



TESIS – MO.142528

**ANALISIS RESIKO *FATIGUE MOORING LINES* PADA *SPREAD MOORING LINE SYSTEM FSO FEDERAL II* DENGAN  
MEMPERTIMBANGKAN BEBAN OPERASI**

MUHAMMAD AULIYA ALDI

NRP. 04311650012001

Dosen Pembimbing :

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

Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D., MRINA

Program Magister

Program Studi Teknik Perancangan Bangunan Laut

Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2018



THESIS – MO.142528

**RISK ANALYSIS DUE TO FATIGUE OF MOORING LINES ON  
SPREAD MOORING LINE SYSTEM FSO FEDERAL II BY  
CONSIDERING OPERATION LOAD**

MUHAMMAD AULIYA ALDI

NRP. 04311650012001

Supervisors :

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

Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D., MRINA

Magister Program

Design of Ocean Structures Engineering

Department of Ocean Engineering

Faculty of Marine Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2018

# LEMBAR PENGESAHAN

Thesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

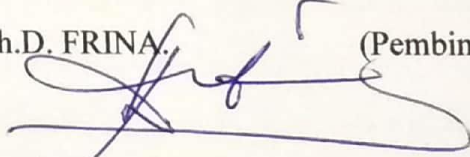
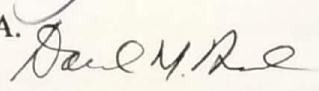
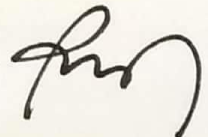
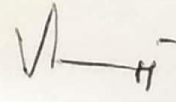
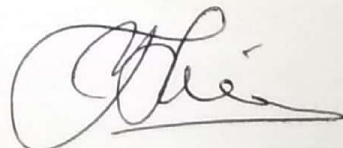
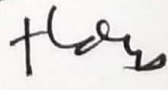
Muhammad Auliya Aldi

NRP. 04311650012001

Tanggal Ujian : 18 Juli 2018

Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh :

1. Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D. FRINA. (Pembimbing I)  
NIP. 19581226 198403 1 002 
2. Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D., MRINA. (Pembimbing II)  
NIP. 19610702 198803 1 003 
3. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T., M.T. (Penguji I)  
NIP. 19710508 199703 1 001 
4. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D (Penguji II)  
NIP. 19711105 199512 1 001 
5. Nur Syahroni ST. MT. Ph.D (Penguji III)  
NIP. NIP. 19730602 199903 1 002 
6. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D (Penguji IV)  
NIP. 19630728 198803 1 001 

Dekan Fakultas Teknologi Kelautan

Plt. Dekan



Prof. Arif Dimauidy, M.Sc., Ph.D.

NIP. 19581005 198003 1 003

## ABSTRAK

### ANALISIS RESIKO *FATIGUE MOORING LINES* PADA *SPREAD MOORING LINE SYSTEM FSO FEDERAL II* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BEBAN OPERASI

Nama Mahasiswa : Muhammad Auliya Aldi  
NRP : 04311650012001  
Departemen : Teknik Kelautan FTK-ITS  
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D., FRINA.  
Prof.Ir.Daniel M.Rosyid, Ph.D., MRINA.

Kebanyakan struktur bangunan apung yang beroperasi di Indonesia saat ini sudah melampaui umur operasinya salah satunya adalah FSO. Pada analisis kekuatan dari struktur bangunan apung yang secara dominan menerima beban siklis sangat diperlukan untuk memastikan integritas dari struktur bangunan apung dan untuk penilaian kemungkinan kerusakan akibat *fatigue* (kelelahan). Tesis ini bertujuan untuk memberikan tinjauan secara komprehensif terhadap sisa umur dan resiko akibat beban kelelahan pada *mooring line* FSO Federal II dengan mempertimbangkan beban operasi yang terjadi. Dalam analisis kelelahan menggunakan pendekatan *combined spectrum*. Beban lingkungan dalam analisis ini menggunakan pendekatan analisis *time domain*. Analisis resiko dalam analisis ini menggunakan metoda analisis semikuantitatif. Probabilitas terjadinya kegagalan (pof) bersifat kuantitatif dimana dalam analisis digunakan metoda simulasi Monte Carlo. Konsekuensi terjadinya kegagalan didapatkan dari uji kelayakan dan kualifikasi mooring integrity management dari OTC (*Offshore Technology Conference*) dan OGP (*Oil and Gas Procedure*).

*Damage* yang terjadi akibat beban operasi terakumulasi sebesar 0.00627 sehingga umur dari *mooring line* FSO Federal II menjadi 53 tahun dengan faktor keamanan 3 dan 15 tahun dengan faktor keamanan 10. Peluang kegagalan terbesar dari beban *fatigue* pada *mooring line* sebesar  $\pm 4.5 \times 10^{-3}$  atau termasuk dalam tingkat 4 dalam matriks resiko DNV RP G101. Berdasarkan laporan OTC 25134 dan OGP 2010 tentang mooring line sedunia, ditetapkan bahwa level konsekuensi kegagalan berada pada level minor-major. Tingat resiko untuk *mooring line* FSO Federal II masuk dalam level ALARP dalam segi keamanan dan lingkungan dan level *high risk* bisnis.

**Kata Kunci**—Beban Operasi, *Mooring line*, FSO, *Fatigue*, *Montecarlo*, Resiko

## ***ABSTRACT***

### ***RISK ANALYSIS FATIGUE OF MOORING LINES ON SPREAD MOORING LINE SYSTEM FSO FEDERAL II BY CONSIDERING OPERATION LOADS***

Name of Student : Muhammad Auliya Aldi  
REG : 04311650012001  
Department : Department of Ocean Engineering, Marine Technology  
Faculty,ITS  
Supervisors : Prof. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D., FRINA.  
Prof.Ir.Daniel M.Rosyid, Ph.D., MRINA.

Most of floating structures operated in Indonesia have exceeded their operating days, for the example is FSO. On the strength analysis of floating building structures that predominantly accept cyclical loads is necessary to ensure the integrity of floating building structures and for the assessment of the possible damage due to fatigue (fatigue). This study aims to provide a comprehensive review of the remaining age and risk due to fatigue load on the Federal II FSO mooring line by considering the operating loads. Fatigue analysis using combined spectrum approach. Environmental load parameters using time domain analysis approach. Risk analysis using semiquantitative analysis method. Probability of Failure (pof) obtained by using Monte carlo simulation method. Consequence of failure obtained from feasibility test and qualification of mooring integrity management from OTC (Offshore Technology Conference) and OGP (Oil and Gas Procedure).

Damage caused by the accumulated operating load is 0.00627 and fatigue life of the FSO Federal II mooring line is 53 years with the safety factor 3 and 15 years with the safety factor 10. The greatest failure chance of fatigue load on the mooring line is  $\pm 4.5 \times 10^{-3}$  and included in level 4 risk matrix DNV RP G101. From the OTC 25134 and OGP 2010 report on the worldwide mooring line, stipulates that the level of consequence of failure is at a minor-major level. The risk level of mooring line FSO Federal II included in the ALARP level in term of safety and environment and high risk level in term of business.

*Key Words—Operating Load, mooring line, FSO, Fatigue, Montecarlo, Risk*

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah dan karunia Allah SWT, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik dan lancar. Sholawat serta salam juga penulis haturkan kepada junjungan seluruh umat manusia Rasulullah Muhammad SAW.

Tesis ini berjudul “ANALISIS RESIKO *FATIGUE MOORING LINES* PADA *SPREAD MOORING LINE SYSTEM FSO FEDERAL II* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN BEBAN OPERASI”. Tesis ini disusun guna membantu dunia industry dalam menentukan umur dari struktur dengan meninjau dari seluruh aspek yang bekerja pada struktur tersebut dan guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan studi pascasarjana (S-2) program studi Teknik Perancangan Bangunan Laut di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Tesis ini membahas tentang analisis resiko *fatigue* pada *mooring lines* FSO Federal II yang mengalami korosi dan menerima beban siklis dari seluruh beban operasi yang bekerja sehingga dapat dijadikan dasar penilaian kemungkinan kerusakan akibat *fatigue* (kelelahan).

Saya menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penulisan tesis ini masih jauh dari kesempurnaan sehingga saya sangat mengharapkan kritik dan saran dari pihak lain. Akhir kata saya berharap tesis ini bermanfaat bagi perkembangan teknologi di bidang rekayasa kelautan serta bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan penulis pada khususnya.

Surabaya, 2018

Penulis

## UCAPAN TERIMAKASIH

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan syukur, Alhamdulillah atas nikmat kekuatan dan karunia kemampuan yang Allah SWT berikan sehingga penulis mampu menyelesaikan tesis ini. Salawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW yang menjadi suri tauladan penulis.

Dalam pembuatan tesis ini, penulis sadar bahwa masih banyak kesalahan dan kekurangan dalam tesis ini sehingga diharapkan adanya kritikan dan saran yang dapat menyempurnakan tesis ini dimasa yang akan datang. Semoga tesis ini berguna untuk dunia industry di Indonesia dan dapat memberikan manfaat bagi pembaca pada umumnya. Penulis pada kesempatan kali ini dengan kerendahan hati ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ayah dan Ibu penulis, Bapak Agung Prihanto dan Ibu Almaidah yang tak kenal lelah mendoakan, memberikan dukungan dan meridhoi penulis dalam menyusun tesis
2. Kakak saya Muhammad Fajar Ibrahim yang selalu memberikan dorongan buat saya untuk selalu bersemangat menghadapi masa depan.
3. Prof. Ir. Eko Budi Djatmuko , M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing pertama penulis yang telah memberikan arahan dan banyak ilmu dalam menyelesaikan tesis ini.
4. Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D. selaku dosen pembimbing kedua penulis yang telah memberikan arahan dan perhatian kepada penulis dalam proses menyelesaikan tesis ini.
5. Jajaran Direksi PT.Biro Klasifikasi Indonesia, yang mengizinkan penulis untuk menggunakan fasilitas kantor dan mengakses beberapa data untuk keperluan tesis penulis.
6. Seluruh jajaran direksi program studi pascasarjana Teknik Kelautan ITS dan Seluruh dosen dan karyawan program studi pascasarjana Teknik Kelautan elautan ITS yang telah memberikan ilmu, bantuan dan fasilitas kepada saya selama menjalani perkuliahan.
7. Semua rekan-rekan pasca sarjana dan alumni Teknik Kelautan ITS yang diantaranya Mas Yuni (L-28), Mas Irfan (BKI), dan Maulana Hikam (Apexindo) atas ilmu, motivasi dan bantuannya selama pengerjaan tesis ini.

Serta semua pihak yang telah membantu namun tidak bisa saya sebutkan satu-persatu. Terima kasih atas bantuan, motivasi dan doanya sehingga saya mampu maju hingga sejauh ini dan mampu menyelesaikan tesis ini. Semoga Allah melimpahkan rahmat-Nya kepada kita semua. Amin.



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL_Id</b> .....	i
<b>HALAMAN JUDUL_En</b> .....	ii
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>UCAPAN TERIMA KASIH</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiv
<b>DAFTAR SYMBOL</b> .....	xvi
<b>DAFTAR ISTILAH</b> .....	xix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan .....	5
1.4 Manfaat .....	6
1.5 Batasan Masalah .....	6
1.6 Sistematika Penulisan .....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI</b> .....	9
2.1 Tinjauan Pustaka .....	9
2.2 Dasar Teori .....	14
2.2.1 Floating Storage and Offloading (FSO) .....	14
2.2.2 Sistem Tambat .....	14
2.2.2.1 <i>Catenary Mooring</i> .....	15
2.2.2.2 <i>Taut Mooring</i> .....	15
2.2.3 Sistem Tambat Pada FSO/FPSO .....	15
2.2.3.1 <i>Spread Mooring</i> .....	16
2.2.3.2 <i>Turret Mooring</i> .....	17
2.2.3.2.1 <i>External Turret</i> .....	17
2.2.3.2.2 <i>Internal Turret</i> .....	17

2.2.3.3 <i>Tower Mooring</i> .....	17
2.2.3.4 <i>Buoy Mooring</i> .....	18
2.2.4 Tali Tambat antar <i>Multy Body (Coupling Line)</i> .....	19
2.2.5 Beban Lingkungan .....	20
2.2.5.1 Beban Arus .....	21
2.2.5.2 Beban Angin .....	21
2.2.5.3 Beban Gelombang .....	23
2.2.6 Teori Gerak Struktur Terapung Akibat Gaya Gelombang .....	24
2.2.7 Spektrum Energi Gelombang .....	28
2.2.8 Response Amplitude Operator (RAO) .....	30
2.2.9 Respon Spektra .....	31
2.2.10 Penentuan Panjang <i>Mooring Line</i> .....	32
2.2.11 <i>Tension</i> pada <i>Mooring Line</i> .....	33
2.2.12 Analisis <i>Fatigue</i> .....	33
2.2.12.1 <i>T-N Curve</i> .....	34
2.2.12.2 <i>Fatigue Damage</i> .....	35
2.2.13 Peluang Kegagalan .....	37
2.2.13.1 Moda Kegagalan .....	37
2.2.13.2 Metode <i>Monte Carlo</i> .....	38
2.2.14 Analisia Resiko .....	38
2.2.15 <i>Assessment Criteria</i> .....	42
2.2.15.1 <i>Mooring Line Tension</i> .....	42
2.2.15.2 Jenis-Jenis Material dan Tipe <i>Mooring Line</i> .....	43
2.2.15.3 Faktor Keamanan <i>Mooring Line</i> untuk Analisis Kelelahan ..	44
2.2.15.4 Korosi dan <i>Marine Growth</i> .....	44
<b>BAB III. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	47
3.1 Diagram Alir .....	47
3.1.1 Diagram Alir Pngerjaan .....	47
3.1.2 Diagram Alir Simulasi <i>Monte Carlo</i> .....	49
3.2 Penjelasan Diagram Alir .....	50
3.3 Pengumpulan Data .....	53
3.3.1 Data Struktur .....	53
3.3.2 Skenario dan Kondisi Pembebanan .....	54
3.3.3 Data Lingkungan .....	54

3.3.4	Data <i>Mooring</i> .....	56
3.3.5	Pendekatan Analisis <i>Frequency Domain</i> dan <i>Time Domain</i> .....	57
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISIS DAN PEMBAHASAN</b> .....	<b>59</b>
4.1	Pemodelan .....	59
4.1.1	Pemodelan FSO dengan <i>Software MAXSURF</i> .....	59
4.1.2	Pemodelan FSO dengan <i>Software MOSES</i> .....	60
4.1.2.1	Validasi Pemodelan <i>MOSES</i> dan Data .....	61
4.1.2.2	RAO Free Floating FSO Menggunakan Software <i>MOSES</i> ..	61
4.1.3	Pemodelan dengan <i>Software Orcafle</i> .....	63
4.2	Analisis Dinamis <i>Line Tension</i> .....	65
4.2.1	Kondisi Aktual <i>Mooring Line</i> .....	65
4.2.2	Analisis <i>Tension</i> Pada <i>Mooring Lines</i> FSO Federal II .....	66
4.2.3	<i>Time History Line Tension</i> .....	69
4.3	Analisis Kelelahan .....	70
4.3.1	Perhitungan <i>Fatigue Dmage</i> .....	71
4.4	Analisis Resiko .....	73
4.4.1	Analisis Peluang Kegagalan.....	73
4.4.2	Konsekuensi Kegagalan .....	75
4.4.2.1	Konsekuensi Kegagalan Menurut Laporan OGP .....	76
4.4.2.2	Konsekuensi Kegagalan Menurut OTC .....	78
4.4.2.3	Konsekuensi Kegagalan dengan Simulai Rantai Putus .....	79
4.4.3	Matriks Penilaian Resiko .....	81
4.4.3.1	Matriks Resiko Terhadap Keselamatan.....	82
4.4.3.2	Matriks Resiko Terhadap Lingkungan .....	83
4.4.3.3	Matriks Resiko Terhadap Bisnis .....	83
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>85</b>
5.1	Kesimpulan .....	85
5.2	Saran .....	86
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	<b>87</b>
<b>LAMPIRAN A</b>		
<b>LAMPIRAN B</b>		

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Spread mooring system</i> FSO Federal II.....	3
Gambar 1.2 Lokasi Federal II.....	3
Gambar 2.1 Kondisi <i>offloading/unloading</i> .....	11
Gambar 2.2 <i>Floating Storage and Offloading</i> .....	14
Gambar 2.3 Sistem tambat: (a) <i>Catenary Mooring</i> , (b) <i>Taut Mooring</i> .....	14
Gambar 2.4 <i>Spread mooring system</i> .....	16
Gambar 2.5 <i>Turret mooring system</i> .....	17
Gambar 2.6 <i>Tower mooring system</i> .....	18
Gambar 2.7 <i>Buoy mooring system</i> .....	18
Gambar 2.8 Konfigurasi <i>coupling line</i> saat <i>side by side offloading/unloading</i> .....	19
Gambar 2.9 Ilustrasi gerakan <i>surging</i> .....	25
Gambar 2.10 Ilustrasi gerakan <i>swaying</i> .....	25
Gambar 2.11 Ilustrasi gerakan <i>heaving</i> .....	25
Gambar 2.12 Ilustrasi gerakan <i>rolling</i> .....	26
Gambar 2.13 Ilustrasi gerakan <i>pitching</i> .....	26
Gambar 2.14 Ilustrasi gerakan <i>yawing</i> .....	26
Gambar 2.15 Gerakan kapal dalam enam derajat kebebasan .....	27
Gambar 2.16 Parameter <i>mooring line</i> .....	32
Gambar 2.17 <i>Mooring fatigue design curve (T-N Curve)</i> .....	35
Gambar 2.18 Matriks resiko .....	41
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan .....	47
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan ( <b>Lanjutan</b> ) .....	48
Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan Keandalan .....	49
Gambar 3.3 <i>Mooring arrangement FSO Federal II</i> .....	57
Gambar 4.1 Pemodelan <i>Software MAXSURF</i> .....	60
Gambar 4.2 Model geometri FSO Federal II <i>MOSES</i> .....	60
Gambar 4.3 Model geometri FSO Kapal <i>tanker MOSES</i> .....	60
Gambar 4.4 <i>RAO free floating (FSO Federal II 40% load, dir. 90<sup>0</sup>)</i> .....	62
Gambar 4.5 Model FSO pada <i>software Orcaflex</i> tampak atas .....	63
Gambar 4.6 Model FSO pada <i>software Orcaflex</i> tampak samping.....	63
Gambar 4.7 Model sistem tambat dalam <i>Orcaflex</i> .....	64

Gambar 4.8 Model sistem tambat FSO <i>standalone</i> dalam <i>Orcaflex</i> .....	64
Gambar 4.9 Model FSO <i>side by side</i> dengan kapal <i>tanker</i> dalam <i>Orcaflex</i> .....	65
Gambar 4.10 <i>Time history mooring line tension</i> .....	70
Gambar 4.11 Tipe CoF tentang keamanan menurut DNV RPG 101 .....	80
Gambar 4.12 Tipe CoF tentang lingkungan menurut DNV RPG 101.....	80
Gambar 4.13 Tipe CoF tentang bisnis menurut DNV RPG 101 .....	81
Gambar 4.14 Matriks resiko tentang keamanan FSO Federal II.....	82
Gambar 4.15 Matriks resiko tentang lingkungan FSO Federal II .....	83
Gambar 4.16 Matriks resiko tentang bisnis FSO Federal II.....	84

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter-parameter gelombang.....	30
Tabel 2.2 Nilai M dan K (API RP 2SK).....	34
Tabel 2.3 Rangkuman mutu kelas <i>marine chain</i> .....	44
Tabel 2.4 <i>Safety factor of fatigue mooring line</i> .....	44
Tabel 3.1 Data FSO Federal II.....	53
Tabel 3.2 Data kapal <i>tanker</i> .....	53
Tabel 3.3 Skenario kondisi operasi ketika <i>offloading/unloading</i> .....	54
Tabel 3.4 Data pembebanan FSO Federal II.....	54
Tabel 3.5 Data pembebanan kapal <i>tanker</i> .....	54
Tabel 3.6 Data lingkungan ladang minyak Widuri.....	55
Tabel 3.7 Data <i>wave scatter diagram</i> Widuri.....	55
Tabel 3.8 Data pembebanan lingkungan dari <i>wave scatter diagram</i> Widuri.....	56
Tabel 3.9 Data <i>mooring lines</i> .....	56
Tabel 3.10 <i>Property of mooring line</i> .....	57
Tabel 4.1. Hasil hidrostatik <i>output software MAXSURF</i> .....	59
Tabel 4.2. Validasi <i>output software Moses</i> dan data FSO Federal II.....	61
Tabel 4.3. Validasi <i>output software Moses</i> dan data <i>Tanker</i> .....	61
Tabel 4.4. Kondisi awal <i>mooring lines</i> .....	66
Tabel 4.5. Kondisi <i>mooring lines</i> terkorosi dan efek <i>marine growth</i> .....	66
Tabel 4.6. Jumlah segmen paada <i>mooring lines</i> .....	66
Tabel 4.7. Tension pada <i>mooring line</i> kondisi operasi FSO Federal II <i>standalone</i> .....	67
Tabel 4.8. Tension pada <i>mooring line</i> kondisi 1 <i>offloading/unloading</i> .....	67
Tabel 4.9. Tension pada <i>mooring line</i> kondisi 2 <i>offloading/unloading</i> .....	68
Tabel 4.10. Tension pada <i>mooring line</i> kondisi 3 <i>offloading/unloading</i> .....	68
Tabel 4.11. <i>Assessment criteria for all lines intact</i> .....	69
Tabel 4.12. <i>Safety Factor mooring lines</i> FSO Federal II (Badai dir.90 <sup>0</sup> ).....	69
Tabel 4.13. Jadwal kegiatan <i>offloading/unloading</i> .....	72
Tabel 4.14. <i>Commulative damage</i> FSO <i>standalone</i> .....	72
Tabel 4.15. <i>Commulative damage offloading/unloading</i> .....	73
Tabel 4.16. Parameter variabel Acak.....	74
Tabel 4.17. Hasil peluang kegagalan dengan simulasi <i>Monte Carlo</i> .....	74

Tabel 4.18. Kriteria peluang gagal DNV RP G101 .....	75
Tabel 4.19 Peluang dari konsekuensi kegagalan <i>mooring lines</i> Menurut OGP .....	77

## DAFTAR SIMBOL

$F_{cx}$	= Gaya arus pada <i>bow</i> (N)
$F_{cy}$	= Gaya arus pada <i>beam</i> (N)
$C_{cx}$	= Koefisien gaya arus pada <i>bow</i>
$C_{cy}$	= Koefisien gaya arus pada <i>bow</i>
$S$	= Luas penampang pada lambung kapal yang terendam ( $m^2$ )
$V_c$	= Kecepatan arus desain (m/sec)
$F_w$	= gaya angin (N)
$C_S$	= koefisien bentuk
$\rho_a$	= massa jenis udara ( $kg/m^3$ )
$\dot{x}$	= kecepatan dari platform (m/s)
$x_a$	= aerodynamic amittance
$A$	= luas area vertikal yang terkena angin ( $m^2$ )
$V_C$	= kecepatan partikel air (m/s)
$V_W$	= kecepatan angin, knots (m/s)
$V_{10}$	= kecepatan angin pada ketinggian 10 m, knots (m/s)
$y$	= ketinggian dimana kecepatan angin dihitung, (m)
$x$	= faktor eksponen
$\xi$	= Parameter bentuk dengan harga umum antara 0,75 s.d. 2,0, sedangkan untuk gelombang laut umumnya berkisar 0,9 s.d. 1.1.
$\xi$	= Parameter skala yang harganya tergantung dari harga ekstrim variabel $x$
$x$	= Intensitas objek/ parameter yang ditinjau, misalnya tinggi gelombang sehingga $x=H$
$M_{jk}$	= matriks massa dan momen inersia massa bangunan laut,
$A_{jk}$	= matriks koefisien-koefisien massa tambah hidrodinamik,
$B_{jk}$	= matriks koefisien-koefisien redaman hidrodinamik,
$K_{jk}$	= matriks koefisien-koefisien kekakuan atau gaya dan momen hidrostatis, 16
$F_j$	= matriks gaya eksitasi( $F_1, F_2, F_3$ ) dan momen eksitasi( $F_4, F_5, F_6$ ) dalam fungsi kompleks (dinyatakan oleh $e^{i\omega t}$ ),
$F1$	= gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>surge</i> (N)
$F2$	= gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>sway</i> (N)



$F3$	= gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>heave</i> (N)
$F4$	= momen eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>roll</i> (N.m)
$F5$	= momen eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>pitch</i> (N.m)
$F6$	= momen eksitasi yang menyebabkan gerakan <i>yaw</i> (N.m)
$\bar{E}$	= elevasi gerakan pada mode ke $k$ ,
$\dot{\xi}$	= elevasi kecepatan gerak pada mode ke $k$ ,
$\ddot{\xi}$	= elevasi percepatan gerak pada mode ke $k$ .
$\omega_p$	= frekuensi puncak spektra ( <i>spectral peak frequency</i> )
$\gamma$	= parameter puncak ( <i>peakedness parameter</i> )
$\tau$	= parameter bentuk ( <i>shape parameter</i> )
$\alpha$	= $0,0076 (X_o)^{-0,22}$ , apabila $X_o$ tidak diketahui maka $\alpha = 0,0081$
$T_p$	= periode puncak spektra (s)
$H_s$	= tinggi gelombang signifikan (m)
$m_o$	= Luasan dibawah kurva spektrum (zero moment)
$T$	= lama kejadian badai ( <i>storm propagation</i> ) = 3 jam
$\alpha$	= kemungkinan kejadian yang tidak terjadi pada saat perancangan ( 1% - 5%)
$m_2$	= Momen Spektra kecepatan
$l$	= panjang minimum dari <i>chain line</i> (m)
$h$	= $h_m + h_c$
$h_m$	= kedalaman air (m)
$h_c$	= tinggi <i>fairlead</i> diatas permukaan air (m)
$p$	= berat <i>chain line</i> didalam air persatuan panjang (T/m)
$F_H$	= gaya horizontal <i>chain line</i> pada <i>fairlead</i> (N)
$T$	= <i>tension</i> dari <i>chain line</i> pada <i>fairlead</i> (N)
$D$	= <i>length resting on the seabed</i> (m)
$T_{mean}$	= <i>mean tension</i>
$T_{max}$	= <i>maximum tension</i>
$T_{wfmax}$	= <i>maximum wave frequency tension</i>
$T_{wfsig}$	= <i>significant wave frequency tension</i>
$T_{lfmax}$	= <i>maximum low-frequency tension</i>
$T_{lfsig}$	= <i>significant low-frequency tension</i>

$N$	= Number of cycles
$R$	= <i>Ratio of tension range dengan reference breaking strength</i>
$M$	= Slope invers negative dari kurva T-N
$K$	= intersep dari log N pada kura T-N
$L_m$	= <i>Ratio of mean load to reference breaking strength untuk wire rope.</i>
$R\sigma_i$	= rasio standar deviasi dari gabungan <i>low frequency</i> dan <i>wave frequency tension range</i> dengan <i>reference breaking strength</i> .
$n_i$	= jumlah <i>cycle tension</i> dalam kondisi <i>i state</i> tiap tahunnya
$\Gamma$	= Gamma
$V_i$	= zero up crossing frequency (Hz) dari spektrum tegangan pada kondisi lingkungan <i>i (wave frequency dan low frequency)</i>
$V_{Li}$	= zero up crossing frequency (Hz) dari spektrum tegangan pada kondisi lingkungan <i>i low frequency</i>
$V_{wi}$	= zero up crossing frequency (Hz) dari spektrum tegangan pada kondisi lingkungan <i>i wave frequency</i>
$T_i$	= waktu dalam 1 tahun (s)
$P_i$	= peluang kejadian kondisi lingkungan <i>i</i>
$D$	= Rasio kerusakan kumulatif
$g(x)$	= moda kegagalan
$T_{plan}$	= <i>Service Life</i>
$P_{of}$	= <i>Probability of failure</i> (didapat dari Simulasi Monte Carlo)
$C_{of}$	= <i>Consequency of failure</i>

## DATAR ISTILAH

FSO	: Suatu bangunan terapung/kapal yang tertambat dan digunakan sebagai tempat untuk menyimpan <i>crude oil</i> .
<i>Mooring Line</i>	: Suatu sarana tambat pada bangunan laut dengan sistem dan tipe yang sesuai dengan kondisi yang ditentukan.
<i>Surging</i>	: Gerakan translasi pada bangunan apung dengan arah gerakan pada sumbu x (maju-mundur).
<i>Swaying</i>	: Gerakan translasi pada bangunan apung dengan arah gerakan pada sumbu y (kanan-kiri).
<i>Heaving</i>	: Gerakan translasi pada bangunan apung dengan arah gerakan pada sumbu z (naik-turun).
<i>Rolling</i>	: Gerakan osilasi rotasional struktur terapung terhadap sumbu x.
<i>Pitching</i>	: Gerakan osilasi rotasional struktur terapung terhadap sumbu y.
<i>Yawing</i>	: Gerakan osilasi rotasional struktur terapung terhadap sumbu z.
RAO	: <i>Respon Amplitude Operator</i> merupakan fungsi respon gerakan dinamis struktur yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi tertentu.
Respon Spektra	: Respon energi densiti pada struktur akibat gelombang, dalam hal ini berupa <i>energy density spectrum</i> .
Splash zone	: Daerah lokasi pada bangunan lepas pantai yang terkena hampasan fluktuasi ketinggian gelombang.
Korosi	: Permasalahan yang selalu timbul ketika suatu material baik metal maupun non metal berada pada lingkungan yang korosif.
Beban Operasi	: Merupakan suatu kondisi pembebanan ketika struktur mengalami beban operasi (Lingkungan (periode ulang 1-10 tahun), Mechanical Load dan kegiatan operasi ( <i>offloading/unloading</i> )).

<i>Offloading/Unloading</i>	: Merupakan suatu kondisi pembebanan dimana struktur melakukan aktivitas bongkar muat dari struktur satu menuju struktur yang lainnya (Con: FSO mentansfer minyak ke kapal <i>tanker</i> ), kegiatan ini merupakan serangkaian kegiatan yang harus dilakukan dalam proses distribusi.
<i>Effective Tension</i>	: Merupakan tegangan yang sering terjadi pada suatu objek akibat respon dari struktur maupun lingkungan.
<i>Fatigue</i>	: Lelahnya suatu objek akibat fenomena alam atau respon yang bekerja secara kontinyu pada suatu objek (beban siklis).
<i>Low frequency</i>	: Frekuensi pada <i>line tension</i> yang terjadi akibat beban dinamis, tanpa adanya unsur <i>damping</i> , <i>viskositas</i> , berat properti dan lain sebagainya.
<i>Wave frequency</i>	: Frekuensi pada <i>line tension</i> (lebih detail dari <i>low frequency</i> ) yang terjadi akibat beban dinamis dimana <i>damping</i> , <i>viskositas</i> , berat properti dan lain sebagainya.
<i>Fatigue life</i>	: Umur kelelahan pada suatu objek yang ingin ditinjau.
<i>Life extension</i>	: Penambahan umur pada suatu objek untuk tetap melanjutkan operasinya.
<i>Probability of failure</i>	: Peluang terjadinya kegagalan pada suatu sistem.
<i>Consequence of failure</i>	: Konsekuensi yang terjadinya apabila terjadi gagal pada objek yang ditinjau.
Monte carlo	: Algoritma komputasi untuk mensimulasikan berbagai perilaku sistem fisika dan matematika.
Matriks resiko	: Merupakan bentuk tabel matriks dengan perpaduan antara peluang kegagalan dengan konsekuensi terjadinya kegagalan.

# BAB I

## PENDAHULUAN

Dalam bab ini dijelaskan berbagai macam hal yang melatarbelakangi tesis ini. Selain itu juga akan dipaparkan suatu permasalahan-permasalahan yang menjadi topik utama pembahasan tesis ini, tujuan, manfaat, batasan-batasan masalah, dan sistematika penulisan laporan tesis.

### 1.1 LATAR BELAKANG

Kebutuhan kilang di Indonesia memiliki konsekuensi tersendiri dalam pemenuhan kebutuhan akan bahan baku. Karena bahan baku yang berasal dari minyak mentah (*crude oil*) harus didatangkan dari luar pulau. Untuk penyaluran minyak menggunakan *tanker* terdapat pula suatu sistem penunjang fasilitas produksi minyak yaitu *FSO (Floating Storage and Offloading)*. FSO merupakan sarana tambat yang terpadu dengan sistem penyaluran minyak dimana kapal *tanker* harus bertambat dan melakukan bongkar/muat minyak melalui rangkaian hose dan jalur pipa bawah laut dalam proses distribusi ke *onshore*.

Menurut Boerdiarto (2000) terdapat dua alternatif utama yang biasa digunakan dalam transportasi hasil produksi migas, yaitu disimpan dalam fasilitas penyimpanan (*storage unit*) atau dikirim melalui jalur perpipaan (*subsea pipeline*). Sebagai pilihan untuk fasilitas penyimpanan, diperlukan suatu sistem dan unit yang mampu untuk menyalurkan hasil produksi dari fasilitas produksi ke *shuttle tanker*. Salah satu sistem transfer yang dikenal saat ini adalah *side by side offloading* dimana *shuttle tanker* langsung mengambil/mentransfer hasil produksi dari tempat penyimpanannya yaitu *floating unit* yang disebut FSO (*Floating Storage and Offloading*). Pada sistem tersebut FSO ditambat dengan menggunakan sistem tambat *spread mooring system*.

Untuk memenuhi permintaan minyak dan gas bumi dalam negeri, beberapa anjungan lepas pantai dan struktur pendukungnya seperti FPSO/FSO, dan SPM yang melebihi umur operasi masih dipertahankan untuk tetap melanjutkan operasinya dalam memproduksi dan menunjang dalam proses eksploitasi hidrokarbon yang masih tersedia. Dalam memastikan dan menjamin keamanan operasi secara keseluruhan saat perencanaan perpanjangan umur operasi, maka dibutuhkan studi penilaian ulang yang seksama dan teliti. Penilaian struktur (*assessment*) digunakan untuk melihat kelayakan dari struktur yang akan

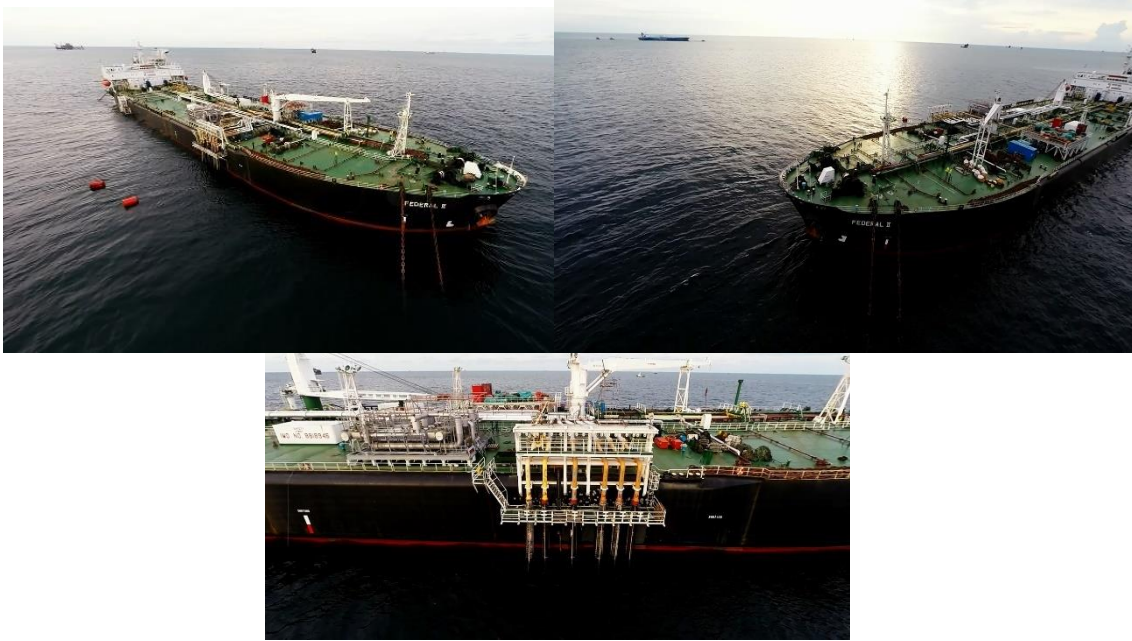
digunakan lagi setelah adanya modifikasi atau rencana dioperasikan kembali lebih dari masa pelayanannya (*expand life*).

Penilaian ulang struktur bertujuan untuk mengidentifikasi kemungkinan-kemungkinan kerusakan yang terjadi pada struktur. Assesment pada sebuah bangunan apung untuk beroperasi mencakup beberapa kriteria yang diantaranya adalah: review kekuatan struktur, *remaining life* dan *Risk-based Inspection planning (RBI)* (API Publication 581). Prosedur seperti ini sudah normal digunakan apabila ada perubahan dalam operasional struktur, adanya tambahan beban dan masa operasi, tambahan struktur ataupun *strengthening* (penguatan), selain itu juga adanya kerusakan dari bagian-bagian struktur misal rusaknya *mooring line* akibat korosi ataupun dari getaran FSO ketika beroperasi dan gerakan dari FSO dan *tanker* ketika *offloading*.

Komponen dari struktur FSO yang mendapat pengaruh besar dari beban siklis antara lain pada *mooring chain* dan *subsea hose* yang tergabung dalam 1 *mooring line system* dan. Analisis tentang kekuatan *fatigue* diterapkan pada semua struktur yang secara dominan menerima beban siklis, untuk memastikan integritas struktur dan untuk penilaian kemungkinan kerusakan akibat beban kelelahan (*fatigue*) sebagai dasar untuk memperkirakan rencana inspeksi yang paling efisien.

Mengingat pentingnya peranan sistem tambat ini maka jika terjadi kerusakan akan dapat mengganggu kelancaran proses penyaluran minyak, menjaga kondisi sistem tambat sehingga dapat beroperasi dengan lancar dan aman merupakan permasalahan penting yang tidak boleh diabaikan. FSO bersifat *floating* (mengapung) untuk mempertahankan kedudukan atau posisinya memerlukan suatu sistem penjangkaran, yaitu biasa disebut dengan *mooring system*. Gerakan (*motion*) dari kapal *tanker* dan FSO menyebabkan adanya gaya yang bekerja (*tension force*, *restoring force*, dan *damping*) pada *mooring system*

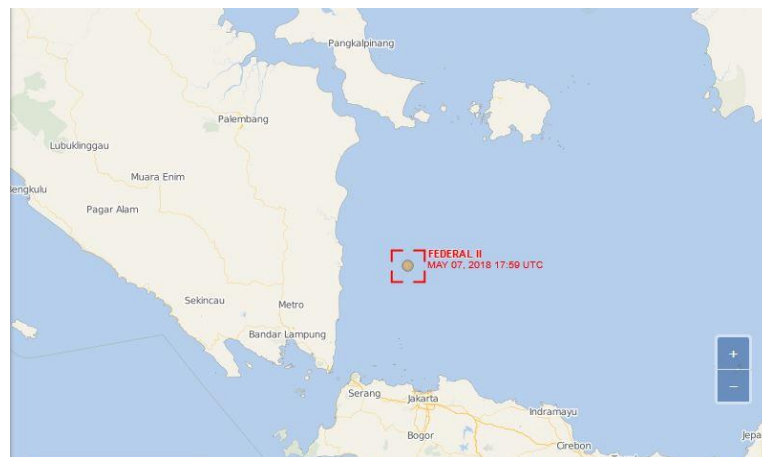
Dalam API RP 2 SK,2005 disebutkan beberapa tipe *mooring* untuk bangunan Floating yang diantaranya SPM dengan sistem *turret*, *Catenary Anchor Leg Mooring/CALM* dan *Single Anchor Leg Mooring/SALM* Fixed Tower, Articulated loading platform (ALP), Single point and reservoir (SPAR), Single-anchor loading (SAL) dan *Catenary Anchor Leg Mooring (CALM)*. Ada pula Spread Mooring dengan *system* yang diantaranya *Spead Mooring System*, *Lateral Mooring System* dan *Differential Compliance Anchoring System* dan yang akan diaplikasikan ke FSO Federal II adalah Spread Mooring Line System (Gambar 1.1).



Sumber :CNOOC, 2014

**Gambar 1.1** *Spread mooring system* FSO Federal II

Tesis ini mengambil objek *spread mooring line* pada FSO dengan type catenary, dengan kapasitas 94.417 DWT. FSO tersebut beroperasi di laut Jawa, *widuri field* , Barat laut dari Jakarta dan Tenggara dari Pulau Sumatra (Gambar 1.2).



Sumber :CNOOC, 2014 & <https://www.vesselfinder.com/?imo=8818946>

**Gambar 1.2** Lokasi FSO Federal II

Kelelahan (*fatigue*) struktur masih menjadi penyebab mayoritas kerusakan pada bangunan laut termasuk struktur *FSO*. Perkiraan umur kelelahan dilakukan berdasar pada fluktuasi beban yang akan diterima struktur selama masa operasinya. Beban yang

diterima bangunan laut terutama pada sistem tambatnya (*mooring system*) lebih didominasi oleh beban gelombang sehingga menyebabkan bangunan laut mempunyai kecenderungan lebih tinggi untuk mengalami kelelahan, selain itu faktor operasi pada tingkat tertentu menambah beban siklis sehingga struktur menjadi bertambah kritis (Djarmiko,2003).

Karena medan yang dilalui oleh *mooring line* pada *FSO Federal II* sangat beragam, yakni mulai dari dalam laut, dataran rendah, lembah, dan di dalam tanah, maka dalam pengoperasiannya akan banyak ditemui berbagai macam persoalan, baik masalah penentuan material dan *system*, beban siklis pada *mooring line* yang menyebabkan kelelahan pada struktur (*fatigue*), dan korosi (*corrosion*) pada struktur maupun *mooring line*. Dari ketiga jenis permasalahan yang biasa dialami *mooring line*, maka pemilihan material menjadi persoalan yang sangat diperhatikan karena efek lanjutan dari beban siklis terhadap material ini bisa mengakibatkan *fatigue* yang mengakibatkan kegagalan pada *mooring line* yang sangat merugikan baik dari segi struktur maupun ekonomis.

Pemilihan material dan sistem penambatan yang digunakan menjadi suatu sorotan yang perlu diperhatikan pada pendesainan *mooring line*, karena material yang digunakan dan *system* yang digunakan menjadi faktor utama yang menentukan kuat tidaknya dan ekonomis tidak ekonomisnya suatu *mooring line system*. Material dan sistem yang dipilih harus mampu menahan beban operasi dan lingkungan yang terjadi seperti arus, gelombang, dan angin.

Beban operasi dan *offloading/unloading* adalah merupakan suatu kondisi dimana struktur terkena beban operasi baik getaran dari peralatan yang beroperasi maupun kondisi lingkungan untuk beroperasi, serta beban *unloading/offloading* merupakan beban yang ditanggung suatu struktur atau dalam kasus ini *FSO Federal II* akibat tarikan kapal ketika proses *unloading/offloading*. Apabila kedua kondisi pembebanan ini terjadi dan dipadukan dengan adanya tegangan yang mengenainya (*stress* atau *strain*) maka besar kemungkinan suatu *mooring line* akan mengalami kelelahan yang akibatnya bisa sangat berbahaya pada simulasi kali ini akan digunakan kapal *tanker* dengan kapasitas 50.000-80.000 DWT dan dipilih untuk kasus ini kapal *tanker* dengan kapasitas  $\pm 54.000$  DWT.

Adanya *crack* pada *mooring line system* mengakibatkan penurunan kekuatan dari *mooring line*, penurunan kekuatan *mooring line* sebanding dengan gerakan yang terus bekerja pada *mooring line* (gerakan siklis) sampai *mooring line* tidak mampu lagi menahan beban siklis tersebut sehingga terjadi kegagalan pada struktur. Pada *mooring line* yang



terpasang di dalam laut mempunyai resiko yang besar terhadap terjadinya suatu kegagalan. Hal ini bisa disebabkan karena adanya beban arus yang diikuti dengan adanya tekanan fluida dan tegangan pada *mooring line* akibat gerakan FSO dan tarikan dari kapal ketika proses bongkar muat. Analisis terhadap resiko terhadap beban fatigue yang dipengaruhi oleh kondisi operasi dan beban *offloading/unloading* pada *mooring line* menjadi sorotan pada tesis ini. Oleh karena itu, tesis ini ditunjukkan untuk mengidentifikasi besarnya resiko pada *mooring line system* apabila terkena beban lingkungan, operasi dan beban *offloading/unloading* hingga terjadi fatigue pada *mooring line*.

Analisis resiko pada *mooring line* akibat beban kelelahan (*fatigue*) yang mengenainya dapat diketahui peluang kegagalan *mooring line* tersebut, selain itu tingkat resiko akibat kegagalan dapat diketahui sehingga diharapkan untuk meminimalisasi peluang kegagalan tersebut (Kusumawardhani,2011). Apabila terjadi suatu kelelahan pada bagian chain maka dapat dipastikan struktur akan mengalami kegagalan yang bisa menimbulkan bahaya seperti keselamatan awak pekerja, kondisi lingkungan sekitar,agalnya sistem operasi ,bahkan kerugian secara struktural hingga non struktural.

## **1.2 RUMUSAN MASALAH**

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan dalam latar belakang di atas, maka beberapa masalah yang akan dikaji dalam tesis ini adalah:

1. Apakah dengan adanya beban operasi (*offloading /unloading*) akan mempengaruhi umur dari *mooring line* FSO Federal II ?
2. Apakah *fatigue life* dari *mooring line* FSO Federal II setelah adanya tambahan pembebanan *offloading/unloading* masih memenuhi kriteria untuk beroperasi selama 10 tahun?
3. Bagaimana tingkat resiko *mooring line system* akibat beban *fatigue* dengan adanya beban tambahan dari *offloading/unloading* ?

## **1.3 TUJUAN**

Berdasarkan perumusan masalah masalah di atas, tujuan yang ingin dicapai ialah:

1. Mengetahui pengaruh/dampak beban operasi (*offloading /unloading*) terhadap umur *mooring line* FSO Federal II.
2. Mengetahui *fatigue life* dari *mooring line FSO Federal II* untuk syarat kriteria beroperasi selama 10 tahun.

3. Mengetahui tingkat resiko *mooring line system* akibat beban *fatigue* yang dipengaruhi oleh adanya beban tambahan dari *offloading/unloading*.

#### **1.4 MANFAAT**

Manfaat yang akan didapatkan dari tesis ini adalah dapat mengetahui *mooring line system* mampu melakukan penambahan umur operasi berdasarkan resiko dengan menambahkan nilai *fatigue* dan korosi. Sehingga dapat menjadi masukan untuk perusahaan terkait guna mengurangi kegagalan atau kerusakan yang akan terjadi dan mendapatkan perencanaan untuk inspeksi yang efektif yang berdasarkan atas resiko yang terjadi dalam *RBI (Risk Based Inspection)*.

#### **1.5 BATASAN MASALAH**

Dengan banyaknya komponen *variable* yang akan dikaji dalam studi ini sehingga akan menyulitkan dalam penganalisaan. Oleh sebab itu agar memudahkan dalam menganalisis permasalahan yang ada maka perlu diberikan batasan-batasan yang diharapkan analisis yang dilakukan dapat memberikan hasil yang maksimal. Adapun batasan masalah yang diberikan dalam studi ini adalah sebagai berikut:

1. Hanya dilakukan permodelan *mooring lines system* pada *FSO* saja, semua peralatan dan perlengkapan diatas *FSO* tidak dimodelkan.
2. Data yang tidak diketahui, diasumsikan berdasarkan *standard* atau *rules* internasional yang memiliki pendekatan secara teori maupun pengalaman.
3. Permukaan Tanah diasumsikan datar.
4. Kekuatan dari jangkar dan *hawser* tidak dibahas / diasumsikan kuat.

#### **1.6 SISTEMATIKA PENULISAN**

Sistematika penulisan tesis ini dimulai dari Bab I yaitu pendahuluan yang menjelaskan tentang latar belakang tesis yang akan dilakukan, perumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam penulisan tesis, manfaat yang diperoleh, serta ruang lingkup untuk membatasi analisis yang dilakukan dalam thesis.

Pada bab II (dua) yaitu tinjauan pustaka dan dasar teori yang berisi referensi dan juga teori-teori pendukung yang digunakan sebagai acuan atau pedoman dalam menyelesaikan thesis. Referensi tersebut bersumber pada jurnal lokal maupun internasional, literatur, *rules/code* dan juga buku yang berkaitan dengan topik yang

berhubungan dengan pengaruh beban kelelahan terhadap tingkat resiko *mooring line* maupun analisis resiko pada *mooring line* akibat beban *fatigue*.

Pada bab berikutnya yaitu Bab III (tiga) yang berisi tentang alur pengerjaan tesis dengan tujuan untuk memecahkan masalah yang diangkat dalam bentuk diagram alir atau *flow chart* yang disusun secara sistematis yang dilengkapi pula dengan data-data tesis serta penjelasan detail untuk setiap langkah pengerjaannya. Pada bab ini dijelaskan antara lain melakukan permodelan dengan bantuan *software MOSES* dan *ORCAFLEX* untuk mencari nilai mencari pengaruh beban yang ada terhadap kekuatan struktur, kemudian proses menentukan tingkat resiko yang dilakukan terhadap *mooring line*.

Pada bab IV(empat) yaitu tentang analisis dan pembahasan yang isinya menjelaskan tentang pengolahan data yang diperoleh, kemudian pemodelan gerak dari *FSO*. Selanjutnya, dalam bab ini juga dilakukan pembahasan dan pengolahan *output* yang diperoleh dari simulasi *software* yang mencakup analisis gerakan struktur saat *free floating* dan tertambat, serta menghitung *fatigue* pada *mooring lines system* di *FSO Federal II* yang diakibatkan adanya beban siklis dari lingkungan, operasi *FSO* dan *offloading/unloading*. Selanjutnya dilakukan analisis resiko pada *mooring line system* di *FSO Federal II* akibat beban *fatigue*.

Pada bab 5 berisi kesimpulan yang merupakan uraian singkat dari keseluruhan hasil analisis. Pada bab ini juga berisikan saran yang bermanfaat guna keberlanjutan penelitian terkait untuk masa depan.

Pada bagian terakhir dalam tesis ini yaitu daftar pustaka yang menampilkan seluruh informasi dan dokumen tertulis yang dijadikan landasan dan pengembangan penelitian. Penulisan daftar pustaka ini mengikuti *Harvard system*.

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 TINJAUAN PUSTAKA

*FSO* merupakan kapal yang dirancang khusus untuk menyimpan dan offload minyak mentah dan kondensat dari instalasi ladang minyak lepas pantai. *FSO* biasanya digunakan sebagai instalasi tetap bidang yang terpisah untuk penyimpanan minyak mentah dan kondensat saat platform produksi utama tidak dilengkapi dengan fasilitas penyimpanan, atau bila kapasitas penyimpanan tambahan diperlukan. Biasanya, *FSO* secara permanen ditambatkan di lapangan, baik dengan sistem tambat tetap di perairan tenang atau dengan sistem pelampung vaning cuaca di perairan lebih keras.

Untuk memenuhi kebutuhan minyak dan gas diperlukan bangunan lepas pantai seperti *offshore structure* dan bangunan-bangunan penunjangnya. Beberapa anjungan lepas pantai dan struktur pendukungnya seperti *FPSO/FSO*, dan *SPM* di Indonesia yang melebihi umur operasi masih dipertahankan untuk tetap melanjutkan operasinya dalam memproduksi dan menunjang dalam proses eksploitasi hidrokarbon yang masih tersedia. Dalam memastikan dan menjamin keamanan operasi secara keseluruhan saat perencanaan perpanjangan umur operasi, maka dibutuhkan studi penilaian ulang yang seksama dan teliti. Penilaian struktur (*assesment*) digunakan untuk melihat kelayakan dari struktur yang akan digunakan lagi setelah adanya modifikasi atau rencana dioperasikan kembali lebih dari masa pelayanannya (*expand life*).

Penilaian ulang struktur bertujuan untuk mengidentifikasi kemungkinan-kemungkinan kerusakan yang terjadi pada struktur. Studi penilaian ulang pada sebuah bangunan lepas pantai meliputi tiga hal, yaitu *puhsover analysis*, *fatigue analysis* dan *Risk-based Inspection planning (RBI)* (Chakrabarti, et al, 2005) dan untuk bangunan apung proses assesment mencakup *fatigue analysis* dan *Risk-based Inspection planning (RBI)* (Chakrabarti, et al, 1987). Prosedur seperti ini sudah normal digunakan apabila ada perubahan dalam operasional struktur, adanya tambahan beban dan masa operasi, tambahan struktur ataupun *strenghtening* (penguatan), selain itu juga adanya kerusakan dari bagian-bagian struktur misal rusaknya *mooring line* akibat korosi ataupun dari getaran *FSO* ketika beroperasi dan gerakan dari *FSO* dan *tanker* ketika *offloading*.

Kelelahan (*fatigue*) struktur masih menjadi penyebab mayoritas kerusakan pada bangunan laut termasuk struktur *FSO*. Perkiraan umur kelelahan dilakukan berdasar pada

fluktuasi beban yang akan diterima struktur selama masa operasinya. Beban yang diterima bangunan laut terutama pada sistem tambatnya (*mooring system*) lebih didominasi oleh beban gelombang sehingga menyebabkan bangunan laut mempunyai kecenderungan lebih tinggi untuk mengalami kelelahan, selain itu faktor operasi pada tingkat tertentu menambah beban siklis sehingga struktur menjadi bertambah kritis (Djarmiko,2003).

Komponen dari struktur *FSO* yang mendapat pengaruh besar dari beban siklis antara lain pada *mooring chain* dan *subsea hose* yang tergabung dalam 1 *mooring line system* dan. Analisis tentang kekuatan *fatigue* diterapkan pada semua struktur yang secara dominan menerima beban siklis, untuk memastikan integritas struktur dan untuk penilaian kemungkinan kerusakan akibat beban kelelahan (*fatigue*) sebagai dasar untuk memperkirakan rencana inspeksi yang paling efisien.

Mengingat pentingnya peranan sistem tambat ini maka jika terjadi kerusakan akan dapat mengganggu kelancaran proses penyaluran minyak, menjaga kondisi sistem tambat sehingga dapat beroperasi dengan lancar dan aman merupakan permasalahan penting yang tidak boleh diabaikan. *FSO* bersifat *floating* (mengapung) untuk mempertahankan kedudukan atau posisinya memerlukan suatu sistem penjangkaran, yaitu biasa disebut dengan *mooring system*. Gerakan (*motion*) dari kapal *tanker* dan *FSO* menyebabkan adanya gaya yang bekerja (*tension force, restoring force, dan damping*) pada *mooring system*.

Karena medan yang dilalui oleh *mooring line* pada *FSO Federal II* sangat beragam, yakni mulai dari dalam laut, dataran rendah, lembah, dan di dalam tanah, maka dalam pengoperasiannya akan banyak ditemui berbagai macam persoalan, baik masalah penentuan material dan *system*, beban siklis pada *mooring line* yang menyebabkan kelelahan pada struktur (*fatigue*), dan korosi (*corrosion*) pada struktur maupun *mooring line*. Dari ketiga jenis permasalahan yang biasa dialami *mooring line*, maka pemilihan material menjadi persoalan yang sangat diperhatikan karena efek lanjutan dari beban siklis terhadap material ini bisa mengakibatkan *fatigue* yang mengakibatkan kegagalan pada *mooring line* yang sangat merugikan baik dari segi struktur maupun ekonomis.

Pemilihan material dan sistem penambatan yang digunakan menjadi suatu sorotan yang perlu diperhatikan pada pendesainan *mooring line*, karena material yang digunakan dan *system* yang digunakan menjadi faktor utama yang menentukan kuat tidaknya dan ekonomis tidak ekonomisnya suatu *mooring line system*. Material dan sitem yang dipilih

harus mampu menahan beban operasi dan lingkungan yang terjadi seperti arus, gelombang, dan angin.

Beban operasi dan *offloading/unloading* (Gambar 2.1) adalah merupakan suatu kondisi dimana struktur terkena beban operasi baik getaran dari peralatan yang beroperasi maupun kondisi lingkungan untuk beroperasi, serta beban *unloading/offloading* merupakan beban yang ditanggung suatu struktur atau dalam kasus ini FSO Federal II akibat tarikan kapal ketika proses *unloading/offloading*. Apabila kedua kondisi pembebanan ini terjadi dan dipadukan dengan adanya tegangan yang mengenainya (*stress* atau *strain*) maka besar kemungkinan suatu *mooring line* akan mengalami kelelahan yang akibatnya bisa sangat berbahaya.



Sumber: <https://www.bmt.org/markets/oil-and-gas/offshore/maritime-safety-services/>

**Gambar 2.1** Kondisi *offloading/unloading*

Menurut Bai (2003), dalam buku *Marine Structural Design* menyebutkan data-data yang akan digunakan dalam analisis penilaian ulang dari struktur (*Structure Reassessment*) yang diantaranya adalah:

- Data inspeksi (*Inspection Record*)
- Data fabrikasi dan pengelasan (*Fabrication and Welding Record*)
- Data retakan dan *damage components*
- Data rincian komponen yang diganti atau diperkuat
- Data rincian dari metode pencegahan korosi dan *marine growth*
- Data hasil pengukuran di lokasi

Dari data-data diatas diseleksi dan digunakan untuk analisis kekuatan dari struktur yang ditinjau maupun kelelahan dari objek yang ditinjau. Kegagalan dari suatu *fix floating structure* adalah ketika salah satu dari *mooring line* putus. Terdapat beberapa kasus kegagalan suatu struktur akibat putusnya *mooring line* yaitu kejadian pada sebuah FPSO

di Laut Utara pada tahun 1999 dan pada *north carr lightship* pada Desember 1959 didekat pantai Skotlandia dimana kapal tersebut mengalami kegagalan diakibatkan rusaknya salah satu *mooring* pada kapal. Kegagalan pada *mooring line* tidak hanya diakibatkan oleh beban lingkungan moderate ataupun ekstrim melainkan juga karena beban yang bekerja pada *mooring* seperti getaran pada struktur yang menyebabkan pergerakan pada struktur yang akan berpengaruh pada *mooring line*, serta beban *offloading/unloading* pada objek yang mempengaruhi pergerakan pada objek yang ditambat yang mengakibatkan tambahan tegangan pada *mooring line*, selain itu juga terdapat berbagai macam sumber potensi yang mengakibatkan kegagalan pada material *mooring line* yang diantaranya adalah:

- Kegetasan pada material
- Kelebihan tegangan
- Korosi
- Abrasi pada *mooring*
- Beban siklis yang menyebabkan kelelahan
- Adanya retakan pada *mooring line*

Adanya *crack* pada *mooring line system* mengakibatkan penurunan kekuatan dari *mooring line*, penurunan kekuatan *mooring line* sebanding dengan gerakan yang terus bekerja pada *mooring line* (gerakan siklis) sampai *mooring line* tidak mampu lagi menahan beban siklis tersebut sehingga terjadi kegagalan pada struktur. Pada *mooring line* yang terpasang di dalam laut mempunyai resiko yang besar terhadap terjadinya suatu kegagalan. Hal ini bisa disebabkan karena adanya beban arus yang diikuti dengan adanya tekanan fluida dan tegangan pada *mooring line* akibat gerakan FSO dan tarikan dari kapal ketika proses bongkar muat.

