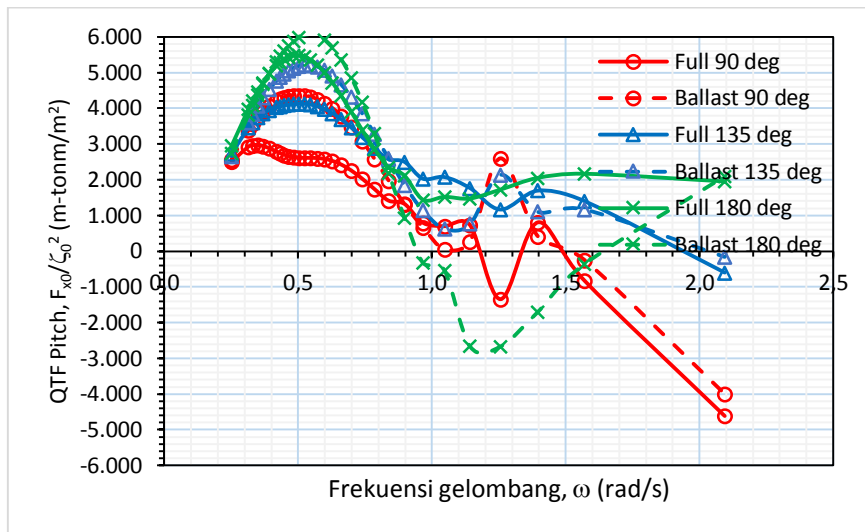
Berikut rangkuman besaran QTF roll terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-19.

Tabel 4-19 QTF roll maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik QTF Roll						
Muatan	QTF maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	QTF (m-tonm/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-tonm/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-tonm/m ²)	ω (rad/s)
Full	1481,80	1,14	616,80	0,90	-0,20	0,90
Ballast	1168,40	1,26	451,60	1,26	1,20	1,40

4.3.3.5 Quadratic Transfer Function (QTF) Pitch

Karakteristik QTF pitch pada tanker dapat dilihat pada Gambar 4-19. Meninjau Gambar 4.19 dapat diketahui bahwa harga QTF pitch memiliki harga pada zona positif dan mencapai puncaknya pada frekuensi sekitar 0,52 rad/s. Kemudian melonjak turun secara tajam pada setelah melewati frekuensi puncak. Harga QTF pitch bergerak ke zona negatif pada frekuensi tinggi.



Gambar 4-19 Grafik QTF *pitch* dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Perbandingan QTF *pitch* kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast mencapai 55% lebih tinggi harga QTF kondisi ballast.

Berikut rangkuman besaran QTF *pitch* terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-20.

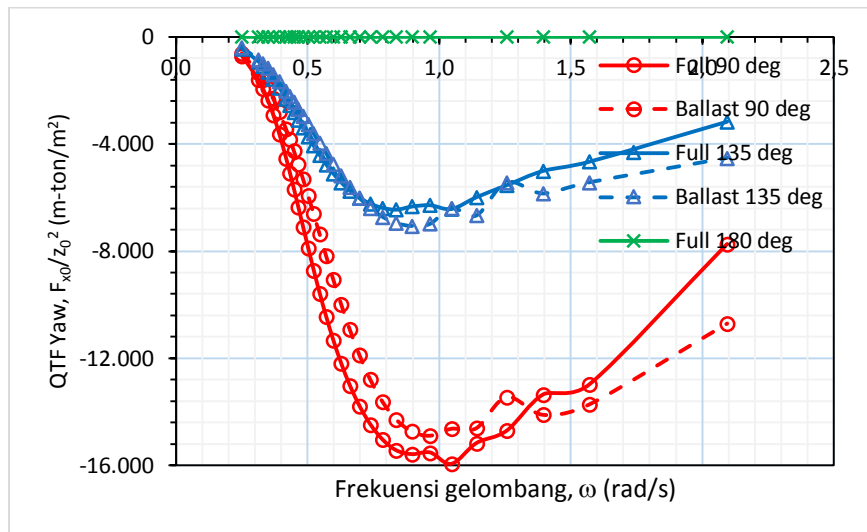
Tabel 4-20 QTF *pitch* maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

Karakteristik QTF <i>Pitch</i>						
Muatan	QTF maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	QTF (m-tonm/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-tonm/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-tonm/m ²)	ω (rad/s)
Full	-4614,10	2,09	4126,60	0,50	5482,40	0,50
Ballast	4365,60	0,50	5210,30	0,52	6071,40	0,55

4.3.3.6 Quadratic Transfer Function (QTF) Yaw

Karakteristik QTF *yaw* pada tanker ditunjukkan pada Gambar 4-20. Berdasarkan Gambar 4-20 terlihat bahwa harga QTF *yaw* didominasi akibat propagasi gelombang arah samping, kemudian diikuti akibat gelombang perempat haluan. Karakteristik QTF *yaw* akibat gelombang haluan memiliki harga 0,00 ton/m².

Besaran harga QTF *yaw* berada pada 0,00 ton/m² pada frekuensi rendah, kemudian melonjak tajam memasuki zona negatif hingga mencapai puncaknya pada frekuensi sekitar 1,00 rad/s.



Gambar 4-20 Grafik QTF yaw dengan variasi kondisi muatan dan arah pembebanan gelombang

Perbandingan harga QTF antara kondisi muatan penuh dengan kondisi ballast memiliki beda sebesar 10% lebih besar harga QTF yaw pada saat kondisi muatan penuh.

Berikut rangkuman besaran QTF yaw terbesar pada tiap-tiap arah propagasi gelombang dan variasi kondisi muatannya ditunjukkan pada Tabel 4-21.

Tabel 4-21 QTF yaw maksimum pada variasi arah gelombang dan kondisi muatan

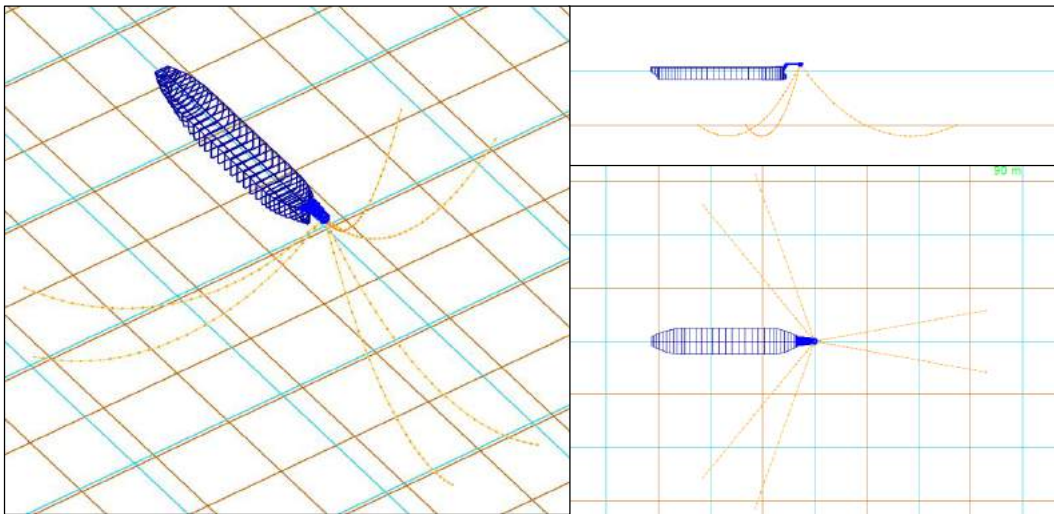
Karakteristik QTF Yaw						
Muatan	QTF maks berdasarkan Arah Gelombang					
	90 deg		135 deg		180 deg	
	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)	QTF (m-ton/m ²)	ω (rad/s)
Full	-15937,30	1,05	-6426,20	1,05	0,10	1,50
Ballast	-14880,80	0,97	-7063,30	0,90	1,10	1,05

4.4 ANALISIS KARAKTERISTIK GERAKAN STRUKTUR PADA GELOMBANG ACAK

Karakteristik gerakan struktur pada gelombang acak didapatkan dengan melakukan analisis dinamis *time domain* dengan siklus 3 x 60 menit (DNV, 2005). Simulasi dimodelkan dengan mempertimbangkan parameter-parameter perilaku hidrodinamika yang didapatkan dari analisis sebelumnya (Lihat **sub bab 4.3**). Parameter perilaku hidrodinamika seperti karakteristik gaya yang bekerja pada struktur apung (*Load RAO*), karakteristik gerakan (*Displacement RAO*), matriks

6 x 6 added mass dan damping, karakteristik gaya gelombang orde-2 (*Quadratic Transfer Function*) menjadi inputan pada simulasi ini.

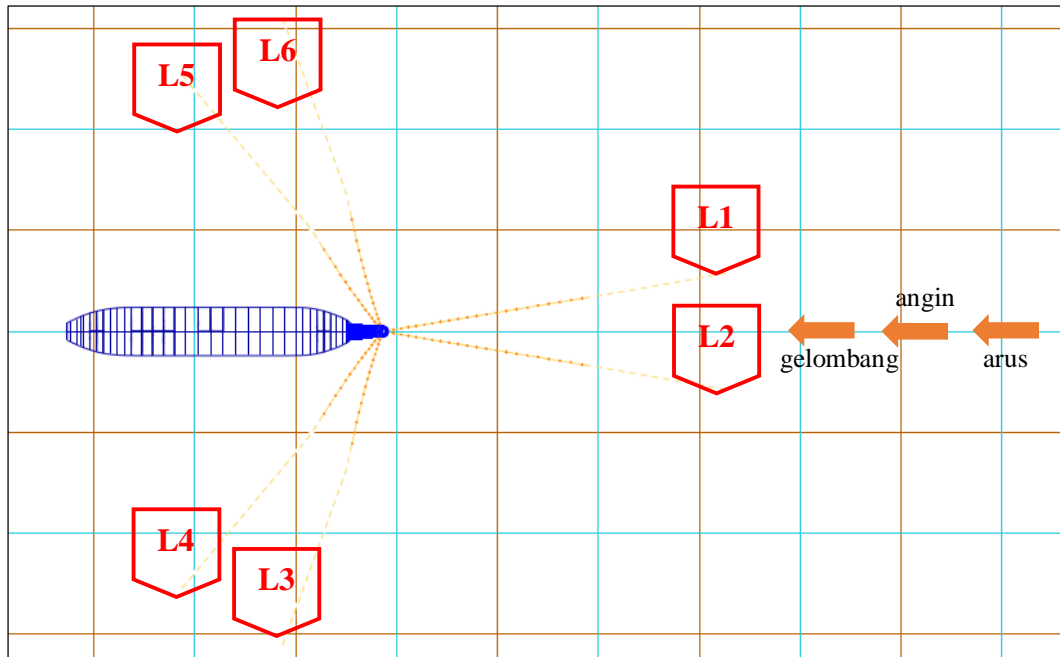
Analisis dinamis *time domain* dilakukan dengan mensimulasikan struktur apung yang ditambatkan pada 6 tali tambat ‘*catenary*’ dengan sistem *external turret mooring* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-2. Sistem tersebut ditempatkan pada bagian haluan kapal dan dapat berputar sesuai dengan arah gaya lingkungan yang bekerja (*weathervaning*).



Gambar 4-21 Ilustrasi sistem tertambat yang disiapkan untuk analisis dinamis

Simulasi domain waktu dilakukan pada kondisi sistem tertambat dengan muatan penuh yang menerima gaya lingkungan terbesar, yaitu arah *collinear*, dengan gaya gelombang, angin dan arus berasal dari arah yang sama/sejajar. Arah gaya lingkungan tersebut diatur bekerja pada haluan kapal (*heading* 180 deg) dan searah dengan posisi tali tambat, L1 (*inline*, **ilustasi dapat dilihat pada Gambar 4-22**). Kecepatan angin dan arus diambilkan dari data lingkungan pada Bab 3, sedangkan tinggi gelombang divariasikan dari 1 s.d. 10 meter untuk melihat respon gerakannya tiap kenaikan tinggi gelombang.

Kondisi pembebanan divariasikan ke dalam 3 jenis : akibat gaya gelombang orde-1, akibat gaya gelombang orde-2 dan kombinasi gaya gelombang orde-1 + orde-2 untuk melihat pengaruh dari masing-masing gaya terhadap respon struktur yang ditimbulkan.

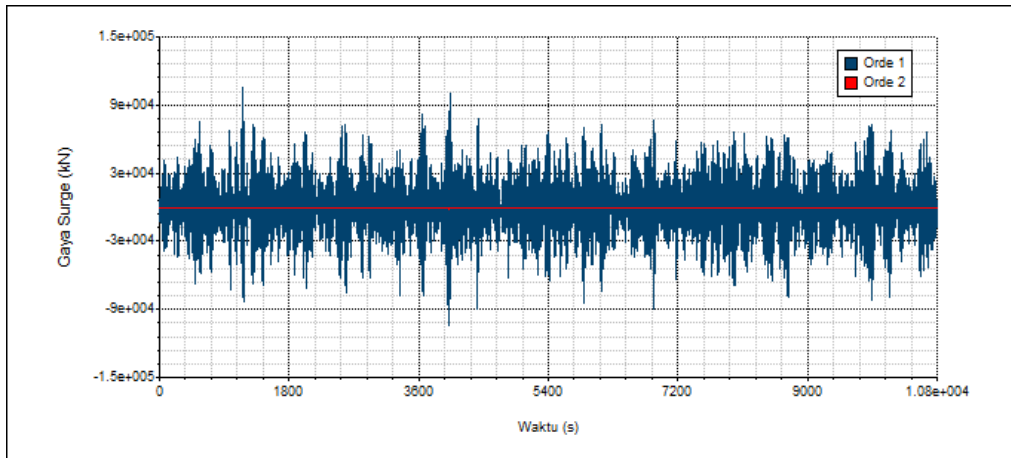


Gambar 4-22 Konfigurasi pemasangan tali tambat (L1 – L6) dengan sistem external turret mooring : 6 tali tambat dengan konfigurasi inline

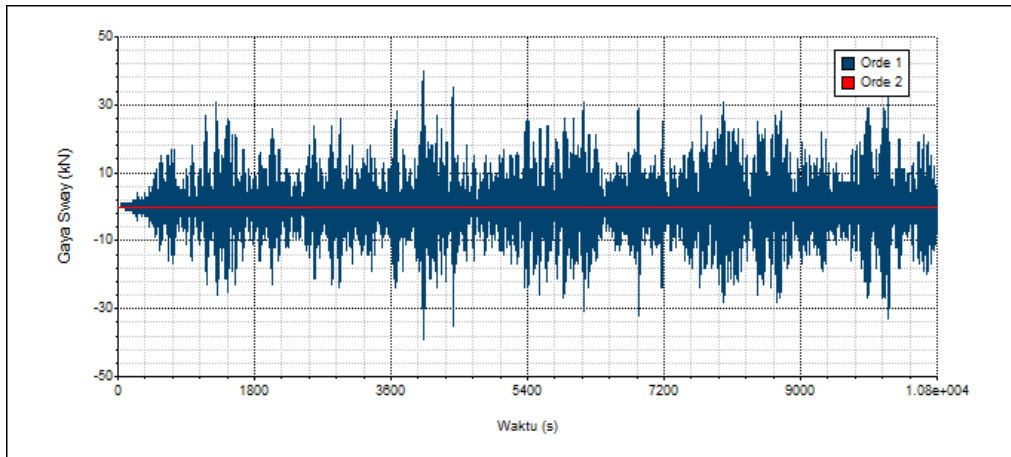
Tahapan analisis dimulai dari analisis statis untuk menentukan kondisi equilibrium sistem struktur tertambat. Beban lingkungan yang ditinjau pada analisis statis adalah beban angin, arus dan gelombang *mean drift*. Setelah kondisi equilibrium terpenuhi, dilanjutkan dengan analisis dinamis *time domain coupled analysis* dengan perhitungan struktur apung dan tali tambat dihitung secara serempak/bersama-sama (*coupled*). Berikut merupakan hasil analisis karakteristik gerakan struktur pada gelombang acak : Karakteristik gaya, karakteristik respon dan karakteristik tension tali tambat.1

4.4.1 Analisis Gaya pada Struktur Apung

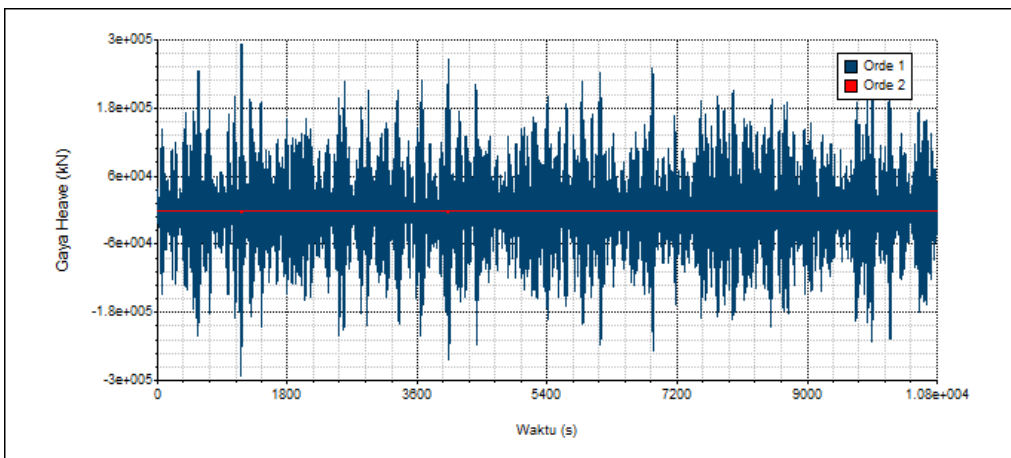
Gaya dan momen yang bekerja pada struktur apung tertambat dapat dilihat pada Gambar 4-23 s.d. 4-28. Gambar tersebut menunjukkan rekam besaran gaya dan momen yang terjadi pada struktur apung akibat pengaruh gelombang orde-1 maupun orde-2 selama 10800 detik. Gaya dan momen akibat pengaruh gelombang orde-1 ditunjukkan dengan garis berwarna biru sedangkan pengaruh gelombang orde-2 ditunjukkan dengan garis berwarna merah.



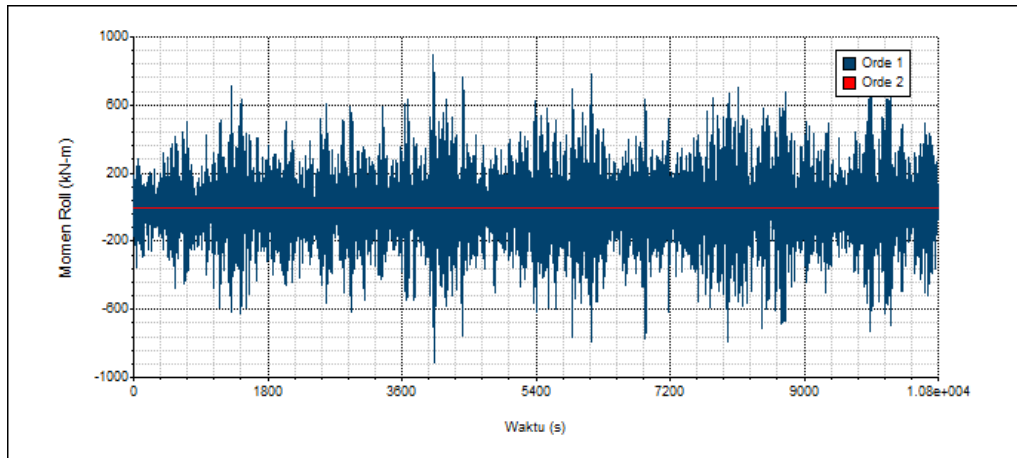
Gambar 4-23 Rekam gaya *surge* pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m



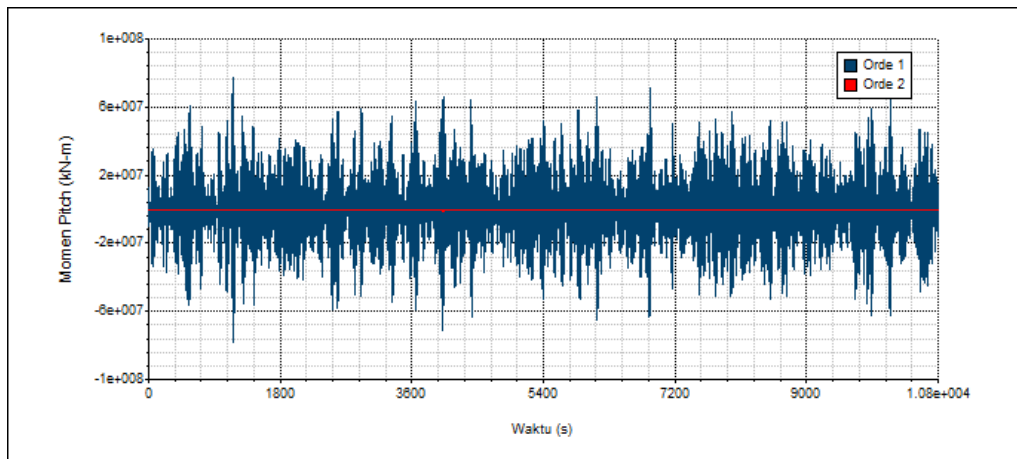
Gambar 4-24 Rekam gaya *sway* pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m



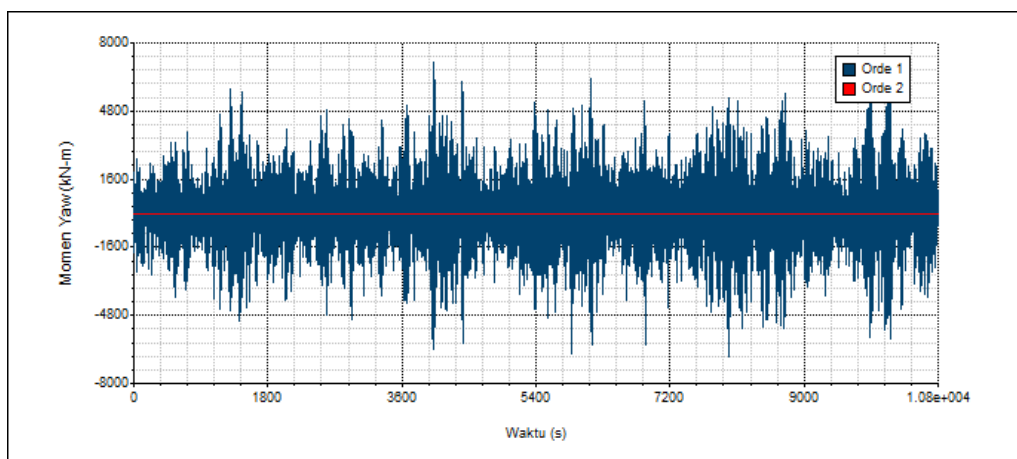
Gambar 4-25 Rekam gaya *heave* pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m



Gambar 4-26 Rekam momen *roll* pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m



Gambar 4-27 Rekam momen *pitch* pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m



Gambar 4-28 Rekam momen *yaw* pada struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m

Berdasarkan Gambar 4-23 s.d. 4-28 terlihat cukup jelas perbedaan besaran gaya dan momen akibat pengaruh gelombang orde-1 dan orde-2. Besaran gaya dan momen yang terjadi akibat pengaruh orde-1 cenderung lebih besar jika dibandingkan akibat pengaruh orde-2. Gaya *surge* terbesar akibat orde-1 mencapai sekitar 105409 kN dan akibat orde-2 sekitar 1575 kN, sehingga rasio perbandingannya mencapai sekitar 67 : 1

Pada kasus ini gaya dan momen yang bekerja pada struktur apung didominasi oleh gaya *surge*, gaya *heave* dan momen *pitch*. Hal ini disebabkan karena arah datang gelombang, angin dan arus berasal dari arah haluan kapal (180 deg) dan searah dengan gerakannya. Sedangkan gaya dan momen lainnya seperti gaya *sway*, momen *roll* dan momen *yaw* yang terbentuk diakibatkan oleh pengaruh kopel gerakan lainnya yang terkandung dalam matriks 6 x 6 *added mass* maupun *damping*. Interaksi kopel antar 6 derajat kebebasan inilah yang menyebabkan timbulnya gaya dan momen walaupun arah datang gelombang, arus dan angin tidak searah dengan arah gaya maupun momennya.

4.4.2 Analisis Respon Gerakan

Respon gerakan dalam 6 derajat kebebasan (6 DOF) : *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw* akibat pengaruh gaya gelombang orde-1, orde-2 maupun kombinasi keduanya ditunjukkan pada Gambar 4-29 s.d. 4-34. Gerakan yang diakibatkan oleh gaya dan momen gelombang orde-1 ditunjukkan dengan garis berwarna biru, warna merah untuk menunjukkan gerakan yang dipengaruhi oleh gaya dan momen gelombang orde-2 dan warna kuning menunjukkan pengaruh kedua jenis gaya dan momen gelombang yang bekerja, orde-1 dan orde-2.

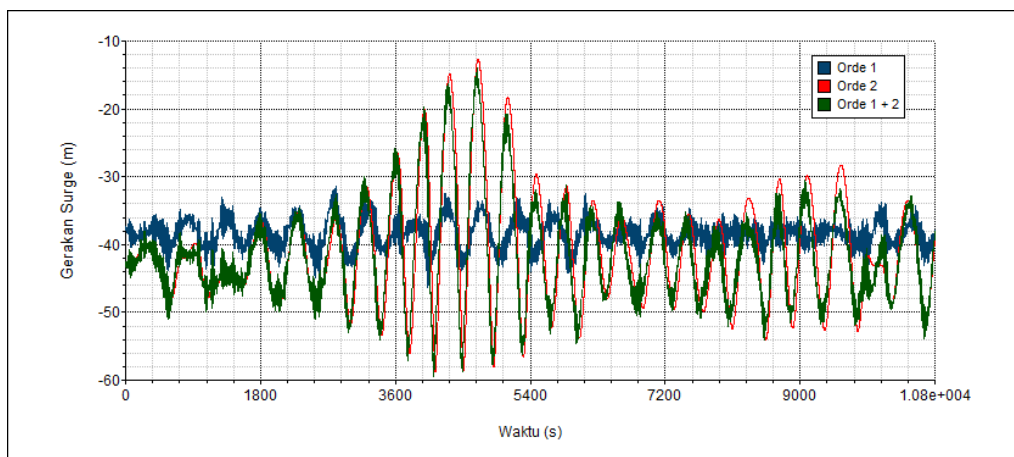
4.4.2.1 Respon Surge

Respon gerakan *surge* kapal ditunjukkan pada Gambar 4-29. Jika diperhatikan dengan seksama, respon *surge* akibat gaya gelombang orde-1 memiliki harga yang relatif kecil dan juga memiliki periode yang lebih pendek jika dibandingkan dengan respon surge akibat pengaruh gaya gelombang orde-2.

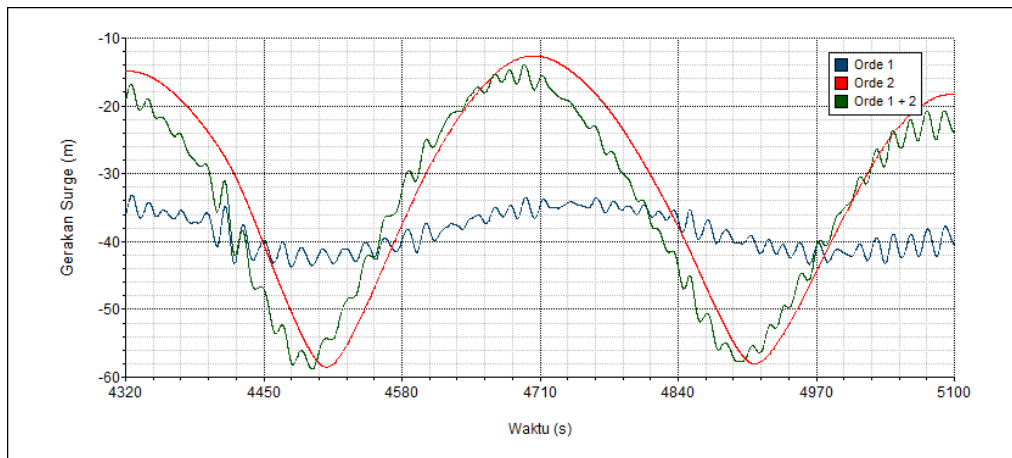
Respon surge akibat gaya gelombang orde-2 memiliki harga relatif besar dengan periode gerakannya yang cenderung tinggi, yaitu sekitar 720 detik. Respon surge akibat pengaruh kombinasi gaya gelombang orde-1 dan orde-2 memiliki karakter perpaduan antar keduanya, yaitu memiliki periode global yang panjang, akibat pengaruh orde-2 dan memiliki periode lokal sebagai akibat dari orde-1.

Gerakan *surge* akibat pengaruh gaya gelombang orde-1 memiliki *double amplitude* sekitar 4.00 m dan akibat pengaruh orde-2 sekitar 46.00 m pada detik ke 4680. Pengaruh gelombang orde-2 menaikkan *double amplitude surge* sekitar 11.00 kali dari pengaruh gaya orde-1 yang ditimbulkan. Respon surge akibat pengaruh kombinasi gaya orde-1+ orde-2 memiliki karakteristik gabungan dari keduanya, yaitu memiliki periode panjang seperti pengaruh yang ditimbulkan oleh gaya orde-2 dan didalamnya terdapat periode pendek pada respon lokal sebagaimana pengaruh yang ditimbulkan oleh gaya orde-1.

Jika amplitudo gerakan *surge* dalam fungsi waktu tersebut ditinjau dalam fungsi frekuensi, maka perlu dilakukan suatu metode untuk mentransformasikan gerakan *surge* dalam domain waktu menjadi kurva densitas spektra gerakan dalam domain frekuensi. Metode transformasi yang telah dikenal cukup luas adalah *Fast Fourier Transform* (FFT). Metode FFT mengubah rekam amplitudo gerakan *surge* dalam domain waktu (Gambar 4-29) menjadi densitas spektra gerakan surge dalam domain frekuensi (Gambar 4-30).

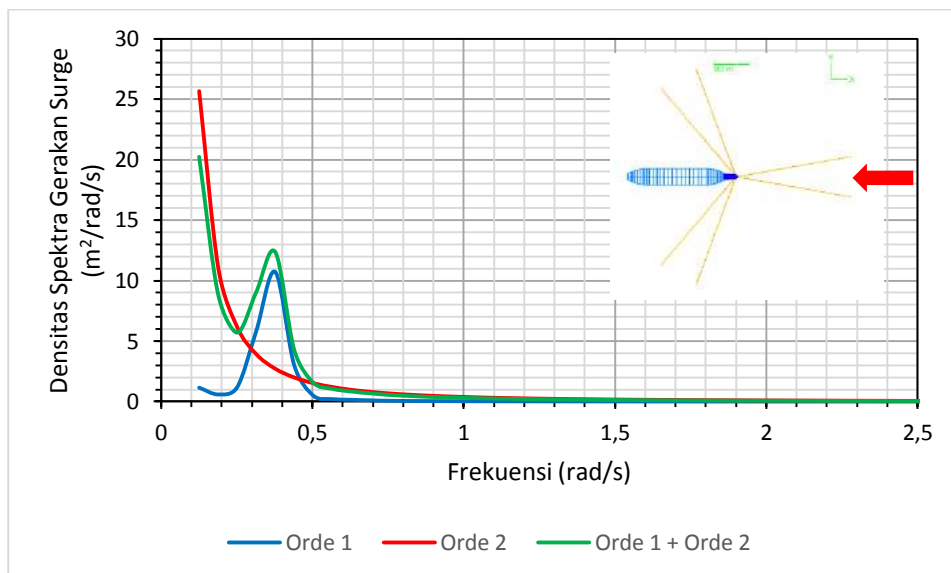


(a)



(b)

Gambar 4-29 Respon gerakan *surge* struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m, Respon surge jika ditinjau dari detik ke-4320 s.d. -5100 (b)



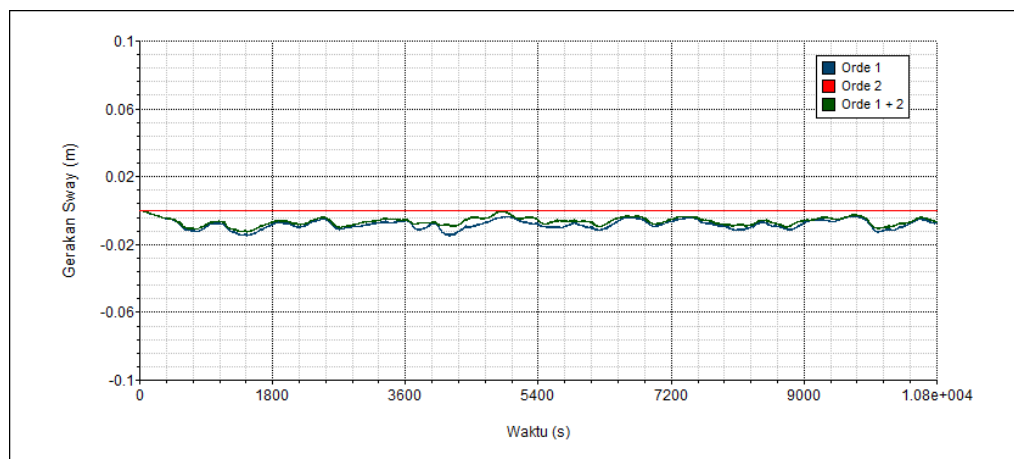
Gambar 4-30 Densitas spektra gerakan *surge*

Densitas spektra gerakan *surge* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-30 menjelaskan bahwa spektra gerakan *surge* akibat pengaruh orde-2 memiliki puncak spektra pada frekuensi yang lebih rendah jika dibandingkan akibat pengaruh orde-1, yaitu pada frekuensi sekitar 0,10 rad/s. Hal ini terjadi akibat resonansi antara gaya gelombang orde-2 yang memiliki frekuensi rendah dengan frekuensi natural sistem tertambat. Spektra gerakan *surge* akibat pengaruh orde-1 memiliki puncak pada rentang frekuensi gelombang pada umumnya. Jika diperhatikan dengan seksama spektra gerakan *surge* akibat pengaruh kombinasi gaya orde-1 dan orde-2 terlihat

memiliki puncak pertama pada frekuensi rendah 0,10 rad/s akibat pengaruh orde-2 dan juga memiliki puncak kedua pada frekuensi sekitar 0,37 rad/s akibat pengaruh orde-1.

4.4.2.2 Respon Sway

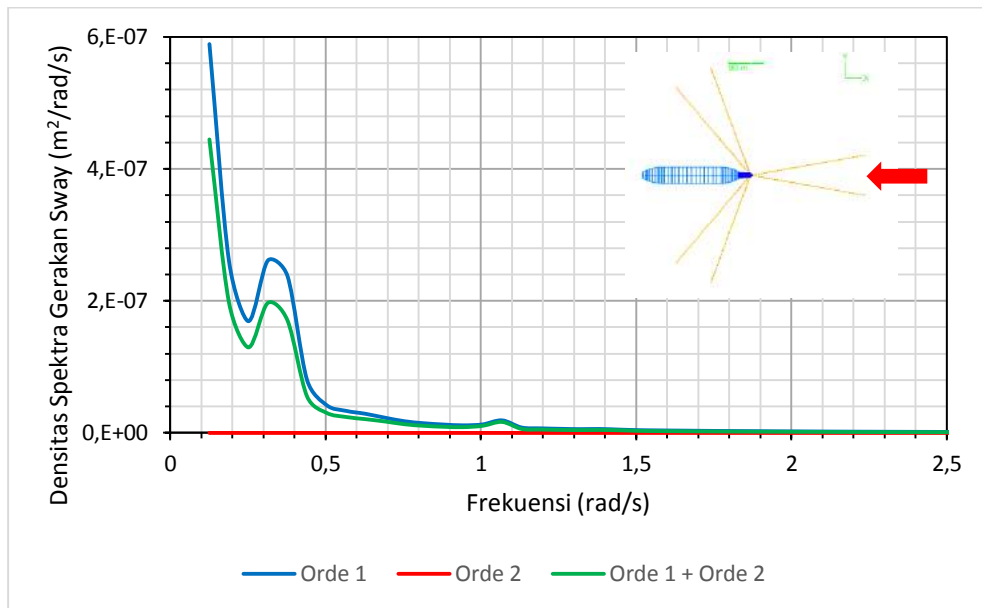
Respon gerakan *sway* kapal dapat dilihat pada Gambar 4-31. Meninjau gambar tersebut terlihat bahwa gerakan *sway*, baik akibat pengaruh gaya orde-1, orde-2 maupun kombinasi antara keduanya, memiliki harga yang relatif kecil. Hal ini disebabkan karena arah gerakan *sway* tidak sejajar dengan arah datang gelombang, yaitu dari arah haluan kapal (180 deg).



Gambar 4-31 Rekam respon gerak *sway* struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m

Adapun jika dilihat karakteristiknya, gerakan *sway* akibat pengaruh gaya orde-2 memiliki harga mendekati 0,00 karena gaya *mean drift* relatif cukup kecil atau mendekati 0,00. Sehingga gerakan *sway* akibat pengaruh kombinasi orde-1 dan orde-2 akan menyerupai gerakan akibat pengaruh orde-1.

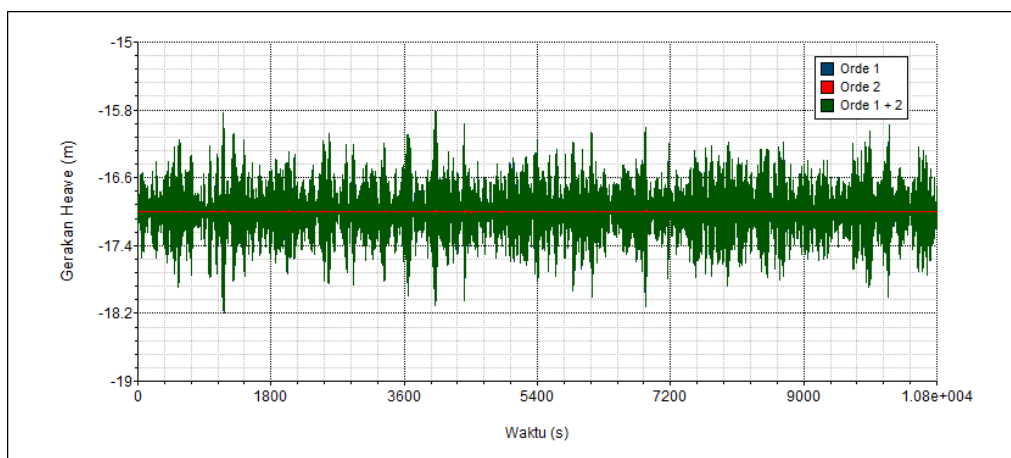
Begitu juga densitas spektra gerakan *sway* yang dipengaruhi oleh kombinasi gaya orde-1 + orde-2 memiliki karakteristik yang menyerupai bentuk gerakan yang diakibatkan oleh pengaruh orde-1 saja (**Lihat Gambar 4-32**).



Gambar 4-32 Densitas spektra gerakan sway

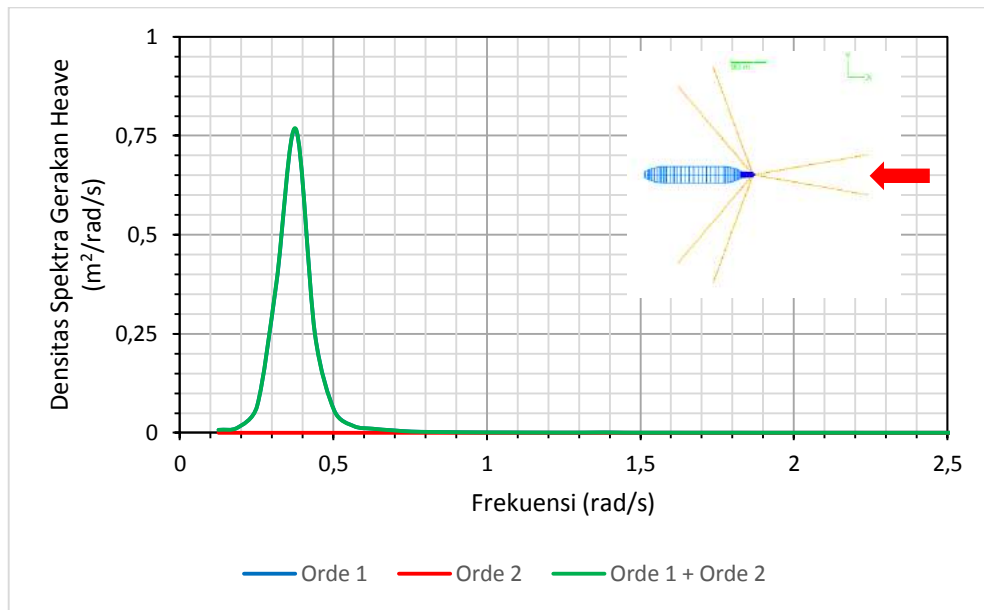
4.4.2.3 Respon *Heave*

Respon gerakan *heave* kapal ditunjukkan pada Gambar 4-33. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa respon *heave* akibat gelombang orde-2 memiliki harga yang mendekati nol. Dapat disimpulkan bahwa gelombang orde-2 tidak berpengaruh terhadap gerakan vertikal, seperti gerakan *heave*. Sehingga gerakan *heave* akibat kombinasi gaya gelombang orde-1 + orde-2 memiliki besaran yang cenderung sama dengan pengaruh orde-1, yaitu memiliki double amplitude gerakan sekitar 2,40 m.



Gambar 4-33 Rekam respon gerak *heave* struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m

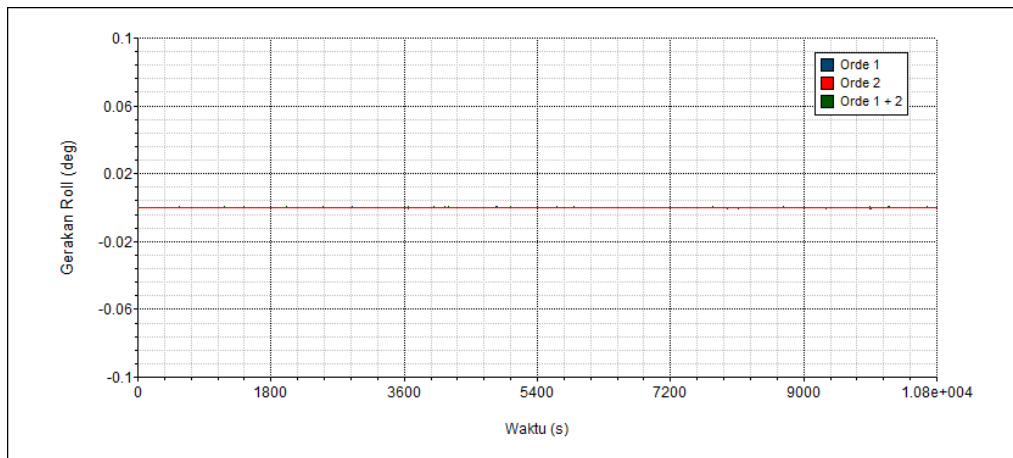
Jika ditinjau dalam densitas spektra gerakan *heave* pada Gambar 4-34 terlihat bahwa densitas spektra *heave* akibat pengaruh gaya orde-1 berhimpit dengan kondisi akibat pengaruh kombinasi gaya orde-1 + orde-2. Hal ini menunjukkan bahwa gaya orde-2 tidak berpengaruh terhadap respon *heave*.



Gambar 4-34 Densitas spektra gerakan *heave*

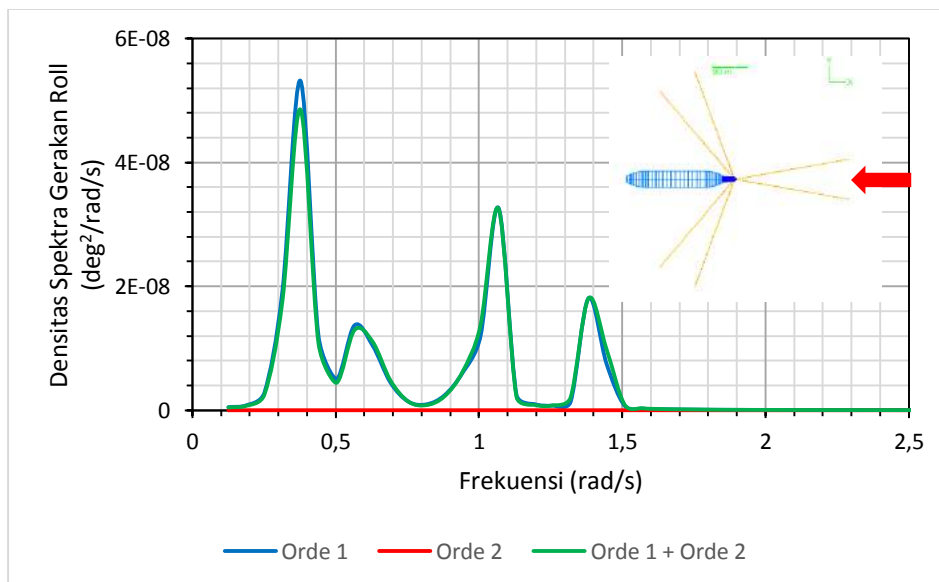
4.4.2.4 Respon *Roll*

Respon gerakan *roll* dapat ditinjau pada Gambar 4-35. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa respon *roll* baik akibat pengaruh gaya orde-1, orde-2, maupun kombinasi keduanya memiliki harga yang mendekati 0,00 mengingat arah gaya *roll* tidak searah dengan arah gerakannya. Respon *roll* akibat pengaruh orde-1 dan kombinasi masih terlihat berosilasi dalam periode yang pendek, sedangkan respon *roll* akibat pengaruh orde-2 tidak terlihat berosilasi sehingga tampak bernilai 0,00.



Gambar 4-35 Rekam respon gerak *roll* struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m

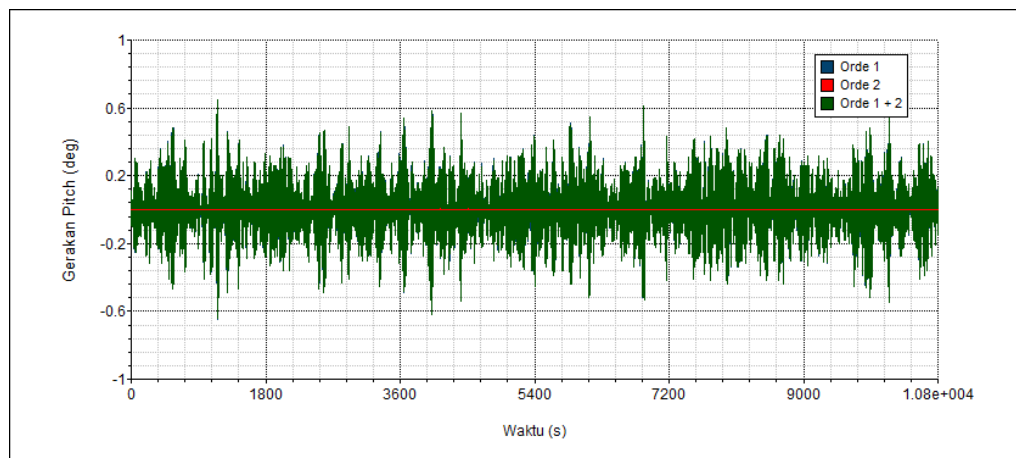
Jika respon *roll* dalam domain waktu tersebut ditinjau dalam bentuk densitas spektra gerakannya akan terlihat seperti pada Gambar 4-36. Terlihat bahwa densitas spektra *roll* akibat pengaruh gaya orde-1 berhimpit dengan kondisi akibat pengaruh gaya kombinasi. Hal ini menunjukkan untuk gerakan *roll* tidak terpengaruh oleh gaya gelombang orde-2.



Gambar 4-36 Densitas spektra gerakan *roll*

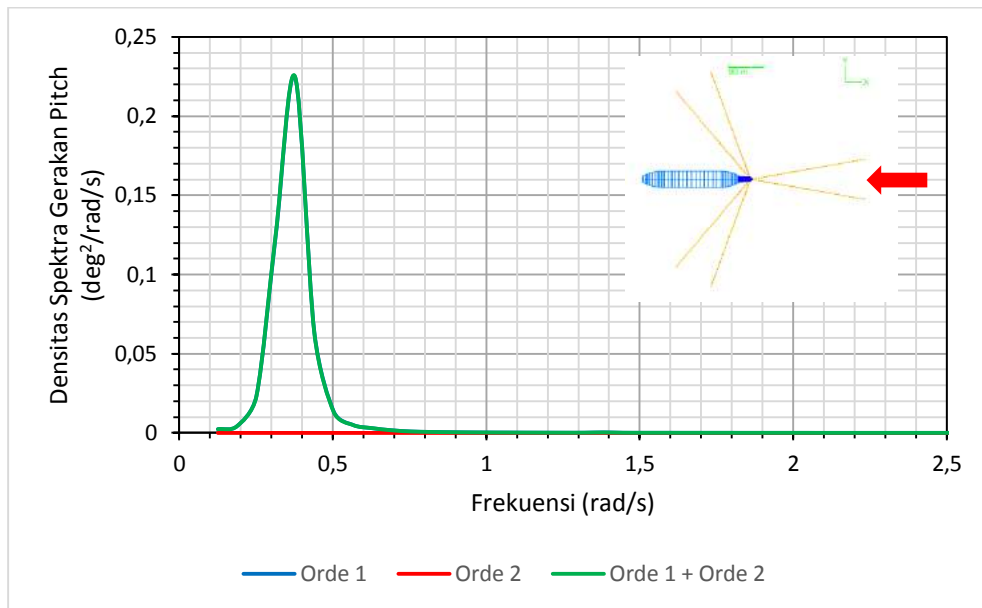
4.4.2.5 Respon *Pitch*

Respon gerakan *pitch* pada tanker dapat dilihat pada Gambar 4-37. Berdasarkan gambar tersebut terekam *double amplitude pitch* sebesar 1,00 deg yang merupakan nilai terbesarnya. Sama halnya dengan kedua gerakan vertikal lainnya, *heave* dan *roll*, pengaruh gaya gelombang orde-2 tidak menimbulkan pengaruh yang cukup signifikan terhadap respon *pitch*, ditandai dengan garis merah yang menunjukkan harga konstan di angka 0,00.



Gambar 4-37 Rekam respon gerak *pitch* struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m

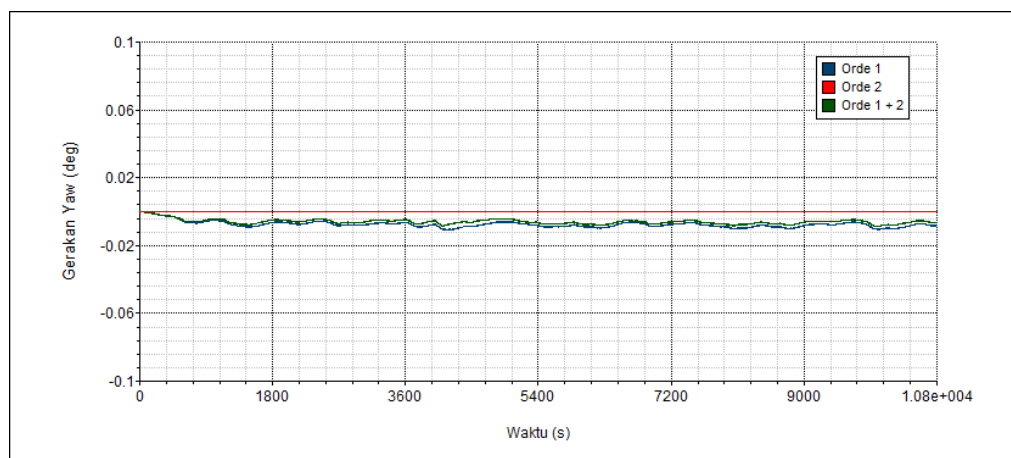
Jika respon tersebut ditinjau ke dalam domain frekuensi akan menghasilkan densitas spektra seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-38. Berdasarkan gambar tersebut ditunjukkan bahwa densitas spektra *pitch* akibat pengaruh gaya orde-1 dan kombinasi saling berhimpit, yang menunjukkan tidak adanya pengaruh gaya gelombang orde-2 pada respon *pitch*. Kurva memiliki puncak dengan harga 0,37 $\text{deg}^2/\text{rad/s}$ pada frekuensi sekitar 0,22 rad/s yang dipengaruhi oleh gaya orde-1.



Gambar 4-38 Densitas spektra gerakan *pitch*

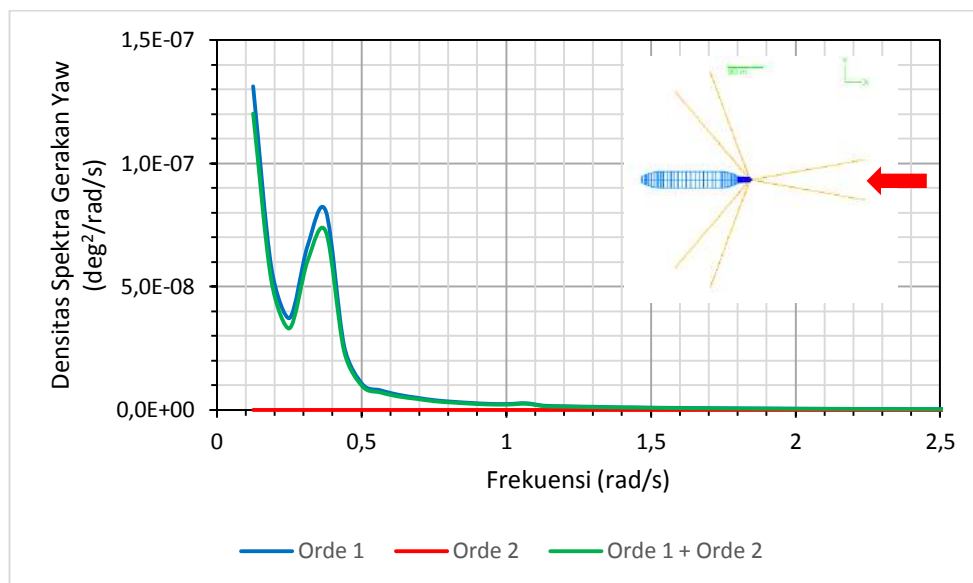
4.4.2.6 Respon *Yaw*

Respon *yaw* pada tanker ditunjukkan pada Gambar 4-39. Meninjau gambar tersebut terlihat bahwa respon *yaw* memiliki harga relatif kecil, mendekati 0,00. Hal ini disebabkan karena arah gaya lingkungan yang bekerja (*heading* 180 deg) tidak searah dengan arah gerakannya. Karakteristik gerakan *yaw* memiliki pola yang sama dengan gerakan horisontal lainnya, *surge* dan *sway*. Pola gerakan *yaw* memiliki periode yang lebih panjang jika dibandingkan dengan gerakan vertikal (*heave*, *roll* dan *pitch*).



Gambar 4-39 Rekam respon gerak *yaw* struktur apung selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m

Jika respon *yaw* ditinjau dalam domain frekuensi akan menghasilkan densitas spektra gerakan *yaw* sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4-40. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa spektra respon *yaw* akibat pengaruh gaya orde-2 memiliki harga 0,00 sebagai akibat arah gayanya yang tidak searah dengan gerakan *yaw*. Sehingga spektra respon *yaw* akibat pengaruh gaya orde-1 dan kombinasi memiliki pola yang relatif sama dan saling berhimpit.



Gambar 4-40 Densitas spektra gerakan *yaw*

Berdasarkan analisis di atas dapat disimpulkan bahwa sistem tertambat yang dikenai gaya dari arah horizontal memiliki respon pada gerakan yang searah dengan gayanya : *surge*, *heave* dan *pitch*. Gaya orde-2 (*mean wave drift force*) memberikan pengaruh cukup signifikan pada respon *surge* (akibat arah gaya dari haluan) tetapi tidak pada gerakan vertikal (*heave*, *roll* dan *pitch*) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4-22.

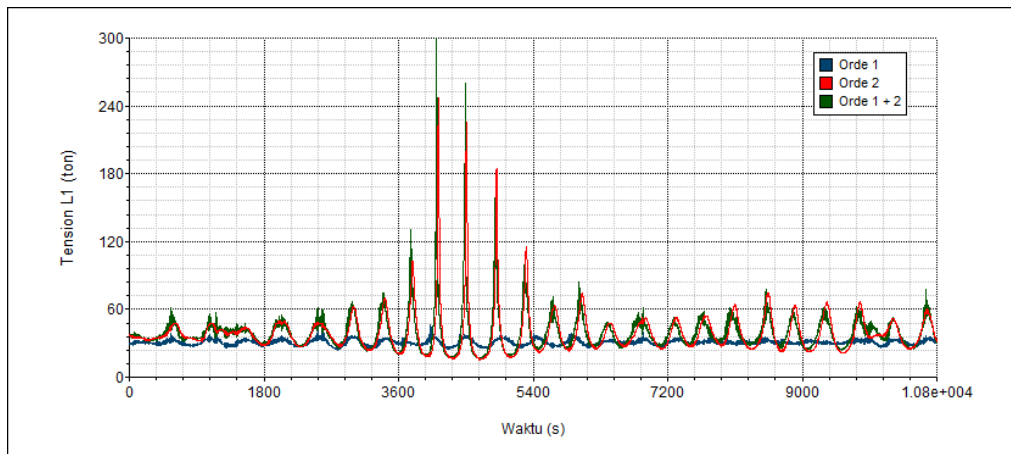
Tabel 4-22 Signifikasi pengaruh gaya orde-2 terhadap responstruktur tertambat

Arah gaya	Respon	Pengaruh gaya orde-2
	<i>Surge</i>	Signifikan
	<i>Sway</i>	Tidak Signifikan
	<i>Heave</i>	Tidak Signifikan
	<i>Roll</i>	Tidak Signifikan
	<i>Pitch</i>	Tidak Signifikan
	<i>Yaw</i>	Tidak Signifikan

4.4.3 Analisis Tension Tali Tambat

Tension tali tambat yang berada di depan struktur apung, L1 dan L2 memiliki tension yang paling tinggi jika dibandingkan dengan keempat tali tambat lainnya (*inline*). Sehingga diambil salah satu dari keduanya, L1 yang dibahas dalam sub bab ini, sedangkan keenam tali tambat lainnya ditampilkan pada bagian lampiran.

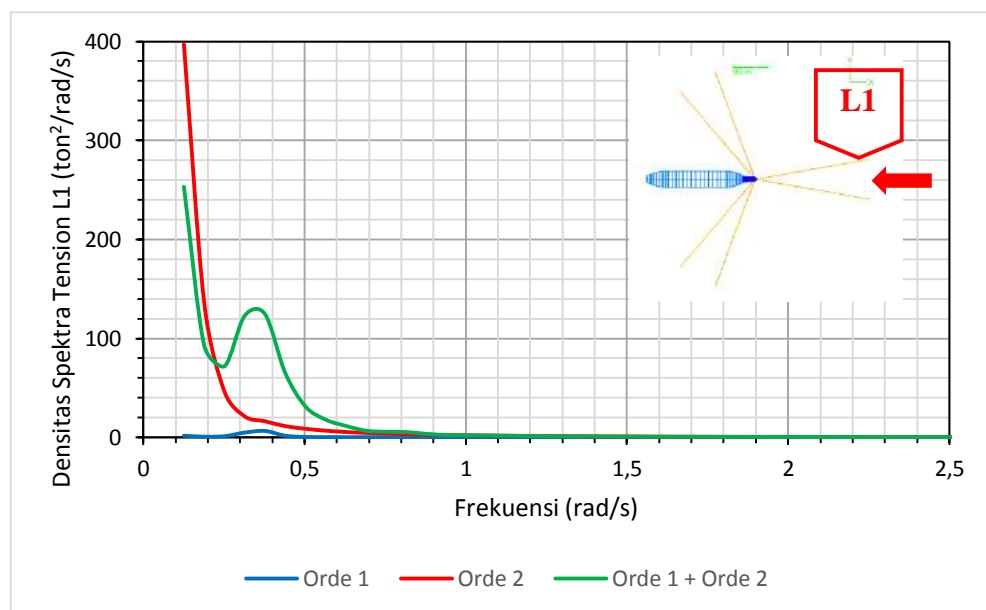
Tension tali tambat L1 pada sistem *external turret mooring* ditunjukkan pada Gambar 4-41. Berdasarkan gambar tersebut terlihat pengaruh gaya gelombang orde-2 cukup signifikan terhadap kenaikan tension L1. Tension L1 akibat pengaruh gaya gelombang orde-1 (ditunjukkan dengan garis warna biru) memiliki harga sekitar 50 ton pada puncaknya, sedangkan tension akibat pengaruh orde-2 (ditunjukkan dengan garis warna merah) memiliki harga sekitar 250 ton. Jika ditinjau *double amplitudanya* tension akibat gaya orde-1 menghasilkan sekitar 15 ton, sedangkan akibat gaya orde-2 sekitar 235 ton, sehingga memiliki beda sekitar 15 kali lipat lebih besar dibandingkan dengan akibat gaya orde-1.



Gambar 4-41 Rekam tension tali tambat, L1 selama 10800 detik, dengan $H_s = 10$ m

Jika tension tersebut ditinjau dalam domain frekuensi akan menghasilkan spektra respon seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-42. Berdasarkan gambar tersebut ditunjukkan bahwa tension yang diakibatkan oleh gaya gelombang orde-2 (warna merah) memiliki puncak pada frekuensi rendah, yaitu sekitar 0,13 rad/s dengan spektra tension mencapai $397 \text{ ton}^2/\text{rad/s}$ kemudian bergerak turun seiring

dengan bertambahnya frekuensi gelombang. Tension yang diakibatkan oleh gaya gelombang orde-1 (warna biru) memiliki puncak pada frekuensi gelombang sekitar 0,40 rad/s dengan spektra tension mencapai 16 ton²/rad/s. Tension yang diakibatkan oleh gaya kombinasi (warna kuning) memiliki dua puncak, puncak pertama terdapat pada frekuensi sekitar 0,13 rad/s akibat dari gaya gelombang orde-2, dan puncak kedua terdapat pada frekuensi sekitar 0,40 rad/s akibat dari gaya gelombang orde-1.



Gambar 4-42 Densitas spektra tension tali tambat, L1

4.5 ANALISIS KARAKTERISTIK GAYA, RESPON GERAK DAN TENSION TALI TAMBAT TERHADAP KENAIKAN TINGGI GELOMBANG

Bagian ini menjelaskan karakteristik gaya, respon gerak struktur apung dan tension tali tambat terhadap variasi kenaikan tinggi gelombang. Tinggi gelombang signifikan (H_s) divariasikan dari 1 s.d. 10 meter. Analisis ini dilakukan guna mengetahui pengaruh gaya gelombang, baik itu gaya gelombang orde-1 maupun 2 terhadap kenaikan tinggi gelombang. Hasil berupa gaya, respon gerak maupun tension tali tambat didapatkan dari analisis dinamis *time domain* 'coupled' dengan durasi perhitungan selama 10800 detik. Berdasarkan analisis tersebut didapatkan

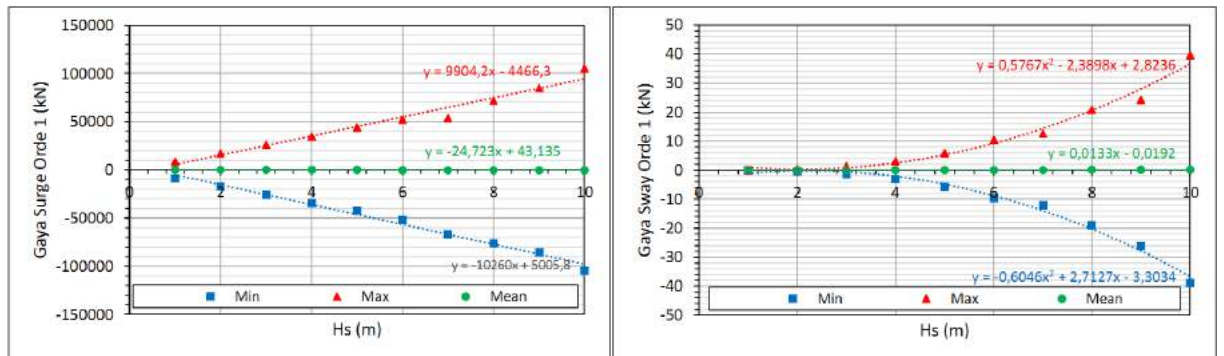
rekam amplitudo gaya, respon dan tension tali tambat dalam fungsi waktu, kemudian diambil harga-harga statistik : maksimum, mean dan minimum untuk ditinjau karakteristiknya terhadap kenaikan tinggi gelombang.

4.5.1 Pengaruh Gaya Gelombang Orde-1

4.5.1.1 Karakteristik Gaya dan Momen

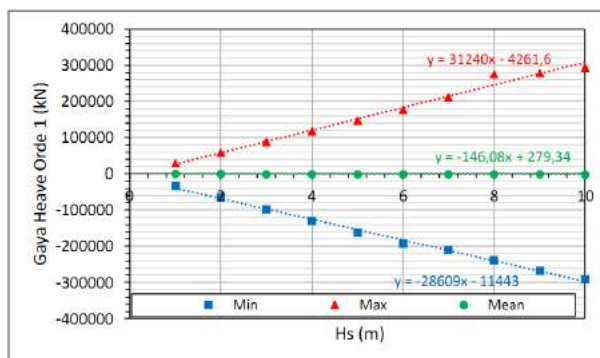
Karakteristik gaya dan momen pada struktur apung yang meliputi gaya *surge*, *sway* dan *heave* beserta momen *roll*, *pitch* dan *yaw* ditunjukkan pada Gambar 4-43. Berdasarkan gambar tersebut terdapat 6 grafik karakteristik gaya dan momen struktur apung yang diakibatkan oleh gaya gelombang orde-1, masing-masing adalah gaya *surge* (a), gaya *sway* (b), gaya *heave* (c), momen *roll* (d), momen *pitch* (e) dan momen *yaw* (f). Garis berwarna merah menunjukkan harga amplitudo maksimum (puncak), garis kuning menunjukkan harga amplitudo rata-rata (mean) dan garis biru menunjukkan harga amplitudo minimum (lembah).

Meninjau Gambar 4-43 terlihat bahwa grafik gaya maupun momen yang bekerja pada struktur apung, hampir semua gaya dan momennya cenderung bergerak linier terhadap kenaikan tinggi gelombang, kecuali pada gaya *sway*, momen *roll* dan *yaw* yang bergerak non-linier kuadratik. Meninjau pada Gambar 4-43 (a), gaya *surge*, setiap kenaikan 1.00 m tinggi gelombang, gaya *surge* naik menjadi sekitar 1,50 kali lipat dari ketinggian awalnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa karakteristik gaya dan momen pada struktur apung akibat pengaruh gaya gelombang orde-1 proporsional terhadap tinggi gelombang.

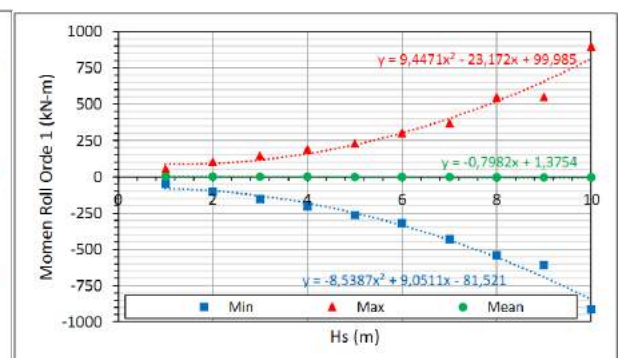


(a)

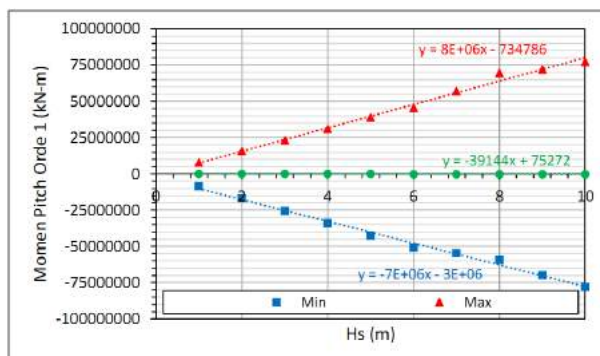
(b)



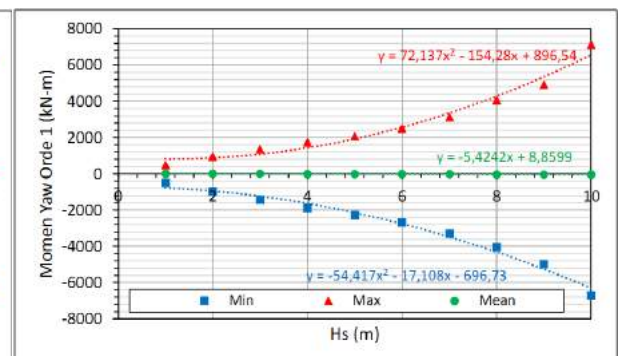
(c)



(d)



(e)



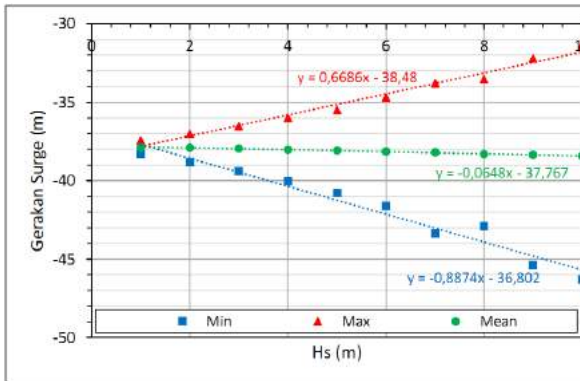
(f)

Gambar 4-43 Karakteristik gaya dan momen struktur apung orde-1 terhadap tinggi gelombang, H_s , terdiri dari gaya : *surge* (a), *sway* (b), *heave* (c) dan momen : *roll* (d), *pitch* (e), *yaw* (f)

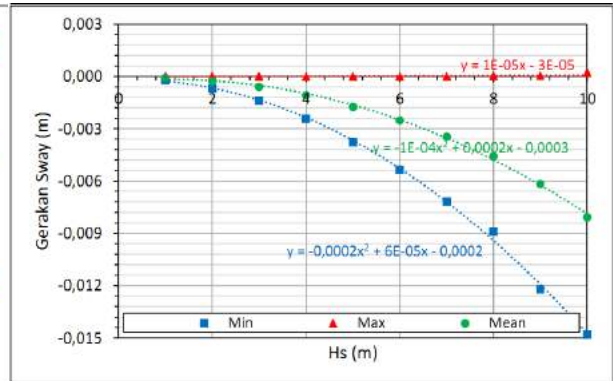
4.5.1.2 Karakteristik Respon Gerak

Karakteristik respon gerak struktur apung yang diakibatkan oleh pengaruh gaya gelombang orde-1, meliputi respon gerak *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* dan *yaw* ditunjukkan pada Gambar 4-44. Jika ditinjau dengan seksama terlihat bahwa hampir semua responnya, baik *surge*, *heave*, *roll* maupun *pitch* memiliki pola grafik

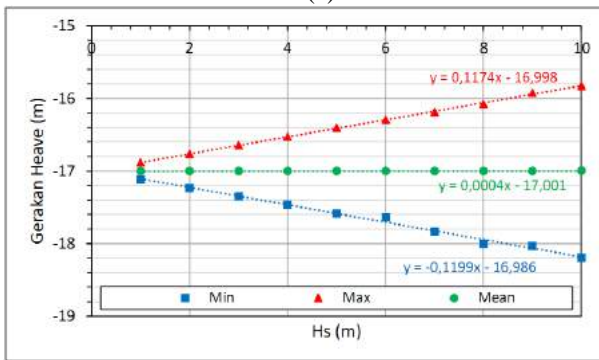
yang cenderung linier, hanya respon *sway* dan *yaw* yang memiliki pola grafik berbentuk non-linear kuadratik. Kecenderungan grafik berbentuk non-linier dapat disebabkan oleh faktor-faktor non-linier seperti gaya angin, arus dan keberadaan tali tambat, faktor-faktor tersebut dapat mempengaruhi respon gerak struktur apung.



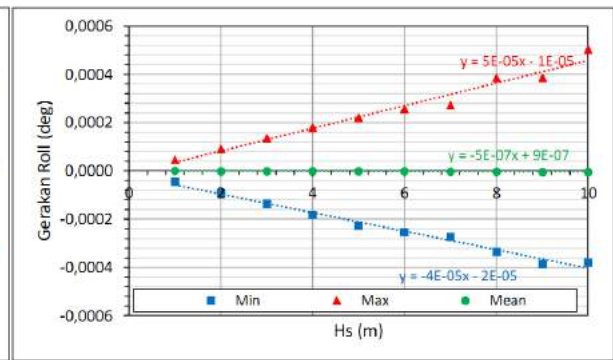
(a)



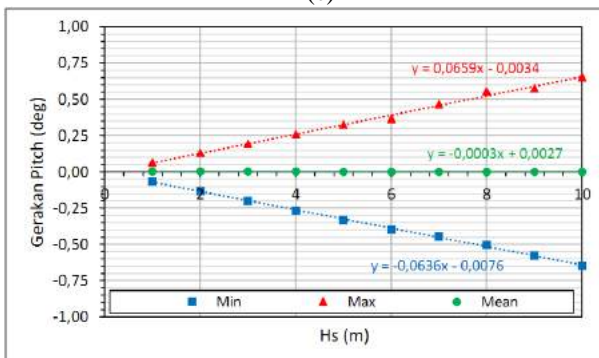
(b)



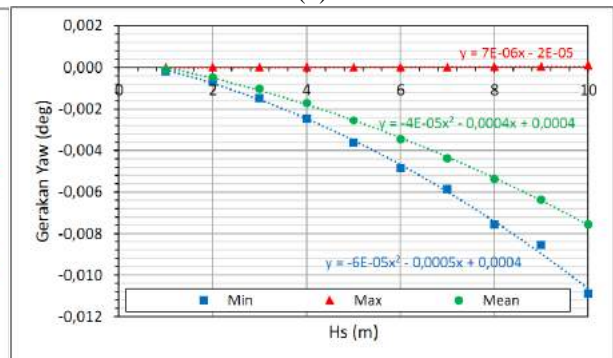
(c)



(d)



(e)

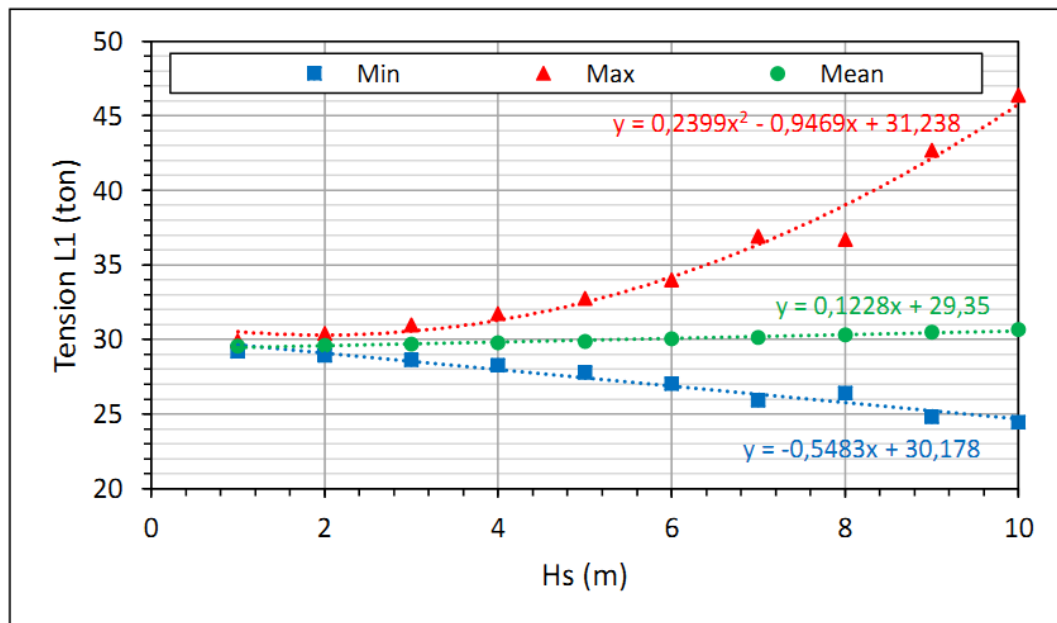


(f)

Gambar 4-44 Karakteristik respon gerak struktur apung akibat gaya orde-1 terhadap tinggi gelombang, H_s , terdiri dari gerakan : *surge* (a), *sway* (b), *heave* (c), *roll* (d), *pitch* (e), *yaw* (f)

4.5.1.3 Karakteristik Tension Tali Tambat

Karakteristik tension tali tambat, L1 yang dipengaruhi oleh gaya gelombang orde-1 dapat ditinjau pada Gambar 4-45. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa tension tali tambat L1 cenderung bergerak non-linier kuadratik terhadap kenaikan tinggi gelombangnya. Hal ini dikarenakan tali tambat itu sendiri memiliki sifat-sifat non-linier.



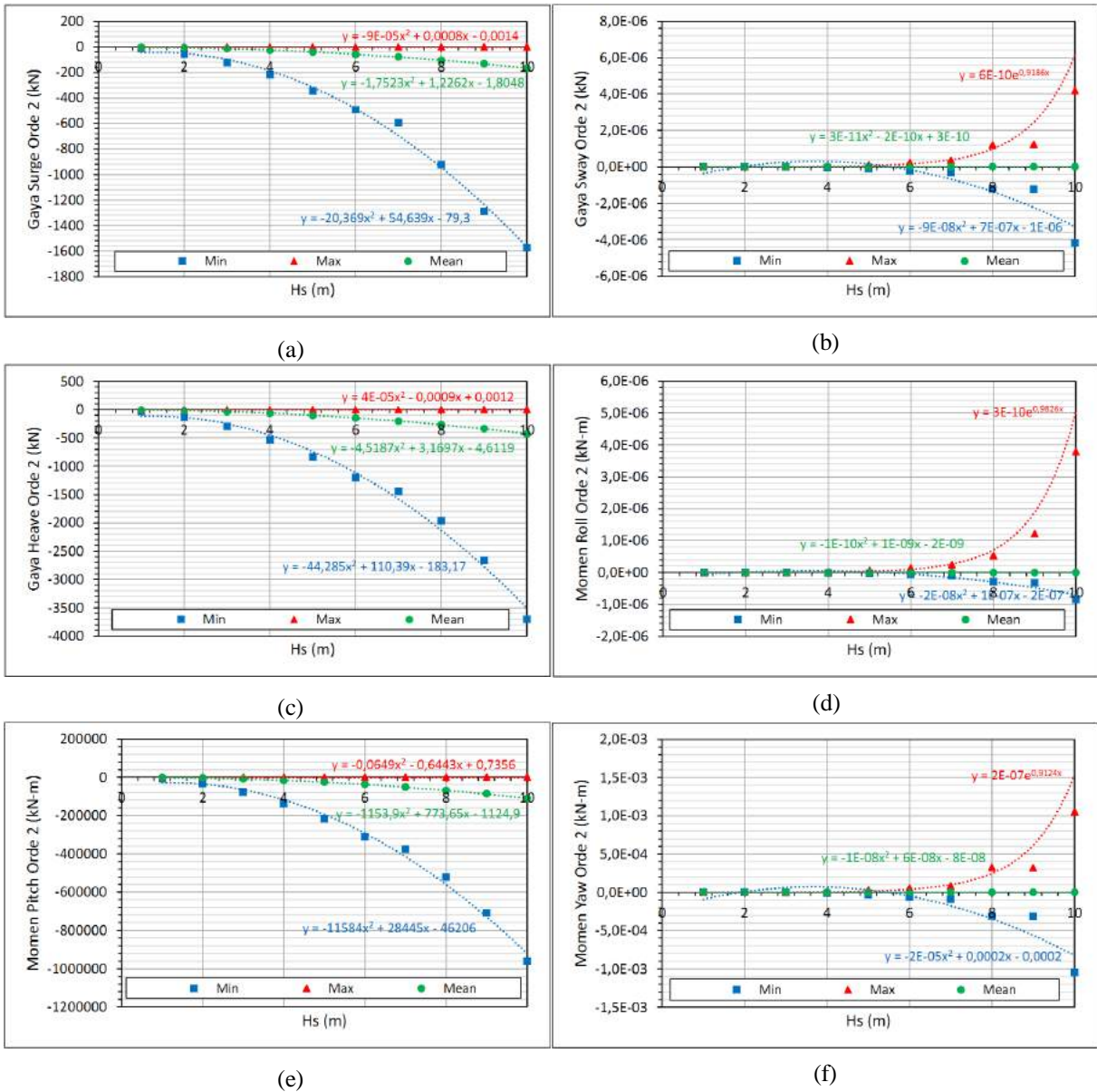
Gambar 4-45 Karakteristik tension tali tambat, L1 akibat gaya orde-1 terhadap kenaikan tinggi gelombang, Hs

4.5.2 Pengaruh Gaya Gelombang Orde-2

4.5.2.1 Karakteristik Gaya dan Momen

Karakteristik gaya dan momen struktur apung yang dipengaruhi oleh gaya gelombang orde-2 dapat dilihat pada Gambar 4-46. Meninjau gambar tersebut dapat dilihat bahwa karakteristik gaya dan momen yang meliputi gaya *surge*, *sway* dan *heave*, beserta momen *roll*, *pitch* dan *yaw* memiliki kecenderungan berbentuk non-linier kuadratik terhadap kenaikan tinggi gelombang, beberapa terlihat berbentuk kurva eksponensial pada gaya *sway*, momen *roll* dan *pitch*. Meninjau pada Gambar 4-46 (a), gaya *surge* (*mean drift*), pada saat tinggi gelombang 1 m, gaya *surge* di bawah 50 kN, saat tinggi gelombang 4 m, gaya *surge* sekitar 200 kN, saat tinggi

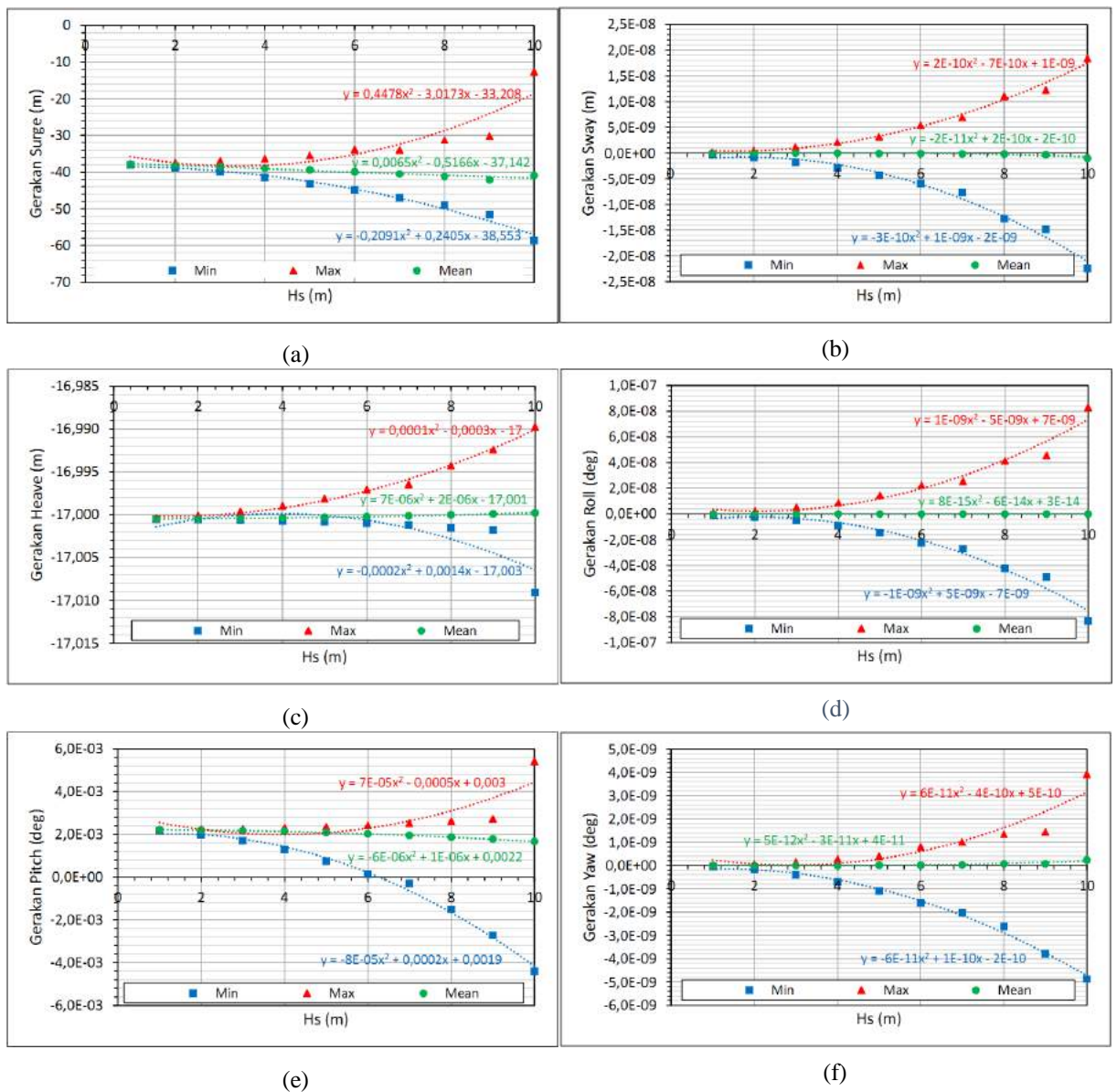
gelombang 6 m, gaya surge mencapai sekitar 500 kN, dst. Sehingga dapat disimpulkan bahwa karakteristik gaya dan momen pada struktur apung akibat pengaruh gaya gelombang orde-2 berbentuk kurva kuadratik yang proporsional terhadap nilai kuadrat tinggi gelombang.



Gambar 4-46 Karakteristik gaya dan momen struktur apung orde-2 terhadap tinggi gelombang, H_s , terdiri dari gaya : *surge* (a), *sway* (b), *heave* (c), dan momen : *roll* (d), *pitch* (e), *yaw* (f)

4.5.2.2 Karakteristik Respon Gerak

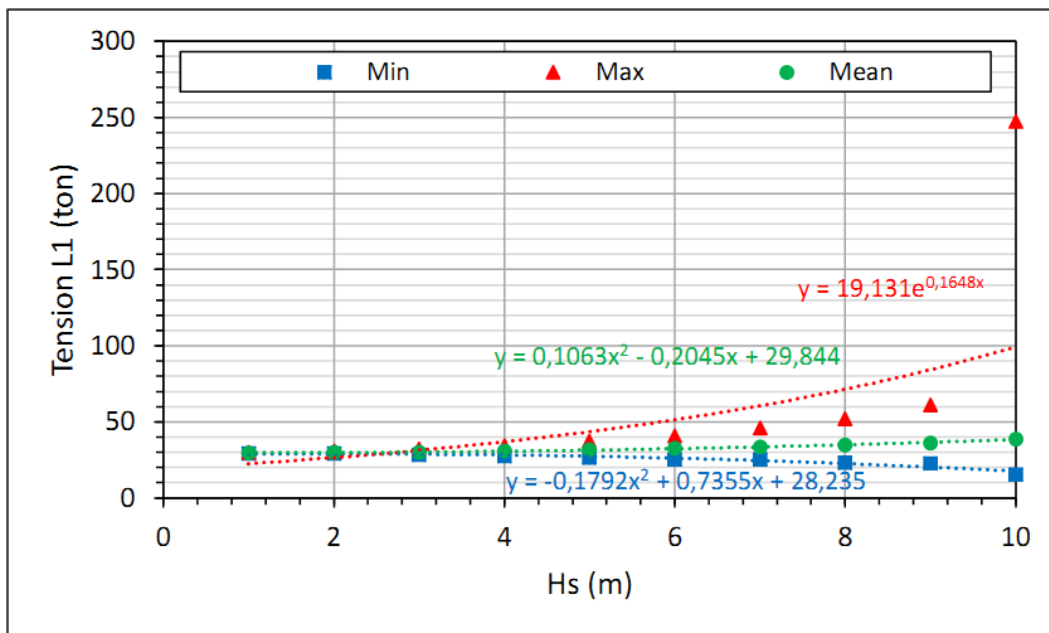
Karakteristik respon gerak struktur apung yang diakibatkan oleh pengaruh gaya gelombang orde-2 ditunjukkan pada Gambar 4-47. Meninjau gambar tersebut, terlihat bahwa karakteristik grafik respon gerak *surge* (4-47,a), *sway* (4-47,b), *heave* (4-47,c), *roll* (4-47,d), *pitch* (4-47,e) dan *yaw* (4-47,f) memiliki kecenderungan yang sama, yaitu bergerak non-linier kuadratik terhadap kenaikan tinggi gelombang.



Gambar 4-47 Karakteristik respon gerak struktur apung akibat gaya orde-2 terhadap tinggi gelombang, H_s , terdiri dari gerakan : *surge* (a), *sway* (b), *heave* (c), *roll* (d), *pitch* (e), *yaw* (f)

4.5.2.3 Karakteristik Tension Tali Tambat

Karakteristik tension tali tambat, L1 yang dipengaruhi oleh gaya gelombang orde-2 dapat ditinjau pada Gambar 4-48. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa tension tali tambat L1 cenderung bergerak eksponensial/non-linier terhadap kenaikan tinggi gelombangnya. Jika dibandingkan dengan tension tali tambat saat dipengaruhi oleh gaya gelombang orde-1, tension yang terjadi saat dikenai beban gelombang orde-2 memiliki harga yang relatif lebih tinggi sekitar 5.00 kali.



Gambar 4-48 Karakteristik tension tali tambat, L1 akibat gaya orde-2 terhadap tinggi gelombang, Hs

4.6 ANALISIS PENGARUH KEDALAMAN PERAIRAN TERHADAP RESPON STRUKTUR TERTAMBAT (SEGMENTASI : CHAIN)

Bagian ini menjelaskan pengaruh variasi kedalaman perairan air laut terhadap gaya 6 DOF, respon struktur apung 6 DOF dan tension tali tambat yang terbentuk. Variasi kedalaman perairan yang digunakan terdiri dari perairan dangkal, menengah dan dalam (dapat dilihat pada Tabel 4-22). Segmentasi tali tambat yang digunakan untuk semua variasi kedalaman perairan adalah *chain*, sebagai asumsi pertama, pada bagian selanjutnya akan dijelaskan jika segmentasi tali tambatnya disesuaikan dengan kondisi kedalamannya (*chain-wire rope-chain*). Hal ini

dimaksudkan untuk melihat pengaruh kedalaman terhadap respon struktur, terutama di bagian orde-2 tanpa dipengaruhi oleh material tali tambat yang berbeda-beda.

Konfigurasi variasi kedalaman perairan dan tali tambat yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4-23 dan 4-24 berikut.

A. Variasi Kedalaman Perairan

Tabel 4-23 Variasi kedalaman perairan yang ditinjau dalam penelitian ini

Model B-I	Model B-II	Model B-III
Perairan dangkal (100 m)	Perairan menengah (300 m)	Perairan dalam (500 m)

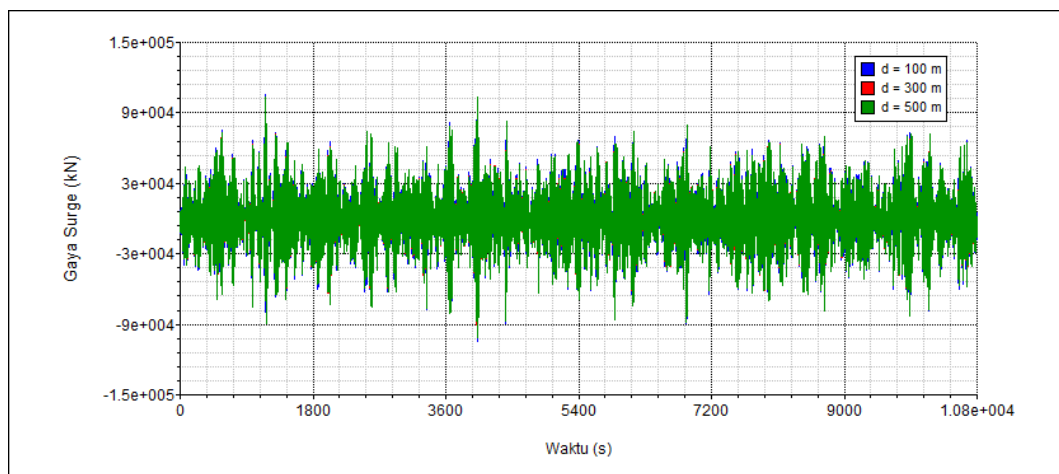
B. Segmentasi Tali Tambat

Tabel 4-24 Segmentasi tali tambat dengan menggunakan material chain

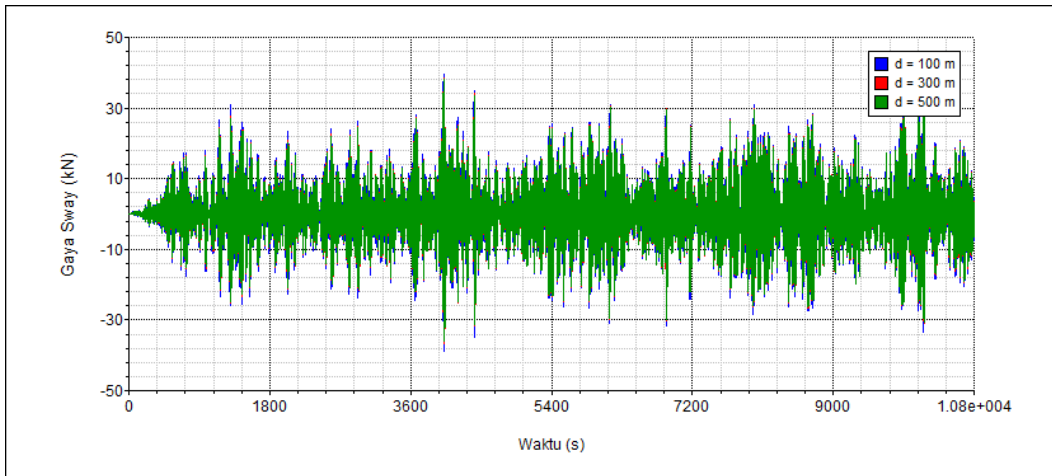
Model	Perairan dangkal (100 m)	Perairan menengah (300 m)	Perairan dalam (500 m)
Kombinasi tali tambat (fairlead – anchor)	<i>Chain</i>	<i>Chain</i>	<i>Chain</i>
Panjang tali (m)	345	1035	1725

4.6.1 Gaya dan Momen 6 DOF Orde-1 (*wave load RAO*)

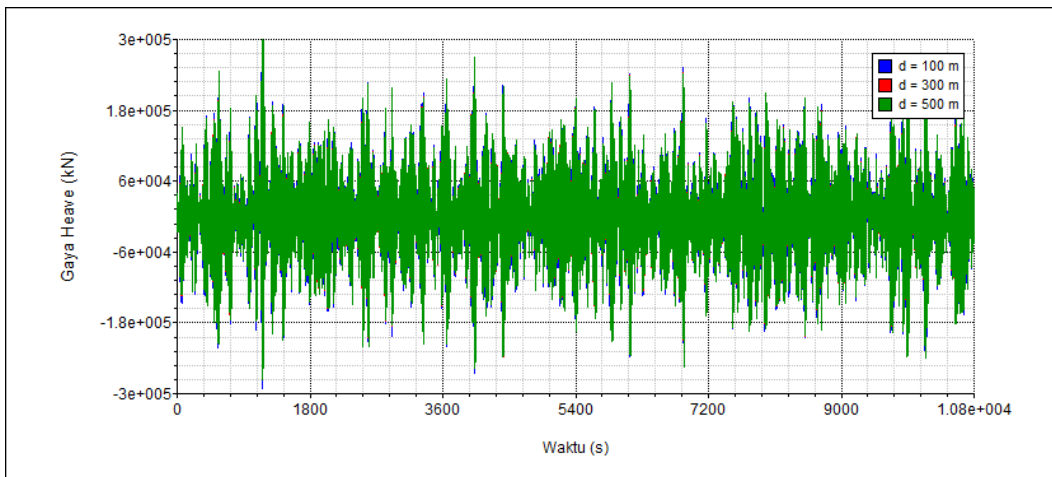
Gaya dan momen 6 DOF orde-1 yang terbentuk akibat beban gelombang orde-1 (*wave load RAO*) ditunjukkan pada Gambar 4-49 s.d. 4-54 berikut ini.



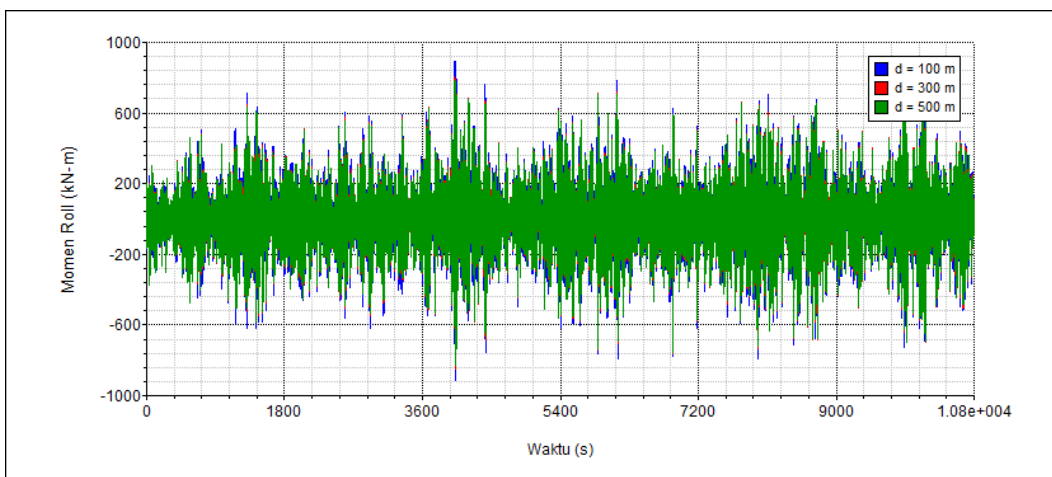
Gambar 4-49 Gaya surge orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)



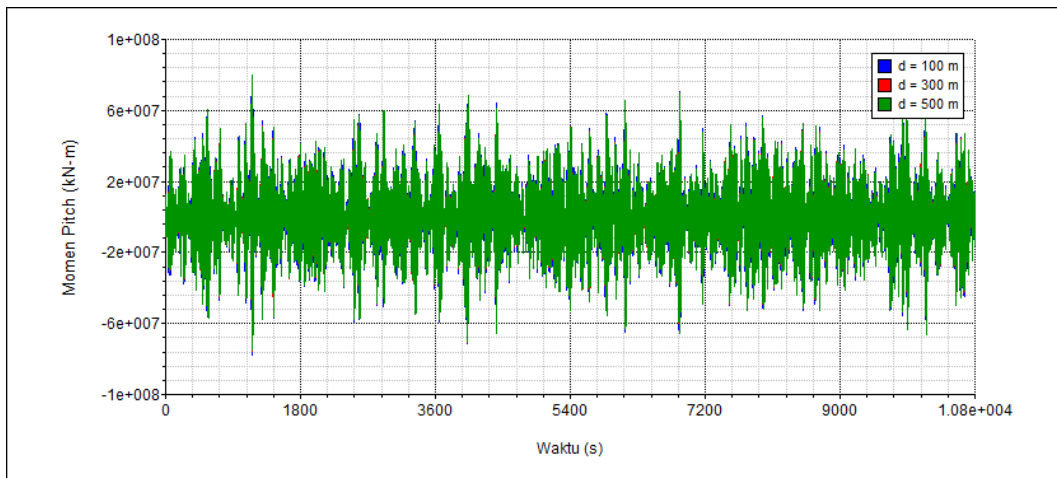
Gambar 4-50 Gaya sway orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)



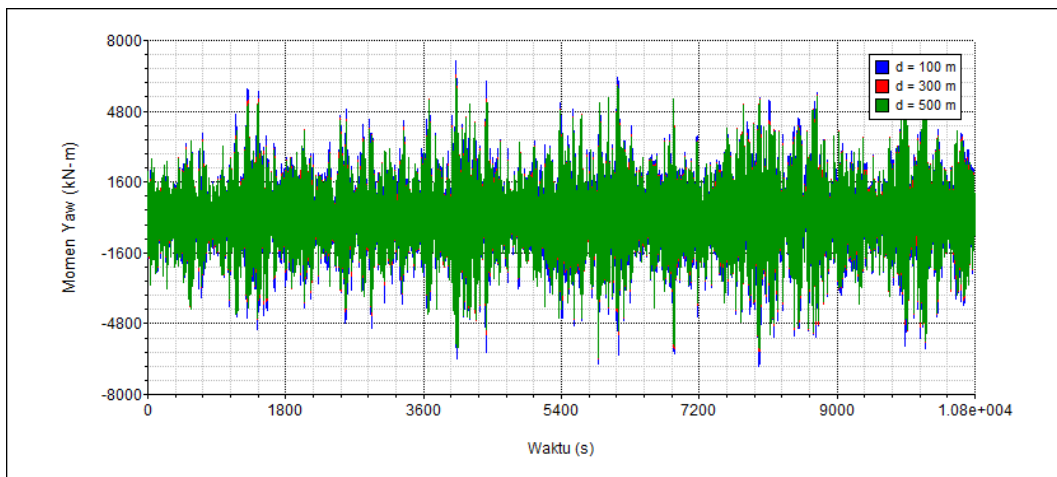
Gambar 4-51 Gaya heave orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)



Gambar 4-52 Momen Roll orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain)



Gambar 4-53 Momen Pitch orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)



Gambar 4-54 Momen Yaw orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)

Gambar 4-49 s.d. 4-51 menunjukkan rekam gaya *surge*, *sway* dan *heave* orde-1 struktur apung (tanker) dalam fungsi waktu dengan periode waktu selama 3 jam (10800 detik). Sedangkan Gambar 4-52 s.d. 4-54 menunjukkan rekam momen *roll*, *pitch* dan *yaw* orde-1. Garis dengan warna biru menunjukkan gaya/momen pada kedalaman perairan dangkal ($d = 100 \text{ m}$), garis merah menunjukkan operasinya pada kedalaman perairan menengah ($d = 300 \text{ m}$) dan garis hijau menunjukkan operasinya pada kedalaman perairan dalam ($d = 500 \text{ m}$).

Meninjau Gambar 4-49 s.d. 4-54 dapat disimpulkan bahwa gaya maupun momen orde-1 yang terpengaruh dengan kondisi lingkungan berasal dari arah *headseas* (*heading 180°*) adalah gaya *surge*, *heave* dan momen *pitch*. Sedangkan

gaya *sway*, momen *roll* dan *yaw* memiliki intensitas yang cukup kecil dikarenakan arahnya tidak searah dengan datangnya beban lingkungan.

Jika diperhatikan dengan seksama, baik gaya dan momen orde-1 pada kedalaman perairan yang berbeda-beda memiliki intensitas yang relatif sama. Hal ini menunjukkan bahwa variasi kedalaman perairan tidak berpengaruh signifikan terhadap gaya maupun momen 6 DOF struktur apung.

4.6.2 Respon Gerak 6 DOF akibat Gaya Orde-1 (Segmentasi *Chain*)

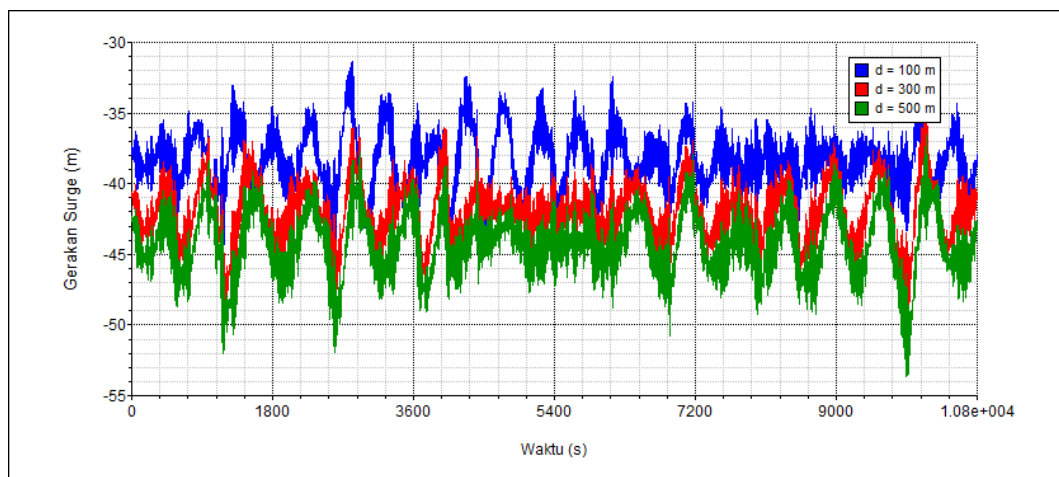
Respon gerak tanker dalam 6 DOF akibat gaya gelombang orde-1 ditunjukkan pada Gambar 4-55 s.d. Gambar 4-60. Perlu diperhatikan bahwa yang dimaksud dengan istilah respon 6 DOF akibat gaya gelombang orde-1 adalah sistem tertambat disimulasikan dengan pembebanan akibat gaya gelombang, arus dan angin dengan memperhatikan pengaruh gaya gelombang orde-1 terhadap respon, sedangkan pengaruh gaya gelombang orde-2 diabaikan. Berikut merupakan respon gerak tanker 6 DOF akibat pengaruh gaya orde-1 dalam fungsi waktu (10800 detik).

4.6.2.1 Respon *Surge* Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain*)

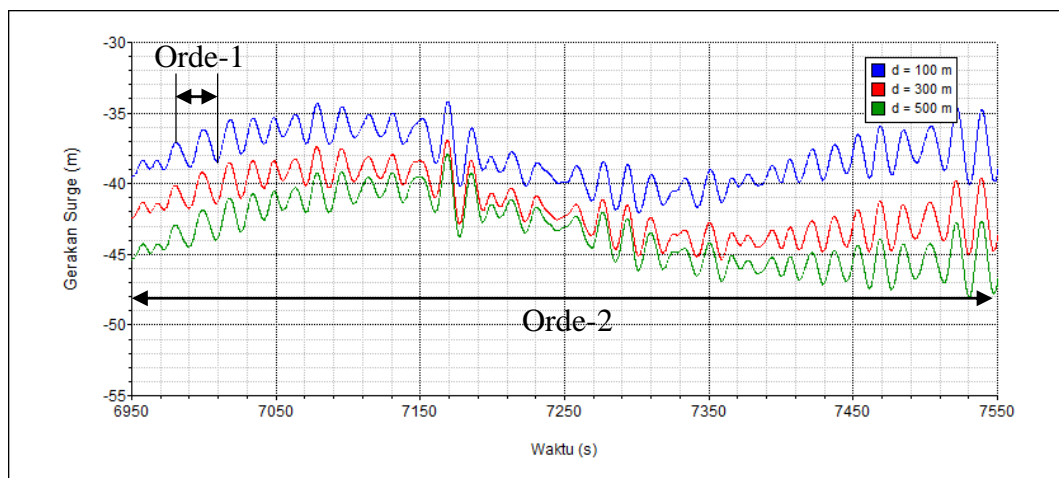
Respon *surge* akibat gaya orde-1 pada tiap-tiap kedalaman 100, 300 dan 500 meter ditunjukkan pada Gambar 4-55. Berdasarkan gambar tersebut garis biru menunjukkan respon *surge* pada kedalaman 100 m, garis merah menunjukkan respon *surge* pada kedalaman 300 m dan garis hijau menunjukkan respon *surge* pada kedalaman 500 m.

Meninjau Gambar 4-55a terlihat bahwa meskipun sistem tertambat dikenai pengaruh gaya orde-1, namun respon yang ditimbulkan terdiri dari respon orde-1 dan respon orde-2. Hal ini disebabkan karena kapal terseret (*drifting*, respon orde-2) berlawanan dengan arah datang gayanya kemudian dikembalikan pada kondisi equilibriumnya oleh gaya pengembali dari sistem tali tambat. Sehingga selain kapal berosilasi dengan gerakan gelombang orde-1 yang menimbulkan respon orde-1, kapal tersebut juga terseret dengan simpangan yang lebih panjang, menghasilkan respon orde-2. Untuk meninjau respon orde-1 dan 2 dengan lebih jelas, Gambar 4-

55a diperbesar (*zoom in*) beberapa kali hingga mendapatkan tangkapan satu periode gelombang dari reapon orde-2, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4-55b berikut ini.



(a)



(b)

Gambar 4-55 Respon surge akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (a) Respon ditinjau pada detik ke-6950 s.d. 7550 detik (b) (*segmentasi chain*)

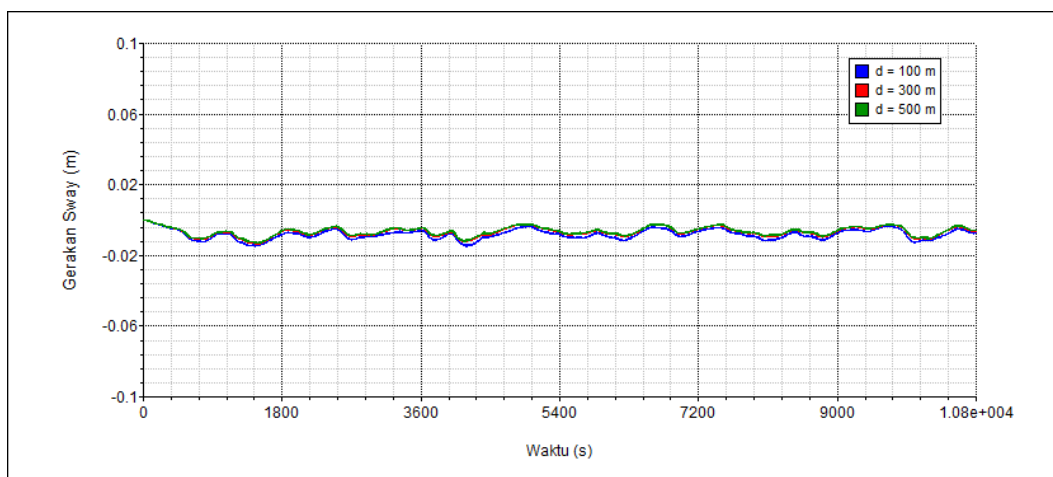
Berdasarkan Gambar 4-55b terlihat respon gerakan *surge* yang ditinjau pada periode 6950 s.d. 7550 detik. Pada rentang waktu tersebut, respon *surge* orde-1 pada kedalaman 100 m memiliki periode yang relatif pendek, sekitar 25 detik dengan amplitudo sebesar 2,00 m. Sedangkan respon surge orde-2 pada kedalaman

yang sama memiliki periode sekitar 600 detik dengan amplitudo sebesar 5,00 m. Dengan meninjau Gambar 4-54 akan didapatkan kesimpulan bahwa semakin dalam kondisi perairan akan menyebabkan respon *surge* yang semakin besar. Salah satu faktor yang mempengaruhi fenomena tersebut adalah semakin besar kedalaman maka tali tambat yang diperlukan juga akan semakin panjang. Jika melihat harga rata-rata respon *surge* orde-1 pada masing-masing kedalaman (amplitudo *surge* pada kedalaman 100 : 300 : 500 m adalah 39 : 43 : 46 m) akan didapatkan kenaikan sekitar 10,00%.

4.6.2.2 Respon Sway Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain*)

Respon kapal untuk gerakan *sway* dapat dilihat pada Gambar 4-56. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa respon *sway* memiliki harga yang mendekati nol, karena arah respon dan gaya yang bekerja (*headseas*) tidak berada dalam satu arah.

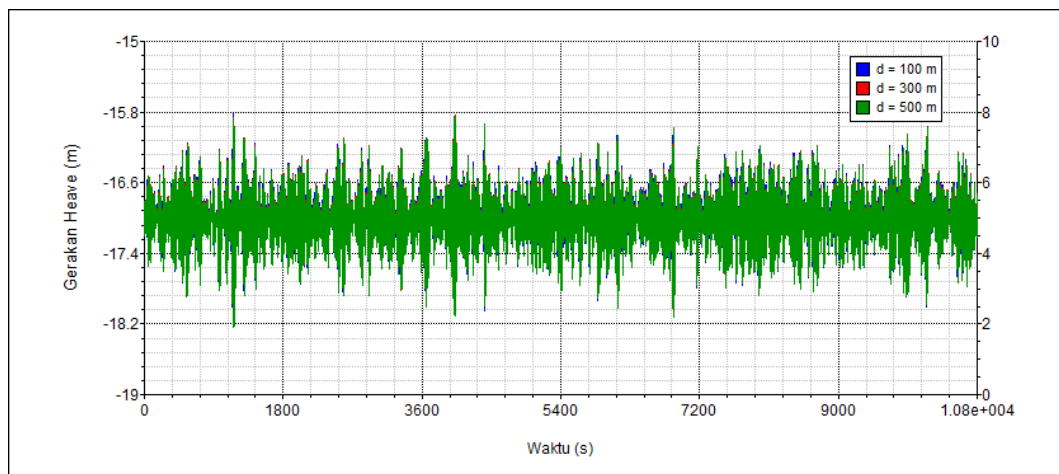
Jika diperhatikan dengan seksama, periode respon *sway* termasuk dalam kategori periode panjang. Hal ini dikarenakan respon *sway* termasuk salah satu gerakan horisontal yang pada umumnya akan terseret (*drifting*) jika dikenai beban horisontal.