Kelelahan terjadi karena akumulasi dari beban siklik yang terjadi saat struktur sedang beroperasi dilokasinya dan saat pembebanan terjadi terlalu besar akan mampu memproduksi *crack* akibat kelelahan dari material, retak diawali pada titik dari tekanan maksimum. Kegagalan karena kelelahan disebabkan oleh tahapan-tahapan dari kelelahan struktur, retak atau *crack*, apabila retak tersebut tidak diketahui akan dapat menyebabkan pecah catastrophic. Oleh karena itu pembebanan lingkungan dan beban operasi serta *offloading* yang sifatnya acak harus diperhitungkan. Apabila penetrasi retak telah melebihi syarat retak pada material (*chain - steelwire - chain*) *mooring* maka kestabilan material akan terganggu dan adanya beban lingkungan mempercepat laju keretakan



hingga terjadi kegagalan pada struktur. Apabila hantaman beban lingkungan terus menerus terjadi pada struktur maka struktur akan mengalami kelelahan sehingga resiko kegagalan akan terus meningkat bahkan kegagalan total struktur dipastikan akan terjadi. Oleh karena itu struktur yang telah melewati masa desain operasinya perlu untuk dianalisis besarnya resiko yang mungkin bisa terjadi.

Analisis resiko pada *mooring line* akibat beban kelelahan (*fatigue*) yang mengenainya dapat diketahui peluang kegagalan *mooring line* tersebut, selain itu tingkat resiko akibat kegagalan dapat diketahui sehingga diharapkan untuk meminimalisasi peluang kegagalan tersebut (Kusumawardhani,2011). Apabila terjadi suatu kegagalan pada member-member kritis maka dapat dipastikan struktur akan mengalami kegagalan yang bisa menimbulkan bahaya seperti keselamatan awak pekerja, kondisi lingkungan sekitar, gagalnya sistem operasi ,bahkan kerugian secara struktural hingga non struktural. Oleh karena itu struktur yang telah melewati masa desain operasinya perlu untuk dianalisis besarnya resiko yang mungkin bisa terjadi.

Pada analisis kali ini yang membedakan dari penelitian sebelumnya dari Sari (2008), Kusumawardhani (2011), dan Irfan (2014) adalah pada analisis kali ini akan dilakukan penambahan beban operasi yaitu *offloading/unloading* pada analisis kelelahan yang akan diaplikasikan pada analisis risiko.

## 2.2 DASAR TEORI

### 2.2.1 Floating Storage and Offloading (FSO)

*FSO (Floating Storage & Offloading)* (Gambar 2.2), merupakan suatu bangunan terapung/kapal yang digunakan sebagai tempat untuk menyimpan *crude oil*. *Crude oil* ini biasanya dari FPS atau FPU yang ditransfer ke FSO melalui sistem *submerged turret loading* (STL), kemudian di *export/offload* ke *shelter tanker* melalui *flexible hoses* pada bagian belakang FSO.

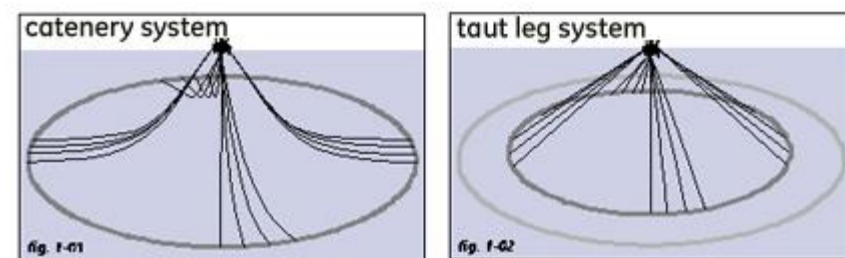


Sumber : CNOOC, 2014

**Gambar 2.2** Floating Storage and Offloading

### 2.2.2 Sistem Tambat

Sistem tambat dimanfaatkan untuk menahan pergerakan bangunan terapung agar tetap pada posisinya.. Beragam jenis sistem mooring yang ada di dunia, diantaranya adalah sistem *catenary mooring* (Gambar 2.3 1a) dan *taut mooring* (Gambar 2.3 1b).



Sumber: [http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/11-12/MORE/mooring/img/1.jpg](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/11-12/MORE/mooring/img/1.jpg)

**Gambar 2.3** Sistem tambat: (a) *Catenary mooring*, (b) *Taut mooring*

### **2.2.2.1 Catenary Mooring**

Catenary merupakan sebuah struktur berbentuk kurva yang biasanya berupa kabel atau rantai, menggantung bebas akibat bebannya sendiri dengan kedua ujungnya tertahan. Penambat struktur terapung yang menggunakan prinsip catenary bertujuan untuk memanfaatkan berat mooring sehingga struktur terapung tertahan di posisinya selama mendapat gangguan dari lingkungan laut. Struktur catenary yang diadopsi ke dalam struktur mooring memiliki banyak tambahan beban akibat beban di strukturnya. Dengan penambahan beban-beban di luar lazimnya struktur catenary maka dibutuhkan solusi yang tidak biasanya dari persamaan catenary. Untuk itu dilakukan pemodelan menggunakan metode numerik sehingga diperoleh koordinat mooring dan tegangan yang terdapat pada setiap segmen mooring

### **2.2.2.2 Taut Mooring**

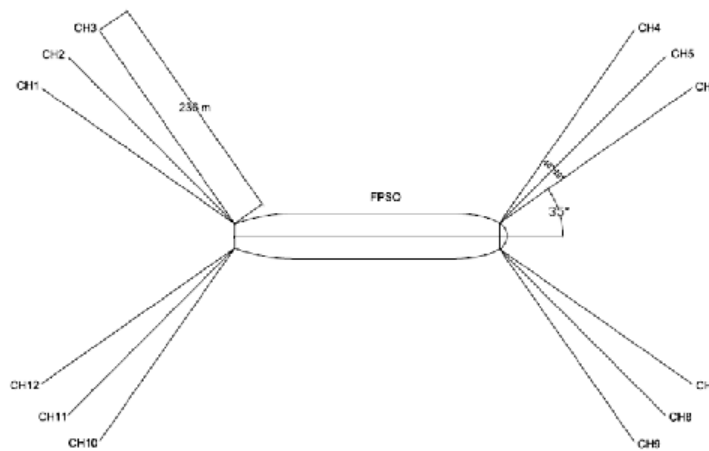
Aplikasi *Taut Mooring* terdiri dari rantai, polyester dan anchor adalah antara 1000 m dan 3000 m. Mekanisme kerja adalah bahwa kabel mooring langsung memperbaiki platform di dasar laut dan kekakuan aksial kabel menyediakan memulihkan kekuatan. Tegang dapat memberikan gaya pemulih yang lebih besar dan mengurangi Platform perpindahan ; di kedalaman yang sama perlu kabel pendek dan juga dapat menghemat biaya , menghindari banyak rantai baja pada waktu yang sama . Hal ini dapat meningkatkan beban variabel dan mengurangi beban platform ; Radius mooring adalah lebih rendah , mengurangi risiko tabrakan dengan fasilitas bawah laut di dekatnya .

## **2.2.3 Sistem Tambat Pada FSO/FPSO**

Fungsi utama mooring pada prinsipnya untuk mengamankan suatu posisi kapal agarkan berada tetap pada tempatnya. Secara umum, ada beberapa mooring system yang digunakan untuk **FSO/FPSO** (*Floating Production Storage and Offloading*) yaitu sistem tambat *weathervaning* dan *non-weathervaning*, dikatakan *weathervaning* apabila struktur bangunan apung bebas berputar 360° tergantung arahbeban yang mengenainya, seperti *Tower Mooring*, *Turret Mooring* dan *Buoy Mooring*. Sedangkan *non-weathervaning*, arah respon struktur dan beban lingkungan dibatasi oleh tahanan struktur bangunan apung contoh: *Spread Mooring* dan *dolphin mooring*.

### 2.2.3.1 Spread Mooring

Spread mooring (Gambar 2.4) merupakan salah satu cara yang sederhana untuk sarana tambat **FSO/FPSO** karena system spread mooring ini memungkinkan kapal untuk bergerak atau berputar mencapai posisi dimana ditemukan efek-efek lingkungan seperti angin, arus dan gelombang. Tapi kita ketahui cara ini akan mengakibatkan beban lingkungan terhadap kapal akan menjadi semakin besar, sehingga dapat mengakibatkan bertambahnya jumlah mooring lines dan line tensionnya.



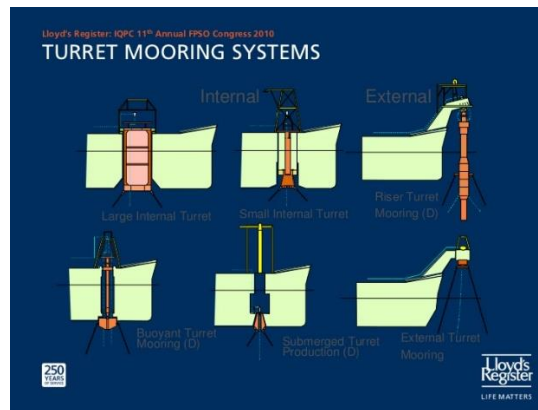
Sumber : <http://www.zebecmarine.com/spread-mooring-analysis.asp>

**Gambar 2.4** Spread mooring system

Adapun peralatan yang biasa digunakan yaitu peralatan umumnya yang sudah tersedia di kapal. Pada system ini digunakan satu set anchor legs dan mooring lines yang terletak pada posisi bow dan stern kapal. Peralatan-peralatan yang digunakan relative sederhana maka tidak perlu dry docking untuk melakukan modifikasi terhadap mooring systemnya. Spread mooring ini dapat kita diterapkan pada setiap tipe kapal tapi kita harus tetap perhatikan fasilitas produksi di atas kapal. Pada **FPSO** yang pada bagian atasnya ada terdapat fasilitas produksi **crude oil** dan **LPG** maka posisi fixed heading menjadi suatu kebutuhan yang penting maka dari itu digunakan system spread mooring, karena pergerakan ataupun perputaran dari kapal begitu sangat berpengaruh pada proses produksi LPG. System spread mooring ini peralatan *offloading* biasanya terletak di bow atau stern kapal.

### 2.2.3.2 Turret Mooring

Turret mooring system adalah salah satu sistem tambat dimana kapal dihubungkan dengan turret sehingga bearing memungkinkan kapal untuk berputar (Gambar 2.5). Jika dibandingkan dengan spread mooring tadi , pada system turret mooring ini riser dan umbilical yang diakomodasi dapat lebih banyak lagi.



Sumber : <http://www.slideshare.net/IQPCsingapore/alastair-jones>

**Gambar 2.5** Turret mooring system

Ada 2 sistem turret mooring yang diantaranya adalah :

#### 2.2.3.2.1 External Turret

External Turret dapat kita diletakkan pada posisi stern kapal pada luar lambung kapal, agarkan kapal dapat berputar 360 derajat dan mampu beroperasi pada kondisi cuaca normal atau extreme. Chain leg ditanam pada dasar laut dengan menggunakan anchor . Untuk biaya pembuatannya sedikit lebih murah jika dibandingkan dengan internal turret dan modifikasi yang dilakukan pada kapal hanya sedikit.

#### 2.2.3.2.2 Internal turret

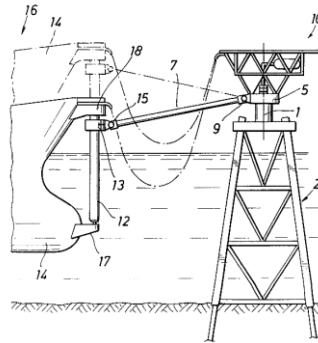
Internal Turret pada system ini mempunyai keunggulan yaitu bisa terpasang secara permanen atau tidak dan dapat diaplikasikan pada lapangan yang mempunyai kondisi lingkungan yang ekstrim dan sesuai untuk deepwater. System Internal turret ini bisa mengakomodasi riser sampai 100 unit dengan kedalaman laut hingga 10,000feet.

### 2.2.3.3 Tower Mooring

Pada system Tower Mooring ini FSO atau FPSO kita hubungkan ke tower dengan permanen wishbone atau permanen hawser (Gambar 2.6). Sistem ini

dihubungkan sesuai untuk laut dangkal ataupun sedang dengan arus yang cukup kuat. Keuntungan dari system ini antara lain :

- dapat akses langsung dari kapal ke tower
- Transfer fluida yang sangat sederhana
- Modifikasi pada kapal tidak banyak



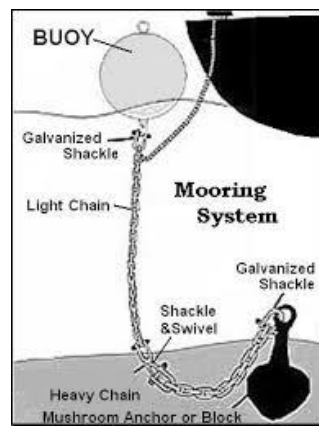
Sumber : <http://www.google.com/patents/US6227135>

**Gambar 2.6** *Tower mooring system*

#### 2.2.3.4 Buoy Mooring

Pada *system Buoy Mooring* ini digunakan untuk mooring point kapal dan *offloading* fluida (Gambar 2.7). Adapun tujuan utama pada system ini untuk transfer fluida dari daratan atau fasilitas offshore ke kapal yang sedang ditambatkan. Berikut ini Komponen-komponennya :

- Buoy Body, berfungsi sebagai penyedia stabilitas dan buoyancy
- Komponen Mooring dan Anchoring, sebagai penghubung buoy dengan seabed
- hawser menghubungkan buoy dengan kapal



Sumber : <http://www.forum.cabledatasheet.com/general-discussion/mooring-systems/>

**Gambar 2.7.** *Buoy mooring system*

### 2.2.4 Tali Tambat antar *Multy Body (Coplign Line)*

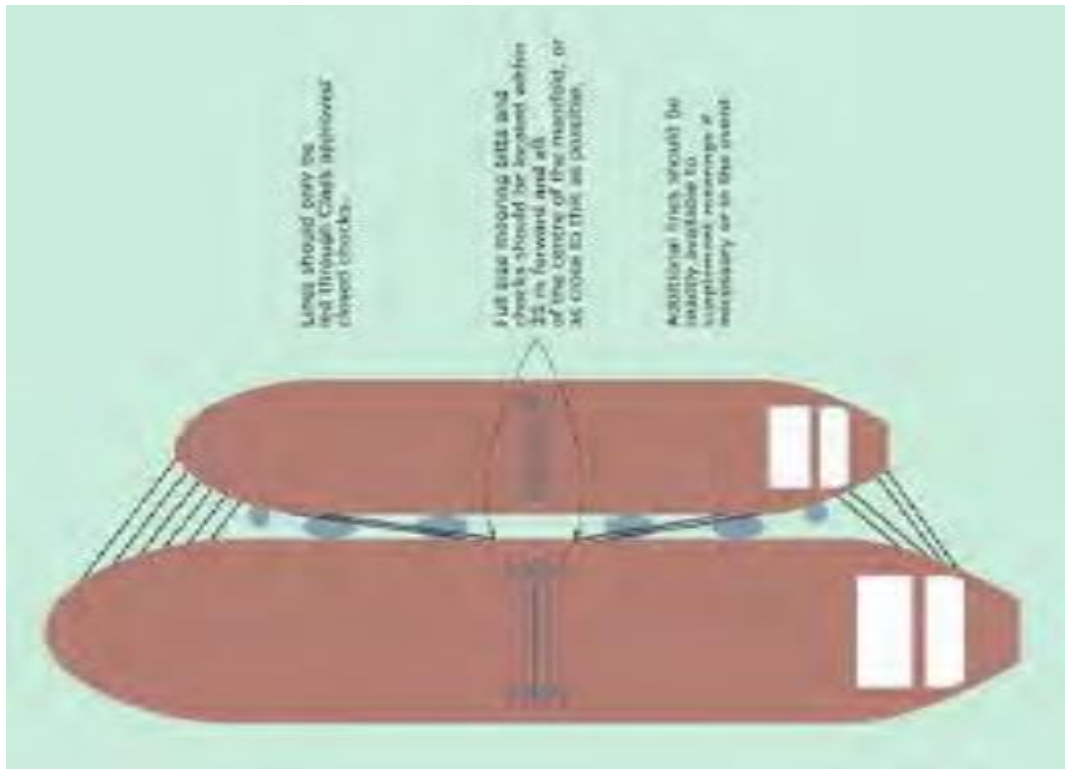
Dalam kondisi *side by side offloading* yang terhubung oleh tali tambat (Gambar 2.8), gerakan masing-masing bangunan apung akan mempengaruhi bangunan apung yang lainnya. Perhitungan tali tambat dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta l = \frac{T}{k} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana diketahui bahwa  $\Delta l$  adalah perpanjangan dari tali tambat, T adalah *tension* atau gaya Tarik dari tali tambat dan k merupakan kekakuan aksial efektif. Kekakuan aksial efektif dapat dihitung berdasarkan persamaan:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{EA} + \frac{1}{k_0} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana kekakuan dari tali tambat berdasarkan dari kekukan elastis (E) dan kekakuan geometri (A). Kekakuan elastis berasal dari material elastis, dan kekakuan geometri berasal dari perubahan bentuk geometri pada tali tambat (Faltinsen, 1990). Sehingga dari penjelasan diatas dapat disimpulkan dalam persamaan 2.1 dan 2.2 bahwa *tension* (T) dapat diperoleh dengan mengalikan kekakuan aksial efektif dengan pertambahan Panjang tali tambat.



**Gambar 2.8** Konfigurasi *coupling line* saat *side by side offloading* (OCIMF, 2008)

### 2.2.5 Beban Lingkungan

Beban lingkungan merupakan suatu kondisi pembebanan dimana beban-beban lingkungan menjadi suatu aspek yang ditinjau dalam pembebanan pada struktur. Beban lingkungan merupakan salah satu kategori jenis pembebanan dari berbagai jenis pembebanan yang terjadi pada suatu struktur, menurut Bai, 2003 dalam buku *Marine Structural Design* menyebutkan struktur laut selama umur operasinya mengalami berbagai macam jenis pembebanan yang diantaranya adalah:

- Beban mati (*Dead loads*)
- Beban hidup (*Live loads*)
- Beban Lingkungan (*Environmental loads*)
  - Beban laut (*Wave and Current Loads*)
  - Beban angin (*Wind loads*)
  - Beban Gempa (*Seismic loads*)
- Beban fungsional (*Functional loads (operation loads)*)
- Beban Kecelakaan (*Accidental loads*)

Semua kategori pembebanan diatas merupakan seluruh beban yang akan bekerja pada bangunan lepas pantai/struktur laut secara bersamaan selama masa operasinya dan tersebar kesegala arah yang akan menghasilkan tegangan yang bervariasi pada struktur, dan hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya kerusakan dan kelelahan pada struktur (Bai,2003). Beban hidup, beban lingkungan dan beban fungsional merupakan aspek yang paling dominan yang menyebabkan suatu permasalahan kelelahan pada struktur laut. Pada kasus pembebanan lingkungan untuk bangunan laut beban gelombang dan beban arus merupakan sumber pembebanan utama penyebab terjadinya kelelahan pada suatu struktur, karena beban gelombang dan arus merupakan suatu pembebanan yang terus menerus terjadi/ beban siklis yang akan dialami oleh struktur laut, dan untuk beban angin merupakan suatu pembebanan lingkungan yang patut dipertimbangkan untuk bangunan laut yang tertambat. Pada penelitiannya Lassen dan Syversten (1996) menjelaskan bahwa melakukan kelelahan pada *mooring line* dapat dilakukan dengan cara mempertimbangkan tiga beban lingkungan yang diantaranya adalah beban angin, arus, dan gelombang. Dan beban fungsionalpu memungkinkan untuk ditinjau dalam analisis kelelahan pada bangunan laut.



### 2.2.5.1 Beban Arus

Selain gelombang, arus laut juga memberikan gaya terhadap struktur bangunan lepas pantai. Arus akibat pasang surut memiliki kecepatan yang semakin berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman sesuai fungsi *non-linier*. Sedangkan arus yang disebabkan oleh angin memiliki karakter yang sama, tetapi dalam fungsi linier. Kecepatan arus tersebut dirumuskan dalam formulasi matematis berikut :

$$U_T = U_{OT}(y/h)^{1/7} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$U_W = U_{OW}(y/h) \dots\dots\dots (2.4)$$

dimana :

$U_T$  : kecepatan arus pasang surut (m/detik)

$U_{OT}$  : kecepatan arus pasang surut di permukaan (m/detik)

$U_W$  : kecepatan arus akibat angin (m/detik)

$U_{OW}$  : kecepatan arus akibat angin di permukaan (m/detik)

$y$  : jarak dari dasar laut (meter)

$h$  : kedalaman laut (meter)

Untuk gaya arus yang bekerja pada struktur menurut (API RP 2P) dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$F_{CX} = C_{CX} S C_c^2 \dots\dots\dots (2.5)$$

$$F_{CY} = C_{CY} S V_c^2 \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

$F_{cx}$  : Gaya arus pada *bow*

$F_{cy}$  : Gaya arus pada *beam*

$C_{cx}$  : Koefisien gaya arus pada *bow* = 0.016 lb/ft<sup>2</sup> (2.89 Nsec<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)

$C_{cy}$  : Koefisien gaya arus pada *bow* = 0.4 lb/ft<sup>2</sup> (72.37 Nsec<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)

$S$  : Luas penampang pada lambung kapal yang terendam (m<sup>2</sup>)

$V_c$  : Kecepatan arus desain (m/sec)

### 2.2.5.2 Beban Angin

Beban angin merupakan beban dinamis, tapi beberapa struktur akan meresponnya pada model statis yang paling mendekati. Dalam perancangan

bangunan lepas pantai pada umumnya perhitungan beban angin disyaratkan untuk didasarkan pada besarnya kecepatan ekstrim dengan periode ulang 50 atau 100 tahun. Semakin lama periode ulang yang digunakan, maka resiko kegagalan semakin besar. Sedangkan formula untuk gaya angin *time series* dapat dibangkitkan dari spektrum gelombang adalah memakai rumus sebagai berikut :

$$F_{WD}(t) = \frac{1}{2} \rho_a C_S A x_a |V_C - \dot{x}| (V_C - \dot{x}) \dots \dots \dots (2.7)$$

dimana:

- $F_w$  = gaya angin (N)
- $C_S$  = koefisien bentuk
- $\rho_a$  = massa jenis udara ( $\text{kg/ m}^3$ )
- $\dot{x}$  = kecepatan dari platform (m/s)
- $x_a$  = aerodinamic amittance
- $A$  = luas area vertikal yang terkena angin ( $\text{m}^2$ )
- $V_C$  = kecepatan partikel air (m/s)

Sedangkan kecepatan angin dirumuskan sebagai berikut :

$$V_W = V_{10} \left( \frac{y}{10} \right)^x \dots \dots \dots (2.8)$$

dimana :

- $V_W$  = kecepatan angin, knots (m/s)
- $V_{10}$  = kecepatan angin pada ketinggian 10 m, knots (m/s)
- $y$  = ketinggian dimana kecepatan angin dihitung, (m)
- $x$  = faktor eksponen

**Catatan:**

Apabila informasi tidak tersedia, maka harga eksponensial x sebesar 1/7 dapat diambil sebagai pendekatan. Harga ini cukup sesuai untuk ketinggian sampai dengan sekitar 200 m. Untuk semua sudut dari pendekatan beban angin pada struktur, gaya pada permukaan datar diasumsikan sebagai gaya normal pada permukaan dan gaya pada tanki silinder vertikal, pipa, dan silinder lain diasumsikan searah dengan arah angin, sedangkan yang tidak vertikal dapat dihitung menggunakan formula yang diambil dari perhitungan arah angin berhubungan dengan gerak objek.

### 2.2.5.3 Beban Gelombang

Dalam perhitungan beban gelombang, gelombang yang digunakan adalah periode ulang gelombang untuk 1, 10, dan 100 tahunan. Periode ulang gelombang dapat dicari dengan analisis gelombang kurun waktu panjang. Analisis kurun waktu panjang adalah analisis yang dilakukan terhadap kumpulan data-data gelombang yang telah diperoleh dalam kurun waktu tahunan (minimal 1 tahun).

Distribusi gelombang dalam kurun waktu panjang dapat didekati dengan distribusi kontinu dari Weibull. Persamaan linier dari fungsi kepadatan peluang diberikan dalam bentuk sebagai berikut

$$\ln \left[ \ln \left\{ \frac{1}{1-P(H)} \right\} \right] = \xi \ln x - \xi \ln \lambda \dots \dots \dots (2.9)$$

Dengan:

$P(H)$  = Peluang terjadinya gelombang

$\xi$  = Parameter bentuk dengan harga umum antara 0,75 s.d. 2,0,  
sedangkan untuk gelombang laut umumnya berkisar 0,9 s.d. 1.1.

$\zeta$  = Parameter skala yang harganya tergantung dari harga ekstrim variabel  $x$

$x$  = Intensitas objek/ parameter yang ditinjau, misalnya tinggi gelombang, sehingga  $x=H$

Tinggi gelombang yang digunakan adalah tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ), jika gelombang yang diketahui adalah tinggi gelombang maksimum ( $H_{max}$ ), maka tinggi gelombang signifikan dapat dicari dengan  $H_s = H_{max} / 1,86$ .

Syarat pemilihan teori untuk perhitungan gaya gelombang didasarkan pada perbandingan antara diameter struktur ( $D$ ) dengan panjang gelombang ( $\lambda$ ) sebagai berikut:

$\frac{D}{\lambda} > 1$  = gelombang mendekati pemantulan murni, pers. morison tidak valid

$\frac{D}{\lambda} > 0.2$  = difraksi gelombang perlu diperhitungkan, pers. morison tidak valid

$\frac{D}{\lambda} < 0.2$  = persamaan morison valid

Berikut adalah teori yang digunakan pada perhitungan gaya gelombang (Indiyono, 2003), yaitu:

a. Teori Morison

Persamaan morison mengasumsikan bahwa gelombang terdiri dari komponen gaya inersia dan *drag force* (hambatan) yang dijumlahkan secara linier.

Persamaan Morison lebih tepat diterapkan pada kasus struktur dimana gaya hambatan merupakan komponen yang dominan. Hal ini biasanya dijumpai pada struktur yang ukurannya ( $D$ ) relatif kecil dibandingkan dengan panjang gelombangnya ( $\lambda$ ).

b. Teori *Froude-Krylov*

*Froude-Krylov* digunakan bilamana gaya hambatan relatif kecil dan gaya inersia dianggap lebih berpengaruh, dimana struktur dianggap kecil. Teori ini mengadopsi metode tekanan gelombang *incident* dan bidang tekanan pada permukaan struktur. Keuntungan dari teori ini adalah untuk struktur yang simetris, perhitungan gaya dapat dilakukan dengan persamaan terangkai (*closed-form*) dan koefisien-koefisien gayanya mudah ditentukan.

c. Teori Difraksi

Bilamana suatu struktur mempunyai ukuran yang relatif besar, yakni memiliki ukuran yang kurang lebih sama dengan panjang gelombang, maka keberadaan struktur ini akan mempengaruhi timbulnya perubahan arah pada medan gelombang disekitarnya. Dalam hal ini difraksi gelombang dari permukaan struktur harus diperhitungkan dalam evaluasi gaya gelombang.

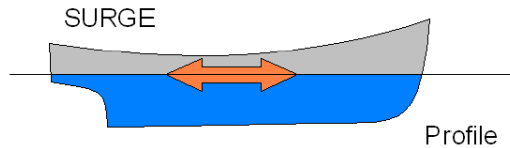
### 2.2.6 Teori Gerak Struktur Terapung Akibat Gaya Gelombang

Ada tiga gerakan utama kapal, yaitu heave, roll, dan pitch. Gerakan itu dipengaruhi gaya pengembali atau momen ketika anjungan terapung dipengaruhi dari posisi setimbangnya. Gerakan yang lain tidak dapat mengembalikan kapal tersebut pada posisi setimbang, selain itu tidak adanya pengaruh dari gaya luar atau momen yang menyebabkan aktifitas gangguan dari arah kebalikannya (Bhattacharya, 1978). Gerakan kapal di laut lepas sangat penting untuk diprediksi. Macam-macam gerakan osilasi pada kapal memiliki enam derajat kebebasan yaitu surge, sway, heave, roll, pitch, dan yaw. Enam derajat kebebasan dapat dibedakan menjadi dua macam mode gerak, yaitu translasional dan rotasional.

o Mode gerak translasional

- *Surge* (gerakan transversal arah sumbu x)

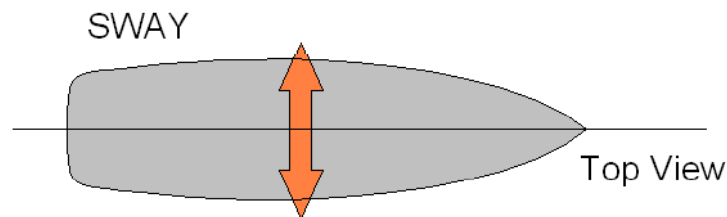
*Surging* adalah gerakan translasi pada arah sumbu x (maju-mundur), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Ilustrasi gerakan *surging* (Djatkiko, 2012)

- *Sway* (gerakan transversal arah sumbu y)

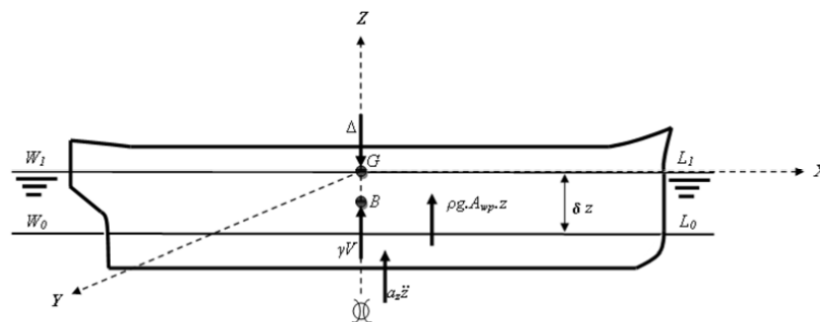
*Swaying* adalah gerakan translasi pada arah sumbu y (melintang), yang ditunjukkan pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.10** Ilustrasi gerakan *swaying* (Djatkiko, 2012)

- *Heave* (gerakan transversal arah sumbu z)

*Heaving* adalah gerakan osilasi translasional suatu struktur terapung pada arah sumbu vertikal (sumbu Z), seperti diilustrasikan pada Gambar 2.11. gerakan tersebut disebabkan oleh adanya gaya luar yang bekerja pada badan struktur terapung, dan gaya luar tersebut tidak lain adalah gaya gelombang



**Gambar 2.11** Ilustrasi gerakan *heaving* (Djatkiko, 2012)

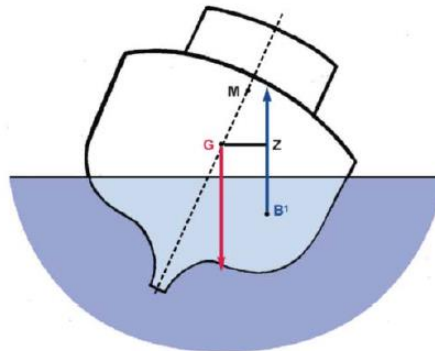
Pada gerakan *heaving*, gaya ke bawah akibat berat struktur tersebut membuat struktur tercelup ke air lebih dalam dan kembali terangkat, dan begitu seterusnya hingga diperoleh kesetimbangan. Ketika gaya angkat (*bouyancy*) lebih besar akibat kapal tercelup, kapal akan bergerak secara vertikal ke atas, dan ketika posisi kapal telah setimbang, gerakan tidak

lantas akan berhenti dan kapal akan tetap naik dikarenakan ada pengaruh momentum.

o Mode gerak rotasional

- *Roll* (gerakan rotasional arah sumbu x)

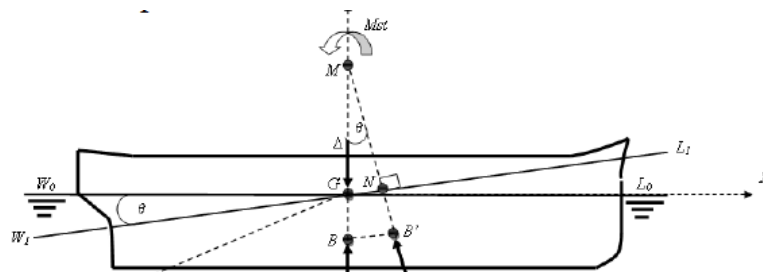
Gerakan *rolling* merupakan salah satu gerakan osilasi rotasional struktur terampung terhadap sumbu x, seperti pada Gambar 2.12.



**Gambar 2.12** Ilustrasi gerakan *rolling* (Djutmiko, 2012)

- *Pitch*, gerakan rotasional arah sumbu y.

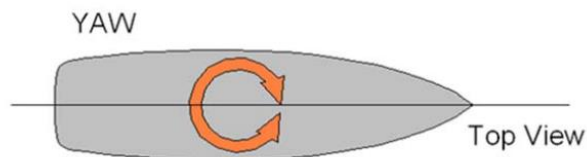
*Pitching* adalah gerakan osilasi rotasional terhadap sumbu transversal (sumbu y), seperti di Gambarkan pada Gambar 2.13.



**Gambar 2.13** Ilustrasi gerakan *pitching* (Djutmiko, 2012)

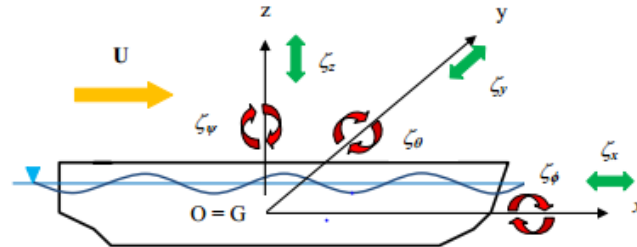
- *Yaw*, gerakan rotasional arah sumbu z

*Yawing*, yang diilustrasikan pada Gambar 2.14, adalah gerakan rotasional terhadap sumbu vertikal (sumbu z).



**Gambar 2.14** Ilustrasi gerakan *Yawing* (Djutmiko, 2012)

Definisi gerakan kapal dalam enam derajat kebebasan dapat dijelaskan dengan Gambar 2.15 dengan memakai konversi sumbu tangan kanan tiga gerakan translasi pada arah sumbu x,y dan z, adalah masing-masing *surge* ( $\zeta_1$ ), *sway* ( $\zeta_2$ ) dan *heave* ( $\zeta_3$ ), sedangkan untuk gerakan rotasi terhadap ketiga sumbu adalah *roll* ( $\zeta_4$ ), *pitch* ( $\zeta_5$ ) dan *yaw* ( $\zeta_6$ ).



**Gambar 2.15** Gerakan kapal dalam enam derajat kebebasan (Djutmiko, 2012)

Keenam gerakan tersebut merupakan osilasi linier dan harmonik yang dapat dinyatakan dalam persamaan diferensial gerakan kopel, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sum_{n=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\zeta}_k + B_{jk}\dot{\zeta}_k + K_{jk}\zeta_k] = F_j e^{i\omega t}; j, k = 1 \dots \dots \dots (2.10)$$

Dengan:

- $M_{jk}$  = matriks massa dan momen inersia massa bangunan laut,
- $A_{jk}$  = matriks koefisien-koefisien massa tambah hidrodinamik,
- $B_{jk}$  = matriks koefisien-koefisien redaman hidrodinamik,
- $K_{jk}$  = matriks koefisien-koefisien kekakuan atau gaya dan momen hidrostatis, 16
- $F_j$  = matriks gaya eksitasi( $F_1, F_2, F_3$ ) dan momen eksitasi( $F_4, F_5, F_6$ ) dalam fungsi kompleks (dinyatakan oleh  $e^{i\omega t}$ ),
- $F_1$  = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan *surge*,
- $F_2$  = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan *sway*,
- $F_3$  = gaya eksitasi yang menyebabkan gerakan *heave*,
- $F_4$  = momen eksitasi yang menyebabkan gerakan *roll*,
- $F_5$  = momen eksitasi yang menyebabkan gerakan *pitch*,
- $F_6$  = momen eksitasi yang menyebabkan gerakan *yaw*,
- $\varepsilon$  = elevasi gerakan pada mode ke  $k$ ,
- $\dot{\varepsilon}$  = elevasi kecepatan gerak pada mode ke  $k$ ,
- $\ddot{\varepsilon}$  = elevasi percepatan gerak pada mode ke  $k$ .

Bila matriks massa, koefisien *added mass*, *damping* dan koefisien pengembali dimasukkan kepersamaan gerak, maka untuk kapal yang simetris dalam arah lateral, enam persamaan gerak *couple* akan dapat dipisahkan menjadi dua bagian, yaitu bagian pertama adalah persamaan *couple* untuk *surge*, *heave* dan *pitch* serta bagian kedua adalah persamaan *couple* untuk *sway*, *roll* dan *yaw*. Jadi untuk kapal dengan bentuk simetris, tidak terjadi *couple* antara *surge*, *heave* dan *pitch* dengan *sway*, *roll* dan *yaw*.

Prosedur komputasi untuk menyelesaikan persamaan gerak kapal, pertama akan dihitung besarnya gaya-gaya eksitasi. Hal ini dapat diturunkan dengan menghitung distribusi tekanan hidrodinamik dengan persamaan *Bernoulli*, yaitu:

$$p = -\rho \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 + gz \right) \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana potensial kecepatan  $\phi$  diformulasikan sebagai berikut :

$$\phi(x, y, z, t) = [-U_x + \phi_s(x, y, x)] + \phi_T(x, y, z)e^{i\omega t} \dots \dots \dots (2.12)$$

Pada persamaan 2.12 , variabel pertama dalam ruas kanan merupakan kontribusi dari potensial kecepatan *steady*,  $\phi_s$  dan kecepatan kapal  $u$ . Sedangkan variabel kedua adalah kontribusi dari potensial kecepatan *unsteady*:

$$\phi_T = \phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^6 h_j \phi_j \dots \dots \dots (2.13)$$

dimana  $\phi_I$ ,  $\phi_D$  dan  $\phi_j$  masing-masing adalah potensial kecepatan dari gelombang insiden, difraksi dan radiasi sebagai akibat mode gerakan ke  $j$ .

Langkah berikutnya dalam menyelesaikan persamaan gerak adalah menentukan harga koefisien *added mass*, *damping* dan hidrostatik. Dari persamaan gerak ini didapatkan hasil berupa karakteristik gerakan kapal. Informasi ini umumnya disajikan dalam bentuk grafik, dimana perbandingan gerakan pada mode tertentu  $\zeta_j$  dengan parameter tinggi atau amplitudo gelombang ( $\zeta_a$ ) yang diberikan sebagai fungsi frekuensi *encounter* ( $\omega_e$ ) dari sumber eksitasi.

### 2.2.7 Spektrum Energi Gelombang

Analisis spektrum gelombang dapat menggunakan beberapa teori spektrum gelombang yang telah ada, antara lain model spektrum JONSWAP, Pierson-Moskowitz, ISSC ataupun ITTC. Pemilihan spektrum gelombang didasarkan pada kondisi real laut yang ditinjau. Bila tidak ada maka dapat digunakan model spektrum yang dikeluarkan oleh berbagai institusi dengan mempertimbangkan kesamaan fisik lingkungan.



Formulasi persamaan umum spektra gelombang pada dasarnya dilakukan dengan menurunkan persamaan spektra rata-rata untuk perairan tertentu melalui manipulasi matematis yang sesuai. Dewasa ini dari berbagai publikasi kita cukup mudah memperoleh bentuk-bentuk persamaan spektra gelombang (Battacharya, 1980; Lyod, 1989). Untuk keperluan perancangan bangunan laut atau analisis operabilitas misalnya, harus dilakukan dengan hati-hati. Perancang harus benar-benar memahami dari mana dan dengan asumsi kondisi perairan yang bagaimana persamaan tersebut diturunkan. Dalam hal spektra atau data gelombang setempat tidak tersedia, dipilih formulasi spektra gelombang yang sesuai menurut berbagai macam aspek (perairan terbuka, perairan tertutup, efek angin, geografis, kedalaman perairan, panjang *fetch*, dan lain-lain). Sehingga kesesuaian dengan analisis yang dilakukan untuk perairan tertentu dapat dicapai. Dari spektrum gelombang dapat diketahui parameter-parameter gelombang. Formulasi spectrum gelombang yang digunakan dalam tesis ini adalah persamaan spektrum Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Persamaan spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari persamaan spektrum Pierson-Morkowitz yang disesuaikan dengan kondisi laut yang ada. Persamaan spektrum JONSWAP dapat ditulis sebagai berikut :

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} EXP \left[ -1,25 \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \gamma^{EXP \left[ \frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2\tau^2 \omega_0^2} \right]} \dots\dots\dots (2.14)$$

Dimana :

$\omega_p$  = frekuensi puncak spektra (*spectral peak frequency*)

$\gamma$  = parameter puncak (*peakedness parameter*)

$\tau$  = parameter bentuk (*shape parameter*)

untuk  $\omega \leq \omega_0 = 0,07$  dan  $\omega \geq \omega_0 = 0,09$

$\alpha = 0,0076 (X_0)^{-0,22}$  , apabila  $X_0$  tidak diketahui maka  $\alpha = 0,0081$

dimana :  $\omega_0 = 2\pi \left( \frac{g}{U_\omega} \right) (X_0)^{-0,33}$  Dan  $X_0 = \frac{gX}{U_\omega}$

Sedangkan, nilai dari parameter puncak ( $\gamma$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan formula sebagai berikut (pada analisis ini digunakan  $\gamma$  sebesar 1.5 untuk Laut daerah Widuri) :

$$\gamma = EXP \left[ 3,4843 \left( 1 - 0,1975 \left( 0,036 - 0,0056 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \right) \frac{T_p^4}{H_s^2} \right) \right] \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana :

$T_p$  = periode puncak spektra

$H_s$  = tinggi gelombang signifikan

Parameter-parameter gelombang didapat dari spektrum gelombang dan menghasilkan hasil yang dirangkum pada Tabel 2.1, yaitu:

**Tabel 2.1** Parameter-parameter gelombang

Profil Gelombang	Amplitudo	Tinggi
Gelombang Rata-Rata	$1,25 (m_0)^{1/2}$	$2,5 (m_0)^{1/2}$
Gelombang signifikan	$2,00 (m_0)^{1/2}$	$4,00 (m_0)^{1/2}$
Rata-rata 1/10 gelombang tertinggi	$2,55 (m_0)^{1/2}$	$5,00 (m_0)^{1/2}$
Rata-rata 1/100 gelombang tertinggi	$3,44 (m_0)^{1/2}$	$6,67 (m_0)^{1/2}$

Dimana :

$m_0$  = Luasan dibawah kurva spektrum (zero moment)

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

### 2.2.8 Resnponse Amplitude Operator (RAO)

*Response Amplitude Operator* (RAO) atau disebut juga dengan *transfer function* merupakan fungsi respon gerakan dinamis struktur yang terjadi akibat gelombang dalam rentang frekuensi tertentu. RAO merupakan alat untuk mentransfer gaya gelombang menjadi respon gerakan dinamis struktur. Menurut Chakrabarti (1987), persamaan RAO dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$RAO(\omega) = \frac{X_P(\omega)}{\eta(\omega)} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

$$X_P(\omega) = \text{Amplitudo struktur}$$

$$\eta(\omega) = \text{Amplitudo gelombang}$$

Sedangkan amplitudo struktur (respon struktur) dapat dirumuskan dengan :

$$X_p = \left( \frac{x_0}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \right) \cos(\omega t - \alpha) \dots\dots\dots(2.17)$$

$$x_0 = \frac{F_0}{k}, r = \frac{\omega}{\omega_n}, \text{ dan } \tan \alpha = \frac{2\zeta r}{1-r^2}$$

### 2.2.9 Respons Spektra

Respon spektra didefinisikan sebagai respon energi densiti pada struktur akibat gelombang, dalam hal ini berupa *energy density spectrum*. Pada sistem linear, *Response spectra* merupakan perkalian antara spektrum gelombang dengan RAO kuadrat. Persamaan dari *response spectra* (Chakrabarty, 1987) adalah sebagai berikut :

$$S_R(\omega) = [RAO(\omega)]^2 S(\omega) \dots\dots\dots(2.18)$$

Dimana:

$S_R$  = *response spectrum*,  $ft^2$ -sec

$S(\omega)$  = spektra gelombang,  $ft^2$ -sec

$RAO$  = *response amplitude operator*

$\omega$  = frekuensi angular, rad/sec

*Response spectra* dapat digunakan untuk mengetahui besar respon maksimum yang mungkin terjadi dalam suatu rentang waktu tertentu. Respon *extreme* maksimum yang terjadi dengan tingkat probabilitas dari suatu kejadian sebesar 62,3% dapat dicari dengan persamaan (Chakrabarty, 1987) sebagai berikut :

$$\zeta_{n\alpha} = \left[ 2 \ln \left\{ \frac{60^2 T}{2\pi} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \right\} \right]^{1/2} \sqrt{m_0} \dots\dots\dots(2.19)$$

Untuk respon *extreme* maksimum yang mungkin terjadi pada saat proses perancangan dapat dicari berdasarkan persamaan diatas dengan mempertimbangkan faktor peluang terlampauinya suatu kejadian  $\alpha$  , dan diformulasikan sebagai berikut :

$$\zeta_{n\alpha} = \left[ 2 \ln \left\{ \frac{60^2 T}{2\pi\alpha} \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \right\} \right]^{1/2} \sqrt{m_0} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana :

$T$  = lama kejadian badai (*storm propagation*) = 3 jam

$\alpha$  = kemungkinan kejadian yang tidak terjadi pada saat perancangan (1 - 5%)

$m_0$  = Luasan dibawah kurva spektrum (zero moment)

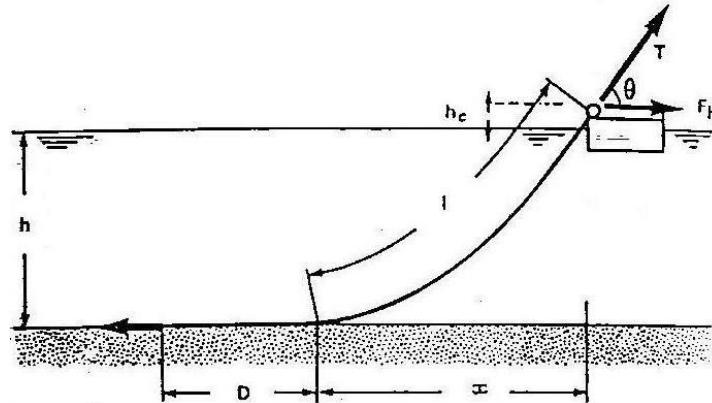
$$m_0 = \int_0^\infty S(\omega) d\omega$$

$m_2$  = Momen Spektra kecepatan

$$m_2 = \int_0^\infty \omega^2 S(\omega) d\omega$$

### 2.2.10 Penentuan Panjang *Mooring Line*

Penentuan panjang *chain line* berfungsi agar CALM pada penambatannya memiliki posisi yang tepat dan *chain line* sendiri memiliki panjang dan *pretension* yang sesuai yang diilustrasikan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Parameter *mooring line* (Faltinsen, 1990)

Panjang minimum *Mooring Line* (*Basic Equation*) :

$$\frac{1}{h} = \sqrt{\frac{2T}{ph} - 1} \dots \dots \dots (2.21)$$

$$\frac{1}{h} = \sqrt{\frac{2F_H}{ph} + 1} \dots \dots \dots (2.22)$$

Dimana:

- $l$  = panjang minimum dari *chain line*
- $h$  =  $h_m + h_c$
- $h_m$  = kedalaman air
- $h_c$  = tinggi *fairlead* diatas permukaan air
- $p$  = berat *chain line* didalam air persatuan panjang
- $F_H$  = gaya horizontal *chain line* pada *fairlead*
- $T$  = *tension* dari *chain line* pada *fairlead*
- $D$  = *length resting on the seabed*

Harga  $D$  dapat diasumsikan berdasarkan tipe dari *mooring line*, yaitu:

1. 200 s/d 300 m (*mooring line* dengan konfigurasi *wire rope anchor lines*).
2. 50 s/d 100 m (*mooring line* yang memiliki konfigurasi *chain anchor lines*).

### 2.2.11 Tension pada *Mooring Line*

Gerakan pada FSO karena pengaruh dari lingkungan menyebabkan adanya tarikan pada *mooring line*. Tarikan pada *mooring line* dapat dibedakan menjadi 2 yaitu, *mean tension* dan *maximum tension*. *Mean tension* adalah *tension* pada *mooring line* yang berkaitan dengan *mean offset* dari *vessel*, dan *maximum tension* adalah *mean tension* yang dipengaruhi oleh kombinasi frekuensi gelombang dan *low-frequency tension*. Untuk *maximum tension* dapat ditentukan dengan formula sebagai berikut :

$$1. T_{lfmax} > T_{wfmax}$$

$$T_{max} = T_{mean} + T_{lfmax} + T_{wfsig} \dots\dots\dots(2.23)$$

$$2. T_{wfmax} > T_{lfmax}$$

$$T_{max} = T_{mean} + T_{wfmax} + T_{lfsig} \dots\dots\dots(2.24)$$

dimana:

- $T_{mean}$  = *mean tension*
- $T_{max}$  = *maximum tension*
- $T_{wfmax}$  = *maximum wave frequency tension*
- $T_{wfsig}$  = *significant wave frequency tension*
- $T_{lfmax}$  = *maximum low-frequency tension*
- $T_{lfsig}$  = *significant low-frequency tension*

Batas dari *tension* dapat diartikan sebagai presentase kekuatan nominal dari komponen *mooring*. Kekuatan nominal dari *wire rope* diformulasikan dengan CBS (*Catalog Break Strength*) dan rantai dengan BTL (*Break Test Load*).

### 2.2.12 Analisis *Fatigue* (Kelelahan)

Bangunan lepas pantai banyak sekali mengalami beban yang sifatnya berulang (*cyclic*) yang menyebabkan berkurangnya kekuatan. Fenomena ini dikenal dengan kelelahan, dan secara esensial ditandai dengan proses keretakan (*crack*) yang diakibatkan oleh lelahnya struktur akibat beban lingkungan dan korosi proses selanjutnya adalah penjararan (*propagation*) dan kerusakan (*failure*). Analisis kelelahan penting dilakukan untuk memprediksi besar relatif dari *fatigue life* pada sambungan yang mengalami stress paling tinggi dan mengakibatkan sambungan tersebut menjadi kritis.

Beberapa metode yang digunakan dalam perhitungan *cycle* pada beban acak, Diantaranya adalah metode *Peak and trough counting*, *range counting* dan *Rainflow counting* dan lain sebagainya. Analisis kelelahan penting dilakukan untuk strategi inspeksi teknis pada *mooring*. Data *Fatigue* biasanya dipresentasikan dalam diagram T-N, dalam literatur lama disebutkan bahwa kurva T-N adalah pengembangan dari kurva Wohler. Kategori *high cycle range* pada *fatigue life* adalah diatas  $10^5$  dan *low cycle range* adalah dibawah  $10^5$ . Fatigue limit bisa digunakan atau ditentukan jika nilai semua beban *cycle* berada dibawah limit dan dengan syarat tanpa korosi. Berikut beberapa metode yang digunakan pada analisis ini.

**2.2.12.1 T-N Curve**

Kurva T-N digunakan untuk menyatakan karakteristik kelelahan pada *mooring line* yang mengalami pembebanan yang berulang atau *continue* pada magnitude konstan (Gambar 2.17). Pada penentuan kurva T-N dipengaruhi oleh parameter kemiringan (*slope*) dan intersepsi. Kedua parameter tersebut mempunyai ketidakpastian. Kombinasi ketidakpastian kedua parameter menjadikan ketidakpastian total dari kurva T-N, berikut formula untuk menggambarkan T-N Curve :

$$K = NR^M \dots\dots\dots(2.25)$$

Atau dalam logaritmic diformulasikan sebagai berikut :

$$\log(K) = \log(N) + M \log(R) \dots\dots\dots(2.26)$$

Dimana :

*N* = Number of cycles

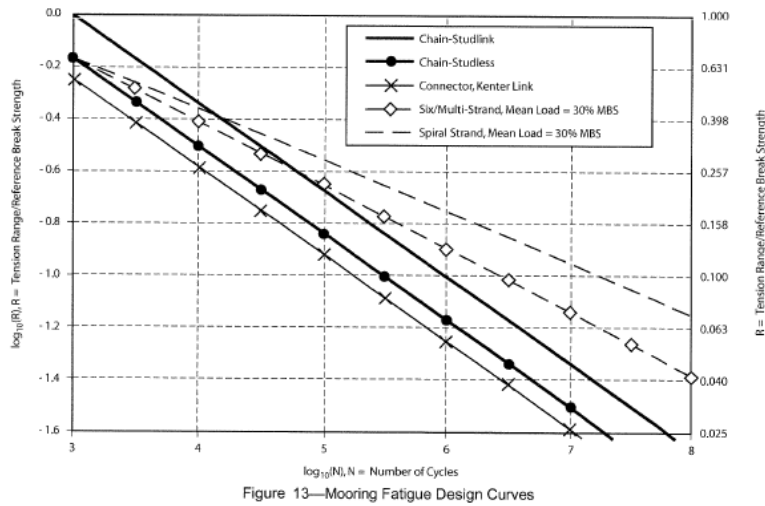
*R* = Ratio of tension range dengan *reference breaking strength*

*L<sub>m</sub>* = Ratio of mean load to *reference breaking strength* untuk *wire rope*.

untuk *wire rope*, nilai *M* dan *K* diGambarkan pada Tabel 2.2, yaitu:

**Tabel 2.2** Nilai *M* dan *K* (API RP 2SK)

Component	<i>M</i>	<i>K</i>
Common studlink	3.0	1,000
Common studless link	3.0	316
Baldr and Kenter connecting link	3.0	178
Six/multi strand rope	4.09	$10^{(3.20 - 2.79L_m)}$
Spiral strand rope	5.05	$10^{(3.25 - 3.43L_m)}$



**Gambar 2.17** Mooring fatigue design curve (T-N Curve)

### 2.2.12.2 Fatigue Damage

Terdapat 4 metodologi yang digunakan dalam perhitungan *cumulative fatigue damage* dengan menggunakan pendekatan S-N Curve (Bai, 2003), yang diantaranya:

- Deterministik.
- *Simplified Fatigue Analysis*.
- *Time Domain Fatigue Analysis*.
- *Spectral Fatigue Analysis*.

Metoda yang umumnya digunakan pada analisis kelelahan *Mooring line* adalah *spectral fatigue analysis* dan *time domain fatigue analysis*. Pada analisis kali ini akan dilakukan dengan metoda spektrum dengan pendekatan *time domain* dikarenakan metoda ini lebih akurat dibandingkan dengan *frequency domain*, dikarenakan *time domain* mampu menggambarkan parameter *non-linear* (sistem masa, beban eksternal, dll) dan menghasilkan respon gerakan yang meliputi pengaruh dari *wave frequency* dan *low frequency motion*.

Untuk akumulasi *fatigue damage* tahunan pada tiap keadaan laut dihitung dengan persamaan sebagai berikut,

$$D_i = \frac{n_i}{K} E[R_i^M] \dots\dots\dots (2.27)$$

Dimana M dan K diketahui dari Tabel 2.2 dan  $n_i$  jumlah siklus (*low* dan *wave frequency*) *tension* pada tiap keadaan laut  $i$  per tahun. Sedangkan  $E[R_i^M]$  adalah nilai yang diharapkan dari normalisasi tegangan (*tension*) R, pangkat M,

di keadaan laut  $i$ . Sedangkan  $n_i$  (jumlah siklus *tension*) dapat ditentukan dengan persamaan sesuai dengan API RP 2SK (2005), sebagai berikut:

$$n_i = v_i \cdot T_i = v_i \cdot P_i \cdot 3.15576 \times 10^7 \dots\dots\dots (2.28)$$

Dimana:

- $v_i$  = *zero up-crossing frequency (hertz) tension* pada kondisi laut  $i$
- $T_i$  = waktu yang dihabiskan pada keadaan laut  $i$
- $P_i$  = probabilitas kejadian pada keadaan laut  $i$

Kelelahan pada *mooring line* dipengaruhi oleh *wave frequency damage* yang ditimbulkan dari gaya *first order* dan *low frequency damage* yang ditimbulkan oleh gaya *second order*. Pada API RP 2SK (2005), terdapat 4 metoda yang digunakan untuk menggabungkan *fatigue damage* akibat *low frequency* dan *wave frequency*, yaitu:

- *Simple Summation*
- *Combined Spectrum*
- *Combined Spectrum with Dual-Narrow-Band*
- *Time Domain Cycle Counting*

Pada tesis ini, metoda yang digunakan untuk perhitungan kelelahan adalah *combined spectrum*. Dimana pada persamaan ini menggunakan persamaan berdasarkan distribusi Reyleigh pada puncak *tension*. Untuk *combined spectrum* memiliki persamaan *fatigue damage* sebagai berikut:

$$D_i = \frac{n_i}{K} (\sqrt{2}R_{\sigma i})^M \cdot \Gamma (1 + \frac{M}{2}) \dots\dots\dots (2.29)$$

Pada persamaan (2.33) di atas, ratio ( $R_{\sigma}$ ) merupakan kombinasi *low* dan *wave frequency* yang dihitung dari akar penjumlahan kuadrat standar deviasi *low* ( $R_{L\sigma i}$ ) dan *wave frequency* ( $R_{W\sigma i}$ ) tegangan, diformulasikan sebagai berikut:

$$R_{\sigma i} = \sqrt{R_{W\sigma i}^2 + R_{L\sigma i}^2} \dots\dots\dots (2.30)$$

Apabila jumlah siklus *tension*,  $n_i$ , dihitung sesuai dengan *combined spectrum* maka (persamaan 2.28) akan memiliki perbedaan pada *zero upcrossing frequency*nya,  $v_{ci}$  maka akan berubah menjadi sebagai berikut:

$$v_{ci} = \sqrt{\lambda_{Li} v_{Li}^2 + \lambda_{Wi} v_{wi}^2} \dots\dots\dots (2.31)$$



Dimana:

$v_{wi}$  = zero upcrossing frequency (hertz) dari spektrum tegangan *wave frequency* pada kondisi lingkungan laut i

$v_{Li}$  = zero upcrossing frequency (hertz) dari spektrum tegangan *low frequency* pada kondisi lingkungan laut i

sumber: API RP 2SK 2005

sesuai dengan teori yang ada bahwa *fatigue damage* ratio akan mengalami kegagalan apabila  $D = 1$ . Tetapi karena banyak angka ketidakpastian maka berbagai klasifikasi menetapkan bahwa nilai  $D \leq 1$  sudah dianggap gagal.

### 2.2.13 Peluang Kegagalan

#### 2.2.13.1 Moda Kegagalan

Penentuan moda kegagalan merupakan unsur penting dalam melakukan analisis keandalan suatu struktur. Pada analisis keandalan pada *mooring line*, moda kegagalan yang akan ditinjau disebabkan karena *total cumulative damage*. Jadi *mooring line* dikatakan gagal apabila *total cumulative damage* yang terjadi pada *chain* melebihi besarnya nilai *damage limit*. Berikut formulasi dari moda kegagalan :

$$MK = K - B \dots\dots\dots(2.32)$$

Dimana :

$K$  = Variabel kekuatan       $B$  = Variabel beban

Dari persamaan umum di atas, disesuaikan dengan permasalahan yang digunakan dalam moda kegagalan berbasis kelelahan pada *mooring chain*.

Persamaan yang digunakan yaitu :

$$g(x) = \Delta - D \dots\dots\dots(2.33)$$

Dimana :

$g(x)$  = Moda Kegagalan       $\Delta$  = *Damage Limit*       $D$  = *fatigue damage*

Perhitungan *Fatigue Damage* menggunakan metode Palmgren-Miner sehingga didapat formula  $D$  sebagai berikut :

$$D = \frac{n_i}{K} (\sqrt{2}R\sigma_i)^M \Gamma(1 + \frac{M}{2})$$

Substitusi persamaan di atas ke persamaan moda kegagalan, sehingga :

$$g(x) = \frac{1}{\frac{n_i}{K} (\sqrt{2}R\sigma_i)^M \Gamma(1 + \frac{M}{2})} - 1_{tahun} < 0 \dots\dots\dots(2.34)$$

### 2.2.13.2 Metode Monte Carlo

Metode simulasi Monte Carlo merupakan salah satu metode untuk analisis keandalan pada bidang rekayasa maupun ekonomi. Metode ini menggunakan permodelan baik secara fisik atau numerik. Permodelan secara fisik dengan membuat *prototipe* dari kenyataan kemudian dilakukan serangkaian percobaan dan asumsi-asumsi untuk mengetahui responnya. Sedangkan permodelan numerik dilakukan dengan bantuan komputer sehingga cara ini menjadi lebih populer karena murah dan efisien bila dibandingkan dengan permodelan fisik.

Unsur pokok yang diperlukan dalam simulasi Monte Carlo adalah *random number generator*. Prinsip dasar metode ini adalah sampling numerik dengan bantuan *random number generator* (RNG), dimana simulasi dilakukan dengan mengambil beberapa *sampel* dari perubah acak berdasarkan distribusi peluang perubah acak tersebut.

Sampel yang diambil tersebut dipakai sebagai *input* dalam persamaan fungsi kinerja  $FK(X)$ , dan harga  $FK(X)$  kemudian dihitung. Jika nilai  $FK(X) < 0$  dan jumlah sampel tersebut adalah  $N$  maka sistem yang ditinjau dianggap gagal sejumlah  $n$  kali. Sehingga peluang kegagalan sistem adalah rasio antara jumlah kejadian gagal dengan jumlah sampel,  $P_g = n/N$ . Nilai pada *random number generator* (RNG) berupa bilangan acak, uniform sedangkan perubah dasar dalam  $FK(X)$  tidak seperti itu, sehingga perlu diubah ke besaran fisis yang sesuai dengan fungsi kerapatan peluang. Transformasi tersebut dapat dilakukan dengan beberapa cara antara lain relasi rekurens, numerik, dan analitik.

### 2.2.14 Analisis Resiko

Resiko yang didefinisikan sebagai fungsi peluang kegagalan (*probability of failure*) dan fungsi konsekuensi (*conquence of failure*) (Rosyid,2007) diformulasikan sebagai berikut :

$$\text{Resiko} = Pof \times Cof \dots\dots\dots(2.35)$$

Dimana :

*Pof* = Probability of failure (didapat dari Monte Carlo)

*Cof* = Consequency of failure

Analisis resiko merupakan sebuah ilmu yang mampu mengevaluasi dan memperoleh suatu kemungkinan dari sebuah efek yang merugikan yang ditimbulkan dari sebuah agen (kimia, fisik, dll), proses industri, teknologi maupun proses yang terjadi secara alami. Lebih jauh, beberapa elemen yang sangat penting yang harus dilakukan dalam analisis resiko, yaitu:

1. Identifikasi bahaya.

*Hazard* atau bahaya adalah suatu keadaan yang bersifat kualitatif yang mempunyai pengaruh terhadap frekuensi kemungkinan terjadinya kerugian ataupun besarnya jumlah dari kerugian yang mungkin terjadi. Langkah awal untuk menganalisis sebuah resiko yang mungkin terjadi pada sebuah sistem yang kita tinjau adalah melakukan identifikasi terhadap bahaya yang ada hubungannya terhadap system tersebut. Tujuan utama dari dilakukannya kegiatan ini adalah untuk mengenali bahaya yang mungkin terjadi dengan tanpa melihat hal yang diterima atau tidak diterima. Selain itu, hal ini juga dilakukan untuk meningkatkan standar keamanan (*safety factor*) dalam suatu kegiatan.

Berdasarkan standard API, terdapat beberapa metode yang digunakan dalam indentifikasi bahaya, yang diantaranya adalah:

- a. *What-if Analysis*.
- b. *Checklist Analysis*.
- c. *Hazard Identification Technique (HAZID-Technique)*.
- d. *Hazard and Operability (HAZOP) Analysis*.
- e. *Failure Modes and Effect Analysis (FMEA)*.
- f. *Contribution of "Human Factor" Issue*.

2. Perkiraan Peluang Kegagalan.

Setelah bahaya pada sistem atau proses dapat diidentifikasi, langkah berikutnya dalam melakukan penilaian resiko adalah dengan menghitung perkiraan kegagalan.

Terdapat beberapa metode yang bisa dilakukan untuk mendapatkan nilai peluang kegagalan. Dalam API RBI terdapat beberapa metode untuk mendapatkan nilai peluang kegagalan pada suatu sistem yang diantaranya adalah:

- A. *Event Tree Analysis.*
- B. *Fault Tree Analysis.*
- C. *Reability Analysis.*
- D. *Common Cause Failure Analysis.*
- E. *Analysis of Historical Data.*

Perhitungan peluang kegagalan yang dilakukan untuk menyelesaikan tesis ini adalah menggunakan metode simulasi Monte Carlo, maka persamaan untuk mengestimasi frekuensi kejadiannya menjadi (Rosyid, 2007):

$$Pg = n/Nk \dots\dots\dots(2.36)$$

Dimana :

Pg = peluang gagal dari seluruh kejadian

Nk = jumlah seluruh kejadian

n = jumlah kejadian gagal

### 3. Perkiraan Konsekuensi.

Konsekuensi merupakan bagian yang terpenting dari proses analisis resiko disamping frekuensi. Dalam melakukan penilaian atau perkiraan konsekuensi bias dengan cara melakukan perhitungan analitis (matematis). Sebelum melakukan perhitungan perkiraan konsekuensi, harus tersedia terlebih dahulu data-data mengenai objek yang akan dihitung konsekuensinya serta data-data dari objek penyebab resikonya. Hal lain yang harus diperhatikan dalam menghitung konsekuensi adalah harus memiliki rujukan atau acuan standard yang resmi dan diakui oleh dunia internasional agar hasil analisis menjadi lebih akurat dan dapat menghindari adanya perbedaan pendapat, misalnya DNV, API, ASME, dan lain sebagainya.

### 4. Evaluasi Resiko.

Matriks resiko dapat digunakan sebagai sebuah mekanisme untuk menetapkan atau menentukan resiko dan membuat ketetapan penerimaan resiko (*risk acceptance decisions*) yang diilustrasikan pada Gambar 2.18. Setiap kotak dari pada matriks menggambarkan sebuah kombinasi tertentu dari peluang (*likelihood*) dan konsekuensi serta dapat ditentukan nilai prioritasnya seperti terlihat pada Gambar matriks resiko.

PoF Ranking	PoF Description	A	B	C	D	E
5	(1) In a small population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in the location.	YELLOW	RED	RED	RED	RED
4	(1) In a large population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in operating company.	YELLOW	YELLOW	RED	RED	RED
3	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a small number of components. (2) Failure has occurred in the operating company.	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED	RED
2	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED
1	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW
CoF Types	Safety	No Injury	Minor Injury Absence < 2 days	Major Injury Absence > 2 days	Single Fatality	Multiple Fatalities
	Environment	No pollution	Minor local effect. Can be cleaned up easily.	Significant local effect. Will take more than 1 man week to remove.	Pollution has significant effect upon the surrounding ecosystem (e.g. population of birds or fish).	Pollution that can cause massive and irreparable damage to ecosystem.
	Business	No downtime or asset damage	< € 10,000 damage or downtime < one shift	< € 100,000 damage or downtime < 4 shifts	< € 1,000,000 damage or downtime < one month	< € 10,000,000 damage or downtime one year
CoF Ranking		A	B	C	D	E

**Gambar 2. 18** Matriks resiko (DNV RP G101,2010)

Untuk daerah *ALARP (As Low As Reasonably Practicable)* merupakan perbatasan antara resiko itu dapat diterima atau tidak, akan tetapi masih dapat diterima dan merupakan batas minimal suatu resiko untuk dapat diterima. Upaya pengurangan dari resiko harus diimbangi dengan analisis biayanya. Apabila perkiraan resiko masih tidak dapat diterima, maka usaha untuk mengurangi resiko dapat dilakukan dengan 3 cara diantaranya:

1. Mengurangi peluang kegagalan.
2. Mengurangi konsekuensi.
3. Sebuah kombinasi dari keduanya.

Resiko harus diusahakan agar sekecil mungkin (berada pada zona hijau), artinya setelah pengurangan resiko dilakukan, perlu juga dipertimbangkan dari segi biayanya. Diusahakan resiko tetap dapat diterima lalu diikuti dengan biaya yang serendah-rendahnya. Perhitungan pengurangan kegagalan harus diprioritaskan sebelum perhitungan pengurangan konsekuensi.

## 2.2.15 Assessment Criteria

### 2.2.15.1 Mooring Line Tension

Prilaku atau gerakan pada kapal dan faktor lingkungan merupakan aspek utama yang mempengaruhi terjadinya tarikan pada *mooring line*, dimana hal tersebut sangatlah mempengaruhi cepat lambatnya kelelahan (*fatigue*) pada *mooring line*. Tarikan yang terjadi pada *mooring line* dibagi menjadi 2 yang diantaranya adalah:

a) *Mean Tension*

Dimana tarikan/*tension* pada *mooring line* yang berkaitan dengan *mean offset* pada kapal akibat beban rata-rata yang terjadi pada vessel.

b) *Maximum Tension*

Merupakan tarikan pada *mooring line* yang diakibatkan oleh respon maksimum kapal (*maximum offset vessel*) dan pengaruh beban kombinasi frekuensi gelombang maximum.

Setelah mengetahui faktor-faktor pengaruh tegangan, harus ditentukan batasan untuk tegangan dari material *mooring line* (*chain/wire*) yang tidak boleh dilampaui. Batasan dalam tegangan maksimum *mooring line* dalam kasus *engineering* disebut *breaking strength*, dimana batasan aman yang ditentukan oleh API RP 2SK untuk maksimum *breaking strength* adalah 1.67 dan formula untuk menentukan *breaking strength* dan angka aman adalah:

$$BS = \frac{CBS(D-2\Delta t T)}{D} \dots\dots\dots(2.37)$$

$$SF = \frac{BS}{T_{sig}} \dots\dots\dots(2.37)$$

Dimana:

- BS* : *Breaking Strength*
- CBS* : *Catalogue Breaking Strength*
- D* : *Diameter Material*
- $\Delta t$  : *Corrosion Allowance*
- T* : *Service Life*
- $T_{sig}$  : *Tension Significant*

### 2.2.15.2 Jenis-Jenis Material dan Tipe *Mooring Line*

Pada umumnya *mooring line* terbuat dari fiber, *wire rope*, dan *chain*. Pada umumnya tipe *mooring line* dalam API RP 2 SK Tahun 2005 terbagi menjadi 3 yang diantaranya adalah:

#### A. Semua *Mooring Line* Terbuat dari *Wire Rope*

*Wire rope* biasa digunakan dalam *mooring line system* karena material tersebut lebih ringan daripada *chain*, memiliki *restoring force* yang lebih diperairan laut dalam dan hanya memerlukan tegangan awal yang lebih rendah disbanding *chain*. Kekurangan dari material ini adalah harus memerlukan *wire rope* yang sangat Panjang untuk menghindari terangkatnya jangkar dari dasar laut/*seabed* dan rentannya *wire rope* terhadap kondisi abrasi.

#### B. Semua *Mooring Line* Terbuat dari *Chain*

Rantai (*chain*) merupakan material yang paling sering digunakan dalam *offshore operation* karena memiliki keunggulan mampu menahan abrasi dasar lautan dan memiliki kemampuan untuk menambah kekuatan/daya cengkram pada jangkar yang sangat signifikan. Kekurangan dari material rantai ini adalah memiliki berat yang sangat besar maka dibutuhkan *pretension* yang besar dan tidak terlalu digunakan dalam perairan laut dalam karena berat rantai yang sangat berat.

#### C. Kombinasi *Mooring Line* Terbuat dari *Chain* dan *Wire Rope*

Kombinasi antara rantai dan tali kabel (*wire rope*) yang tepat maka akan diperoleh suatu kondisi yang ideal dan menguntungkan dalam sebuah operasi yang mengandalkan *mooring line*. Dengan kombinasi yang tepat maka akan diperoleh keuntungan diantaranya *pretension* yang rendah, *restoring force* yang tinggi, daya cengkram jangkar semakin kuat akibat dukungan *mooring line system*, dan daya tahan terhadap abrasi yang ideal yang menyebabkan *mooring line system* tersebut cocok untuk operasi di laut dalam.

Berdasarkan spesifikasinya terhadap kekuatan material, rantai dikelompokkan dalam beberapa tingkat. Dalam IACS (*International Association of Classification Society*) *chain grade* dikategorikan sebagai berikut:

- a. Oil Rig Quality (ORQ) dengan 690 MPA
- b. R3 dengan 690 MPA
- c. R3S dengan 770 MPA
- d. R4 dengan 860 MPA
- e. R4S dengan 950 MPA
- f. R5 dengan > 1000 MPA

Untuk membedakan antara standar tingkat rantai kapal atau *marine* dengan tingkatan rantai *offshore*, maka dibuat ringkasan karakteristik mutu kelas rantai laut:

**Tabel 2.3.** Ringkuman mutu kelas *marine chain*

Marine Grade Chain	Description	Ultimate Tensile Strength (Mpa or N/mm <sup>2</sup> )
Marine Grade U1	Wrought iron or mild steel	310
Marine Grade U2	Special Quality Steel	490
Marine Grade U3	Extra Special Quality Steel	690

(Sumber: Research Report of JIP mooring integrity, Nobel Denton 2006)

### 2.2.15.3 Faktor Keamanan *Mooring Line* untuk Analisis Kelelahan

Pada tesis ini, *assessment* untuk menghitung/memprediksi sisa umur dari *mooring line* mengacu pada standard dan atiran dari API, dimana pada API RP 2 SK menjelaskan tentang *safety factor* yang harus dipertimbangkan untuk analisis kelelahan *mooring line*. *Safety factor* yang dipertimbangkan sebagai berikut:

**Tabel 2.4.** *Safety factor of fatigue mooring line*

Mooring Component Fatigue Life Design Service Life	Safety Factor
Inspectable areas	3
Non Inspectable and Critical Area	10

### 2.2.15.4 Korosi dan *Marine Growth*

Korosi dan *marine growth* merupakan aspek yang tidak diinginkan karena akan berdampak sangat buruk pada struktur dalam jangka Panjang, oleh sebab itu kedua parameter tersebut patut dipertimbangkan dalam *assessment*. Korosi dan *marine growth* pada struktur yang telah lama beroperasi akan memberikan efek penurunan kekuatan pada struktur seperti degradasi diameter *mooring line*, menambah berat struktur, dan memperbesar area drag karena adanya substansi



hidup pada struktur/*marine growth*. Bersarkan API RP 2SK diameter chain menyusut 0.2 mm-0.4 mm/year pada daerah *splash zone* dan *trash zone* (didasar yang keras).

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

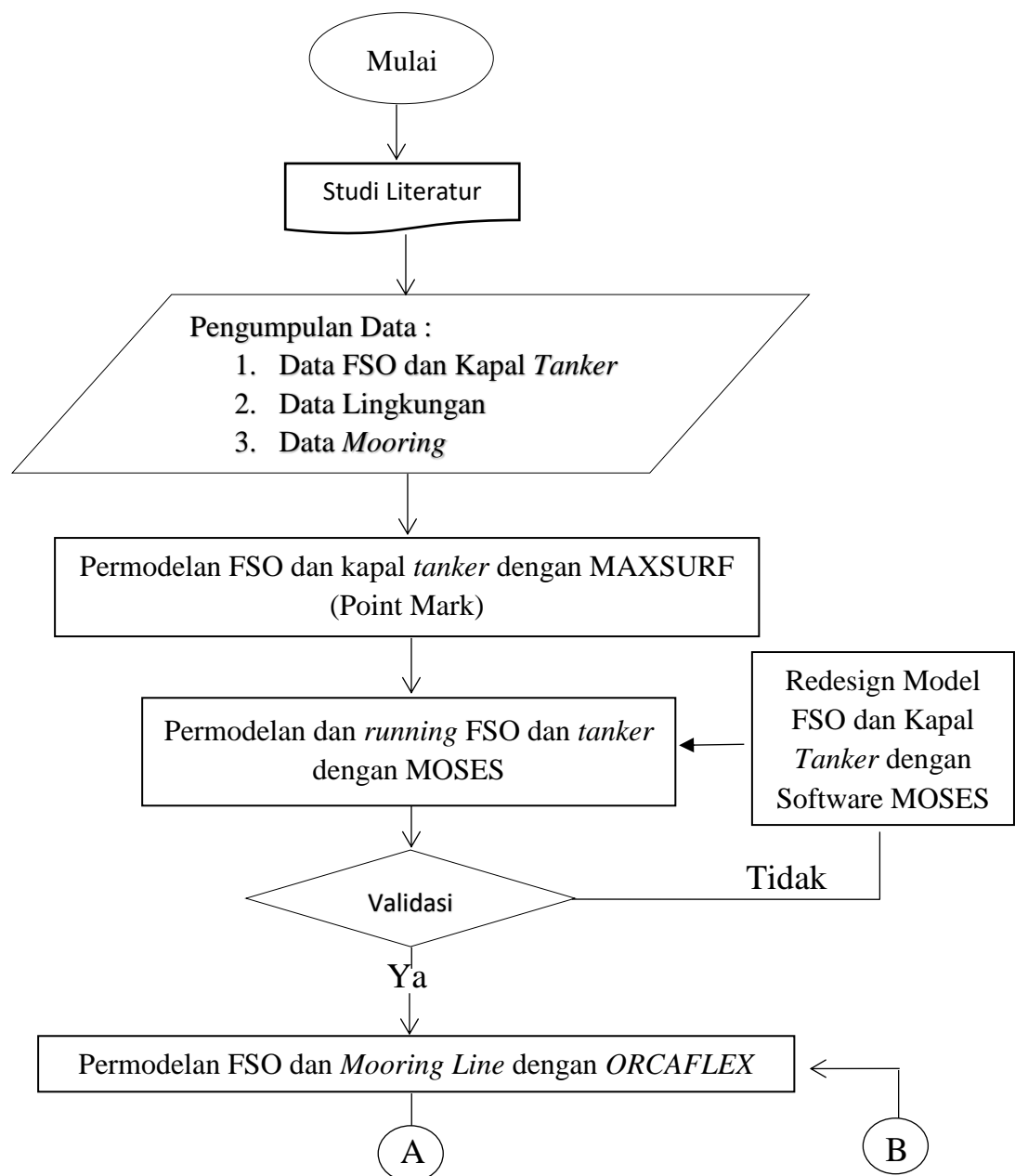
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini akan dijelaskan tahap-tahap yang dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan dalam tesis ini. Metode-metode penyelesaian dengan mengacu pada Bab 2. Isi dari bab ini meliputi diagram alir pelaksanaan, penjelasan dari tiap-tiap tahap dan data-data yang dibutuhkan dan disajikan pada Sub-Bab 3.1-3.3.

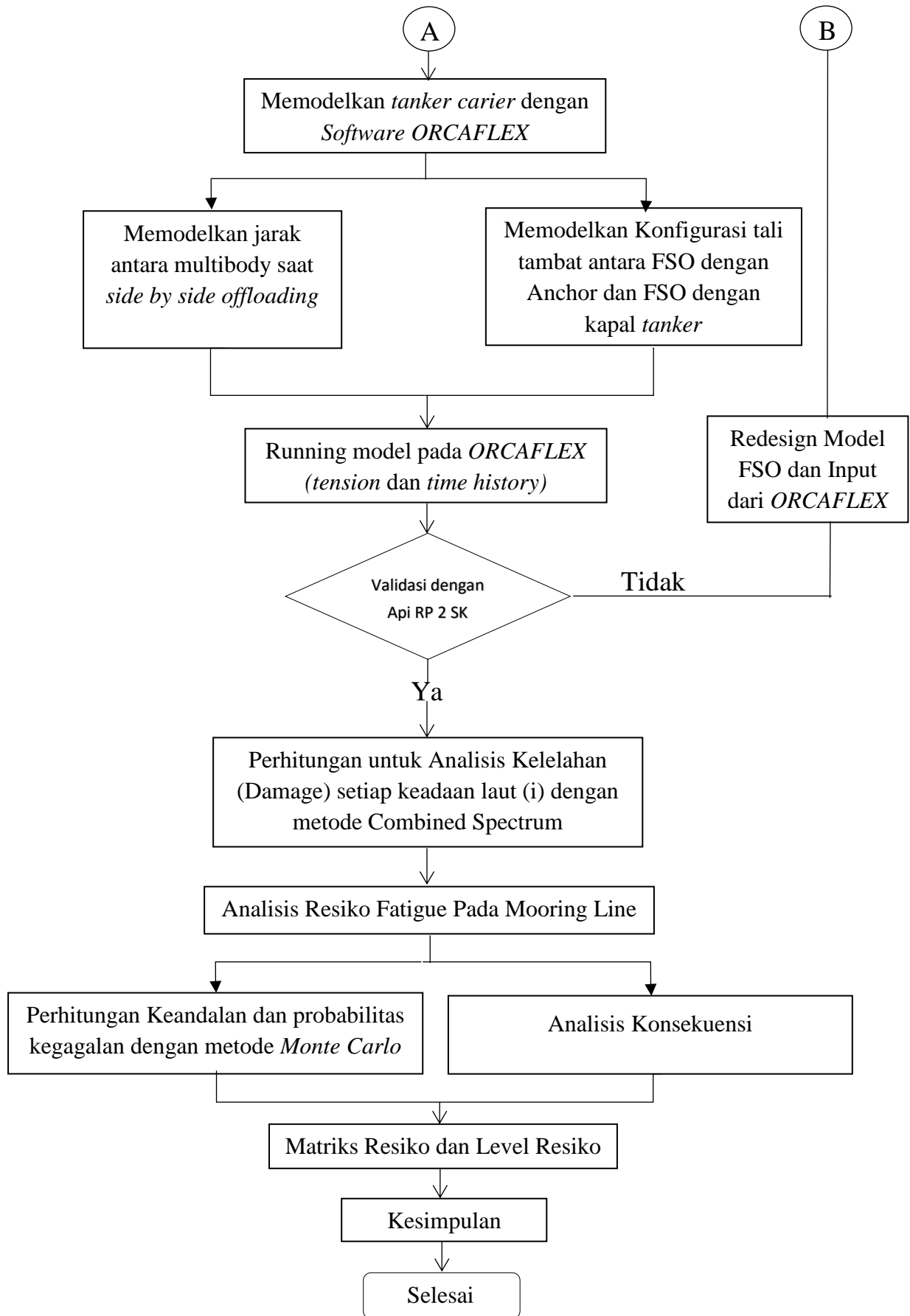
### 3.1 Diagram Alir

#### 3.1.1 Diagram Alir Pengerjaan

Alur pengerjaan dalam tesis ini dipaparkan dalam diagram alir pada Gambar 3.1



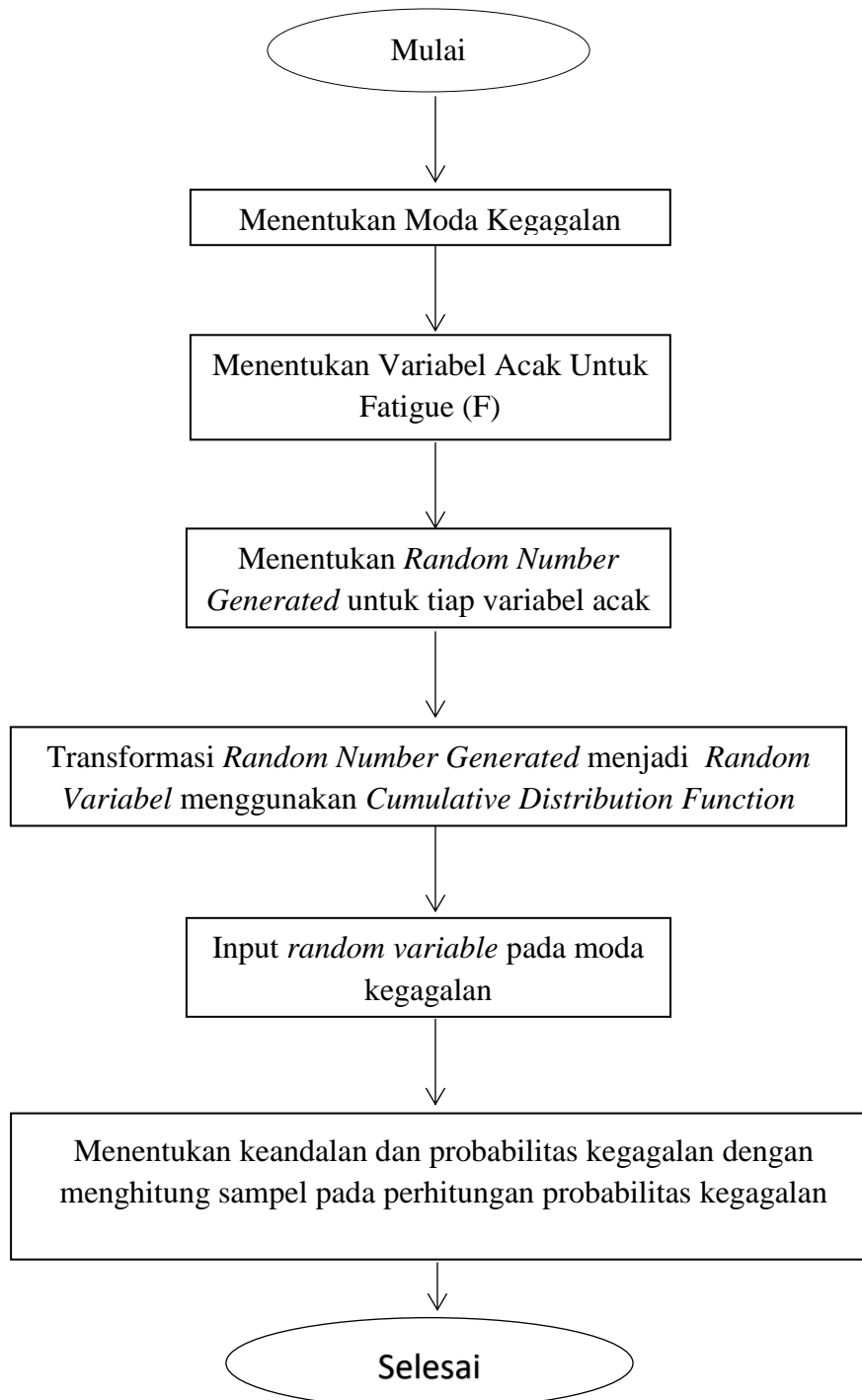
**Gambar 3.1** Diagram alir pengerjaan



**Gambar 3.1** Diagram alir pengerjaan (lanjutan)

### 3.1.2 Diagram Alir Simulasi Monte Carlo

Probabilitas kegagalan pada tesis ini bersifat kuantitatif dimana dalam analisis pof diperlukan formulasi dan simulasi secara statistic dan matematis dalam pengoahannya. Pada analisis probabilitas kegagalan dilakukan pada thesis ini adalah dengan menggunakan simulasi Montecarlo dan akan disajikan dalam tahap-tahap yang terdapat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Diagram alir analisis *likelihoods* dengan simulasi Monte Carlo

### 3.2 Penjelasan Diagram Alir

#### 1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mencari dasar teori, studi pustaka dari penelitian terbaru, peraturan/regulasi yang relevan dan dibutuhkan selama pengerjaan tesis ini. Studi literature dapat diperoleh dari buku, tesis, jurnal, Code/Standard, peraturan/regulasi baik nasional maupun internasional serta mempelajari *software-software* yang akan digunakan yaitu MAXSURF, MOSES dan ORCAFLEX.

#### 2. Pengumpulan Data

Dilakukanmya studi di lapangan dengan tujuan untuk mencari data-data yang diperlukan pada pembahasan masalah yang akan dianalisis dalam tesis ini. Studi lapangan dapat dilakukan dengan melakukan pengamatan langsung terhadap objek yang akan dikaji atau hanya dengan melihat beberapa data yang terkait atau sesuai dengan masalah yang akan dikaji ataupun mencari beberapa data-data sebagai kegiatan persiapan untuk pelaksanaan studi ini. Data-data yang dibutuhkan antara lain sebagai berikut :

- Data ukuran utama FSO dan *Tanker*
- Data Lingkungan
- Data *Mooring*

#### 3. Permodelan FSO dan *Tanker* dengan MAXSURF

Pemodelan struktur FSO dan *tanker* ini dengan bantuan aplikasi MAXSURF yang mengacu pada data utama FSO dan *tanker*. Dari hasil permodelan didapat titik-titik koordinat kapal sebagai data yang akan diinput kedalam MOSES.

#### 4. Permodelan FSO dan *Tanker* dengan MOSES

Permodelan dan running FSO dan kapal *tanker* dengan menggunakan MOSES. Permodelan FPSO dan kapal *tanker* dengan menggunakan bantuan *software* MOSES dengan berbagai arah heading beban lingkungan ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  dan  $180^\circ$ ) untuk mendapatkan RAO, *wave drift*, *added mass* dan *damping force* yang akan digunakan sebagai input untuk permodelan selanjutnya dengan ORCAFLEX.

5. Pemodelan *Structure Integrity* dan *Mooring line System* dengan *ORCAFLEX*  
Permodelan FSO, kapal *tanker* dan *mooring line* dengan *ORCAFLEX* dilakukan untuk mendapatkan tegangan pada struktur dan pada *mooring line* yang digunakan untuk menghitung kelelahan struktur.
6. Analisis Tegangan Tali Tambat dengan *ORCAFLEX*  
Setelah komputasi permodelan FSO, kapal *tanker* dan *mooring line* dengan *ORCAFLEX* kita menganalisis tegangan pada tali tambat hingga tali tambat mengalami kelelahan akibat beban gelombang dengan menggunakan data *RAO* dari output *MOSES* yang kita running pada *ORCAFLEX*.
7. Analisis Fatigue Pada Mooring Line  
Menggunakan perhitungan *cycle* dengan metode *Palmgren-Miner* yang diaplikasikan pada analisis *fatigue* yang sesuai dengan API RP 2 SK. Dalam tahapan ini digunakan persamaan pada analisis *fatigue* dengan menggunakan metoda *Combined Spectrum* dimana data *wave scatter* yang merupakan tinggi gelombang, periode, peluang kejadian gelombang selama satu tahun digunakan untuk menentukan jumlah siklus *low* dan *wave frequency tension* pada tiap kedalaman laut *i* tiap tahunnya ( $n_i$ ). Pada API RP 2 SK terdapat kurva T-N yang digunakan untuk menentukan nilai variable K dan M yang akan digunakan pada parameter *combined spectrum*, dimana variable M dan K merupakan variable yang menggambarkan karakteristik dari suatu material yang digunakan.
8. Menghitung *Fatigue Life*  
Setelah dilakukan perhitungan dengan menggunakan metode *combined spectrum* maka didapatkan besar *damage* yang diterima oleh objek yang ditinjau yang digunakan untuk mendapatkan umur kelelahan pada *mooring line* tiap *segment* yang kemudian dikonversi menjadi umur kelelahan *mooring line* struktur SPM. Setelah didapatkan sisa umur yang didapatkan lalu dibagi dengan faktor keamanan untuk analisis kelelahan berdasarkan standar API RP 2 SK untuk mendapatkan sisa target umur kelelahan yang diizinkan.
9. Prosedur Menghitung Keandalan dan Probabilitas Kegagalan  
Setelah didapat *damage* pada struktur maupun *mooring line* kita dapat menentukan resiko metode *Monte Carlo* dengan prosedur sebagai berikut :

- a. Menentukan moda kegagalan dari umur kelelahan struktur dengan perhitungan damage menggunakan metode *combined spectrum* dan umur struktur ( $T=1/D$ ), sehingga didapat moda kegagalan sebagai berikut :

$$g(x) = \frac{1}{\frac{n_i}{K} (\sqrt{2}R\sigma_i)^M \Gamma(1 + \frac{M}{2})} - 1_{tahun} < 0$$

- b. Menentukan variabel acak dari *parameter fatigue* pada *mooring line*.
- c. Menentukan jenis distribusi data untuk variabel acak.
- d. Menentukan *Random Number Generated* untuk tiap-tiap variabel acak.
- e. Melakukan transformasi *Random Number Generated* menjadi *random variable* menggunakan *Cumulative Distribution Function*.
- f. *Input* nilai *random variable* pada mode kegagalan yang ditentukan.
- g. Menentukan indeks keandalan dengan menghitung jumlah sampel yang berhasil pada perhitungan keandalan.

#### 10. Analisis Resiko dari *Fatigue Mooring Line*

Pada tahap ini setelah didapatkan nilai keandalan dilakukan beberapa identifikasi terhadap resiko dengan cara sebagai berikut:

- a. Menentukan peluang terjadinya kegagalan dengan menggunakan simulasi Monte Carlo dimana ( $Pof = 1 - \%Keandalan$ )
- b. Dilakukan identifikasi terhadap bahaya akibat gagal atau putusnya *mooring line* pada FSO Federal II yang sedang beroperasi yang diakibatkan oleh fenomena kelelahan pada *mooring line*.
- c. Menentukan kriteria atau kategori konsekuensi kegagalan dengan mengacu pada standar maupun jurnal-jurnal yang berkaitan dengan analisis resiko khususnya pada kasus *mooring line*.
- d. Mengidentifikasi resiko dengan menggunakan metode semi-kualitatif pada matriks resiko, dimana nilai Pof didapatkan dari simulasi Monte Carlo (Kualitatif), dan nilai Cof didapatkan dari identifikasi dari report-report yang berkaitan dengan *mooring line* dan diskusi dengan seseorang yang ahli dalam bidang *mooring line system* dan *risk analysis*.
- e. Didapatkan klasifikasi terhadap nilai resiko yang telah dianalisis dengan mengiputkan nilai peluang terjadinya kegagalan (Pof)/*likelihoods* dan nilai konsekuensi terjadinya kegagalan.

#### 11. Ditentukan kesimpulan dan saran.



### 3.3 Pengumpulan Data

Data-data yang diperlukan dalam tesis ini disajikan dalam sub bab ini terdiri dari data umum struktur FSO yang terletak pada Tabel 3.1 dan data umum kapal *tanker* pada Tabel 3.2. Untuk simulasi pada tesis ini dilakukan sesuai dengan skenario yang terletak pada Tabel 3.3. Dalam tesis ini kondisi pembebanan pada FSO disajikan pada Tabel 3.4 dan untuk kapal *tanker* disajikan pada Tabel 3.5. Analisis pada tesis ini dilakukan pada objek FSO Federal II yang terletak di ladang minyak Widuri, sehingga data lingkungan dibutuhkan pada tesis ini dan akan disajikan pada Tabel 3.6. Berikut penjabaran terhadap aspek pengumpulan data.

#### 3.3.1 Data Struktur

Data utama yang akan digunakan pada analisis ini adalah FSO Federal II yang disajikan pada Tabel 3.1 dan kapal *tanker* yang akan disajikan pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.1** Data FSO Federal II

Item	FSO Draft Condition	
	Full Loaded Draft	Ballasted Draft
Length Over All (LOA)	232.04 (m)	232.04 (m)
Length Between Perpendiculars (LPP)	222.064 (m)	222.064 (m)
Breadth Moulded (B)	42 (m)	43 (m)
Depth Moulded (H)	20.3(m)	20.3(m)
Draft mean	14.01 (m)	5.36 (m)
Draft Fwd	14.01 (m)	5.36 (m)
Draft Aft	14.01 (m)	5.36 (m)
Displacement	110.031,2 (tonnes)	38,588.5 (tonnes)
KG (from Keel)	10.65 (m)	9.82 (m)

**Tabel 3.2** Data kapal *tanker*

Item	Tanker Carrier Draft Condition	
	Full Loaded Draft	Ballasted Draft
Length Over All (LOA)	225.81 (m)	225.81 (m)
Length Between Perpendiculars (LPP)	215.00 (m)	215.00 (m)
Breadth Moulded (B)	36.60 (m)	36.60 (m)
Depth Moulded (H)	22.30 (m)	22.30 (m)
Draft mean	11.57 (m)	7.32 (m)
Draft Fwd	11.57 (m)	7.03 (m)
Draft Aft	11.57 (m)	7.60 (m)
Displacement	73,633 (tonnes)	42260 (tonnes)
KG (from Keel)	11.93 (m)	11.08 (m)

### 3.3.2 Skenario dan Kondisi Pembebanan

Skenario pada analisis pada tesis ini dibuat untuk mempermudah dalam analisis kondisi yang akan digunakan dalam analisis fatigue. Skenario pembebanan disajikan dalam Tabel 3.3 dan untuk kondisi pembebanan pada FSO terdapat pada Tabel 3.4 dan untuk kapal *tanker* disajikan pada Tabel 3.5.

**Tabel 3.3** Skenario kondisi operasi ketika *offloading/unloading*

Skenario Pembebanan Ketika <i>Offloading</i>		
Load Condition	FPSO	<i>Tanker</i>
1	Full Load	Ballast Cond
2	Operation Load 70%	Operation Load 50%
3	Operation Load 40%	Full Load

**Tabel 3.4** Data pembebanan FSO Federal II

Kondisi Pembebanan FSO				
Load Condition	Cargo Load (t)	DWT (t)	LWT (t)	Disp. (t)
Lighthship	0	0	15613.3	15613.3
Full Load	89989.8	94660	15613.3	110273.3
Ballast	2676.8	36180.7	15613.3	51794
Operation Load 70%	61138.3	58320.7	15613.3	73934
Operation Load 50% Ballast	0	0	15613.3	15613.3
Operation 40 %	47610	52280.5	15613.3	67893.8
Operation 10 %	21610	58320.7	15613.3	73934

**Tabel 3.5** Data pembebanan kapal *tanker*

Kondisi Pembebanan <i>Tanker</i>				
Load Condition	Cargo Load (t)	DWT (t)	LWT (t)	Disp. (t)
Lightship	0	0	18950	18950
Full Load	50308.3	54683	18950	73633
Ballast Condition	22683 (Water Ballast)	23310	18950	42260
50% Operation Load	33454	36785	18950	55735
100% Operation Load	50308.3	54683	18950	73633

### 3.3.3 Data Lingkungan

FSO Federal II dioperasikan diladang minyak Widuri yang pada saat kondisi operasi ditambah dengan kapal *tanker* untuk proses distribusi. Data lingkungan berupa angin gelombang dan arus yang disajikan pada Tabel 3.6 sedangkan data *wave occurrence scatter diagram* disajikan pada Tabel 3.7 dan data lingkungan olahan dari kombinasi wave scatter diagram untuk daerah Widuri disajikan pada Tabel 3.8. Untuk kondisi Laut Widuri memiliki parameter gamma ( $\gamma$ ) sebesar 1.5.

**Tabel 3.6** Data lingkungan ladang minyak Widuri (CNOOC, 2014)

**Widuri-P**

Metocean Parameter			Return Period (years)					
Item	Notation	Unit	1	5	10	25	50	100
<b>Wind Speed</b>								
1-hour mean	$U_{50}$	m/s	16.60	26.34	29.14	32.68	35.30	37.90
30-minute mean	$U_{30}$	m/s	16.93	26.87	29.72	33.33	36.01	38.66
10-minute mean	$U_{10}$	m/s	17.60	27.92	30.89	34.64	37.42	40.17
1-minute mean	$U_1$	m/s	19.59	31.08	34.39	38.56	41.65	44.72
3-second gust	$U_{gust}$	m/s	22.08	35.03	38.76	43.46	46.95	50.41
<b>Maximum Individual Wave</b>								
Height	$H_{max}$	m	3.29	5.45	6.09	6.89	7.48	8.05
Period	$T_{max}$	s	7.37	8.63	8.93	9.28	9.53	9.75
Length	$L_{max}$	m	84.81	116.28	124.51	134.46	141.80	148.42
Steepness	$(H/L)_{max}$		0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
<b>Significant Wave</b>								
Height	$H_s$	m	1.85	3.06	3.42	3.87	4.20	4.52
Period	$T_s$	s	4.95	5.97	6.28	6.66	6.94	7.21
Length	$L_s$	m	38.18	54.76	60.07	66.66	71.53	76.23
Steepness	$(H/L)_s$		0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
<b>Astronomical Tide</b>								
Highest water level (above MSL)	HHWL	m	0.77 <sup>1)</sup>					
Lowest water level (below MSL)	LLWL	m	0.83 <sup>1)</sup>					
<b>Storm Surge</b>	$\eta$	m	0.04	0.11	0.13	0.17	0.20	0.23
<b>Current Speed<sup>2)</sup></b>								
at 0% of depth <sup>3)</sup>	$V_0$	m/s	1.19	1.57	1.69	1.83	1.93	2.03
10% of depth	$V_{10}$	m/s	1.01	1.29	1.37	1.48	1.55	1.63
20% of depth	$V_{20}$	m/s	0.88	1.09	1.15	1.22	1.28	1.33
30% of depth	$V_{30}$	m/s	0.78	0.93	0.98	1.03	1.07	1.11
40% of depth	$V_{40}$	m/s	0.71	0.82	0.86	0.90	0.93	0.96
50% of depth	$V_{50}$	m/s	0.66	0.74	0.77	0.80	0.82	0.84
60% of depth	$V_{60}$	m/s	0.63	0.69	0.70	0.72	0.74	0.76
70% of depth	$V_{70}$	m/s	0.60	0.64	0.65	0.67	0.68	0.69
80% of depth	$V_{80}$	m/s	0.58	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65
90% of depth	$V_{90}$	m/s	0.57	0.59	0.59	0.60	0.61	0.62
100% of depth	$V_{100}$	m/s	0.55	0.57	0.58	0.58	0.59	0.59

<sup>1)</sup> The concept of return period does not apply to astronomical tide.

<sup>2)</sup> Scalar sum of wind- and tide-induced components only.

<sup>3)</sup> Depth = 21 m.

**Tabel 3.7** Data wave scatter diagram Widuri (CNOOC)

Hs(m)	<2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	Total
>3													
2.8 - 3.0													
2.6 - 2.8													
2.4 - 2.6							1						1
2.2 - 2.4						2	4						6
2.0 - 2.2					1	11	6						18
1.8 - 2.0					3	38	4						45
1.6 - 1.8					43	92	7						142
1.4 - 1.6				2	159	178	9						348
1.2 - 1.4				44	423	270	6						743
1.0 - 1.2				271	825	342	5						1443
0.8 - 1.0			44	649	768	235	7	3					1706
0.6 - 0.8		9	319	730	580	120	17	5					1780
0.4 - 0.6		58	838	736	398	80	22	26	28	7			2193
0.2 - 0.4		27	526	401	124	18	20	77	60	19	2	2	1276
0.0 - 0.2		8	118	101	12	8	21	19	7	3	1	1	299
Total		102	1845	2934	3336	1394	129	130	95	29	3	3	10000

**Tabel 3.8** Data pembebanan lingkungan dari *wave scatter diagram* Widuri  
(CNOOC)

	Combination Load Seastate (i)												
Hs (m)	2.5	2.3	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.7	0.5	0.3	0.1
Tp (s)	7.2	6.9	6.6	6.3	5.9	5.6	5.2	4.8	4.3	3.8	3.2	2.5	1.4
Tz (s)	5.4	5.2	5	4.7	4.5	4.2	3.9	3.6	3.3	2.9	2.4	1.9	1.1
Vw (m/s)	12.5	11.95	11.6	11.02	10.66	10.01	9.49	8.7	8.29	7.73	6.42	5.08	3.23
Current at Surface (m/s)	1.09	1.05	1.00	0.95	0.90	0.84	0.79	0.72	0.66	0.58	0.49	0.38	0.22
Current at 5 m (m/s)	0.9	0.86	0.81	0.76	0.71	0.65	0.59	0.53	0.47	0.39	0.3	0.19	0.03
Current at 10 m (m/s)	0.8	0.76	0.71	0.66	0.61	0.55	0.49	0.43	0.37	0.29	0.2	0.09	0
Current at 20 m (m/s)	0.6	0.56	0.51	0.46	0.41	0.35	0.29	0.23	0.17	0.09	0	0	0
1 m above seabed (m/s)	0.6	0.56	0.51	0.46	0.41	0.35	0.29	0.23	0.17	0.09	0	0	0
Seabed (m/s)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
* Current Condition Used Interpolated and Powerlaw theory													
Power Law Coef	0.5												

### 3.3.4 Data Mooring

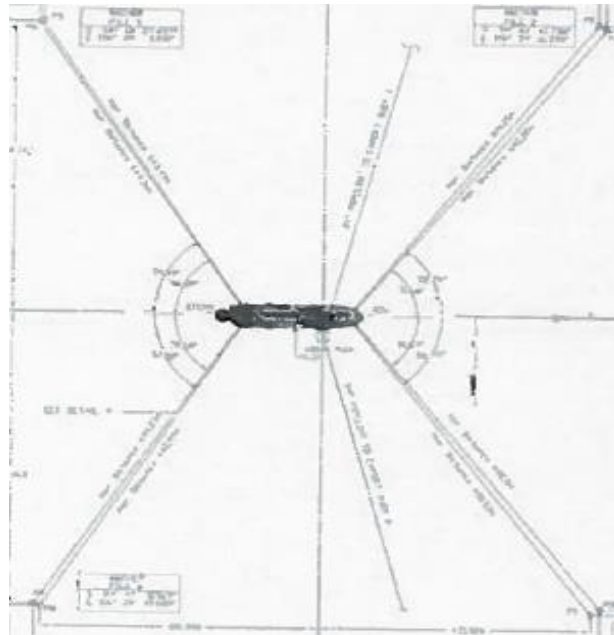
Dalam analisis ini dibutuhkan *mooring properties* yang akan disajikan pada Tabel 3.9 dan 3.10 sedangkan untuk *mooring arrangement* disajikan pada Gambar 3.3.

**Tabel 3.9** Data *mooring lines* (CNOOC, 2014)

Mooring Line	Mooring Arrangement	Line Working Pre-Tension
L1	Approx. 330 m of 4.5" dia. Grade 4 chain (new) payout + approx. 289.56 m of 5" dia. steel wire (existing) payout + approx. 82.3 m of 4.75" dia. Grade 3 chain (existing) payout (at pile)	17 mt at Fully Loaded Condition
L2	Approx. 329 m of 4.5" dia. Grade 4 chain (new) payout + approx. 289.56 m of 5" dia. steel wire (existing) payout + approx. 82.3 m of 4.75" dia. Grade 3 chain (existing) payout (at pile)	17 mt at Fully Loaded Condition
L5	Approx. 281 m of 4.5" dia. Grade 4 chain (new) payout + approx. 289.56 m of 5" dia. steel wire (existing) payout + approx. 82.3 m of 4.75" dia. Grade 3 chain (existing) payout (at pile)	17 mt at Fully Loaded Condition
L6	Approx. 382 m of 4.5" dia. Grade 4 chain (new) payout + approx. 289.56 m of 5" dia. steel wire (existing) payout + approx. 82.3 m of 4.75" dia. Grade 3 chain (existing) payout (at pile)	17 mt at Fully Loaded Condition
L7	Approx. 282 m of 4.5" dia. Grade 4 chain (new) payout + approx. 289.56 m of 5" dia. steel wire (existing) payout + approx. 82.3 m of 4.75" dia. Grade 3 chain (existing) payout (at pile)	17 mt at Fully Loaded Condition
L8	Approx. 280 m of 4.5" dia. Grade 4 chain (new) payout + approx. 289.56 m of 5" dia. steel wire (existing) payout + approx. 82.3 m of 4.75" dia. Grade 3 chain (existing) payout (at pile)	17 mt at Fully Loaded Condition
L9	Approx. 328 m of 4.5" dia. Grade 4 chain (new) payout + approx. 289.56 m of 5" dia. steel wire (existing) payout + approx. 82.3 m of 4.75" dia. Grade 3 chain (existing) payout (at pile)	17 mt at Fully Loaded Condition
L10	Approx. 330 m of 4.5" dia. Grade 4 chain (new) payout + approx. 289.56 m of 5" dia. steel wire (existing) payout + approx. 82.3 m of 4.75" dia. Grade 3 chain (existing) payout (at pile)	17 mt at Fully Loaded Condition

**Tabel 3.10** *Property of mooring line*

Line Segment	Normal Condition			
	Nominal dia.	Nominal dia.	Break Load	Wt/Line
	(inch)	(mm)	(Tonnes)	(T/m)
Chain R3	4.75	121	991	0.33
Wire	5	127	979	0.07
New Chain R4	4.5	114.3	1266.06	0.285



Sumber: CNOOC, 2014

**Gambar 3.3** *Mooring arrangement FSO Federal II*

### 3.3.5 Pendekatan Analisis *Frequency Domain* dan *Time Domain*

Analisis dinamis pada tesis ini diselesaikan dengan menggunakan pendekatan gabungan antara *frequency domain* dan *time domain*. Pendekatan *frequency domain* digunakan untuk menganalisis beban-beban dinamis seperti angin, arus dan gelombang yang bekerja pada struktur dengan menggunakan gaya eksitasi angin/ arus dan gelombang radiasi/difraksi. Pendekatan *frequency domain* bertujuan untuk mendapatkan *first order excitation force*, *hydrostatics*, *potential damping*, *added mass*, *first order RAO*, *second order drift force coefficients*, dan *wind* dan *current load spectrum*.

Pendekatan *time domain* pada tesis ini digunakan untuk mensimulasikan analisis *couple* dinamis antara FSO, *tanker tanker*, dan sistem tambat yang terintegrasi, dimana hasil dari analisis *frequency domain* digunakan untuk analisis *couple-time domain* dengan melakukan FFT. Pada analisis *time domain* pada tesis ini dilakukan sebuah simulasi dengan durasi simulasi 10800 s atau 3 jam simulasi sesuai dengan yang ditetapkan code API RP 2 SK, durasi tersebut cukup untuk menggambarkan standar deviasi respon frekuensi gelombang karena mewakili sekitar 1000 siklus respon dengan periode 10 detik.

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Pemodelan

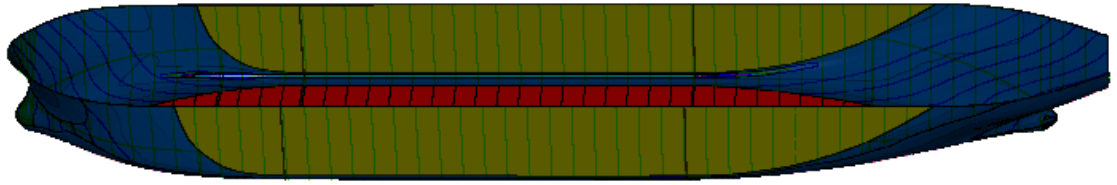
##### 4.1.1 Pemodelan FSO dengan *Software MAXSURF*

Pada tesis ini pemodelan kordinat-kordinat struktur menggunakan bantuan *software MAXSURF* ,dimana *software* ini digunakan untuk mendapatkan model *tanker* dan koordinat- koordinatnya. Model dibuat dalam bentuk *lines plan* sehingga dapat diketahui titik-titik koordinat yang kemudian akan dimodelkan dengan *MOSES*. Pemodelan struktur *tanker* dengan menggunakan *software MAXSURF* dilakukan dengan menginput data pada Tabel 3.1 pada *software maxsurf* .

Dari hasil pemodelan struktur *tanker* dengan menggunakan *software MAXSURF* didapatkan model yang diilustrasikan pada Gambar 4.1 dan hasil hidrostatis dari struktur *tanker* berikut pada *software maxsurf* yang disajikan pada Tabel 4.1:

**Tabel 4.1.** Hasil hidrostatik *output Software MAXSURF*

Measurement	Value	Unit
Displacement	113600	t
Volume (displaced)	110828,9	m <sup>3</sup>
Draft Amidships	14	m
Immersed depth	14	m
WL Length	228,766	m
Beam max extents on WL	42	m
Wetted Area	13921,58	m <sup>2</sup>
Max sect. Area	586,145	m <sup>2</sup>
Waterpl. Area	8730,267	m <sup>2</sup>
LCB length	-110,191	from zero pt. (+ve fwd) m
LCF length	-116,153	from zero pt. (+ve fwd) m
LCB %	-48,167	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
LCF %	-50,774	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
KB	7,265	m
KG fluid	0	m
BMt	10,628	m
BML	291,04	m
GMt corrected	17,894	m
GML	298,305	m
KMt	17,894	m
KML	298,305	m
Immersion (TPc)	89,485	tonne/cm
MTc	1460,409	tonne.m



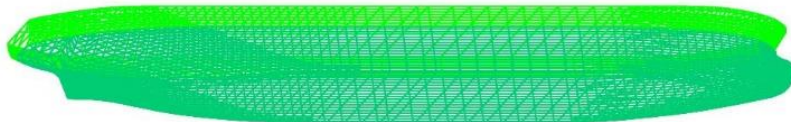
**Gambar 4.1** Pemodelan *Software MAXSURF*

#### **4.1.2. Pemodelan FSO dan Kapal *Tanker* dengan *Software MOSES***

Pada tesis ini, FSO dan kapal *tanker* dimodelkan hanya *hull*-nya saja. Sedangkan *topside* dan *compartment* tidak dimodelkan. Dari permodelan dengan menggunakan *software MOSES* ini akan diketahui parameter hidrostatis dan fenomena *frequency domain* pada FSO dan *tanker tanker*.

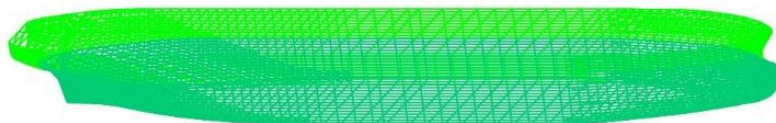
Dengan menggunakan *software Bentley MOSES* dilakukan pemodelan FSO dan kapal *tanker* dalam kondisi *free floating* atau tanpa mooring. Hasil dari pemodelan ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 :

HYDRODYNAMIC ANALYSIS  
of FSO FEDERAL II



**Gambar 4.2** Model geometri FSO Federal II MOSES

HYDRODYNAMIC ANALYSIS  
of Tanker Carrier



**Gambar 4.3** Model geometri kapal *tanker* MOSES



#### 4.1.2.1 Validasi Pemodelan *MOSES* dan DATA

Validasi model FSO dapat dilakukan dengan cara membandingkan *output* dari *software MOSES* dan Data. Dari kedua pemodelan ini didapatkan data-data perbandingan disajikan pada Tabel 4.2 dan 4.3 :

**Tabel 4.2.** Validasi *output software MOSES* dan data FSO Federal II

PARAMETER	SATUAN	DATA	MOSES	ERROR %
			HARGA	
LOA	m	232.04	232.04	0.0
B	m	42	42	0.0
H	m	20.3	20.3	0.0
T	m	14	14	0.0
DISPLACEMENT	m-tons	110031.2	110782.1	0.7
WPA	m <sup>2</sup>	8568.46	8528.05	-0.5
BMT	m	10.592	10.38	-2.0
BML	m	285.316	282.17	-1.11

**Tabel 4.3.** Validasi *output software MOSES* dan Data Tanker

PARAMETER	SATUAN	DATA	MOSES	ERROR %
			HARGA	
LOA	m	225.81	225.81	0.0
B	m	36.6	36.6	0.0
H	m	22.3	22.3	0.0
T	m	11.7	11.7	0.0
DISPLACEMENT	m-tons	73633	74795	1.6
WPA	m <sup>2</sup>	6686.65	6644.643	-0.6
BMT	m	8.95	8.94	-0.1
BML	m	266.41	263.43	-1.13

Dari Tabel 4.2 dan 4.3 disimpulkan bahwa model telah memenuhi syarat untuk pemodelan dimana pada tiap parameter tidak melebihi dari 2% sesuai dengan acuan IACS tahun 2013.

#### 4.1.2.2 RAO *Free Floating* FSO Menggunakan *Software MOSES*

Pada Tahap ini perilaku gerakan FSO dan kapal karrier pada saat kondisi *free floating* dianalisis dan hanya meninjau gerakan-gerakan yang mengalami perubahan secara signifikan saja sesuai dengan arah datang gelombang (*heading*). Analisis dilakukan dengan simulasi *software MOSES*.

Hasil yang diperoleh dari analisis tersebut adalah grafik RAO dengan arah  $0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $112.5^\circ$ ,  $135^\circ$ , dan  $180^\circ$  untuk FSO dan kapal karier. RAO ini menunjukkan perilaku gerakan *tanker* di gelombang regular dan disajikan pada Lampiran A.