Gambar 4-56 Respon sway akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi *chain*)

4.6.2.3 Respon *Heave* Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain*)

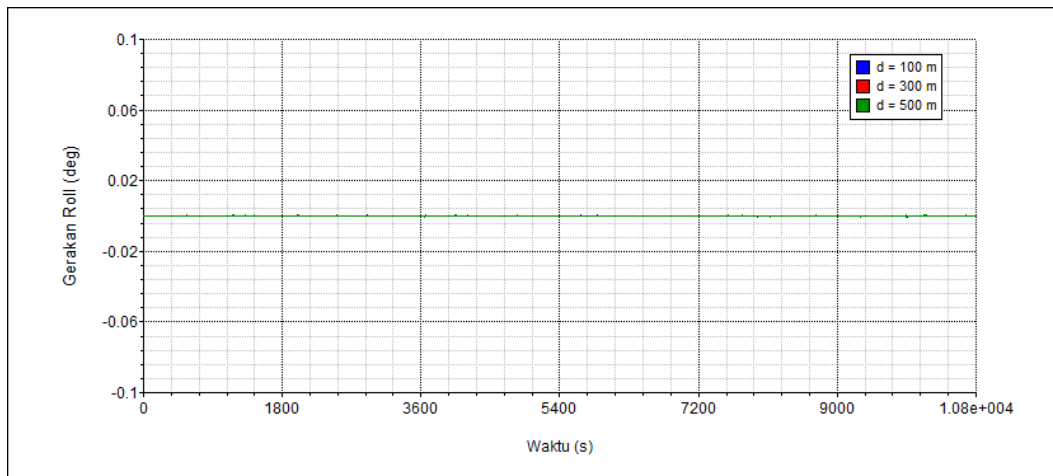
Respon *heave* akibat gaya orde-1 dapat dilihat pada Gambar 4-57. Meninjau gambar tersebut terlihat bahwa respon *heave* terdiri dari respon orde-1 saja dan tidak memiliki respon orde-2. Respon *heave* hanya terpengaruh oleh osilasi gaya gelombang orde-1 (*wave frequency load*). Jika dilihat berdasarkan variasi kedalaman perairannya, respon *heave* cenderung memiliki harga yang relatif sama. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kedalaman perairan tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada respon *heave*. Berdasarkan gambar tersebut, respon *heave* memiliki amplitudo sekitar 1,20 m baik pada kedalaman 100, 300 maupun 500 m.



Gambar 4-57 Respon *heave* akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi *chain*)

4.6.2.4 Respon *Roll* Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain*)

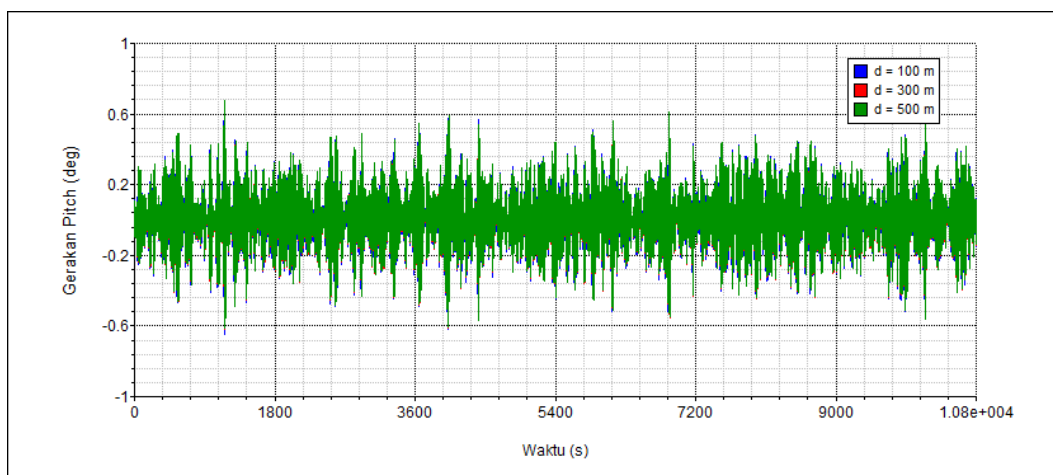
Respon tanker untuk gerakan *roll* memiliki harga mendekati nol sebagaimana yang terlihat pada Gambar 4-58. Hal ini disebabkan karena gerakan *roll* tidak searah dengan arah datangnya gaya lingkungan.



Gambar 4-58 Respon roll akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)

4.6.2.5 Respon *Pitch* Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (*Segmentasi Chain*)

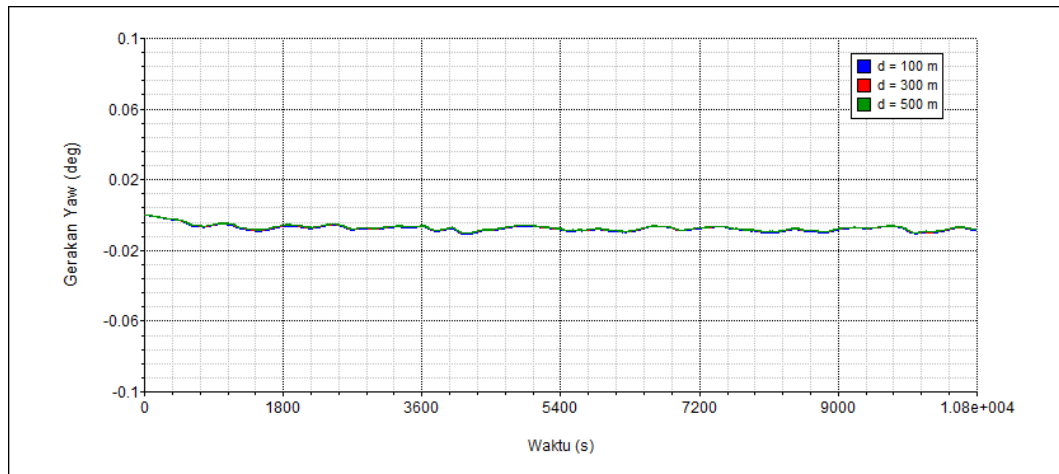
Respon *pitch* akibat gaya orde-1 hanya memiliki satu jenis respon, yaitu respon orde-1 dengan periode pendek, sama halnya yang dijumpai pada respon gerakan vertikal lainnya (*heave* dan *roll*). Begitu juga yang dijumpai pada gerakan *heave* dan *roll*, variasi kedalaman perairan tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada respon gerak *pitch*. Berdasarkan Gambar 4-59 terlihat bahwa respon *pitch* tanker memiliki amplitudo sekitar 0,70 deg pada variasi kedalaman perairan yang berbeda-beda.



Gambar 4-59 Respon pitch akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)

4.6.2.6 Respon *Yaw* Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain*)

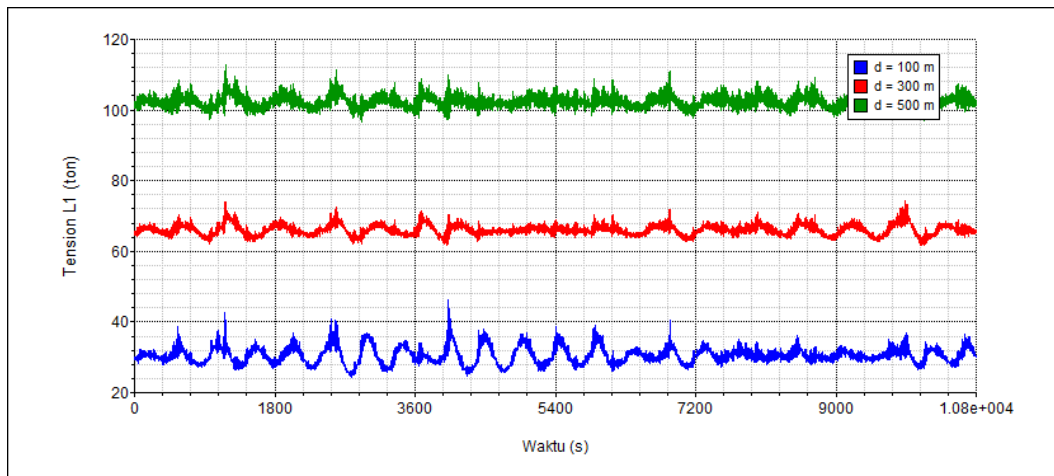
Respon *yaw* yang ditunjukkan pada Gambar 4-60 memiliki harga yang mendekati nol, karena arah gerakannya tidak searah dengan arah datangnya gaya lingkungan, seperti halnya gerakan *sway* dan *roll* yang telah dibahas sebelumnya.



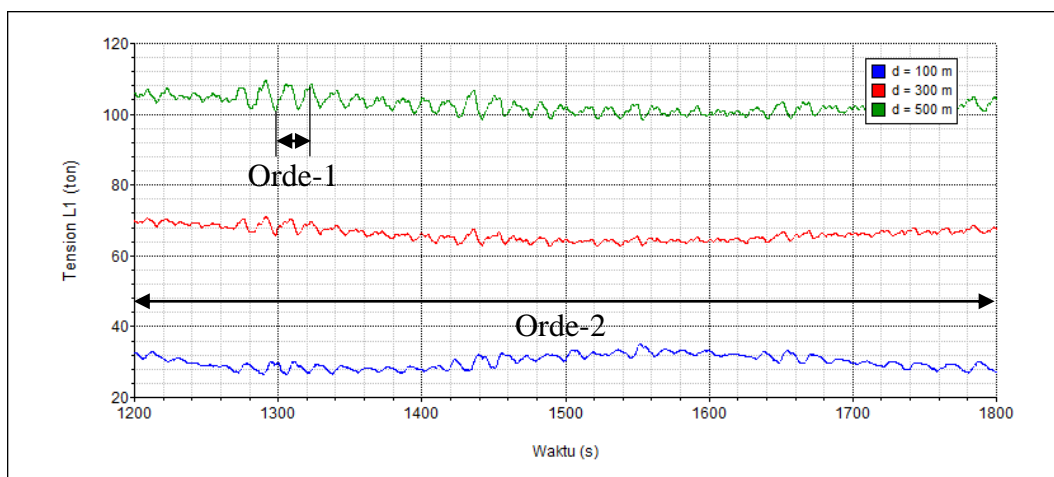
Gambar 4-60 Respon yaw akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi *chain*)

4.6.3 Tension Tali Tambat Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain*)

Tali tambat yang ditinjau pada bagian ini merupakan tali tambat yang berhadapan langsung dengan gaya lingkungan (L1). Tension L1 disajikan dalam fungsi waktu selama 3 jam (10800 detik) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-61a dan 4-61b berikut ini.



(a)



(b)

Gambar 4-61 Tension tali tambat L1 akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (a) tension L1 jika ditinjau pada detik ke-1200 s.d. 1800 (b) (**segmentasi chain**)

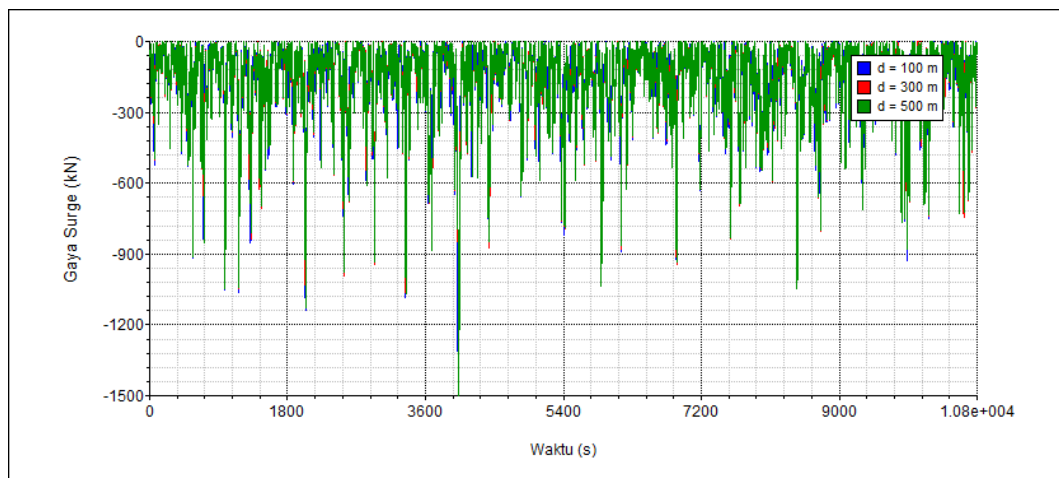
Berdasarkan Gambar 4-61b dapat dilihat bahwa tension orde-1 pada kedalaman perairan 500 m memiliki periode sekitar 20 detik dengan amplitude tension sebesar 4 ton, pada rata-rata tension sebesar 104 ton. Sedangkan tension orde-2 pada kedalaman yang sama memiliki periode tension sebesar 600 detik dengan amplitudo tension mencapai 8 ton.

Jika ditinjau berdasarkan variasi kedalaman perairan dengan gaya orde-1 yang dipertimbangkan terlihat bahwa semakin dalam kondisi perairan maka semakin besar tension pada tali tambat yang dihasilkan. Setiap penambahan

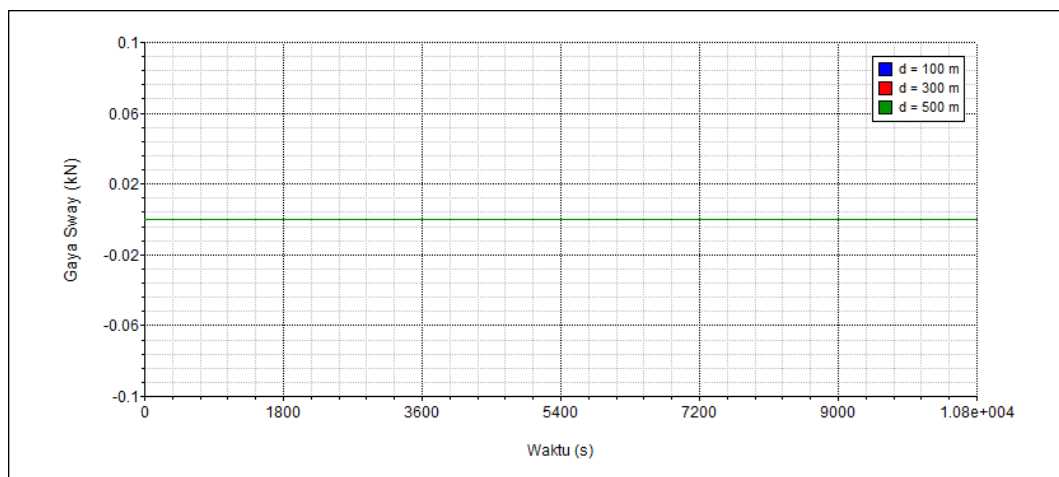
kedalaman sebesar 200 m, terjadi kenaikan tension tali tambat sebesar 126% atau 2,67 kali lebih besar dari tension tinjauan mula-mula.

4.6.4 Gaya dan Momen 6 DOF Orde-2 (*wave drift load*) (Segmentasi *Chain*)

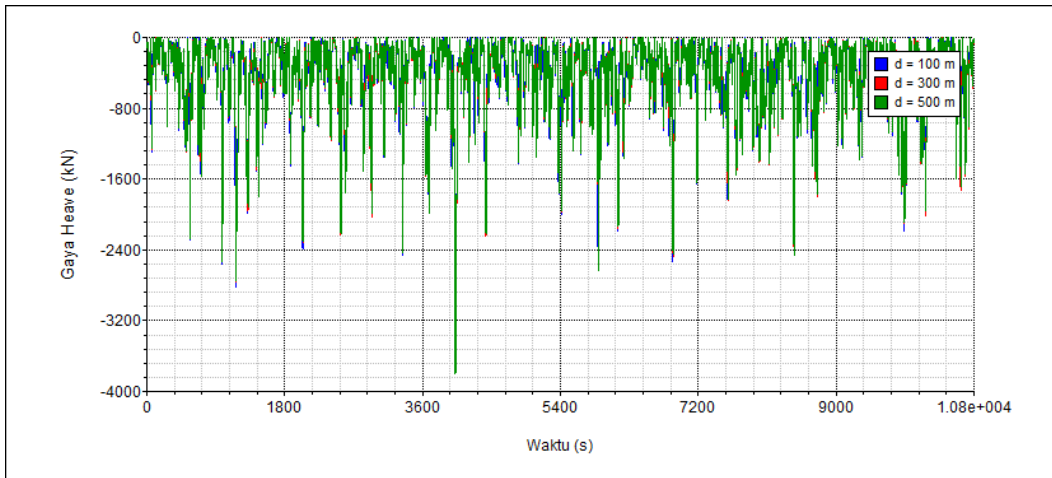
Gaya dan momen orde-2 yang terbentuk dari hasil pengintegralan langsung komponen orde-2 pada tekanan Bernoulli atau yang disebut dengan gaya *wave drift force* ditunjukkan pada Gambar 4-62 s.d. Gambar 4-67 berikut ini.



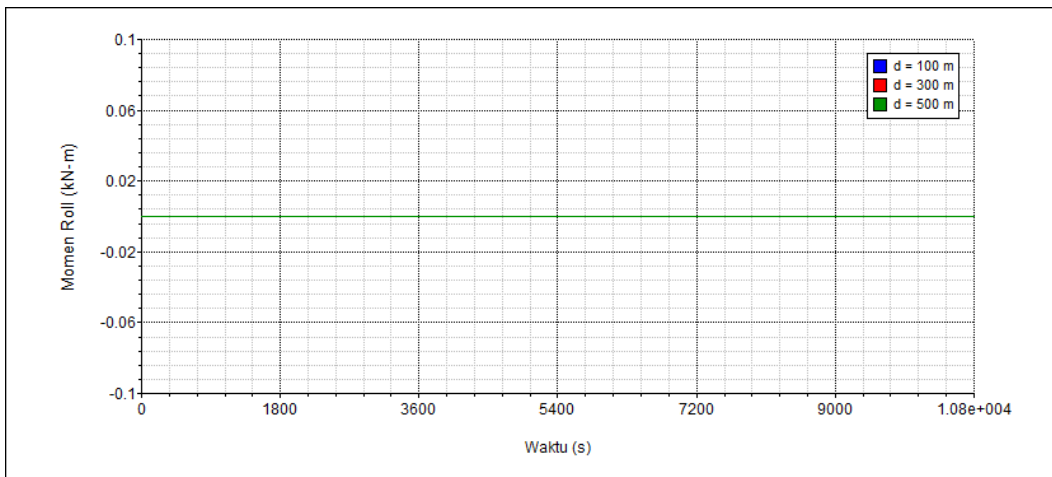
Gambar 4-62 Gaya surge orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi *chain*)



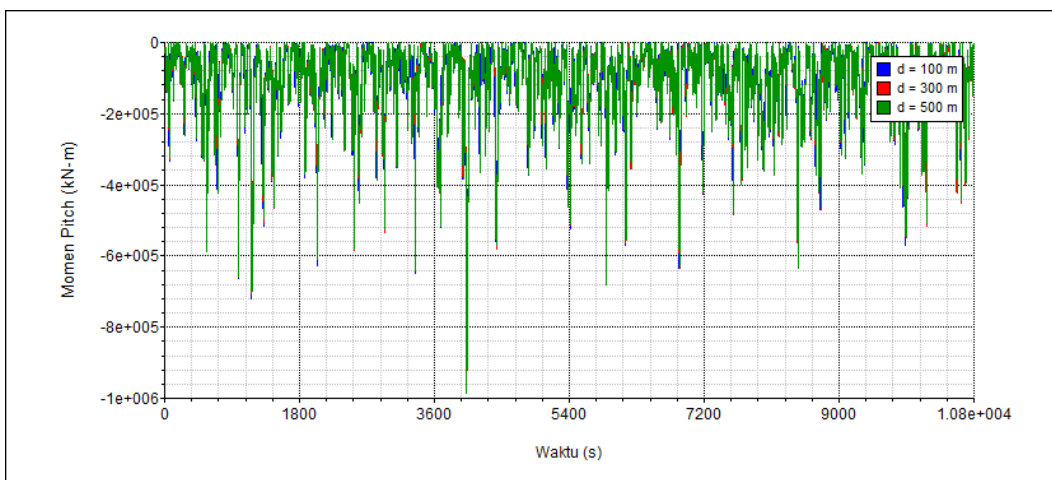
Gambar 4-63 Gaya sway orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi *chain*)



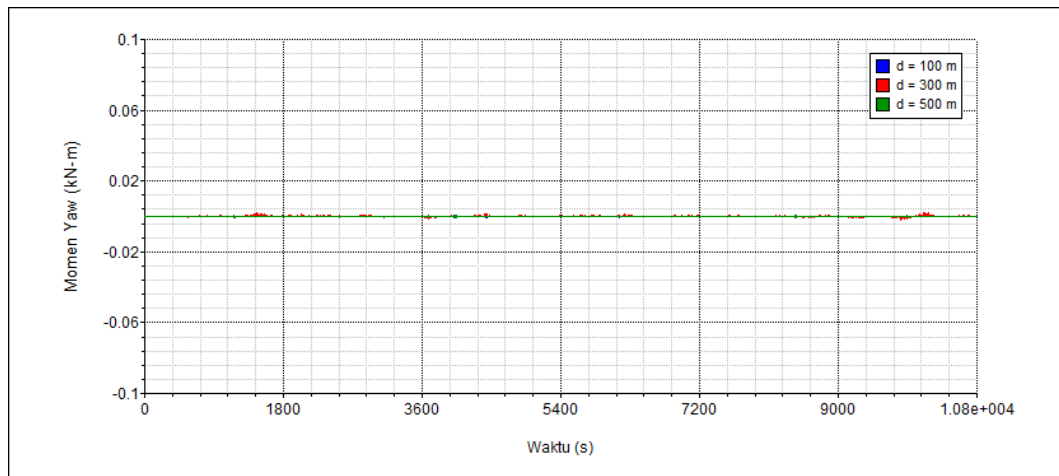
Gambar 4-64 Gaya heave orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)



Gambar 4-65 Momen roll orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)



Gambar 4-66 Momen pitch orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)



Gambar 4-67 Momen yaw orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)

Gambar 4-62 s.d. 4-64 menunjukkan rekam gaya *wave drift surge*, *sway* dan *heave* struktur apung (tanker) dalam fungsi waktu dengan periode waktu selama 3 jam (10800 detik). Sedangkan Gambar 4-65 s.d. 4-67 menunjukkan rekam momen *wave drift roll*, *pitch* dan *yaw*. Garis dengan warna biru menunjukkan gaya/momen pada kedalaman perairan dangkal ($d = 100 \text{ m}$), garis merah menunjukkan operasinya pada kedalaman perairan menengah ($d = 300 \text{ m}$) dan garis hijau menunjukkan operasinya pada kedalaman perairan dalam ($d = 500 \text{ m}$).

Meninjau Gambar 4-62 s.d. 4-67 dapat disimpulkan bahwa gaya maupun momen *wave drift* yang terpengaruh dengan kondisi lingkungan berasal dari arah *headseas* (*heading* 180°) adalah gaya *surge*, *heave* dan momen *pitch*. Sedangkan gaya *sway*, momen *roll* dan *yaw* memiliki intensitas yang cukup kecil dikarenakan arahnya tidak searah dengan datangnya beban lingkungan. Berdasarkan gambar tersebut dapat dikatakan bahwa gaya/momen orde-2 (*wave drift*) memiliki karakteristik *non zero mean force* atau memiliki nilai *mean* yang tidak nol.

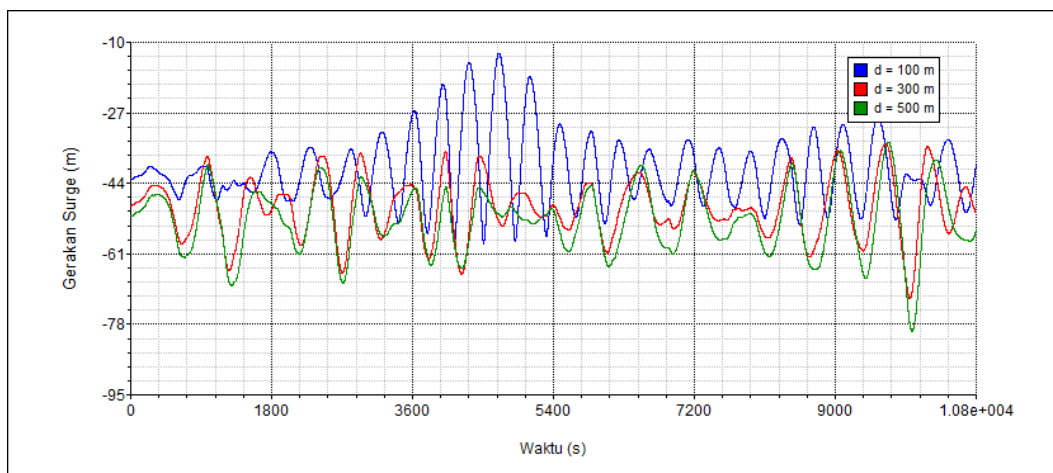
Jika diperhatikan dengan seksama, baik gaya dan momen *wave drift* pada kedalaman perairan yang berbeda-beda memiliki intensitas yang relatif sama. Hal ini menunjukkan bahwa variasi kedalaman perairan tidak berpengaruh signifikan terhadap gaya maupun momen *wave drift* 6 DOF struktur apung.

4.6.5 Respon Gerak 6 DOF Akibat Gaya Orde-2 (Segmentasi Chain)

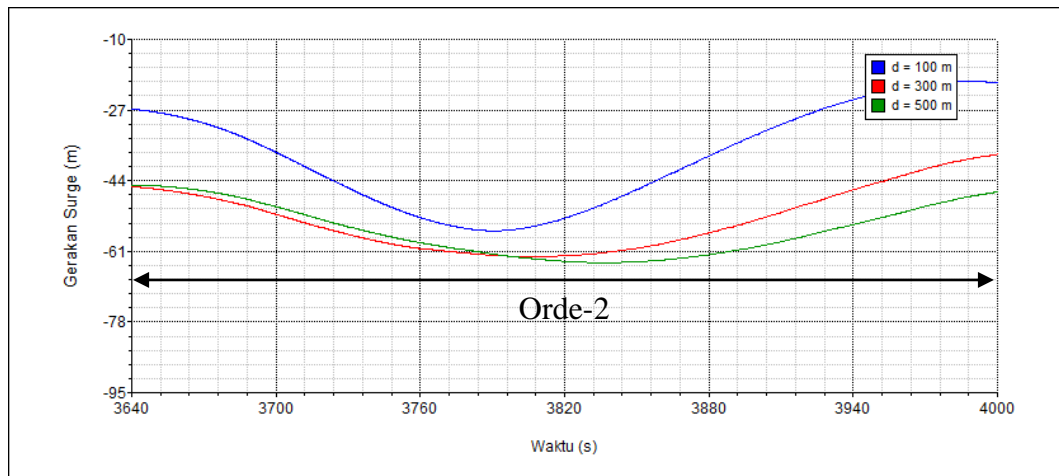
Respon gerak tanker dalam 6 DOF akibat gaya gelombang orde-2 (*wave drift*) ditunjukkan pada Gambar 4-68 s.d. Gambar 4-73. Perlu diperhatikan bahwa yang dimaksud dengan istilah respon 6 DOF akibat gaya gelombang orde-2 adalah sistem tertambat disimulasikan dengan pembebanan akibat gaya gelombang, arus dan angin dengan memperhatikan pengaruh gaya gelombang orde-2 terhadap respon, sedangkan pengaruh gaya gelombang orde-1 (*wave load RAO*) diabaikan. Berikut merupakan respon gerak tanker 6 DOF akibat pengaruh gaya orde-2 dalam fungsi waktu (10800 detik).

4.6.5.1 Respon Surge Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi Chain)

Respon *surge* akibat gaya orde-2 pada tiap-tiap kedalaman 100, 300 dan 500 meter ditunjukkan pada Gambar 4-68a dan 4-68b. Berdasarkan gambar tersebut garis biru menunjukkan respon *surge* pada kedalaman 100 m, garis merah menunjukkan respon *surge* pada kedalaman 300 m dan garis hijau menunjukkan respon *surge* pada kedalaman 500 m. Meninjau Gambar 4-68a terlihat bahwa respon *surge* yang terbentuk akibat gaya orde-2 hanya terdiri dari respon *surge* periode panjang atau respon *surge* orde-2, tanpa adanya respon orde-1 yang memiliki periode cenderung pendek. (Detailnya dapat dilihat pada Gambar 4-68b).



(a)



(b)

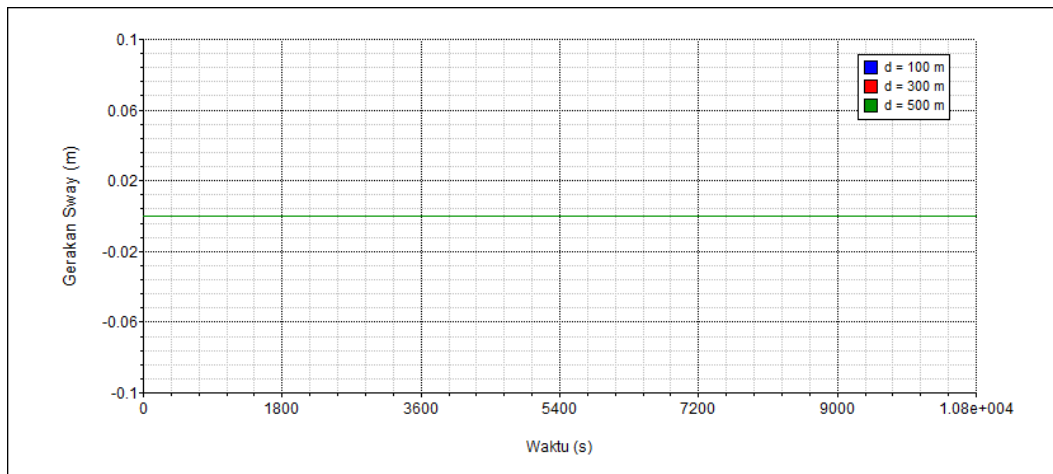
Gambar 4-68 Respon surge akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Respon surge ditinjau pada detik ke-3640 s.d. 4000 detik (**segmentasi chain**)

Berdasarkan Gambar 4-68b terlihat bahwa tidak ada respon *surge* orde-1 yang terbentuk. Sedangkan respon *surge* orde-2 memiliki periode sekitar 360 detik. Jika meninjau variasi kedalaman perairannya semakin dalam kondisi perairannya menghasilkan respon *surge* orde-2 yang semakin besar pula dengan kenaikan sekitar 20%.

4.6.5.2 Respon *Sway* Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain*)

Respon kapal untuk gerakan *sway* dapat dilihat pada Gambar 4-69. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa respon *sway* memiliki harga yang mendekati nol, karena arah respon dan gaya yang bekerja (*headseas*) tidak berada dalam satu arah.

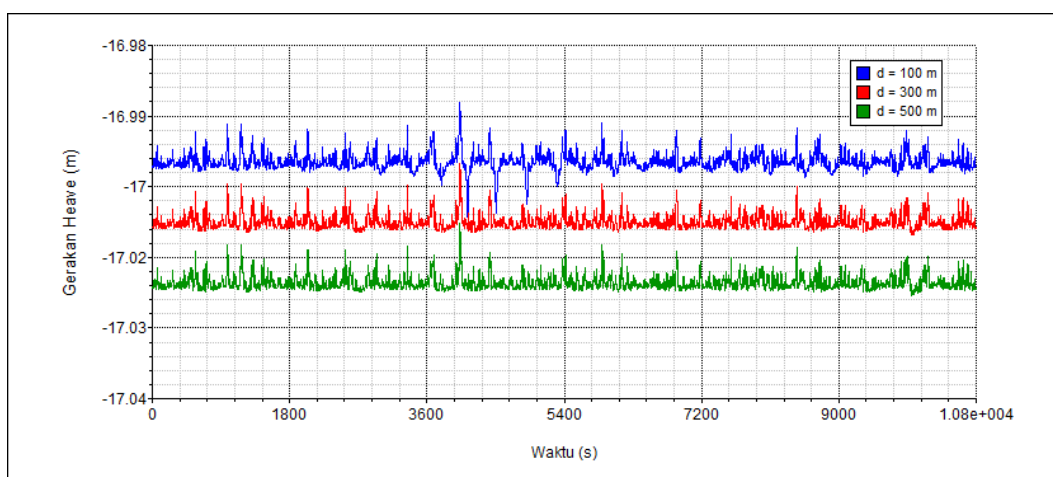
Jika diperhatikan dengan seksama, periode respon *sway* termasuk dalam kategori periode panjang. Hal ini dikarenakan respon *sway* termasuk salah satu gerakan horisontal yang pada umumnya akan terseret (*drifting*) jika dikenai beban horisontal.



Gambar 4-69 Respon sway akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)

4.6.5.3 Respon *Heave* Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (*Segmentasi Chain*)

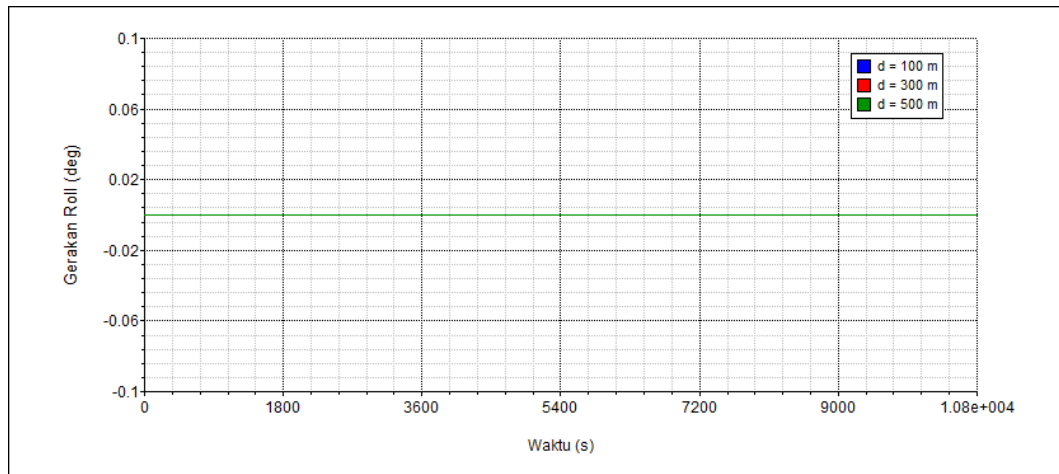
Respon *heave* akibat gaya orde-2 dapat dilihat pada Gambar 4-70. Meninjau gambar tersebut terlihat bahwa respon *heave* terdiri dari respon orde-1 saja dan tidak memiliki respon orde-2. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa respon *heave* orde-2 memiliki amplitudo yang relatif kecil, mendekati nol. Sehingga dapat disimpulkan bahwa gaya orde-2 tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada respon *heave*.



Gambar 4-70 Respon heave akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)

4.6.5.4 Respon *Roll* Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain*)

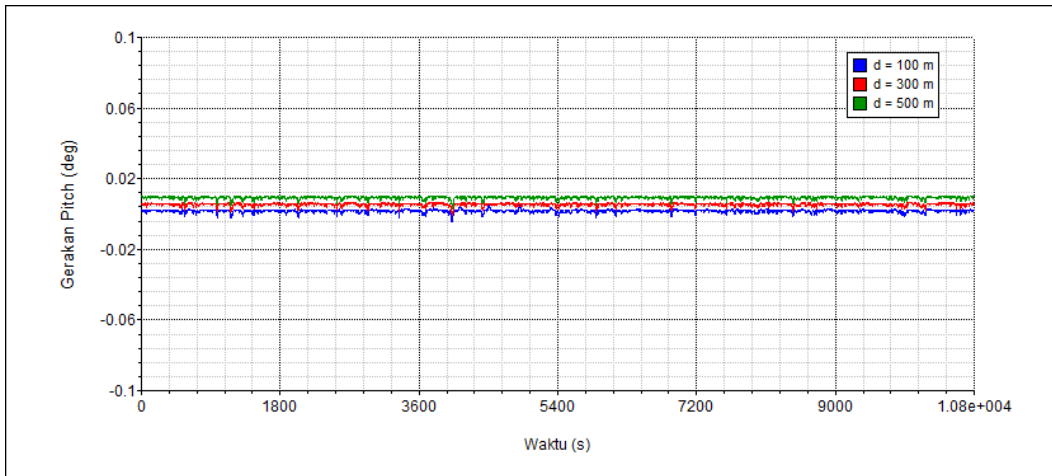
Respon tanker untuk gerakan *roll* memiliki harga mendekati nol sebagaimana yang terlihat pada Gambar 4-71. Hal ini disebabkan karena gerakan *roll* tidak searah dengan arah datangnya gaya lingkungan.



Gambar 4-71 Respon roll akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi *chain*)

4.6.5.5 Respon *Pitch* Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain*)

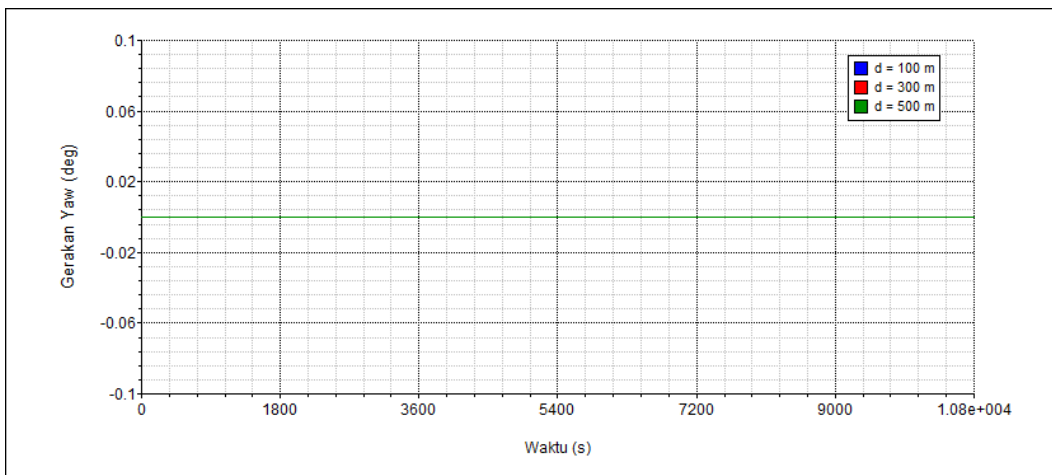
Respon *pitch* akibat gaya orde-2 hanya memiliki satu jenis respon, yaitu respon orde-1 dengan periode pendek, sama halnya yang dijumpai pada respon gerakan vertikal lainnya (*heave* dan *roll*). Begitu juga yang dijumpai pada gerakan *heave* dan *roll*, variasi kedalaman perairan tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada respon gerak *pitch*. Berdasarkan Gambar 4-72 terlihat bahwa respon *pitch* tanker memiliki amplitudo relatif pada variasi kedalaman perairan yang berbeda-beda.



Gambar 4-72 Respon pitch akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)

4.6.5.6 Respon *Yaw* Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain*)

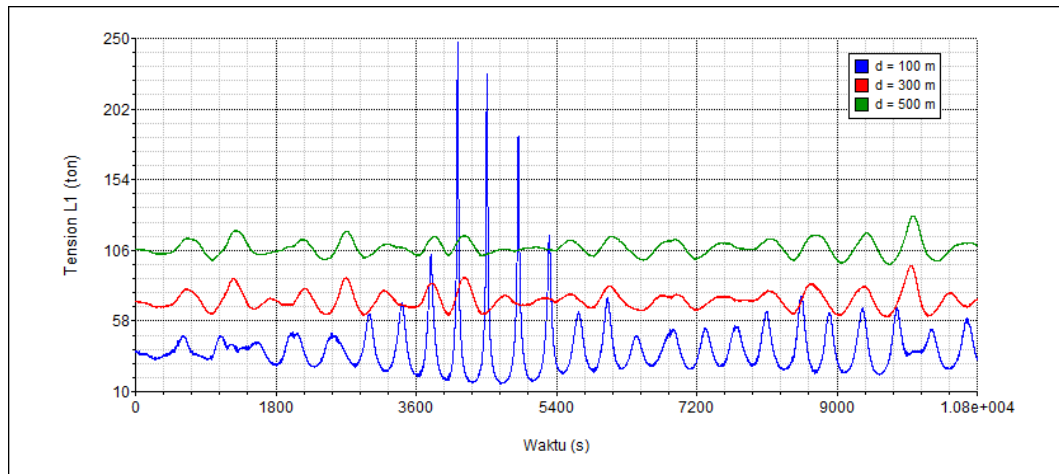
Respon *yaw* yang ditunjukkan pada Gambar 4-73 memiliki harga yang mendekati nol, karena arah gerakannya tidak searah dengan arah datangnya gaya lingkungan, seperti halnya gerakan *sway* dan *roll* yang telah dibahas sebelumnya.



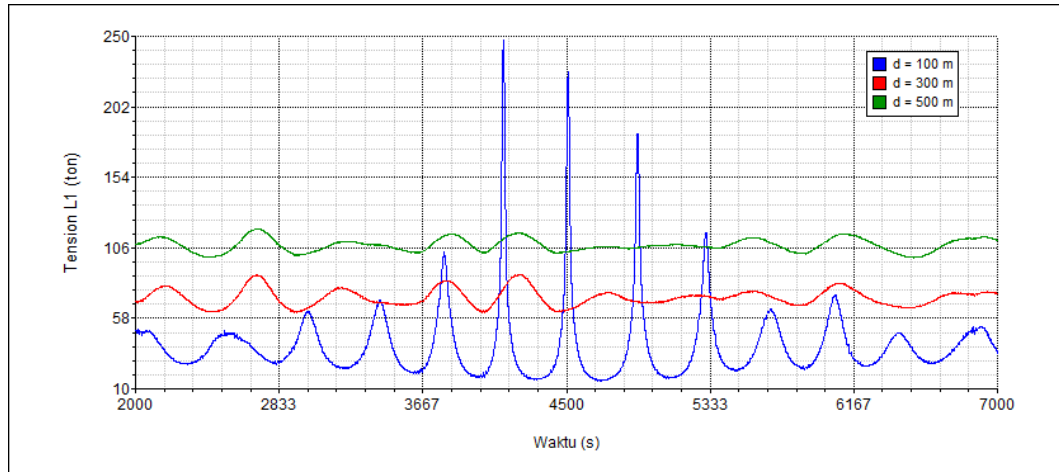
Gambar 4-73 Respon yaw akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain**)

4.6.6 Tension Tali Tambat Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi Chain)

Tali tambat yang ditinjau merupakan tali tambat yang berhadapan langsung dengan gaya lingkungan (L1). Tension L1 akibat gaya orde-2 disajikan dalam Gambar 4-74a dan Gambar 4-74b berikut ini.



(a)



(b)

Gambar 4-74 Tension tali tambat L1 akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Tension L1 jika ditinjau pada detik ke-2000 s.d. 7000 (b) (segmentasi chain)

Meninjau Gambar 4-74a dan Gambar 4-74b dapat dilihat bahwa kenaikan kedalaman perairan menyebabkan kenaikan tension pada tali tambat L1. Namun jika diperhatikan dengan seksama pada detik ke-2000 s.d. 7000 terlihat bahwa

tension L1 pada kondisi kedalaman 100 m memberikan tension yang paling besar dibandingkan dengan dua kondisi kedalaman lainnya. Hal ini disebabkan karena pada saat kondisi kedalaman 100 m, tali tambat relatif lebih pendek dan respon kapal yang belum sembat kembali di posisi equilibriumnya sudah terkena gelombang lagi sehingga tension tali tambat menjadi relatif lebih besar.

4.7 ANALISIS PENGARUH KEDALAMAN PERAIRAN TERHADAP RESPON STRUKTUR TERTAMBAT (SEGMENTASI *CHAIN-WIRE ROPE*)

Jika pada bagian sebelumnya dijelaskan tentang pengaruh kedalaman perairan terhadap respon struktur tertambat, dengan segmentasi tali tambatnya diseragamkan menjadi chain, maka bagian ini menjelaskan konfigurasi tali tambat yang disesuaikan dengan penggunaannya di lapangan. Skenario kedalaman perairan dan segmentasi tali tali tambat ditunjukkan pada Tabel 4-25 dan Tabel 4-26.

A. Variasi Kedalaman Dasar Laut

Tabel 4-25 Variasi kedalaman perairan yang ditinjau dalam penelitian ini

Model B-I	Model B-II	Model B-III
Perairan dangkal (100 m)	Perairan menengah (300 m)	Perairan dalam (500 m)

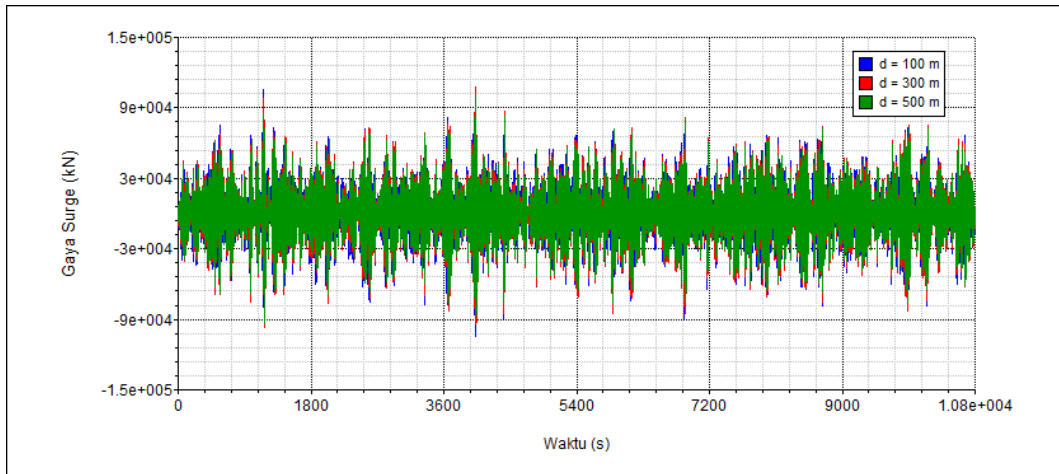
B. Konfigurasi Tali Tambat

Tabel 4-26 Segmentasi tali tambat dengan menggunakan material chain-wire rope

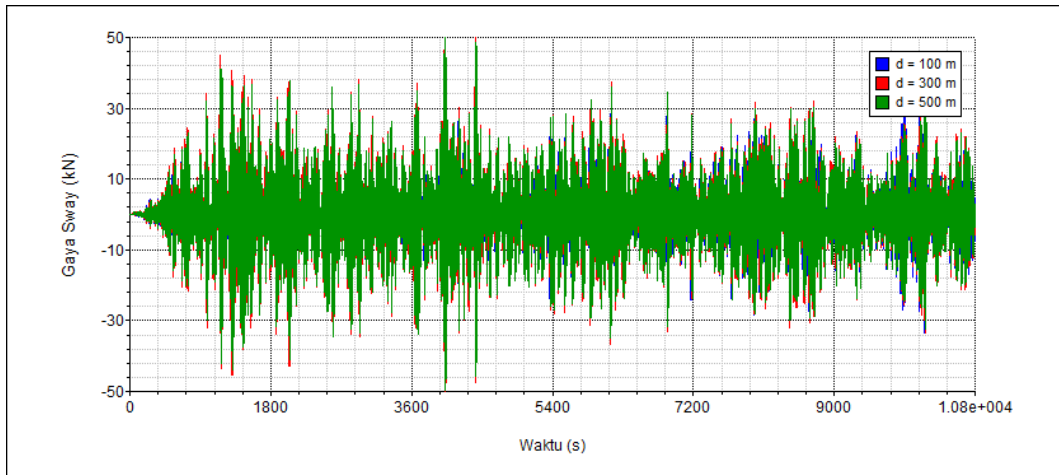
Model	Perairan dangkal (100 m)	Perairan menengah (300 m)	Perairan dalam (500 m)
Kombinasi tali tambat (<i>fairlead – anchor</i>)	<i>Chain</i>	<i>Chain-wire rope-chain</i>	<i>Chain-wire rope-chain</i>
Panjang tali (m)	345	125-860-50 (total 1035)	210-1430-85 (total 1725)

4.7.1 Gaya dan Momen 6 DOF Orde-1 (*wave load RAO*) dengan Segmentasi Tali Tambat Chain-Wire Rope

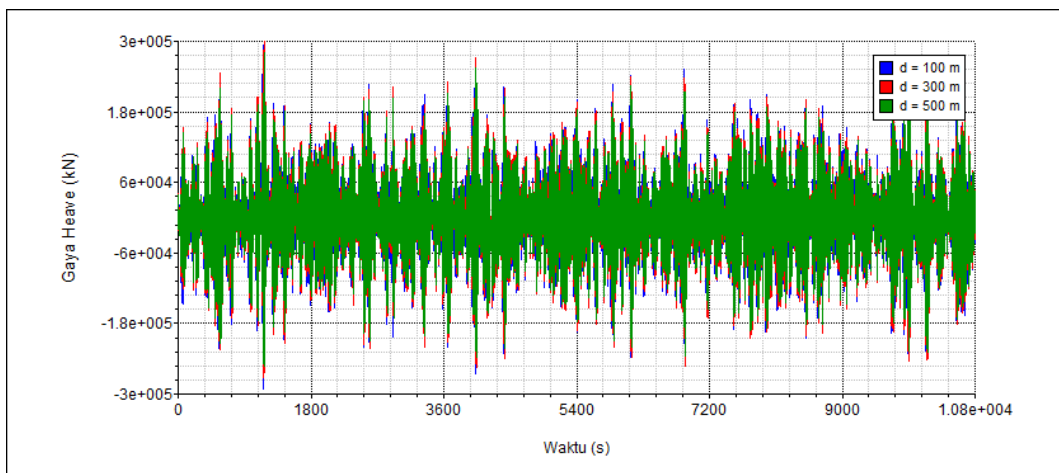
Gaya dan momen 6 DOF orde-1 yang terbentuk akibat beban gelombang orde-1 (*wave frequency load*) ditunjukkan pada Gambar 4-75 s.d. 4-80 berikut ini.



Gambar 4-75 Gaya surge orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)



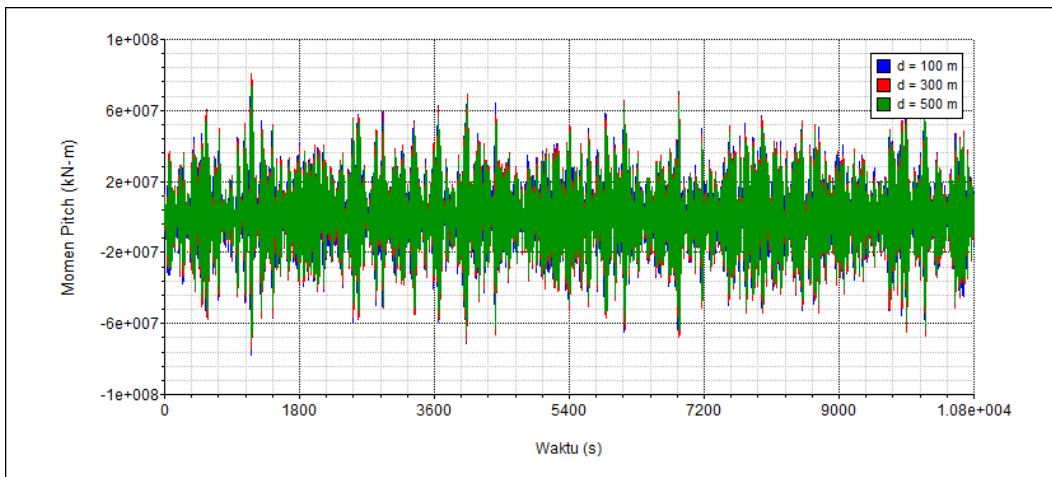
Gambar 4-76 Gaya sway orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)



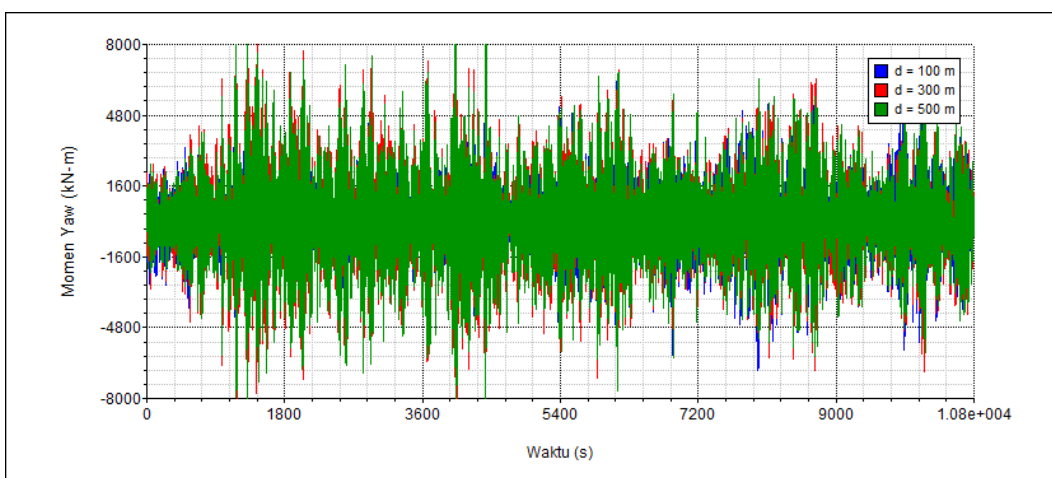
Gambar 4-77 Gaya heave orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)



Gambar 4-78 Momen Roll orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)



Gambar 4-79 Momen Pitch orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)



Gambar 4-80 Momen Yaw orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi chain-wire rope)

Gambar 4-75 s.d. 4-77 menunjukkan rekam gaya *surge*, *sway* dan *heave* orde-1 struktur apung (tanker) dalam fungsi waktu dengan periode waktu selama 3 jam (10800 detik). Sedangkan Gambar 4-78 s.d. 4-80 menunjukkan rekam momen *roll*, *pitch* dan *yaw* orde-1.

Meninjau Gambar 4-75 s.d. 4-80 dapat disimpulkan bahwa gaya maupun momen orde-1 yang terpengaruh dengan kondisi lingkungan berasal dari arah *headseas* (*heading 180°*) adalah gaya *surge*, *heave* dan momen *pitch*. Sedangkan gaya *sway*, momen *roll* dan *yaw* memiliki intensitas yang cukup kecil dikarenakan arahnya tidak searah dengan datangnya beban lingkungan.

Jika diperhatikan dengan seksama, baik gaya dan momen orde-1 pada kedalaman perairan yang berbeda-beda memiliki intensitas yang relatif sama. Hal ini menunjukkan bahwa variasi kedalaman perairan tidak berpengaruh signifikan terhadap gaya maupun momen 6 DOF struktur apung.

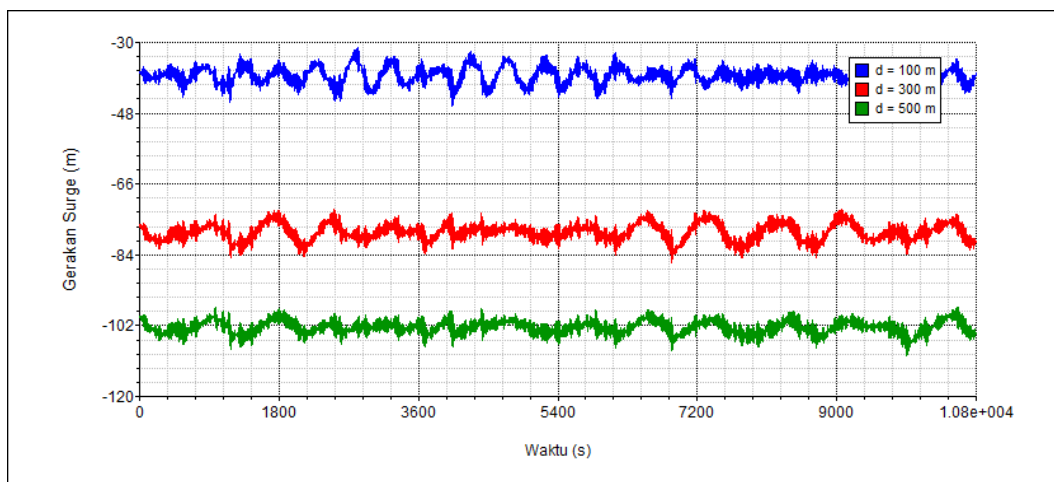
Hal yang membedakan antara gaya ataupun momen yang terbentuk pada kondisi segmentasi chain dan saat segmentasi kombinasi chain-wire rope terletak pada kekakuan dan massa tali tambat. Perbedaan keduanya akan memberikan perbedaan hasil pada ruas kanan persamaan gerak, yaitu pada besaran gaya/momen.

4.7.2 Respon Gerak 6 DOF akibat Gaya Orde-1 (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

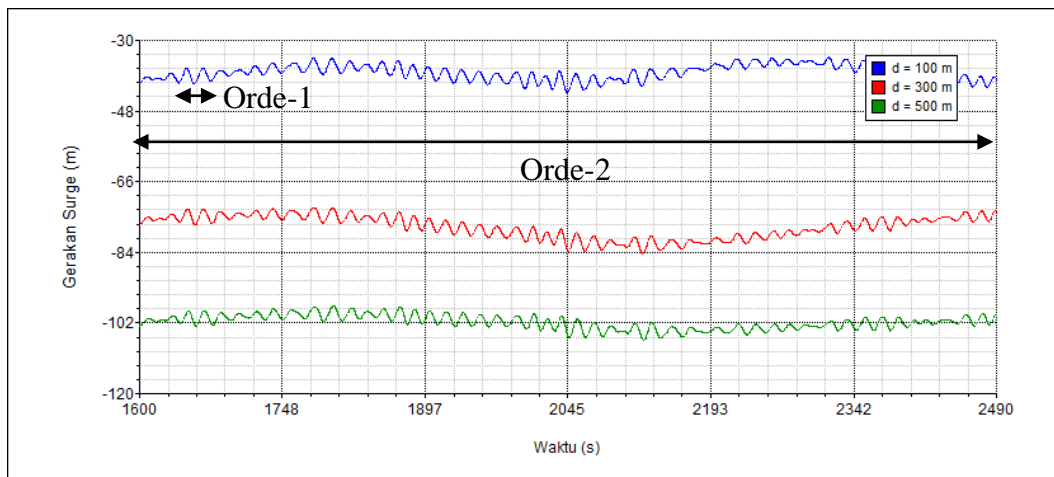
Respon gerak tanker dalam 6 DOF akibat gaya gelombang orde-1 ditunjukkan pada Gambar 4-81 s.d. Gambar 4-86. Perlu diperhatikan bahwa yang dimaksud dengan istilah respon 6 DOF akibat gaya gelombang orde-1 adalah sistem tertambat yang disimulasikan dengan pembebanan akibat gaya gelombang, arus dan angin dengan memperhatikan pengaruh gaya gelombang orde-1 terhadap respon, sedangkan pengaruh gaya gelombang orde-2 diabaikan. Berikut merupakan respon gerak tanker 6 DOF akibat pengaruh gaya orde-1 dalam fungsi waktu (10800 detik).

4.7.2.1 Respon Surge Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi Chain-Wire Rope)

Respon *surge* akibat gaya orde-1 pada variasi kedalaman 100, 300 dan 500 meter ditunjukkan pada Gambar 4-81. Meninjau gambar tersebut terlihat bahwa meskipun sistem tertambat dikenai pengaruh gaya orde-1, namun respon yang ditimbulkan terdiri dari respon orde-1 dan respon orde-2 sebagaimana yang terjadi pada saat sistem dikonfigurasi dengan segmentasi *chain*.



(a)



(b)

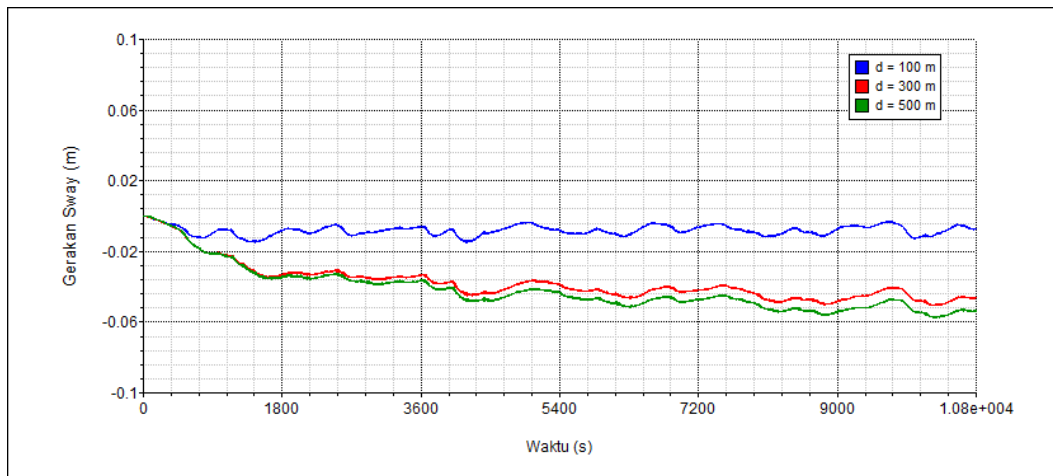
Gambar 4-81 Respon surge akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Respon surge akibat gaya orde-1 ditinjau pada detik ke-1600 s.d. 2490 detik (b) (**segmentasi chain-wire rope**)

Meninjau Gambar 4-81 terlihat bahwa respon surge orde-1 pada kondisi kedalaman 100 m memiliki periode sekitar 30 detik dengan amplitudo responnya sebesar 3,60 m dan gerakan rata-ratanya mencapai -39,00 m. Sedangkan respon surge orde-2 pada kondisi kedalaman yang sama memiliki periode sekitar 700 detik dengan amplitudo responnya sebesar 7,00 m.

Jika diperhatikan dengan seksama, respon *surge* dengan sistem tambat *chain-wire rope-chain* (terlihat pada kondisi kedalaman perairan 300 dan 500 m) memiliki offset yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tali tambat *chain*. Hal ini disebabkan karena karakter *wire rope* yang memiliki tingkat elastisitas yang lebih tinggi sehingga memiliki perpanjangan (*elongation*) yang lebih besar dibandingkan dengan *chain*. Kenaikan kedalaman perairan dari 100 menjadi 300 m menjadikan respon surge meningkat sekitar 92%. Sebagai perbandingan, jika segmentasi tali tambatnya berupa *chain*, hanya mampu meningkatkan respon surge sekitar 10%. Jika dibandingkan dengan *chain*, eskursi surge maksimum material *chain-wire rope* lebih besar 2 kali lipatnya, sehingga perbandingan eskursi *chain* dan *chain-wire rope* adalah 1 : 2.

4.7.2.2 Respon Sway Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi Chain-Wire Rope)

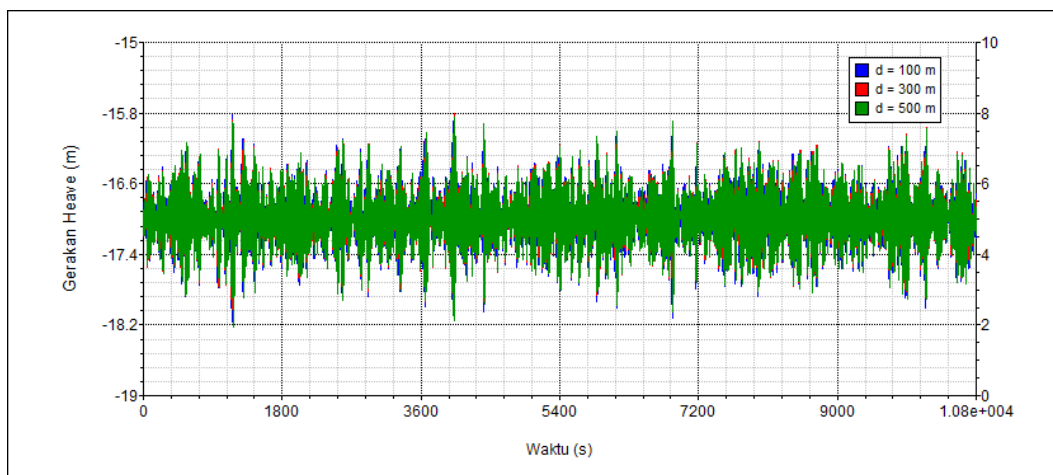
Respon kapal untuk gerakan *sway* dapat dilihat pada Gambar 4-82. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa respon *sway* memiliki harga yang mendekati nol, karena arah respon dan gaya yang bekerja (*headseas*) tidak berada dalam satu arah.



Gambar 4-82 Respon sway akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)

4.7.2.3 Respon *Heave* Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

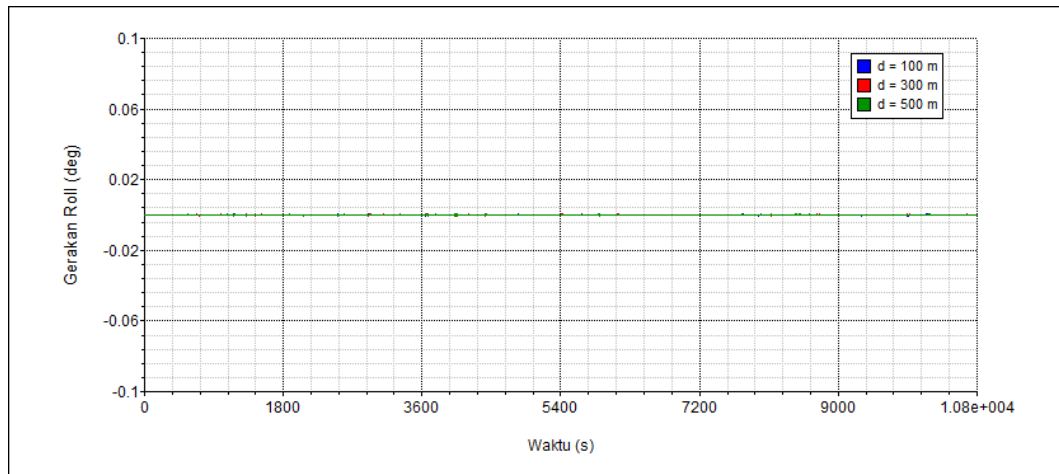
Respon *heave* akibat gaya orde-1 dapat dilihat pada Gambar 4-83. Meninjau gambar tersebut terlihat bahwa respon *heave* terdiri dari respon orde-1 saja dan tidak memiliki respon orde-2. Jika dilihat berdasarkan variasi kedalaman perairannya, respon *heave* cenderung memiliki harga yang relatif sama. Sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya mengindikasikan bahwa kedalaman perairan tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada respon *heave*. Meninjau gambar tersebut respon *heave* memiliki amplitudo sekitar 1,20 m pada semua kondisi kedalaman perairan.



Gambar 4-83 Respon heave akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)

4.7.2.4 Respon *Roll* Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

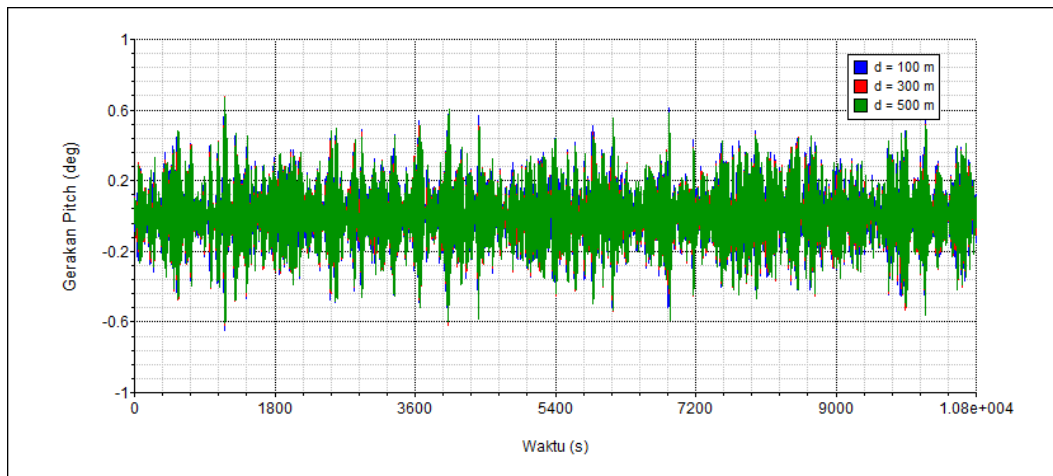
Respon tanker untuk gerakan *roll* memiliki harga mendekati nol sebagaimana yang terlihat pada Gambar 4-84. Hal ini disebabkan karena gerakan *roll* tidak searah dengan arah datangnya gaya lingkungan.



Gambar 4-84 Respon roll akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi *chain-wire rope*)

4.7.2.5 Respon *Pitch* Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

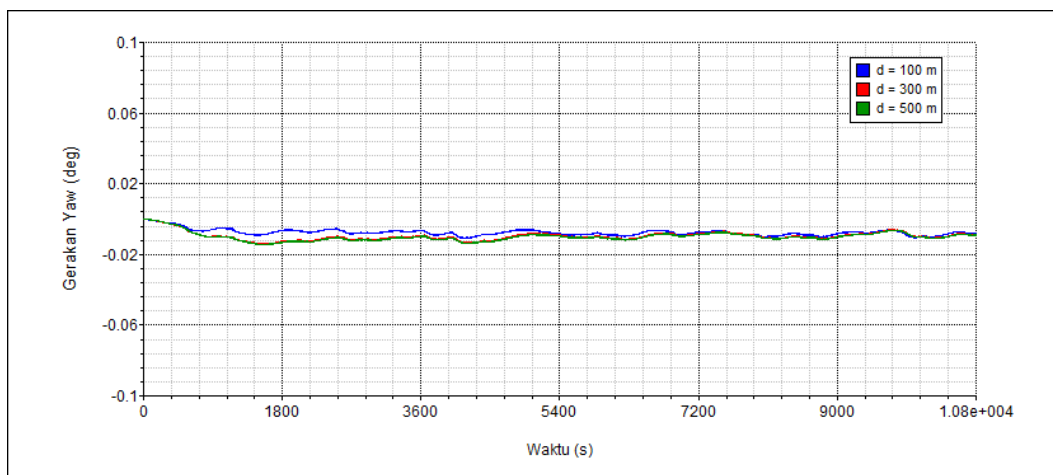
Respon *pitch* akibat gaya orde-1 hanya memiliki satu jenis respon, yaitu respon orde-1 dengan periode pendek, sama halnya yang dijumpai pada respon gerakan vertikal lainnya (*heave* dan *roll*). Selain itu sebagaimana yang dijumpai pada gerakan *heave* dan *roll*, variasi kedalaman perairan tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada respon gerak *pitch*. Berdasarkan Gambar 4-85 terlihat bahwa respon *pitch* tanker memiliki amplitudo sekitar 0,70 deg pada semua variasi kedalaman perairan.



Gambar 4-85 Respon pitch akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)

4.7.2.6 Respon *Yaw* Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

Respon *yaw* yang ditunjukkan pada Gambar 4-86 memiliki harga yang mendekati nol, karena arah gerakannya tidak searah dengan arah datangnya gaya lingkungan, seperti halnya gerakan *sway* dan *roll* yang telah dibahas sebelumnya.

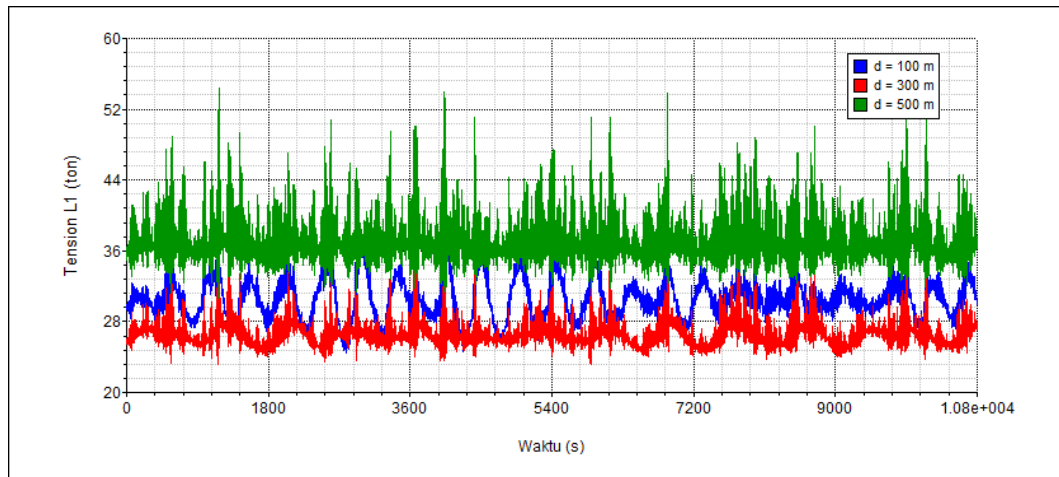


Gambar 4-86 Respon yaw akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)

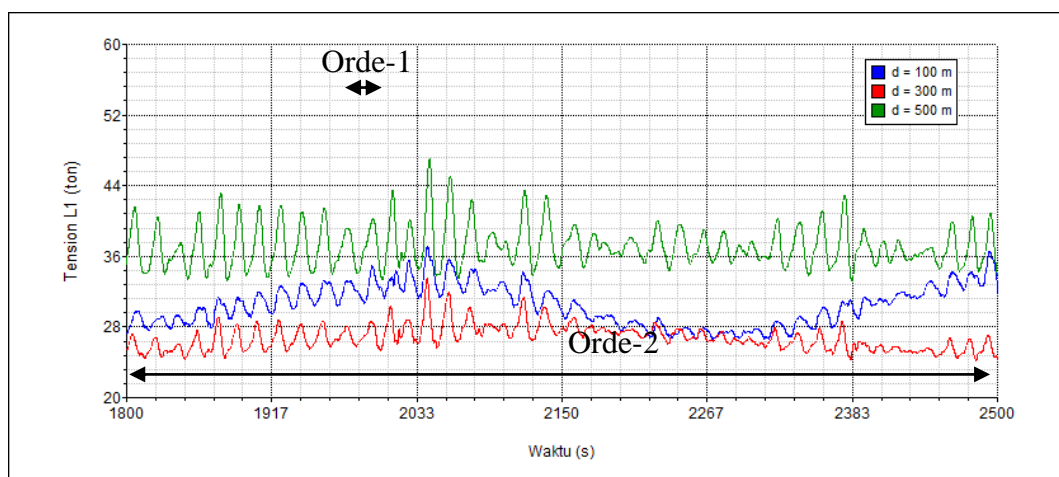
4.7.3 Tension Tali Tambat Akibat Gaya Orde-1 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

Seperti halnya yang telah dijelaskan sebelumnya, tali tambat yang ditinjau pada bagian ini merupakan tali tambat yang berhadapan langsung dengan gaya

lingkungan (L1). Tension L1 disajikan dalam Gambar 4-87a dan Gambar 4-87b berikut ini.



(a)



(b)

Gambar 4-87 Tension tali tambat L1 akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Tension L1 jika ditinjau pada detik ke-1800 s.d. 2500 (b) (**segmentasi chain-wire rope**)

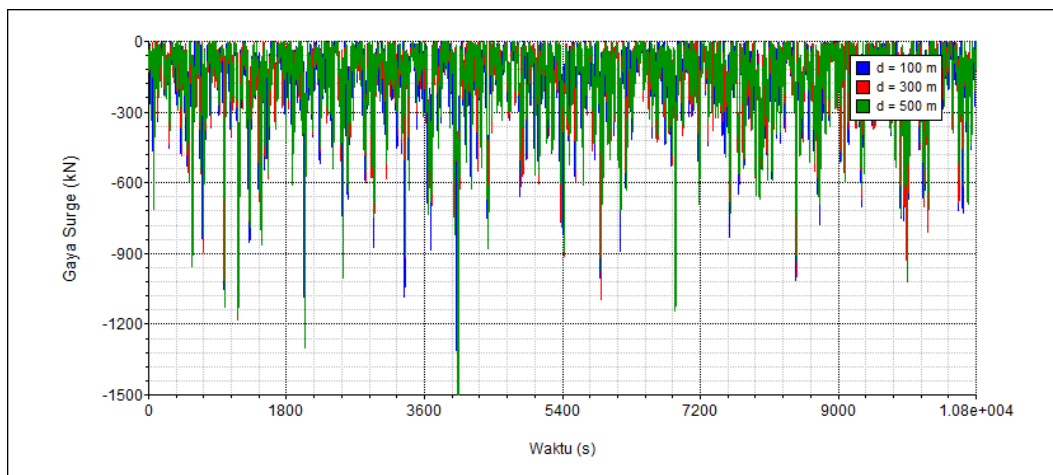
Berdasarkan Gambar 4-87b dapat dilihat bahwa tension orde-1 pada kedalaman perairan 100 m memiliki periode sekitar 23 detik dengan amplitude tension sebesar 2,40 ton, pada rata-rata tension sebesar 30 ton. Sedangkan tension orde-2 pada kedalaman yang sama memiliki periode tension sebesar 700 detik dengan amplitudo tension mencapai 5,50 ton.

Jika dibandingkan dengan segmentasi *chain* di awal pembahasan akan terlihat bahwa tension segmentasi *chain-wire rope* memiliki periode yang lebih

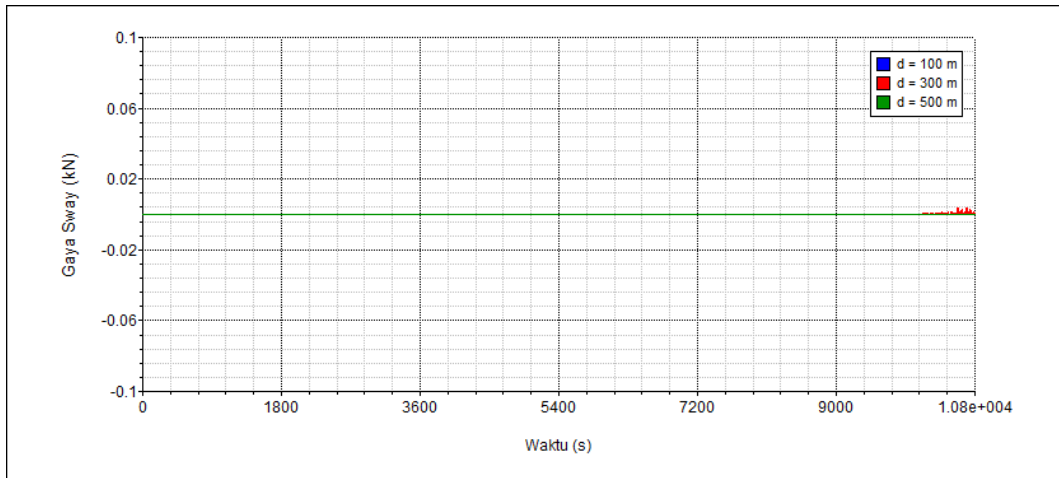
panjang, yaitu 700 detik berbanding dengan 600 detik. Selain itu besarnya amplitudo tension juga lebih kecil dibandingkan pada saat dimodelkan sebagai *chain*. Tali tambat dengan komposisi penyusunnya *chain* menghasilkan tension maksimum sebesar 74 ton dengan kondisi kedalaman perairan 300 m, sedangkan tali tambat dengan komposisi penyusunnya *chain-wire rope* memiliki tension sebesar 34,4 ton pada kedalaman yang sama. Dapat disimpulkan bahwa tension akibat gaya orde-1 pada material *chain-wire rope* lebih rendah jika dibandingkan dengan material *chain* saja, dengan skala perbandingan 1 : 2.

4.7.4 Gaya dan Momen 6 DOF Orde-2 (*wave drift force*) dengan Segmentasi Tali Tambat *Chain-Wire Rope*

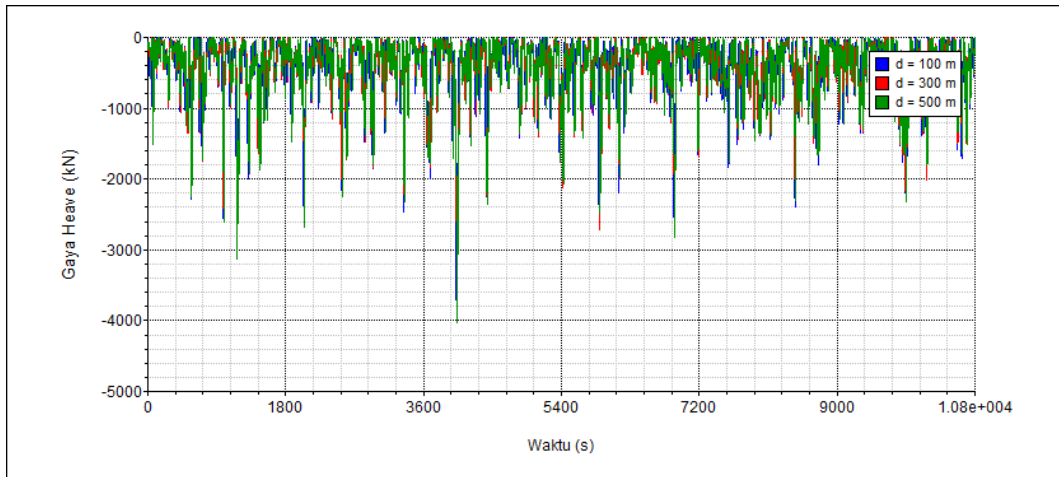
Gaya dan momen orde-2 yang terbentuk dari hasil pengintegralan langsung komponen orde-2 pada tekanan Bernoulli atau yang disebut dengan gaya *wave drift force* ditunjukkan pada Gambar 4-88 s.d. Gambar 4-93 berikut ini.



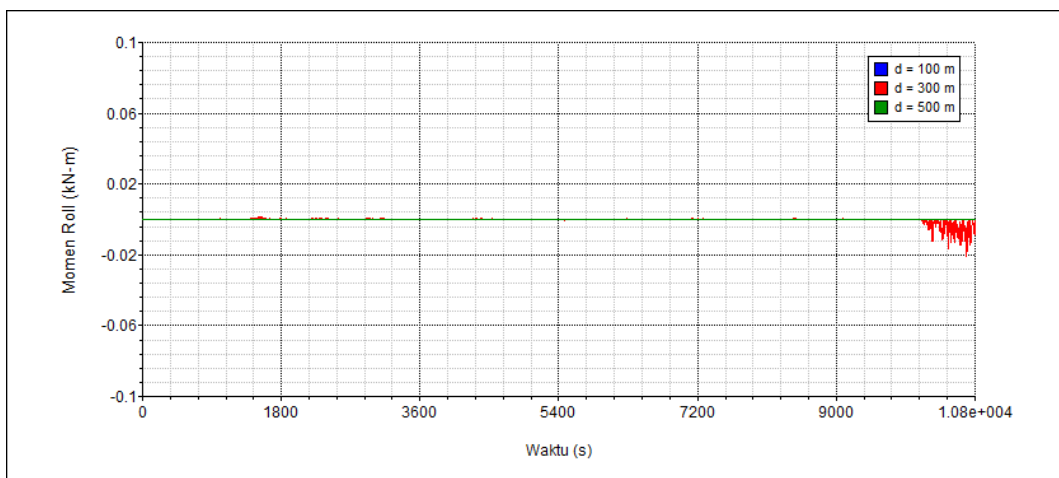
Gambar 4-88 Gaya surge orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)



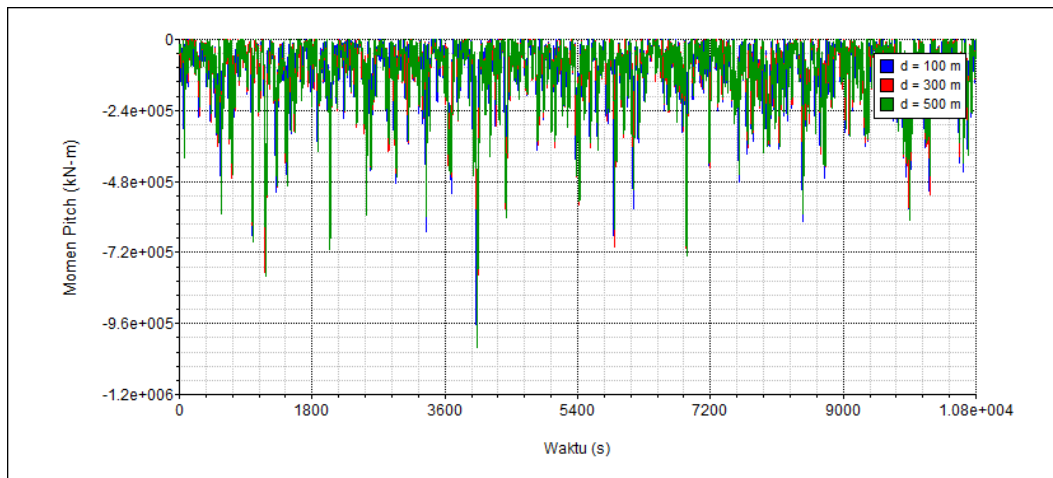
Gambar 4-89 Gaya sway orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)



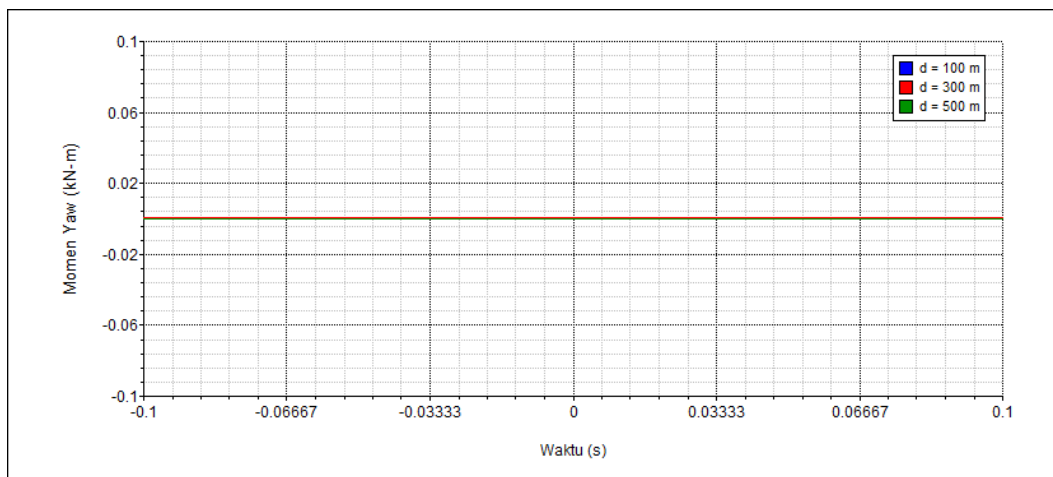
Gambar 4-90 Gaya heave orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)



Gambar 4-91 Momen roll orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)



Gambar 4-92 Momen pitch orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)



Gambar 4-93 Momen yaw orde-2 (*wave drift*) terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)

Gambar 4-88 s.d. Gambar 4-90 menunjukkan rekam gaya *wave drift surge*, *sway* dan *heave* struktur apung (tanker) tertambat dengan segmentasi tali tambat *chain-wire rope* dalam fungsi waktu dengan periode waktu selama 3 jam (10800 detik). Sedangkan Gambar 4-91 s.d. Gambar 4-93 menunjukkan rekam momen *wave drift roll*, *pitch* dan *yaw*. Garis dengan warna biru menunjukkan gaya/momen pada kedalaman perairan dangkal ($d = 100$ m), garis merah menunjukkan operasinya pada kedalaman perairan menengah ($d = 300$ m) dan garis hijau menunjukkan operasinya pada kedalaman perairan dalam ($d = 500$ m).

Meninjau Gambar 4-88 s.d. 4-93 dapat disimpulkan bahwa gaya maupun momen *wave drift* yang terpengaruh dengan kondisi lingkungan berasal dari arah *headseas* (*heading 180°*) adalah gaya *surge*, *heave* dan momen *pitch*. Sedangkan gaya *sway*, momen *roll* dan *yaw* memiliki intensitas yang cukup kecil dikarenakan arahnya tidak searah dengan datangnya beban lingkungan.

Jika diperhatikan dengan seksama, baik gaya dan momen *wave drift* pada kedalaman perairan yang berbeda-beda memiliki intensitas yang relatif sama. Hal ini menunjukkan bahwa variasi kedalaman perairan tidak berpengaruh signifikan terhadap gaya maupun momen *wave drift* 6 DOF struktur apung.

4.7.5 Respon Gerak 6 DOF Akibat Gaya Orde-2 (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

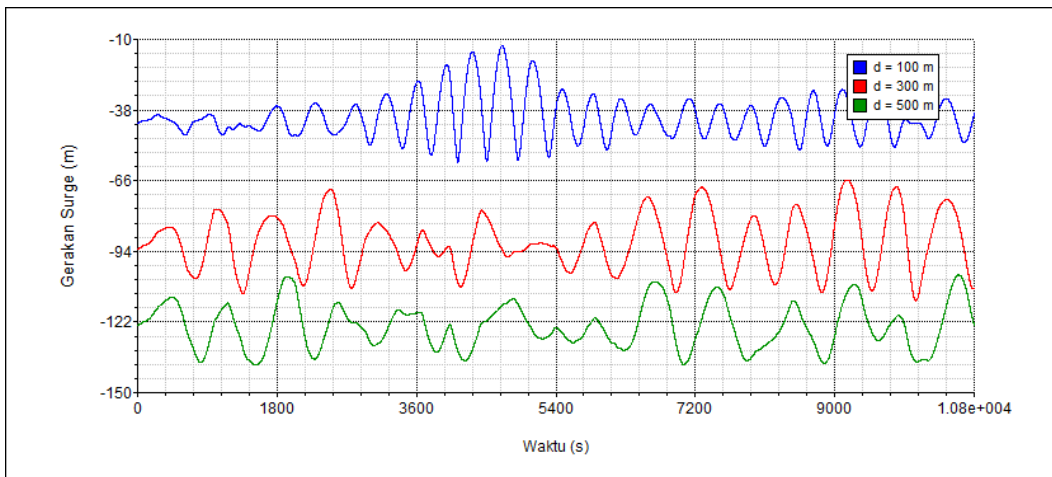
Respon gerak tanker dalam 6 DOF akibat gaya gelombang orde-2 (*wave drift*) ditunjukkan pada Gambar 4-98 s.d. Gambar 4-93. Perlu diperhatikan bahwa yang dimaksud dengan istilah respon 6 DOF akibat gaya gelombang orde-2 adalah sistem tertambat (dengan segmentasi tali tambat *chain-wire rope*) disimulasikan dengan pembebanan akibat gaya gelombang, arus dan angin dengan memperhatikan pengaruh gaya gelombang orde-2 terhadap respon, sedangkan pengaruh gaya gelombang orde-1 (*wave load RAO*) diabaikan. Berikut merupakan respon gerak tanker 6 DOF akibat pengaruh gaya orde-2 dalam fungsi waktu (10800 detik).

4.7.5.1 Respon *Surge* Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

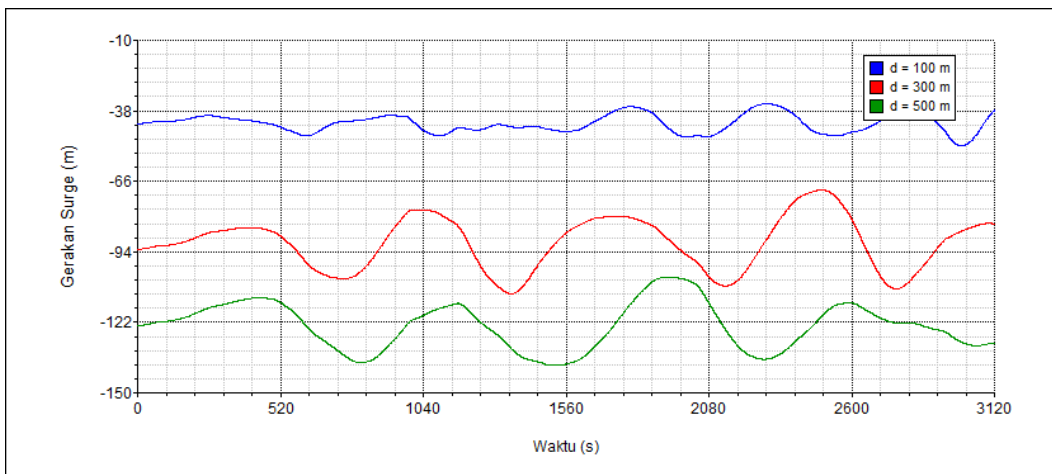
Respon *surge* akibat gaya orde-2 pada tiap-tiap kedalaman 100, 300 dan 500 meter ditunjukkan pada Gambar 4-94a dan Gambar 4-94b. Berdasarkan gambar tersebut garis biru menunjukkan respon *surge* pada kedalaman 100 m, garis merah menunjukkan respon *surge* pada kedalaman 300 m dan garis hijau menunjukkan respon *surge* pada kedalaman 500 m. Meninjau Gambar 4-94a terlihat bahwa respon *surge* yang terbentuk akibat gaya orde-2 hanya terdiri dari respon *surge*

periode panjang atau respon surge orde-2, tanpa adanya respon orde-1 yang memiliki periode cenderung pendek. (Detailnya dapat dilihat pada Gambar 4-94b).

Gambar 4-94b merupakan grafik pembesaran dari Gambar 4-94a. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa tidak ada respon *surge* orde-1 yang terbentuk. Sedangkan respon *surge* orde-2 memiliki periode sekitar 1040 detik. Jika meninjau variasi kedalaman perairannya semakin dalam dalam kondisi perairannya menghasilkan respon *surge* orde-2 yang semakin besar pula dengan kenaikan sekitar 118%.



(a)



(b)

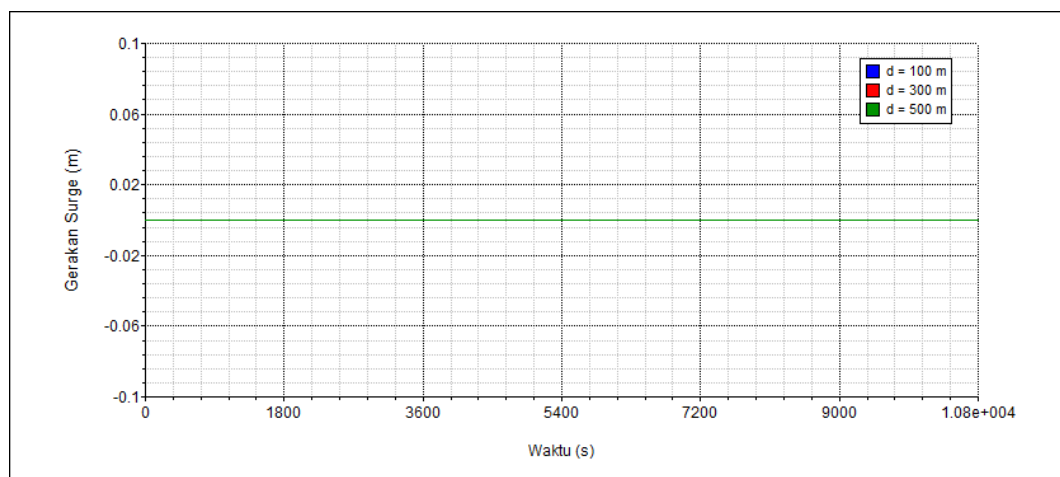
Gambar 4-94 Respon surge akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Respon surge ditinjau pada detik ke-3640 s.d. 4000 detik (b) (**segmentasi chain-wire rope**)

Jika dibandingkan dengan respon *surge* maksimum pada saat menggunakan material *chain*, respon ini memiliki eskursi yang cenderung lebih panjang. Tersebut di awal pembahasan, respon *surge* dengan tali tambat *chain* pada kedalaman perairan 300 m adalah sebesar 71,20 m, sedangkan jika dengan tali tambat *chain-wire rope* menghasilkan eskursi sekitar 113,60 m, atau 2 kali lipat lebih besar.

4.7.5.2 Respon *Sway* Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

Respon kapal untuk gerakan *sway* dapat dilihat pada Gambar 4-95. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa respon *sway* memiliki harga yang mendekati nol, karena arah respon dan gaya yang bekerja (*headseas*) tidak berada dalam satu arah.

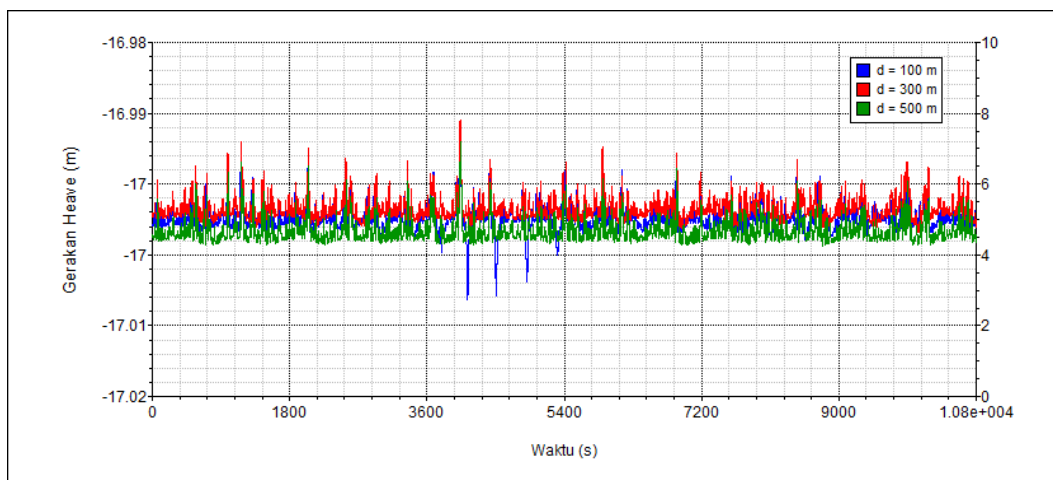
Jika diperhatikan dengan seksama, periode respon *sway* termasuk dalam kategori periode panjang. Hal ini dikarenakan respon *sway* termasuk salah satu gerakan horisontal yang pada umumnya akan terseret (*drifting*) jika dikenai beban horisontal.



Gambar 4-95 Respon *sway* akibat gaya orde-1 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi *chain-wire rope*)

4.7.5.3 Respon *Heave* Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

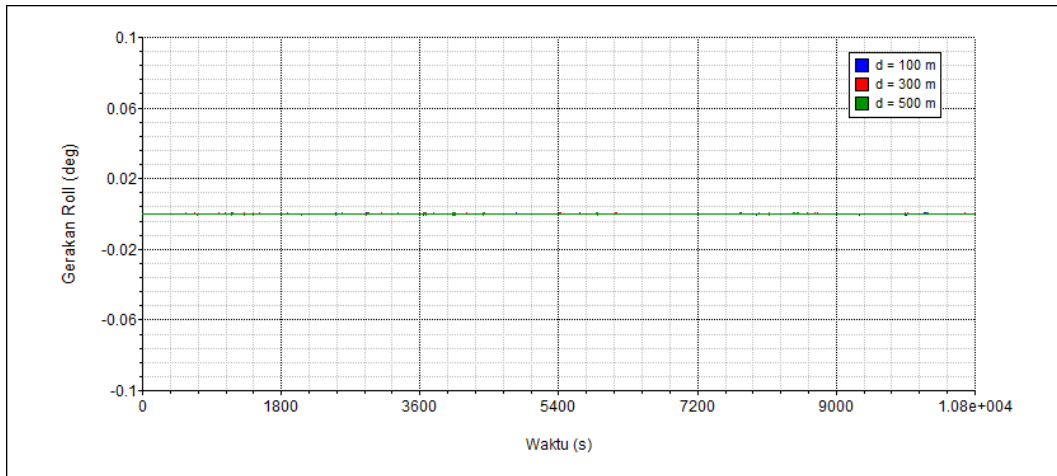
Respon *heave* akibat gaya orde-2 dapat dilihat pada Gambar 4-96. Meninjau gambar tersebut terlihat bahwa respon *heave* terdiri dari respon orde-1 saja dan tidak memiliki respon orde-2. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa respon *heave* orde-2 memiliki amplitudo yang relatif kecil, mendekati nol. Sehingga dapat disimpulkan bahwa gaya orde-2 tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada respon *heave*.



Gambar 4-96 Respon *heave* akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi *chain-wire rope*)

4.7.5.4 Respon *Roll* Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

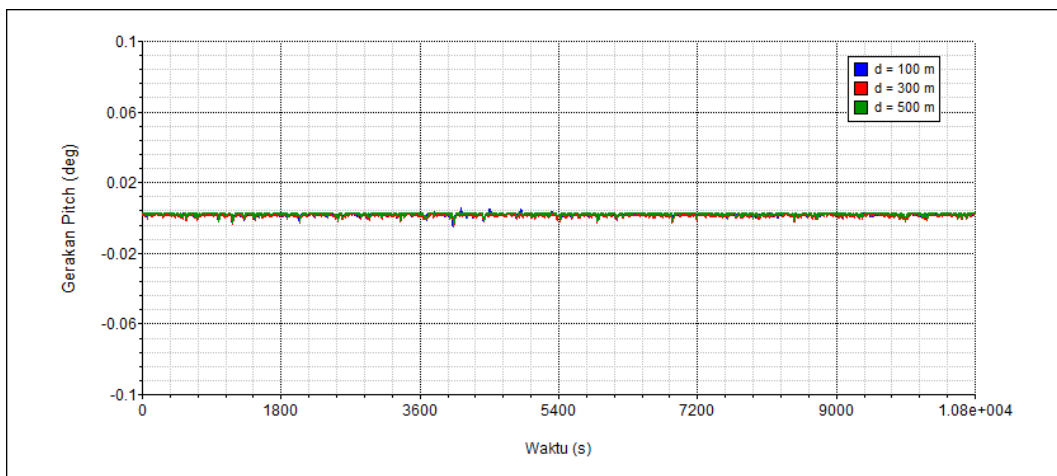
Respon tanker untuk gerakan *roll* memiliki harga mendekati nol sebagaimana yang terlihat pada Gambar 4-97. Hal ini disebabkan karena gerakan *roll* tidak searah dengan arah datangnya gaya lingkungan.



Gambar 4-97 Respon roll akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)

4.7.5.5 Respon *Pitch* Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

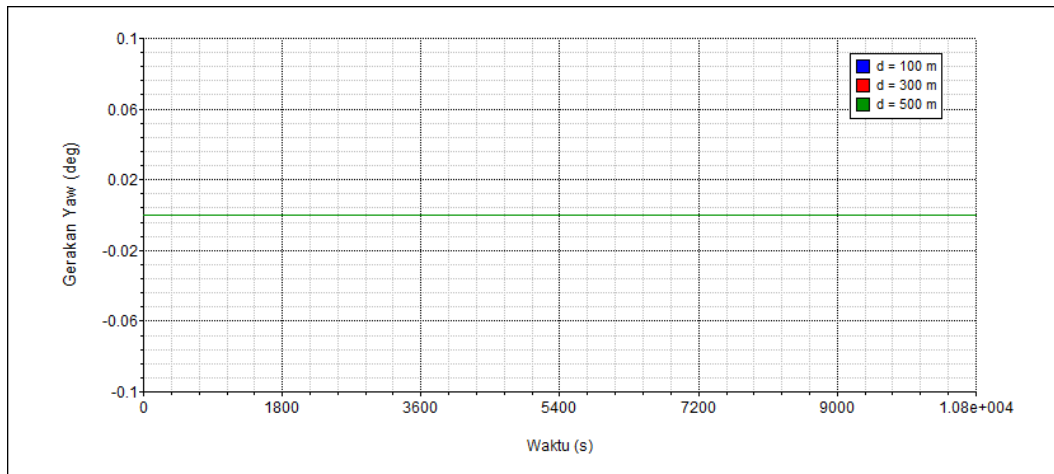
Respon *pitch* akibat gaya orde-2 hanya memiliki satu jenis respon, yaitu respon orde-1 dengan periode pendek, sama halnya yang dijumpai pada respon gerakan vertikal lainnya (*heave* dan *roll*). Begitu juga yang dijumpai pada gerakan *heave* dan *roll*, variasi kedalaman perairan tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada respon gerak *pitch*. Berdasarkan Gambar 4-98 terlihat bahwa respon *pitch* tanker memiliki amplitudo relatif pada variasi kedalaman perairan yang berbeda-beda.



Gambar 4-98 Respon pitch akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (**segmentasi chain-wire rope**)

4.7.5.6 Respon Yaw Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

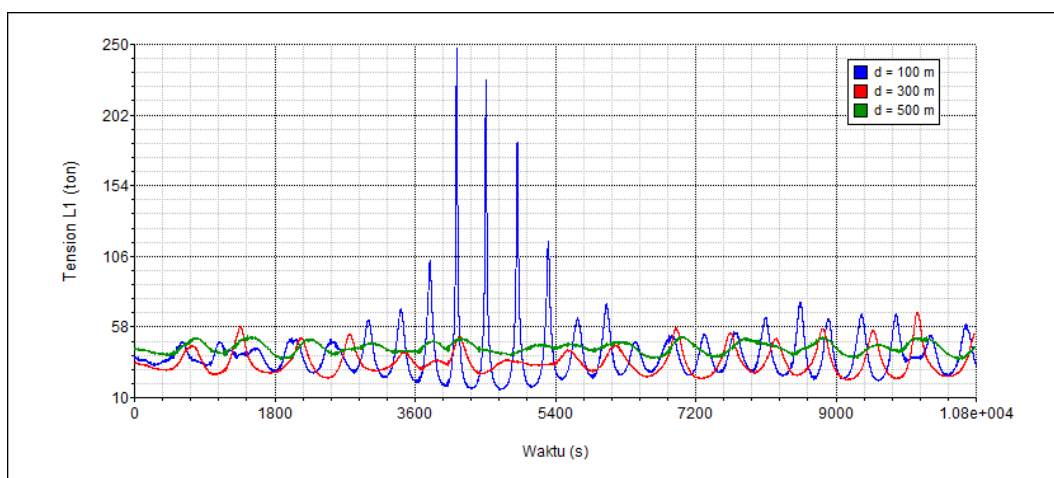
Respon *yaw* yang ditunjukkan pada Gambar 4-99 memiliki harga yang mendekati nol, karena arah gerakannya tidak searah dengan arah datangnya gaya lingkungan, seperti halnya gerakan *sway* dan *roll* yang telah dibahas sebelumnya.



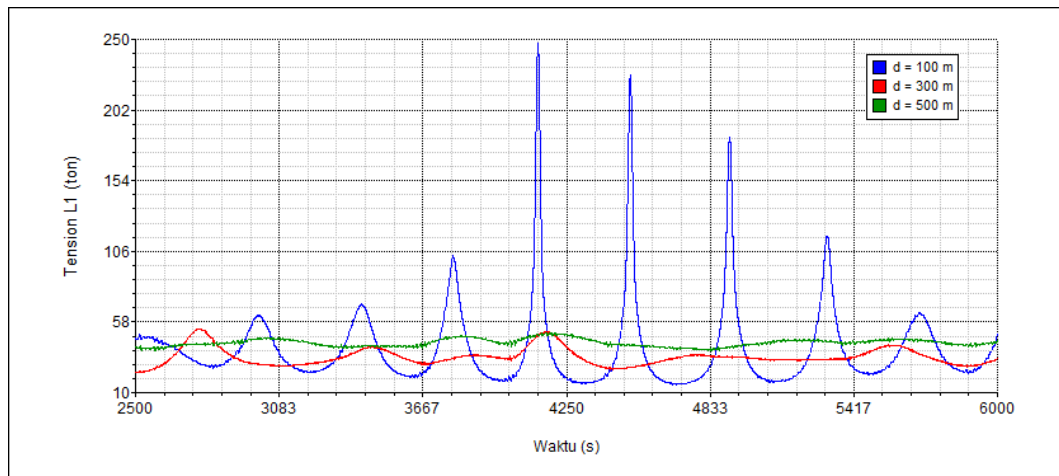
Gambar 4-99 Respon yaw akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (segmentasi *chain-wire rope*)

4.7.6 Tension Tali Tambat Akibat Gaya Orde-2 terhadap Variasi Kedalaman (Segmentasi *Chain-Wire Rope*)

Tali tambat yang ditinjau merupakan tali tambat yang berhadapan langsung dengan gaya lingkungan (L1). Tension L1 akibat gaya orde-2 disajikan dalam Gambar 4-100a dan Gambar 4-100b berikut ini.



(a)



(b)

Gambar 4-100 Tension tali tambat L1 akibat gaya orde-2 terhadap variasi kedalaman perairan (a). Tension L1 jika ditinjau pada detik ke-2000 s.d. 7000 (b) (**segmentasi chain-wire rope**)

Berdasarkan Gambar 4-100a dan 4-100b dapat dilihat bahwa kenaikan kedalaman perairan menyebabkan kenaikan tension pada tali tambat L1. Namun jika diperhatikan dengan seksama pada detik ke-2500 s.d. 1000 terlihat bahwa tension L1 pada kondisi kedalaman 100 m memberikan tension yang paling besar dibandingkan dengan dua kondisi kedalaman lainnya. Hal ini disebabkan karena pada saat kondisi kedalaman 100 m, tali tambat relatif lebih pendek dan respon kapal yang belum sembat kembali di posisi equilibriumnya sudah terkena gelombang lagi sehingga tension tali tambat menjadi relatif lebih besar.

Jika dibandingkan dengan material *chain* pada pembahasan sebelumnya, terlihat bahwa tension maksimum *chain* akibat gaya orde-2 dengan kondisi kedalaman perairan 500 m memiliki harga sekitar 130 ton, sedangkan pada *chain-wire rope* sebesar 50 ton. Hal ini menunjukkan bahwa tension pada *chain* cenderung lebih besar dibandingkan tension pada *chain-wire rope*, dengan skala perbandingan sekitar 3 : 1.

4.8 ANALISIS PENGARUH KEDALAMAN PERAIRAN TERHADAP RESPON STRUKTUR TERTAMBAT

Simulasi yang dilakukan pada **Sub bab 4.6 dan 4.7** mendemonstrasikan sistem tertambat pada kondisi kedalaman perairan yang berbeda-beda, mulai dari kedalaman 100, 300 dan 500 meter. Berdasarkan simulasi yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa variasi kedalaman perairan tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan baik pada gaya orde-1 maupun orde-2. Namun memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada respon gerakan struktur tertambat dan tension tali tambatnya. Berikut rangkuman respon beserta tension tali tambat dapat dilihat pada Tabel 4-27.

Tabel 4-27 Respon struktur tertambat dan tension tali tambat pada kondisi kedalaman perairan 100, 300 dan 500 m

No	Parameter (harga max)	Unit	Pengaruh Gaya yang Bekerja	Kedalaman Perairan (m)		
				100	300	500
1	Respon <i>Surge</i>	m	Orde-1	-46,31	-50,58	-53,69
			Orde-2	-58,74	-71,76	-79,70
2	Respon <i>Sway</i>	m	Orde-1	0,00	0,00	0,00
			Orde-2	0,00	0,00	0,00
3	Respon <i>Heave</i>	m	Orde-1	-18,19	-18,23	-18,24
			Orde-2	-17,01	-17,01	-17,02
4	Respon <i>Roll</i>	deg	Orde-1	0,00	0,00	0,00
			Orde-2	0,00	0,00	0,00
5	Respon <i>Pitch</i>	deg	Orde-1	0,65	0,67	0,68
			Orde-2	0,01	0,01	0,01
6	Respon <i>Yaw</i>	deg	Orde-1	0,00	0,00	0,00
			Orde-2	0,00	0,00	0,00
7	Tension L1	ton	Orde-1	46,38	74,47	209,76
			Orde-2	247,00	96,00	232,00

Meninjau Tabel 4-27 terlihat bahwa respon yang cukup signifikan dipengaruhi oleh arah gaya *headseas* (180 deg) adalah respon gerakan *surge*, *heave* dan *pitch*, serta tension L1, karena respon tersebut memiliki arah yang sama dengan arah datangnya gaya lingkungan. Sedangkan respon lainnya, misalkan *sway*, *roll* dan *yaw* memiliki harga yang mendekati 0,00 karena arah responnya tidak searah dengan arah datangnya gaya lingkungan.

Jika diperhatikan dengan seksama, maka akan terlihat bahwa setiap penambahan kedalaman perairan sekitar 200m memberikan kenaikan pada respon *surge* akibat gaya orde-1 sebesar 5 – 9% atau sekitar 2 – 5 meter, dan akibat gaya orde-2 sebesar 9 – 19% atau sekitar 7 – 12 meter. Penambahan kedalaman perairan juga menyebabkan kenaikan pada respon *heave* dan *pitch*, namun pengaruhnya cenderung kecil, yaitu tidak lebih dari 0,06% atau sekitar 0,01 meter. Penambahan kedalaman perairan juga menaikkan tension pada tali tambat sebesar 60 - 65% atau sekitar 28 - 135 ton akibat gaya orde-1 dan mencapai sekitar 75% atau sekitar 152 ton saat dikenai gaya orde-2. Penambahan kedalaman perairan juga menaikkan tension pada tali tambat sebesar 60 - 65% atau sekitar 28 - 135 ton akibat gaya orde-1 dan mencapai sekitar 75% atau sekitar 152 ton saat dikenai gaya orde-2.

Perilaku ini menunjukkan bahwa variasi kedalaman perairan memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap respon gerakan *surge* dan tension terbesar akibat fenomena gerakan seret (*drifting*).

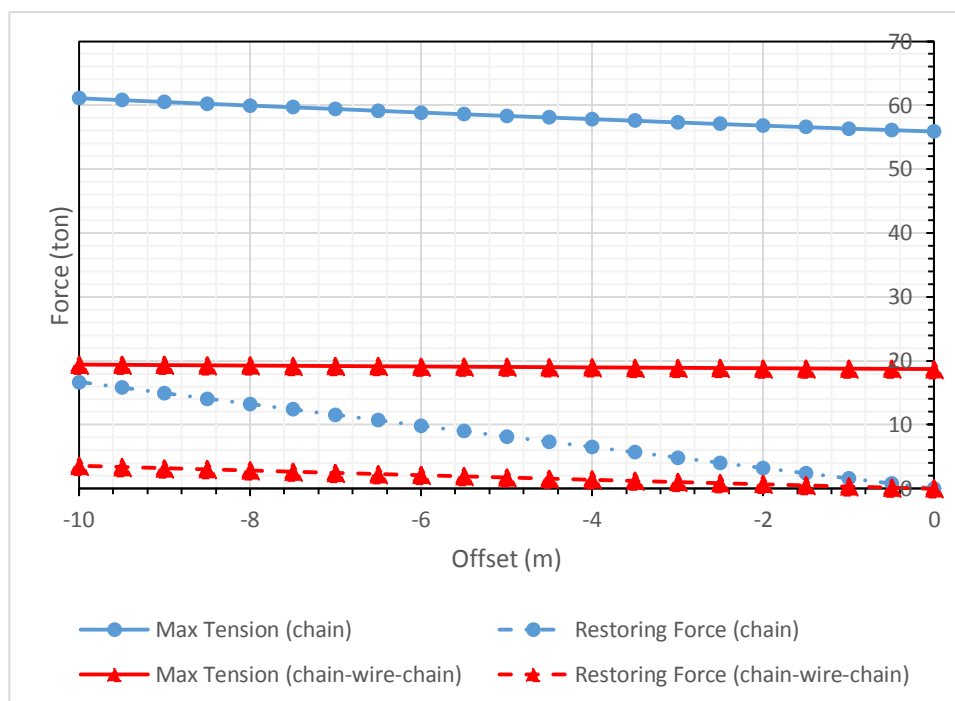
4.9 ANALISIS PENGARUH PENGGUNAAN TALI TAMBAT *CHAIN VS WIRE ROPE*

Berdasarkan analisis pada **Sub bab 4.6 dan 4.7** mengenai respon struktur tertambat menggunakan material *chain* (Sub bab 4.6) dan kombinasi *chain-wire rope-chain* (Sub bab 4.7) didapatkan kesimpulan bahwa penggunaan material kombinasi (*chain-wire rope chain*) pada tali tambat menghasilkan tension yang lebih kecil dibandingkan dengan tension yang dihasilkan oleh *chain*. Namun jika ditinjau dari eskursi (jarak offset) gerakan *surge*, material kombinasi menghasilkan eskursi gerakan *surge* lebih tinggi jika dibandingkan dengan material *chain* (**Lihat Tabel 4-28**).