Karakteristik gerakan pada masing-masing arah pembebanan (*heading*) dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. *Following seas* ( $\mu=0^\circ$ ) dan *head seas* ( $\mu=180^\circ$ )

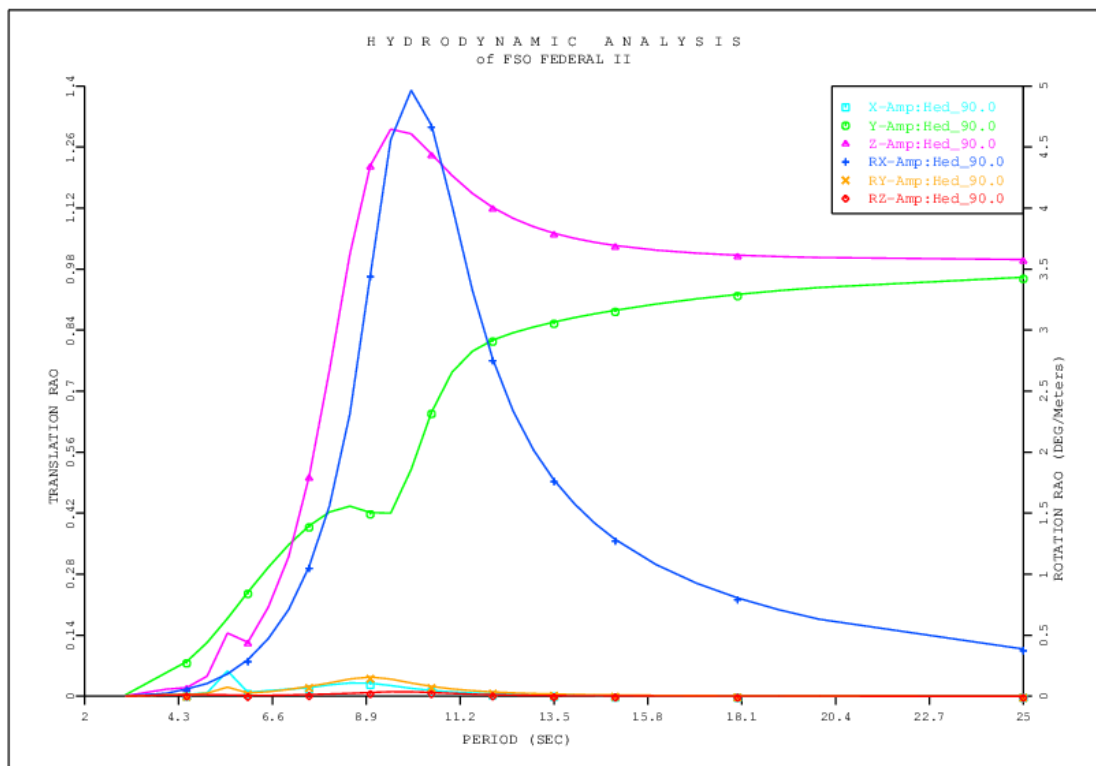
Pada arah gelombang  $0^\circ$  dan  $180^\circ$  gerakan *tanker* yang mengalami perubahan paling signifikan adalah *surge*, *heave*, dan *pitch*. Gerakan *sway*, *roll*, dan *yaw* hampir tidak mengalami perubahan.

2. *Beam seas* ( $\mu=90^\circ$ )

Pada arah gelombang  $90^\circ$  gerakan *tanker* yang mengalami perubahan paling signifikan adalah *roll*. Gerakan yang lain mengalami perubahan yang signifikan tetapi tidak sebesar gerakan *roll*.

3. *Quartering seas* ( $\mu=45^\circ$  dan  $135^\circ$ )

Pada arah gelombang  $45^\circ$  dan  $135^\circ$  gerakan *tanker* semuanya mengalami perubahan namun tidak terlalu signifikan pada semua gerakan.

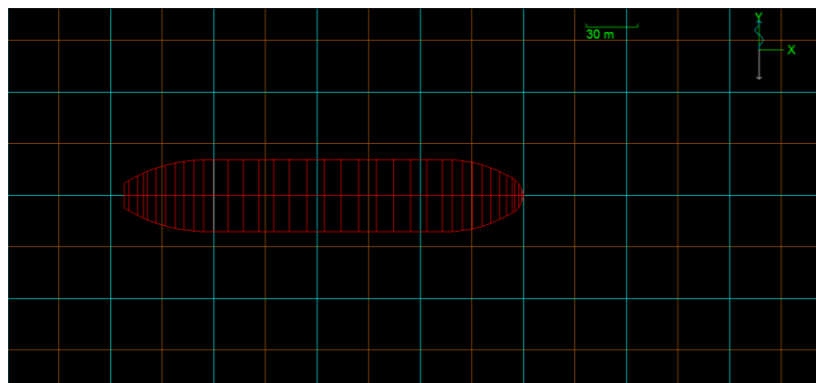


**Gambar 4.4** RAO free floating (FSO Federal II 40% load, dir.  $90^\circ$ )

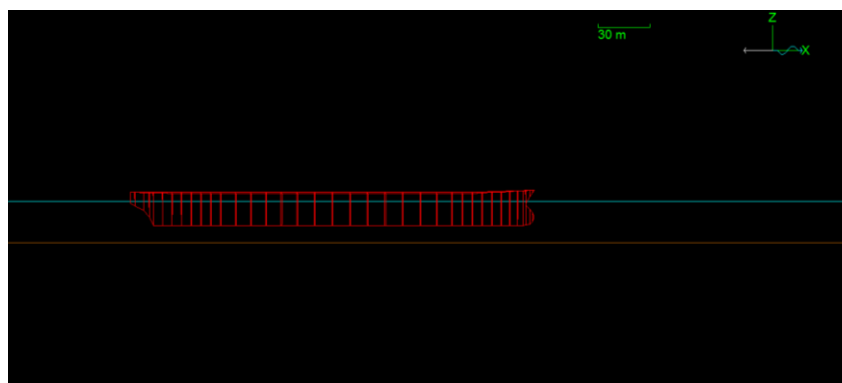
Disimpulkan dari grafik pada Lampiran A diketahui bahwa gerakan *tanker* paling extreme terjadi pada arah  $90^\circ$  (Gambar 4.4) untuk gerakan translasional yaitu gerakan *sway* dan *heave* mengalami pergerakan paling signifikan, namun pada gerakan *surge* yang tampak tidak mengalami perubahan atau dapat dikatakan *tanker* tidak mengalami pergerakan saat mengalami gerakan *surge*. Untuk gerakan *rotasional* hanya gerakan *roll* mengalami perubahan gerakan paling extreme.

#### 4.1.3 Pemodelan dengan *Software Orcaflex*

Langkah-langkah dalam pemodelan dengan *software ORCAFLEX* adalah memodelkan struktur lengkap dengan *hull* FSO, kapal *tanker* dan *mooring lines* integrity. Langkah Pertama adalah dengan modelkan *hull* FSO, yaitu dengan cara menentukan koordinat-kordinat titik dari geometri *hull vessel* yang kemudian titik-titik itu dihubungkan dengan garis hingga menjadi *surface* yang utuh. Pada pemodelan ini dilakukan dengan memasukkan data *vessel dimention*, data lingkungan dan data *output* dari pemodelan menggunakan *software MOSES* seperti : RAO struktur, *wave drift*, *added inertia mass*, *damping coefficient*. Simulasi pemodelan dengan *software Orcaflex* disajikan pada Gambar 4.5 hingga Gambar 4.6.

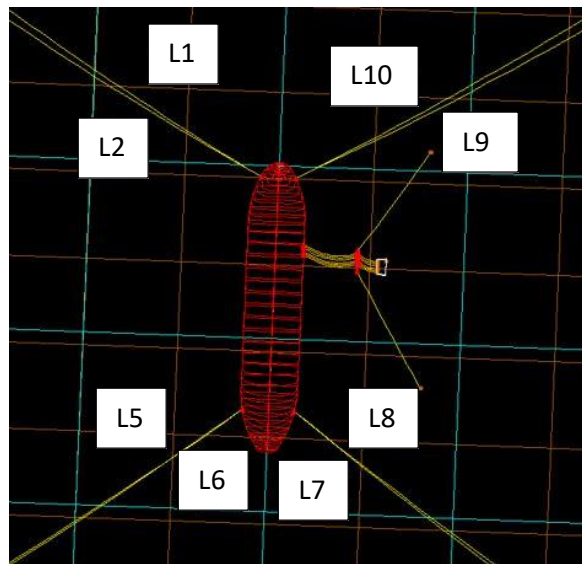


**Gambar 4.5** Model FSO pada *software Orcaflex* tampak atas



**Gambar 4.6** Model FSO Pada *software Orcaflex* Tampak Samping

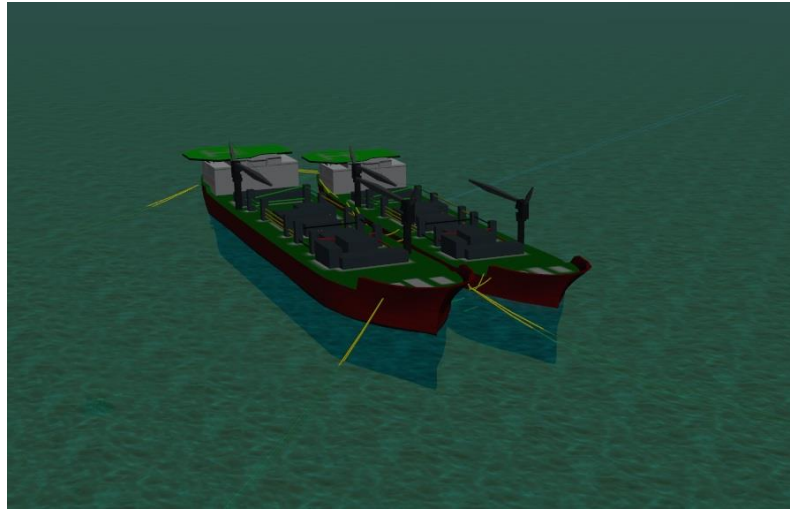
Setelah pemodelan FSO dilakukan, selanjutnya memodelkan *tanker* dan *mooring lines* integrity pada *Software* ORCAFLEX. Pada pemodelan ini, struktur dikenai beban gelombang 1 (beban operasi) dan 100 tahunan (beban badai) untuk mendapatkan *tension* dari masing- masing *mooring*. Pembebanan dilakukan dengan memasukkan data properti dari *mooring lines*, data lingkungan, *pretension* yang diberikan pada *mooring*, *mooring arrangement* (Gambar 3.3) serta data-data *output* dari simulasi *software* MOSES untuk struktur FSO dan kapal *tanker* yang diantaranya RAO struktur, *wave drift*, *added inertia mass*, *damping coefficient*. Kemudian memasukkan tipe spektra gelombang, kecepatan arus, kecepatan angin serta arah headingnya, dan kedalaman perairan. Simulasi yang dilakukan sesuai dengan skenario pada Tabel 3.3 dan disajikan pada Gambar 4.7, Gambar 4.8 untuk kondisi FSO sendiri (*standalone*), dan Gambar 4.9 untuk kondisi *offloading/unloading*.



**Gambar 4.7** Model sistem tambat dalam *Orcaflex*



**Gambar 4.8** Model sistem tambat FSO *standalone* dalam *Orcaflex*



**Gambar 4.9** Model FSO *Side by side* dengan kapal *tanker* dalam *Orcaflex*

#### **4.2. Analisis Dinamis *Line Tension***

Analisis dinamis pada tesis ini dilakukan dalam dua tahap pengerjaan menggunakan bantuan program berbasis elemen hingga, dimana program tersebut harus mencakup aspek *frequency domain* dan *time domain*. Dalam analisis dinamis *line tension* atau sering disebut analisis kekuatan ada aspek-aspek yang wajib dipertimbangkan sebagai bagian dari kriteria penilaian ulang yaitu kondisi aktual dari *mooring line*.

##### **4.2.1 Kondisi Aktual *Mooring Line***

Kondisi *mooring line* telah mengalami degradasi selama masa operasinya. Hal tersebut menyebabkan terjadinya penurunan kekuatan putus rantai atau dikenal dengan istilah *breaking strength*. Oleh sebab itu perlu dilakukan perhitungan ataupun inspeksi pada *mooring line* untuk menentukan kondisi actual *mooring line* berdasarkan data-data seperti ketebalan *marine growth*, laju korosi, dan umur operasi. Lama umur operasi dari *mooring line* struktur ini diambil rata-rata 10 tahun. Dalam tesis ini sesuai data dari CNOOC (2014), didapatkan laju korosi sebesar 0.91 mm/year.

Efek dari korosi dan *marine growth* pada *mooring line* menyebabkan diameter *mooring line* berubah, sehingga menyebabkan parameter pada *mooring line* ikut berubah seperti halnya berat *mooring line* dan *coefisien drag* ( $C_d$ ), hal tersebut disajikan dalam Tabel 4.4 dan 4.5.

**Tabel 4.4.** Kondisi awal *mooring line*

Line Segment	Normal Condition				
	Nominal dia.	Nominal dia.	Break Load	Wt/Line	Cd
	(inch)	(mm)	(Tonnes)	(T/m)	
Chain R3	4.75	121	991	0.33	2.6
Wire	5	127	979	0.07	1.8
New Chain R4	4.5	114.3	1266.06	0.285	2.4

**Tabel 4.5.** Kondisi *mooring line* terkorosi dan efek *marine growth*

Line Segment	After Corrosion & marine Growth (10 Years)				
	Nominal dia.	Break Load	Wt/Line	With Marine Growth	
				Cd	Wt/line
	(mm)	(Tonnes)	(T/m)		(T/m)
Chain R3	108.2	824.7	0.26	7.41	0.302
Wire	114.2	784	0.06	4.95	0.081
New Chain R4	105.2	1063	0.22	6.96	0.265

#### 4.2.2 Analisis Tension Pada Mooring Lines FSO Federal II

Setelah melakukan analisis statis dengan menggunakan *software MOSES*, dilakukan analisis dinamis untuk mendapatkan respon gerakan FSO ketika tertambat. Respon gerak yang terjadi akan mengakibatkan gaya tarikan pada *mooring line* sehingga didapatkan *effective tension* dari tiap *mooring line*.

Pada analisis ini *mooring line* dibagi menjadi beberapa segment. Untuk menentukan jumlah segment, menurut *Germanischer Lloyd* dirumuskan bahwa panjang satu segment adalah 1 *fathom* = 27.5 m, karena panjang *mooring line* yang digunakan dalam analisis tesis ini bervariasi yaitu 701,86 m pada Line 1 , 700,86 m pada line 2, 652,86 m pada line 5, 753,86 m pada line 6, 653,86 m pada line 7, 651,86 m pada line 8, 699,86 m pada line 9 dan 701,86 m pada line 10 maka jumlah segment bervariasi tiap linennya jumlah segment pada *mooring line* pada analisis ini disajikan pada Tabel 4.6:

**Tabel 4.6.** Jumlah segment pada *mooring lines*

Konfigurasi Mooring jarak per segmen								
	L1	L2	L5	L6	L7	L8	L9	L10
Total Length	701,86	700,86	652,86	753,86	653,86	651,86	699,86	701,86
Jumlah Segment	28	27	26	29	26	26	27	28

Setelah membagi *mooring line* menjadi beberapa segment, kemudian memasukkan data lingkungan FSO beroperasi seperti : tinggi gelombang, kedalaman perairan, kecepatan angin, kecepatan arus, dan arah pembebanan, selanjutnya memasukkan data respon gerakan dari FSO dari *software MOSES* seperti : *RAO, mean wave drift, hydrodynamic drag* dan *wind drag coefficient, inertia moment, added mass* serta *damping*.

Menurut API RP 2 SK dan DNV OS 301 Analisis dilakukan dengan simulasi waktu selama 10.800 sekon (3 jam). Setelah simulasi dilakukan maka akan didapatkan *effective tension* dari masing-masing *mooring line*. Tabel 4.7 menyajikan *effective tension* untuk FSO kondisi operasi *standalone*. Kondisi FSO *offloading/unloading* dengan *tanker* pada Tabel 4.8 hingga Tabel 4.10. Penyajian pada tiap-tiap tabel hanya L7 dikarenakan L7 mengalami tension terbesar.

**Tabel 4.7.** Tension pada *Mooring Line* Kondisi Operasi FSO Federal II  
*Standalone*

Wave Direction (Deg)	Tension (tef)							
	L1	L2	L5	L6	L7	L8	L9	L10
0	34.52162	30.48333	63.95783	54.63336	68.83912	57.59143	37.324	40.86069
45	34.52162	28.22284	52.35306	42.06927	69.43203	58.8112	50.71901	56.54399
90	36.77108	32.91154	54.3348	46.02316	73.68831	61.54723	33.21343	35.2131
135	45.59883	39.30499	60.30623	50.81952	61.83452	52.16646	33.92955	36.22327
180	40.28884	35.57517	66.13706	56.19282	65.0559	55.02123	36.90878	40.05492
225	41.27435	36.08069	68.1692	57.65953	62.4955	53.27701	36.57372	39.77779
270	39.6767	35.19417	70.66972	60.76414	62.92552	53.58446	36.49293	39.58433
315	41.36677	36.09307	72.75895	62.07631	62.13884	52.9556	33.71898	36.26513

**Tabel 4.8.** Tension pada *mooring line* kondisi 1 *offloading/unloading*

<i>Condition 1</i>	<i>Max Tension at L 7 (tef)</i>
<i>Wave Direction</i>	<i>Maximum Tension</i>
45	101.585
90	109.838
135	93.625

**Tabel 4.9.** Tension pada *mooring line* kondisi 2 *offloading/unloading*

Condition 2	Max Tension at L 7 ( <i>tef</i> )
Wave Direction	Maximum Tension
45	110.013
90	112.628
135	100.329

**Tabel 4.10.** Tension pada *mooring line* kondisi 3 *offloading/unloading*

Condition 3	Max Tension at L 7 ( <i>tef</i> )
Wave Direction	Maximum Tension
45	125.331
90	134.509
135	118.141

Dari Tabel 4.7 hingga 4.10 diatas disimpulkan bahwa tension terbesar terjadi pada L7 dengan arah pembebanan 90<sup>0</sup>.

Pada analisis ini diambil sample tension maksimum pada segmen pertama yaitu *fairlead* hingga segmen 1 pada simulasi, hal tersebut dikarenakan tegangan maksimum sering terjadi pada segmen terdekat dengan *vessel*. Pada analisis tersebut diketahui bahwa *tension* maksimum pada masing-masing *line* terdapat pada daerah *fairlead*. Hal ini diartikan bahwa dari semua segment pada masing-masing *mooring* daerah didekat *fairlead* merupakan penerima tegangan terbesar.

*Tension* maksimum untuk keseluruhan *mooring line* akibat beban operasi dengan arah pembebanan 90<sup>0</sup> yaitu sebesar 73.688 *tef* kondisi FSO *standalone* dan 134.509 *tef* kondisi *offloading/unloading* yang terletak pada *line* 7 (Tabel 4.7-4.10). Untuk mendapatkan target angka keamanan yang diizinkan pada *mooring line*, maka dalam analisis angka keamanan *mooring line* ditetapkan nilai faktor keamanan berdasarkan API RP 2SK yang dibuat pada Tabel 4.11, sebagai berikut :



**Tabel 4.11.** *Assesment criteria for all lines intact*

Line Tension Criteria	Safety Factor	Allowable Line Tension (Ton)	Remarks
Line 1	1.67	469.46	All lines are cosisting of below properties : - 4.5” Dia. Chain R4 MBL = 1063 T - 5” Dia. Steel Wire MBL = 784 T - 4.75” Dia. Chain R3 MBL = 824.7 T
Line 2			
Line 5			
Line 6			
Line 7			
Line 8			
Line 9			
Line 10			

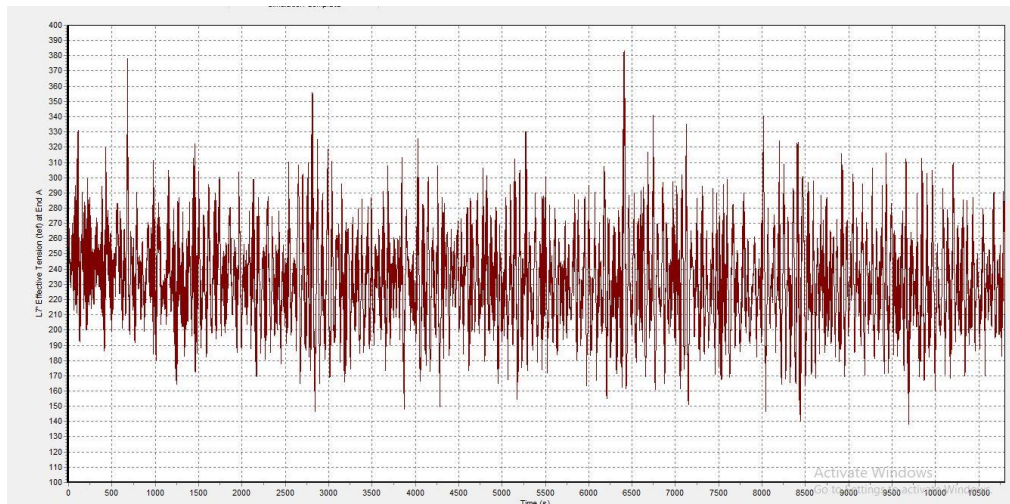
Faktor keamanan dapat diperoleh dengan membandingkan nilai *Minimum Breaking Load* dengan maksimum aktual tension yang terjadi pada struktur yang biasanya disimulasikan dalam kondisi badai (periode 100 tahun), faktor keamanan disajikan pada Tabel 4.12, sebagai berikut:

**Tabel 4.12.** *Safety factor mooring lines FSO Federal II (Badai dir.90<sup>0</sup>)*

Line	Properties	Max Tension (tef) kondisi badai	MBL (tef)	Safety Factor
Line 7	Chain R4	383.30	1063	2.77

### 4.2.3 Time History Mooring Line Tension

Ketika kita telah mensimulasikan permodelan dan analisis *tension* dengan menggunakan *software ORCAFLEX* selain mendapatkan *effective tension* pada *mooring line* kita juga akan mendapatkan *time history mooring line tension* yang akan disajikan pada Gambar 4.10. Berikut ini adalah *time history tension* pada *mooring line FSO Federal II* kondisi badai dengan arah pembebanan 90<sup>0</sup> pada segmen 1 *mooring line L7* :



**Gambar 4.10** *Time history mooring line tension*

Gambar 4.10 memiliki bentuk grafik yang dapat diartikan bahwa *time history tension* yang terjadi pada *mooring* merupakan respon yang terjadi pada *mooring* pada tiap waktu menghasilkan *tension* yang fluktuatif pada tiap waktunya. *Tension* yang terjadi merupakan *tension* acak sehingga dalam menganalisis *cycle* untuk analisis umur kelelahan dari masing-masing *mooring* dapat menggunakan metode *combined spectrum*, dimana gaya *low frequency* dan *wave frequency* sudah terkombinasi dalam grafik tersebut.

### 4.3. Analisis Kelelahan

Analisis kelelahan pada tesis ini dapat dilakukan ketika hasil simulasi sudah memenuhi syarat aman *tension* yang ditentukan oleh API RP 2SK, dan dari hasil simulasi pada tesis ini didapatkan angka aman dari hasil analisis untuk *tension* sebesar 2.77 dimana hasil tersebut sudah memenuhi syarat aman yang ditentukan oleh kriteria API RP 2 SK. Syarat aman disajikan pada Tabel 4.11. dan hasil simulasi *tension* pada tesis ini disajikan pada Tabel 4.12.

Kelelahan pada *mooring line* sangat berpengaruh pada kondisi beban lingkungan meliputi gelombang, arus dan angin dimana pembebanan tersebut akan memberikan siklus pembebanan yang terus menerus terjadi pada struktur utama. Pada tesis ini seluruh pembebanan yang dianggap bekerja terhadap struktur utama secara terus menerus dan berkala akan dianalisis dalam perhitungan kelelahan, salah satunya adalah penambahan beban operasi seperti *offloading/unloading* yang diyakini dapat mempengaruhi siklus tegangan pada *mooring line* secara signifikan.

Dalam analisis kelelahan dibutuhkan data *scatter diagram* yang digunakan sebagai data gelombang tiap keadaan laut (*i state*) dengan kombinasi tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) dan periode gelombang ( $T_p$ ) tertentu yang mewakili statistic gelombang satu tahunan, *wave scatter diagram* disajikan dalam Tabel 3.7. Data *wave scatter* dapat diolah untuk dijadikan data perhitungan dalam analisis kelelahan seperti yang disajikan pada Tabel 3.8. dimana beban angin dan arus dalam kasus ini diolah berdasarkan dari *wave scatter diagram*. Menurut Bai (2003), mengkombinasikan data gelombang dengan angin dan arus merupakan suatu hal yang kompleks. Perlu adanya *engineering judgment* yang tepat berdasarkan pemahaman data lingkungan yang ada dan respon dinamis struktur. Pada tesis ini digunakan *wave scatter* pada Tabel 3.7 untuk analisis beban operasi FSO *standalone* dan Tabel 3.8 untuk beban *offloading/unloading*, hal tersebut dikarenakan pada kondisi *standalone* struktur utama perlu dianalisis lebih detail terhadap seluruh beban gelombang, arus dan angin pada tiap  $H_s$  dan  $T_p$  sesuai dengan *wave scatter*, sedangkan untuk kondisi operasi cukup dengan menggunakan data olahan dari *wave scatter diagram* seperti penelitian yang telah dilakukan peneliti sebelumnya yang analisisnya berhubungan dengan kelelahan.

#### 4.3.1 Perhitungan *Fatigue Damage*

*Fatigue damage* pada *mooring line* disebabkan oleh *line tension* yang bergerak secara fluktuatif yang disebabkan oleh pergerakan struktur yang tertambat dengan gaya *low frequency* maupun *wave frequency*. Pada analisis kali ini perhitungan fatigue menggunakan persamaan *combined spectrum*, dimana persamaan ini merupakan metoda untuk mengkombinasikan kerusakan kelelahan akibat *low frequency* maupun *wave frequency* yang diformulasikan seperti Persamaan (2.29).

Pada persamaan tersebut menunjukkan keadaan laut *i state* dengan kondisi tinggi gelombang ( $H_s$ ) dan periode ( $T$ ) tertentu. Terdapat parameter ni yaitu jumlah siklus yang terjadi tiap tahunnya dalam kondisi *i state* yang diformulasikan pada Persamaan (2.28), dimana terdapat parameter  $v$  yang merupakan *zero up-crossing frequency* dari *spectrum tension*. *Spectrum tension* merupakan hasil dari analisis *line tension* dalam bentuk time domain (*output Orcaflex*). Sedangkan  $R_{oi}$  merupakan rasio dari standar deviasi ( $\sigma$ ) tegangan efektif dari *mooring line* pada keadaan laut tertentu *i state* dengan setengah *Minimum Breaking Load corrosion*

( $MBL_{corr}$ ) mooring line yang ditinjau ( $\sigma/b_{s_{cor}}$ ). Standard deviasi ( $\sigma$ ) yang diperoleh sudah mencakup kombinasi dari *wave frequency* dan *low frequency*.

Perhitungan *fatigue damage* menggunakan kombinasi beban gelombang, arus, dan angin. Pada analisis *commulative damage* dipengaruhi oleh kondisi operasi, dimana FSO *standalone* dengan beban operasi dan FSO *side by side* dengan kapal *tanker* untuk beban tambahan kondisi *offloading*. Dalam analisis kelelahan akibat pengaruh beban *offloading/unloading* harus dilakukan kalkulasi untuk siklus beban *offloading/unloading*, dimana data yang harus disediakan adalah jadwal kegiatan *offloading/unloading* tiap tahunnya yang akan disajikan pada Tabel 4.13. untuk perbedaan hasil kalkulasi kelelahan dengan adanya pengaruh beban tambahan *offloading/unloading* disajikan pada Tabel 4.14 dan Tabel 4.15.

**Tabel 4.13.** Jadwal kegiatan *offloading/unloading*

Operation Time (Offloading/Onloading)		
Per month	2 times	
Operating Time / day		
Ship Capacity	50308.3	Ton
	348133.4	bbls
Trasfer rate	10000	bbls/ hour
	12000	bbls/ hour
after and before offloading preparation	4	hours
Tanker Moored to SPM	3	hours
Total Time Operation Cond.	33.01112	hours
Operating time/year (Hours)	792.2669	Hours
Operating time/year (Sec)	2852161	Sec

**Tabel 4.14.** *Commulative damage* FSO *standalone*

Mooring Line	Total Damage	Faktor Keamanan (T>S)	
		SF 3	SF 10
L7 (FSO Federal II)	0.001041464	320	96
Service Life = 10 tahun		FK=T>S	OK
Umur Struktur	SF		
Daerah Terinspeksi	3		
Daerah Kritis	10		

**Tabel 4.15.** *Commulative damage offloading/unloading*

Mooring Line	Total Damage	Faktor Keamanan (T>S)	
		SF 3	SF 10
L7 (FSO Federal II)	0.006272358	53	16
Service Life = 10 tahun		FK=T>S	OK
Umur Struktur	SF		
Daerah Terinspeksi	3		
Daerah Kritis	10		

Dari tabel diatas digunakan arah 90° untuk perhitungan *commulative fatigue damage* pada *mooring line* karena pada arah 90° pada analisis ini mendapatkan nilai *tension* paling besar. Dari *total damage* yang terjadi dapat ditentukan umur dari struktur yang dianalisis menggunakan formula  $T(\text{years}) = 1/D$ . Untuk mendapatkan sisa umur struktur yang diizinkan maka dalam analisis kelelahan ditetapkan nilai faktor keamanan berdasarkan standard API RP 2SK, dimana untuk *mooring line* faktor keamanan paling kecil adalah 3 kali dari service life yang ditentukan untuk daerah terinspeksi dan 10 kali untuk daerah kritis sisa umur. Faktor keamanan 10 merupakan angka keamanan untuk daerah yang tak terinspeksi dan tidak dilakukan perawatan dan inspeksi secara berkala, sehingga laju korosi dan *marine growth* dapat menjalar dan tumbuh secara pesat pada daerah tersebut sesuai dengan acuan standard API RP 2SK, untuk hasil perhitungan kelelahan sesuai dengan angka keamanan disajikan dalam Tabel 4.14 dan 4.15. dan untuk perhitungan kelelahan dilampirkan pada Lampiran B.

#### 4.4. Analisis Resiko

##### 4.4.1. Analisis Peluang Kegagalan

Analisi peluang kegagalan *mooring line* terhadap beban kelelahan pada tesis ini menggunakan simulasi *Monte Carlo*. Moda kegagalan yang digunakan dalam analisis ini menggunakan Persamaan (2.34) yaitu :

$$g(x) = \frac{1}{\frac{n_i}{K} (\sqrt{2}R\sigma_i)^M \Gamma(1 + \frac{M}{2})} - 1_{tahun} < 0$$

Dalam analisis ini terdapat angka ketidakpastian yang disebabkan oleh kapasitas kelelahan, perhitungan *tension*, dan *fatigue damage*. Angka ketidakpastian tersebut didapatkan dari parameter beban lingkungan, gerakan

kapal, dan model (Lassen, 1997). Pada API RP 2 SK diketahui bahwa parameter kelelahan mengikuti distribusi lognormal dengan nilai 1 dan koefisien variasi 0.3, nilai M mengikuti distribusi normal dan nilai K mengikuti distribusi lognormal. Pada analisis kali ini parameter ketidakpastian pada moda kegagalan dimodelkan variabel acak. Parameter variabel acak yang digunakan pada perhitungan  $Pof$  akibat beban kelelahan disajikan dalam Tabel 4.16 dibawah ini.

**Tabel 4.16.** Parameter variabel acak

Parameter Variabel Acak	Data Analisis			Hasil Distribusi		
	Covarian data	Mean ( $\mu$ ) data	Standard Deviasi data	Jenis distribusi	Mean ( $\mu$ ) distribusi	Standard Deviasi distribusi
ni*	-	116289.2	199285.4529	Log Normal	10.97865	1.170625739
ni**	-	81416.73	298763.4265	Log Normal	9.971447	1.634557222
R $\sigma$ *	-	0.001909	0.002624199	Log Normal	-6.79213	1.030261367
R $\sigma$ **	-	0.009385	0.033216604	Log Normal	-5.97097	1.613898458
M	0.03	3	0.09	Normal	-	-
K	0.48	1000	480	Log Normal	6.804086	0.455345275
*	<i>Operational Condition FSO Standalone</i>					
**	<i>Operational Condition offloading/unloading</i>					

Dari parameter variabel acak pada Tabel 4.17 dilakukan simulasi *Monte Carlo* dengan bantuan MS Excel dengan jumlah eksperimen 100000. Pada analisis kali ini kondisi gagal ketika nilai dari  $g(x) < 0$  dan dikatakan aman apabila nilai  $g(x) > 0$ . Hasil simulasi *Monte Carlo* disajikan pada Tabel 4.17 dibawah ini.

**Tabel 4.17.** Hasil peluang kegagalan dengan simulasi *Monte Carlo*

Simulasi	Berhasil	Gagal	Pof	Keandalan
100000	99551	449	0.00449	0.99551

Pada tesis ini tingkat resiko berdasarkan keadaan *mooring line* yang mengalami kelelahan akibat beban kombinasi dari beban lingkungan dan *offloading/unloading*. Dari analisis tersebut diketahui bahwa kegagalan *mooring line FSO Federal II* akibat beban kelelahan memiliki peluang terjadinya kegagalan sebesar 0.00449 ( $4.5 \times 10^{-3}$ ) tiap tahunnya. Nilai peluang kegagalan akan digunakan sebagai parameter penentu tingkat resiko pada matriks resiko. Pada tesis ini peluang kegagalan mengacu pada DNV RP G 101 yang disajikan pada Tabel 4.18 dibawah ini.

**Tabel 4.18.** Kriteria peluang gagal DNV RP G101

Cat.	Annual Failure Probability		Description
	Quantitative	Qualitative	
5	$> 10^{-2}$	Failure expected	0,01 kejadian atau lebih dari 0,01 kejadian <i>mooring line</i> per tahun
4	$10^{-3}$ to $10^{-2}$	High	0,001 - 0,01 kejadian atau 1 kejadian per 100-1000 <i>mooring line</i> per tahun
3	$10^{-4}$ to $10^{-3}$	Medium	0,0001 - 0,001 kejadian atau 1 kejadian per 1000-10000 <i>mooring line</i> per tahun
2	$10^{-5}$ to $10^{-4}$	Low	0,00001 - 0,0001 kejadian atau 1 kejadian per 10000-100000 <i>mooring line</i> per tahun
1	$< 10^{-5}$	Negligible	0,00001 kejadian atau kurang dari 0,00001 kejadian <i>mooring line</i> per tahun

Hasil simulasi yang telah dilakukan didapatkan nilai peluang kegagalan sebesar  $4.5 \times 10^{-3}$ , dimana hasil tersebut apabila diklasifikasikan dalam Tabel kriteria peluang kegagalan menurut DNV RP G101 dapat diketahui bahwa peluang kegagalan dari *mooring line FSO Federal II* akibat beban kelelahan masuk pada kriteria *High* yaitu bernilai antara  $10^{-3}$  hingga  $10^{-2}$ .

#### 4.4.2. Konsekuensi Kegagalan

Pada umumnya untuk mengukur suatu tingkat resiko dibuat desain pesimis sistem bangunan terapung harus mampu menahan kegagalan satu *mooring line* tanpa mengakibatkan peningkatan gerak kapal yang mengakibatkan kerusakan pada sistem riser atau lainnya. Beberapa *mooring line* gagal hanya terjadi apabila kegagalan tidak terdeteksi diawal atau jika ada degradasi secara umum merata pada sistem *mooring line* dalam kuadran tertentu pada tingkat yang sama (Denton, 2006).

Kemungkinan kegagalan suatu sistem *mooring line* akan memberikan dampak buruk bagi sistem operasi bangunan apung karena menyebabkan kegagalan sistem secara menyeluruh, sedangkan apabila kegagalan terdeteksi maka akan segera ditindaklanjuti dengan memperbaiki kondisi *mooring line* hingga sistem tersebut benar-benar siap untuk dioperasikan kembali. Dapat disimpulkan bahwa dari segala kemungkinan kegagalan akibat *mooring line* putus akan mengakibatkan sistem operasi terganggu dan sedikit banyak akan memberikan efek kualitas dan target produksi, dengan kata lain aspek bisnis menjadi sorotan utama pada kasus kegagalan *mooring line*.

Analisis konsekuensi pada tesis ini dilakukan secara kualitatif dengan mengacu pada scenario kegagalan pada *mooring line*. Untuk kriteria konsekuensi mengikuti kriteria yang digunakan pada DNV RP G101. Skenario terjadinya kegagalan pada satu *mooring* digambarkan sebagai berikut:

1. *Deterioration* : Kerusakan memburuk akibat korosi, *marine growth*, keausan dan kelelahan.
2. *Failure* : Diikuti dengan kegagalan komponen pada kondisi *moderate* atau *extreme*.
3. *Detection* : Tali putus dan kemungkinan bisa terdeteksi melalui alat monitoring *tension* yang sudah terpasang. Namun bisa dimungkinkan tidak diketahui sampai adanya pengecekan bawah laut dilakukan.
4. *Shutdown*: Sistem harus dimatikan sampai integritas *mooring system* dipastikan aman untuk beroperasi lagi.
5. *Inspection*: Sistem *mooring* dan produksi seharusnya dicek untuk mengidentifikasi bahaya yang berkaitan.
6. *Reduce operations*: Dimulainya operasi kembali dibawah kriteria kondisi yang diizinkan.
7. *Repair* : Pemulihan seluruh sistem tambat.

#### **4.4.2.1. Konsekuensi Kegagalan Menurut Laporan OGP**

Pada analisis ini konsekuensi kegagalan *mooring line* menggunakan metode kualitatif, dimana angka kegagalan didapat dari penelitian maupun skenario yang dibuat terhadap terjadinya suatu kegagalan pada objek yang dituju. Pada analisis ini angka kegagalan dipertimbangkan dari laporan OGP (Oil and Gas Procedure). Dimana asosiasi internasional ini telah melakukan penyusunan serta penyaringan berkaitan dengan struktur bangunan laut. Salah satu laporan OGP pada tahun (2010) yaitu mengenai direktori penilaian resiko terkait struktur pada bangunan lepas pantai. Dalam laporan tersebut terdapat data frekuensi kegagalan *mooring line* sedunia, dimana menurut OGP frekuensi kegagalan *mooring line* untuk semisubmersible sebesar  $5.78 \times 10^{-3}$  tiap tahunnya. Kejadian ini menyebabkan kerusakan dengan kategori sebagai berikut :



- *Total Loss* : Total hilangnya unit termasuk kerugian konstruktif dari sudut pandang asuransi, namun unit dapat diperbaiki dan dioperasikan kembali.
- *Severe Damage* : Kerusakan berat/parah pada satu modul unit, kerusakan besar pada peralatan penring , dan kerusakan pada struktur pemikul beban.
- *Significant Damage* : Kerusakan serius pada modul dan daerah unit, kerusakan kecil pada struktur pemikul beban, kerusakan yang signifikan pada peralatan penting tunggal dan kerusakan pada peralatan yang lebih penting.
- *Minor Damage* : Kerusakan kecil untuk peralatan penting, kerusakan pada peralatan yang non-esensial, dan kerusakan struktur non pemikul beban.
- *Insignificant Damage* : Tidak ada kerusakan pada alat , dan kerusakan hanya pada bagian alat kerusakan pada kabel penyeret, pendorong, generator dan *driver*.

Tingkat kerusakan akibat kegagalan *mooring line* pada OGP juga disajikan dalam bentuk tabel , yaitu Tabel 4.19 disajikan sebagai berikut:

**Tabel 4.19.** Peluang dari konsekuensi kegagalan *mooring line* menurut OGP

<i>Damage Level</i>	Insignificant	Minor	Significant	Serve	Total Loss
	0.29	0.44	0.27	0	0
<i>Single/Multiple line failure</i>	<i>Single</i>	<i>Multiple</i>			
	0.7	0.3			

Dari Tabel 4.19 dapat diketahui bahwa peluang terjadinya konsekuensi kegagalan paling besar terdapat pada *level* minor, dan kegagalan dari *single mooring line* yang putus sebesar 70 % memiliki angka lebih besar dibanding kegagalan akibat *multiple line* putus yaitu sebesar 30 %. Hal tersebut menunjukkan bahwa konsekuensi akibat kegagalan pada *mooring line* yaitu hanya pada *level* minor, sedangkan untuk kegagalan pada putusnya satu rantai lebih besar daripada *multiple line* yang putus sangatlah masuk akal , karena apabila ada satu rantai putus maka langsung diadakan inspeksi atau penanganan kepada *mooring line* yang lainnya agar tidak jadi kegagalan

hingga putus seperti *mooring line* sebelumnya. Data tersebut bisa dijadikan pertimbangan untuk menetapkan konsekuensi terjadi kegagalan karena perilaku kegagalan yang terjadi pada data sama dengan perilaku *mooring line* pada umumnya. Dan dapat ditetapkan bahwa konsekuensi terjadinya kegagalan pada *mooring line FSO Federal II* masuk dalam katagori minor baik dari aspek keamanan bisnis dan finansial.

#### **4.4.2.2. Konsekuensi Kegagalan Menurut OTC**

Pada analisis ini konsekuensi kegagalan *mooring line* menggunakan metode kualitatif, dimana angka kegagalan didapat dari penelitian maupun skenario yang dibuat terhadap terjadinya suatu kegagalan pada objek yang dituju. Pada analisis ini angka kegagalan dipertimbangkan dari laporan OTC (*Offshore Technology Conference*)-25134 *Mooring Integrity Management : A State of the Art Review*. Dimana asosiasi internasional ini telah melakukan penyusunan serta penyaringan berkaitan dengan struktur bangunan laut. Salah satu laporan OTC-25134 pada tahun (2014) yaitu mengenai direktori penilaian resiko terkait struktur pada bangunan lepas pantai.

Ma, et al. (2013) pada tahun 2001 hingga 2011 mereka melaporkan terjadinya kegagalan pada *mooring line*. dari hasil laporan yang dibuat, terdapat kurang lebih 21 kejadian kegagalan pada *mooring line* yang dimana 8 diantaranya mengalami dampak yang signifikan/major. Masalah tersebut meliputi gagalnya *multiple line*, hilangnya *station keeping*, produksi di hentikan / *emergency shutdown*, dan rusaknya *risers* yang menyebabkan tumpahan hidrokarbon. Mereka menyimpulkan bahwa peluang terjadinya kegagalan pada sistem tambat sebesar  $3 \times 10^{-3}$ . Beberapa penyebab terjadinya kegagalan pada *mooring line* diantaranya adalah OPB (*Out of Plane Bending*), rantai *hocking/twisting/knotting*, las-lasan cacat, ketahanan terhadap retak rendah, kelelahan, dan korosi. Beberapa *mooring line* gagal karena kekuatan *mooring* berkurang akibat perbaikan yang dilakukan tidak tepat dan hasil las yang tidak tepat.

Dalam laporan OTC-25134 terdapat banyak pendapat dan laporan tentang kegagalan pada *mooring line* dan dapat disimpulkan dari seluruh pendapat dan laporan pada OTC adalah penyebab terjadinya kegagalan pada

*mooring line* adalah kelelahan akibat OPB, korosi, hasil las-lasan yang buruk, dan *maintenance* yang buruk. Untuk dampak yang dihasilkan akibat kegagalan pada *mooring line* pada OTC-25134 menyebutkan bahwa dampak yang terjadi termasuk tingkatan signifikan dan major untuk aspek bisnis dan keuangan serta lingkungan, sehingga dibutuhkan adanya mitigasi dan pemahaman lebih tentang treatment untuk sistem tambat dimana sistem tambat mampu menjalankan perannya secara sempurna. *Sistem* tambat adalah elemen penting untuk keamanan dari FPU, dimana diharapkan sistem tambat tersebut mampu menjaga FPU pada tempatnya sesuai Batasan *offset* yang ditentukan, mampu mempertahankan FPU selama umur desain fasilitasnya (biasanya 20-30 tahun). *mooring lines* harus mampu menahan lingkungan yang korosif dan lingkungan yang dinamis, karena hal tersebut dapat mengurangi kegagalan pada *mooring line*.

#### **4.4.2.3. Konsekuensi Kegagalan dengan Simulasi Rantai Putus**

Pada tesis ini dalam penentuan besar konsekuensi kegagalan dilakukan simulasi putusnya rantai dalam variasi satu rantai putus. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui konsekuensi kegagalan apabila terjadi putus pada *mooring line*.

Dari hasil analisis dengan mensimulasikan satu rantai putus dapat disimpulkan bahwa apabila satu rantai putus maka pengaruh yang terjadi tidak terlalu berbahaya dari segi keamanan, lingkungan, tetapi bahaya dari segi bisnis karena akan menunda waktu produksi dari FSO. Apabila 1 rantai putus maka kru kapal langsung menindak lanjuti line yang lain sehingga tidak terjadi putusnya *multiple chain*. Hasil analisis diklasifikasikan dalam beberapa zona menurut DNV RP G 101, yang diantaranya;

##### **4.4.2.3.1.1. Keamanan**

Kondisi keamanan peralatan dan awak kapal ketika terjadi rantai putus pada FSO Federal II yaitu tidak akan terjadi kerusakan yang signifikan pada peralatan FSO Federal II dan tidak ada korban kecelakaan pada awak kapal, hal tersebut dikarenakan ketika terjadi kegagalan pada 1

rantai di FSO Federal II tidak menimbulkan respon pergerakan dan gaya yang besar pada FSO Federal II.

<b>Safety</b>	No Injury	Minor Injury Absence < 2 days	Major Injury Absence > 2 days	Single Fatality	Multiple Fatalities
---------------	-----------	----------------------------------	----------------------------------	-----------------	---------------------

**Gambar 4.11** Tipe CoF tentang keamanan menurut DNV RPG 101

Menurut hasil analisis yang telah dilakukan dan pertimbangan yang telah dilakukan maka dalam hal keamanan dengan menggunakan DNV RPG 101 dipilih kelas A yaitu No Injury (Gambar 4.11).

#### 4.4.2.3.1.2. Lingkungan

Dari hasil diskusi dengan praktisi BKI dan Apexindo apabila terjadi kegagalan pada *single mooring* tidak akan merusak riser secara signifikan, tetapi akan menaikkan sedikit tegangan dari riser, dengan kata lain riser akan aman dan kemungkinan untuk terjadinya tumpahan minyak dari *riser /hose* sangatlah kecil. Dari hasil diskusi tersebut ditentukan kondisi lingkungan ketika terjadi rantai putus pada FSO Federal II yaitu tidak akan terjadi tumpahan limbah beracun bagi lingkungan, tetapi rantai yang putus akan menjadi sampah beberapa hari di laut, sehingga akan mengotori laut dan merusak karang maupun makhluk hidup yang terkena runtuhannya mooring. Untuk menanggulangi kerusakan alam tersebut diperlukan beberapa jam hingga hari untuk mengangkat mooring tersebut.

<b>Environment</b>	No pollution	Minor local effect. Can be cleaned up easily.	Significant local effect. Will take more than 1 man week to remove.	Pollution has significant effect upon the surrounding ecosystem (e.g. population of birds or fish).	Pollution that can cause massive and irreparable damage to ecosystem.
--------------------	--------------	--	--	---	---

**Gambar 4.12** Tipe CoF tentang lingkungan menurut DNV RPG 101

Menurut hasil analisis yang telah dilakukan dan pertimbangan yang telah dilakukan maka efek kegagalan mooring terhadap lingkungan dengan menggunakan DNV RPG 101 dipilih kelas B (*Minor Local Effect*) (Gambar 4.12), dikarenakan mooring yang runtuh mudah untuk diangkat kembali.

#### 4.4.2.3.1.3. Bisnis

Kondisi produksi maupun bisnis ketika terjadi rantai putus pada FSO Federal II dapat menyebabkan target produksi berkurang akibat konsekuensi penghentian produksi, setelah produksi dihentikan akan ditindak lanjuti dengan inspeksi untuk mengecek sistem *mooring* dan produksi agar dapat mengidentifikasi potensi bahaya yang ada. Waktu yang digunakan untuk pemeriksaan dan perbaikan dibutuhkan waktu 1-7 hari kerja. Setelah dipastikan aman maka operasi diatas FSO bisa dijalankan dengan normal, tetapi apabila keamanan perbaikan membutuhkan keamanan yang tinggi maka pada waktu tertentu operasi harus dihentikan.

<b>Business</b>	No downtime or asset damage	< € 10.000 damage or downtime < one shift	< € 100.000 damage or downtime < 4 shifts	< € 1.000.000 damage or downtime < one month	< € 10.000.000 damage or downtime one year
-----------------	-----------------------------	---	---	--	--

**Gambar 4.13** Tipe CoF tentang bisnis menurut DNV RPG 101

Menurut hasil analisis yang telah dilakukan melalui pertimbangan menurut laporan OTC dan OGP dan diskusi dengan praktisi BKI disimpulkan bahwa kegagalan mooring terhadap bisnis dan produksi dengan menggunakan acuan matriks resiko DNV RPG 101 terletak pada tingkat C (*Significant Local Effect*) dan disajikan pada Gambar 4.13.

#### 4.4.3. Matriks Penilaian Resiko

Pada analisis resiko ini dilakukan dengan metode semi kuantitatif, karena pada analisis ini menggabungkan penilaian peluang terjadinya kegagalan (Pof) secara kuantitatif dan konsekuensi terjadinya kegagalan (Cof) secara kualitatif. Angka resiko akan ditentukan dengan menggunakan matriks resiko 5 x 5 dengan cara mengalikan angka pada peluang terjadinya kegagalan dengan *level* konsekuensi. Didalam matrik resiko terdapat 3 zona berbeda yang diataranya:

- Zona Aman: Merupakan Zona dimana resiko dapat diterima atau dikatakan objek aman , zona ini biasanya diinterpretasikan dengan warna hijau
- Zona ALARP: Zona ALARP (As Low As Reasonably Practicable) merupakan zona dimana resiko masih bisa diterima dengan adanya alasan yang logis , karena pada zona ini resiko masih memiliki potensi yang tinggi.

Zona ini biasanya berwarna kuning terletak diantara zona aman (*acceptabel*) dan zona tidak aman (*unacceptabel*).

- Zona Tidak Aman: Zona ini merupakan zona yang tidak aman atau zona yang tidak dapat diterima karena memiliki resiko yang tinggi, sehingga perlu dilakukan peninjauan kembali terhadap resiko, pemeriksaan dan peninjauan objek yang ditinjau. Zona ini biasanya diinterpretasikan dengan warna merah.

Dari tabel matrik resiko (Gambar 2.16) kita dapat menentukan bahwa resiko yang terjadi pada *mooring lines* FSO Federal II akibat beban *fatigue*. Pada analisis kali ini parameter yang ditinjau untuk analisis resiko akibat beban *fatigue* menurut DNV RPG 101 yaitu *safety*, *environment*, dan *business*. Berikut hasil analisis resiko pada tiap parameter menurut DNV RPG 101:

#### 4.4.3.1. Matriks Resiko Terhadap Keselamatan

Berdasarkan probabilitas kegagalan struktur karena kelelahan sebesar  $4.5 \times 10^{-3}$  (4) dan konsekuensi terhadap keselamatan adalah rendah (A). Jika diplotkan antara probabilitas dan konsekuensi tersebut dalam matriks resiko DNV RPG 101 akan didapatkan resiko terhadap keselamatan kru dan equipment pada FSO Federal II masuk dalam zona ALARP diasajikan dalam Gambar 4.14, dimana pada zona tersebut angka resiko masih cukup tinggi sehingga perlu dilakukan mitigasi untuk mengurangi angka resiko yang terjadi.

PoF Ranking	PoF Description	A	B	C	D	E
5	(1) In a small population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in the location.	YELLOW	RED	RED	RED	RED
4	(1) In a large population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in operating company.	YELLOW	YELLOW	RED	RED	RED
3	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a small number of components. (2) Failure has occurred in the operating company.	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED	RED
2	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED
1	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW

Gambar 4.14 Matriks resiko keamanan Federal II (DNV RP G 101)

#### 4.4.3.2. Matriks Resiko Terhadap Lingkungan

Berdasarkan probabilitas kegagalan struktur karena kelelahan sebesar  $4.5 \times 10^{-3}$  (4) dan konsekuensi terhadap Lingkungan adalah Minor (B). Jika diplotkan antara probabilitas dan konsekuensi tersebut dalam matriks resiko DNV RPG 101 akan didapatkan resiko terhadap lingkungan akibat putusnya *mooring* FSO Federal II masuk dalam zona ALARP disajikan pada Gambar 4.15, dimana pada zona tersebut angka resiko masih cukup tinggi sehingga perlu dilakukan mitigasi untuk mengurangi angka resiko yang terjadi.

PoF Ranking	PoF Description	A	B	C	D	E
5	(1) In a small population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in the location.	YELLOW	RED	RED	RED	RED
4	(1) In a large population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in operating company.	YELLOW	YELLOW	RED	RED	RED
3	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a small number of components. (2) Failure has occurred in the operating company.	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED	RED
2	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED
1	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW

Gambar 4.15 Matriks resiko lingkungan Federal II (DNV RP G 101)

#### 4.4.3.3. Matriks Resiko Terhadap Bisnis

Berdasarkan probabilitas kegagalan struktur karena kelelahan sebesar  $4.5 \times 10^{-3}$  (4) dan konsekuensi terhadap bisnis dan produksi adalah Major (C). Jika diplotkan antara probabilitas dan konsekuensi tersebut dalam matriks resiko DNV RPG 101 akan didapatkan resiko terhadap lingkungan akibat putusnya *mooring* FSO Federal II masuk dalam zona *high risk*, dimana pada zona tersebut angka resiko masih cukup tinggi sehingga perlu dilakukan mitigasi untuk mengurangi angka resiko yang terjadi.

PoF Ranking	PoF Description	A	B	C	D	E
5	(1) In a small population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in the location.	YELLOW	RED	RED	RED	RED
4	(1) In a large population, one or more failures can be expected annually. (2) Failure has occurred several times a year in operating company.	YELLOW	YELLOW	RED	RED	RED
3	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a small number of components. (2) Failure has occurred in the operating company.	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED	RED
2	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW	RED
1	(1) Several failures may occur during the life of the installation for a system comprising a large number of components. (2) Failure has occurred in industry.	GREEN	GREEN	GREEN	YELLOW	YELLOW

**Gambar 4.16** Matriks resiko bisnis Federal II (DNV RP G 101)

Dapat disimpulkan dari Gambar 4.16 dan beberapa aspek yang ditinjau besar resiko FSO Federal II akibat beban kelelahan yaitu berada pada zona medium atau ALARP dimana ketiga kategori (Keamanan, Lingkungan dan Bisnis) dari hasil analisis dan pertimbangan report OGP, OTC dan diskusi terletak pada zona tersebut. Pada zona *high risk* besar resiko sangat besar sehingga perlu dilakukan mitigasi untuk menekan angka resiko pada FSO Federal II.



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

Dari tesis yang telah dilakukan, didapatkan umur struktur akibat beban kelelahan dengan adanya faktor korosi dan *offloading/unloading* pada *mooring line* FSO Federal II, peluang kegagalan dan konsekuensi kegagalan struktur tiap tahunnya. Dengan menggunakan analisis resiko didapatkan *level* resiko yang diterima oleh objek yang digunakan terhadap beban kelelahan.

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang dilakukan diperoleh beberapa kesimpulan untuk menyelesaikan permasalahan yang dirumuskan. Berikut kesimpulan pada tesis ini:

- a. Pengaruh dari beban *offloading/unloading* sangatlah signifikan, hal tersebut diakibatkan ketika FSO sedang melakukan *offloading/unloading* dengan sistem *syde by side* maka FSO akan menerima gaya tambahan dari kapal *tanker* yang menambat pada FSO, perpindahan muatan yang membuat naiknya *draft* FSO dapat mempengaruhi keseimbangan dari FSO dan membuat respon FSO semakin besar. Hal-hal tersebut membuat *tension* pada tali tambat FSO meningkat secara signifikan dan meningkatnya *tension* pada tali tambat membuat damage yang diterima oleh tali tambat pada FSO semakin besar, hal tersebut disajikan pada hasil analisis Tabel 4.14 dan 4.15.
- b. *Commulative damage* yang terjadi pada *mooring line* FSO Federal II sebesar 0.006 dan didapatkan *fatigue life* akibat beban tambahan *offloading/unloading* dan kondisi *mooring line* terkorosi selama 10 tahun adalah 16 tahun dengan angka keamanan 10 dan 53 tahun dengan angka keamanan 3, sehingga dapat disimpulkan bahwa struktur mampu melakukan penambahan umur operasi selama 10 tahun dan memenuhi syarat aman dari *fatigue life* pada *mooring line*, sesuai API RP 2 SK.
- c. Tingkat resiko untuk *mooring line* FSO Federal II masuk dalam ALARP dalam segi keamanan dan lingkungan dan *high risk* dalam segi bisnis dan keuangan hal tersebut dianalisis dan diasajikan dalam Gambar 4.14 - 4.16. Pada area ALARP tingkat resiko masih cukup tinggi sehingga masih perlu adanya mitigasi agar tingkat resiko bisa masuk ke daerah yang aman dan untuk area *high risk* sangat perlu untuk dilakukan mitigasi agar level resiko turun hingga menjadi level aman.

## 5.2 Saran

Beberapa hal yang dapat dijadikan saran yang sifatnya membangun penelitian selanjutnya diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. Mempertimbangkan adanya *standing wave* dan mencari efek damping kapal ketika dilakukan *side by side* kapal.
- b. Menghitung *Fatigue Damage* dengan menggunakan teori Rainflow secara manual.
- c. Mencari *Probability of Failure* akibat beban kelelahan dengan menggunakan metoda AFOSM dan Wirsching.
- d. Mencari *Consequence of Failure (cof)* dengan metode kuantitatif agar hasil cof mendekati dengan objek yang dianalisis.
- e. Melakukan analisis lokal pada *compartment mooring line* (ex :*chain, Socket, Swivel, Wire*, dll).
- f. Melakukan analisis Risk Based Inspection dan melakukan mitigasi terhadap resiko pada *mooring line*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Annual Report CNOOC SES Ltd., 2014. *Permanent Mooring Analysis of FSO "Federal II" On Widuri Field*. Jakarta, Indonesia.
- API RP 2P., 1987. *Recommended Practice for the Analysis of Spread Mooring Systems for Floating Drilling Units*. Washington, DC: American Petroleum Institute.
- API Publication 581., 2000. *Risk Based Inspection Base Resource Document*. Washington, DC: American Petroleum Institute.
- API RP 2SK., 2005. *Recommended Practice for Design and Analysis of Station Keeping Systems for Floating Structures*. Washington, DC: American Petroleum Institute.
- Bai, Y., 2003. *Marine Structural Design*. (J. Sullivanm Ed.). Kidlington, Oxford UK: Elsevier. Retrieved from [www.elsevier.com](http://www.elsevier.com).
- Bhattacharyya, R., 1978. *Dynamics of Marine Vehicles*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Bjørnsen, E., 2014. *Chains in Mooring Systems*. Norwegia: Master Thesis NTNU.
- Boediarto, G., 2000. *Analisa Statis dalam Pra Perencanaan Sistem Tambat Lepas Pantai Jenis CALM*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia.
- Chakrabarti, S.K., Capagnoglu, C., and Halkyard, J. 2005. An Overview Of The Reassessment Studies Of Fixed Offshore Platforms In The Bay Of Campeche, Mexico. *Proceedings of OMAE 2005 Halkidiki*, Greece: June 12-16, 2005.
- Chakrabarti, S.K., 1987. *Hydrodynamics of Offshore Structures*. Boston, USA: Computational Mechanics Publications Southampton.
- Denton, N., 2006. *Floating Production System-JIP FPS Mooring Integrity*. Aberdeen.
- Djarmiko, E.B., 2003. *Fatigue Analysis*. Surabaya: Kursus Singkat Offshore Structure Design and Modelling.
- Djarmiko, E.B., 2012. *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*. Surabaya: Departemen Teknik Kelautan ITS.
- DNV OS E 301., 2004. *Position Mooring*. Norway: Det Norske Veritas.
- DNV RP G 101., 2010. *Risk Base Inspection Of Offshore Topsides Static Mechanical Equipment*. Norway: DET NORSKE VERITAS
- Faltinsen, O. M., 1990. *Sea Loads On Ships And Offshore Structures*. United Kingdom : Cambridge University Press.
- Gordon, Robert B., et al., (2014), *Mooring Integrity Management: A State of the Art Review*, OTC 25134.
- Indiyono, P., 2003. *Hidrodinamika Bangunan Lepas Pantai*. Surabaya: SIC.