Tabel 4-28 Tension dan eskursi pada material tali tambat chain dan kombinasi (kedalaman perairan 300 m)

No	Kondisi Pembebanan	Eskursi Max(Offset Surge) meter		Tension Max ton	
		<i>Chain</i>	<i>Chain-wire</i>	<i>Chain</i>	<i>Chain-wire</i>
1	Akibat Gaya Orde-1	●	● ●	● ●	●
2	Akibat Gaya Orde-2	●	● ●	● ● ●	●

Meninjau Tabel 4-28 dapat diketahui bahwa perbandingan eskursi surge untuk material chain dan kombinasi, baik akibat gaya orde-1 dan orde 2 adalah sekitar 1 : 2. Sedangkan perbandingan tension tali tambat antara chain dan kombinasi akibat gaya orde-1 adalah 2 : 1, sedangkan akibat gaya orde-2 sekitar 3 : 1. Fenomena ini terjadi karena sifat dasar masing-masing material, material kombinasi cenderung memiliki perpanjangan (*elongation*) yang lebih tinggi, karena terdiri dari material *wire rope* (lebih elastis), sehingga akan menerima tension yang lebih kecil. Berikut merupakan ilustrasi tension, offset dan *restoring force* dari material *chain* yang dibandingkan dengan material kombinasi yang ditunjukkan pada Gambar 4-101. Kurva dengan warna biru menunjukkan karakteristik material *chain* dan kurva merah menunjukkan karakteristik material kombinasi.



Gambar 4-101 Grafik hubungan offset, tension dan restoring force material chain dan kombinasi

Berdasarkan Gambar 4-101 dapat dilihat bahwa untuk menghasilkan offset sebesar -10 meter dibutuhkan tension sebesar 60 ton untuk material *chain* dan 20 ton untuk material kombinasi. *Restoring force* material kombinasi memiliki harga yang cenderung lebih rendah daripada *restoring force* material *chain*, hal ini terjadi karena material kombinasi cenderung lebih fleksibel dibandingkan material *chain*.

BAB 5

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Analisis mengenai pengaruh gaya orde-2 terhadap struktur apung tertambat dilakukan dengan mensimulasikan kapal tanker Aframax 120.000 DWT yang ditambatkan dengan sistem external turret mooring konfigurasi enam tali catenary. Simulasi ditinjau pada daerah operasi ladang “*Western Isles*”, Utara North Sea dengan H_s mencapai 10m. Berdasarkan simulasi tersebut didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Karakteristik gerakan struktur apung tertambat akibat eksitasi gaya gelombang orde-1

Berdasarkan analisis dalam domain waktu yang diselesaikan secara simultan (*time domain coupled analysis*) didapatkan kesimpulan bahwa gerakan/respon struktur apung tertambat memiliki dua komponen, yaitu respon orde-1 dan respon orde-2. Respon yang cukup signifikan saat dikenai gaya lingkungan dari arah haluan (*heading 180 deg*) adalah respon *surge*. Amplitudo respon *surge* akibat gaya orde-1 dengan H_s mencapai 10 meter adalah sekitar 2,00 meter.

Dengan meninjau respon spektra masing-masing gerakan (densitas spektra gerakan) akibat eksitasi gaya gelombang orde-1, dapat disimpulkan bahwa karakteristik gerakannya memiliki periode sekitar 5 – 32 detik dimana masih berada pada kisaran periode gelombang orde-1, yaitu sekitar 3 – 20 detik.

2. Karakteristik gerakan struktur apung tertambat akibat eksitasi gaya gelombang orde-2

Karakteristik gerakan struktur apung tertambat akibat eksitasi gaya gelombang orde-2 yang cukup signifikan juga ditemukan pada respon gerakan *surge*. Berbeda dengan respon gerak yang dipengaruhi oleh gaya gelombang orde-1, respon yang terjadi akibat pengaruh gaya orde-2 hanya menghasilkan respon orde-2. Masih meninjau responnya dalam domain waktu, dapat dilihat bahwa respon orde-2 memiliki periode yang relatif lebih panjang yaitu sekitar 360 detik.

Berdasarkan densitas spektra gerakan akibat eksitasi gaya gelombang orde-2, dapat disimpulkan bahwa karakteristik gerakannya memiliki puncak spektra pada periode sekitar 63 detik dimana frekuensi tersebut berada pada kisaran periode gelombang orde-2, seperti halnya yang dijelaskan oleh Faltinsen (1990).

Analisis perbandingan gaya, respon dan tension tali tambat antara pengaruh orde-1 dan orde-2 didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

- Gaya/Momen 6 *Degree of Freedom* (DOF) Orde-1 dan Orde-2

Gaya/momen 6 DOF yang terdiri dari gaya : *surge*, *sway*, *heave*, momen : *roll*, *pitch* dan *yaw* orde-1 memiliki intensitas yang cukup besar, dibandingkan dengan gaya/momen orde-2 yang relatif kecil. Pada kasus arah gaya lingkungan berasal dari haluan kapal (*headseas*, 180 deg), gaya yang terpengaruh cukup signifikan adalah gaya *surge*, *heave* dan momen *pitch*. Gaya *surge* terbesar akibat orde-1 mencapai sekitar 105409 kN dan akibat orde-2 sekitar 1575 kN, sehingga rasio perbandingannya mencapai sekitar 67 : 1

- Respon Struktur Tertambat akibat Gaya Orde-1 dan Orde-2

Walaupun gaya orde-2 memiliki intensitas yang cukup kecil namun pada struktur tertambat mampu membangkitkan responnya secara signifikan. Hal ini terjadi karena gaya orde-2 memiliki frekuensi yang cenderung rendah, dan berada pada kisaran frekuensi alami struktur tertambat saat bergerak horizontal (*surge*, *sway* dan *yaw*), sehingga terjadi resonansi.

Amplitudo respon *surge* akibat gaya orde-1 dengan H_s mencapai 10 meter adalah sekitar 2,00 meter, sedangkan orde-2 menghasilkan sekitar 23,00 meter, sehingga rasio perbandingannya sekitar 1 : 11.

- Tension Tali Tambat akibat Gaya Orde-1 dan Orde-2

Perilaku yang sama juga diamati terjadi pada tension tali tambat, dimana tension tali tambat yang dikenai gaya orde-2 menghasilkan intensitas yang relatif lebih besar dan memiliki periode panjang dibandingkan saat dikenai gaya orde-1. Hal ini dikarenakan oleh fenomena gerakan seret (*drifting*) dalam mode gerakan *surge*. Mengingat gerakan horizontalnya cukup tinggi maka tension tali tambat yang searah dengan gerakannya juga akan menjadi tinggi. Amplitudo

tension akibat orde-1 mencapai 7,5 ton dan akibat orde-2 sekitar 117,5 ton sehingga rasio perbandingannya mencapai 1 : 15.

- Pengaruh Kenaikan Tinggi Gelombang terhadap Respon Struktur Tertambat
Analisis kenaikan tinggi gelombang signifikan dengan mempertimbangkan pengaruh gaya orde-1 menghasilkan kenaikan gaya 6 DOF beserta responnya dengan pola linier. Hal ini mengindikasikan bahwa kenaikan gaya orde-1 proporsional terhadap kenaikan tinggi gelombang. Berbeda halnya dengan gaya 6 DOF dan respon struktur tertambat akibat pengaruh orde-2. Gaya dan respon yang dihasilkan membentuk pola yang cenderung naik dengan pola kurva non-linier kuadrat. Hal ini mengindikasikan bahwa gaya orde-2 proporsional dengan harga kuadrat kenaikan tinggi gelombang.

3. Pengaruh kedalaman perairan terhadap respon struktur tertambat yang dikenai gaya gelombang orde-2

Kedalaman perairan tidak berpengaruh cukup signifikan terhadap gaya/momen 6 DOF, tetapi berpengaruh pada respon struktur dan tali tambatnya. Hal ini terjadi karena faktor panjang tali tambat yang berbeda pada masing-masing kedalamannya, sehingga massa dan kekakuan tali tambatnya juga menjadi berbeda.

Setiap penambahan kedalaman perairan sekitar 200m memberikan kenaikan pada respon *surge* akibat gaya orde-1 sebesar 5 – 9% atau sekitar 2 – 5 meter, dan akibat gaya orde-2 sebesar 9 – 19% atau sekitar 7 – 12 meter. Penambahan kedalaman perairan juga menyebabkan kenaikan pada respon *heave* dan *pitch*, namun pengaruhnya cenderung kecil, yaitu tidak lebih dari 0,06% atau sekitar 0,01 meter. Penambahan kedalaman perairan juga menaikkan tension pada tali tambat sebesar 60 - 65% atau sekitar 28 - 135 ton akibat gaya orde-1 dan mencapai sekitar 75% atau sekitar 152 ton saat dikenai gaya orde-2. Perilaku ini menunjukkan bahwa variasi kedalaman perairan memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap respon gerakan *surge* dan tension terbesar akibat fenomena gerakan seret (*drifting*).

5.2 SARAN

Diharapkan kelanjutan penelitian ke depannya dapat dilakukan dengan turut mempertimbangkan hal-hal seperti berikut :

1. Peninjauan terhadap arah datang gaya lingkungan *non-collinear* untuk mengetahui gaya dan respon struktur tertambat
2. Peninjauan terhadap redaman non-linear (*non-linear damping*) dari struktur tertambat
3. Signifikansi pengaruh sistem tertambat lengkap, seperti keberadaan *riser*, *clump*, *buoyancy element* dan *offloading tanker* (tinjauan mengenai *multibody effect*) terhadap respon orde-2
4. Peninjauan terhadap kekuatan tali tambat dengan acuan *limit state* yang berlaku : ULS (*Ultimate Limit State*), ALS (*Accidental Limit State*) dan FLS (*Fatigue Limit State*)

A. Perhitungan berat lambung dan COGnya

Perhitungan berat lambung

$$W_{st} = 23460.28 \text{ ton}$$

$$L_{pp} = 248.848 \text{ m}$$

$$B = 43 \text{ m}$$

$$D = 22.4 \text{ m}$$

$$T = 17 \text{ m}$$

$$C_b = 0.825$$

$$f_1 = 21 \% \quad (\text{pengurangan berat dengan penggunaan baja high tensile, Okumoto, 2009})$$

Cudina et al (2010)

(Tankers and Bulk-Carriers)

$$W_H = \left(1 - \frac{f_1}{100}\right) \left\{ 0.0282 [L_{pp} \cdot (B + 0.85D + 0.15T)]^{1.36} \left[1 + 0.5 \left[(C_b - 0.7) + (1 - C_b) \frac{0.8D - T}{3} T \right] \right] + 450 \right\}$$

Okumoto et al (2009) Design of Ship Hull Structures

From the above, it can be said that the non-buckling design with existing scantling will bring better ultimate strength by 43% ($100/70 = 1.43$), which means a 30% area reduction of the longitudinal members while keeping existing strength. Then the total hull steel weight can be reduced by 21–24% ($0.7 \times 0.3 = 0.21$, $0.8 \times 0.3 = 0.24$).

Perhitungan *Center of Gravity* Lambung**VCG_{st}**

$$\text{VCG}_{st} = 10.25 \text{ m}$$

dengan,

$$\text{Lpp} = 248.848 \text{ m}$$

$$B = 43 \text{ m}$$

$$D = 22.4 \text{ m}$$

$$T = 17 \text{ m}$$

$$Cb = 0.825$$

LCG_{st}

$$\text{LCG}_{st} = 120.63 \text{ m}$$

$$\text{LCB} = 120.48 \text{ m} \quad (\text{from bow})$$

TCG_{st}

$$\text{TCG}_{st} = 0 \text{ m}$$

Steel (Kupras)

$$KG_{s1} = 0.01D \left[46.6 + 0.135(0.81 - Cb)(L/D)^2 \right] + 0.008D(L/B - 6.5) \quad L \geq 120 \text{ m}$$

- ✓ Kupras, L. K. (1976), "Optimisation Method and Parametric Design in Precontracted Ship Design", International Shipbuilding Progress.

Preliminary Ship Design Parameter Estimation

The longitudinal position of the basic hull weight will typically be slightly aft of the LCB position. Waston gives the suggestion:

$$\text{LCG}_{hull} = -0.15 + \text{LCB}$$

B. Perhitungan berat *super structure* dan COGnya

Lampiran A

Perhitungan Center of Gravity dan Radius Girasi

Yuni Ari Wibowo

Perhitungan berat *super structure*

$$W_{SPS} = W_U \cdot A$$

$$W_{sps} = 2327.17 \text{ ton}$$

$$W_u = 0.225 \text{ t/m}^2$$

$$A = 10342.96 \text{ m}^2 \quad (\text{Area of super structure deck})$$

Perhitungan *Center of Gravity Super Structure*

VCG_{sps}

$$VCG_{sps} = 31.08 \text{ m}$$

LCG_{sps}

$$LCG_{sps} = 222.88 \text{ m}$$

TCG_{sps}

$$TCG_{sps} = 0 \text{ m}$$

Ventura (lecturer slide)

Estimating Methods for Basic Ship Design

- Can be obtained as a function of the hull weight (P_c) and the type of ship:
 - Cargo liners - $W_{sps} = 10 \sim 12 \% P_c$
 - Tankers - $W_{sps} = 6 \sim 8 \% P_c$
 - Bulk carriers - $W_{sps} = 6 \sim 7 \% P_c$
- When the arrangement of the superstructures is already known, a criteria based in the average weight per unit area (W_u) can be used, assuming that the corresponding height of the decks is equal to 2.40 m.

$$W_{SPS} = W_U \cdot A$$

with:

A - covered area of decks

$W_u = 190 \text{ kg/m}^2$ (castles)

$W_u = 210 \text{ kg/m}^2$ (superstructures amidships)

$W_u = 225 \text{ kg/m}^2$ (superstructures aft)

C. Perhitungan berat peralatan (*equipment*) dan COGnya

Perhitungan berat peralatan

$$W_e = 1352.433 \text{ ton}$$

$$L_{pp} = 248.848 \text{ m}$$

$$B = 43 \text{ m}$$

$$D = 22.4 \text{ m}$$

$$T = 17 \text{ m}$$

$$C_b = 0.825$$

Cudina et al (2010)

$$W_E = \left(0.28 - \frac{L_{pp}}{1620} \right) \cdot L_{pp} \cdot B \quad (\text{Tankers and Bulk-Carriers})$$

Perhitungan *Center of Gravity* Peralatan

VCG_n

$$VCG_n = 23.65 \text{ m}$$

Cudina, P.; Zanic, V. and Preberg, P. (2010), "Multiattribute Decision Making Methodology in the Concept Design of Tankers and Bulk-Carriers", 11th Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, PRADS.

LCG_s

$$LCG_s = 120.48 \text{ m}$$

Equipment (Kupras)

$$KG_E = D + 1.25 \quad p/ \quad L \leq 125 \text{ m}$$

$$KG_E = D + 1.25 + 0.01(L - 125) \quad p/ \quad 125 \leq L < 250 \text{ m}$$

$$KG_E = D + 2.50 \quad p/ \quad L \geq 250 \text{ m}$$

TCG_s

$$LCG_s = 0 \text{ m}$$

D. Perhitungan berat permesinan (*machinery*) dan COGnya

Lampiran A

Perhitungan Center of Gravity dan Radius Girasi

Yuni Ari Wibowo

Perhitungan berat permesinan

$$W_m = 554.66 \text{ ton} \quad (12 \text{ cylinders})$$

12 cylinders

$$\text{MCR} = 2500 \text{ kw} \quad (4 \text{ cylinders})$$

$$\text{RPM} = 150 \text{ RPM}$$

Perhitungan *Center of Gravity* Permesinan

VCG_h

$$VCG_h = 9.70 \text{ m}$$

$$h_{DB} = 2.87 \text{ m} \quad (\text{Tanker's standard height of double bottom})$$

$$D = 22.4 \text{ m} \quad (\text{Depth of Ship})$$

LCG_s

$$LCG_s = 224.21 \text{ m}$$

TCG_s

$$LCG_s = 0 \text{ m}$$

D. G. M. Waston and A.W. Gilfillan, some ship Design Methods' RINA, 1977.

Watson and Gilfillan

$$W_m (\text{diesel}) = \sum_i 12 [MCR_i / RPM_i]^{0.84} + \text{Auxiliary wt.}$$

Auxiliary weight = $0.69 (\text{MCR})^{0.7}$ for bulk and general cargo vessel

$$= 0.72 (\text{MCR})^{0.7} \text{ for tankers}$$

$$= 0.83 (\text{MCR})^{0.7} \text{ for passenger ships and ferries}$$

$$= 0.19 \text{ for frigates and Convettors}$$

MCR is in kw and RPM of the engine

Machinery (Watson and Gilfillan)

$$KG_M = h_{DB} + 0.35(D - h_{DB}) \quad \text{in which } h_{DB} - \text{height of double-bottom}$$

E. Perhitungan Berat Lightship dan COG Lightship

Tabel Berat dan COG Aframax 120.000 DWT (Kondisi : Lightship)

No	Bangunan dan peralatan	Volume (m ³)	density (ton/m ³)	Berat (ton)	Panjang Lengan COG			Moment		
					x	y	z	x	y	z
	Topside :									
1	W _{st} (berat baja lambung)			23460.28	120.63	0.00	10.25	2830013.89	0.00	240577.64
2	W _{sps} (berat super structure)			2327.17	222.88	0.00	31.08	518678.63	0.00	72328.30
3	W _e (berat peralatan)			1352.43	120.48	0.00	23.65	162941.12	0.00	31985.04
4	W _m (Berat permesinan)			554.66	224.21	0.00	9.70	124361.35	0.00	5382.10

Σberat	27694.55 ton		Σmomen	3635994.99	0.00	350273.08
			COG baru dari titik 0,0,0	131.29	0.00	12.65
				dalam meter		

F. Perhitungan *Center of Gravity* Kapal Muatan Full

Yuni Ari Wibowo

Tabel Berat dan COG Aframax 120.000 DWT Kondisi Muatan FULL

No	Bangunan dan peralatan	Volume (m ³)	density (ton/m ³)	Berat (ton)	Panjang Lengan COG			Moment		
					x	y	z	x	y	z
	Lightship									
				27694.55	131.29	0.00	12.65	3635994.99	0.00	350273.08
	Loadings :									
1	Tank 1 (petroleum)	30867.41	0.80	24693.93	41.25	0.00	12.00	1018624.53	0.00	296327.14
2	Tank 2 (petroleum)	49784.20	0.80	39827.36	93.89	0.00	12.00	3739390.64	0.00	477928.30
3	Tank 3 (petroleum)	49784.20	0.80	39827.36	146.79	0.00	12.00	5846257.88	0.00	477928.30
4	Tank 4 (petroleum)	29853.69	0.80	23882.95	190.43	0.00	12.00	4548030.68	0.00	286595.43
5	Ballast 1 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	8.94	20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
6	Ballast 2 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	41.26	20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
7	Ballast 3 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	93.90	20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
8	Ballast 4 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	146.79	20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
9	Ballast 5 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	190.43	20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
10	Ballast 6 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	222.12	20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
11	Ballast 7 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	8.94	-20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
12	Ballast 8 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	41.26	-20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
13	Ballast 9 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	93.90	-20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
14	Ballast 10 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	146.79	-20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
15	Ballast 11 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	190.43	-20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
16	Ballast 12 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	222.12	-20.49	0.87	0.00	0.00	0.00
17	Ballast 13 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	8.94	0.00	13.33	0.00	0.00	0.00
18	Ballast 14 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	41.26	0.00	13.33	0.00	0.00	0.00
19	Ballast 15 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	93.90	0.00	13.33	0.00	0.00	0.00
20	Ballast 16 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	146.79	0.00	13.33	0.00	0.00	0.00
21	Ballast 17 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	190.43	0.00	13.33	0.00	0.00	0.00
22	Ballast 18 (ballast water)	0.00	1.03	0.00	222.12	0.00	13.33	0.00	0.00	0.00

Σberat	155926.14 ton		Σmomen	18788298.72	0.00	1889052.24
			COG baru dari titik 0,0,0	120.49	0.00	12.12
				dalam meter		

Sarat 17 m

G. Perhitungan *Center of Gravity* Kapal Muatan Ballast

Yuni Ari Wibowo

Tabel Berat dan COG Aframax 120.000 DWT Kondisi Muatan Ballast

No	Bangunan dan peralatan	Volume (m ³)	density (ton/m ³)	Berat (ton)	Panjang Lengan COG			Moment		
					x	y	z	x	y	z
	Lightship									
				27694.55	131.29	0.00	12.65	3635994.99	0.00	350273.08
	Loadings :									
1	Tank 1 (petroleum)	3086.74	0.80	2469.39	41.25	0.00	1.44	101862.45	0.00	3543.58
2	Tank 2 (petroleum)	4978.42	0.80	3982.74	93.89	0.00	1.44	373939.06	0.00	5715.23
3	Tank 3 (petroleum)	4978.42	0.80	3982.74	146.79	0.00	1.44	584625.79	0.00	5715.23
4	Tank 4 (petroleum)	2985.37	0.80	2388.30	190.43	0.00	1.44	454803.07	0.00	3427.20
5	Ballast 1 (ballast water)	795.24	1.03	815.12	8.94	20.49	0.87	7287.14	16701.73	709.15
6	Ballast 2 (ballast water)	2796.89	1.03	2866.81	41.26	20.49	0.87	118284.59	58740.94	2494.12
7	Ballast 3 (ballast water)	2796.89	1.03	2866.81	93.90	20.49	0.87	269193.47	58740.94	2494.12
8	Ballast 4 (ballast water)	2796.89	1.03	2866.81	146.79	20.49	0.87	420819.06	58740.94	2494.12
9	Ballast 5 (ballast water)	1818.14	1.03	1863.59	190.43	20.49	0.87	354883.47	38184.96	1621.32
10	Ballast 6 (ballast water)	1606.96	1.03	1647.13	222.12	20.49	0.87	365861.52	33749.79	1433.01
11	Ballast 7 (ballast water)	795.24	1.03	815.12	8.94	-20.49	0.87	7287.14	-16701.73	709.15
12	Ballast 8 (ballast water)	2796.89	1.03	2866.81	41.26	-20.49	0.87	118284.59	-58740.94	2494.12
13	Ballast 9 (ballast water)	2796.89	1.03	2866.81	93.90	-20.49	0.87	269193.47	-58740.94	2494.12
14	Ballast 10 (ballast water)	2796.89	1.03	2866.81	146.79	-20.49	0.87	420819.06	-58740.94	2494.12
15	Ballast 11 (ballast water)	1818.14	1.03	1863.59	190.43	-20.49	0.87	354883.47	-38184.96	1621.32
16	Ballast 12 (ballast water)	1606.96	1.03	1647.13	222.12	-20.49	0.87	365861.52	-33749.79	1433.01
17	Ballast 13 (ballast water)	1422.65	1.03	1458.22	8.94	0.00	13.33	13036.48	0.00	19438.06
18	Ballast 14 (ballast water)	5003.55	1.03	5128.64	41.26	0.00	13.33	211607.62	0.00	68364.75
19	Ballast 15 (ballast water)	5003.55	1.03	5128.64	93.90	0.00	13.33	481579.14	0.00	68364.75
20	Ballast 16 (ballast water)	5003.55	1.03	5128.64	146.79	0.00	13.33	752832.82	0.00	68364.75
21	Ballast 17 (ballast water)	3252.59	1.03	3333.91	190.43	0.00	13.33	634876.01	0.00	44440.99
22	Ballast 18 (ballast water)	2874.80	1.03	2946.67	222.12	0.00	13.33	654515.42	0.00	39279.18

Σberat	89494.96 ton	Σmomen	10972331.37	0.00	699418.49
		COG baru dari titik 0,0,0	122.60	0.00	7.82
			dalam meter		

Sarat 10.2 m

H. Perhitungan Radius Girasi Kapal Muatan Full & Ballast

Kondisi Muatan FULL

$$\begin{aligned} Lwl &= 252.488 \text{ m} \\ B &= 43 \text{ m} \\ KG &= 12.12 \text{ m} \end{aligned}$$

$$K_{xx} = 0,29 * B (1 + (2 KG/B)^2)$$

$$K_{xx} = 16.42949 \text{ m}$$

$$K_{yy} = K_{zz} = \text{SQRT}(1/12)*L$$

$$K_{yy} = K_{zz} = 72.88701 \text{ m}$$

Kondisi Muatan BALLAST

$$\begin{aligned} Lwl &= 243.262 \text{ m} \\ B &= 43 \text{ m} \\ KG &= 7.82 \text{ m} \end{aligned}$$

$$K_{xx} = 0,29 * B (1 + (2 KG/B)^2)$$

$$K_{xx} = 14.11766 \text{ m}$$

$$K_{yy} = K_{zz} = \text{SQRT}(1/12)*L$$

$$K_{yy} = K_{zz} = 70.22369 \text{ m}$$

Bureau Veritas :

- Radius girasi *roll*

$$k_{xx} = 0,289 * B * \left(1,0 + \left(\frac{2 \overline{KG}}{B} \right)^2 \right)$$

- Radius girasi *pitch* = radius girasi *yaw*

$$k_{yy} = k_{zz} = \sqrt{\frac{1}{12}} L$$

dengan,

B = lebar kapal (meter)

\overline{KG} = jarak *keel to gravity* (meter)

L = *Length of Water Line* (meter)

Input MOSES : Model Tanker Aframax 120.000 DWT

```

$ AFRA.DAT
$ Model      : Tanker Aframax 120.000 DWT
$ Created by : Yuni Ari Wibowo
$ NRP       : 4114 201 001
$
$*****
$-----factors for dimensions-----
&dimen -save -dimen meters m-tons
$
$*****
$----- VESSEL DEFINITION-----
$
&DESCRIBE BODY aframax
$
$-----
$
pgen B -perm 1.0 -loc 0 0 0 -difftype 3ddif
plane  -1.144 -cart  0      23.409 \
          0.5      23.441 \
          1        23.518 \
          2.49     23.99  \
plane  0      -cart  0      21.73  \
          0.5     21.801 \
          1       21.932 \
          4       23.525 \
          4.62    23.958 \
plane  1      -cart  0      19.768 \
          0.5     19.892 \
          1       20.094 \
          4       22.099 \
          6.225   23.915 \
plane  2      -cart  0      17.781 \
          0.5     17.966 \
          1       18.25  \
          4       20.667 \
          7       23.329 \
          7.562   23.867 \
plane  3      -cart  0      15.265 \
          0.5     15.681 \
          1       16.209 \
          4       19.173 \
          7       22.014 \
          8.785   23.815 \
plane  3.486 -cart  0      0.079  \
          0.5     0.198  \
          0.945   0.5    \
          1       0.547  \
          1.456   1      \
          1.847   1.5    \
          2.156   2      \
          2.896   4      \
          2.915   6      \
          2.472   7.6    \
          2.346   8      \
          1.877   9.489  \
          1       11.874 \
          0.741   14     \
          1       14.878 \
          4       18.4    \
          7       21.358 \
          9.356   23.787 \
plane  6      -cart  0      0      \
          0.5     0      \
          0.614   0      \
          1       0.083  \
          1.948   0.5    \
          2.589   1      \
          3.102   1.5    \
          3.507   2      \
          4       2.809  \
          4.459   4      \
          4.646   6      \
          4.39    7.6    \
          4.313   8      \
          4.09    9.489  \
          4       10.394 \
          4       12.262 \
          4.469   14     \
          7       17.664 \
          10      21.213 \
          12.058  23.638 \
          plane  9      -cart  0      0      \
          0.5     0      \
          1       0      \
          1.498   0      \
          3.441   0.5    \
          4       0.804  \
          4.313   1      \
          4.958   1.5    \
          5.434   2      \
          6.575   4      \
          6.99    6      \
          7       6.127  \
          7.057   7.6    \
          7.064   8      \
          7.105   9.489  \
          8.196   14     \
          10      16.892 \
          14     22.521 \
          14.67   23.466 \
          plane  12     -cart  0      0      \
          0.5     0      \
          1       0      \
          2.515   0      \
          4       0.179  \
          5.11    0.5    \
          6.121   1      \
          6.855   1.5    \
          7       1.616  \
          7.428   2      \
          8.744   4      \
          9.367   6      \
          9.679   7.6    \
          9.741   8      \
          9.943   9.489  \
          10      9.972  \
          11.171  14     \
          14     18.964  \
          16.671  23.304 \
          plane  15     -cart  0      0      \
          0.5     0      \
          1       0      \
          3.672   0      \
          4       0.018  \
          6.796   0.5    \
          7       0.58  \
          7.883   1      \
          8.727   1.5    \
          9.403   2      \
          10     2.61  \
          10.846  4      \
          11.624  6      \
          12.055  7.6    \
          12.139  8      \
          12.415  9.485  \
          13.566  14     \
          14     15.018  \
          18     22.834  \
          18.16  23.146  \
          plane  18     -cart  0      0      \
          0.5     0      \
          1       0      \
          4       0      \
          4.978   0      \
          7       0.15  \
          8.465   0.5    \
          9.66    1      \
          10     1.172  \
          10.582  1.5    \
          11.296  2      \
          12.874  4      \
          13.749  6      \
          14     6.78  \
          14.212  7.6    \
          14.301  8      \
          14.591  9.477  \
          15.613  14     \
          18     20.117  \

```

			19	22.429	\				17.444	2	\
			19.235	22.988	\				18	2.605	\
plane	21	-cart	0	0	\				18.738	4	\
			0.5	0	\				19	5.118	\
			1	0	\				19.155	6	\
			4	0	\				19.421	7.6	\
			6.398	0	\				19.485	8	\
			7	0.026	\				19.706	9.465	\
			10	0.461	\				20	11.673	\
			10.128	0.5	\				20.283	14	\
			11.41	1	\				20.5	15.794	\
			12.36	1.5	\				21	20.125	\
			13.083	2	\				21.218	22.471	\
			14	2.885	\	plane	33	-cart	0	0	\
			14.761	4	\				0.5	0	\
			15.627	6	\				1	0	\
			16.07	7.6	\				4	0	\
			16.157	8	\				7	0	\
			16.442	9.469	\				10	0	\
			17.334	14	\				12.258	0	\
			18	16.545	\				14	0.124	\
			19	19.757	\				15.865	0.5	\
			20	22.796	\				17.139	1	\
			20.012	22.833	\				17.938	1.5	\
plane	24	-cart	0	0	\				18	1.548	\
			0.5	0	\				18.487	2	\
			1	0	\				19	2.678	\
			4	0	\				19.546	4	\
			7	0	\				19.891	6	\
			7.905	0	\				20	6.859	\
			10	0.135	\				20.093	7.6	\
			11.737	0.5	\				20.142	8	\
			13.055	1	\				20.312	9.465	\
			14	1.493	\				20.5	11.224	\
			14.012	1.5	\				20.768	14	\
			14.73	2	\				21	16.518	\
			16.393	4	\				21.377	22.414	\
			17.116	6	\	plane	36	-cart	0	0	\
			17.51	7.6	\				0.5	0	\
			17.594	8	\				1	0	\
			17.876	9.466	\				4	0	\
			18	10.189	\				7	0	\
			18.664	14	\				10	0	\
			19	15.765	\				13.501	0	\
			20	20.201	\				14	0.026	\
			20.5	22.359	\				16.962	0.5	\
			20.572	22.688	\				18	0.929	\
plane	27	-cart	0	0	\				18.129	1	\
			0.5	0	\				18.837	1.5	\
			1	0	\				19	1.652	\
			4	0	\				19.309	2	\
			7	0	\				20	3.341	\
			9.429	0	\				20.183	4	\
			10	0.024	\				20.476	6	\
			13.237	0.5	\				20.5	6.239	\
			14	0.763	\				20.631	7.6	\
			14.563	1	\				20.668	8	\
			15.501	1.5	\				20.8	9.465	\
			16.188	2	\				21	12.056	\
			17.708	4	\				21.134	14	\
			18	4.922	\				21.467	22.394	\
			18.25	6	\	plane	39	-cart	0	0	\
			18.583	7.6	\				0.5	0	\
			18.661	8	\				1	0	\
			18.925	9.465	\				4	0	\
			19	9.934	\				7	0	\
			19.615	14	\				10	0	\
			20	16.507	\				14	0	\
			20.5	19.533	\				14.607	0	\
			20.963	22.563	\				17.884	0.5	\
plane	30	-cart	0	0	\				18	0.543	\
			0.5	0	\				18.902	1	\
			1	0	\				19	1.066	\
			4	0	\				19.52	1.5	\
			7	0	\				19.919	2	\
			10	0	\				20	2.132	\
			10.895	0	\				20.5	3.328	\
			14	0.34	\				20.664	4	\
			14.617	0.5	\				20.908	6	\
			15.937	1	\				21	7.144	\
			16.817	1.5	\				21.035	7.6	\

			21.064	8	\			4	0	\	
			21.161	9.449	\			7	0	\	
			21.378	14	\			10	0	\	
			21.497	22.391	\			14	0	\	
plane	42	-cart	0	0	\			18	0	\	
			0.5	0	\			18.15	0	\	
			1	0	\			19	0.048	\	
			4	0	\			20	0.356	\	
			7	0	\			20.226	0.5	\	
			10	0	\			20.5	0.723	\	
			14	0	\			20.75	1	\	
			15.591	0	\			21	1.368	\	
			18	0.289	\			21.072	1.5	\	
			18.641	0.5	\			21.276	2	\	
			19	0.67	\			21.5	3.656	\	
			19.518	1	\			21.5	4	\	
			20	1.455	\			21.5	6	\	
			20.037	1.5	\			21.5	7.6	\	
			20.367	2	\			21.5	8	\	
			20.5	2.265	\			21.5	14	\	
			20.995	4	\			21.5	22.391	\	
			21	4.034	\	plane	58	-cart	0	0	\
			21.197	6	\			0.5	0	\	
			21.297	7.6	\			1	0	\	
			21.317	8	\			4	0	\	
			21.379	9.403	\			7	0	\	
			21.49	14	\			10	0	\	
			21.5	15.829	\			14	0	\	
			21.5	22.391	\			18	0	\	
plane	45	-cart	0	0	\			18.761	0	\	
			0.5	0	\			19	0.005	\	
			1	0	\			20	0.225	\	
			4	0	\			20.465	0.5	\	
			7	0	\			20.5	0.526	\	
			10	0	\			20.977	1	\	
			14	0	\			21	1.029	\	
			16.491	0	\			21.277	1.5	\	
			18	0.135	\			21.429	2	\	
			19	0.374	\			21.5	2.595	\	
			19.292	0.5	\			21.5	4	\	
			20	0.979	\			21.5	6	\	
			20.022	1	\			21.5	7.6	\	
			20.436	1.5	\			21.5	8	\	
			20.5	1.601	\			21.5	14	\	
			20.713	2	\			21.5	22.391	\	
			21	2.84	\	plane	63	-cart	0	0	\
			21.211	4	\			0.5	0	\	
			21.378	6	\			1	0	\	
			21.44	7.6	\			4	0	\	
			21.452	8	\			7	0	\	
			21.489	9.328	\			10	0	\	
			21.5	9.966	\			14	0	\	
			21.5	14	\			18	0	\	
			21.5	22.391	\			19	0	\	
plane	48	-cart	0	0	\			19.023	0	\	
			0.5	0	\			20	0.172	\	
			1	0	\			20.5	0.437	\	
			4	0	\			20.591	0.5	\	
			7	0	\			21	0.879	\	
			10	0	\			21.096	1	\	
			14	0	\			21.368	1.5	\	
			17.232	0	\			21.485	2	\	
			18	0.046	\			21.5	2.22	\	
			19	0.196	\			21.5	4	\	
			19.76	0.5	\			21.5	6	\	
			20	0.664	\			21.5	7.6	\	
			20.362	1	\			21.5	8	\	
			20.5	1.17	\			21.5	14	\	
			20.72	1.5	\			21.5	22.391	\	
			20.958	2	\	plane	64.86	-cart	0	0	\
			21	2.115	\			0.5	0	\	
			21.374	4	\			1	0	\	
			21.477	6	\			4	0	\	
			21.5	6.807	\			7	0	\	
			21.5	7.6	\			10	0	\	
			21.5	8	\			14	0	\	
			21.5	14	\			18	0	\	
			21.5	22.391	\			19	0	\	
plane	53	-cart	0	0	\			19.027	0	\	
			0.5	0	\			20	0.168	\	
			1	0	\			20.5	0.421	\	

			20.616	0.5	\				21.5	8	\
			21	0.853	\				21.5	14	\
			21.118	1	\				21.5	22.391	\
			21.386	1.5	\	plane	162.247	-cart	0	0	\
			21.491	2	\				0.5	0	\
			21.5	2.173	\				1	0	\
			21.5	4	\				4	0	\
			21.5	6	\				7	0	\
			21.5	7.6	\				10	0	\
			21.5	8	\				14	0	\
			21.5	14	\				18	0	\
			21.5	22.391	\				18.835	0	\
plane	98	-cart	0	0	\				19	0.015	\
			0.5	0	\				20	0.275	\
			1	0	\				20.397	0.5	\
			4	0	\				20.5	0.572	\
			7	0	\				20.955	1	\
			10	0	\				21	1.056	\
			14	0	\				21.276	1.5	\
			18	0	\				21.459	2	\
			19	0	\				21.5	2.235	\
			19.027	0	\				21.5	4	\
			20	0.168	\				21.5	6	\
			20.5	0.421	\				21.5	7.6	\
			20.616	0.5	\				21.5	8	\
			21	0.853	\				21.5	14	\
			21.118	1	\	plane	168.527	-cart	21.5	22.391	\
			21.386	1.5	\				0	0	\
			21.491	2	\				0.5	0	\
			21.5	2.173	\				1	0	\
			21.5	4	\				4	0	\
			21.5	6	\				7	0	\
			21.5	7.6	\				10	0	\
			21.5	8	\				14	0	\
			21.5	14	\				18	0	\
			21.5	22.391	\				18.176	0	\
plane	128	-cart	0	0	\				19	0.142	\
			0.5	0	\				19.925	0.5	\
			1	0	\				20	0.543	\
			4	0	\				20.5	0.908	\
			7	0	\				20.598	1	\
			10	0	\				21	1.495	\
			14	0	\				21.003	1.5	\
			18	0	\				21.275	2	\
			19	0	\				21.5	2.683	\
			19.027	0	\				21.5	4	\
			20	0.168	\				21.5	6	\
			20.5	0.421	\				21.5	7.6	\
			20.616	0.5	\				21.5	8	\
			21	0.853	\				21.5	14	\
			21.118	1	\	plane	174.939	-cart	21.5	22.391	\
			21.386	1.5	\				0	0	\
			21.491	2	\				0.5	0	\
			21.5	2.173	\				1	0	\
			21.5	4	\				4	0	\
			21.5	6	\				7	0	\
			21.5	7.6	\				10	0	\
			21.5	8	\				14	0	\
			21.5	14	\				17.172	0	\
			21.5	22.391	\				18	0.142	\
plane	157.899	-cart	0	0	\				19	0.475	\
			0.5	0	\				19.055	0.5	\
			1	0	\				19.897	1	\
			4	0	\				20	1.082	\
			7	0	\				20.456	1.5	\
			10	0	\				20.5	1.546	\
			14	0	\				20.857	2	\
			18	0	\				21	2.246	\
			19	0	\				21.5	3.598	\
			19.027	0	\				21.5	4	\
			20	0.168	\				21.5	6	\
			20.5	0.421	\				21.5	7.6	\
			20.616	0.5	\				21.5	8	\
			21	0.853	\				21.5	14	\
			21.118	1	\	plane	182.151	-cart	21.5	22.391	\
			21.386	1.5	\				0	0	\
			21.491	2	\				0.5	0	\
			21.5	2.173	\				1	0	\
			21.5	4	\				4	0	\
			21.5	6	\				7	0	\
			21.5	7.6	\				10	0	\

			14	0	\				19	6.067	\
			15.671	0	\				19.831	7.6	\
			17.654	0.5	\				20	7.937	\
			18	0.673	\				20.032	8	\
			18.538	1	\				20.5	9.016	\
			19	1.332	\				21	10.518	\
			19.211	1.5	\				21.259	11.469	\
			19.729	2	\				21.281	11.549	\
			20	2.318	\				21.5	12.4	\
			20.5	2.97	\				21.5	14	\
			21	3.791	\				21.5	22.391	\
			21.109	4	\	plane	206	-cart	0	0	\
			21.5	5.135	\				0.5	0	\
			21.5	6	\				1	0	\
			21.5	7.6	\				4	0	\
			21.5	8	\				7	0	\
			21.5	14	\				8.484	0	\
plane	189.729	-cart	21.5	22.391	\				10	0.212	\
			0	0	\				11.055	0.5	\
			0.5	0	\				12.018	1	\
			1	0	\				12.814	1.5	\
			4	0	\				13.548	2	\
			7	0	\				14	2.366	\
			10	0	\				15.583	4	\
			13.779	0	\				17.243	6	\
			14	0.032	\				18	7.189	\
			15.918	0.5	\				18.242	7.6	\
			16.914	1	\				18.479	8	\
			17.641	1.5	\				19	8.907	\
			18	1.79	\				20	10.92	\
			18.242	2	\				20.434	11.928	\
			19	2.762	\				20.5	12.086	\
			19.952	4	\				21	13.442	\
			20	4.071	\				21.164	14	\
			20.5	4.908	\				21.5	16.124	\
			21	5.925	\				21.5	22.391	\
			21.032	6	\	plane	211	-cart	0	0	\
			21.489	7.6	\				0.5	0	\
			21.5	7.663	\				1	0	\
			21.5	8	\				4	0	\
			21.5	14	\				6.507	0	\
plane	196.618	-cart	21.5	22.391	\				7	0.045	\
			0	0	\				9.225	0.5	\
			0.5	0	\				10	0.886	\
			1	0	\				10.193	1	\
			4	0	\				10.961	1.5	\
			7	0	\				11.593	2	\
			10	0	\				13.527	4	\
			11.732	0	\				14	4.497	\
			14	0.451	\				15.371	6	\
			14.136	0.5	\				16.571	7.6	\
			15.141	1	\				16.835	8	\
			15.924	1.5	\				18	9.859	\
			16.586	2	\				18.91	11.361	\
			18	3.428	\				19	11.518	\
			18.453	4	\				20	13.415	\
			19	4.758	\				20.266	14	\
			19.795	6	\				20.5	14.564	\
			20	6.364	\				21	16.065	\
			20.5	7.367	\				21.5	19.598	\
			20.602	7.6	\				21.5	22.391	\
			20.764	8	\	plane	216	-cart	0	0	\
			21	8.664	\				0.5	0	\
			21.5	10.641	\				1	0	\
			21.5	14	\				4	0	\
plane	200.07	-cart	21.5	22.391	\				4.465	0	\
			0	0	\				7	0.383	\
			0.5	0	\				7.351	0.5	\
			1	0	\				8.351	1	\
			4	0	\				9.05	1.5	\
			7	0	\				9.559	2	\
			10	0	\				10	2.536	\
			10.589	0	\				11.129	4	\
			13.084	0.5	\				12.98	6	\
			14	0.972	\				14	7.144	\
			14.045	1	\				14.411	7.6	\
			14.834	1.5	\				14.773	8	\
			15.562	2	\				16.927	10.775	\
			17.556	4	\				18	12.306	\
			18	4.571	\				19	13.881	\
			18.96	6	\				19.07	14	\

			20	15.798	\			3.55	1.5	\	
			20.5	17.047	\			3.846	2	\	
			21	18.819	\			4	2.398	\	
			21.499	22.402				4.449	4	\	
plane	221	-cart	0	0	\			5.293	6	\	
			0.5	0	\			6.913	7.6	\	
			1	0	\			7	7.667	\	
			2.64	0	\			7.451	8	\	
			4	0.154	\			8.872	8.973	\	
			5.432	0.5	\			10	9.738	\	
			6.455	1	\			14	13.045	\	
			7	1.423	\			14.918	14	\	
			7.076	1.5	\			18	18.457	\	
			7.472	2	\			19	20.395	\	
			8.635	4	\			19.937	22.391	\	
			10	5.662	\	plane	233	-cart	0	0	\
			10.319	6	\			0.263	0	\	
			11.99	7.6	\			0.5	0.082	\	
			12.419	8	\			1	0.285	\	
			14	9.567	\			1.416	0.5	\	
			14.557	10.182	\			2.054	1	\	
			17.589	14	\			2.452	1.5	\	
			18	14.579	\			2.714	2	\	
			19	16.139	\			3.23	4	\	
			20	18.187	\			3.806	6	\	
			20.5	19.531	\			4	6.338	\	
			21	21.194	\			5.225	7.6	\	
			21.296	22.391				5.73	8	\	
plane	224	-cart	0	0	\			6.453	8.527	\	
			0.5	0	\			7	8.876	\	
			1	0	\			10	10.838	\	
			1.755	0	\			13.86	14	\	
			4	0.403	\			14	14.149	\	
			4.266	0.5	\			18	20.127	\	
			5.267	1	\			19	22.158	\	
			5.879	1.5	\			19.109	22.391	\	
			6.252	2	\	plane	236	-cart	0	0	\
			7	3.606	\			0.072	0	\	
			7.209	4	\			0.5	0.258	\	
			8.7	6	\			0.8	0.5	\	
			10	7.298	\			1	0.706	\	
			10.34	7.6	\			1.232	1	\	
			10.804	8	\			1.536	1.5	\	
			12.974	9.813	\			1.777	2	\	
			14	10.839	\			2.254	4	\	
			16.719	14	\			2.504	6	\	
			18	15.751	\			3.524	7.6	\	
			19	17.44	\			3.936	8	\	
			20	19.584	\			4	8.058	\	
			20.5	20.871	\			4.034	8.088	\	
			21	22.351	\			7	10.026	\	
			21.013	22.391				10	11.85	\	
plane	227	-cart	0	0	\			12.694	14	\	
			0.5	0	\			14	15.485	\	
			1	0	\			18	22.252	\	
			1.058	0	\			18.065	22.391	\	
			3.201	0.5	\	plane	238	-cart	0	0.022	\
			4	0.916	\			0.367	0.423	\	
			4.127	1	\			0.423	0.5	\	
			4.704	1.5	\			0.5	0.61	\	
			5.046	2	\			0.741	1	\	
			5.791	4	\			1	1.497	\	
			6.974	6	\			1.001	1.5	\	
			7	6.033	\			1.242	2	\	
			8.624	7.6	\			1.748	4	\	
			9.14	8	\			1.688	6	\	
			10	8.632	\			2.37	7.6	\	
			11.104	9.412	\			2.516	7.786	\	
			14	11.971	\			2.72	8	\	
			15.858	14	\			4	8.997	\	
			18	16.997	\			7	10.73	\	
			19	18.849	\			10	12.506	\	
			20	21.005	\			11.823	14	\	
			20.5	22.2	\			14	16.637	\	
			20.576	22.391				17.244	22.391	\	
plane	230	-cart	0	0	\	plane	240	-cart	0	0.508	\
			0.5	0	\			0.235	1	\	
			0.584	0	\			0.469	1.5	\	
			1	0.088	\			0.5	1.564	\	
			2.253	0.5	\			0.721	2	\	
			3.058	1	\			1	2.558	\	

			1.336	3.959	\				0.5	9.266	\
			1.333	4	\				1	9.449	\
			1	5.277	\				4	10.736	\
			0.884	6	\				7	12.208	\
			1	7.16	\				9.452	14	\
			1.118	7.467	\				10	14.543	\
			1.191	7.6	\				14	20.281	\
			1.482	8	\				15.054	22.391	\
			4	9.822	\	plane	242.801	-cart	0	9.227	\
			7	11.362	\				0.5	9.369	\
			10	13.237	\				1	9.54	\
			10.869	14	\				4	10.783	\
			14	18.04	\				7	12.266	\
plane	241.769	-cart	16.342	22.391	\				9.362	14	\
			0	1.682	\				10	14.633	\
			0.145	2	\				14	20.424	\
			0.5	2.797	\				14.978	22.391	\
			0.953	4	\	plane	242.952	-cart	0	9.32	\
			0.5	5.137	\				0.5	9.458	\
			0.159	6	\				1	9.62	\
			0	7.15	\				4	10.829	\
			0	7.152	\				7	12.324	\
			0	7.17	\				9.273	14	\
			0	7.17	\				10	14.724	\
			0.145	7.6	\				14	20.568	\
			0.385	8	\				14.901	22.391	\
			0.5	8.149	\	plane	243.103	-cart	0	9.402	\
			1	8.655	\				0.5	9.535	\
			4	10.449	\				1	9.692	\
			7	11.895	\				4	10.874	\
			9.971	14	\				7	12.383	\
			10	14.028	\				9.183	14	\
			14	19.477	\				10	14.815	\
plane	241.894	-cart	15.496	22.391	\				14	20.715	\
			0	7.874	\				14.824	22.391	\
			0.139	8	\	plane	244	-cart	0	9.766	\
			0.5	8.362	\				0.5	9.886	\
			1	8.786	\				1	10.024	\
			4	10.492	\				4	11.15	\
			7	11.937	\				7	12.749	\
			9.898	14	\				8.662	14	\
			10	14.099	\				10	15.356	\
			14	19.588	\				14	21.636	\
plane	242.045	-cart	15.433	22.391	\				14.358	22.391	\
			0	8.315	\	plane	245	-cart	0	10.118	\
			0.5	8.606	\				0.5	10.234	\
			1	8.942	\				1	10.366	\
			4	10.542	\				4	11.482	\
			7	11.989	\				7	13.168	\
			9.809	14	\				8.091	14	\
			10	14.186	\				10	15.98	\
			14	19.724	\				13.822	22.391	\
plane	242.196	-cart	15.358	22.391	\	plane	246	-cart	0	10.459	\
			0	8.605	\				0.5	10.576	\
			0.5	8.818	\				1	10.707	\
			1	9.089	\				4	11.833	\
			4	10.592	\				7	13.61	\
			7	12.042	\				7.503	14	\
			9.721	14	\				10	16.67	\
			10	14.273	\				13.27	22.391	\
			14	19.861	\	plane	247	-cart	0	10.797	\
plane	242.347	-cart	15.282	22.391	\				0.5	10.915	\
			0	8.818	\				1	11.048	\
			0.5	8.996	\				4	12.197	\
			1	9.224	\				6.889	14	\
			4	10.641	\				7	14.088	\
			7	12.096	\				10	17.457	\
			9.631	14	\				12.704	22.391	\
			10	14.362	\	plane	248	-cart	0	11.135	\
			14	20	\				0.5	11.255	\
plane	242.499	-cart	15.206	22.391	\				1	11.39	\
			0	8.984	\				4	12.573	\
			0.5	9.144	\				6.248	14	\
			1	9.345	\				7	14.617	\
			4	10.689	\				10	18.366	\
			7	12.152	\				12.123	22.391	\
			9.541	14	\	plane	249	-cart	0	11.474	\
			10	14.452	\				0.5	11.596	\
			14	20.14	\				1	11.733	\
plane	242.65	-cart	15.13	22.391	\				4	12.965	\
			0	9.117	\				5.587	14	\

```

7      15.219  \
10     19.407  \
11.528 22.391  \
plane  250    -cart  0      11.807  \
0.5    11.932  \
1      12.072  \
4      13.383  \
4.913  14      \
7      15.912  \
10     20.559  \
10.919 22.391  \
plane  251    -cart  0      12.128  \
0.5    12.26   \
1      12.408  \
4      13.836  \
4.233  14      \
7      16.71   \
10     21.787  \
10.3   22.391  \
plane  252    -cart  0      12.437  \
0.5    12.58   \
1      12.741  \
3.544  14      \
4      14.335  \
7      17.613  \
9.671  22.391  \
plane  254.856 -cart  0      13.258  \
1.847  13.979  \
3.858  15.804  \
5.34   17.716  \
6.564  19.887  \
7.84   22.391  \
end pgen
$
pgen A -perm 1.0 -loc 0 0 0 -difftype 3ddif
plane  241.769 -cart  0      1.682  \
0.145  2      \
0.5    2.797  \
0.953  4      \
0.5    5.137  \
0.159  6      \
0      7.152   \
plane  241.894 -cart  0      1.803  \
0.102  2      \
0.5    2.884  \
0.924  4      \
0.5    5.055  \
0      6.345   \
plane  242.045 -cart  0      1.963  \
0.031  2      \
0.5    2.99   \
0.889  4      \
0.5    4.965  \
0      5.972   \
plane  242.196 -cart  0      2.138  \
0.5    3.096  \
0.854  4      \
0.5    4.883  \
0      5.714   \
plane  242.347 -cart  0      2.33    \
0.5    3.203  \
0.818  4      \
0.5    4.808  \
0      5.506   \
plane  242.499 -cart  0      2.542  \
0.5    3.313  \
0.781  4      \
0.5    4.74   \
0      5.325   \
plane  242.65  -cart  0      2.772  \
0.5    3.425  \
0.743  4      \
0.5    4.679  \
0      5.164   \
plane  242.801 -cart  0      3.024  \
0.5    3.541  \
0.705  4      \

0.5    4.625  \
0      5.015  \
plane  242.952 -cart  0      3.296  \
0.5    3.661  \
0.664  4      \
0.5    4.576  \
0      4.87   \
plane  243.103 -cart  0      3.59    \
0.5    3.785  \
0.62   4      \
0.5    4.533  \
0      4.724  \
end pgen
$
pgen C -perm 1.0 -loc 0 0 0 -difftype 3ddif
plane  0      -cart  0      2.208  \
0.5    2.628  \
0.94   4      \
0.641  6      \
0.5    6.3    \
0      7.005  \
plane  1      -cart  0      1.123  \
0.5    1.366  \
0.633  1.5    \
0.955  2      \
1      2.09   \
1.544  4      \
1.386  6      \
1      6.999  \
0.675  7.6    \
0.5    7.877  \
0.415  8      \
0      8.482  \
plane  2      -cart  0      0.501  \
0.5    0.702  \
0.821  1      \
1      1.216  \
1.193  1.5    \
1.463  2      \
2.082  4      \
2.007  6      \
1.466  7.6    \
1.298  8      \
1      8.646  \
0.537  9.489  \
0.5    9.551  \
0      10.251 \
plane  3      -cart  0      0.166  \
0.5    0.311  \
0.762  0.5    \
1      0.724  \
1.257  1      \
1.633  1.5    \
1.926  2      \
2.624  4      \
2.613  6      \
2.143  7.6    \
2.008  8      \
1.475  9.489  \
1      10.562 \
0.5    11.787 \
0      12.862 \
plane  3.486 -cart  0      0.079  \
0.5    0.198  \
0.945  0.5    \
1      0.547  \
1.456  1      \
1.847  1.5    \
2.156  2      \
2.896  4      \
2.915  6      \
2.472  7.6    \
2.346  8      \
1.877  9.489  \
1      11.874 \
0.741  14    \
end pgen

```

Input MOSES : Analisis Perilaku Hidrodinamika

```
$ RAO.CIF
$ Model      : Tanker Aframax 120.000 DWT
$ Created by  : Yuni Ari Wibowo
$ NRP       : 4114 201 001
$
$
$
$
$          Response Amplitude Operators
$
$
$
$set basic parameters
$
&dimen -remember -DIMEN meters m-tons
&device -oecho no -primary device -auxin afra.dat
&TITLE Response Amplitude Operators of AFRAMAX
TANKER 120.000 DWT
$
$read model
$
INMODEL
$
$set transit condition
$
&INSTATE aframax -CONDITION 17
$
$plot of model
$
&PLTMODEL VESSEL
  PIC ISO
  pic SIDE
  pic TOP
  PIC BOW
END
$
$compute weight for cond.
$
&weight -compute aframax 12.12 16.43 72.89 72.89
&equi   -iter 50
&STATUS B_W
$
$*****
enter hydrostatics menu
$
Hstatic

$
$*****
hydrostatics properties
$
cform 0 0 0 -draft 0.5 49
  report
  end
end
$
$enter hydrodynamics menu
$
HYDRODYNAMICS
$
$stability trans.
$
&para -m_dist 5
  g_press -heading 0 45 90 135 180 225 270 315
&ENV SEA
&status Force
hydr_sum
V_MDRIFT
REPORT
END
end
$
$frequency response
$
freq_resp
$
$response
$
  rao -speed 0
$
$std post processing
$
  fp_std 120.49 0.00 12.12
  equ_sum
  MATRICES -FILE YES
  REPORT
  END
end
$
$all done
$
&FINISH
```

Ouput MOSES : Komponen Hidrostatika

Page 1

Licensee - Global Maritime

Rev 7.00.018

Ser614

```
*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     18 October, 2015                             *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                       *
*                                                                                       *
*****
```

+++ H Y D R O S T A T I C P R O P E R T I E S +++
=====

For Body AFRAMAX

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

/-- Condition			--// Displac-	/-- Center Of Buoyancy			--// W.P.	/C. Flotation			/---- Metacentric Heights			
Draft	Trim	Roll		---X---	---Y---	---Z---	Area	---X---	---Y---	-KMT-	-KML-	-BMT-	-BML-	
2.00	0.00	0.00	15922.16	115.14	0.00	1.03	8268.	115.51	0.00	71.29	1773.23	70.26	1772.20	
2.50	0.00	0.00	20184.46	115.24	0.00	1.29	8358.	115.69	0.00	57.80	1435.00	56.51	1433.72	
3.00	0.00	0.00	24488.64	115.33	0.00	1.54	8434.	115.88	0.00	48.87	1209.06	47.32	1207.52	
3.50	0.00	0.00	28830.47	115.43	0.00	1.80	8505.	116.08	0.00	42.58	1048.62	40.78	1046.82	
4.00	0.00	0.00	33207.73	115.53	0.00	2.06	8572.	116.26	0.00	37.92	928.68	35.86	926.62	
4.50	0.00	0.00	37613.84	115.63	0.00	2.32	8619.	116.53	0.00	34.29	830.79	31.98	828.47	
5.00	0.00	0.00	42043.51	115.74	0.00	2.57	8664.	116.78	0.00	31.45	752.85	28.87	750.28	
5.50	0.00	0.00	46495.86	115.85	0.00	2.83	8708.	117.03	0.00	29.16	689.58	26.33	686.76	
6.00	0.00	0.00	50970.06	115.96	0.00	3.08	8750.	117.27	0.00	27.30	637.21	24.21	634.13	
6.50	0.00	0.00	55466.17	116.08	0.00	3.34	8792.	117.66	0.00	25.76	593.46	22.42	590.12	
7.00	0.00	0.00	59984.05	116.22	0.00	3.60	8835.	118.04	0.00	24.48	556.21	20.88	552.61	
7.50	0.00	0.00	64523.53	116.36	0.00	3.85	8877.	118.43	0.00	23.40	524.13	19.55	520.28	
8.00	0.00	0.00	69084.84	116.51	0.00	4.11	8921.	118.86	0.00	22.49	496.73	18.38	492.62	
8.50	0.00	0.00	73669.91	116.67	0.00	4.37	8969.	119.37	0.00	21.72	473.42	17.35	469.05	
9.00	0.00	0.00	78279.82	116.85	0.00	4.63	9018.	119.88	0.00	21.07	452.99	16.44	448.36	
9.50	0.00	0.00	82914.87	117.03	0.00	4.89	9068.	120.39	0.00	20.51	435.05	15.62	430.17	
10.00	0.00	0.00	87577.08	117.22	0.00	5.15	9121.	120.93	0.00	20.03	419.36	14.89	414.22	
10.50	0.00	0.00	92266.58	117.43	0.00	5.40	9177.	121.50	0.00	19.63	405.82	14.23	400.41	
11.00	0.00	0.00	96986.25	117.64	0.00	5.66	9237.	122.10	0.00	19.29	394.10	13.63	388.44	
11.50	0.00	0.00	101736.66	117.86	0.00	5.93	9299.	122.72	0.00	19.01	383.69	13.08	377.76	
12.00	0.00	0.00	106519.55	118.09	0.00	6.19	9361.	123.33	0.00	18.77	374.27	12.58	368.08	
12.50	0.00	0.00	111334.10	118.33	0.00	6.45	9424.	123.92	0.00	18.57	365.68	12.12	359.23	
13.00	0.00	0.00	116180.77	118.58	0.00	6.71	9486.	124.51	0.00	18.41	357.69	11.70	350.98	
13.50	0.00	0.00	121059.02	118.83	0.00	6.98	9546.	125.08	0.00	18.28	350.18	11.31	343.21	
14.00	0.00	0.00	125966.71	119.08	0.00	7.24	9604.	125.62	0.00	18.18	342.85	10.94	335.61	
14.50	0.00	0.00	130902.00	119.33	0.00	7.50	9651.	125.92	0.00	18.10	334.97	10.60	327.46	
15.00	0.00	0.00	135861.69	119.58	0.00	7.77	9699.	126.19	0.00	18.05	327.55	10.28	319.79	
15.50	0.00	0.00	140844.58	119.82	0.00	8.03	9744.	126.42	0.00	18.01	320.48	9.98	312.45	
16.00	0.00	0.00	145850.55	120.05	0.00	8.30	9787.	126.63	0.00	17.99	313.73	9.69	305.43	
16.50	0.00	0.00	150878.06	120.27	0.00	8.56	9830.	126.80	0.00	17.99	307.32	9.43	298.75	
17.00	0.00	0.00	155927.50	120.48	0.00	8.83	9871.	126.96	0.00	18.01	301.21	9.18	292.39	

```

*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     -----                               *
*                                     18 October, 2015                               *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                               *
*                                                                                               *
*****
    
```

+++ H Y D R O S T A T I C C O E F F I C I E N T S +++

=====

For Body AFRAMAX

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

/--- Draft	Condition ---/ Trim Roll		Displacement -----	Wetted Surface -----	Load To Change Draft 1 MM -----	/----- For 0 KG -----/ Moment To Change .01 Deg --- Heel --- --- Trim ---	
2.00	0.00	0.00	15922.16	8675.4	8.48	195.24	4924.83
2.50	0.00	0.00	20184.46	8959.5	8.57	199.07	5050.77
3.00	0.00	0.00	24488.64	9239.7	8.65	202.25	5161.01
3.50	0.00	0.00	28830.47	9519.4	8.72	205.18	5267.45
4.00	0.00	0.00	33207.73	9799.0	8.79	207.83	5370.56
4.50	0.00	0.00	37613.84	10073.7	8.84	209.92	5438.79
5.00	0.00	0.00	42043.51	10347.7	8.88	211.88	5505.55
5.50	0.00	0.00	46495.86	10620.6	8.93	213.70	5573.07
6.00	0.00	0.00	50970.06	10892.6	8.97	215.38	5641.15
6.50	0.00	0.00	55466.17	11166.6	9.01	217.03	5712.74
7.00	0.00	0.00	59984.05	11440.8	9.06	218.61	5785.40
7.50	0.00	0.00	64523.53	11715.1	9.10	220.11	5859.11
8.00	0.00	0.00	69084.84	11991.1	9.15	221.59	5939.84
8.50	0.00	0.00	73669.91	12270.8	9.19	223.09	6030.99
9.00	0.00	0.00	78279.82	12551.0	9.25	224.58	6125.72
9.50	0.00	0.00	82914.87	12832.0	9.30	226.09	6225.09
10.00	0.00	0.00	87577.08	13114.9	9.35	227.58	6331.32
10.50	0.00	0.00	92266.58	13401.1	9.41	229.09	6448.08
11.00	0.00	0.00	96986.25	13691.1	9.47	230.66	6575.24
11.50	0.00	0.00	101736.66	13983.4	9.53	232.25	6707.74
12.00	0.00	0.00	106519.55	14277.2	9.60	233.87	6843.04
12.50	0.00	0.00	111334.10	14571.9	9.66	235.55	6980.42
13.00	0.00	0.00	116180.77	14867.1	9.73	237.24	7116.94
13.50	0.00	0.00	121059.02	15162.9	9.79	238.89	7251.57
14.00	0.00	0.00	125966.71	15458.7	9.85	240.55	7378.60
14.50	0.00	0.00	130902.00	15742.2	9.89	242.11	7481.44
15.00	0.00	0.00	135861.69	16026.7	9.94	243.70	7582.89
15.50	0.00	0.00	140844.58	16310.3	9.99	245.26	7680.70
16.00	0.00	0.00	145850.55	16593.2	10.03	246.79	7775.00
16.50	0.00	0.00	150878.06	16875.5	10.08	248.31	7867.10
17.00	0.00	0.00	155927.50	17157.2	10.12	249.81	7957.15

Ouput MOSES : Matriks Added Mass & Damping

```

$&dimen -dimen Meters      M-Tons
$MATRICES
Frequency      0.2513          Period      25.0000
Added Mass
2.40293E-02   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   -2.91235E-01   0.00000E+00
0.00000E+00   1.20623E+00   -5.58560E-04   -3.77250E+00   -2.38573E-03   -3.74449E+00
0.00000E+00   -3.60192E-04   1.46907E+00   -1.78673E-02   -7.95359E+00   5.94561E-03
0.00000E+00   -3.77250E+00   -1.78673E-02   5.71927E+01   -4.69152E-01   -7.29163E+01
-2.91235E-01   -2.38573E-03   -7.95359E+00   -1.91358E+00   6.19031E+03   -1.25339E+00
0.00000E+00   -3.74449E+00   5.94561E-03   -6.44718E+01   3.38101E+00   4.95276E+03
Damping
0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00
0.00000E+00   2.90393E-02   -4.75401E-05   -1.18706E-01   1.51036E-05   -1.33930E-01
0.00000E+00   5.05366E-06   4.09273E-01   -3.65001E-03   -2.68215E+00   3.68593E-04
0.00000E+00   -1.18706E-01   -3.65001E-03   4.92403E-01   -1.27644E-01   -7.36190E-01
0.00000E+00   1.51036E-05   -2.68215E+00   -3.64897E-01   1.79504E+03   -7.33902E-01
0.00000E+00   -1.33930E-01   3.68593E-04   -3.67424E-01   7.78481E-01   9.92783E+01
Frequency      0.3142          Period      20.0000
Added Mass
2.40293E-02   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   -2.91235E-01   0.00000E+00
0.00000E+00   1.29955E+00   -5.79257E-04   -4.02783E+00   -2.85788E-03   -4.36568E+00
0.00000E+00   -4.13855E-04   1.20847E+00   -1.54886E-02   -6.32866E+00   6.20917E-03
0.00000E+00   -4.02783E+00   -1.54886E-02   5.80381E+01   -3.88346E-01   -7.64299E+01
-2.91235E-01   -2.85788E-03   -6.32866E+00   -1.68507E+00   5.04838E+03   -6.24296E-01
0.00000E+00   -4.36568E+00   6.20917E-03   -6.68765E+01   3.00107E+00   5.29953E+03
Damping
0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00
0.00000E+00   8.85456E-02   -6.91444E-05   -3.45122E-01   -9.70440E-05   -4.43787E-01
0.00000E+00   -4.81132E-06   4.25865E-01   -3.56767E-03   -3.13267E+00   5.77295E-04
0.00000E+00   -3.45122E-01   -3.56767E-03   1.37720E+00   -1.44585E-01   -2.13385E+00
0.00000E+00   -9.70440E-05   -3.13267E+00   -3.44010E-01   1.91110E+03   -8.61157E-01
0.00000E+00   -4.43787E-01   5.77295E-04   -1.01421E+00   9.78996E-01   3.00641E+02
Frequency      0.3307          Period      19.0000
Added Mass
2.40293E-02   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   -2.91235E-01   0.00000E+00
0.00000E+00   1.31408E+00   -5.84021E-04   -4.04889E+00   -2.97556E-03   -4.48601E+00
0.00000E+00   -4.27056E-04   1.15749E+00   -1.50595E-02   -5.96753E+00   6.25615E-03
0.00000E+00   -4.04889E+00   -1.50595E-02   5.80736E+01   -3.70251E-01   -7.72914E+01
-2.91235E-01   -2.97556E-03   -5.96753E+00   -1.64707E+00   4.81926E+03   -4.66697E-01
0.00000E+00   -4.48601E+00   6.25615E-03   -6.75750E+01   2.90625E+00   5.36120E+03
Damping
0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00
0.00000E+00   1.13166E-01   -7.78341E-05   -4.34987E-01   -1.58559E-04   -5.79743E-01
0.00000E+00   -1.06063E-05   4.26044E-01   -3.49323E-03   -3.24266E+00   6.67486E-04
0.00000E+00   -4.34987E-01   -3.49323E-03   1.71765E+00   -1.48065E-01   -2.70733E+00
0.00000E+00   -1.58559E-04   -3.24266E+00   -3.33592E-01   1.92539E+03   -8.81210E-01
0.00000E+00   -5.79743E-01   6.67486E-04   -1.27908E+00   1.03521E+00   3.84022E+02
Frequency      0.3491          Period      18.0000
Added Mass
2.40293E-02   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   -2.91235E-01   0.00000E+00
0.00000E+00   1.32122E+00   -5.87371E-04   -4.03610E+00   -3.08243E-03   -4.57205E+00
0.00000E+00   -4.39608E-04   1.10787E+00   -1.46673E-02   -5.59065E+00   6.28136E-03
0.00000E+00   -4.03610E+00   -1.46673E-02   5.79788E+01   -3.51604E-01   -7.81682E+01
-2.91235E-01   -3.08243E-03   -5.59065E+00   -1.61353E+00   4.59278E+03   -3.01445E-01
0.00000E+00   -4.57205E+00   6.28136E-03   -6.83933E+01   2.80116E+00   5.40233E+03
Damping
0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00
0.00000E+00   1.45297E-01   -8.92255E-05   -5.49642E-01   -2.46518E-04   -7.62143E-01
0.00000E+00   -1.90483E-05   4.24430E-01   -3.38769E-03   -3.36129E+00   7.86747E-04
0.00000E+00   -5.49642E-01   -3.38769E-03   2.14572E+00   -1.51276E-01   -3.46743E+00
0.00000E+00   -2.46518E-04   -3.36129E+00   -3.20318E-01   1.93419E+03   -8.93173E-01
0.00000E+00   -7.62143E-01   7.86747E-04   -1.63805E+00   1.09802E+00   4.93271E+02
Frequency      0.3696          Period      17.0000
Added Mass
2.40293E-02   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   -2.91235E-01   0.00000E+00
0.00000E+00   1.31524E+00   -5.87469E-04   -3.96883E+00   -3.16280E-03   -4.58905E+00
0.00000E+00   -4.49557E-04   1.06026E+00   -1.43254E-02   -5.19568E+00   6.25813E-03
0.00000E+00   -3.96883E+00   -1.43254E-02   5.76843E+01   -3.32759E-01   -7.90234E+01
-2.91235E-01   -3.16280E-03   -5.19568E+00   -1.58501E+00   4.37124E+03   -1.37335E-01
0.00000E+00   -4.58905E+00   6.25813E-03   -6.93612E+01   2.68424E+00   5.40538E+03
Damping
0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00
0.00000E+00   1.86760E-01   -1.04167E-04   -6.93634E-01   -3.71230E-04   -1.00451E+00
0.00000E+00   -3.10798E-05   4.20531E-01   -3.24388E-03   -3.48916E+00   9.41711E-04
0.00000E+00   -6.93634E-01   -3.24388E-03   2.67513E+00   -1.54010E-01   -4.48452E+00
0.00000E+00   -3.71230E-04   -3.48916E+00   -3.03681E-01   1.93581E+03   -8.92998E-01
0.00000E+00   -1.00451E+00   9.41711E-04   -2.14087E+00   1.16851E+00   6.35341E+02
Frequency      0.3927          Period      16.0000
Added Mass
2.40293E-02   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   -2.91235E-01   0.00000E+00
0.00000E+00   1.28805E+00   -5.81616E-04   -3.82031E+00   -3.18486E-03   -4.48260E+00
0.00000E+00   -4.53846E-04   1.01558E+00   -1.40560E-02   -4.77932E+00   6.15699E-03
0.00000E+00   -3.82031E+00   -1.40560E-02   5.70995E+01   -3.14479E-01   -7.97341E+01
-2.91235E-01   -3.18486E-03   -4.77932E+00   -1.56240E+00   4.15741E+03   1.11755E-02
0.00000E+00   -4.48260E+00   6.15699E-03   -7.04557E+01   2.55537E+00   5.34434E+03
Damping
0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00
0.00000E+00   2.39001E-01   -1.23475E-04   -8.69102E-01   -5.41685E-04   -1.31937E+00
0.00000E+00   -4.77216E-05   4.13730E-01   -3.05437E-03   -3.62740E+00   1.14134E-03
0.00000E+00   -8.69102E-01   -3.05437E-03   3.31071E+00   -1.55919E-01   -5.85779E+00
0.00000E+00   -5.41685E-04   -3.62740E+00   -2.83306E-01   1.92807E+03   -8.74853E-01
0.00000E+00   -1.31937E+00   1.14134E-03   -2.87198E+00   1.24647E+00   8.16862E+02
Frequency      0.4189          Period      15.0000
Added Mass
2.40293E-02   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   -2.91235E-01   0.00000E+00
0.00000E+00   1.22980E+00   -5.66133E-04   -3.56084E+00   -3.10426E-03   -4.18275E+00
0.00000E+00   -4.48005E-04   9.75016E-01   -1.38831E-02   -4.33749E+00   5.93602E-03
0.00000E+00   -3.56084E+00   -1.38831E-02   5.61361E+01   -2.98177E-01   -8.01179E+01
-2.91235E-01   -3.10426E-03   -4.33749E+00   -1.54573E+00   3.95501E+03   1.18847E-01
0.00000E+00   -4.18275E+00   5.93602E-03   -7.16135E+01   2.41529E+00   5.18586E+03
Damping
0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00   0.00000E+00
0.00000E+00   3.02062E-01   -1.47672E-04   -1.07214E+00   -7.67589E-04   -1.71170E+00
0.00000E+00   -6.96680E-05   4.03266E-01   -2.81308E-03   -3.77665E+00   1.38857E-03
0.00000E+00   -1.07214E+00   -2.81308E-03   4.03663E+00   -1.56744E-01   -7.71666E+00
0.00000E+00   -7.67589E-04   -3.77665E+00   -2.58677E-01   1.90821E+03   -8.34268E-01
0.00000E+00   -1.71170E+00   1.38857E-03   -3.96666E+00   1.33254E+00   1.04132E+03

```

Frequency 0.4333 Period 14.5000
 Added Mass
 2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.18604E+00 -5.53512E-04 -3.38195E+00 -3.00647E-03 -3.93631E+00
 0.00000E+00 -4.39663E-04 9.56747E-01 -1.38411E-02 -4.10527E+00 5.76747E-03
 0.00000E+00 -3.38195E+00 -1.38411E-02 5.54912E+01 -2.91242E-01 -8.00878E+01
 -2.91235E-01 -3.00647E-03 -4.10527E+00 -1.53954E+00 3.85967E+03 1.47524E-01
 0.00000E+00 -3.93631E+00 5.76747E-03 -7.21483E+01 2.34235E+00 5.05874E+03
 Damping
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 3.36903E-01 -1.61543E-04 -1.17990E+00 -8.98300E-04 -1.93374E+00
 0.00000E+00 -8.25809E-05 3.96379E-01 -2.67124E-03 -3.85522E+00 1.52588E-03
 0.00000E+00 -1.17990E+00 -2.67124E-03 4.41979E+00 -1.56696E-01 -8.88101E+00
 0.00000E+00 -8.98300E-04 -3.85522E+00 -2.44414E-01 1.89272E+03 -8.05882E-01
 0.00000E+00 -1.93374E+00 1.52588E-03 -4.71270E+00 1.37849E+00 1.16872E+03
 Frequency 0.4488 Period 14.0000
 Added Mass
 2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.13145E+00 -5.37084E-04 -3.16874E+00 -2.86314E-03 -3.61585E+00
 0.00000E+00 -4.26881E-04 9.40124E-01 -1.38333E-02 -3.86460E+00 5.55538E-03
 0.00000E+00 -3.16874E+00 -1.38333E-02 5.47328E+01 -2.85617E-01 -7.98403E+01
 -2.91235E-01 -2.86314E-03 -3.86460E+00 -1.53473E+00 3.76924E+03 1.53264E-01
 0.00000E+00 -3.61585E+00 5.55538E-03 -7.25996E+01 2.26930E+00 4.89466E+03
 Damping
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 3.73050E-01 -1.76427E-04 -1.28792E+00 -1.04057E-03 -2.16791E+00
 0.00000E+00 -9.65805E-05 3.88220E-01 -2.51532E-03 -3.93647E+00 1.66927E-03
 0.00000E+00 -1.28792E+00 -2.51532E-03 4.80408E+00 -1.56436E-01 -1.02264E+01
 0.00000E+00 -1.04057E-03 -3.93647E+00 -2.28640E-01 1.87284E+03 -7.73476E-01
 0.00000E+00 -2.16791E+00 1.66927E-03 -5.62980E+00 1.42709E+00 1.30428E+03
 Frequency 0.4654 Period 13.5000
 Added Mass
 2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
 0.00000E+00 1.06586E+00 -5.16578E-04 -2.92262E+00 -2.67489E-03 -3.21614E+00
 0.00000E+00 -4.09302E-04 9.25419E-01 -1.38622E-02 -3.61435E+00 5.29543E-03
 0.00000E+00 -2.92262E+00 -1.38622E-02 5.38693E+01 -2.81384E-01 -7.92981E+01
 -2.91235E-01 -2.67489E-03 -3.61435E+00 -1.53134E+00 3.68461E+03 1.33350E-01
 0.00000E+00 -3.21614E+00 5.29543E-03 -7.28827E+01 2.19628E+00 4.69102E+03
 Damping
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 4.09464E-01 -1.92071E-04 -1.39217E+00 -1.19190E-03 -2.40778E+00
 0.00000E+00 -1.11315E-04 3.78652E-01 -2.34613E-03 -4.01996E+00 1.82023E-03
 0.00000E+00 -1.39217E+00 -2.34613E-03 5.17597E+00 -1.56103E-01 -1.17694E+01
 0.00000E+00 -1.19190E-03 -4.01996E+00 -2.11138E-01 1.84806E+03 -7.38728E-01
 0.00000E+00 -2.40778E+00 1.82023E-03 -6.74871E+00 1.47941E+00 1.44533E+03
 Frequency 0.4833 Period 13.0000
 Added Mass
 2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
 0.00000E+00 9.89848E-01 -4.91971E-04 -2.64781E+00 -2.43279E-03 -2.73638E+00
 0.00000E+00 -3.86732E-04 9.12928E-01 -1.39306E-02 -3.35429E+00 4.99285E-03
 0.00000E+00 -2.64781E+00 -1.39306E-02 5.29140E+01 -2.78854E-01 -7.83783E+01
 -2.91235E-01 -2.43279E-03 -3.35429E+00 -1.52956E+00 3.60668E+03 8.56128E-02
 0.00000E+00 -2.73638E+00 4.99285E-03 -7.29048E+01 2.12439E+00 4.44712E+03

Damping
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 4.44850E-01 -2.08090E-04 -1.48796E+00 -1.34486E-03 -2.64429E+00
 0.00000E+00 -1.26266E-04 3.67534E-01 -2.16329E-03 -4.10543E+00 1.96409E-03
 0.00000E+00 -1.48796E+00 -2.16329E-03 5.52215E+00 -1.55851E-01 -1.35185E+01
 0.00000E+00 -1.34486E-03 -4.10543E+00 -1.91373E-01 1.81773E+03 -7.06364E-01
 0.00000E+00 -2.64429E+00 1.96409E-03 -8.09321E+00 1.53619E+00 1.58818E+03
 Frequency 0.5027 Period 12.5000
 Added Mass
 2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
 0.00000E+00 9.04860E-01 -4.63495E-04 -2.35134E+00 -2.14537E-03 -2.18231E+00
 0.00000E+00 -3.59457E-04 9.02988E-01 -1.40388E-02 -3.08283E+00 4.64885E-03
 0.00000E+00 -2.35134E+00 -1.40388E-02 5.18897E+01 -2.77883E-01 -7.69998E+01
 -2.91235E-01 -2.14537E-03 -3.08283E+00 -1.52962E+00 3.53671E+03 1.10536E-02
 0.00000E+00 -2.18231E+00 4.64885E-03 -7.25622E+01 2.05309E+00 4.16504E+03
 Damping
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 4.77748E-01 -2.24075E-04 -1.57033E+00 -1.49515E-03 -2.86680E+00
 0.00000E+00 -1.40850E-04 3.54725E-01 -1.96887E-03 -4.19191E+00 2.10617E-03
 0.00000E+00 -1.57033E+00 -1.96887E-03 5.82708E+01 -1.55944E-01 -1.54718E+01
 0.00000E+00 -1.49515E-03 -4.19191E+00 -1.69068E-01 1.78126E+03 -6.79697E-01
 0.00000E+00 -2.86680E+00 2.10617E-03 -9.67603E+00 1.59883E+00 1.72826E+03
 Frequency 0.5236 Period 12.0000
 Added Mass
 2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
 0.00000E+00 8.13161E-01 -4.31654E-04 -2.04283E+00 -1.82029E-03 -1.56532E+00
 0.00000E+00 -3.28101E-04 8.95960E-01 -1.41878E-02 -2.79972E+00 4.27519E-03
 0.00000E+00 -2.04283E+00 -1.41878E-02 5.08261E+01 -2.78418E-01 -7.50928E+01
 -2.91235E-01 -1.82029E-03 -2.79972E+00 -1.53212E+00 3.47593E+03 -8.59432E-02
 0.00000E+00 -1.56532E+00 4.27519E-03 -7.17517E+01 1.98209E+00 3.84936E+03
 Damping
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 5.06659E-01 -2.39547E-04 -1.63452E+00 -1.63397E-03 -3.06241E+00
 0.00000E+00 -1.54316E-04 3.40096E-01 -1.76356E-03 -4.27828E+00 2.22983E-03
 0.00000E+00 -1.63452E+00 -1.76356E-03 6.07727E+00 -1.56755E-01 -1.76112E+01
 0.00000E+00 -1.63397E-03 -4.27828E+00 -1.43575E-01 1.73802E+03 -6.65896E-01
 0.00000E+00 -3.06241E+00 2.22983E-03 -1.14996E+01 1.66978E+00 1.86026E+03
 Frequency 0.5464 Period 11.5000
 Added Mass
 2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
 0.00000E+00 7.17671E-01 -3.97180E-04 -1.73364E+00 -1.46524E-03 -9.02886E-01
 0.00000E+00 -2.93729E-04 8.92230E-01 -1.43766E-02 -2.50405E+00 3.87773E-03
 0.00000E+00 -1.73364E+00 -1.43766E-02 4.97581E+01 -2.79929E-01 -7.25838E+01
 -2.91235E-01 -1.46524E-03 -2.50405E+00 -1.53788E+00 3.42566E+03 -1.97981E-01
 0.00000E+00 -9.02886E-01 3.87773E-03 -7.03624E+01 1.90773E+00 3.50745E+03
 Damping
 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
 0.00000E+00 5.30210E-01 -2.54108E-04 -1.67668E+00 -1.75871E-03 -3.21722E+00
 0.00000E+00 -1.65952E-04 3.23533E-01 -1.55034E-03 -4.36301E+00 2.33769E-03
 0.00000E+00 -1.67668E+00 -1.55034E-03 6.26077E+00 -1.58774E-01 -1.98890E+01
 0.00000E+00 -1.75871E-03 -4.36301E+00 -1.14457E-01 1.68729E+03 -6.70831E-01
 0.00000E+00 -3.21722E+00 2.33769E-03 -1.35278E+01 1.75203E+00 1.97855E+03

Frequency 0.5712 Period 11.0000
Added Mass
2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
0.00000E+00 6.21680E-01 -3.61052E-04 -1.43560E+00 -1.10033E-03 -2.19342E-01
0.00000E+00 -2.57797E-04 8.92183E-01 -1.46031E-02 -2.19619E+00 3.47226E-03
0.00000E+00 -1.43560E+00 -1.46031E-02 4.87222E+01 -2.81880E-01 -6.94586E+01
-2.91235E-01 -1.10033E-03 -2.19619E+00 -1.54779E+00 3.38736E+03 -3.13306E-01
0.00000E+00 -2.19342E-01 3.47226E-03 -6.83338E+01 1.82750E+00 3.14911E+03
Damping
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 5.47296E-01 -2.67307E-04 -1.69425E+00 -1.86312E-03 -3.31693E+00
0.00000E+00 -1.75144E-04 3.04961E-01 -1.33035E-03 -4.44358E+00 2.42345E-03
0.00000E+00 -1.69425E+00 -1.33035E-03 6.36889E+00 -1.62180E-01 -2.22343E+01
0.00000E+00 -1.86312E-03 -4.44358E+00 -8.13110E-02 1.62851E+03 -6.99530E-01
0.00000E+00 -3.31693E+00 2.42345E-03 -1.57016E+01 1.84647E+00 2.07757E+03
Frequency 0.5984 Period 10.5000
Added Mass
2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
0.00000E+00 5.28497E-01 -3.24146E-04 -1.15972E+00 -7.33949E-04 4.54565E-01
0.00000E+00 -2.21802E-04 8.96192E-01 -1.48653E-02 -1.87574E+00 3.06775E-03
0.00000E+00 -1.15972E+00 -1.48653E-02 4.77512E+01 -2.83389E-01 -6.57449E+01
-2.91235E-01 -7.33949E-04 -1.87574E+00 -1.56288E+00 3.36264E+03 -4.18925E-01
0.00000E+00 4.54565E-01 3.06775E-03 -6.56566E+01 1.73532E+00 2.78592E+03
Damping
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 5.57177E-01 -2.78942E-04 -1.68617E+00 -1.94561E-03 -3.34825E+00
0.00000E+00 -1.81306E-04 2.84363E-01 -1.10689E-03 -4.51653E+00 2.48639E-03
0.00000E+00 -1.68617E+00 -1.10689E-03 6.40018E+00 -1.67580E-01 -2.45639E+01
0.00000E+00 -1.94561E-03 -4.51653E+00 -4.37130E-02 1.56117E+03 -7.58691E-01
0.00000E+00 -3.34825E+00 2.48639E-03 -1.79402E+01 1.95783E+00 2.15235E+03
Frequency 0.6283 Period 10.0000
Added Mass
2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
0.00000E+00 4.41123E-01 -2.87345E-04 -9.15135E-01 -3.88678E-04 1.08336E+00
0.00000E+00 -1.87404E-04 9.04558E-01 -1.51582E-02 -1.54459E+00 2.67350E-03
0.00000E+00 -9.15135E-01 -1.51582E-02 4.68718E+01 -2.83528E-01 -6.15273E+01
-2.91235E-01 -3.88678E-04 -1.54459E+00 -1.58390E+00 3.35282E+03 -4.98941E-01
0.00000E+00 1.08336E+00 2.67350E-03 -6.23799E+01 1.62509E+00 2.43041E+03
Damping
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 5.59521E-01 -2.88819E-04 -1.65300E+00 -2.00737E-03 -3.30219E+00
0.00000E+00 -1.84163E-04 2.61799E-01 -8.83836E-04 -4.57735E+00 2.53000E-03
0.00000E+00 -1.65300E+00 -8.83836E-04 6.35548E+00 -1.75119E-01 -2.67793E+01
0.00000E+00 -2.00737E-03 -4.57735E+00 -1.73024E-03 1.48486E+03 -8.50554E-01
0.00000E+00 -3.30219E+00 2.53000E-03 -2.01418E+01 2.08701E+00 2.19908E+03
Frequency 0.6614 Period 9.5000
Added Mass
2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
0.00000E+00 3.62001E-01 -2.51372E-04 -7.08329E-01 -7.41663E-05 1.63211E+00
0.00000E+00 -1.56187E-04 9.17457E-01 -1.54764E-02 -1.20498E+00 2.28739E-03
0.00000E+00 -7.08329E-01 -1.54764E-02 4.61046E+01 -2.81198E-01 -5.69325E+01
-2.91235E-01 -7.41663E-05 -1.20498E+00 -1.61129E+00 3.35905E+03 -5.37380E-01
0.00000E+00 1.63211E+00 2.28739E-03 -5.86015E+01 1.48846E+00 2.09464E+03

Damping
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 5.54371E-01 -2.96826E-04 -1.59665E+00 -2.05850E-03 -3.17565E+00
0.00000E+00 -1.83663E-04 2.37438E-01 -6.65032E-04 -4.61999E+00 2.55349E-03
0.00000E+00 -1.59665E+00 -6.65032E-04 6.23979E+00 -1.84889E-01 -2.87709E+01
0.00000E+00 -2.05850E-03 -4.61999E+00 4.42778E-02 1.39931E+03 -9.75349E-01
0.00000E+00 -3.17565E+00 2.55349E-03 -2.21861E+01 2.23434E+00 2.21539E+03
Frequency 0.6981 Period 9.0000
Added Mass
2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
0.00000E+00 2.92877E-01 -2.16766E-04 -5.43037E-01 1.94198E-04 2.07178E+00
0.00000E+00 -1.29565E-04 9.34824E-01 -1.58092E-02 -8.61137E-01 1.90569E-03
0.00000E+00 -5.43037E-01 -1.58092E-02 4.54605E+01 -2.75316E-01 -5.21247E+01
-2.91235E-01 1.94198E-04 -8.61137E-01 -1.64396E+00 3.38196E+03 -5.18869E-01
0.00000E+00 2.07178E+00 1.90569E-03 -5.44735E+01 1.31701E+00 1.78920E+03
Damping
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 5.42077E-01 -3.02864E-04 -1.52004E+00 -2.12026E-03 -2.97422E+00
0.00000E+00 -1.80155E-04 2.11575E-01 -4.56041E-04 -4.63597E+00 2.55850E-03
0.00000E+00 -1.52004E+00 -4.56041E-04 6.06164E+00 -1.96608E-01 -3.04479E+01
0.00000E+00 -2.12026E-03 -4.63597E+00 9.33265E-02 1.30466E+03 -1.12747E+00
0.00000E+00 -2.97422E+00 2.55850E-03 -2.39598E+01 2.39687E+00 2.20069E+03
Frequency 0.7392 Period 8.5000
Added Mass
2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
0.00000E+00 2.34776E-01 -1.83937E-04 -4.20357E-01 4.04321E-04 2.38590E+00
0.00000E+00 -1.08850E-04 9.56149E-01 -1.61390E-02 -5.19675E-01 1.51510E-03
0.00000E+00 -4.20357E-01 -1.61390E-02 4.49415E+01 -2.64682E-01 -4.72814E+01
-2.91235E-01 4.04321E-04 -5.19675E-01 -1.67821E+00 3.42092E+03 -4.28670E-01
0.00000E+00 2.38590E+00 1.51510E-03 -5.01625E+01 1.10155E+00 1.52192E+03
Damping
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 5.23176E-01 -3.06758E-04 -1.42674E+00 -2.23274E-03 -2.71176E+00
0.00000E+00 -1.74519E-04 1.84621E-01 -2.62483E-04 -4.61408E+00 2.53700E-03
0.00000E+00 -1.42674E+00 -2.62483E-04 5.83060E+00 -2.09438E-01 -3.17302E+01
0.00000E+00 -2.23274E-03 -4.61408E+00 1.43864E-01 1.20109E+03 -1.29390E+00
0.00000E+00 -2.71176E+00 2.53700E-03 -2.53609E+01 2.56587E+00 2.15608E+03
Frequency 0.7854 Period 8.0000
Added Mass
2.40293E-02 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 -2.91235E-01 0.00000E+00
0.00000E+00 1.88075E-01 -1.53271E-04 -3.39173E-01 5.38647E-04 2.57310E+00
0.00000E+00 -9.54924E-05 9.79966E-01 -1.64344E-02 -1.88039E-01 1.11030E-03
0.00000E+00 -3.39173E-01 -1.64344E-02 4.45427E+01 -2.47743E-01 -4.25706E+01
-2.91235E-01 5.38647E-04 -1.88039E-01 -1.70322E+00 3.47269E+03 -2.49796E-01
0.00000E+00 2.57310E+00 1.11030E-03 -4.58456E+01 8.30319E-01 1.29753E+03
Damping
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 4.98268E-01 -3.08216E-04 -1.32082E+00 -2.50167E-03 -2.40590E+00
0.00000E+00 -1.69179E-04 1.57015E-01 -9.16201E-05 -4.53785E+00 2.47809E-03
0.00000E+00 -1.32082E+00 -9.16201E-05 5.55479E+00 -2.21029E-01 -3.25443E+01
0.00000E+00 -2.50167E-03 -4.53785E+00 1.92864E-01 1.08854E+03 -1.43919E+00
0.00000E+00 -2.40590E+00 2.47809E-03 -2.62710E+01 2.71726E+00 2.08347E+03

Frequency	1.5708	Period	4.0000			
Added Mass						
2.40293E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-2.91235E-01	0.00000E+00	
0.00000E+00	1.78915E-01	-3.86275E-05	-6.23960E-01	1.45777E-03	1.40736E+00	
0.00000E+00	-1.21238E-04	1.25587E+00	-1.94758E-02	4.75410E-01	3.45927E-03	
0.00000E+00	-6.23960E-01	-1.94758E-02	4.39697E+01	-2.33503E-02	-2.36498E+01	
-2.91235E-01	1.45777E-03	4.75410E-01	-2.48146E+00	4.43577E+03	2.26953E+00	
0.00000E+00	1.40736E+00	3.45927E-03	-2.45319E+01	-2.33983E+00	1.00058E+03	
Damping						
0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
0.00000E+00	1.48704E-01	-6.09975E-05	-4.51432E-01	3.71329E-03	1.08706E-01	
0.00000E+00	-3.42386E-05	3.22427E-02	-1.44211E-04	-2.63241E+00	-9.35764E-04	
0.00000E+00	-4.51432E-01	-1.44211E-04	3.54342E+00	-1.48295E-02	-1.97914E+01	
0.00000E+00	3.71329E-03	-2.63241E+00	2.63560E-02	3.85314E+02	2.46186E-01	
0.00000E+00	1.08706E-01	-9.35764E-04	-2.17474E+01	-1.88750E-01	7.85019E+02	
Frequency	2.0944	Period	3.0000			
Added Mass						
2.40293E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	-2.91235E-01	0.00000E+00	
0.00000E+00	2.86044E-01	-5.93701E-05	-8.02152E-01	-4.83856E-03	7.69797E-01	
0.00000E+00	-9.29816E-05	1.29198E+00	-1.97568E-02	-1.50105E-01	1.16394E-03	
0.00000E+00	-8.02152E-01	-1.97568E-02	4.44613E+01	-2.05249E-01	-2.62629E+01	
-2.91235E-01	-4.83856E-03	-1.50105E-01	-2.44713E+00	4.63731E+03	3.10435E-02	
0.00000E+00	7.69797E-01	1.16394E-03	-2.73785E+01	-6.73654E-01	1.33953E+03	
Damping						
0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
0.00000E+00	7.08680E-02	1.87103E-05	-2.93339E-01	-3.77867E-03	1.04065E+00	
0.00000E+00	2.41999E-05	1.69935E-02	-8.36350E-05	-1.48805E+00	-4.48695E-03	
0.00000E+00	-2.93339E-01	-8.36350E-05	2.34746E+00	-1.37003E-01	-1.50907E+01	
0.00000E+00	-3.77867E-03	-1.48805E+00	-7.80067E-02	2.13990E+02	-1.36377E+00	
0.00000E+00	1.04065E+00	-4.48695E-03	-1.51197E+01	8.42605E-01	3.92329E+02	

Ouput MOSES : Gaya/Momen 6 DOF (Orde-1)

```
*****
*                               *** MOSES ***                               *
*                               -----                               *
*                               18 October, 2015                               *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                               *
*                               -----                               *
*****
```

+++ P A N E L W A V E F R E Q U E N C Y F O R C E S F O R A F R A M A X +++
=====

Pressure Name = AFRAMAX Heading = 0.00

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge Force /		Sway Force /		Heave Force /		Roll Moment /		Pitch Moment /		Yaw Moment /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.2513	25.00	878.	-44	0.	0	7227.	58	4.	-134	957443.	-107	35.	56
0.3142	20.00	1178.	-19	0.	0	5657.	89	6.	-117	798401.	-67	54.	81
0.3307	19.00	1233.	-11	0.	0	5169.	98	6.	-113	749653.	-55	59.	88
0.3491	18.00	1274.	-2	0.	73	4594.	109	6.	-109	692384.	-41	64.	96
0.3696	17.00	1292.	7	0.	79	3916.	121	6.	-105	625090.	-24	68.	106
0.3927	16.00	1270.	19	0.	86	3125.	136	6.	-102	546551.	-3	70.	117
0.4189	15.00	1186.	34	0.	94	2217.	155	5.	-101	456702.	22	70.	131
0.4333	14.50	1110.	43	0.	0	1726.	167	5.	-103	408310.	38	69.	140
0.4488	14.00	1006.	52	0.	0	1218.	-178	4.	-109	358762.	56	66.	150
0.4654	13.50	869.	63	0.	0	710.	-160	4.	-120	309753.	78	62.	162
0.4833	13.00	696.	74	0.	0	256.	-114	4.	-136	263996.	104	57.	176
0.5027	12.50	483.	86	0.	0	354.	2	4.	-149	225371.	135	50.	-165
0.5236	12.00	234.	95	0.	0	734.	37	5.	-155	198166.	173	44.	-143
0.5464	11.50	68.	-14	0.	0	1029.	62	7.	-153	184324.	-144	38.	-115
0.5712	11.00	344.	-29	0.	0	1175.	88	8.	-146	180172.	-99	34.	-81
0.5984	10.50	608.	-10	0.	0	1129.	118	9.	-134	177479.	-52	33.	-44
0.6283	10.00	794.	13	0.	0	875.	154	9.	-117	168672.	0	33.	-7
0.6614	9.50	833.	41	0.	0	485.	-147	8.	-98	151817.	60	32.	28
0.6981	9.00	662.	73	0.	0	380.	-31	6.	-78	133169.	133	29.	63
0.7392	8.50	283.	100	0.	0	640.	52	4.	-63	120859.	-139	25.	99
0.7854	8.00	237.	16	0.	0	589.	123	3.	-55	108666.	-40	19.	146
0.8378	7.50	476.	55	0.	0	207.	-113	2.	-61	85984.	79	10.	-113
0.8976	7.00	254.	104	0.	101	391.	61	7.	-113	62965.	-127	43.	59
0.9666	6.50	228.	62	0.	0	287.	100	11.	84	9939.	-22	12.	-177
1.0472	6.00	119.	109	1.	105	322.	130	24.	-51	35012.	-66	231.	103
1.1424	5.50	105.	115	0.	-10	47.	-143	9.	-130	11929.	-148	169.	-10
1.2566	5.00	52.	120	0.	0	275.	-40	6.	-56	33226.	113	104.	127
1.3963	4.50	37.	118	0.	0	507.	-156	2.	118	52409.	28	90.	-36
1.5708	4.00	16.	129	0.	0	51.	-135	0.	0	6956.	116	18.	-65
2.0944	3.00	2.	179	0.	0	16.	13	5.	-56	4540.	-165	86.	119

```

*****
*                                     *** MOSES ***                             *
*                                     -----                             *
*                                     18 October, 2015                             *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                       *
*                                                                                       *
*****
    
```

+++ P A N E L W A V E F R E Q U E N C Y F O R C E S F O R A F R A M A X +++

Pressure Name = AFRAMAX Heading = 45.00

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge Force /		Sway Force /		Heave Force /		Roll Moment /		Pitch Moment /		Yaw Moment /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase
0.2513	25.00	646. -57	1389. -61	7566. 45	22507. 119	985338. -124	166370. -52						
0.3142	20.00	923. -39	2044. -48	6419. 68	32616. 133	863686. -95	247513. -33						
0.3307	19.00	991. -34	2200. -44	6072. 75	34932. 137	827818. -86	267673. -28						
0.3491	18.00	1059. -28	2353. -40	5665. 84	37122. 142	785991. -76	288084. -22						
0.3696	17.00	1126. -20	2488. -35	5183. 93	38925. 147	736840. -63	307269. -14						
0.3927	16.00	1184. -11	2580. -29	4609. 105	39913. 153	678747. -48	322704. -5						
0.4189	15.00	1223. -1	2590. -22	3927. 119	39451. 161	609970. -30	330490. 5						
0.4333	14.50	1230. 4	2548. -18	3540. 127	38417. 165	571086. -20	329904. 11						
0.4488	14.00	1226. 11	2465. -13	3120. 136	36693. 170	529057. -7	325344. 19						
0.4654	13.50	1205. 19	2334. -8	2669. 147	34165. 176	483938. 5	316071. 28						
0.4833	13.00	1163. 27	2147. -2	2188. 159	30738. -177	436023. 21	301433. 38						
0.5027	12.50	1095. 36	1901. 4	1683. 173	26355. -169	386013. 39	280980. 50						
0.5236	12.00	994. 47	1594. 11	1168. -167	21028. -161	335247. 61	254594. 64						
0.5464	11.50	854. 59	1233. 19	673. -139	14870. -153	286022. 87	222663. 82						
0.5712	11.00	669. 72	831. 27	328. -74	8179. -147	241898. 119	186335. 104						
0.5984	10.50	435. 86	427. 26	486. 10	2355. 174	207473. 158	147936. 132						
0.6283	10.00	161. 95	218. -29	789. 52	6224. 103	186357. -156	111776. 169						
0.6614	9.50	156. -33	465. -58	980. 87	11442. 116	177227. -105	85051. -140						
0.6981	9.00	447. -19	692. -43	989. 126	14501. 141	172623. -50	74367. -78						
0.7392	8.50	665. 7	754. -17	808. 176	14178. 172	163736. 11	73425. -13						
0.7854	8.00	714. 40	604. 14	539. -109	9726. -147	146449. 84	65991. 53						
0.8378	7.50	513. 78	288. 38	464. 0	1788. -101	124763. 174	43455. 135						
0.8976	7.00	115. 89	237. 1	553. 112	6211. 145	111108. -68	24129. -84						
0.9666	6.50	326. 32	313. 48	261. -150	7910. -136	66121. 39	33202. 66						
1.0472	6.00	269. 94	69. 68	327. 21	784. 17	75955. -155	20392. -105						
1.1424	5.50	152. 58	314. 137	193. -91	5307. -73	53164. 92	55515. 125						
1.2566	5.00	69. 101	283. -10	241. -168	4968. -179	47225. 13	37427. 8						
1.3963	4.50	44. 105	122. 43	133. -128	2048. -142	29622. 46	10794. 29						
1.5708	4.00	27. 123	463. -59	61. 68	5904. 118	20555. -113	57313. -75						
2.0944	3.00	2. 149	114. -86	50. -50	1372. 86	12197. 135	8159. -123						

```

*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     -----                               *
*                                     18 October, 2015                               *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                       *
*                                                                                       *
*****
    
```

+++ P A N E L W A V E F R E Q U E N C Y F O R C E S F O R A F R A M A X +++

Pressure Name = AFRAMAX Heading = 90.00

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge Force /		Sway Force /		Heave Force /		Roll Moment /		Pitch Moment /		Yaw Moment /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.2513	25.00	0.	0	2043.	-92	7908.	12	33203.	87	1010643.	-167	242367.	-92
0.3142	20.00	0.	0	3188.	-96	7221.	18	51268.	83	926182.	-162	377140.	-96
0.3307	19.00	0.	0	3512.	-97	7041.	19	56314.	82	904087.	-160	415196.	-97
0.3491	18.00	0.	0	3874.	-99	6841.	21	61893.	80	879624.	-158	457515.	-98
0.3696	17.00	0.	0	4268.	-101	6619.	23	67935.	79	852406.	-156	503696.	-100
0.3927	16.00	0.	0	4686.	-103	6370.	25	74254.	76	821943.	-154	552484.	-103
0.4189	15.00	0.	0	5104.	-106	6089.	28	80481.	74	787652.	-151	601308.	-105
0.4333	14.50	0.	0	5303.	-107	5935.	29	83385.	72	768850.	-150	624481.	-106
0.4488	14.00	0.	0	5487.	-109	5771.	31	86031.	71	748810.	-148	645960.	-108
0.4654	13.50	0.	0	5650.	-110	5596.	33	88316.	69	727412.	-146	665003.	-109
0.4833	13.00	0.	0	5786.	-111	5408.	35	90138.	68	704533.	-144	680858.	-110
0.5027	12.50	0.	0	5887.	-112	5207.	37	91401.	67	680038.	-142	692822.	-111
0.5236	12.00	0.	0	5948.	-113	4992.	40	92025.	66	653785.	-139	700304.	-112
0.5464	11.50	0.	0	5966.	-114	4761.	43	91952.	66	625622.	-137	702883.	-113
0.5712	11.00	0.	0	5938.	-114	4513.	46	91152.	66	595396.	-133	700340.	-113
0.5984	10.50	0.	0	5862.	-113	4248.	49	89623.	66	562955.	-130	692651.	-112
0.6283	10.00	0.	0	5740.	-112	3963.	53	87387.	67	528157.	-126	679950.	-110
0.6614	9.50	0.	0	5573.	-110	3659.	58	84488.	70	490867.	-121	662480.	-108
0.6981	9.00	0.	0	5366.	-107	3334.	63	80982.	73	450938.	-116	640517.	-105
0.7392	8.50	0.	0	5121.	-102	2988.	70	76928.	78	408150.	-109	614304.	-100
0.7854	8.00	0.	0	4840.	-96	2615.	77	72376.	84	361884.	-102	583989.	-94
0.8378	7.50	0.	0	4526.	-88	2195.	86	67360.	92	309408.	-93	549561.	-85
0.8976	7.00	0.	0	4178.	-77	1464.	95	61870.	102	218671.	-84	510822.	-75
0.9666	6.50	0.	0	3791.	-63	1831.	110	55953.	116	259096.	-72	467088.	-61
1.0472	6.00	0.	0	3359.	-46	1454.	124	49340.	133	215666.	-58	417015.	-44
1.1424	5.50	0.	0	2816.	-24	1044.	149	41040.	154	158547.	-32	353258.	-23
1.2566	5.00	0.	0	2588.	19	692.	174	38463.	-162	109940.	-7	324722.	19
1.3963	4.50	0.	0	1975.	58	282.	-169	28962.	-123	53326.	15	248941.	58
1.5708	4.00	0.	0	1394.	116	397.	-76	20771.	-67	56902.	97	177187.	115
2.0944	3.00	0.	0	1105.	64	52.	130	14641.	-118	8964.	-27	134702.	59

```

*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     -----                               *
*                                     18 October, 2015                               *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                       *
*                                                                                   *
*****
    
```

+++ P A N E L W A V E F R E Q U E N C Y F O R C E S F O R A F R A M A X +++

Pressure Name = AFRAMAX Heading = 135.00

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge Force /		Sway Force /		Heave Force /		Roll Moment /		Pitch Moment /		Yaw Moment /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase
0.2513	25.00	646. 58	1391. -123	7558. -21	22554. 55	977838. 148	166942. -132						
0.3142	20.00	923. 40	2055. -144	6414. -35	32882. 33	850938. 128	250776. -158						
0.3307	19.00	991. 35	2216. -151	6070. -40	35322. 27	813779. 121	272457. -166						
0.3491	18.00	1059. 29	2377. -158	5667. -45	37699. 19	770652. 114	295159. -175						
0.3696	17.00	1126. 21	2524. -168	5191. -51	39779. 9	720275. 105	317772. 172						
0.3927	16.00	1184. 12	2633. -179	4626. -59	41173. -1	661150. 93	338251. 158						
0.4189	15.00	1223. 2	2667. 167	3953. -69	41280. -15	591683. 79	353195. 142						
0.4333	14.50	1230. -3	2640. 159	3572. -74	40597. -23	552626. 71	357079. 132						
0.4488	14.00	1226. -10	2573. 151	3158. -81	39261. -32	510551. 62	357563. 121						
0.4654	13.50	1205. -18	2459. 142	2712. -88	37145. -42	465493. 51	353812. 109						
0.4833	13.00	1163. -26	2290. 132	2234. -96	34127. -53	417691. 38	344988. 96						
0.5027	12.50	1095. -35	2058. 121	1729. -106	30110. -65	367720. 23	330350. 81						
0.5236	12.00	994. -46	1759. 108	1206. -118	25042. -79	316672. 5	309392. 64						
0.5464	11.50	854. -58	1393. 95	681. -134	18959. -95	266424. -16	282046. 45						
0.5712	11.00	669. -71	967. 79	203. -178	12064. -116	219921. -42	248980. 22						
0.5984	10.50	435. -85	497. 58	343. 51	5202. -159	181170. -76	212068. -5						
0.6283	10.00	161. -94	80. -39	702. 21	5373. 85	153869. -116	175035. -38						
0.6614	9.50	156. 34	467. -140	925. -2	11673. 40	137779. -162	143827. -80						
0.6981	9.00	447. 20	827. -167	946. -27	16621. 9	126342. 147	124313. -131						
0.7392	8.50	665. -6	1006. 165	730. -57	18198. -21	111169. 92	114822. 172						
0.7854	8.00	714. -39	918. 136	304. -94	14924. -55	90228. 25	103144. 114						
0.8378	7.50	513. -77	547. 109	194. 62	6596. -94	72491. -59	77759. 47						
0.8976	7.00	115. -88	176. 147	478. 12	3868. 35	66652. -156	44152. -43						
0.9666	6.50	326. -31	423. 162	373. -60	9407. -17	50319. 75	31643. -171						
1.0472	6.00	269. -93	358. 131	147. 13	4649. -64	32544. -67	18608. 96						
1.1424	5.50	152. -57	210. 100	186. -34	3726. -40	9414. 119	22924. 71						
1.2566	5.00	69. -100	95. -114	38. -86	1235. 43	13858. 26	16159. -54						
1.3963	4.50	44. -104	153. -174	80. -46	2641. -5	14047. 74	8727. 128						
1.5708	4.00	27. -122	570. 170	63. 41	7916. -10	7530. -69	52263. 179						
2.0944	3.00	2. -148	161. -151	27. -5	2344. 25	2417. 124	11461. -130						

```

*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     -----                               *
*                                     18 October, 2015                               *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                       *
*                                                                                   *
*****
    
```

+++ P A N E L W A V E F R E Q U E N C Y F O R C E S F O R A F R A M A X +++

Pressure Name = AFRAMAX Heading = 180.00

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge Force /		Sway Force /		Heave Force /		Roll Moment /		Pitch Moment /		Yaw Moment /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.2513	25.00	878.	45	0.	0	7224.	-35	4.	138	949058.	129	35.	-48
0.3142	20.00	1178.	20	0.	0	5674.	-58	6.	106	787576.	97	55.	-84
0.3307	19.00	1233.	12	0.	-76	5195.	-66	6.	96	739078.	87	60.	-95
0.3491	18.00	1274.	3	0.	-86	4633.	-74	7.	84	682690.	75	65.	-109
0.3696	17.00	1292.	-6	0.	-100	3971.	-84	7.	68	617196.	61	70.	-125
0.3927	16.00	1270.	-18	0.	-115	3199.	-97	7.	49	541698.	42	73.	-145
0.4189	15.00	1186.	-33	0.	-134	2313.	-113	6.	23	456368.	19	74.	-170
0.4333	14.50	1110.	-42	0.	-145	1831.	-123	6.	7	410750.	5	73.	174
0.4488	14.00	1006.	-51	0.	0	1332.	-135	5.	-11	364155.	-11	71.	157
0.4654	13.50	869.	-62	0.	0	828.	-152	5.	-35	317957.	-31	68.	138
0.4833	13.00	696.	-73	0.	0	359.	173	4.	-67	274260.	-54	63.	115
0.5027	12.50	483.	-85	0.	0	288.	63	4.	-106	235968.	-82	57.	89
0.5236	12.00	234.	-94	0.	0	659.	19	4.	-148	206312.	-116	51.	58
0.5464	11.50	68.	15	0.	0	980.	-5	5.	173	187211.	-154	46.	20
0.5712	11.00	344.	30	0.	0	1169.	-29	7.	138	176912.	163	43.	-24
0.5984	10.50	608.	11	0.	0	1172.	-56	8.	105	169733.	117	44.	-72
0.6283	10.00	794.	-12	0.	0	959.	-87	8.	71	159326.	67	46.	-122
0.6614	9.50	833.	-40	0.	0	551.	-131	8.	35	143170.	8	47.	-173
0.6981	9.00	662.	-72	0.	0	244.	111	7.	-3	125610.	-61	43.	132
0.7392	8.50	283.	-99	0.	0	588.	12	5.	-47	113855.	-144	32.	70
0.7854	8.00	237.	-15	0.	0	696.	-50	2.	-83	103716.	119	15.	-16
0.8378	7.50	476.	-54	0.	0	307.	-130	2.	-60	85159.	5	14.	170
0.8976	7.00	254.	-103	0.	64	335.	14	9.	-145	70090.	-135	37.	59
0.9666	6.50	228.	-61	0.	0	567.	-90	5.	-91	68086.	71	14.	-114
1.0472	6.00	119.	-108	0.	168	105.	-136	18.	3	14733.	-100	186.	161
1.1424	5.50	105.	-114	0.	55	30.	115	8.	-90	9502.	-137	182.	59
1.2566	5.00	52.	-119	0.	0	268.	26	6.	-142	30745.	-120	47.	59
1.3963	4.50	37.	-117	0.	0	521.	159	4.	8	61831.	-29	70.	-148
1.5708	4.00	16.	-128	0.	0	120.	159	0.	0	17916.	-43	25.	-17
2.0944	3.00	2.	-178	0.	0	15.	135	2.	21	1751.	-35	35.	157