- Irfan, M., 2014. *Analisis Mooring Sistem Pada Single Point Mooring Berdasarkan Standard Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) : Studi Kasus Penentuan Sisa Umur Kelelahan Mooring Line*. Surabaya: Tesis Teknik Kelautan ITS.
- Kusumawardhani, H. T., 2011. *Analisis Resiko Pada Mooring line SPM (Single Point Mooring) Akibat Beban Kelelahan*. Surabaya: Tesis Departemen Teknik Kelautan ITS.
- Lassen, T., & Syvertsen, K., 1996. *Fatigue Reliability and Life Cycle Cost Analysis of Mooring Chain, IV*, 418-422.
- Lassen, V., 1997. *In Search Result, Performance Management Practices in Norway, Public Management Service*. Norway: OECD.
- Ma, Kai-tung, Arun Duggal, Philip Smedley, Didier L'Hostis and Hongbo Shu (2013), *A Historical Review on Integrity Issues of Permanent Mooring Systems*, OTC 24025.
- OCIMF., 2008. *Mooring Equipment Guidelines 3rd Edition*. United Kingdom :Witberby Seamanship International.
- OGP., 2010. *Risk Assessment Data Directory-Structural risk for offshore installations*. London, England.
- Rosyid, D. M., 2007. *Pengantar Rekayasa Keandalan*. Surabaya: Airlangga University Press.
- Sari, L. K., 2008. *Analisa Keandalan Terhadap Beban Kelelahan pada Mooring Line Single Buoy dengan Simulasi Monte Carlo*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia.
- Yunus, M., 2013. *Evaluasi Aspek Respon Struktur Global Akibat Beban Gelombang pada Perancangan Drillship Displasemen 35000 ton*. Surabaya: Tesis Departemen Teknik Kelautan ITS.

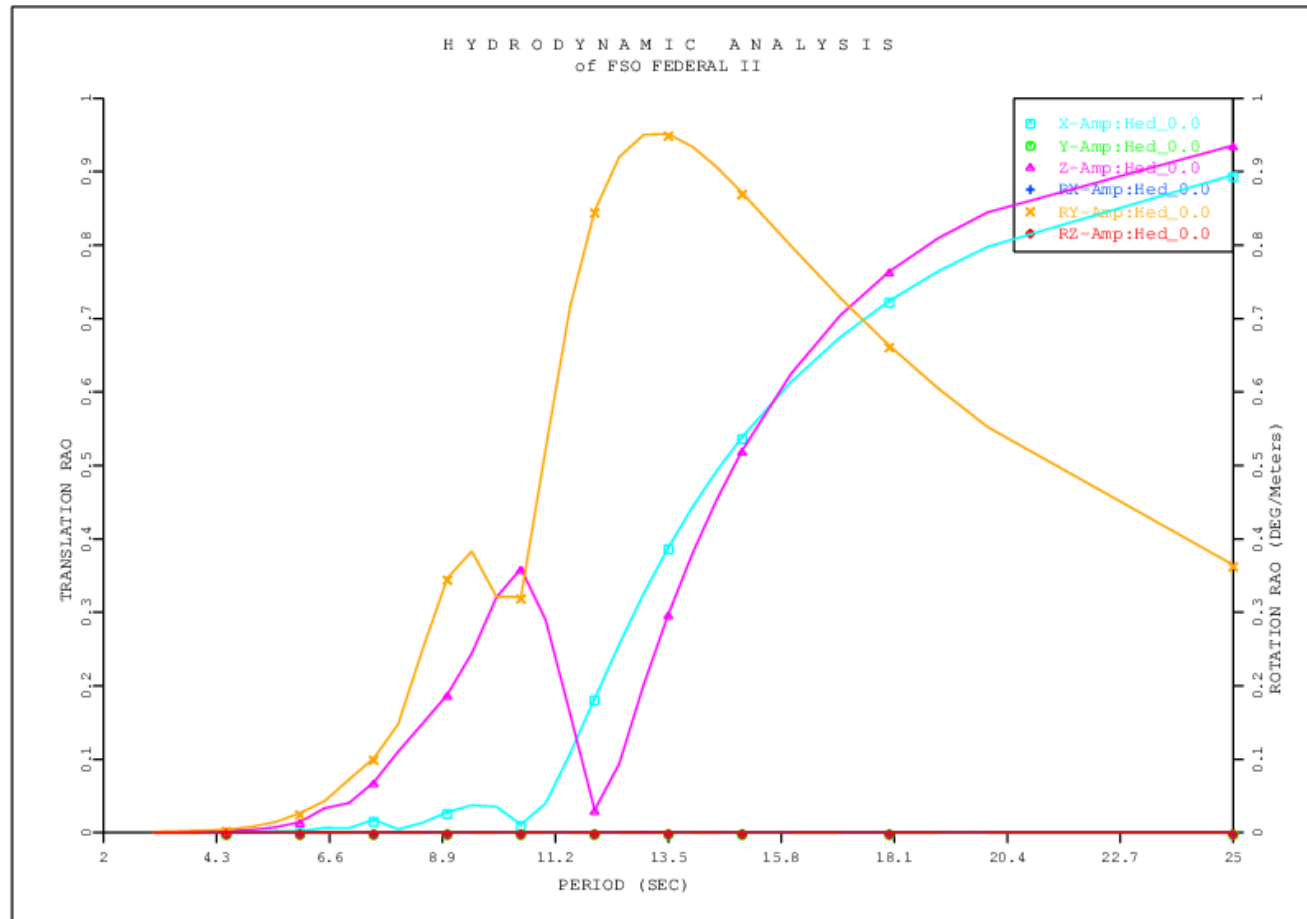
# LAMPIRAN A

(RAO KONDISI *FREE FLOATING*)

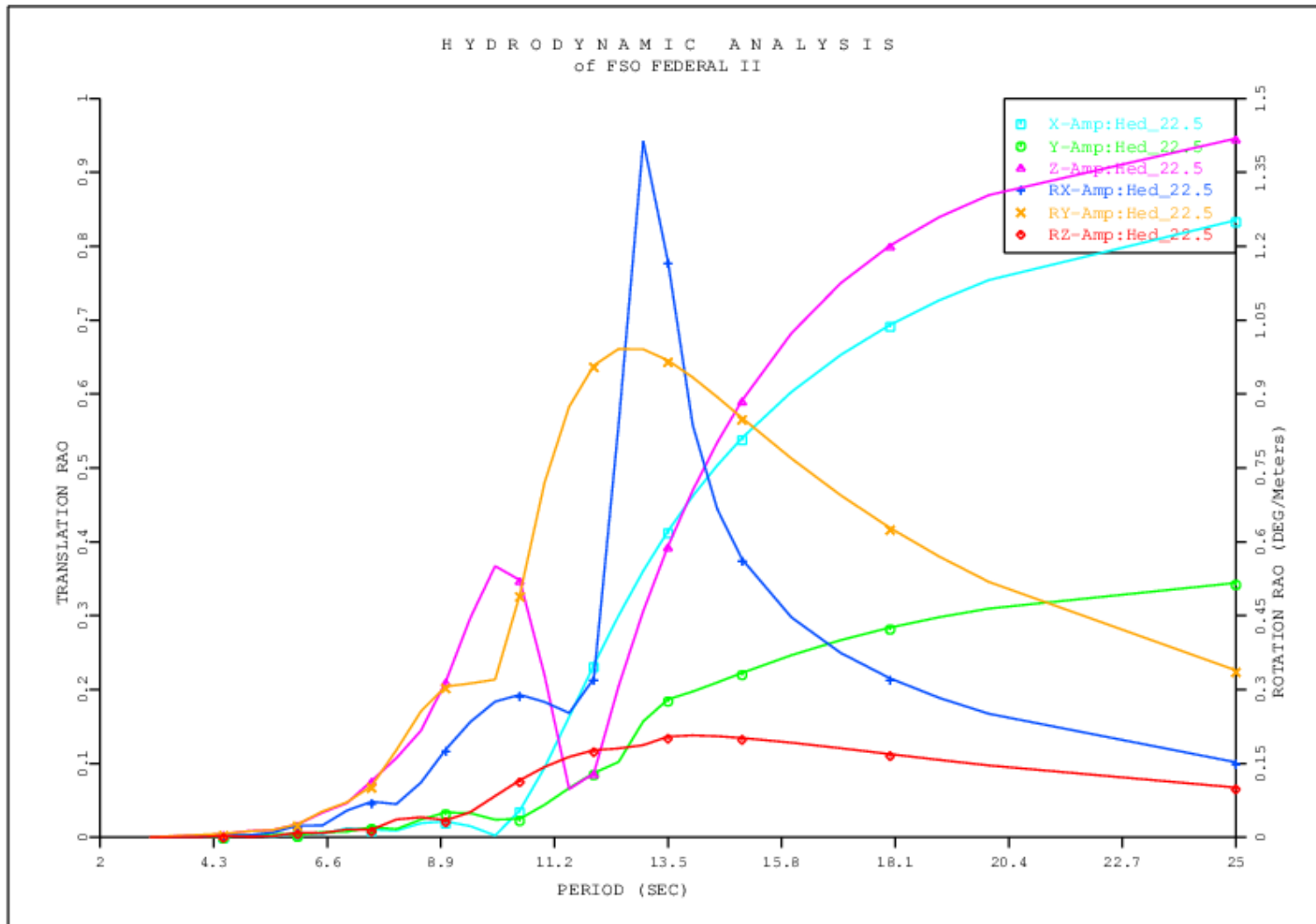
# 1. RAO FREE FLOATING

## 1.1 RAO FSO Federal II

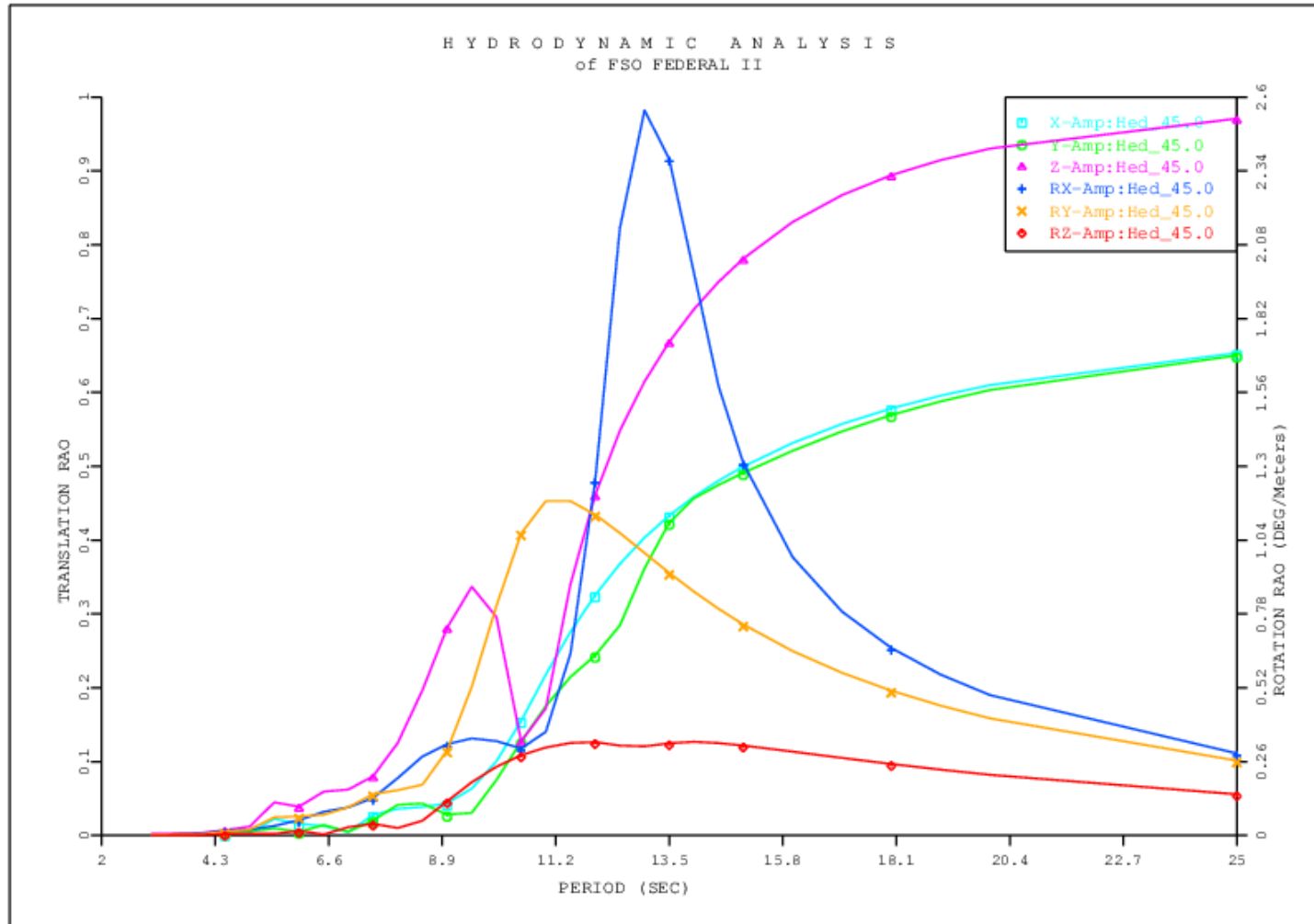
### 1.1.1 Case 1 (Full Load)



Gambar A1.1.1 RAO free floating FSO Federal II arah pembebanan 0° kondisi muatan penuh

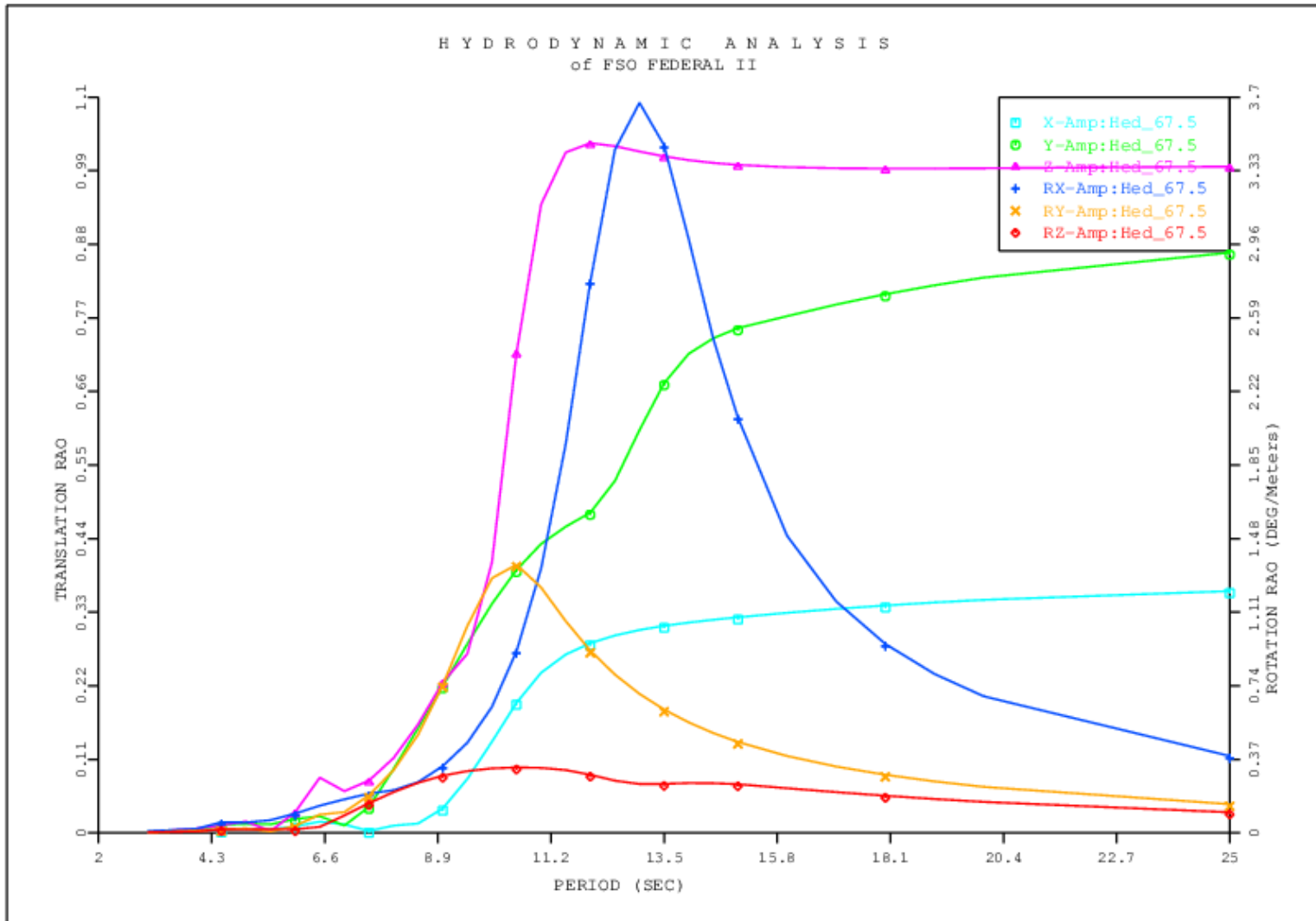


**Gambar A1.1.2** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $22.5^0$  kondisi muatan penuh

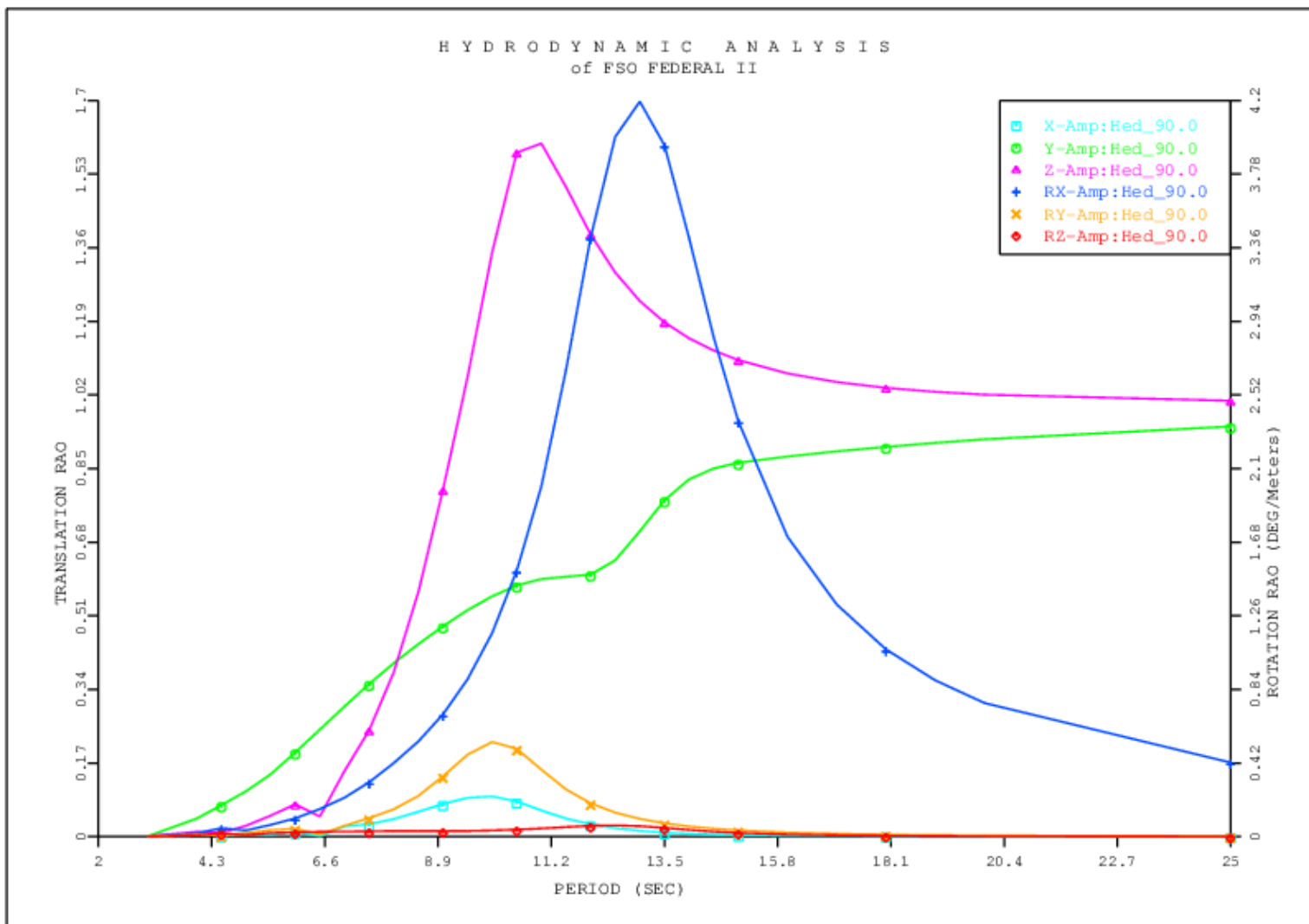


**Gambar A1.1.3** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $45^{\circ}$  kondisi muatan penuh

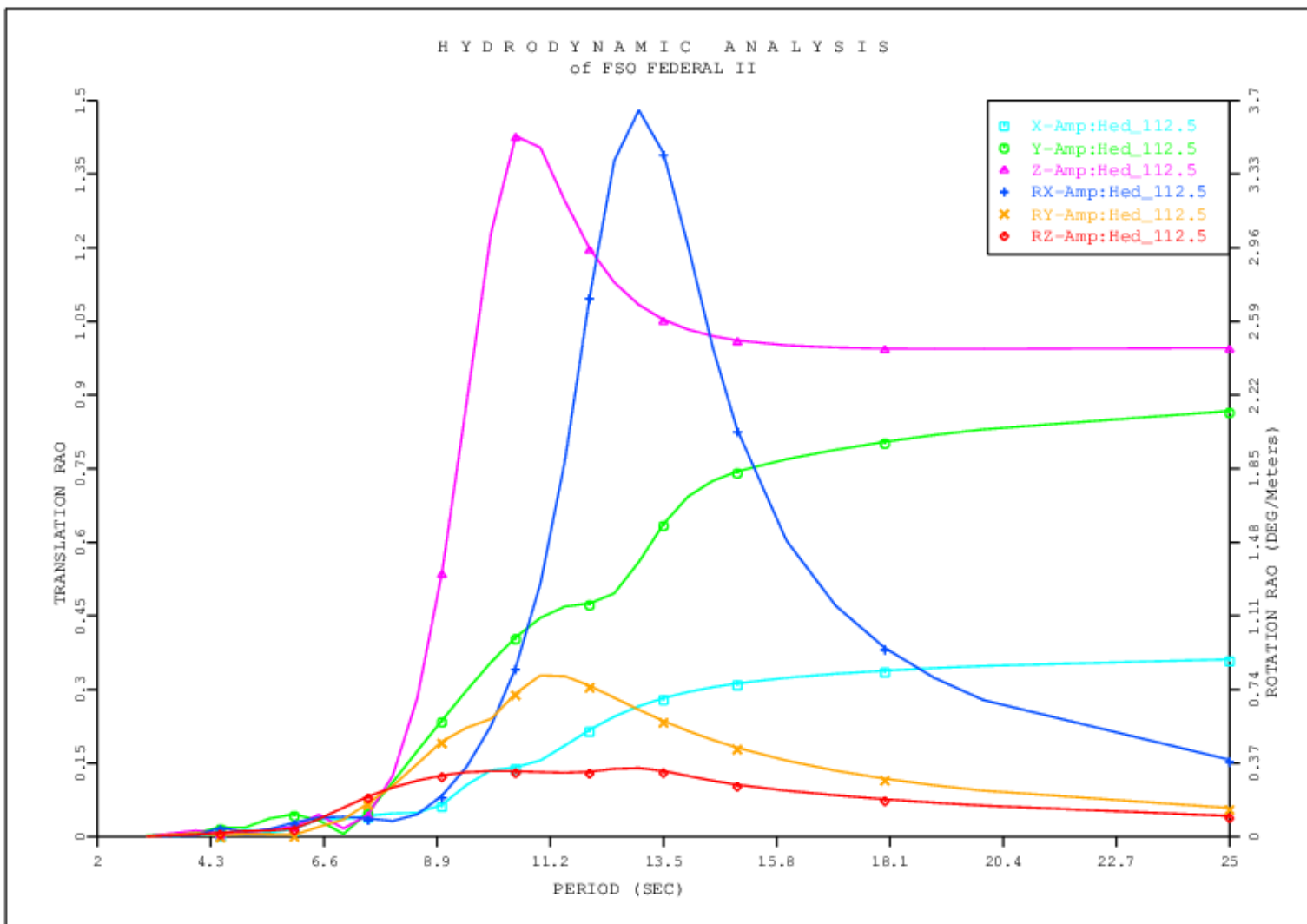




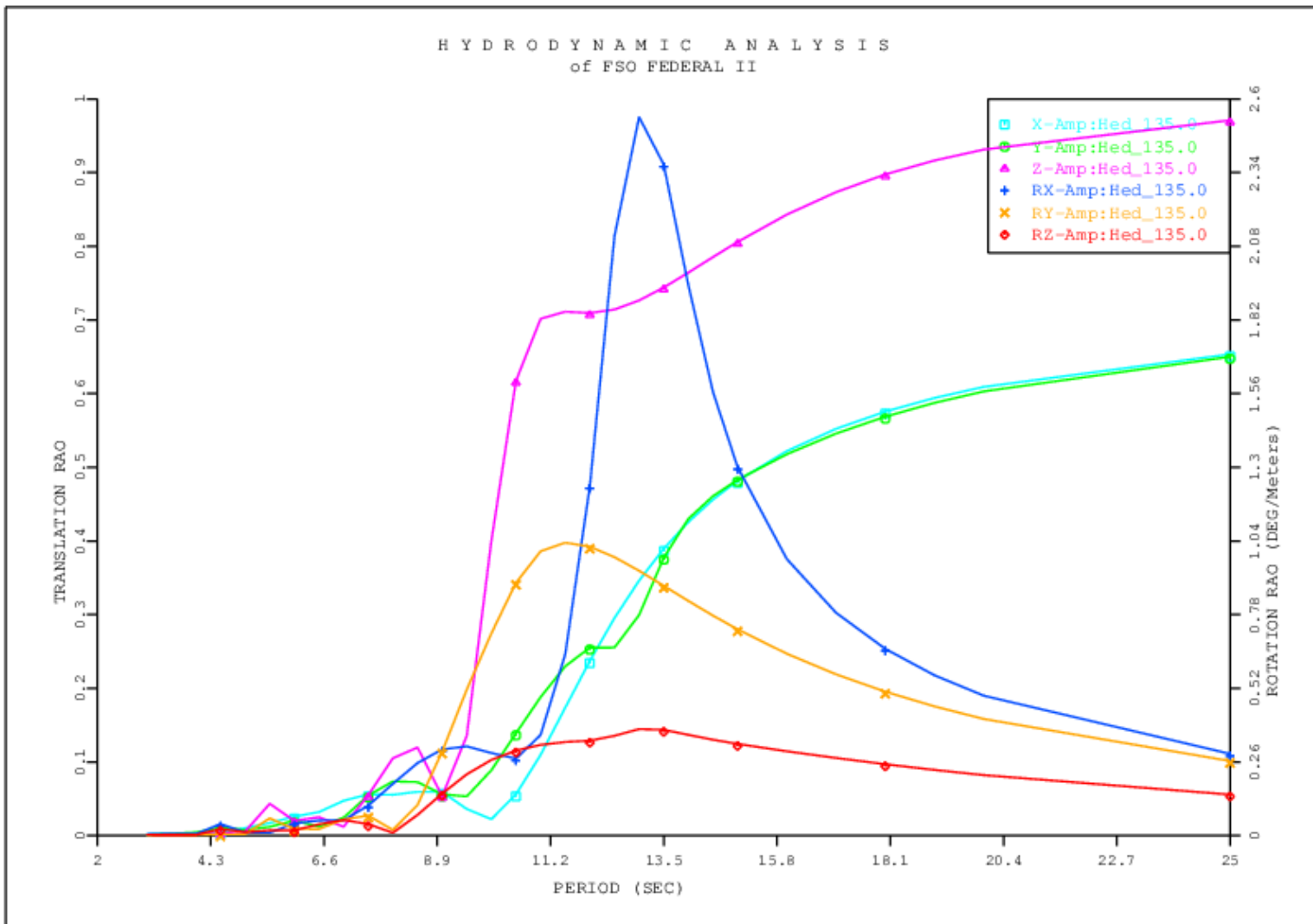
**Gambar A1.1.4** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 67.5<sup>0</sup> kondisi muatan penuh



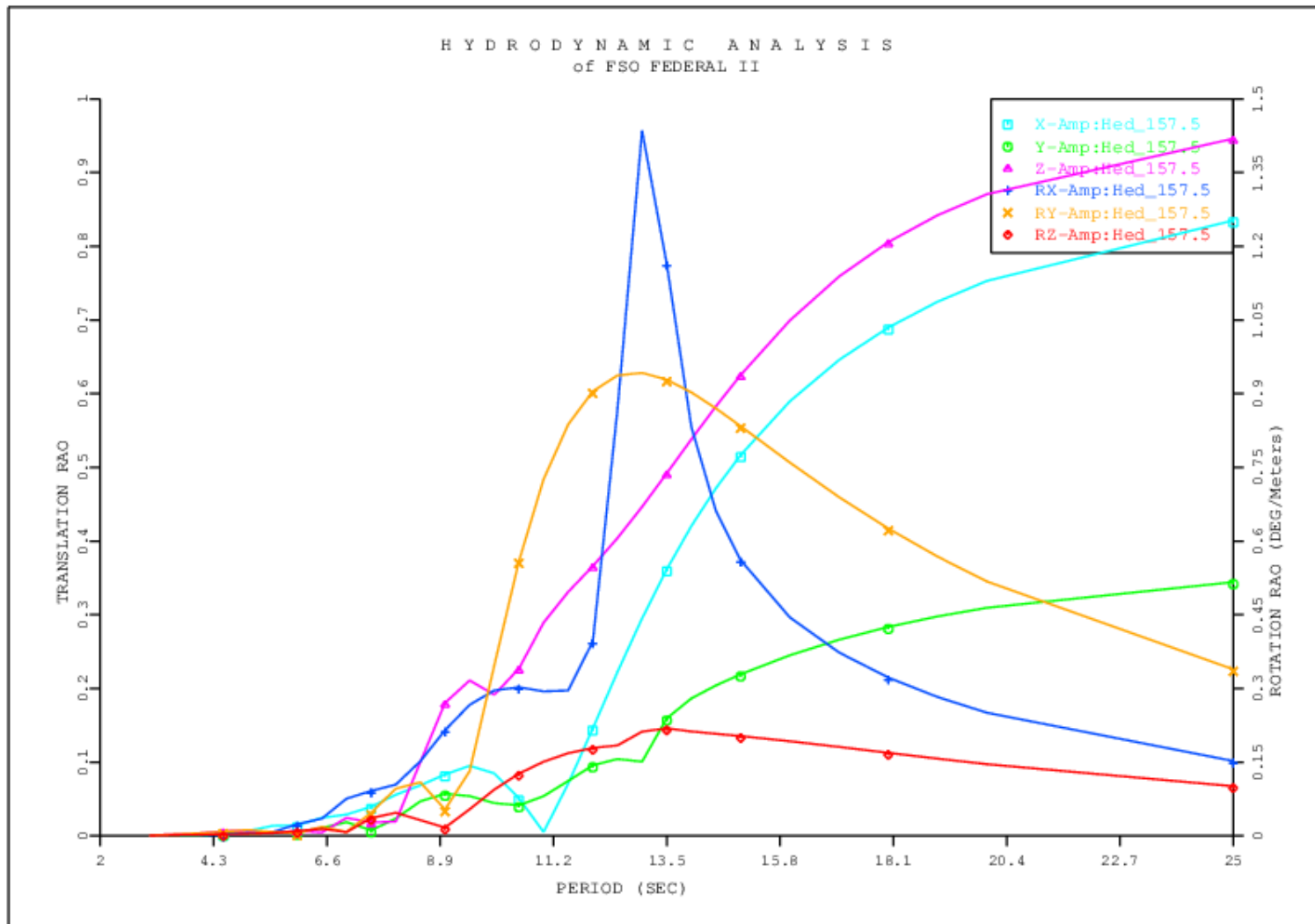
**Gambar A1.1.5** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $90^0$  kondisi muatan penuh



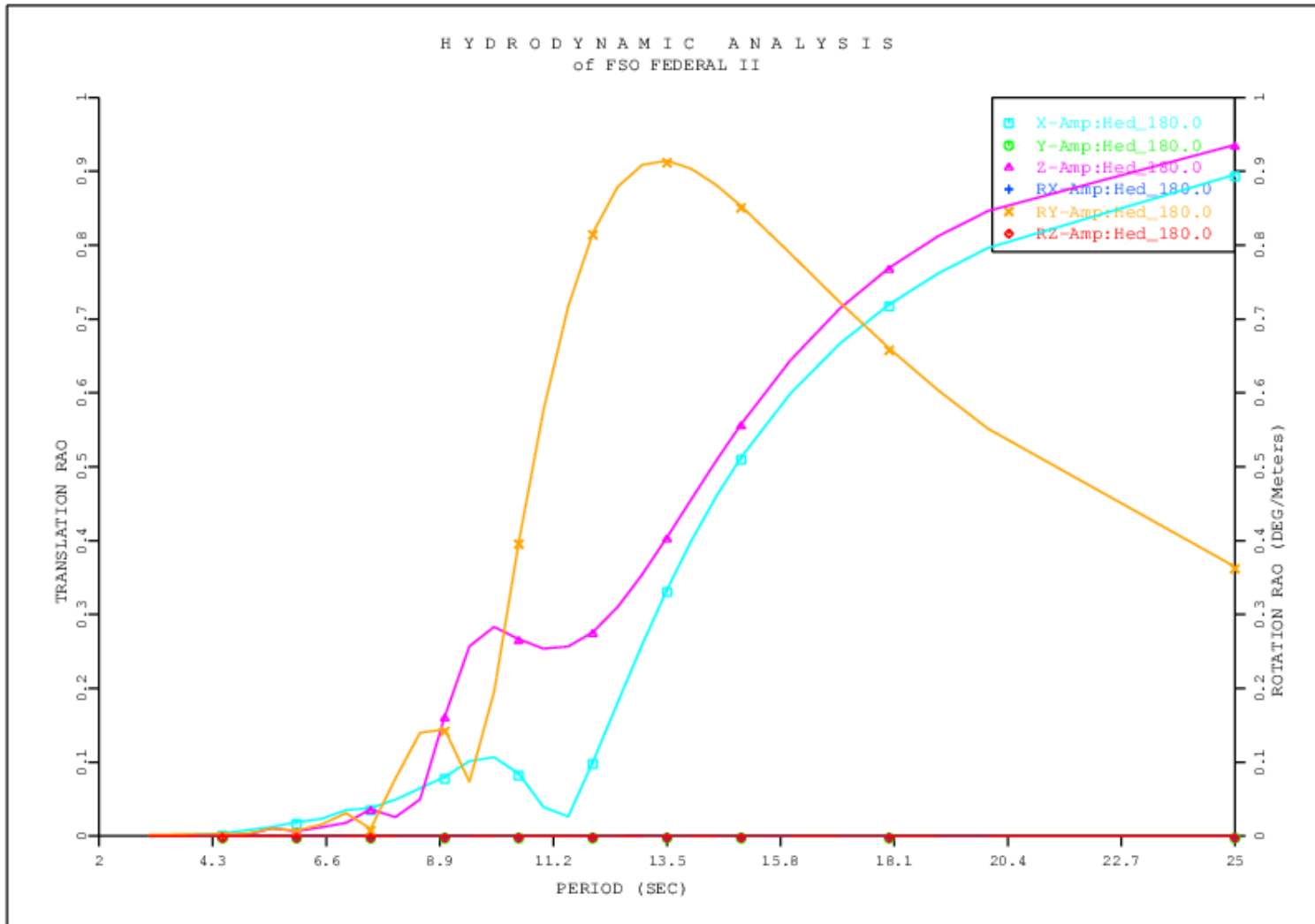
**Gambar A1.1.6** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 112.5<sup>0</sup> kondisi muatan penuh



**Gambar A1.1.7** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 135<sup>0</sup> kondisi muatan penuh

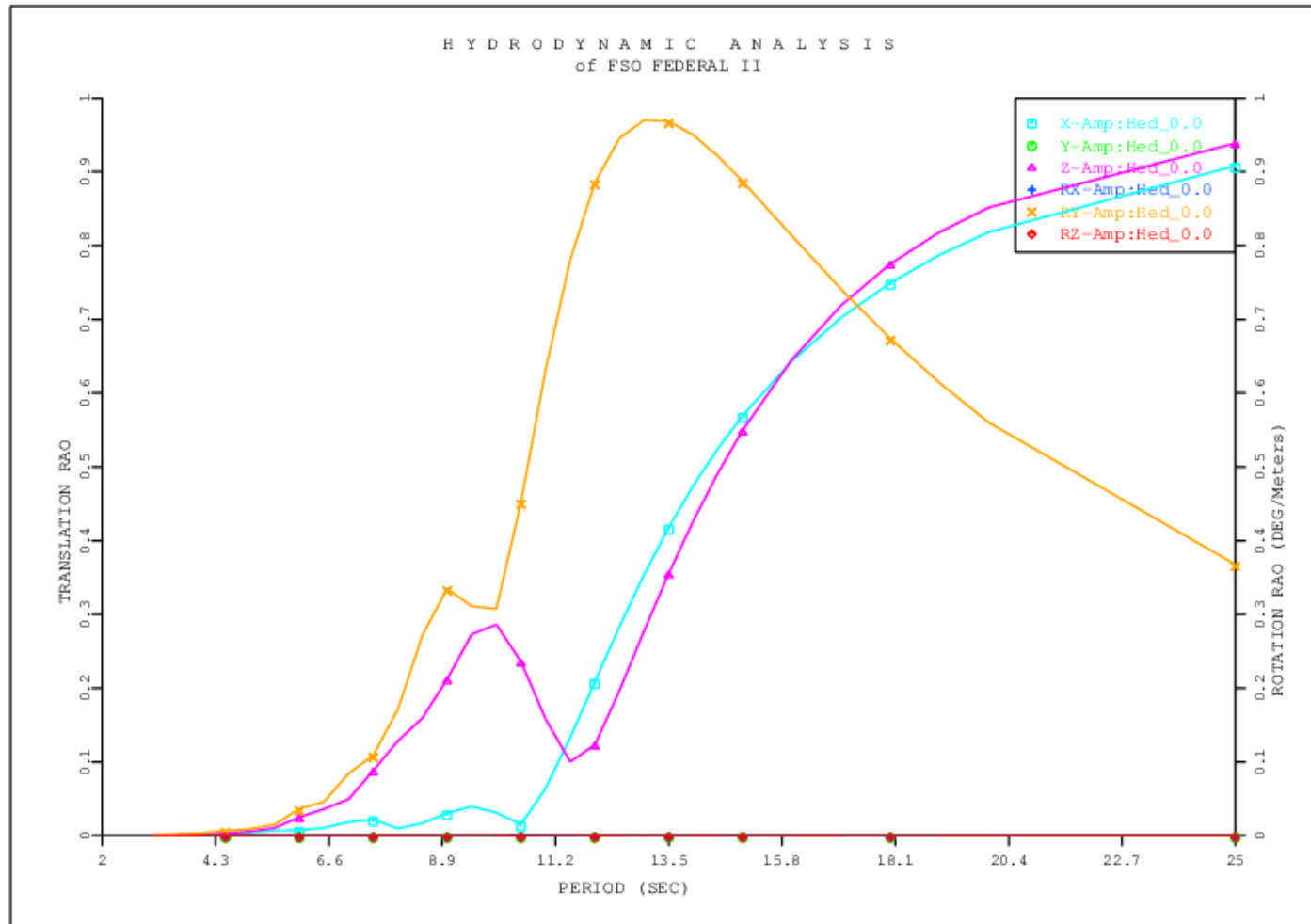


**Gambar A1.1.8** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 157.5<sup>0</sup> kondisi muatan penuh

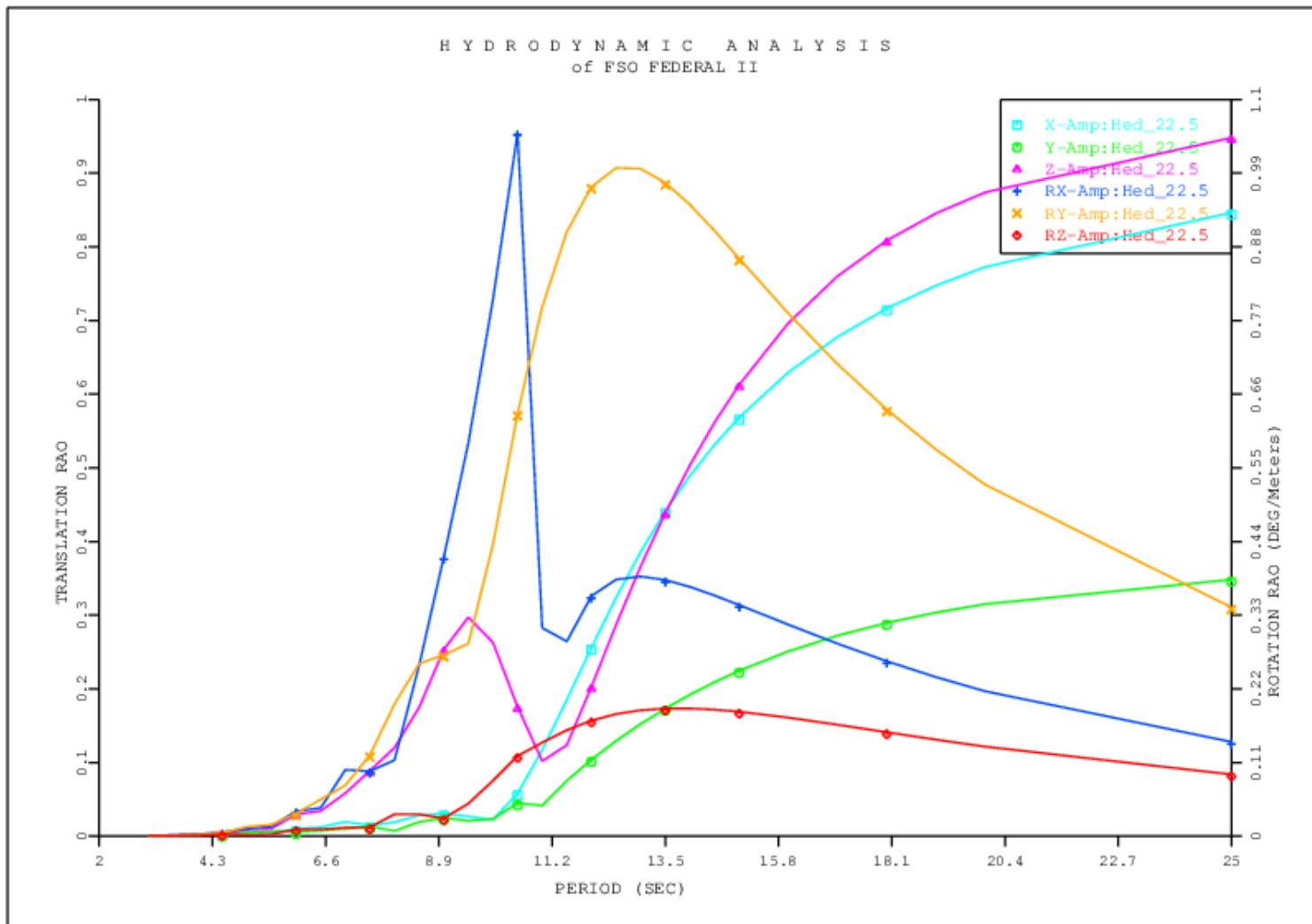


**Gambar A1.1.9** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 180<sup>0</sup> kondisi muatan penuh

### 1.1.2 Case 2 (Load 70%)

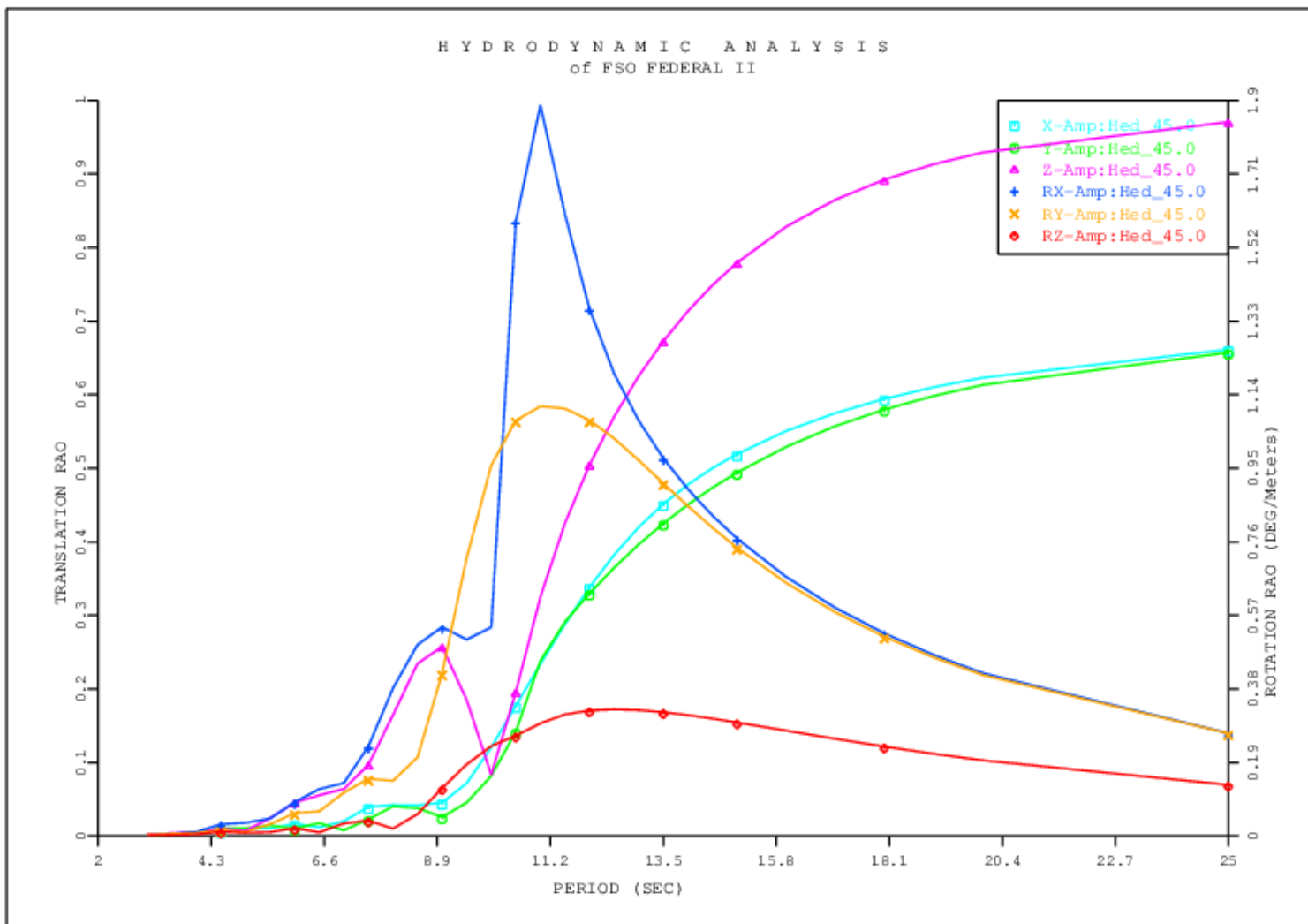


Gambar A1.2.1 RAO free floating FSO Federal II arah pembebanan 0° kondisi muatan 70%

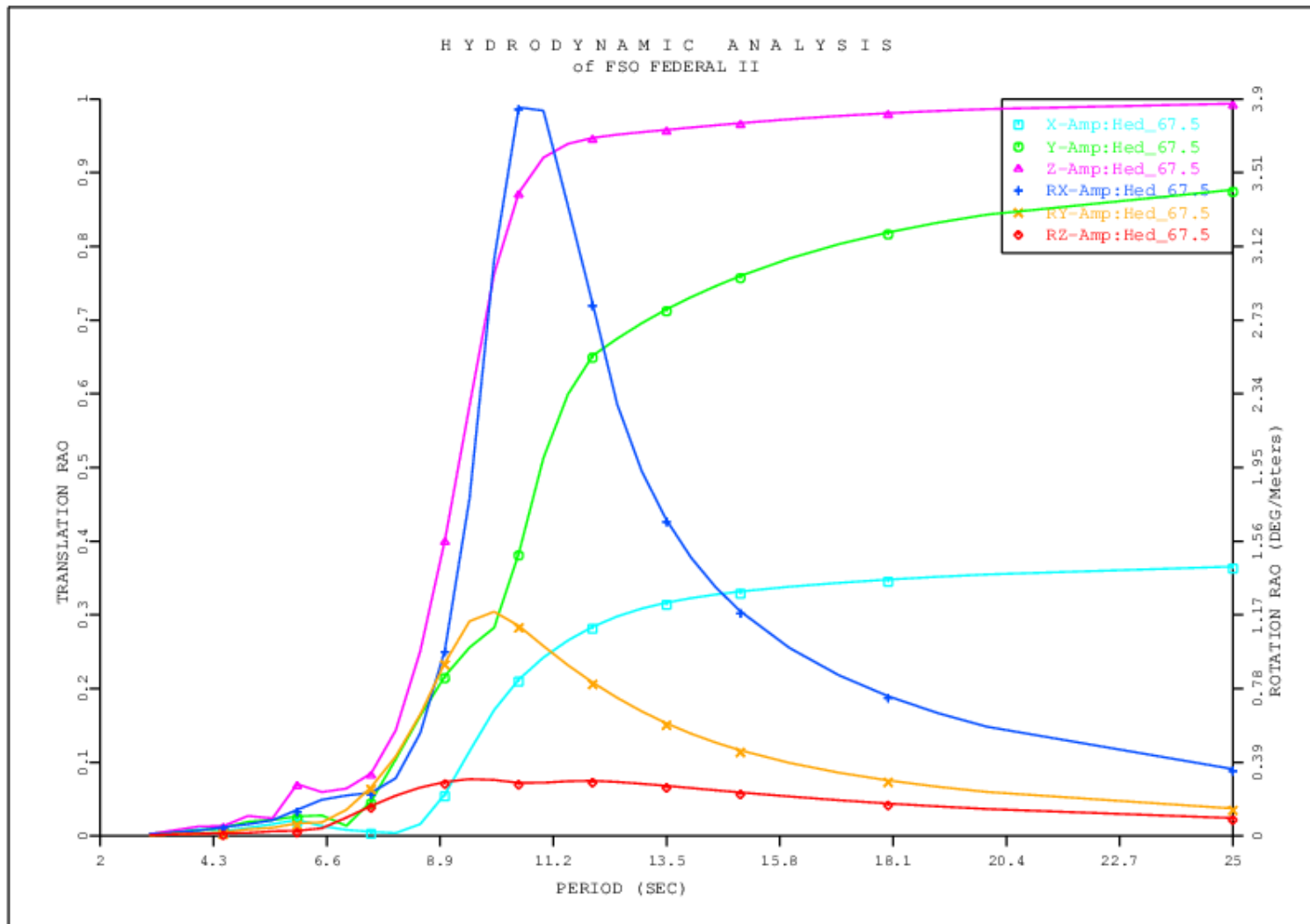


**Gambar A1.2.2** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $22.5^0$  kondisi muatan 70%

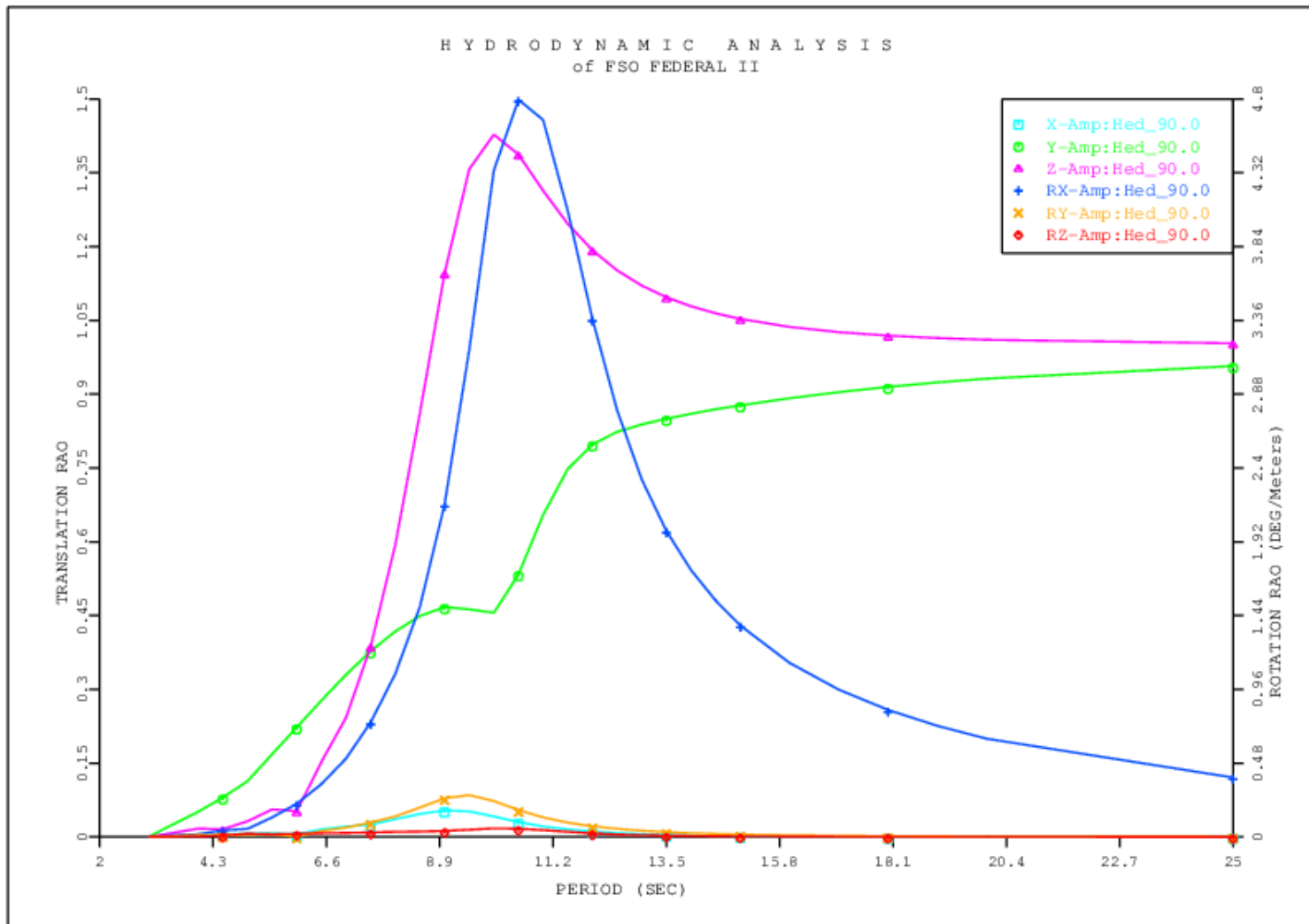




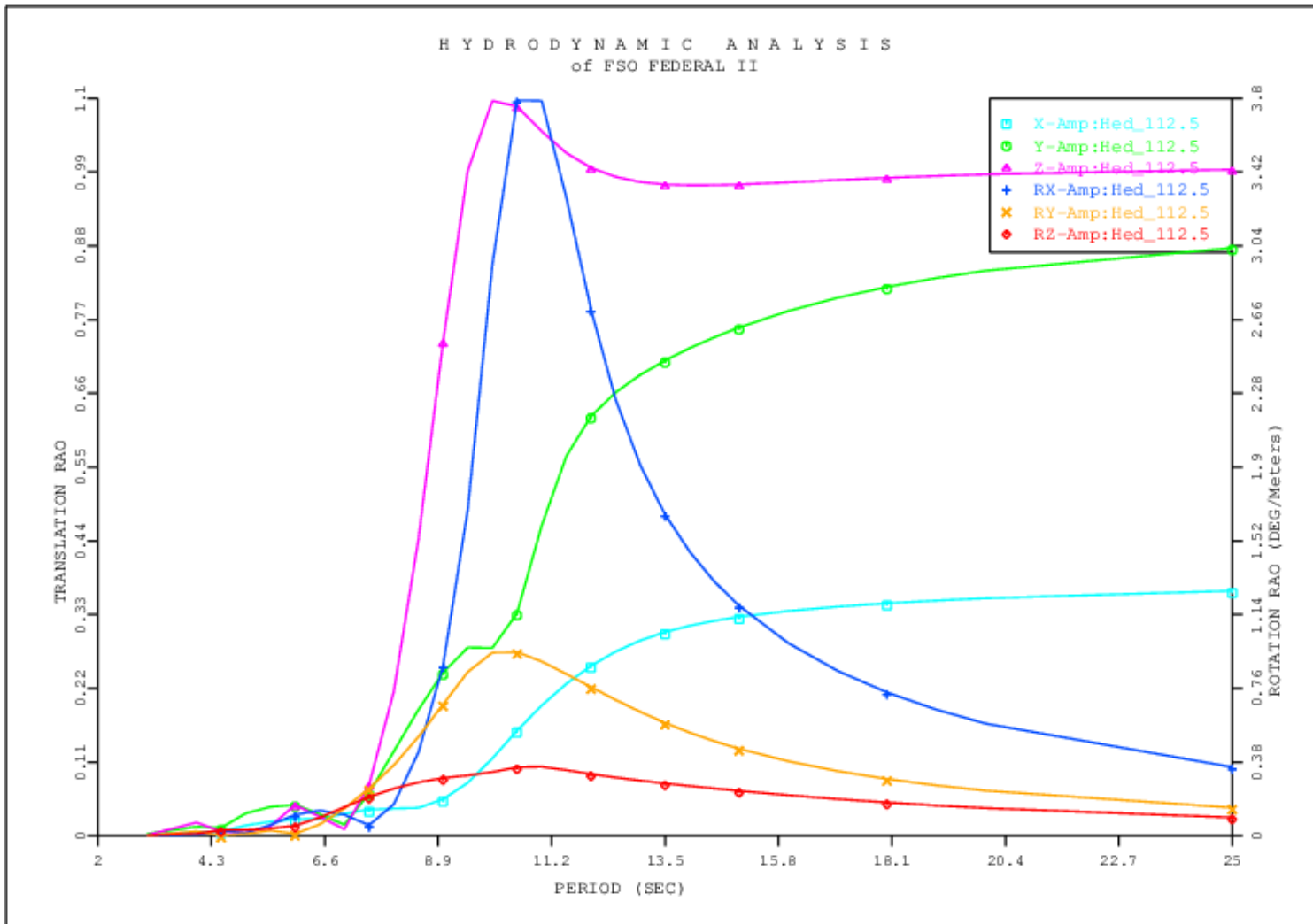
**Gambar A1.2.3** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 45<sup>0</sup> kondisi muatan 70%