Ouput MOSES : Gaya/Momen Mean Drift (Orde-2)

Page 15

Licensee - Global Maritime

Rev 7.00.018

Ser614

```
*****
*                               *** MOSES ***                               *
*                               -----                               *
*                               18 October, 2015                               *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                               *
*                               -----                               *
*****
```

+++ M E A N W A V E D R I F T F O R C E S F O R A F R A M A X +++
=====

Drift Name = AFRAMAX Heading = 0.00 Computed by Salvesen

Motion Factor = 0.0000 Force Factor = 1.0000

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Mean Drift Force (With No Factor) / (Wave Amplitude)**2

E N C O U N T E R		T R A N S L A T I O N			R O T A T I O N		
Frequency	Period	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0.2513	25.000	-4.3	0.0	-22.9	0.0	2935.3	0.0
0.3142	20.000	-7.9	0.0	-30.6	0.0	3943.7	0.0
0.3307	19.000	-8.9	0.0	-32.3	0.0	4181.6	0.0
0.3491	18.000	-10.1	0.0	-34.2	0.0	4426.7	0.0
0.3696	17.000	-11.3	0.0	-35.9	0.0	4673.3	0.0
0.3927	16.000	-12.7	0.0	-37.6	0.0	4911.7	0.0
0.4189	15.000	-14.1	0.0	-39.1	0.0	5126.6	0.0
0.4333	14.500	-14.9	0.0	-39.6	0.0	5218.1	0.0
0.4488	14.000	-15.6	0.0	-40.1	0.0	5294.0	0.0
0.4654	13.500	-16.3	0.0	-40.3	0.0	5349.3	0.0
0.4833	13.000	-16.9	0.0	-40.3	0.0	5378.2	0.0
0.5027	12.500	-17.4	0.0	-40.0	0.0	5373.8	0.0
0.5236	12.000	-17.9	0.0	-39.3	0.0	5328.0	0.0
0.5464	11.500	-18.2	0.0	-38.2	0.0	5232.0	0.0
0.5712	11.000	-18.4	0.0	-36.6	0.0	5076.0	0.0
0.5984	10.500	-18.3	0.0	-34.4	0.0	4850.8	0.0
0.6283	10.000	-18.1	0.0	-31.5	0.0	4548.5	0.0
0.6614	9.500	-17.7	0.0	-28.0	0.0	4164.9	0.0
0.6981	9.000	-17.0	0.0	-23.8	0.0	3703.0	0.0
0.7392	8.500	-16.2	0.0	-19.2	0.0	3177.5	0.0
0.7854	8.000	-15.3	0.0	-14.4	0.0	2620.9	0.0
0.8378	7.500	-14.3	0.0	-9.9	0.0	2096.5	0.0
0.8976	7.000	-12.9	0.0	-7.9	-0.2	1847.5	0.0
0.9666	6.500	-13.0	0.0	-2.1	0.1	1167.3	0.0
1.0472	6.000	-13.8	0.0	-2.7	-0.2	1217.6	-0.1
1.1424	5.500	-12.6	0.0	-3.6	-0.1	1164.1	-0.1
1.2566	5.000	-12.5	0.0	-6.4	0.0	1394.4	0.0
1.3963	4.500	-12.2	0.0	-9.7	0.0	1715.5	0.0
1.5708	4.000	-12.1	0.0	-11.2	0.0	1824.4	0.0
2.0944	3.000	-10.1	0.0	-10.5	0.0	1644.7	0.1


```
*****
*                               *** MOSES ***                               *
*                               -----                               *
*                               18 October, 2015                               *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                               *
*                               *****                               *
*****
```

+++ M E A N W A V E D R I F T F O R C E S F O R A F R A M A X +++
=====

Drift Name = AFRAMAX Heading = 45.00 Computed by Salvesen

Motion Factor = 0.0000 Force Factor = 1.0000

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Mean Drift Force (With No Factor) / (Wave Amplitude)**2

E N C O U N T E R		T R A N S L A T I O N			R O T A T I O N		
Frequency	Period	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0.2513	25.000	-3.5	-3.5	-21.0	61.5	2714.7	-453.6
0.3142	20.000	-7.3	-7.3	-26.2	121.6	3417.7	-922.4
0.3307	19.000	-8.5	-8.5	-27.0	140.4	3548.1	-1082.9
0.3491	18.000	-10.1	-10.1	-27.8	162.2	3663.4	-1281.3
0.3696	17.000	-12.2	-12.2	-28.3	187.3	3756.6	-1528.6
0.3927	16.000	-14.7	-14.7	-28.6	215.7	3820.8	-1838.9
0.4189	15.000	-17.9	-17.9	-28.6	247.4	3850.8	-2227.5
0.4333	14.500	-19.7	-19.7	-28.5	264.4	3852.2	-2455.7
0.4488	14.000	-21.8	-21.8	-28.4	282.0	3844.2	-2708.0
0.4654	13.500	-24.0	-24.0	-28.1	300.3	3826.6	-2984.8
0.4833	13.000	-26.4	-26.4	-27.8	319.2	3798.5	-3285.2
0.5027	12.500	-28.9	-28.9	-27.4	338.7	3757.8	-3607.3
0.5236	12.000	-31.6	-31.6	-26.9	358.8	3701.2	-3947.7
0.5464	11.500	-34.4	-34.4	-26.2	379.7	3623.3	-4301.7
0.5712	11.000	-37.1	-37.1	-25.4	401.1	3517.0	-4663.7
0.5984	10.500	-39.8	-39.8	-24.2	423.1	3373.8	-5027.1
0.6283	10.000	-42.3	-42.3	-22.8	445.4	3185.0	-5384.5
0.6614	9.500	-44.7	-44.7	-20.9	467.7	2943.7	-5728.0
0.6981	9.000	-46.7	-46.7	-18.7	489.7	2647.0	-6049.0
0.7392	8.500	-48.3	-48.3	-16.1	511.1	2299.4	-6337.7
0.7854	8.000	-49.5	-49.5	-13.3	532.4	1917.2	-6582.7
0.8378	7.500	-50.0	-50.0	-10.7	556.3	1538.7	-6765.9
0.8976	7.000	-49.2	-49.2	-10.2	616.8	1372.1	-6803.6
0.9666	6.500	-48.9	-48.9	-5.5	520.2	951.1	-6912.2
1.0472	6.000	-49.8	-49.8	-6.3	567.7	901.2	-7285.0
1.1424	5.500	-47.1	-47.1	-5.3	577.0	569.3	-7046.5
1.2566	5.000	-44.9	-44.9	-0.9	562.6	-14.9	-6988.3
1.3963	4.500	-41.0	-41.0	-5.1	547.5	566.4	-6577.7
1.5708	4.000	-37.8	-37.8	-4.0	553.0	323.9	-6422.3
2.0944	3.000	-22.2	-22.2	10.1	365.6	-1271.1	-4256.8

```
*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     -----                               *
*                                     18 October, 2015                               *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                       *
*                                                                                       *
*****
```

+++ M E A N W A V E D R I F T F O R C E S F O R A F R A M A X +++
=====

Drift Name = AFRAMAX Heading = 90.00 Computed by Salvesen

Motion Factor = 0.0000 Force Factor = 1.0000

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Mean Drift Force (With No Factor) / (Wave Amplitude)**2

E N C O U N T E R		T R A N S L A T I O N			R O T A T I O N		
Frequency	Period	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0.2513	25.000	0.0	-5.7	-19.2	95.0	2503.6	-713.8
0.3142	20.000	0.0	-12.7	-21.8	198.4	2928.4	-1599.7
0.3307	19.000	0.0	-15.4	-21.8	232.8	2965.4	-1930.6
0.3491	18.000	0.0	-18.8	-21.6	274.1	2972.0	-2355.2
0.3696	17.000	0.0	-23.3	-21.0	323.2	2943.0	-2904.4
0.3927	16.000	0.0	-29.1	-20.0	381.2	2878.7	-3616.6
0.4189	15.000	0.0	-36.5	-18.9	448.3	2789.4	-4533.5
0.4333	14.500	0.0	-41.0	-18.2	485.2	2742.1	-5080.2
0.4488	14.000	0.0	-46.0	-17.6	524.4	2698.0	-5689.3
0.4654	13.500	0.0	-51.5	-17.1	565.6	2661.0	-6360.9
0.4833	13.000	0.0	-57.5	-16.6	608.9	2634.2	-7092.2
0.5027	12.500	0.0	-63.9	-16.3	654.2	2618.8	-7877.0
0.5236	12.000	0.0	-70.6	-16.0	701.9	2613.1	-8706.1
0.5464	11.500	0.0	-77.6	-15.8	752.2	2611.9	-9567.4
0.5712	11.000	0.0	-84.7	-15.7	805.5	2606.0	-10446.4
0.5984	10.500	0.0	-91.7	-15.4	862.5	2582.6	-11327.0
0.6283	10.000	0.0	-98.5	-15.0	923.6	2526.8	-12191.2
0.6614	9.500	0.0	-104.9	-14.2	989.3	2423.5	-13018.9
0.6981	9.000	0.0	-110.6	-13.0	1059.8	2260.0	-13787.2
0.7392	8.500	0.0	-115.5	-11.4	1135.3	2029.8	-14469.1
0.7854	8.000	0.0	-119.4	-9.4	1215.6	1737.9	-15032.6
0.8378	7.500	0.0	-121.9	-7.2	1303.1	1415.7	-15436.6
0.8976	7.000	0.0	-122.4	-7.4	1441.0	1321.8	-15577.8
0.9666	6.500	0.0	-120.6	-1.9	1369.7	793.8	-15516.5
1.0472	6.000	0.0	-122.4	-2.9	1454.4	698.9	-15937.3
1.1424	5.500	0.0	-116.0	-5.0	1481.8	729.9	-15160.4
1.2566	5.000	0.0	-112.3	13.0	1449.2	-1344.5	-14702.4
1.3963	4.500	0.0	-99.3	-5.7	1342.2	807.1	-13344.2
1.5708	4.000	0.0	-94.8	7.9	1273.8	-829.2	-12974.8
2.0944	3.000	0.0	-48.7	37.6	752.0	-4614.1	-7731.7

```
*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     -----                               *
*                                     18 October, 2015                               *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                       *
*                                     -----                               *
*****
```

+++ M E A N W A V E D R I F T F O R C E S F O R A F R A M A X +++
=====

Drift Name = AFRAMAX Heading = 135.00 Computed by Salvesen

Motion Factor = 0.0000 Force Factor = 1.0000

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Mean Drift Force (With No Factor) / (Wave Amplitude)**2

E N C O U N T E R		T R A N S L A T I O N			R O T A T I O N		
Frequency	Period	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0.2513	25.000	3.5	-3.5	-21.0	61.5	2731.3	-440.6
0.3142	20.000	7.3	-7.3	-26.2	121.6	3463.2	-923.7
0.3307	19.000	8.5	-8.5	-27.0	140.4	3606.0	-1092.3
0.3491	18.000	10.1	-10.1	-27.8	162.2	3738.5	-1301.7
0.3696	17.000	12.2	-12.2	-28.3	187.3	3855.6	-1563.7
0.3927	16.000	14.7	-14.7	-28.6	215.7	3952.9	-1892.4
0.4189	15.000	17.9	-17.9	-28.6	247.4	4028.7	-2302.2
0.4333	14.500	19.7	-19.7	-28.5	264.4	4058.8	-2541.2
0.4488	14.000	21.8	-21.8	-28.4	282.0	4084.1	-2803.9
0.4654	13.500	24.0	-24.0	-28.1	300.3	4104.4	-3089.9
0.4833	13.000	26.4	-26.4	-27.8	319.2	4119.3	-3397.4
0.5027	12.500	28.9	-28.9	-27.4	338.7	4126.6	-3723.6
0.5236	12.000	31.6	-31.6	-26.9	358.8	4122.9	-4063.9
0.5464	11.500	34.4	-34.4	-26.2	379.7	4102.5	-4412.7
0.5712	11.000	37.1	-37.1	-25.4	401.1	4058.0	-4763.3
0.5984	10.500	39.8	-39.8	-24.2	423.1	3980.3	-5107.7
0.6283	10.000	42.3	-42.3	-22.8	445.4	3860.2	-5437.3
0.6614	9.500	44.7	-44.7	-20.9	467.7	3690.0	-5742.2
0.6981	9.000	46.7	-46.7	-18.7	489.7	3465.9	-6011.1
0.7392	8.500	48.3	-48.3	-16.1	511.1	3191.6	-6231.1
0.7854	8.000	49.5	-49.5	-13.3	532.4	2882.1	-6386.1
0.8378	7.500	50.0	-50.0	-10.7	556.3	2575.5	-6452.6
0.8976	7.000	49.2	-49.2	-10.2	616.8	2499.9	-6334.1
0.9666	6.500	48.9	-48.9	-5.5	520.2	2028.9	-6286.4
1.0472	6.000	49.8	-49.8	-6.3	567.7	2074.5	-6426.2
1.1424	5.500	47.1	-47.1	-5.3	577.0	1765.6	-5984.6
1.2566	5.000	44.9	-44.9	-0.9	562.6	1164.9	-5541.6
1.3963	4.500	41.0	-41.0	-5.1	547.5	1695.3	-5001.2
1.5708	4.000	37.8	-37.8	-4.0	553.0	1399.4	-4662.3
2.0944	3.000	22.2	-22.2	10.1	365.6	-599.8	-3167.9

```

*****
*                                     *** MOSES ***                               *
*                                     -----                               *
*                                     18 October, 2015                               *
* Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT                       *
*                                                                                   *
*****
    
```

+++ M E A N W A V E D R I F T F O R C E S F O R A F R A M A X +++
 =====

Drift Name = AFRAMAX Heading = 180.00 Computed by Salvesen

Motion Factor = 0.0000 Force Factor = 1.0000

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

Mean Drift Force (With No Factor) / (Wave Amplitude)**2

E N C O U N T E R		T R A N S L A T I O N			R O T A T I O N		
Frequency	Period	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
0.2513	25.000	4.3	0.0	-22.9	0.0	2950.4	0.0
0.3142	20.000	7.9	0.0	-30.6	0.0	3974.4	0.0
0.3307	19.000	8.9	0.0	-32.3	0.0	4217.4	0.0
0.3491	18.000	10.1	0.0	-34.2	0.0	4468.8	0.0
0.3696	17.000	11.3	0.0	-35.9	0.0	4722.9	0.0
0.3927	16.000	12.7	0.0	-37.6	0.0	4970.3	0.0
0.4189	15.000	14.1	0.0	-39.1	0.0	5196.2	0.0
0.4333	14.500	14.9	0.0	-39.6	0.0	5294.2	0.0
0.4488	14.000	15.6	0.0	-40.1	0.0	5377.1	0.0
0.4654	13.500	16.3	0.0	-40.3	0.0	5440.1	0.0
0.4833	13.000	16.9	0.0	-40.3	0.0	5477.5	0.0
0.5027	12.500	17.4	0.0	-40.0	0.0	5482.4	0.0
0.5236	12.000	17.9	0.0	-39.3	0.0	5446.9	0.0
0.5464	11.500	18.2	0.0	-38.2	0.0	5362.0	0.0
0.5712	11.000	18.4	0.0	-36.6	0.0	5218.3	0.0
0.5984	10.500	18.3	0.0	-34.4	0.0	5006.2	0.0
0.6283	10.000	18.1	0.0	-31.5	0.0	4718.1	0.0
0.6614	9.500	17.7	0.0	-28.0	0.0	4349.6	0.0
0.6981	9.000	17.0	0.0	-23.8	0.0	3903.8	0.0
0.7392	8.500	16.2	0.0	-19.2	0.0	3394.9	0.0
0.7854	8.000	15.3	0.0	-14.4	0.0	2855.5	0.0
0.8378	7.500	14.3	0.0	-9.9	0.0	2348.0	0.0
0.8976	7.000	12.9	0.0	-7.9	-0.2	2113.8	0.0
0.9666	6.500	13.0	0.0	-2.1	0.1	1439.8	0.0
1.0472	6.000	13.8	0.0	-2.7	-0.2	1521.0	0.1
1.1424	5.500	12.6	0.0	-3.6	-0.1	1474.5	0.1
1.2566	5.000	12.5	0.0	-6.4	0.0	1724.6	0.0
1.3963	4.500	12.2	0.0	-9.7	0.0	2052.4	0.0
1.5708	4.000	12.1	0.0	-11.2	0.0	2166.9	0.0
2.0944	3.000	10.1	0.0	-10.5	0.0	1952.7	-0.1


```

*****
***      MOSES      ***
*****
-----
18 October, 2015
-----
Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT

Draft = 17.0 Meters      Trim Angle = 0.00 Deg.      GMT = 5.89 Meters
Roll Gy. Radius = 16.4 Meters      Pitch Gy. Radius = 72.9 Meters      Yaw Gy. Radius = 72.9 Meters
Heading = 45.00 Deg.      Forward Speed = 0.00 Knots      Linearization Based on 1/ 20

```

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++

Of Point On Body AFRAMAX At X = 120.5 Y = 0.0 Z = 12.1

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.2513	25.00	0.628	122	0.637	121	0.968	31	0.323	124	0.272	-56	0.144	-148
0.3142	20.00	0.573	140	0.583	139	0.918	47	0.609	144	0.428	-39	0.208	-132
0.3307	19.00	0.554	145	0.566	144	0.898	52	0.730	149	0.474	-34	0.224	-127
0.3491	18.00	0.532	151	0.547	150	0.872	57	0.912	155	0.527	-28	0.241	-121
0.3696	17.00	0.504	159	0.526	157	0.838	63	1.217	157	0.589	-21	0.257	-114
0.3927	16.00	0.469	168	0.501	163	0.792	70	1.808	151	0.661	-13	0.270	-107
0.4189	15.00	0.425	178	0.424	167	0.727	77	2.270	116	0.744	-4	0.271	-95
0.4333	14.50	0.399	-175	0.358	172	0.685	81	2.140	93	0.789	0	0.275	-87
0.4488	14.00	0.370	-168	0.303	-177	0.634	85	1.678	69	0.836	5	0.285	-80
0.4654	13.50	0.338	-160	0.279	-166	0.570	87	1.031	63	0.884	10	0.291	-73
0.4833	13.00	0.302	-152	0.254	-157	0.490	89	0.628	73	0.929	15	0.290	-65
0.5027	12.50	0.262	-142	0.222	-148	0.387	86	0.393	96	0.962	20	0.283	-56
0.5236	12.00	0.219	-132	0.184	-139	0.261	74	0.268	129	0.965	24	0.271	-46
0.5464	11.50	0.172	-119	0.141	-129	0.162	27	0.225	171	0.903	27	0.251	-35
0.5712	11.00	0.123	-106	0.097	-121	0.230	-33	0.233	-149	0.742	31	0.224	-22
0.5984	10.50	0.073	-92	0.055	-117	0.328	-54	0.255	-116	0.510	41	0.189	-7
0.6283	10.00	0.024	-82	0.025	-146	0.334	-56	0.268	-86	0.298	64	0.146	9
0.6614	9.50	0.023	145	0.036	167	0.269	-44	0.259	-55	0.161	110	0.097	27
0.6981	9.00	0.057	161	0.054	174	0.183	-17	0.225	-21	0.122	-179	0.048	42
0.7392	8.50	0.075	-171	0.058	-163	0.107	26	0.166	21	0.127	-117	0.017	-2
0.7854	8.00	0.071	-138	0.046	-136	0.059	99	0.093	81	0.112	-59	0.037	-23
0.8378	7.50	0.045	-100	0.022	-116	0.044	-161	0.053	-163	0.075	12	0.043	12
0.8976	7.00	0.009	-91	0.016	-147	0.039	-58	0.076	-53	0.041	123	0.024	61
0.9666	6.50	0.022	-147	0.018	-108	0.013	41	0.061	41	0.021	-119	0.007	9
1.0472	6.00	0.015	-85	0.004	-92	0.013	-149	0.017	-135	0.019	40	0.015	87
1.1424	5.50	0.007	-121	0.013	-28	0.006	95	0.027	60	0.011	-77	0.009	-68
1.2566	5.00	0.003	-79	0.009	178	0.006	14	0.013	29	0.006	-160	0.004	-95
1.3963	4.50	0.001	-75	0.003	-128	0.002	52	0.004	25	0.003	-137	0.002	80
1.5708	4.00	0.001	-55	0.010	125	0.001	-108	0.001	-110	0.002	68	0.004	30
2.0944	3.00	0.000	0	0.001	95	0.000	0	0.000	0	0.001	-37	0.001	-51

```

*****
***      MOSES      ***
*****
-----
18 October, 2015
-----
Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT

Draft = 17.0 Meters      Trim Angle = 0.00 Deg.      GMT = 5.89 Meters
Roll Gy. Radius = 16.4 Meters  Pitch Gy. Radius = 72.9 Meters  Yaw Gy. Radius = 72.9 Meters
Heading = 90.00 Deg.      Forward Speed = 0.00 Knots      Linearization Based on 1/ 20

```

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++

Of Point On Body AFRAMAX At X = 120.5 Y = 0.0 Z = 12.1

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/		/-----/	
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase	Ampl.	Phase
0.2513	25.00	0.000	0	0.936	90	1.012	0	0.482	89	0.002	-1	0.002	87
0.3142	20.00	0.000	0	0.908	90	1.034	0	0.984	87	0.006	-6	0.005	83
0.3307	19.00	0.000	0	0.902	90	1.044	0	1.218	86	0.009	-8	0.007	81
0.3491	18.00	0.000	0	0.897	89	1.057	0	1.587	83	0.011	-10	0.010	78
0.3696	17.00	0.000	0	0.887	88	1.076	0	2.129	68	0.016	-13	0.014	59
0.3927	16.00	0.000	0	0.860	85	1.104	0	2.974	46	0.023	-17	0.022	35
0.4189	15.00	0.000	0	0.770	82	1.146	-1	3.704	9	0.034	-22	0.030	-3
0.4333	14.50	0.000	0	0.707	83	1.176	-2	3.626	-11	0.043	-26	0.031	-25
0.4488	14.00	0.000	0	0.660	87	1.214	-4	3.338	-33	0.056	-31	0.031	-47
0.4654	13.50	0.000	0	0.642	90	1.263	-5	2.803	-51	0.073	-37	0.028	-65
0.4833	13.00	0.000	0	0.637	93	1.325	-8	2.262	-64	0.097	-45	0.024	-79
0.5027	12.50	0.001	-56	0.632	94	1.401	-12	1.812	-74	0.133	-56	0.021	-89
0.5236	12.00	0.001	-72	0.621	95	1.487	-18	1.455	-79	0.184	-72	0.019	-95
0.5464	11.50	0.001	-93	0.604	96	1.553	-28	1.183	-79	0.249	-93	0.017	-99
0.5712	11.00	0.002	-121	0.582	97	1.537	-41	0.974	-79	0.310	-121	0.015	-103
0.5984	10.50	0.002	-153	0.555	98	1.386	-55	0.807	-79	0.331	-153	0.014	-107
0.6283	10.00	0.001	175	0.525	100	1.132	-69	0.670	-77	0.298	175	0.013	-112
0.6614	9.50	0.001	149	0.490	102	0.852	-79	0.554	-76	0.234	149	0.012	-117
0.6981	9.00	0.001	130	0.451	104	0.605	-86	0.454	-73	0.170	130	0.011	-123
0.7392	8.50	0.001	118	0.409	108	0.416	-88	0.368	-70	0.119	118	0.010	-129
0.7854	8.00	0.000	0	0.363	112	0.279	-87	0.292	-66	0.083	112	0.009	-136
0.8378	7.50	0.000	0	0.314	118	0.182	-83	0.227	-61	0.059	109	0.008	-142
0.8976	7.00	0.000	0	0.265	126	0.099	-77	0.172	-54	0.041	110	0.007	-148
0.9666	6.50	0.000	0	0.215	136	0.087	-64	0.127	-45	0.029	112	0.006	-152
1.0472	6.00	0.000	0	0.166	150	0.054	-50	0.089	-32	0.022	125	0.006	-152
1.1424	5.50	0.000	0	0.120	168	0.030	-28	0.057	-16	0.013	147	0.005	-144
1.2566	5.00	0.000	0	0.087	-149	0.016	-3	0.047	15	0.008	171	0.003	-163
1.3963	4.50	0.000	0	0.054	-113	0.005	12	0.026	47	0.005	-152	0.003	-139
1.5708	4.00	0.000	0	0.030	-59	0.005	103	0.016	97	0.002	-105	0.002	-79
2.0944	3.00	0.000	0	0.012	-113	0.000	0	0.003	9	0.000	0	0.001	157

```

*****
***      MOSES      ***
*****
-----
18 October, 2015
-----
Response Amplitude Operators of AFRAMAX TANKER 120.000 DWT

Draft = 17.0 Meters      Trim Angle = 0.00 Deg.      GMT = 5.89 Meters
Roll Gy. Radius = 16.4 Meters  Pitch Gy. Radius = 72.9 Meters  Yaw Gy. Radius = 72.9 Meters
Heading = 135.00 Deg.      Forward Speed = 0.00 Knots      Linearization Based on 1/ 20

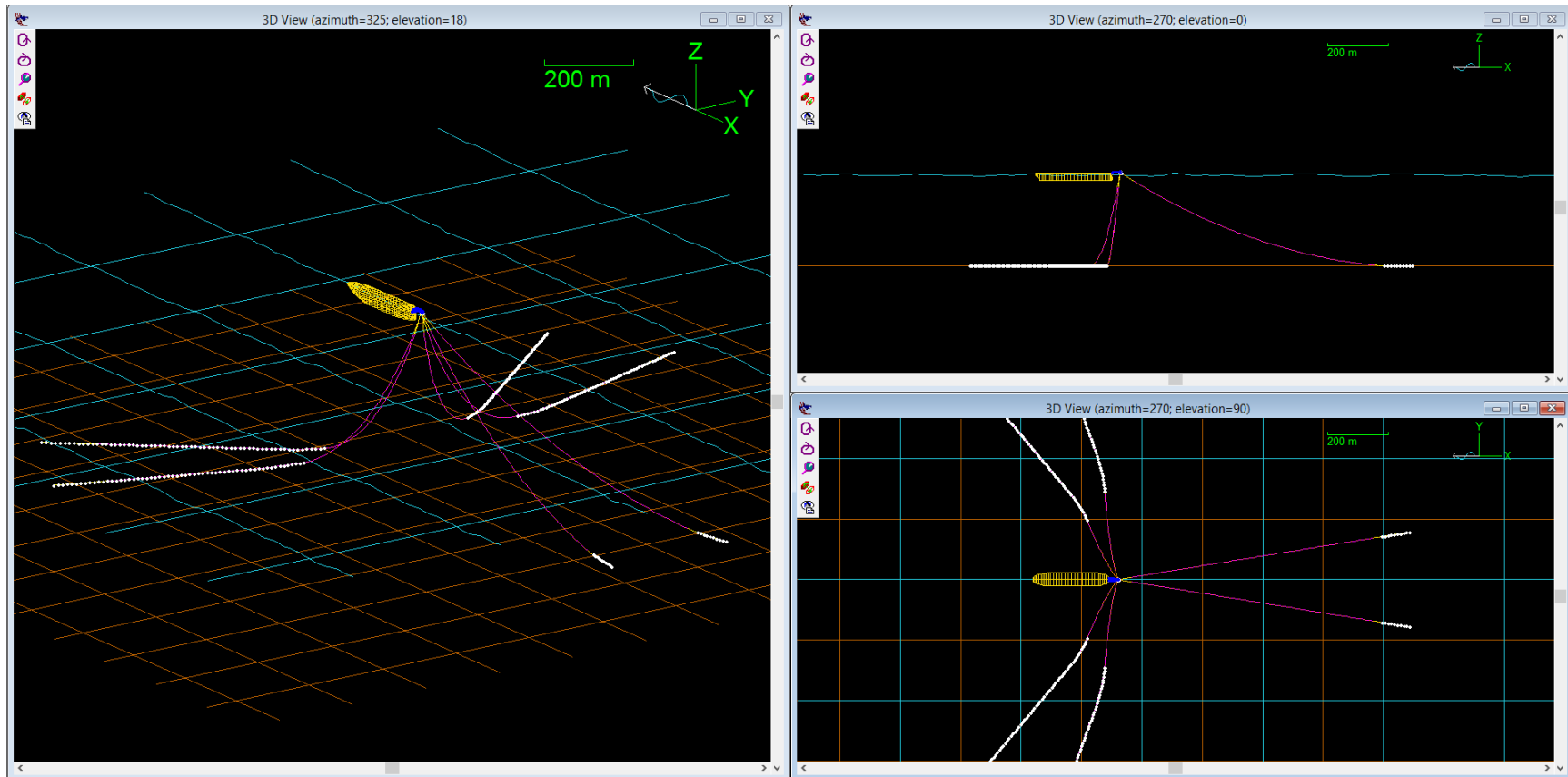
```

+++ M O T I O N R E S P O N S E O P E R A T O R S +++

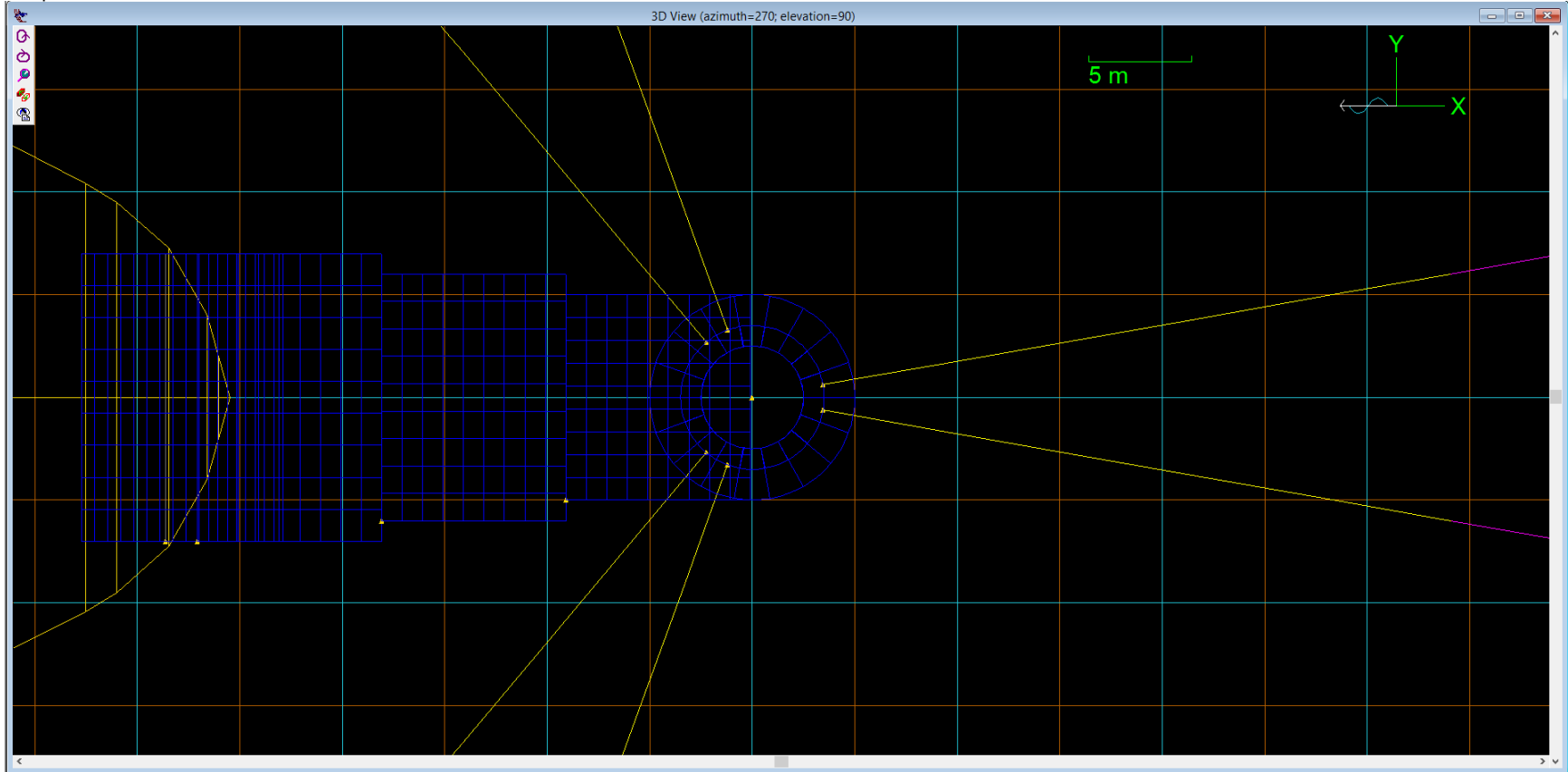
Of Point On Body AFRAMAX At X = 120.5 Y = 0.0 Z = 12.1

Process is DEFAULT: Units Are Degrees, Meters, and M-Tons Unless Specified

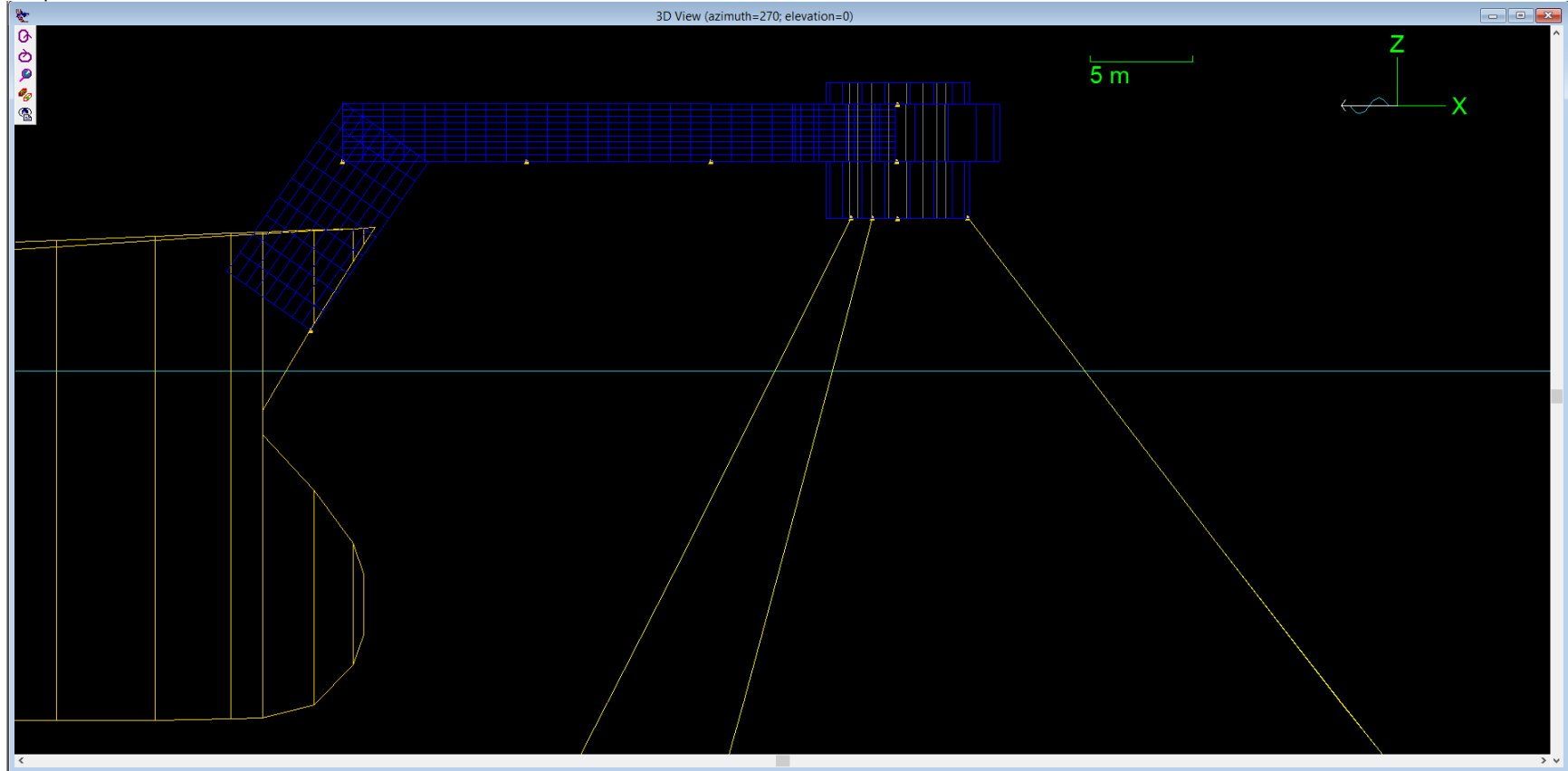
E N C O U N T E R		Surge /		Sway /		Heave /		Roll /		Pitch /		Yaw /	
-----		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.		Wave Ampl.	
Frequency	Period	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/	/-----/
-(Rad/Sec)-	-(Sec)-	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase	Ampl. Phase
0.2513	25.00	0.628	-121	0.636	59	0.969	-31	0.323	54	0.270	55	0.144	-30
0.3142	20.00	0.573	-139	0.583	41	0.924	-49	0.608	33	0.421	34	0.209	-48
0.3307	19.00	0.554	-144	0.565	35	0.907	-55	0.728	26	0.466	28	0.226	-53
0.3491	18.00	0.532	-150	0.545	29	0.885	-61	0.909	18	0.517	20	0.244	-59
0.3696	17.00	0.504	-158	0.521	20	0.857	-69	1.211	2	0.575	11	0.264	-66
0.3927	16.00	0.469	-166	0.482	8	0.821	-78	1.741	-27	0.643	0	0.288	-75
0.4189	15.00	0.425	-177	0.385	-6	0.775	-89	2.252	-86	0.719	-13	0.313	-87
0.4333	14.50	0.399	176	0.320	-9	0.749	-95	2.113	-126	0.760	-22	0.315	-95
0.4488	14.00	0.370	169	0.291	-8	0.719	-102	1.593	-168	0.801	-32	0.310	-103
0.4654	13.50	0.338	162	0.281	-13	0.687	-111	0.966	161	0.842	-43	0.308	-109
0.4833	13.00	0.302	153	0.257	-22	0.653	-120	0.550	143	0.878	-56	0.307	-117
0.5027	12.50	0.263	144	0.223	-33	0.614	-132	0.291	128	0.901	-72	0.303	-126
0.5236	12.00	0.220	134	0.183	-45	0.565	-148	0.118	106	0.898	-92	0.294	-136
0.5464	11.50	0.174	122	0.138	-58	0.483	-169	0.033	-5	0.844	-115	0.278	-148
0.5712	11.00	0.125	110	0.090	-76	0.334	159	0.110	-71	0.724	-141	0.254	-161
0.5984	10.50	0.075	96	0.043	-102	0.120	120	0.173	-95	0.555	-170	0.221	-176
0.6283	10.00	0.026	89	0.016	148	0.077	-92	0.211	-117	0.367	156	0.178	166
0.6614	9.50	0.022	-147	0.048	78	0.176	-136	0.223	-142	0.178	114	0.126	146
0.6981	9.00	0.056	-159	0.074	47	0.175	-178	0.206	-171	0.047	25	0.068	126
0.7392	8.50	0.075	173	0.082	18	0.117	140	0.161	152	0.078	-99	0.013	131
0.7854	8.00	0.071	140	0.069	-12	0.046	91	0.095	104	0.094	-152	0.036	-132
0.8378	7.50	0.045	102	0.037	-41	0.012	-80	0.041	4	0.062	155	0.056	-163
0.8976	7.00	0.009	91	0.012	-3	0.031	-159	0.064	-114	0.013	74	0.044	159
0.9666	6.50	0.021	148	0.024	5	0.019	118	0.063	164	0.020	-148	0.016	148
1.0472	6.00	0.015	86	0.018	-29	0.004	-162	0.014	49	0.018	149	0.016	166
1.1424	5.50	0.007	122	0.009	-66	0.005	144	0.026	-176	0.005	170	0.006	174
1.2566	5.00	0.003	80	0.003	74	0.001	88	0.004	146	0.004	-165	0.005	178
1.3963	4.50	0.001	75	0.004	13	0.001	130	0.006	154	0.003	-143	0.005	-140
1.5708	4.00	0.001	58	0.012	-5	0.001	-137	0.004	165	0.001	169	0.005	149
2.0944	3.00	0.000	0	0.002	30	0.000	0	0.001	-173	0.000	0	0.001	-174

Hasil Simulasi Struktur Tertambat Pada Kedalaman Perairan 300 M

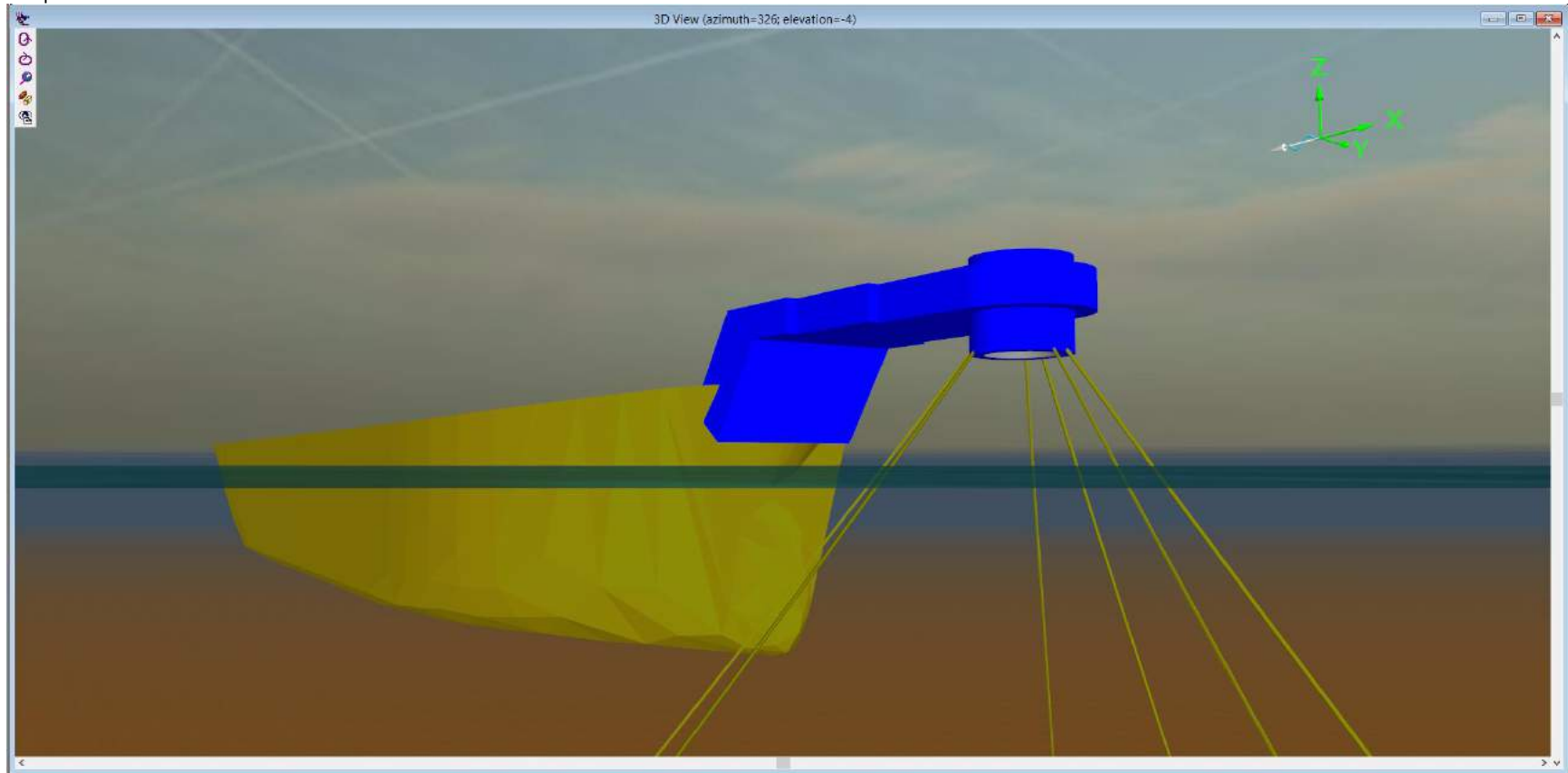
Gambar 1 Konfigurasi tali tambat dengan sistem *external turret mooring* pada kedalaman $d = 300$ m



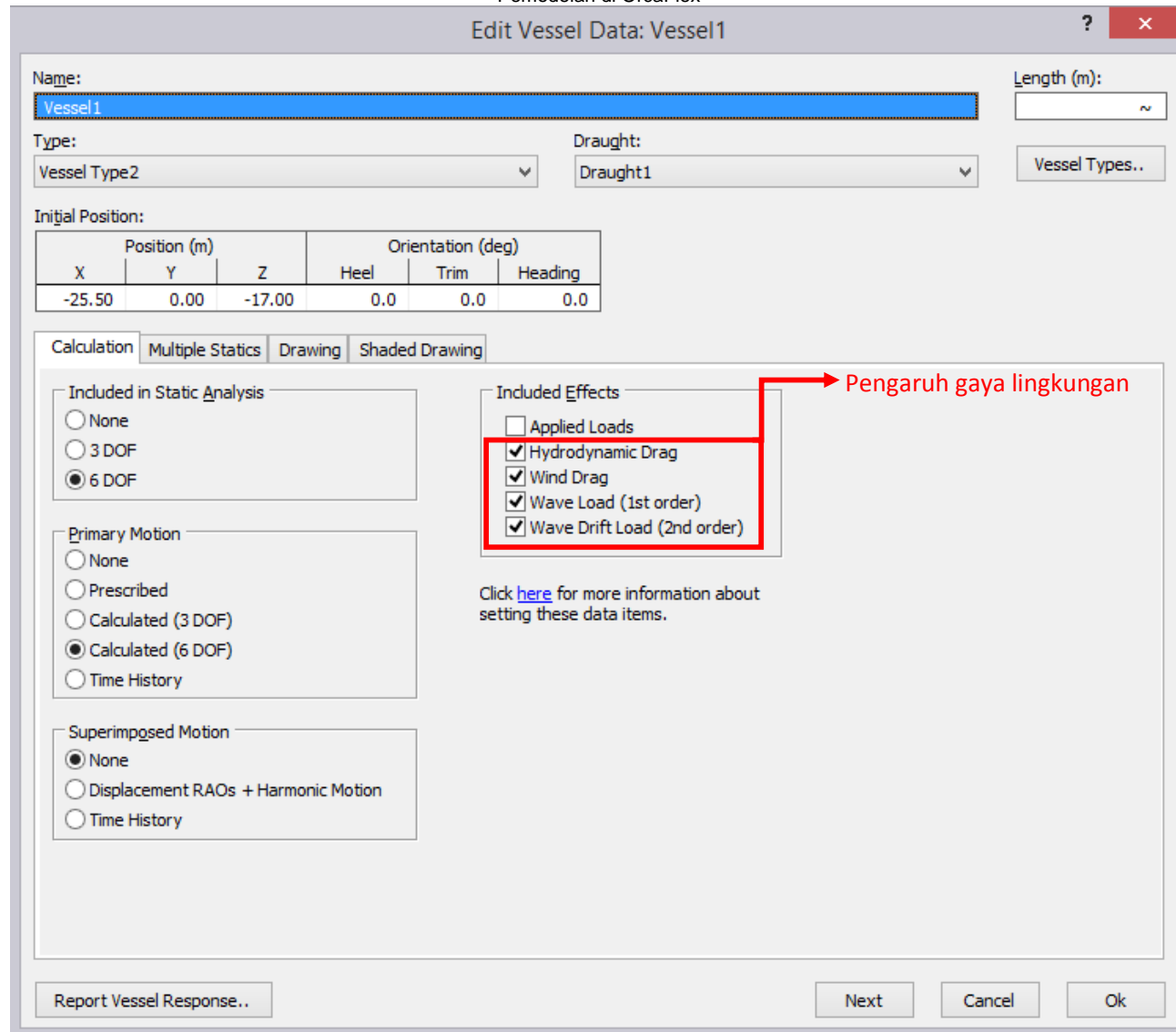
Gambar 2 Sistem external turret mooring tampak atas



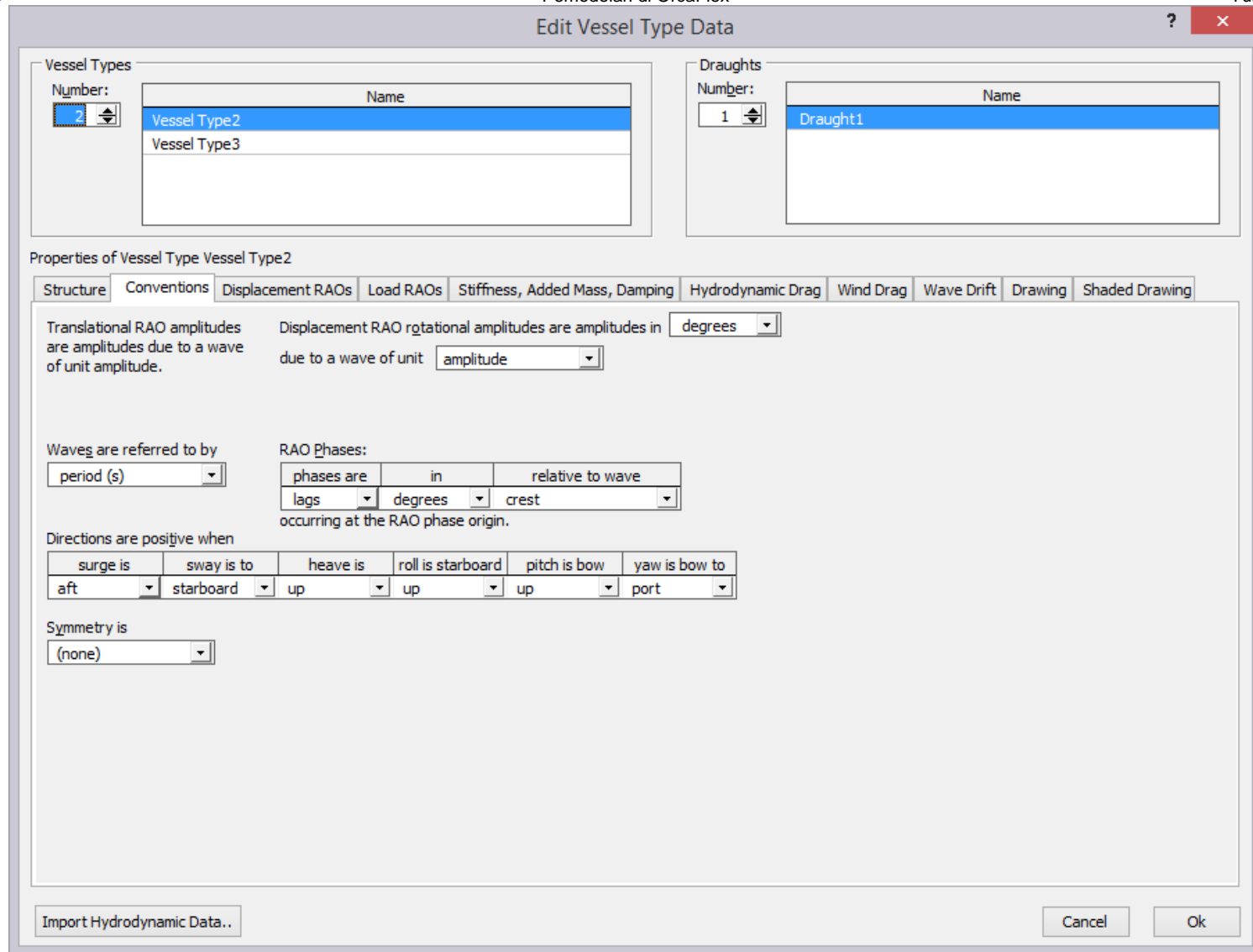
Gambar 3 Sistem external turret mooring tampak samping



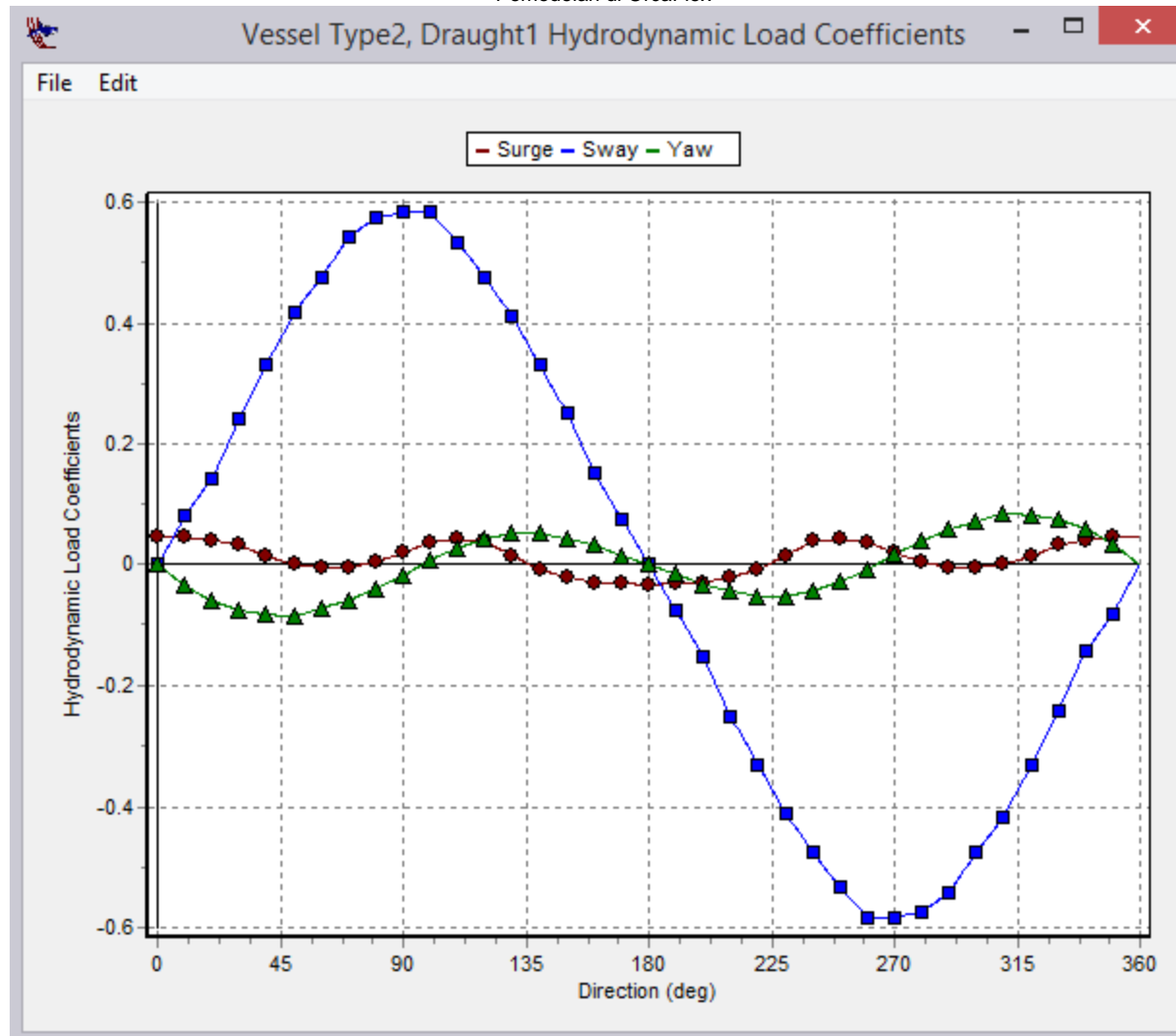
Gambar 4 Sistem external turret mooring tampak isometri