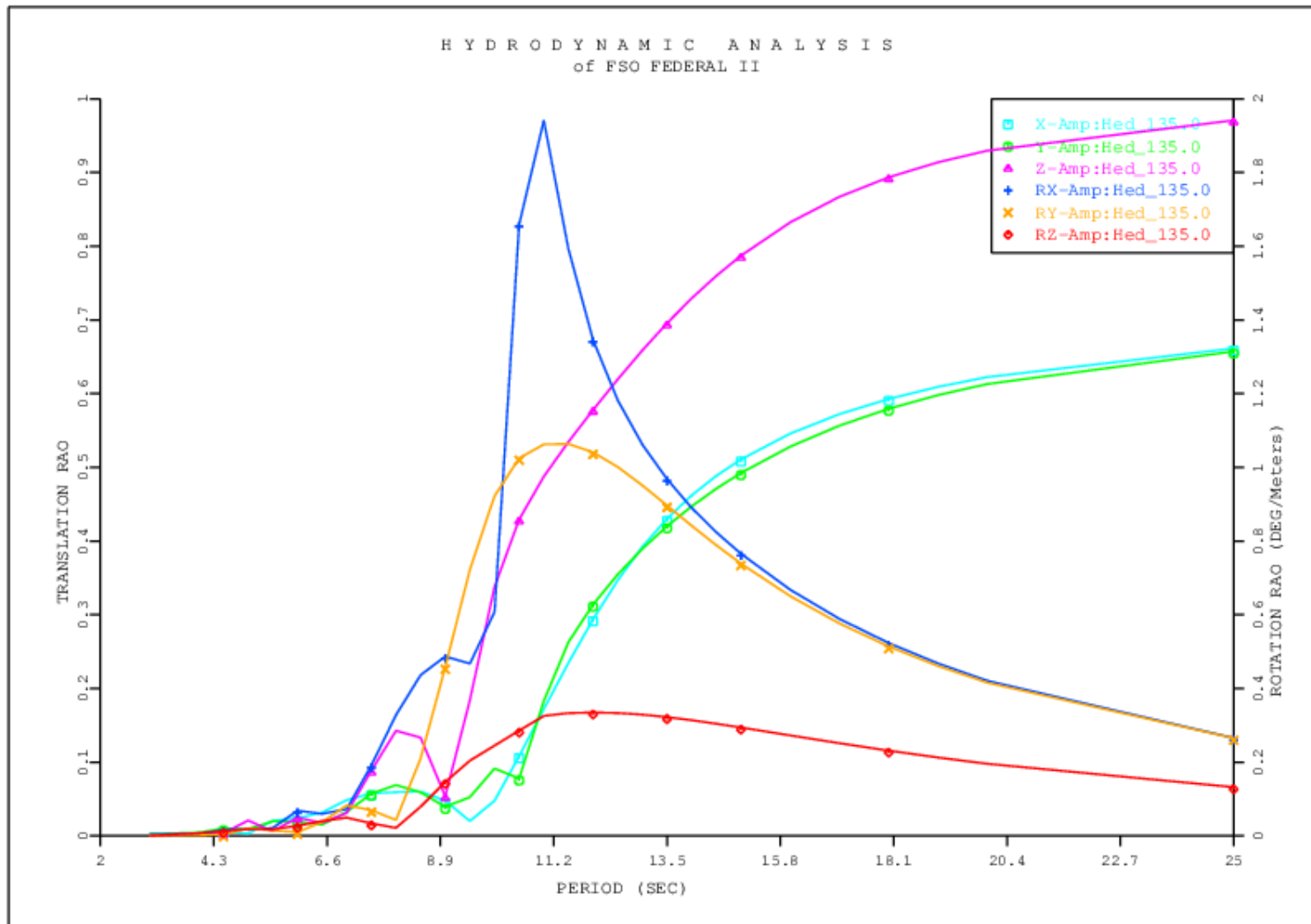
**Gambar A1.2.4** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $67.5^0$  kondisi muatan 70%



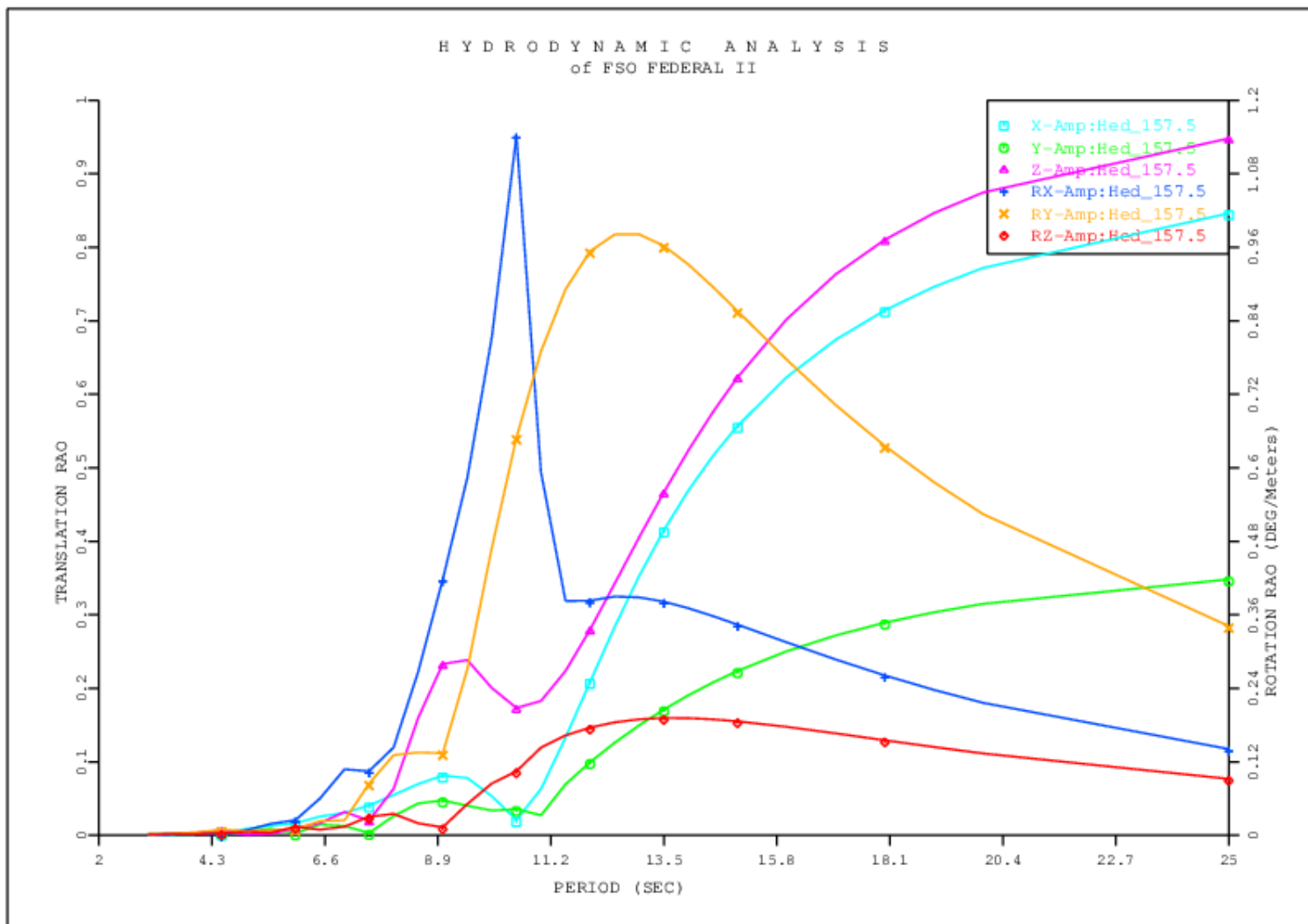
**Gambar A1.2.5** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $90^0$  kondisi muatan 70%



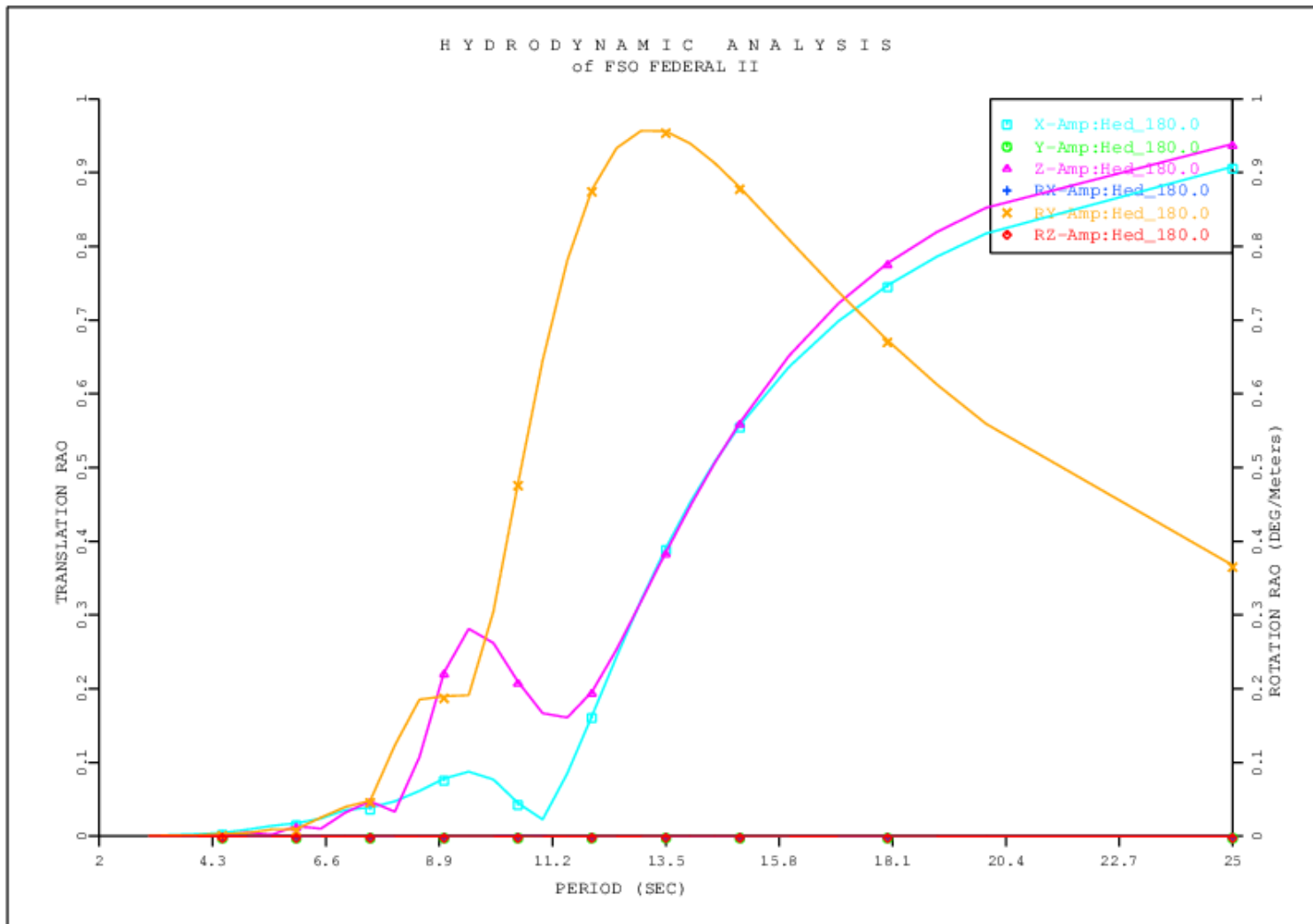
**Gambar A1.2.6** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $112.5^0$  kondisi muatan 70%



**Gambar A1.2.7** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 135° kondisi muatan 70%

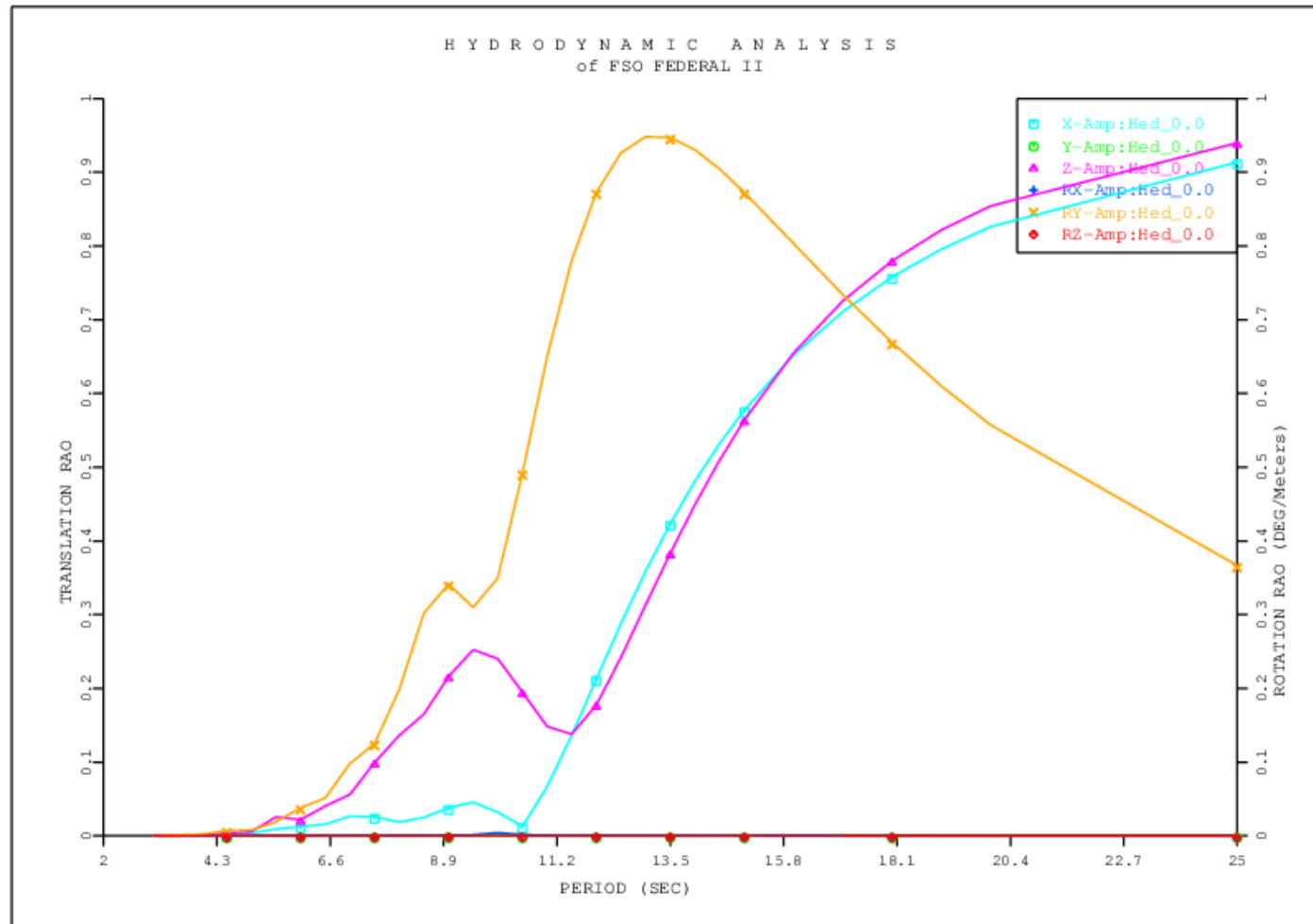


**Gambar A1.2.8** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $157.5^{\circ}$  kondisi muatan 70%



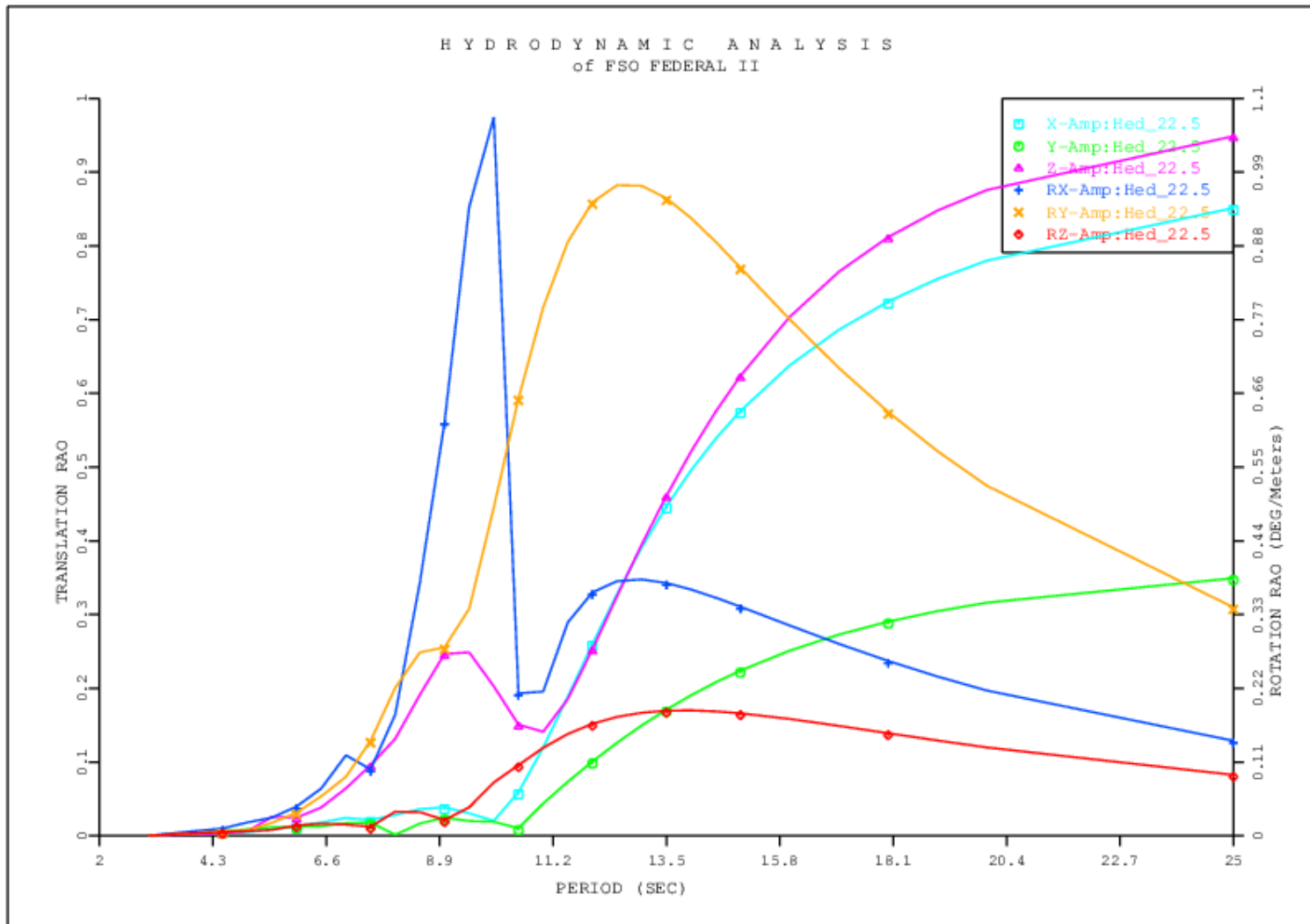
**Gambar A1.2.9** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 180<sup>0</sup> kondisi muatan 70%

### 1.1.3 Case 3 (Load 40%)

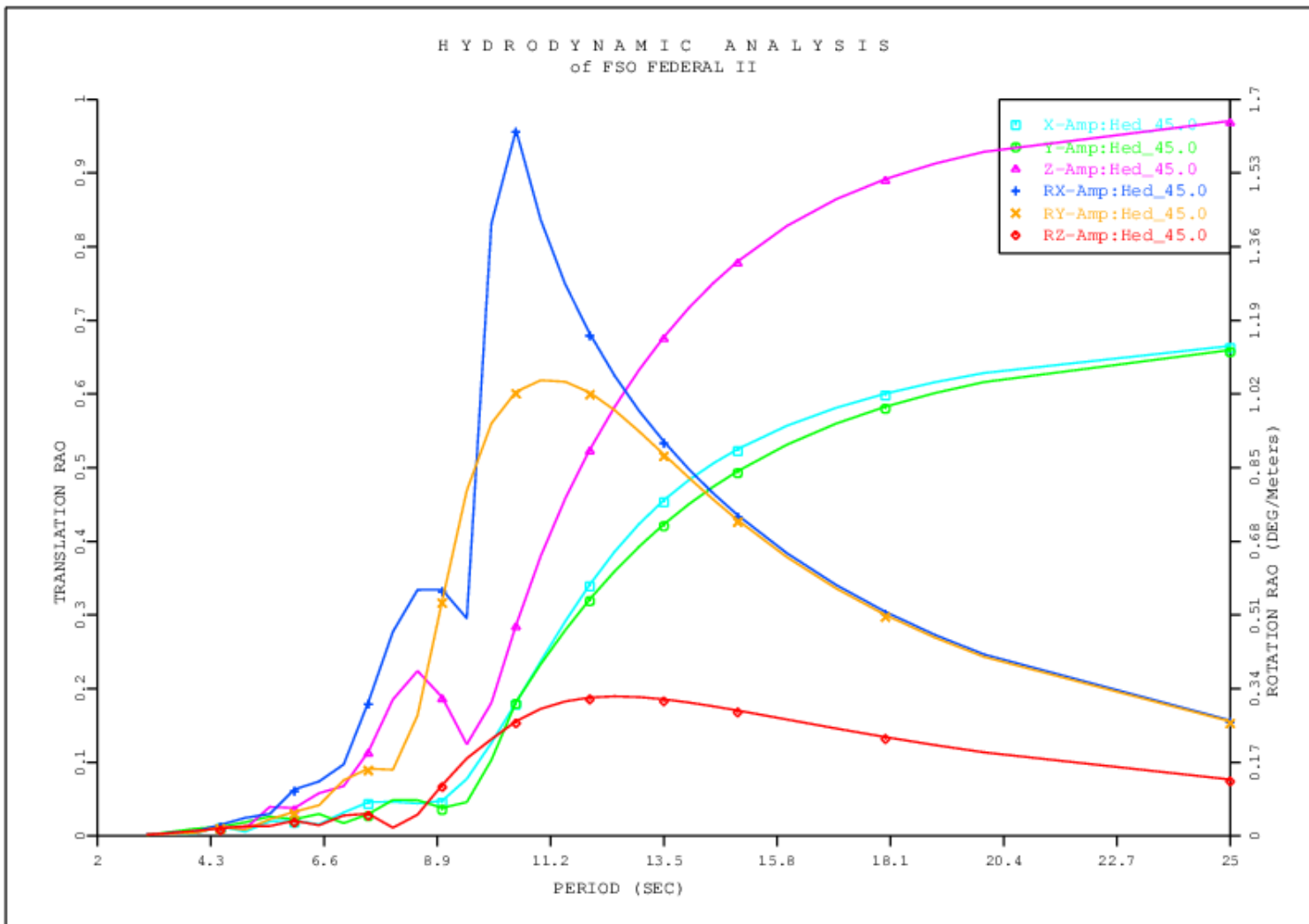


**Gambar A1.3.1** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $0^0$  kondisi muatan 40%

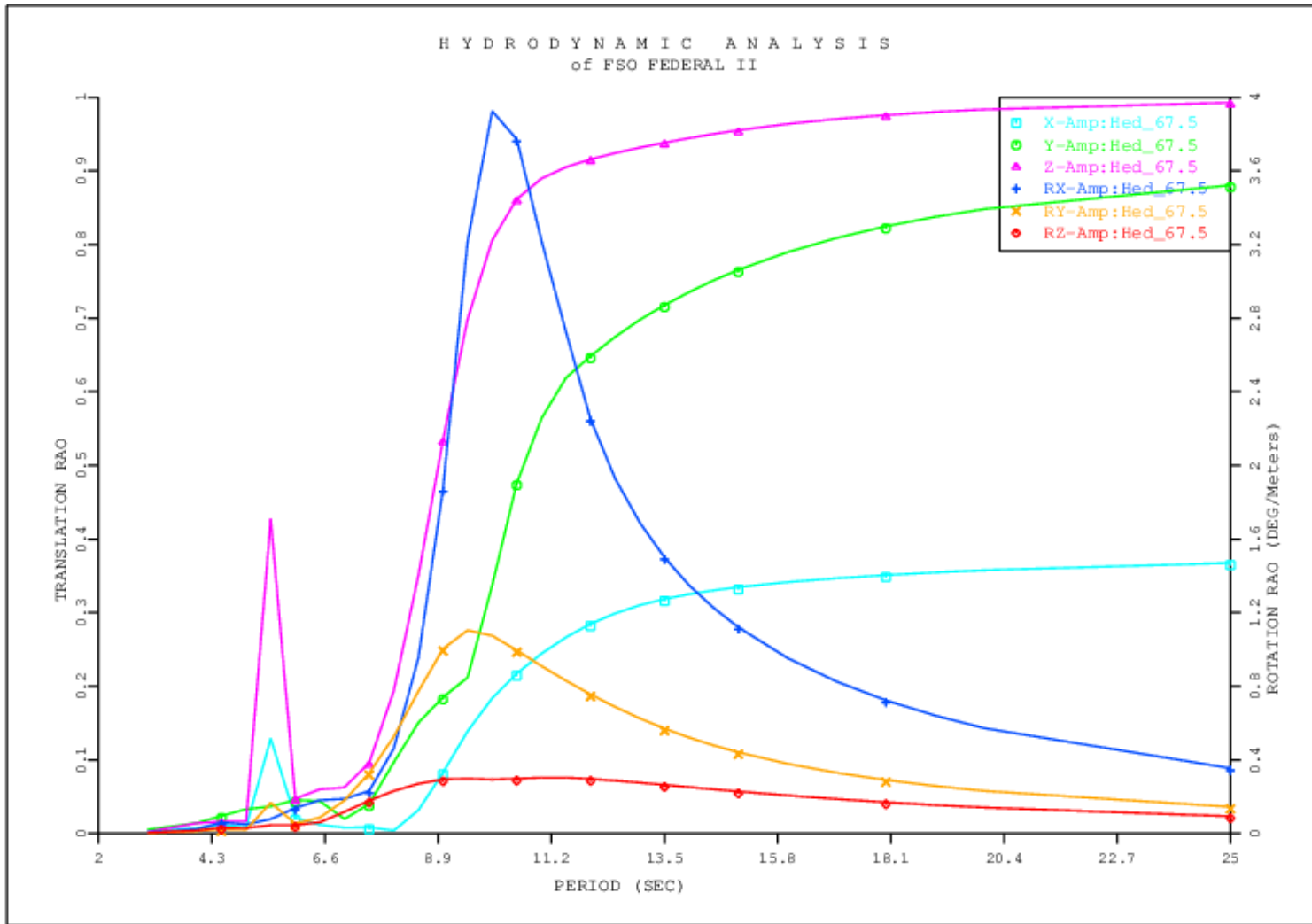




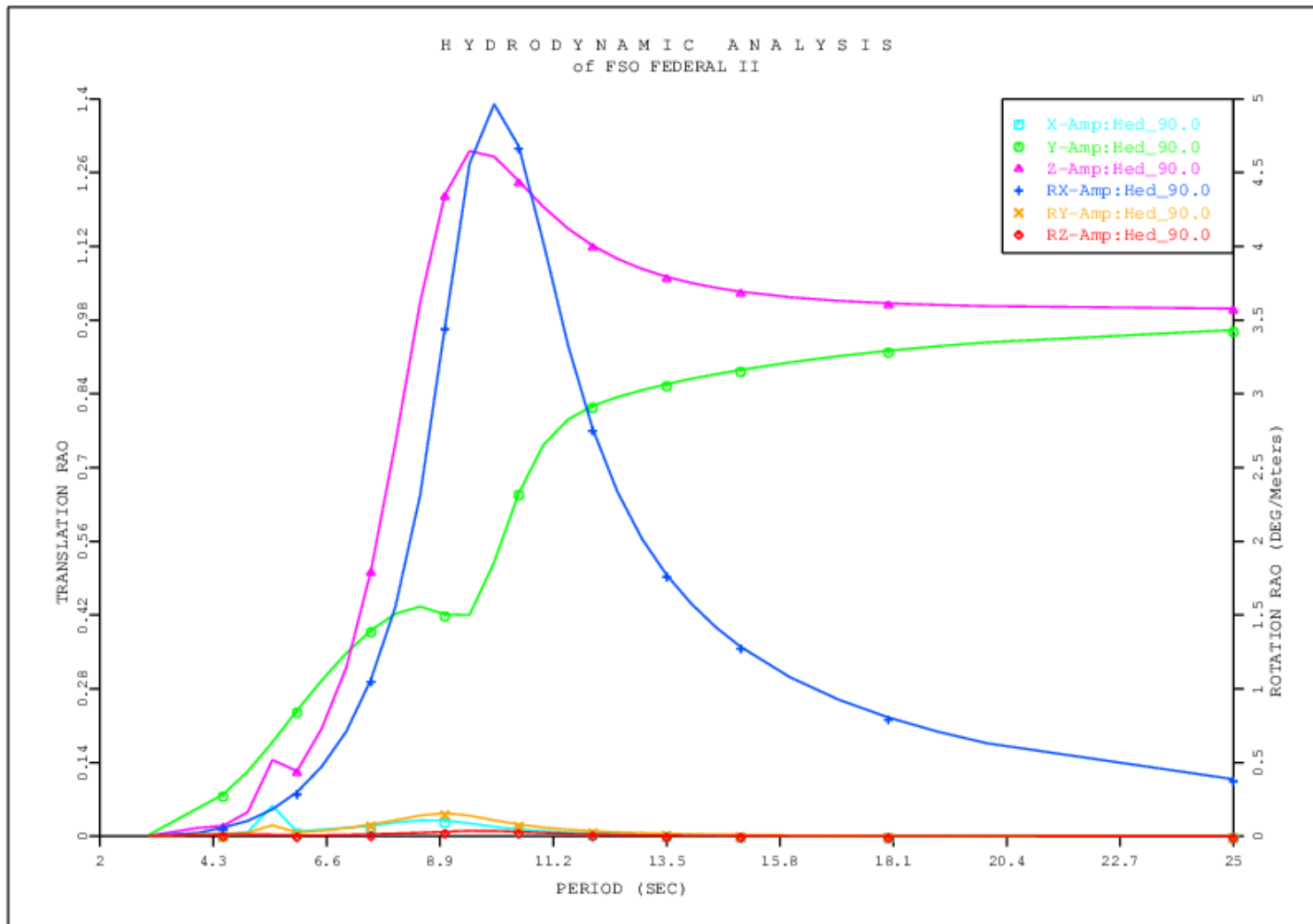
**Gambar A1.3.2** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $22.5^0$  kondisi muatan 40%



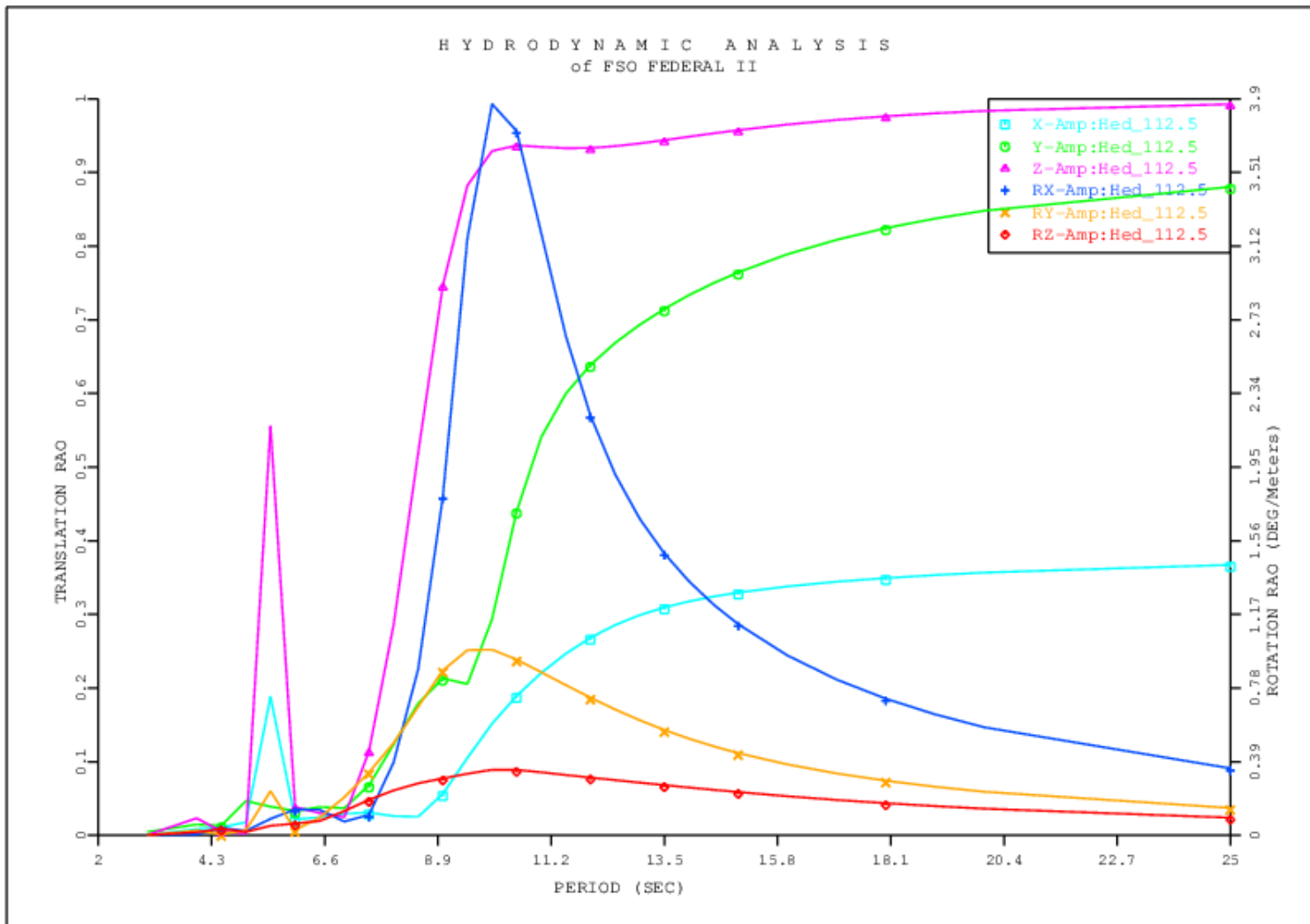
**Gambar A1.3.3** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 45<sup>0</sup> kondisi muatan 40%



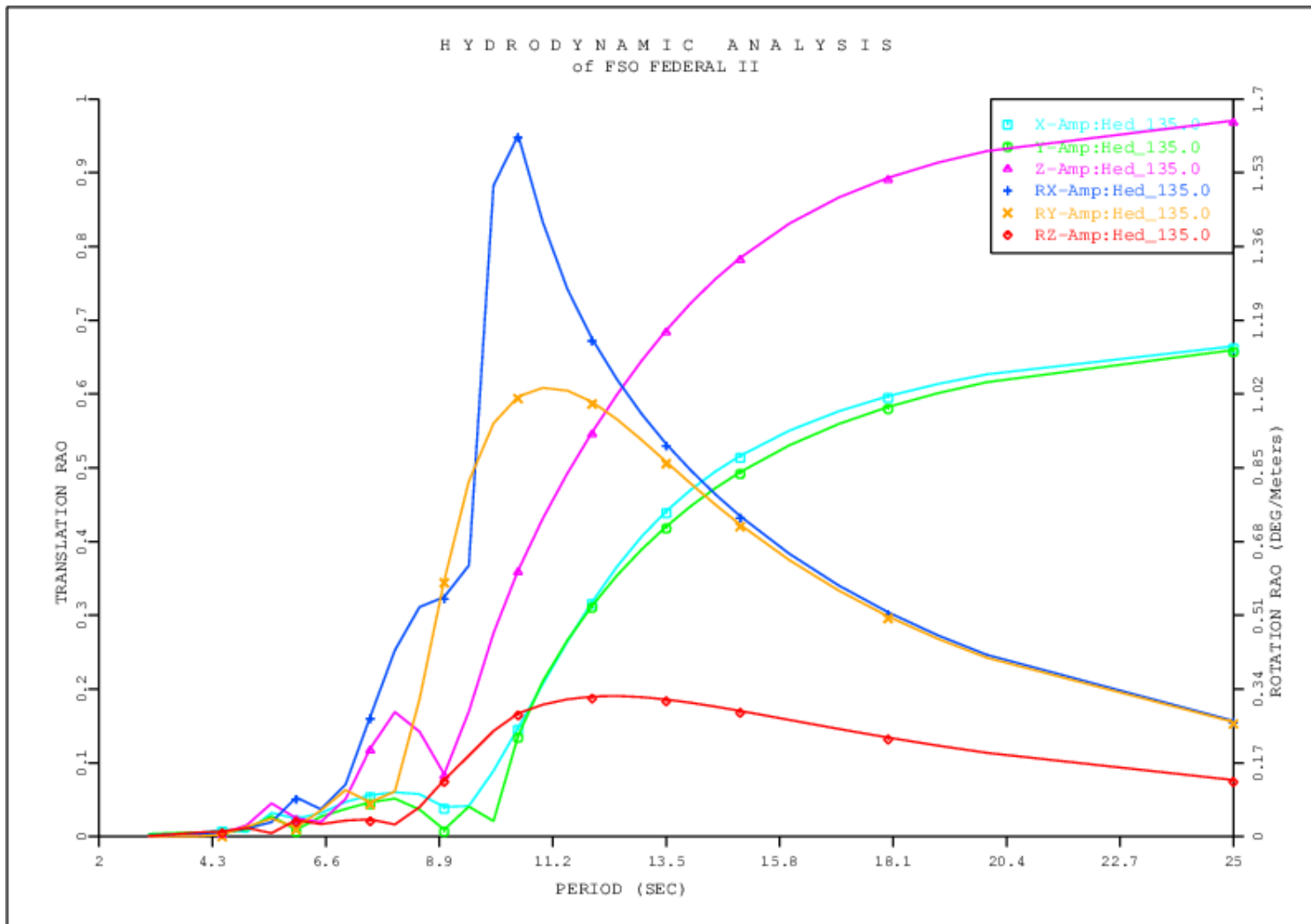
**Gambar A1.3.4** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 67.5<sup>0</sup> kondisi muatan 40%



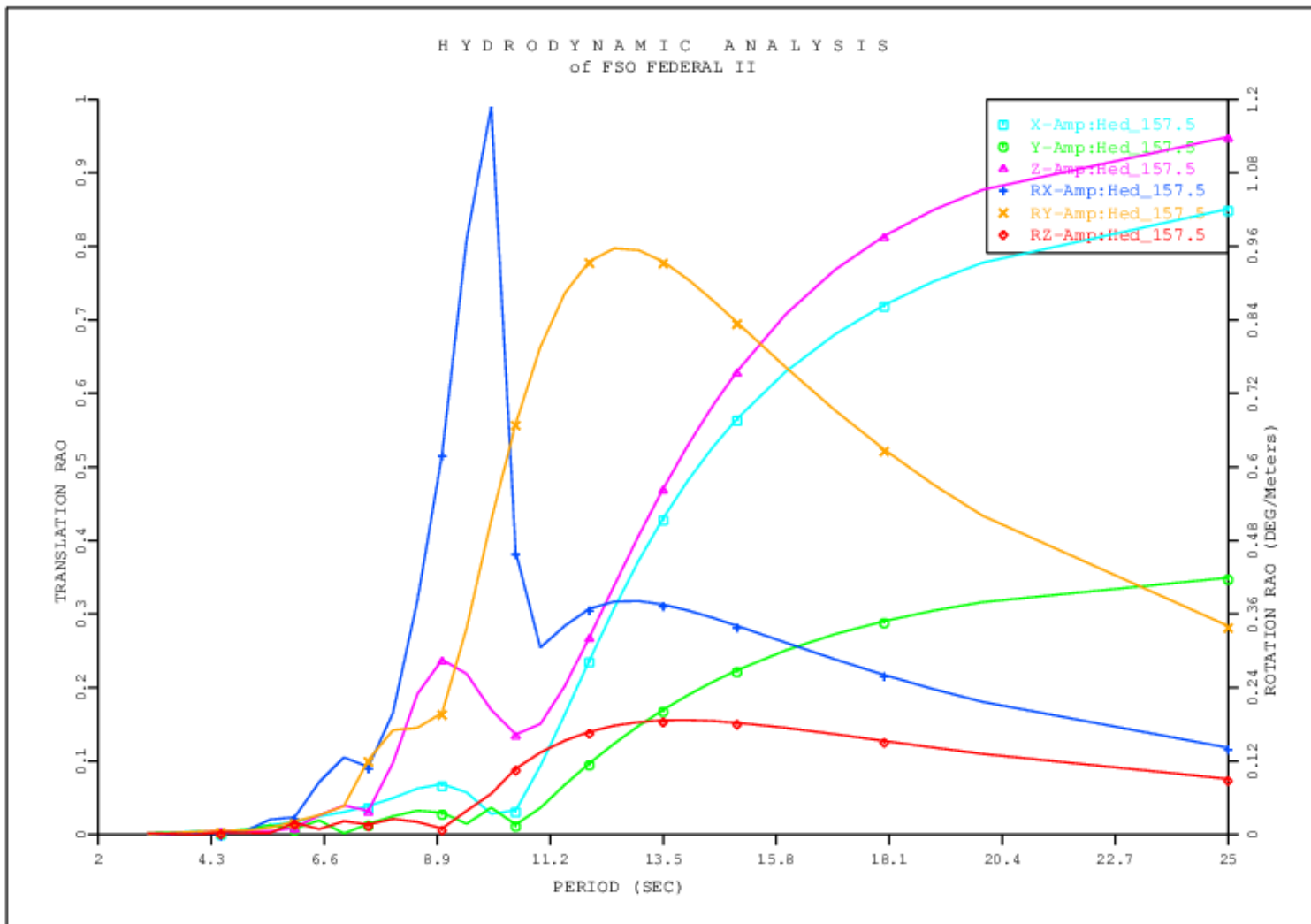
**Gambar A1.3.5** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $90^0$  kondisi muatan 40%



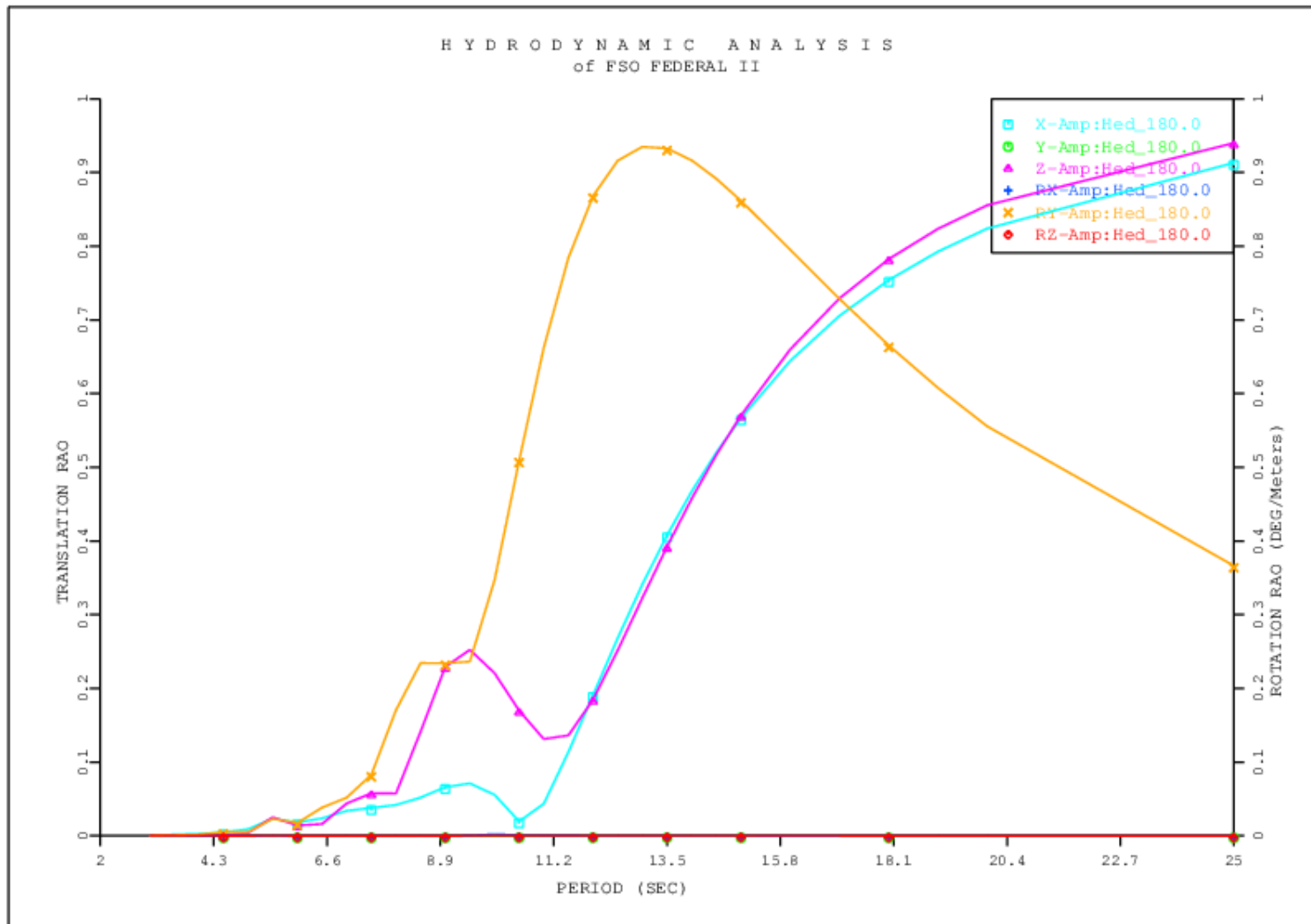
**Gambar A1.3.6** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $112.5^0$  kondisi muatan 40%



**Gambar A1.3.7** RAO free floating FSO Federal II arah pembebanan 135<sup>0</sup> kondisi muatan 40%



**Gambar A1.3.8** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan  $157.5^{\circ}$  kondisi muatan 40%

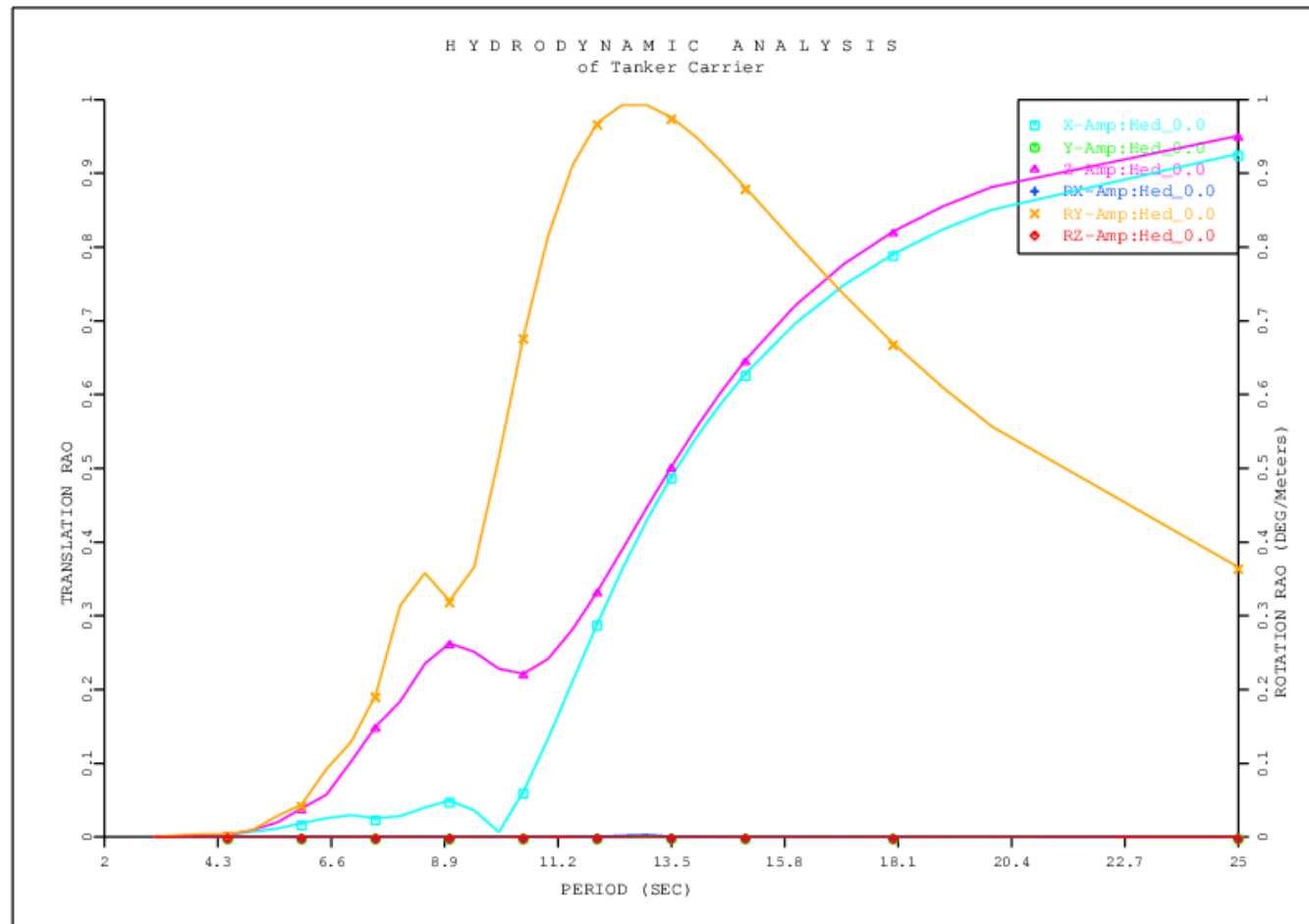


**Gambar A1.3.9** RAO *free floating* FSO Federal II arah pembebanan 180<sup>0</sup> kondisi muatan 40%

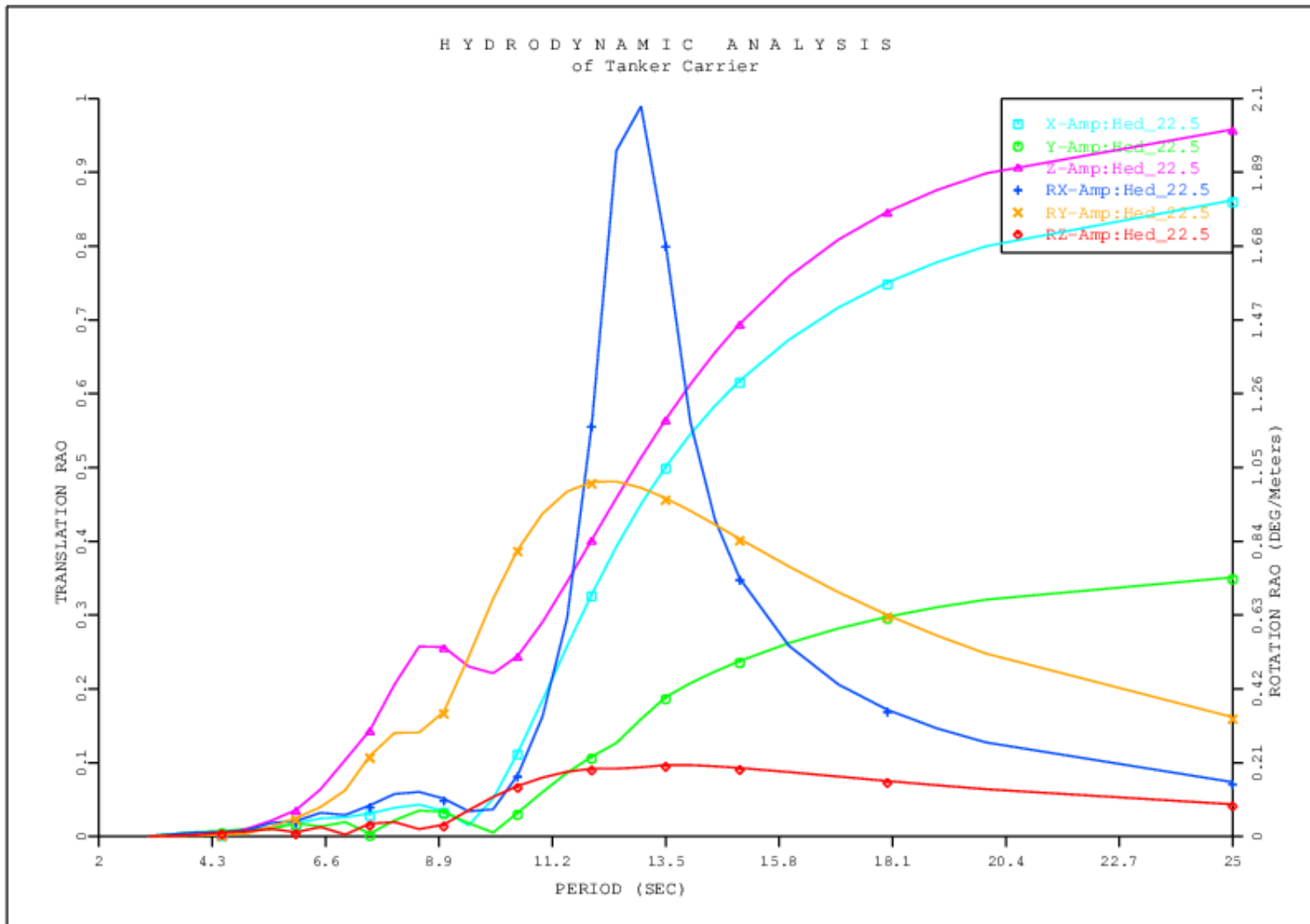


## 1.2 RAO Tanker

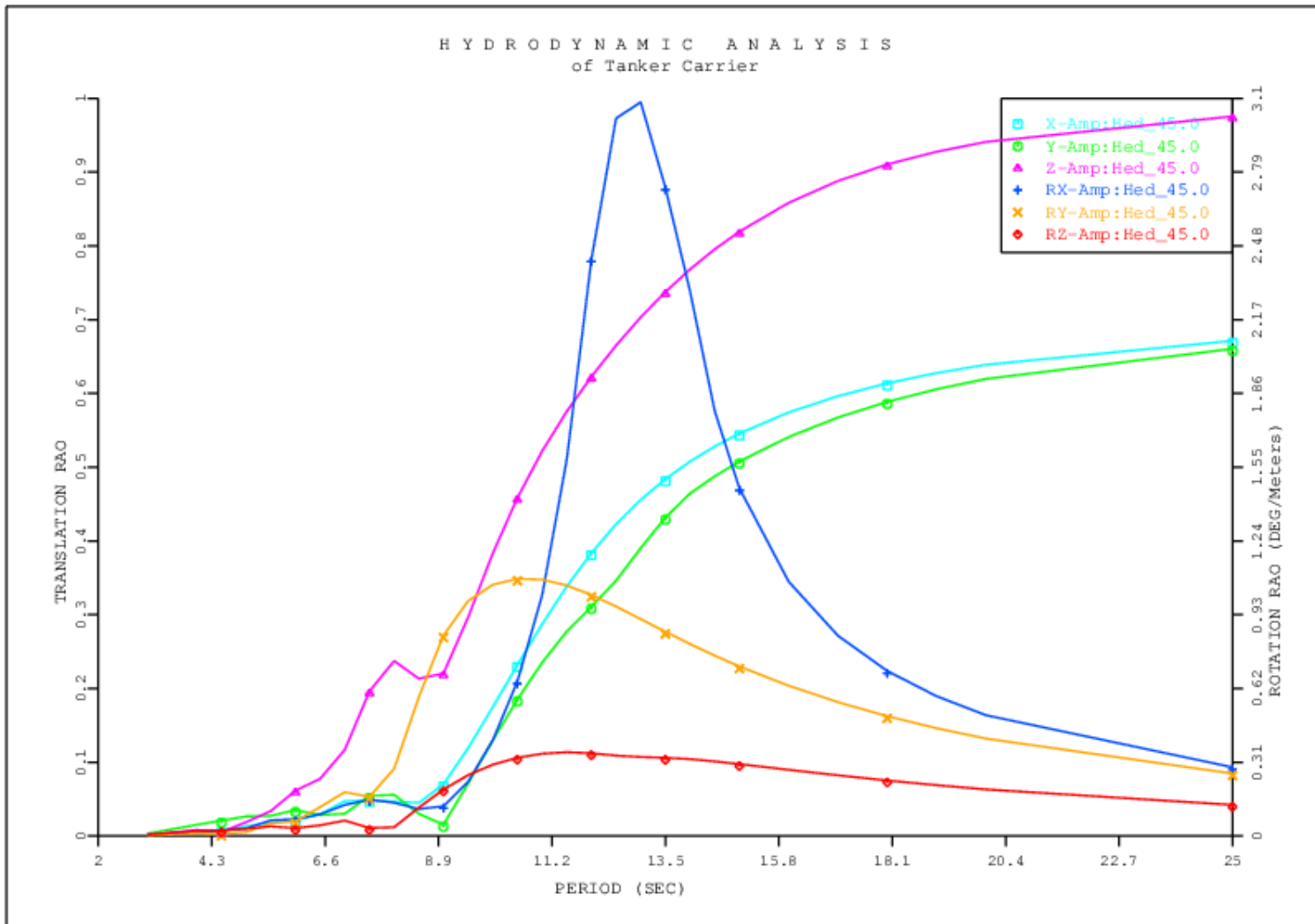
### 1.2.1 Case 1 (Ballasted)



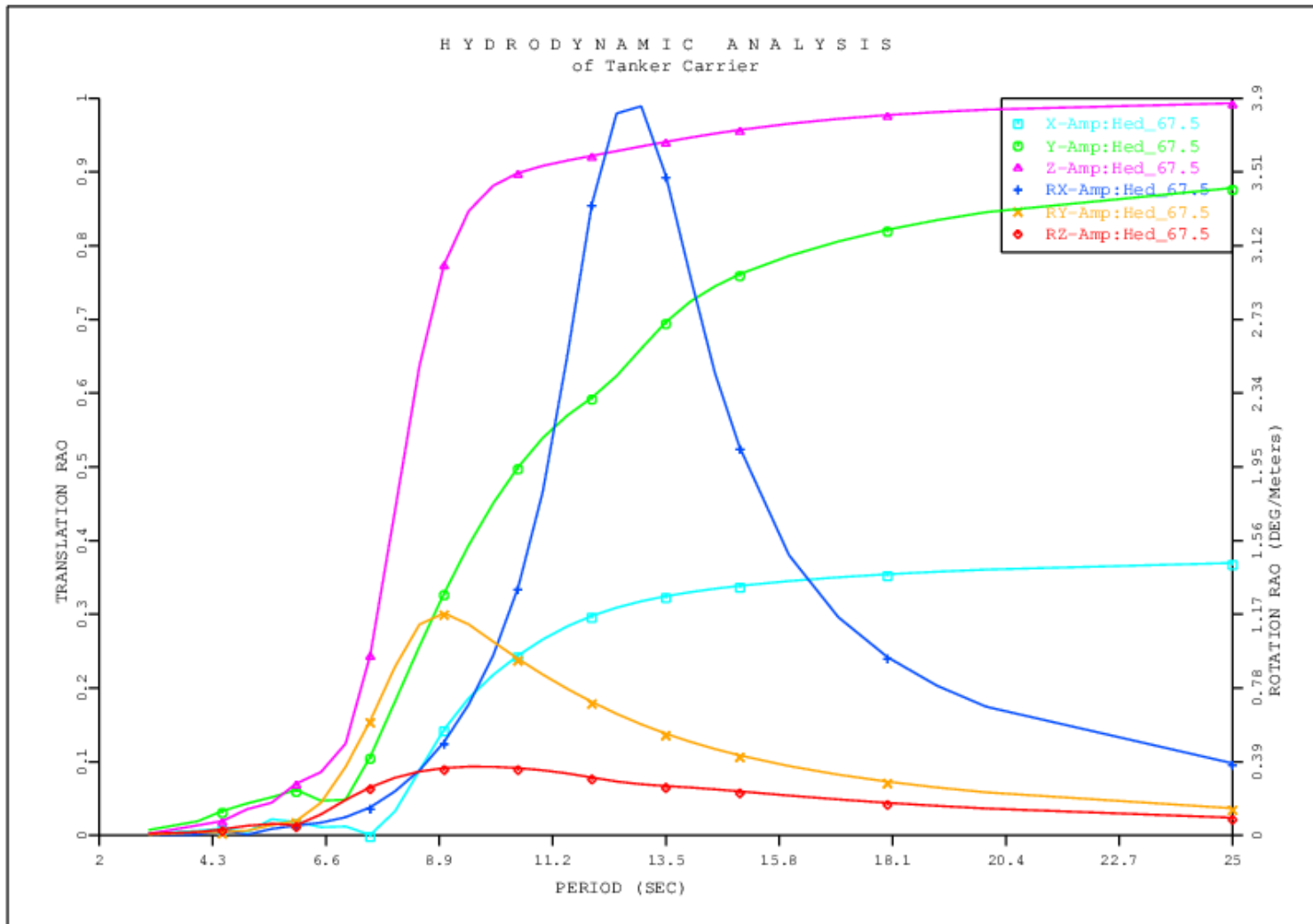
Gambar A2.1.1 RAO free floating kapal tanker arah pembebanan  $0^0$  kondisi ballasted



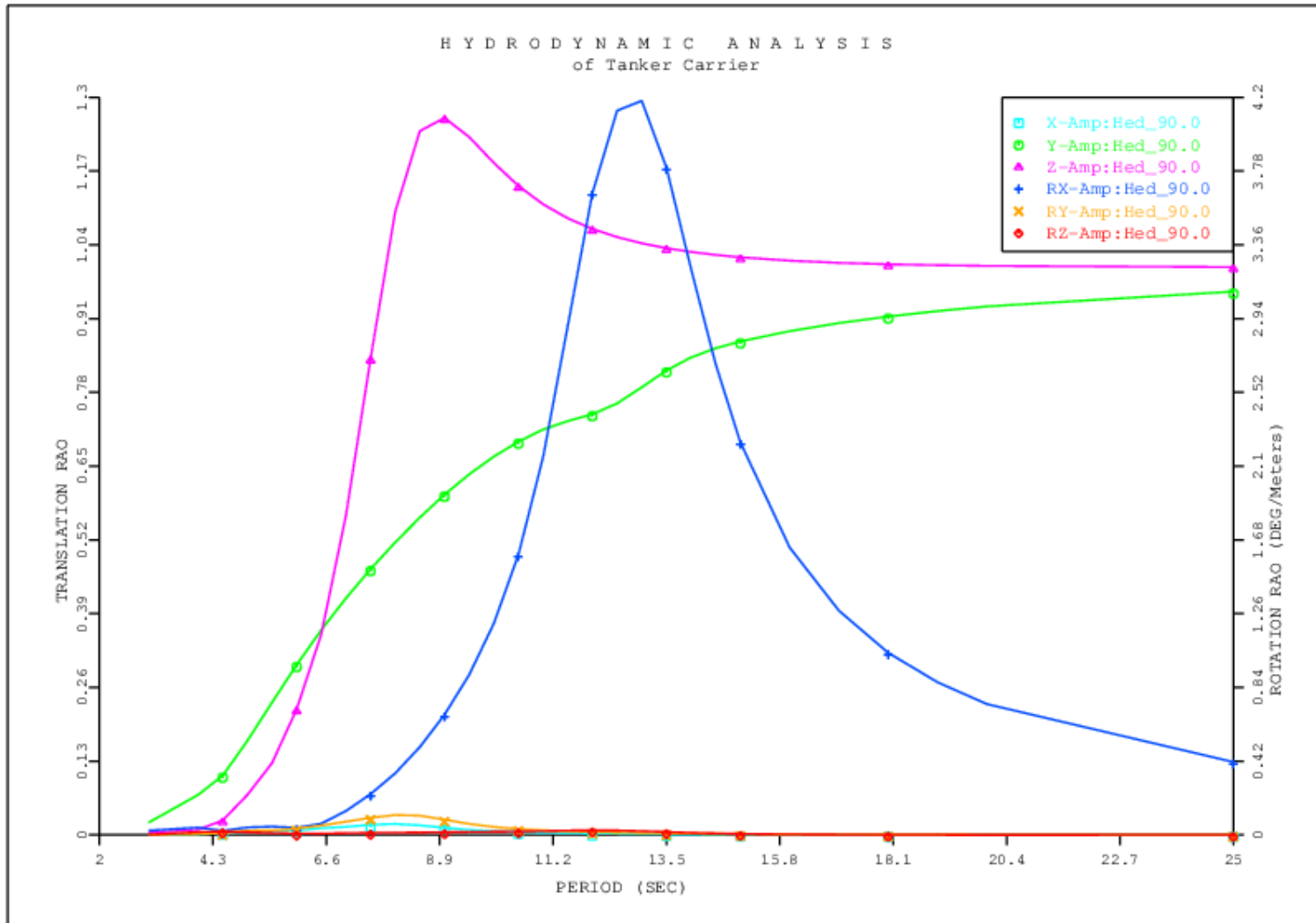
**Gambar A2.1.2** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 22.5° kondisi *ballasted*



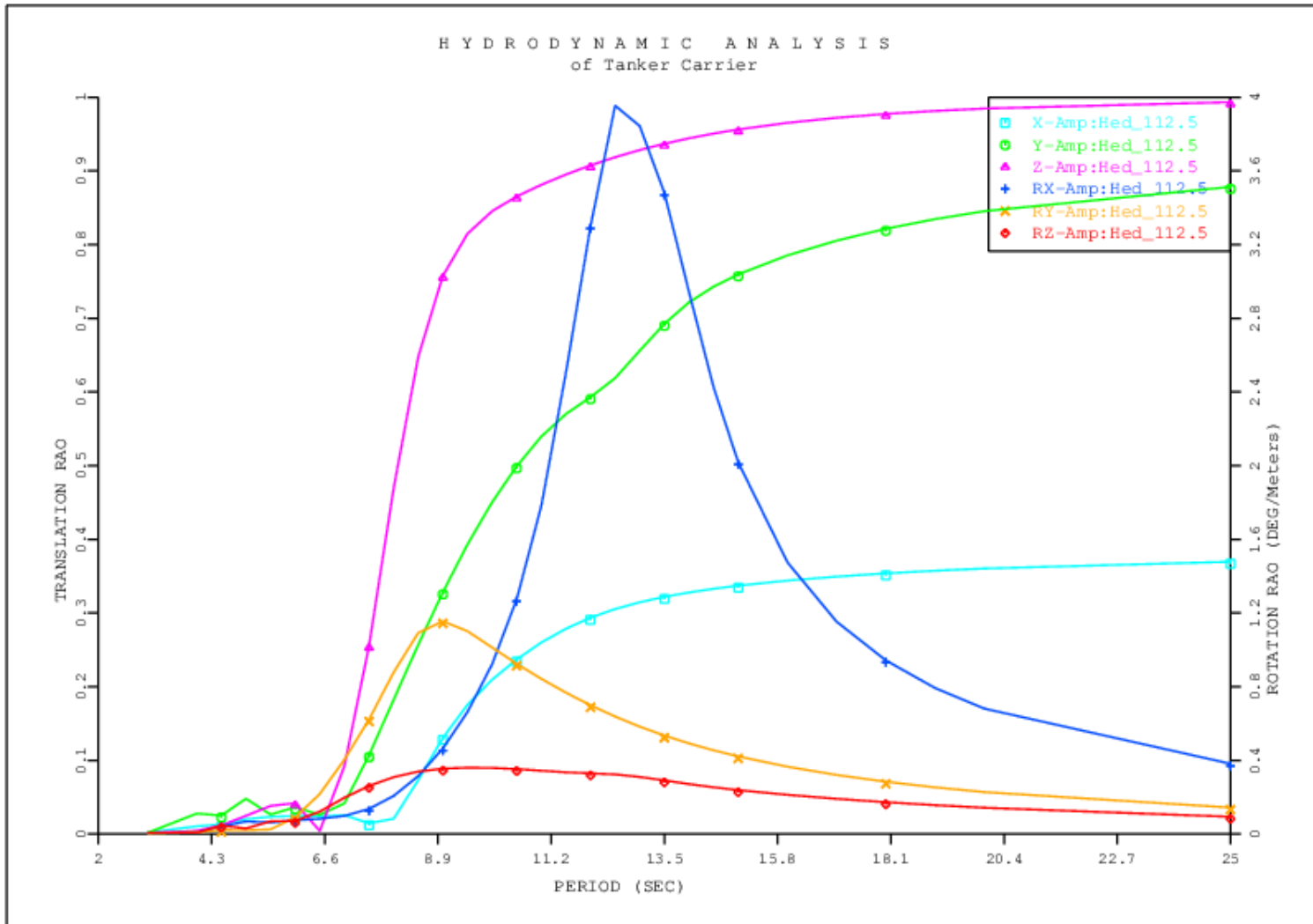
**Gambar A2.1.3** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 45° kondisi *ballasted*



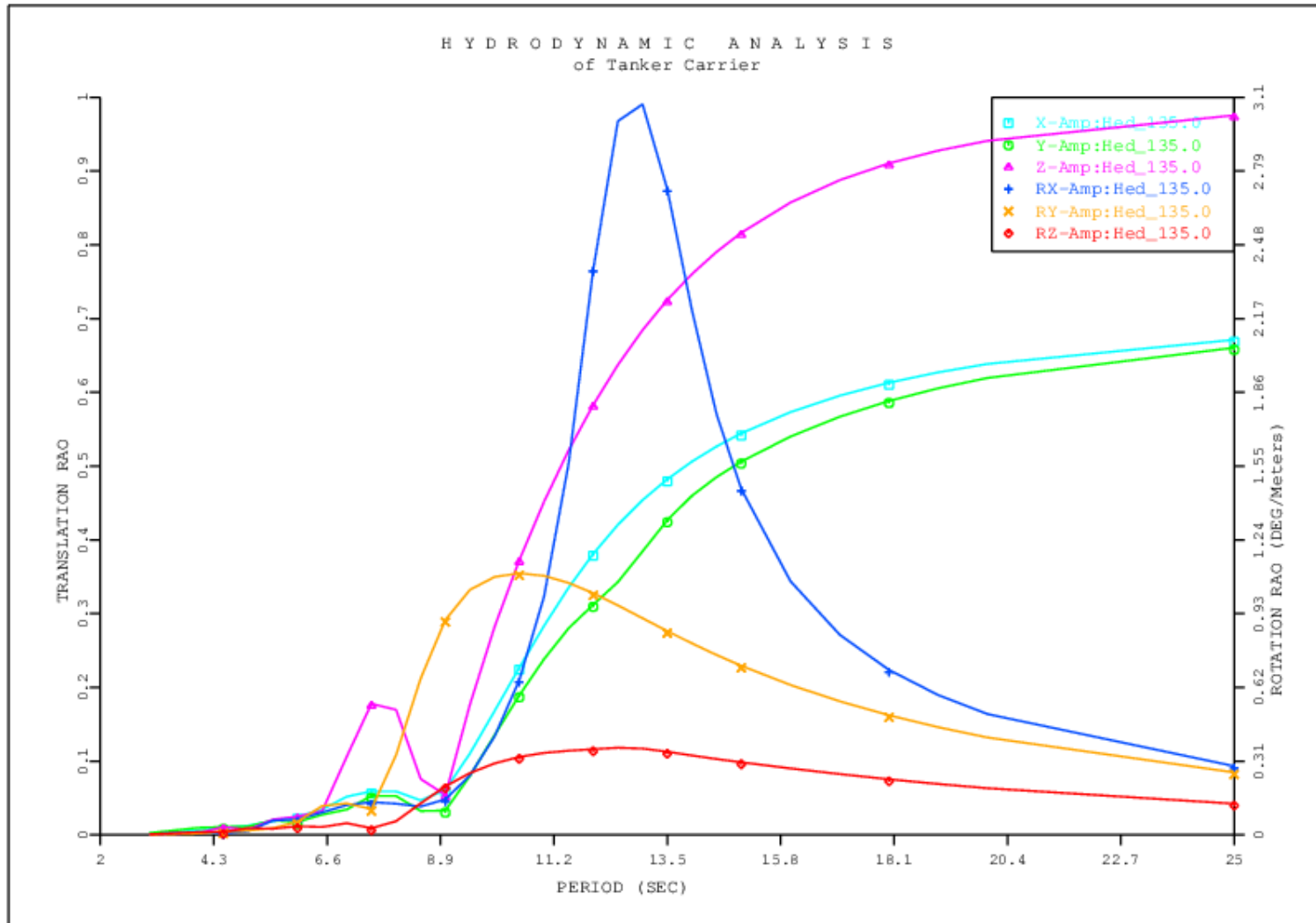
**Gambar A2.1.4** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 67.5<sup>0</sup> kondisi *ballasted*



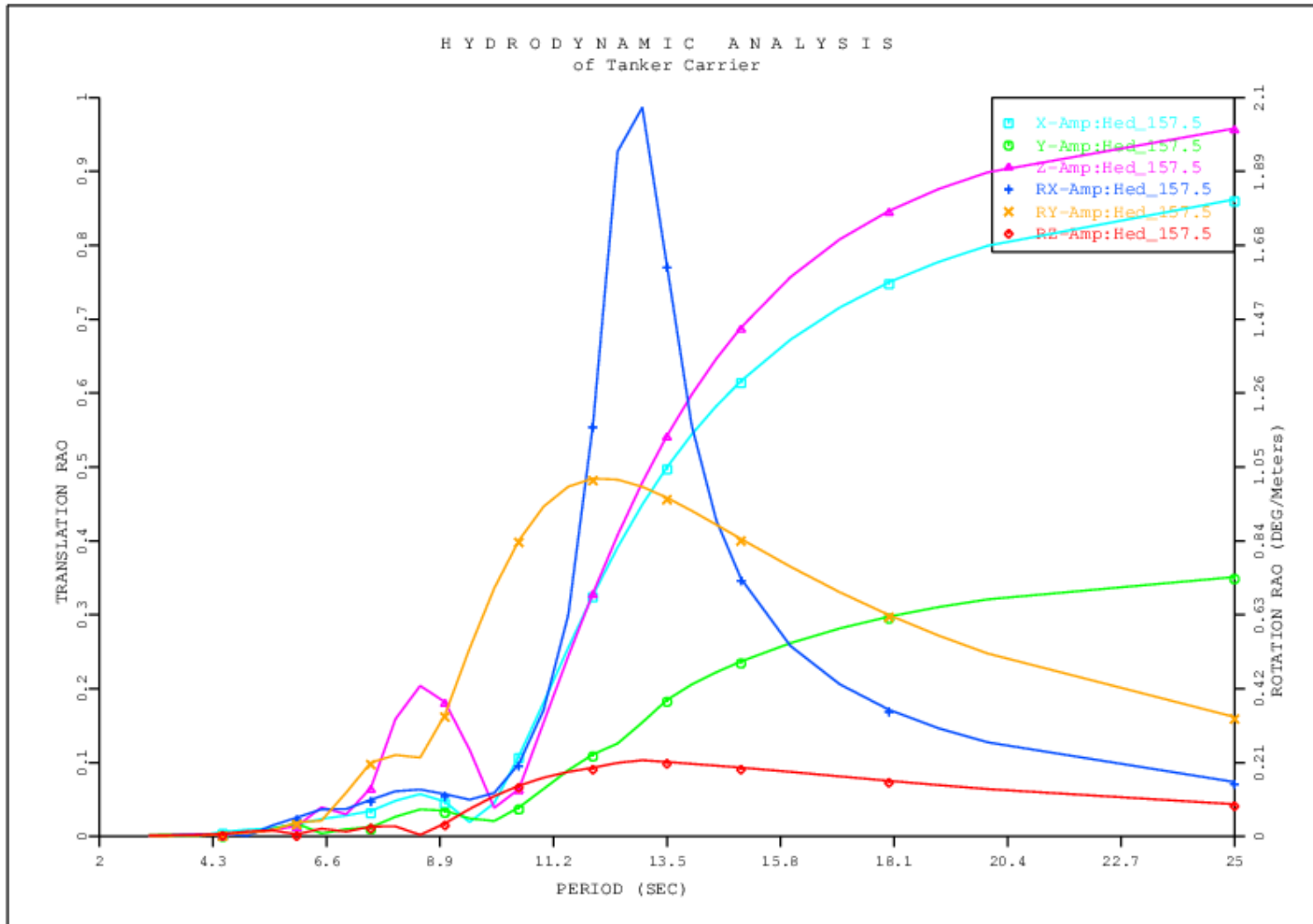
**Gambar A2.1.5** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 90° kondisi *ballasted*



**Gambar A2.1.6** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 112.5<sup>0</sup> kondisi *ballasted*

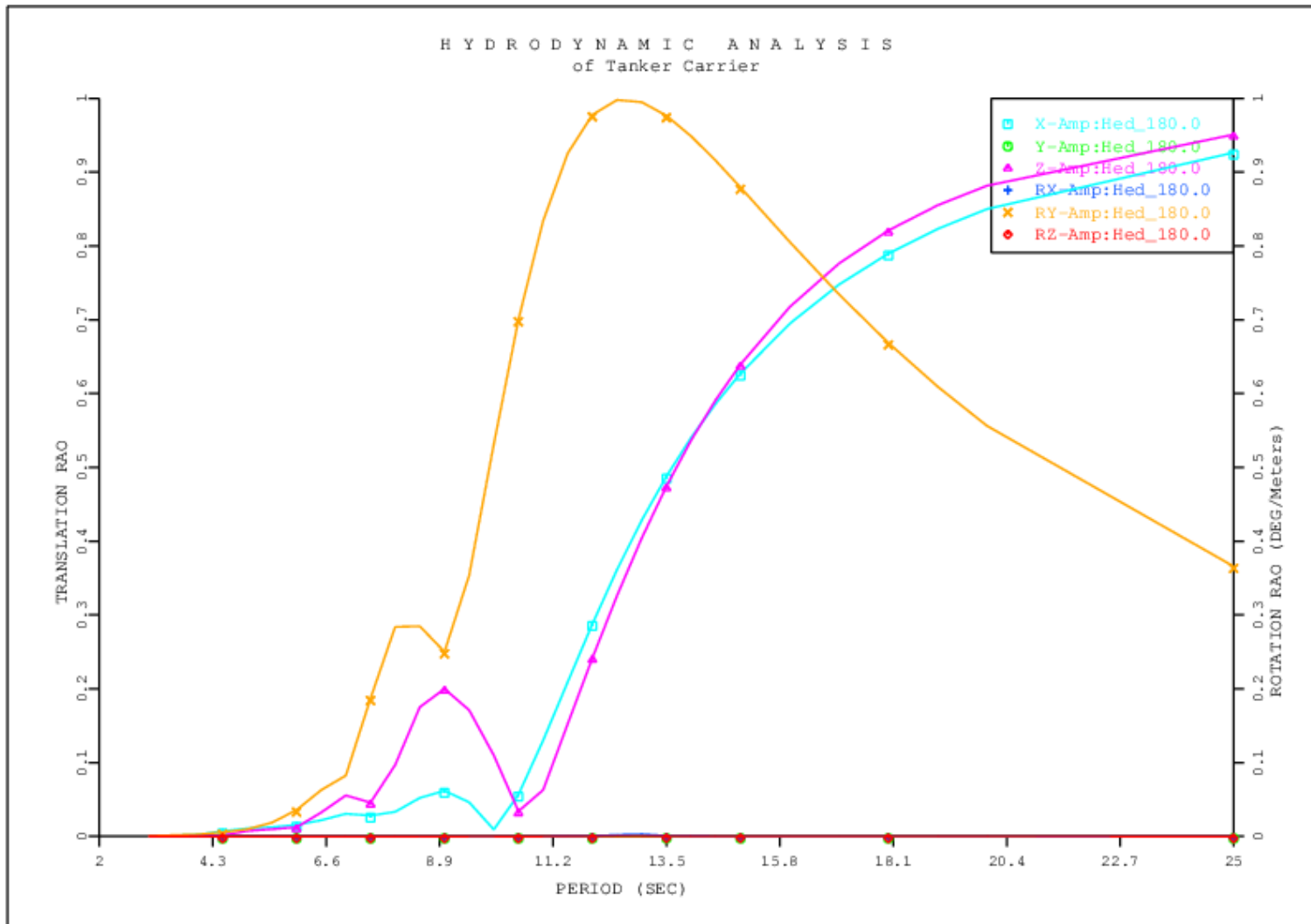


**Gambar A2.1.7** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan  $135^0$  kondisi *ballasted*



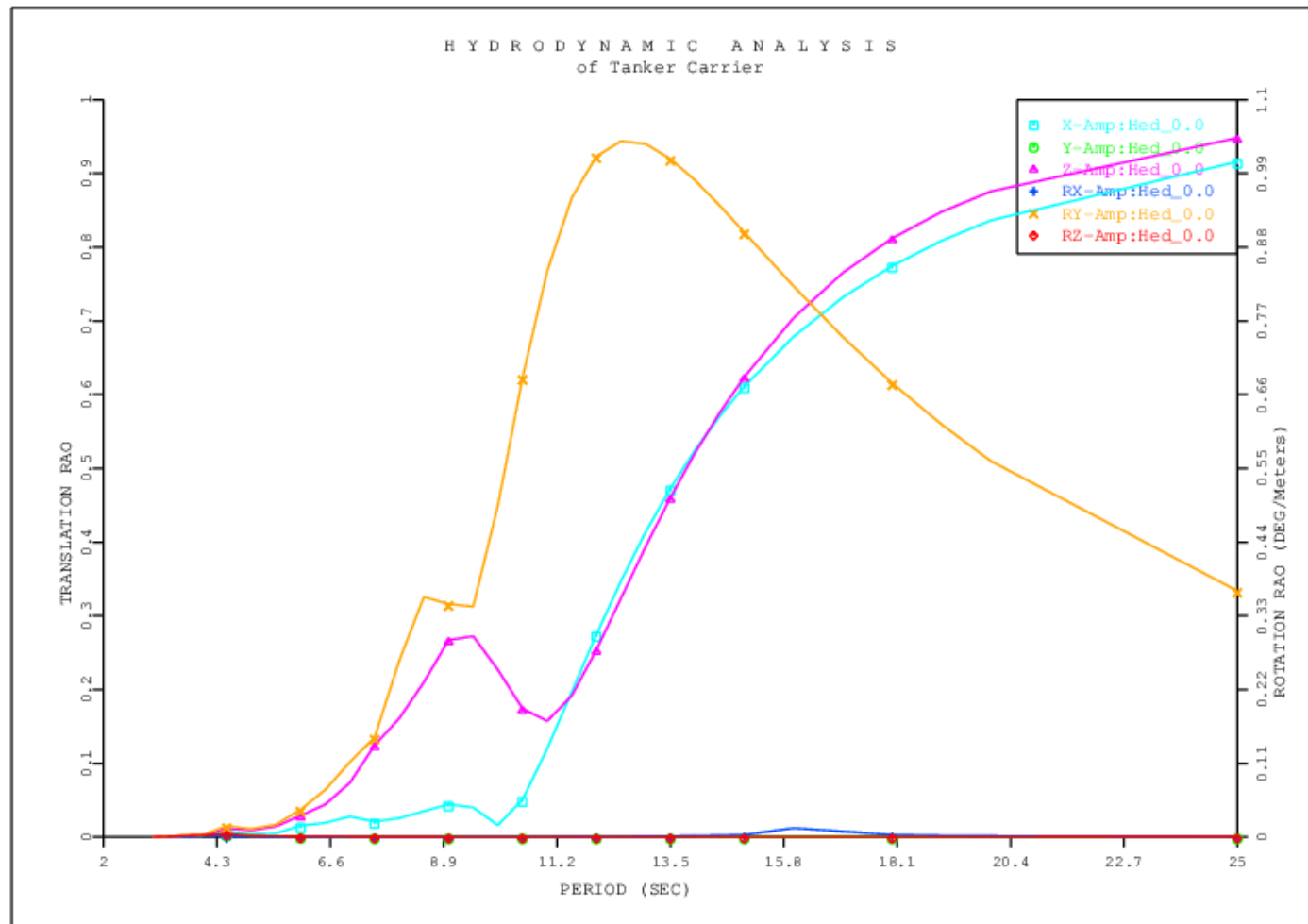
**Gambar A2.1.8** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 157.5<sup>0</sup> kondisi *ballasted*



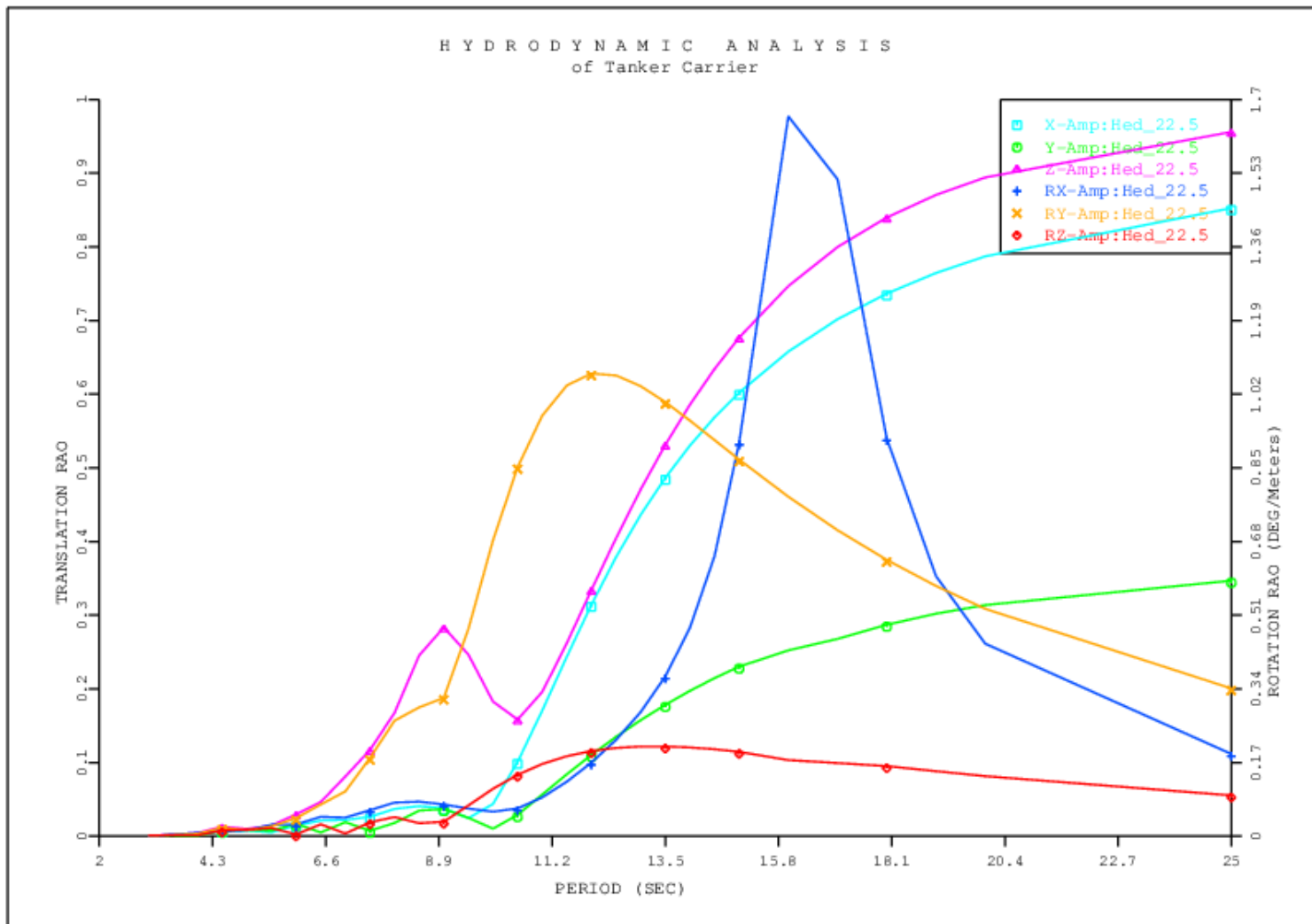


**Gambar A2.1.9** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 180<sup>0</sup> kondisi *ballasted*

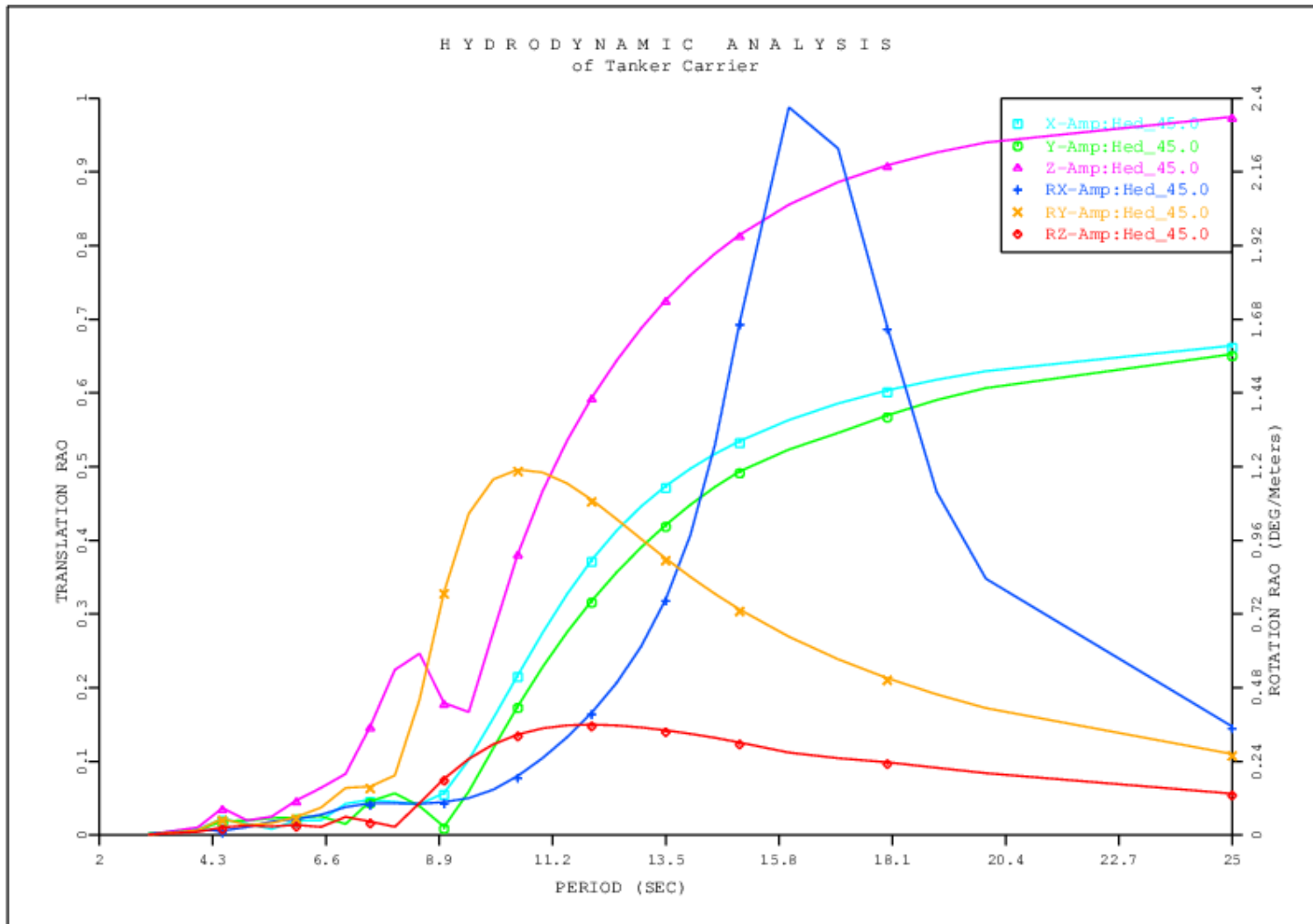
### 1.2.2 Case 2 (Load 50%)



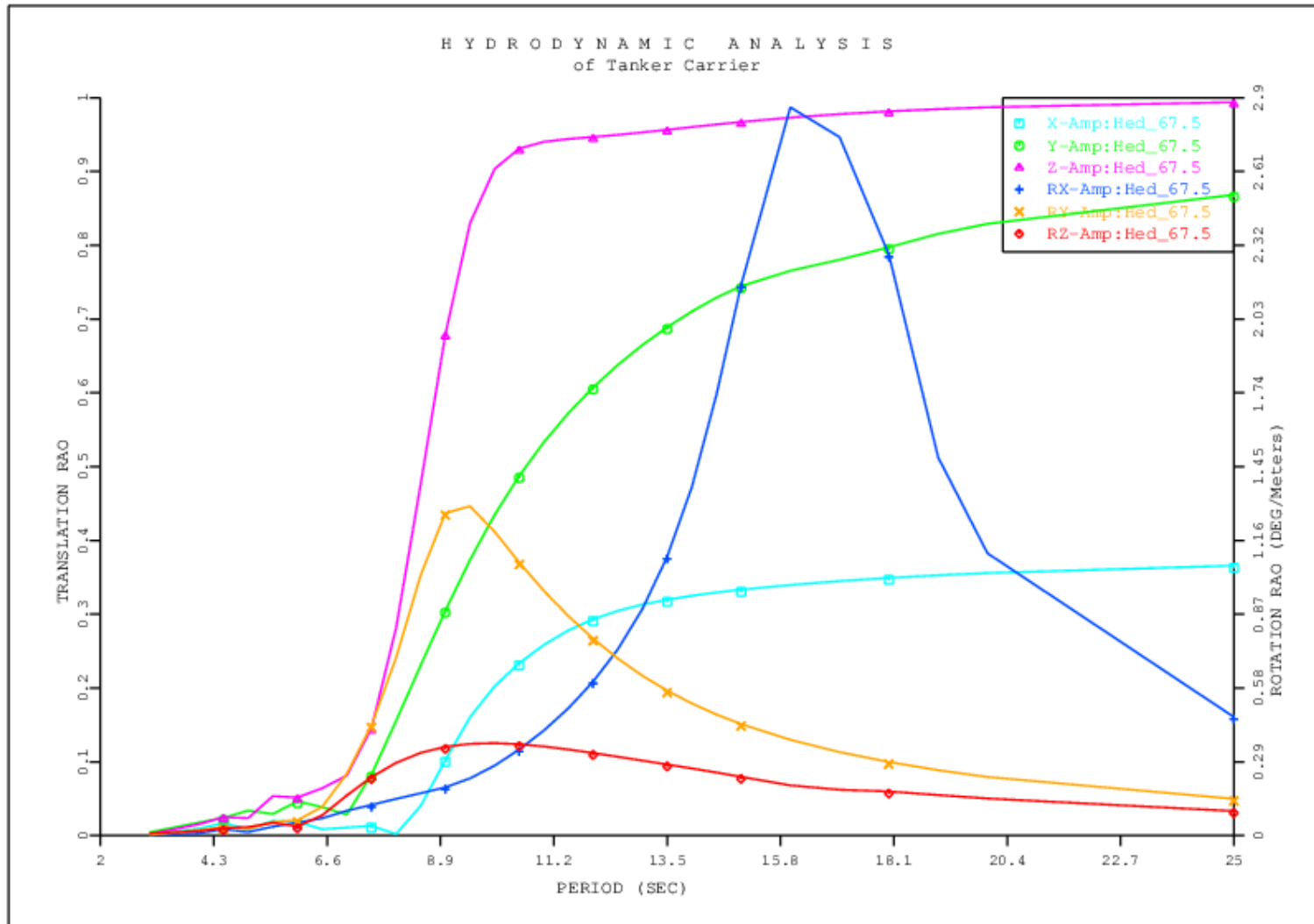
Gambar A2.2.1 RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan  $0^0$  kondisi muatan 50%



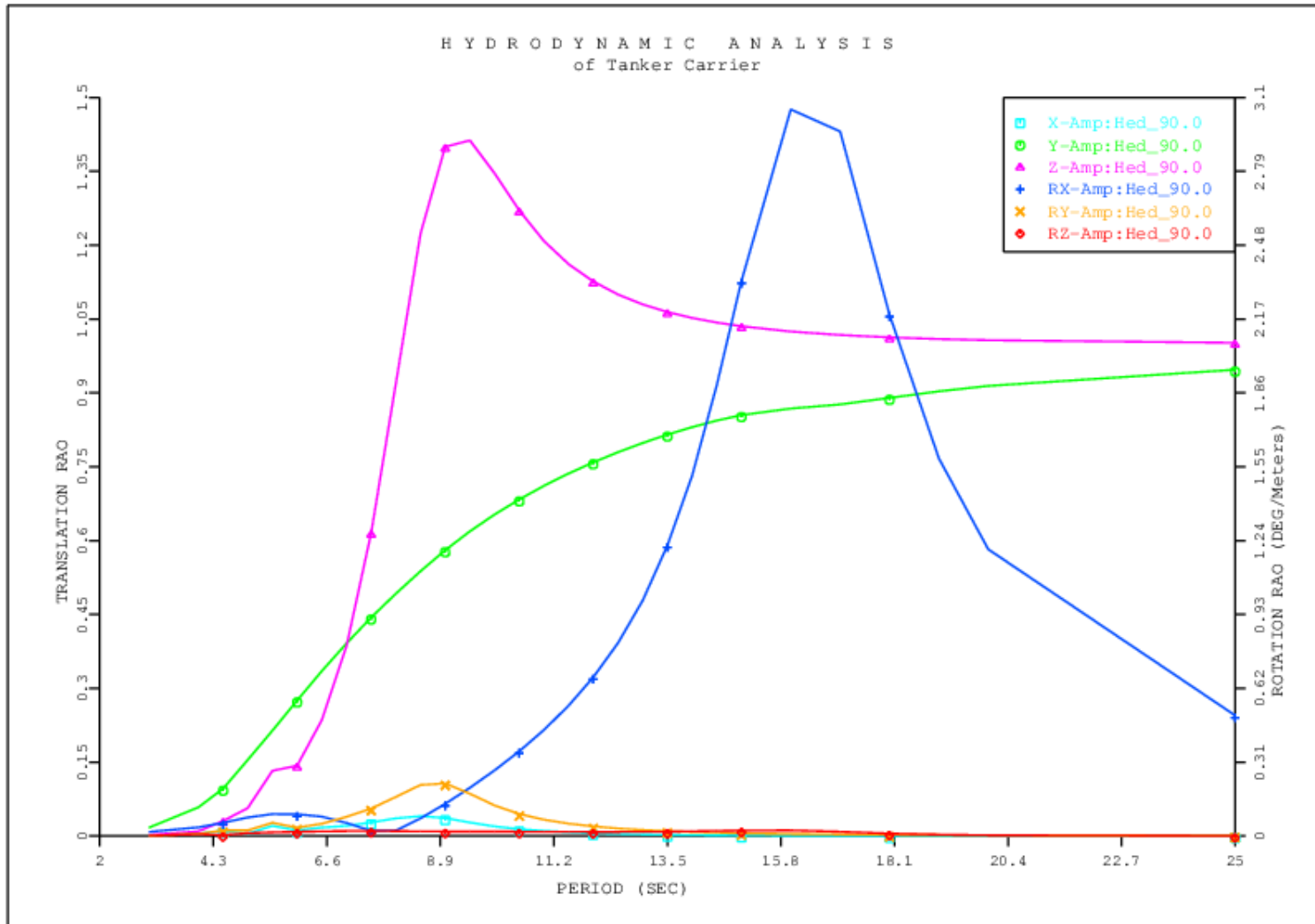
**Gambar A2.2.2** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan  $22.5^{\circ}$  kondisi muatan 50%



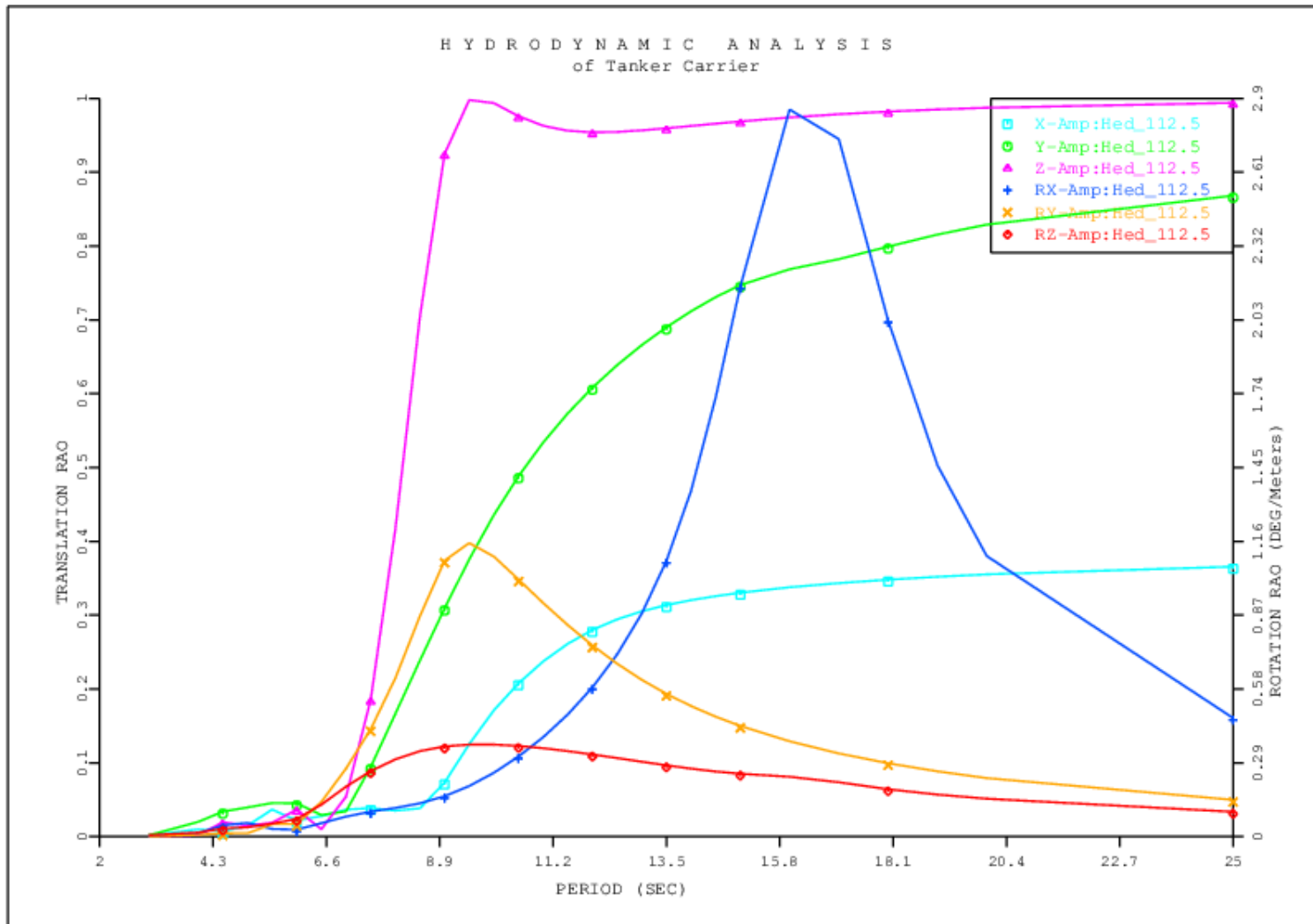
**Gambar A2.2.3** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 45<sup>0</sup> kondisi muatan 50%



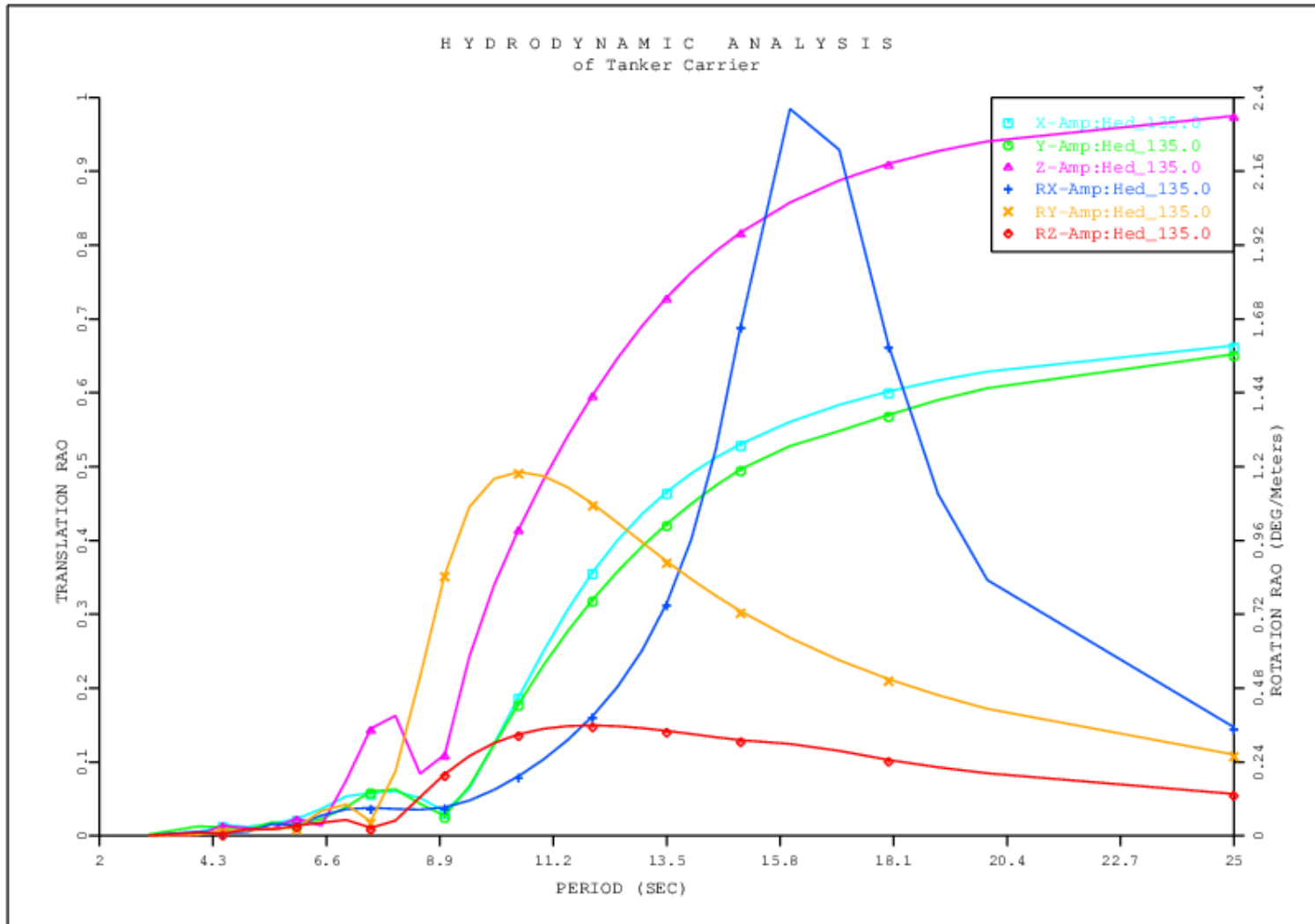
**Gambar A2.2.4** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan  $67.5^0$  kondisi muatan 50%



**Gambar A2.2.5** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 90<sup>0</sup> kondisi muatan 50%

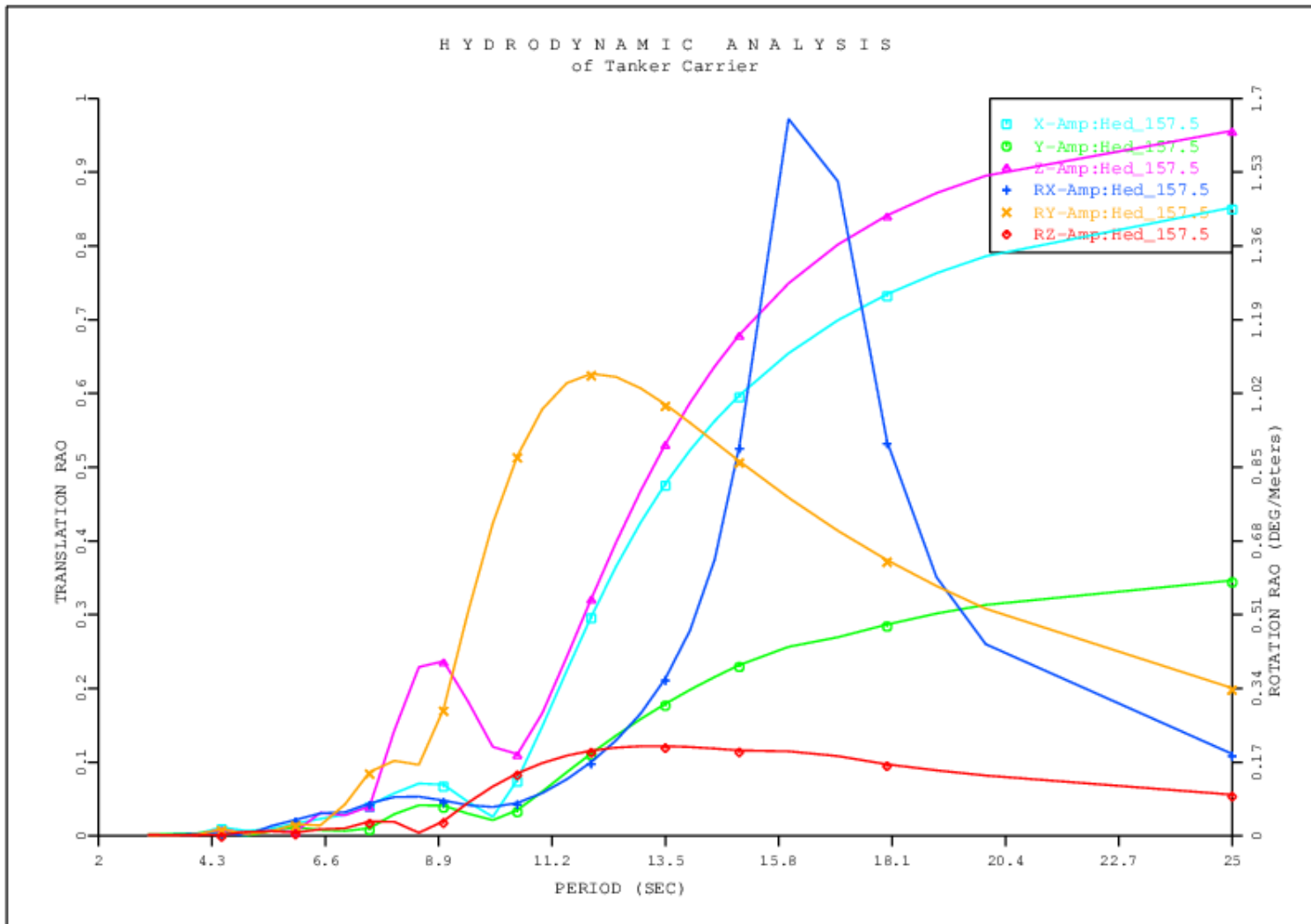


Gambar A2.2.6 RAO free floating kapal tanker arah pembebanan 112.5<sup>0</sup> kondisi muatan 50%