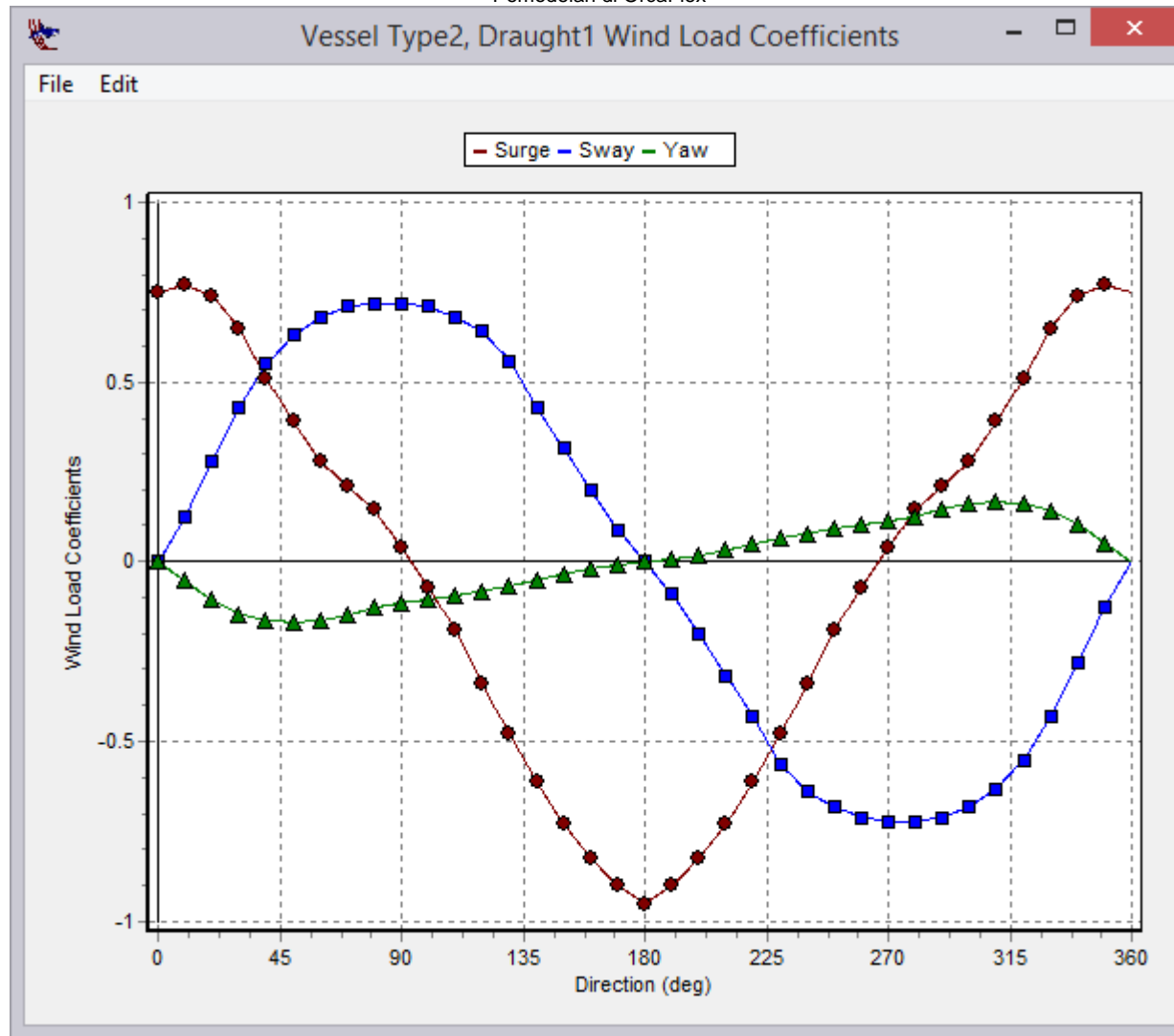
Gambar 5 Skenario simulasi domain waktu secara simultan dengan memperhatikan gaya arus, angin, gaya gelombang orde-1 dan gaya gelombang orde-2



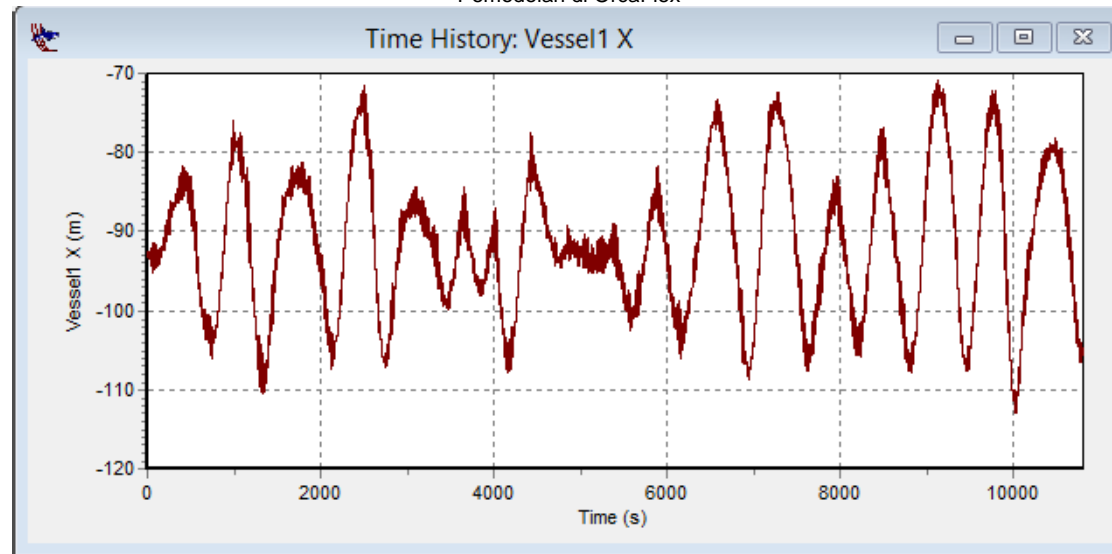
Gambar 6 Konvensi satuan dari MOSES ke OrcaFlex



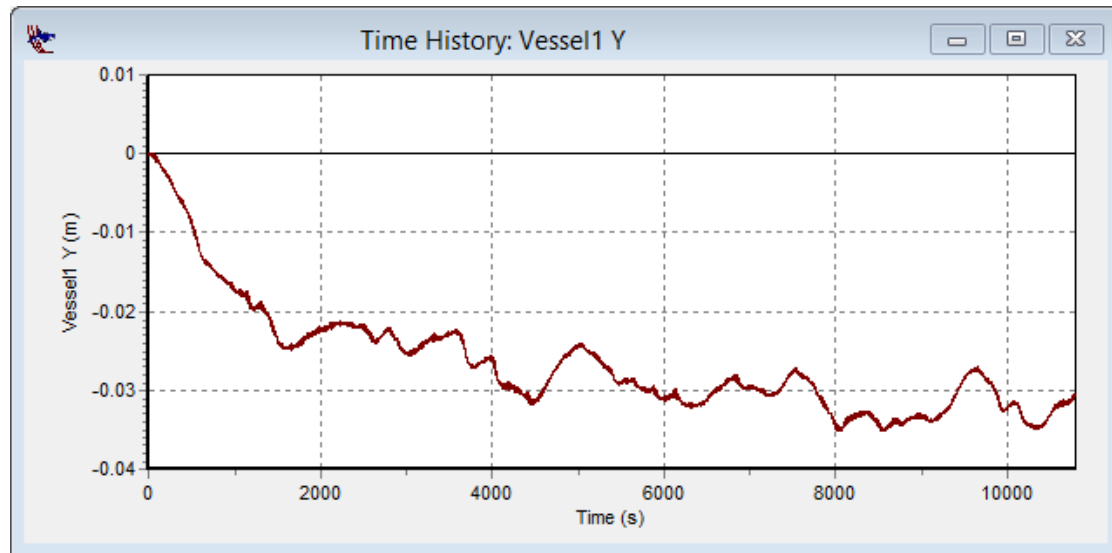
Gambar 7 Koefisien drag gaya arus pada tanker (OCIMF, 1994)



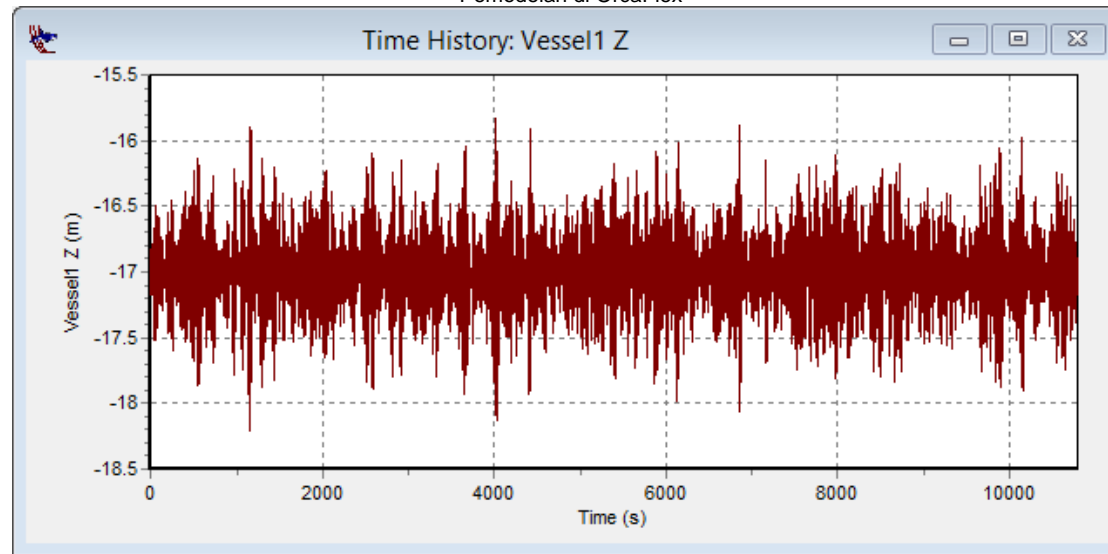
Gambar 8 Koefisien drag gaya angin pada tanker (OCIMF, 1994)



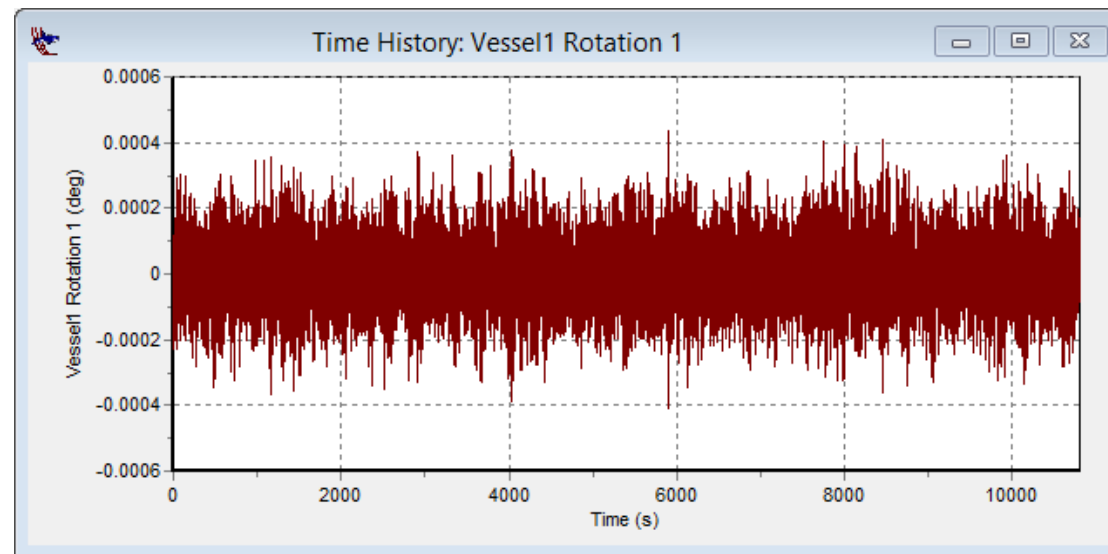
Gambar 9 Respon *surge* struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan H_s 10 m



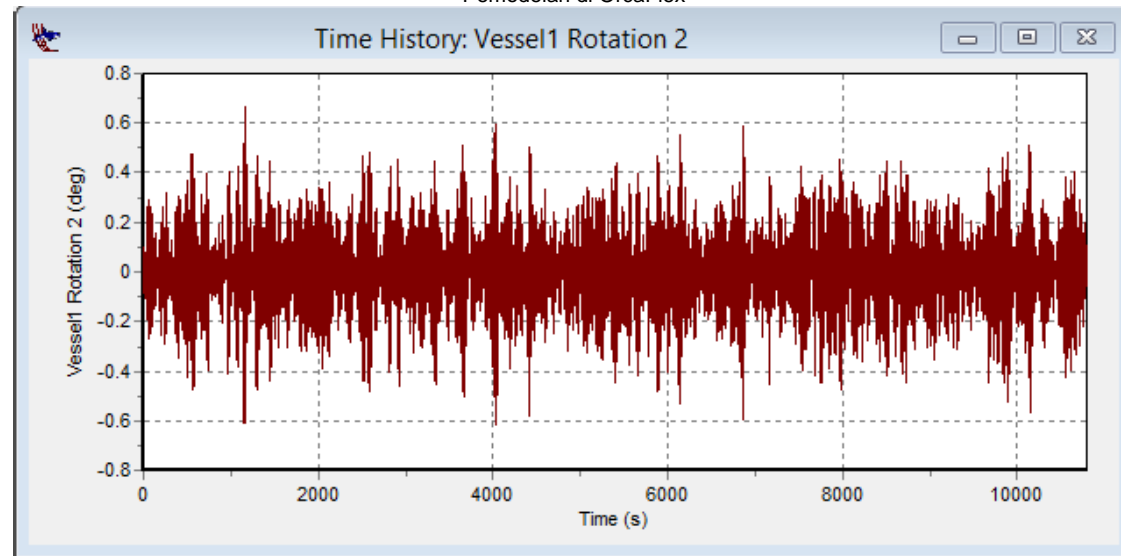
Gambar 10 Respon *sway* struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan H_s 10 m



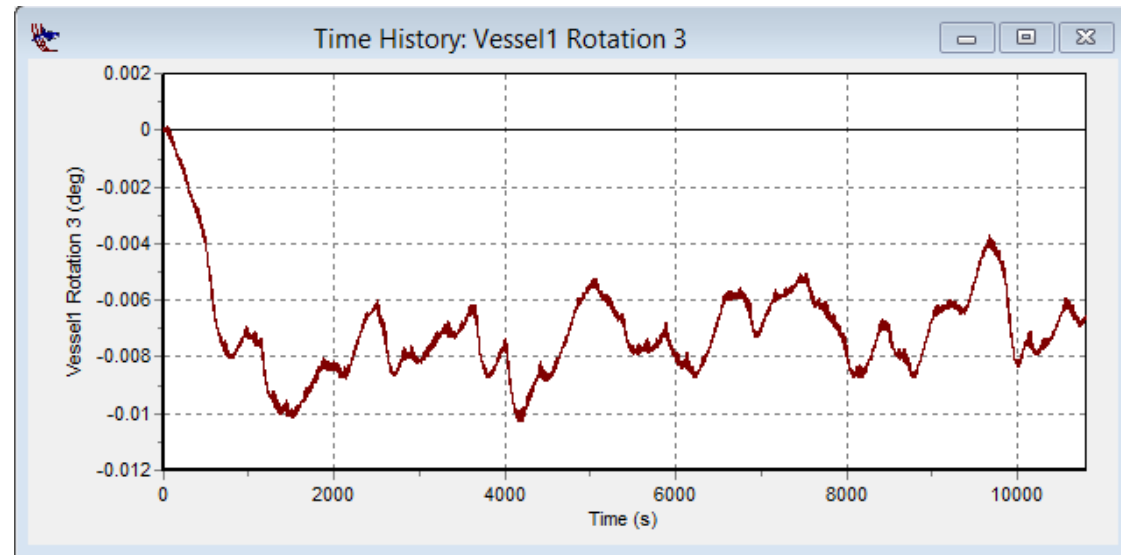
Gambar 11 Respon *heave* struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



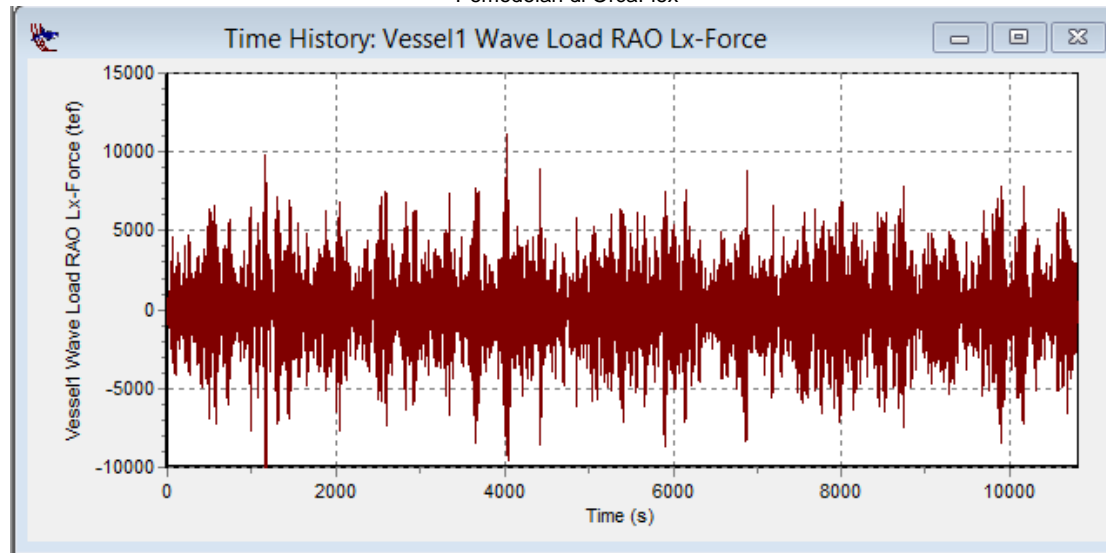
Gambar 12 Respon *roll* struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



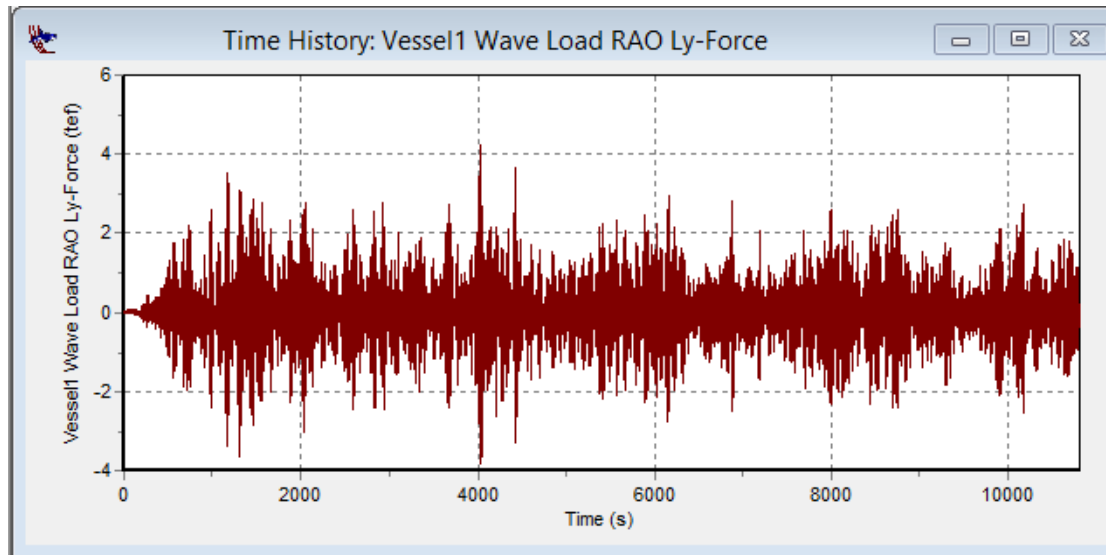
Gambar 13 Respon *pitch* struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan H_s 10 m



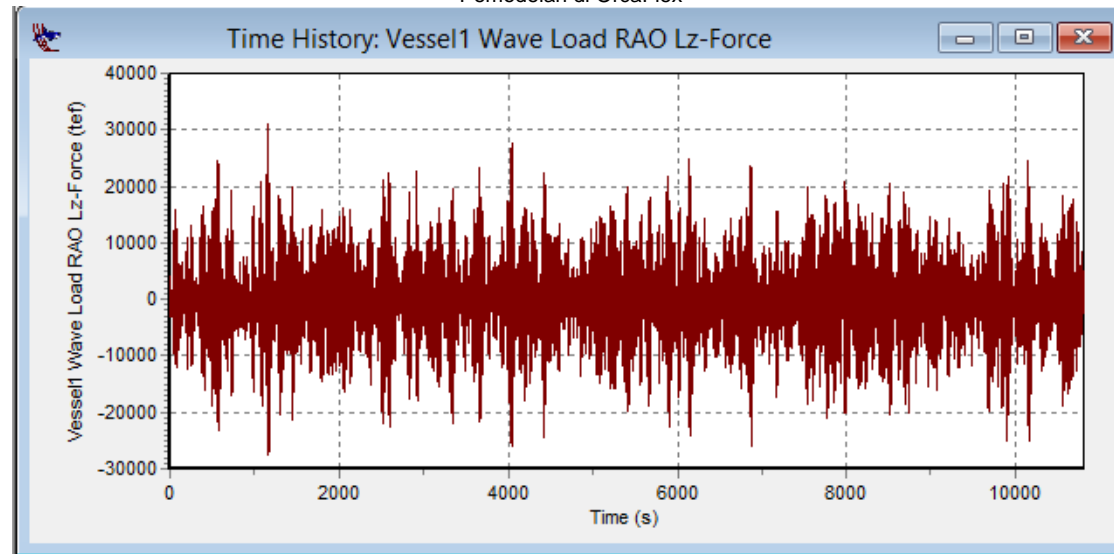
Gambar 14 Respon *yaw* struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan H_s 10 m



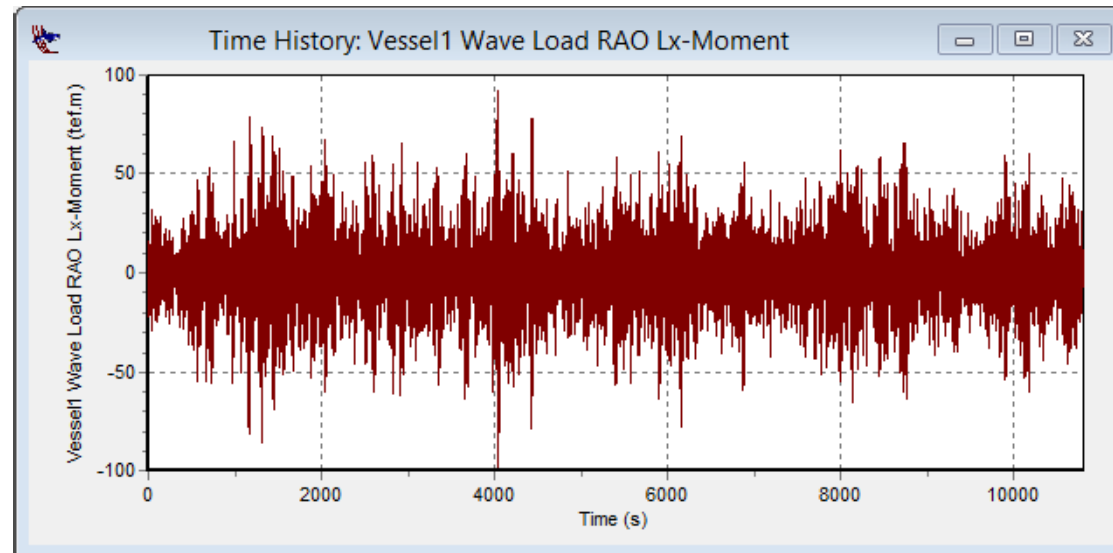
Gambar 15 Gaya surge orde 1 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



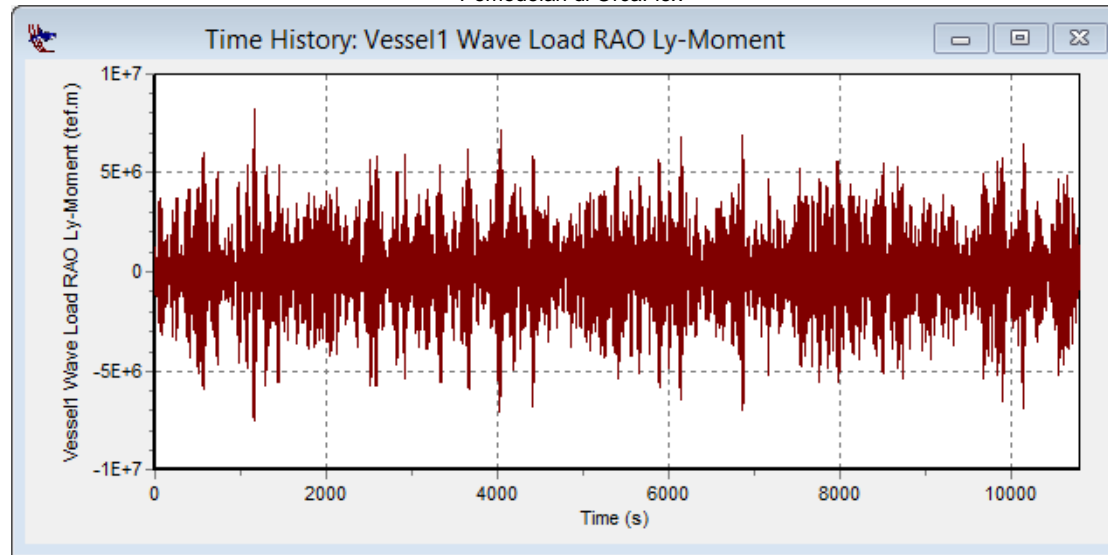
Gambar 16 Gaya sway orde 1 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



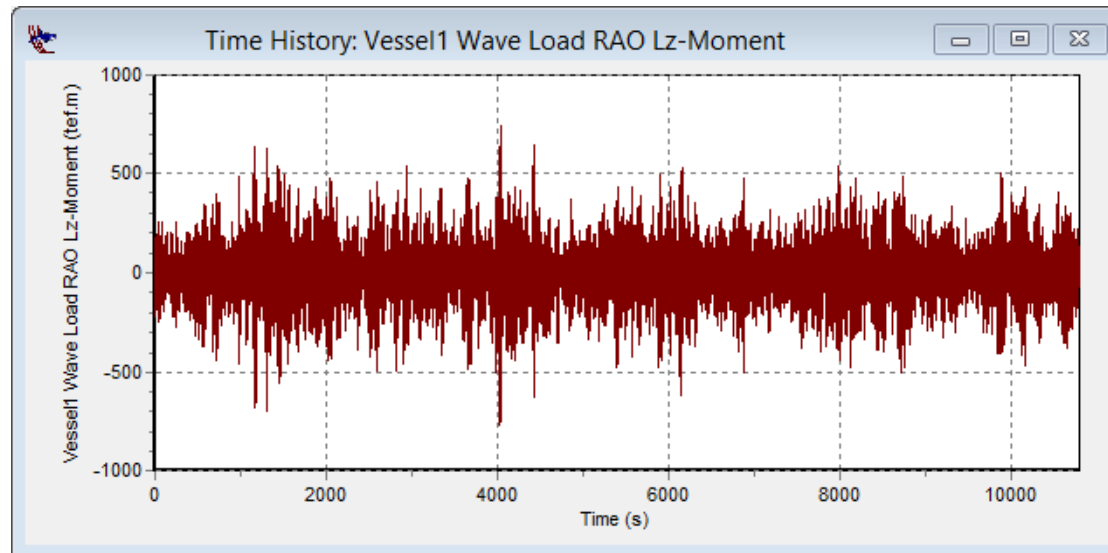
Gambar 17 Gaya *heave* orde 1 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



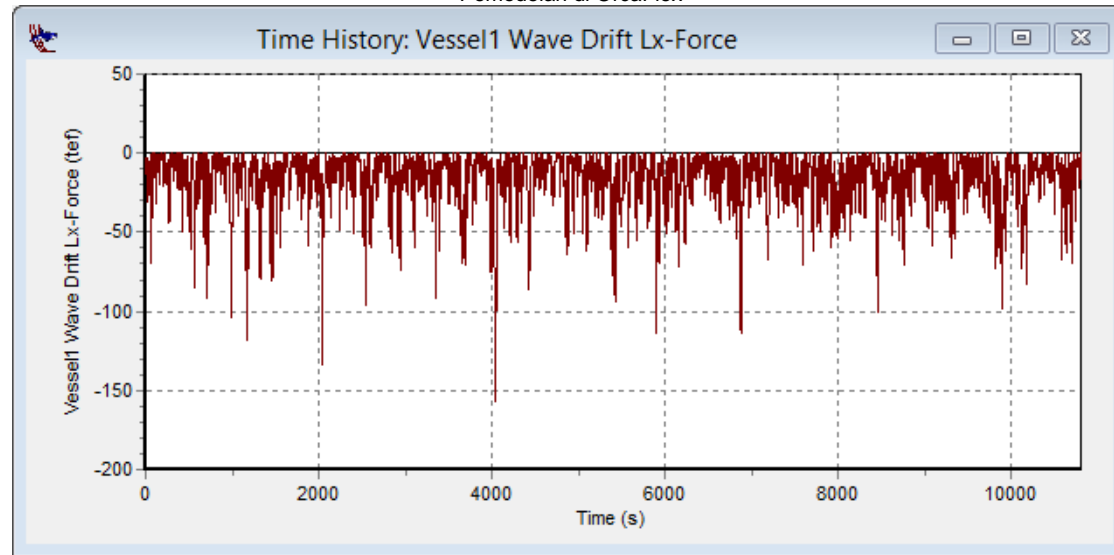
Gambar 18 Momen *roll* orde 1 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



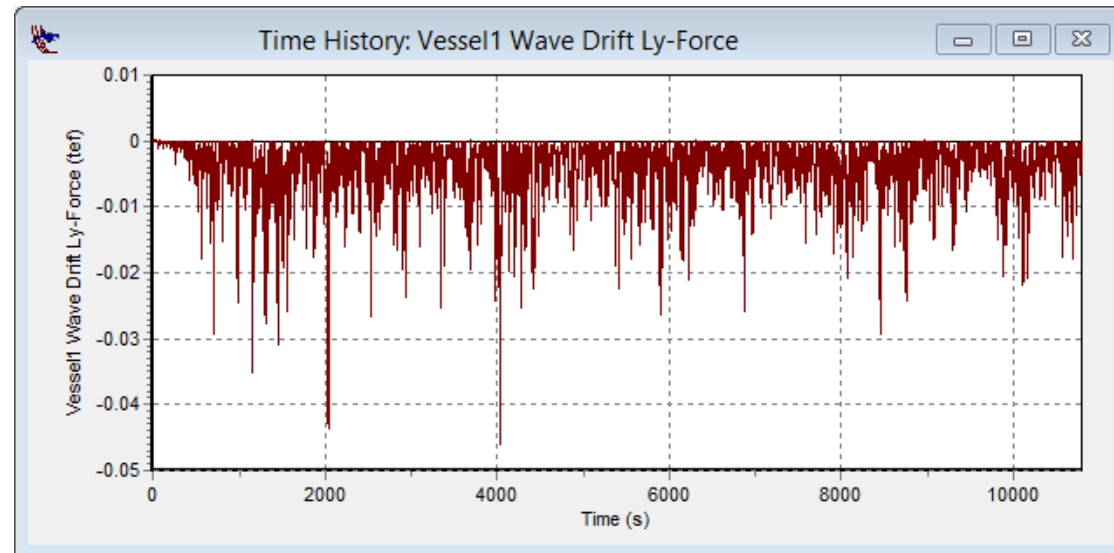
Gambar 19 Momen *pitch* orde 1 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



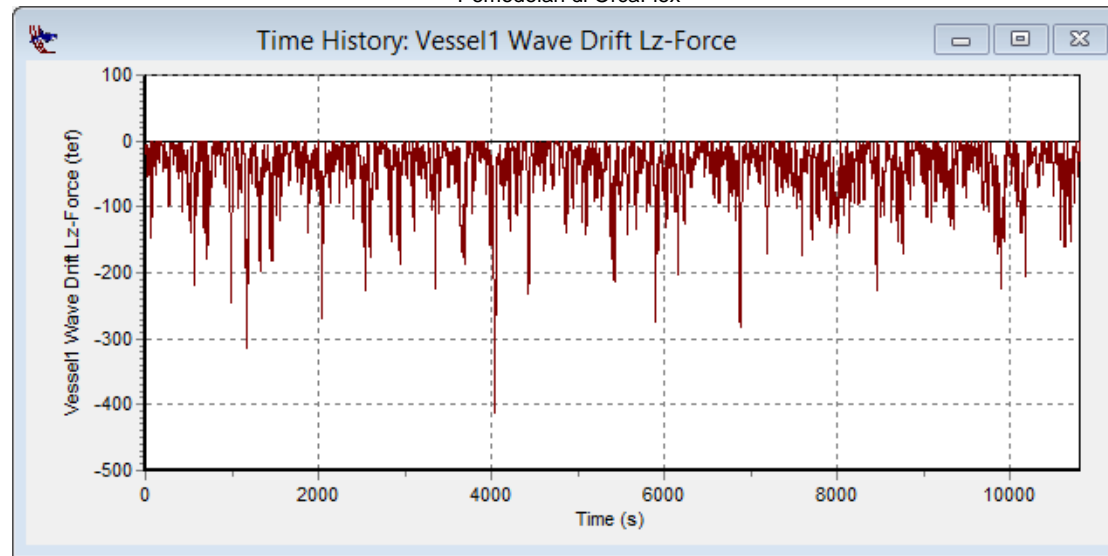
Gambar 20 Momen *yaw* orde 1 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



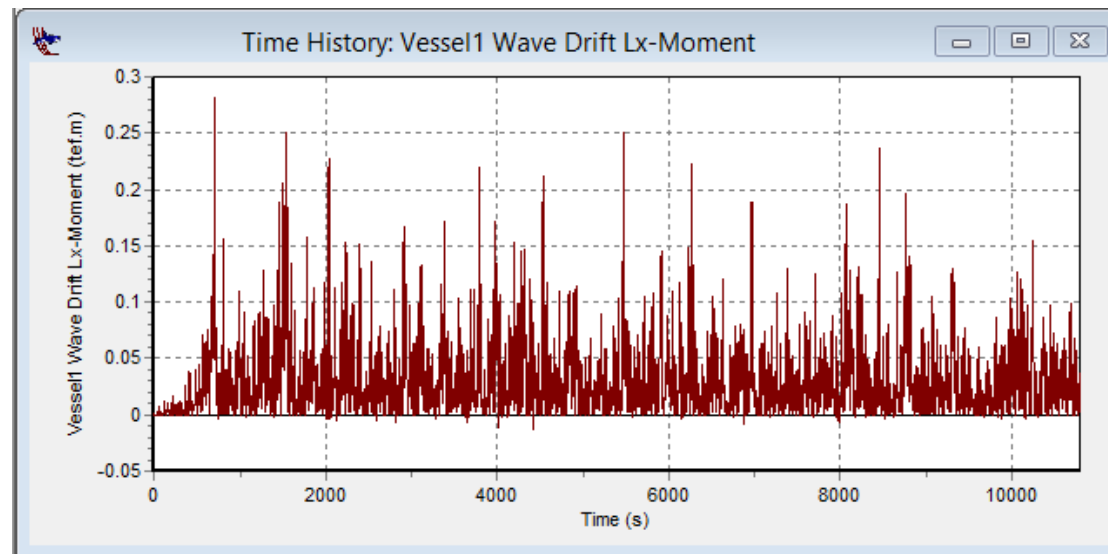
Gambar 21 Gaya *surge* orde 2 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



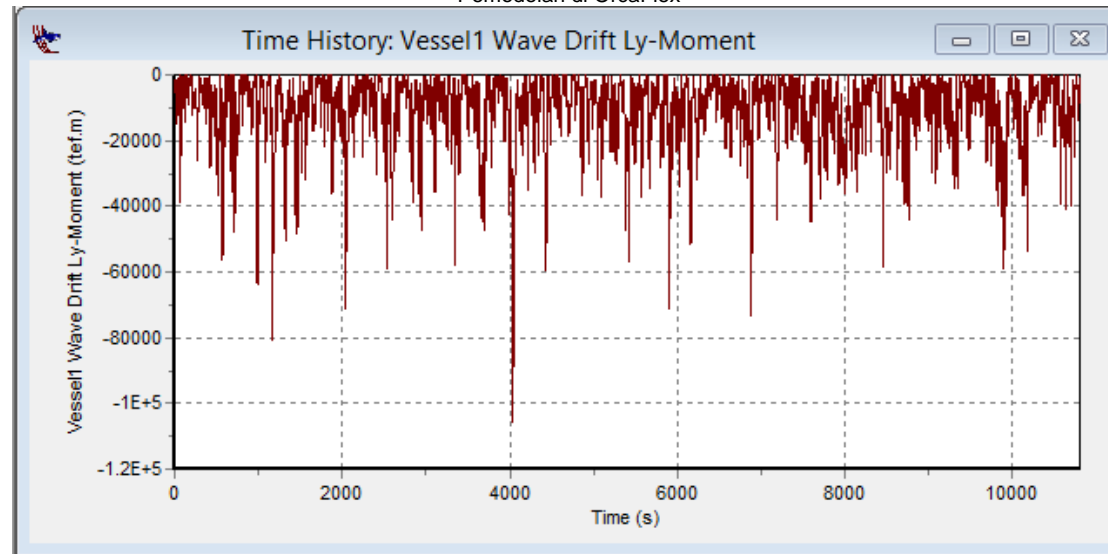
Gambar 22 Gaya *sway* orde 2 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



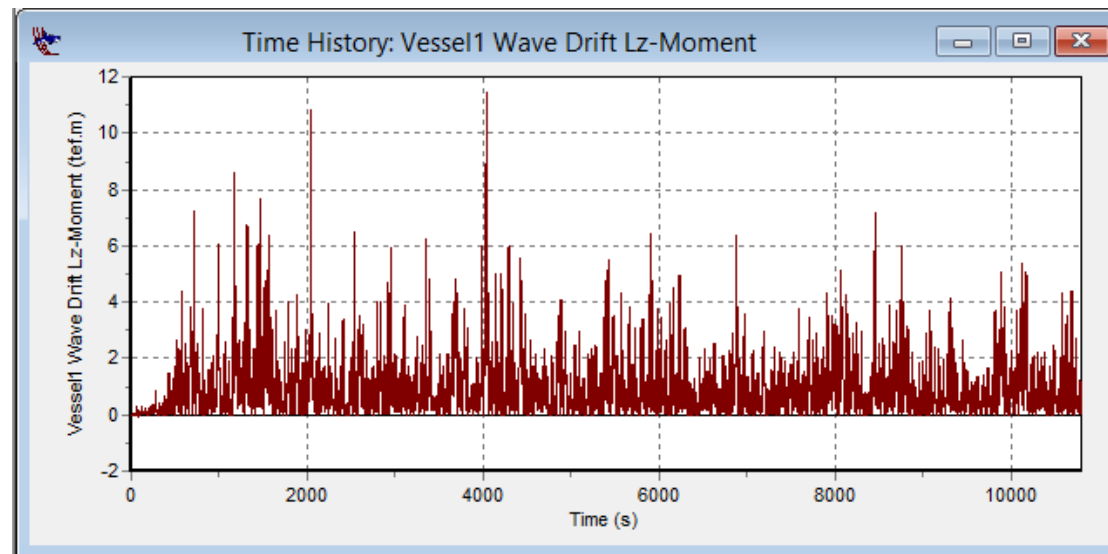
Gambar 23 Gaya *heave* orde 2 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



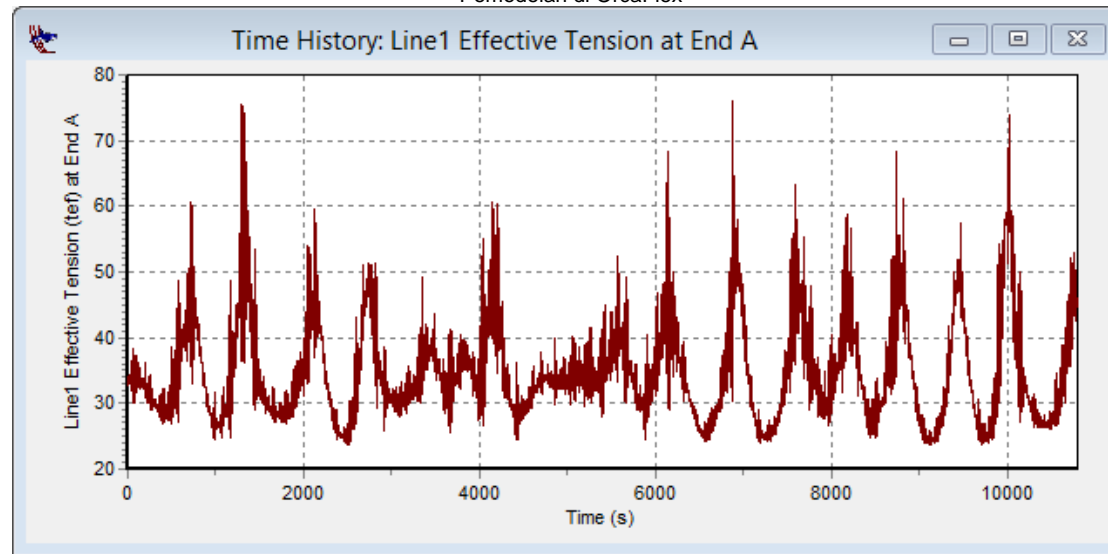
Gambar 24 Momen *roll* orde 2 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



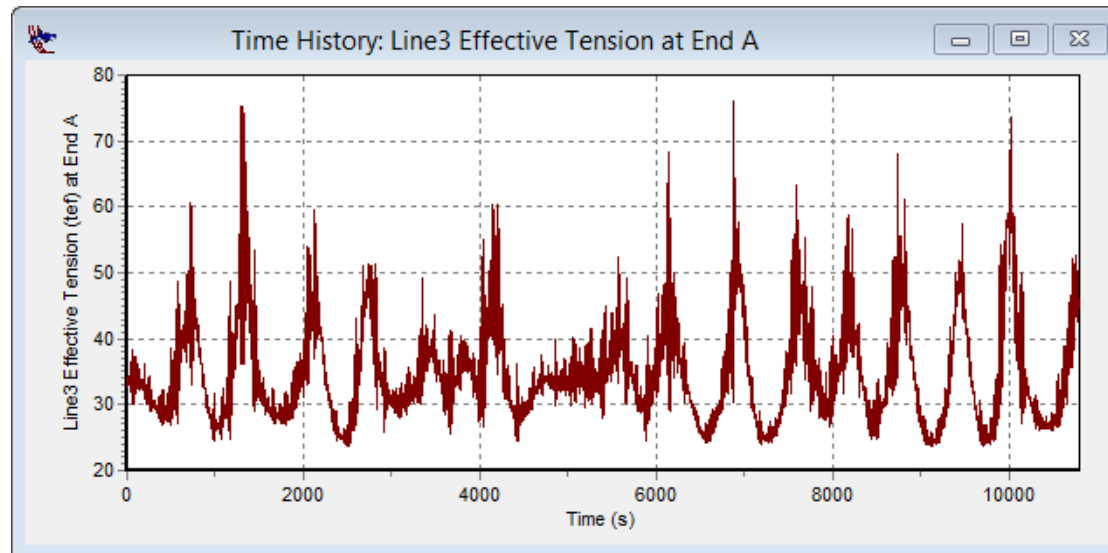
Gambar 25 Momen *pitch* orde 2 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



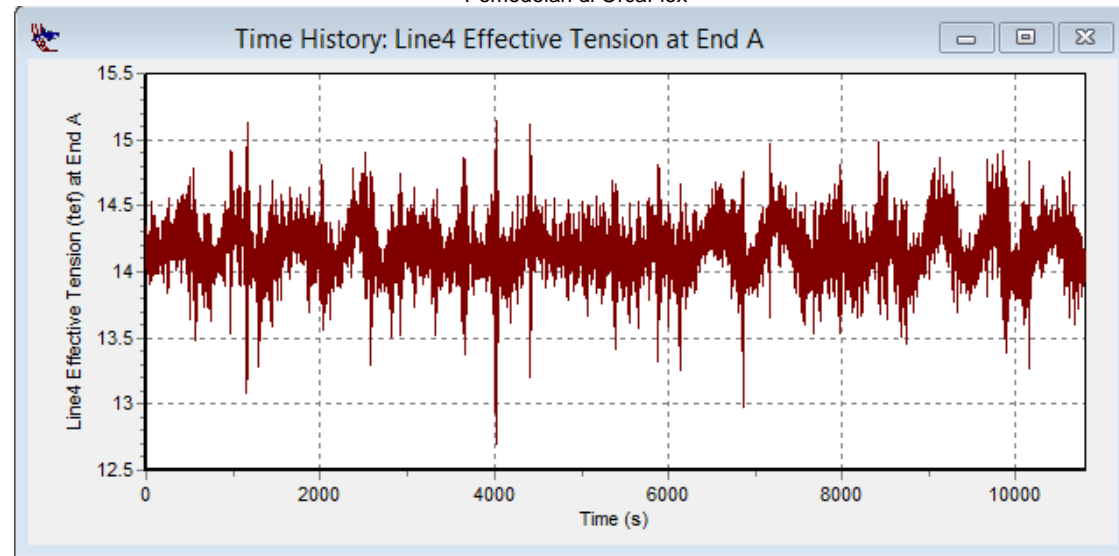
Gambar 26 Momen *yaw* orde 2 struktur tertambat pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



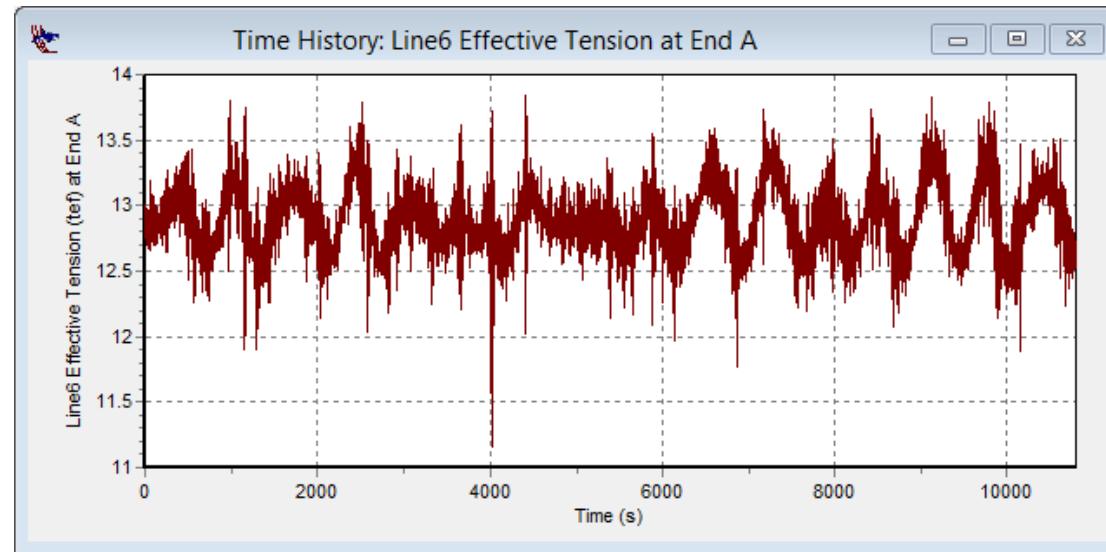
Gambar 27 Tension L1 struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



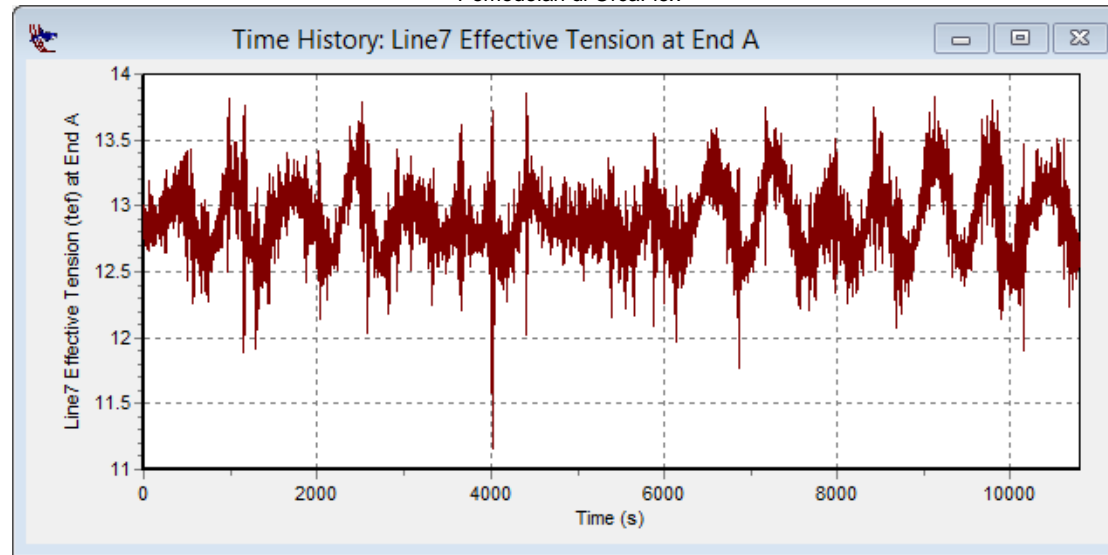
Gambar 28 Tension L2 struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



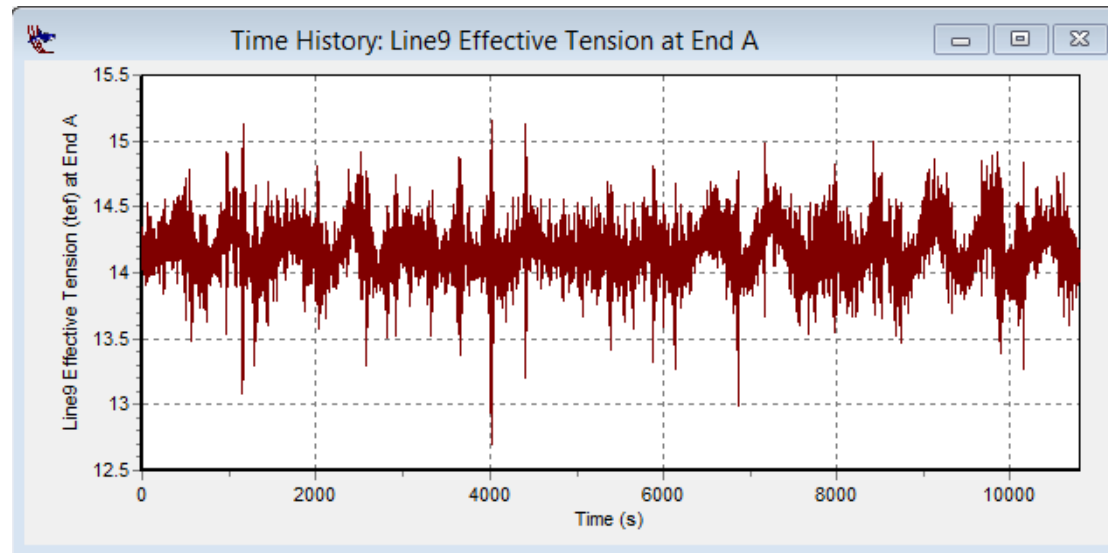
Gambar 29 Tension L3 struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



Gambar 30 Tension L4 struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



Gambar 31 Tension L5 struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m



Gambar 32 Tension L6 struktur tertambat akibat gaya orde 1+orde2 pada kedalaman 300 m dengan Hs 10 m

DAFTAR PUSTAKA

- Afriana, Rika. 2011. "Coupled Dynamic Analysis of Cylindrical FPSO, Moorings and Riser Based on Numerical Simulation". *Master Tesis of Faculty of Science and Technology*. University of Stavanger, Norway.
- API RP 2SK 2nd edition. 1996. *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington, DC.
- Barltrop, N. D. P. 1998. *Floating Structures : a Guide for Design vol 1*. Houston : CMPT
- Barltrop, N. D. P. 1998. *Floating Structures : a Guide for Design vol 2*. Houston : CMPT
- Djarmiko, E. B. 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut Di Atas Gelombang Acak*. Surabaya : ITS Press.
- DNV-RP-F205. 2010. *Global Performance Analysis of Deepwater Floating Structures*. Norway.
- Faltinsen, O. M., Michelsen, F. 1974. "The Motion of Large Structures in Waves at Zero Froude Number". *Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves*. London.
- Faltinsen, O. M., Loken, A. E. 1978. "Drift Forces and Slowly Varying Forces ". *Journal of Ship Research*. Vol. 4, No. 3.
- Faltinsen, O. M. 1990. *Sea Loads On Ships And Offshore Structures*. United Kingdom : Cambridge University Press.
- Goodman, T. R. 1965. "Forces on a Hovering Slender Body of Revolution Submerged under a Free Surface". *Developments in Mechanics*. New York : Pergamon Press.
- Journee, J. M. J., Massie, W. W. 2001. *Offshore Hydrodynamic First Edition*. Delft University of Technology.
- Kudou, H. 1977. "The Drifting Force Acting on a Three Dimensional Body in Waves". *JSNA*. Vol. 141, Japan.
- Newman, J. N. 1967. "The Drift Force and Moment on Ships in Waves". *Journal of Ship Research*. Vol. 11, No. 1, March.

- Maruo, H. 1960. "The Drift of a Body Floating in Waves". *Journal of Ship Research*. Vol. 4, No. 3, December.
- MIT. 2011. "Mooring Dynamics". *Design of Ocean Systems*. Lecture 12
- Molin, B. 1979. "Computation of Drift Forces". *OTC*. Paper No. 3627. Houston
- Ogilvie, T. F. 1963. "First and Second Order Forces on a Cylindrical Submerged under a Free Surface". *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 16, Part. 3 (pp 451-472).
- Philip H. Augener, Stefan Kruger. 2014. "Computation of Drift Forces for Dynamic Positioning within The Very Early Design Stage of Offshore Wind Farm Installation Vessels". *OMAE2014-23074*
- Pinkster, J. A. 1976. "Low Frequency Second Order Wave Forces on Vessels Moored at Sea". *Eleven Symposium on Naval Hydrodynamics*. University College. London
- Pinkster, J. A. 1979. "Mean and Low Frequency Wave Drifting Forces on Floating Structures". *Ocean Engineering*.
- Pinkster, J. A. 1980. "Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures". *Terkrijging van de Graad van Doctor*. Delft.
- Pinkster, J. A. 1980. "Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces on Floating Structures". *Terkrijging van de Graad van Doctor*. Delft.
- Perwitasari, R. P. 2010. "Hydrodynamic Interaction and Mooring Analysis For Offloading Between FPSO and LNG Shuttle Tanker". *Master Tesis of Departement Marine Technology*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
- Prasiwi, R. A. 2014. "Analisis Perilaku FPSO (*Floating Production Storage And Offloading*) Terhadap *Internal Turret Mooring System* Berbasis Simulasi *Time Domain*". *Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Salvesen, N. 1974. "Second Order Steady Forces and Moments on Surface Ships in Oblique Regular Waves". *Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves*. London.

- Spens, P. G., Lalangas, P. A. 1962. *Measurement of the Mean Lateral Force and Yawing Moment on a Series 60 Model in Oblique Regular Waves*. Davidson Laboratory. Report 880.
- Wibowo, Y. A. 2014. "Analisis Pengaruh Variasi Jarak Horizontal Antara FSRU dan LNGC saat *Side by Side Offloading* terhadap Perilaku Gerak Kapal Dan Gaya Tarik *Coupling Line*". *Tugas Akhir Jurusan Teknik Kelautan*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Wichers, J. E. W. 1982. "On the Low-Frequency Surge Motions of Vessels Moored in High Seas". *Offshore Technology Conference*. Paper No. 4437
- Wichers, J. E. W. 1984. "On the Low-Frequency Hydrodynamic Redaman Forces Acting on Offshore Moored Vessels". *Offshore Technology Conference*. Paper No. 4813
- Wichers, J. E. W. 1986. "Progress in Computer Simulations of SPM Moored Vessels". *Offshore Technology Conference*. Paper No. 5175

BIODATA PENULIS



Yuni Ari Wibowo, ST., dilahirkan di Purworejo pada 19 Juni 1992. Anak pertama dari 3 bersaudara ini telah menempuh pendidikan di SDN 01 Bruno, SMP dan SMA Darul Hikmah Kutoarjo serta telah menyelesaikan pendidikan di Pondok Pesantren Darul Hikmah Kutoarjo, Purworejo. Setelah itu penulis mengikuti Seleksi Penerimaan Mahasiswa Baru melalui jalur PBSB (Penerima Beasiswa Santri Berprestasi) yang diselenggarakan oleh Kementerian Agama Republik Indonesia dan diterima di Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyelesaikan pendidikan sarjananya pada Tahun 2014. Di tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan pascasarjana S2 di Fakultas Teknologi Kelautan dengan Prodi Teknik Perancangan Bangunan Laut (TPBL) atas bantuan pendidikan dari Program *Fresh Graduate*, Dikti.

Selama masa kuliah pascasarjana, penulis juga aktif mengikuti kegiatan pengabdian masyarakat khususnya konsultasi dan studi dalam lingkungan inovasi teknologi kelautan bagi industri dan masyarakat luas, bernaung di bawah LPPM ITS dan NaSDEC Indonesia. Hal ini meliputi perancangan dan pengkajian kegiatan konstruksi bangunan lepas pantai maupun operasinya. Beberapa kegiatan pengkajian yang telah dilakukan diantaranya : *Risk Assessment of GTS Platforms (SPU, NPU & CPU field)-TOTAL E&P Indonesia*, *Mooring Design at Bangka Strait-Conoco Phillips Indonesia*, Interaksi Hidrodinamika Kapal Nelayan terhadap Hempasan Kapal Besar di Alur Pelayaran Barat Surabaya, Analisis mooring dan kekuatan SPM di Cinta Field-Laut Jawa, Analisis Stabilitas Kapal Perintis di Jalur Pelayaran Indonesia-Hubla. Selain itu penulis juga diperbantukan untuk menjadi asisten dosen pada mata kuliah Hidrodinamika 1, Hidrodinamika 2, Olah Gerak bangunan Apung dan Fisika Kelautan.

Penulis menguasai beberapa program simulasi yang berkaitan dengan teknologi kelautan di bidang Hidrodinamika Lepas Pantai dan Struktur, di antaranya : MAXSURF, MOSES, OrcaFlex, Ariane, ANSYS AQWA, ANSYS Multiphysics, SACS dan GT Strudl.