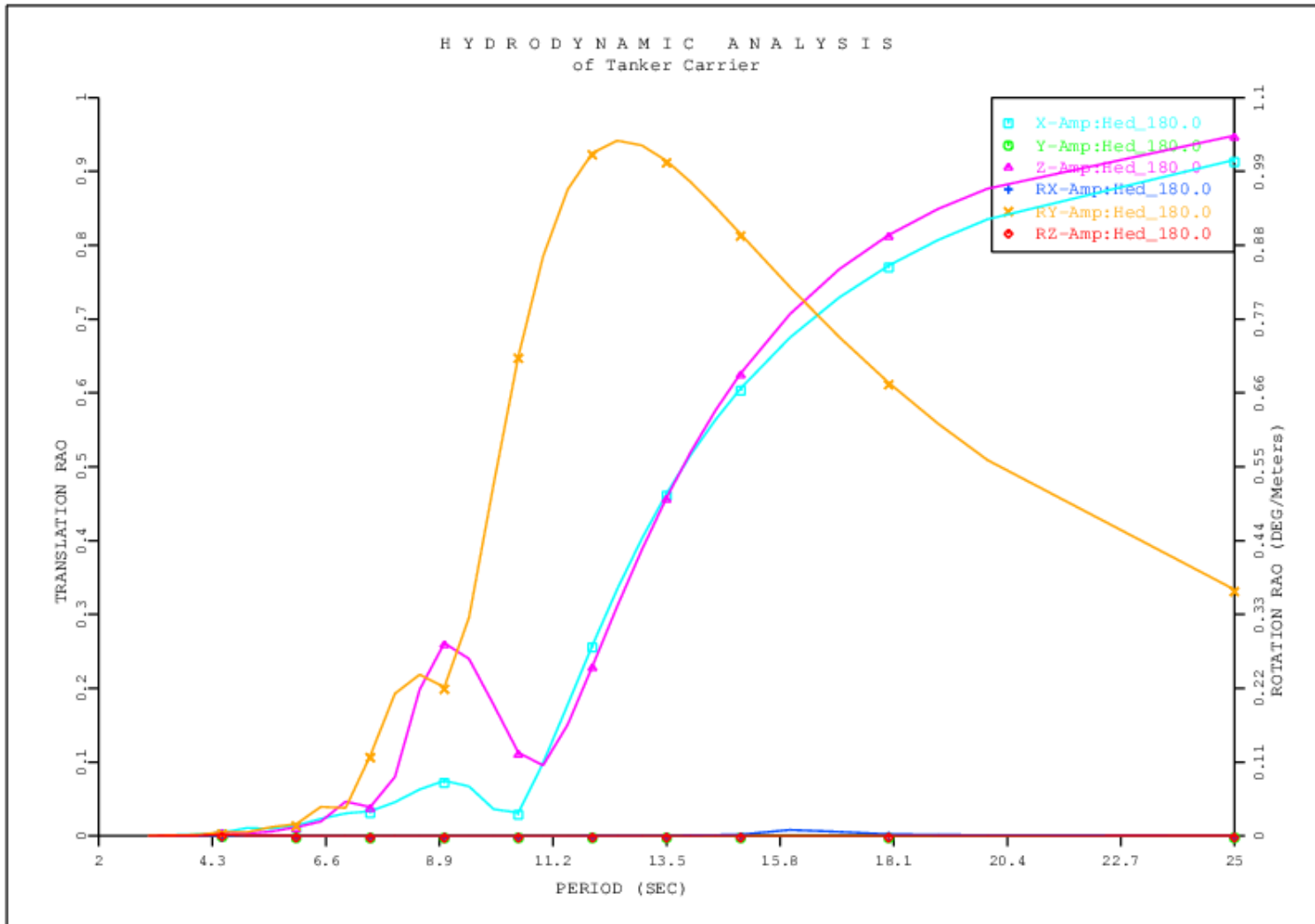


**Gambar A2.2.7** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 135<sup>0</sup> kondisi muatan 50%



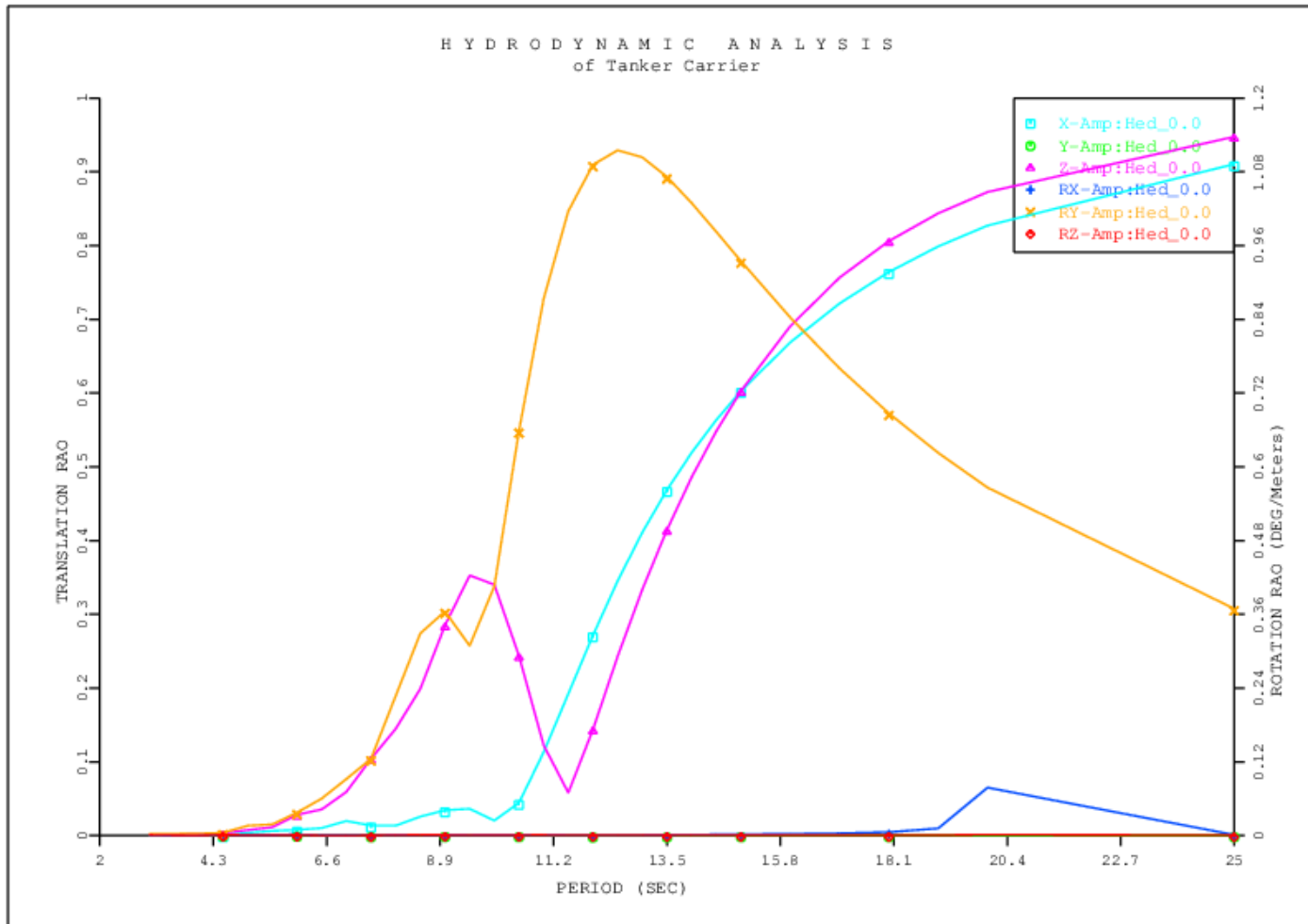


**Gambar A2.2.8** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 157.5<sup>0</sup> kondisi muatan 50%

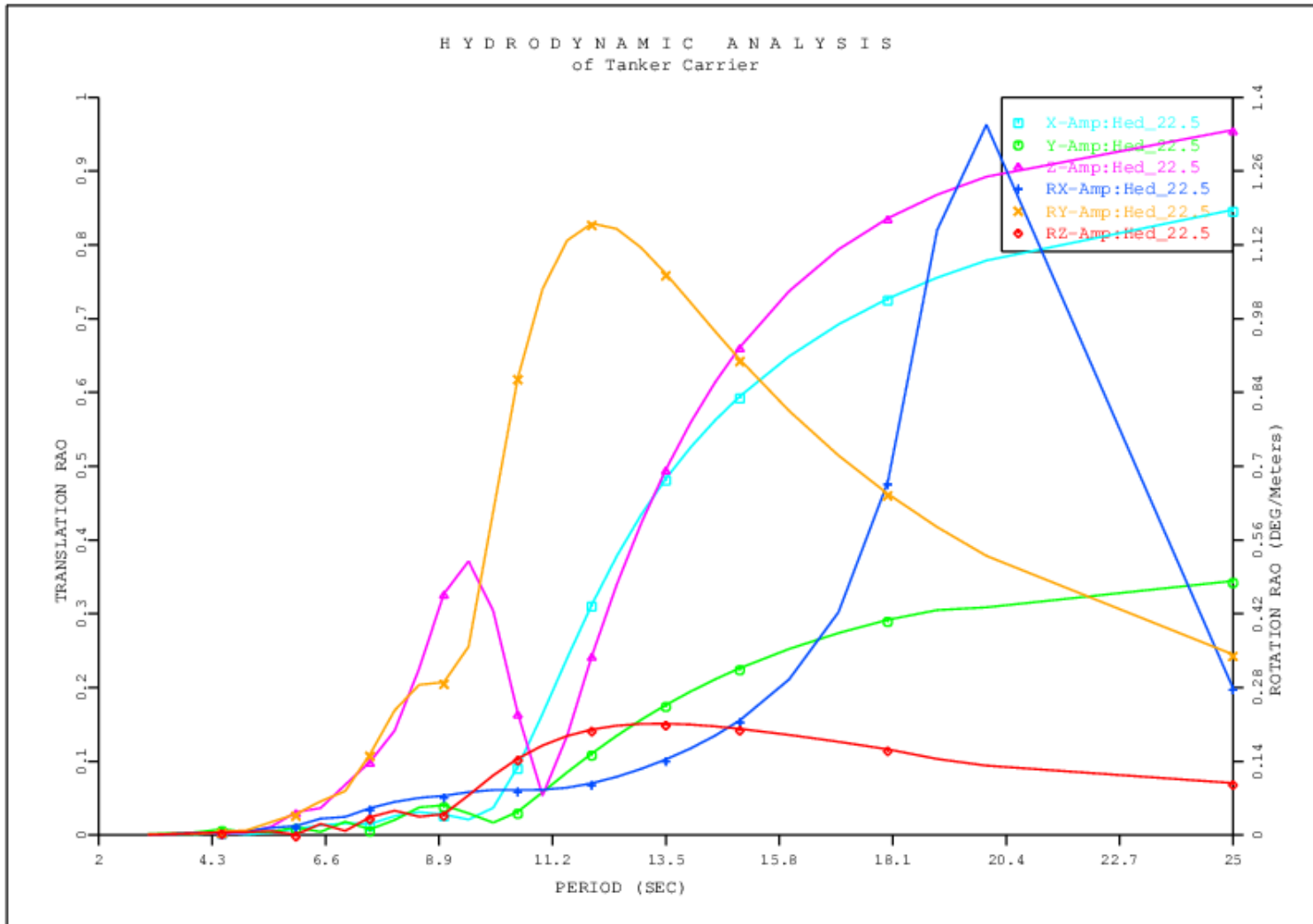


**Gambar A2.2.9** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 180<sup>0</sup> kondisi muatan 50%

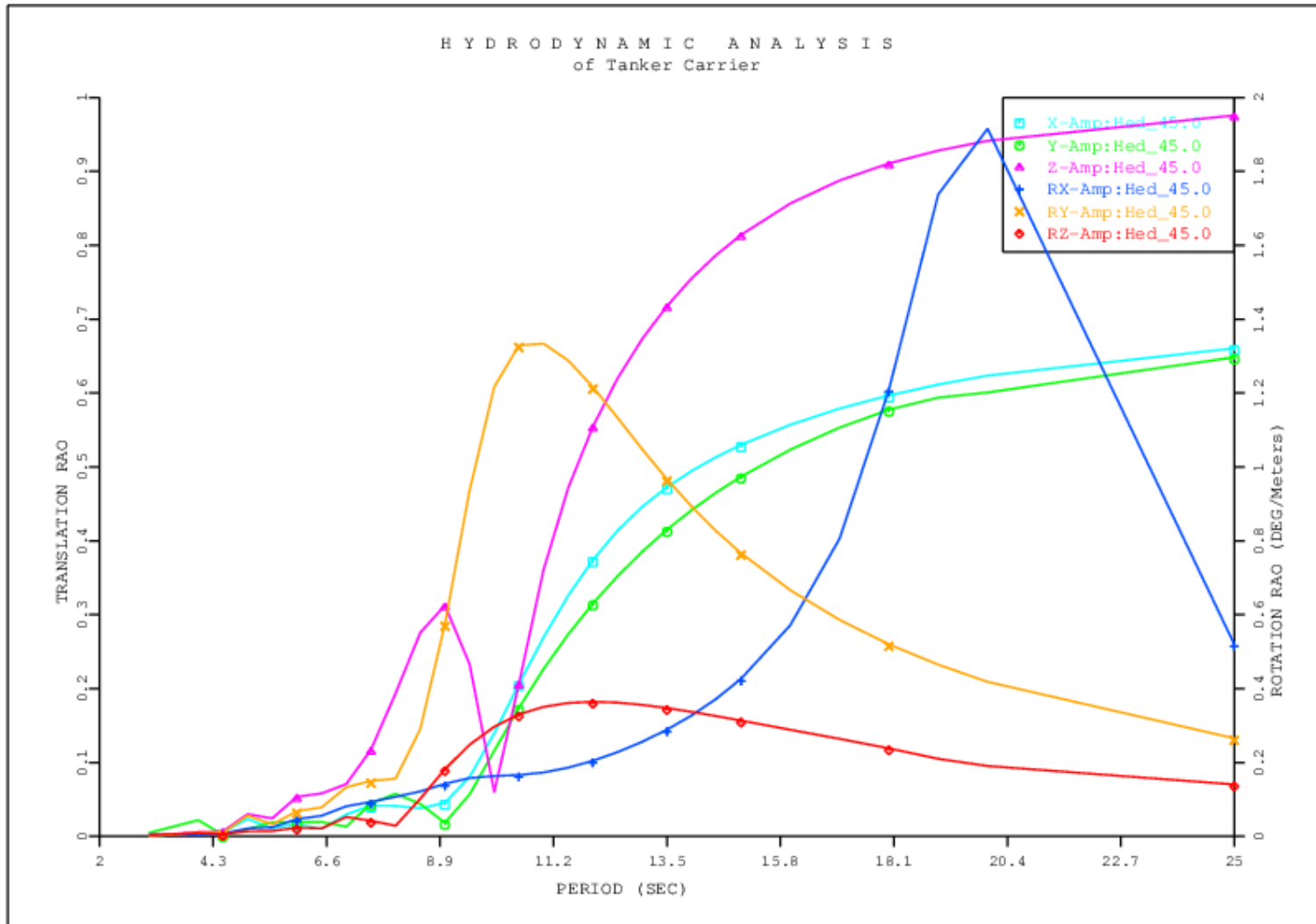
### 1.2.3 Case 3 (Full Load)



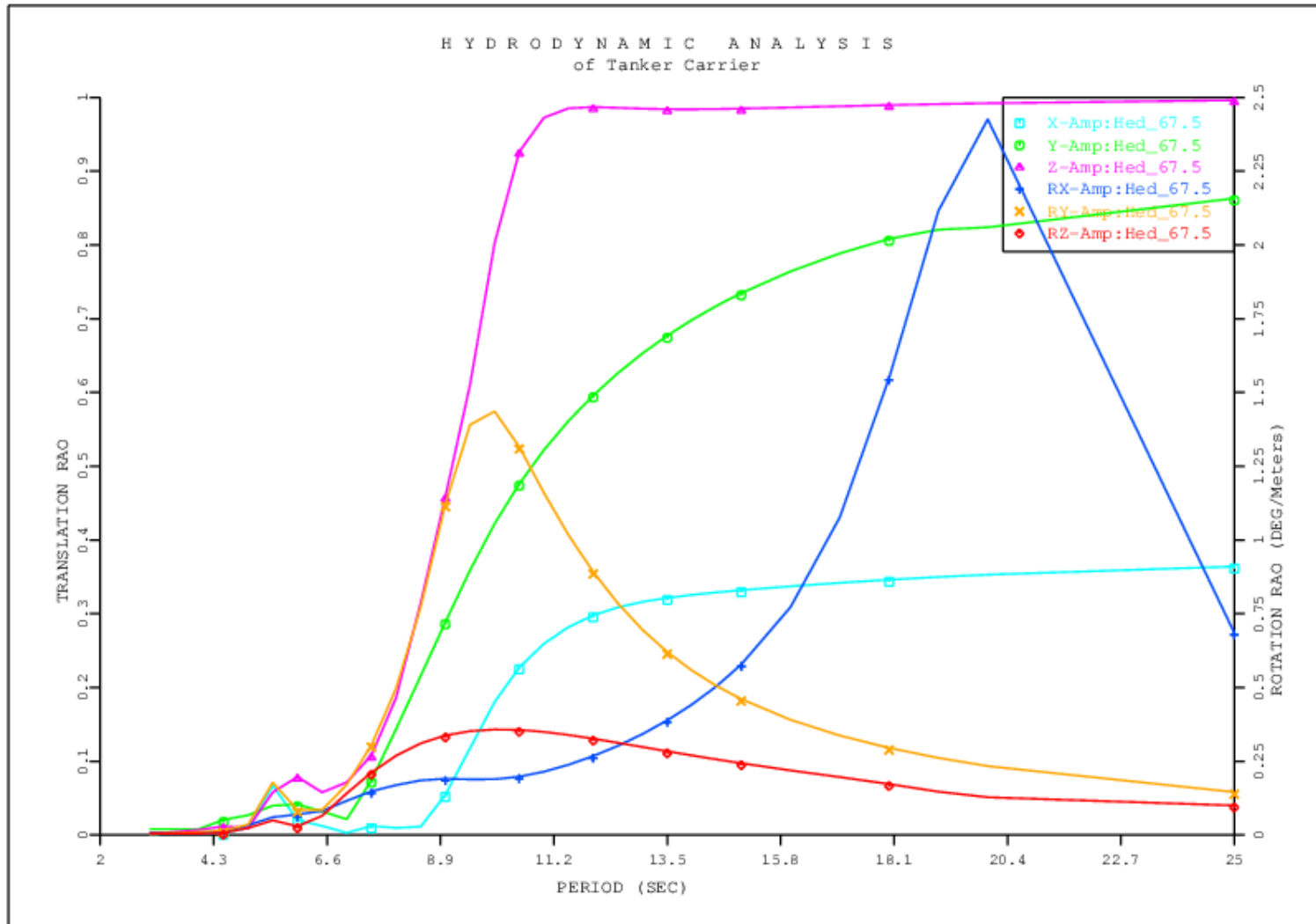
Gambar A2.3.1 RAO free floating kapal tanker arah pembebanan  $0^0$  kondisi muatan penuh



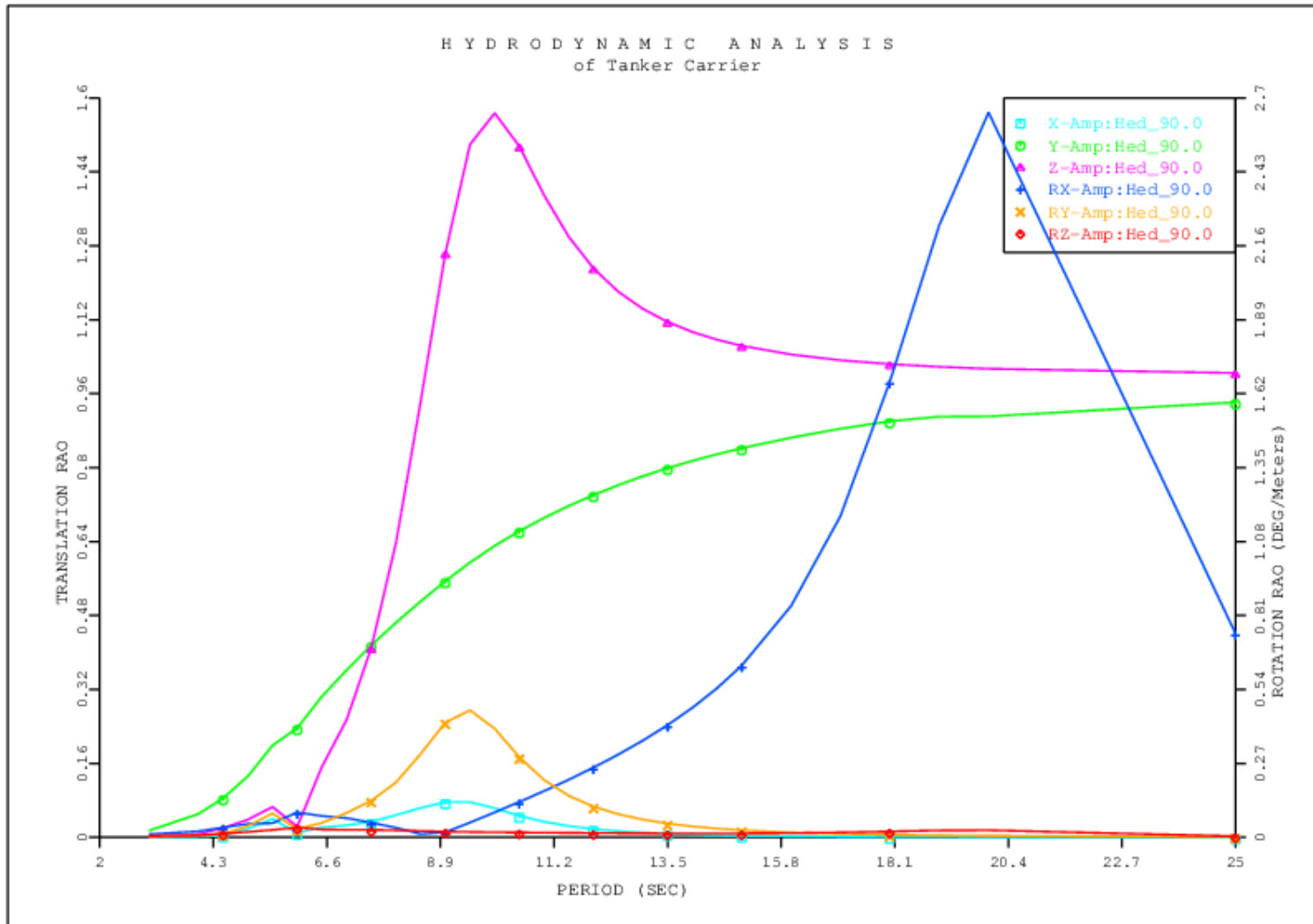
**Gambar A2.3.2** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan  $22.5^0$  kondisi muatan penuh



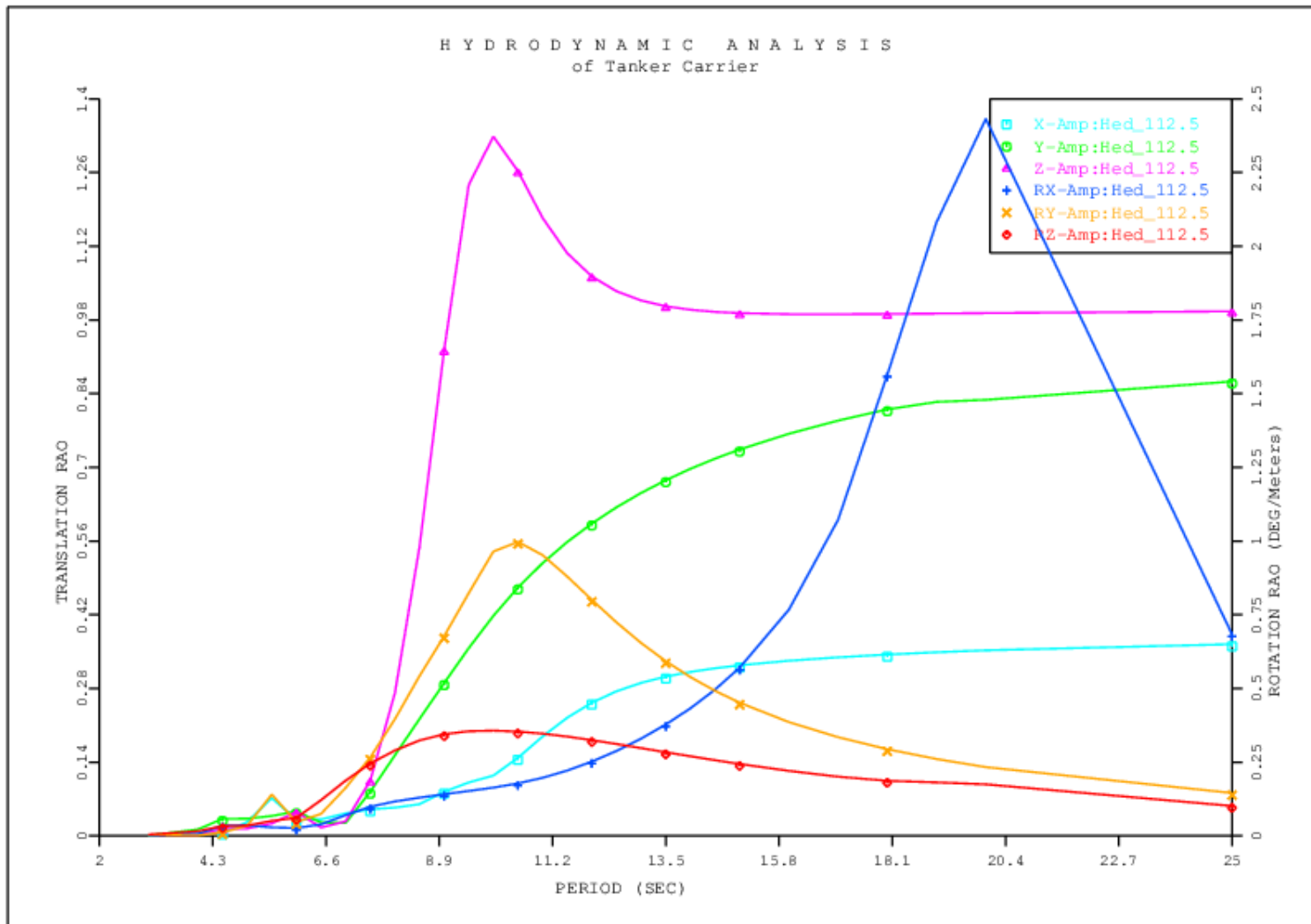
**Gambar A2.3.3** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 45° kondisi muatan penuh



**Gambar A2.3.4** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 67.5<sup>0</sup> kondisi muatan penuh

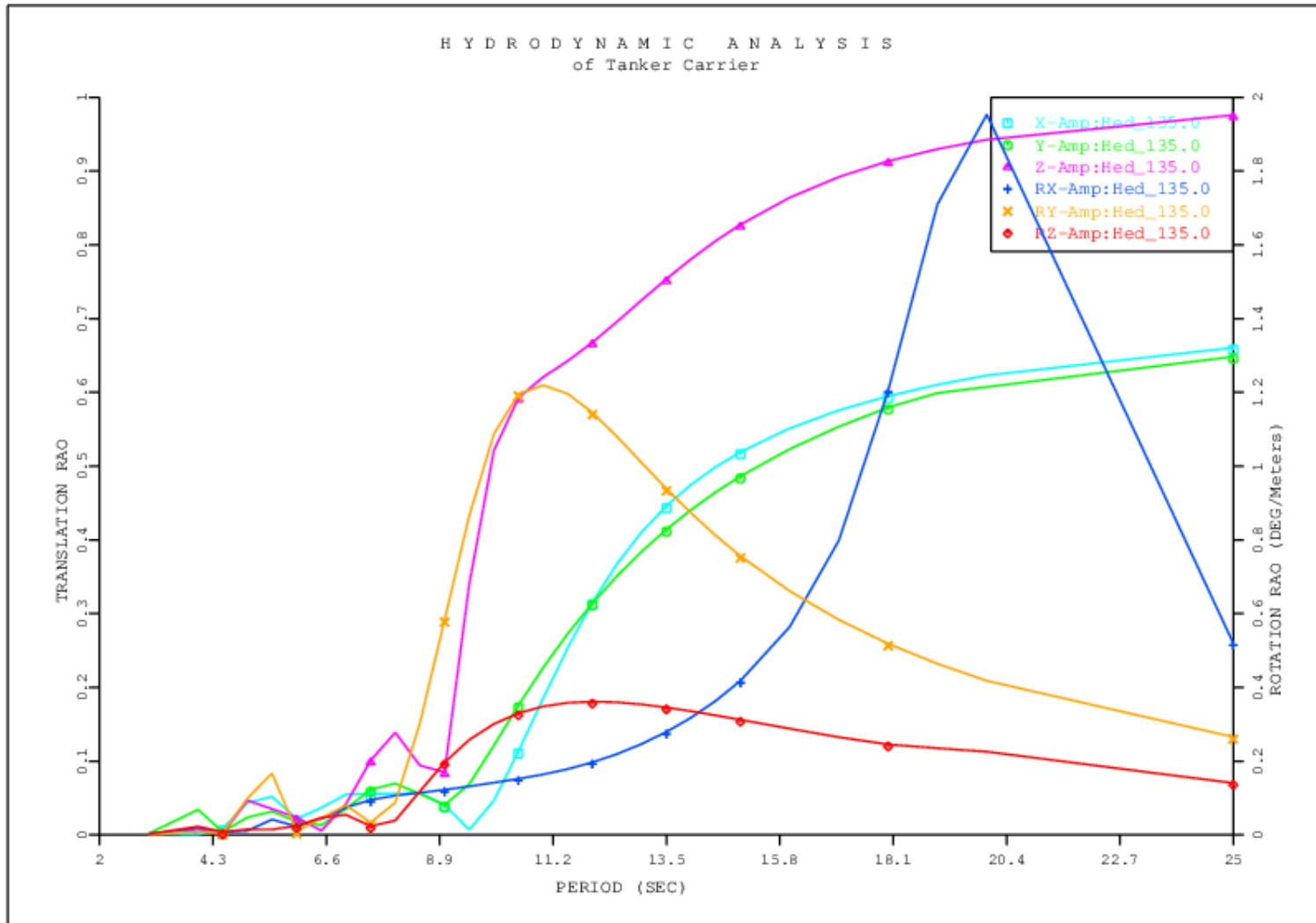


**Gambar A2.3.5** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 90<sup>0</sup> kondisi muatan penuh

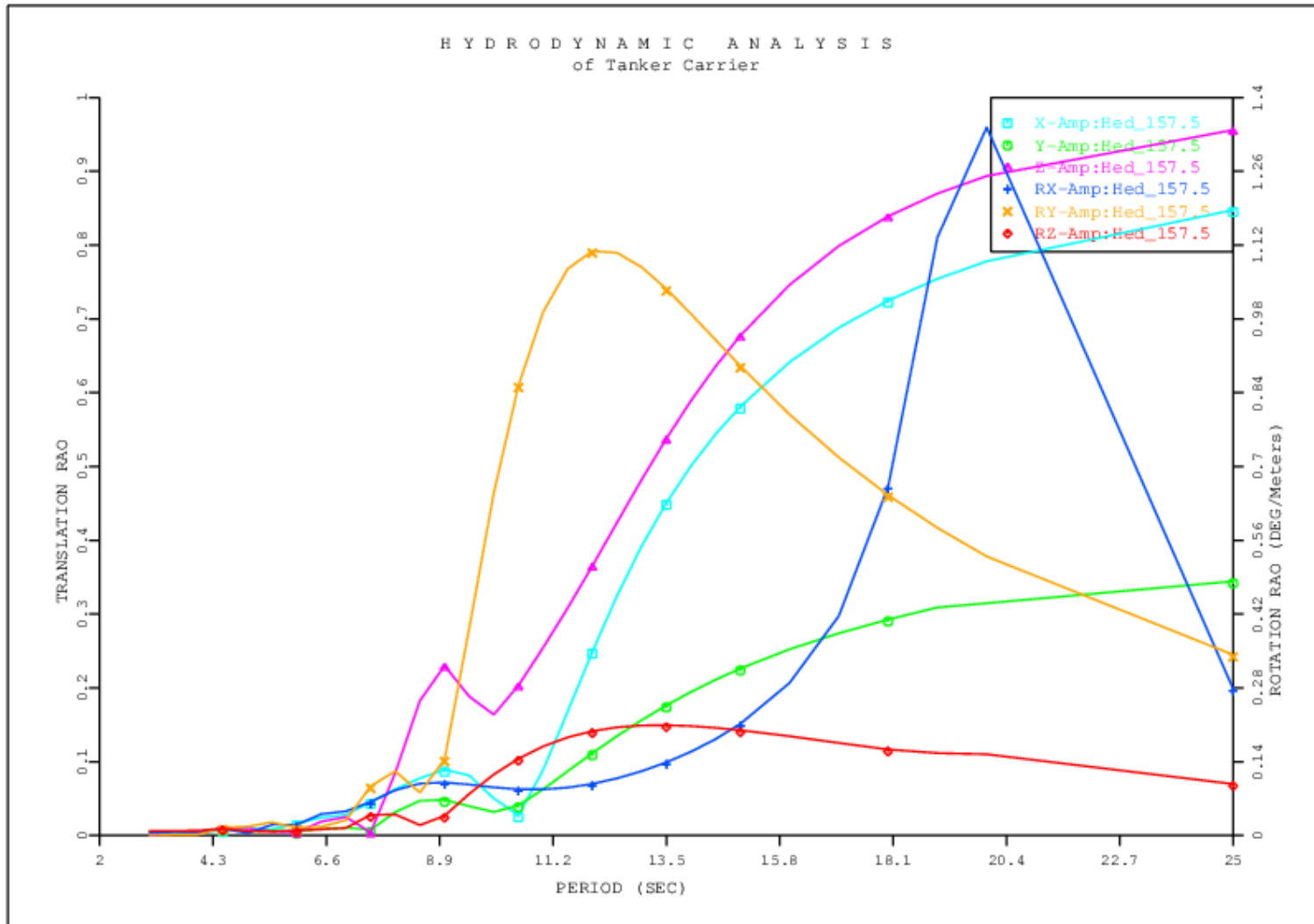


**Gambar A2.3.6** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 112.5<sup>0</sup> kondisi muatan penuh

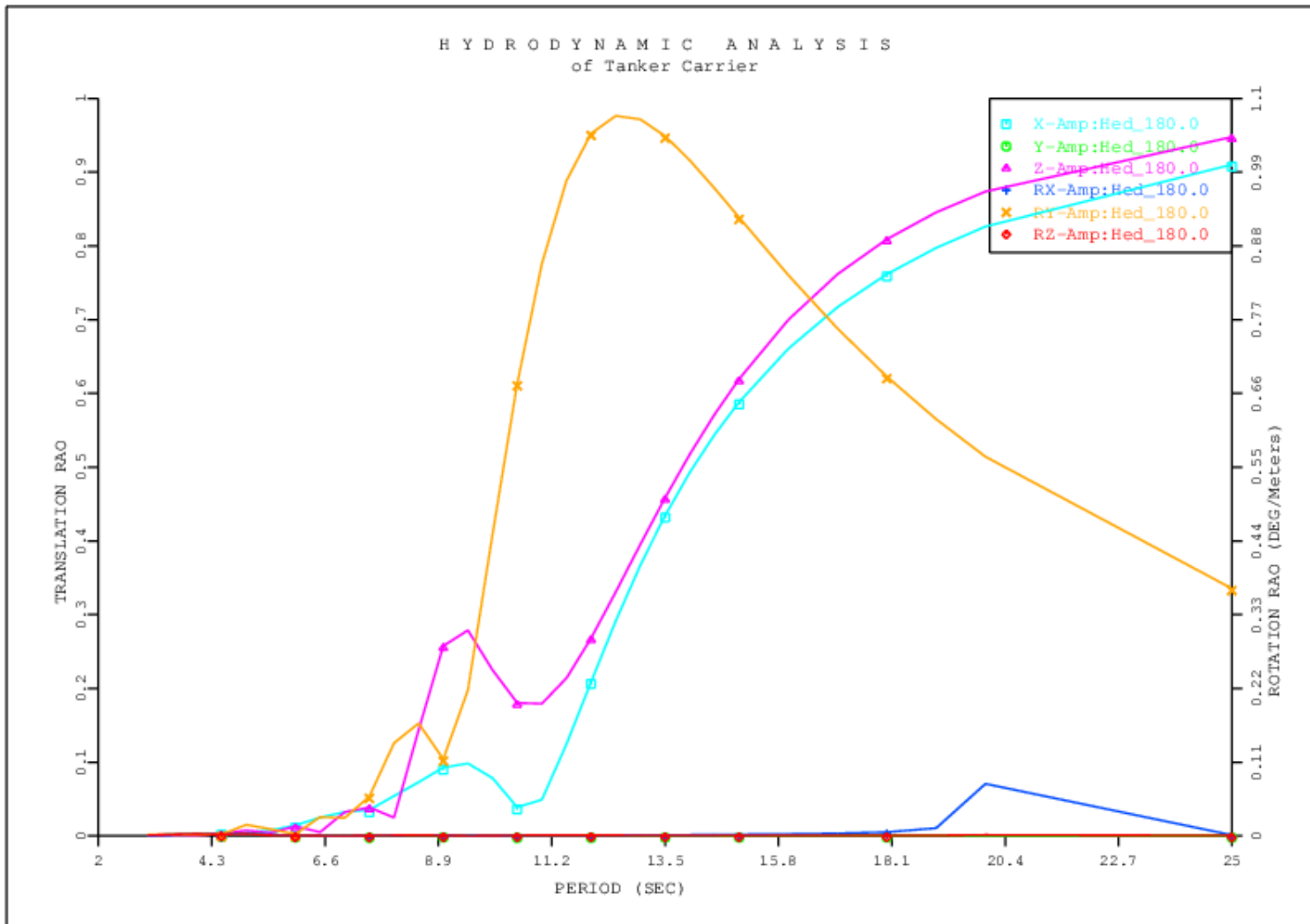




**Gambar A2.3.7** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 135° kondisi muatan penuh



**Gambar A2.3.8** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 157.5° kondisi muatan penuh



**Gambar A2.3.9** RAO *free floating* kapal tanker arah pembebanan 180° kondisi muatan penuh



# **LAMPIRAN B**

(Perhitungan Kelelahan)



2 Perhitungan Kelelahan

**Tabel B.1** Perhitungan kelelahan *FSO Standalone*

HS (Significant High) (m)	TP (Peak Period) (s)	Mean Tension (tef)	Standard Deviation Tension	M	K	MBL Chain R4	Cycle	Pi	Rsi	ni	Ni	Di
2.5	7.5	99.04820318	18.73613463	3	1000	1063	1	0.0001	0.017626	70.73063	6071396.806	1.16498E-05
2.3	6.5	95.77810603	6.986551467	3	1000	1063	2	0.0002	0.006572	1281.724	117095451.5	1.0946E-05
	7.5	86.08549572	6.973593475	3	1000	1063	4	0.0004	0.00656	2221.655	117749408.3	1.88677E-05
2.1	5.5	95.50819199	6.521559063	3	1000	1063	1	0.0001	0.006135	757.3824	143970766.8	5.26067E-06
	6.5	90.91799078	6.27009402	3	1000	1063	11	0.0011	0.005898	7049.482	161996806.7	4.35162E-05
	7.5	86.85157148	5.961124124	3	1000	1063	6	0.0006	0.005608	3332.483	188514221.4	1.76776E-05
1.9	5.5	91.76757925	5.200365873	3	1000	1063	3	0.0003	0.004892	2272.147	283940220.1	8.0022E-06
	6.5	86.14677658	4.98042271	3	1000	1063	38	0.0038	0.004685	24352.76	323243647.7	7.53387E-05
	7.5	82.34944427	4.21501074	3	1000	1063	4	0.0004	0.003965	2221.655	533252078	4.16624E-06
1.7	5.5	86.84636448	4.155986904	3	1000	1063	43	0.0043	0.00391	32567.44	556296211.3	5.85433E-05
	6.5	82.747746	4.097346229	3	1000	1063	92	0.0092	0.003855	58959.31	580524592.1	0.000101562
	7.5	79.95428018	4.332358228	3	1000	1063	7	0.0007	0.004076	3887.896	491083716.7	7.91697E-06
1.5	4.5	83.70792341	3.492400011	3	1000	1063	2	0.0002	0.003285	1851.379	937468471.7	1.97487E-06
	5.5	81.4235734	3.423048904	3	1000	1063	159	0.0159	0.00322	120423.8	995610119.2	0.000120955
	6.5	78.38861797	3.180345133	3	1000	1063	178	0.0178	0.002992	114073.4	1241383178	9.18922E-05
1.3	7.5	76.02895946	3.671060288	3	1000	1063	9	0.0009	0.003453	4998.724	807149650.6	6.19306E-06
	4.5	83.15040981	2.430116798	3	1000	1063	44	0.0044	0.002286	40730.34	2782576870	1.46376E-05
	5.5	78.90832238	2.39137262	3	1000	1063	423	0.0423	0.00225	320372.8	2920026926	0.000109716
	6.5	76.81059374	2.37523199	3	1000	1063	270	0.027	0.002234	173032.7	2979960530	5.80654E-05
1.1	7.5	74.79396212	2.810599402	3	1000	1063	6	0.0006	0.002644	3332.483	1798588303	1.85283E-06
	4.5	79.40129016	1.921149207	3	1000	1063	271	0.0271	0.001807	250861.9	5631775388	4.4544E-05
	5.5	75.77644379	1.850521798	3	1000	1063	825	0.0825	0.001741	624840.5	6301529845	9.9157E-05
	6.5	74.29341015	1.63328132	3	1000	1063	342	0.0342	0.001536	219174.8	9165277706	2.39136E-05
0.9	7.5	72.99052635	2.070018399	3	1000	1063	5	0.0005	0.001947	2777.069	4502005244	6.16852E-07
	3.5	79.72828633	1.491871129	3	1000	1063	44	0.0044	0.001403	52367.58	12026373417	4.3544E-06
	4.5	73.97237304	1.338301165	3	1000	1063	649	0.0649	0.001259	600772.6	16659694963	3.60614E-05
	5.5	72.40951608	1.214220947	3	1000	1063	768	0.0768	0.001142	581669.7	22306706381	2.6076E-05
	6.5	71.91957204	1.060477089	3	1000	1063	235	0.0235	0.000998	150602.6	33483029289	4.49788E-06
	7.5	71.3664546	1.411646826	3	1000	1063	7	0.0007	0.001328	3887.896	14195491873	2.73882E-07
	8.5	70.34390052	1.412349885	3	1000	1063	3	0.0003	0.001329	1470.213	14174303152	1.03724E-07

0.7	2.5	78.03430284	0.988063724	3	1000	1063	9	0.0009	0.00093	14996.17	41397465163	3.62249E-07
	3.5	74.39413038	0.812014742	3	1000	1063	319	0.0319	0.000764	379665	74582488926	5.09054E-06
	4.5	72.65259209	0.791827892	3	1000	1063	730	0.073	0.000745	675753.4	80433362788	8.40141E-06
	5.5	71.72581842	0.761191658	3	1000	1063	580	0.058	0.000716	439281.8	90541263786	4.85173E-06
	6.5	71.33407694	0.668151321	3	1000	1063	120	0.012	0.000629	76903.44	1.33876E+11	5.74436E-07
	7.5	70.71846603	0.881550028	3	1000	1063	17	0.0017	0.000829	9442.034	58289149993	1.61986E-07
0.5	8.5	70.26654517	0.955203832	3	1000	1063	5	0.0005	0.000899	2450.355	45818455483	5.34796E-08
	2.5	72.69894759	0.801099389	3	1000	1063	58	0.0058	0.000754	96641.99	77672880459	1.24422E-06
	3.5	71.22683839	0.692274621	3	1000	1063	838	0.0838	0.000651	997364.4	1.20363E+11	8.2863E-06
	4.5	70.63763716	0.454877187	3	1000	1063	736	0.0736	0.000428	681307.5	4.24274E+11	1.60582E-06
	5.5	70.3631347	0.436970591	3	1000	1063	398	0.0398	0.000411	301438.2	4.78599E+11	6.29834E-07
	6.5	70.11538253	0.408111091	3	1000	1063	80	0.008	0.000384	51268.96	5.8748E+11	8.72692E-08
	7.5	69.94870768	0.505098279	3	1000	1063	22	0.0022	0.000475	12219.1	3.09885E+11	3.94311E-08
	8.5	69.61004937	0.60791114	3	1000	1063	26	0.0026	0.000572	12741.85	1.77749E+11	7.16843E-08
0.3	9.5	68.99247962	0.986856984	3	1000	1063	28	0.0028	0.000928	12277.57	41549514777	2.95492E-07
	10.5	68.2424328	1.326396205	3	1000	1063	7	0.0007	0.001248	2777.069	17112316376	1.62285E-07
	2.5	70.522451	0.48689428	3	1000	1063	27	0.0027	0.000458	44988.51	3.45959E+11	1.3004E-07
	3.5	70.12395267	0.349434875	3	1000	1063	526	0.0526	0.000329	626030.7	9.35901E+11	6.68907E-07
	4.5	69.97542238	0.195548931	3	1000	1063	401	0.0401	0.000184	371201.5	5.34026E+12	6.951E-08
	5.5	69.89184262	0.17529684	3	1000	1063	124	0.0124	0.000165	93915.42	7.41321E+12	1.26687E-08
	6.5	69.77069033	0.17511197	3	1000	1063	18	0.0018	0.000165	11535.52	7.43671E+12	1.55116E-09
	7.5	69.72038926	0.210185267	3	1000	1063	20	0.002	0.000198	11108.28	4.30053E+12	2.583E-09
	8.5	69.54162433	0.30067028	3	1000	1063	77	0.0077	0.000283	37735.46	1.46912E+12	2.56858E-08
	9.5	69.01613254	0.582886939	3	1000	1063	60	0.006	0.000548	26309.07	2.0164E+11	1.30476E-07
0.1	10.5	68.71363073	0.771832895	3	1000	1063	19	0.0019	0.000726	7537.758	86847788113	8.67927E-08
	11.5	68.03856606	1.173435062	3	1000	1063	2	0.0002	0.001104	724.4527	24714477409	2.93129E-08
	12.5	67.88642731	1.252426243	3	1000	1063	2	0.0002	0.001178	666.4965	20326946122	3.27888E-08
	2.5	69.68029714	0.20537663	3	1000	1063	8	0.0008	0.000193	13329.93	4.60973E+12	2.89169E-09
	3.5	69.67612881	0.138812671	3	1000	1063	118	0.0118	0.000131	140440.3	1.49294E+13	9.40699E-09
	4.5	69.60712179	0.06254965	3	1000	1063	101	0.0101	5.88E-05	93494.65	1.63175E+14	5.72971E-10
	5.5	69.59961809	0.034560646	3	1000	1063	12	0.0012	3.25E-05	9088.589	9.67349E+14	9.39536E-12
	6.5	69.53296767	0.034526065	3	1000	1063	8	0.0008	3.25E-05	5126.896	9.70258E+14	5.28405E-12
	7.5	69.55979725	0.051109035	3	1000	1063	21	0.0021	4.81E-05	11663.69	2.99113E+14	3.89942E-11
	8.5	69.51020334	0.089720417	3	1000	1063	19	0.0019	8.44E-05	9311.348	5.5291E+13	1.68406E-10
TOTAL	9.5	69.18350334	0.349670795	3	1000	1063	7	0.0007	0.000329	3069.392	9.34008E+11	3.28626E-09
	10.5	69.05630937	0.466136398	3	1000	1063	3	0.0003	0.000439	1190.172	3.94266E+11	3.0187E-09
	11.5	68.94360584	0.564234446	3	1000	1063	1	0.0001	0.000531	362.2264	2.22305E+11	1.62941E-09
	12.5	69.12934545	0.601634627	3	1000	1063	1	0.0001	0.000566	333.2483	1.83371E+11	1.81735E-09
	TOTAL							10000	1			

LAMPIRAN B –Perhitungan Kelelahan



2.1 Perhitungan FSO ketika Offloading/Unloading

**Tabel B.2.1** Perhitungan kelelahan *FSO Standalone*

HS (Significant High) (m)	TP (Peak Period)	Mean Tension	Standard Deviation	M	K	MBL Chain R4	Cycle	Pi	Rsi	ni	$\Gamma(1+M/2)$	Ni	Di
2.5	7.5	99.0482	18.73613	3	1000	1063	1	0.0001	0.017626	70.73063	1.32934	6071397	1.16E-05
2.3	6.5	95.77811	6.986551	3	1000	1063	2	0.0002	0.006572	1281.724	1.32934	1.17E+08	1.09E-05
	7.5	86.0855	6.973593	3	1000	1063	4	0.0004	0.00656	2221.655	1.32934	1.18E+08	1.89E-05
2.1	5.5	95.50819	6.521559	3	1000	1063	1	0.0001	0.006135	757.3824	1.32934	1.44E+08	5.26E-06
	6.5	90.91799	6.270094	3	1000	1063	11	0.0011	0.005898	7049.482	1.32934	1.62E+08	4.35E-05
	7.5	86.85157	5.961124	3	1000	1063	6	0.0006	0.005608	3332.483	1.32934	1.89E+08	1.77E-05
1.9	5.5	91.76758	5.200366	3	1000	1063	3	0.0003	0.004892	2066.792	1.32934	2.84E+08	7.28E-06
	6.5	86.14678	4.980423	3	1000	1063	38	0.0038	0.004685	22151.77	1.32934	3.23E+08	6.85E-05
	7.5	82.34944	4.215011	3	1000	1063	4	0.0004	0.003965	2020.863	1.32934	5.33E+08	3.79E-06
1.7	5.5	86.84636	4.155987	3	1000	1063	43	0.0043	0.00391	29624.01	1.32934	5.56E+08	5.33E-05
	6.5	82.74775	4.097346	3	1000	1063	92	0.0092	0.003855	53630.59	1.32934	5.81E+08	9.24E-05
	7.5	79.95428	4.332358	3	1000	1063	7	0.0007	0.004076	3536.51	1.32934	4.91E+08	7.2E-06
1.5	4.5	83.70792	3.4924	3	1000	1063	2	0.0002	0.003285	1684.052	1.32934	9.37E+08	1.8E-06
	5.5	81.42357	3.423049	3	1000	1063	159	0.0159	0.00322	109540	1.32934	9.96E+08	0.00011
	6.5	78.38862	3.180345	3	1000	1063	178	0.0178	0.002992	103763.5	1.32934	1.24E+09	8.36E-05
	7.5	76.02896	3.67106	3	1000	1063	9	0.0009	0.003453	4546.942	1.32934	8.07E+08	5.63E-06
1.3	4.5	83.15041	2.430117	3	1000	1063	44	0.0044	0.002286	37049.15	1.32934	2.78E+09	1.33E-05
	5.5	78.90832	2.391373	3	1000	1063	423	0.0423	0.00225	291417.6	1.32934	2.92E+09	9.98E-05
	6.5	76.81059	2.375232	3	1000	1063	270	0.027	0.002234	157394.1	1.32934	2.98E+09	5.28E-05
	7.5	74.79396	2.810599	3	1000	1063	6	0.0006	0.002644	3031.294	1.32934	1.8E+09	1.69E-06
1.1	4.5	79.40129	1.921149	3	1000	1063	271	0.0271	0.001807	228189.1	1.32934	5.63E+09	4.05E-05
	5.5	75.77644	1.850522	3	1000	1063	825	0.0825	0.001741	568367.7	1.32934	6.3E+09	9.02E-05
	6.5	74.29341	1.633281	3	1000	1063	342	0.0342	0.001536	199365.9	1.32934	9.17E+09	2.18E-05
	7.5	72.99053	2.070018	3	1000	1063	5	0.0005	0.001947	2526.079	1.32934	4.5E+09	5.61E-07
0.9	3.5	79.72829	1.491871	3	1000	1063	44	0.0044	0.001403	47634.63	1.32934	1.2E+10	3.96E-06
	4.5	73.97237	1.338301	3	1000	1063	649	0.0649	0.001259	546475	1.32934	1.67E+10	3.28E-05
	5.5	72.40952	1.214221	3	1000	1063	768	0.0768	0.001142	529098.7	1.32934	2.23E+10	2.37E-05
	6.5	71.91957	1.060477	3	1000	1063	235	0.0235	0.000998	136991.2	1.32934	3.35E+10	4.09E-06
	7.5	71.36645	1.411647	3	1000	1063	7	0.0007	0.001328	3536.51	1.32934	1.42E+10	2.49E-07
	8.5	70.3439	1.41235	3	1000	1063	3	0.0003	0.001329	1337.336	1.32934	1.42E+10	9.43E-08

0.7	2.5	78.0343	0.988064	3	1000	1063	9	0.0009	0.00093	13640.82	1.32934	4.14E+10	3.3E-07
	3.5	74.39413	0.812015	3	1000	1063	319	0.0319	0.000764	345351	1.32934	7.46E+10	4.63E-06
	4.5	72.65259	0.791828	3	1000	1063	730	0.073	0.000745	614679.1	1.32934	8.04E+10	7.64E-06
	5.5	71.72582	0.761192	3	1000	1063	580	0.058	0.000716	399579.7	1.32934	9.05E+10	4.41E-06
	6.5	71.33408	0.668151	3	1000	1063	120	0.012	0.000629	69952.95	1.32934	1.34E+11	5.23E-07
	7.5	70.71847	0.881155	3	1000	1063	17	0.0017	0.000829	8588.667	1.32934	5.83E+10	1.47E-07
0.5	8.5	70.26655	0.955204	3	1000	1063	5	0.0005	0.000899	2228.893	1.32934	4.58E+10	4.86E-08
	2.5	72.69895	0.801099	3	1000	1063	58	0.0058	0.000754	87907.54	1.32934	7.77E+10	1.13E-06
	3.5	71.22684	0.692275	3	1000	1063	838	0.0838	0.000651	907223.1	1.32934	1.2E+11	7.54E-06
	4.5	70.63764	0.454877	3	1000	1063	736	0.0736	0.000428	619731.3	1.32934	4.24E+11	1.46E-06
	5.5	70.36313	0.436971	3	1000	1063	398	0.0398	0.000411	274194.4	1.32934	4.79E+11	5.73E-07
	6.5	70.11538	0.408111	3	1000	1063	80	0.008	0.000384	46635.3	1.32934	5.87E+11	7.94E-08
	7.5	69.94871	0.505098	3	1000	1063	22	0.0022	0.000475	11114.75	1.32934	3.1E+11	3.59E-08
	8.5	69.61005	0.607911	3	1000	1063	26	0.0026	0.000572	11590.24	1.32934	1.78E+11	6.52E-08
0.3	9.5	68.99248	0.986857	3	1000	1063	28	0.0028	0.000928	11167.93	1.32934	4.15E+10	2.69E-07
	10.5	68.24243	1.326396	3	1000	1063	7	0.0007	0.001248	2526.079	1.32934	1.71E+10	1.48E-07
	2.5	70.52245	0.486894	3	1000	1063	27	0.0027	0.000458	40922.47	1.32934	3.46E+11	1.18E-07
	3.5	70.12395	0.349435	3	1000	1063	526	0.0526	0.000329	569450.3	1.32934	9.36E+11	6.08E-07
	4.5	69.97542	0.195549	3	1000	1063	401	0.0401	0.000184	337652.5	1.32934	5.34E+12	6.32E-08
	5.5	69.89184	0.175297	3	1000	1063	124	0.0124	0.000165	85427.39	1.32934	7.41E+12	1.15E-08
	6.5	69.77069	0.175112	3	1000	1063	18	0.0018	0.000165	10492.94	1.32934	7.44E+12	1.41E-09
	7.5	69.72039	0.210185	3	1000	1063	20	0.002	0.000198	10104.31	1.32934	4.3E+12	2.35E-09
	8.5	69.54162	0.30067	3	1000	1063	77	0.0077	0.000283	34324.95	1.32934	1.47E+12	2.34E-08
	9.5	69.01613	0.582887	3	1000	1063	60	0.006	0.000548	23931.27	1.32934	2.02E+11	1.19E-07
0.1	10.5	68.71363	0.771833	3	1000	1063	19	0.0019	0.000726	6856.499	1.32934	8.68E+10	7.89E-08
	11.5	68.03857	1.173435	3	1000	1063	2	0.0002	0.001104	658.977	1.32934	2.47E+10	2.67E-08
	12.5	67.88643	1.252426	3	1000	1063	2	0.0002	0.001178	606.2589	1.32934	2.03E+10	2.98E-08
	2.5	69.6803	0.205377	3	1000	1063	8	0.0008	0.000193	12125.18	1.32934	4.61E+12	2.63E-09
	3.5	69.67613	0.138813	3	1000	1063	118	0.0118	0.000131	127747.4	1.32934	1.49E+13	8.56E-09
	4.5	69.60712	0.06255	3	1000	1063	101	0.0101	5.88E-05	85044.65	1.32934	1.63E+14	5.21E-10
	5.5	69.59962	0.034561	3	1000	1063	12	0.0012	3.25E-05	8267.167	1.32934	9.67E+14	8.55E-12
	6.5	69.53297	0.034526	3	1000	1063	8	0.0008	3.25E-05	4663.53	1.32934	9.7E+14	4.81E-12
	7.5	69.5598	0.051109	3	1000	1063	21	0.0021	4.81E-05	10609.53	1.32934	2.99E+14	3.55E-11
	8.5	69.5102	0.08972	3	1000	1063	19	0.0019	8.44E-05	8469.793	1.32934	5.53E+13	1.53E-10
0.1	9.5	69.1835	0.349671	3	1000	1063	7	0.0007	0.000329	2791.982	1.32934	9.34E+11	2.99E-09
	10.5	69.05631	0.466136	3	1000	1063	3	0.0003	0.000439	1082.605	1.32934	3.94E+11	2.75E-09
	11.5	68.94361	0.564234	3	1000	1063	1	0.0001	0.000531	329.4885	1.32934	2.22E+11	1.48E-09
	12.5	69.12935	0.601635	3	1000	1063	1	0.0001	0.000566	303.1294	1.32934	1.83E+11	1.65E-09
TOTAL							10000						0.000957

LAMPIRAN B –Perhitungan Kelelahan

**Tabel B.2.2** Perhitungan kelelahan *side by side*

HS (Significant High) (m)	TP (Peak Period) (s)	Mean Tension (tef)	Standard Deviation Tension	M	K	MBL Chain R4	Cycle	Pi	Rsi	ni	Di	Di FSO Standalone	Di Comb
2.5	0	0	0	3	1000	1063	1	0.0001	0	0	0	1.165E-05	1.165E-05
2.3	0	0	0	3	1000	1063	6	0.0006	0	0	0	2.9814E-05	2.9814E-05
2.1	0	0	0	3	1000	1063	18	0.0018	0	0	0	6.6454E-05	6.6454E-05
1.9	6.3	72.88187623	18.50839281	3	1000	1063	45	0.0045	0.01741147	2689.18013	5.34E-05	7.9598E-05	0.00013297
1.7	5.9	68.44795829	17.60045133	3	1000	1063	142	0.0142	0.016557339	9061.16964	0.000155	0.00015284	0.00030748
1.5	5.6	60.79357984	13.2380094	3	1000	1063	348	0.0348	0.012453443	23395.8671	0.00017	0.00020104	0.00037094
1.3	5.2	57.96308195	12.73020111	3	1000	1063	743	0.0743	0.01197573	53793.9455	0.000347	0.00016762	0.00051501
1.1	4.8	55.04629903	12.69925547	3	1000	1063	1443	0.1443	0.011946619	113180.869	0.000726	0.00015303	0.00087861
0.9	4.3	50.5413489	12.67463065	3	1000	1063	1706	0.1706	0.011923453	149368.321	0.000952	6.4917E-05	0.00101694
0.7	3.8	50.21844691	12.06524988	3	1000	1063	1780	0.178	0.011350188	176353.602	0.00097	1.7734E-05	0.00098729
0.5	3.2	47.08778362	11.02019925	3	1000	1063	2193	0.2193	0.010367074	258010.026	0.001081	1.13E-05	0.0010922
0.3	2.5	45.67447275	10.51653579	3	1000	1063	1276	0.1276	0.00989326	192158.055	0.0007	1.0827E-06	0.0007007
0.1	1.4	39.80319517	8.638980402	3	1000	1063	299	0.0299	0.008126981	80406.4858	0.000162	2.0781E-08	0.0001623
<b>Total</b>							<b>10000</b>		<b>0.122005556</b>	<b>1058417.52</b>	<b>0.005315</b>	<b>0.00095709</b>	<b>0.00627236</b>

**Halaman ini sengaja dikosongkan**

## BIODATA PENULIS



Muhammad Auliya Aldi dilahirkan di Bekasi pada tanggal 30 juli 1994, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dengan menyelesaikan jenjang Pendidikan Dasar di SDN Pacarkeling 05, Surabaya pada tahun 2000-2002 dan SDN Mangun Jaya 01, Bekasi pada tahun 2002-2006. Kemudian melanjutkan pendidikan sekolah di SMPN 1 Tambun pada tahun 2006-2009, SMAN 1 Tambun pada tahun 2009-2012. Setelah lulus SMA pada tahun 2012, penulis diterima di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui program mandiri dan terdaftar dengan NRP 4312100112.

Setelah lulus ST pada tahun 2016, penulis melanjutkan jenjang pendidikan master di Program Studi Teknik Perancangan Bangunan Laut, Departemen Teknik Kelautan ITS pada tahun 2017. Selama jenjang sarjana hingga master penulis memperdalam wawasannya dalam bidang hidrodinamika bangunan laut, kelelahan dan resiko. Topik tesis yang diteliti penulis adalah tentang *fatigue* (kelelahan) dan resiko pada bangunan laut dengan objek analisis *mooring line* pada FSO Federal II. Analisis tersebut dipublikasikan dalam *International Seminar on Science and Technology 4<sup>th</sup>* (ISST 4<sup>th</sup>).

Selama menempuh masa perkuliahan S1, penulis aktif mengikuti berbagai kegiatan seperti Himpunan Mahasiswa-Teknik kelautan, OCEANO, Ocean Engineering Underwater Robotic Club, Ketua pengurus lab. Operasional Riset dan Perancangan. Penulis diberi kesempatan untuk berprestasi dalam bidang *oil rig design* dengan meraih prestasi juara 2 dalam kompetisi internasional *Oil Rig Design* di ITS-Surabaya, Indonesia dan juara 3 kompetisi internasional *Oil Rig Design* di UiTM-Syah Alam, Malaysia. Pada tahun 2015 penulis berkesempatan melaksanakan kerja praktek di perusahaan BUMN untuk klasifikasi dan inspeksi bangunan laut yaitu PT. Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) di Priok, Jakarta Utara. Dalam perjalanannya menempuh jenjang master penulis sempat bekerja sebagai *engineer* kontrak selama 1 tahun di PT. Biro Klasifikasi Indonesia. Penulis pun ikut mengembangkan ilmu dengan aktif dalam proyek-proyek dosen dan pelatihan *Software-software* yaitu *Bentley Software* dan *Orcaflex*.

Kontak Penulis :

Email : [muhammad.aldix11@gmail.com](mailto:muhammad.aldix11@gmail.com)

Telepon : 081293256960